

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

Tino Vidović

**INTEGRIRANO DIMENZIONIRANJE I
UPRAVLJANJE ENERGIJOM HIBRIDNOG
BRODSKOG ENERGETSKOG SUSTAVA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2025.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

Tino Vidović

*Integrirano dimenzioniranje i upravljanje
energijom hibridnog brodskog energetskeg sustava*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2025

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za strojarstvo i brodogradnju Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu

Mentor: Prof. dr.sc. Gojmir Radica

Rad br:

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: Brodski hibridni energetske sustavi; Integrirano dimenzioniranje i upravljanje energijom; Dvostupanjska optimizacija; Adaptivni ECMS; Simulacija životnog ciklusa; Degradacija komponenti

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Znanstvena grana: Procesno-energetsko strojarstvo

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: prof. dr.sc. Gojmir Radica

Broj stranica: 189

Broj slika: 76

Broj tablica: 26

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 173

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
2. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
3. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
2. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
3. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
4. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
5. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad

Disertacija obranjena dana: xx. mjesec 20xx.

Integrirano dimenzioniranje i upravljanje energijom hibridnog brodskog energetskeg sustava

Sažetak:

Tema ovog doktorskog rada bavi se jednim od ključnih izazova u projektiranju modernih, ekološki prihvatljivih plovila: složenom međuovisnosti između dimenzioniranja energetskih komponenti i operativne strategije upravljanja energijom. Rad polazi od premise da odvojena optimizacija ovih dvaju aspekata dovodi do suboptimalnih rješenja, te kao odgovor razvija i validira inovativnu dvostupanjsku optimizacijsku metodologiju.

Na višem, strateškom stupnju, višeciljni genetski algoritam NSGA-II istražuje širok prostor mogućih dizajna, optimizirajući dimenzije ključnih komponenti poput baterija i motora. Svaki predloženi dizajn se potom prosljeđuje na niži, operativni stupanj, gdje se provodi detaljna simulacija cjelokupnog desetogodišnjeg životnog ciklusa. Ova simulacija, vođena realističnim profilom opterećenja koji uključuje sezonske i stohastičke varijacije, koristi naprednu adaptivnu ECMS strategiju (A-ECMS) za upravljanje energijom u stvarnom vremenu. Cjelokupni proces istovremeno minimizira tri konfliktna cilja: trošak životnog ciklusa (LCC), ukupnu potrošnju goriva i kompozitni indeks degradacije komponenti.

Analiza je provedena za tri različita operativna scenarija, donoseći ključne zaključke. Dokazano je da je energetski samodostatna strategija održavanja stanja napunjenosti (CS) ekonomski neisplativa zbog gubitaka kod proizvodnje električne energije na samom brodu, koja može uključivati višestruke energetske konverzije. Nasuprot tome, strategije pražnjenja baterije (CD), koje koriste jeftiniju energiju s kopna, pokazale su se tehno-ekonomski superiornima. Posebno se ističe scenarij s mogućnošću dnevnog punjenja (CD-2), koji postiže značajno nižu potrošnju goriva, čini pomoćni motor praktički suvišnim te omogućava fleksibilniji odabir kompromisnih dizajna.

Zaključno, rad dokazuje da je razvijena integrirana metodologija moćan alat za projektante. Potvrđeno je da je detaljan, višegodišnji profil opterećenja, a ne općenita pravila, najkritičniji faktor za optimalno dimenzioniranje. Odabir makro-strategije (CS ili CD) fundamentalno mijenja prirodu i kvalitetu optimalnih rješenja, naglašavajući važnost usklađivanja dizajna sustava s operativnim kontekstom plovila.

Ključne riječi:

Brodski hibridni energetski sustavi; Integrirano dimenzioniranje i upravljanje energijom; Dvostupanjska optimizacija; Adaptivni ECMS; Simulacija životnog ciklusa; Degradacija komponenti

Integrated dimensioning and energy management of the hybrid marine energy system

Abstract:

This doctoral thesis addresses one of the key challenges in the design of modern, environmentally friendly vessels: the complex interdependence between the sizing of energy components and the operational energy management strategy. The work is based on the premise that the separate optimization of these two aspects leads to suboptimal solutions, and in response, it develops and validates an innovative bi-level optimization methodology.

At the upper, strategic level, the multi-objective genetic algorithm NSGA-II explores a vast design space, optimizing the dimensions of key components such as batteries and engines. Each proposed design is then passed to the lower, operational level, where a detailed simulation of the entire ten-year life cycle is conducted. This simulation, driven by a realistic load profile that includes seasonal and stochastic variations, uses an advanced adaptive ECMS strategy (A-ECMS) for real-time energy management. The entire process simultaneously minimizes three conflicting objectives: Life Cycle Cost (LCC), total fuel consumption, and a composite component degradation index.

The analysis was conducted for three different operational scenarios, yielding key conclusions. The energy self-sufficient Charge Sustaining (CS) strategy was proven to be economically unviable due to losses in onboard electricity generation, which can include multiple energy conversions. In contrast, Charge Depleting (CD) strategies, which utilize cheaper shore power, proved to be techno-economically superior. The scenario with the possibility of daily charging (CD-2) particularly stands out, as it achieves significantly lower fuel consumption, renders the auxiliary engine practically redundant, and allows for a more flexible selection of compromise designs.

In conclusion, the work proves that the developed integrated methodology is a powerful tool for designers. It is confirmed that a detailed, multi-year load profile, rather than general rules of thumb, is the most critical factor for optimal sizing. The choice of macro-strategy (CS or CD) fundamentally changes the nature and quality of the optimal solutions, emphasizing the importance of aligning the system design with the vessel's operational context.

Keywords:

Marine Hybrid Power Systems; Integrated Sizing and Energy Management; Bi-Level Optimization; Adaptive ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy); Life Cycle Simulation; Component Degradation

Zahvala

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1 Hipoteza	3
1.2 Opis i metodologija istraživanja	4
1.2.1 Konfiguracija razmatranog sustava	4
1.2.2 Dvostupanjska optimizacija	5
1.2.3 Profil opterećenja	8
1.3 Očekivani znanstveni doprinos	9
1.4 Struktura rada	10
2. PREGLED LITERATURE	11
2.1 Glavne komponente brodskih hibridnih sustava	12
2.2 Baterije	13
2.3 Motori s unutarnjim izgaranjem	16
2.4 Gorivni članci	17
2.5 Propulzijski elektromotori	18
2.5.1 Sinkroni motori s permanentnim magnetima	18
2.5.2 Asinkroni motori	19
2.5.3 Reluktantni motori	20
2.6 Energetska elektronika	21
2.6.1 DC/DC Pretvarači	21
2.6.2 AC/DC Pretvarači	24
2.6.3 DC/AC Pretvarači	26
2.7 Konfiguracije pogonskih i energetske brodskih sustava	29
2.7.1 Mehanička propulzija	29
2.7.2 Električna propulzija	31
2.7.3 Hibridna propulzija	32
2.7.4 Elektropropulzija s hibridnim izvorima energije	34
2.7.5 Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije	36
2.7.6 Elektropropulzija s DC hibridnim izvorom energije	36
2.8 Modeliranje komponenti hibridnih brodskih sustava	38
2.8.1 Modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima	38
2.8.2 Metode temeljene na obradi podataka	40

2.8.3	Modeliranje baterijskog sklopa.....	42
2.8.4	Modeliranje motora s unutarnjim izgaranjem.....	44
2.9	Integrirane metode dimenzioniranja i upravljanja energijom brodskih energetske sustava	46
2.9.1	Strategije upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava.....	48
2.9.2	Dimenzioniranje hibridnih brodskih sustava	56
2.10	Zaključak.....	62
3.	MODELIRANJE KOMPONENTI BRODSKOG HIBRIDNOG SUSTAVA	65
3.1	Konfiguracija sustava i tokovi snage	65
3.1.1	Validacija bilance snage	67
3.2	Model motora s unutarnjim izgaranjem.....	69
3.2.1	Specifična potrošnja goriva.....	69
3.2.2	Odabir pristupa modeliranju	71
3.2.3	Matematički opis modela.....	72
3.2.4	Proračun ukupne potrošnje goriva u životnom ciklusu.....	73
3.3	Model baterijskog sklopa.....	73
3.3.1	Model stanja napunjenosti	74
3.3.2	Model degradacije baterije.....	74
4.	STRATEGIJA UPRAVLJANJA ENERGIJOM HIBRIDNOG BRODSKOG SUSTAVA	88
4.1	Koncept faktora ekvivalencije i funkcije troška	91
4.1.1	Uloga i značenje ekvivalencijskog faktora	91
4.1.2	Fizikalna interpretacija ekvivalencijskog faktora	92
4.2	Adaptivna strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje	92
4.2.1	Adaptacija ekvivalencijskog faktora pomoću proporcionalno-integralne regulacije	92
4.2.2	Definiranje referentne putanje stanja napunjenosti baterije.....	93
4.2.3	Stabilizacija sustava pomoću histereze	95
4.2.4	Formulacija proširene funkcije troška	96
4.3	Algoritam za trenutnu optimizaciju raspodjele snage.....	99
4.3.1	Metode rješavanja optimizacijskog problema u stvarnom vremenu.....	99
4.3.2	Hibridna strategija za odabir radne točke	101
4.3.3	Usporedba računalne složenosti dviju metoda.....	102
4.3.4	Usporedba točnosti dviju metoda.....	105
4.4	Validacija upravljačke strategije pomoću dinamičkog programiranja.....	108

4.4.1	Matematička formulacija dinamičkog programiranja.....	108
4.4.2	Rezultati validacije.....	109
5.	POSTAVKE OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA.....	115
5.1	Modeliranje dnevnog operativnog ciklusa.....	115
5.2	Konstrukcija višegodišnjeg profila	118
5.2.1	Modeliranje sezonskih varijacija	118
5.2.2	Uvođenje stohastičkih elemenata.....	121
5.2.3	Integracija perioda punjenja.....	121
5.3	Koncept dvostupanjske optimizacije	122
5.3.1	Viši stupanj: Optimizacija dimenzioniranja sustava.....	122
5.3.2	Niži stupanj: Evaluacija performansi kroz simulaciju životnog ciklusa.....	124
5.3.3	Interakcija između stupnjeva optimizacije i tijek informacija	126
5.4	Genetski algoritam	126
5.4.1	Definicija jedinke i prostora dizajna	127
5.4.2	Ključni mehanizmi i genetski operatori.....	127
5.5	Funkcije cilja za evaluaciju sustava.....	128
5.5.1	Trošak životnog ciklusa	128
5.5.2	Kompozitni indeks degradacije.....	134
5.5.3	Ukupna potrošnja goriva.....	137
5.6	Zaključak.....	137
6.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA	138
6.1	Slučaj 1: Strategija pražnjenja bez dnevnog punjenja baterije	139
6.1.1	Makro analiza.....	140
6.1.2	Mikro analiza	149
6.2	Slučaj 2: Strategija pražnjenja sa dnevnim punjenjem baterije	153
6.2.1	Makro analiza.....	154
6.2.2	Mikro analiza	161
6.3	Slučaj 3: Strategija održavanja konstantnog stanja napunjenosti	165
6.3.1	Makro analiza.....	166
6.3.2	Mikro analiza	172
7.	ZAKLJUČAK	177
	LITERATURA	179

Popis slika

Slika 1.1 Odnos brzine plovila, te opterećenja i broja okretaja pogonskog motora	3
Slika 1.2: Shema razmatranog hibridnog brodskog sustava	4
Slika 1.3: Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije	7
Slika 1.4 Profil opterećenja motora na trajektu za vrijeme plovidbe na lokalnoj ruti	8
Slika 2.1 Kronologija ključnih događaja u razvoju hibridnih i električnih brodskih pogonskih sustava	12
Slika 2.2 Poprečni presjeci rotora različitih tipova električnih motora	18
Slika 2.3 Usporedba izmjerenih učinkovitosti i izlazne snage trofaznog četveropolnog PMSM-a i IM-a od 1,1 kW, mjereno pri jednakom naponu 380 V / 50 Hz	20
Slika 2.4 Koncept višerazinskog invertera.....	27
Slika 2.5 Klasični mehanički brodski pogonski sustav s generatorima za proizvodnju el. energije za pomoćne potrošače	29
Slika 2.6 Tipični raspored elektropulzijskog sustava	31
Slika 2.7 Tipični hibridni pogonski sustav	33
Slika 2.8 Wärtsilä hibridni propulzijski sustav	34
Slika 2.9 Tipičan elektropulzijski sustav s hibridnim izvorima energije	35
Slika 2.10 Tri propelerne krivulje i linija opterećenja generatora unutar tri radna područja dizela motora s konturnim prikazom specifične potrošnje	37
Slika 2.11 Strategija upravljanja temeljena na pravilima iz rada Torreglosa i sur.	51
Slika 2.12 Dijagram strategije upravljanja dobivene GWO optimizacijom	53
Slika 2.13 Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije (MOPSO za višu razinu i MAECMS za nižu razinu)	61
Slika 3.1 Shematski prikaz razmatranog hibridnog energetskeg sustava	66
Slika 3.2 Dijagram toka postupka računanja raspodjele snaga hibridnog energetskeg sustava ...	68
Slika 3.3 Prikaz specifične potrošnje goriva kod motora različitih veličina pri radu na propelernoj krivulji i na konstantnom broju okretaja	70
Slika 3.4 Dijagram toka modela degradacije baterije	77
Slika 3.5 Prikaz strukture litij ionske baterije i položaja SEI sloja	78
Slika 3.6 Prikaz ovisnosti stope kalendarskog starenja o temperaturi i SOC-u.....	79

Slika 3.7 Utjecaj pasivizacije, odnosno vremena na kalendarsko starenje	80
Slika 3.8 Utjecaj C-stope i DOD-a na stopu cikličke degradacije	82
Slika 3.9 Utjecaj temperature pri različitim DOD-ovima na stopu cikličke degradacije	83
Slika 3.10 Utjecaj EFC-a na stopu cikličke degradacije	84
Slika 3.11 Razlika između DOD-a koji se koristi kao parametar optimizacije i dinamičkog DOD-a za izračun cikličke degradacije	86
Slika 4.1 Dijagram toka predložene adaptivne ECMS strategije	90
Slika 4.2 Profil opterećenja zajedno s prikazom referentnih CS i CD putanja s različitim faktorima izravnjanja	94
Slika 4.3 Prikaz utjecaja područja nereagiranja na stvarni SOC (gore) i utjecaj PI kontrolera na vrijednost faktora ekvivalencije s (dolje)	96
Slika 4.4 Utjecaj faktora nagiba na izračun multiplikatora bazne kazne	98
Slika 4.5 Vizualna usporedba računske složenosti klasične pretrage mrežom i hibridne metode u ovisnosti o gustoći mreže (gore) i broju optimizacijskih parametara (dolje)	104
Slika 4.6 Komparativna analiza performansi hibridne strategije i pretrage mreže operativni profil kroz SOC, ukupnu potrošnju goriva i ECMS funkciju troška	107
Slika 4.7 Prikaz pada SOC-a i korištenja energije iz baterije za dvije različite strategije upravljanja energijom za prvi slučaj	110
Slika 4.8 Dijagram korištenja pomoćnog motora kod obje strategije upravljanja za prvi slučaj	111
Slika 4.9 Dijagram snage korištenja glavnog motora kod obje strategije za prvi slučaj	111
Slika 4.10 Prikaz potrošene energije iz baterije za drugi slučaj	113
Slika 4.11 Prikaz putanje SOC-a i dijagrama snage glavnog motora kod drugog slučaja	113
Slika 5.1 Primjeri modeliranih dnevnih profila opterećenja koji prikazuju različite operativne scenarije: standardni, dinamični i dugolinijski	117
Slika 5.2 Prikaz promjene sezonskog faktora intenziteta prometa i propulzijske snage	119
Slika 5.3 Sezonski faktor hotelskog opterećenja	120
Slika 5.4 Prikaz godišnje promjene povratnih putovanja	120
Slika 5.5 Dijagram toka višeg stupnja optimizacije	123
Slika 5.6 Dijagram toka nižeg stupnja optimizacije	125
Slika 5.7 Projicirano smanjenje cijena baterija i gorivnih članaka to 2030.	131
Slika 5.8 Projicirane cijene goriva i vodika prema DNV-u do 2045. god.	132

Slika 5.9 Prikaz projekcije cijene električne energije u EU	133
Slika 6.1 Prikaz odnosa količine potrošenog goriva te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 1.	141
Slika 6.2 Prikaz odnosa indeksa degradacije te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 1.	142
Slika 6.3 Prikaz odnosa indeksa degradacije te potrošnje goriva kod Pareto rezultata, slučaj 1.	142
Slika 6.4 Distribucija optimalnih rješenja za kapacitet baterije (lijevo) i glavni motor (desno), slučaj 1.	143
Slika 6.5 Distribucija optimalnih rješenja za pomoćni motor (lijevo) i C-stopu (desno), slučaj 1.	144
Slika 6.6 Distribucija optimalnih rješenja za krajnji SOC (lijevo) i širinu pojasa histereze (desno), slučaj 1.	145
Slika 6.7 Utjecaj kapaciteta baterije na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 1.	146
Slika 6.8 Utjecaj nazivne snage motora na indeks degradacije, slučaj 1.	148
Slika 6.9 Utjecaj C-stope na LCC i indeks degradacije, slučaj 1.	149
Slika 6.10 Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 1.	151
Slika 6.11 Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 1.	152
Slika 6.12 Prikaz odnosa količine potrošenog goriva te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 2.	155
Slika 6.13 Prikaz odnosa indeksa degradacije te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 2.	156
Slika 6.14 Distribucija optimalnih rješenja za glavni (lijevo) i pomoćni motor (desno), slučaj 2.	157
Slika 6.15 Utjecaj kapaciteta baterije na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 2.	158
Slika 6.16 Utjecaj kapaciteta baterije na degradaciju sustava, slučaj 2.	159
Slika 6.17 Utjecaj C-stope na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 2.	160
Slika 6.18 Utjecaj C-stope na indeks degradacije, slučaj 2.	160
Slika 6.19 Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 2.	162

Slika 6.20 Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 2.	164
Slika 6.21 Prikaz odnosa količine potrošenog goriva (lijevo) i indeksa degradacije (desno) s troškovima životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 3.	167
Slika 6.22 Prikaz odnosa količine potrošenog goriva i indeksa degradacije kod Pareto rezultata, slučaj 3.	167
Slika 6.23 Distribucija optimalnih rješenja za glavni motor, slučaj 3.	169
Slika 6.24 Utjecaj nazivne snage glavnog motora na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 3.	170
Slika 6.25 Utjecaj nazivne snage glavnog motora na indeks degradacije (lijevo) i C-stope na indeks degradacije (desno), slučaj 3.	171
Slika 6.26 Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 3.	174
Slika 6.27 Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 3.	175

Popis tablica

Tablica 2.1 Tablica najpoznatijih hibridnih i električnih brodova koji trenutno plove	13
Tablica 2.2: Karakteristike različitih materijala katoda za litij-ionske baterije koje se mogu koristiti u brodovima	14
Tablica 2.3. Prednosti i nedostaci najčešće korištenih tehnologija gorivnih članaka	17
Tablica 2.4 Komparativna analiza tehnologija električnih propulzijskih motora	21
Tablica 2.5 Usporedna tablica topologija DC/DC pretvarača za pomorske primjene	23
Tablica 2.6 Glavni proizvođači visokonaponskih ispravljača za pomorsku primjenu	25
Tablica 2.7 Usporedba DFE i AFE ispravljača za pomorske sustave	26
Tablica 2.8 Usporedna tablica višerazinskih topologija izmjenjivača (MLI)	28
Tablica 2.9 Pregled radova koji su koristili modele temeljene na fizikalnim zakonitostima	39
Tablica 2.10 Pregled radova koji su koristili metode temeljene na obradi podataka	41
Tablica 2.11 Pregled strategija upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava	55
Tablica 3.1 Set parametara za izračun normaliziranih SFC krivulja za različite vrste motora	72
Tablica 3.2 Detalji o komercijalnim litij-ionskim baterijskim ćelijama velikog kapaciteta	75
Tablica 3.3 Parametri kalendarskog starenja	87
Tablica 3.4 Parametri cikličkog starenja	87
Tablica 4.1 Numerička evaluacija na kraju simulacijskog ciklusa za prvi slučaj	112
Tablica 4.2 Numerička evaluacija na kraju simulacijskog ciklusa za drugi slučaj	112
Tablica 5.1 Prikaz svih parametara korištenih u LCC modelu	133
Tablica 5.2 Prikaz svih parametara korištenih u modelu indeksa degradacije	135
Tablica 6.1 Granice za pojedine parametre dizajna za CS slučaj	139
Tablica 6.2 Granice za pojedine parametre dizajna za CD slučajeve	139
Tablica 6.3 Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 1.	143
Tablica 6.4 Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 1. ...	150
Tablica 6.5 Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 2.	156
Tablica 6.6 Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 2. ...	161
Tablica 6.7 Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 3.	168
Tablica 6.8 Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 3. ...	172

Popis kratica

AC	Izmjenična struja (engl. <i>Alternating Current</i>)
ACOA	Optimizacija mravlje kolonije (engl. <i>Ant Colony Optimization Algorithm</i>)
A-ECMS	Adaptivna strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (engl. <i>Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>)
AFC	Alkalni gorivni članak (engl. <i>Alkaline Fuel Cell</i>)
ANN	Umjetna neuronska mreža (engl. <i>Artificial Neural Network</i>)
ASF	Funkcija skaliranja postignuća (engl. <i>Achievement Scalarization Function</i>)
BESS	Sustav za pohranu energije u baterijama (engl. <i>Battery Energy Storage System</i>)
CAPEX	Investicijski troškovi (engl. <i>Capital Expenditures</i>)
CBI	Indeks troškova i koristi (engl. <i>Cost Benefit Index</i>)
CD	Način rada s planiranim pražnjenjem baterije (engl. <i>Charge Depleting</i>)
CO	Ugljični monoksid (engl. <i>Carbon Monoxide</i>)
CO₂	Ugljični dioksid (engl. <i>Carbon Dioxide</i>)
CPP	Propeler s upravljivim korakom (engl. <i>Controllable Pitch Propeller</i>)
CS	Način rada s održavanjem stanja napunjenosti baterije (engl. <i>Charge Sustaining</i>)
DC	Istosmjerna struja (engl. <i>Direct Current</i>)
DCIR	Unutarnji istosmjerni otpor (engl. <i>Direct Current Internal Resistance</i>)
DEA	Algoritam diferencijalne evolucije (engl. <i>Differential Evolution Algorithm</i>)
DOD	Dubina pražnjenja (eng. <i>Depth of Discharge</i>)
DP	Dinamičko programiranje (eng. <i>Dynamic Programming</i>)
DPA	Algoritam dinamičkog programiranja (engl. <i>Dynamic Programming Algorithm</i>)
ECMS	Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (engl. <i>Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>)
EEA	Europska agencija za okoliš (engl. <i>European Environment Agency</i>)
EEDI	Indeks energetske učinkovitosti (engl. <i>Energy Efficiency Design Index</i>)
EFC	Ekvivalentni puni ciklus (eng. <i>Equivalent Full Cycle</i>)
EGR	Recirkulacija ispušnih plinova (engl. <i>Exhaust Gas Recirculation</i>)
EMS	Sustav upravljanja energijom (engl. <i>Energy Management System</i>)
EOL	Kraj životnog vijeka (engl. <i>End of Life</i>)
ESS	Sustav za pohranu energije (engl. <i>Energy Storage System</i>)
FPP	Propeler s fiksnim korakom (engl. <i>Fixed Pitch Propeller</i>)
FWE	Emulzija goriva i vode (engl. <i>Fuel Water Emulsion</i>)
GA	Genetski algoritam (engl. <i>Genetic Algorithm</i>)
GHG	Staklenički plinovi (engl. <i>Greenhouse Gases</i>)

GO	Globalna optimizacija (engl. <i>Global Optimization</i>)
GPS	Globalni sustav pozicioniranja (engl. <i>Global Positioning System</i>)
GWO	Optimizator sivog vuka (engl. <i>Grey Wolf Optimizer</i>)
HEV	Hibridno električno vozilo (engl. <i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
HFO	Teško loživo ulje (engl. <i>Heavy Fuel Oil</i>)
ICE	Motor s unutarnjim izgaranjem (eng. <i>Internal Combustion Engine</i>)
IDEG	Kompozitni indeks degradacije (eng. <i>Degradation Index</i>)
IMO	Međunarodna pomorska organizacija (engl. <i>International Maritime Organization</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. <i>International Organization for Standardization</i>)
LCC	Trošak životnog ciklusa (eng. <i>Life Cycle Cost</i>)
LCO	Litij-kobalt oksidna baterija (engl. <i>Lithium Cobalt Oxide Battery</i>)
LFP	Litij-željezo fosfatna baterija (engl. <i>Lithium Iron Phosphate Battery</i>)
LMO	Litij-mangan oksidna baterija (engl. <i>Lithium Manganese Oxide Battery</i>)
LNG	Ukapljeni prirodni plin (engl. <i>Liquefied Natural Gas</i>)
LPG	Ukapljeni naftni plin (engl. <i>Liquefied Petroleum Gas</i>)
MARPOL	Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova (engl. <i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>)
MCFC	Gorivni članak s rastaljenim karbonatom (engl. <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>)
MCR	Maksimalna trajna snaga (eng. <i>Maximum Continuous Rating</i>)
MOPSO	Višeciljna optimizacija rojem čestica (engl. <i>Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>)
MPC	Kontrola pomoću prediktivnog modela (engl. <i>Model Predictive Control</i>)
NCA	Litij-nikal-kobalt-aluminij oksidna baterija (engl. <i>Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide Battery</i>)
NMC	Litij-nikal-mangan-kobalt oksidna baterija (engl. <i>Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery</i>)
NO_x	Dušikovi oksidi (engl. <i>Nitrogen Oxides</i>)
NPC	Neto sadašnja vrijednost (engl. <i>Net Present Cost</i>)
NSGA	Nerangirani sortirajući genetski algoritam (engl. <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>)
OPEX	Operativni troškovi (engl. <i>Operational Expenditures</i>)
PAFC	Gorivni članak s fosfornom kiselinom (engl. <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>)
PBI	Polibenzimidazol (engl. <i>Polybenzimidazole</i>)
PEMFC	Gorivni članak s protonski provodljivom membranom (engl. <i>Proton-Exchange Membrane Fuel Cell</i>)
PHEV	Plug-in hibridno električno vozilo (engl. <i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>)

PI	Proporcionalno-integralni (engl. <i>Proportional-Integral</i>)
PID	Proporcionalno-integralno-derivativni (engl. <i>Proportional-Integral-Derivative</i>)
PM	Čestice (engl. <i>Particulate Matter</i>)
PM	Polinomijalna mutacija (eng. <i>Polynomial Mutation</i>)
PMP	Pontryaginov princip minimuma (engl. <i>Pontryagin's Minimum Principle</i>)
PSO	Optimizacija rojem čestica (engl. <i>Particle Swarm Optimization</i>)
PTI	Režim u kojem elektromotor pomaže glavnom motoru (eng. <i>Power Take-In</i>)
PTO	Režim u kojem osovinski generator preuzima snagu od glavnog motora (eng. <i>Power Take-Off</i>)
PV	Fotonaponski (engl. <i>Photovoltaic</i>)
RTO	Optimizacija u stvarnom vremenu (engl. <i>Real-Time Optimization</i>)
SA	Optimizacija simuliranim žarenjem (eng. <i>Simulated Annealing</i>)
SBX	Simulirano binarno križanje (engl. <i>Simulated Binary Crossover</i>)
SCR	Selektivna katalitička redukcija (engl. <i>Selective Catalytic Reduction</i>)
SEEMP	Plan upravljanja energetsom učinkovitošću broda (engl. <i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i>)
SEI	Međufaza čvrstog elektrolita (eng. <i>Solid Electrolyte Interphase</i>)
SFC	Specifična potrošnja goriva (eng. <i>Specific Fuel Consumption</i>)
SOC	Stanje napunjenosti baterije (engl. <i>State of Charge</i>)
SOFC	Gorivni članak s krutim oksidom (engl. <i>Solid Oxide Fuel Cell</i>)
SOH	Stanje ispravnosti baterije (eng. <i>State of Health</i>)
SOH_EOL	Granična vrijednost stanja ispravnosti za kraj životnog vijeka (eng. <i>State of Health End-of-Life</i>)
SO_x	Sumporni oksidi (engl. <i>Sulfur Oxides</i>)
WHR	Povrat otpadne topline (engl. <i>Waste Heat Recovery</i>)

Popis oznaka

Oznaka	Opis
a, b, c	Empirijski koeficijenti za model specifične potrošnje
A_1, f_1	Amplituda i frekvencija niskofrekventne oscilacije snage
A_2, f_2	Amplituda i frekvencija visokofrekventne oscilacije snage
C_{base}	Bazna kazna za nisko stanje napunjenosti baterije
$c_{batt,y}, c_{gorivo,y}, \dots$	Dinamičke (godišnje) jedinične cijene
C_{CAPEX}	Ukupni investicijski troškovi
$c_{ice}, c_{gen}, \dots$	Jedinične cijene komponenti
$C_{ice}, C_{gen}, \dots$	Investicijski troškovi pojedinih komponenti
C_{nom}	Nominalni kapacitet baterije
$C_{OPEX, diskontirani}$	Ukupni diskontirani operativni troškovi
$C_{OPEX,y}$	Ukupni operativni trošak za godinu y
$c_{odr\check{z}, batt}$	Specifični trošak održavanja baterije po snazi
$C_{odr\check{z}, y}$	Trošak održavanja za godinu y
C_{rate}	C-stopa (brzina punjenja/praznjenja)
C_{rate}	Osnovni C-faktor punjenja/praznjenja baterije
$C_{soc}(t)$	Penalizacija (kazna) za prenisko stanje napunjenosti baterije
$C_{start}(t)$	Penalizacija (kazna) za pokretanje motora/generatora
$C_{zamj,y}$	Trošak zamjene baterije u godini y
d	Redni dan u godini
$d_{A,B}$	Euklidska udaljenost između dva rješenja A i B
d_{min}	Minimalni prag Euklidske udaljenosti za odabir kandidata
$D_{batt}, D_{ice}, D_{gen}$	Pod-indeksi degradacije za bateriju, motor i generator
dq/dt	Ukupna trenutačna stopa gubitka kapaciteta
$dq_{Loss, Cal}/dt$	Stopa kalendarskog starenja
$dq_{Loss, Cyc}/dt$	Stopa cikličkog starenja
D_{soc}	Deficit energije u bateriji
$e(t)$	Greška između stvarne i referentne vrijednosti stanja napunjenosti baterije
E_{batt}	Nominalni energetska kapacitet baterije
E_{BESS}	Energija pohranjena u baterijskom sklopu
EFC	Ekvivalentni puni ciklusi
E_{nom}	Nominalni energetska kapacitet baterije

Oznaka	Opis
f_{inst}	Faktor troška instalacije
$f_{odr\acute{z},ice/gen}$	Godišnji faktor troška održavanja motora
F_{hys}	Faktor histereze
F_{kwh}	Faktor konverzije iz kWh u ekvivalentne grame goriva
F_n	Normalizacijski faktor za izračun specifične potrošnje goriva
F_s	Faktor nagiba za eksponencijalnu kaznu prilikom niske napunjenosti baterije
$H_{ECMS}(t)$	Trenutna funkcija troška
$H_{rad,ice}, H_{rad,gen}$	Radni sati motora i generatora
I	Struja
$IDEG$	Kompozitni indeks degradacije
I_{SA}	Broj iteracija za jednu instancu simuliranog žarenja
J	Ukupni trošak tijekom zadanog vremenskog horizonta
$J_N(x_N)$	Terminalni trošak na kraju horizonta
k	Indeks za trenutni vremenski korak
k	Broj odabranih kandidata za lokalnu optimizaciju
K_{cal}	Koeficijent brzine kalendarskog starenja
K_{cyc}	Koeficijent cikličkog naprezanja
K_i	Integralni faktor proporcionalno-integralnog regulatora
K_p	Proporcionalni faktor proporcionalno-integralnog regulatora
LCC	Ukupni trošak životnog ciklusa
L_k	Funkcija trenutnog troška u koraku k
$load$	Relativno opterećenje motora
m_f	Maseni protok goriva
$m_{fuel}(t)$	Stvarna, trenutna masena potrošnja goriva
$M_{f,total}$	Ukupna masa goriva potrošena u životnom ciklusu
$m_{norm}, m_{akt},$ m_{min}, m_{max}	Varijable za normalizaciju metrika
N	Ukupan broj vremenskih koraka u simulaciji
N	Ukupan broj koraka u vremenskom horizontu
N_{ciklus}	Broj ekvivalentnih ciklusa baterije
$N_{putovanja}(d)$	Broj dnevnih putovanja za dan d
$N_{start,ice},$ $N_{start,gen}$	Broj pokretanja motora i generatora
N_{zamj}	Broj zamjena baterije

Oznaka	Opis
$p_1 \dots p_{10}$	Empirijski parametri modela degradacije
P_B	Snaga motora na radilici
P_{batt}	Izlazna (+) ili ulazna (-) snaga baterije
P_{bazna}	Srednja (bazna) vrijednost snage pri manevriranju
P_{bool}	Vjerojatnost prihvatanja lošijeg rješenja u simuliranom žarenju
$P_{eng \rightarrow prop}$	Snaga koju glavni motor direktno isporučuje propeleru
P_{eng}, P_{gen}	Snaga glavnog motora i dizel-generatora
$P_{eng, total}$	Ukupna snaga glavnog motora (ICE)
P_{genset}	Snaga pomoćnog dizel-generatora
P_{hotel}	Snaga brodskih trošila
P_{ice}	Maksimalna snaga glavnog porivnog motora
P_{kW}	Trenutna snaga motora
$P_{man}(t)$	Ukupna potražnja za snagom tijekom manevriranja
$P_{max, kW}$	Maksimalna snaga motora
P_{gen}	Maksimalna snaga pomoćnog generatora
$P_{PTI, elek}$	Električna snaga koju troši elektromotor u PTI modu
$P_{PTI, mech}$	Mehanička snaga koju isporučuje elektromotor u PTI modu
$P_{PTO, elek}$	Električna snaga generirana u PTO modu
$P_{prop, demand}$	Trenutni zahtjev za propulzijskom snagom
$P_{propulzije}(d)$	Propulzijska snaga za dan d
$P_{slučajno}$	Slučajna (stohastička) komponenta varijacije snage
q_k	Relativni kapacitet baterije u koraku k
$q_{Loss, Cal}$	Gubitak kapaciteta zbog kalendarskog starenja
$q_{Loss, Cyc}$	Gubitak kapaciteta zbog cikličkog starenja
Q_{nom}	Nominalni kapacitet ćelije
r	Godišnja diskontna stopa
s	Ekvivalencijski faktor
s_0	Polazišna (bazna) vrijednost ekvivalencijskog faktora
SFC	Specifična potrošnja goriva
$SFC_{ICE, avg}$	Prosječna specifična potrošnja goriva motora
SFC_{norm}	Normalizirana specifična potrošnja goriva
SFC_{real}	Stvarna specifična potrošnja goriva
$S_{hotel}(d)$	Sezonski faktor za osnovno električno opterećenje za dan d
SOC	Stanje napunjenosti baterije

Oznaka	Opis
$SOC_{actual}(t)$	Stvarna vrijednost napunjenosti baterije u trenutku t
SOC_{cs}	Ciljana razina napunjenosti baterije u CS strategiji
SOC_{end}	Ciljana konačna razina napunjenosti baterije u CD strategiji
SOC_{prag}	Sigurnosni prag za napunjenost baterije
$SOC_{ref}(t)$	Referentna (željena) vrijednost napunjenosti baterije u trenutku t
SOC_{target}	Ciljana vrijednost napunjenosti baterije na kraju horizonta
$S_{promet}(d)$	Sezonski faktor intenziteta prometa i propulzijske snage za dan d
t	Vrijeme
T	Apsolutna temperatura
T	“Temperatura” u algoritmu simuliranog žarenja
$t_{operativni}$	Ukupno trajanje dnevnih operacija
$t_{punjenja}$	Raspoloživi vremenski okvir za punjenje baterije
u_k	Upravljačka varijabla u koraku k (npr. $P_{eng,k}, P_{gen,k}$)
U_a	Potencijal anode
$W_{batt}, W_{ice}, W_{gen}$	Glavni ponderi za relativnu važnost komponenti
$w_{zamj}, w_{SOH}, \dots$	Ponderi za pojedine metrike unutar komponente
x_k	Varijabla stanja u koraku k
X_{CS}, X_{CD}	Vektori odluke (kromosomi) za CS i CD strategije
y	Indeks godine u životnom ciklusu
Y	Životni vijek sustava

Grčki alfabet

Oznaka	Opis
ΔC	Promjena u funkciji troška
$\Delta SOH_{krajnji}$	Gubitak kapaciteta posljednje baterije
Δt	Vremenski korak simulacije
η	Faktor relativne učinkovitosti
η_{avg}	Prosječna učinkovitost puta pretvorbe energije
η_{batt}	Učinkovitost punjenja ili pražnjenja baterije
$\eta_{batt \rightarrow prop}$	Učinkovitost energetskog toka baterije
η_{EM}	Učinkovitost električnog motora
$\eta_{ICE \rightarrow prop}$	Učinkovitost energetskog toka motora s unutarnjim izgaranjem
η_{praz}	Prosječna učinkovitost pražnjenja baterije
η_{pun}	Prosječna učinkovitost punjenja baterije
η_{SG}	Učinkovitost osovinskog generatora
λ_{ramp}	Težinski faktor kazne za promjenu snage motora
λ_{SOC}	Težinski faktor kazne za odstupanje konačnog stanja napunjenosti baterije
$\sum P_{opterećenja,elek}$	Ukupna električna opterećenja
$\sum P_{proizvodnja,elek}$	Ukupna električna proizvodnja

1. UVOD

Pomorski sektor ima ključnu ulogu u globalnoj trgovini, omogućujući prijevoz približno 80 % do 90 % dobara. Iako je pomorski prijevoz energetski učinkovitiji od cestovnog i zračnog prijevoza, njegova široka primjena uzrokuje značajne ekološke posljedice na globalnoj razini. Prema podacima Međunarodne pomorske organizacije (engl. *International Maritime Organization*, IMO), brodovi godišnje troše približno 300 milijuna tona fosilnih goriva, pri čemu teško loživno ulje (engl. *Heavy Fuel Oil*, HFO) predstavlja 72 %, a brodsko dizelsko gorivo 26 % ukupne potrošnje [1]. Oslanjanje na ova goriva dovodi do značajnih emisija stakleničkih plinova (engl. *Greenhouse gases*, GHG) i drugih zagađivača, poput dušikovih i sumpornih oksida (NO_x i SO_x), što pridonosi globalnom zatopljenju i zagađenju zraka.

Četvrta IMO studija o stakleničkim plinovima [2] otkriva da emisije iz pomorskog sektora dosežu 1.076 milijuna tona godišnje, pokazujući trend značajnog porasta u odnosu na prethodne godine. Dodatno, podaci Europske agencije za okoliš (engl. *European Environment Agency*, EEA) pokazuju da pomorski prijevoz značajno doprinosi ukupnim emisijama NO_x (20,98 %), SO_x (11,80 %) i čestica PM₁₀ (4,63 %) [3]. Kako bi se odgovorilo na ove probleme, IMO je uveo regulatorne okvire poput Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (engl. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*, MARPOL), Indeksa projektiranja energetske učinkovitosti (engl. *The Energy Efficiency Design Index*, EEDI), Plana upravljanja energetskom učinkovitosti broda (engl. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP) i drugih, s ciljem smanjenja emisija i poticanja dekarbonizacije. Ove regulative imaju za cilj povećati energetske učinkovitost i odrediti načine smanjenja emisija nudeći strukturirani put prema održivijoj pomorskoj industriji. Osim regulatornih pritisaka, rastuća svijest o važnosti održivog razvoja dodatno potiče pomorsku industriju na istraživanje inovativnih i prilagodljivih tehnoloških rješenja.

Budući da suvremeni brodovi značajno variraju u svojim dimenzijama, namjeni i zahtjevima za energijom, to dodatno otežava optimizaciju energetskih sustava za specifične uvjete u fazi projektiranja. Do 1990-ih, u većini slučajeva jedina konfiguracija brodskog energetskog sustava koja se koristila u brodovima bila je mehanička propulzija gdje je glavni motor bio izravno mehanički spojen s brodskim vijkom u kombinaciji s pomoćnim motorima koji su napajali sve pomoćne sisteme. Prva značajna promjena uvedena je električnom propulzijom, koja je omogućila prilagodbu raznolikim operativnim profilima, posebno za brodove poput kruzera, jahti i trajekata. Iako je električna propulzija učinkovitija pri niskim brzinama plovila, uvođenje električnih komponenti, poput generatora, transformatora i električnih motora, rezultira dodatnim gubicima od 5 % do 15 %. Kako bi se postigla ravnoteža između učinkovitosti i prilagodljivosti operativnim profilima, u posljednjim desetljećima razvijen je širok spektar konfiguracija brodskih energetskih sustava, koje se mogu klasificirati prema sljedećim kriterijima:

1. Vrsta propulzije:

- Mehanička propulzija
- Električna propulzija
- Hibridni sustavi koji kombiniraju mehaničku i električnu propulziju

2. Proizvodnja energije:

- Motori s unutarnjim izgaranjem,
- Gorivni članci
- Alternativni izvori energije poput solara, jedara ili Flettnerovih rotora
- Hibridni sustavi koji kombiniraju više izvora i skladišta energije

3. Skladištenje energije

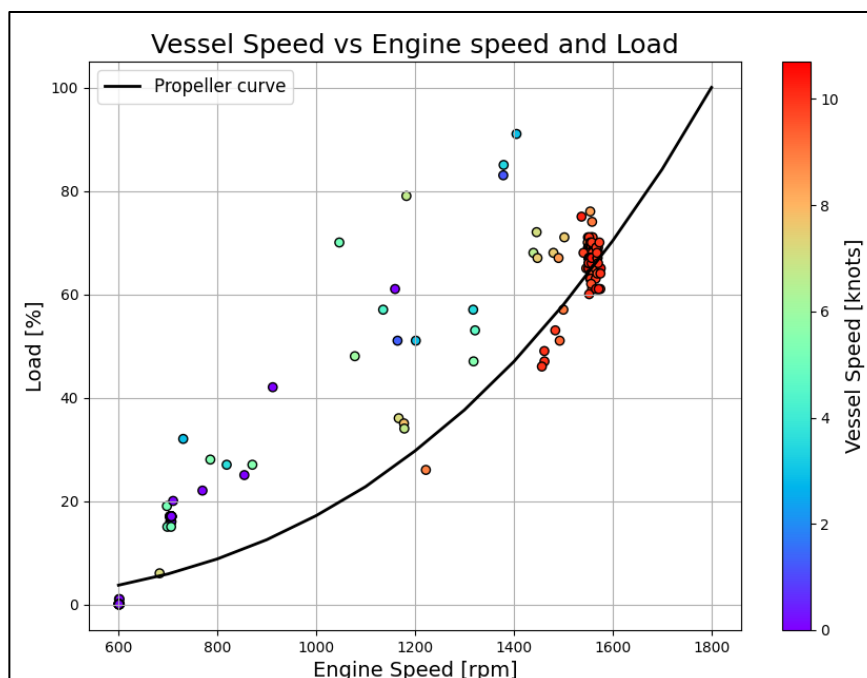
- Elektrokemijske baterije, superkondenzatori i mehaničke baterije,
- Hibridni sustavi koji kombiniraju više izvora i skladišta energije

4. Električna distribucija na brodu:

- AC (izmjenična struja),
- DC (istosmjerna struja).

Stoga nije iznenađenje da jedno od sve značajnijih rješenja u pomorskom sektoru je primjena hibridnih propulzijskih sustava. Svi sustavi kombiniraju različite izvore energije, poput dizelskih motora, baterija i gorivnih članaka, kako bi smanjili emisije, potrošnju goriva i operativne troškove. Integracijom ovih tehnologija, hibridni sustavi koriste prednosti pojedinačnih komponenti za povećanje ukupne učinkovitosti. Fleksibilnost inherentna ovim sustavima omogućuje operaterima prilagodbu potrošnje energije specifičnim operativnim zahtjevima, postižući ekonomičnost i ekološke prednosti. Empirijska istraživanja pokazala su da hibridni dizel-električni sustavi mogu omogućiti uštede goriva od 6.9 % do 8.8 % [4], dok sustavi koji koriste gorivne članke mogu povećati ukupnu energetska učinkovitost za više od 22 % [5]. Štoviše, hibridni propulzijski sustavi značajno smanjuju emisije CO₂, NO_x i SO_x te omogućuju tiši rad brodova, dodatno minimizirajući njihov utjecaj na okoliš [6].

U sklopu HRZZ projekta Povećanje učinkovitosti, smanjenje štetnih emisija i hibridizacija broskog energetskog sustava (MOPTIHYB) odrađena su mjerenja na glavnim propulzijskim motorima na trajektima koji plove lokalnim linijama. Iz analize rada motora moglo se primijetiti da motori većinu svog vremena rade blizu svog opterećenja određenog propelerom krivuljom, no unutar faze manevriranja, opterećenje motora dosta varira od propelerne krivulje te iz toga se može zaključiti da motor najviše zagađuje i radi u najneučinkovitijem području unutar luke, gdje bi ti zahtjevi trebali biti itekako zadovoljeni. To se jasno može vidjeti na slici 1.1, gdje su prikazane radne točke opterećenja u ovisnosti o broju okretaja s time da je također za svaku radnu točku definirana i brzina trajekta. Jasno se može vidjeti iz slike da najveća odstupanja od propelerne krivulje se upravo događaju na malim do srednjim brzinama, a takvi uvjeti se isključivo događaju u fazi manevriranja. Ovo je bila još jedna motivacija za detaljnije istraživanje hibridnog sustava jer bi on upravo mogao zadovoljiti i ekološke i zahtjeve performansi u gore opisanim slučajevima. Unatoč svim prednostima, implementacija hibridnih sustava donosi i značajne izazove. Kako složenost hibridne konfiguracije broskog energetskog sustava raste, povećava se i stupanj slobode u upravljanju. Trenutno, najnaprednije konfiguracije još uvijek koriste tradicionalne strategije upravljanja poput fiksnih kombinatornih krivulja, generatora s fiksnom frekvencijom te strategije upravljanja energijom temeljene na pravilima. Istraživanja u pomorskom i automobilskom sektoru pokazala su da napredne konfiguracije s tradicionalnim strategijama upravljanja ne smanjuju



Slika 1.1: Odnos brzine plovila, te opterećenja i broja okretaja pogonskog motora

značajno potrošnju goriva ili emisije, dok troškovi i složenost sustava rastu [7]. U usporedbi sa automobilskim hibridnim sustavima, brodski hibridni sustavi, a posebice strategije upravljanja, su još u ranoj fazi, a ključne su za optimizaciju njihovih performansi. Nepredvidljivost pomorskog okoliša, u kombinaciji s potrebom za ispunjenjem raznolikih kriterija performansi, zahtijeva razvoj naprednijih i prilagodljivih sustava upravljanja.

Osim strategije upravljanja, jedan od najvažnijih problema je pravilno dimenzioniranje najbitnijih komponenti sustava, poput baterija, gorivnih članaka ili motora s unutrašnjim izgaranjem, koje mora uzeti u obzir operativne uvjete, sigurnosna ograničenja i financijske aspekte. Točno dimenzioniranje ključno je kako bi se izbjegle neučinkovitosti i prekoračenja troškova; primjerice, premale baterije mogu uzrokovati povećane troškove održavanja, smanjenu učinkovitost i trajnost, dok prevelike baterije povećavaju trajnost, ali i izdatke, bez proporcionalnih koristi.

Na temelju pregledane literature može se zaključiti da postoji nedostatak istraživanja koja istovremeno obuhvaćaju dimenzioniranje komponenti sustava i implementaciju napredne strategije upravljanja temeljene na optimizaciji u stvarnom vremenu. Dinamična i prilagodljiva strategija upravljanja esencijalna je za postizanje optimalnih performansi sustava u različitim operativnim scenarijima. Ovo će istraživanje biti usmjereno na razvoj rješenja koje integrira te aspekte, omogućujući učinkovitu primjenu hibridnih sustava uz istodobno uzimanje u obzir ekoloških, sigurnosnih i ekonomskih kriterija.

1.1 Hipoteza

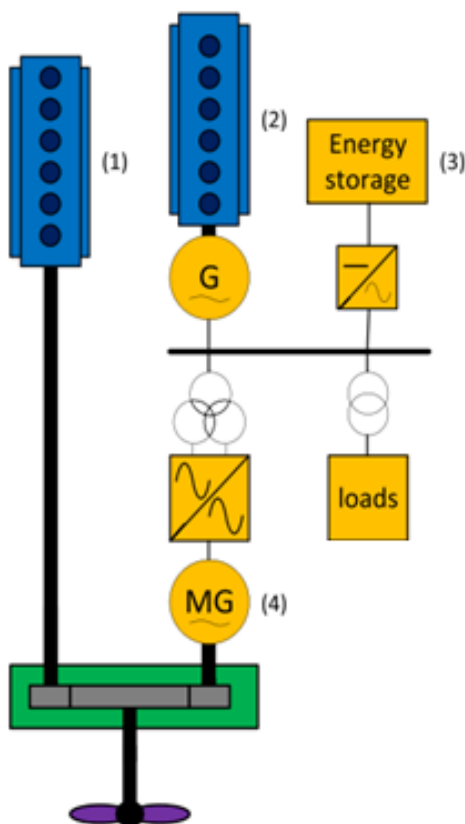
Dvostupanjskom optimizacijom moguće je precizno dimenzionirati sastavne komponente broskog hibridnog sustava i optimizirati strategiju upravljanja energijom unutar tog sustava. Prvi cilj optimizacije jest zadovoljavanje tehničkih zahtjeva energetske učinkovitosti, prilagodba zahtjevima razmatranog profila opterećenja i smanjenje utjecaja degradacije komponenata na

radne karakteristike sustava. Drugi cilj optimizacije teži smanjenju kapitalnih, operativnih troškova te troškova održavanja

1.2 Opis i metodologija istraživanja

1.2.1 Konfiguracija razmatranog sustava

Razmatrani hibridni brodski sustav sastoji se od komponenata prikazanim na slici 1.2: glavni motor kroz izravan mehanički pogon (1) osigurava propulziju uz visoku učinkovitost kad motor s unutarnjim izgaranjem radi pri nazivnom opterećenju. Nadalje, električni motor (4), koji je povezan s istim vratilom preko reduktora ili izravno na vratilo koje pokreće propeler, osigurava propulziju pri niskim okretajima, čime se izbjegava neučinkovito korištenje glavnog motora u djelomičnom opterećenju. Osim toga, glavni motor također može u kombinaciji s električnim motorom biti u funkciji dizel generatora te na taj način u potpunosti zamijeniti pomoćne dizel generatore (2). Uz pomoćne dizel generatore, potrebe za električnom energijom mogu se zadovoljiti iz litij-ionske baterije (3).



Slika 1.2: Shema razmatranog hibridnog brodskog sustava [7]

Baterijski sustav za pohranu energije ima nekoliko potencijalnih funkcija:

- Osigurava potrebnu električnu energiju te omogućuje gašenje jednog ili više dizel-generatora koji bi pri djelomičnom opterećenju radili neučinkovito. Baterija se može ponovno puniti dok motor radi u radnoj točki s nižom specifičnom potrošnjom goriva. Time se postiže ušteda goriva, smanjenje emisija, smanjenje razine buke, povećanje udobnosti te omogućavanje privremene plovidbe bez emisija, buke i vibracija motora.

- Omogućuje stabilno i kontinuirano opterećenje motora s unutarnjim izgaranjem apsorbirajući fluktuacije snage.
- Kompenzira vršna opterećenja pružanjem dodatne energije tijekom razdoblja povećane potražnje, dok se puni tijekom razdoblja smanjene energetske potrebe.
- Omogućuje punjenje iz vanjske električne mreže u luci, čime se dodatno smanjuju potrošnja goriva i emisije.
- Osigurava rezervno napajanje u slučaju kvara dizel-generatora ili glavnog motora, čime se povećava pouzdanost i redundancija energetskog sustava i pogona.

Ova konfiguracija odabrana je zbog svoje fleksibilnosti u korištenju različitih izvora i tokova energije, a već je korištena u industriji u realnim uvjetima čime se dokazuje njezina praktičnost i izvedivost.

1.2.2 Dvostupanjska optimizacija

Prethodna istraživanja o poboljšanju performansi brodskih hibridnih pogonskih sustava mogu se uglavnom klasificirati u dvije kategorije. Prva kategorija koristi optimizacijske algoritme za određivanje nazivnih kapaciteta komponenata (npr. kapacitet baterije ili nazivna snaga dizel motora) koji zadovoljavaju jedan ili više ciljeva (npr. minimalna potrošnja goriva, emisije stakleničkih plinova i troškovi sustava), ali zanemaruje strategije upravljanja energijom.

Druga kategorija koristi optimalne ili gotovo optimalne strategije za upravljanje energijom tijekom rada kako bi se postigla minimalna potrošnja goriva, no za sustave s unaprijed definiranom veličinom komponenata. Problem je što, unaprijed dimenzionirane komponente nisu nužno optimalne. Osim toga, kada se dimenzije sustava promijene, mijenjaju se i ograničenja upravljanja energijom, što dovodi do toga da se i strategija upravljanja energijom mora prilagoditi.

Kako bi se odgovorilo na ove izazove, dvostupanjska optimizacija se nameće kao rješenje te će biti metoda koja će se koristiti u ovom istraživanju. Ova metoda istovremeno rješava dva ključna problema, dimenzioniranje komponenti sustava i upravljanje energijom, čime se izbjegava degradacija performansi uzrokovana neovisnim optimizacijama i osigurava usklađenost s ekološkim standardima i zahtjevima performansi.

Dvostupanjska optimizacija pokazala je već prednosti u odnosu na standardne jednostupanjske optimizacije u planiranju i razvoju otočnih električnih mikromreža [8], samostalnih hibridnih energetskih sustava [9] i hibridnih električnih cestovnih vozila [10, 11]. Svakako najveća mana ovakvog pristupa je njegova složenost, te balans između učinkovitosti dobivanja optimalnog rješenja i računalnog opterećenja značajniji u ovom pristupu nego kod standardnih metoda. Pravilan odabir algoritama višeg (dimenzioniranje komponenti) i nižeg stupnja (strategija upravljanja) je ključan.

U višem stupnju, u slučaju korištenja višeciljne optimizacije, postoji nekoliko pristupa za određivanje krajnje funkcije cilja. U ovom istraživanju, za optimizaciju je korištena višeciljna optimizacija. Umjesto objedinjenja više ciljeva u jedan s težinskim faktorima, što može dovesti do loših performansi ako se ne odaberu ispravno, primijenjen je Pareto-baziran pristup. Konkretno, za rješavanje problema optimizacije odabran je nedominirani sortirajući genetski algoritam II (NSGA-II), koji je prepoznat kao učinkovit alat za istovremeno optimiziranje više proturječnih ciljeva. Korištenjem ovog algoritma u višem stupnju omogućeno je pronalaženje skupa Pareto optimalnih rješenja, odnosno onih rješenja kod kojih se niti jedan cilj ne može poboljšati bez pogoršanja barem jednog drugog.

Za strategiju upravljanja energijom u ovom je istraživanju implementiran adaptivna strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (engl. *Equivalent consumption minimisation strategy*, ECMS), što predstavlja pristup optimizacije u realnom vremenu. Ključna prednost ove metode je

njezina dinamička prilagodljivost, što je posebno važno za osiguravanje optimalne energetske učinkovitosti u promjenjivim uvjetima. Umjesto da koristi fiksni ekvivalentni faktor, adaptivni ECMS automatski ga podešava prema trenutnom stanju napunjenosti baterije (SOC). Ova značajka omogućuje precizno balansiranje između potrošnje goriva iz dizelskih motora i korištenja energije iz baterija, osiguravajući najbolje moguće performanse. Zbog svoje fleksibilnosti i sposobnosti brzog reagiranja na promjene, ovaj pristup je idealno rješenje za specifično područje djelovanja, osiguravajući optimalne rezultate uz zadržavanje jednostavnosti i učinkovitosti. Detaljnije objašnjenje principa rada i implementacije ECMS pristupa bit će prikazano u sljedećim poglavljima, gdje će se detaljno objasniti kako se ova metoda prilagođava različitim operativnim scenarijima.

U ovom istraživanju analizirana su tri različita scenarija rada kako bi se procijenio utjecaj strategije upravljanja energijom na performanse hibridnog sustava.

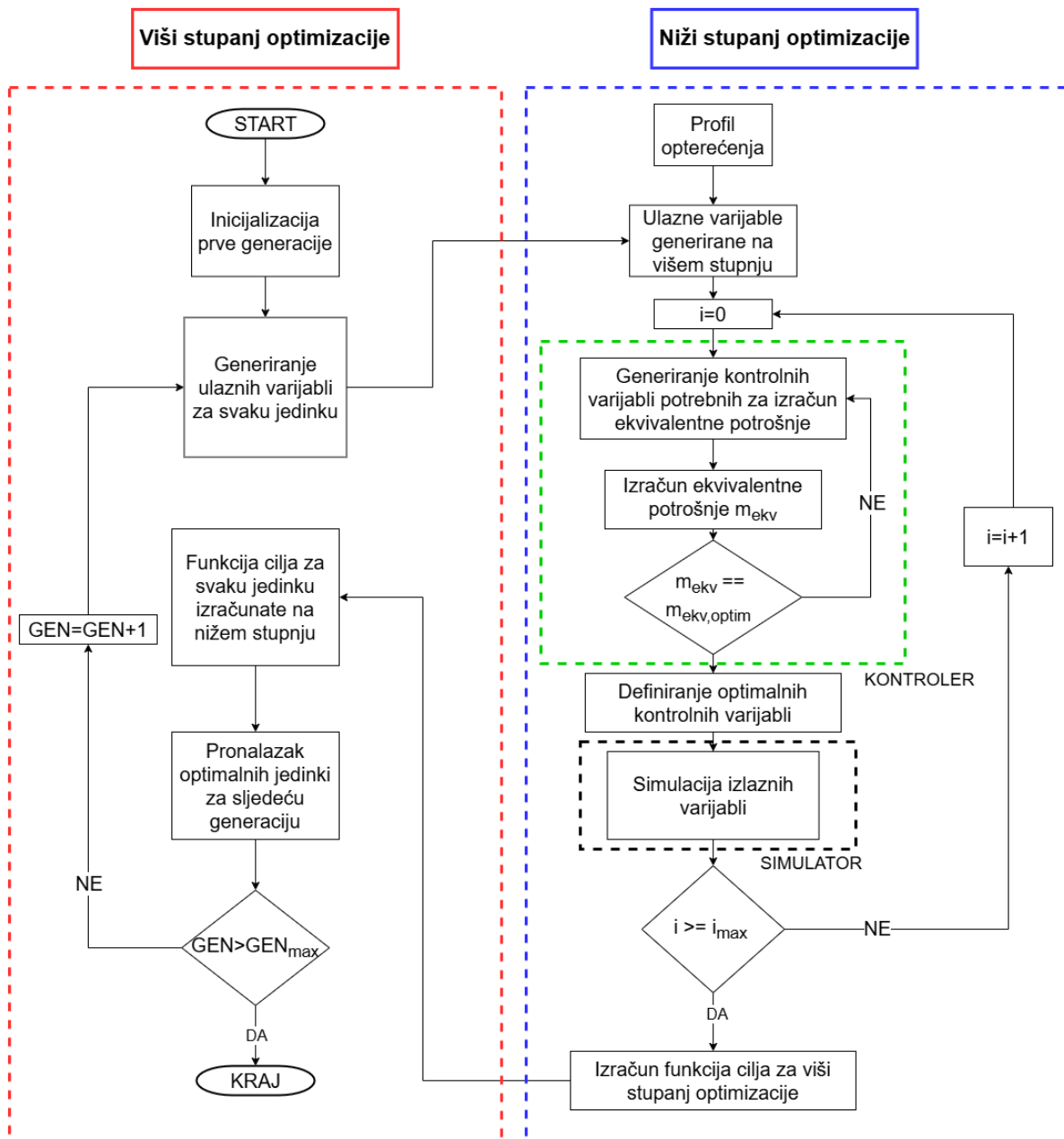
Prvi scenarij, nazvan održavanje stanja napunjenosti (CS) (engl. *Charge Sustaining*), predstavlja uobičajeni način rada. U ovom režimu, glavni cilj je održavanje stanja napunjenosti baterije unutar uskog, unaprijed definiranog raspona. To znači da se baterija puni i prazni u manjim ciklusima, kako bi se uvijek osigurao dovoljan kapacitet za apsorpciju energetske fluktuacije i podršku sustavu.

Preostala dva scenarija spadaju u kategoriju pražnjenja baterije (CD) (engl. *Charge Depleting*), u kojima se baterija koristi za pogon sustava sve dok se njezina razina napunjenosti značajno ne smanji. Ovi scenariji razlikuju se u strategiji punjenja:

- **Pražnjenje baterije s noćnim punjenjem:** U ovom scenariju baterija se puni isključivo tijekom noći, dok je brod u luci. Tijekom dnevnog rada, baterija se prazni kako bi se iskoristila maksimalna količina uskladištene električne energije.
- **Pražnjenje baterije s dnevnim i noćnim punjenjem:** Ovaj scenarij koristi istu osnovnu strategiju pražnjenja, ali s dodatnom fleksibilnošću. Baterija se ne puni samo noću, već i kroz fiksno dvosatno punjenje tijekom dana.

Analiza performansi sustava u ova tri različita scenarija omogućila je sveobuhvatnu procjenu prednosti i nedostataka svake strategije te je pružila uvid u optimalnu upotrebu hibridnog sustava. Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije može se vidjeti na slici 1.3. Na dijagramu crvenom bojom je označen viši stupanj, dok je plavom bojom označen niži stupanj optimizacije. Cijeli postupak počinje u višem stupnju generiranjem početne generacije jedinki. S tim podacima generiranim za svaku jedinku (npr. kapacitet baterije, nazivna snaga glavnog motora ili dizel generatora, prijenosni omjer reduktora i sl.) započinje niži stupanj optimizacije. Niži stupanj optimizacije provodi se zasebno za svaku jedinku u svakom vremenskom koraku i . Broj vremenskih koraka i_{max} definiran je zadanim profilom opterećenja. Definicija profila opterećenja bit će pobliže objašnjena u potpoglavlju 1.2.3. Zatim kontroler strategije upravljanja označen zelenom bojom na temelju zahtjeva za snagom definiranim u profilu opterećenja, stanju svih komponenti iz prethodnog vremenskog koraka te definiranih ograničenja generira set kontrolnih varijabli (npr. izlazna snaga baterije ili binarne varijable koje označavaju je li pojedina komponenta uključena ili ne) koje služe za izračun ekvivalentne potrošnje. Optimizacija u nižem stupnju se temelji isključivo na minimizaciji ekvivalentne potrošnje. Nakon pronalaska optimalne ekvivalentne potrošnje unutar vremenskog koraka, automatski su definirane i optimalne kontrolne varijable koje se koriste, zajedno s ulaznim varijablama i podacima definiranim u profilu opterećenja, da bi simulator (označen crnom bojom) izračunao izlazne varijable sustava (npr. izlazne snage glavnog motora, dizel generatora, baterije i elektromotora). Navedeni postupak se ponavlja u svakom vremenskom koraku do koraka i_{max} . Period razmatranja u ovom istraživanju je

bio 10 godina s minutnom podjelom tokom operativnog dijela. Nakon desetogodišnjeg perioda izračunavaju se funkcije cilja potrebne za nastavak višeg stupnja optimizacije.



Slika 1.3: Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije

Razmatrane funkcije cilja su:

- **Minimizacija ukupne potrošnje goriva** (tehnička funkcija cilja), koja služi kao ključni pokazatelj učinkovitosti hibridnog broskog sustava.
- **Minimizacija degradacije sustava** (tehnička funkcija cilja). Ova funkcija ocjenjuje utjecaj starenja i gubitka kapaciteta pojedinih komponenti poput baterije, dizelskog motora i generatora, čime se direktno utječe na dugoročnu pouzdanost i vijek trajanja cijelog sustava.

- **Minimizacija LCC-a (engl. *Life Cycle Cost*)** (ekonomska funkcija cilja). LCC je definiran kao ukupni troškovi tijekom životnog vijeka sustava, uključujući početne kapitalne troškove (nabava i instalacija), operative troškove (gorivo, energija s kopna) te troškove održavanja i zamjene komponenti.

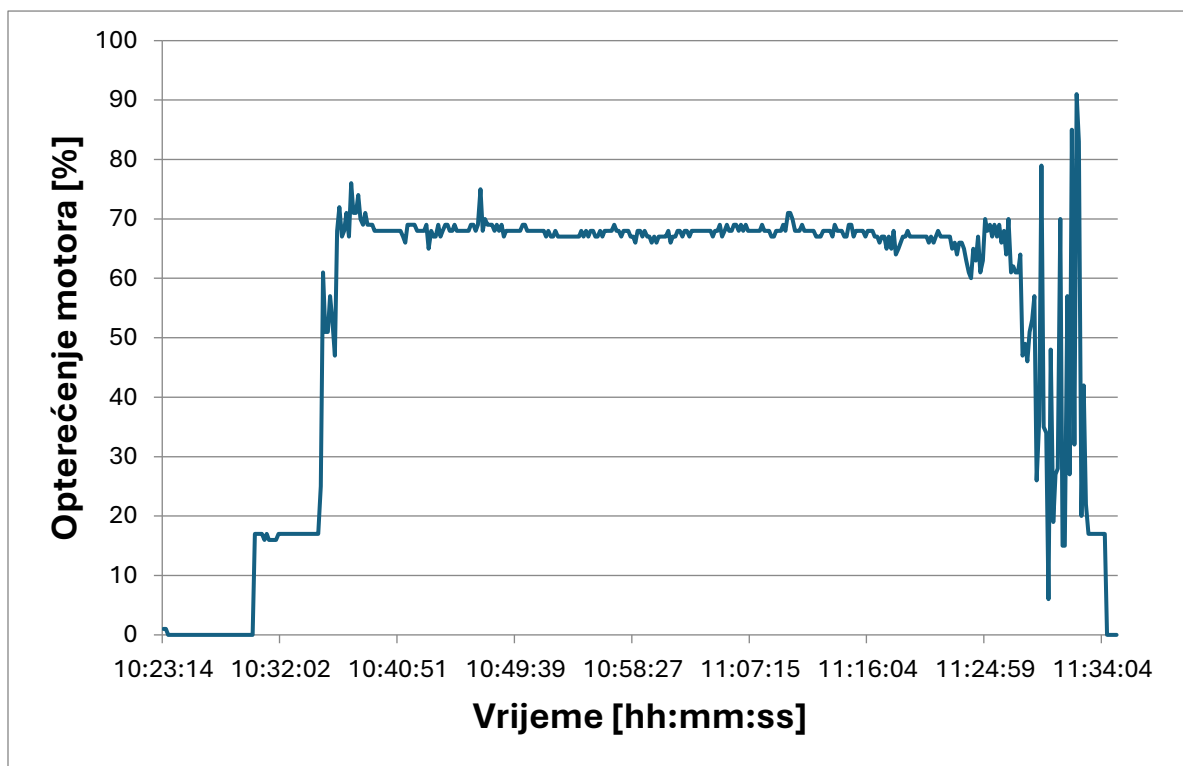
Na temelju spomenutih funkcija cilja, optimizator u višem stupnju optimizacije generira nove jedinice koje bi trebale biti sve bliže optimalnom rješenju. Kraj optimizacije je gotov kad se do maksimalnog broja generacija $G_{\max}$ koji je iznosio 95 s ukupno izračunatih 10830 jedinki za svaki razmatrani slučaj. Cjelokupno modeliranje pojedinih komponenti te proces dvostupanjske optimizacije se izvršio korištenjem Python programskog jezika te njegovih proširenja.

1.2.3 Profil opterećenja

Profil opterećenja sustava je ključan ulazni podatak te se cijela optimizacija, i viši i niži stupanj, prilagođava definiranom profilu opterećenja. Profil opterećenja za brodske sustave se općenito sastoji od dva dijela:

- Zahtjev za propulzijskom energijom
- Zahtjev za energijom za održavanje pomoćnih brodskih sustava

Zahtjev za propulzijskom energijom jest kroz istraživanje izmjeren na nekoliko različitih trajekata koji plove na lokalnim linijama, dok zahtjev za energijom za održavanje pomoćnih sustava će biti procijenjen na temelju podataka dostupnih u literaturi. Analizirajući profil propulzijskog opterećenja na lokalnim trajektima, došlo se do uvida da standardni propulzijski profil opterećenja na lokalnoj ruti ima prilično ujednačen oblik koji možemo vidjeti na slici 1.4.



Slika 1.4: Profil opterećenja motora na trajektu za vrijeme plovidbe na lokalnoj ruti

Na slici 1.4 se vidi da propulzijski profil ima četiri različita područja djelovanja:

- Stajanje u luci gdje propulzijski motor nije ni uključen
- Proces ubrzavanja plovila do predviđene brzine plovidbe i dolazak motora na propelerno opterećenje
- Plovidba pri konstantnoj brzini broda i pri radu motora na propelernom opterećenju
- Faza manevriranja gdje opterećenje je promjenljivo, a motor radi u nepovoljnom području rada

Određivanje ova četiri različita područja djelovanja bit će ključno pri određivanju faktora ekvivalencije unutar strategije upravljanja.

U višem stupnju optimizacije se odvija dimenzioniranje komponenti koje nastoje zadovoljiti ciljeve čiji se utjecaj manifestira tek u vremenskom razdoblju duljem od onog prikazanog na slici 1.4. Stoga je jedan od zadataka ovog istraživanja izrada profila opterećenja definiranog za dulje vremensko razdoblje, u ovom istraživanju na 10 godina.

Modeliranje se temelji na dnevnom profilu putovanja, koji se sastoji od niza povratnih putovanja. Broj tih putovanja nije fiksni, već se prilagođava ovisno o sezoni, simulirajući realne prometne obrasce. Na primjer, tijekom ljetne sezone, kada je promet trajekta pojačan, broj dnevnih putovanja je veći u odnosu na zimske mjeseci.

Utjecaj sezonskih promjena na opterećenje detaljno je ugrađen u model. Povećanje broja putnika i tereta (vozila) tijekom ljeta direktno utječe na povećanje propulzijskog i pomoćnog opterećenja broda. Kako bi se to postiglo, standardnom profilu dodan je stohastički doprinos, što znači da opterećenje nije potpuno predvidljivo, već sadrži elemente nasumičnosti. Ove stohastičke varijacije primjenjuju se na snagu potrebnu za plovidbu pri nominalnoj brzini te na trajanje i snagu manevarskih faza. Takav pristup omogućuje iznimno vjerno prikazivanje nepredvidljivosti koja je svojstvena plovidbi u realnim uvjetima. Nadalje, uzimaju se u obzir i faktori kao što su utjecaj lošeg vremena na trajanje manevarske faze, što dodatno povećava realnost modela.

Konačni dugoročni profil opterećenja spaja sve ove elemente u jedinstvenu vremensku seriju. Profil uključuje sve faze rada: manevriranje pri polasku i dolasku, plovljenje na otvorenom moru te vrijeme provedeno u luci. Za svaku od tih faza definirana su odgovarajuća opterećenja, a sezonske i stohastičke varijacije osiguravaju da profil točno odražava stvarne fluktuacije u potražnji za energijom. Ova detaljna i sveobuhvatna simulacija osigurava da rezultati optimizacije nisu samo teoretski, već primjenjivi u praksi, pružajući pouzdane smjernice za dimenzioniranje i upravljanje hibridnim brodskim sustavima.

1.3 Očekivani znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinosi su:

- Metoda dvostupanjske optimizacije za brodski hibridni energetska sustav integrira dimenzioniranje komponenti sustava i strategiju upravljanja energijom u stvarnom vremenu
- Strategija upravljanja energijom broskog hibridnog sustava koja se temelji na strategiji minimizacije ekvivalentne potrošnje s varijabilnim faktorom ekvivalencije omogućava dinamičko prilagođavanje standardnom profilu opterećenja
- Profil opterećenja plovidbe utječe na dimenzioniranje kapaciteta komponenti broskog hibridnog energetska sustava

1.4 Struktura rada

Ovaj doktorski rad je strukturiran u sedam međusobno povezanih poglavlja, osmišljenih tako da metodički vode od definicije problema do konačnih rezultata i zaključaka.

Prvo poglavlje, *Uvod*, postavlja temelje istraživanja. U njemu se definira problem optimizacije brodskih hibridnih sustava, iznosi se središnja znanstvena hipoteza te se daje sažet opis metodologije istraživanja, s posebnim naglaskom na razvijeni koncept dvostupanjske optimizacije. Na kraju poglavlja navode se očekivani znanstveni doprinosi i daje se pregled strukture cjelokupnog rada.

Drugo poglavlje, *Pregled literature*, pruža sveobuhvatan uvid u postojeće znanstvene i stručne spoznaje. Analiziraju se temeljne komponente hibridnih sustava, različite konfiguracije pogona te se daje detaljan pregled najsuvremenijih metoda za modeliranje komponenti, strategije upravljanja energijom i pristupe dimenzioniranju. Ovo poglavlje služi za kontekstualizaciju istraživanja i identifikaciju znanstvene praznine koju ovaj rad nastoji popuniti.

Treće poglavlje, *Modeliranje komponenti brodskog hibridnog sustava*, posvećeno je razvoju matematičkih modela koji čine jezgru simulacijskog okvira. Detaljno se opisuje model tokova snage unutar odabrane hibridne konfiguracije, model motora s unutarnjim izgaranjem s fokusom na specifičnu potrošnju goriva te model baterijskog sklopa koji uključuje ključne mehanizme praćenja stanja napunjenosti (SOC) i, što je najvažnije, modeliranja degradacije.

Četvrto poglavlje, *Strategija upravljanja energijom hibridnog brodskog sustava*, detaljno razrađuje inteligenciju sustava. Predstavlja se koncept Adaptivne ECMS strategije (A-ECMS) s PI regulacijom, kao i hibridni algoritam za optimizaciju raspodjele snage u stvarnom vremenu. Kredibilitet i učinkovitost razvijene strategije potvrđuje se validacijom pomoću dinamičkog programiranja, gdje globalni optimum služi kao referentna točka.

Peto poglavlje, *Postavke optimizacijskog problema*, formalno definira cjelokupni optimizacijski okvir. U njemu se opisuje metodologija za konstrukciju realističnog, višegodišnjeg profila opterećenja, formalizira se dvostupanjska optimizacija te se detaljno razrađuju tri ključne funkcije cilja: trošak životnog ciklusa (LCC), kompozitni indeks degradacije i ukupna potrošnja goriva.

Šesto poglavlje, *Rezultati istraživanja*, predstavlja središnji i najvažniji dio rada. U njemu se sustavno prikazuju i detaljno analiziraju rezultati dobiveni primjenom postavljenog optimizacijskog okvira. Analiza je strukturirana kroz tri ključna operativna scenarija (strategije pražnjenja s dnevnim punjenjem i bez njega te strategija održavanja stanja napunjenosti). Za svaki scenarij provodi se makro analiza cjelokupne Pareto fronte te mikro analiza odabranih reprezentativnih rješenja.

Sedmo poglavlje, sveobuhvatni zaključak koji sažima ključne spoznaje, potvrđuje postavljenu hipotezu, ističe ostvarene znanstvene doprinose te predlaže smjernice za buduća istraživanja.

2. PREGLED LITERATURE

Pomorski promet, kao temelj globalne trgovine, suočava se s rastućim pritiskom smanjenja svog značajnog ekološkog otiska. S godišnjom potrošnjom od približno 300 milijuna tona fosilnih goriva, ovaj sektor je odgovoran za značajan udio globalnih emisija stakleničkih plinova (GHG) te drugih štetnih tvari poput sumpornih (SO_x) i dušikovih (NO_x) oksida [12]. Kao odgovor na ovaj problem, Međunarodna pomorska organizacija (IMO) uvela je niz strogih regulatornih okvira, poput MARPOL konvencije i strategije za dekarbonizaciju do 2050. godine [13], koji prisiljavaju industriju na temeljitu tehnološku transformaciju.

U potrazi za rješenjima, pomorska industrija istražuje tri temeljna pristupa: implementaciju novih tehnologija za obradu ispušnih plinova, primjenu alternativnih, nisko-ugljičnih goriva te elektrifikaciju pogonskih sustava [14]. Među ovim pristupima, hibridno-električni pogonski sustavi, koji integriraju motore s unutarnjim izgaranjem s komponentama za pohranu električne energije poput baterija, ističu se kao jedno od najperspektivnijih i tehnološki najzrelijih rješenja za kratkoročno i srednjoročno razdoblje. Potencijal hibridizacije leži u značajnom smanjenju potrošnje goriva i troškova održavanja, uz istovremeno poboljšanje operativnih sposobnosti i sigurnosti plovila [15].

Međutim, uspješna realizacija ovih prednosti nije zajamčena samom ugradnjom hibridne tehnologije. Ključni istraživački izazov, koji se nalazi u središtu ovog rada, jest složena međuovisnost između fizičke konfiguracije sustava (dimenzioniranje komponenti) i njegove operativne inteligencije, odnosno strategije upravljanja energijom (eng. *Energy Management Strategy*, EMS) [16]. Nepravilno dimenzioniran sustav ili neadekvatna strategija upravljanja mogu poništiti potencijalne uštede i dovesti do negativnog povrata ulaganja. Ekonomska i ekološka isplativost hibridnog sustava stoga se ne može promatrati kao jednostavna jednadžba kapitalnih i operativnih troškova, već kao integrirani problem optimizacije dimenzioniranja i upravljanja.

Slijedom toga, cilj ovog poglavlja je pružiti sveobuhvatan i strukturiran pregled dosadašnjih znanstvenih i stručnih spoznaja u području hibridno-električnih pogonskih sustava u pomorstvu. Analiza postojeće literature usmjerena je na ključne aspekte koji definiraju učinkovitost ovih sustava. U prvom dijelu poglavlja bit će predstavljene osnovne konfiguracije hibridnih sustava te detaljno analizirane ključne komponente poput motora s unutarnjim izgaranjem, baterijskih sustava i elemenata energetske elektronike. Središnji dio poglavlja posvećen je sustavnom pregledu i klasifikaciji različitih strategija upravljanja energijom, od jednostavnih heurističkih metoda do naprednih optimizacijskih algoritama i strategija temeljenih na umjetnoj inteligenciji. Konačno, u završnom dijelu poglavlja analizirat će se postojeći pristupi integriranom rješavanju problema dimenzioniranja i upravljanja, čime će se identificirati otvorena istraživačka pitanja i postaviti temelji za doprinos ovog rada

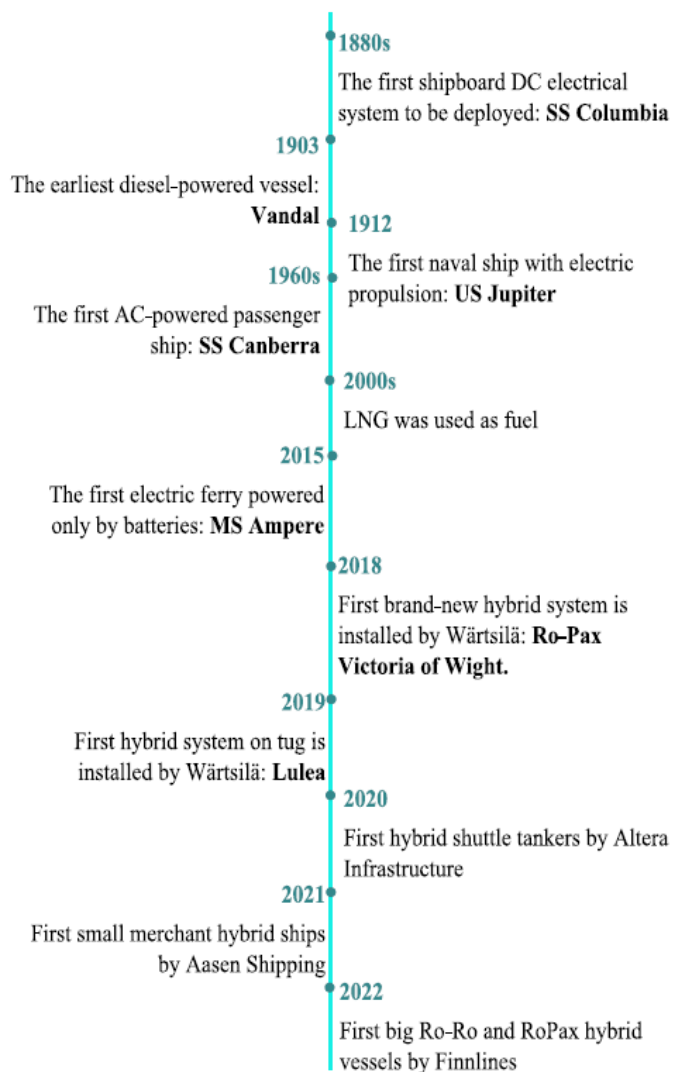
2.1 Glavne komponente brodskih hibridnih sustava

Kako bi se istaknula evolucija dizajna hibridnih elektroenergetskih sustava na brodovima i plovilima, u ovom dijelu prikazana je ukratko povijest razvoja brodskog električnog i hibridnog pogona. Na slici 2.1 prikazana je kronologija ključnih događaja u razvoju hibridnog pogonskog sustava [17].

Vandal, prvi dizel-električni brod, izgrađen je 1903. godine, dok je 1912. godine mornaričko plovilo USS Jupiter, prvo s električnim pogonskim sustavom, uvedeno u vojnu službu [18]. Jupiter je bio opremljen s tri pogonska sustava: izravno s parnom turbinom, turboelektričnim pogonom i dizel pogonom. Njegov dvostruki turboelektrični pogonski sustav od 3500 hp pokazao se izuzetno uspješnim. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća, uvođenje izmjeničnih motora, transformatora i dizel motora potaknulo je daljnji razvoj primjene električne energije u brodovima.

Putnički brod SS Canberra, koji koristi izmjenični (*engl. Alternate current*, AC) pogon, izgrađen je 1960-ih, a AC električni motori počeli su se razvijati i primjenjivati tijekom 1970-ih. Napredak elektroničke tehnologije tijekom energetske krize 1970-ih potaknuo je prijelaz u eru potpuno električnih brodova [18]. Specijalizirani komercijalni brodovi, poput brodova za ukapljeni prirodni plin, značajno su utjecali na dizajn električnih sustava. Prijelaz s parnih motora na motore s unutarnjim izgaranjem označio je značajan tehnološki napredak, koji je utjecao na snagu i tehnologiju brodskih pogonskih sustava.

Hibridni sustavi, kao varijanta integriranih elektroenergetskih sustava, mogu kombinirati mehaničke i električne komponente, došli su nešto kasnije. Prvi svjetski trajekt u potpunosti na baterijski pogon, MF Ampere, počeo je s radom u siječnju 2015., označivši početak ere potpuno električnih brodova. Jedan od najvećih proizvođača brodskih pogonskih komponenti Wärtsilä proširila je svoj utjecaj na tržište hibridnih brodskih sustava [19] te je od 2018. godine dizajnirala i instalirala prvi novoizgrađeni hibridni sustav na brodu Ro-Pax Victoria of Wight te hibridni tegljač i ledolamac Vilja [20]. Tablica 2.1. prikazuje neke od najpoznatijih hibridnih i električnih brodova koji trenutno plove.



Slika 2.1: Kronologija ključnih događaja u razvoju hibridnih i električnih brodskih pogonskih sustava [17]

Tablica 2.1: Tablica najpoznatijih hibridnih i električnih brodova koji trenutno plove

Ime broda	Godina	Operater	Vrsta	Ključne značajke
MS Roald Amundsen	2019	Hurtigruten	Kruzer	Prvi hibridni kruzer na svijetu, radi bez emisija u zaštićenim područjima [21]
Ampere	2015	Norled	Trajekt	Prvi potpuno električni trajekt na svijetu [22]
Ellen	2019	DFDS	Trajekt	Potpuno električni, na jugu Danske na liniji dugoj 22 nautičke milje [23]
Viking Energy	2003 (preuređen 2021)	Razni	Opskrbni brod	Preuređen u plug-in hibrid s baterijskim sustavom snage 1600 kW, a 2024. će biti opremljen gorivnim člancima koje koriste amonijak kao gorivo [24]
Catriona	2018	CalMac	Trajekt	Dizelsko-električni hibrid; napravljen s ciljem smanjenja potrošnje goriva i emisije CO ₂ za najmanje 2 0% [25]
Crowley eWolf	U izgradnji	Crowley Maritime	Tegljač	Potpuno električni, kapacitet baterije od 6.2 MWh za poboljšanu operativnu učinkovitost [26]
Saint Malo	2024	Brittany Ferries	Trajekt	Među najvećim hibridnim plovilima, kapacitet baterije od 11 MWh [27]

2.2 Baterije

Baterije predstavljaju trenutačno vodeću tehnologiju za pohranu energije zahvaljujući visokoj gustoći energije u usporedbi sa ostalim sustavima pohrane energije [15], nižim troškovima u usporedbi s drugim tehnologijama iste energetske razine te iskustvu iz drugih sektora transporta. Strukturno, baterije se sastoje od elektroda, elektrolita i separatora, a njihov učinak uvelike ovisi o materijalu elektroda [28]. S obzirom na različite vrste baterija dostupne za komercijalnu primjenu u transportnom sektoru, odabir odgovarajuće vrste baterije ključan je korak za pomorsku industriju kako bi se osigurala pouzdana, učinkovita i optimalna implementacija. Iako se u budućnosti mogu razmotriti i druge vrste baterija, prema analizama sustava pohrane energije (*engl. Energy Storage System, ESS*) litij-ionske baterije trenutno se smatraju najprikladnijima za brodski sektor zbog visoke energetske gustoće, dugog životnog vijeka (cikličnosti), te visoke industrijske zrelosti i dostupnosti [29]. Osim toga, cijena litij-ionskih baterija značajno se smanjila posljednjih godina, čime se dodatno povećava njihova privlačnost. U [15], svojstva više vrsta baterija detaljno su analizirana te su dovedeni sljedeći zaključci:

- **Olovno-kiselinske baterije:** Imaju nisku gustoću energije (30–50 Wh/kg) i kraći do srednji vijek trajanja (500–1000 ciklusa), ali su jeftine (70 \$/kWh). Zbog većih dimenzija, manje su pogodne za brodove gdje je prostor ograničen [30].
- **Nikalkadmijske (NiCd) baterije:** Srednje gustoće energije (50–75 Wh/kg) i dugog vijeka trajanja (2000–2500 ciklusa), ali niže učinkovitosti (60–65 %) i više cijene (300 \$/kWh). Pogodne su za manje zahtjeve snage.
- **Nikalmhidridne (NiMH) baterije:** Srednje gustoće energije (60–100 Wh/kg) i srednjeg vijeka trajanja (750 ciklusa), s cijenom od 300–500 \$/kWh, mogu biti opcija za brodove s

umjerenim potrebama snage, no karakterizira ih visoka stopa samopražnjenja, čak i do 28 % [31]

- **Litij-ionske baterije:** Visoka gustoća energije (100–200 Wh/kg) i učinkovitost (85–90 %) čine ih najboljim izborom za hibridne brodove. Iako su skuplje (200–700 \$/kWh), njihova dugotrajnost i performanse opravdavaju trošak.

Tablica 2.2: Karakteristike različitih materijala katoda za litij-ionske baterije koje se mogu koristiti u brodovima

Materijal katode	Gustoća energije (Wh/kg)	Primjene	Utjecaj na okoliš	Sigurnost	Temperaturni raspon
Litij Kobalt Oksid (LCO)	150-200	Mobiteli, kamere, laptopi	Loš utjecaj na okoliš zbog iskopavanja kobalta	Umjerena sigurnost, rizik od pregrijavanja	-20 do 60 °C
Litij Nikal Mangan Kobalt Oksid (NMC)	150-250	Alati, medicinska oprema	Manji sadržaj kobalta, ali uključuje iskopavanje nikla	Poboljšana sigurnost s boljom termalnom stabilnošću	-10 do 55 °C
Litij Željezo Fosfat (LFP)	95-140	Električna vozila, sustavi za pohranu, hibridni i električni brodovi	Ekološki prihvatljivo, bez kobalta i nikla	Vrlo sigurno, termički stabilno	-30 do 60 °C
Litij Nikal Kobalt Aluminij Oksid (NCA)	200-260	Električna vozila visokih performansi, hibridni i električni brodovi	Smanjen sadržaj kobalta, visoki sadržaj nikla	Dobra sigurnost s visokom energijskom gustoćom	-20 do 60 °C
Litij Mangan Oksid (LMO)	100-150	Alati, medicinska oprema, električna vozila, hibridna vozila	Manji trošak za okoliš zbog uporabe mangana	Umjerena sigurnost, veći rizik pri visokim temperaturama	-10 do 55 °C

Tablica 2.2 prikazuje karakteristike različitih materijala katode za litij-ionske baterije koje se mogu koristiti u brodovima, analizirajući ih s obzirom na napetost, gustoću energije, utjecaj na okoliš, sigurnost i temperaturni raspon. Ovi podaci su preuzeti iz [32] i [33].

Dva materijala katode su se posebno istaknule u pomorskim primjenama:

- **Litij-željezo-fosfat (LFP, LiFePO_4):** Ove baterije su poznate po izvanrednoj sigurnosti, visokoj termičkoj stabilnosti (manji rizik od termalnog bijega) i vrlo dugom ciklusu života. Njihov nedostatak je nešto niža gustoća energije u usporedbi s drugim katodnim materijalima
- **Nikal-mangan-kobalt (NMC):** NMC baterije nude veću gustoću energije, što znači da mogu pohraniti više energije u manjem i lakšem paketu. To ih čini privlačnima za primjene s ograničenim prostorom. Međutim, one su manje termički stabilne te u većini slučajeva zahtijevaju složeniji sustav termalnog upravljanja.

Izbor između LFP i NMC kemije predstavlja ključnu inženjersku odluku. Za putničke brodove, gdje je sigurnost apsolutni prioritet, LFP je često preferirani izbor [34]. Za plovila gdje su prostor i težina kritični, veća gustoća energije NMC-a može biti presudna [17].

Visokonaponske litij-ionske baterije zahtijevaju i izuzetno sofisticirane sustave za nadzor i upravljanje kako bi se osigurao siguran, pouzdan i dugotrajan rad. Dva ključna podsustava koja to omogućuju su sustav za upravljanje baterijama (BMS) i sustav za termalno upravljanje (TMS) [35].

Sustav za upravljanje baterijama djeluje kao centralni nadzorni i upravljački sustav, često opisan kao "mozak" baterijskog paketa. Njegova primarna uloga je osigurati da svaka pojedinačna ćelija unutar paketa radi unutar svojih specificiranih sigurnih operativnih granica (eng. *Safe Operating Area*, SOA). Ključne funkcije BMS-a uključuju:

- **Nadzor:** Kontinuirano praćenje ključnih parametara u stvarnom vremenu, kao što su napon, struja i temperatura svake ćelije ili grupe ćelija. Na temelju ovih mjerenja, BMS procjenjuje ključna stanja baterije, uključujući stanje napunjenosti (eng. *State of Charge*, SOC), stanje ispravnosti (eng. *State of Health*, SOH) i dostupnu snagu (eng. *State of Power*, SOP) [36].
- **Zaštita:** Aktivno sprječavanje stanja koja mogu dovesti do trajnog oštećenja ili sigurnosnih rizika. To uključuje zaštitu od prekomjernog punjenja, prekomjernog pražnjenja, previsoke struje punjenja i pražnjenja te rada izvan dopuštenog temperaturnog raspona.
- **Balansiranje ćelija:** Zbog neizbježnih malih razlika u proizvodnji, ćelije unutar paketa se tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja nejednako troše, što dovodi do neravnoteže u njihovom stanju napunjenosti. BMS provodi balansiranje (pasivno ili aktivno) kako bi izjednačio napon svih ćelija, čime se maksimizira iskoristivi kapacitet i produljuje životni vijek cijelog paketa [37].
- **Komunikacija:** BMS komunicira s glavnim upravljačkim sustavom plovila (npr. *Power Management System*, PMS), pružajući mu ključne informacije o stanju baterije i omogućujući donošenje odluka unutar strategije upravljanja energijom [38].

Sustav za termalno upravljanje je od presudne važnosti jer litij-ionske baterije pokazuju optimalne performanse i najsporiju degradaciju samo unutar uskog temperaturnog raspona, tipično između 15°C i 35°C. TMS je zadužen za održavanje temperature baterija unutar tog optimalnog prozora, bez obzira na vanjske uvjete i opterećenje sustava [39]. Njegove zadaće uključuju:

- **Hlađenje:** Tijekom rada pod visokim opterećenjem (brzo pražnjenje ili punjenje), baterije generiraju značajnu količinu topline. TMS aktivno odvodi tu toplinu koristeći različite medije, poput zraka (prisilna konvekcija) ili tekućine (najčešće mješavina vode i glikola), koja cirkulira kroz rashladne ploče ili kanale unutar baterijskog modula.
- **Grijanje:** U hladnim klimatskim uvjetima, niske temperature mogu drastično smanjiti raspoloživu snagu i kapacitet baterije te usporiti proces punjenja. TMS u takvim uvjetima koristi grijače kako bi doveo temperaturu baterije na optimalnu razinu.

Učinkovit TMS nije samo ključan za performanse i dugovječnost, već i za sigurnost. Neadekvatno odvođenje topline može dovesti do pregrijavanja i pokrenuti opasnu lančanu reakciju poznatu kao termalni bijeg (eng. *thermal runaway*), gdje se ćelije nekontrolirano zagrijavaju do točke zapaljenja, što može rezultirati požarom ili eksplozijom cijelog baterijskog paketa [40]. Stoga je integracija robusnog BMS-a i učinkovitog TMS-a temeljni preduvjet za sigurnu primjenu velikih baterijskih sustava u pomorstvu.

Baterije predstavljaju izvrsno rješenje za hibridizaciju brodskih sustava, te je provedeno niz analiza primjenom različitih strategija. Na primjer, hibridni sustav koji se sastoji od litij-ionskih baterija s gorivnim člancima analiziran je za obalne brodove, uzimajući u obzir izvedivost i potencijalne

koristi s obzirom na faktore kao što su snaga, gustoća energije, životni vijek i troškovi [41]. Nadalje, analiza hibridnog baterijsko-dizelskog električnog pogonskog sustava pokazala je potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova za 14 % u globalnoj floti brodova za suhi rasuti teret [42].

Istovremeno, postoje projekti potpuno električnih brodskih pogona, kao što je MF Ampere, koji se smatra važnim korakom prema brodovima s nultom emisijom. Ovaj projekt označava prekretnicu u razvoju potpuno električnih trajekata, a trajekt je u Norveškoj u pogonu od 2015. Opremljen je NMC baterijama s kapacitetom od 1 MWh. Punjenje se odvija preko obalne mreže tijekom kratkih pauza u lukama i tijekom noći [43].

2.3 Motori s unutarnjim izgaranjem

Motori s unutarnjim izgaranjem, poglavito dizelski motori, predstavljaju okosnicu proizvodnje energije na brodovima, kako za pogon tako i za napajanje pomoćnih sustava. Njihova dominacija, koja traje od zamjene parnih strojeva tijekom 20. stoljeća, temelji se na nizu čvrstih prednosti: desetljećima akumuliranom operativnom iskustvu, globalno raširenoj servisnoj mreži i lakoj dostupnosti rezervnih dijelova te razvijenoj infrastrukturi za opskrbu gorivom. Ovi faktori osigurali su im status primarnog i najpouzdanijeg izvora energije u pomorskoj industriji.

Međutim, njihov dominantan položaj sve je više ugrožen zbog rastućih ekoloških pritisaka. Štetne emisije koje nastaju izgaranjem fosilnih goriva – prvenstveno dušikovi oksidi (NO_x) koji doprinose stvaranju kiselih kiša i smoga, sumporni oksidi (SO_x) koji su također uzročnici kiselih kiša, čestice (PM) štetne za ljudsko zdravlje i ugljikov dioksid (CO₂) kao ključni staklenički plin – predmet su sve strožih regulativa Međunarodne pomorske organizacije (IMO), posebice kroz MARPOL konvenciju, Aneks VI. Kako bi se zadovoljili zahtjevi poput Tier III ograničenja za NO_x ili globalnog limita sumpora od 0.50 %, razvijene su kompleksne tehnologije za obradu ispušnih plinova. Sustavi poput recirkulacije ispušnih plinova (EGR), selektivne katalitičke redukcije (SCR) koja zahtijeva potrošni reagens (ureu), i pročištača (scrubbera) za uklanjanje SO_x postali su nužnost. Ipak, njihova implementacija značajno povećava investicijske troškove (CAPEX) zbog cijene samih uređaja i ugradnje, ali i operativne troškove (OPEX) kroz potrošnju reagensa, održavanje i potencijalno povećanu potrošnju goriva. Upravo ta ekonomska i tehnička opterećenja čine potragu za alternativnim rješenjima nužnom, pri čemu se primjena alternativnih goriva i fundamentalna promjena konfiguracije pogona kroz hibridizaciju ističu kao najprivlačnija i dugoročno najodrživija rješenja.

Ključni operativni nedostatak dizelskih motora je njihova smanjena učinkovitost pri radu s djelomičnim opterećenjem. Dizajnirani su za postizanje optimalne specifične potrošnje goriva (SFOC) u uskom rasponu visokih opterećenja, najčešće iznad 60 % do 70 % maksimalne kontinuirane snage (MCR). Pri nižim opterećenjima, karakterističnim za manevriranje, plovidbu smanjenom brzinom ili rad u luci, proces izgaranja postaje manje učinkovit, što dovodi do neproporcionalno veće potrošnje goriva i povećanih emisija. Upravo taj problem niske učinkovitosti pri varijabilnim opterećenjima predstavlja temeljni razlog za hibridizaciju. Integracija sustava za pohranu energije, poput baterija, omogućuje motoru da radi u svom optimalnom režimu, dok se višak energije pohranjuje za kasniju upotrebu (eng. *peak shaving, load leveling*), ili da se u potpunosti ugasi tijekom perioda niske potražnje za snagom.

2.4 Gorivni članci

Gorivni članci izravno pretvaraju kemijsku energiju goriva u istosmjernu električnu energiju. Budući da postoji samo jedan korak pretvorbe energije eliminacijom procesa izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem, ukupna učinkovitost je relativno viša nego kod pomorskih dizelskih motora te najčešće koriste vodik kao osnovno gorivo, što im omogućuje čišći rad u usporedbi s dizelskim motorima [45]. Na taj način, u kontekstu strogih propisa o emisijama, gorivni članci su vrlo obećavajući zbog niskog utjecaja na okoliš u pogonu budućih brodova. Glavna razlika između gorivnih članaka i drugih sustava za pohranu energije je njihova sposobnost rada bez potrebe za punjenjem, pa mogu proizvoditi električnu energiju sve dok postoji stabilan dovod goriva. Gorivni članci klasificiraju se prema vrsti elektrolita koji se koristi, a komercijalno je dostupno pet vrsta gorivnih članaka: gorivni članak s protonski provodljivom membranom (*engl. Proton-exchange membrane fuel cell*, PEMFC), alkalni gorivni članak (*engl. Alkaline fuel cell*, AFC), gorivni članak s rastaljenim karbonatom (*engl. Molten carbonate fuel cell*, MCFC) i gorivni članak s krutim oksidom (*engl. Solid oxide fuel cell*, SOFC). U tablici 2.3. se mogu vidjeti prednosti i nedostaci navedenih članaka [46, 47].

Komercijalno najpopularnija vrsta gorivnih članaka je PEMFC zbog svoje tehnološke zrelosti i široke primjene u drugim energetske primjenama [48]. Tehnološka zrelost donosi prednost s aspekta troškova i operativnog iskustva. Međutim, kao glavni nedostatak, PEMFC zahtijeva visoku čistoću vodika, jer se članak može oštetiti i prestati raditi zbog trovanja ugljikovim monoksidom [49]. Glavne promjene u operativnim svojstvima različitih tipova gorivnih članaka proizlaze iz radnih temperatura; gorivni članci s visokim i niskim radnim temperaturama pokazuju različite karakteristike. MCFC, PAFC i SOFC su tipovi visokih temperatura. Postoji i visokotemperaturna verzija PEMFC koja se dobije zamjenom materijala membrane perfluorosulfonske kiseline (Nafion) s polibenzimidazolom (PBI). Visokotemperaturni PEMFC rješava neke probleme PEMFC-a kao što su upravljanje vodom na strani katode i visoka osjetljivost na nečistoće u gorivu [50]. Gorivni članci visokih temperatura manje su osjetljivi na sastav goriva i znatno su fleksibilniji u izboru goriva; primjerice, vodik i ugljikovodici poput dizelskog ulja, metanola i ukapljenog prirodnog plina (LNG) opcije su goriva za SOFC i MCFC putem procesa reformiranja [51].

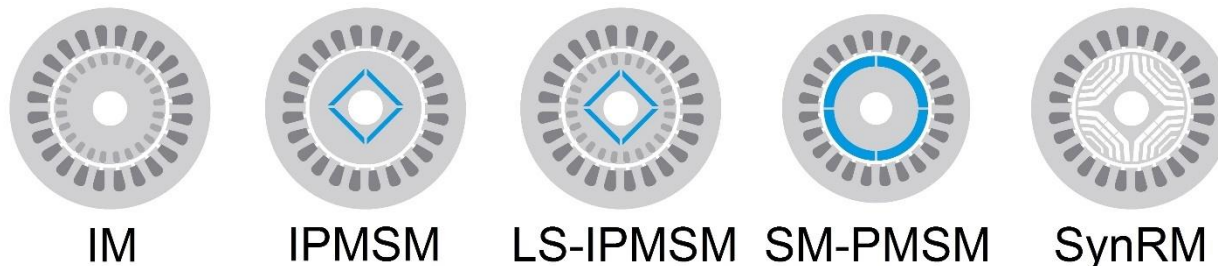
Tablica 2.3: *Prednosti i nedostaci najčešće korištenih tehnologija gorivnih članaka*

Tehnologija	Prednosti	Nedostaci
PEMFC	- Visoka učinkovitost i gustoća snage - Brzo vrijeme pokretanja - Niske radne temperature (60-80°C)	- Visoka cijena materijala (npr. platinasti katalizatori) - Ograničena trajnost - Zahtijeva čisto vodikovo gorivo
AFC	- Visoka učinkovitost i niska cijena materijala - Dobre performanse u okruženjima s visokim temperaturama	- Osjetljivo na CO ₂ u gorivu, zahtijeva čisti vodik - Niža gustoća snage u usporedbi s PEMFC-ima
PAFC	- Dobra izdržljivost i pouzdanost	- Niža učinkovitost od PEMFC-a i SOFC-a - Više radne temperature (150-200°C)
MCFC	- Može raditi na prirodni plin i druga goriva - Visoka učinkovitost u velikim razmjerima	- Visoke radne temperature (600-700°C) - Korozivni elektrolit zahtijeva posebne materijale
SOFC	- Visoka učinkovitost (do 60 % ili više) - Može koristiti različita goriva (zemni plin, bioplin) - Dug radni vijek	- Visoke radne temperature (600-1000°C) mogu dovesti do toplinskog stresa - Sporo vrijeme pokretanja - Skupi materijali

Osim fleksibilnosti goriva, povećanje snage i učinkovitosti izravne su posljedice visokih radnih temperatura. Gorivni članci su modularni pa se njihove fizičke karakteristike, kao što su težina ili dimenzije, mijenjaju ovisno o potrebnoj snazi sustava. Općenito, izlazna snaga je na razini kW, međutim, za verzije s visokim temperaturama, dosegnute su i razine MW. Zapravo, ispušni plinovi visokih temperatura mogu se koristiti u kombiniranom sustavu s turbinom, čime se povećava ukupna učinkovitost sustava i izlazna snaga [52]. Odabir najperspektivnijeg tipa gorivnih članaka za hibridizaciju uvelike ovisi o operativnom profilu broda. Međutim, iz provedenih projekata, čini se da PEMFC, MCFC i SOFC pokazuju bolje performanse u usporedbi s drugim tipovima. Imaju različite prednosti; ako je potreba za snagom visoka i postoji poteškoća u skladištenju vodika na brodu, SOFC i MCFC su preferirani. S druge strane, s aspekta emisija, visoke gustoće snage i tehnološke zrelosti, prednosti PEMFC-a su značajne. Međutim, potreba za vodikom visoke čistoće kao gorivom još uvijek nije ekonomična za dugotrajna plovila.

2.5 Propulzijski elektromotori

Električni motor predstavlja srce električnog i hibridno-električnog pogonskog sustava, pretvarajući električnu energiju u mehaničku snagu potrebnu za pokretanje propelera. Odabir i pravilno dimenzioniranje propulzijskog motora ključni su za postizanje ciljeva učinkovitosti, pouzdanosti i performansi cijelog sustava. U modernim brodskim primjenama koristi se nekoliko različitih tehnologija motora, svaka sa svojim jedinstvenim karakteristikama, prednostima i nedostacima. Ovo poglavlje uspoređuje dominantne topologije motora – sinkrone motore s permanentnim magnetima (PMSM), asinkrone (indukcijske) motore (IM) i reluktantne motore (RM) – te detaljno razrađuje ključne pokazatelje performansi koji su temelj za njihovo optimalno dimenzioniranje u zahtjevnom pomorskom okruženju.



Slika 2.2: Poprečni presjeci rotora različitih tipova električnih motora [29]

2.5.1 Sinkroni motori s permanentnim magnetima

Sinkroni motori s permanentnim magnetima (Permanent Magnet Synchronous Motors - PMSM) postali su dominantna tehnologija u mnogim naprednim primjenama, prvenstveno zbog svojih izvanrednih performansi.

- **Prednosti:** Glavna prednost PMSM motora je njihova superiorna energetska učinkovitost, koja redovito premašuje 97 %, što je značajno više u usporedbi s drugim tehnologijama [53]. Ova visoka učinkovitost proizlazi iz činjenice da se magnetsko polje rotora stvara pomoću permanentnih magneta, čime se eliminiraju gubici u rotoru (tzv. I²R gubici) koji su prisutni kod asinkronih motora. Posljedično, PMSM motori imaju izuzetno visoku gustoću snage i momenta, što znači da za istu izlaznu snagu imaju manji volumen i masu u usporedbi s asinkronim motorima. Ova kompaktnost je od presudne važnosti u brodskim primjenama gdje su prostor i težina često ograničavajući faktori [54].

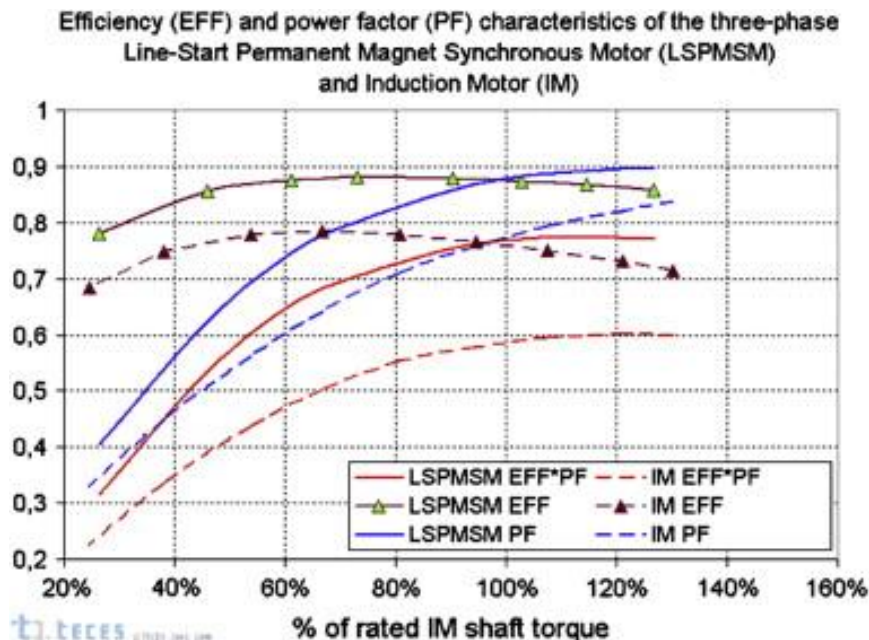
Zbog manjeg broja mehaničkih komponenti koje se troše (nema četkica ni kliznih prstenova), PMSM motori također zahtijevaju manje održavanja [53].

- **Nedostaci:** Najveći nedostatak PMSM motora je njihova visoka početna cijena, koja je izravna posljedica korištenja skupih permanentnih magneta od rijetkih metala, poput legure neodimija, željeza i bora (NdFeB). Postoji i rizik od trajne demagnetizacije magneta ako motor radi na previsokim temperaturama, što nalaže potrebu za naprednim i pouzdanim sustavima hlađenja. Konačno, za učinkovit rad PMSM motora potrebni su složeni sustavi upravljanja, kao što je vektorsko upravljanje (Field-Oriented Control - FOC), koji zahtijevaju precizne informacije o položaju rotora, dobivene putem enkodera ili rezolvera, što dodatno povećava složenost i cijenu pogonskog sustava.
- **Primjena:** PMSM su idealan izbor za primjene koje zahtijevaju maksimalnu učinkovitost i gustoću snage, kao što su brza plovila, putnički brodovi ili vojna plovila. Proces dimenzioniranja je složen i uključuje optimizaciju niza geometrijskih i elektromagnetskih parametara. Ključni koraci uključuju odabir optimalne kombinacije broja polova i broja utora statora, te optimizaciju omjera promjera i duljine aktivnog dijela motora (D/L omjer) i mase magneta, s ciljem maksimiziranja učinkovitosti i minimiziranja nestabilnosti izlaznog momenta [55].

2.5.2 Asinkroni motori

Asinkroni ili indukcijski motori (Induction Motors - IM) predstavljaju tradicionalnu, robusnu i široko rasprostranjenu tehnologiju u industrijskim i pomorskim pogonima [56, 57].

- **Tipovi:** Dva osnovna tipa su asinkroni motori s kaveznim rotorom (Squirrel-Cage Induction Motors - SCIM) i asinkroni motori s namotanim rotorom i kliznim prstenovima (Wound-Rotor Induction Motors - WRIM) [58].
- **Prednosti:** Glavne prednosti asinkronih motora su njihova robusnost, visoka pouzdanost, jednostavna konstrukcija i niži početni troškovi u usporedbi s PMSM motorima. SCIM motori su posebno poznati po svojoj jednostavnosti i minimalnim zahtjevima za održavanjem. WRIM motori, s druge strane, nude mogućnost regulacije otpora rotora putem kliznih prstenova, što im omogućuje postizanje vrlo visokog početnog momenta i preciznu kontrolu brzine, čak i bez upotrebe složenih frekvencijskih pretvarača, što može biti prednost u nekim primjenama velike snage.
- **Nedostaci:** Osnovni nedostatak asinkronih motora je njihova niža učinkovitost (tipično u rasponu od 93 % do 95 %) i niža gustoća snage u usporedbi s PMSM motorima. To znači da su za istu snagu veći i teži. Njihova učinkovitost je također vrlo ovisna o opterećenju i značajno pada pri niskim opterećenjima, što je nepovoljno za plovila s promjenjivim operativnim profilom. WRIM motori, iako nude bolju kontrolu, zahtijevaju redovito održavanje kliznih prstenova i četkica, što povećava operativne troškove [58].
- **Primjena:** SCIM motori su često preferirani izbor za primjene gdje su niski troškovi i pouzdanost važniji od maksimalne učinkovitosti i kompaktnosti, kao što su teretni brodovi ili radna plovila. Proces dimenzioniranja uključuje optimizaciju geometrije utora statora i šipki rotora, kao i odabir materijala za rotorski kavez (bakar nudi veću učinkovitost od aluminija).



Slika 2.3: Usporedba izmjerenih učinkovitosti i izlazne snage trofaznog četveropolnog PMSM-a i IM-a od 1,1 kW, mjereno pri jednakom naponu 380 V / 50 Hz [56]

2.5.3 Reluktantni motori

Reluktantni motori, uključujući komutirane (Switched Reluctance Motor - SRM) i sinkrone (Synchronous Reluctance Motor - SynRM), predstavljaju tehnologiju u usponu koja nudi jedinstvenu kombinaciju robusnosti i niske cijene [59].

- **Prednosti:** Ključna prednost reluktantnih motora je njihova konstrukcija bez permanentnih magneta i namota na rotoru. Rotor se sastoji samo od laminiranog željeza, što ih čini izuzetno robusnima, jeftinima za proizvodnju i ekološki održivijima jer ne ovise o rijetkim metalima [60]. Mogu raditi u vrlo teškim uvjetima i na visokim temperaturama, te su inherentno otporni na kvarove [61].
- **Nedostaci:** Najveći izazov kod reluktantnih motora, posebno SRM-a, su njihove izrazito nelinearne elektromagnetske karakteristike. To rezultira nestabilnim momentom i visokom razinom akustične buke i vibracija. Za ublažavanje ovih problema potrebni su vrlo napredni i složeni algoritmi upravljanja i specijalizirana energetska elektronika. Također, u usporedbi s PMSM motorima iste veličine, imaju nižu gustoću snage.
- **Primjena:** Reluktantni motori postaju sve atraktivnija alternativa u primjenama gdje su cijena, robusnost i pouzdanost apsolutni prioriteti. Proces dimenzioniranja je vrlo složen i fokusira se na optimizaciju geometrije polova statora i rotora kako bi se maksimizirao reluktantni moment i minimizirala valovitost. U početnim fazama dizajna često se koriste modeli magnetskih ekvivalentnih krugova (Magnetic Equivalent Circuit - MEC), dok se za detaljnu analizu i fino podešavanje geometrije koristi FEM [62].

Tablica 2.4: Komparativna analiza tehnologija električnih propulzijskih motora

	Sinkroni motor s permanentnim magnetima (PMSM)	Asinkroni (indukcijski) motor (IM)	Komutirani reluktantni motor (SRM)	Sinkroni reluktantni motor (SynRM)
Princip rada	Sinkrona rotacija rotora s permanentnim magnetima s rotirajućim poljem statora.	Asinkrona rotacija rotora inducirana strujama u kavezu uslijed proklizavanja.	Rotacija uslijed težnje rotora da se poravna s pobuđenim polovima statora (minimalna reluktancija).	Sinkrona rotacija rotora s izraženim polovima s rotirajućim poljem statora.
Tipična učinkovitost	97–98 %	93–95 %	Visoka, ali ovisi o upravljanju; tipično 90-96 %	Viša od IM, niža od PMSM; tipično 94-97 %
Gustoća snage	2 - 5 kW/kg	1 – 2.5 kW/kg	1.5 - 3 kW/kg	1.5 - 3 kW/kg
Složenost upravljanja	Visoka (zahtijeva FOC i senzor položaja)	Niska do srednja (skalarno ili vektorsko)	Vrlo visoka (nelinearno upravljanje)	Visoka (slično PMSM-u)
Cijena	250-800 \$/kW	150-450 \$/kW	200-500 \$/kW	200-500 \$/kW
Ključne prednosti	Učinkovitost, kompaktnost, gustoća snage.	Niska cijena, robusnost, jednostavnost.	Niska cijena, robusnost, rad na visokim temperaturama, bez magneta.	Učinkovitost veća od IM, bez magneta, niska cijena.
Ključni izazovi	Cijena magneta, rizik od demagnetizacije, hlađenje.	Niža učinkovitost i gustoća snage.	Nestabilnost momenta, akustična buka, složeno upravljanje.	Nestabilnost momenta, složeno upravljanje.

2.6 Energetska elektronika

Energetska elektronika predstavlja ključnu sponu između različitih komponenti u bilo kojem električnom sustavu. Oni upravljaju protokom energije, pretvaraju napon i struju iz jednog oblika u drugi te omogućuju preciznu kontrolu brzine i momenta električnih motora. Bez naprednih pretvarača, funkcionalnost i učinkovitost modernih hibridnih arhitektura ne bi bile moguće. Njihovo pravilno dimenzioniranje stoga je od presudne važnosti za performanse, pouzdanost i sigurnost cijelog sustava. Ovo poglavlje pruža detaljnu analizu tri ključne vrste pretvarača: DC/AC invertera, AC/DC ispravljača i DC/DC pretvarača. Analiza se fokusira na dominantne topologije, njihove principe rada, strategije upravljanja te kritične kriterije za dimenzioniranje u specifičnom i zahtjevnom pomorskom okruženju, gdje su visoka snaga, učinkovitost i pouzdanost imperativ.

2.6.1 DC/DC Pretvarači

DC/DC pretvarači su elektronički sklopovi koji pretvaraju izvor istosmjerne struje (DC) s jedne naponske razine na drugu. U kontekstu brodskih DC mikromreža, oni su fundamentalni gradivni blokovi koji omogućuju fleksibilnost, otpornost i učinkovito upravljanje energijom. Njihova sposobnost da precizno i brzo reguliraju napon i struju čini ih ključnima za integraciju modernih energetske tehnologije.

Primjena

Uloga DC/DC pretvarača u pomorskim sustavima je višestruka i kritična za funkcionalnost modernih električnih arhitektura.

- **Integracija sustava za pohranu energije (ESS):** Ovo je jedna od najvažnijih primjena. Baterijski sustavi za pohranu energije (BESS) ili superkondenzatori postaju standardni dio brodskih mikromreža. Međutim, napon baterije nije konstantan, već varira ovisno o stanju napunjenosti. Kako bi se takav varijabilni izvor povezao na stabilnu DC sabirnicu broda, neophodan je dvosmjerni DC/DC pretvarač. Tokom pražnjenja, kada baterija isporučuje energiju, pretvarač radi u "boost" načinu, podižući niži napon baterije na viši napon sabirnice. U modu punjenja, pretvarač radi u "buck" načinu, spuštajući napon sabirnice na odgovarajuću razinu za punjenje baterije. Ova dvosmjerna funkcionalnost je ključna za učinkovito upravljanje energijom [63].
- **Peak shaving i dinamički odziv:** Brodski elektroenergetski sustavi često su izloženi naglim i velikim promjenama opterećenja, kao što su pokretanje velikih motora, rad pulsirajućih tereta ili brzi manevri propulzije. Takve promjene predstavljaju velik stres za dizelske generatore, tjerajući ih da rade izvan svojih optimalnih točaka učinkovitosti uzrokujući fluktuacije napona na mreži. Korištenjem ESS-a spojenog putem brzog DC/DC pretvarača, moguće je izvesti "peak shaving" – baterija trenutno isporučuje vršnu snagu, dok generatori nastavljaju raditi u stabilnom, visoko-učinkovitom režimu. Isto tako, prilikom regenerativnog kočenja, višak energije se brzo pohranjuje u bateriju. Time se ne samo štedi gorivo, već se i poboljšava dinamički odziv i stabilnost cjelokupnog sustava [64].
- **Povezivanje alternativnih izvora:** Rastući trend dekarbonizacije potiče integraciju alternativnih izvora energije poput fotonaponskih (PV) panela i gorivnih članaka. Ovi izvori također imaju varijabilan izlazni napon. DC/DC pretvarači služe kao sučelje za njihovo povezivanje na DC sabirnicu, pri čemu često implementiraju napredne algoritme za praćenje točke maksimalne snage (Maximum Power Point Tracking - MPPT) kako bi se maksimizirala iskoristivost dostupne energije.
- **Višerazinska distribucija napona:** Na modernom brodu postoji potreba za više različitih razina istosmjernog napona. Dok se za glavnu propulziju i distribuciju snage na većim plovilima sve više koristi srednjonaponska DC (MVDC) arhitektura (npr. 1 kV do 10 kV), za napajanje upravljačkih sustava, navigacijske opreme, rasvjete i sustava za hitne slučajeve potrebni su standardni niskonaponski DC (LVDC) naponi, kao što su 24 V ili 48 V. DC/DC pretvarači omogućuju učinkovitu i preciznu pretvorbu s MVDC razine na potrebne LVDC razine, eliminirajući potrebu za višestrukim odvojenim mrežama i pripadajućom opremom.

Analiza topologija DC/DC Pretvarača

Odabir odgovarajuće topologije DC/DC pretvarača ovisi o specifičnim zahtjevima aplikacije, kao što su snaga, naponski omjer, potreba za galvanskom izolacijom i cijena.

▪ Neizolirane topologije

Ove topologije su jednostavnije i učinkovitije, ali ne pružaju galvansku izolaciju, što ih čini manje pogodnima za visokonaponske primjene.

- **Standardni dvosmjerni Buck-Boost:** Temeljna topologija s minimalnim brojem komponenti, ali ograničena na niže snage zbog visokog naponskog stresa i potrebe za velikim filtrima.
- **Višerazinske i "Interleaved" topologije:** Naprednije strukture koje rješavaju nedostatke osnovnog buck-boost pretvarača. Paralelnim spajanjem više jedinica ("interleaving") smanjuje se valovitost struje i toplinsko opterećenje, dok višerazinske topologije smanjuju naponski stres, čineći ih pogodnima za više napone.

• Izolirane Topologije

Obavezne su za primjene visoke snage i napona, poput povezivanja baterija na MVDC sabirnice, jer galvanska izolacija osigurava sigurnost osoblja i zaštitu opreme.

- **Dual Active Bridge (DAB):** Industrijski standard za dvosmjerne aplikacije visoke snage. Sastoji se od dva H-mosta povezana visokofrekventnim transformatorom. Ključne prednosti su mu galvanska izolacija, visoka gustoća snage i mogućnost mekog prekapčanja (ZVS), što smanjuje gubitke i povećava učinkovitost. Međutim, visoka učinkovitost DAB-a ostvaruje se samo u uskom rasponu napona i opterećenja. Izvan tog raspona, gubi se ZVS, što dovodi do većih gubitaka. Budući da napon brodske baterije i opterećenje značajno variraju, pravi izazov je u primjeni naprednih modulacijskih strategija koje proširuju područje učinkovitog rada.
- **Rezonantni pretvarači (npr. LLC):** Koriste rezonantni krug za postizanje vrlo visoke učinkovitosti u širokom rasponu opterećenja. Ipak, obično su optimizirani za uzak raspon napona, što može biti ograničenje za baterijske sustave.

Tablica 2.5: *Usporedna tablica topologija DC/DC pretvarača za pomorske primjene*

Topologija	Galvanska Izolacija	Tipična Snaga	Učinkovitost (%)	Gustoća Snage	Složenost Upravljanja	Ključne Prednosti	Glavni Nedostaci
Dvosmjerni Buck-Boost	Ne	< 10 kW	95-97	Srednja	Niska	Jednostavnost, niska cijena, malo komponenti	Visok naponski stres, diskontinuirana struja
Interleaved Buck-Boost	Ne	< 100 kW	96-98	Visoka	Srednja	Smanjena valovitost struje, veća gustoća snage	Veći broj komponenti, složenije upravljanje
Dual Active Bridge (DAB)	Da	> 50 kW - MW	96-98.5	Vrlo visoka	Visoka	Dvosmjernost, izolacija, ZVS, visoka gustoća snage	Ograničen ZVS raspon, povratna snaga, složena modulacija
Rezonantni (LLC)	Da	< 200 kW	> 98	Vrlo visoka	Srednja	Iznimno visoka učinkovitost, ZVS/ZCS	Ograničen naponski raspon, obično jednosmjernan

2.6.2 AC/DC Pretvarači

AC/DC pretvarači, poznatiji kao ispravljači, predstavljaju ključno sučelje između tradicionalne proizvodnje električne energije na brodu (koja je gotovo uvijek izmjenična) i modernih istosmjernih distribucijskih sustava. Njihova uloga je pretvoriti izmjeničnu struju (AC) iz dizelskih generatora ili s kopnene mreže u stabilnu istosmjernu struju (DC) za napajanje brodske mikromreže.

Primjena

- **Ispravljanje struje s glavne sabirnice:** Na brodovima s DC distribucijom, cjelokupna snaga proizvedena od strane dizelskih ili plinsko-turbinskih generatora mora se ispraviti prije nego što se dovede na glavnu DC sabirnicu. Ovi ispravljači su dimenzionirani za punu snagu brodskih generatora i predstavljaju srce sustava za proizvodnju energije.
- **Priključak na Kopnenu Mrežu ("Cold Ironing"):** Kada je brod u luci, ekološki i ekonomski je poželjno ugasiti vlastite motore i napajati se s lokalne kopnene mreže. Ovaj proces, poznat kao "cold ironing", zahtijeva AC/DC pretvarač koji može prihvatiti kopnenu mrežu (obično 50 Hz ili 60 Hz na različitim naponskim razinama) i pretvoriti je u istosmjerni napon koji odgovara brodskoj mreži.
- **Namjenski Punjači:** Osim glavnih ispravljača, manji AC/DC pretvarači se koriste kao namjenski punjači za različite baterijske sustave, puneći ih iz glavne izmjenične mreže broda (ako postoji) ili iz manjih pomoćnih generatora.

Usporedna analiza topologija ispravljača

Izbor topologije ispravljača ima presudan utjecaj na kvalitetu električne energije, učinkovitost, cijenu i veličinu sustava. Dvije glavne kategorije su pasivni i aktivni ispravljači.

- **Pasivni ispravljači (Diode Front End - DFE)**

Ove topologije koriste diode, pasivne poluvodičke komponente, za ispravljanje izmjeničnog napona.

- **6-pulsni diodni ispravljač:** Ovo je najjednostavnija, najjeftinija i najrobusnija topologija. Sastoji se od šest dioda u trofaznom spoju. Njegov glavni nedostatak je što povlači izrazito ne-sinusoidnu struju iz mreže, što rezultira visokim ukupnim harmonijskim izobličenjem struje (THDi), koje može prelaziti 40 %. Ovako visoki harmonici su neprihvatljivi za brodske sustave i zahtijevaju dodatne mjere filtriranja.
- **Višepulsni ispravljači (12, 18, 24-pulsni):** Kako bi se smanjilo harmonijsko izobličenje, tradicionalno se koriste i višepulsne konfiguracije. One koriste specijalne transformatore s višestrukim sekundarnim namotima koji su fazno pomaknuti. Spajanjem izlaza više 6-pulsnih ispravljača, niži harmonici (npr. 5. i 7. kod 12-pulsnog sustava) se međusobno poništavaju. 12-pulsni ispravljač može smanjiti THDi na oko 12 %, dok 24-pulsni može postići THDi ispod 5 %, što je često dovoljno za zadovoljavanje standarda [65]. Međutim, ovi sustavi su vrlo glomazni, teški i skupi zbog potrebe za velikim i složenim transformatorima, što je značajan nedostatak u pomorskim aplikacijama gdje su prostor i težina kritični.

• Aktivni ispravljači (Active Front End - AFE)

AFE ispravljači koriste aktivne, upravljive poluvodičke sklopke (obično IGBT-ove) umjesto dioda. To omogućuje potpunu kontrolu nad oblikom ulazne struje i smjerom toka snage.

- **Topologija i princip rada:** AFE je u suštini naponski DC/AC izmjenjivač koji radi "unazad". Koristeći brzu pulsno-širinsku modulaciju (PWM) i sofisticirane upravljačke algoritme, AFE može prisiliti struju koju vuče iz mreže da bude u fazi s naponom i da ima gotovo savršen sinusoidni oblik.
- **Ključne prednosti AFE-a:**
 1. **Nizak THD:** AFE može postići THDi ispod 3-5 % bez potrebe za velikim pasivnim filterima. Harmoničko izobličenje se rješava unutar samog pretvarača, a ne vanjskim komponentama.
 2. **Dvosmjerni tok snage (regeneracija):** Za razliku od DFE-a, AFE omogućuje povrat energije iz DC mreže natrag u AC mrežu. Ova sposobnost je ključna za regenerativno kočenje, gdje se kinetička energija broda prilikom usporavanja pretvara u električnu energiju putem propulzijskog motora (koji radi kao generator) i vraća u brodsku mrežu za pohranu ili korištenje.
 3. **Regulacija napona:** AFE može održavati stabilan napon na DC sabirnici čak i ako napon na AC strani (iz generatora ili kopnene mreže) varira, što povećava robusnost sustava [66].
- **Nedostaci AFE-a:** Glavni nedostaci su viša početna cijena, veća složenost upravljačkog sustava i potencijalno niža pouzdanost u usporedbi s jednostavnim diodnim ispravljačima zbog većeg broja aktivnih komponenti i složenije elektronike.

U nastavku je prikazana tablica sa primjerima glavnih proizvođača visokonaponskih pretvarača:

Tablica 2.6: Glavni proizvođači visokonaponskih ispravljača za pomorsku primjenu

Proizvod	Topologija	Proizvođač	Snaga (MVA)	Napon (V)
SINAMICS SM120	Diodni most	Siemens	4 – 13,3	3300 – 7200
SFC	Diodni most ili aktivni ispravljač	Grencisco	0,06 – 0,4	380 – 400
OVPHASE GPC	Aktivni ispravljač	Wärtsilä	0,6 – 1,5	3×260 – 458
MGE Galaxy 7000	Aktivni ispravljač	Schneider	0,45 – 0,5	380 – 440
PCS 6000	Modularni frekvencijski pretvarač	ABB	4 – 9	3300 – 4160

Kvaliteta električne energije je od presudne važnosti na brodu. Harmonici, koje generiraju nelinearna trošila poput ispravljača, mogu uzrokovati ozbiljne probleme:

- **Pregrijavanje:** Dodatne struje na harmoničkim frekvencijama uzrokuju povećane gubitke u namotima generatora, transformatora i kabela, što dovodi do njihovog pregrijavanja i smanjenja životnog vijeka.
- **Smetnje:** Harmonici mogu ometati rad osjetljive navigacijske, komunikacijske i upravljačke opreme, ugrožavajući sigurnost plovidbe.
- **Smanjenje učinkovitosti:** Pulsirajući momenti uzrokovani harmonicima mogu smanjiti učinkovitost i uzrokovati mehaničke vibracije u motorima

Zbog ovih razloga, pomorska klasifikacijska društva (npr. DNV, ABS) i međunarodni standardi, poput IEEE 519, postavljaju stroga ograničenja na razinu harmonijskog izobličenja. Standard

IEEE 519 definira limite i za ukupno harmonijsko izobličenje napona (THDv) i za strujno izobličenje (THDi) na točki zajedničkog spajanja (Point of Common Coupling - PCC). PCC je definirana kao točka u elektroenergetskom sustavu gdje se spaja više korisnika ili trošila. U brodskom kontekstu, to je obično glavna razvodna ploča ili sabirnica na koju su spojeni i nelinearna opterećenja (poput pogona) i osjetljiva linearna opterećenja.

Odluka o usvajanju DC arhitekture na brodu, ukoliko se želi postići maksimalna sistemska učinkovitost, gotovo automatski implicira potrebu za AFE ispravljačima. Dok DFE ispravljači zahtijevaju stabilnu ulaznu frekvenciju za ispravan rad svojih filtera, AFE ispravljači, zahvaljujući naprednoj kontroli, mogu raditi u širokom rasponu ulaznih frekvencija i napona [67]. Upravo ta sposobnost omogućuje realizaciju jedne od najvećih prednosti DC arhitekture: rad generatora s promjenjivom brzinom radi uštede goriva. Bez AFE-a, DC distribucija bi bila ograničena na generatore s fiksnom brzinom, čime bi se izgubio značajan dio potencijala za optimizaciju. Stoga se analiza troškova ne može svesti na jednostavnu usporedbu cijene DFE i AFE ispravljača, već mora uključiti cjelokupnu analizu životnog ciklusa koja obuhvaća i uštede goriva koje su moguće isključivo s AFE tehnologijom.

Tablica 2.7: Usporedba DFE i AFE ispravljača za pomorske sustave

Karakteristika	Pasivni Ispravljač (DFE)	Aktivni Ispravljač (AFE)
Topologija	Diodni, višepulsni transformator	IGBT sklopke, LCL filter
THDi (struja)	Visok (12-40 % za 12/6-pulsni)	Vrlo nizak (< 5 %, tipično < 3 %)
Faktor Snage	Nizak do umjeren (0.8-0.95)	Jedinični (>0.99)
Tok Snage	Jednosmjernan	Dvosmjernan (regenerativan)
Veličina i Težina	Velika (zbog transformatora/filtera)	Kompaktan

2.6.3 DC/AC Pretvarači

DC/AC pretvarači, poznatiji kao inverteri, imaju zadatak pretvoriti istosmjernu energiju s glavne brodske sabirnice u izmjeničnu energiju željenog napona i frekvencije. Oni su ključni za napajanje gotovo svih velikih izmjeničnih trošila na brodu s modernom DC distribucijskom arhitekturom.

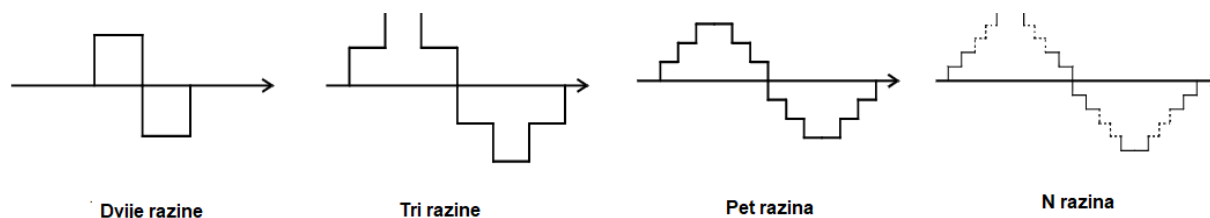
Primjena

- **Električna propulzija:** Ovo je najzahtjevnija i najznačajnija primjena invertera u pomorstvu. Inverteri snage od nekoliko megavata (MW) napajaju glavne propulzijske motore (obično asinkrone ili sinkrone s permanentnim magnetima). Ključna sposobnost ovih izmjenjivača je generiranje izmjeničnog napona s promjenjivim naponom i promjenjivom frekvencijom (Variable Voltage Variable Frequency - VVVF). To omogućuje preciznu, kontinuiranu i visoko učinkovitu kontrolu brzine i momenta propelera, što rezultira superiornom manevarabilnošću, bržim odzivom i boljom učinkovitošću u usporedbi s tradicionalnim mehaničkim pogonima s fiksnim brojem okretaja motora.
- **Pomoćna trošila:** Osim propulzije, velik dio opreme na brodu zahtijeva izmjenično napajanje. To uključuje sustave klimatizacije (HVAC), pumpe za balast i gorivo, kompresore, kuhinjsku opremu, rasvjetu i opću mrežu. Izmjenjivači manje snage napajaju ova trošila, pretvarajući DC napon sa sabirnice u standardni AC napon (npr. 440V, 60 Hz).

- **Formiranje mreže:** U sustavima gdje je DC sabirnica primarni izvor energije, izmjenjivači mogu raditi u "grid forming" načinu rada. U ovom modu, izmjenjivač ne samo da napaja trošila, već aktivno stvara i održava stabilnu, neovisnu AC podmrežu na brodu, osiguravajući konstantan napon i frekvenciju. To je ključno za osiguranje kompatibilnosti i pouzdanog rada standardne AC opreme koja nije dizajnirana za rad s varijabilnim izvorima.

Analiza višerazinskih topologija izmjenjivača srednjeg napona

Za propulzijske sustave snage više megavata, koji rade na srednjim naponima (npr. 3.3 kV, 6.6 kV), standardni dvorazinski izmjenjivači su neprikladni. Oni generiraju pravokutni izlazni napon koji sadrži visoku razinu harmonika i uzrokuje vrlo visoke naponske strmine (dV/dt). To stvara ogroman stres na izolaciju namota motora, može uzrokovati struje u ležajevima i zahtijeva velike i skupe izlazne filtere. Rješenje za ove probleme su višerazinski izmjenjivači (Multilevel Inverters - MLI) [68]. MLI koriste veći broj poluvodičkih sklopki kako bi sintetizirali izlazni napon u stepenastom obliku koji puno bolje aproksimira idealnu sinusoidu. Što je veći broj razina, to je valni oblik kvalitetniji te posljedično THD je niži. To se najbolje može vidjeti na slici 2.4.



Slika 2.4: Koncept višerazinskog invertera

Tri klasične MLI topologije dominiraju u primjenama visoke snage.

- **Neutral Point Clamped inverter:** Također poznat kao diodno upeti izmjenjivač, jedna je od najstarijih i najraširenijih MLI topologija. U svojoj osnovnoj izvedbi s tri razine koristi četiri serijski spojene sklopke po fazi i dvije diode koje spajaju središnje točke na neutralnu točku podijeljene DC sabirnice. To omogućuje generiranje tri naponske razine: $+V_{dc}/2$, 0 i $-V_{dc}/2$ [68].
 - **Prednosti:** Glavna prednost je korištenje jednog zajedničkog DC izvora, što pojednostavljuje ulazni ispravljački stupanj. Također, ima manji broj kondenzatora u usporedbi s FC topologijom.
 - **Izazovi:** Ključni izazov kod ovih izmjenjivača je održavanje balansa napona na kondenzatorima DC sabirnice, odnosno održavanje potencijala neutralne točke na nuli. Neuravnoteženost može dovesti do pojave harmonika niskog reda i prenaprezanja. Drugi problem je nejednaka raspodjela gubitaka među poluvodičima, a s povećanjem broja razina, broj potrebnih dioda eksponencijalno raste, što čini topologiju nepraktičnom za više od 5 razina [68].
- **Flying Capacitor (FC) inverter:** Ova topologija koristi "leteće" kondenzatore, koji se serijski spajaju s glavnim sklopkama kako bi se generirale dodatne naponske razine.
 - **Prednosti:** FC izmjenjivači nude redundanciju sklopkih stanja. To znači da se ista izlazna naponska razina može postići s različitim kombinacijama uključenih sklopki, što se može iskoristiti za aktivno balansiranje napona na letećim kondenzatorima.

- **Izazovi:** Glavni nedostatak je velik broj potrebnih kondenzatora, koji su često glomazni i skupi, što smanjuje ukupnu gustoću snage. Upravljanje i balansiranje napona na svim tim kondenzatorima je izuzetno složeno, posebno tijekom prijelaznih stanja.
- **Cascaded H-Bridge (CHB) inverter:** CHB topologija se temelji na serijskom spajanju više jedno-faznih H-mostova. Svaki H-most ima svoj vlastiti, izolirani DC izvor i može generirati tri naponske razine (+Vdc, 0, -Vdc). Ukupni izlazni napon faze je suma napona svih serijski spojenih ćelija.
 - **Prednosti:** Najveća prednost CHB-a je njegova modularnost [65]. Povećanje napona i broja razina jednostavno se postiže dodavanjem više identičnih ćelija u seriju. Ova modularnost donosi iznimnu pouzdanost; u slučaju kvara jedne ćelije, ona se može zaobići (bypass), a izmjenjivač može nastaviti s radom sa smanjenim brojem razina i nešto nižom snagom. Ne postoji problem balansiranja napona kao kod prethodnih topologija.
 - **Izazovi:** Glavni nedostatak je potreba za velikim brojem izoliranih DC izvora, po jedan za svaku ćeliju. To se u praksi najčešće rješava korištenjem velikog i skupog višepulsnog transformatora s višestrukim sekundarnim namotima, što povećava ukupnu masu i volumen sustava.

Modularnost CHB topologije nije samo tehnička prednost, već i logistička i operativna. Dok tehnička prednost leži u toleranciji na kvarove, što je kritično za misije gdje je pouzdanost najvažnija (npr. vojni brodovi), operativna prednost leži u pojednostavljenom održavanju. Budući da su sve ćelije identične, brod može nositi nekoliko standardiziranih, zamjenjivih H-most modula kao rezervu. Popravak se svodi na brzu zamjenu neispravnog modula, što značajno smanjuje prosječno vrijeme popravka i povećava operativnu dostupnost plovila.

Tablica 2.8: *Usporedna tablica višerazinskih topologija izmjenjivača (MLI)*

Topologija	Broj Komponenti (po fazi, 5-razina)	Potreba Za DC Izvorima	Problem Balansiranja Napona	Modularnost	Pouzdanost (Tolerancija na Kvar)	Tipična Primjena u Pomorstvu
Diode Clamped	8 sklopki, 12 dioda, 4 kondenzatora	Jedan, podijeljen	Visok (neutralna točka)	Niska	Niska	Komercijalni propulzijski pogoni
FC (Flying Capacitor)	8 sklopki, 6 kondenzatora	Jedan	Vrlo visok (leteći kondenzatori)	Srednja	Srednja	Rijetko se koristi zbog volumena
CHB (Cascaded H-Bridge)	8 sklopki, 2 kondenzatora	Dva izolirana (po fazi)	Nema	Visoka	Visoka (mogućnost bypass-a)	Vojni brodovi, zahtjevne aplikacije

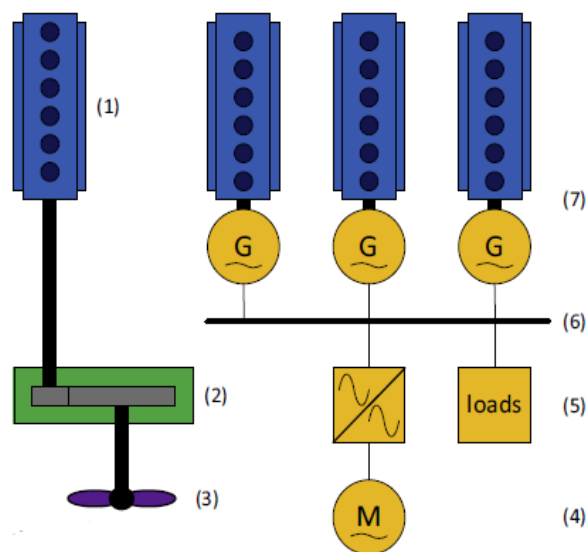
2.7 Konfiguracije pogonskih i energetske brodskih sustava

2.7.1 Mehanička propulzija

Tipična konfiguracija za moderni brod s mehaničkim pogonom prikazana je na slici 2.5 [7]. Glavni pogonski stroj (1), obično dizelski motor, pokreće propulzijski sustav (3), najčešće propeler, bilo izravno ili putem prijenosnika (2). Za proizvodnju i distribuciju električne energije za pomoćne potrošače (5), kao što su primjerice elektromotori promjenjivog broja okretaja (4), grijanje, ventilacija, klimatizacija i drugi kritični te pomoćni sustavi, potreban je odvojeni AC električni mrežni sustav (6). Dizelski, parno-turbinski ili plinsko-turbinski generatori (7) napajaju ovaj električni sustav.

Za velike teretne brodove koji koriste sporokretne dizelske motore reduktor nije potreban, a promjena smjera može se postići promjenom smjera okretanja motora. S druge strane, manji brodovi trebaju reduktor kako bi smanjili brzinu motora, jer ih pokreću srednje ili brzokretni dizelski motori. Reduktor se također može koristiti za reverziju smjera rotacije osovine. Najčešće korišteni propulzijski sustav je propeler s fiksnim korakom (*engl. Fixed pitch propeller, FPP*), koji zahtijeva reverzibilni motor ili prijenosnik za zaustavljanje i reverziju. Alternativno, vijak s upravljivim usponom (*engl. Controllable pitch propeller, CPP*) može osigurati negativni potisak za zaustavljanje i reverziju.

Mehanička propulzija je posebno je učinkovita pri projektnoj brzini, između 80 i 100 % maksimalne brzine. U tom rasponu dizelski motor radi na svojoj najefikasnijoj radnoj točki. Štoviše, mehanička propulzija uključuje samo tri stupnja pretvorbe energije: glavni motor, prijenosnik i propeler, što dovodi do niskih gubitaka pri pretvorbi energije. Budući da su ograničenja emisije NO_x za motore razina II i III izražena u g/kWh, učinkovito funkcioniranje koje vodi nižem izlazu snage također smanjuje emisiju NO_x, pri čemu treba uzeti u obzir da su ograničenja za brzokretne motore stroža nego za sporokretne motore. Konačno, kapitalni i operativni trošak sustava s mehaničkom propulzijom je nizak zbog jednostavne konstrukcije, što opravdava primjenu kod transportnih brodove. To je prikazano energetsom analizom na tankeru za teret, koji 88 % svoje energije pretvara u glavnim dizelskim motorima [69]. Ova studija zaključuje da se kod ovih tipova brodova potrošnja goriva i emisije mogu najbolje smanjiti povratom topline iz ispušnih plinova i rashladne vode kako bi se generirala pomoćna električna energija i grijanje. Međutim, usklađivanje motora s projektiranom brzinom također fiksira ponašanje postrojenja za ostatak radnog područja. CPP može dodati dodatnu slobodu kontrole uz cijenu povećanja složenosti sustava.



Slika 2.5: Klasični mehanički brodski pogonski sustav s generatorima za proizvodnju el. energije za pomoćne potrošače [7]

Unatoč prednostima, mehanička propulzija suočava se s određenim izazovima:

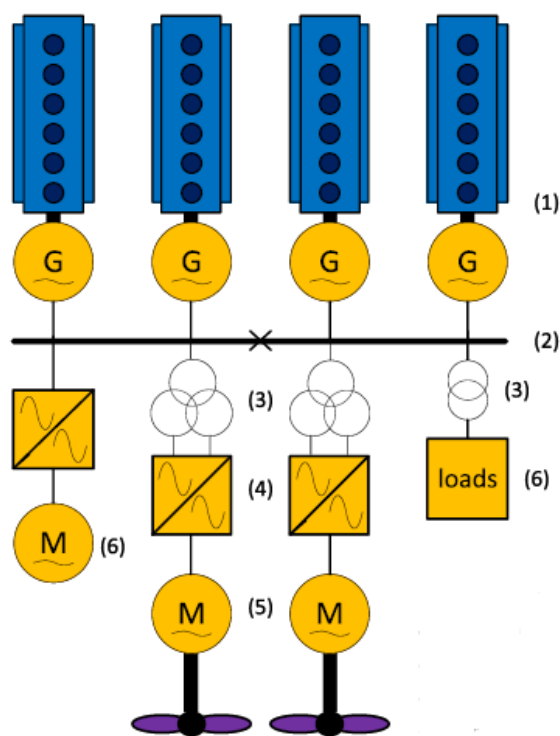
- Manevriranje je ograničeno radnim područjem motora. CPP može poboljšati manevriranje, ali ono ostaje ograničeno kako bi se spriječilo preopterećenje motora.
- Visoko statičko i dinamičko opterećenje motora može povećati potrebu za održavanjem. Primjena CPP-a s odgovarajućom kontrolnom strategijom može smanjiti statičko i dinamičko opterećenje [70].
- Mehanička propulzija ima nisku učinkovitost goriva i visoke emisije pri plovidbi brzinama ispod 70 % maksimalne brzine, budući da potrošnja goriva motora znatno raste ispod 50 % nazivne snage.
- Emisije NO_x glavnog pogonskog motora određene su njegovim radnim točkama unutar radnog područja. Istraživanje dizelskih motora u automobilske industriji pokazalo je da su emisije NO_x tijekom WLTC (*engl. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle*) ciklusa, s povećanim profilom ubrzanja, znatno veće od Euro 6 standarda od 80 mg/km. Taj trend potvrđuju mjerenja NO_x emisija provedena na istraživačkom motoru MAN4L20/27 snage 300 kW bez tehnologije smanjenja NO_x-a [71]. Osim toga, dizelska mehanička propulzija tijekom ubrzanja uzrokuje visoke emisije NO_x zbog visokih temperatura u cilindru.

Kod brodova s mehaničkom propulzijom, istraživanja su ponajviše usmjerena na različite načine kontrole opterećenja motora. Standardna strategija za brodove s propelerima fiksnog koraka uključuje regulaciju broja okretaja motora pomoću regulatora brzine, često kontroliranog PID regulatorom [70, 72]. Ova metoda, iako pruža zaštitu od prevelike brzine i gotovo linearnu vezu između postavke ručice i brzine, može dovesti do poremećaja opterećenja motora u određenim uvjetima [73]. Studije sugeriraju da robusni PID dizajn, poput onog kojeg predlaže Xiros [74], može smanjiti poremećaje predviđanjem derivacija brzine pomoću mjerenja zakretnog momenta osovine, čime se poboljšava stabilnost protiv vanjskih utjecaja poput vjetera i valova. Drugi pristup, koji su razvili Guillemette i Bussi  res [75], koristi adaptivni regulator brzine kako bi optimizirao povratni signal brzine i smanjio fluktuacije opterećenja motora, iako praktična primjena ovog pristupa još nije potvrđena. Za brodove s propelerima podesivog koraka (CPP), kombinatorke krivulje koriste se za zajedničko upravljanje kutom propelera i brzinom motora, iako imaju ograničenja u dinamičkoj prilagodbi promjenjivim uvjetima okoline, što ponekad dovodi do povećanih troškova održavanja ili smanjene učinkovitosti propulzije [76].

2.7.2 Električna propulzija

Električna propulzija postoji od ranih 1900-ih godina. Tijekom 1990-ih, električna propulzija dobila je značajan zamah u industriji kruzera. Tipična konfiguracija sustava električne propulzije prikazana je na slici 2.6. Više dizelskih generatora (1) napaja visokonaponsku električnu sabirnicu konstantne frekvencije (2). Ta sabirnica napaja motor električne propulzije (5) i opterećenje pomoćnih sustava (6), u većini slučajeva putem transformatora (3). Motor električne propulzije sastoji se od naponskog pretvarača (4) koji se koristi za kontrolu brzine osovinske linije, a time i brzine broda. Ovakvo konfiguracija donosi mnogo prednosti :

- Električna propulzija predstavlja energetski učinkovito rješenje kada pomoćni sustava uzimaju značajan dio zahtjeva za ukupnom snagom i kada je profil opterećenja raznolik, budući da se snaga generatora može koristiti i za propulziju, i za pomoćne sustave [77]. Da bi se to postiglo, sustav upravljanja energijom usklađuje broj aktivnih motora sa zahtjevima za kombiniranu propulzijsku i pomoćnu snagu. Ova strategija upravljanja osigurava da motori ne rade neučinkovito pri djelomičnom opterećenju.
- Emisije NO_x -a kod električne propulzije manji su u usporedbi s mehaničkom propulzijom, jer je propulzijska snaga pri punoj brzini broda, u većini slučajeva, raspodijeljena na više motora, koji, zbog niže pojedinačne snage, rade pri većoj brzini okretaja. Nadalje, zbog spomenutog sustava upravljanja u električnoj propulziji, dizelski generatori rade bliže optimalnoj radnoj točki, pri čemu obično proizvode manje emisija NO_x ili zahtijevaju manje mjere za smanjenje NO_x-a koje povećavaju potrošnju goriva. Osim toga, uvijek rade pri nominalnoj brzini, za razliku od motora mehaničke propulzije, koji mogu raditi i pri smanjenoj brzini pri djelomičnom opterećenju, što dovodi do većih emisija NO_x.
- Treća prednost električne propulzije je smanjen opseg održavanja, budući da se motori dijele između propulzije i pomoćnog opterećenja te se isključuju kada nisu potrebni.
- Četvrto, električna propulzija može smanjiti emitiranu buku zbog izostanka mehaničkog prijenosnog puta od motora do propelera. U tu svrhu, dizajn motora i pretvarača snage mora biti optimiran za minimalne fluktuacije momenta.



Slika 2.6: Tipični raspored elektropropulzijskog sustava [7]

Suprotno tome, električna propulzija suočava se s izazovima kao što su:

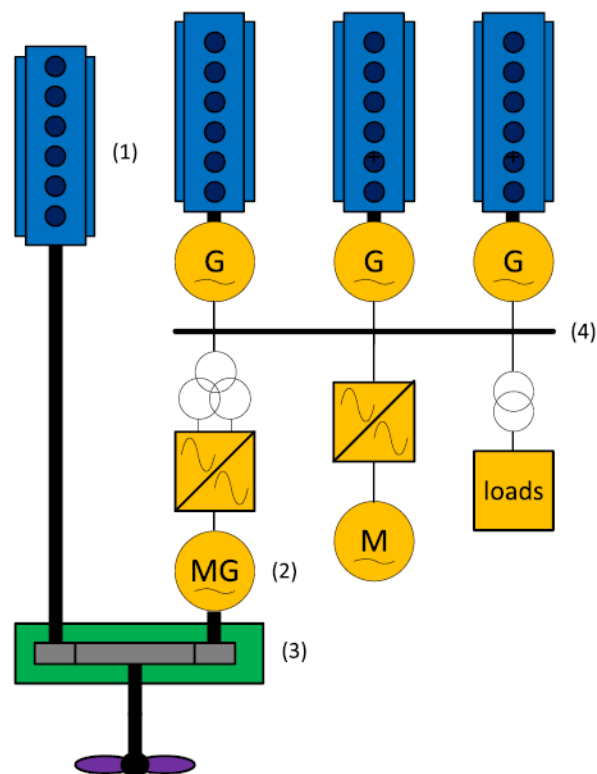
- Zbog dodatnih stupnjeva pretvorbe u energetske pretvaračima i elektromotorima, električna propulzija ima povećane gubitke. Ti gubici dovode do povećanja specifične potrošnje, osobito pri maksimalnoj brzini broda.
- Kada rade redundantni motori kako bi se postigla visoka dostupnost propulzije, što je potrebno za osjetljive manevre, motori rade pri niskom djelomičnom opterećenju. To dovodi do loše potrošnje goriva i visokih emisija.
- Većina brodova s električnom propulzijom koristi FPP, jer elektromotori s promjenjivom brzinom vožnje mogu pružiti maksimalni moment pri svakoj brzini i raditi u obrnutom smjeru. U [73] je pokazano da emitirana buka uslijed kavitacije raste u operativnim uvjetima pri fiksiranju koraka propelera i korištenju kontrole brzine, što je standardna strategija kontrole za elektromotore. Stoga, kavitacija potencijalno raste u operativnim uvjetima, osobito za električnu propulziju s propelerima fiksnog koraka i kontrolom brzine, kao i za mehaničku propulziju s FPP.
- Zbog činjenice da sva opterećenja koriste napon i frekvenciju električne mreže, dolazi do oscilacija napona i frekvencije u uvjetima kvara.

Istraživanja u području električne propulzije usmjerena su na strategije upravljanja koje omogućuju kontrolu brodske električne mreže s konstantnom frekvencijom i propulzije kako bi se održala željena brzina i smjer broda. Za kontrolu napona i frekvencije, AC mreže s konstantnom frekvencijom ponajviše koriste „droop“ kontrolu za raspodjelu aktivnog opterećenja između generatora [78]. Iako su mreže s konstantnom frekvencijom robusne, uzrokuju veću potrošnju goriva i trošenje motora zbog konstantnog rada pri nominalnoj brzini, što također utječe na emisije. Alternativna rješenja, poput mreža s promjenjivom frekvencijom, koje predlaže Simmonds, mogu uštedjeti do 5 % goriva, ali zahtijevaju specijaliziranu opremu i dodatnu pretvorbu za opterećenja s konstantnom frekvencijom [79]. Kod elektropropulzije pod primarnom kontrolom se gleda sustav održavanja stabilnog napona i frekvencije mreže, dok sustav upravljanja energijom provodi sekundarnu kontrolu, što uključuje upravljanje opterećenjem generatora, prevenciju nestanka struje i rekonfiguraciju nakon kvarova, posebno za plovila koja zahtijevaju visoke manevarske sposobnosti [80]. Napredne strategije upravljanja u stvarnom vremenu, koje su predložili Amgai i Abdelwahed [81], i praćenje snage na više različitih vremenskih razina koje predlaže Seenumani i sur. [80], pokazuju potencijal za održavanje napona i frekvencije u uvjetima kvara, premda svaka ima ograničenja u praktičnoj primjeni.

2.7.3 Hibridna propulzija

Kada pomoćno opterećenje predstavlja samo dio potrebne propulzivne snage, gubici povezani s električnom konverzijom dovode do povećane potrošnje goriva za električne propulzijske sustave [82]. Dodatna električna oprema također dovodi do povećanja težine, dimenzija i troškova. Zbog toga hibridna propulzija je idealna za brodove s promjenjivim zahtjevima snage i potreban im je fleksibilan način pogona. Ovaj sustav posebno je koristan za trajekte, tegljače i jahte, koji mogu koristiti električni pogon za smanjenje emisija i buke u ekološki osjetljivim područjima, dok dizelski motor služi za duže ili zahtjevnije vožnje [83].

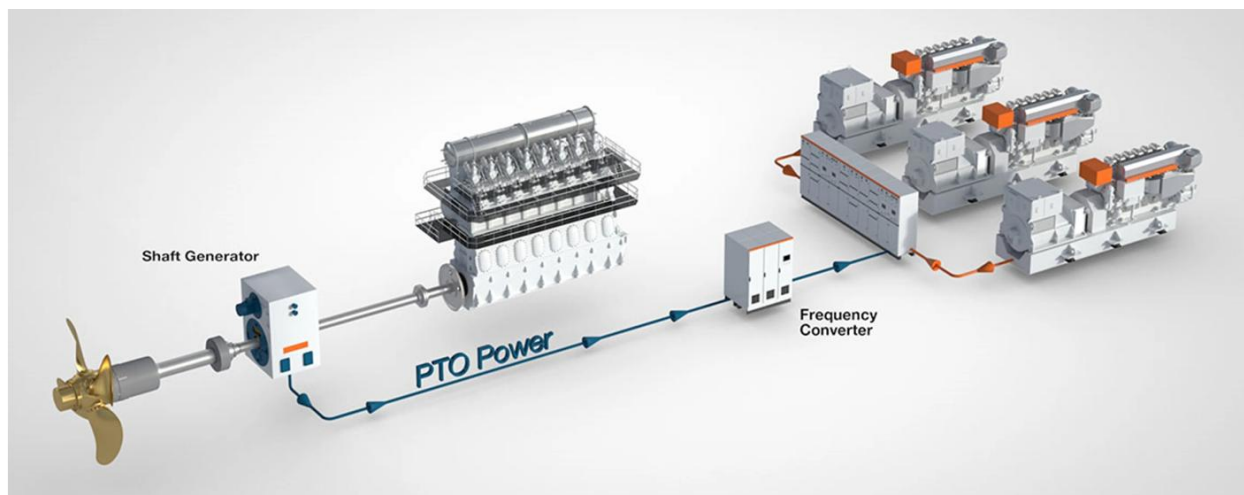
U hibridnoj propulziji, glavni motor na izravan mehanički pogon (1) osigurava propulziju pri visokim brzinama uz visoku učinkovitost. Nadalje, električni motor (2), koji je povezan s istim vratilom preko reduktora (3) ili izravno na vratilo koje pokreće propeler, osigurava propulziju pri malim brzinama, čime se izbjegava neučinkovito korištenje glavnog motora u djelomičnom opterećenju. Prema tome, glavni motor također se može koristiti kao generator za električna opterećenja na električnoj brodskoj mreži (4). Tipičan izgled takvog hibridnog propulzijskog sustava prikazan je na slici 2.7. Kada je glavni motor mehaničkog pogona u radu, ovaj sustav omogućava kapacitet generiranja električne energije bilo iz električnog generatora ili izravno iz glavnog motora. Uobičajeno je da se kapacitet generiranja određuje temeljem pravila ili od strane operatora. Budući da je hibridna propulzija kombinacija električnog i mehaničkog pogona, ona može iskoristiti prednosti obaju sustava, koji su objašnjeni detaljno u prethodnim poglavljima. Međutim, za postizanje tih prednosti, potreban je odgovarajući dizajn, a



Slika 2.7: Tipični hibridni pogonski sustav [7]

često je potrebno napraviti kompromis između svih zahtjeva. Strategija upravljanja omogućuje optimalan kompromis i može koristiti dodatni stupanj upravljanja prijenosom električne energije iz mehaničkog pogona u brodsku električnu mrežu i obrnuto. Glavni izazov u dizajnu hibridne propulzije je uspostaviti ravnotežu između svih zahtjeva te postaviti strategiju upravljanja kako bi se postigla ta ravnoteža. Istraživanja u području hibridne propulzije usmjerena su na optimizaciju performansi i učinkovitosti u različitim radnim režimima. Wijsmuller i Hasselaar [84] analiziraju hibridnu propulziju za brodove za vuču u hitnim situacijama, pri čemu se najekonomičnija konfiguracija pokazala hibridnim sustavom s velikim i malim motorom na svakoj osovini za učinkovitu plovidbu pri patrolnim brzinama te električnom propulzijom za niske brzine. Barcellos [85] pokazuje slične prednosti za offshore brodove, gdje hibridna propulzija štedi više od 10 % goriva optimiziranjem mehaničkog sustava za tranzit i električnog sustava za potrebe dinamičkog pozicioniranja. Hibridni sustavi općenito su ekonomični kada operativni profil uključuje značajno vrijeme pri niskoj snazi, što također primjećuje de Waard [86]. Trenutno istraživanja u području strategija upravljanja hibridnom propulzijom ponajviše se bace slučajem gdje je elektromotor montiran direktno na glavnu osovinu gdje se može koristiti ili kao dodatan izvor momenta ili kao osovinski generator, ovisno o uvjetima opterećenja. Takav sustav komercijalno nudi Wärtsilä i prikazan je na slici 2.8 [87]. Sulligoi i sur. [88] demonstriraju uspješan paralelni rad generatora na osovini i dizel generatora koristeći „droop“ kontrolu, iako ovaj pristup možda ne iskorištava u

potpunosti dinamiku plinske turbine. Dodatno, Topaloglou i sur. [89] predlažu korištenje električnog momenta za smanjenje toplinskog opterećenja motora i emisije NO_x, postižući smanjenje emisija od 16 % i poboljšane performanse tijekom ubrzanja.



Slika 2.8: Wärtsilä hibridni propulzijski sustav [87]

2.7.4 Elektropropulzija s hibridnim izvorima energije

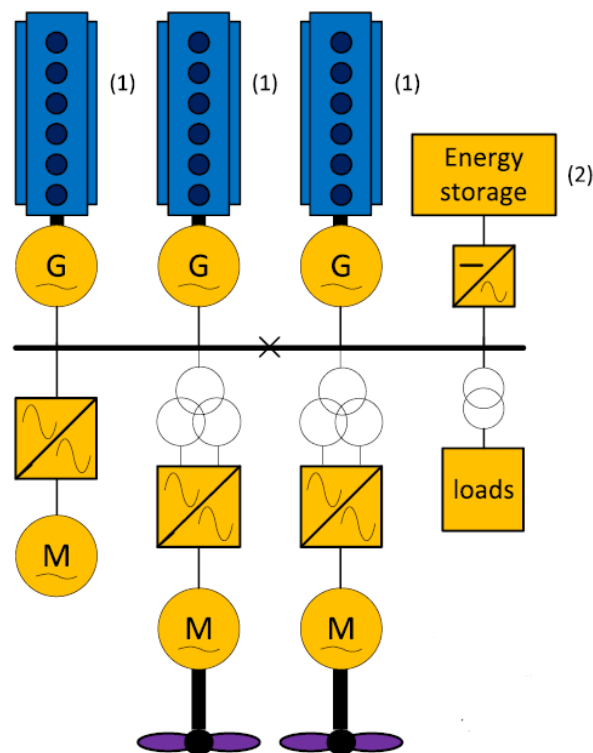
U električnoj propulziji s hibridnim izvorima energije, kombinacija dvaju ili više vrsta izvora energije može osigurati električnu energiju. Takav tipičan sustav je prikazan na slici 2.9. Klasifikacija načina proizvodnje električne energije može se napraviti na sljedeći način:

- Proizvodnja toplinskim strojevima, poput dizelskih motora (1), plinskih ili parnih turbina
- Elektrokemijska proizvodnja iz gorivnih članaka
- Napajanje iz skladištene energije putem sustava za pohranu energije (2) poput baterija, zamašnjaka ili superkondenzatora

Primjena pohrane energije i hibridnog napajanja u brodskim energetske i propulzijskim sustavima može imati višestruke koristi:

- Pohrana energije može osigurati potrebnu električnu energiju i omogućiti isključivanje jednog ili više motora kada bi radili neučinkovito pri djelomičnom opterećenju. Pohranjena energija može se zatim ponovno puniti kada motor radi u točki rada s nižom specifičnom potrošnjom goriva i manjim emisijama CO₂ i NO_x, čime se može uštedjeti gorivo, smanjiti emisije, smanjiti buka, povećati udobnost i omogućiti privremena plovidba bez emisija, buke i vibracija motora [90].
- Baterija može omogućiti poravnanje opterećenja, održavajući konstantno opterećenje motora te održavajući učinkovitiju radnu točku, dok baterija pokriva vršna opterećenja.
- Baterija može omogućiti smanjenje vršnog opterećenja; baterija isporučuje energiju u razdobljima kada je potrebna visoka snaga, a puni se kada su zahtjevi za snagom manji. Ova strategija omogućava učinkovitiji rad motora i smanjenje instalirane snage.

- Kada se baterija puni s mreže, to također može smanjiti potrošnju goriva i lokalne emisije. Ipak, potrebno je uzeti u obzir trošak i emisije proizvodnje energije iz mreže, što dovodi do daljnjih komplikacija pri izračunu potrošnje i emisija [91].
- Baterija može pohraniti regeneriranu energiju prilikom kočenja električnih motorima. U trenutnim sustavima električne propulzije ta se energija gubi u kočnim otpornicima. Iako su uštede goriva zbog pohrane energije od kočenja ograničene jer brodovi rijetko trebaju brzo stati, značajna energija može se regenerirati na brodovima s velikim kranovima te u brodovima za offshore radove [92].
- Baterija može osigurati rezervnu snagu u slučaju kvara na dizelskim generatorima. Ovo može smanjiti potrebu za radom dodatnih dizelskih motora kao rezervne snage i potencijalno smanjiti instaliranu snagu na plovilima s visokim zahtjevima za dostupnošću propulzije, primjerice na plovilima kojima je dinamičko pozicioniranje jako bitno.



Slika 2.9: Tipičan elektropropulzijski sustav s hibridnim izvorima energije [7]

Baterija u hibridnom sustavu napajanja radi paralelno s generatorima, što vodi sljedećim izazovima:

- Strategija upravljanja treba maksimizirati smanjenje potrošnje goriva i emisija, pravilnim odabirom vremena punjenja i pražnjenja baterije.
- Fluktuacije opterećenja na dizelskim motorima povećavaju trošak goriva, emisije i troškove održavanja. Stoga bi strategija upravljanja idealno trebala raspodijeliti dinamičko opterećenje između baterije i dizelskog motora tako da su trošak goriva, emisije i opterećenje održavanja svih izvora energije minimizirani.
- Potrebno je smanjiti ili nadoknaditi povećane kapitalne troškove zbog ugradnje baterija smanjenjem instalirane snage dizelskih motora.

Upotreba baterija u pomorskim aplikacijama, posebno za tegljače i trajekte, brzo se širi zbog potencijalne uštede goriva i smanjenja emisija [91]. Volkerovo istraživanje [93] o hibridnim sustavima za tegljače i trajekte naglašava da ušteda goriva ovisi o operativnim profilima i minimalna je bez punjenja s obale. Trajekt MV Hallaig, s električnim pogonom i hibridnim napajanjem, postigao je uštedu goriva od 35 %: 24 % punjenjem s mreže tijekom noći, što može biti ekološki prihvatljivo uz obnovljive izvore energije, i 11 % optimiziranim upravljanjem motora i baterije [91]. Ovaj slučaj pokazuje potencijal naprednih strategija upravljanja u hibridnim

sustavima za značajno smanjenje goriva i emisija u pomorskim uvjetima. Strategije upravljanja energijom bit će detaljnije obrađene u narednim poglavljima.

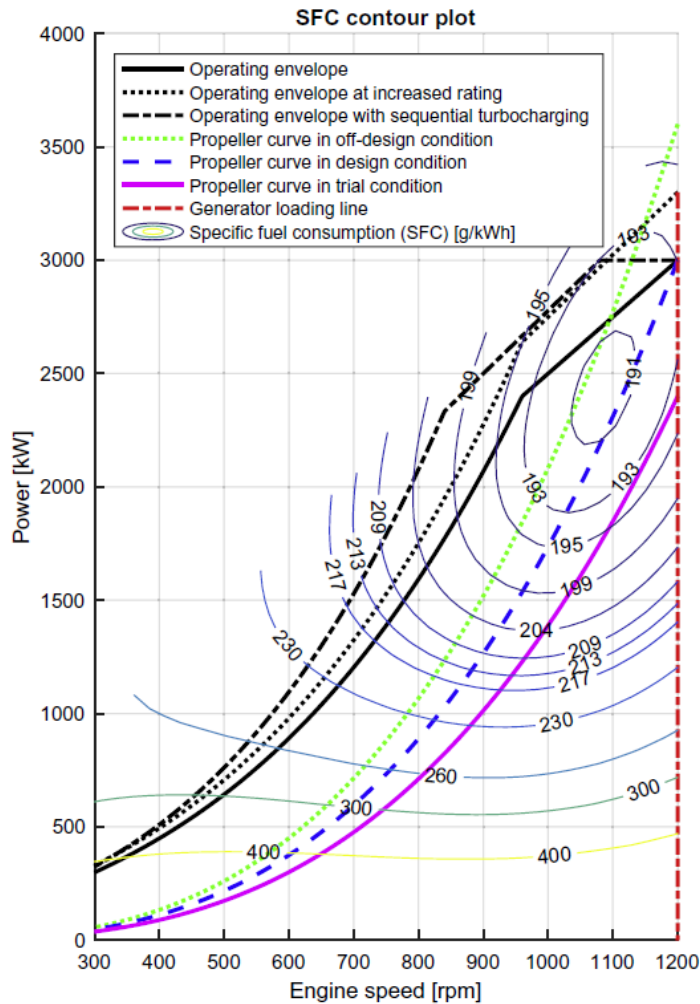
2.7.5 Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije

Hibridna propulzija s hibridnim izvorima energije koristi maksimalnu učinkovitost izravnog mehaničkog pogona i fleksibilnost kombinacije pogona s izgaranjem iz glavnog motora i pohranjene energije iz sustava za pohranu energije za električno napajanje. Pri niskoj propulzivnoj snazi dostupan je električni pogon za pokretanje broda, čime se omogućava isključivanje glavnog motora. Kao i s hibridnim pogonom, ovaj način pogona je najkompleksniji, ali pruža i najveću fleksibilnost jer kombinira sve prednosti navedene u poglavlju o sustavima s hibridnom propulzijom te sve prednosti elektropropulzijskog sustava s hibridnom izvorom energije navedenog u poglavlju 2.7.4. Shematski prikaz navedene konfiguracije se može vidjeti na slici 1.1. Hibridni pogon s hibridnim napajanjem primarno je istraživani i primjenjivan na lučkim tegljačima, pri čemu je Damen isporučio prvi hibridni tegljač 2014., a jahta Savannah, koju je Feadship lansirao 2015., također koristi ovu tehnologiju [94]. Ove aplikacije pokazale su potencijal za značajno smanjenje lokalnih emisija, posebno kada se baterije pune iz obalne mreže [95]. Tehnološko sveučilište u Delftu istražilo je heurističku strategiju upravljanja temeljenu na pravilima, gdje se način rada prilagođava aktivnosti plovila (npr. vuča, prijelaz ili pripravnost) i stanju napunjenosti baterije, što pomaže optimizirati potrošnju goriva. Međutim, uštede goriva uvelike ovise o radnom profilu plovila i dimenziji komponenti, a oslanjanje na električnu energiju za puni vučni potisak može predstavljati rizike za pouzdanost. Nadalje, Grimmelijs i sur. [96] predstavili su model strategije minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) za tegljače, no ova metoda je detaljnije raspravljena u poglavlju o strategiji upravljanja energijom.

2.7.6 Elektropropulzija s DC hibridnim izvorom energije

Jedan od glavnih nedostataka električne propulzije jest povećana potrošnja goriva motora pri djelomičnom opterećenju kod rada pri konstantnoj brzini okretaja u usporedbi s motorom koji radi pri promjenjivoj brzini (poput motora s mehaničkom propulzijom) [7]. To je ilustrirano krivuljama potrošnje goriva na slici 2.10. Taj nedostatak djelomično može biti riješen uvođenjem DC (*engl. Direct current*) brodske električne mreže. Povijesno, DC sustavi su primjenjivani u specifičnim aplikacijama poput podmornica [7]. Međutim, problemi zaštite od kvarova i stabilnosti energetskog sustava ograničili su njihovu primjenu. Nastavak razvoja energetske elektronike i inteligentnih sustava za zaštitu od kvarova i osiguravanje stabilnosti sustava omogućio je širu primjenu DC sustava. Najvažniji razlozi za primjenu DC sustava su povećana učinkovitost pri djelomičnom opterećenju generatora i smanjenje gubitaka u pretvorbi energije [90]. Prednosti primjene hibridnog DC napajanja na brodovima s električnom propulzijom uključuju sljedeće:

- DC sustavi omogućuju rad dizelskog motora pri promjenjivoj broju okretaja, što potencijalno dovodi do smanjenja potrošnje goriva, emisija, buke te mehaničkog i toplinskog opterećenja motora.
- DC sustavi su otporniji na kvarove, jer energetska elektronika omogućava trenutačno upravljanje električnim varijablama, a električni kvarovi se ne šire kroz mrežu te ne remete napon i frekvenciju mreže.
- Količina i dimenzija sklopne opreme može se smanjiti kada energetska elektronika u sustavu obavlja zaštitu od kvarova [97].



Slika 2.10: Tri propelerne krivulje i linija opterećenja generatora unutar tri radna područja dizel motora s konturnim prikazom specifične potrošnje [7]

Iako DC sustavi mogu donijeti značajne koristi, sljedeći izazovi trebaju biti riješeni:

- Svi izvori energije i opterećenja moraju biti povezani na DC mrežu putem naponskog pretvarača. Ako je potrebno napajati veliki broj potrošača s konstantom frekvencijom, to može dovesti do značajnog povećanja troškova. Međutim, ako se većina ukupnog opterećenja napaja putem pogona s promjenjivim brojem okretaja, DC sustavi mogu dovesti do smanjenja troškova.
- Za omogućavanje DC konfiguracija potrebno je riješiti zaštitu od kvarova.
- Potrebna je koordinirana strategija upravljanja kako bi se riješili problemi stabilnosti i postigla optimalna izvedba

DC sustavi, kao što je već kazano, tradicionalno su se koristili u podmornicama s velikim baterijama, no sada se primjenjuju i šire. Američka mornarica koristi DC sustav na svojim razaračima DDG-1000 [98], a Kraljevska mornarica Ujedinjenog kraljevstva istraživala je DC sustave za fregate [97]. DC sustavi sada su uobičajeni na trajektima i offshore plovilima, poput MV Jaguar (2012) od

Alewijnsea i MV Edda Ferd (2013) od Siemens [94]. Prvi potpuno električni trajekt, MF Ampere, koristi DC mrežu koja se napaja isključivo iz baterija. Offshore DC sustavi obično imaju centralizirani dizajn s jednom ili dvije DC razvodne ploče, distribuirajući AC snagu putem naponskog pretvarača kako bi se osigurala lokalna stabilnost i zaštita od kvarova [97]. Luksuzne jahte također imaju koristi od DC sustava za veću udobnost i tihi električni pogon [99]. Strategije upravljanja za DC brodske sustave su prilično neistražene. Zahedi i sur. [90] predlažu strategiju optimizacije koja daje prednost učinkovitosti goriva, ostvarujući do 8 % uštede, dok Park i sur. [100] pokazuju izvedivost modela prediktivnog upravljanja u stvarnom vremenu za uravnoteženje više kriterija izvedbe.

2.8 Modeliranje komponenti hibridnih brodskih sustava

Matematičko modeliranje u svrhu računalnih simulacija je tehnika za stvaranje digitalnih replika stvarnih sustava ili procesa kako bi se proučavalo njihovo ponašanje u kontroliranim uvjetima. Ova metoda omogućava testiranje i eksperimentiranje bez utjecaja na stvarni sustav, što je korisno kada bi eksperimentiranje u stvarnom životu bilo preskupo, rizično ili tehnički izazovno. U simulacijama je važno pronaći ravnotežu između složenosti, vremena i točnosti. Najšire korištena metoda za modeliranje komponenata je pristup temeljen na fizikalnim zakonitostima [101]. Ti modeli prikazani su matematičkim jednadžbama s poznatim ulazno-izlaznim odnosima. Međutim, u složenijim sustavima može biti izazovno i vremenski zahtjevno prepoznati te odnose. Drugi pristup, koji ubrzano dobiva na popularnosti, jest metoda modeliranja temeljena na obradi podataka. Ovim pristupom moguće je modelirati komponente bez potpunog razumijevanja sustava, njegovih unutarnjih parametara i temeljnih fizikalnih zakonitosti, već se umjesto toga oslanja isključivo na podatke. Ipak, ovakav pristup može dati fizikalno nekonzistentne rezultate ako nisu pravilno implementirani [102].

2.8.1 Modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima

Većina studija modeliranja zasnovanih na fizikalnim zakonitostima odnosila se na dizelske električne, baterijske ili hibridne brodove s vodikom, dok se u literaturi postoji praznina u modeliranju energetske sustava s alternativnim gorivima, koji su se u posljednje vrijeme značajno razvijali. Pojednostavljeni matematički modeli i obične diferencijalne jednadžbe uglavnom su se koristili za modeliranje brodskih energetske i pogonske komponenti, dok je MATLAB/Simulink bio najčešće korišten alat za analize [16].

Bagherabadi i sur. u svom istraživanju [103] modelirali su gorivni članak s pomoćnim komponentama koristeći metodu teorije grafova kako bi istražili učinkovitost i dinamički odziv sustava za različite dimenzije i topologije komponenti. Model je imao mogućnost rada u stvarnom vremenu te je mogao pratiti dinamiku gorivnog članka uz skaliranje raspona snage

Balestra i Schjøberg [104] modelirali su pogonski sustav trajekta na vodik, kombinirajući podatke o stvarnom radu i dinamičke modele komponenti u Simulinku, uz korištenje ode3 (Bogacki-Shampine) solvera. Proučavali su učinke dimenzija komponenti na strategiju upravljanja energijom temeljenu na pravilima, kao i obrnute učinke. Razvijeni matematički model pokazao se kao robustan i skalabilan, te primjenjiv za sustave do 10 MW.

Donnarumma i sur. [105] prikazali su model pojednostavljenog električnog energetske sustava, pri čemu su uzeli u obzir elektromehaničko ponašanje dinamičkog odnosa snage i frekvencije. Budući da se dinamika plovila i električnog sustava razlikovala, sustavi s krutim običnim diferencijalnim jednadžbama integrirani su u vremensku simulacijsku platformu s kraćim vremenskim koracima. Model je imao mogućnost rada u stvarnom vremenu i koristio se za proučavanje ponašanja plovila u zahtjevnim radnim uvjetima.

Zhu i sur. [106] su također razmatrali elektromehaničku dinamiku za matematičko modeliranje DC-baziranog brodskog distribucijskog sustava na razini sustava. Za predloženu metodu modeliranja smanjenog reda i prosječne vrijednosti korišten je solver s promjenjivim korakom ode15s, čime su postigli visoku računalnu učinkovitost simulacija uz dovoljnu točnost za stacionarne i prolazne operacije, omogućujući prilagodbu i drugim sustavima.

Abrougui i sur. [107] koristili su MATLAB/Simulink za rješavanje običnih diferencijalnih jednadžbi za pogonske komponente električnog broda, gdje su jednadžbe električnog stroja bile pojednostavljene, te je brzo i precizno pokazano da nije došlo do prekoračenja u brzini naprijed broda i brzini vrtnje električnog motora.

Zhu i Dong [108] su u svom istraživanju koristili MATLAB/Simulink i SimPowerSystems za rješavanje temeljnih jednadžbi dinamičkih komponenti AC distribucijskog sustava za dizelski električni trajekt. Parametri komponenti određeni su na temelju podataka proizvođača, a smanjenje potrošnje goriva i troškova energije prikazano je usporedbama s konvencionalnim verzijama trajekta.

Hemdani i sur. [109] analizirali su različite serijske i paralelne konfiguracije pogonskog sustava s gorivnim člankom, generatorom, baterijama i solarnim panelima. Sveukupni model bio je četvrtog reda, nelinearan i multivarijabilan; potrebna snaga procijenjena je rješavanjem diferencijalnih jednadžbi pogonskog sustava, pri čemu je potvrđeno pravilno funkcioniranje sustava u različitim topologijama.

ovi fizikalni pristup modeliranju, kojim se nastojalo izbjeći dugotrajno rješavanje simulacija složenih međusobno povezanih energetske sustava, bila je kosimulacija korištenjem tzv. Functional Mockup Interface standarda [110]. Korištenjem ovog standarda modeli se mogu rješavati neovisno koristeći vlastite solvere i lokalne vremenske korake, različite metode modeliranja i alate, no simuliraju se zajedno u istom digitalnom okruženju, čime je postignuto značajno smanjenje vremena simulacije uz zadržavanje željene točnosti. Perabo i sur. [111] su odvojeno modelirali komponente AC-baziranog dizelskog električnog plovila u MATLAB/Simulink-u, dok je simulacija integriranog pogonskog sustava provedena na platformi Open Simulation. Korišteni su solveri prvog reda Eulera za električne komponente i četvrtog reda Runge-Kutta za motore i propelere, a rezultati su dobiveni nakon 8 minuta uz gotovo identičnu točnost kao kod monolitne simulacije.

U radu [112] kosimulacijom je modeliran hibridni DC sustav s baterijama i dizelskim generatorima, pri čemu su komponente i njihovi kontroleri podijeljeni u različite funkcionalne modele (FMU) prema potrebnoj razini točnosti. Eulerov solver prvog reda i Runge-Kutta solver četvrtog reda korišteni su u ovom procesu. Rezultati dinamičkih opterećenja uspoređeni su s [113], gdje je monolitna simulacija izvedena u MATLAB/Simulinku za isti sustav korištenjem metode teorije grafova, te se pokazalo da su rezultati kosimulacijom dobiveni brže, bez gubitka točnosti. Razvijeni model hibridnog energetske sustava mogao se koristiti za virtualno testiranje u stvarnom vremenu.

Skjong i sur. [114] također su koristili kosimulaciju, koristeći Euler i Runge-Kutta metode integracije za različite funkcionalne modele, pri čemu su istraživali hidrodinamičke performanse brodova u različitim uvjetima. Tablica 2.9 prikazuje sažeti pregled radova koji su koristili modele temeljene na fizikalnim zakonitostima.

Tablica 2.9: Pregled radova koji su koristili modele temeljene na fizikalnim zakonitostima

Ref.	Autori	Opis modela	Alat/Metoda	Fokus istraživanja
[90]	Mylonopoulos i sur.	Pregled modeliranja i optimizacije brodskih energetske sustava	MATLAB/Simulink	Analiza modeliranja brodskih energetske sustava s alternativnim gorivima
[91]	Bagherabadi i sur.	Model gorivnog članka s pomoćnim komponentama koristeći teoriju grafova	Nepoznat	Istraživanje učinkovitosti i dinamičkog odziva za različite dimenzije i topologije
[92]	Balestra i Schjølberg	Model pogonskog sustava trajekta na vodik u Simulinku	MATLAB/Simulink (ode3 solver)	Učinci dimenzija komponenti na EMS temeljen na pravilima

[93]	Donnarumma i sur.	Pojednostavljeni model električnog energetskog sustava s elektromehaničkim ponašanjem	Nepoznat	Dinamički odnos snage i frekvencije u zahtjevnim uvjetima
[94]	Zhu i sur.	Modeliranje DC-baziranog brodskog distribucijskog sustava	Solver s promjenjivim korakom ode15s	Visoka računalna učinkovitost za stacionarne i prolazne operacije
[95]	Abrougui i sur.	MATLAB/Simulink za modeliranje pogonskih komponenti električnog broda	MATLAB/Simulink	Precizno praćenje brzine naprijed i brzine vrtnje električnog motora
[96]	Zhu i Dong	AC distribucijski sustav za dizelski električni trajekt	MATLAB/Simulink, SimPowerSystems	Ušteda goriva i energije u odnosu na konvencionalne trajekte
[97]	Hemdana i sur.	Serijske i paralelne konfiguracije pogonskog sustava s gorivnim člankom i solarnim panelima	Nepoznat	Funkcioniranje sustava u različitim topologijama
[98]	Gomes i sur.	Kosimulacija pomoću Functional Mockup Interface standarda	Functional Mockup Interface standard	Smanjenje vremena simulacije zadržavajući točnost
[99]	Perabo i sur.	Modeliranje komponenti AC-baziranog dizelskog električnog plovila u MATLAB/Simulink-u i Open Simulation	MATLAB/Simulink, Open Simulation	Integrirana simulacija s Eulerovim i Runge-Kutta solverima
[100]	Ghimire i sur.	Kosimulacija hibridnog DC sustava s baterijama i dizelskim generatorima	Euler i Runge-Kutta solveri	Brža simulacija uz očuvanje točnosti u usporedbi s monolitnom simulacijom
[101]	Ghimire i sur.	Monolitna simulacija hibridnog sustava koristeći teoriju grafova	MATLAB/Simulink	Usporedba s kosimulacijom
[102]	Skjong i sur.	Hidrodinamičke performanse brodova u različitim uvjetima koristeći kosimulaciju	Euler i Runge-Kutta metode integracije	Performanse brodskih sustava u različitim uvjetima

2.8.2 Metode temeljene na obradi podataka

Ghimire i sur. u svom radu [115] razvili su dinamičke modele pogonskog sustava temeljene na polinomima kako bi procijenili ukupnu učinkovitost, s obzirom na konvencionalne dizelsko-električne i hibridne konfiguracije baterija, uz AC ili DC distribucijske sustave. Pokazana je računalna učinkovitost metode za procjene učinkovitosti složenih energetskih sustava.

U radu Swider i sur. [116] izgradili su statistički model, tzv. Generalized Additive Model, kojim se mogla procijeniti potrebna snaga broda i njezini najutjecajni parametri za različite vremenske i valne uvjete. Takav model bio je točniji od modela temeljenog na regresiji jer je mogao uključiti nelinearne efekte.

Fang i sur. [117] predložili su metodu koja koristi ekstremni model učenja (Extreme Learning Machine) za karakterizaciju nesigurnosti fotonaponske proizvodnje energije. Neuralna mreža je trenirana kako bi predviđjala izlaznu snagu za različite uvjete temperature i solarnog zračenja duž navigacijske rute. Ova se metoda pokazala robusnom jer je omogućavala fleksibilnost u promjeni radnih uvjeta.

Postoji nekoliko studija koje su se usredotočile na predviđanje performansi broda.

Karagiannidis i Themelis [118] u svom radu trenirali su neuralne mreže korištenjem podataka s brodskih senzora kako bi procijenili snagu osovine i potrošnju goriva. Pokazali su da se poboljšanjem svijesti o stanju trupa i propelera te pažljivom filtracijom podataka preciznost modela mogla povećati za 1,5 %.

Coraddu i sur. [119] predložili su digitalni blizanac temeljen na obradi podataka za dva tankera kako bi izračunali gubitak brzine uslijed onečišćenja na trupu brodova i propeleru. Ovaj model je koristio ekstremni model učenja za otkrivanje odstupanja u brzini, pri čemu je metoda imala veću točnost predviđanja u odnosu na standardni pristup ISO 19030.

Assani i sur. [120] u svom opsežnom pregledu literature o digitalnim blizancima u pomorstvu prikazali su da je dostupno ograničeno znanje o digitalnim blizancima energetske sustava brodova temeljenih na obradi podataka te da ima prostora za napredak u tom smjeru, jer se u većini slučajeva ti modeli razvijaju na fizikalnim zakonitostima.

Postoji nekoliko studija slučaja koje su koristile metode temeljene na obradi podataka za praćenje stanja i otkrivanje grešaka u glavnim strojnim sustavima brodova.

U radu [121] razvijen je model podržanih vektora (Support Vector Machine) koji je treniran koristeći podatke iz dnevnih izvješća za normalne radne uvjete s ograničenim pretpostavkama kako bi pratio performanse dizelskog generatora u brodovima. Pokazano je da model temeljen na obradi podataka može točno razlikovati normalne i neispravne uvjete rada stroja te se može koristiti za različite energetske sustave. Modeli temeljeni na obradi podataka mogli su rano otkriti kvarove povezane s temperaturom ispušnih plinova i tlakom usisnog zraka glavnog motora, kako bi se održao energetski učinkovit rad.

Surogatni modeli temeljeni na obradi podataka također su korišteni za modeliranje složenih sustava radi postizanja dovoljno točnih rezultata uz brzu računalnu obradu. Ti su modeli obučavani podacima iz fizičkih simulacija koje su inače dugotrajne. Surogatni modeli su nedavno korišteni za optimizaciju performansi gorivnih članaka koje imaju složena, multi-fizikalna svojstva [122]. Surogatni modeli također su korišteni za modeliranje i optimizaciju baterija u električnim vozilima, posebno za njihove sustave upravljanja toplinom. Zhang i sur. [123] koristili su adaptivni Krigingov visoko dimenzionalni model za modeliranje i optimizaciju sustava upravljanja toplinom u baterijama za električna vozila. Surogatno potpomognute optimizacije također su se provodile za električne motore i pretvarače snage. Balasubramanian i sur. [124] primijenili su surogatni model drugog reda polinoma za optimizaciju dizajna indukcijskog stroja, dok su Lim i sur. [125] koristili Krigingov model za sinkroni motor s permanentnim magnetom kako bi poboljšali elektromagnetsku učinkovitost. Što se tiče naponskih pretvarača snage, u radu [126] korištena je neuralna mreža za poboljšanje učinkovitosti i smanjenja dimenzija komponenti, a u [127] provedena je surogatna globalna optimizacija za unapređenje konfiguracije naponskog pretvarača. U cjelini, za studije modeliranja energetske sustava brodova temeljene na obradi podataka, najviše su korišteni modeli strojnog učenja za procjene snage i učinkovitosti, predikcije brzine te praćenje stanja energetske sustava pod različitim endogenim i egzogenim parametrima. Tablica 2.10 prikazuje sažeti pregled radova koji su koristili metode temeljene na obradi podataka.

Tablica 2.10: Pregled radova koji su koristili metode temeljene na obradi podataka

Ref.	Autori	Opis modela/metode	Fokus istraživanja
[27]	Ghimire i sur.	Dinamički modeli pogonskog sustava temeljeni na polinomima	Procjena učinkovitosti dizelsko-električnih i hibridnih sustava
[103]	Swider i sur.	Generalized Additive Model za procjenu potrebne snage broda	Snaga broda i utjecajni parametri u vremenskim i valnim uvjetima
[104]	Fang i sur.	Extreme Learning Machine za predikciju fotonaponske energije	Fleksibilnost predikcije u promjeni radnih uvjeta

[105]	Karagiannidis i Themelis	Neuralne mreže za procjenu snage osovine i potrošnje goriva	Poboljšanje točnosti kroz filtraciju podataka
[106]	Coraddu i sur.	Digitalni blizanac za izračun gubitka brzine zbog onečišćenja	Predviđanje brzine uz veću točnost
[107]	Assani i sur.	Pregled digitalnih blizanaca u pomorstvu	Ograničeno znanje i potencijal za razvoj digitalnih blizanaca
[108]	Lazakis i sur.	Support Vector Machine za praćenje performansi dizelskog generatora	Otkrivanje normalnih i neispravnih radnih uvjeta
[109]	Li i sur.	Surogatni modeli za optimizaciju performansi gorivnih članaka	Optimizacija složenih energetske sustava
[110]	Zhang i sur.	Adaptivni Krigingov model za optimizaciju sustava upravljanja toplinom baterija	Održavanje temperaturnog raspona rada
[111]	Balasubramanian i sur.	Surogatni model za optimizaciju dizajna indukcijskog stroja	Optimizacija elektromotora
[112]	Lim i sur.	Krigingov model za sinkroni motor s permanentnim magnetom	Poboljšanje elektromagnetske učinkovitosti
[113]	Bui i sur.	Duboka neuronska mreža za optimizaciju komponenti pretvarača snage	Optimizacija dimenzija komponenti
[114]	Rafieezadeh i sur.	Surogatna globalna optimizacija za konfiguraciju pretvarača snage	Unapređenje konfiguracije pretvarača

2.8.3 Modeliranje baterijskog sklopa

Baterijski sklop je ključna komponenta hibridnog sustava, a njegovo modeliranje za svrhe dugoročnog dimenzioniranja mora obuhvatiti dva fundamentalna aspekta. Prvi je praćenje stanja napunjenosti (eng. *State of Charge* - *SOC*), koje služi kao primarna varijabla stanja za energetske upravljačku strategiju u stvarnom vremenu. Drugi je predviđanje degradacije, odnosno starenja baterije, što je presudno za procjenu životnog vijeka, troškova zamjene i, posljedično, ekonomske isplativosti cjelokupnog sustava.

1. Modeli za procjenu stanja napunjenosti baterije

Modeli za procjenu SOC-a moraju biti iznimno računski efikasni kako bi se mogli izvršavati u svakom koraku simulacije, omogućujući EMS-u donošenje odluka o raspodjeli snage [128].

- **Metoda brojanja kulona (Coulomb Counting)**

Najjednostavnija i najrasprostranjenija metoda za praćenje SOC-a u sistemskim simulacijama je metoda brojanja kulona. Ona se temelji na integraciji struje koja ulazi u bateriju ili izlazi iz nje. U diskretnom vremenskom obliku, jednadžba za ažuriranje SOC-a glasi:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{I_{bat} \cdot \Delta t}{Q_{bat}} \cdot \eta_{bat}(I_{bat}) \quad (2.1)$$

gdje je:

- SOC_{k+1} stanje napunjenosti u trenutnom vremenskom koraku,
- SOC_k stanje napunjenosti u prethodnom vremenskom koraku,
- I_{bat} struja baterije (pozitivna za pražnjenje, negativna za punjenje) u amperima,
- Δt trajanje vremenskog koraka u sekundama,

- Q_{bat} trenutni kapacitet baterije u Amper-sekundama (As),
- η_{bat} kulonska učinkovitost, koja ovisi o smjeru struje.

U praksi se često koristi pojednostavljeni model učinkovitost, gdje se za pražnjenje uzima $\eta_{bat}=1$, a za punjenje vrijednost nešto manja od 1 (npr. 0.9 do 0.99) kako bi se obuhvatili gubici vezani uz sporedne kemijske reakcije. Glavni nedostatak ove metode je njezina osjetljivost na pogreške u mjerenju struje i nepoznavanje točnog početnog stanja SOC-a. Tijekom dugotrajnih simulacija, ove male pogreške se akumuliraju i mogu dovesti do značajnog odstupanja procijenjenog SOC-a od stvarne vrijednosti.

• Modeli temeljeni na ekvivalentnim električnim krugovima (ECM)

Dok metoda brojanja kulona prati promjenu SOC-a, ona ne pruža informaciju o naponu i struji baterije pri zadanom zahtjevu za snagom. EMS tipično definira snagu (P_{bat}) koju baterija treba isporučiti ili apsorbirati. Za izračun struje (I_{bat}), koja je potrebna za metodu brojanja kulona, koriste se modeli ekvivalentnih električnih krugova (ECM). Najjednostavniji takav model, poznat kao R-int model, predstavlja bateriju kao idealni izvor napona (V_{oc}) u seriji s unutarnjim otporom (R_i). Snaga na terminalima baterije dana je izrazom $P_{bat} = V_{terminal} \cdot I_{bat} = (V_{oc} - I_{bat} \cdot R_i) \cdot I_{bat}$. Rješavanjem ove kvadratne jednadžbe po struji dobiva se [129]:

$$I_{bat}(P_{bat}) = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_i \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_i} \quad (2.2)$$

Ova jednadžba je ključna jer povezuje zahtjev za snagom, definiran od strane EMS-a, s unutarnjim stanjem baterije i omogućuje izračun struje potrebne za ažuriranje SOC-a. Međutim, ova jednostavna formulacija skriva važnu činjenicu: parametri V_{oc} i R_i nisu konstante. U stvarnosti, napon otvorenog kruga (V_{oc}) je nelinearna funkcija stanja napunjenosti, dok je unutarnji otpor (R_i) funkcija i stanja napunjenosti i temperature. Za realističnu simulaciju, nužno je ove parametre definirati kao funkcije, najčešće putem jednodimenzionalnih ili dvodimenzionalnih preglednih tablica: $V_{oc} = f(SOC)$ i $R_i = f(SOC, T)$. Implementacija ovih ovisnosti, iako računski i dalje vrlo efikasna, zahtijeva prethodnu karakterizaciju baterijske ćelije kako bi se popunile tablice, što predstavlja važan korak u pripremi modela.

2. Modeli degradacije baterije za procjenu životnog vijeka

Degradacija baterije, koja se manifestira kao gubitak kapaciteta i porastom unutarnjeg otpora, ključan je faktor za procjenu krajnje cijene baterijskog sklopa kroz cijeli životni vijek hibridnog sustava.

Fenomen starenja je relativno spor proces koji se odvija na vremenskoj skali mjeseci i godina, za razliku od dinamike SOC-a koja se mijenja na skali sekundi i minuta. Ova razlika u vremenskim skalama omogućuje primjenu učinkovitog pristupa modeliranju. Umjesto da se jednadžbe degradacije rješavaju u svakom koraku simulacije, moguće je primijeniti pristup s dvije vremenske skale. Tijekom “brze” simulacije rada sustava, bilježe se ključni stresni faktori koji utječu na starenje (npr. C-stopa, temperatura, prosječni SOC, dubina pražnjenja). Na kraju definiranog dužeg perioda (npr. jednog dana ili tjedna), “spori” model degradacije koristi akumulirane podatke

o stresnim faktorima kako bi ažurirao parametre baterije, odnosno smanjio Q_{bat} i povećao R_i . Ovaj pristup drastično smanjuje računalno opterećenje, a istovremeno vjerno obuhvaća utjecaj operativnih uvjeta na životni vijek baterije.

- **Empirijski i polu-empirijski modeli starenja**

Za sistemske simulacije najpogodniji su empirijski ili polu-empirijski modeli koji povezuju stresne faktore s mjerama degradacije. Ovi modeli često imaju fizikalno utemeljenu strukturu (npr. Arrheniusova ovisnost o temperaturi), ali se njihovi parametri određuju empirijski, prilagodbom na eksperimentalne podatke.

Model gubitka kapaciteta (Q_{loss}) često se razdvaja na dvije komponente: kalendarsko starenje (ovisno o vremenu) i cikličko starenje (ovisno o korištenju). Opći oblik modela može se izraziti na sljedeći način:

Kalendarsko starenje:

$$Q_{loss,cal} = A_{cal} \cdot \exp\left(\frac{-E_{a,cal}}{R \cdot T}\right) \cdot f(SOC) \cdot t^z \quad (2.3)$$

Cikličko starenje:

$$Q_{loss,cyc} = A_{cyc} \cdot \exp\left(\frac{-E_{a,cyc}}{R \cdot T}\right) \cdot f(DoD) \cdot (Ah_{throughput}) \quad (2.4)$$

gdje su:

- A_{cal} , A_{cyc} pred-eksponencijalni faktori,
- $E_{a,cal}$, $E_{a,cyc}$ aktivacijske energije,
- R opća plinska konstanta,
- T apsolutna temperatura,
- $f(SOC)$ i $f(DoD)$ funkcije koje opisuju ovisnost o stanju napunjenosti i dubini pražnjenja,
- t vrijeme, a z eksponent (često 0.5 za kalendarsko starenje),
- $Ah_{throughput}$ ukupni protok naboja kroz bateriju.

Ukupni gubitak kapaciteta može se modelirati kao superpozicija ili interakcija ovih dvaju mehanizama. Sličan pristup primjenjuje se i za modeliranje porasta unutarnjeg otpora ($R_{increase}$), gdje se parametri modela kalibriraju na temelju mjerenja otpora tijekom eksperimenata starenja. Ovakvi “sivi” (eng. *grey-box*) modeli predstavljaju idealan kompromis između fizikalne utemeljenosti i računalne jednostavnosti za dugoročne simulacije.

2.8.4 Modeliranje motora s unutarnjim izgaranjem

U kontekstu hibridnog pogonskog sustava, primarni cilj modeliranja motora je precizna procjena potrošnje goriva ($\dot{m}_f$) za zadanu radnu točku definiranu brzinom vrtnje (ω_e) i okretnim momentom (T_e). Potrošnja goriva je obično ključna komponenta funkcije cilja u optimizaciji upravljačke strategije i dimenzioniranja.

• Empirijski modeli

Standardni pristup u industriji i mnogim akademskim istraživanjima je korištenje statičkih mapa performansi motora. Mapa specifične potrošnje goriva (eng. *Brake Specific Fuel Consumption - BSFC*) je 2D pregledna tablica koja daje vrijednost BSFC-a (u g/kWh) kao funkciju brzine vrtnje i okretnog momenta. Maseni protok goriva ($\dot{m}_f$) tada se jednostavno računa kao:

$$\dot{m}_f = \frac{BSFC(\omega_e, T_e) \cdot P_e}{1000 \cdot 3600} = \frac{BSFC(\omega_e, T_e) \cdot (\omega_e \cdot T_e)}{1000 \cdot 3600} \quad (2.5)$$

Alternativno, umjesto korištenja pregledne tablice i interpolacije, cijela mapa potrošnje goriva može se aproksimirati polinomnom funkcijom visokog reda:

$$\dot{m}_f(\omega_e, T_e) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m c_{ij} \cdot \omega_e^i \cdot T_e^j \quad (2.6)$$

gdje se koeficijenti c_{ij} određuju prilagodbom (eng. *fitting*) na eksperimentalne podatke.

Prednost oba pristupa je njihova iznimna računalna efikasnost i visoka točnost, pod uvjetom da su podaci dobiveni preciznim mjerenjima na dinamometru. Iako se naizgled čini da je ključno ograničenje ovog pristupa njegova vezanost uz jedan konkretan motor, problem se time ne svodi nužno na strogo diskretni odabir.

U praksi, motori unutar iste tehnološke generacije i kategorije (npr. sporokretni, srednjekretni ili brzokretni) pokazuju vrlo slične karakteristike specifične potrošnje goriva (SFC), posebice kada rade u definiranim režimima poput propellerske krivulje ili konstantne brzine vrtnje. Zbog te uniformnosti, odabrana SFC mapa ne predstavlja isključivo jedan motor, već služi kao reprezentativni model za čitavu klasu motora. Na taj način, pristup zadržava visoku razinu generalizacije, omogućujući analizu koja vrijedi za širi spektar motora sličnih svojstava, umjesto da bude ograničena na jedan jedini model.

• Willansove linije

Za prevladavanje problema skalabilnosti, razvijeni su polu-fizikalni modeli koji opisuju potrošnju goriva na temelju fizikalnih parametara motora. Jedan od najuspješnijih i najčešće korištenih pristupa je model temeljen na Willansovim linijama, koji uspostavlja linearnu vezu između ulazne kemijske energije goriva i izlazne mehaničke energije [129].

Model se temelji na konceptu srednjeg efektivnog tlaka (p_{me}), koji je proporcionalan izlaznom momentu, i srednjeg tlaka goriva (p_{ma}), koji je proporcionalan masenom protoku goriva po ciklusu. Osnovna jednadžba modela glasi [2]:

$$p_{me} = e \cdot p_{ma} - p_{mloss} \quad (2.7)$$

gdje je e interna učinkovitost motora, a p_{mloss} predstavlja srednji tlak gubitaka (uglavnom zbog trenja). Ovi tlakovi su definirani kao [2]:

$$p_{me} = \frac{T_e \cdot 4\pi}{V_d} \quad \text{i} \quad p_{ma} = \frac{Q_{lhw} \cdot \dot{m}_f}{\omega_e} \cdot \frac{4\pi}{V_d} \quad (2.8)$$

gdje je V_d zapremina motora, a Q_{lhv} donja ogrjevna vrijednost goriva. Ključna prednost modela leži u parametrizaciji učinkovitosti i gubitaka kao funkcija srednje brzine klipa ($c_m = \frac{S \cdot \omega_e}{\pi}$, gdje je S hod klipa), što omogućuje skaliranje [2]:

$$p_{me} = [e_0(c_m) - e_1(c_m) \cdot p_{ma}] \cdot p_{ma} - p_{mloss}(c_m) \quad (2.9)$$

$$e_1(c_m) = e_{10} + e_{11} \cdot c_m \quad (2.10)$$

$$e_0(c_m) = e_{00} + e_{01} \cdot c_m + e_{02} \cdot c_m^2 \quad (2.11)$$

$$p_{mloss}(c_m) = p_{mloss0} + p_{mloss2} \cdot c_m^2, \quad (2.12)$$

Parametri $p_{mloss0}, p_{mloss2}, e_{00}, e_{01}, e_{02}, e_{10}, e_{11}$ su bezdimenzijski koeficijenti koji ostaju nepromijenjeni za motore iste tehnološke generacije i tipa (npr. četverotaktni dizelski motor s turbopunjačem). [2]

Ova karakteristika čini model iznimno pogodnim za optimizaciju dimenzioniranja. Veličina motora, predstavljena zapreminom V_d i hodom klipa S , eksplicitno se pojavljuje u jednadžbama kao parametar. To omogućuje optimizacijskom algoritmu da kontinuirano mijenja veličinu motora jednostavnim promjenom vrijednosti V_d , dok osnovna fizikalna parametrizacija (koeficijenti $p_{mloss,k}$ i e_{ij}) ostaje ista. Iako je ovaj model računalno najbrži, njegova primjena u praksi je često ograničena zbog teške dostupnosti bezdimenzijskih parametara potrebnih za skaliranje i kalibraciju modela. Za razliku od SFC mapa koje su relativno standardizirani podatak, parametri za Willansov model često zahtijevaju detaljna interna mjerenja koja nisu javno dostupna, te zbog toga su ovom istraživanju odabrane standardne SFC mape. Odluka za korištenjem ovog pristupa temelji se na prioritetu točnosti i vjernosti modela u odnosu na teorijsku skalabilnost. Budući da se istraživanje fokusira na usporedbu nekoliko definiranih i realnih kategorija motora (sporokretnih, srednjekretnih i brzokretnih), primjena dediceranih SFC mapa za svaku od njih predstavlja najpouzdaniju metodu.

Time se osigurava da su sve specifičnosti vezane za efikasnost pojedinog tipa motora ispravno obuhvaćene, što je ključno za realističnu procjenu performansi cjelokupnog hibridnog sustava. Korištenje provjerenih podataka o performansama smanjuje neizvjesnost modela i jača pouzdanost konačnih rezultata.

2.9 Integrirane metode dimenzioniranja i upravljanja energijom brodskih energetske sustava

Kao što je već prije kazano, hibridni sustavi obećavaju značajno smanjenje potrošnje goriva i emisija stakleničkih plinova, nudeći veću operativnu fleksibilnost u usporedbi s konvencionalnim pogonima. Međutim, temeljni izazov leži u činjenici da performanse hibridnog sustava nisu samo funkcija kvalitete njegovih pojedinačnih komponenti. One su kritično ovisne o sinergiji između početnog dizajna sustava, odnosno dimenzioniranja komponenti, i njegove operativne kontrole, tj. strategije upravljanja energijom. Tretiranje dimenzioniranja i upravljanja energijom kao dva odvojena, sekvencijalna optimizacijska problema, dovodi do dokazano suboptimalnih rješenja [11]. Istinski optimalan sustav može se postići isključivo kroz simultani, integrirani optimizacijski pristup.⁷

Ovo istraživanje se stoga usredotočuje na dvostupanjski (eng. *bi-level*) optimizacijski okvir kao dominantnu metodologiju za rješavanje ovog složenog problema. Ukratko, dvostupanjska

optimizacija koristi hijerarhijsku strukturu gdje gornja razina (ili vanjska petlja) rješava problem strateškog, dugoročnog dimenzioniranja komponenti, dok donja razina (ili unutarnja petlja) upravlja operativnom, kratkoročnom raspodjelom energije u stvarnom vremenu.⁷

Optimizacija brodskog hibridnog sustava može se konceptualno podijeliti na dva temeljna, ali međusobno ovisna problema:

- **Dimenzioniranje (eng. Sizing):** Ovo je strateški problem koji se rješava u projektnoj fazi izgradnje ili rekonstrukcije plovila. Cilj je odrediti optimalni kapacitet svake komponente (npr. nazivna snaga generatora u kW, kapacitet baterije u kWh). To je tipično višeciljni optimizacijski problem, gdje se teži optimizaciji jedne ili više sljedećih funkcija cilja:
 - **Minimizacija ukupnog troška vlasništva (TCO/LCC):** Najsveobuhvatniji ekonomski cilj koji uključuje zbroj kapitalnih troškova (CAPEX - cijena komponenti i instalacije) i operativnih troškova (OPEX - troškovi goriva, održavanja, zamjene baterija i eventualnih poreza na emisije) kroz cijeli životni vijek broda.
 - **Minimizacija emisija štetnih plinova:** Fokusiran na zadovoljavanje ekoloških regulativa (npr. IMO, EEXI, CII) i smanjenje utjecaja na okoliš. Ciljevi mogu biti odvojeni za različite plinove, poput ugljičnog dioksida (CO₂), dušikovih oksida (NO_x) i sumpornih oksida (SO_x).
 - **Minimizacija potrošnje goriva:** Iako je dio TCO-a, često se postavlja kao zaseban tehnički cilj radi povećanja operativne efikasnosti i smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima.
 - **Maksimalno produljenje životnog vijeka komponenti:** Ovaj cilj se primarno odnosi na minimizaciju degradacije baterijskog sustava, što izravno utječe na troškove zamjene i pouzdanost sustava.
 - **Smanjenje buke i vibracija:** Za putničke, vojne ili istraživačke brodove, ovo može biti ključan cilj koji utječe na komfor putnika ili osjetljivost opreme.
- **Upravljanje energijom (EMS):** Ovo je operativni problem upravljanja u stvarnom vremenu (eng. *real-time*). Za zadani, fiksni set komponenti, cilj EMS-a je u svakom trenutku odrediti optimalnu raspodjelu snage između njih kako bi se zadovoljila trenutna potražnja za snagom uz minimizaciju neke funkcije cilja (npr. trenutne potrošnje goriva). U literaturi se koriste različiti modeli i strategije za EMS, a mogu se podijeliti u nekoliko glavnih kategorija:
 - **Strategije temeljene na pravilima (Rule-Based):** Najjednostavniji pristup koji koristi unaprijed definirani set pravila (npr. IF-THEN logika, *state machine*). Odluke se donose na temelju trenutnih vrijednosti, poput stanja napunjenosti baterije (SOC) i potražnje za snagom. Iako su robusne i računalno nezahtjevne, rijetko postižu optimalne rezultate.
 - **Optimizacijske strategije (Optimization-Based):** Koriste matematičke algoritme za pronalaženje optimalne raspodjele snage.
 - **Globalna optimizacija (npr. Dinamičko programiranje - DP):** Pronalazi teoretski najbolje moguće rješenje, ali zahtijeva poznavanje cjelokupnog budućeg profila opterećenja. Zbog toga nije primjenjiva u stvarnom vremenu, ali služi kao ključni **benchmark** za usporedbu drugih, praktičnijih strategija.
 - **Optimizacija u stvarnom vremenu (npr. ECMS - Equivalent Consumption Minimization Strategy):** Minimizira trenutačnu

"ekvivalentnu" potrošnju goriva, gdje se energija iz baterije preračunava u ekvivalentnu količinu goriva. Predstavlja dobar kompromis između optimalnosti i računalne izvedivosti za primjenu u stvarnom vremenu.

- **Prediktivna optimizacija (npr. MPC - Model Predictive Control):** Koristi predviđanje potražnje za snagom na kratkom budućem horizontu kako bi donijela optimalne odluke. Ovaj pristup može proaktivno upravljati stanjem baterije i efikasnije koristiti komponente, ali performanse mu ovise o točnosti predikcijskog modela.
- **Strategije temeljene na strojnom učenju (Learning-Based):** Moderna kategorija koja koristi tehnike strojnog učenja, poput *Reinforcement Learning* (RL). Ovi algoritmi "uče" optimalnu strategiju kroz interakciju sa sustavom (ili njegovom simulacijom), te se mogu prilagoditi promjenjivim uvjetima bez potrebe za preciznim matematičkim modelom sustava.

2.9.1 Strategije upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava

Implementacija strategije pametnog upravljanja energijom u stvarnom vremenu od iznimne je važnosti za brodove s hibridnim pogonom kako bi se osigurala veća učinkovitost sustava i komponenti te ekonomično, sigurno i pouzdano djelovanje. S obzirom na to da hibridni energetske sustavi sadrže više izvora energije i nekoliko potrošača, tijekom različitih vrsta operacija mogu se pojaviti različite dinamičke karakteristike. Stoga sustav upravljanja energijom (EMS) mora biti dobro organiziran i primijenjen kako bi omogućio jasan odgovor na promjenjive dinamičke zahtjeve sustava i osigurao sigurno napajanje pomoćnih sustava i pogonskih sustava broda. Primjeren EMS može poboljšati energetske učinkovitost i smanjiti potrošnju goriva kontroliranjem svakog izvora energije radi postizanja optimalnih uvjeta rada. Općenito, postoje dvije vrste EMS-a koje se mogu razmotriti za brodove: strategije temeljene na pravilima i optimizirane strategije upravljanja [130].

Najjednostavniji pristup predstavljaju strategije temeljene na pravilima (engl. *Rule-Based*). One funkcioniraju na temelju unaprijed definiranog skupa heurističkih pravila, najčešće u obliku IF-THEN logike ili dijagrama stanja (*state machine*). Odluke se donose isključivo na temelju trenutnih mjerenja, poput potražnje za snagom i stanja napunjenosti baterije (SOC). Njihove glavne prednosti su iznimna jednostavnost implementacije, robusnost i vrlo niska računalna zahtjevnost, što ih čini lakima za primjenu na standardnim brodskim kontrolerima. Međutim, njihov ključni nedostatak je suboptimalnost; budući da su isključivo reaktivne i nemaju sposobnost predviđanja, često dovode do neefikasnog korištenja komponenti, osobito u dinamičkim uvjetima plovidbe.

Na potpuno suprotnom kraju spektra nalazi se Dinamičko programiranje (DP), koje se smatra teorijskim "zlatnim standardom". Kao metoda globalne optimizacije, DP je u stanju izračunati apsolutno optimalnu sekvencu upravljačkih odluka za cjelokupnu, unaprijed poznatu misiju plovila. Upravo zbog toga, DP je nezamjenjiv akademski alat koji služi kao *benchmark* za kvantificiranje performansi i suboptimalnosti drugih, praktičnijih strategija. Njegova primjena u stvarnom vremenu je, međutim, nemoguća zbog dva temeljna ograničenja: zahtjeva za potpunim poznavanjem budućeg profila opterećenja i eksponencijalnog rasta računalne složenosti s brojem varijabli.

Kako bi se premostio jaz između jednostavnosti pravila i neprimjenjivosti DP-a, razvijene su optimizacijske strategije za rad u stvarnom vremenu. Među njima se ističu dvije: Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) i Model Predictive Control (MPC). ECMS kompleksan problem dugoročne optimizacije pojednostavljuje na niz trenutnih odluka. To

postizhe uvođenjem "ekvivalentnog faktora" koji energiju pohranjenu u bateriji pretvara u ekvivalentnu buduću potrošnju goriva, omogućujući algoritmu da u svakom koraku minimizira trenutačnu ukupnu "cijenu" energije. MPC, s druge strane, koristi proaktivni pristup. Na temelju matematičkog modela sustava i kratkoročnog predviđanja opterećenja, on rješava optimizacijski problem na pokretnom vremenskom horizontu. Time može anticipirati nadolazeće promjene i optimalno pripremiti sustav (npr. napuniti bateriju prije manevra uplovljavanja), što mu daje prednost u rukovanju složenim ograničenjima, ali uz cijenu veće računalne zahtjevnosti.

Najnoviju granicu istraživanja predstavljaju strategije temeljene na učenju, s Reinforcement Learningom (RL) kao najistaknutijim primjerom. Za razliku od prethodnih pristupa, RL ne zahtijeva eksplicitan matematički model sustava. Umjesto toga, inteligentni "agent" uči optimalnu strategiju upravljanja kroz proces pokušaja i pogrešaka, u interakciji sa stvarnim sustavom ili njegovom simulacijom. Potencijal ovog pristupa leži u njegovoj sposobnosti adaptacije na promjenjive uvjete, starenje komponenti i složene operativne obrasce koje je teško modelirati. Iako je tehnologija još u fazi razvoja i validacije za pomorske primjene, obećava stvaranje visoko autonomnih i efikasnih sustava.

U konačnici, izbor EMS-a predstavlja ključnu inženjersku odluku koja balansira između performansi, složenosti i troškova implementacije, a jasan trend u istraživanjima vodi od statičnih i reaktivnih prema inteligentnim, prediktivnim i adaptivnim sustavima.

1. Strategije temeljene na pravilima

Sustav upravljanja temeljen na pravilima je statička strategija upravljanja koja pokazuje dobru robusnost i visoku učinkovitost u stvarnom vremenu, pružajući praktična pravila upravljanja dobivena iz prethodnih iskustava i stručnog znanja. Međutim, kapaciteti optimizacije su ograničeni zbog slabog dinamičkog odgovora na promjene. Upravljanje temeljenom na pravilima često se koristi s logičkim pragovima [131], a predložene su različite strategije upravljanja istim pristupom za hibridne sustave s više izvora energije. Primjerice, hijerarhijski sustav upravljanja energijom za hibridni sustav koji se sastoji od solarnih panela, vjetroturbina, baterija i sustava gorivnih članaka prikazan je uzimajući u obzir ekonomske aspekte u radu Torreglosa i sur. [132] i bit će u nastavku detaljnije pojašnjen. Hijerarhijska strategija upravljanja uključuje glavno upravljanje usmjereno na strategiju troškova generacije i podređeno upravljanje za kaskadno upravljanje u stvarnom vremenu. Glavno upravljanje koristi skup od 10 operativnih stanja, koja se određuju prema unosima poput neto snage, stanja napunjenosti baterije (*engl. State of charge*, SOC) i razina vodikovog spremnika, koji se mogu klasificirati kao visoki (H), normalni (N) ili niski (L). Sustav radi u načinu punjenja (višak energije iz vjetroturbina i PV panela) ili načinu pražnjenja (nedostatak energije). Ekonomski kriteriji utječu na izbor izvora energije, s posebnim stanjima (2, 4, 7 i 10) koja optimiziraju troškove i održavaju SOC i razine vodika unutar granica. EMS izračunava troškove generacije i apsorpcije, uzimajući u obzir životni vijek i ekonomske parametre za komponente poput baterija, gorivnih članaka i elektrolizatora, kao i faktore poput neto sadašnje vrijednosti (NPC) i faktora serijske sadašnje vrijednosti (SPWF). Dijagram na slici 2.11 predstavlja sustav kontrole za hibridni brodski sustav koji koristi gorivne članke, baterije, elektrolizatore i vjetroturbine za upravljanje proizvodnjom i trošenjem energije. Kroz niz logičkih odluka, sustav određuje kako će se energija generirati, skladištiti ili trošiti, ovisno o trenutnim potrebama, stanju napunjenosti baterija te razini napunjenosti tanka vodika.

1. Početna točka (Start):

- Sustav započinje procjenom neto snage (P_{net}), koja je definirana kao razlika između snage opterećenja (ukupna potrošnja brodskih sustava) i ukupne snage proizvedene iz obnovljivih izvora, tj. vjetroturbine i solarnog sustava.

$$\text{Dakle: } P_{net} = P_{load} - (P_{wind} + P_{solar}) \quad (2.13)$$

- Ako je $P_{net} > 0$, to znači da postoji potreba za dodatnom snagom, i sustav prelazi u „Način punjenja“, dok u suprotnom prelazi u „Način pražnjenja“ kako bi iskoristio postojeće resurse.

2. Način punjenja:

- U načinu punjenja sustav pokušava pohraniti višak energije. Provjerava se je li maksimalna snaga punjenja baterije veća od neto snage punjenja ($P'_{ch} > P_{net}$). Ako je odgovor "DA", prebacuje se na S5 gdje je $P_{fc} = 0$ i $P_{bat} = P_{net}$.
- Ako je odgovor "NE", provjerava se SOC baterija i razina napunjenosti tanka vodika. Ovisno o različitim kombinacijama visokih i niskih razina (L ili H), prelazi se na različite strategije poput S6, S7, S8, i S9.

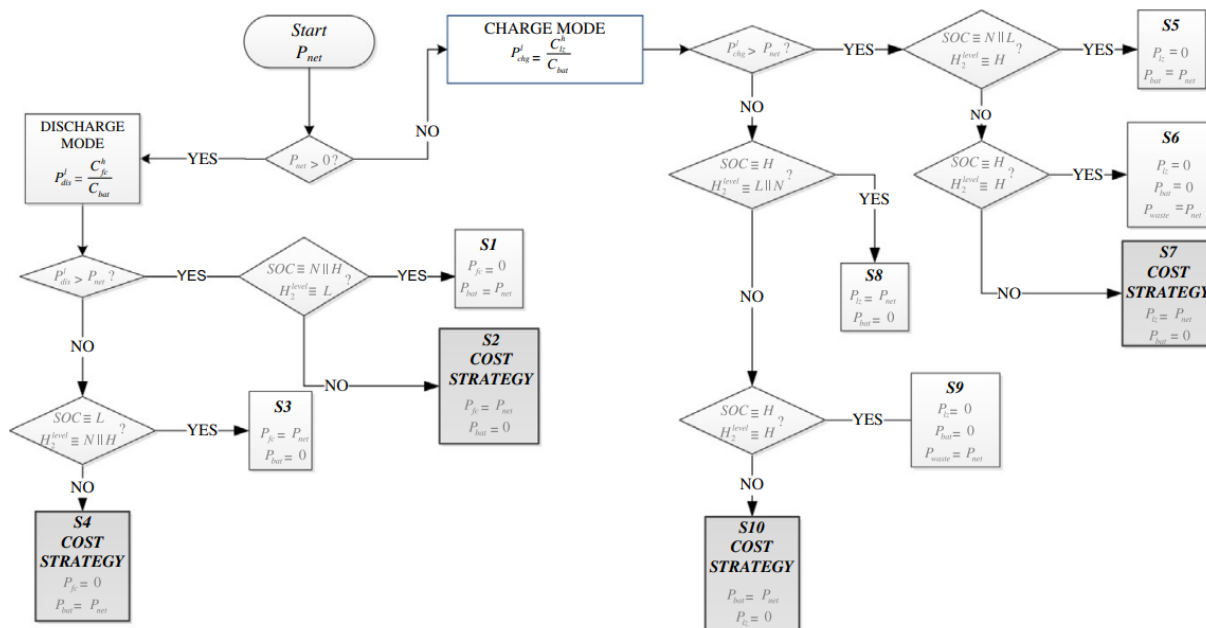
3. Način pražnjenja:

- U načinu pražnjenja sustav koristi energiju iz baterija i drugih izvora. Provjerava se je li maksimalna snaga za pražnjenje baterija manja od neto snage ($P'_{dis} > P_{net}$). Ako je odgovor "NE", sustav provjerava SOC baterija i razinu napunjenosti tanka vodika.
- Ovisno o SOC-u i H nivou, sustav koristi različite strategije, poput S1, S2, S3, i S4. Na primjer, u S2, energija se troši na način koji optimizira troškove, s $P_{fc} = P_{net}$ i $P_{bat} = 0$.

4. Strategije optimizacije troškova:

- Snage P'_{ch} i P'_{dis} izračunate su kako bi se odredilo koji će izvor generirati ili apsorbirati neto snagu, ovisno o ekonomskim kriterijima. Ovi ekonomski kriteriji definirani su u stanjima S2, S4, S7, i S10 (označeni kao "cost strategy" - strategija troškova) na dijagramu toka.
- Ostatak stanja (kao što su S1, S3, S5, S6, S8, i S9) uključen je sustav upravljanja energijom kako bi se osiguralo da SOC baterije i razina vodika u tanku ostanu unutar operativnih granica. Bez ovih stanja, sustav ne bi mogao kontrolirati napunjenost baterije niti razinu vodika u tanku.

Ovaj dijagram predstavlja automatizirani pristup gdje sustav dinamički odlučuje kako će raspodijeliti i koristiti energiju, osiguravajući ekonomičnost i trajnost sustava kroz različite načine upravljanja energijom ovisno o potrebama, stanju baterije i raspoloživoj količini vodika. Ostatak



Slika 2.11 Strategija upravljanja temeljena na pravilima iz rada Torreglosa i sur. [132]

stanja dizajniran je da zamijeni strategiju troškova u kritičnim situacijama, čime se izbjegavaju preopterećenja ili potpuno pražnjenje, osiguravajući stabilnost i pouzdanost sustava.

S druge strane, budući da strategija upravljanja temeljenom na pravilima u velikoj mjeri ovisi o iskustvu projektanta, postaje teško pronaći optimalnu točku za složenije i dinamičnije sustave. S obzirom na to da su pomorski uvjeti nepredvidivi i podložni vanjskim utjecajima poput djelovanja mora i vjetrova, složenije strategije upravljanja postaju važnije kada je potrebno upravljanje s dinamičnim vremenski varijabilnim nelinearnim problemima. Fuzzy logičko upravljanje jedna je od kontrolnih metoda koja ne zahtijeva točan matematički model uz prihvatljivu pogrešku. Razvijena je metoda upravljanja temeljenom na fuzzy logici za upravljanje energijom PV, baterijskog, dizelskog hibridnog RORO broda [133]. Kao rezultat istraživanja, postignuto je smanjenje potrošnje goriva i emisija poboljšanjem ukupnih performansi broda usporedbom stvarnih podataka broda i rezultata simulacija. Druga usporedba između EMS-a temeljenih na fuzzy logici i proporcionalno-integralnom (PI) upravljanju provedena je za sustave napajanja svih električnih brodova srednjeg napona u DC [134]. Iako oba EMS-a uspješno opskrbljuju brodski sustav napajanja pri različitim zahtjevima za energijom, fuzzy logičko upravljanje pokazalo je bolje rezultate u upravljanju stanjem napunjenosti baterija mijenjanjem stopa punjenja i pražnjenja. Međutim, uspostavljanje fuzzy pravila zahtijeva visoku stručnost u upravljanju sustavom i predikciji ponašanja. Brodovi su dinamički sustavi te ih je teško uklopiti u stabilni linearni matematički model. Slijedom toga, optimizirane strategije upravljanja mnogo su učinkovitije za brodove s više izvora energije nego strategije temeljene na pravilima, zahvaljujući svojoj osjetljivosti na različite operativne aspekte i prikladnosti za složene sustave [135].

2. Optimizirane strategije upravljanja

Optimizirana strategija upravljanja može se podijeliti u dvije kategorije: globalna optimizacija (GO) i optimizacija u stvarnom vremenu (*engl. Real-time optimization*, RTO). Prvo, globalna optimizacija koristi sve modele sustava i uvjete s teorijskom osnovom i točnim matematičkim

jednadžbama kako bi provela sveobuhvatnu optimizaciju unutar zadanog razdoblja. GO može uključivati algoritam dinamičkog programiranja (*engl. Dynamic programming algorithm*, DPA) [136], genetski algoritam (*engl. Genetic algorithm*, GA) [137], neuralnu mrežu (*engl. Artificial neural network*, ANN) [138], optimizaciju rojem čestica (*engl. Partical Swarm optimization*, PSO) [139], algoritam optimizacije kolonije mrava (*engl. Ant colony optimization algorithm*, ACOA) [140], algoritam simuliranog kaljenja [141] i algoritam diferencijalne evolucije (*engl. Differential evolution algorithm*, DEA) [142] ili druge napredne algoritme optimizacije.

DPA zahtijeva sve informacije o problemu optimizacije unaprijed. U istraživanju optimizacije rasporeda proizvodnje energije za potpuno električni brod pomoću DPA, u odnosu na operativna ograničenja poput emisija stakleničkih plinova ili rasporeda putovanja, i uz pretpostavku da se promjene opterećenja broda mogu predvidjeti, moguće je postići smanjenje operativnih troškova i emisija stakleničkih plinova [136].

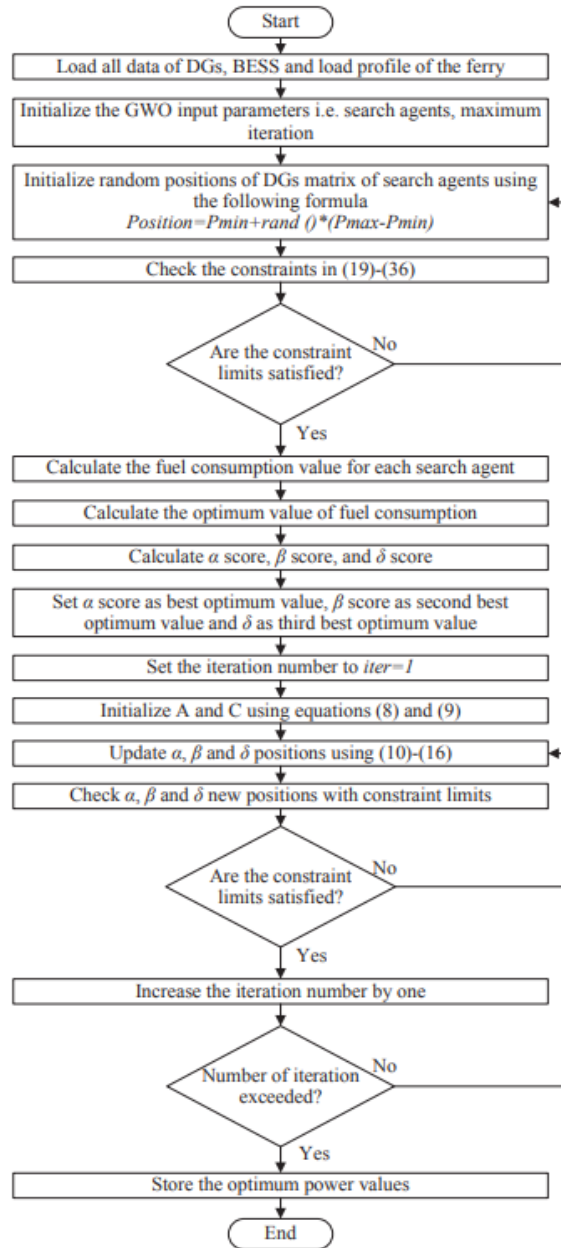
GA pokazuje svestranost i široku primjenjivost uz nisku složenost algoritma. Primjerice, u [137] predložena je GA optimizacija za smanjenje potrošnje goriva optimiziranjem raspodjele opterećenja s različitim konfiguracijama izvora energije za kruzer. Kao rezultat, hibridni sustavi pokazali su najbolje performanse među analiziranim parametrima, poput ekonomskih i okolišnih. U drugom istraživanju o optimalnom dimenzioniranju solarnih panela, sustava za pohranu energije (ESS) i dizelskih generatora korištene su dvije različite varijante PSO za tanker, uz zaključak da bez ESS-a konfiguracija solarno-dizelskog hibridnog sustava nije ekonomski izvediva [139].

U svrhu osiguravanja učinkovitosti i sigurnosti rada broda s fotonaponskim/baterijskim/dizelskim sustavima i „cold ironing“ sustavom, u radu [143] razvijen je trostupanjski idealni model upravljanja energijom i strategija upravljanja pomoću adaptivne višekontekstualne kooperativne evoluirajuće optimizacije rojem čestica. Iako predložena strategija može smanjiti troškove električne energije broda uz povećanje korištenja solarne energije, opsežan proces optimizacije zahtijeva vrlo velik obujam podataka što povećava računalno opterećenje i produžava vrijeme potrebno za dobivanje rezultata.

Al-Falahi i sur. [135] su primijenili dvije strategije upravljanja, temeljene na pravilima i na algoritmu optimizatora sivog vuka (*engl. Grey wolf optimizer*, GWO), gdje su potrošnja goriva i smanjenje emisija postavljeni kao indikatori performansi. GWO nadmašuje tradicionalnu metodu temeljenu na pravilima, koja se oslanja na unaprijed određene uvjete, u smislu smanjenja potrošnje goriva i emisija. GWO može riješiti probleme optimizacije s više ciljeva i mnogim operativnim ograničenjima, dok tradicionalne metode koriste unaprijed određene uvjete. Dijagram strategije upravljanja dobivene GWO optimizacijom prikazan je na slici 2.12 te služi za minimizaciju potrošnje goriva i raspodjelu snage za trajekt s dizel generatorima, baterijskim sustavom za pohranu energije i profilom opterećenja trajekta. Dijagram je podijeljen u nekoliko koraka:

1. **Početak i inicijalizacija** – Učitavaju se podaci o generatorima, baterijskom sustavu i profilu opterećenja trajekta. Postavljaju se parametri GWO algoritma, poput broja agenata za pretraživanje i maksimalnog broja iteracija. Agenti dobivaju početne slučajne pozicije unutar definiranih granica.
2. **Provjera ograničenja** – Provjerava se zadovoljavaju li agenti postavljena ograničenja. Ako ne zadovoljavaju, prilagođavaju se.
3. **Izračun potrošnje i optimizacija** – Izračunava se potrošnja goriva za svakog agenta, te se identificiraju najbolji agenti na temelju ocjena α , β i δ , koji predstavljaju tri najbolje pozicije.

4. **Ažuriranje pozicija i ponovna provjera ograničenja** – Na temelju pozicija najboljih agenata, svi agenti ažuriraju svoje pozicije prema formulama koje vode prema optimalnim vrijednostima, te se provjerava zadovoljavaju li nove pozicije ograničenja.
5. **Povećanje broja iteracija i provjera granice** – Broj iteracija se povećava. Ako broj iteracija prelazi zadanu granicu, proces završava.
6. **Pohrana optimalnih vrijednosti** – Na kraju, pohranjuju se optimalne vrijednosti snage koje su pronađene tijekom optimizacije.
7. **Kraj** – Algoritam završava nakon što se pohrane optimalne vrijednosti.



Slika 2.12 Dijagram strategije upravljanja dobivene GWO optimizacijom [135]

Algoritam razvijen u radu [144] uključuje metodu optimizacije fuzzy logikom s GWO (FL-GWO) kako bi se smanjili operativni troškovi hibridnog električnog trajekta. Nalazi pokazuju da predloženi FL-GWO nadmašuje GWO u uštedi goriva, s povećanjem od 3.14 % i 1.81 % u uvjetima normalnog i visokog opterećenja. Međutim, u oba rada [135, 144] nisu provedene usporedbe s drugim vrstama metaheurističkih algoritama optimizacije kako bi se dodatno potvrdila učinkovitost predloženog algoritma upravljanja.

Druga vrsta optimizirane strategije upravljanja je RTO, odnosno optimizacija u stvarnom vremenu. Ovo je strategija optimizacije koja se fokusira na trenutne uvjete energetske potražnje sustava, uspostavljanjem modela u stvarnom vremenu za potrošnju energije. Pontryaginov princip minimuma (PMP) i strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) dvije su popularne RTO tehnike. PMP koristi strategiju minimizacije globalnih problema optimizacije razdvajanjem na lokalne podprobleme kako bi se poboljšalo vrijeme odziva u proračunima sustava. Iako se PMP uglavnom koristi za hibridna električna vozila s mogućnošću vanjskog punjenja (PHEV) [145], rijetko se primjenjuje u brodarstvu.

U radu [145] istraženo je korištenje PMP-a u stvarnom vremenu za smanjenje potrošnje goriva u hibridnom vozilu na gorivne članke. Istovremeno ažuriranje funkcije upravljanja energijom u skladu s nepredviđenim dnevnim ciklusima vožnje, poput zaustavljanja i pokretanja, dinamičkog opterećenja i niske ili visoke izlazne snage, dalo je bolje rezultate od upravljanja temeljenog na pravilima. Rezultati simulacije pokazuju da je trajnost gorivnog članka poboljšana s blagim povećanjem potrošnje goriva i degradacije baterije, te da su prosječni dnevni operativni troškovi učinkovito smanjeni.

ECMS nastoji izračunati optimalne referentne točke upravljanja snagom i optimalne formulacije upravljanja kako bi se minimizirala potrošnja goriva motora [146]. Za nepoznati operativni profil HEV-a, ECMS pokazuje najbolju učinkovitost u potrošnji goriva u usporedbi s različitim strategijama upravljanja [147]. U demonstraciji ECMS-a na hibridnom trajektu postignuto je smanjenje potrošnje goriva za 10 % optimizacijom ravnoteže snage između izvora energije [42]. ECMS metoda će detaljnije biti objašnjena u sljedećem poglavlju.

Primjena ACOA algoritma s strategijom minimizacije ekvivalentne potrošnje ECMS na dizelsko-električni hibridni brod analizirana je s ciljem smanjenja potrošnje goriva i fluktuacija stanja napunjenosti baterije u [140]. EMS temeljen na ACOA gotovo je udvostručio učinkovitost u odnosu na strategiju temeljenu na pravilima, smanjujući potrošnju goriva za 6.9 % do 12.1 %.

U radu [90] predložen je algoritam optimizacije za određivanje optimalnih uvjeta opterećenja radi smanjenja potrošnje goriva hibridnog pogonskog sustava brodova. Proučavani sustav uključivao je dizelske motore, sinkroni generator, ispravljačke jedinice i Li-Ion bateriju kao pohranu energije. Rezultirajuća potrošnja goriva u simulaciji uspoređena je s onom konvencionalnog sustava s izmjeničnom strujom, kao i s istosmjernim sustavom napajanja bez pohrane energije. Rezultati pokazuju da dok istosmjerni sustav bez pohrane energije pruža primjetnu uštedu goriva u usporedbi s konvencionalnim izmjeničnim sustavom (15 % uštede goriva), dok optimalno korištenje pohrane energije u istosmjernom sustavu može rezultirati s dodatnih 7 % uštede u odnosu na istosmjerni sustav bez pohrane energije.

U radu [148] predložen je EMS temeljen na Double Q learning modelu. Double Q model se trenirao korištenjem stohastičkih profila snage prikupljenih kontinuiranim praćenjem putničkog trajekta, koristeći plug-in hibridni model sastavljen od gorivnih članaka i baterijskog propulzijskog sustava. Strategije upravljanja energijom koje je generirao model potvrđene su pomoću drugog testnog skupa podataka prikupljenog tijekom drugog mjerenog razdoblja. Ograničenje ove metode je potreba za velikom količinom podataka zbog zahtjeva metode za validaciju. Nadalje, kako Q

model uključuje „maximization biases“ performanse sustava mogu proizvesti nezadovoljavajuće rezultate. Investicijski i operativni troškovi također nisu uzeti u obzir, što može utjecati na ekonomsku isplativost metode.

U radu [149] korištena je Model Predictive Control (MPC) metoda kako bi se izbjegli frekvencijske prijelazne pojave uzrokovane propelerom u brodski energetski sustav. Uređaj za ublažavanje bio je baterijski sustav pohrana energije, izravno povezan s DC frekvencijskim pretvaračem. Rezultati simulacije pokazuju da predloženo rješenje s baterijskim sustavom i MPC može održati prijelazne frekvencijske poremećaje u brodskom energetskom sustavu unutar dopuštenih vrijednosti koje su propisane standardima kvalitete.

U nastavku je prikazana tablica koja sažima sve prethodno opisane strategije.

Tablica 2.11: Pregled strategija upravljanja energijom hibridnih brodskih sustava

Ref.	Metoda	Opis	Vrsta metode	Prednosti	Nedostaci
[117]	Hijerarhijsko upravljanje	Sustav upravljanja energijom za solarne panele, vjetroturbine, baterije i FC, uključujući ekonomske aspekte.	Metoda temeljena na pravilima	Osigurava optimizaciju troškova i balans SOC te razine vodika.	Složena implementacija, ovisnost o postavljenim pravilima.
[118], [119]	Fuzzy logičko upravljanje	Metoda upravljanja bez preciznog matematičkog modela, primijenjena na PV-baterijsko-dizelski RORO brod, koja smanjuje potrošnju goriva i emisije.	Metoda temeljena na pravilima	Fleksibilno i učinkovito smanjenje potrošnje goriva i emisija.	Visoka stručnost potrebna za postavljanje pravila, zahtjevi za kompleksnijim matematičkim modelima.
[130]	Pontryaginov princip minimuma	Primjena na lokalne podprobleme u stvarnom vremenu radi optimizacije potrošnje goriva u hibridnim vozilima.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Poboljšana prilagodljivost i trajnost sustava.	Ograničena primjena u pomorskoj industriji.
[45], [131], [132]	Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje	Optimizira potrošnju goriva balansiranjem izvora energije u hibridnim sustavima.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Učinkovitost u hibridnim sustavima, smanjenje potrošnje goriva.	Teško odrediv faktor ekvivalencije
[120]	Grey Wolf Optimizer	Algoritam za smanjenje potrošnje goriva i emisija, nadmašuje tradicionalne metode temeljenim na pravilima, primijenjen za hibridne sustave.	Optimizacijska metoda, globalna	Nadmašuje tradicionalne metode temeljenim na pravilima.	Visoki zahtjevi za podacima i resursima za validaciju.
[120], [129]	Fuzzy logika s GWO	Kombinacija fuzzy logike i GWO za uštedu goriva na hibridnim trajektima, s poboljšanjima u usporedbi s GWO metodom.	Optimizacijska metoda, globalna	Ušteda goriva i povećana učinkovitost.	Nedostatak usporedbe s drugim metaheurističkim algoritmima.
[134]	Model Predictive Control	Primjenjuje se za održavanje stabilnosti sustava u prijelaznim stanjima kroz baterijski sustav, prema standardima kvalitete, uz regulaciju frekvencijskih oscilacija.	Optimizacijska metoda, u realnom vremenu	Održava stabilnost sustava prema standardima kvalitete.	Visoka složenost implementacije, zahtijeva baterijski sustav

2.9.2 Dimenzioniranje hibridnih brodskih sustava

Jedan od najvećih izazova pri integraciji baterijskog sustava u hibridni pogonski sustav je određivanje njegovog optimalnog kapaciteta [150]. Izbori će imati utjecaj na trošak investicije, količinu uštedenog goriva i procijenjeni vijek trajanja sustava za pohranu energije [151]. Osim toga, najbolje opcije ovise o karakteristikama performansi broda i sigurnosnim ograničenjima u različitim režimima rada plovila, koji često favoriziraju upotrebu sustava za pohranu, ali istovremeno nameću neka ograničenja na njegove dimenzije i korištenje [152]. Kada se u sustav ugradi baterijski sustav pohrane malog kapaciteta, mogući su nepotrebni troškovi održavanja zbog starenja opreme, dok visoki investicijski troškovi neće postići najbolji omjer troškova i koristi pri upotrebi sustava prevelikog kapaciteta [153].

Formulacija funkcije cilja predstavlja ključan korak u optimizaciji jer matematički definira prioritete vlasnika broda. Evolucija od jednostavnih funkcija (minimizacija goriva) do složenih, višeciljnih formulacija koje obuhvaćaju troškove, degradaciju i emisije, odražava sazrijevanje razumijevanja problema HEPS-a. Više se ne radi samo o učinkovitosti goriva, već o optimizaciji tehnno-ekonomskih i ekoloških performansi tijekom cijelog životnog ciklusa sustava. Funkcija cilja je, dakle, matematička inkarnacija poslovne i ekološke strategije vlasnika.

Ove funkcije evaluiraju performanse kandidatskog dizajna tijekom cijelog životnog vijeka.

1. Ekonomska isplativost

Cilj je minimizirati ukupni ekonomski utjecaj tijekom životnog vijeka plovila. Opća formulacija, sintetizirana iz više izvora, može se prikazati kao minimizacija neto sadašnje vrijednosti (NPV) svih troškova:

$$J_{LCC} = C_{CAPEX} + \sum_{t=1}^N \frac{C_{OPEX}(t) + C_{gorivo}(t) + C_{emisije}(t)}{(1+r)^t} \quad (2.14)$$

gdje su:

- C_{CAPEX} kapitalni izdaci, odnosno početni trošak investicije. Definiran je kao $C_{CAPEX} = \sum_i c_i \cdot S_i$, gdje je c_i specifični trošak (npr. u /kW ili /kWh), a S_i je veličina (snaga ili kapacitet) komponente i .
- $C_{OPEX}(t)$ su operativni troškovi u godini t , uključujući održavanje, popravke i troškove zamjene komponenti, koji su često modelirani kao funkcija radnih sati i degradacije. Trošak zamjene baterije je posebno značajan faktor.
- $C_{gorivo}(t)$ je trošak goriva (npr. dizel, vodik) i električne energije s kopna potrošene u godini t .
- $C_{emisije}(t)$ predstavlja troškove penala ili poreza na emisije stakleničkih plinova (npr. porez na CO_2).
- r je diskontna stopa za izračun neto sadašnje vrijednosti.

2. Životni vijek i degradacija komponenti

Cilj je minimizirati stopu trošenja komponenti, što se često monetizira i uključuje u LCC.

- **Degradacija baterije:** Polu-empirijski model kvantificira gubitak kapaciteta (D_{batt}) kao funkciju stanja napunjenosti (SOC) i struje. Ovaj pristup omogućuje optimizatoru da favorizira dizajne i strategije upravljanja koje produljuju životni vijek baterije.

$$D_{batt} = \int_0^t \frac{1}{Q_{batt}} F(SOC_{batt}) \cdot G(i_{batt}) \cdot I_{batt}(t) dt \quad (2.15)$$

gdje su $F(SOC_{batt}) = 1 + k_1(1 - SOC_{batt})^2$ funkcija koja penalizira rad pri niskom SOC-u, a $G(i_{batt})$ je funkcija koja penalizira visoke struje punjenja i pražnjenja.

- **Degradacija gorivnog članka:** Model kvantificira degradaciju napona (D_{GC}) na temelju operativnih stresora. Ovo potiče rješenja koja gorivni članak drže u stabilnom i učinkovitom radnom području.

$$D_{GC} = \frac{d_1 \cdot T_{nisko} + d_2 \cdot T_{visoko} + d_3 \cdot N_{prijelaz} + d_4 \cdot N_{ss}}{V_{init}} \quad (2.16)$$

gdje jednadžba zbraja sve doprinose degradaciji od rada pri niskoj snazi (T_{nisko}), visokoj snazi (T_{visoko}), tijekom prijelaznih stanja snage ($N_{prijelaz}$) i ciklusa pokretanja-zaustavljanja (N_{ss}), ponderirane specifičnim stopama degradacije (d_1 do d_4).

3. Utjecaj na okoliš

- **Ukupna potrošnja goriva:** Cilj je minimizirati ukupnu masu goriva potrošenu tijekom misije.

$$J_{gorivo} = \int_0^T \dot{m}_{gorivo}(t) dt \quad (2.17)$$

gdje se trenutna potrošnja goriva $\dot{m}_{gorivo}(t)$ izračunava iz mapa učinkovitosti motora na temelju njegove radne točke (okretni moment i brzina vrtnje).

- **Ukupne emisije stakleničkih plinova:** Često se računaju kao ponderirani zbroj emisija CO_2, NO_x, SO_x itd.

$$J_{GHG} = \int_0^T (EF_{CO_2} \cdot \dot{m}_{gorivo}(t) + \dots) dt \quad (2.18)$$

gdje je EF specifični emisijski faktor za pojedini plin.

4. Analitički pristup dimenzioniranju

Analitički pristup određuje optimalni kapacitet baterijskog sustava (*engl. Battery energy storage system*, BESS) izvođenjem i evaluacijom niza matematičkih jednadžbi [154]. Tijekom procesa odabira, ciljne funkcije i uspostavljena ograničenja sustava kontinuirano se procjenjuju s više parametara, a parametri s najboljim rezultatima, uključujući kapacitet BESS-a, odabrani su kao najbolje rješenje. Barrera-Cardenas i sur. u [155], su razvili metodologiju za dimenzioniranje sustava za pohranu energije u baterijama za hibridne pomorske energetske sustave i primijenili za slučajeve s dva operativna profila, prvi u kojima se BESS koristi kao rezerva snage ili drugi, koji strateškim opterećivanjem motora ga se drži u optimalnom području rada. Ova metodologija predlaže niz različitih kapaciteta sustava koristeći tri ključna indeksa performansi: godišnja uštede goriva, očekivani vijek trajanja baterija i indeks isplativosti (*engl. Cost benefit indeks*, CBI). Vijek trajanja baterije je ključan za ekonomsku održivost BESS-a, a prvenstveno ovisi o starenju ćelija baterije, koje gube kapacitet i povećavaju unutarnji otpor tijekom vremena. Za litij-ionske baterije,

degradacija kapaciteta je pouzdaniji kriterij za kraj životnog vijeka od povećanja unutarnjeg otpora [156]. U radu su definirana dva načina starenja baterije. Kalendarsko starenje događa se tijekom perioda mirovanja i ovisi o temperaturi i stanju napunjenosti (SOC), dok se degradacija zbog cikliranja javlja tijekom aktivnog korištenja. Ukupni gubitak kapaciteta u određenom razdoblju izračunava se na temelju degradacije zbog cikliranja i kalendarskog starenja i definirana je sljedećim izrazom:

$$\frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{BOL}}} = \sum_{t=1}^{N_{\text{cal}}} D_{Q,\text{cal}}(t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{cycle}}} D_{Q,\text{cyc}}(k) < \frac{k_{\text{EOL}}}{100} \quad (2.19)$$

gdje Q_{loss} je ukupni gubitak kapaciteta baterije, Q_{BOL} je inicijalni kapacitet baterije, N_{cal} i N_{cycle} broj ciklusa kod kalendarskog starenja i ciklične degradacije, $D_{Q,\text{cal}}$ i $D_{Q,\text{cyc}}$ su faktori usred kalendarskog starenja i cikličke degradacije i k_{EOL} je prag kraja životnog vijeka baterije.

Uštede goriva izračunavaju se za oba načina rada, kad je BESS samo rezerva snage ili kad služi za preuzimanje dinamičkih opterećenje motora. Ukupna ušteda goriva na godišnjoj razini se računa iz sljedeće jednadžbe:

$$\Delta FC = 8760 \cdot (k_{L,NSR} \cdot \Delta FC_{NSR} + (1 - k_{L,NSR}) \cdot \Delta FC_{SR}) \quad (2.20)$$

gdje je ΔFC godišnja ušteda goriva, $k_{L,NSR}$ udio rada motora u kojem je motor radio u režimu gdje baterija služi kao rezerva snage, ΔFC_{NSR} i ΔFC_{SR} je satna ušteda goriva u režimu gdje baterija služi kao rezerva snage i u režimu gdje je motor strateški opterećen.

CBI se izračunava oduzimanjem troškova instalacije sustava za pohranu energije i pokretanja/zaustavljanja DG-a od kumulativnih ušteda goriva, čime se određuje ekonomska isplativost BESS-a. To možemo vidjeti u sljedećoj jednadžbi:

$$CBI = CFST - C_{\text{BESS}} - C_{SS} \quad (2.21)$$

gdje $CFST$ ukupna novčana ušteda u gorivu, C_{BESS} je trošak instalacije baterijskog sustava u brod kod retrofittinga te C_{SS} je trošak uzrokovan učestalijim startanjem i gašenjem motora.

Metodologija otkriva kompromis između maksimiziranja uštede goriva i maksimiziranja CBI-a. Postizanje maksimalne uštede goriva i najvišeg CBI-a suprotstavljeni su ciljevi; maksimiziranje jednog obično zahtijeva kompromis u drugome. U studiji, CBI se pokazao osjetljivijim na vijek trajanja BESS-a nego na kapacitet BESS-a. Umjereno velika BESS jedinica, optimizirana za korištenje kao rezerva snage visokog kapaciteta, pruža bolji CBI od veće BESS jedinice koja se koristi za strateško opterećenje, što bi moglo smanjiti stres zbog cikliranja i produljiti vijek trajanja baterije, ali nije ekonomski toliko isplativa solucija. Studija zaključuje da bi korištenje BESS-a za strateško opterećenje trebalo biti ograničeno. Međutim, analiza troškova provedena u ovom radu ima značajna ograničenja jer su procjene nekih varijabli, kao što su operativni troškovi i troškovi održavanja te vijek trajanja BESS-a, teško odredive.

Analitički pristup određivanja kapaciteta BESS-a za hibridne energetske sustave također je osmišljen i korišten u radu [157]. Otkriveno je da su maksimalne uštede goriva i indeks koristi dva suprotstavljena cilja. Analiza koristi i troškova pokazala je da je upotreba BESS-a za strateške operacije opterećenja irelevantna. Iako instalacija BESS-a velikog kapaciteta povećava uštede goriva, to također rezultira smanjenjem indeksa koristi-trošak kao i vijeka trajanja baterije.

U radu [158] predložen je pristup za određivanje kapaciteta baterije, pri čemu je optimalni kapacitet BESS-a određena na temelju najzahtjevnijeg uvjeta napajanja, a izračunata je prema

IEEE normi Std. 485-2010 [159]. S obzirom na to da je norma zamijenjena, predložena metoda izračuna više nije prikladna za korištenje u trenutnom sustavu.

5. Dimenzioniranje metaheurističkom optimizacijom

Suvremene metode optimizacije sve više dobivaju na popularnosti, što dovodi do pojave novog područja optimizacije poznatog kao metaheuristička optimizacija. Većina metaheurističkih algoritama inspirirana je prirodom, jednostavni su i lako primjenjivi te se oslanjaju na snažnu teorijsku osnovu, a ne na empirijske tehnike, kako bi identificirali najbolje rješenje u kratkom vremenskom periodu [160]. Metaheuristička optimizacija inspirirana prirodom može se podijeliti u četiri skupine i neki algoritmi su već spomenuti u prethodnim poglavljima.

- Prva kategorija algoritama inspirirana prirodom uključuje evolucijske algoritme, koji koriste operatore selekcije, križanja, mutacije i reprodukcije za identificiranje superiornih rješenja [161]. Genetski algoritam (GA) prepoznat je kao najistaknutiji evolucijski algoritam, a drugi popularan algoritam je algoritam diferencijalne evolucije (DEA).
- Algoritmi temeljeni na fizikalnim zakonitostima čine drugu kategoriju. Fizikalne zakonitosti služe kao inspiracija za ove tehnike optimizacije [161], s poznatim algoritmima kao što su simulirano kaljenje i optimizator multi-svemira (*engl. Multi-Verse Optimizer, MVO*).
- Treća kategorija su algoritmi temeljeni na ljudskom ponašanju, koji su inspirirani različitim okolnostima često povezanim s ljudskim ponašanjem i percepcijom [105]. Najpriznatiji algoritmi u ovoj kategoriji su Harmony Search (HS) i Human Group Formation (HGF).
- Tehnike optimizacije inteligencije roja uključene su u posljednju kategoriju. Društveno ponašanje rojeva ili zajednica poput životinjskih krda, kolonija insekata i jata ptica inspirira ove algoritme [162]. Optimizacija rojem čestica je najčešće korišteni algoritam u ovoj kategoriji, dok ostali uključuju Grey Wolf Optimizer (GWO), i Harris Hawks Optimization (HHO).

Metaheuristička optimizacija može se vidjeti u radu [163], gdje je genetski algoritam (GA) primijenjen za pronalaženje optimalnog kapaciteta BESS-a. Količina uštede goriva postignuta predloženom metodom ovisila je o kapacitetu i težini sustava te troškovima, no usporedba s temeljnim sustavom bez BESS-a nije provedena.

Optimalno dimenzioniranje BESS-a razmatrano je u višeobjektivnom pristupu optimizacije u radu od Zhu i sur. [164]. Ne-dominirani sortirajući genetski algoritam II (NSGA II) primijenjen u ovom radu donosi koristi u sve tri ciljne funkcije, smanjujući potrošnju goriva za 14,99 %, emisiju stakleničkih plinova za 14,12 % i troškove životnog ciklusa za 12,11 %. Predložena strategija verificirana je korištenjem hardware-in-the-loop metode, ali primijenjeni EMS temeljen na pravilima sa statičkim parametrima ograničava performanse optimalnog rješenja.

Damian i sur. u [165], su radili optimizaciju kapaciteta BESS-a prevedenu u dva koraka pomoću algoritma Harris Hawks Optimization (HHO), pri čemu je optimalni kapacitet BESS-a određen nakon pronalaska optimalne radne točke, ali stanje napunjenosti BESS-a tokom rada nije bilo razmatrano.

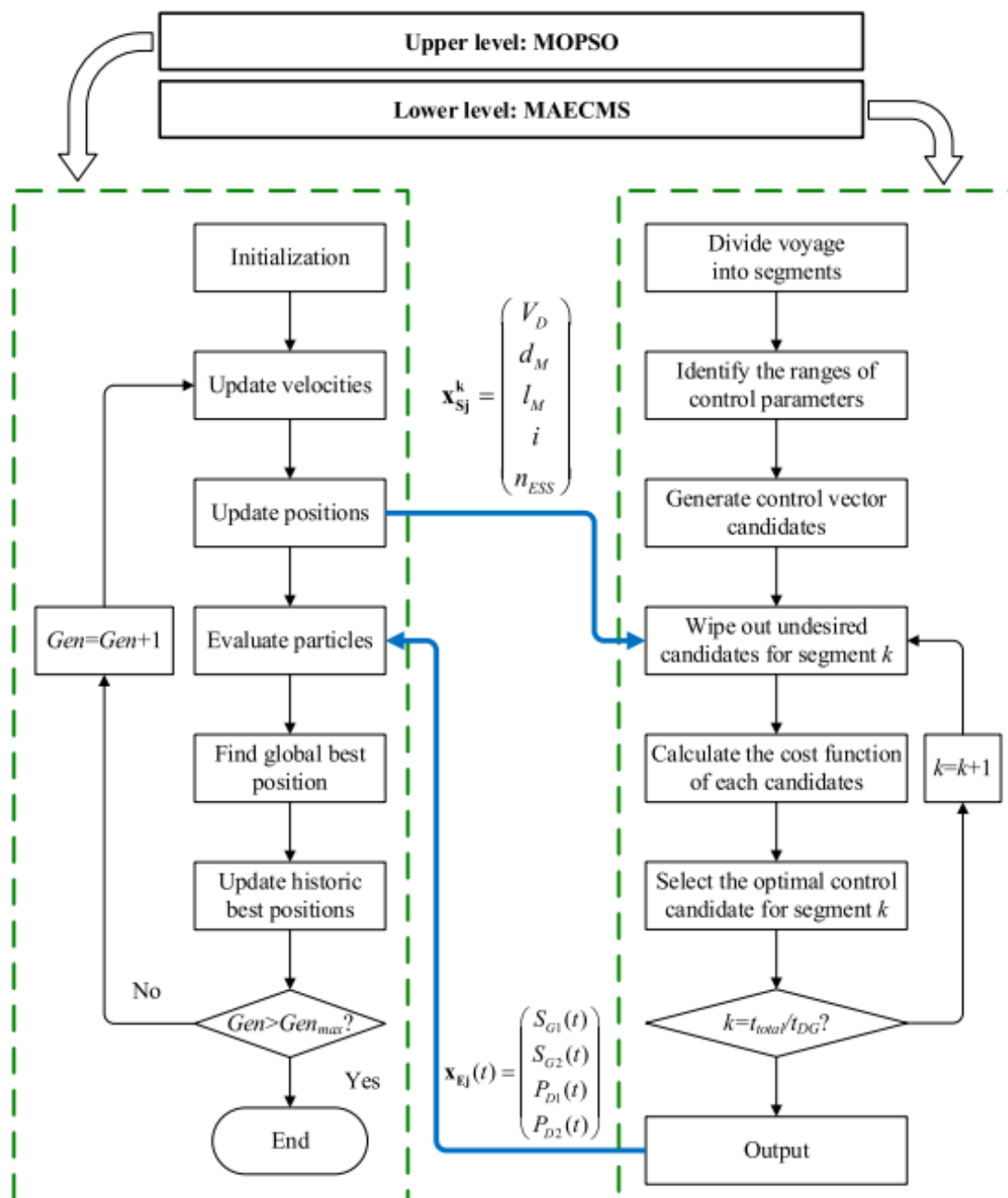
Wen i sur. [166] su proveli je analiza troškova pomoću PSO algoritma za optimizaciju kapaciteta triju vrsta skladišnih tehnologija: olovno-kiselinske baterije, Li-ion baterije i superkondenzatora, u tankeru s hibridnim sustavom dizelskog generatora i PV. Rezultati simulacije sugeriraju da

upotreba ESS-a štedi novac u odnosu na tradicionalno skladištenje, no održavanje i dugovječnost baterija nisu uzeti u obzir, što je rezultiralo suboptimalnim rezultatima.

U radu [167] predloženo je optimalno dimenzioniranje BESS-a pomoću MOPSO i NSGA II algoritama kako bi se smanjila potrošnja goriva i kapacitet ugrađenog BESS-a, pri čemu je vijek trajanja baterije bio jedno od ograničenja. Rezultati su pokazali da se uštede goriva u hibridnom električnom trajektu razlikuju ovisno o kapacitetu ugrađenog BESS-a. Ograničenje ove metode je da dizajner mora žrtvovati jedan od ciljeva radi većih koristi. Kako bi se smanjila potrošnja goriva, veliki BESS mora biti integriran u sustav i zamijenjen kako bi zadovoljio ograničenja, što dovodi do visokih investicijskih troškova.

Zhu i sur. [168] predložili su dvostupanjsku optimizaciju s više ciljeva, koja koristi PSO za dimenzioniranje komponenti na višoj razini i modificiranu adaptivnu strategiju minimizacije ekvivalentne potrošnje za upravljanje energijom na nižoj razini. Optimizacija je obuhvaćala tri cilja: potrošnju goriva, emisiju stakleničkih plinova (GHG) i ukupne troškove unutar životnog ciklusa. U nedostatku standardiziranog operativnog ciklusa za brodove, analizirao se generična ruta tegljača sa dva standarda stila plovidbe. Profil jedne vožnje je trajao 4800 sekundi, a tegljač radi 6 tura dnevno, 200 dana godišnje. Eksperimenti na HIL platformi pokazuju da dvostupanjska optimizacija smanjuje potrošnju goriva za 3,37 %, emisiju GHG za 6,70 % i troškove za 13,95 % u odnosu na jednostupanjsku optimizaciju. Ova metoda je posebno važna za dizajn HEPS-a u područjima sa strogim ekološkim standardima i kod troškovno osjetljivih brodovlasnika te se može primijeniti na različite vrste brodova. Ovo je jedan od rijetkih radova koji se bavio istodobno dimenzioniranjem i strategijom upravljanja komponenti, no radio je to samo na profilu opterećenja za tegljača te je koristio ECMS metodu koja nije uzimala u obzir rutu plovila. Na slici 2.13 može se vidjeti dijagram kako su obuhvaćene obje optimizacijske strukture.

U radu [112] istražen je izazov optimalnog dimenzioniranja hibridnog broskog energetskog sustava sastavljenog od PV/dizel sustava i sustava za pohranu energije korištenjem različitih varijanti PSO. Triangularni PSO (TRIPSO) i PSO s promjenjivom inercijskom težinom (TVIW-PSO) rezultiraju značajnim uštedama i smanjenjem zagađenja. Nalazi sugeriraju da uporaba TVIW na PSO i TRIPSO može poboljšati rezultate optimizacije, ali povećava složenost računanja sustava. Nažalost, kada zadatak postane složeniji i dimenzija raste, algoritmi imaju poteškoća s pronalaženjem optimalnog rješenja u razumnom vremenskom okviru, što otežava njihovu praktičnu primjenu [169].



Slika 2.13 Dijagram toka predložene dvostupanjske optimizacije (MOPSO za višu razinu i A-ECMS za nižu razinu) [168]

2.10 Zaključak

Provedeni pregled literature sustavno je analizirao kompleksno polje hibridnih brodskih sustava, prepoznajući ih kao najzrelije i najperspektivnije rješenje za smanjenje ekološkog otiska u kratkoročnom i srednjoročnom razdoblju. Analizom ključnih komponenti, sistemskih konfiguracija, metoda modeliranja i strategija upravljanja, ovo poglavlje postavlja jasan istraživački okvir za ovaj doktorski rad.

Put prema dekarbonizaciji u pomorstvu nije linearan i uključuje brojne tehnološke smjerove. Iako dugoročne vizije uključuju goriva s nultom emisijama, poput vodika i amonijaka, literatura je pokazala da tehnologije za njihovu primjenu, kao što su primjerice gorivni članci, još uvijek nisu dosegle potrebnu razinu tehnološke zrelosti, skalabilnosti i ekonomske isplativosti za široku primjenu u brodskim sustavima snage više megavata. Trenutni izazovi vezani uz proizvodnju, skladištenje i distribuciju ovih goriva, zajedno s visokim investicijskim troškovima samih gorivnih članaka, čine ih rješenjem budućnosti, ali ne i pragmatičnim izborom za neposrednu implementaciju. Istovremeno, analiza je potvrdila da dizelski motor, unatoč svojim ekološkim nedostacima, ostaje neosporni temelj globalne flote. Golema postojeća infrastruktura, dugi životni vijek brodova i desetljeća operativnog iskustva čine njegovu brzu zamjenu nerealnom. Stoga, logičan i evolucijski put prema zelenijem brodarstvu ne vodi kroz trenutnu eliminaciju dizelskih motora, već kroz njihovu inteligentnu integraciju u napredne hibridno-električne sustave. Upravo hibridizacija omogućuje da motor s unutarnjim izgaranjem radi u svojim najučinkovitijim režimima, dok se nedostaci, poput niske učinkovitosti pri parcijalnim opterećenjima, kompenziraju primjenom sustava za pohranu energije.

Središnji element svakog hibridnog sustava je baterijski sklop, a odabir vrste baterije predstavlja temeljnu odluku koja definira sigurnost, performanse i ekonomsku isplativost cijelog sustava. Litij ionske baterije su najlogičniji odabir u ovom segmentu, no i one se mogu dosta razlikovati u ovisnosti o materijalu katode. Nikal-mangan-kobalt (NMC) katode nude superiornu energetsku gustoću, što je ključno u primjenama s ograničenim prostorom poput osobnih električnih vozila, no analiza je pokazala da se za velike pomorske sustave postavlja potpuno drugačiji skup prioriteta. U ovom kontekstu, gdje su apsolutna sigurnost, dugi ciklički životni vijek i ukupan trošak vlasništva važniji od minimizacije mase i volumena, litij-željezo-fosfat (LFP) tehnologija ističe se kao superiorno rješenje. Njezina inherentno viša termalna stabilnost drastično smanjuje rizik zapaljenja i požara, što je sigurnosni imperativ na brodovima. Odsutnost kobalta ne samo da osigurava nižu i stabilniju cijenu, neovisnu o fluktuacijama na tržištu rijetkih metala, već i značajno manji ekološki i etički otisak. Zbog ovog optimalnog balansa ključnih karakteristika, LFP tehnologija je prepoznata kao standard za stacionarne i pomorske primjene te je, sukladno tome, odabrana kao referentni katodni materijal za sve daljnje analize, modeliranje i simulacije unutar ovog dokorskog rada.

Nadalje, izbor propulzijskog elektromotora i prateće energetske elektronike ključan je za učinkovitost pretvorbe električne energije u mehanički rad. Usporedna analiza različitih tehnologija elektromotora pokazala je jasan kompromis između performansi, cijene i robusnosti. Sinkroni motori s permanentnim magnetima (PMSM) predstavljaju vrhunac tehnologije u pogledu učinkovitosti i gustoće snage, ali njihova visoka cijena, ovisnost o rijetkim metalima i zahtjevi za složenim sustavima hlađenja čine ih manje prikladnima za opću primjenu. S druge strane,

asinkroni (indukcijski) motori predstavljaju provjereno, isplativo i iznimno robusno rješenje. Iako nude nešto nižu učinkovitost i gustoću snage u usporedbi s PMSM motorima, njihova jednostavnost, pouzdanost i niži troškovi održavanja čine ih idealnim izborom za primjene gdje je dugoročna pouzdanost prioritet. Stoga je za potrebe dimenzioniranja u okviru ovog istraživanja odabran asinkroni motor kao reprezentativni model.

Sličan pragmatičan pristup primijenjen je i na energetske elektronike. Prepoznato je da su napredne topologije poput Dual Active Bridge (DAB) za DC/DC pretvorbu, Active Front End (AFE) za AC/DC ispravljanje i višerazinski inverteri za DC/AC pretvorbu ključne za postizanje visoke sistemske učinkovitosti.

Ključni element koji povezuje sve komponente i omogućuje njihovu sinergiju jest odabir adekvatne metodologije modeliranja. Težište ovog rada usmjereno je na višu, sistemsku razinu, s primarnim ciljem razvoja integrirane metodologije dimenzioniranja i upravljanja energijom u realnom vremenu. Ova usmjerenost nameće fundamentalni zahtjev pred modele komponenti: oni moraju biti računski iznimno efikasni kako bi omogućili simulaciju tisuća operativnih ciklusa tijekom dugogodišnjeg životnog vijeka broda, a istovremeno dovoljno precizni da vjerno obuhvate ključne fenomene koji utječu na operativne troškove i degradaciju. Stoga je za svaku komponentu odabran pristup koji predstavlja optimalan kompromis između fizikalne utemeljenosti i računalne jednostavnosti. Za baterijski sklop, razvijen je višeslojni model koji razdvaja brzu i sporu dinamiku. Praćenje stanja napunjenosti (SOC), ključno za odluke strategije upravljanja u realnom vremenu, izvodi se efikasnom metodom brojanja kulona, dok se naponsko-strujna karakteristika za zadani zahtjev snage određuje pomoću jednostavnog modela ekvivalentnog električnog kruga. Najvažniji aspekt, degradacija baterije, modelira se pristupom s dvije vremenske skale: tijekom brze simulacije bilježe se ključni stresni faktori, dok se na kraju definiranog dužeg perioda "spori" polu-empirijski model starenja koristi za ažuriranje stanja ispravnosti baterije. Ovaj pristup vjerno obuhvaća utjecaj operativnih uvjeta na životni vijek baterije bez rješavanja složenih elektrokemijskih jednadžbi u svakom koraku simulacije.

Sličan pragmatizam primijenjen je i na modeliranje motora s unutarnjim izgaranjem. Iako polufizikalni modeli poput Willansovih linija nude superiornu skalabilnost, njihova primjena zahtijeva parametre koji često nisu javno dostupni. Stoga je donesena odluka o korištenju statičkih mapa specifične potrošnje goriva, koje predstavljaju industrijski standard i temelje se na preciznim mjerenjima proizvođača. Time se prioritet daje vjernosti i točnosti modela nad teorijskom skalabilnošću, osiguravajući da su procjene potrošnje goriva realistične i utemeljene na provjerenim podacima.

Konačno, energetska elektronika, iako ključna za učinkovitost, modelira se na najvišoj razini apstrakcije. Umjesto modeliranja kompleksnih topologija, njihov utjecaj svodi se na pojednostavljeni model pada učinkovitosti. Ova odluka je opravdana činjenicom da su za dugoročnu energetske bilancu i ekonomske proračune gubici pri pretvorbi energije značajniji od same dinamike pretvarača, čija bi simulacija bila računski neizvediva na vremenskoj skali od 10 godina. Ovaj hibridni pristup modeliranju, odnosno kombinacija empirijskih podataka, polu-empirijskih modela i pojednostavljenih modela učinkovitosti, stvara digitalnog blizanca sustava koja je specifično skrojena za rješavanje problema optimizacije na razini životnog ciklusa.

Konačno, definiranje topologije cjelokupnog energetskog sustava predstavlja ključni korak koji povezuje odabrane komponente u funkcionalnu cjelinu. Pregledom suvremenih konfiguracija, od klasične mehaničke do potpuno električne propulzije, hibridni propulzijski sustav s hibridnim izvorima energije i AC brodskom električnom mrežom identificiran je kao najrelevantniji za ovo istraživanje. Ova odluka temelji se na činjenici da takva topologija predstavlja najčešće i

komercijalno najzastupljenije rješenje na današnjem tržištu hibridnih plovila. Fokusiranjem na ovu konfiguraciju osigurava se da će rezultati dimenzioniranja i razvijene strategije upravljanja energijom biti izravno primjenjivi na većinu postojećih i budućih brodskih projekata. Istovremeno, važno je naglasiti metodološku fleksibilnost razvijenog modela. Iako je primarni fokus na AC sustavima, prelazak na analizu modernijih DC sustava je trivijalan. Temeljna razlika svodi se na način rada motora s unutarnjim izgaranjem. U AC sustavima oni rade pri konstantnoj brzini, dok u DC sustavima mogu raditi pri promjenjivoj brzini radi optimizacije potrošnje. Prilagodba modela zahtijeva samo zamjenu odgovarajuće mape specifične potrošnje goriva, čime razvijeni alat za optimizaciju ostaje relevantan i lako prilagodljiv za evaluaciju prednosti novih tehnologija u budućim istraživanjima.

Ovim sveobuhvatnim pregledom i sustavnim donošenjem odluka, postavljen je čvrst temelj za originalni doprinos ovog rada, koji leži u razvoju integrirane metodologije za simultanu optimizaciju dimenzioniranja komponenti i strategije upravljanja energijom. Sve prethodno donesene odluke, a to je odabir LFP baterija, asinkronih motora, pojednostavljenih modela pretvarača i AC hibridne konfiguracije, služe jednom cilju: stvaranju realističnog, relevantnog i računski izvedivog okvira unutar kojeg se može riješiti ovaj složeni, dvostupanjski optimizacijski problem. Sljedeća poglavlja ovog rada posvećena su razvoju, implementaciji i validaciji tog okvira.

3. MODELIRANJE KOMPONENTI BRODSKOG HIBRIDNOG SUSTAVA

Točna i pouzdana analiza, upravljanje i optimizacija brodskih hibridnih energetske sustava ovise o kvaliteti njihovih matematičkih reprezentacija. Precizno modeliranje ključan je preduvjet kako za razvoj naprednih strategija upravljanja energijom, koje će biti tema idućeg poglavlja, tako i za provođenje cjelokupne optimizacije životnog ciklusa sustava. Bez vjernog modela koji obuhvaća ključne energetske i degradacijske procese, procjena dugoročnih performansi i troškova bila bi nepouzdana.

Cilj ovog poglavlja jest detaljno opisati razvoj i implementaciju cjelovitog dinamičkog modela brodskog hibridnog energetske sustava. Ovaj model, koncipiran kao "digitalni blizanač" plovila, služi kao temeljna simulacijska okolina za sve analize provedene u ovom radu. Model obuhvaća ne samo kvazistatičke karakteristike glavnih energetske pretvarača – dizelskog motora, dizel-generatora i baterijskog sklopa – već i ključne dinamičke aspekte poput modela degradacije kapaciteta baterije uslijed starenja, što je od presudne važnosti za realističnu procjenu troška životnog ciklusa.

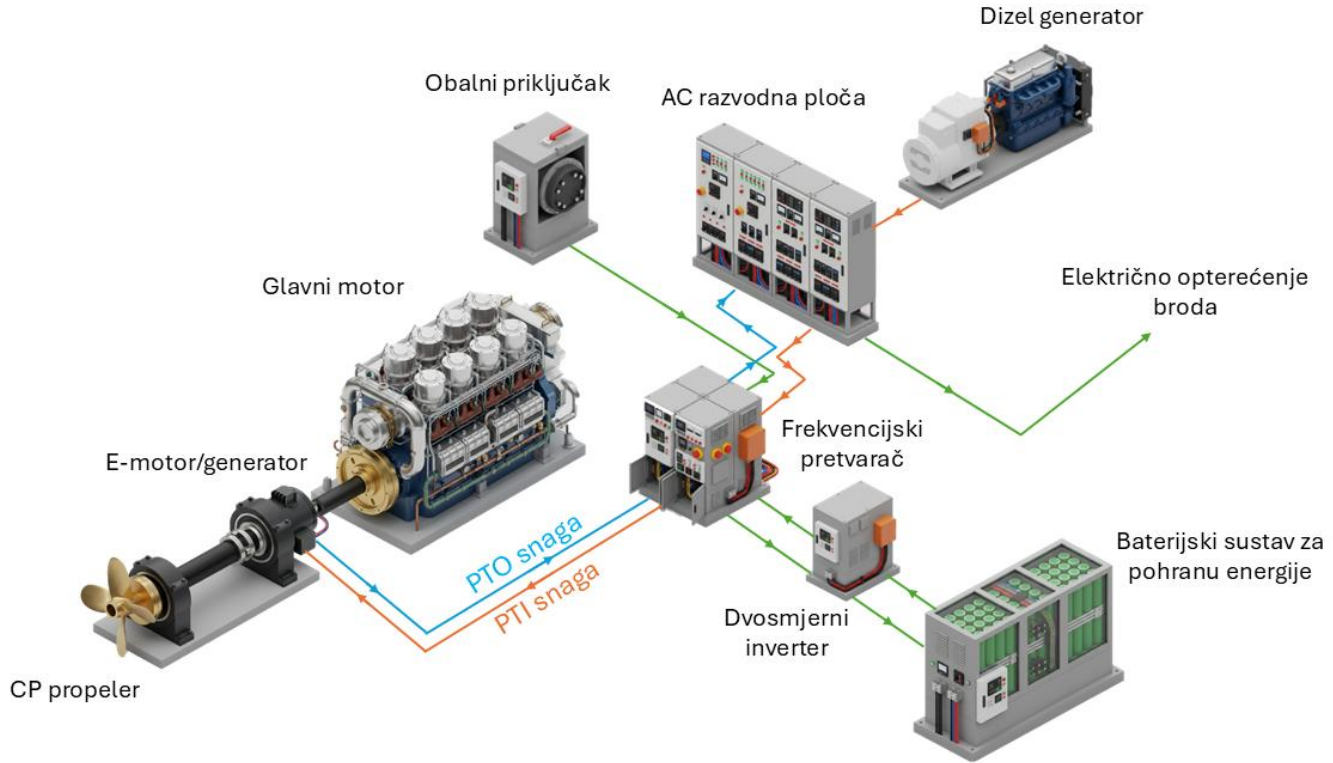
Poglavlje započinje analizom arhitekture sustava i definiranjem temeljnih tokova snage koji opisuju interakciju između komponenata u različitim režimima rada, kao što su PTI (*Power Take-In*) i PTO (*Power Take-Off*). Nakon toga, slijedi detaljno matematičko modeliranje svake ključne komponente zasebno: motora s unutarnjim izgaranjem s fokusom na specifičnu potrošnju goriva te baterijskog sklopa energije, s posebnim naglaskom na modele promjene stanja napunjenosti i starenja. Na kraju, poglavlje opisuje kako su ovi pojedinačni modeli integrirani u jedinstvenu, objektno-orijentiranu programsku cjelinu koja omogućuje robusnu i fleksibilnu simulaciju ponašanja cijelog sustava.

3.1 Konfiguracija sustava i tokovi snage

Za potrebe ovog istraživanja modelirana je i analizirana paralelno-serijska hibridna konfiguracija, čiji je detaljan prikaz dan na slici 3.1, a ona sama je pobliže pojašnjena u poglavlju 2.7. Ova konfiguracija pruža najvišu razinu fleksibilnosti jer omogućuje rad u više različitih načina:

- **Paralelni način rada:** Glavni pogonski motor (ICE) i električni stroj rade zajedno na istoj propelerskoj osovinu. Električni stroj može pomagati glavnom motoru (PTI - *Power Take-In* način rada) ili apsorbirati višak snage glavnog motora za proizvodnju električne energije (PTO - *Power Take-Off* način rada).
- **Serijski (dizel-električni) način rada:** Glavni motor je isključen, a pomoćni dizel generatorski sklop proizvodi električnu energiju koja preko frekvencijskog pretvarača napaja električni stroj za propulziju.
- **Električni način rada:** I glavni motor i dizel generator su isključeni, a brod se pogoni isključivo energijom iz baterijskog sklopa (BESS).

Cjelokupni proces raspodjele snage u modelu slijedi logiku “predloži-izračunaj-provjeri” koju u svakom vremenskom koraku vodi strategija upravljanja energijom, detaljno opisana u poglavlju 4. Snage glavnog motora ($P_{eng,total}$) i pomoćnog dizel-generatora (P_{genset}) predstavljaju ključne varijable odluke koje EMS predlaže s ciljem minimizacije funkcije troška. Na temelju tog prijedloga i trenutnih opterećenja, model zatim proračunava balans snaga i provodi rigoroznu validaciju fizikalne izvedivosti predloženog rješenja.



Slika 3.1 Shematski prikaz razmatranog hibridnog energetskog sustava

Matematička formulacija tokova snage

Nakon što EMS predloži snage motora, a prije validacije, ključni korak je izračunavanje izlazne ili ulazne snage iz same baterije (P_{batt}). Pozitivna vrijednost P_{batt} označava pražnjenje baterije, dok negativna vrijednost označava punjenje.

Ona se određuje iz jednadžbe bilance snage na električnoj mreži, koja predstavlja razliku između ukupnih električnih opterećenja i ukupne električne proizvodnje:

$$P_{batt} = \sum P_{opterećenja,elek} - \sum P_{proizvodnja,elek} \quad (3.1)$$

Ukupna električna opterećenja ($\sum P_{opterećenja,elek}$) sastoje se od snage potrebne za sva električna trošila na brodu (P_{hotel}) i snage koju troši elektromotor za propulziju u PTI modu ($P_{PTI,elek}$):

$$\sum P_{opterećenja,elek} = P_{hotel} + P_{PTI,elek} \quad (3.2)$$

Ukupna električna proizvodnja ($\sum P_{proizvodnja,elek}$) zbroj je snage pomoćnog dizel-generatora (P_{genset}) i snage generirane od strane osovinskog generatora u PTO modu ($P_{PTO,elek}$):

$$\sum P_{proizvodnja,elek} = P_{genset} + P_{PTO,elek} \quad (3.3)$$

Način rada elektromotora (PTI ili PTO način rada) ovisi o odnosu između ukupne snage glavnog motora ($P_{eng,total}$) i trenutnog zahtjeva za propulzijskom snagom ($P_{prop,demand}$). Prvo se definira snaga koju glavni motor direktno isporučuje propeleru ($P_{eng \rightarrow prop}$):

$$P_{eng \rightarrow prop} = \min(P_{eng,total}, P_{prop,demand}) \quad (3.4)$$

- **PTI (Power Take-In) način rada** se aktivira kada propulzijski zahtjev premašuje snagu koju glavni motor isporučuje te mu je potrebna dodatna snaga iz elektropogona. Potrebna električna snaga ($P_{PTI,elek}$) računa se kao:

$$P_{PTI,elek} = \begin{cases} \frac{P_{prop,demand} - P_{eng \rightarrow prop}}{\eta_{EM}} & \text{ako } P_{prop,demand} > P_{eng \rightarrow prop} \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.5)$$

gdje je η_{EM} efikasnost električnog motora.

- **PTO (Power Take-Off) način rada** se aktivira kada glavni motor razvija više snage nego što je potrebno za propulziju. Višak se pretvara u električnu energiju ($P_{PTO,elek}$):

$$P_{PTO,elek} = \begin{cases} (P_{eng,total} - P_{eng \rightarrow prop}) \cdot \eta_{SG} & \text{ako } P_{eng,total} > P_{eng \rightarrow prop} \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (3.6)$$

gdje je η_{SG} efikasnost generatora.

Kombiniranjem navedenih jednadžbi dobiva se finalni izraz za snagu baterije, koji je direktno implementiran u simulacijskom modelu:

$$P_{batt} = (P_{hotel} + P_{PTI,elek}) - (P_{genset} + P_{PTO,elek}) \quad (3.7)$$

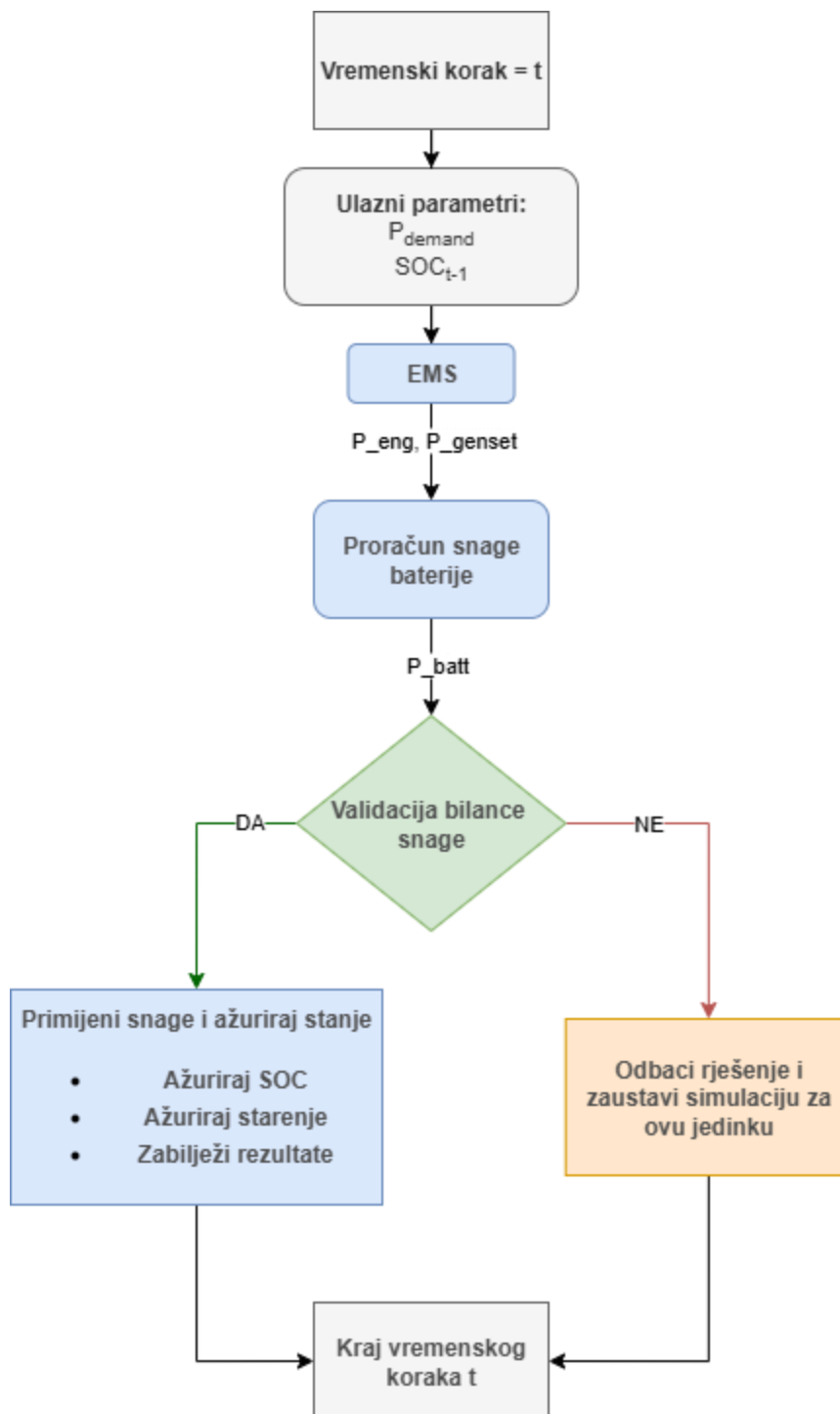
3.1.1 Validacija bilance snage

Kako bi se osigurala fizikalna konzistentnost i numerička stabilnost simulacije, svaka predložena raspodjela snage mora proći kroz validacijski korak. Za to je zadužena zasebna funkcija u simulatoru koja neovisno provjerava zadovoljavaju li predložene snage zakone očuvanja energije za mehanički i električki dio sustava. Provjera se odvija u dva ključna koraka:

- **Provjera mehaničke bilance:** Funkcija prvo izračunava ukupnu mehaničku snagu isporučenu na propelersku osovinu zbrajanjem doprinosa glavnog motora ($P_{eng \rightarrow prop}$) i doprinosa električnog motora u PTI modu ($P_{PTI,mech}$). Zatim uspoređuje dobivenu vrijednost s traženom propulzijskom snagom ($P_{prop,demand}$). Rješenje je mehanički validno samo ako je razlika između isporučene i tražene snage unutar vrlo uske tolerancije, odnosno snage su praktički jednake.
- **Provjera električne bilance:** Funkcija zatim izračunava ukupnu potrošnju električne energije, koja se sastoji od snage hotelskih trošila (P_{hotel}) i snage koju električni motor troši u PTI modu ($P_{PTI,elek}$). Istovremeno, zbraja ukupnu proizvodnju električne energije iz svih izvora: pomoćnog generatora (P_{genset}), osovinskog generatora u PTO modu ($P_{PTO,elek}$) te snage pražnjenja baterije (P_{batt}). Rješenje je validno samo ako je ukupna proizvodnja jednaka ukupnoj potrošnji, također unutar zadane numeričke tolerancije.

Ako bilo koja od ove dvije provjere ne uspije, predložena raspodjela snage se odbacuje kao fizikalno nemoguća, a simulacija završava za dotičnu jedinku. Ovaj robusni mehanizam osigurava da samo valjana rješenja ulaze u evaluaciju.

Dijagram toka navedenog postupka može se vidjeti na dijagramu na slici 3.2.



Slika 3.2 Dijagram toka postupka računanja raspodjele snaga hibridnog energetskeg sustava

3.2 Model motora s unutarnjim izgaranjem

Motor s unutarnjim izgaranjem predstavlja temeljnu komponentu i primarni izvor energije u većini današnjih brodskih energetske sustava, uključujući i hibridne konfiguracije koje su predmet ove disertacije. Njegova osnovna funkcija je pretvorba kemijske energije pohranjene u fosilnom gorivu u mehanički rad, koji se potom koristi za propulziju broda ili za pogon električnih generatora. Unatoč pojavi novih tehnologija motori s unutarnjim izgaranjem će, zbog svoje energetske gustoće, pouzdanosti i razvijene infrastrukture, još dugo ostati ključan element pomorskog prometa, posebice u hibridnim sustavima.

Ključni izazov u radu motora s unutarnjim izgaranjem leži u njihovoj učinkovitosti, koja je izrazito ovisna o radnoj točki, odnosno o kombinaciji brzine vrtnje i opterećenja. Najveća učinkovitost, izražena kao najniža specifična potrošnja goriva (*engl. Specific Fuel Consumption, SFC*) postiže se u relativno uskom području rada. U konvencionalnim sustavima, gdje je motor izravno ili neizravno vezan za propeler, promjenjivi uvjeti plovidbe (brzina, vremenski uvjeti, manevriranje) prisiljavaju motor da često radi izvan svoje projektne točke, što rezultira značajno povećanom potrošnjom goriva i emisijama.

Upravo u ovom segmentu hibridizacija sustava donosi temeljnu promjenu. Uvođenjem sustava za pohranu energije (baterije), djelomično se razdvaja trenutna proizvodnja energije od trenutne potražnje. Ova energetska sprega omogućuje da uloga motora postane znatno fleksibilnija i inteligentnija. Umjesto da slijepo prati zahtjeve opterećenja, rad motora se može strateški optimizirati. Strategija upravljanja energijom može donijeti odluku da motor radi u svojoj točki najveće učinkovitosti, a višak proizvedene energije pohrani u baterije. Alternativno, u razdobljima niskog opterećenja, motor se može u potpunosti isključiti, dok baterije opskrbljuju sustav energijom, eliminirajući tako najneučinkovitije režime rada.

S obzirom na to da je potrošnja goriva dominantan faktor u ukupnim operativnim troškovima i ekološkom otisku (ukupne emisije), precizno modeliranje njegovog ponašanja od presudne je važnosti za uspjeh cjelokupnog optimizacijskog procesa. Cilj modeliranja motora u okviru ovog istraživanja nije detaljna termodinamička analiza procesa izgaranja, već razvoj računalno učinkovitog i preciznog modela koji može pouzdano predvidjeti potrošnju goriva i operativna ograničenja u bilo kojoj relevantnoj radnoj točki. Takav model služi kao ključni element unutar simulacije životnog ciklusa, pružajući temeljne ulazne podatke za evaluaciju svake pojedine konfiguracije hibridnog sustava.

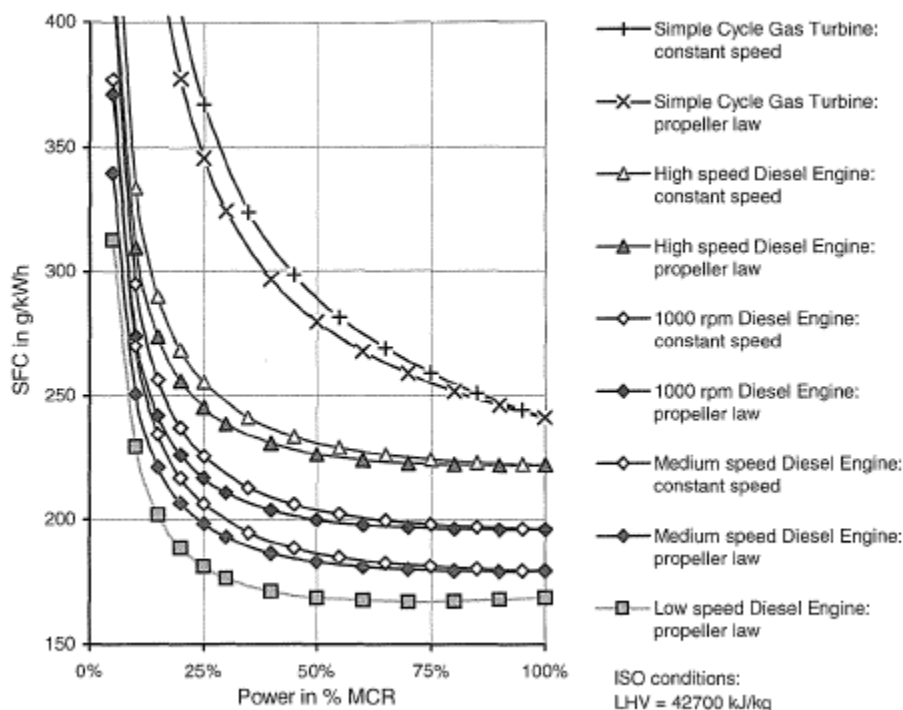
3.2.1 Specifična potrošnja goriva

Jedan od načina kvantificiranja učinkovitosti motora s unutarnjim izgaranjem je specifična potrošnja goriva. Za razliku od općih mjera poput potrošnje u litrama po satu, SFC predstavlja fundamentalni pokazatelj koji direktno povezuje masu utrošenog goriva ($\dot{m}_f$) sa snagom motora na radilici (P_B):

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_B} \quad (3.8)$$

Jedinica grama po kilovatsatu (g/kWh) omogućuje pravednu usporedbu efikasnosti različitih motora, neovisno o njihovoj veličini i maksimalnoj snazi. Niža vrijednost SFC-a implicira višu efikasnost, odnosno manju količinu goriva potrebnu za obavljanje iste jedinice rada. Stoga je minimizacija SFC-a, odnosno operiranje motora u režimima visoke efikasnosti, u srži svake strategije za smanjenje potrošnje goriva, operativnih troškova i emisija štetnih plinova.

Ponašanje specifične potrošnje goriva, prikazano na slici 3.3 [170] za različite brodske motore, izrazito je nelinearno i otkriva nekoliko ključnih karakteristika koje su od presudne važnosti za modeliranje i upravljanje hibridnim sustavima.



Slika 3.3 Prikaz specifične potrošnje goriva kod motora različitih veličina pri radu na propelornoj krivulji i na konstantnom broju okretaja [170]

Krivulje na dijagramu imaju prepoznatljiv oblik, s izraženim minimumom. Taj minimum predstavlja točku najveće efikasnosti motora, koja se za moderne brodske dizele tipično nalazi u području visokih opterećenja, između 75 % i 90 % maksimalne trajne snage (MCR). U tom radnom području, termodinamički parametri motora—poput tlaka i temperature izgaranja, stupnja punjenja cilindara i mehaničkih gubitaka—nalaze se u optimalnom odnosu, što rezultira najpotpunijim izgaranjem goriva i minimalnim gubicima po jedinici proizvedene snage. U idealnim uvjetima, motor bi neprestano radio u toj točki, no u stvarnim plovidbenim uvjetima, gdje zahtjevi za snagom konstantno variraju, to je praktički neizvedivo za konvencionalne pogonske sustave.

Najdramatičnija karakteristika SFC krivulje je njen eksponencijalni rast pri opterećenjima ispod 25-30 % MCR. Ova izrazita neefikasnost proizlazi iz činjenice da motor ima značajne unutarnje, tzv. parazitske gubitke, koji su relativno neovisni o izlaznoj snazi. Čak i kada ne vrši koristan rad, motor mora trošiti gorivo samo da bi svladao unutarnje trenje, pokretao pomoćne sustave (pumpe ulja, vode i goriva) te održavao radnu temperaturu. Pri visokim snagama, ovi fiksni gubici čine mali postotak ukupne proizvedene energije. Međutim, pri malim snagama, oni postaju dominantni, što znači da se veći dio energije goriva troši na održavanje samog motora, a manji dio na koristan rad. Posljedično, specifična potrošnja goriva drastično raste. Ovaj fenomen čini konvencionalne pogone izuzetno neefikasnim u režimima rada kao što su manevriranje, plovidba niskom brzinom ili čekanje u luci, te pruža temeljni argument za primjenu hibridnih sustava koji mogu u potpunosti izbjeći rad motora u tim neefikasnim područjima.

Dijagram na slici 3.3 jasno razlikuje dvije vrste radnih režima. Ta razlika je ključna jer se u analiziranom hibridnom sustavu nalaze motori koji rade u oba režima:

- **Glavni pogonski motor** radi po propelernoj krivulji. Snaga potrebna za pogon propelera raste približno s kubom brzine vrtnje ($P \propto N^3$). To znači da se sa smanjenjem brzine vrtnje motora istovremeno smanjuje i moment i snaga.
- **Pomoćni dizel-generator** radi pri konstantnoj brzini vrtnje kako bi osigurao stabilnu frekvenciju izmjenične struje (npr. 50 ili 60 Hz). Snaga se mijenja isključivo promjenom opterećenja generatora, dok motor zadržava istu brzinu vrtnje.

Kao što je vidljivo iz usporedbe krivulja, rad pri konstantnoj brzini vrtnje rezultira višom specifičnom potrošnjom pri djelomičnim opterećenjima u usporedbi s radom po propelerskoj krivulji. Razlog leži u tome što motor koji radi pri konstantnoj brzini ne može optimizirati sve parametre za niža opterećenja; iako je izlazna snaga mala, mehanički gubici zbog visoke brzine vrtnje ostaju veliki. Zbog toga je za potrebe preciznog modeliranja nužno koristiti dva odvojena seta parametara: jedan za glavni motor i drugi za pomoćni generator.

3.2.2 Odabir pristupa modeliranju

Izbor metodologije za modeliranje komponente unutar složenog energetskeg sustava uvijek predstavlja kompromis između preciznosti, kompleksnosti i računalne zahtjevnosti. Pri modeliranju motora s unutarnjim izgaranjem, u literaturi se generalno razlikuju dvije temeljne kategorije pristupa: dinamički (fizički utemeljeni) modeli i kvazi-statički modeli.

Dinamički modeli temelje se na rješavanju fundamentalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju fizičke procese unutar motora u vremenskoj domeni. Ovi modeli obuhvaćaju termodinamičke cikluse u cilindrima, dinamiku fluida u usisnim i ispušnim sustavima, prijenos topline te mehaniku pokretnih dijelova poput koljenastog vratila i turbopunjača. Njihova glavna prednost je iznimno visoka preciznost, jer mogu precizno simulirati prijelazne pojave kao što su promjene u broju okretaja, odziv turbopunjača i toplinske efekte. Međutim, njihov fundamentalni nedostatak je izuzetno visoka računalna zahtjevnost. Vrijeme simulacije za svega nekoliko sekundi stvarnog rada motora može trajati minute ili čak sate, što ih čini potpuno neprikladnima za primjenu unutar optimizacijskog okvira koji zahtijeva tisuće dugogodišnjih simulacija.

S druge strane, kvazi-statički modeli, koji se detaljnije pojašnjavaju u poglavlju 2.8.4, ne rješavaju interne dinamičke procese motora. Umjesto toga, oni se oslanjaju na unaprijed definirane podatke o performansama, najčešće u obliku mapa ili krivulja dobivenih eksperimentalnim mjerenjem na testnom stolu. Model kao ulaznu veličinu prima željenu radnu točku (npr. zahtijevanu snagu i/ili brzinu vrtnje), a kao izlaznu veličinu daje odgovarajuću vrijednost performansi (npr. potrošnju goriva) jednostavnim očitavanjem ili interpolacijom iz mape. Naziv "kvazi-statički" proizlazi iz temeljne pretpostavke da motor trenutačno prelazi iz jedne stacionarne radne točke u drugu, zanemarujući dinamiku tog prijelaza.

S obzirom na ciljeve ovog istraživanja, kvazi-statički pristup predstavlja ne samo praktičan, već i metodološki najispravniji izbor iz nekoliko ključnih razloga:

1. **Računalna učinkovitost:** Budući da se model svodi na jednostavnu evaluaciju matematičke funkcije ili očitavanje iz tablice, vrijeme izračuna je zanemarivo kratko. To je apsolutni preduvjet za provedbu optimizacije koja uključuje simulaciju životnog vijeka sustava od 10 godina s vremenskim korakom od 60 sekundi. Primjena dinamičkog modela u takvom okviru bila bi računalno neizvediva.

2. **Fokus istraživanja:** Primarni cilj modela nije analiza unutarnjih procesa motora, već precizno kvantificiranje potrošnje goriva kao ključnog ulaza za ekonomske (LCC) i ekološke (ukupno gorivo) funkcije cilja. Kvazi-statički modeli, ukoliko su temeljeni na kvalitetnim podacima proizvođača, pružaju izvrsnu točnost upravo za ovu svrhu.
3. **Vremenska skala simulacije:** Vremenski korak simulacije ($dt=60s$) znatno je veći od vremenske skale na kojoj se odvijaju dinamičke pojave u motoru. Slijedom toga, zanemarivanje ovih brzih pojava je opravdana simplifikacija, jer se stanje sustava promatra kao slijed stacionarnih stanja u diskretnim vremenskim točkama.

Zaključno, kvazi-statički pristup nudi optimalan kompromis između potrebne točnosti za analizu na razini sustava i računalne brzine koja omogućuje njegovu integraciju u složeni, dugotrajni optimizacijski proces. Time se osigurava da je cjelokupna metodologija i znanstveno utemeljena i praktično izvediva.

3.2.3 Matematički opis modela

Kako bi se vjerno opisale nelinearne SFC krivulje sa slike 3.3, u ovom radu korišten je model baziran na eksponencijalnoj funkciji. Ovaj pristup omogućuje preciznu aproksimaciju oblika krivulje uz računski vrlo prihvatljivu složenost. Jednadžba za izračun *normalizirane* specifične potrošnje goriva glasi:

$$SFC_{norm} = a \cdot e^{(b \cdot load)} + c \quad (3.9)$$

gdje su:

- SFC_{norm} - Normalizirana, bezdimenzijska vrijednost specifične potrošnje goriva.
- $load$ - Trenutno relativno opterećenje motora, izračunato kao omjer trenutne snage (P_{kW}) i maksimalne snage motora ($P_{max,kW}$).
- a, b, c - Empirijski koeficijenti koji definiraju oblik krivulje.

Unutar simulacijskog okvira, pohranjeni su različiti setovi ovih koeficijenata kako bi se modelirale različite vrste motora. Za glavni pogonski motor odabran je set parametara koji odgovara radu po propelerskoj krivulji, dok je za pomoćni generator odabran set koji odgovara radu pri konstantnoj brzini vrtnje. Set parametara je prikazan u tablici 3.1.

Tablica 3.1: Set parametara za izračun normaliziranih SFC krivulja za različite vrste motora

Tip motora	a	b	c
Sporokretni motor	0.7687	-15.2808	0.4225
Srednjekretni motor koji radi po propelerskoj krivulji	0.7871	-14.2547	0.456
Srednjekretni motor koji radi pri konstantnom broju okretaja	0.9397	-14.2638	0.4617
Brzokretni motor koji radi po propelerskoj krivulji	0.8879	-13.7346	0.564
Brzokretni motor koji radi pri konstantnom broju okretaja	0.898	-11.4026	0.5665

Model prvo izračunava normaliziranu vrijednost, koju zatim skalira pomoću referentnog faktora kako bi se dobila stvarna vrijednost SFC-a u fizičkim jedinicama (g/kWh). Stvarna specifična potrošnja goriva (SFC_{real}) računa se kao:

$$SFC_{real}[g/kWh] = SFC_{norm} \cdot F_n \quad (3.10)$$

gdje je $F_n = 400$ normalizacijski faktor.

Konačno, ukupna masena potrošnja goriva u gramima po satu ($\dot{m}_f$) dobiva se množenjem stvarne specifične potrošnje sa izlaznom snagom motora:

$$\dot{m}_f [\text{g/h}] = SFC_{real} \cdot P_{kW} \quad (3.11)$$

3.2.4 Proračun ukupne potrošnje goriva u životnom ciklusu

Prethodno opisani model specifične potrošnje goriva predstavlja temelj za izračun trenutačne potrošnje u svakom vremenskom koraku simulacije. Međutim, za potrebe cjelokupne optimizacije, ključni pokazatelj performansi je ukupna masa goriva koju će određena konfiguracija hibridnog sustava potrošiti tijekom cijelog svog životnog vijeka. Ta ukupna potrošnja jedna je od tri ključne ciljne funkcije koje se minimiziraju u optimizacijskom problemu.

Proračun se provodi za svaku pojedinu jedinku u genetskom algoritmu. Za svaku jedinku pokreće se cjelovita simulacija životnog ciklusa u trajanju od 10 godina. Ukupna potrošnja goriva ($M_{f,total}$) dobiva se numeričkom integracijom trenutačne potrošnje goriva tijekom cjelokupnog simulacijskog perioda. S obzirom na to da se simulacija odvija u diskretnim vremenskim koracima (Δt), ukupna potrošnja je suma potrošnji u svakom pojedinom koraku:

$$M_{f,total} = \sum_{i=1}^N \left(\dot{m}_{f,ICE}(t_i) + \dot{m}_{f,genset}(t_i) \right) \cdot \Delta t \quad (3.12)$$

gdje su:

- $M_{f,total}$ - Ukupna masa potrošenog goriva [g] tijekom cijele simulacije.
- $\dot{m}_{f,ICE}(t_i)$ - Maseni protok goriva glavnog motora [g/s] u vremenskom koraku t_i .
- $\dot{m}_{f,genset}(t_i)$ - Maseni protok goriva pomoćnog generatora [g/s] u vremenskom koraku t_i .
- Δt - Trajanje jednog vremenskog koraka [s].
- N - Ukupan broj vremenskih koraka u simulaciji životnog ciklusa.

Dobivena vrijednost, najčešće izražena u kilogramima ili tonama, predstavlja konačnu ocjenu energetske efikasnosti pojedinog dizajna i strategije upravljanja. Ta se vrijednost zatim prosljeđuje optimizacijskom algoritmu kao jedan od rezultata funkcije cilja koju treba minimizirati.

3.3 Model baterijskog sklopa

Baterijski sklop za pohranu energije (BESS) ključna je komponenta hibridnog sustava, koja omogućuje pohranu viška energije i isporuku snage bez emisija. Međutim, litij-ionske baterije podložne su degradaciji kapaciteta tijekom vremena, što direktno utječe na performanse i ekonomsku isplativost sustava. Budući da degradacija nije linearan proces i ovisi o nizu stresora, precizno predviđanje životnog vijeka ključno je za procjenu ukupnih troškova vlasništva. Model baterije u ovom istraživanju sastoji od dva međusobno povezana dijela: električnog modela koji prati trenutno stanje napunjenosti (SOC) i modela degradacije koji predviđa dugoročni gubitak kapaciteta.

3.3.1 Model stanja napunjenosti

Osnovni zadatak električnog modela je praćenje količine energije pohranjene u bateriji u svakom trenutku. Za tu svrhu koristi se metoda brojanja kulona (eng. *Coulomb counting*), odnosno praćenje energetskog toka, koja uzima u obzir gubitke prilikom punjenja i pražnjenja.

Kada se baterija prazni ($P_{batt} > 0$), energija isporučena iz baterije veća je od one predane električnoj mreži zbog unutarnjih gubitaka. Promjena energije u bateriji (E_{BESS}) u vremenskom koraku Δt računa se kao:

$$E_{BESS}(t) = E_{BESS}(t - \Delta t) - \frac{P_{batt}(t)}{\eta_{praz}} \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

Kada se baterija puni ($P_{batt} < 0$), energija pohranjena u bateriju manja je od one preuzete s mreže. Promjena energije tada iznosi:

$$E_{BESS}(t) = E_{BESS}(t - \Delta t) - P_{batt}(t) \cdot \eta_{pun} \cdot \Delta t \quad (3.14)$$

gdje su η_{praz} i η_{pun} prosječne efikasnosti pražnjenja i punjenja. Stanje napunjenosti (SOC) se zatim definira kao omjer trenutne energije u bateriji i njenog nominalnog energetskog kapaciteta na početku životnog vijeka (E_{nom}):

$$SOC(t) = \frac{E_{BESS}(t)}{E_{nom}} \quad (3.15)$$

Ovaj model, implementiran u simulacijskom okviru, omogućuje jednostavno i računski efikasno praćenje SOC-a, što je ključan ulazni podatak kako za strategiju upravljanja, tako i za model starenja.

3.3.2 Model degradacije baterije

Optimalno dimenzioniranje hibridnog broskog energetskog sustava složen je tehno-ekonomski problem u kojem su dugoročne performanse i životni vijek baterijskog sustava za pohranu energije (BESS) ključni čimbenici njegove financijske isplativosti. U tu je svrhu potreban robustan model životnog vijeka baterije koji je istovremeno računalno učinkovit za korištenje unutar optimizacijskog okvira i reprezentativan za fizikalne pojave degradacije u stvarnim uvjetima.

Ovaj rad primjenjuje polu-empirijski model degradacije za simulaciju gubitka kapaciteta litij-željezo-fosfatne (LFP/Gr) baterije kemije.

Polu-empirijski modeli predstavljaju pragmatičnu ravnotežu između čisto empirijskih, podatkovno vođenih modela i računalno intenzivnih elektrokemijskih modela temeljenih na prvim principima. Izgrađeni su na matematičkim strukturama inspiriranim fizikalnim zakonima—poput Arrheniusovih i Tafelovih jednadžbi koje opisuju brzine kemijskih reakcija—ali njihovi se parametri kalibriraju pomoću eksperimentalnih podataka o starenju. Ovaj pristup rezultira modelom koji je istovremeno fizikalno intuitivan i računalno izvediv.

Specifičan model koji se primjenjuje je polu-empirijska formulacija za LFP/Gr ćelije predstavljena u sveobuhvatnoj studiji Gasper i sur. [171]. U svom radu, autori su usporedili performanse ovog polu-empirijskog modela s kompleksnijim modelom strojnog učenja i utvrdili da je polu-empirijska struktura bila iznimno učinkovita u opisivanju degradacijskog ponašanja. Prilikom odabira odgovarajućeg degradacijskog modela, uočeno je da je većina znanstvene literature usmjerena na testiranje i modeliranje ćelija manjeg formata (npr. <10 Ah), čije se degradacijsko ponašanje ne može izravno preslikati na ćelije velikog formata koje se koriste u brodskim i

stacionarnim sustavima. U literaturi postoji značajan nedostatak javno dostupnih podataka i sveobuhvatnih studija starenja za komercijalne litij-ionske baterije velikog kapaciteta (>50 Ah). Studija autora Gasper i sur. (2023) odabrana je kao temelj za ovaj rad upravo zato što izravno adresira taj nedostatak, predstavljajući jednu od rijetkih, ako ne i jedinu, sveobuhvatnu analizu koja uključuje i kalendarsko i cikličko starenje te razvoj validiranih modela za LFP i NMC ćelije velikog formata. Vrste razmatranih baterija i njihovi kapaciteti su prikazani u donjoj tablici.

Tablica 3.2: Detalji o komercijalnim litij-ionskim baterijskim ćelijama velikog kapaciteta

Naziv ćelije	Pozitivna elektroda	Nominalni napon	Klasa kapaciteta	Nominalni DCIR	Norm. toplinski otpor
NMC Gr A	LiNixMnyCozO ₂	3.7 V	75 Ah	0.56 mΩ	160 Kh
NMC Gr B1	LiNixMnyCozO ₂	3.7 V	50 Ah	0.70 mΩ	71 Kh
NMC Gr B2	LiNixMnyCozO ₂	3.7 V	50 Ah	0.79 mΩ	86 Kh
LFP	LiFePO ₄	3.3 V	250 Ah	0.36 mΩ	280 Kh

Sve ćelije imaju grafitne negativne elektrode. Unutarnji istosmjerni otpor (DCIR) je prosjek otpora punjenja i pražnjenja, izračunat primjenom Ohmovog zakona na 10-sekundne impulse punjenja i pražnjenja (> 1C) pri 50 % SOC i 30°C na temelju mjerenja svih testiranih ćelija na početku životnog vijeka. Normalizirani toplinski otpor je linearni nagib porasta temperature tijekom cikliranja kao funkcija procijenjene stope generiranja topline, normaliziran energetske kapacitetom ćelije.

1. Arhitektura modela

Temeljna arhitektura polu-empirijskog modela izgrađena je na dobro utvrđenom principu razdvajanja degradacije baterije na dvije primarne, aditivne komponente: degradaciju koja se pasivno događa tijekom vremena, poznatu kao kalendarsko starenje, i dodatnu štetu uzrokovanu operativnim stresorima punjenja i pražnjenja, koja se naziva cikličko starenje. Kalendarsko starenje prvenstveno je potaknuto parazitskim kemijskim nuspojavama na sučeljima elektroda-elektrolit, koje su neprestano aktivne. Cikličko starenje, s druge strane, uvodi dinamička mehanička i elektrokemijska naprezanja, poput onih uzrokovanih interkalacijom/deinterkalacijom litija, koja su prisutna samo tijekom uporabe. Interkalacija litija je reverzibilni elektrokemijski proces umetanja litijevih iona unutar kristalne rešetke grafita, bez značajnog narušavanja kovalentnih veza unutar te strukture. Deinterkalacija predstavlja reverzni proces, odnosno ekstrakciju litijevih iona iz rešetke domaćina. Ova visoko reverzibilna migracija iona između kristalnih rešetki anode i katode temeljni je mehanizam koji omogućuje pohranu i oslobađanje naboja, a time i energije, u litij-ionskim baterijama

Iako originalna formulacija Gasper i sur. (2023) predstavlja model u smislu ukupnog gubitka kapaciteta, njegova primjena na sustav s dinamičkim radnim profilom—kao što je hibridno brodsko plovilo—zahtijeva njegovu konverziju u oblik temeljen na stopi degradacije. Ovaj metodološki korak u potpunosti je usklađen s pristupom samih autora. Kako bi procijenili stvarni životni vijek baterija u realnim primjenama, poput stacionarnih sustava, autori su proveli simulacije degradacije s vremenski ovisnim stresorima tako što su model gubitka kapaciteta tokom cijelog životnog vijeka pretvorili u vremenski ovisan oblik te izračunavali promjenu kapaciteta u satnim vremenskim koracima. Ovakav pristup je neophodan jer je model koji predviđa ukupan gubitak praktičan samo za statičke ili vrlo pravilne radne cikluse, dok model temeljen na stopi

degradacije može izračunati inkrementalnu štetu koja nastaje tijekom svakog malog vremenskog koraka promjenjivog profila misije, pružajući znatno točnije predviđanje životnog vijeka.

Vodeća hipoteza modela je da se ukupna trenutačna stopa gubitka kapaciteta, $\frac{dq}{dt}$, može izraziti kao linearna superpozicija stopa kalendarske i cikličke degradacije. Ova pretpostavka o aditivnim, ne-interaktivnim mehanizmima je pojednostavljivanje, no pokazala se vrlo učinkovitom za LFP/Gr bateriju. Srž arhitekture stoga je sljedeća diferencijalna jednadžba:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{d(q_{Loss,Cal})}{dt} + \frac{d(q_{Loss,Cyc})}{dt} \quad (3.16)$$

Stope degradacije nisu konstante, već funkcije koje ovise o trenutnom stanju baterije i njezinoj cjelokupnoj povijesti rada. Ova ovisnost ključna je za opisivanje nelinearnog ponašanja starenja baterije. Stopa u bilo kojem vremenskom koraku k određena je dvjema skupinama ulaznih podataka:

- **Trenutni stresori:** Ovo su radni uvjeti u stvarnom vremenu koji diktiraju trenutačnu ozbiljnost procesa degradacije. Uključuju temperaturu ćelije (T_k), stanje napunjenosti (SOC_k) i iznos struje (I_k). Viša temperatura, na primjer, trenutačno će ubrzati stopu reakcija kalendarskog starenja, dok će veća struja povećati stopu cikličkog starenja.
- **Akumulirane varijable stanja:** Ove varijable predstavljaju kumulativnu povijest i trenutno zdravlje baterije. Primarne varijable stanja su ukupno proteklo kalendarsko vrijeme (t_{total}) i ukupan protok naboja kroz bateriju, mjeren u ekvivalentnim punim ciklusima (EFC_{total}).

Ovaj okvir, temeljen na stopi degradacije, neophodan je za točnu procjenu životnog vijeka baterije u hibridnom brodskom sustavu, kojeg karakterizira složen slijed radnih režima poput tranzita, manevriranja i boravka u luci. Izračunavanjem inkrementalnog gubitka kapaciteta u svakom vremenskom koraku na temelju specifičnih uvjeta tog trenutka i akumulirane povijesti baterije, ukupan gubitak kapaciteta može se pronaći numeričkim integriranjem trenutačne stope tijekom cijelog radnog profila. Na slici 3.4 prikazan je dijagram toka cijelog modela degradacije čiji će pojedini segmenti biti dodatno pojašnjeni u nastavku.



Slika 3.4: Dijagram toka modela degradacije baterije

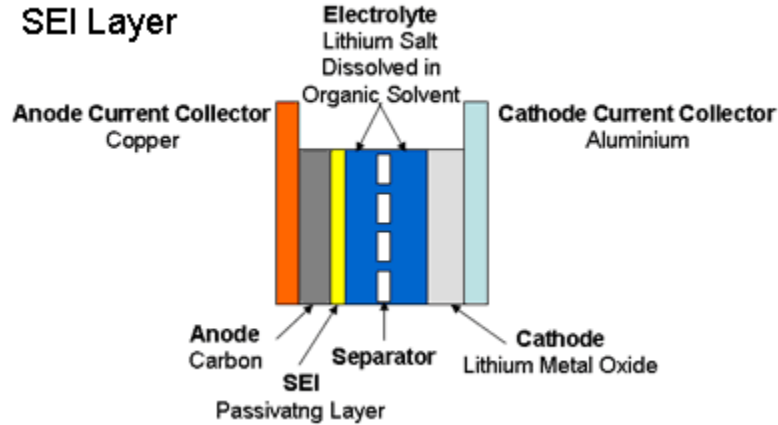
2. Formulacija stope kalendarske degradacije

Komponenta kalendarske degradacije u modelu formulirana je kako bi obuhvatila kontinuirani, naizgled pasivni gubitak kapaciteta koji baterija doživljava tijekom vremena, čak i kada se ne koristi. Ovaj fenomen ukorijenjen je u nizu sporih, ireverzibilnih parazitskih reakcija koje se događaju na sučeljima elektroda-elektrolit. Kod litij-ionskih ćelija s grafitnim anodama, najznačajnija od tih reakcija je formiranje i naknadni rast međufaze čvrstog elektrolita (SEI).

SEI je složen pasivizacijski sloj koji se formira na površini anode od produkata razgradnje elektrolita. Njegovo početno formiranje ključno je za funkcioniranje baterije, jer kinetički stabilizira visoko reaktivni litirani grafit od daljnje, opsežne redukcije elektrolita. Međutim, SEI nije savršeno stabilan i nastavlja polako rasti i razvijati se tijekom životnog vijeka baterije. Ovaj kontinuirani rast primarni je mehanizam degradacije jer nepovratno troši ciklički dostupan litij i organsko otapalo, što izravno dovodi do gubitka kapaciteta. Prikaz SEI sloja može se vidjeti na

slici 3.5 [172]. Model ima za cilj obuhvatiti makroskopski utjecaj ovog procesa, sa stopom koja je vrlo osjetljiva na temperaturu skladištenja i elektrokemijski potencijal anode (koji je izravna funkcija stanja napunjenosti).

Trenutačna stopa kalendarske degradacije izvedena je iz temeljne jednadžbe za ukupan kalendarski



Slika 3.5 Prikaz strukture litij ionske baterije i položaja SEI sloja [172]

gubitak. Ukupni udio izgubljenog kapaciteta, $q_{Loss,Cal}$, dan je jednadžbom:

$$q_{Loss,Cal} = p_1 \cdot \exp\left(\frac{p_2}{T}\right) \cdot \exp\left(\frac{p_3 U_a}{T}\right) \cdot t^{p_4} \quad (3.17)$$

ako bi se ovaj izraz prilagodio za dinamičku simulaciju, potrebno je pronaći trenutačnu stopu deriviranjem po vremenu. Grupiranjem faktora koji ne ovise o vremenu u jedinstveni koeficijent brzine, K_{cal} , ukupni gubitak se pojednostavljuje u ovisnost o potenciji vremena: $q_{Loss,Cal} = K_{cal} \cdot t^{p_4}$. Derivacija tada glasi:

$$\frac{d(q_{Loss,Cal})}{dt} = \frac{d}{dt}(K_{cal} \cdot t^{p_4}) = K_{cal} \cdot p_4 \cdot t^{p_4-1} \quad (3.18)$$

Ovaj konačni izraz, jednadžba trenutačne stope kalendarske degradacije, daje udio izgubljenog kapaciteta po jedinici vremena. Njegova se struktura može dekonstruirati na dva fizikalno značajna dijela:

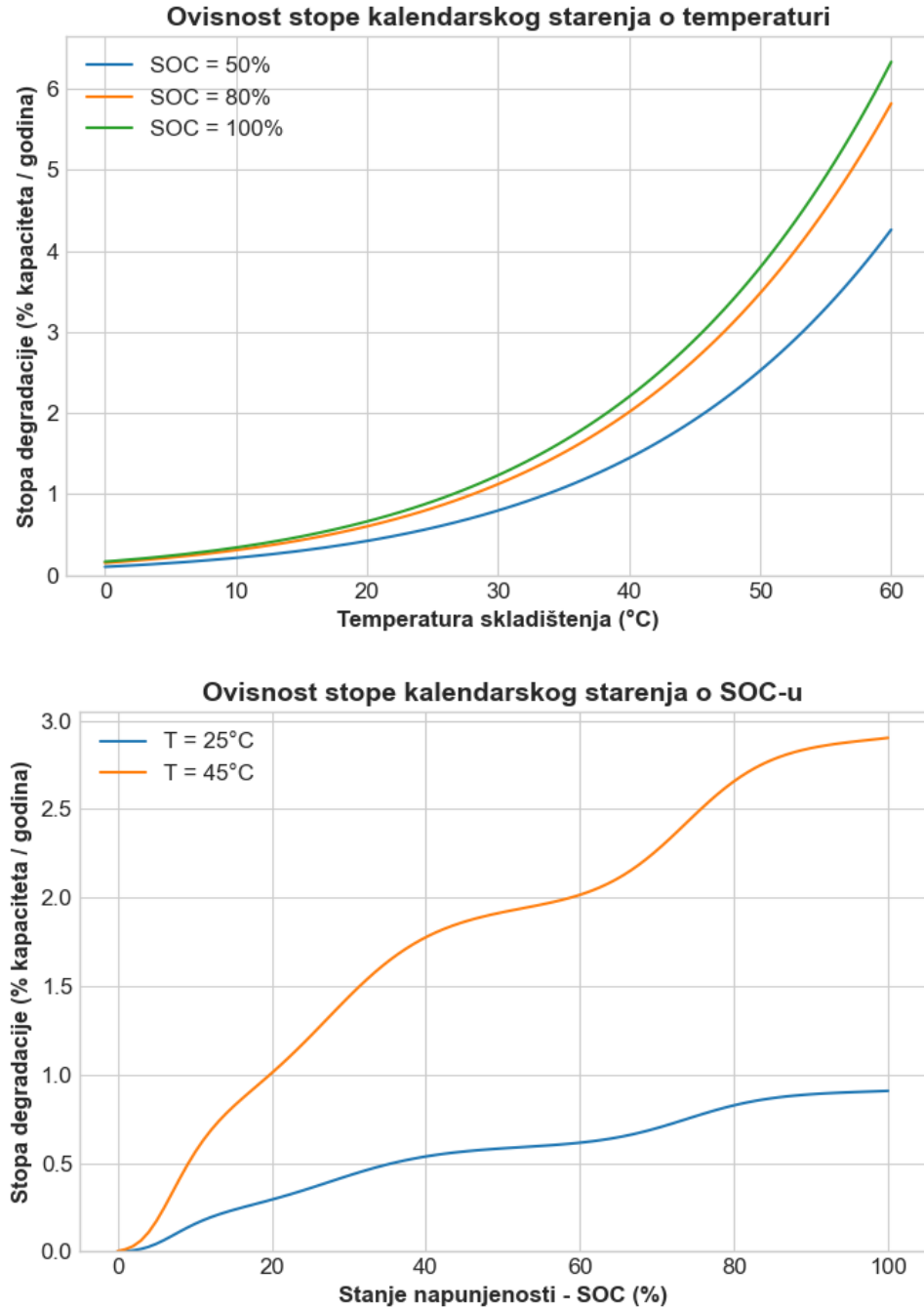
- **Koeficijent brzine (K_{cal})**

Ovaj složeni član određuje temeljnu ozbiljnost stope degradacije pod određenim skupom kvazistatičkih uvjeta (temperatura i SOC). On efektivno sažima termodinamičke i kinetičke pokretače nuspojava u jednu skalarnu vrijednost. Prikaz utjecaja parametara SOC-a i temperature može se vidjeti na slici 3.6.

- **Arrheniusov član**, $\exp\left(\frac{p_2}{T}\right)$, opisuje eksponencijalnu ovisnost brzine reakcije o apsolutnoj temperaturi (T). Parametar p_2 analogan je efektivnoj aktivacijskoj energiji procesa degradacije ($p_2 \approx -E_a/R_g$), kvantificirajući toplinsku osjetljivost. Negativni predznak kalibriranog parametra p_2 potvrđuje da se stopa degradacije povećava s temperaturom.
- **Tafelov član**, $\exp\left(\frac{p_3 U_a}{T}\right)$, obuhvaća eksponencijalnu ovisnost brzine reakcije o potencijalu anode (U_a). Potencijal grafitne anode je izrazito nelinearna funkcija SOC-a, postajući vrlo nizak (tj. negativniji u odnosu na katodu) pri visokim

stanjima napunjenosti. Ovaj nizak potencijal pruža veću pokretačku silu za redukciju elektrolita. Negativni predznak kalibriranog parametra p_3 ispravno modelira ovu vezu, pokazujući da niži U_a (viši SOC) rezultira bržom stopom degradacije. Model stoga ispravno identificira kombinaciju visoke temperature i visokog SOC-a kao najštetniji uvjet skladištenja.

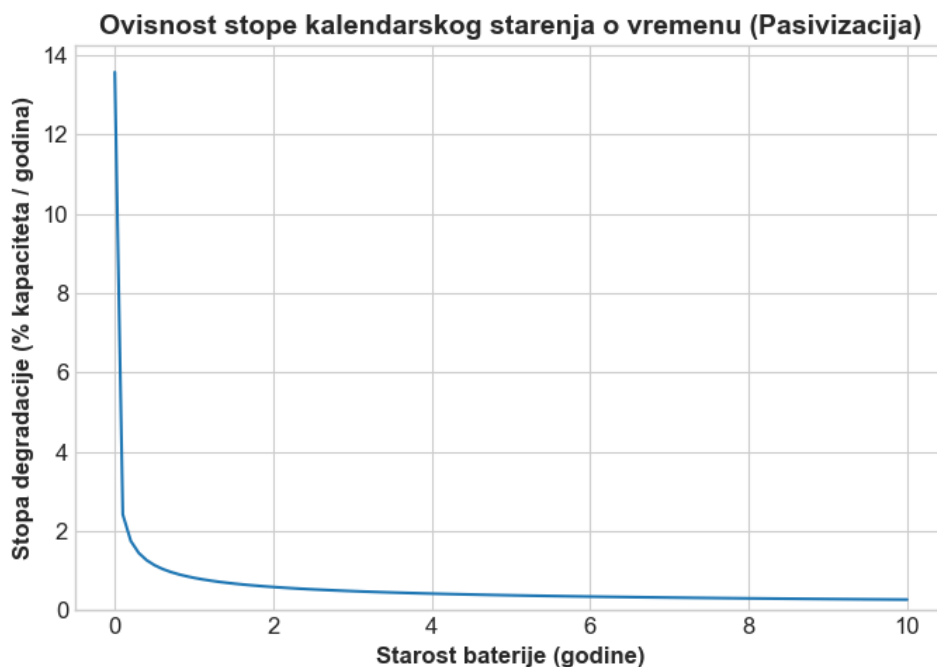
- Vremenski ovisan član ($p_4 \cdot t^{p_4-1}$)



Slika 3.6 Prikaz ovisnosti stope kalendarskog starenja o temperaturi i SOC-u

Ovaj član upravlja evolucijom stope degradacije tijekom vremena i odražava prirodu procesa starenja.

Eksponent p_4 diktira oblik krivulje degradacije. Za LFP/Gr ćeliju, empirijski kalibrirana vrijednost p_4 iznosi 0.5257. Budući da je ova vrijednost manja od 1, eksponent u jednadžbi stope ($p_4 - 1$) je negativan, što znači da se stopa $\frac{d(q_{Loss,Cal})}{dt}$ smanjuje kako ukupno vrijeme (t) raste. Ovo matematičko ponašanje ima snažnu fizikalnu osnovu u teoriji pasivizacije. Kako SEI sloj postaje deblji, djeluje kao učinkovitija barijera, sprječavajući transport elektrona ili molekula otapala do reaktivne površine anode. To usporava stopu daljnjeg rasta SEI-ja. Važno je napomenuti da teorijski modeli rasta SEI-ja ograničenog difuzijom otapala kroz postojeći sloj često predviđaju gubitak kapaciteta proporcionalan kvadratnom korijenu vremena ($t^{0.5}$). Empirijski određen eksponent od ≈ 0.526 u ovom modelu u skladu je s ovom teorijom, što daje kredibilitet strukturi modela. Stopa kalendarskog starenja stoga je najviša kod nove baterije i postupno se smanjuje kako anoda postaje sve više pasivizirana. Utjecaj ovog člana može se jasno uočiti na slici 3.7.



Slika 3.7 Utjecaj pasivizacije, odnosno vremena na kalendarsko starenje

3. Formulacija stope cikličke degradacije

Komponenta cikličke degradacije u modelu formulirana je kako bi obuhvatila niz mehanizama oštećenja koji se aktiviraju ili značajno ubrzavaju tijekom dinamičkih uvjeta rada baterije. Za razliku od sporih, kontinuiranih procesa kalendarskog starenja, cikličko starenje uvodi niz elektrokemijsko-mehaničkih naprezanja. Primarni mehanizam je mehanički zamor uzrokovan ponavljanim promjenama volumena materijala elektroda tijekom interkalacije i deinterkalacije litija. Iako LFP katoda ima strukturno stabilnu rešetku, grafitna anoda doživljava značajno širenje volumena od približno 10 % pri potpunoj litijaciji. Ovo ponavljano naprezanje može dovesti do

pucanja čestica aktivnog materijala i, što je ključno, do pucanja zaštitnog SEI sloja. Svaka pukotina izlaže svježu površinu anode elektrolitu, pokrećući lokaliziranu, brzu reformaciju SEI-ja, što troši dodatni ciklički dostupan litij i ubrzava gubitak kapaciteta.

Nadalje, ekstremni radni uvjeti uvode druge putanje degradacije. Visoke C-stope mogu generirati značajno omsko zagrijavanje, povećavajući unutarnju temperaturu ćelije i ubrzavajući parazitske reakcije. Rad na niskim temperaturama značajno utječe na elektrokemijske procese unutar baterije, primarno usporavajući kinetiku, odnosno brzinu, interkalacije litijevih iona u grafitnu rešetku anode. U tim uvjetima, brzina kojom anoda može sigurno apsorbirati ione postaje ograničavajući faktor. Ukoliko se baterija puni strujom koja premašuje tu kinetički ograničenu brzinu interkalacije, dolazi do nakupljanja litijevih iona na površini anode. To nakupljanje uzrokuje pad potencijala anode ispod 0 V (u odnosu na Li/Li⁺), čime se stvaraju termodinamički uvjeti za njihovu redukciju u metalni litij. Taj proces, poznat kao litijsko oblaganje (engl. *lithium plating*), rezultira taloženjem metalnog litija na površini elektrode, što uzrokuje nepovratan gubitak kapaciteta i predstavlja ozbiljan sigurnosni rizik. Ovo je posebno težak način degradacije jer uzrokuje brz, nepovratan gubitak kapaciteta i, u ekstremnim slučajevima, može stvoriti dendrite koji predstavljaju rizik od unutarnjeg kratkog spoja. Model cikličke degradacije ima za cilj obuhvatiti kombinirani makroskopski učinak ovih složenih i često sinergijskih mehanizama oštećenja.

Trenutačna stopa cikličke degradacije u odnosu na vrijeme izvedena je iz temeljne jednadžbe rada za ukupan ciklički gubitak, koja je izražena kao funkcija ekvivalentnih punih ciklusa (engl. *equivalent full cycle*, EFC). Ekvivalentni puni ciklus (EFC) je standardizirana mjera koja predstavlja ukupan rad baterije jednak jednom potpunom punjenju i jednom potpunom pražnjenju njenog nominalnog kapaciteta. Ova jedinica omogućuje praćenje ukupnog trošenja baterije neovisno o tome jesu li ciklusi bili plitki ili duboki.

Ukupan gubitak, $q_{Loss,Cyc}$, dan je jednadžbom:

$$q_{Loss,Cyc} = (p_5 + p_6 \cdot DOD + p_7 \cdot C_{rate}) \cdot \left(\exp\left(\frac{p_8}{T}\right) + \exp\left(-\frac{p_9}{T}\right) \right) \cdot EFC^{p_{10}} \quad (3.19)$$

Kako bi se ovaj model, definiran kao funkcija ekvivalentnih ciklusa, transformirao u vremensku domenu potrebnu za simulaciju promjenjivog profila opterećenja, primjenjuje se lančano pravilo:

$$\frac{d(q_{Loss,Cyc})}{dt} = \frac{d(q_{Loss,Cyc})}{dEFC} \cdot \frac{dEFC}{dt} \quad (3.20)$$

Derivacija jednadžbe ukupnog gubitka u odnosu na EFC daje član “oštećenje po ciklusu”, dok je “stopa akumulacije EFC-a” funkcija trenutačne struje, $|I(t)|$, i nominalnog kapaciteta ćelije, Q_{nom} .

To dovodi do konačne jednadžbe trenutačne stope cikličke degradacije:

$$K_{cyc} = (p_5 + p_6 \cdot DOD + p_7 \cdot C_{rate}) \cdot \left(\exp\left(\frac{p_8}{T}\right) + \exp\left(-\frac{p_9}{T}\right) \right) \quad (3.21)$$

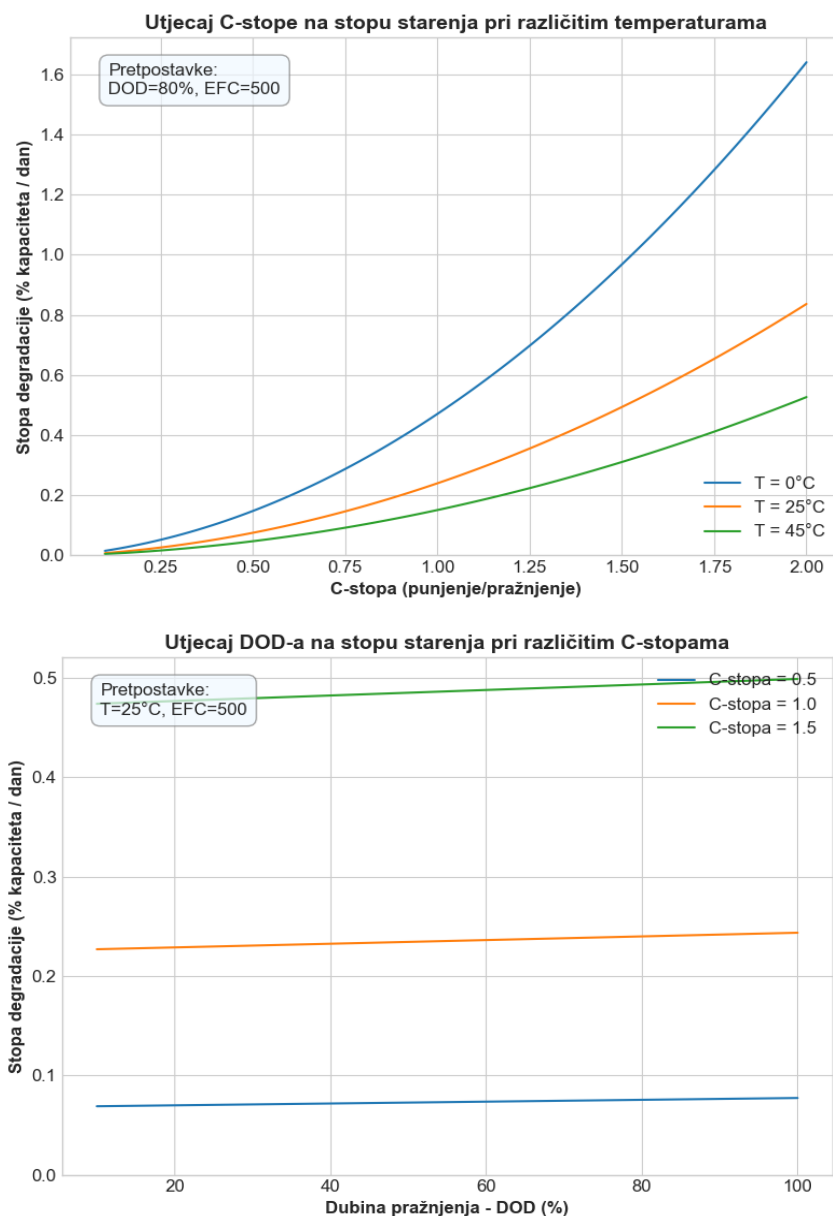
$$\frac{d(q_{Loss,Cyc})}{dt} = (K_{cyc} \cdot p_{10} \cdot EFC^{p_{10}-1}) \cdot \left(\frac{|I(t)|}{Q_{nom}} \right) \quad (3.22)$$

Struktura ove jednadžbe može se dekonstruirati na njezine ključne funkcionalne komponente:

- **Koeficijent cikličkog naprezanja (K_{cyc})**

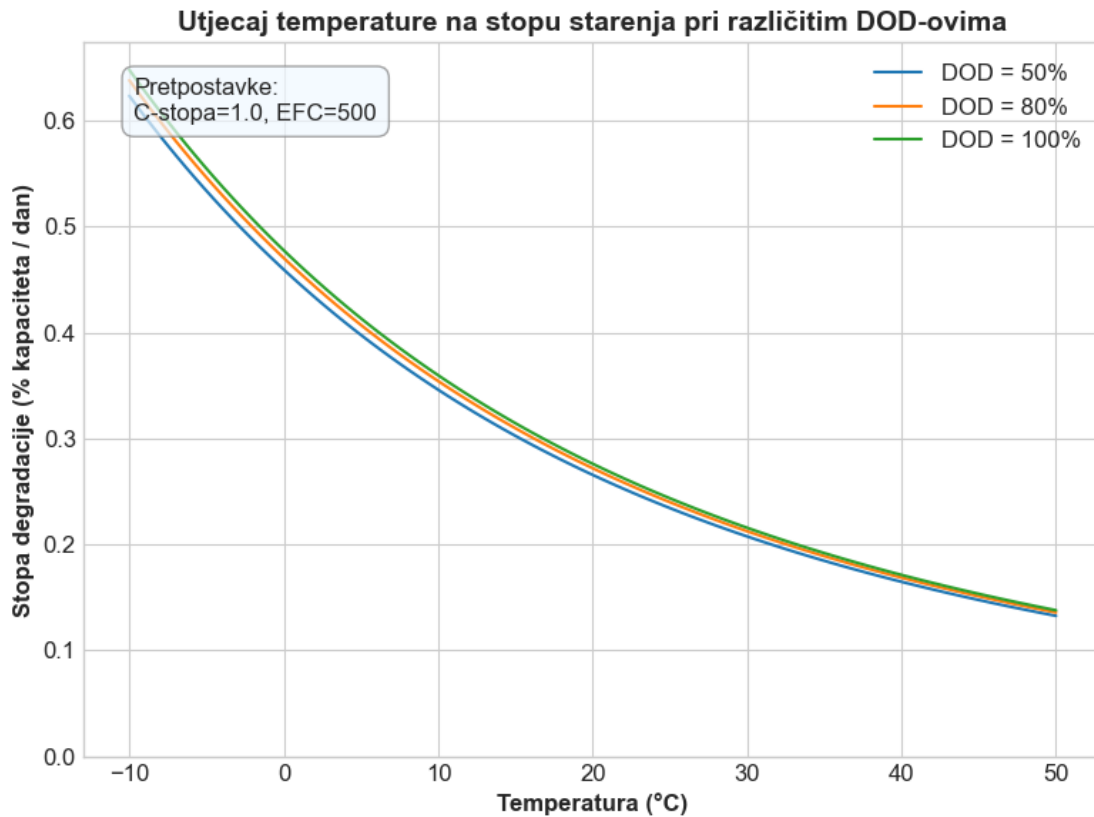
Ovaj koeficijent funkcionira kao sveobuhvatan faktor naprezanja, kvantificirajući intrinzičnu ozbiljnost cikliranja pod specifičnim radnim uvjetima. Utjecaji pojedinih parametara mogu se vidjeti na slikama 3.8 i 3.9.

- **Linearni član naprezanja, ($p_5 + p_6 \cdot DOD + p_7 \cdot C_{rate}$)**, modelira utjecaj dubine ciklusa i veličine struje. Model pretpostavlja linearno povećanje naprezanja s dubljim ciklusima (engl. *depth of discharge*, DOD) i višim C-stopama. Relativne veličine kalibriranih parametara p_6 i p_7 ukazuju na osjetljivost ćelije na svaki od stresora.



Slika 3.8: Utjecaj C-stope i DOD-a na stopu cikličke degradacije

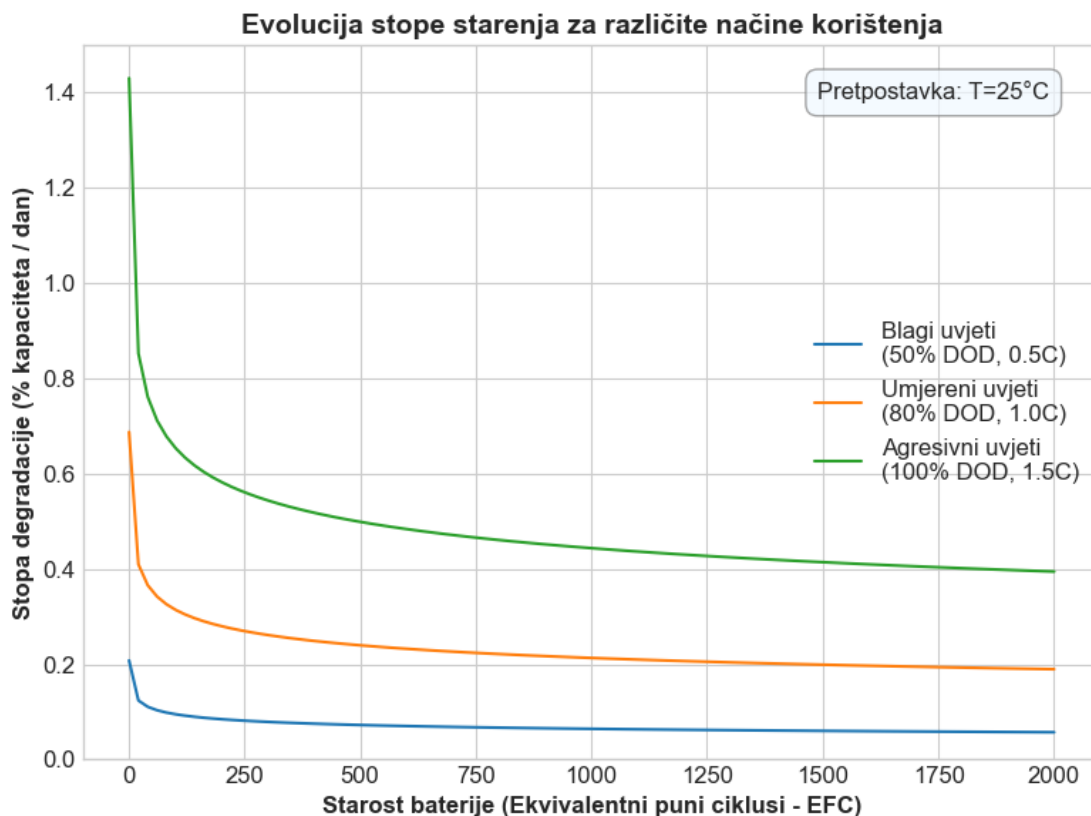
- Član ovisnosti o temperaturi, $\left(\exp\left(\frac{p_8}{T}\right) + \exp\left(-\frac{p_9}{T}\right)\right)$, pruža odziv na temperaturu. Za razliku od jednostavnijih modela koji obuhvaćaju samo efekte visokih temperatura, ova struktura uzima u obzir ubrzano starenje na oba ekstrema. Standardni Arrheniusov član, $\exp\left(\frac{p_8}{T}\right)$, modelira oštećenja od termički aktiviranih nuspojava. Inverzni Arrheniusov član, $\exp\left(-\frac{p_9}{T}\right)$, kritično obuhvaća povećani rizik od mehanizama degradacije poput litijskog oblaganja pri niskim temperaturama. Ova značajka je ključna za robusno modeliranje životnog vijeka baterije u primjenama sa širokim rasponom radnih temperatura, kao što je brodsko plovilo.



Slika 3.9: Utjecaj temperature pri različitim DOD-ovima na stopu cikličke degradacije

- Član ovisnosti o EFC-u, $p_{10} \cdot EFC^{p_{10}-1}$, opisuje kako se oštećenje po ciklusu razvija s dobi baterije. S kalibriranom vrijednošću p_{10} od $\sim 0,831$ (manje od 1), negativan eksponent ukazuje da se oštećenje od dodatnih ciklusa smanjuje kako baterija akumulira više ciklusa. To može odražavati stabilizaciju mikrostrukture elektroda ili iscrpljivanje reaktivnijih mjesta nakon početnog perioda rada baterije. Utjecaj EFC-a na stopu degradacije je prikazana na slici 3.10.

- **Stopa akumulacije EFC-a**, $\frac{|I(t)|}{Q_{nom}}$, djeluje kao faktor skaliranja u vremenskoj domeni. Ovaj član djeluje kao ključni modulatorski faktor koji upravlja cjelokupnim procesom cikličkog starenja, osiguravajući da je funkcija oštećenja aktivna samo dok teče struja i da je stopa oštećenja izravno proporcionalna veličini te struje. To ispravno izolira cikličko oštećenje na periode aktivne uporabe.



Slika 3.10: Utjecaj EFC-a na stopu cikličke degradacije

4. Implementacija diskretiziranih jednadžbi za numeričku simulaciju

Kontinuirane diferencijalne jednadžbe koje upravljaju stopama degradacije tvore spregnut, nelinearan sustav koji ovisi o vremenski promjenjivim radnim ulazima temperature, SOC-a i struje. Zbog složenosti i prirode ovih jednadžbi, analitičko rješenje za proizvoljan radni profil nije izvedivo. Slijedom toga, numerički pristup je neophodan za točnu simulaciju kumulativnog procesa starenja. Implementacija uključuje diskretizaciju kontinuiranog radnog profila u niz malih, konačnih vremenskih koraka, Δt , i inkrementalno integriranje degradacije.

Primijenjena shema numeričke integracije je obična (Forward) Eulerova metoda. Ova metoda prvog reda odabrana je prvenstveno zbog svoje računalne učinkovitosti i jednostavnosti implementacije, što su ključne značajke za model namijenjen korištenju unutar opsežnog okvira za optimizaciju sustava gdje se može pozivati milijunima puta. Metoda funkcionira tako da izračunava stopu degradacije na početku vremenskog koraka, k , i pretpostavlja da ta stopa ostaje konstantna tijekom intervala, Δt , kako bi se projiciralo stanje u sljedećem vremenskom koraku, $k+1$. Iako je računalno jeftina, točnost ove metode ovisi o veličini vremenskog koraka; dovoljno

mali Δt je potreban kako bi se osiguralo da aproksimacija ostane blizu stvarnog kontinuiranog rješenja, što predstavlja temeljni kompromis između vjernosti simulacije i računalnog opterećenja. Osnovno pravilo za ažuriranje relativnog kapaciteta baterije, q , izraženo je kao:

$$q_{k+1} = q_k - \left(\left(\frac{d(q_{Loss,Cal})}{dt} \right)_k + \left(\frac{d(q_{Loss,Cyc})}{dt} \right)_k \right) \cdot \Delta t \quad (3.23)$$

Kritičan aspekt ovog modela ovisnog o stanju je kontinuirano praćenje i ažuriranje varijabli koje predstavljaju “memoriju” ili akumuliranu povijest baterije. Primarne varijable stanja ažuriraju se na sljedeći način:

- **Ukupno vrijeme:** Ulaz za vremensku ovisnost stope kalendarskog starenja ažurira se jednostavnom akumulacijom: $t_{k+1} = t_k + \Delta t$.
- **Ukupni ekvivalentni puni ciklusi :** Ulaz za ovisnost o proturnosti stope cikličkog starenja ažurira se integriranjem trenutačne stope EFC-a: $EFC_{k+1} = EFC_k + \left(\frac{|I_k|}{Q_{nom}} \right) \cdot \Delta t$.

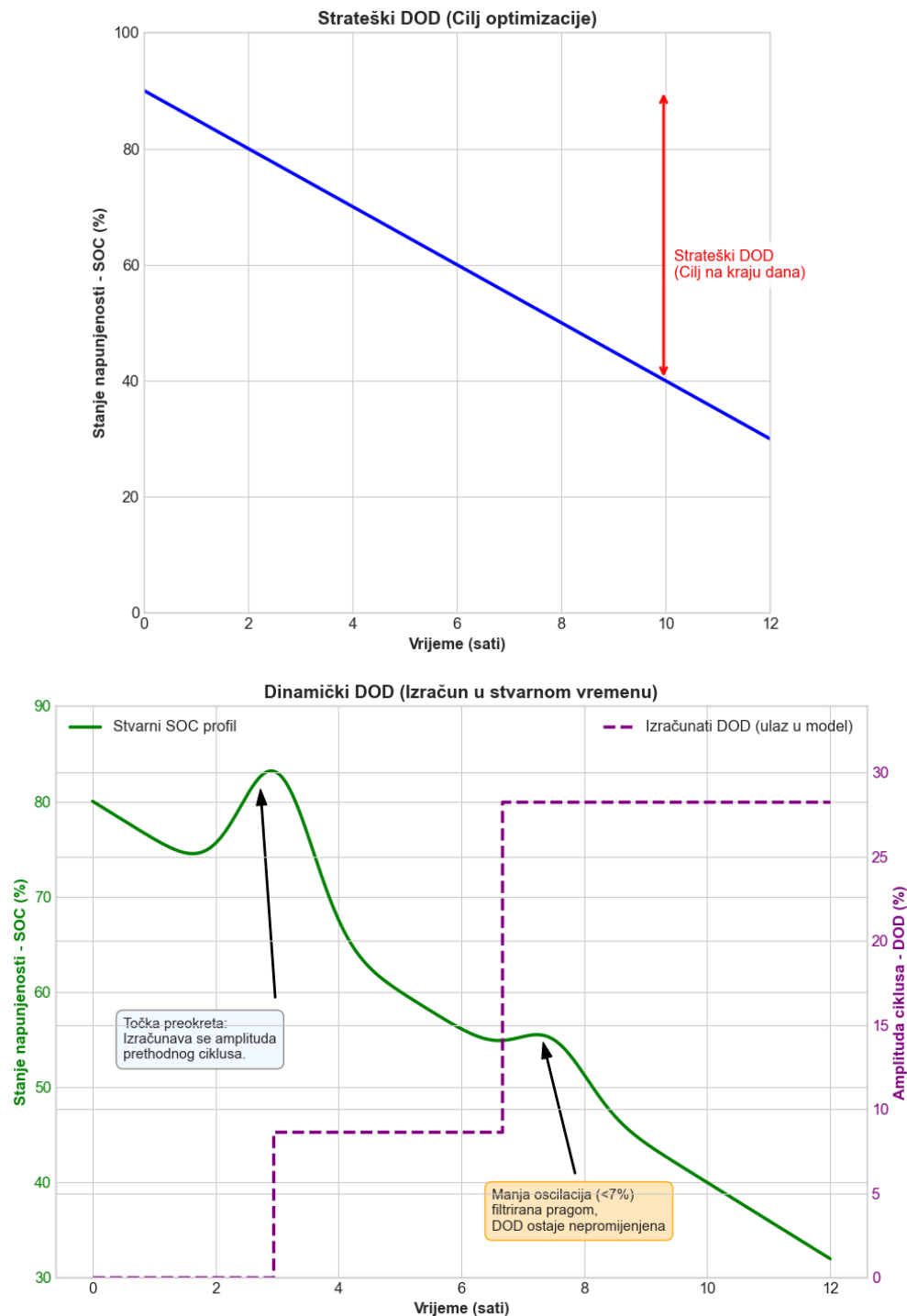
Značajan izazov u implementaciji modela cikličkog starenja za nepravilan profil je određivanje dubine pražnjenja (DOD). Prije detaljnog opisa, važno je naglasiti da se pojam dubine pražnjenja u ovom istraživanju koristi u dva različita konteksta. S jedne strane, DOD je strateški parametar unutar glavnog optimizacijskog problema koji definira ciljano stanje napunjenosti (SOC) na kraju dana. S druge strane, DOD je dinamički ulazni parametar koji zahtijeva sam model degradacije.

Dok prvi DOD predstavlja strateški cilj optimizacije, drugi, koji se koristi u modelu degradacije, predstavlja deskriptivnu mjeru amplitude nedavno završenih radnih ciklusa. Ostatak ovog poglavlja detaljno opisuje metodologiju za određivanje upravo tog, dinamičkog DOD-a potrebnog za izračun cikličkog starenja. Na slici 3.10 se zorno prikazuje razlika između DOD-a koji se koristi kao parametar optimizacije i dinamičkog DOD-a za izračun degradacije.

Parametar DOD unutar modela ne predstavlja trenutačnu promjenu stanja napunjenosti (SOC), već se odnosi na amplitudu završenog ciklusa naprezanja. Fizikalna osnova za ovakav pristup leži u činjenici da su dominantni mehanizmi cikličke degradacije, poput mehaničkog zamora uslijed promjena volumena elektroda, intrinzično povezani s magnitudom i preokretom smjera protoka iona. Stoga je za ispravnu primjenu modela nužno implementirati logiku koja iz kontinuiranog i nepravilnog signala SOC-a može u stvarnom vremenu ekstrahirati ove značajne cikluse naprezanja.

U tu svrhu, primijenjen je algoritam za detekciju lokalnih ekstrema (vrhova i dolina), koji služi kao računalno učinkovita alternativa kompleksnijim metodama brojanja ciklusa, poput Rainflow algoritma. Princip rada algoritma je sljedeći:

1. Sustav kontinuirano prati SOC i smjer struje kako bi identificirao monotone faze (neprekidno punjenje ili neprekidno pražnjenje).
2. Tijekom svake monotone faze, algoritam bilježi dosegnute maksimalne (vrh) i minimalne (dolina) vrijednosti SOC-a.
3. Točka preokreta definira se kao trenutak u kojem struja mijenja smjer, čime se označava kraj jednog ciklusa.
4. U trenutku detekcije točke preokreta, izračunava se amplituda upravo završenog ciklusa kao apsolutna razlika između zabilježenog vrha i doline.



Slika 3.11: Razlika između DOD-a koji se koristi kao parametar optimizacije i dinamičkog DOD-a za izračun cikličke degradacije

Ta izračunata amplituda se zatim usvaja kao reprezentativna vrijednost DOD-a za sve naredne vremenske korake. Ova vrijednost ostaje konstantna sve do detekcije sljedeće točke preokreta, kada se završava novi ciklus i vrijednost DOD-a se ponovno ažurira. Ovakav pristup, s DOD-om

kao konstantnom funkcijom, temelji se na pretpostavci da je potencijal oštećenja definiran magnitudom posljednjeg značajnog energetskog ciklusa.

Kako bi se povećala robusnost i fizikalna realnost simulacije, ova metoda je uparena s minimalnim pragom za DOD. Prag služi kao filter koji sprječava da se visokofrekventni šum ili minorne oscilacije u SOC profilu pogrešno interpretiraju kao ciklusi koji uzrokuju degradaciju. Na taj se način osigurava da samo ciklusi sa značajnom energetskom izmjenom, koji doista doprinose mehaničkom i kemijskom naprezanju, budu uključeni u izračun cikličkog starenja.

U sljedeće dvije tablice su navedeni parametri p1 do p10 potrebni za izračun kalendarske i cikličke degradacije.

Tablica 3.3: Parametri kalendarskog starenja

p1	p2	p3	p4
8.21E+04	-5.20E+03	-3.57E+03	0.5257

Tablica 3.4: Parametri cikličkog starenja

p5	p6	p7	p8	p9	p10
4.31E-08	1.70E-08	1.64E-07	2.19E+03	1.61E+05	0.8306

4. STRATEGIJA UPRAVLJANJA ENERGIJOM HIBRIDNOG BRODSKOG SUSTAVA

Uspješna integracija i rad hibridnog broorskog eneretskog sustava ne ovise samo o pravilnom dimenzioniranju njegovih komponenti, već presudno o inteligenciji algoritma koji upravlja protokom energije unutar njega. Hardverska konfiguracija—veličina motora, kapacitet baterije, snaga generatora—definira tek *potencijal* za postizanje ušteda i smanjenje emisija. Ključ za ostvarivanje tog potencijala leži u strategiji upravljanja energijom, koja djeluje kao “mozak” cjelokupne operacije. EMS je odgovoran za donošenje kontinuiranih, trenutnih odluka o tome kako raspodijeliti opterećenje između različitih izvora energije, motora s unutarnjim izgaranjem, dizelskih generatora i baterijskog sustava, kako bi se zadovoljila potražnja za snagom uz minimizaciju zadanog cilja, najčešće potrošnje goriva, pritom poštujući sva operativna i fizička ograničenja sustava.

Izbor i dizajn EMS-a predstavljaju fundamentalni izazov u razvoju hibridnih sustava. Postojeći pristupi mogu se klasificirati u nekoliko glavnih kategorija, svaka s vlastitim kompromisima između optimalnosti, računalne složenosti i primjenjivosti u realnom vremenu. Unutar domene strategija optimizacije u realnom vremenu, strategija minimizacije ekvivalente potrošnje istaknula se kao jedna od najučinkovitijih. ECMS rješava problem optimizacije korištenja energije pohranjene u bateriji tako što je prevodi u ekvivalentnu potrošnju goriva. Uvođenjem ekvivalencijskog faktora (s), koji predstavlja cijenu korištenja ili pohrane električne energije, složeni problem dugoročne optimizacije svodi se na niz jednostavnijih, trenutnih problema minimizacije.

Iako je osnovni ECMS koncept moćan, njegova jednostavna primjena s fiksnim ekvivalencijskim faktorom pati od značajnih nedostataka, prvenstveno nemogućnosti jamčenja održavanja stanja napunjenosti baterije (SOC) unutar željenih granica tijekom dugih putovanja s promjenjivim profilom opterećenja.

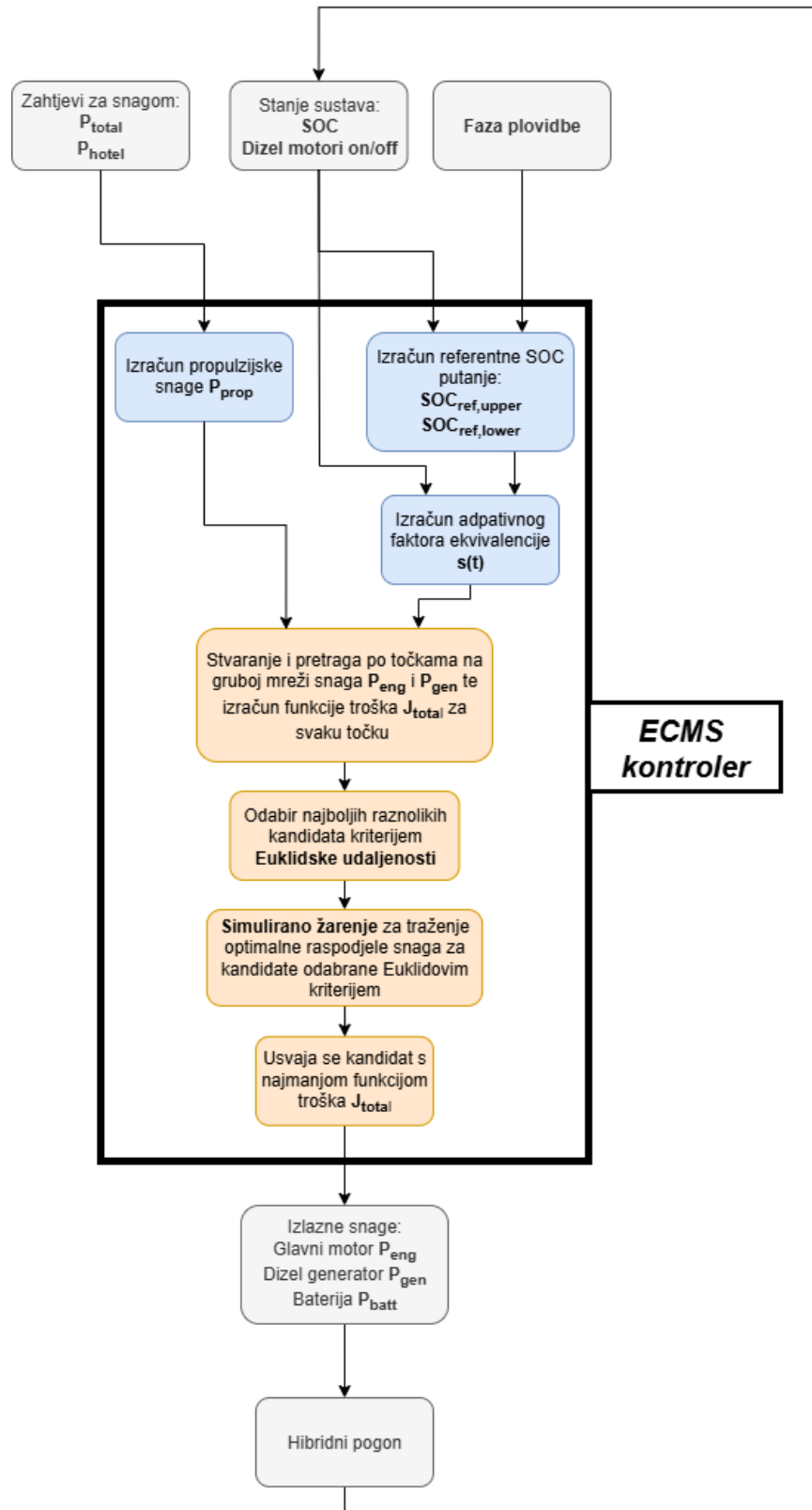
Upravo s ciljem prevladavanja ovih ograničenja, u sklopu ovog istraživanja razvijena je napredna strategija upravljanja utemeljena na konceptu adaptivnog ECMS (A-ECMS). U skladu s postavljenom hipotezom, primjenom strategije minimizacije ekvivalentne potrošnje s varijabilnim faktorom ekvivalencije postiže se dinamičko prilagođavanje profilu opterećenja, kojeg je moguće podijeliti na karakteristične uzorke djelovanja. Ova prilagodljivost omogućuje optimizaciju upravljanja energijom za svaki karakteristični uzorak, osiguravajući uštedu energije, smanjenje emisija i produženje vijeka trajanja komponenti. Predloženi pristup to postiže kroz nekoliko ključnih inovacija:

- **Intelligentno oblikovanje referentne putanje SOC-a:** Umjesto da slijedi jednostavno linearno pražnjenje, strategija generira dinamički oblikovanu referentnu putanju stanja napunjenosti baterije (SOC) koja je direktno ovisna o trenutnoj fazi plovidbe. Za faze u kojima glavni motor radi u svom visoko učinkovitom području, poput plovidbe konstantnom brzinom, putanja se “izravnava” kako bi se potaknulo očuvanje energije u bateriji i maksimalno iskoristila efikasnost motora. Nasuprot tome, tijekom operacija kao što su manevriranje ili ubrzavanje, gdje je učinkovitost motora niža, a opterećenje izrazito varijabilno, referentna putanja postaje strmija. Time se sustavu dopušta agresivnije korištenje baterije za pokrivanje vršnih opterećenja. Na taj se način PI regulator, koji upravlja ekvivalencijskim faktorom, inteligentno navodi na donošenje strateški optimalnih odluka u skladu s operativnim kontekstom plovidla.

Prilagodba operativnih granica: Kao dodatni sloj adaptacije, strategija za svaki karakteristični uzorak djelovanja (boravak u luci, ubrzavanje, plovidba, manevriranje)

- definira i specifične granice za rad baterije (maksimalne C-stope). Ovaj mehanizam osigurava da se, čak i unutar agresivnih faza, baterija ne koristi izvan sigurnih i preporučenih granica, čime se štiti njezin životni vijek.
- **Proširena funkcija troška:** Funkcija troška, odnosno funkcija izračuna ekvivalentne potrošnje, je proširena kako bi uključila i realne operativne aspekte. Uvedeni su penalizacijski članovi za pokretanje motora i generatora, čime se destimulira njihovo često paljenje i gašenje koje dovodi do mehaničkog zamora i dodatnih emisija, te fizikalno utemeljen penal za niski SOC, koji djeluje kao “meki zid” štiteći bateriju od prekomjernog pražnjenja.
- **Hibridni algoritam za optimizaciju u svakom vremenskom koraku:** Za pronalaženje optimalne raspodjele snage u svakom trenutku koristi se efikasan hibridni algoritam koji kombinira brzu pretragu grube mreže s finom optimizacijom pomoću simuliranog žarenja (engl. *Simulated Annealing*).
- **Upravljanje s histerezom:** Radi povećanja stabilnosti sustava i izbjegavanja oscilacija uzrokovanih manjim fluktuacijama opterećenja, oko referentne SOC putanje implementiran je pojas nereagiranja. Unutar ovog pojasa, regulator smatra da je sustav u stabilnom stanju i ne vrši korekcije, čime se sprječavaju oscilacije i nepotrebno opterećivanje komponenti. Ovakav pristup osigurava mirniji odziv, smanjuje stres na energetskim pretvaračima i bateriji te povećava ukupnu robusnost strategije u realnim uvjetima plovidbe.

Ovo poglavlje detaljno će razraditi svaki od navedenih elemenata. Krenut će se od teorijske osnove ECMS-a, nakon čega će se detaljno opisati arhitektura predloženog A-ECMS kontrolera, s posebnim naglaskom na mehanizam adaptacije i formulaciju proširene funkcije troška. Na kraju, objasniti će se rad hibridnog optimizacijskog algoritma i njegova uloga u cjelokupnoj strategiji upravljanja energijom. Dijagram toka adaptivne ECMS strategije prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1: Dijagram toka predložene adaptivne ECMS strategije

4.1 Koncept faktora ekvivalencije i funkcije troška

Ključna ideja ECMS-a je da se korištenje električne energije iz baterije može izjednačiti s određenom količinom goriva. Svaki kilovatsat (kWh) energije koji se isprazni iz baterije morat će se u budućnosti nadoknaditi, bilo punjenjem preko generatora (što troši gorivo) ili iz vanjske mreže. S druge strane, svaki kWh energije koji se pohrani u bateriju predstavlja potencijalnu uštedu goriva u budućnosti.

ECMS kvantificira ovu vezu uvođenjem ekvivalencijskog faktora, s . Ovaj faktor predstavlja “cijenu” ili “težinu” električne energije izraženu u ekvivalentnoj potrošnji goriva [g/kWh]. Pomoću njega, trenutna snaga baterije (P_{batt}) može se pretvoriti u ekvivalentni maseni protok goriva.

Na temelju ovog koncepta, formira se trenutna funkcija troška, poznata i kao Hamiltonijan sustava, koja se minimizira u svakom vremenskom koraku t :

$$H_{ECMS}(t) = \dot{m}_{fuel}(t) + s(t) \cdot \frac{P_{batt}(t)}{\eta_{avg}} \quad (4.1)$$

Gdje je:

- $\dot{m}_{fuel}(t)$ stvarna, trenutna masena potrošnja goriva motora s unutarnjim izgaranjem i/ili generatora [g/s].
- $P_{batt}(t)$ je trenutna snaga baterije [kW]. Prema konvenciji, pozitivna vrijednost označava pražnjenje, a negativna punjenje baterije.
- $s(t)$ je ekvivalencijski faktor [g/kWh], koji može biti konstantan ili vremenski promjenjiv (adaptivan).
- η_{avg} je prosječna efikasnost puta pretvorbe energije od goriva do baterije i natrag do pogona. U praksi se često računa unutar samog ekvivalencijskog faktora radi jednostavnosti.

Cilj strategije upravljanja u svakom koraku jest pronaći takvu raspodjelu snage između komponenti koja će minimizirati vrijednost H_{ECMS} .

4.1.1 Uloga i značenje ekvivalencijskog faktora

Ekvivalencijski faktor s je najvažniji parametar unutar ECMS okvira i on diktira ponašanje cijelog sustava:

- **Visoka vrijednost s :** Ako je ekvivalencijski faktor visok, “cijena” korištenja električne energije je velika. To znači da je pražnjenje baterije ($P_{batt} > 0$) snažno penalizirano u funkciji troška. Kontroler će stoga favorizirati korištenje motora i generatora te će težiti punjenju baterije ili održavanju njenog trenutnog stanja.
- **Niska vrijednost s :** Ako je ekvivalencijski faktor nizak, električna energija je “jeftina”. Funkcija troška manje penalizira pražnjenje, pa će kontroler biti skloniji korištenju energije iz baterije kako bi motor radio u učinkovitijem području ili kako bi se u potpunosti isključio.

Optimalna vrijednost ekvivalencijskog faktora ovisi o prosječnoj efikasnosti pretvorbe energije unutar hibridnog sustava. U praksi određivanje njegove točne vrijednosti je vrlo izazovno jer ovisi o cjelokupnom profilu putovanja. Zbog toga se u naprednim implementacijama, poput one opisane u ovom istraživanju, ekvivalencijski faktor ne tretira kao konstanta, već kao adaptivna varijabla koja se dinamički prilagođava kako bi se zadovoljili dugoročni ciljevi, poput održavanja stanja napunjenosti baterije.

4.1.2 Fizikalna interpretacija ekvivalencijskog faktora

Za potrebe inicijalizacije adaptivne strategije, potrebno je definirati polazišnu vrijednost ekvivalencijskog faktora, s_0 . Ova se vrijednost izvodi iz fizikalne usporedbe dvaju glavnih puteva isporuke propulzijske snage: konvencionalnog puta (od goriva do propelera preko motora) i električnog puta (od pohranjene energije u bateriji do propelera).

- **Efikasnost motornog puta ($\eta_{ICE \rightarrow prop}$):** Efikasnost pretvorbe kemijske energije goriva u mehanički rad na osovini motora za moderne brodske dizelske motore u njihovom optimalnom području rada iznosi otprilike 40-45 %.
- **Efikasnost baterijskog puta ($\eta_{batt \rightarrow prop}$):** Ovaj put je znatno efikasniji i uključuje seriju visokoefikasnih komponenti. Ukupna efikasnost je produkt efikasnosti pražnjenja baterije (cca. 97 %), efikasnosti energetske pretvarača (DC/AC, cca. 97 %) i efikasnosti samog elektromotora (cca. 96 %). Ukupna efikasnost ovog puta od pohranjene kemijske energije u bateriji do mehaničkog rada na osovini stoga iznosi otprilike 90 %.

Kako bismo ih usporedili, uvodimo faktor relativne efikasnosti (η), koji pokazuje koliko je puta baterijski put (od baterije do propelera) učinkovitiji od motornog puta (od goriva do propelera):

$$\eta = \frac{\eta_{batt \rightarrow prop}}{\eta_{ICE \rightarrow prop}} \approx \frac{0.90}{0.45} = 2 \quad (4.2)$$

Ovaj faktor nam govori da je korištenje 1 kWh prethodno pohranjene električne energije za propulziju otprilike dvostruko efikasnije od generiranja 1 kWh mehaničkog rada direktno iz goriva. Slijedom toga, polazišna vrijednost ekvivalencijskog faktora s_0 može se definirati kao prosječna specifična potrošnja goriva motora, umanjena za ovaj faktor relativne efikasnosti:

$$s_0 = \frac{SFC_{ICE,avg}}{\eta} \quad (4.3)$$

Ova jednadžba pruža fizikalno utemeljenu početnu vrijednost za ekvivalencijski faktor. Međutim, oslanjanje na konstantan faktor s tijekom cijelog putovanja je nepredvidljivo i suboptimalno, pogotovo za plovilo koje može raditi u različitim režimima. Optimalna trenutna vrijednost s ovisi o nizu faktora: preostalom trajanju putovanja, trenutnom SOC-u te operativnoj strategiji—bilo da se radi o načinu pražnjenja (CD), gdje se troši jeftinija energija iz mreže, ili načinu održavanja (CS), gdje se energija mora nadoknaditi skupljim gorivom. Korištenje jedne fiksne vrijednosti u oba slučaja dovelo bi do pogrešnih odluka.

Stoga se u ovom radu izračunata vrijednost s_0 ne koristi kao fiksna upravljačka varijabla, već isključivo kao bazno polazište ili početna vrijednost za napredni adaptivni algoritam opisan u nastavku, koji dinamički korigira ovu vrijednost u realnom vremenu.

4.2 Adaptivna strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje

Kako bi se prevladali nedostaci ECMS strategije s fiksnim ekvivalencijskim faktorom, razvijena je napredna adaptivna ECMS (A-ECMS) strategija. Ovaj pristup uvodi nekoliko ključnih mehanizama koji omogućuju dinamičko prilagođavanje, stabilnost i robusnost, uzimajući u obzir ne samo trenutnu potrošnju goriva, već i dugoročno zdravlje i operativne troškove komponenti sustava. U nastavku se detaljno opisuju temeljni elementi predložene strategije.

4.2.1 Adaptacija ekvivalencijskog faktora pomoću proporcionalno-integralne regulacije

Osnovni nedostatak klasičnog ECMS-a je nemogućnost jamčenja održavanja stanja napunjenosti baterije (SOC) unutar željenih granica. Kako bi se taj problem riješio, uveden je mehanizam

povratne veze koji dinamički prilagođava ekvivalencijski faktor s u realnom vremenu. Za tu svrhu koristi se klasični proporcionalno-integralni (PI) regulator.

Zadatak PI regulatora je minimizirati grešku između stvarne vrijednosti SOC-a (SOC_{actual}) i željene, referentne vrijednosti (SOC_{ref}) koja je definirana dinamički oblikovanom putanjom. Greška se u svakom trenutku računa kao:

$$e(t) = SOC_{actual}(t) - SOC_{ref}(t) \quad (4.4)$$

Na temelju te greške, PI regulator korigira polazišnu vrijednost ekvivalencijskog faktora (s_0) prema sljedećoj upravljačkoj jednadžbi:

$$s(t) = s_0 - \left(K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (4.5)$$

gdje su:

- $s(t)$ je adaptivna vrijednost ekvivalencijskog faktora koja se koristi u funkciji troška.
- s_0 je polazišna (referentna) vrijednost, izračunata na temelju fizikalne analize efikasnosti sustava.
- K_p je proporcionalni faktor, koje definira koliko snažno regulator reagira na trenutnu grešku.
- K_i je integralni faktor, koje korigira dugotrajna, stacionarna odstupanja i osigurava da se SOC s vremenom vrati na referentnu putanju.

Logika rada regulatora je sljedeća:

- **Ako je stvarni SOC niži od referentnog** ($SOC_{actual} < SOC_{ref}$), greška $e(t)$ je negativna. Zbog znaka minus u jednadžbi, regulator će povećati vrijednost $s(t)$. Time energija iz baterije postaje “skuplja”, što potiče ECMS optimizator na donošenje odluka koje će podići SOC (npr. punjenje baterije pomoću generatora ili smanjenje pražnjenja).
- **Ako je stvarni SOC viši od referentnog** ($SOC_{actual} > SOC_{ref}$), greška $e(t)$ je pozitivna. Regulator će smanjiti vrijednost $s(t)$, čineći energiju iz baterije “jeftinijom” i potičući njezino korištenje, što dovodi do spuštanja SOC-a prema referentnoj vrijednosti.

Na ovaj način, PI regulator osigurava da sustav, unatoč nepoznatom i promjenjivom profilu opterećenja, dugoročno prati zadanu strategiju upravljanja stanjem napunjenosti baterije.

4.2.2 Definiranje referentne putanje stanja napunjenosti baterije

Učinkovitost prethodno opisanog PI regulatora izravno ovisi o kvaliteti i strateškom oblikovanju njegove referentne varijable, odnosno željene putanje stanja napunjenosti baterije (SOC_{ref}). Umjesto statičkog pristupa, razvijena strategija omogućuje generiranje referentne putanje na dva načina, ovisno o željenoj operativnoj filozofiji plovila: održavanje stanja napunjenosti (Charge Sustaining) ili planirano pražnjenje (Charge Depleting).

• Putanja za strategiju održavanje stanja napunjenosti (Charge Sustaining - CS)

Ovaj pristup je primjenjiv u scenarijima gdje plovilo nema pristup vanjskom izvoru punjenja i mora završiti putovanje s jednakom ili sličnom količinom energije u bateriji s kojom je i započelo. U tom slučaju, referentna putanja je konstantna tijekom cijelog putovanja. Zadaje se fiksna ciljana vrijednost SOC-a (npr. 60 %), a zadatak PI regulatora je da održava stvarno stanje napunjenosti što bliže toj konstantnoj vrijednosti, korigirajući odstupanja uzrokovana radom sustava.

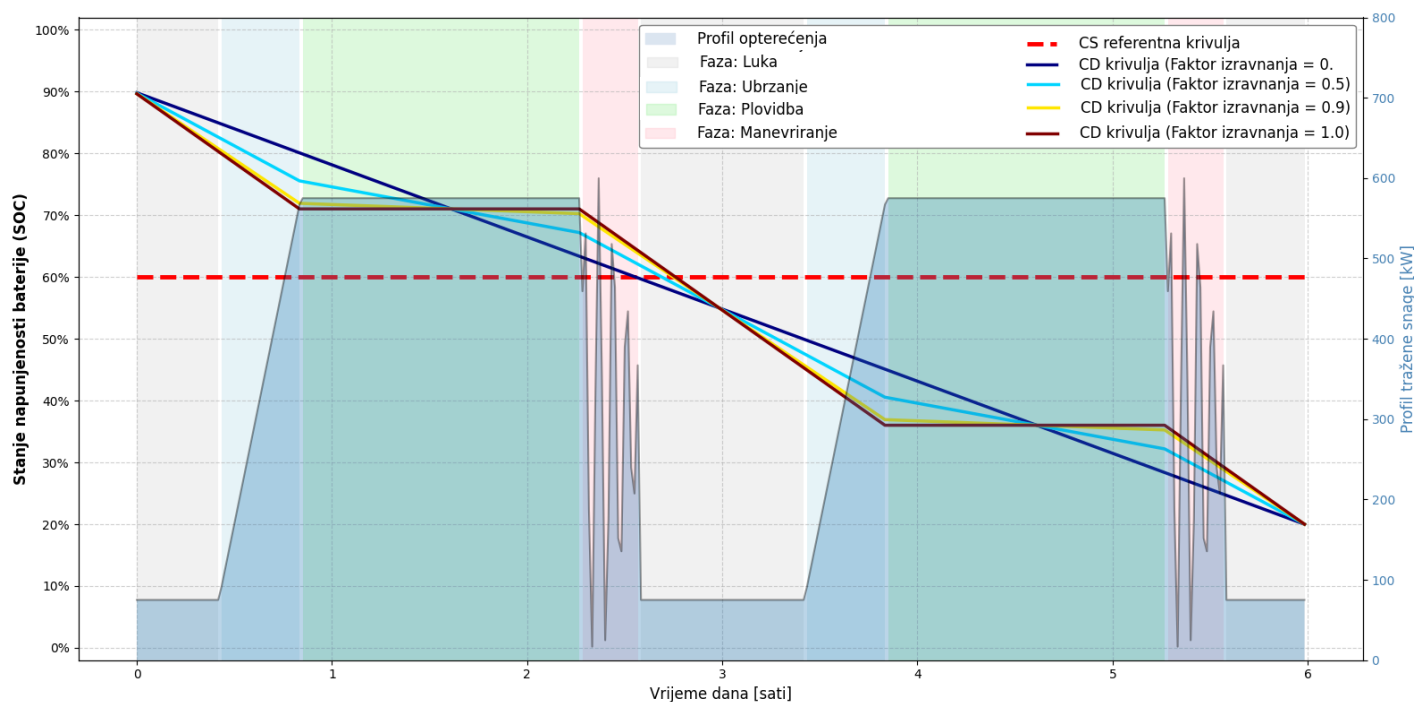
- **Dinamički oblikovana putanja za pražnjenje (Charge Depleting - CD)**

Za operacije koje započinju s punom baterijom (napunjenom s kopnene mreže) i imaju za cilj iskoristiti tu jeftiniju energiju tijekom dana, jednostavno linearno pražnjenje od početnog do konačnog SOC-a nije optimalno. Stoga je razvijen mehanizam za generiranje dinamički oblikovane, segmentirane putanje koja inteligentno upravlja brzinom pražnjenja ovisno o operativnoj fazi plovila.

Logika ovog mehanizma je sljedeća:

- **Konzervativno korištenje energije:** U fazama plovidbe gdje glavni motor radi u svom, visoko učinkovitom području (npr. plovidba konstantnom brzinom), referentna putanja se izravna u vrijednosti faktora izravnjanja. To znači da se propisuje sporija stopa pražnjenja od prosječne, čime se čuva dragocjena energija pohranjena u bateriji.
- **Agresivno korištenje energije:** U fazama gdje je motor manje učinkovit ili je opterećenje izrazito promjenjivo (npr. manevriranje, ubrzavanje), referentna putanja postaje strmija. Time se dopušta brže pražnjenje baterije i njezino intenzivnije korištenje za pomoć motoru, upravo u trenucima kada je to energetski najisplativije.

Stupanj usporavanja i ubrzavanja pražnjenja podešava se pomoću faktora izravnjanja, čime se omogućuje fino ugađanje agresivnosti strategije. Na ovaj način, referentna putanja ne služi samo kao cilj, već i kao strateški vodič koji proaktivno usmjerava PI regulator na optimalno iskorištavanje energije, u skladu s unaprijed poznatim karakteristikama efikasnosti plovila u različitim režimima rada. Profil opterećenja zajedno s prikazom referentnih CS i CD putanja s različitim faktorima izravnjanja je prikazan na slici 4.2.



Slika 4.2: Profil opterećenja zajedno s prikazom referentnih CS i CD putanja s različitim faktorima izravnjanja

4.2.3 Stabilizacija sustava pomoću histereze

Iako PI regulator osigurava dugoročno praćenje referentne putanje, njegova inherentna osjetljivost na grešku može u realnim uvjetima dovesti do nestabilnosti. Manje fluktuacije opterećenja, šum u mjerenju SOC-a ili sitne nepreciznosti modela mogu uzrokovati da stvarni SOC konstantno oscilira oko referentne linije. Standardni PI regulator bi na svako takvo minimalno odstupanje reagirao, što bi rezultiralo neujednačenim odzivom sustava: neprestanim, brzim i suprotstavljenim korekcijama ekvivalencijskog faktora s . Takvo oscilatorno ponašanje je nepoželjno jer uzrokuje nepotreban stres na energetske pretvarače, povećava gubitke u sustavu i može dovesti do nestabilnog rada motora i generatora.

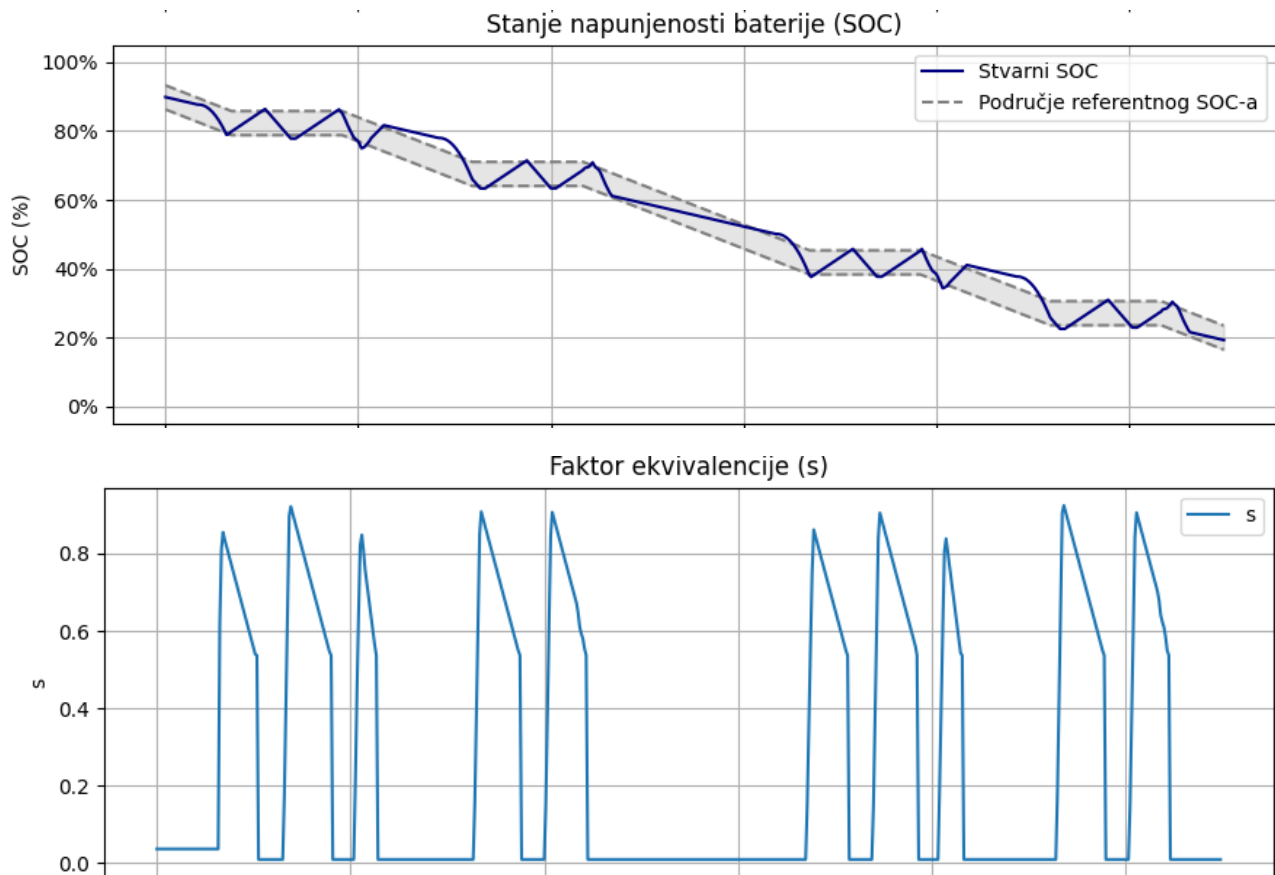
Kako bi se osigurao miran i robustan rad, implementiran je mehanizam histereze koji ima tri moguća stanja: mirovanje, punjenje i pražnjenje. Ključni element ovog mehanizma je pojas nereagiranja, definiran gornjom i donjom granicom oko centralne referentne putanje SOC-a.

Logika rada je sljedeća:

- **Stanje mirovanja:** Dokle god se stvarna vrijednost SOC-a nalazi unutar pojasa nereagiranja (između donje i gornje granice), sustav je u stanju mirovanja. U ovom stanju, greška za PI regulator se postavlja na nulu, bez obzira na točno mjesto SOC-a unutar pojasa. Regulator ne vrši nikakve korekcije, dopuštajući sustavu da se slobodno mijenja unutar prihvatljivih granica.
- **Aktivacija korektivnog djelovanja:** Stanje mirovanja se napušta tek kada SOC prijeđe graničnu vrijednost:
 - Ako SOC padne ispod donje granice, sustav prelazi u stanje punjenja. To signalizira jasnu potrebu za nadoknadom energije.
 - Ako SOC poraste iznad gornje granice, sustav prelazi u stanje pražnjenja, signalizirajući višak energije koji se može iskoristiti.
- **Asimetrično računanje greške:** Jednom kada je sustav u aktivnom stanju, logika PI regulatora se mijenja. Greška se više ne računa u odnosu na centralnu liniju, već u odnosu na suprotnu granicu pojasa.
 - U stanju punjenja, greška se računa kao odstupanje od gornje granice. Cilj regulatora sada nije samo vratiti SOC natrag u pojas, već ga dovesti sve do gornje granice prije nego što se vrati u stanje mirovanja.
 - U stanju pražnjenja, greška se računa kao odstupanje od donje granice.

Ovakav pristup stvara petlju histereze i sprječava da sustav, čim se vrati unutar pojasa, odmah prestane s korektivnim djelovanjem i eventualno ponovno ispadne iz njega. Na primjer, ako SOC padne ispod donje granice, regulator će težiti punjenju sve dok SOC ne dosegne gornju granicu, osiguravajući tako odlučnu i potpunu korekciju.

Implementacija ovog mehanizma osigurava da sustav reagira samo na značajna odstupanja, ignorirajući manje fluktuacije. Time se postiže mirniji i stabilniji odziv, smanjuje stres na komponente i povećava ukupna robusnost strategije upravljanja, čineći je prikladnijom za primjenu u nepredvidivim realnim uvjetima plovidbe. Na slici 4.3. gore, prikazano je područje nereagiranja i kako PI kontroler vodi stvarno stanje napunjenosti baterije unutar tog područja. Na donjoj slici prikazano je kako u tom istom slučaju se mijenja vrijednost koeficijenta ekvivalentnog faktora s , odnosno utjecaj PI kontrolera na njegovu vrijednost.



Slika 4.3: Prikaz utjecaja područja nereagiranja na stvarni SOC (gore) i utjecaj PI kontrolera na vrijednost faktora ekvivalencije s (dolje)

4.2.4 Formulacija proširene funkcije troška

Dok se klasični ECMS primarno bavi kompromisom između trenutne potrošnje goriva i korištenja energije iz baterije, holistički pristup optimizaciji zahtijeva uzimanje u obzir i dugoročnih ekonomskih i fizikalnih faktora, kao što su troškovi održavanja i životni vijek komponenti. Stoga je u srcu predložene A-ECMS strategije proširena funkcija troška, koja osim direktnih energetskih troškova uključuje i članove koji modeliraju degradaciju opreme i osiguravaju sigurnost sustava. Ukupna funkcija troška (H_{ECMS}) koja se minimizira u svakom vremenskom koraku t definirana je kao zbroj četiri ključne komponente:

$$H_{ECMS}(t) = \dot{m}_{fuel}(t) + s(t) \cdot P_{batt}(t) + C_{start}(t) + C_{soc}(t) \quad (4.6)$$

1. Potrošnja goriva ($\dot{m}_{fuel}$)

- **Definicija:** Ovaj član predstavlja trenutnu, ukupnu masenu potrošnju goriva svih aktivnih motora s unutarnjim izgaranjem (glavnog propulzijskog motora i dizelskih generatora) u sustavu. Izračunava se korištenjem nelinearnih mapa specifične potrošnje goriva (SFC), koje precizno povezuju izlaznu snagu motora s njegovom efikasnošću.

- **Značenje:** Ovo je temeljni i najočitiji operativni trošak. On predstavlja direktan financijski izdatak za gorivo u danom trenutku. Minimizacija ovog člana je primarni cilj svake strategije usmjerene na energetske učinkovitost i smanjenje emisija.

2. Ekvivalentna potrošnja baterije ($s \cdot P_{batt}$)

- **Definicija:** Ovaj član je produkt trenutne snage baterije (P_{batt}) i dinamički prilagođenog ekvivalencijskog faktora (s).
- **Značenje:** On predstavlja oportunitetni trošak korištenja energije iz baterije. Kroz ekvivalencijski faktor, on kvantificira buduću obvezu nadoknade potrošene energije i time povezuje trenutnu odluku s dugoročnim stanjem sustava. Ovaj član je ključan mehanizam ECMS-a koji omogućuje optimizaciju stanja napunjenosti (varijable stanja) unutar trenutne funkcije troška.

Sljedeća dva člana predstavljaju ključno proširenje u odnosu na standardni ECMS. Njihova svrha nije modeliranje direktne potrošnje energije, već uvođenje dugoročnih operativnih i sigurnosnih aspekata u proces trenutne optimizacije

3. Penalizacija pokretanja motora s unutarnjim izgaranjem (C_{start})

- **Definicija:** Ovo je diskretna, impulsna kazna koja se dodaje funkciji troška isključivo u onom vremenskom koraku u kojem motor ili generator prelaze iz ugašenog stanja u radno stanje.
- **Značenje:** Ova kazna ne predstavlja stvarni utrošak goriva, već modelira amortizirane dugoročne troškove povezane s čestim pokretanjem motora.

Svako pokretanje, pogotovo iz hladnog stanja, uzrokuje:

- **Povećano mehaničko habanje:** Zbog privremeno neoptimalnog podmazivanja, komponente poput klipnih prstenova, cilindara i ležajeva trpe pojačano trošenje.
- **Termalni stres:** Nagla promjena temperature uzrokuje naprezanje materijala, što dovodi do zamora i smanjenja životnog vijeka ključnih dijelova motora.
- **Povećani troškovi održavanja:** Veći broj ciklusa paljenja/gašenja direktno utječe na planirane intervale održavanja i povećava vjerojatnost neplaniranih kvarova.

Uvođenjem ove kazne, optimizacijski algoritam se snažno odvraća od rješenja koja uključuju često paljenje i gašenje motora radi pokrivanja manjih, fluktuirajućih opterećenja. Umjesto toga, strategija će favorizirati stabilniji rad, odnosno duža razdoblja neprekinutog rada ili mirovanja, što u konačnici smanjuje dugoročne troškove i produljuje vijek trajanja opreme.

4. Penalizacija preniskog SOC-a (C_{soc})

- **Definicija:** Ovo je nelinearna kazna koja je jednaka nuli sve dok je stanje napunjenosti baterije (SOC) iznad sigurnosnog praga koje je u istraživanju definirano kao 20 %. Kada SOC padne ispod tog praga, iznos kazne počinje eksponencijalno rasti što je SOC niži.

Ova kazna ima dvostruku ulogu: zaštitu komponente i osiguranje sustava.

- **Očuvanje životnog vijeka baterije:** Duboka pražnjenja su jedan od glavnih uzroka ubrzane degradacije i smanjenja kapaciteta litij-ionskih baterija. Sprječavanjem rada u

području niskog SOC-a, ova kazna direktno doprinosi produljenju životnog vijeka baterijskog sustava, što je ključna stavka u ukupnom životnom trošku (LCC).

- **Osiguranje operativne sigurnosti:** Održavanje minimalne rezerve energije u bateriji je od presudne važnosti. Ta rezerva osigurava dostupnost snage za hitne manevre, pokrivanje iznenadnih vršnih opterećenja ili u slučaju otkaza primarnog izvora energije (npr. generatora).

Kazna je definirana sljedećim skupom jednažbi:

$$D_{soc} = SOC_{prag} - SOC \quad (4.7)$$

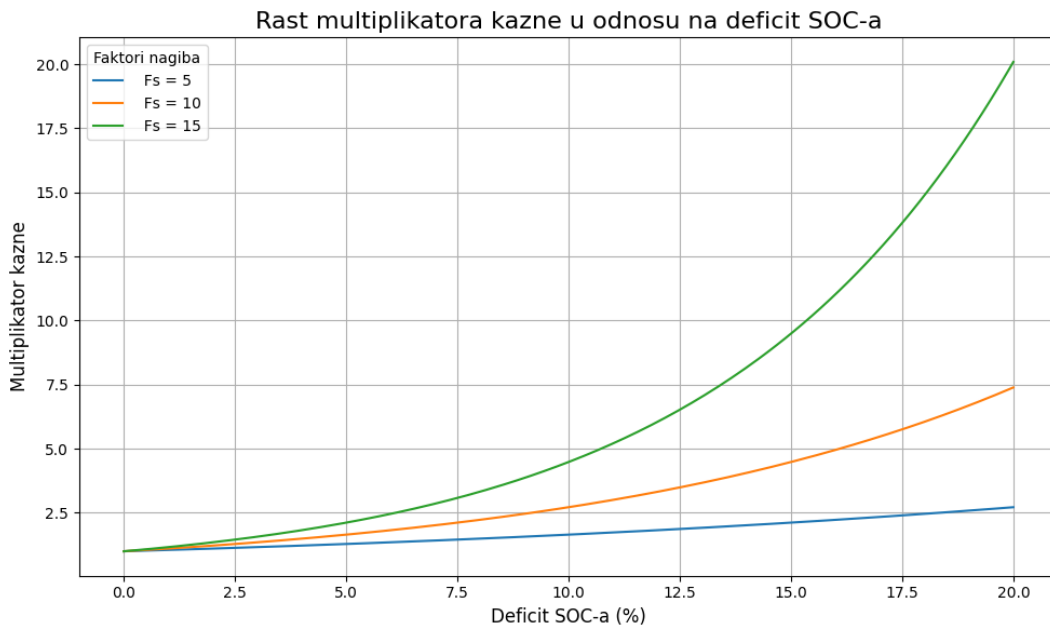
$$C_{base} = D_{soc} \cdot C_{nom} \cdot F_{kwh} \quad (4.8)$$

$$C_{soc} = C_{base} \cdot e^{D_{soc} \cdot F_s} \quad (4.9)$$

gdje je:

- D_{soc} deficit SOC-a, odnosno koliko je stvarni SOC pao ispod praga SOC_{prag}
- C_{base} je bazna kazna u gramima koja izračunata kao energija baterije u kWh ($D_{soc} \cdot C_{nom}$, gdje je C_{nom} nominalni kapacitet baterije) pomnožena s faktorom konverzije F_{kwh}
- C_{soc} je ukupna kazna izračunata tako da je bazna kazna multiplicirana eksponencijalnom funkcijom koja ovisi o D_{soc} i faktoru nagiba F_s

Utjecaj eksponencijalne funkcije i faktora nagiba vidljiv je na slici 4.4. Funkcionalno, ova kazna djeluje kao "meki zid". Za razliku od tvrdog ograničenja koje bi moglo sustav učiniti nestabilnim, ova kazna dopušta sustavu da u izvanrednim situacijama iskoristi rezervu energije, ali uz toliko visoku "cijenu" da će to optimizator učiniti samo ako je apsolutno neophodno. Time se postiže robusnost strategije, koja ostaje operativna i sigurna čak i u nepredviđenim i ekstremnim uvjetima.



Slika 4.4: Utjecaj faktora nagiba na izračun multiplikatora bazne kazne

4.3 Algoritam za trenutnu optimizaciju raspodjele snage

Primarni cilj strategije upravljanja energijom (EMS) u stvarnom vremenu jest, za svaki vremenski korak t , odrediti optimalnu raspodjelu snage između energetskih pretvarača hibridnog sustava. Za promatrani brodski energetski sustav, ova se odluka svodi na odabir dviju ključnih, nezavisnih varijabli: ukupne snage koju razvija glavni pogonski motor, $P_{eng}(t)$, i snage koju razvija pomoćni dizel generator, $P_{gen}(t)$. Ove dvije varijable u potpunosti definiraju radnu točku sustava.

Nakon odabira para $(P_{eng}(t), P_{gen}(t))$, snaga baterijskog sustava P_{batt} nije neovisna varijabla, već je deterministički određena zakonom o očuvanju energije. Upravljački algoritam mora zadovoljiti ukupnu potražnju za snagom, koja se sastoji od propulzijske snage P_{prop} i snage za napajanje brodskih trošila P_{hotel} . Način izračuna snage detaljno je opisan u poglavlju 3.1.1, gdje je naglašena uloga baterije, odnosno njezino balansiranje tokova snage, uzimajući u obzir radne režime:

- **Režim viška mehaničke snage (PTO - Power Take-Off):** Ako je snaga glavnog motora $P_{eng}(t)$ veća od propulzijske potražnje P_{prop} , višak mehaničke snage se preko osovinskog generatora pretvara u električnu energiju za napajanje trošila ili punjenje baterije.
- **Režim manjka mehaničke snage (PTI - Power Take-In):** Ako je propulzijska potražnja P_{prop} veća od snage glavnog motora $P_{eng}(t)$, razliku nadoknađuje elektromotor, crpeći električnu energiju iz mreže (koju osiguravaju generator i/ili baterija).

Jezgra optimizacijskog problema je minimizacija funkcije cilja, odnosno, definirane Hamiltonijanom metode ekvivalentne potrošnje goriva H_{ECMS} opisanog u prethodnom poglavlju. Prema tome, optimizacijski problem koji EMS rješava u svakom vremenskom koraku t može se formalno definirati kao:

$$\min_{P_{eng}, P_{gen}} H_{ECMS}(t) = \dot{m}_f(t) + s(t) \cdot P_{batt}(t) + C_{start}(t) + C_{soc}(t) \quad (4.10)$$

uz sljedeća ograničenja:

$$0 \leq P_{eng}(t) \leq P_{eng,max} \quad (4.11)$$

$$0 \leq P_{gen}(t) \leq P_{gen,max} \quad (4.12)$$

$$P_{batt,min} \leq P_{batt}(t) \leq P_{batt,max} \quad (4.13)$$

Rješavanje ovog problema u stvarnom vremenu zahtijeva metodu koja može brzo i pouzdano pronaći par $(P_{eng}(t), P_{gen}(t))$ koji minimizira H_{ECMS} .

4.3.1 Metode rješavanja optimizacijskog problema u stvarnom vremenu

Problem minimizacije definiran u prethodnom poglavlju, mora se riješiti u iznimno kratkom vremenskom roku, kako bi bio primjenjiv u stvarnom vremenu. U literaturi postoje različiti pristupi za rješavanje ovakvih problema. U nastavku se analiziraju dvije fundamentalne metode – pretraga mreže i simulirano žarenje – te se ističu njihove prednosti i mane koje su motivirale razvoj hibridnog pristupa korištenog u ovom radu.

1. Pretraga mreže

Pretraga mreže (engl. *grid search*) je najizravnija metoda za rješavanje ovakvog optimizacijskog problema. Kontinuirani prostor mogućih snaga motora P_{eng} i generatora P_{gen} diskretizira se u konačan skup točaka, tvoreći dvodimenzionalnu mrežu. Algoritam zatim iscrpno izračunava

vrijednost funkcije cilja H_{ECMS} za svaku pojedinu točku $(P_{eng,i}, P_{gen,j})$ na mreži. Radna točka koja rezultira najnižom vrijednošću H_{ECMS} odabire se kao optimalno rješenje za dani vremenski korak. Glavna prednost ove metode je njezina jednostavnost i, pod uvjetom da je mreža dovoljno gusta, jamstvo pronalaska optimalnog rješenja unutar diskretiziranog prostora. Međutim, njezina praktična primjena ograničena je problemom poznatim kao “prokletstvo dimenzionalnosti” (engl. *curse of dimensionality*).

Broj izračuna koje je potrebno izvršiti raste eksponencijalno s povećanjem broja točaka diskretizacije i broja optimizacijskih varijabli (dimenzija). Ako se prostor snage motora podijeli na N_{eng} točaka, a prostor generatora na N_{gen} točaka, ukupan broj izračuna je $N_{eng} \times N_{gen}$. Za postizanje visoke preciznosti, potrebna je fina mreža (velik N), što drastično povećava računski teret. Ako problem proširimo na D energetskih izvora (npr. dodavanjem gorivnih članaka ili drugih generatora), broj izračuna raste prema N^D . Ovaj eksponencijalni rast čini metodu pretrage mrežom nepraktičnom za složenije hibridne sustave i onemogućuje buduća proširenja, jer bi vrijeme potrebno za izračun vrlo brzo premašilo raspoloživo vrijeme unutar jednog upravljačkog koraka. Štoviše, pojam “složeniji hibridni sustavi” nije samo teoretska mogućnost, već izgledan smjer razvoja brodske energetike u skladu s dekarbonizacijskim ciljevima. Budući sustavi će vrlo vjerojatno uključivati integraciju dodatnih, raznolikih energetskih pretvarača kao što su gorivni članci (koji koriste vodik, metanol ili amonijak), fotonaponski sustavi, ili više generatorskih agregata različitih snaga optimiziranih za različite režime rada.

Svaki novi, neovisno upravljani izvor energije dodaje novu dimenziju (D) u prostor pretrage, čime se ukupan broj kombinacija koje treba provjeriti ne zbraja, već množi. Primjerice, sustav s dva izvora i rezolucijom od 100 točaka po izvoru zahtijeva $100^2 = 10.000$ izračuna. Dodavanjem trećeg izvora (npr. gorivnog članka) sa samo 50 diskretnih točaka snage, broj izračuna raste na $100 \times 100 \times 50 = 500.000$, što je pedeseterostruko povećanje koje čini primjenu u stvarnom vremenu nemogućom.

Ova fundamentalna ne-skalabilnost znači da bi svaka buduća nadogradnja sustava zahtijevala ili drastično smanjenje preciznosti upravljanja (korištenje grublje, suboptimalne mreže) ili potpuno novi, redizajnirani pristup upravljanju. Stoga je metoda pretrage mrežom, unatoč svojoj jednostavnosti, strateški neprihvatljiva za razvoj modularnih upravljačkih sustava koji se mogu lako prilagođavati i nadograđivati novim tehnologijama.

2. Optimizacija simuliranim žarenjem

Simulirano žarenje (engl. *Simulated Annealing*, SA) je metaheuristička metoda optimizacije inspirirana procesom žarenja metala, gdje se materijal zagrijava, a zatim polako hladi kako bi se postigla željena kristalna struktura. Algoritam je iznimno učinkovit za optimizacijske probleme u velikim, kontinuiranim prostorima rješenja.

Proces započinje odabirom inicijalne radne točke $(P_{eng,0}, P_{gen,0})$ i postavljanjem visoke početne “temperature” T . U svakoj iteraciji, algoritam generira novu, “susjednu” točku $(P_{eng,new}, P_{gen,new})$ blagom perturbacijom trenutnog rješenja. Zatim se računa promjena u trošku $\Delta C = H_{ECMS,new} - H_{ECMS,current}$. Odluka o prihvatanju nove točke donosi se prema sljedećim pravilima:

- Ako je novo rješenje bolje ($\Delta C < 0$), ono se uvijek prihvaća.
- Ako je novo rješenje lošije ($\Delta C \geq 0$), ono se može prihvatiti s vjerojatnošću P koja ovisi o trenutnoj temperaturi T .

Ključni mehanizam koji algoritmu simuliranog žarenja omogućuje izbjegavanje preuranjene konvergencije u lokalne minimume jest probabilističko prihvatanje rješenja koja ne donose odmah poboljšanje. Ta je vjerojatnost P je definirana Boltzmannovom jednačbom:

$$P(\text{bool}) = e^{-\frac{\Delta C}{T}} \quad (4.14)$$

gdje je P vjerojatnost prihvatanja, ΔC pozitivna razlika u vrijednosti funkcije cilja između novog (lošijeg) i trenutnog rješenja ($\Delta C = H_{ECMS, \text{new}} - H_{ECMS, \text{current}}$), a T je kontrolni parametar temperature.

Parametar temperature T nije statičan, već se postupno smanjuje tijekom izvršavanja algoritma, čime se dinamički mijenja ponašanje pretrage. U početnim fazama optimizacije, pri visokim vrijednostima T , vjerojatnost prihvatanja je visoka čak i za rješenja sa značajnim porastom troška ΔC . Ovo omogućuje algoritmu fazu globalnog istraživanja (eksploracije) prostora rješenja i sposobnost “preskakanja” barijera koje bi zarobile determinističke metode.

Kako vrijednost T iterativno konvergira prema nuli, vjerojatnost prihvatanja bilo kojeg nepoboljšavajućeg rješenja eksponencijalno opada. Algoritam time prelazi u fazu lokalnog iskorištavanja (eksploatacije), gdje se njegovo ponašanje približava determinističkom i vrši se isključivo fino podešavanje oko pronađenog optimuma. Upravo ta kontrolirana tranzicija od stohastičke pretrage prema determinističkoj konvergenciji daje metodi simuliranog žarenja robusnost i suštinsku prednost pred pohlepnim optimizacijskim algoritmima.

- **Prednosti:** Ključna snaga simuliranog žarenja leži u njegovoj sposobnosti da, posebice pri visokim temperaturama, s određenom vjerojatnošću prihvati lošija rješenja. To mu omogućuje da “preskoči” preko barijera u prostoru rješenja i izbjegne zaglavljivanje u lokalnim minimumima, što je čest nedostatak jednostavnijih optimizacijskih metoda. Kako se temperatura T postepeno smanjuje tijekom iteracija, algoritam sve rjeđe prihvaća lošija rješenja i na kraju konvergira prema jednoj točki minimuma.
- **Mane:** Unatoč svojoj robusnosti, simulirano žarenje ima značajan nedostatak: putanja pretrage uvelike ovisi o inicijalnoj poziciji. Algoritam istražuje prostor rješenja prateći jednu putanju od početne do konačne točke. Ako se početna točka nalazi u području koje je daleko od globalnog optimuma ili je okruženo visokim “energetskim barijerama”, postoji rizik da će algoritam konvergirati prema suboptimalnom lokalnom minimumu, ili će zahtijevati iznimno velik broj iteracija (sporo hlađenje) da pronađe bolje rješenje. Ova osjetljivost na početne uvjete čini samostalnu primjenu SA metode nepouzdanom za upravljanje u stvarnom vremenu gdje je konzistentnost i brzina od presudne važnosti.

Između ove dvije metode vidljiva je dilema: pretraga mrežom je prespora i neskalabilna, dok je simulirano žarenje brzo, ali potencijalno nepouzdan zbog ovisnosti o početnoj točki. Ova ograničenja izravno motiviraju razvoj hibridnog pristupa opisanog u sljedećem poglavlju.

4.3.2 Hibridna strategija za odabir radne točke

Kako bi se prevladala ograničenja prethodno opisanih metoda – računalna zahtjevnost pretrage mrežom i ovisnost o početnoj točki kod simuliranog žarenja – u ovom istraživanju je razvijena i primijenjena hibridna strategija upravljanja. Ovaj pristup sinergijski spaja prednosti obje metode u dvostupanjski proces koji osigurava brzu, robusnu i preciznu optimizaciju u stvarnom vremenu.

Cilj je efikasno pretražiti globalni prostor rješenja kako bi se identificirala obećavajuća područja, a zatim unutar tih područja provesti finu, lokalnu optimizaciju.

Postupak se u svakom vremenskom koraku sastoji od sljedeće tri faze:

- Globalna pretraga na gruboj mreži i rangiranje rješenja.
- Diverzifikacija kandidata korištenjem metode Euklidske udaljenosti.
- Paralelna lokalna optimizacija odabranih kandidata simuliranim kaljenjem.

1. Globalna pretraga na gruboj mreži

Umjesto definiranja guste mreže koja bi zahtijevala velik broj izračuna, prva faza koristi izrazito grubu mrežu radnih točaka. Za ovaj rad, prostor snaga glavnog motora i pomoćnog generatora diskretiziran je na $N_{eng,coarse} = 6$ i $N_{gen,coarse} = 6$ točaka. Svrha ove faze nije pronaći precizan optimum, već brzo procijeniti cijeli prostor rješenja i identificirati općenita područja unutar kojih se nalaze potencijalni minimumi. Za svaku od $6 \times 6 = 36$ kombinacija, izračunava se vrijednost funkcije cilja H_{ECMS} , a dobiveni rezultati se sortiraju u listu prema rastućem trošku.

2. Odabir raznolikih kandidata

Jednostavan odabir nekoliko najboljih rješenja iz sortirane liste bio bi suboptimalan, jer su ta rješenja najčešće grupirana unutar istog, uskog područja. Kako bi se osiguralo da faza lokalne optimizacije istraži različite, ali jednako obećavajuće regije, primjenjuje se postupak diverzifikacije.

Algoritam iterativno prolazi kroz sortiranu listu rješenja. Prvo rješenje (ono s najnižim troškom) automatski se odabire kao prvi kandidat. Svako sljedeće rješenje s liste prihvaća se kao novi kandidat samo ako je njegova udaljenost u prostoru snaga od svih prethodno odabranih kandidata veća od zadanog praga, d_{min} . Udaljenost se mjeri kao Euklidska udaljenost između dviju točaka, $A = (P_{eng,A}, P_{gen,A})$ i $B = (P_{eng,B}, P_{gen,B})$:

$$d(A, B) = \sqrt{(P_{eng,A} - P_{eng,B})^2 + (P_{gen,A} - P_{gen,B})^2} \quad (4.15)$$

Ovaj se postupak ponavlja dok se ne prikupi željeni broj raznolikih kandidata, k (u ovom istraživanju $k = 3$), koji će poslužiti kao početne točke za sljedeću fazu.

3. Lokalna optimizacija simuliranim kaljenjem

Za svakog od k odabranih kandidata pokreće se neovisna instanca optimizacije simuliranim kaljenjem (SA). Budući da su početne točke inteligentno odabrane da budu i kvalitetne (nizak trošak na gruboj mreži) i raznolike (međusobno udaljene), značajno se povećava vjerojatnost da će barem jedna od SA instanci započeti pretragu u blizini globalnog optimuma. Svaka SA instanca provodi fiksni broj iteracija ($I_{SA} = 75$) kako bi pronašla lokalni minimum u svom susjedstvu.

Nakon što svih k instanci završi s radom, njihovi konačni rezultati se uspoređuju. Rješenje koje ima apsolutno najnižu vrijednost funkcije cilja H_{ECMS} odabire se kao konačna, optimalna radna točka za taj vremenski korak.

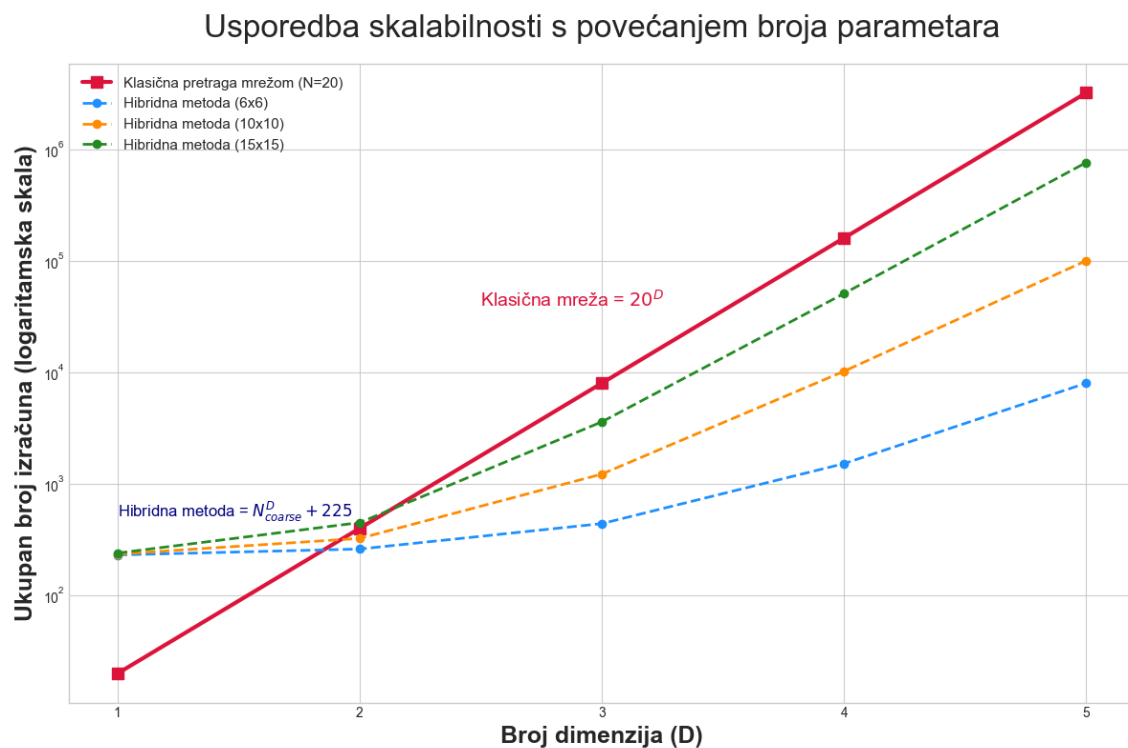
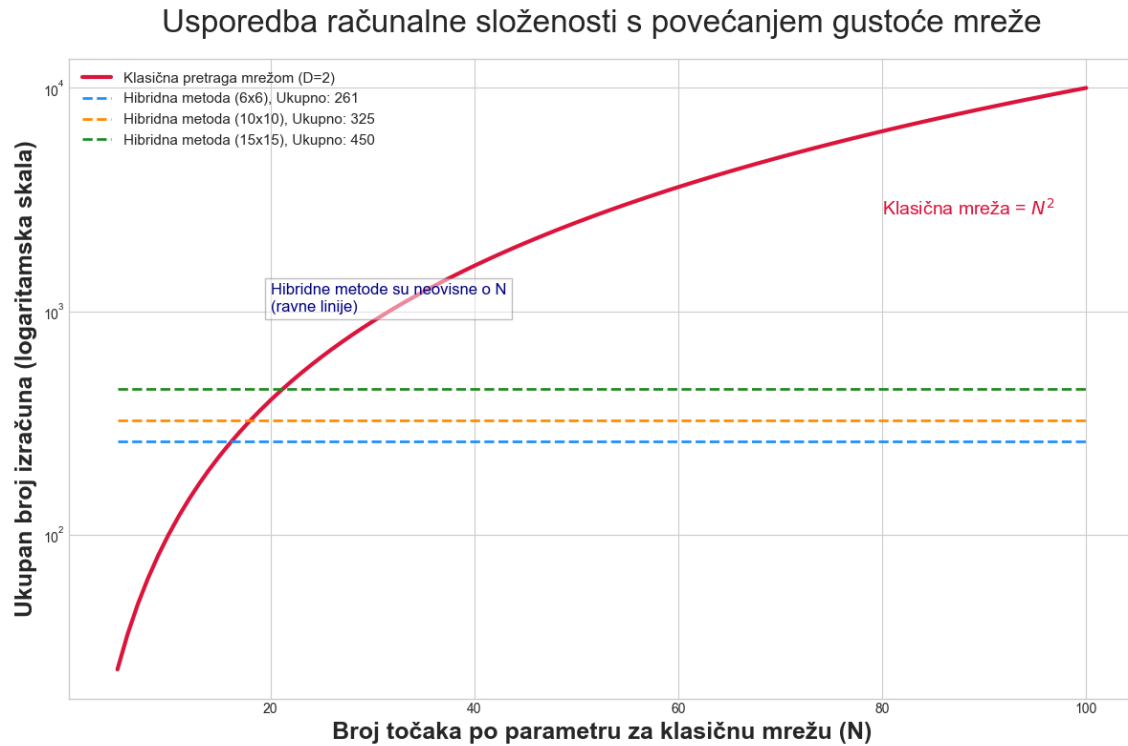
4.3.3 Usporedba računalne složenosti dviju metoda

Učinkovitost predloženog hibridnog pristupa najočitija je pri usporedbi broja ukupnih izračuna funkcije cilja s onim kod klasične pretrage mrežom. Pretpostavimo da za klasičnu metodu koristimo umjereno gustu mrežu s 20 diskretnih točaka za glavni motor i 20 točaka za generator. Takva mreža, iako nudi bolju rezoluciju od grube, i dalje predstavlja kompromis između preciznosti i brzine.

- **Klasična pretraga mrežom (20×20):**
 - Broj točaka za motor: $N_{eng,fine} = 20$
 - Broj točaka za generator: $N_{gen,fine} = 20$
 - Ukupan broj izračuna: $N_{fine} = N_{eng,fine} \times N_{gen,fine} = 20 \times 20 = 400$
- **Predloženi hibridni pristup:**
 - Broj izračuna u fazi grube pretrage: $N_{coarse} = N_{eng,coarse} \times N_{gen,coarse} = 6 \times 6 = 36$
 - Broj izračuna u fazi lokalne SA optimizacije: $N_{SA} = k \times I_{SA} = 3 \times 75 = 225$
 - Ukupan broj izračuna: $N_{hybrid} = N_{coarse} + N_{SA} = 36 + 225 = 261$

Usporedba pokazuje da hibridna metoda zahtijeva 261 izračun funkcije cilja u usporedbi s 400 izračuna kod umjerene pretrage mrežom. To predstavlja smanjenje računskog opterećenja od gotovo 35 % u svakom vremenskom koraku.

Iako se ova ušteda može činiti manjom u usporedbi s vrlo gustom mrežom, važno je naglasiti da mreža od 20×20 točaka i dalje nudi ograničenu preciznost. Bilo kakvo daljnje povećanje rezolucije klasične metode, na primjer na 30×30 točaka (900 izračuna), drastično bi povećalo razliku i potvrdilo eksponencijalni rast složenosti opisan ranije. S druge strane, hibridna metoda postiže visoku preciznost kroz lokalnu SA optimizaciju bez potrebe za povećanjem broja početnih izračuna. Time se ostvaruje superioran kompromis između brzine i točnosti, uz ključno zadržavanje skalabilnosti za buduće nadogradnje sustava. Utjecaj obje metode na skalabilnost može direktno vidjeti na slici 4.5.



Slika 4.5: Vizualna usporedba računske složenosti klasične pretrage mrežom i hibridne metode u ovisnosti o gustoći mreže (gore) i broju optimizacijskih parametara (dolje)

Prikazani dijagram pruža kvantitativnu vizualizaciju i usporedbu računske složenosti klasične pretrage mrežom i predložene hibridne metode. Analiza je provedena kroz dva ključna aspekta:

utjecaj preciznosti (gustoće mreže) na broj izračuna pri fiksnom broju parametara, te utjecaj broja parametara (skalabilnost) pri fiksnoj preciznosti. Korištenje logaritamske skale na y-osi u oba grafa omogućuje jasan prikaz ogromnih razlika u redovima veličine računalnog opterećenja.

1. Utjecaj gustoće mreže

Gornji dijagram na slici 4.5 prikazuje kako se ukupan broj izračuna mijenja s povećanjem broja točaka po parametru (N) za sustav s dvije dimenzije ($D = 2$). Ovaj parametar N izravno predstavlja željenu preciznost rješenja kod klasične metode.

- **Klasična pretraga mrežom (crvena linija):** Krivulja pokazuje izrazito polinomijalni rast (N^2), što je i očekivano. Već pri skromnom povećanju zahtjeva za preciznošću (npr. s $N = 40$ na $N = 80$), broj izračuna raste četverostruko (s ~ 1600 na ~ 6400). Ovo vizualno potvrđuje temeljni nedostatak metode: svako poboljšanje preciznosti plaća se neproporcionalno velikim porastom računskog vremena.
- **Hibridna metoda (isprekidane linije):** Tri vodoravne linije predstavljaju tri varijante hibridne metode (s grubom mrežom 6×6 , 10×10 i 15×15). Njihov horizontalni položaj je ključan zaključak ovog grafikona: računski trošak hibridne metode je potpuno neovisan o preciznosti (N) koju bi zahtijevala klasična metoda. Trošak je fiksni i definiran isključivo internim parametrima (veličinom grube mreže i brojem SA iteracija). Iako je za niže preciznosti klasična metoda brža od složenije hibridne varijante, za bilo koju praktično korisnu razinu preciznosti, hibridna metoda postaje višestruko efikasnija.

2. Utjecaj broja parametara i skalabilnost

Donji dijagram na slici 4.5 je ključan za razumijevanje strateških prednosti hibridnog pristupa jer prikazuje kako se metode ponašaju pri povećanju složenosti samog sustava, odnosno dodavanjem novih energetskih izvora (povećanjem broja dimenzija D).

- **Klasična pretraga mrežom (crvena linija):** Linija prikazuje eksponencijalni rast, što je jasna vizualizacija “prokletstva dimenzionalnosti”. Za sustav s dva parametra ($D = 2$), metoda zahtijeva 400 izračuna. Dodavanjem samo jednog dodatnog parametra ($D = 3$), trošak raste 20 puta na 8.000, dok za pet parametara ($D = 5$) doseže preko tri milijuna izračuna. Ovo nedvosmisleno pokazuje da je klasična metoda potpuno neskalabilna i praktički neupotrebljiva za hibridne sustave koji bi u budućnosti mogli uključivati gorivne članke, solarne panele ili dodatne generatore.
- **Hibridna metoda (isprekidane linije):** Iako je i rast hibridne metode eksponencijalan (zbog dijela N_{coarse}^D), on je značajno blaži. Baza eksponenta je puno manja (6, 10 ili 15 umjesto 20), što rezultira drastično sporijim rastom troškova. Čak i najskuplja hibridna varijanta (15×15) je za sustav s 5 parametara gotovo 40 puta jeftinija od umjereno guste klasične mreže.

4.3.4 Usporedba točnosti dviju metoda

Nakon što je u prethodnom poglavlju elaborirana i dokazana računalna učinkovitost i skalabilnost predložene hibridne strategije, neophodno je provesti i validaciju njezine točnosti. Cilj ovog poglavlja je utvrditi stupanj podudarnosti između upravljačkih odluka donesenih hibridnom metodom i onih dobivenih referentnom, metodom pretrage fine mreže.

U tu svrhu, kao referentna metoda za usporedbu odabrana je pretraga mreže s rezolucijom od 20×20 točaka. Unatoč prethodno dokazanoj računskoj nepraktičnosti za implementaciju u stvarnom vremenu, ova metoda pruža determinističko rješenje koje se, unutar granica primijenjene

diskretizacije, može smatrati bliskim optimumu. Time ona predstavlja valjano mjerilo za ocjenu kvalitete i točnosti predloženog hibridnog pristupa.

Kako bi se osigurala objektivna i direktna usporedba, obje su strategije – hibridna i pretraga mrežom – implementirane i testirane na identičnom, reprezentativnom jednodnevnom operativnom profilu. Primijenjen je uniformni skup parametara hibridnog sustava, identični početni uvjeti i jednaka operativna ograničenja. Ovakvim pristupom osigurava se da su eventualne razlike u izlaznim rezultatima isključivo posljedica fundamentalnih razlika u optimizacijskoj logici dviju metoda.

Analiza koja slijedi temelji se na rezultatima prikazanim na slici 4.6 i strukturirana je kroz komparativni prikaz triju ključnih varijabli koje cjelovito opisuju performanse sustava:

1. **Ukupna potrošnja goriva**, kao finalni, integralni pokazatelj energetske učinkovitosti.
2. **Vrijednost ECMS funkcije troška**, kao direktan uvid u optimalnost trenutanih upravljačkih odluka.
3. **Stanje napunjenosti baterije (SOC)**, kao pokazatelj dugoročne strategije upravljanja pohranjenom energijom.

- **Usporedba napunjenosti baterije**

Gornji dio slike prikazuje kretanje stanja napunjenosti baterije tijekom dvanaestosatnog ciklusa. Obje strategije slijede opadajući trend, što je karakteristika *charge-depleting* načina rada. Sivi pojas predstavlja definirani referentni pojas unutar kojeg se SOC treba kretati.

Vidljivo je da se putanje obje strategije gotovo savršeno poklapaju i kreću unutar zadanog referentnog pojasa. Ovo ukazuje na to da PI regulator faktora ekvivalencije (s) u obje metode uspješno održava SOC blizu željene putanje, osiguravajući da se ciljano stanje napunjenosti na kraju ciklusa postigne na predvidljiv način. Manja odstupanja su vidljiva, ali ona ne utječu na konačni trend.

- **Usporedba ukupne potrošnje goriva**

Srednji graf na slici 4.6 prikazuje kumulativnu potrošnju goriva i pruža najvažniji kvantitativni pokazatelj učinkovitosti. Krivulje se gotovo u potpunosti preklapaju, što ukazuje na vrlo sličan obrazac angažmana dizelskih motora.

Konačni rezultati, istaknuti u tekstualnom okviru, su sljedeći:

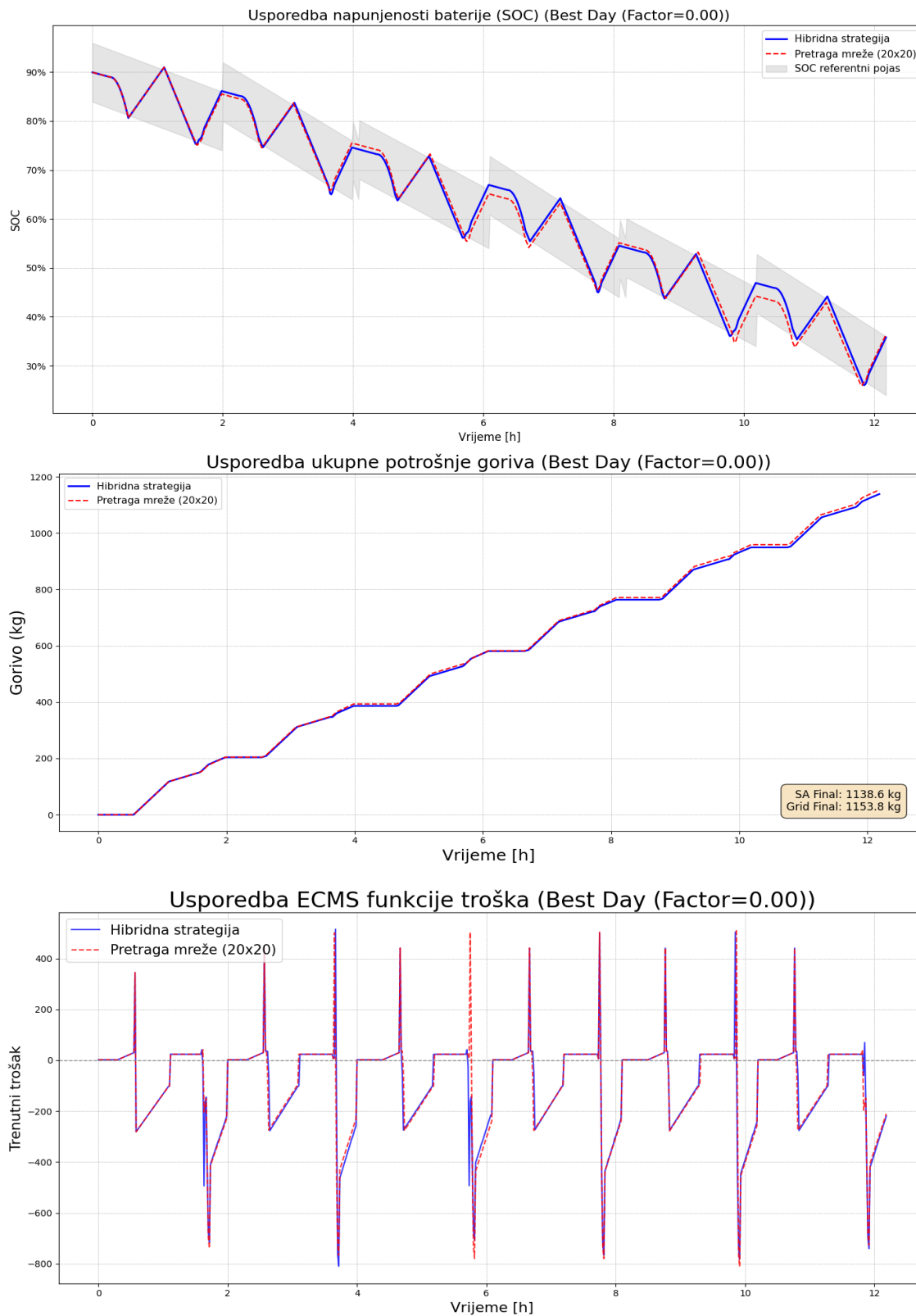
- **Hibridna SA strategija (konačna potrošnja):** 1138.6 kg
- **Pretraga mreže (20x20) (konačna potrošnja):** 1153.8 kg

Ovi podaci pokazuju da je hibridna strategija ostvarila uštedu od 15.2 kg goriva, što odgovara smanjenju potrošnje od približno 1.32 % u odnosu na referentnu metodu. Ovi rezultati direktno potvrđuju sposobnost hibridne metode da, zahvaljujući optimizaciji u kontinuiranom prostoru, pronađe neznatno, ali mjerljivo bolje rješenje od diskretne pretrage mreže.

- **Usporedba funkcije troška**

Donji graf nudi uvid u optimalnost odluka u svakom vremenskom koraku. Grafikon prikazuje gotovo savršeno preklapanje vrijednosti ECMS funkcije troška za obje metode. Dinamika promjena, uključujući oštre negativne vrhove (koji signaliziraju odluke o punjenju baterije korištenjem viška snage motora) i pozitivne vrijednosti, identična je.

Ovo gotovo potpuno preklapanje potvrđuje da hibridna strategija donosi odluke koje su konzistentno bliske optimumu koji pronalazi iscrpna pretraga. Manje razlike u konačnoj potrošnji goriva proizlaze iz suptilnih, ali kumulativnih prednosti koje hibridna metoda ostvaruje pronalazeći preciznije radne točke koje su nedostupne gruboj mreži.



Slika 4.6: Komparativna analiza performansi hibridne strategije i pretrage mreže operativni profil kroz SOC, ukupnu potrošnju goriva i ECMS funkciju troška

- **Zaključak**

Slika 4.6 pruža još jedan snažan dokaz valjanosti hibridnog pristupa. Unatoč bitno različitoj optimizacijskoj logici i drastično manjoj računskoj zahtjevnosti, hibridna metoda uspješno replicira, pa čak i blago nadmašuje, performanse referentne metode pretrage mrežom. Dokazana je njezina sposobnost da precizno slijedi referentnu SOC putanju i donosi trenutačne odluke koje su gotovo identične onima dobivenim iscrpnom pretragom, što u konačnici rezultira mjerljivim uštedama u potrošnji goriva.

4.4 Validacija upravljačke strategije pomoću dinamičkog programiranja

Prije detaljne analize rezultata optimizacije, ključno je validirati performanse razvijene upravljačke strategije. Stoga će se u nadolazećem poglavlju prikazati usporedba razvijenog adaptivnog ECMS (A-ECMS) kontrolera s globalno optimalnim rješenjem dobivenim pomoću dinamičkog programiranja (DP). Ova usporedba služi kao referentna točka za kvantifikaciju učinkovitosti A-ECMS kontrolera, koji radi u stvarnom vremenu bez poznavanja budućih opterećenja.

Prije detaljne analize rezultata dobivenih višeciljnom optimizacijom, nužno je kvantificirati učinkovitost razvijene A-ECMS upravljačke strategije. Budući da A-ECMS donosi odluke u stvarnom vremenu na temelju trenutnog stanja sustava i bez poznavanja budućih zahtjeva za snagom, odluke algoritma su sub-optimalne po prirodi. Kako bi se procijenila kvaliteta takve strategije, odnosno njezino odstupanje od teorijskog optimuma, u ovom poglavlju provodi se usporedba s dinamičkim programiranjem (DP).

Dinamičko programiranje je moćna numerička metoda za rješavanje složenih problema sekvencijalnog odlučivanja. Temelji se na Bellmanovom principu optimalnosti, koji nalaže da se optimalna strategija sastoji od optimalnih pod-strategija. Za deterministički problem s poznatim profilom opterećenja, DP jamči pronalazak globalno optimalne upravljačke trajektorije koja minimizira zadanu funkciju cilja. Upravo zbog te garancije globalne optimalnosti, DP se u literaturi često koristi kao referentna točka za validaciju heurističkih ili sub-optimalnih strategija koje su primjenjive u stvarnom vremenu.

Glavni nedostatak DP-a je njegova visoka računalna složenost. Vrijeme potrebno za izračun raste eksponencijalno s brojem varijabli stanja i finoćom diskretizacije prostora stanja i upravljanja. Zbog toga je primjena DP-a na višegodišnjim profilima opterećenja, kakvi se koriste u glavnoj optimizaciji, računalno neizvediva. Stoga je usporedba u ovom radu provedena na reprezentativnom dnevnom profilu opterećenja s nekoliko različitih varijabli dizajna, što je dovoljno za procjenu sub-optimalnosti A-ECMS strategije, ali unutar računalno prihvatljivih granica.

4.4.1 Matematička formulacija dinamičkog programiranja

Problem upravljanja energijom svodi se na pronalaženje optimalne sekvence upravljačkih odluka koje minimiziraju ukupni trošak (u ovom slučaju, potrošnju goriva) tijekom zadanog vremenskog horizonta. Ukupni trošak J definiran je kao suma trenutnih troškova L_k u svakom vremenskom koraku k :

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L_k(x_k, u_k) \quad (4.16)$$

gdje je N ukupan broj koraka u horizontu.

Varijable stanja (x_k) definiraju stanje sustava u koraku k . U ovom problemu, prostor stanja je proširen kako bi uključivao ne samo stanje napunjenosti baterije (SOC_k), već i snagu glavnog motora iz prethodnog koraka ($P_{eng,k-1}$), što omogućuje penalizaciju naglih promjena snage motora.

Upravljačke varijable (u_k) predstavljaju odluke koje se donose u svakom koraku. One su definirane snagama glavnog motora i generatora: $u_k = [P_{eng,k}, P_{gen,k}]$.

Jednadžba prijelaza stanja opisuje kako se stanje sustava mijenja iz koraka k u $k + 1$ pod utjecajem upravljačke odluke u_k . Promjena stanja napunjenosti baterije dana je izrazom:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{P_{batt,k}(u_k) \cdot \Delta t}{E_{batt} \cdot \eta_{batt}(P_{batt,k})} \quad (4.17)$$

gdje je $P_{batt,k}$ snaga baterije (pozitivna za pražnjenje, negativna za punjenje) izračunata iz bilance snaga sustava, Δt je vremenski korak, E_{batt} je nominalni kapacitet baterije, a η_{batt} je efikasnost punjenja ili pražnjenja.

Funkcija trenutnog troška (L_k) predstavlja trošak nastao u intervalu Δt . Sastoji se od potrošnje goriva oba motora i kazne za promjenu snage glavnog motora:

$$L_k(x_k, u_k) = (\dot{m}_{f,eng}(P_{eng,k}) + \dot{m}_{f,gen}(P_{gen,k})) \cdot \Delta t + \lambda_{ramp} |P_{eng,k} - P_{eng,k-1}| \quad (4.18)$$

gdje su $\dot{m}_{f,eng}$ i $\dot{m}_{f,gen}$ funkcije masenog protoka goriva ovisne o izlaznoj snazi, a λ_{ramp} je težinski faktor kazne za promjenu snage.

Sam DPA algoritam rješava se unazad kroz vrijeme, počevši od konačnog koraka N . Prvo se definira terminalni trošak $J_N(x_N)$, koji penalizira odstupanje konačnog stanja napunjenosti od željene vrijednosti SOC_{target} :

$$J_N(x_N) = \lambda_{SOC} (SOC_N - SOC_{target})^2 \quad (4.19)$$

Zatim se rekurzivno, od koraka $k = N - 1$ do $k = 0$, računa funkcija troška $J_k(x_k)$ za svaku moguću vrijednost stanja x_k . Ova funkcija predstavlja minimalni ukupni trošak od trenutnog stanja x_k do kraja horizonta i dana je Bellmanovom jednadžbom:

$$J_k(x_k) = \min_{u_k} \{L_k(x_k, u_k) + J_{k+1}(x_{k+1})\} \quad (4.20)$$

Rješavanjem ove jednadžbe za sve točke u diskretiziranom prostoru stanja i vremena, generiraju se mape optimalnih odluka za svako moguće stanje u svakom. Konačno, provodi se simulacija unaprijed koja, počevši od zadanog početnog stanja x_0 , koristi generirane mape odluka kako bi se rekonstruirala globalno optimalna trajektorija stanja i upravljanja. Ova trajektorija služi kao temelj za usporedbu s trajektorijom dobivenom pomoću A-ECMS kontrolera.

4.4.2 Rezultati validacije

Kako bi se sustavno ispitala robusnost i učinkovitost A-ECMS strategije, provedena je analiza na dva karakteristična slučaja s različitim konfiguracijama hibridnog sustava. Svaki slučaj osmišljen je kako bi se testiralo ponašanje strategije upravljanja u specifičnim uvjetima koji naglašavaju određene aspekte hibridnog pogona. U nastavku se detaljno analizira prvi slučaj.

Slučaj 1: Sustav s velikom baterijom i motorom nedovoljne snage za vršna opterećenja

Opis slučaja

Prvi analizirani slučaj postavljen je kao stres-test za strategiju upravljanja energijom, koristeći konfiguraciju sustava i operativni profil koji iziskuju intenzivnu hibridizaciju.

- **Konfiguracija sustava** definirana je sljedećim parametrima:

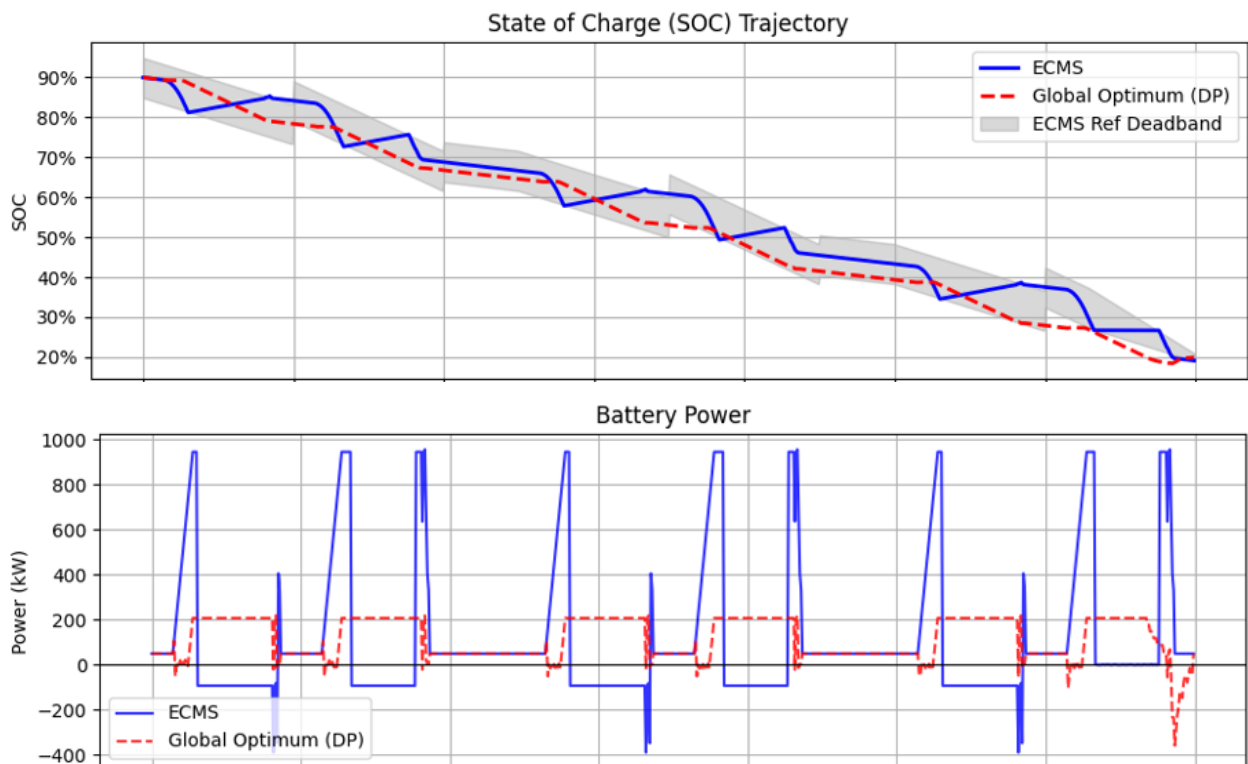
- Kapacitet baterijskog sustava: 2500 kWh
- Maksimalna snaga glavnog motora: 700 kW
- Maksimalna snaga pomoćnog motora: 300 kW

Ključna karakteristika ove konfiguracije jest da je snaga glavnog motora nedovoljna za samostalno pokrivanje vršnih opterećenja u plovidbi, koja prema profilu dosežu približno 900 kW. Time je sustav primoran kontinuirano koristiti bateriju u *Power Take-In* (PTI) načinu rada za asistenciju glavnom motoru. Veliki kapacitet baterije pruža značajnu energetska zalihu za ovakav način rada.

- **Operativni profil** sastoji se od tri uzastopna povratna putovanja unutar jednog dana, što uključuje šest dionica plovidbe u trajanju od po dva sata, ispresijecanih jednosatnim boravcima u luci. Ovakav dinamičan profil s čestim promjenama opterećenja dodatno naglašava potrebu za efikasnim upravljanjem energetskim tokovima.

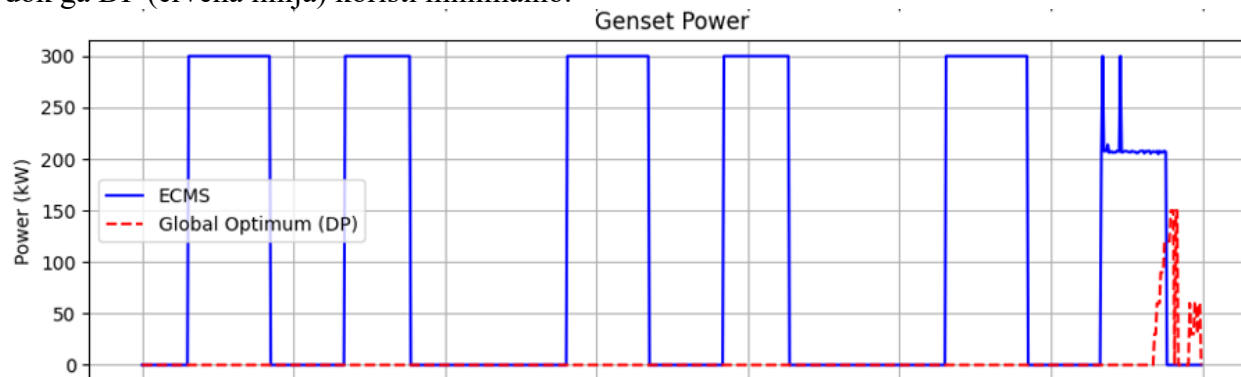
Analiza dviju strategija upravljanja

Fundamentalna razlika u strategijama, koja je i glavni uzrok odstupanja u potrošnji goriva, proizlazi iz načina korištenja baterije u različitim fazama putovanja. Dok globalno optimalno rješenje (DP) koristi bateriju primarno kao dopunu snage tijekom plovidbe konstantnom brzinom, A-ECMS strategija intenzivno koristi bateriju i tijekom faza ubrzavanja i manevriranja. To se vidi direktno na slici 4.7.



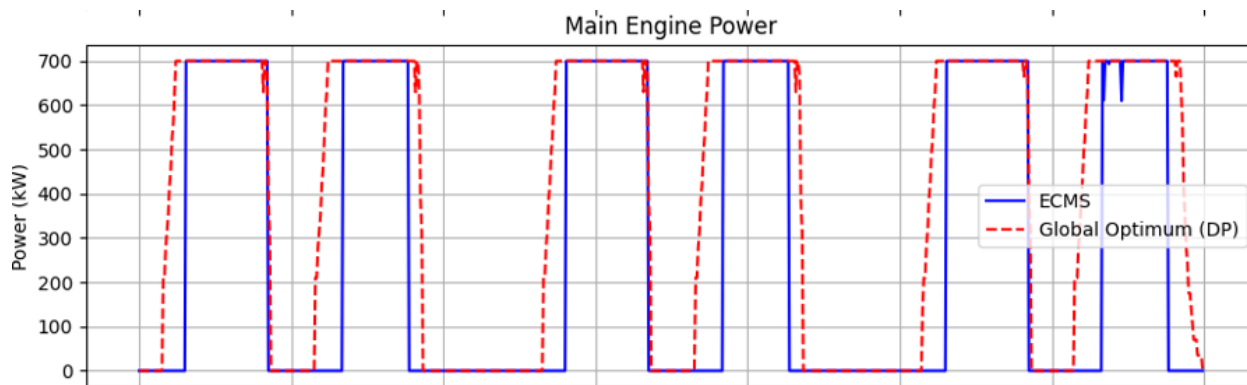
Slika 4.7: Prikaz pada SOC-a i korištenja energije iz baterije za dvije različite strategije upravljanja energijom za prvi slučaj

Ovakav agresivniji pristup pražnjenju baterije u A-ECMS-u dovodi do bržeg pada stanja napunjenosti. Posljedično, regulator unutar A-ECMS-a teži kompenzirati taj pad, što rezultira čestim aktiviranjem pomoćnog motora za punjenje baterije. To je jasno vidljivo na dijagramu snage pomoćnog motora na slici 4.8, gdje A-ECMS (plava linija) često pokreće pomoćni motor, dok ga DP (crvena linija) koristi minimalno.



Slika 4.8: Dijagram korištenja pomoćnog motora kod obje strategije upravljanja za prvi slučaj

Nasuprot tome, DP, s potpunim poznavanjem nadolazećeg opterećenja, zna da je ukupno efikasnije sačuvati energiju baterije tijekom faza ubrzanja i osloniti se više na glavni motor, a zatim koristiti bateriju kao pomoć u duljem, energetski zahtjevnom segmentu plovljenja konstantom brzinom. Na taj način izbjegava nepotrebno pokretanje manje efikasnog pomoćnog motora, oslanjajući se na punjenje putem viška snage s osovine glavnog motora (PTO).



Slika 4.9: Dijagram snage korištenja glavnog motora kod obje strategije za prvi slučaj

Unatoč ovoj fundamentalnoj razlici u strategiji, važno je uočiti da je upravljanje glavnim motorom gotovo identično kod obje metode. I A-ECMS i DP ispravno zaključuju da je najefikasnije opteretiti glavni motor na njegovu maksimalnu snagu tijekom plovidbe. To je vidljivo na slici 4.9.

Tablica 4.1: Numerička evaluacija na kraju simulacijskog ciklusa za prvi slučaj

Metrika	Adaptivni ECMS	Globalni Optimum (DP)	Razlika
Ukupno gorivo (kg)	1126.51	1036.83	+8.65 %
Broj pokretanja glavnog motora	6	6	0
Broj pokretanja pomoćnog motora	6	2	3x više
Konačni SOC	19.1 %	20.0 %	-0.9 %
Vrijeme izvođenja (s)	4.75	136.52	~28x brže

Konačni rezultat je razlika optimalnosti od **8.65 %**, što znači da je A-ECMS strategija u ovom scenariju potrošila 8.65 % više goriva od globalnog optimuma. Kao što je pokazala analiza vremenskih rezultata, ova razlika je izravna posljedica agresivnijeg korištenja baterije u tranzijentnim režimima, što je dovelo do potrebe za kompenzacijskim punjenjem putem manje efikasnog pomoćnog motora.

Obje strategije su imale identičan broj pokretanja glavnog motora i postigle su traženo konačno stanje napunjenosti baterije s neznatnom razlikom. Najznačajniji podatak je razlika u vremenu izvođenja. S vremenom od 4.75 sekundi, A-ECMS je preko 28 puta brži od DP-a, što potvrđuje njegovu podobnost za primjenu u višegodišnjim optimizacijskim problemima ili gdje je potrebno odlučivanje u stvarnom vremenu.

Slučaj 2: Sustav s predimenzioniranim glavnim motorom i manjom baterijom

Drugi slučaj istražuje radikalno drugačiju filozofiju dizajna hibridnog sustava. Cilj je bio ispitati sposobnost A-ECMS strategije da se prilagodi konfiguraciji gdje dominantnu ulogu preuzima motor s unutarnjim izgaranjem.

- **Konfiguracija sustava** definirana je sljedećim parametrima:

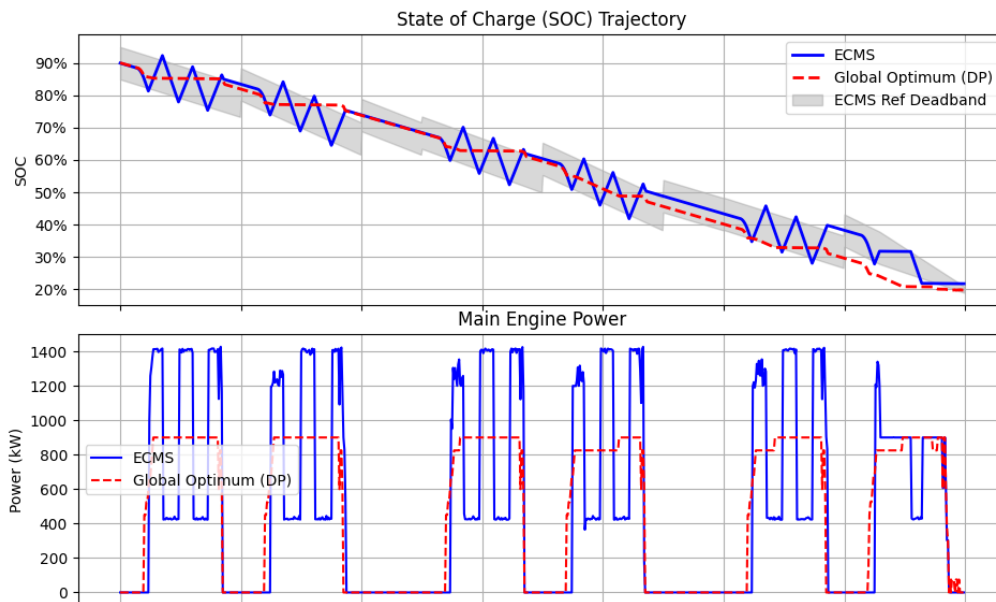
- Kapacitet baterijskog sustava: 1000 kWh
- Maksimalna snaga glavnog motora: 1500 kW
- Maksimalna snaga pomoćnog motora: 300 kW

U ovoj konfiguraciji, glavni motor je značajno predimenzioniran u odnosu na vršnu snagu potrebnu za plovidbu (~900 kW). To znači da sustav nikada nije primoran koristiti bateriju za asistenciju propulziji (PTI način rada). Naprotiv, tijekom plovidbe glavni motor ima značajan višak snage koji se može iskoristiti za proizvodnju električne energije i punjenje baterije (PTO način rada). Baterija je manjeg kapaciteta, naglašavajući njezinu ulogu kao energetske međuspremnika.

- **Operativni profil** ostaje identičan onome iz prvog slučaja (tri povratna putovanja) kako bi se omogućila izravna usporedba utjecaja konfiguracije sustava na rad strategije upravljanja.

Analiza dviju strategija upravljanja

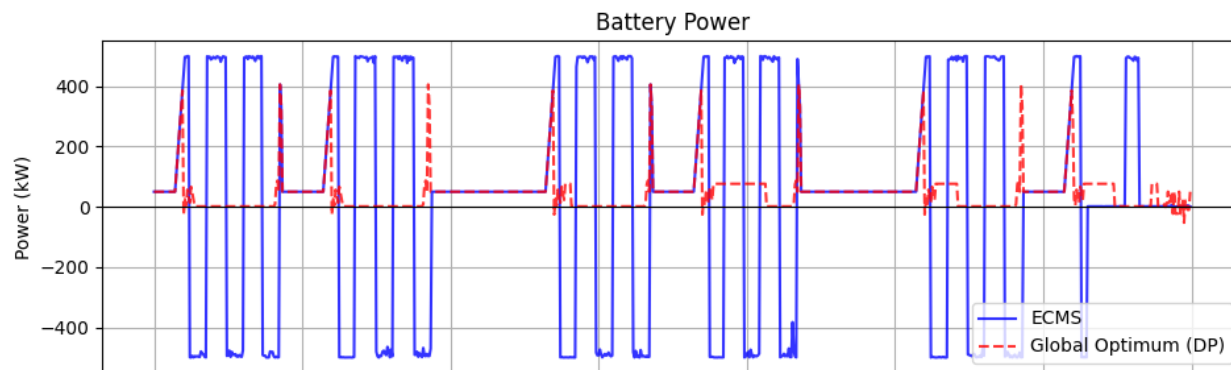
Analiza odziva sustava u slučaju 2, prikazana na slici 4.10, otkriva fundamentalne razlike u pristupu upravljanja energijom, unatoč prividnoj sličnosti u konačnim rezultatima.



Slika 4.10: Prikaz potrošene energije iz baterije za drugi slučaj

Ključna razlika u ovom slučaju očituje se u potpuno različitim strategijama korištenja baterije. Globalno optimalno rješenje (DP), posjedujući savršeno znanje o budućim opterećenjima, ispravno zaključuje da je početni kapacitet baterije od 1000 kWh dovoljan za pokrivanje svih pomoćnih opterećenja i tranzijentnih manevara tijekom cijelog dana. Stoga, DP primjenjuje strategiju isključivog pražnjenja baterije; snaga baterije (crvena linija na slici 4.11) nikada nije negativna, što znači da se PTO način rada glavnog motora za punjenje baterije uopće ne koristi. DP je izračunao da je ukupno energetske efikasnije potrošiti energiju iz baterije i izbjeći gubitke povezane s punjenjem.

Nasuprot tome, A-ECMS strategija, bez znanja o budućnosti, reaktivno slijedi zadanu referentnu SOC putanju. Njezina SOC krivulja (plava linija) ima karakterističan “cik-cak” uzorak. Ovo ponašanje je posljedica samog regulatora koji nastoji održati SOC unutar područja histereze (siva zona). Nakon što se baterija isprazni da bi pokrila opterećenje, SOC odstupa od središnje referentne linije; regulator to detektira kao grešku i naređuje agresivno punjenje (putem PTO-a ili genseta) kako bi vratio SOC prema referenci. Ovi ponavljajući ciklusi agresivnog pražnjenja i punjenja glavni su uzrok neoptimalne potrošnje goriva.



Slika 4.11: Prikaz putanje SOC-a i dijagrama snage glavnog motora kod drugog slučaja

Tablica 4.2: Numerička evaluacija na kraju simulacijskog ciklusa za drugi slučaj

Metrika	Adaptivni ECMS (A-ECMS)	Globalni Optimum (DP)	Razlika
Ukupno gorivo (kg)	1285.42	1205.90	+6.59 %
Broj pokretanja ME	6	10	-4
Konačni SOC	21.8 %	19.9 %	+1.9 %
Vrijeme izvođenja (s)	4.57	73.03	~16x brže

Jaz optimalnosti u ovom se slučaju smanjio na 6.59 %, što potvrđuje visoku učinkovitost A-ECMS-a. Analiza je pokazala da ova razlika gotovo isključivo proizlazi iz reaktivne prirode A-ECMS regulatora, koji forsira nepotrebne cikluse punjenja baterije koje globalni optimum uspješno izbjegava.

Važno je naglasiti da upravo ova sub-optimalnost, uzrokovana agresivnim punjenjem i pražnjenjem, dokazuje da postoji značajan prostor za poboljšanje kroz kalibraciju samog A-ECMS modela. Upravo će parametri koji definiraju ponašanje regulatora (npr., širina područja histereze) biti uključeni kao varijable odlučivanja u glavnoj, sveobuhvatnoj optimizacijskoj petlji koja slijedi u idućem poglavlju. Time se validacija ne koristi samo kao dokaz točnosti, već i kao smjernica za daljnju optimizaciju.

5. POSTAVKE OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA

Ovo poglavlje detaljno izlaže cjeloviti metodološki okvir razvijen za rješavanje složenog problema integriranog dimenzioniranja i upravljanja energijom brodskog hibridnog pogonskog sustava. Ključni cilj predstavljene metodologije jest pronalaženje skupa Pareto-optimalnih rješenja koja uravnotežuju kompromise između ekonomskih troškova, energetske učinkovitosti i dugoročne pouzdanosti. Problem dimenzioniranja hibridnih sustava neraskidivo je povezan s problemom njihovog operativnog upravljanja; odluke donesene na strateškoj razini dizajna izravno utječu na optimalnost strategije upravljanja energijom u stvarnom vremenu, i obrnuto. Stoga, pristup koji razdvaja ove dvije domene često rezultira suboptimalnim rješenjima.

Predstavljena metodologija prevladava to ograničenje primjenom integriranog pristupa, gdje se procesi dimenzioniranja i upravljanja promatraju kao jedinstven, povezan problem. Srž metodologije čini dvostupanjski optimizacijski okvir koji spaja evolucijski algoritam za istraživanje širokog prostora mogućih dizajna sustava s detaljnom simulacijom životnog ciklusa za preciznu evaluaciju performansi svakog pojedinog dizajna. Ovakva struktura omogućuje da se svaka potencijalna konfiguracija sustava – definirana veličinama ključnih komponenti poput baterijskog spremnika, glavnog porivnog motora i pomoćnih generatora – vrednuje ne u izoliranim, idealiziranim uvjetima, već kroz simulaciju njezina rada tijekom cjelokupnog životnog vijeka, podvrgnuta realističnim i promjenjivim operativnim zahtjevima.

Da bi evaluacija bila relevantna, od presudne je važnosti utemeljiti je na vjerodostojnom operativnom scenariju. Stoga, ovo poglavlje najprije opisuje postupak generiranja sintetičkog, višegodišnjeg profila opterećenja. Taj profil uključuje determinističke operativne faze, ali i sezonske te stohastičke elemente koji odražavaju stvarne uvjete plovidbe i nepredvidivosti s kojima se sustav suočava.

Nakon postavljanja operativnog konteksta, poglavlje detaljno razrađuje arhitekturu spomenutog dvostupanjskog optimizacijskog okvira. Objašnjeno je kako viši stupanj, vođen genetskim algoritmom NSGA-II, sustavno generira i modificira populaciju mogućih dizajna, do niži stupanj za svaki od njih provodi simulaciju primjenjujući naprednu strategiju upravljanja energijom temeljenu na principu ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS).

Konačno, za holističku kvantifikaciju uspješnosti svakog rješenja, definiran je skup od tri ključne funkcije cilja. Poglavlje će stoga zaključno pružiti detaljan uvid u logiku izračuna troška životnog ciklusa (LCC), koji obuhvaća investicijske i operativne troškove uzimajući u obzir dinamičke ekonomske parametre; ukupne potrošnje goriva kao mjere energetske učinkovitosti; te kompozitnog indeksa degradacije, koji agregira trošenje svih ključnih komponenti sustava u jedinstvenu metriku. Kroz ovaj sveobuhvatni pristup, metodologija pruža dubinski uvid u složene međuovisnosti koje oblikuju performanse brodskih hibridnih sustava.

5.1 Modeliranje dnevnog operativnog ciklusa

Temelj za svaku dugoročnu analizu performansi brodskog energetskog sustava jest realističan i ponovljiv model njegovih svakodnevnih operacija. Dnevni operativni ciklus predstavlja osnovnu gradivnu jedinicu unutar višegodišnjeg profila opterećenja, a njegova je svrha vjerno replicirati slijed aktivnosti i s njima povezane energetske zahtjeve tijekom jednog radnog dana. Struktura dnevnog ciklusa, a posebice njegova dekompozicija na četiri karakteristične operativne faze – mirovanje u luci, ubrzanje, plovidba i manevriranje – izvedena je iz analize stvarnih podataka o opterećenju prikupljenih mjerenjima na lokalnom putničkom trajektu. Time se osigurava da

sintetički profil opterećenja koji se koristi u optimizaciji vjerno odražava stvarne energetske zahtjeve i dinamiku plovila u realnim uvjetima. U ovoj metodologiji, dnevni ciklus je posljedično koncipiran kao serija jedne ili više povratnih plovidbi, pri čemu svaka plovidba predstavlja putovanje od polazišne do odredišne točke i natrag.

Kako bi se postigla visoka razina vjerodostojnosti, svaka pojedinačna plovidba dekomponirana je na niz uzastopnih, fizikalno utemeljenih operativnih faza. Trajanje svake faze definirano je kao udio u ukupnom trajanju plovidbe, što osigurava skalabilnost i modularnost modela. Slijed i karakteristike tih faza su sljedeći:

- **Faza mirovanja u luci:** Ova faza predstavlja početno i završno stanje svake plovidbe. Tijekom ovog perioda, propulzijski sustav je neaktivan, a ukupno opterećenje energetskog sustava odgovara konstantnoj potražnji za električnom energijom nužnom za rad osnovnih brodskih sustava. Ovo opterećenje uključuje napajanje navigacijske opreme, klimatizacije, rasvjete i ostalih pomoćnih sustava. Boravak na sidru predstavlja cca 9 % vremena putovanja i čini do 20 % potrošnje goriva (SEEMP).
- **Faza tranzicije i ubrzanja:** Nakon isplovljavanja, sustav ulazi u fazu tranzicije u kojoj plovilo ubrzava do nominalne brzine. U ovom segmentu, potražnja za snagom propulzijskog sustava modelira se kao linearna funkcija vremena, rastući od nulte vrijednosti do razine snage potrebne za plovidbu nominalnom brzinom. Ukupno opterećenje sustava u ovoj fazi je zbroj propulzijske snage i osnovnog električnog opterećenja.
- **Faza plovidbe nominalnom brzinom:** Ovaj segment predstavlja najduži dio plovidbe, tijekom kojeg se plovilo kreće konstantnom brzinom. Potražnja za snagom je visoka i modelira se kao konstantna vrijednost koja odgovara snazi potrebnoj za održavanje putne brzine u definiranim uvjetima mora.
- **Faza manevriranja:** Prilikom približavanja odredišnoj luci, plovilo ulazi u fazu manevriranja. Ovaj je režim rada energetski najkompleksniji i najdinamičniji, karakteriziran čestim i naglim promjenama opterećenja uslijed korištenja glavnog poriva i bočnih potisnika za precizno pozicioniranje i pristajanje. Opterećenje u ovoj fazi nije determinističko, već se modelira kao superpozicija više komponenata kako bi se što vjernije opisala njegova stohastička priroda.

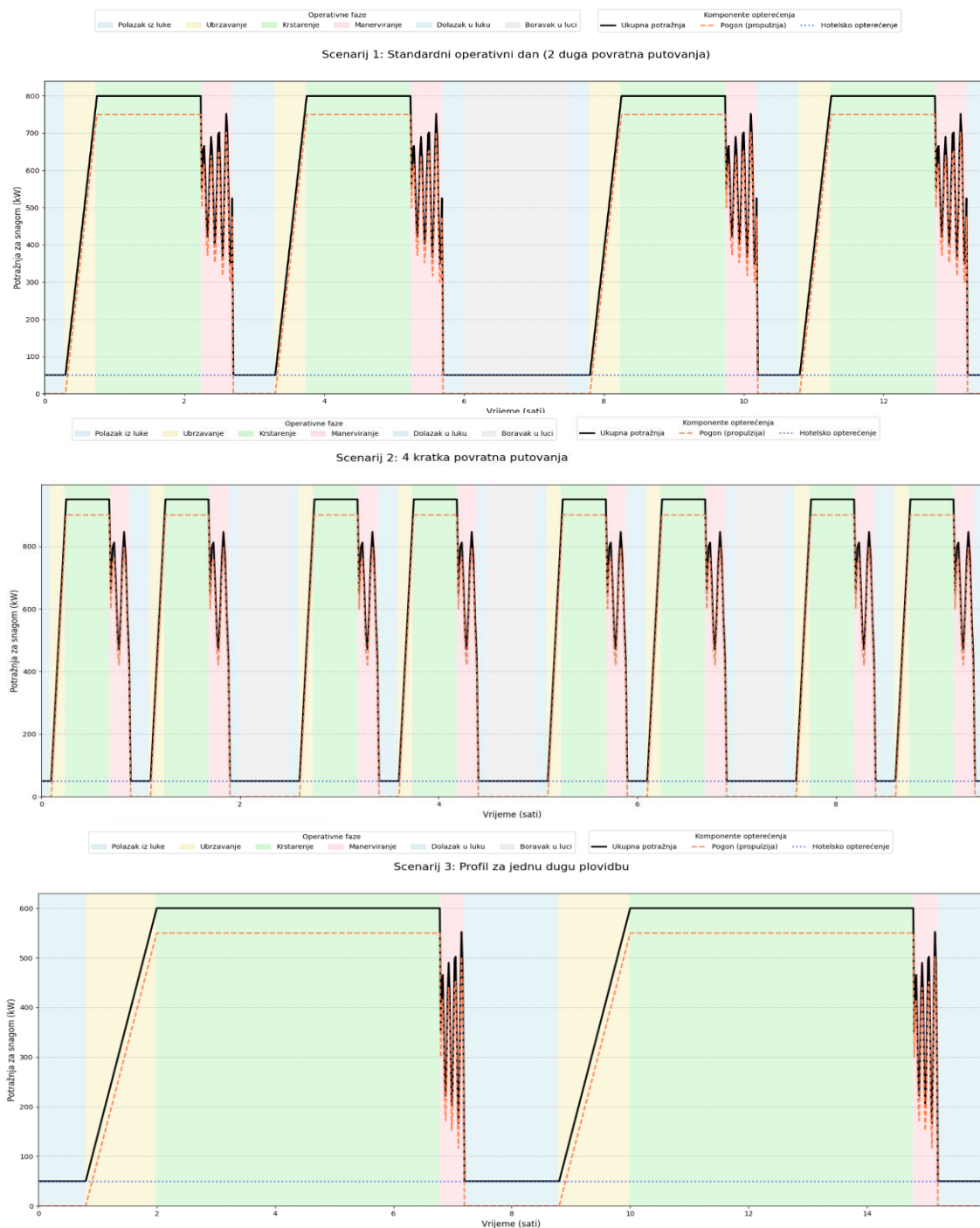
Ukupna potražnja za snagom tijekom manevriranja, $P_{man}(t)$, opisana je sljedećom jednadžbom:

$$P_{man}(t) = P_{bazna} + A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (5.1)$$

gdje je:

- P_{bazna} – srednja (bazna) vrijednost snage oko koje opterećenje oscilira, a predstavlja osnovni energetski zahtjev za manevriranje.
- $A_1 \sin(2\pi f_1 t)$ – komponenta niskofrekventne oscilacije, koja predstavlja primarne, sporije manevre poput zaokretanja plovila. Ovu komponentu karakterizira veća amplituda (A_1) i duži period (niža frekvencija f_1).
- $A_2 \sin(2\pi f_2 t)$ – komponenta visokofrekventne oscilacije, koja predstavlja sekundarne, brze korekcije putanje i položaja korištenjem kratkih i intenzivnih potisaka. Ovu komponentu karakterizira manja amplituda (A_2) i kraći period (viša frekvencija f_2).

Primjenom opisane metodologije, moguće je generirati širok spektar realističnih dnevnih ciklusa koji odražavaju različite operative zahtjeve. U nastavku na slici 5.1 su prikazana tri karakteristična scenarija koja ilustriraju fleksibilnost modela:



Slika 5.1: Primjeri modeliranih dnevnih profila opterećenja koji prikazuju različite operative scenarije: standardni, dinamični i dugolinijski

- **Scenarij 1: Standardni operativni dan (2 duga povratna putovanja)** Ovaj profil, prikazan na prvoj slici, predstavlja tipičan radni dan s dva duga, simetrična povratna putovanja. Karakteriziraju ga duge faze plovidbe pri visokoj i stabilnoj potražnji za snagom (oko 750 kW za propulziju), prekinute dinamičnim fazama manevriranja i pauzom za boravak u luci. Ovaj scenarij je reprezentativan za standardnu, predvidljivu operaciju s dugim periodima visoke, ali stabilne potrošnje.
- **Scenarij 2: 4 kratka povratna putovanja** Drugi scenarij prikazuje vrlo dinamičan dan s četiri kratka i intenzivna povratna putovanja. Ovaj profil karakteriziraju vrlo visoki, ali kratki vrhovi potražnje za snagom tijekom plovidbe (preko 900 kW). Faze ubrzavanja i manevriranja čine značajan udio ukupnog vremena, što rezultira stalnim i velikim promjenama opterećenja. Ovakav profil tipičan je za plovila koja obavljaju kratke, česte rute poput lokalnih trajekata, te zahtijeva energetske sustav koji može brzo odgovoriti na česte i visoke vršne zahtjeve.
- **Scenarij 3: Profil za jednu dugu plovidbu** Treći scenarij ilustrira jedno dugo povratno putovanje. Njime dominiraju izrazito duge faze krstarenja pri nešto nižoj, ali konstantnoj snazi (oko 550 kW za propulziju), dok su prijelazne faze ubrzavanja i manevriranja relativno kratke. Ovaj je scenarij reprezentativan za plovila na dužim rutama, gdje je energetska učinkovitost tijekom višesatne plovidbe nominalnom brzinom ključni faktor za optimizaciju.

Takav modularan pristup, ilustriran kroz navedene primjere, omogućuje fleksibilnu prilagodbu broja dnevnih putovanja i trajanja pojedinih operacija, što je preduvjet za uspješnu sintezu dugoročnog, višegodišnjeg profila opterećenja koji će biti opisan u sljedećem poglavlju

5.2 Konstrukcija višegodišnjeg profila

Dok dnevni operativni ciklus pruža esencijalnu, ali statičnu sliku energetske zahtjeva, on sam po sebi nije dovoljan za cjelovitu analizu. Fenomeni poput degradacije komponenti, kumulativne potrošnje goriva i ukupnih troškova životnog ciklusa mogu se ispravno procijeniti jedino promatranjem sustava na dugoročnoj skali. Stoga je ključan korak metodologije sinteza višegodišnjeg profila opterećenja koji nadilazi puko ponavljanje identičnih dnevnih ciklusa i uvodi realističnu varijabilnost.

Konstrukcija profila temelji se na sekvencijalnom generiranju dnevnih operativnih ciklusa za svaki dan unutar definiranog životnog vijeka plovila (npr. 10 ili više godina). Kako bi se vjerno preslikali stvarni uvjeti eksploatacije, u model se uvode determinističke sezonske promjene i stohastički (slučajni) elementi.

5.2.1 Modeliranje sezonskih varijacija

Sezonski utjecaji predstavljaju najznačajniji izvor dugoročne, predvidljive varijabilnosti. Intenzitet pomorskog prometa i uvjeti okoline (npr. temperatura) nisu konstantni tijekom godine, što izravno utječe na opterećenje sustava. Ovi se utjecaji modeliraju pomoću sezonskih faktora – normaliziranih, periodičkih funkcija koje moduliraju ključne parametre dnevnog ciklusa.

Sezonski faktor intenziteta prometa i propulzijske snage (S_{promet}), koji utječe na broj putovanja i snagu krstarenja, definiran je sinusnom funkcijom te se njegov utjecaj može vidjeti na slici 5.2:

$$S_{promet}(d) = \frac{1}{2} \left(\sin \left(\frac{2\pi(d - 122)}{365} \right) + 1 \right) \quad (5.2)$$

gdje je:

- d – redni dan u godini (1-365).
- Fazni pomak $d_0 = 122$ postavlja početak rasta sezonskog opterećenja u kasno proljeće, osiguravajući da vrhunac (kada $S_{promet} = 1$) bude krajem srpnja, što odgovara vršnoj turističkoj sezoni. Transformacija $(\sin(\cdot) + 1)/2$ skalira izlaz funkcije na raspon $[0,1]$, gdje 0 predstavlja potpunu izvansezonu, a 1 vrhunac sezone.

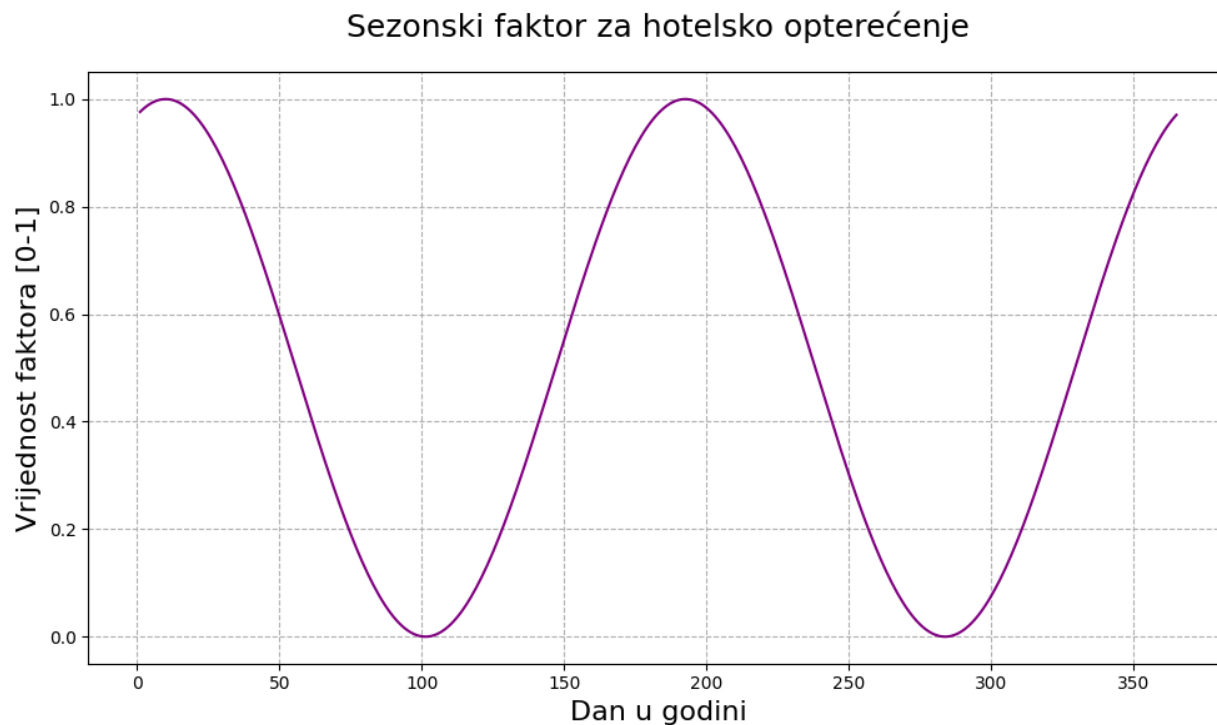


Slika 5.2: Prikaz promjene sezonskog faktora intenziteta prometa i propulzijske snage

Sezonski faktor za osnovno električno opterećenje (S_{hotel}), koje ovisi o radu klimatizacijskih i grijalnih sustava, može imati dva vrha godišnje. Takav se fenomen modelira kosinusnom funkcijom udvostručene frekvencije i prikazan je na slici 5.3:

$$S_{hotel}(d) = \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{4\pi(d - 10)}{365} \right) + 1 \right) \quad (5.3)$$

Ova formulacija generira dva ciklusa unutar jedne godine, s vrhuncima u zimskim i ljetnim mjesecima.



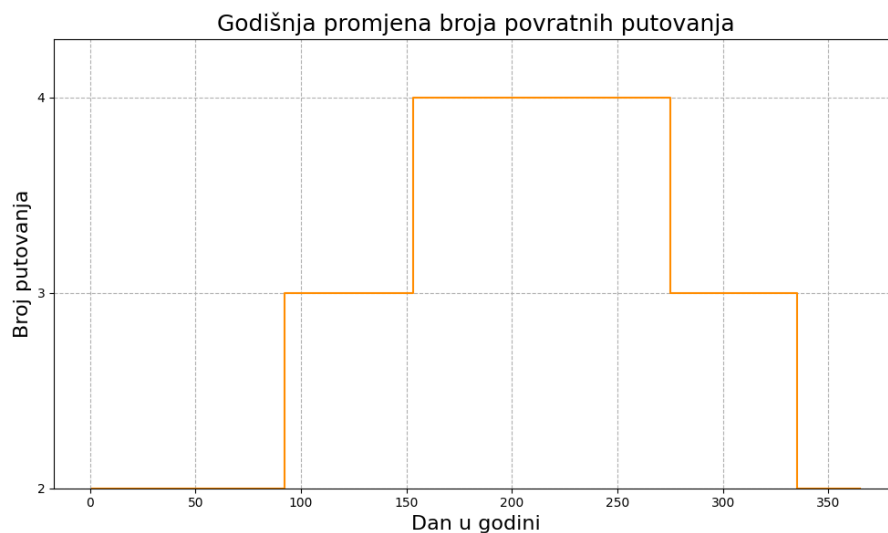
Slika 5.3: Sezonski faktor hotelskog opterećenja

Ovi se faktori potom koriste za dinamički izračun operativnih parametara za svaki dan.

- **Broj dnevnih putovanja ($N_{putovanja}$):**

$$N_{putovanja}(d) = \text{round} \left(N_{bazni} + \Delta N_{sezonski} \cdot S_{promet}(d) \right) \quad (5.4)$$

gdje je N_{bazni} broj putovanja izvan sezone, a $\Delta N_{sezonski}$ maksimalno dodatno povećanje u sezoni. Prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4: Prikaz godišnje promjene povratnih putovanja

- **Propulzijska snaga ($P_{propulzije}$):**

$$P_{propulzije}(d) = P_{bazna,prop} + \Delta P_{sezonski,prop} \cdot S_{promet}(d) + P_{slučajno} \quad (5.5)$$

gdje $P_{bazna,prop}$ i $\Delta P_{sezonski,prop}$ predstavljaju baznu snagu i njeno sezonsko povećanje.

- **Snaga za osnovno električno opterećenje (P_{hotel}):**

$$P_{hotel}(d) = P_{bazna,hotel} + \Delta P_{sezonski,hotel} \cdot S_{hotel}(d) \quad (5.6)$$

gdje $P_{bazna,hotel}$ i $\Delta P_{sezonski,hotel}$ predstavljaju baznu snagu i njeno polusezonsko povećanje.

5.2.2 Uvođenje stohastičkih elemenata

Kako bi se osigurala robusnost rješenja, profil mora sadržavati i nepredvidive elemente.

1. **Dnevne fluktuacije:** Član $P_{slučajno}$ u jednadžbi za snagu krstarenja predstavlja stohastičku varijablu iz uniformne distribucije $U(-\Delta P_{slučajno}, +\Delta P_{slučajno})$. On simulira manje, svakodnevne varijacije u uvjetima plovidbe (npr. struje, vjetar).
2. **Nepovoljni vremenski uvjeti:** Uvodi se dnevna vjerojatnost loših vremenskih uvjeta. Ukoliko je taj uvjet ispunjen, parametri dnevnog profila se modificiraju, produženjem trajanja energetske zahtjevnije faze manevriranja i osnovnog električnog opterećenja. Ovaj element modelira rjeđe, ali značajnije događaje koji stavljaju sustav pod vršno opterećenje.

5.2.3 Integracija perioda punjenja

Konačno, kako bi se osigurao kontinuirani rad iz dana u dan, profil uključuje i faze punjenja baterije s kopnene mreže. Nakon završetka dnevnih operacija, model umeće period noćnog punjenja. Trajanje ovog perioda je preostalo vrijeme do 24 sata, a cilj je dovesti stanje napunjenosti baterije (SOC) na zadanu početnu vrijednost za sljedeći dan. Ova faza je ključna jer povezuje energetske bilance uzastopnih dana i direktno ovisi o odabranoj dugoročnoj strategiji upravljanja energijom (npr. povratak na visoki SOC kod strategije pražnjenja ili održavanje srednjeg SOC-a kod strategije održavanja).

Unutar simulacijskog okvira, ovaj je proces modeliran s visokom razinom detalja kako bi se vjerno replicirali fizikalni procesi i donosile inteligentne upravljačke odluke. Model najprije determinira raspoloživi vremenski okvir za punjenje, $t_{punjenja}$, oduzimanjem ukupnog trajanja dnevnih operacija, $t_{operativni}$, od ukupnog broja sekundi u danu:

$$t_{punjenja} = (24 \times 3600) - t_{operativni} \quad (5.7)$$

Nakon definiranja vremenskog okvira, implementiran je mehanizam za inteligentan odabir snage punjenja. Umjesto primjene fiksne, maksimalne snage, što bi moglo nepotrebno ubrzati degradaciju baterije, algoritam nastoji koristiti najnižu moguću snagu koja i dalje može zadovoljiti postavljeni cilj. Postupak je iterativan: model raspolaže s nekoliko predefiniranih opcija snage punjenja (npr. $0.33 \cdot C_{rate,max}$, $0.66 \cdot C_{rate,max}$, $C_{rate,max}$) te za svaku od njih izračunava potrebno vrijeme za doseganje ciljanog SOC-a. Odabire se prva, najniža snaga za koju je izračunato vrijeme unutar raspoloživog vremenskog prozora. Ovim se pristupom minimizira stres na baterijske ćelije.

Ključno je istaknuti da fizikalni model sustava ostaje u potpunosti aktivan tijekom ove faze te se kontinuirano proračunavaju dva ključna parametra:

1. **Ukupna energija preuzeta s kopnene mreže:** Ova vrijednost je esencijalna za izračun operativnih troškova (OPEX), budući da predstavlja direktan trošak električne energije.
2. **Degradacija baterije:** Model starenja baterije proračunava utjecaj kalendarskog starenja tijekom cijelog perioda mirovanja i punjenja, uzimajući u obzir prosječno stanje napunjenosti i temperaturu. Ovaj proces je od presudne važnosti za točnu procjenu životnog vijeka baterije i s njim povezanih troškova zamjene (CAPEX).

Kombinacijom determinističke dnevne strukture, predvidljivih sezonskih ciklusa i nepredvidivih stohastičkih događaja, stvara se sveobuhvatan i realističan višegodišnji operativni scenarij. Takav profil opterećenja, koji vjerno modelira i operativne i ne-operativne faze, služi kao vjerodostojan temelj na kojem se provodi optimizacija, osiguravajući da su konačna rješenja primjenjiva i robusna u stvarnim uvjetima eksploatacije.

5.3 Koncept dvostupanjske optimizacije

Problem optimizacije hibridnog broskog energetskeg sustava inherentno je složen zbog duboke međuovisnosti između strateških odluka o dimenzioniranju i operativnih odluka o upravljanju energijom. Konfiguracija sustava (npr. veličina baterije i snaga motora) izravno utječe na optimalnu strategiju upravljanja u stvarnom vremenu, dok istovremeno performanse te iste konfiguracije ovise isključivo o tome koliko se učinkovito njome upravlja tijekom životnog vijeka. Rješavanje ovog spregnutog problema zahtijeva metodološki okvir koji nadilazi jednostavne, sekvencijalne pristupe i omogućuje istovremeno, integrirano razmatranje obiju domena.

U tu je svrhu u ovom radu razvijen i primijenjen dvostupanjski (hijerarhijski) optimizacijski pristup. Ovaj koncept razlaže cjelokupni problem na dva stupnja koje djeluju u sinergiji: viši, strateški stupanj zadužen za dimenzioniranje, i niži, operativni stupanj zadužen za evaluaciju.

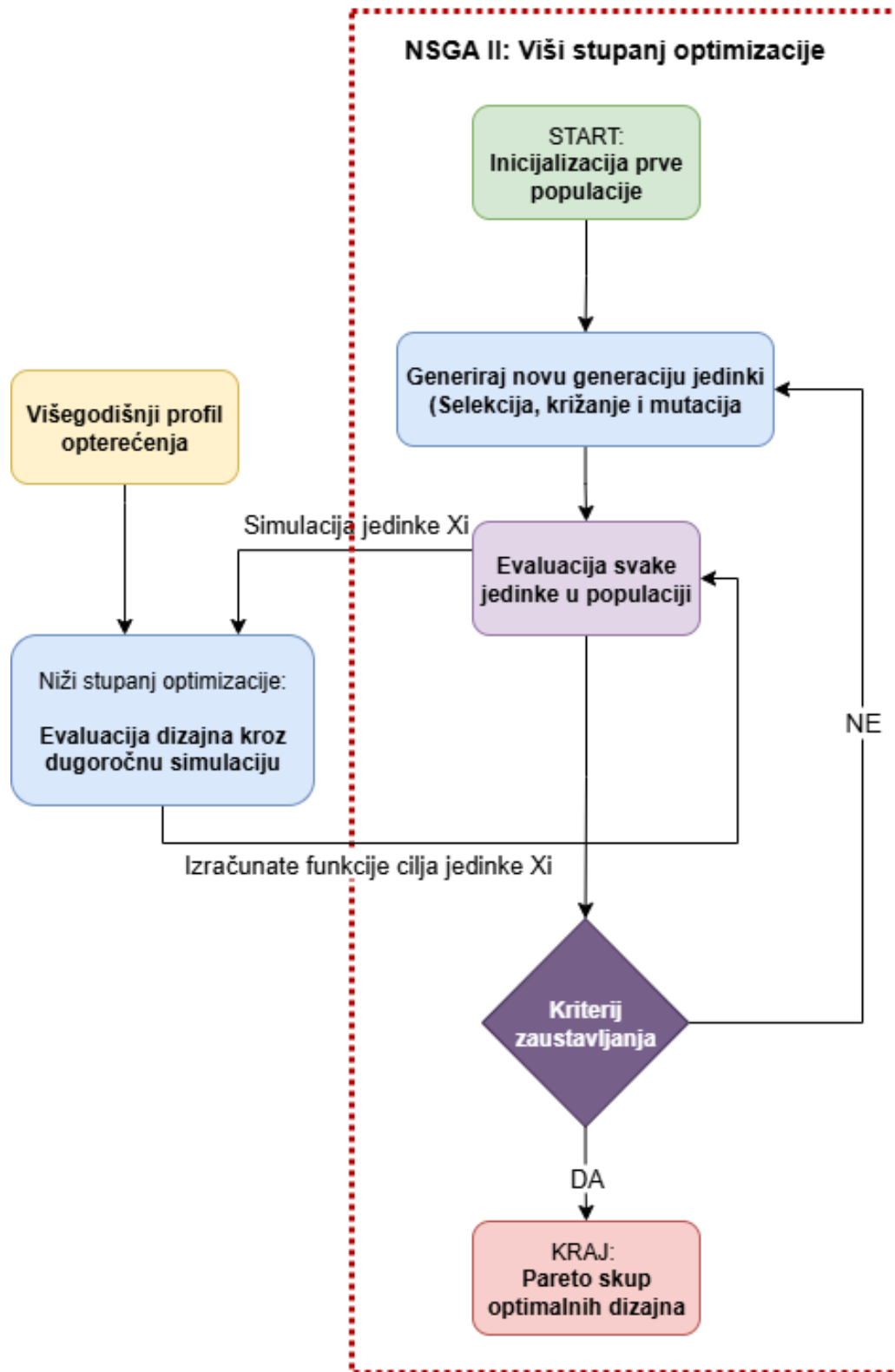
5.3.1 Viši stupanj: Optimizacija dimenzioniranja sustava

Vanjska razina predstavlja glavni optimizacijski proces, vođen višeciljnim genetskim algoritmom NSGA-II. Njezina je temeljna zadaća sustavno istraživanje golemog područja mogućih dizajna (engl. *design space*). U ovom kontekstu, “dizajn” ili “jedinka” u populaciji algoritma nije samo skup hardverskih komponenti, već cjelovita konfiguracija sustava definirana vektorom ključnih parametara. Taj vektor odluke obuhvaća:

- **Veličine ključnih komponenti:** kapacitet baterijskog spremnika energije (kWh), nazivna snaga glavnog pogonskog motora (kW) i maksimalna snaga pomoćnog dizelskog generatora (kW).
- **Strateške operativne parametre:** Ovi parametri definiraju dugoročnu filozofiju korištenja energije, kao što su ciljano stanje napunjenosti baterije (SOC) na kraju dana, agresivnost korištenja baterije (definirana C-stopom), ili stanje konstantnog SOC-a u Charge Sustaining strategijama.

Parametri korišteni u ovom istraživanju će biti dodatno pojašnjeni u nastavku.

Algoritam NSGA-II iterativno generira populacije ovih vektora dizajna, koristeći genetske operatore (selekciju, križanje i mutaciju) kako bi stvorio nove, potencijalno superiorne konfiguracije. Međutim, da bi algoritam mogao procijeniti “kvalitetu” ili podobnost (engl. *fitness*) bilo kojeg predloženog dizajna, on ga mora proslijediti na niži stupanj na detaljnu evaluaciju.



Slika 5.5: Dijagram toka višeg stupnja optimizacije

Prikazani dijagram na slici 5.5 detaljno prikazuje arhitekturu višeg stupnja optimizacije korištenog u ovom istraživanju. Glavna optimizacijska petlja započinje inicijalizacijom prve populacije jedinki, nakon čega slijedi njihova evaluacija. Ključni korak je u bloku "Evaluacija svake jedinke", unutar kojeg se za svaki pojedini dizajn poziva niži stupanj optimizacije.

Niži stupanj (plavi blok) provodi detaljnu višegodišnju simulaciju rada sustava, koristeći višegodišnji profil opterećenja kao temeljni ulaz. Rezultat simulacije su izračunate vrijednosti funkcija cilja koje se vraćaju u NSGA-II petlju. Ove vrijednosti služe kao mjera kvalitete dizajna i usmjeravaju proces selekcije za iduću generaciju.

Ciklus se ponavlja sve dok nije zadovoljen kriterij zaustavljanja (npr. maksimalan broj generacija), nakon čega algoritam kao konačni rezultat daje Pareto skup optimalnih, kompromisnih dizajna sustava.

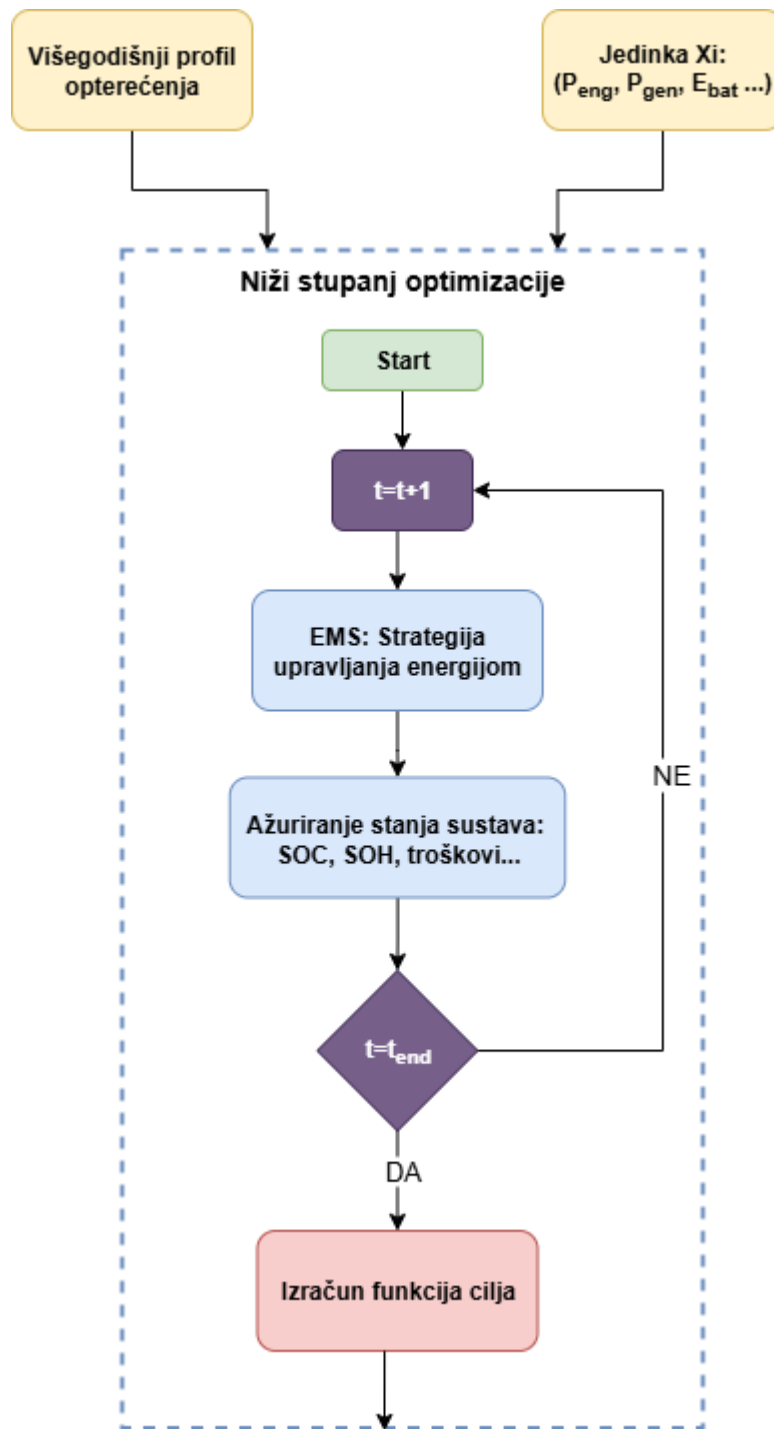
5.3.2 Niži stupanj: Evaluacija performansi kroz simulaciju životnog ciklusa

Niži stupanj djeluje kao funkcija za evaluaciju. Njzin je jedini zadatak primiti jedan specifičan dizajn sustava od vanjske razine i vratiti sveobuhvatnu ocjenu njegovih performansi tijekom cijelog životnog vijeka. Ova se evaluacija ne temelji na pojednostavljenim analitičkim modelima, već na detaljnoj, dinamičkoj simulaciji rada sustava korak-po-korak na prethodno generiranom višegodišnjem profilu opterećenja.

Za svaki evaluirani dizajn, simulacija se odvija na sljedeći način:

1. Virtualno se "izgrađuje" hibridni sustav s komponentama točno definiranih veličina i karakteristika.
2. Pokreće se simulacija koja prolazi kroz višegodišnji profil opterećenja u diskretnim vremenskim koracima (dt).
3. U svakom vremenskom koraku, strategija upravljanja energijom (EMS), temeljena na principu ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS), donosi operativnu odluku: kako raspodijeliti traženu snagu između glavnog motora, generatora i baterijskog sustava kako bi se minimizirala trenutna ekvivalentna potrošnja.
4. Tijekom cijele simulacije bilježe se sve ključne metrike: potrošnja goriva, utrošena električna energija s kopnene mreže, broj pokretanja glavnih i pomoćnih motora, radni sati, te degradacija baterije i ostalih komponenti.

Nakon završetka simulacije cjelokupnog životnog vijeka, akumulirani podaci se obrađuju kako bi se izračunale konačne vrijednosti triju funkcija cilja: ukupni trošak životnog ciklusa (LCC), ukupna potrošnja goriva i kompozitni indeks degradacije. Dijagram toka opisanog postupka je prikazan na slici 5.6.



Slika 5.6: Dijagram toka nižeg stupnja optimizacije

5.3.3 Interakcija između stupnjeva optimizacije i tijek informacija

Najveća prednost i snaga dvostupanjskog pristupa leži u neprestanoj interakciji između razina. Tijek procesa je sljedeći:

1. **Prijedlog:** NSGA-II (viši stupanj) stvara populaciju različitih dizajna sustava.
2. **Evaluacija:** Svaki pojedini dizajn iz populacije šalje se na unutarnju razinu, gdje se za njega provodi potpuna simulacija životnog ciklusa.
3. **Povratna veza:** Unutarnja razina vraća vanjskoj razini rezultate simulacije u obliku vektora s vrijednostima funkcija cilja (npr., [LCC, Gorivo, Degradacija]).
4. **Evolucija:** NSGA-II koristi primljene ocjene kako bi rangirao jedinke u populaciji i, primjenom genetskih operatora, stvorio novu, napredniju generaciju dizajna.

Ovaj se ciklus ponavlja stotinama puta, omogućujući sustavu konvergira prema skupu rješenja koja predstavljaju najbolji mogući kompromis između zadanih ciljeva. Ovakav integrirani pristup osigurava da konačna, Pareto-optimalna rješenja nisu samo hardverski dobro dimenzionirana, već su optimalna upravo zato što je njihova evaluacija od samog početka uzela u obzir kako će se njima dinamički upravljati u realnim i promjenjivim uvjetima eksploatacije.

5.4 Genetski algoritam

Za vanjsku, stratešku razinu dvostupanjske optimizacije, zaduženu za dimenzioniranje sustava, odabran je Nerangirani Sortirajući Genetski Algoritam II (NSGA-II). Izbor ovog algoritma nije slučajan; NSGA-II je jedan od najpriznatijih i najčešće korištenih višeciljnih evolucijskih algoritama, a njegove karakteristike ga čine izuzetno prikladnim za rješavanje složenih inženjerskih problema poput ovog.

Ključne prednosti NSGA-II koje su bile presudne za njegov odabir su:

1. **Višeciljnost:** Algoritam je fundamentalno dizajniran za istovremenu optimizaciju više konfliktnih funkcija cilja bez potrebe za njihovim agregiranjem u jednu vrijednost pomoću proizvoljnih pondera.
2. **Pronalaženje Pareto-optimalnog skupa:** Cilj algoritma nije pronaći jedno, singularno rješenje, već čitav skup Pareto-optimalnih rješenja. Ovaj skup dizajneru pruža uvid u kompromise između ciljeva, omogućujući informiran odabir konačnog rješenja koje najbolje odgovara specifičnim projektnim zahtjevima.
3. **Elitizam:** NSGA-II koristi mehanizam elitizma koji osigurava da najbolja rješenja pronađena u prethodnim generacijama ne budu izgubljena, već se prenose u sljedeće, čime se jamči konvergencija prema boljim rješenjima.
4. **Održavanje raznolikosti:** Ugrađeni mehanizam gustoće udaljenosti potiče ravnomjernu raspodjelu rješenja duž Pareto-fronte, sprječavajući preuranjenu konvergenciju algoritma u samo jednom uskom dijelu prostora rješenja.

5.4.1 Definicija jedinke i prostora dizajna

Da bi genetski algoritam mogao operirati, potencijalno rješenje problema mora biti enkodirano u strukturu koju algoritam razumije – jedinku ili kromosom. U ovom radu, jedinka je definirana kao vektor realnih brojeva, gdje svaki element vektora, ili gen, predstavlja jedan specifičan parametar dizajna sustava. Ovisno o odabranoj dugoročnoj strategiji upravljanja energijom, kromosom je definiran na sljedeći način:

- **Za strategiju održavanja konstantnog SOC-a (Charge Sustaining-CS):**

$$X_{CS} = [E_{batt}, P_{ice}, P_{gen}, C_{rate}, SOC_{cs}, F_{hys}]$$

- **Za strategiju pražnjenja SOC-a (Charge Depleting - CD):**

$$X_{CD} = [E_{batt}, P_{ice}, P_{gen}, C_{rate}, SOC_{end}, F_{hys}]$$

gdje geni predstavljaju:

- E_{batt} : Nominalni kapacitet baterijskog spremnika energije (u kWh).
- P_{ice} : Maksimalna snaga glavnog porivnog motora s unutarnjim izgaranjem (u kW).
- P_{gen} : Maksimalna snaga pomoćnog dizelskog generatora (u kW).
- C_{rate} : Osnovni C-faktor, koji definira nominalnu brzinu punjenja/pražnjenja baterije i utječe na njezino opterećenje.
- SOC_{cs} : Ciljana razina stanja napunjenosti koju sustav nastoji održavati u CS strategiji.
- SOC_{end} : Ciljana konačna razina SOC-a na kraju operativnog dana u CD strategiji.
- F_{hys} : Faktor histereze SOC trajektorije, koji utječe koliko PI kontroler može odstupati od referentne SOC trajektorije

Za svaki od ovih gena definiran je raspon dozvoljenih vrijednosti (donja i gornja granica), čime se prostor mogućih dizajna ograničava na fizikalno smislene i tehnički izvedive konfiguracije.

5.4.2 Ključni mehanizmi i genetski operatori

Rad algoritma temelji se na iterativnom poboljšavanju populacije jedinki kroz primjenu genetskih operatora.

1. **Selekcija:** Odabir “roditeljskih” jedinki za stvaranje sljedeće generacije temelji se na dva kriterija. Primarni kriterij je rang nedominiranosti – jedinke koje se nalaze na boljoj Pareto-fronti imaju prednost. Sekundarni kriterij, koji se koristi za odabir između jedinki istog ranga, jest gustoća udaljenosti. Prednost se daje jedinkama koje se nalaze u rjeđe naseljenim dijelovima fronte, čime se osigurava raznolikost rješenja.
2. **Križanje:** Za stvaranje novih jedinki (“potomaka”) iz odabranih roditelja koristi se operator Simuliranog Binarnog Križanja (SBX). Ovaj je operator posebno pogodan za rad s realnim brojevima jer omogućuje stvaranje potomaka u okolini roditelja, pri čemu distribucija potomaka ovisi o upravljačkom parametru η_c .
3. **Mutacija:** Na svakoj novostvorenoj jedinki primjenjuje se Polinomijalna Mutacija (PM). Svrha mutacije je uvođenje malih, slučajnih promjena u gene jedinke, čime se održava genetska raznolikost u populaciji i sprječava da algoritam “zaglavi” u lokalnom optimumu. Intenzitet promjene kontrolira se parametrom η_m .

Cjelokupni proces započinje generiranjem slučajne početne populacije dizajna. Svaki se dizajn evaluira pomoću simulacije na unutarnjoj razini. Potom se, kroz uzastopne cikluse selekcije, križanja i mutacije, stvara niz novih generacija, od kojih je svaka u prosjeku bolja od prethodne. Proces se zaustavlja nakon unaprijed definiranog broja generacija, a konačni rezultat jest skup nedominiranih rješenja iz posljednje populacije – tražena Pareto-optimalna fronta.

5.5 Funkcije cilja za evaluaciju sustava

Kako bi genetski algoritam, opisan u prethodnom poglavlju, mogao učinkovito voditi proces evolucije prema superiornim rješenjima, nužno je uspostaviti jasan i kvantitativan sustav za vrednovanje performansi svake pojedine konfiguracije sustava. Tu ulogu preuzimaju funkcije cilja. One prevode složene, višegodišnje rezultate simulacije u koncizan skup numeričkih vrijednosti koje algoritam može izravno uspoređivati i rangirati.

Evaluacija kompleksnog sustava kao što je brodski hibridni pogon višedimenzionalan je problem. Fokusiranje na samo jedan aspekt, primjerice minimizaciju početne investicije, gotovo bi sigurno dovelo do rješenja s visokom potrošnjom goriva i ubrzanom degradacijom. S druge strane, isključiva optimizacija energetske učinkovitosti mogla bi zahtijevati preskup i predimenzioniran sustav. Stoga je za dobivanje cjelovitih i praktično primjenjivih rješenja neophodan višeciljni pristup.

U skladu s time, ova metodologija temelji se na istovremenoj minimizaciji tri ključne, često konfliktne, metrike performansi koje zajedno pružaju holističku sliku o kvaliteti pojedinog dizajna. Tri funkcije cilja su:

1. **Ekonomska funkcija cilja: Trošak životnog ciklusa (LCC).** Ovo je primarni ekonomski pokazatelj koji obuhvaća cjelokupne financijske implikacije pojedinog dizajna. LCC nadilazi početne investicijske troškove (CAPEX) te uključuje sve operativne troškove (OPEX) – poput goriva, održavanja, električne energije s kopna i troškova zamjene komponenti – nastale tijekom cijelog životnog vijeka sustava, diskontirane na njihovu sadašnju vrijednost.
2. **Tehnička funkcija cilja: Kompozitni indeks degradacije.** Kako bi se kvantificirala dugoročna pouzdanost i sustava, uveden je ovaj inovativni indeks. Umjesto da promatra samo degradaciju jedne komponente, poput baterije, ovaj kompozitni pokazatelj agregira ključne metrike starenja za sve glavne komponente sustava: broj i sate rada motora i generatora, kao i broj ciklusa, gubitak kapaciteta i broj zamjena baterijskog spremnika. Time se potiču rješenja koja inteligentno raspoređuju opterećenje kako bi se produljio životni vijek cijelog sustava.
3. **Energetsko-ekološka funkcija cilja: Ukupna potrošnja goriva.** Ova funkcija cilja predstavlja izravnu mjeru energetske učinkovitosti sustava. Minimizacija ukupne potrošnje fosilnih goriva tijekom životnog ciklusa u direktnoj je korelaciji sa smanjenjem emisija stakleničkih plinova (CO_2) i ostalih štetnih ispušnih plinova, čime ovaj cilj postaje i ključni pokazatelj ekološkog otiska plovila

U nastavku ovog poglavlja, svaka od navedene tri funkcije cilja bit će detaljno matematički i konceptualno razrađena, s jasnim opisom svih ulaznih parametara i logike izračuna.

5.5.1 Trošak životnog ciklusa

Prva i fundamentalna funkcija cilja u ovom optimizacijskom okviru jest trošak životnog ciklusa (LCC). LCC predstavlja sveobuhvatnu ekonomsku mjeru koja kvantificira ukupne troškove povezane s određenom konfiguracijom hibridnog sustava, od trenutka nabave do kraja njegovog predviđenog životnog vijeka. Cilj je minimizirati ovu vrijednost. Ovakav pristup nadilazi pojednostavljenu analizu početnih investicijskih troškova te pruža holističku financijsku sliku, omogućujući realističnu usporedbu različitih dizajnerskih filozofija. Većina parametara potrebnih za izračun pojedinih stavki je preuzeto iz rada [173].

Ukupni LCC izračunava se kao zbroj početnih investicijskih troškova (CAPEX) i ukupnih diskontiranih operativnih troškova (OPEX) koji nastaju tijekom životnog vijeka sustava (Y):

$$LCC = C_{CAPEX} + C_{OPEX,diskontirani} \quad (5.8)$$

1. Investicijski troškovi

CAPEX (*engl. Capital Expenditures*, CAPEX) obuhvaća sve jednokratne troškove potrebne za nabavu i instalaciju komponenti hibridnog energetskog sustava. Ukupni CAPEX sastoji se od zbroja cijena pojedinih komponenti i dodatnog troška instalacije, koji se modelira kao postotak (f_{inst}) ukupne cijene hardvera:

$$C_{CAPEX} = (1 + f_{inst}) \cdot (C_{ice} + C_{gen} + C_{batt} + C_{em} + C_{conv}) \quad (5.9)$$

Troškovi pojedinih komponenti izračunavaju se na temelju njihove snage ili energetskog kapaciteta, pomnoženih s odgovarajućom jediničnom cijenom c_i :

1. **Glavni motor:** $C_{ice} = c_{ice} \cdot P_{ice}$
2. **Pomoćni generator:** $C_{gen} = c_{gen} \cdot P_{gen}$
3. **Baterijski sustav:** $C_{batt} = c_{batt}(y = 1) \cdot E_{batt}$
4. **Električni motor/generator:** $C_{em} = c_{em} \cdot P_{em}$
5. **Energetska elektronika:** $C_{conv} = c_{conv} \cdot (P_{ice} + P_{gen} + P_{em})$

Važno je napomenuti da se za početnu investiciju koristi jedinična cijena baterije u prvoj godini životnog ciklusa ($y = 1$).

2. Operativni troškovi

OPEX (*engl. Operational Expenditures*, OPEX) predstavlja sve troškove koji nastaju tijekom eksploatacije sustava. Ključna značajka ovog modela je korištenje dinamičkih cijena koje se mijenjaju tijekom godina, što odražava realne tržišne projekcije. Kako bi se budući troškovi mogli uspoređivati s današnjim, oni se svode na sadašnju vrijednost primjenom diskontne stope (r). Ukupni diskontirani OPEX računa se kao suma godišnjih operativnih troškova:

$$C_{OPEX,diskontirani} = \sum_{y=1}^Y \frac{C_{OPEX,y}}{(1 + r)^y} \quad (5.10)$$

Ukupni operativni trošak za pojedinu godinu y ($C_{OPEX,y}$) zbroj je sljedećih stavki:

$$C_{OPEX,y} = C_{gorivo,y} + C_{kopno,y} + C_{odr\dot{z},y} + C_{zamj,y} \quad (5.11)$$

Svaka od ovih stavki definirana je na sljedeći način:

1. **Trošak goriva ($C_{gorivo,y}$):** Umnožak godišnje potrošnje goriva ($m_{gorivo,y}$), dobivene iz simulacije, i projicirane cijene goriva za tu godinu ($c_{gorivo}(y)$).
2. **Trošak energije s kopna ($C_{kopno,y}$):** Umnožak ukupne energije preuzete s kopnene mreže za punjenje baterija ($E_{kopno,y}$) i projicirane cijene električne energije za tu godinu ($c_{kopno}(y)$).
3. **Trošak održavanja ($C_{odr\dot{z},y}$):** Godišnji trošak koji se modelira kao postotak početne investicijske cijene (CAPEX) pojedinih komponenti.

4. **Trošak zamjene ($C_{zamj,y}$):** Ovaj trošak je jednak nuli osim u onim godinama kada simulacija pokaže da je stanje ispravnosti baterije (SOH) palo ispod definiranog praga, što aktivira zamjenu. Trošak zamjene jednak je umnošku kapaciteta baterije (E_{batt}) i dinamičke cijene baterije u godini zamjene ($c_{batt}(y)$).

Trošak održavanja ($C_{odr\dot{z},y}$)

Trošak održavanja obuhvaća sve redovne godišnje izdatke potrebne za osiguravanje pouzdanosti, sigurnosti i optimalnog rada hibridnog energetskog sustava. U ovom modelu, trošak održavanja je definiran kao fiksni godišnji iznos koji ovisi o veličini i vrijednosti instaliranih komponenti. Pristup modeliranju razlikuje se za motore s unutarnjim izgaranjem i za baterijski sustav, odražavajući različitu prirodu njihovog održavanja.

Ukupni godišnji trošak održavanja ($C_{odr\dot{z},y}$) računa se kao zbroj troškova održavanja za pojedine komponente:

$$C_{odr\dot{z},y} = C_{odr\dot{z},ice} + C_{odr\dot{z},gen} + C_{odr\dot{z},batt} \quad (5.12)$$

gdje su pojedine stavke definirane na sljedeći način:

- **Održavanje glavnog motora i generatora:** Za motore s unutarnjim izgaranjem (glavni pogonski motor i pomoćni generator), godišnji trošak održavanja modelira se kao postotak njihove početne investicijske vrijednosti (CAPEX). Jednadžbe su:

$$C_{odr\dot{z},ice} = f_{odr\dot{z},ice/gen} \cdot C_{ice} \quad (5.13)$$

$$C_{odr\dot{z},gen} = f_{odr\dot{z},ice/gen} \cdot C_{gen} \quad (5.14)$$

gdje je $f_{odr\dot{z},ice/gen}$ godišnji faktor troška održavanja (npr. 3 %), a C_{ice} i C_{gen} su početni kapitalni troškovi tih komponenti.

- **Održavanje baterijskog sustava:** Za razliku od motora, održavanje baterijskog sustava se ne modelira prema njegovoj početnoj cijeni, već prema njegovoj maksimalnoj snazi pražnjenja (P_{batt}). To je zato što održavanje baterija primarno uključuje sustave za termalno upravljanje, nadzorne sustave (BMS) i energetsku elektroniku, čija kompleksnost i troškovi više ovise o snazi koju mogu isporučiti nego o ukupnom energetskom kapacitetu. Stoga se trošak računa kao:

$$C_{odr\dot{z},batt} = c_{odr\dot{z},batt} \cdot P_{batt} \quad (5.15)$$

gdje je $c_{odr\dot{z},batt}$ specifični trošak održavanja izražen u valuti po kilovatu snage na godišnjoj razini.

Trošak zamjene ($C_{zamj,y}$)

Trošak zamjene je specifičan, jednokratni trošak koji se u ovom modelu odnosi isključivo na baterijski sustav. Baterije su, zbog svoje elektrokemijske prirode, komponenta s najizraženijom degradacijom i ograničenim životnim vijekom. Ovaj trošak nije fiksni godišnji izdatak, već uvjetni trošak koji se aktivira samo u onoj godini kada simulirani rad sustava dovede do pada stanja ispravnosti baterije (SOH) ispod unaprijed definirane granične vrijednosti (SOH_{EOL}), koja se tipično postavlja na 80 %.

Mehanizam aktivacije i izračun troška definirani su na sljedeći način:

$$C_{zamj,y} = \begin{cases} c_{batt,y} \cdot E_{batt}, & \text{ako je } SOH_y < SOH_{EOL} \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.16)$$

gdje je:

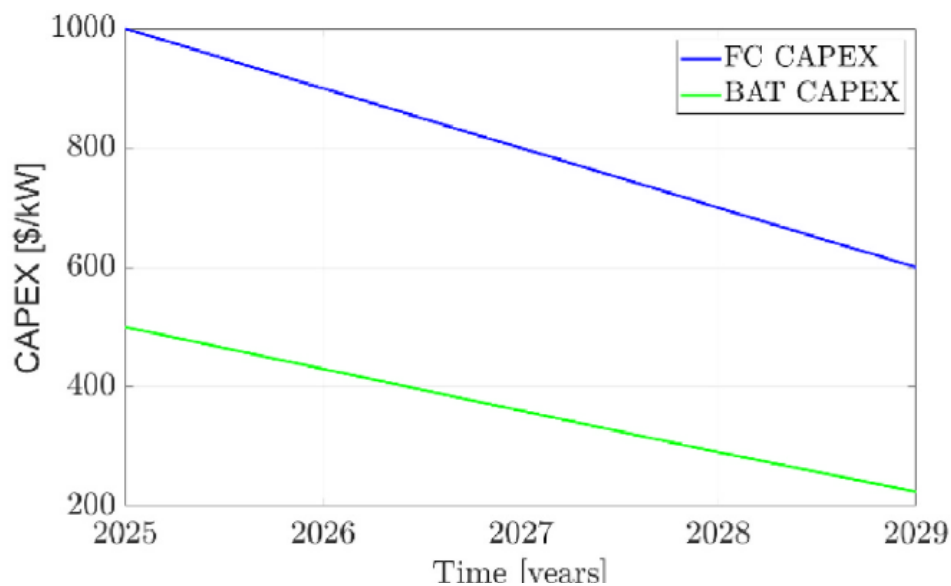
- SOH_y stanje ispravnosti baterije na kraju godine y , dobiveno iz detaljne simulacije degradacije.
- SOH_{EOL} granična vrijednost stanja ispravnosti (npr. 0.8).
- E_{batt} je nazivni energetska kapacitet baterijskog sustava (u kWh).
- $c_{batt,y}$ je dinamička, projicirana jedinična cijena baterija (u \$/kWh) za specifičnu godinu y u kojoj se zamjena događa.

Ovakav način modeliranja je od iznimne važnosti jer direktno povezuje operativnu strategiju s dugoročnim ekonomskim posljedicama. Upravljačka strategija koja agresivno koristi bateriju, uzrokujući bržu degradaciju, rezultirat će ranijom aktivacijom ovog značajnog troška, što će drastično povećati ukupni LCC. Time optimizator dobiva snažan poticaj da pronađe rješenja koja ne samo da štede gorivo, već i čuvaju životni vijek baterije.

Varijabilne cijene komponenata

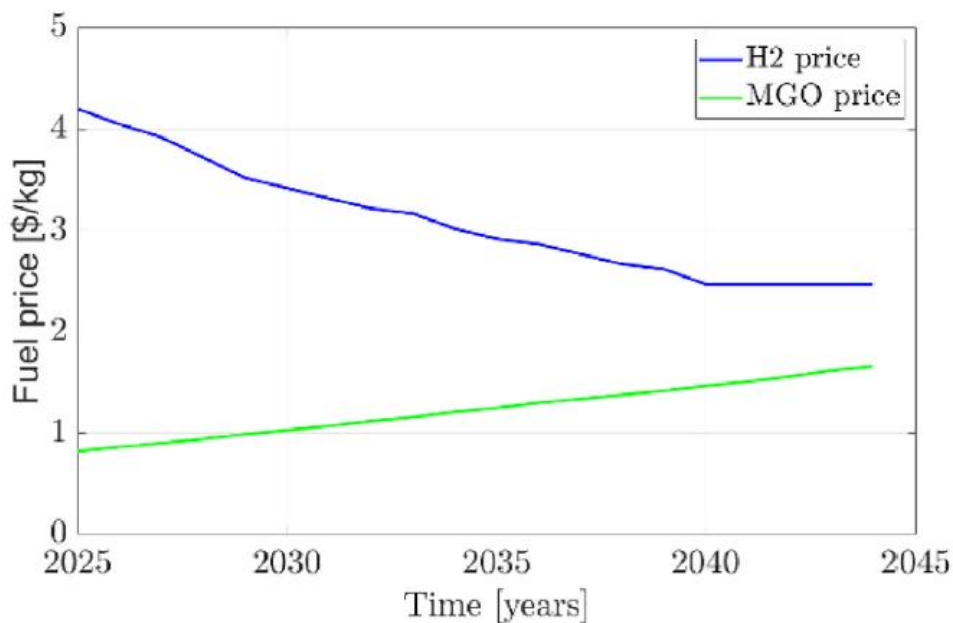
Jedna od ključnih prednosti ovog LCC modela jest napuštanje statičkog pristupa i usvajanje dinamičkih, vremenski promjenjivih cijena za ključne komponente i energente. Korištenje fiksnih cijena za cijeli životni vijek sustava od 10 ili više godina dovelo bi do nerealnih i potencijalno pogrešnih zaključaka. Tržišni trendovi, tehnološki napredak i regulative značajno utječu na cijene, a njihovo uključivanje u model ključno je za donošenje robusnih i dugoročno ispravnih odluka. U skladu s projekcijama iz relevantne literature, ovaj model implementira dva suprotstavljena, ali fundamentalna trenda:

- **Projekcija pada cijene baterija:** Model pretpostavlja kontinuirani pad jedinične cijene baterijskog sustava ($c_{batt,y}$) tijekom godina. Kao što je vidljivo na slici 5.7, očekuje se značajno smanjenje kapitalnih troškova (CAPEX) za baterije. Ova pretpostavka ima izravan utjecaj na izračun troška zamjene ($C_{zamj,y}$). To znači da će zamjena baterijskog sustava u kasnijim godinama životnog ciklusa biti financijski manje opterećenje od početne investicije.



Slika 5.7: Projicirano smanjenje cijena baterija i gorivnih članaka do 2030. [173]

- **Projekcija rasta cijene goriva:** Istovremeno, model uzima u obzir očekivani rast cijene brodskog dizelskog goriva (MGO), kao što je prikazano na slici 5.8. Povećanje cijene $c_{gorivo,y}$ znači da će trošak goriva ($C_{gorivo,y}$) postajati sve dominantnija stavka u ukupnim operativnim troškovima (OPEX) kako plovilo stari. Ova projekcija snažno potiče optimizator da favorizira energetska efikasnija rješenja. Konfiguracije sustava i upravljačke strategije koje minimiziraju potrošnju goriva, čak i po cijenu većeg početnog CAPEX-a, pokazat će se dugoročno isplativijima upravo zbog ovog rastućeg troška.

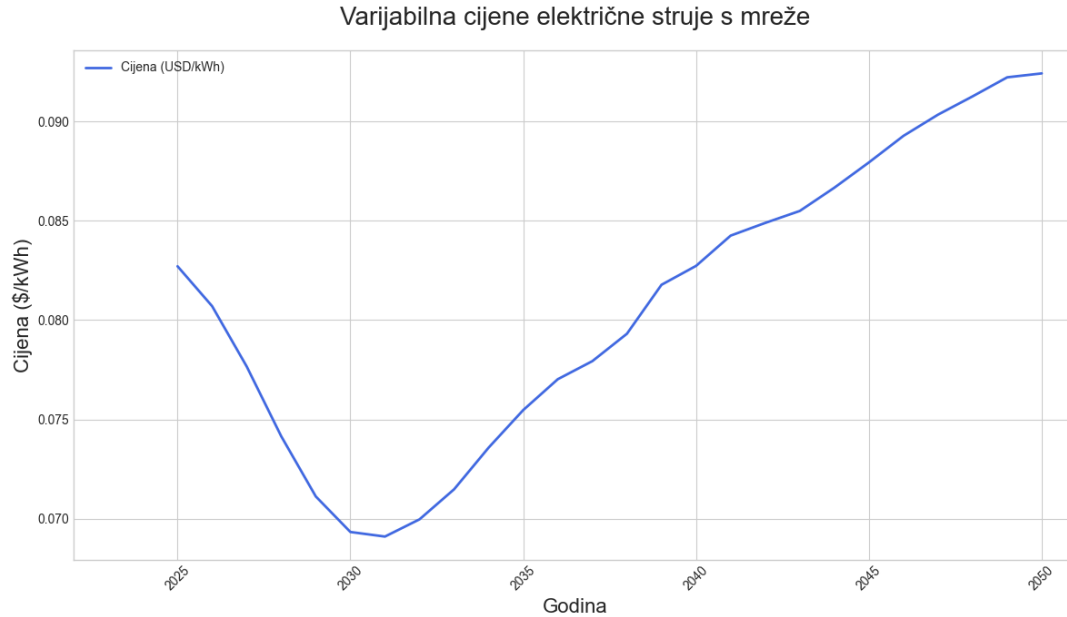


Slika 5.8: Projicirane cijene goriva i vodika prema DNV-u do 2045. god. [173]

- **Projekcija cijena električne energije s obale:** Ova projekcija, temeljena na tržišnim analizama, definira ključni parametar $c_{kopno,y}$, koji predstavlja očekivanu cijenu električne energije u godini y . Taj se parametar koristi za izračun godišnjeg troška punjenja baterija dok je plovilo u luci ($C_{kopno,y}$):

$$C_{kopno,y} = E_{kopno,y} \cdot c_{kopno,y} \quad (5.17)$$

gdje je $E_{kopno,y}$ ukupna energija (u kWh) preuzeta s mreže u godini y . Prikazani nelinearni trend na slici 5.9, s početnim padom i kasnijim dugoročnim rastom cijene, unosi dodatnu kompleksnost u optimizacijski problem, zahtijevajući od sustava da balansira između iskorištavanja jeftinije energije u početnim godinama i ublažavanja utjecaja njenog kasnijeg poskupljenja u odnosu na cijenu goriva.



Slika 5.9: Prikaz projekcije cijene električne energije u EU [173]

Ovi suprotstavljeni trendovi, pojeftinjenje tehnologije za pohranu energije, poskupljenje fosilnih goriva te nelinearno mijenjanje cijene električne energije, stvaraju dinamičku tenziju koja je u srži problema optimizacije hibridnih sustava. Model koji obuhvaća ove projekcije u stanju je identificirati rješenja koja su ne samo trenutno optimalna, već i ekonomski otporna na buduće tržišne promjene, čime se jača argument za hibridizaciju kao strateško dugoročno rješenje.

3. Parametri ekonomskog modela

Tablica ispod pruža pregled svih parametara korištenih u LCC modelu, njihov opis i jedinice.

Tablica 5.1: Prikaz svih parametara korištenih u LCC modelu

Parametar	Opis	Jedinica	Vrijednost
Varijable dizajna			
P_{ice}	Maksimalna snaga glavnog propulzijskog motora	kW	Varirajuća
P_{gen}	Maksimalna snaga pomoćnog dizelskog generatora	kW	Varirajuća
E_{batt}	Nominalni kapacitet baterijskog spremnika energije	kWh	Varirajuća
P_{em}	Maksimalna snaga električnog motora/generatora	kW	Varirajuća
Fiksni parametri			
c_{ice}	Jedinična cijena glavnog motora	\$/kW	300
c_{gen}	Jedinična cijena pomoćnog generatora	\$/kW	350
c_{em}	Jedinična cijena električnog motora/generatora	\$/kW	134
c_{conv}	Jedinična cijena energetske elektronike (pretvarača)	\$/kW	216
f_{inst}	Faktor troška instalacije (postotak cijene komponenti)	%	25
Y	Simulirano vrijeme	godine	10

Parametar	Opis	Jedinica	Vrijednost
r	Godišnja diskontna stopa	%	5
$f_{odr,ice/gen}$	Godišnji faktor troška održavanja motora/generatora (postotak od $C_{ice/gen}$)	%/god.	3
Dinamički parametri			
$c_{batt}(y)$	Projicirana jedinična cijena baterijskog sustava u godini y	\$/kWh	Varirajuća
$c_{gorivo}(y)$	Projicirana cijena dizelskog goriva u godini y	\$/kg	Varirajuća
$c_{kopno}(y)$	Projicirana cijena električne energije s kopna u godini y	\$/Wh	Varirajuća

5.5.2 Kompozitni indeks degradacije

Dok su LCC i potrošnja goriva klasične i nezaobilazne metrike performansi, one ne daju potpunu sliku o dugoročnoj održivosti i pouzdanosti sustava. Strategija upravljanja energijom koja je ekonomski optimalna na kratki rok može dovesti do prekomjernog opterećenja i ubranog starenja ključnih komponenti. Primjerice, strategija koja minimizira rad dizelskih motora može se oslanjati na duboke i brze cikluse pražnjenja baterije, dok strategija koja “čuva” bateriju može zahtijevati vrlo česta paljenja i gašenja motora, uzrokujući njihovo termalno i mehaničko trošenje.

Kako bi se kvantificirali ovi složeni kompromisi, uvedena je druga funkcija cilja, kompozitni indeks degradacije (I_{DEG}). Svrha ovog indeksa jest pružiti jedinstvenu, holističku mjeru ukupnog degradacije cjelokupnog hibridnog sustava tijekom njegovog životnog vijeka. Umjesto promatranja samo jedne komponente, I_{DEG} agregira ključne pokazatelje starenja za sve glavne komponente sustava. Time se optimizacijski algoritam usmjerava prema pronalaženju rješenja koja ne samo da su ekonomična i učinkovita, već su i robusna i dugoročno pouzdana.

Izračun indeksa provodi se kroz metodološki slijed od tri koraka: praćenje metrika, normalizacija i ponderirana suma.

1. Praćenje metrika degradacije

Tijekom simulacije životnog ciklusa za svaku pojedinu konfiguraciju sustava, prikupljaju se kumulativni podaci o ključnim pokazateljima koji su u direktnoj korelaciji s fizičkim starenjem komponenti:

- **Baterijski sustav:**
 - **Broj zamjena (N_{zamj}):** Ukupan broj puta kada je baterijski sustav zamijenjen nakon što mu je stanje ispravnosti (SOH) palo ispod praga za kraj životnog vijeka.
 - **Gubitak stanja ispravnosti ($\Delta SOH_{krajnji}$):** Gubitak kapaciteta posljednjeg baterijskog sustava na kraju simulacije, izražen kao $1 - SOH_{krajnji}$.
 - **Broj ekvivalentnih ciklusa (N_{ciklus}):** Ukupan protok energije kroz bateriju, normaliziran na njezin nominalni kapacitet.
- **Glavni porivni motor (ICE):**
 - **Broj pokretanja ($N_{start,ice}$):** Ukupan broj ciklusa paljenja-gašenja motora.
 - **Radni sati ($H_{rad,ice}$):** Ukupno vrijeme rada motora.
- **Pomoćni generator (Genset):**
 - **Broj pokretanja ($N_{start,gen}$):** Ukupan broj ciklusa paljenja-gašenja generatora.
 - **Radni sati ($H_{rad,gen}$):** Ukupno vrijeme rada generatora.

2. Normalizacija metrika

Budući da praćene metrike imaju različite fizikalne jedinice i raspone vrijednosti (npr. “broj pokretanja” naspram “radnih sati”), nužno ih je svesti na zajedničku, bezdimenzijsku skalu prije sumacije. To se postiže normalizacijom, gdje se svaka izmjerena vrijednost preslikava na interval $[0,1]$. Vrijednost 0 predstavlja idealan ishod (nema degradacije), dok 1 predstavlja najgori očekivani ishod. Normalizacija se provodi prema jednadžbi:

$$m_{norm} = \frac{\max(m_{min}, \min(m_{akt}, m_{max})) - m_{min}}{m_{max} - m_{min}} \quad (5.18)$$

gdje je:

- m_{norm} – normalizirana vrijednost metrike.
- m_{akt} – stvarna vrijednost metrike dobivena simulacijom.
- m_{min} i m_{max} – unaprijed definirane donje i gornje granice koje predstavljaju očekivani raspon vrijednosti za svaku metriku tijekom životnog vijeka. Korištenje min i max funkcija osigurava da vrijednosti izvan očekivanog raspona budu zasićene na 0 ili 1.

3. Ponderirana sumacija

Nakon normalizacije, bezdimenzijske vrijednosti se kombiniraju u konačni indeks kroz proces ponderirane sumacije. Prvo se izračunavaju podindeksi degradacije za svaku komponentu, a zatim se oni spajaju u konačni I_{DEG} .

- **Pod-indeksi degradacije po komponentama ($D_{komponenta}$):**

$$D_{batt} = w_{zamj} \cdot N_{zamj,norm} + w_{SOH} \cdot \Delta SOH_{norm} + w_{ciklus} \cdot N_{ciklus,norm} \quad (5.19)$$

$$D_{ice} = w_{start,ice} \cdot N_{start,ice,norm} + w_{rad,ice} \cdot H_{rad,ice,norm} \quad (5.20)$$

$$D_{gen} = w_{start,gen} \cdot N_{start,gen,norm} + w_{rad,gen} \cdot H_{rad,gen,norm} \quad (5.21)$$

- **Konačni kompozitni indeks degradacije (I_{DEG}):**

$$I_{DEG} = W_{batt} \cdot D_{batt} + W_{ice} \cdot D_{ice} + W_{gen} \cdot D_{gen} \quad (5.22)$$

Ponderi (w i W) ključni su parametri modela koji definiraju relativnu važnost pojedinih mehanizama starenja i komponenti. Njihovim podešavanjem moguće je usmjeriti optimizaciju prema rješenjima koja favoriziraju dugovječnost određene komponente.

4. Parametri modela degradacije

Tablica ispod prikazuje sve parametre korištene za izračun indeksa degradacije, uključujući granice za normalizaciju i pondere.

Tablica 5.2: Prikaz svih parametara korištenih u modelu indeksa degradacije

Parametar	Opis	Vrijednost
Granice za normalizaciju		
$N_{zamj,min/max}$	Min/maks broj zamjena baterije	0 / 5
$\Delta SOH_{krajnji,min/max}$	Min/maks gubitak SOH-a	0 / 0.2
$N_{ciklus,min/max}$	Min/maks broj ciklusa baterije	0 / 50000
$N_{start,ice,min/max}$	Min/maks broj pokretanja gl. motora	0 / 15000
$H_{rad,ice,min/max}$	Min/maks radni sati gl. motora	0 / 30000
$N_{start,gen,min/max}$	Min/maks broj pokretanja generatora	0 / 15000

Parametar	Opis	Vrijednost
$H_{rad,gen,min/max}$	Min/maks radni sati generatora	0 / 20000
Ponderi (unutar komponente)		
$W_{zamj} / W_{SOH} / W_{ciklus}$	Ponderi za metriku baterije	0.5 / 0.1 / 0.4
$W_{start,ice} / W_{rad,ice}$	Ponderi za metriku gl. motora	0.7 / 0.3
$W_{start,gen} / W_{rad,gen}$	Ponderi za metriku generatora	0.7 / 0.3
Ponderi (među komponentama)		
$W_{batt} / W_{ice} / W_{gen}$	Glavni ponderi za komponente	0.45/0.30/ 0.25

Ponderi korišteni u izračunu indeksa degradacije predstavljaju ključne parametre koji usmjeravaju optimizacijski proces. Njihova uloga je prevesti kvalitativne ciljeve, poput “očuvanja opreme”, u precizne kvantitativne upute. Kroz hijerarhijsku strukturu ponderiranja, definira se i relativna štetnost pojedinih operativnih događaja, ali i strateški prioritet očuvanja svake ključne komponente sustava.

Definiranje prioriteta mehanizama degradacije unutar komponente

Na prvoj razini, ponderi unutar svake komponente određuju koji se mehanizmi trošenja smatraju najštetnijima.

- Za **baterijski sustav**, najveći ponder od 0.5 dodijeljen je samom događaju zamjene baterije. Time se optimizacija primarno usmjerava na izbjegavanje degradacije koja bi zahtijevala ovu skupu intervenciju. Značajan ponder od 0.4 dodijeljen je ukupnom broju ciklusa, čime se penaliziraju operativne strategije s čestim punjenjem i pražnjenjem. Nasuprot tome, manji ponder od 0.1 za konačni gubitak stanja ispravnosti (SOH) sugerira da je postupna, kontrolirana degradacija prihvatljivija sve dok ne dovodi do potrebe za zamjenom.
- Kod **glavnog motora i pomoćnog generatora**, ponderi su postavljeni tako da daju znatno veći značaj broju pokretanja (ponder 0.7) u odnosu na ukupan broj radnih sati (ponder 0.3). Ovakav odabir odražava inženjersko shvaćanje da su termalni i mehanički stresovi tijekom pokretanja motora znatno štetniji za njegov životni vijek od kontinuiranog rada. Stoga će algoritam favorizirati operativne profile koji smanjuju učestalost paljenja i gašenja motora.

Definiranje globalne strategije očuvanja sustava

Na drugoj, višoj razini, glavni ponderi definiraju hijerarhiju važnosti između samih komponenti, uspostavljajući time globalnu strategiju očuvanja sustava.

- Najviši prioritet, s ponderom od 0.45, dodijeljen je očuvanju baterijskog sustava. Ovo ga pozicionira kao najkritičniju komponentu čiji životni vijek treba maksimizirati.
- Slijedi glavni pogonski motor s ponderom od 0.30, dok je pomoćni generator pozicioniran kao komponenta s najnižim prioritetom očuvanja (ponder 0.25).

Ovakva raspodjela omogućuje optimizatoru donošenje informiranih odluka pri rješavanju konfliktnih situacija. Primjerice, algoritam može odabrati rješenje koje uključuje češće korištenje pomoćnog generatora (povećavajući time njegovu degradaciju) ako se time postiže značajno smanjenje broja ciklusa baterije ili se izbjegava nepovoljan režim rada glavnog motora. Time se svjesno žrtvuje komponenta nižeg prioriteta kako bi se osigurala dugovječnost ključnih i najskupljih dijelova sustava.

5.5.3 Ukupna potrošnja goriva

Treća i posljednja funkcija cilja, ukupna potrošnja goriva, predstavlja najizravniju mjeru energetske učinkovitosti i ekološkog utjecaja analiziranog hibridnog sustava. Iako je trošak goriva već sastavni dio LCC-a, izdvajanje ukupne potrošnje goriva kao zasebnog optimizacijskog cilja od fundamentalne je važnosti. Ono omogućuje optimizatoru da neovisno vrednuje i minimizira potrošnju fosilnih goriva, što je u izravnoj korelaciji sa smanjenjem emisija stakleničkih plinova (CO_2) i drugih štetnih produkata izgaranja. Ovaj cilj, stoga, ne samo da odražava operativnu efikasnost, već služi i kao ključni pokazatelj ekološke prihvatljivosti rješenja.

Metoda izračuna ukupne potrošnje detaljno je pojašnjena u poglavlju 3.2.

5.6 Zaključak

U ovom je poglavlju detaljno izložen cjeloviti metodološki okvir za integrirano dimenzioniranje i upravljanje energijom brodskog hibridnog energetskog sustava. Prikazana metodologija sustavno pristupa rješavanju ovog složenog problema kroz nekoliko ključnih, međusobno povezanih koraka.

Kao temelj za realističnu analizu, prvo je opisan postupak konstrukcije dinamičkog, višegodišnjeg profila opterećenja. Pokazano je kako se, polazeći od modela dnevnog ciklusa utemeljenog na stvarnim mjerenjima, uvođenjem sezonskih i stohastičkih varijacija stvara robustan operativni scenarij koji služi kao vjerodostojan testni poligon za svaku potencijalnu konfiguraciju sustava.

Nadalje, predstavljen je središnji dio okvira, koncept dvostupanjske optimizacije. Objašnjeno je kako ovaj hijerarhijski pristup, koji spaja vanjsku razinu dimenzioniranja vođenu genetskim algoritmom NSGA-II s unutarnjom razinom detaljne simulacije životnog ciklusa, omogućuje istovremeno rješavanje strateškog problema dizajna i operativnog problema upravljanja energijom.

Konačno, kako bi se osigurala holistička evaluacija, definirane su tri ključne funkcije cilja: trošak životnog ciklusa (LCC), ukupna potrošnja goriva i kompozitni indeks degradacije. Kroz njihovu minimizaciju, metodologija omogućuje pronalaženje rješenja koja ne predstavljaju samo jedan, singularni optimum, već čitav spektar Pareto-optimalnih rješenja. Svako od tih rješenja nudi jedinstveni kompromis između ekonomskih, ekoloških i tehničkih performansi.

Sintezom ovih elemenata stvoren je moćan simulacijski i optimizacijski alat, sposoban za dubinsku analizu i identifikaciju superiornih dizajna hibridnih sustava.

U poglavlju koje slijedi, predstaviti će se i detaljno analizirati rezultati dobiveni primjenom opisane metodologije. Prikazat će se dobivene Pareto-optimalne fronte koje vizualiziraju odnose i kompromise između definiranih ciljeva. Posebna pažnja posvetit će se analizi nekoliko karakterističnih, nedominiranih rješenja s fronte. Kroz njihovu detaljnu usporedbu, istražiti će se ključni principi i zakonitosti koje upravljaju dizajnom i radom optimalnih brodskih hibridnih energetskih sustava.

6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Ovo poglavlje predstavlja sveobuhvatnu analizu rezultata dobivenih primjenom razvijenog okvira za integrirano dimenzioniranje i upravljanje energijom brodskog hibridnog energetskeg sustava. Korištenjem višeciljnog genetskog algoritma NSGA-II, provedena je optimizacija s ciljem istovremene minimizacije tri ključna cilja: troška životnog ciklusa (LCC), ukupne potrošnje goriva i indeksa degradacije komponenti. Kako bi se osigurala realističnost i relevantnost rezultata, optimizacija je provedena na temelju detaljnog, sintetički generiranog višegodišnjeg profila opterećenja koji simulira rad broda u periodu od 10 godina. Profil opterećenja, generiran s vremenskim korakom od 60 sekundi, osmišljen je tako da obuhvati širok spektar operativnih uvjeta, uključujući determinističke i stohastičke elemente.

Osnovni dnevni operativni ciklus sastoji se od tri povratna putovanja, pri čemu svako jednosmjerno putovanje traje 1 sat i 15 min, s pauzom od 45 min u luci između putovanja. Osnovna snaga tokom plovidbe konstantom brzinom iznosi 800 kW, dok je osnovna snaga potrebna za manevriranje 500 kW s amplitudama od 300 kW. Na ovu osnovnu strukturu dodane su sljedeće varijacije kako bi se postigla što veća podudarnost sa stvarnim uvjetima:

- **Sezonske varijacije:** Broj dnevnih povratnih putovanja varira između 3 i 5 ovisno o dobu godine, simulirajući tako veći intenzitet rada tijekom ljetne sezone. Slično tome, snaga tokom plovidbe i hotelsko opterećenje (bazno 50 kW) također variraju sezonski, odražavajući utjecaj vremenskih uvjeta i potreba za grijanjem i klimatizacijom.
- **Stohastičke varijacije:** U model su uključeni i nasumični elementi. Snaga tokom plovidbe konstantom brzinom svakodnevno varira unutar ± 50 kW kako bi se simulirale promjene u stanju mora i vjetra. Dodatno, s vjerojatnošću od 10 %, simuliraju se dani s lošim vremenskim uvjetima, što rezultira produljenim i intenzivnijim periodima manevriranja.

Ovakav pristup osigurava da optimizirana rješenja budu robusna i učinkovita kroz razmatrano životno razdoblje broda. Životni vijek baterije je definiran kada stanje ispravnosti (SOH) baterije padne ispod 80 %. Svi tehno-ekonomski proračuni temelje se na parametrima troškova i modelima degradacije detaljno opisanim u prethodnim poglavljima, a njihove vrijednosti su navedene u Tablici 5.1 i Tablici 5.2.

Glavni dio ovog poglavlja posvećen je detaljnoj analizi Pareto fronti dobivenih za tri različita operativna scenarija, odnosno tri različite makro-strategije korištenja baterijskog sustava:

1. **Slučaj 1: Strategija pražnjenja bez dnevnog punjenja (Charge Depleting - CD-1):** Ovaj scenarij istražuje mogućnosti značajnijeg korištenja energije pohranjene u bateriji. Strategija dopušta da se baterija tijekom operativnog dana prazni, a zatim se u potpunosti puni tijekom noći korištenjem električne energije s kopna. Dnevna punjenja nisu predviđena. Parametri dizajna su $X_{CD} = [E_{batt}, P_{ice}, P_{gen}, C_{rate}, SOC_{end}, F_{hys}]$, a pobliže su objašnjeni u poglavlju 5.4.1.
2. **Slučaj 2: Strategija pražnjenja s dnevnim punjenjem (Charge Depleting - CD-2):** Predstavlja najnapredniji operativni scenarij koji, uz noćno punjenje, uključuje i jedno kraće punjenje tijekom operativnog dana (npr., za vrijeme dužeg boravka u luci). Ovaj pristup omogućuje potencijalno korištenje manjih baterija ili agresivnije pražnjenje, ali uvodi dodatnu ovisnost o infrastrukturi. Parametri dizajna su isti kao i kod slučaja 1.

3. **Slučaj 3: Strategija održavanja konstantnog stanja napunjenosti (Charge Sustaining - CS):** U ovom scenariju, sustav je optimiziran pod pretpostavkom da baterija služi primarno kao jedinica za optimizaciju rada motora (za tzv. "peak shaving" i "load leveling"). Cilj upravljačke strategije je održavati stanje napunjenosti (SOC) baterije oko konstantne, unaprijed zadane vrijednosti. Brod u ovom slučaju ne ovisi o vanjskoj infrastrukturi za punjenje. Parametri dizajna su $X_{CS} = [E_{batt}, P_{ice}, P_{gen}, C_{rate}, SOC_{cs}, F_{hys}]$, a pobliže su objašnjeni u poglavlju 5.4.1.

Gornje i donje granice svakog parametra dizajna je navedena u tablicama 6.1 i 6.2.

Tablica 6.1: Granice za pojedine parametre dizajna za CS slučaj

Parametar	Donja granica	Gornja granica
E_{batt}	500	2000
P_{ice}	800	1200
P_{gen}	300	600
C_{rate}	0.3	1.2
SOC_{cs}	0.4	0.8
F_{hys}	0.05	0.4

Tablica 6.2: Granice za pojedine parametre dizajna za CD slučajeve

Parametar	Donja granica	Gornja granica
E_{batt}	300	3000
P_{ice}	500	1500
P_{gen}	200	600
C_{rate}	0.1	1
SOC_{end}	0.15	0.6
F_{hys}	0.05	0.4

Za svaki od navedena tri slučaja, bit će prikazane i detaljno analizirane dobivene Pareto fronte. Provest će se analiza kompromisa između ciljnih funkcija, istražiti karakteristike optimalnih dizajna te identificirati ključni principi koji povezuju dimenzije komponenti i parametre upravljačke strategije s konačnim performansama sustava.

6.1 Slučaj 1: Strategija pražnjenja bez dnevnog punjenja baterije

Scenarij pražnjenja bez mogućnosti dnevnog punjenja temelji se na operativnoj filozofiji u kojoj se brod ponaša kao energetska neovisan sustav tijekom svojih dnevnih plovidbenih zadataka.

Operativni ciklus za ovaj scenarij definiran je na sljedeći način:

1. **Početak operativnog dana:** Brod započinje dan s visokim stanjem napunjenosti baterije ($SOC_{start} = 90\%$), koje je postignuto tijekom noći dok je bio privezan i spojen na obalnu elektroenergetsku mrežu.

2. **Dnevne operacije:** Tijekom plovidbe i manevriranja, sustav aktivno koristi energiju pohranjenu u bateriji kako bi smanjio potrebu za radom motora s unutarnjim izgaranjem. Ne postoji mogućnost punjenja s kopna.
3. **Kraj operativnog dana:** Dan završava sa nižim stanjem napunjenosti (SOC_{end}), koje je definirano kao jedna od optimizacijskih varijabli. Brod se zatim ponovno spaja na mrežu kako bi se baterija napunila za sljedeći dan.

Glavni cilj sustava za upravljanje energijom (EMS) u ovom scenariju jest optimalno rasporediti početnu zalihu električne energije tijekom dana. EMS mora u svakom trenutku donositi odluke o tome kada koristiti bateriju za pomoć pri pogonu (PTI), kada je puniti viškom snage glavnog motora (PTO), a kada uključiti pomoćni motor, sve s ciljem minimizacije cjeloživotnih troškova, potrošnje goriva i degradacije.

Ključni izazov ovog scenarija leži u energetskej samodostatnosti. Cjelokupna energetska bilanca tijekom dana mora biti zadovoljena isključivo resursima na brodu. To stvara pritisak na dimenzioniranje sustava: premala baterija može dovesti do čestog i neefikasnog rada pomoćnog motora, dok prevelika baterija značajno povećava početnu investiciju. Upravo će se ti kompromisi analizirati u nastavku.

6.1.1 Makro analiza

Prvi korak u analizi rezultata za ovaj scenarij jest razumijevanje globalnih karakteristika dobivenog skupa od 114 nedominiranih, odnosno optimalnih rješenja. Ova makro analiza ima za cilj istražiti temeljne kompromise između tri suprotstavljene funkcije cilja te identificirati ključne veze između krajnjih odluka, kako u pogledu dimenzioniranja komponenti, tako i u pogledu parametara strategije upravljanja, i konačnih cjeloživotnih performansi sustava.

Analiza započinje vizualizacijom Pareto fronte kako bi se ispitali inherentni odnosi između troškova životnog ciklusa (LCC), ukupne potrošnje goriva i indeksa degradacije. Nakon toga, prikazat će se rasponi vrijednosti unutar kojih se kreću optimalne varijable dizajna i funkcije cilja, čime se definira opseg prostora optimalnih rješenja. Konačno, kroz specifične grafove istražiti će se kako najutjecajnije od tih varijabli, poput kapaciteta baterijskog sustava, direktno oblikuju ishode optimizacije i definiraju prirodu kompromisnih rješenja.

1. Pareto fronta

Slike 6.1-6.3 prikazuju Pareto frontu kroz tri dvodimenzionalne projekcije, koje ilustriraju temeljne kompromise između triju suprotstavljenih ciljnih funkcija: troškova životnog ciklusa (LCC), ukupne potrošnje goriva i indeksa degradacije.

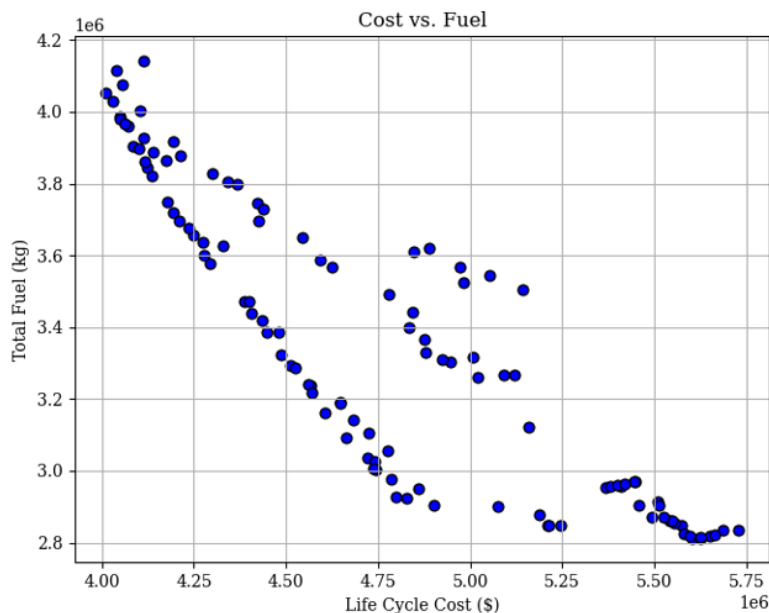
Troškovi životnog ciklusa vs. Ukupna potrošnja goriva

Na slici 6.1 uočava se jasan i očekivan kompromis između ekonomskih i ekoloških performansi sustava. Krivulja ima karakterističan konveksan, “L” oblik, tipičan za višeciljne optimizacijske probleme.

- **Ekonomski ekstrem:** Rješenja s najnižim troškovima životnog ciklusa (LCC), grupirana oko 4 milijuna dolara, istovremeno imaju najvišu potrošnju goriva, koja premašuje 4.000 tona tijekom 10-godišnjeg perioda. Ova rješenja se oslanjaju na manje baterijske sustave kako bi minimizirala početnu investiciju (CAPEX), što posljedično dovodi do češćeg i manje efikasnog korištenja motora s unutarnjim izgaranjem.
- **Ekološki ekstrem:** Na suprotnom kraju spektra, rješenja koja postižu najnižu potrošnju goriva (ispod 2.900 tona) zahtijevaju značajno viši LCC, koji raste i do 5.75 milijuna dolara. Ovakva rješenja podrazumijevaju velike baterijske sustave koji omogućuju duge

periode plovidbe u potpuno električnom modu ili s motorima koji rade isključivo u svojim optimalnim točkama.

- **“Koljeno” krivulje:** Posebno je zanimljivo područje “koljena” krivulje, u rasponu LCC-a od 4.25 do 4.75 milijuna dolara, gdje se postiže najveće smanjenje potrošnje goriva po jedinici povećanja troška. Ovo područje tipično sadrži “balansirana” rješenja koja nude najbolji kompromis između cijene i performansi.

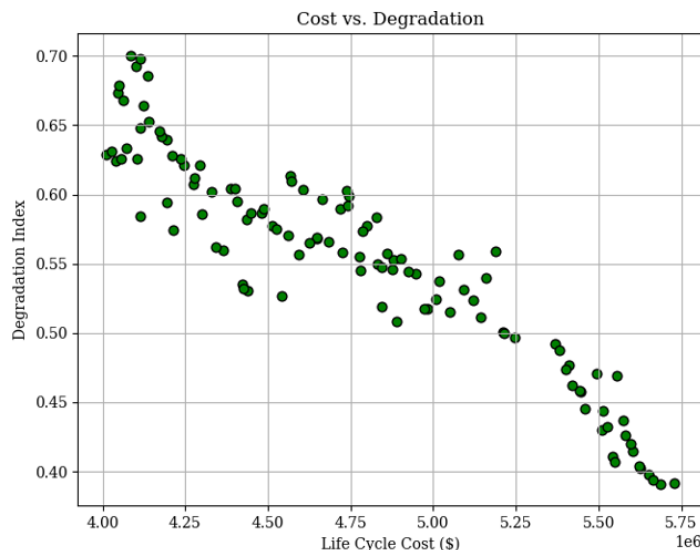


Slika 6.1: Prikaz odnosa količine potrošenog goriva te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 1.

Troškovi životnog ciklusa vs. Indeks degradacije

Slika 6.2 prikazuje sličan inverzan odnos između LCC-a i indeksa degradacije. Niži ukupni troškovi sustava postižu se po cijenu bržeg trošenja komponenti.

- Sustavi s niskim LCC-om (oko 4 milijuna dolara) pokazuju najviši indeks degradacije (blizu 0.7). To je posljedica korištenja manjih komponenti koje su tijekom rada izložene većim opterećenjima, češćim startovima i radu izvan optimalnih režima kako bi zadovoljile potražnju za snagom.
- S druge strane, da bi se postigao najniži indeks degradacije (oko 0.4), potrebna je investicija koja LCC podiže iznad 5.5 milijuna dolara. Velike i snažne komponente u takvim sustavima rade s manjim relativnim opterećenjem, što smanjuje njihovo trošenje i produžuje životni vijek.

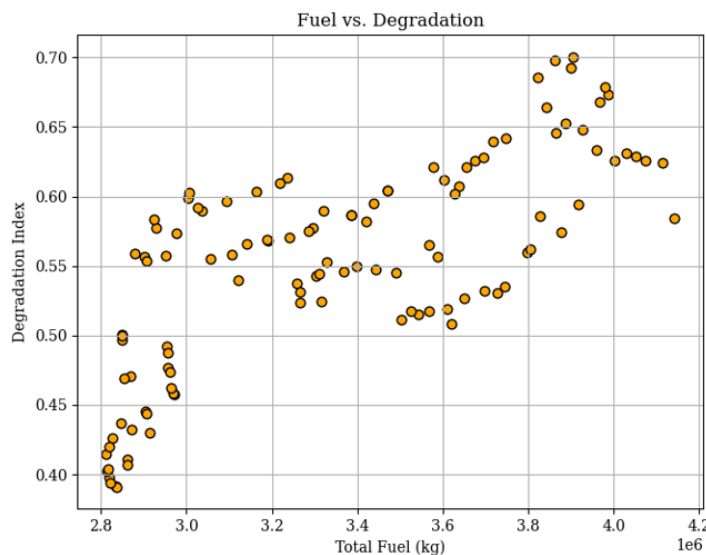


Slika 6.2: Prikaz odnosa indeksa degradacije te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 1.

Ukupna potrošnja goriva vs. Indeks degradacije

Slika 6.3 otkriva najzanimljiviji odnos i ključan uvid u dinamiku hibridnog sustava. Za razliku od prethodna dva grafa, ovdje ne postoji jasan kompromis.

- Uočava se snažna pozitivna korelacija: rješenja koja imaju nižu potrošnju goriva u pravilu imaju i niži indeks degradacije. Najbolja rješenja grupirana su u donjem lijevom kutu grafa.



Slika 6.3: Prikaz odnosa indeksa degradacije te potrošnje goriva kod Pareto rezultata, slučaj 1.

- Ova sinergija je logična posljedica rada hibridnog sustava. Isti mehanizam, korištenje baterije za stabiliziranje opterećenja motora istovremeno dovodi do dva poželjna ishoda:
 1. **Smanjenje potrošnje goriva:** Motori rade dulje u svom najefikasnijem području.
 2. **Smanjenje degradacije:** Izbjegavaju se nagle promjene opterećenja, smanjuje se broj sati rada i broj paljenja/gašenja motora.

Promatrajući sva tri grafa zajedno, nameće se ključni zaključak za ovaj scenarij: temeljni konflikt nije između ekoloških performansi i dugotrajnosti sustava, već između početne investicije (koja dominira LCC-om) i operativnih performansi (koje obuhvaćaju i potrošnju goriva i degradaciju). Odluka o dizajnu sustava svodi se na odabir željene točke na krivulji kompromisa između cijene i sveukupne operativne izvrsnosti.

2. Rasponi optimalnih rješenja

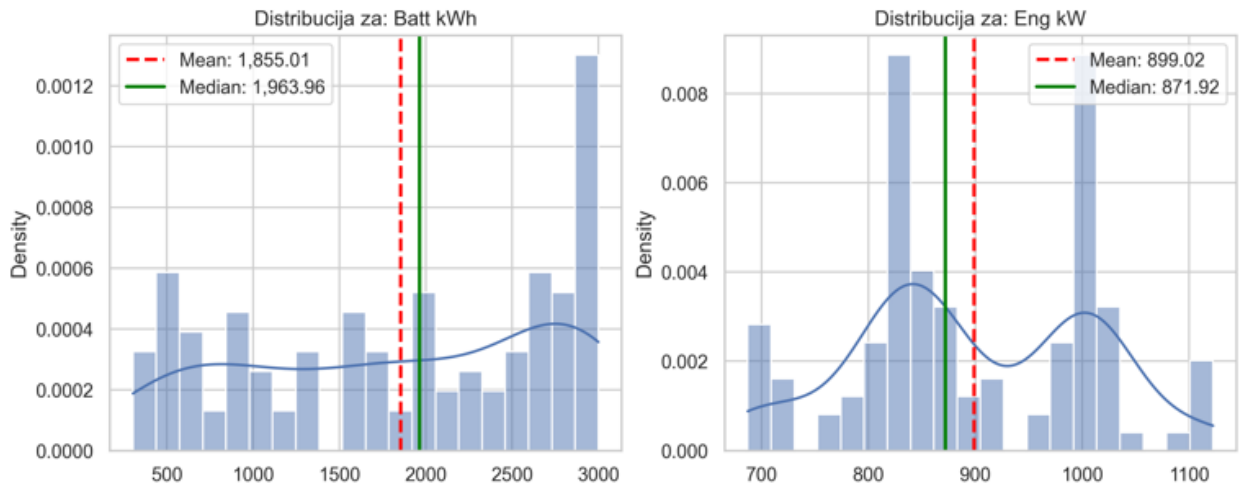
Nakon sagledavanja općih kompromisa na Pareto fronti, sljedeći korak je detaljna analiza samih rješenja. Cilj ovog poglavlja je kvantificirati unutar kojih se raspona kreću optimalne parametri dizajna i identificirati preferencije koje optimizacijski algoritam pokazuje prema određenim vrijednostima.

Tablica 6.3: Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 1.

	E_{batt} [kWh]	P_{ice} [kW]	P_{gen} [kW]	C_{rate} [—]	SOC_{end} [—]	F_{hys} [—]	LCC [\$]	Ukupna potrošnja goriva [kg]	Index degradacije
Min	303.89	687.17	200.01	0.1	0.15	0.06	4.01E+06	2.81E+06	0.39
Max	2999.2	1122.5	425.03	0.24	0.6	0.4	5.73E+06	4.14E+06	0.7
Aritmetička sredina	1855.01	899.02	213.04	0.16	0.33	0.36	4.77E+06	3.36E+06	0.55
Medijan	1963.96	871.92	201.32	0.14	0.29	0.4	4.73E+06	3.31E+06	0.56
Asimetrija	-0.25	0.01	4.26	0.4	0.81	-2.9	0.28	0.23	-0.38

Kapacitet baterije (E_{batt})

- **Raspon:** Optimalna rješenja pokrivaju izuzetno širok raspon kapaciteta, od minimalnih 304 kWh do maksimalnih 3000 kWh.
- **Distribucija:** Statistički podaci (srednja vrijednost 1855 kWh, medijan 1964 kWh, asimetrija -0.25) ne ukazuju na snažnu nagnutost. Vizualna analiza lijevog histograma na slici 6.4 to potvrđuje, pokazujući relativno ravnomjernu, blago bimodalnu distribuciju bez ijedne izražene vrijednosti.



Slika 6.4: Distribucija optimalnih rješenja za kapacitet baterije (lijevo) i glavni motor (desno), slučaj 1.

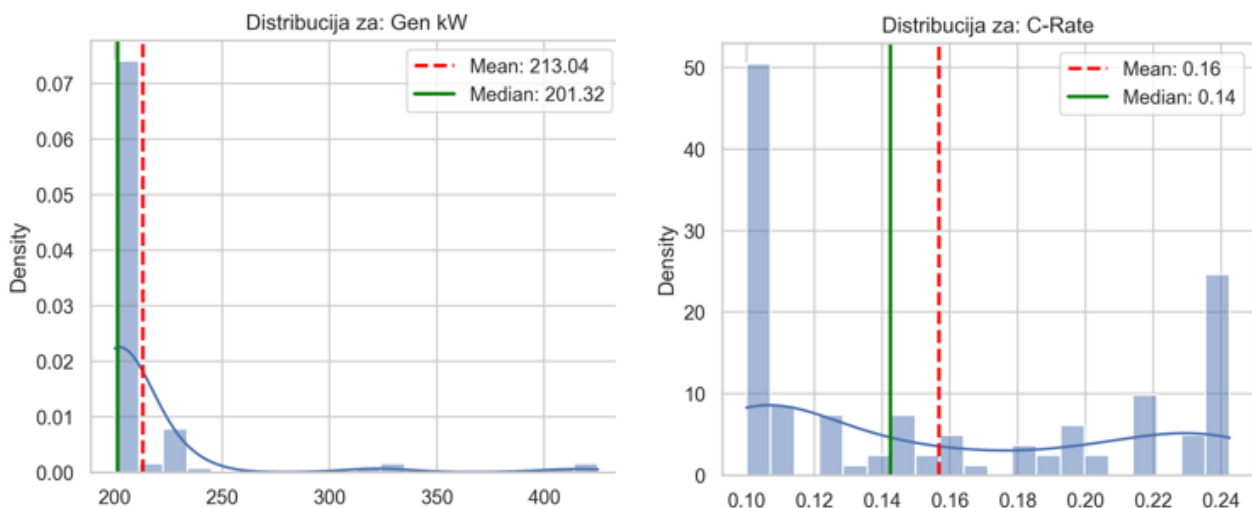
- **Zaključak:** Ne postoji jedinstvena optimalna veličina baterije za ovaj slučaj. Njen kapacitet je najvažnija varijabla kompromisa: rješenja s niskim LCC-om biraju baterije manjeg kapaciteta, dok rješenja s niskom potrošnjom goriva i degradacijom zahtijevaju baterije većeg kapaciteta.

Snaga glavnog motora (P_{ice})

- **Raspon:** Snaga glavnog motora kreće se od 687 kW do 1122 kW.
- **Distribucija:** Histogram jasno otkriva izraženu bimodalnu distribuciju, s dva vidljiva vrha—jedan oko 850 kW i drugi oko 1050 kW. Srednja vrijednost (899 kW) i medijan (872 kW) nalaze se u dolini između ova dva vrha, što je klasičan pokazatelj bimodalnosti.
- **Zaključak:** Optimizator preferira dvije različite strategije. Ako se uzme u obzir da vršno opterećenje u prosjeku iznosi 850 kW, prva strategija uparuje motor srednje snage (oko 850 kW) s većom baterijom koja preuzima vršna opterećenja. Druga strategija koristi snažniji motor (oko 1050 kW) koji može samostalno pokriti veći dio opterećenja, te ga uparuje s manjim baterijskim sustavom.

Snaga pomoćnog motora (P_{gen})

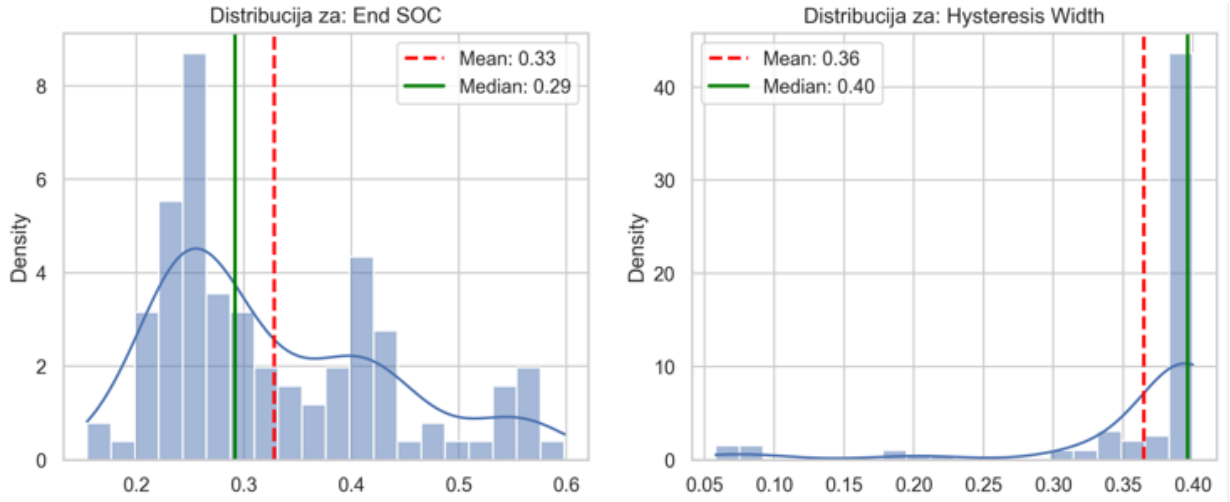
- **Raspon:** Iako se snaga pomoćnog motora kreće od 200 kW do 426 kW, distribucija je izuzetno nagnuta.
- **Distribucija:** Statistička tablica pokazuje ekstremno visoku pozitivnu asimetriju (4.26). Čak 75 % svih optimalnih rješenja ima snagu pomoćnog motora ispod 203 kW, što je tek neznatno iznad minimuma. Histogram na slici 6.5 lijevo ovo dramatično potvrđuje, pokazujući ogroman vrh na samom minimumu raspona (200 kW) i dugačak, tanak rep prema većim vrijednostima.
- **Zaključak:** Postoji izrazita i nedvosmislena preferencija za najmanji mogući pomoćni motor. U ovom slučaju, gdje je sustav energetske samodostatan, uloga pomoćnog motora je svedena na minimum, vjerojatno samo kao podrška u rijetkim situacijama, stoga ga algoritam minimizira radi smanjenja troškova.



Slika 6.5: Distribucija optimalnih rješenja za pomoćni motor (lijevo) i C-stopu (desno), slučaj 1.

C-stopa (C_{rate})

- **Raspon:** Vrijednosti se kreću od 0.10 do 0.24.
- **Distribucija:** Distribucija je pozitivno nagnuta (0.40), s medijanom na 0.14. Histogram na slici 6.5 desno, pokazuje jasno grupiranje rješenja pri nižim C-stopama.
- **Zaključak:** Optimalni sustavi preferiraju manje agresivno korištenje baterije u odnosu na njen kapacitet. To je vidljivo i u samom rasponu C-stopa i u njihovoj distribuciji. To ukazuje na strategiju koja favorizira smanjenje naprežanja i degradacije baterije, umjesto dizajniranja za ekstremno visoke, ali kratkotrajne impulse snage.



Slika 6.6: Distribucija optimalnih rješenja za krajnji SOC (lijevo) i širinu pojasa histereze (desno), slučaj 1.

Krajnji SOC (SOC_{end})

- **Raspon:** Ciljni SOC na kraju dana varira od 0.15 do 0.60.
- **Distribucija:** Kao i kod C-stope, distribucija je pozitivno nagnuta (0.81), s medijanom na 0.29. Većina rješenja grupirana je u rasponu od 0.25 do 0.41 (interkvartilni raspon).
- **Zaključak:** Preferira se dublje pražnjenje baterije kako bi se maksimalno iskoristila energija napunjena tijekom noći. Ipak, algoritam izbjegava ekstremno niske vrijednosti (ispod 0.15) kako bi se očuvao životni vijek baterije i zadržala rezerva snage.

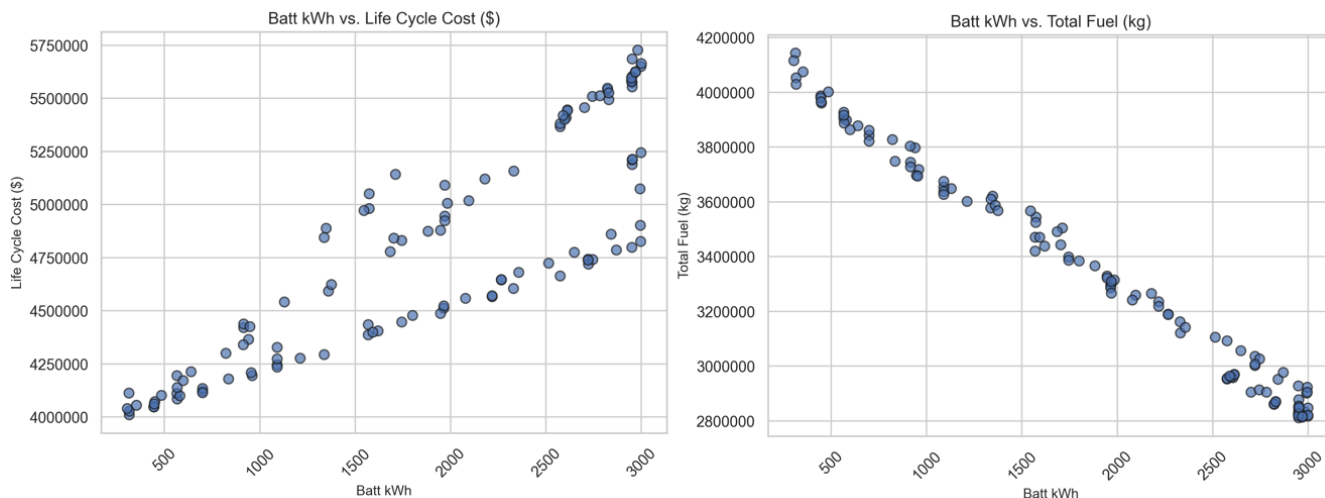
Širina pojasa histereze (F_{hys})

- **Raspon:** Širina pojasa kreće se od 0.06 do 0.48.
- **Distribucija:** Ovdje je prisutna ekstremno jaka negativna asimetrija (-2.98). Medijan i 75-ti percentil su na 0.40, a desni histogram na slici 6.6 pokazuje ogroman vrh na desnom kraju raspona.
- **Zaključak:** Algoritam pokazuje izrazitu preferenciju za širok pojas histereze. Ovo je ključan uvid u optimalnu strategiju upravljanja. Širok pojas sprječava često uključivanje i isključivanje motora kao odgovor na male promjene SOC-a, čime se smanjuje broj startova i poboljšava ukupna efikasnost sustava. To direktno smanjuje i potrošnju goriva i degradaciju.

3. Utjecaj parametara dizajna na funkcije cilja

Nakon analize raspona i distribucija, ovo poglavlje detaljnije istražuje kako najutjecajniji parametri dizajna direktno oblikuju konačne performanse sustava. Odabrano je pet ključnih odnosa koji najbolje ilustriraju temeljne kompromise u dizajnu hibridnog sustava za ovaj operativni scenarij.

Kapacitet baterije (E_{batt}) vs (LCC & Ukupna potrošnja goriva)



Slika 6.7: Utjecaj kapaciteta baterije na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 1.

Na Slici 6.7 prikazan je kompromis pri dimenzioniranju hibridnog sustava. Desni dijagram prikazuje operativnu i ekološku korist, dok lijevi dijagram prikazuje ekonomsku realnost povezanu s kapacitetom baterije.

Desni dijagram otkriva gotovo savršenu inverzno linearnu ovisnost između kapaciteta baterije i ukupne potrošnje goriva. S povećanjem kapaciteta baterije, potrošnja goriva konzistentno i predvidljivo opada. Ovaj trend je temeljni razlog za hibridizaciju u CD scenariju: veća baterija služi kao veći spremnik jeftinije energije napunjene tijekom noći, što omogućuje rjeđe i efikasnije korištenje motora s unutarnjim izgaranjem. Svaki dodatni kWh kapaciteta direktno doprinosi smanjenju operativne ovisnosti o fosilnim gorivima.

Međutim, dok je korist povećanja baterije u vidu uštede goriva jasna i nedvosmislena, lijevi dijagram otkriva da se ta korist ne preslikava na jednako jednostavan način na ukupne troškove životnog ciklusa (LCC). Analizom LCC-a uočavaju se dvije dominantne, približno linearne grupacije rješenja s različitim nagibima, koje predstavljaju dvije različite "obitelji" optimalnih dizajna:

1. **Gornji pravac (Prioritet na performansama):** Gornja linija točaka predstavlja rješenja koja su primarno optimizirana za minimalnu potrošnju goriva i degradaciju. Da bi se postigle vrhunske performanse za određeni kapacitet baterije, ostatak sustava je konfiguriran na način koji je skuplji, što rezultira višim LCC-om. Ovo su tehnički superiorna, ali ekonomski zahtjevnija rješenja.
2. **Donji pravac (Balansirana/ekonomična rješenja):** Donja linija točaka predstavlja rješenja koja postižu niži LCC za isti kapacitet baterije tako što dopuštaju blago odstupanje od apsolutno minimalne potrošnje goriva ili degradacije. Ova "obitelj" rješenja nudi bolji ekonomski kompromis.

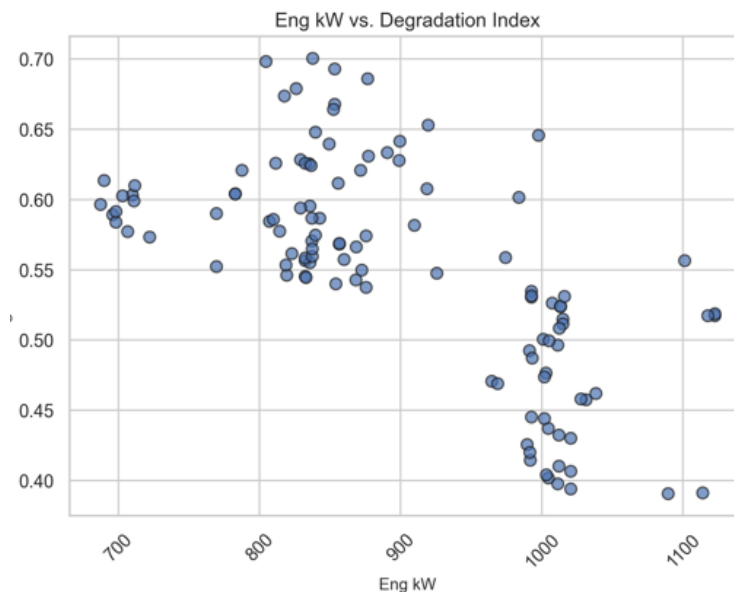
Zaključak: Usporedni prikaz ova dva dijagrama savršeno ilustrira srž problema višeciljne optimizacije. Dok desni graf sugerira jednostavnu strategiju gdje što veća baterija daje bolje rezultate, lijevi graf uvodi složenu ekonomsku realnost. Pokazuje da postoji točka opadajućih prinosa, gdje visoki početni troškovi (CAPEX) velikih baterija nadmašuju uštede u gorivu (OPEX). Postojanje dvaju trendova u LCC-u dodatno komplicira odluku, nudeći projektantu izbor između dizajnerske filozofije koja beskompromisno cilja na performanse i one koja traži ekonomski optimalniju ravnotežu.

Nazivna snaga glavnog motora (P_{ice}) vs Indeks degradacije

Slika 6.8 prikazuje odnos između nazivne snage glavnog motora i ukupnog indeksa degradacije sustava. Umjesto jednostavnog linearnog trenda, graf otkriva izraženu bimodalnu strukturu s dva jasno definirana klastera rješenja, što je u potpunom skladu s prethodno prikazanom bimodalnom distribucijom na histogramu. Ova dva klastera predstavljaju dvije fundamentalno različite, ali jednako optimalne dizajnerske filozofije.

1. **Klaster 1: Strategija "manjeg" motora (800 – 900 kW)** Ovaj klaster obuhvaća rješenja koja koriste motore manje nazivne snage. Karakteristika ovih rješenja je značajno viši indeks degradacije, koji se uglavnom kreće u rasponu od 0.55 do 0.70. Iako se odabir manjeg motora može činiti korisnim za smanjenje početne investicije, on dovodi do većeg opterećenja na cjelokupni hibridni sustav. Manji motor mora češće raditi na visokom postotku svog maksimalnog opterećenja, a za pokrivanje vršnih potreba za snagom nužna je češća i agresivnija asistencija baterijskog sustava i pomoćnog motora. To rezultira ubrzanim trošenjem ne samo glavnog motora, već i ostalih komponenti, što dovodi do višeg ukupnog indeksa degradacije.
2. **Klaster 2: Strategija "većeg" motora (980 – 1050 kW)** Drugi klaster rješenja favorizira motore veće nazivne snage. Ova strategija rezultira osjetno nižim indeksom degradacije, uglavnom u rasponu od 0.40 do 0.55. Snažniji glavni motor može samostalno pokriti veći dio operativnog profila opterećenja bez naprezanja, radeći s većom rezervom snage. Posljedično, smanjuje se potreba za intervencijom baterije i pomoćnog motora, čime se smanjuje broj njihovih radnih sati i ciklusa. Manje opterećenje svih komponenti dovodi do njihove veće dugovječnosti i, sukladno tome, nižeg ukupnog indeksa degradacije.

Zaključak: Ovaj dijagram razbija pojednostavljenu pretpostavku da je za hibridni sustav uvijek bolje odabrati manji motor s unutarnjim izgaranjem. Rezultati jasno pokazuju da, iako takav pristup može biti ekonomski primamljiv, on dolazi po cijenu znatno bržeg trošenja cjelokupnog sustava. Odabir adekvatno dimenzioniranog, snažnijeg glavnog motora pokazao se kao ključna strategija za postizanje dugovječnosti sustava. Rješenja s nižom degradacijom su ona gdje glavni motor preuzima ulogu primarnog izvora snage, dok baterija služi kao sofisticirani alat za optimizaciju, a ne kao nužna ispomoć.



Slika 6.8: Utjecaj nazivne snage motora na indeks degradacije, slučaj 1.

C-stopa vs (LCC & Indeks degradacije)

Dijagrami na slici 6.9 prikazuju ključnu ulogu C-stope, kao mjere maksimalne snage baterije, u definiranju ekonomskih i eksploatacijskih karakteristika sustava. Umjesto jedinstvenog trenda, na oba dijagrama jasno se ističu dva odvojena klastera rješenja, koji predstavljaju dvije različite dizajnerske filozofije koje je optimizacijski algoritam identificirao kao optimalne.

Klaster 1: Rješenja s fiksnom minimalnom C-stopom (≈ 0.10)

Prvi, vrlo gusti klaster rješenja nalazi se na samom minimumu dopuštenog raspona, pri C-stopi od 0.10. Ova rješenja predstavljaju dizajnersku filozofiju u kojoj baterija ima minimalnu ulogu, gdje služi praktički kao izvor energije za pomoćne sustave. Ključna karakteristika ovog klastera je veliko vertikalno raspršenje vrijednosti za obje ciljne funkcije:

- Na lijevom dijagramu, LCC za ovu C-stopu varira od najnižih 4 milijuna do preko 5 milijuna dolara.
- Na desnom dijagramu, Indeks degradacije za istu C-stopu pokriva visok raspon od 0.55 do gotovo 0.70.

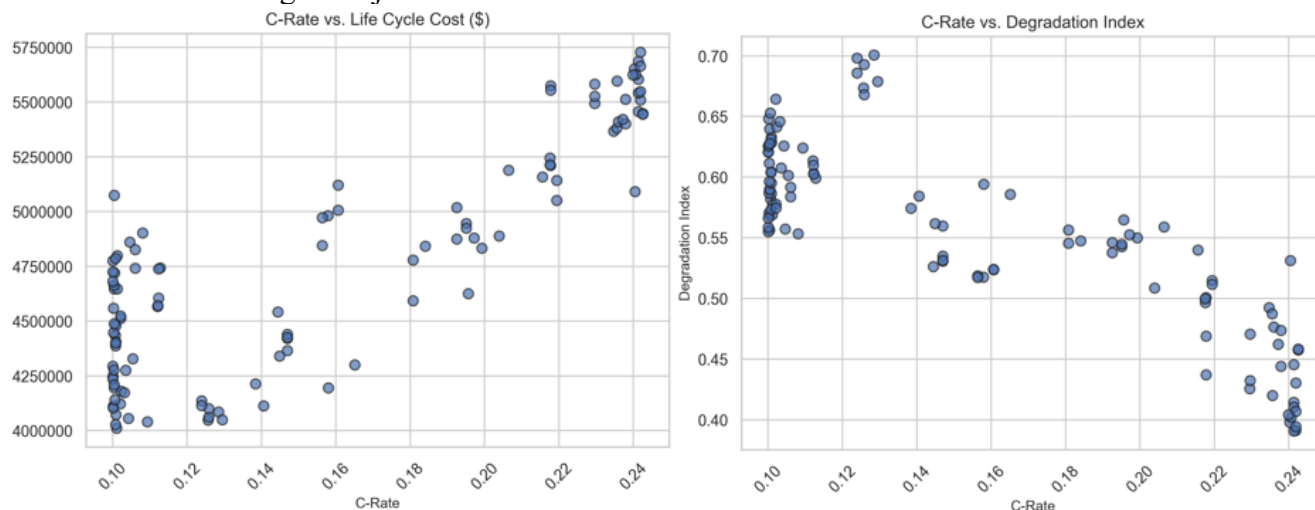
Ovo raspršenje pokazuje da, jednom kada je uloga baterije kao izvora snage fiksirana na minimum, konačni LCC i degradacija postaju isključivo ovisni o dimenzijama i međusobnom odnosu snage motora i ukupnog energetskeg kapaciteta baterije.

Klaster 2: Rješenja s linearnim ponašanjem (> 0.12)

Drugi klaster rješenja predstavlja strategiju u kojoj se svjesno ulaže u bateriju (s višom C-stopom) kako bi se postigle bolje performanse cijelog sustava. Unutar ovog klastera vidljivi su jasni linearni trendovi:

- **Lijevi dijagram (LCC):** S porastom C-stope, linearno raste i LCC. Ovaj pravac predstavlja direktnu cijenu ulaganja u bateriju koje podnose veća strujna opterećenja.

- **Desni dijagram (Indeks degradacije):** Istovremeno, s porastom C-stope, linearno opada Indeks degradacije. Ovaj naizgled kontraintuitivan rezultat objašnjava se na sistemskoj razini. Baterija više C-stope funkcionira kao efikasniji energetska amortizer, efikasnije štiteći mehaničke komponente od naglih promjena opterećenja. Rezultirajuće smanjenje stope degradacije motora s unutarnjim izgaranjem kvantitativno nadmašuje ubranu degradaciju samog baterijskog sustava, što dovodi do niže vrijednosti ukupnog, sistemskog indeksa degradacije.



Slika 6.9: Utjecaj C-stope na LCC i indeks degradacije, slučaj 1.

Zaključak:

Optimizacija nudi projektantu jasan izbor između dvije strategije. Prva je odabir najjeftinije, "osnovne" baterijske tehnologije (Klaster 1), gdje performanse sustava ovise o drugim komponentama. Druga strategija je svjesno ulaganje u moćniju bateriju (Klaster 2), gdje postoji jasan i predvidljiv kompromis: veća investicija u C-stopu linearno se isplati kroz povećanje dugovječnosti i pouzdanosti cjelokupnog sustava.

6.1.2 Mikro analiza

Nakon makro analize cjelokupnog prostora rješenja, mikro analiza se usmjerava na detaljnu usporedbu četiriju reprezentativnih rješenja. Cilj je dodatno pojašnjenje specifičnih dizajnerskih strategija i njihovih posljedica na tehnno-ekonomske performanse sustava.

1. Kriteriji odabira rješenja

Za analizu su odabrana četiri rješenja s Pareto fronte. Tri rješenja predstavljaju ekstreme koji minimiziraju svaku od tri ciljne funkcije pojedinačno: "Najniži LCC", "Najniža potrošnja goriva" i "Najniži indeks degradacije". Četvrto rješenje, "Balansirano", predstavlja kompromisno rješenje identificirano primjenom ASF funkcije (engl. *Achievement Scalarization Function*). Ova metoda, nakon normalizacije ciljnih funkcija, pronalazi rješenje koje je, uzimajući u obzir jednake težine za sve ciljeve, najbliže idealnoj utopijskoj točki, nudeći time najuravnoteženije performanse.

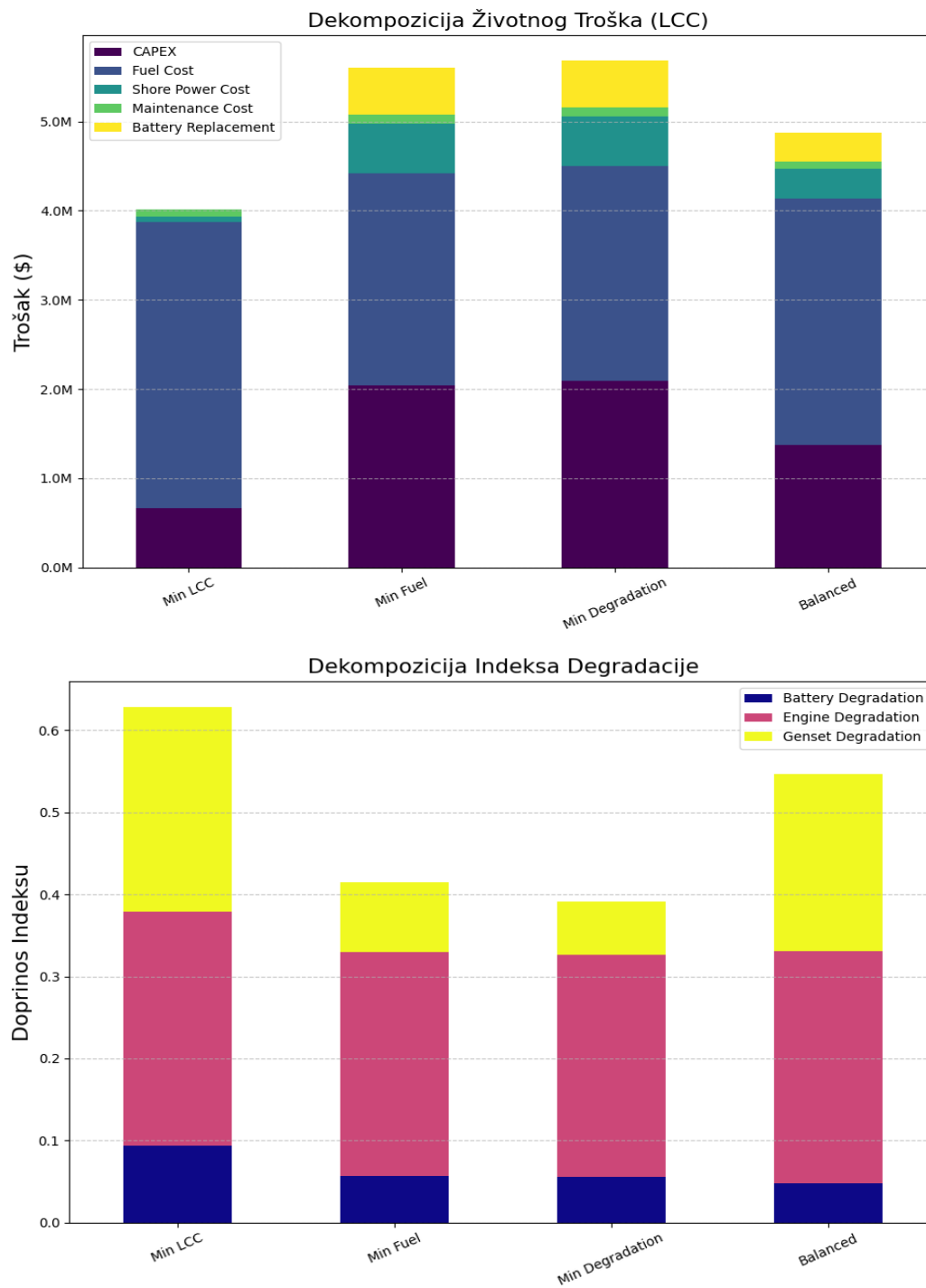
2. Komparativna analiza reprezentativnih rješenja

Tablica 6.4 i slika 6.10 u nastavku pružaju kvantitativne i vizualne podatke za komparativnu analizu odabranih rješenja.

Tablica 6.4: Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 1.

	Najniži LCC	Najniža potrošnja goriva	Najniži indeks degradacije	Balansirano
E_{batt} [kWh]	315	2,950	2,950	1,881
P_{ice} [kW]	829	992	1,089	819
P_{gen} [kW]	200	200	200	201
C_{rate} [–]	0.1	0.24	0.24	0.19
SOC_{end} [–]	0.32	0.55	0.55	0.42
F_{hys} [–]	0.36	0.4	0.4	0.4
LCC [\$]	4,011,110	5,604,177	5,685,803	4,875,065
Ukupna potrošnja goriva [kg]	4,053,287	2,811,320	2,836,081	3,367,028
Index degradacije	0.629	0.415	0.391	0.546

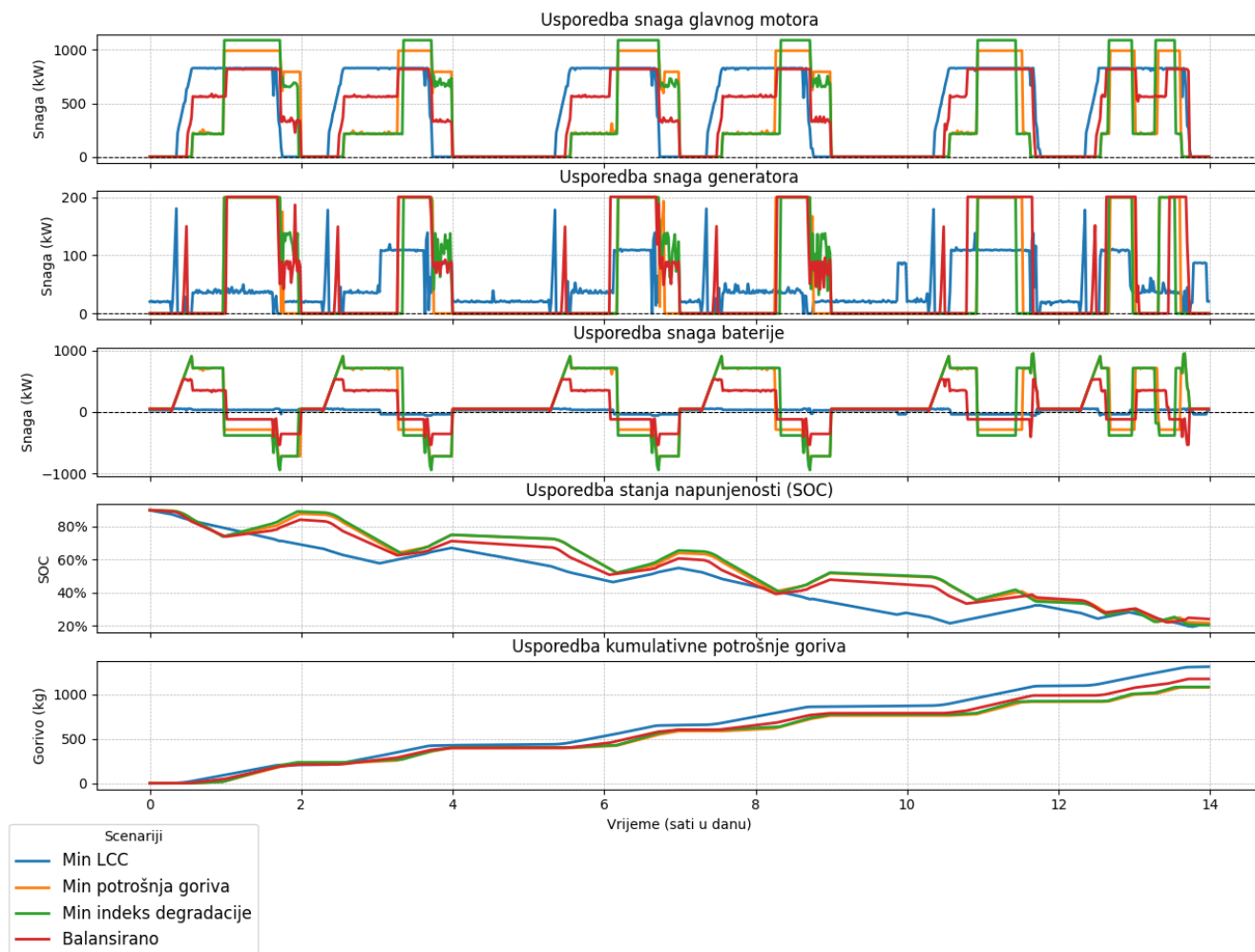
- “**Najniži LCC**” rješenje predstavlja strategiju minimizacije početnih ulaganja. Karakterizirano je minimalnim kapacitetom baterije (315 kWh) i najmanjim pomoćnim motorom (200 kW). Posljedice takvog dizajna vidljive su u performansama: sustav bilježi najvišu potrošnju goriva (4,053 t) i najviši Indeks degradacije (0.629). Dekompozicija LCC-a na slici 6.10 potvrđuje da, unatoč najnižem CAPEX-u, ukupni trošak dominantno generira visoka cijena goriva. Analiza degradacije otkriva da je visoki indeks gotovo isključivo posljedica degradacije glavnog i pomoćnog motora. Nedovoljan kapacitet baterije onemogućuje efikasnu asistenciju, što dovodi do prekomjernog opterećenja i trošenja mehaničkih komponenti.
- “**Najniža potrošnja goriva**” i “**Najniži indeks degradacije**” rješenja demonstriraju strategiju maksimizacije performansi. Oba se oslanjaju na izuzetno velike baterijske sustave (2,950 kWh) i motore veće snage. Time se potrošnja goriva smanjuje za približno 30 %, a Indeks degradacije za preko 34 % u odnosu na “Najniži LCC” rješenje. Cijena za ovakve performanse je izrazito visok LCC (preko \$5.6M), a graf dekompozicije LCC-a pokazuje to dominantnom udjelu CAPEX-a. Ključan uvid pruža grafikon dekompozicije degradacije. Ukupna degradacija je niska, a najveća razlika u odnosu na “Najniži LCC” rješenje očituje se u gotovo potpunoj eliminaciji doprinosa pomoćnog motora te značajnom smanjenju degradacije glavnog motora, prebacujući opterećenje na bateriju.
- “**Balansirano**” rješenje predstavlja učinkovit kompromis. S baterijom srednjeg kapaciteta (1,881 kWh), postiže značajno bolje performanse od “Najniži LCC” rješenja uz LCC koji je za oko \$800,000 niži od rješenja fokusiranih na performanse. Dekompozicijski grafikoni potvrđuju ovu ravnotežu: CAPEX i troškovi goriva su uravnoteženi, a degradacija je podijeljena između baterije i motora, ali na prihvatljivoj ukupnoj razini. Ovo rješenje se nameće kao tehno-ekonomski najrobusniji odabir.



Slika 6.10: Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 1.

3. Usporedba reprezentativnih rješenja na primjeru prosječnog dana

Nakon analize cjeloživotnih performansi, ključno je razumjeti kako se različite dizajnerske filozofije manifestiraju u realnom vremenu. Slika 6.11 prikazuje usporednu simulaciju rada četiriju odabranih arhetipova (“Najniži LCC”, “Najniža potrošnja goriva”, “Najniži indeks degradacije” i “Balansirano”) tijekom jednog reprezentativnog operativnog dana. Analiza njihovog dinamičkog ponašanja otkriva fundamentalne razlike u njihovim strategijama upravljanja energijom.



Slika 6.11: Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 1.

Analiza operativnih strategija

- **Rješenje “Najniži LCC”** (plava linija): Konzervativna strategija oslonjena na motore Ovo rješenje se ponaša najbližije konvencionalnom pogonu. Snaga glavnog motora (prvi graf) vrlo dinamično prati profil opterećenja, što znači da motor direktno odgovara na većinu zahtjeva za snagom, često radeći i izvan optimalnog režima. Baterija (treći graf) se koristi minimalno, uglavnom za vrlo kratke i plitke cikluse. Zbog malog kapaciteta baterije, sustav se ne može osloniti na nju za duža vršna opterećenja, stoga se pomoćni motor (drugi graf) često uključuje. Posljedica ovakvog rada je najviša kumulativna potrošnja goriva.

- **Rješenja “Najniža potrošnja goriva” i “Najniži indeks degradacije” (narančasta i zelena linija):** Agresivna strategija optimizacije opterećenja. Ova dva rješenja demonstriraju potpuno suprotnu filozofiju. Glavni motor radi u dugim intervalima na visokoj i gotovo konstantnoj snazi, čime se drži u točki svoje najviše učinkovitosti. Sva razlika između konstantne snage motora i varijabilnog opterećenja plovila kompenzira se pomoću baterije, koja radi izuzetno agresivno. Štoviše, u periodima nižeg opterećenja, glavni motor se u potpunosti gasi, a cjelokupni pogon postaje potpuno električni, što se očituje u snažnom pražnjenju baterije. Ključno je uočiti da se pomoćni motor rijetko kada koristi, čime se izbjegava njegov neefikasan rad. Rezultat je najniža kumulativna potrošnja goriva.
- **Rješenje “Balansirano” (crvena linija):** Hibridna strategija kompromisa. Rješenje “Balansirano” primjenjuje uravnoteženu strategiju. Glavni motor ne prati opterećenje dinamično kao “Najniži LCC”, niti radi potpuno statično kao “Najniža potrošnja goriva”, već operira u nekoliko diskretnih, stabilnih razina snage. Baterija se koristi značajno aktivnije od “Najniži LCC” rješenja za pokrivanje većih tranzijenata, što rezultira umjerenim padom SOC-a. Pomoćni motor se koristi, ali znatno rjeđe i sustavnije nego kod “Najniži LCC” rješenja. Ova inteligentna kombinacija rezultira kumulativnom potrošnjom goriva koja je točno između dva ekstrema.

Zaključak

Dnevna operativna analiza savršeno objašnjava cjeloživotne rezultate.

- Često i kratkotrajno korištenje oba motora kod rješenja “Najniži LCC” objašnjava zašto je njegova degradacija dominantno uzrokovana trošenjem mehaničkih komponenti.
- Strategija optimizacije opterećenja i periodi potpuno električne plovidbe kod rješenja “Najniža potrošnja goriva” i “Najniži indeks degradacije” objašnjavaju njihovu superiornu učinkovitost. Istovremeno, agresivno cikliranje baterije pojašnjava zašto je degradacija baterije glavni doprinos njihovom ukupnom indeksu degradacije.
- Rješenje “Balansirano” dokazuje svoju robusnost korištenjem svake komponente na umjeren način, čime postiže najbolji kompromis između trenutne i cjeloživotne efikasnosti.

6.2 Slučaj 2: Strategija pražnjenja sa dnevnim punjenjem baterije

Drugi analizirani scenarij (CD-2) predstavlja nadogradnju prethodno analizirane CD-1 strategije. Osnovna operativna filozofija ostaje ista: brod započinje dan s visokim stanjem napunjenosti baterije postignutim tijekom noći, koristi pohranjenu energiju za optimizaciju rada pogonskog sustava tijekom dana, te završava operacije s nižim stanjem napunjenosti.

Ključna razlika i inovacija ovog scenarija leži u uvođenju jednog kraćeg, oportunističkog punjenja tijekom operativnog dana. Ova mogućnost simulira realne situacije poput dužeg boravka u luci između putovanja, gdje je dostupna obalna infrastruktura za punjenje.

Ova funkcionalnost je integralni dio razvijenog modela za generiranje višegodišnjih operativnih scenarija. Kada se odabere ovaj operativni režim, model automatski u dnevni raspored, otprilike na polovici operativnog dana, umeće dodatni vremenski period predviđen za punjenje. Tijekom simulacije životnog vijeka, kada simulator naiđe na ovaj period:

1. Prepoznaje ga kao stanje mirovanja i punjenja, a ne plovidbe.
2. Opterećenje pogonskog sustava svodi se na pokrivanje osnovnih potreba broda u mirovanju.

3. Aktivira se modul koji simulira punjenje baterije s kopna do unaprijed definirane, fiksne razine napunjenosti, uzimajući pritom u obzir efikasnost punjenja i istovremeni utjecaj na degradaciju baterije.

Uvođenje dnevnog punjenja fundamentalno mijenja energetske bilancu sustava i uvodi dodatnu fleksibilnost, stoga se očekuje da će imati značajan utjecaj na rezultate optimizacije u usporedbi sa strogo energetski samodostatnim CD-1 slučajem. Postavljaju se dvije glavne, potencijalno suprotstavljene hipoteze:

- **Mogućnost smanjenja komponenti:** Sposobnost “osvježavanja” energetskih zaliha sredinom dana mogla bi omogućiti optimizacijskom algoritmu da postigne slične ili čak bolje performanse s manjim i jeftinijim baterijskim sustavima. Manja baterija znači niži početni trošak (CAPEX), što bi moglo rezultirati pomakom Pareto fronte prema nižim vrijednostima LCC-a.
- **Mogućnost agresivnije strategije:** Alternativno, sustav bi mogao iskoristiti dnevno punjenje kao “sigurnosnu mrežu” koja omogućuje još agresivnije pražnjenje baterije u prvoj polovici dana. To bi moglo dovesti do dodatnih ušteda u gorivu jer bi se motori s unutarnjim izgaranjem koristili još rjeđe i efikasnije. Međutim, ovakva strategija bi mogla rezultirati i većom degradacijom baterije zbog dubljih ciklusa pražnjenja.

Analiza koja slijedi imat će za cilj istražiti koji od ovih efekata prevladava te kako mogućnost dnevnog punjenja preoblikuje kompromise između LCC-a, potrošnje goriva i indeksa degradacije.

6.2.1 Makro analiza

Makro analiza dobivenog skupa od 114 optimalnih rješenja, kao i u prethodnom poglavlju, istražuje temeljne kompromise između tri ciljne funkcije: troškova životnog ciklusa (LCC), potrošnje goriva i indeksa degradacije. Cilj je identificirati veze između odluka o dizajnu, poput dimenzioniranja komponenti i parametara upravljanja, i konačnih performansi sustava. Analiza započinje vizualizacijom Pareto fronte, nakon čega se ispituju rasponi optimalnih dizajnerskih varijabli te istražuje kako najutjecajnije varijable, poput kapaciteta baterije, oblikuju prirodu kompromisnih rješenja.

1. Pareto fronta

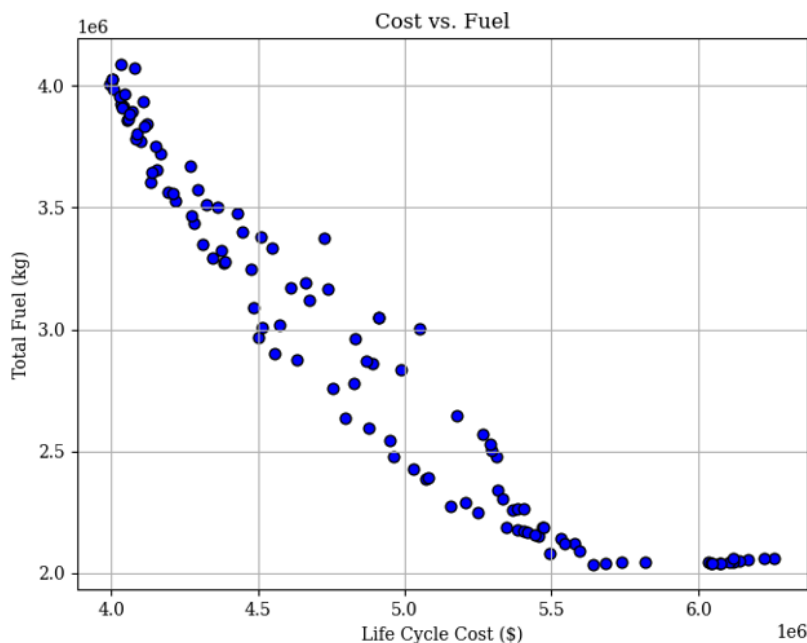
Makro analiza Pareto fronte za CD-2 scenarij otkriva, očekivano, vrlo slične temeljne odnose između ciljnih funkcija kao i u CD-1 slučaju. Ponovno se uočava jasan kompromis između LCC-a i operativnih performansi (potrošnja goriva i degradacija), te izražena sinergija između niske potrošnje goriva i niske degradacije.

Međutim, unatoč općoj sličnosti, postoje suptilne, ali važne strukturne razlike u rasporedu optimalnih rješenja na fronti. Te razlike direktno oslikavaju utjecaj dodatne operativne fleksibilnosti koju omogućuje dnevno punjenje baterije.

Ključna razlika uočava se na dijagramu LCC vs. Potrošnja goriva na slici 6.12. Za razliku od CD-1 scenarija, gdje su se mogle nazrijeti dvije dominantne, približno linearne grupacije rješenja, Pareto fronta za CD-2 je osjetno homogenija. Rješenja tvore jedinstveniju, kontinuiranu konveksnu krivulju bez jasnih prekida ili klastera.

Ova pojava sugerira da je dodatna fleksibilnost, uvedena kroz mogućnost dnevnog punjenja, pružila optimizacijskom algoritmu više prostora za pronalazak optimalnih rješenja. Sustav se ne mora strogo odlučiti za jednu od dviju rigidnih dizajnerskih filozofija (npr. oslanjanje na predimenzionirani motor vs. oslanjanje na veliku bateriju) jer dnevno punjenje omogućava dodatnu energetske sigurnost. Ta energetska injekcija sredinom dana omogućuje širi spektar

održivih dizajna koji mogu postići optimalne performanse i time glađe povezati ekonomski i ekološki ekstrem na Pareto fronti. Osim toga na dijagramu se može uočiti i izražen plato. Nakon što LCC prijeđe granicu od približno 5.5 milijuna dolara, daljnje investicije ne donose gotovo nikakvo smanjenje potrošnje goriva. Krivulja postaje gotovo horizontalna, što indicira da je sustav dosegnoo praktični minimum potrošnje za zadani operativni profil i tehnološka ograničenja. U



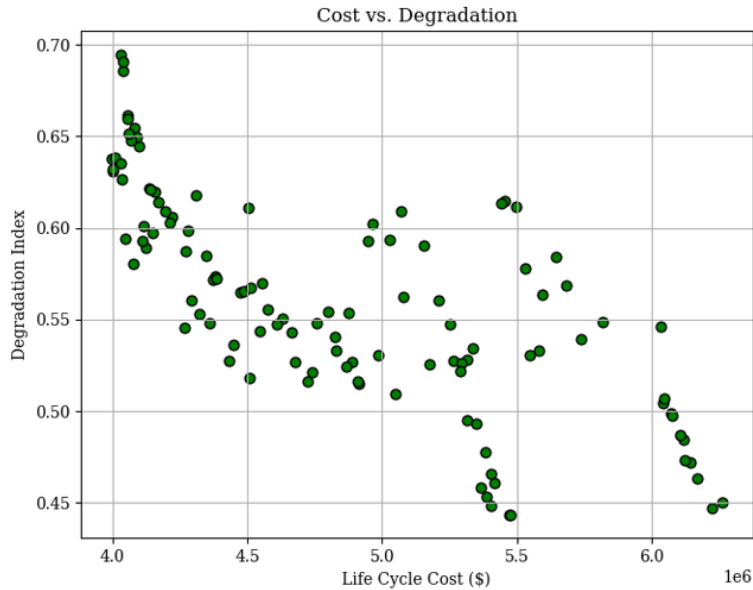
Slika 6.12: Prikaz odnosa količine potrošenog goriva te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 2.

ovoj točki, daljnje povećanje LCC-a, vjerojatno kroz instalaciju još većeg baterijskog sustava, ne donosi mjerljive operativne koristi u vidu uštede goriva i predstavlja neefikasnu investiciju.

Za razliku od jasnog platoa kod potrošnje goriva, na dijagramu LCC vs. Indeks degradacije uočava se drugačiji, ali srodan fenomen: postojanje dva odvojena klastera rješenja koja postižu gotovo identičnu, minimalnu razinu degradacije, ali uz značajno različit LCC.

1. **Klaster s najvišim LCC-om:** Na krajnjem desnom rubu dijagrama nalazi se grupa rješenja koja postiže apsolutno najniži indeks degradacije, ali uz najviše troškove životnog ciklusa. Ovim načinom maksimalna dugovječnost komponenti se postiže njihovim značajnim predimenzioniranjem.
2. **Klaster s nižim LCC-om:** Ono što je tehno-ekonomski najznačajnije jest postojanje drugog klastera rješenja koji postiže praktički istu, iznimno nisku razinu degradacije, ali uz osjetno niži LCC.

Postojanje ovog drugog, ekonomski superiornijeg klastera, izravna je posljedica operativne fleksibilnosti koju uvodi dnevno punjenje. Umjesto oslanjanja isključivo na predimenzioniranje komponenti, ova optimalna rješenja koriste dodatni unos energije tijekom dana kako bi efikasnije upravljala opterećenjima i smanjila stres na komponente. Time se postiže gotovo ista razina dugovječnosti kao kod najskupljih sustava, ali bez nepotrebnih, graničnih troškova investicije.



Slika 6.13: Prikaz odnosa indeksa degradacije te troškova životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 2.

Ove suptilne razlike u strukturi Pareto fronte stoga imaju jasan praktični značaj. One ne samo da potvrđuju da dodatna operativna fleksibilnost ima mjerljiv utjecaj na kvalitetu optimalnih rješenja, već i jasno identificiraju skup tehno-ekonomski naprednijih dizajna koji nude vrhunsku dugovječnost bez nepotrebnog kapitalnog ulaganja.

2. Rasponi optimalnih rješenja

Kao i u prethodnom poglavlju, cilj ovog poglavlja je kvantificirati raspone optimalnih dizajna i identificirati preferencije koje optimizacijski algoritam pokazuje prema određenim vrijednostima.

Tablica 6.5: Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 2.

	E_{batt} [kWh]	P_{ice} [kW]	P_{gen} [kW]	C_{rate} [–]	SOC_{end} [–]	F_{hys} [–]	LCC [\$]	Ukupna potrošnja goriva [kg]	Index degradacije [–]
Min	300.84	541.58	200.01	0.1	0.15	0.3	4.00E+06	2.03E+06	0.44
Medijan	2307.75	886.11	200.78	0.15	0.39	0.4	4.78E+06	2.97E+06	0.55
Max	2999.24	1253.05	218.62	0.44	0.59	0.4	6.27E+06	4.08E+06	0.69
Aritmetička sredina	1962.51	897.4	202.52	0.19	0.36	0.38	4.86E+06	2.94E+06	0.56
Asimetrija	-0.42	-0.58	2.39	1.04	-0.45	-1.96	0.43	0.11	0.01

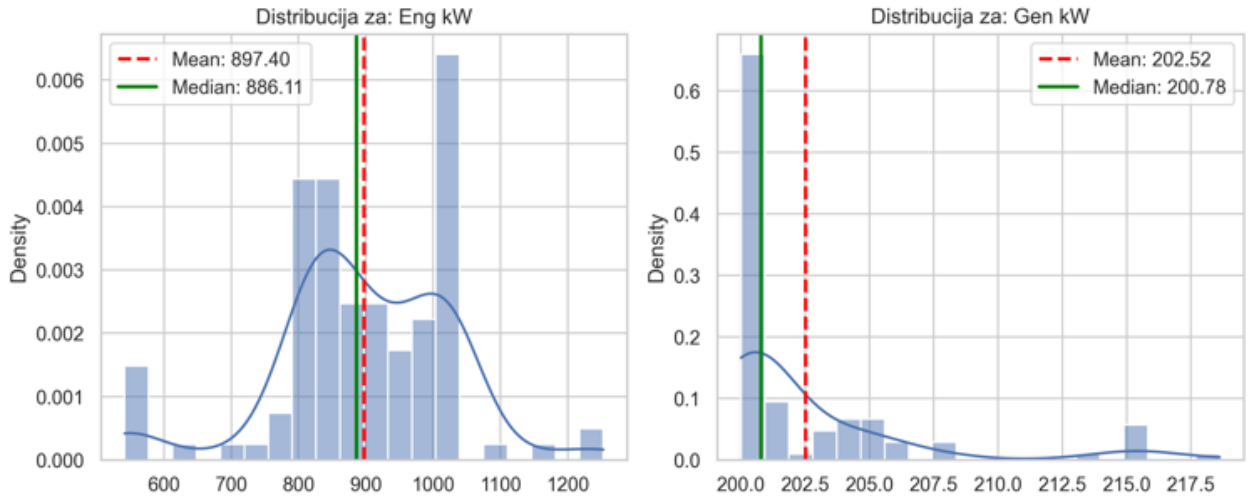
U tablici 6.5 su jasno sažeti statistički obrađeni podaci za drugi slučaj.

Uloga i dimenzioniranje baterijskog sustava (E_{batt} , C_{rate})

- **Kapacitet baterije (E_{batt}):** Raspon optimalnih kapaciteta (301 kWh – 2999 kWh) gotovo je identičan onome u CD-1 slučaju. Međutim, medijalna vrijednost je osjetno viša (2308 kWh u CD-2 naspram 1964 kWh u CD-1). Ovo je ključan uvid: algoritam nije iskoristio dnevno punjenje da bi smanjio bateriju, već naprotiv, pokazuje blagu sklonost većim baterijama. To sugerira da sustav koristi dodatni unos energije kako bi omogućio još intenzivnije korištenje baterije tijekom dana za postizanje boljih performansi.
- **C-stopa (C_{rate}):** Iako je medijalna C-stopa i dalje relativno niska (0.15), maksimalna optimalna vrijednost je gotovo udvostručena u odnosu na CD-1 (0.44 u CD-2 naspram 0.24 u CD-1). Ovo potvrđuje prethodni zaključak: kada se odabere sustav visokih performansi s velikom baterijom, dnevno punjenje omogućuje da ta baterija bude projektirana za znatno veće snage pražnjenja i punjenja.

Uloga motora s unutarnjim izgaranjem (P_{ice} , P_{gen})

- **Snaga glavnog motora (P_{ice}):** Na slici 6.14 se može primijetiti da bimodalna distribucija snage glavnog motora, koja je bila ključna karakteristika CD-1 scenarija, u CD-2 slučaju je mnogo manje naglašena. Srednja vrijednost (897 kW) i medijan (886 kW) su vrlo blizu, a distribucija je znatno homogenija. Dnevno punjenje je eliminiralo potrebu za postojanjem dviju radikalno različitih filozofija dizajna, vodeći prema jedinstvenijem setu rješenja.
- **Snaga pomoćnog motora (P_{gen}):** Ovdje se vidi najdramatičnija promjena. U CD-1 slučaju, snaga se kretala do 426 kW, dok je u CD-2 slučaju maksimalna optimalna snaga tek 218 kW. Medijan je na samom minimumu (201 kW), a ekstremno visoka pozitivna asimetrija (2.39) potvrđuje da gotovo sva rješenja biraju najmanji mogući pomoćni motor. Zaključak je nedvosmislen: mogućnost dnevnog punjenja s kopna čini ulogu pomoćnog motora gotovo u potpunosti suvišnom.



Slika 6.14: Distribucija optimalnih rješenja za glavni (lijevo) i pomoćni motor (desno), slučaj 2.

Optimizacija strategije upravljanja (SOC_{end} , F_{hys})

- **Krajnji SOC (SOC_{end}):** Medijalna vrijednost ciljnog SOC-a na kraju dana viša je u CD-2 slučaju (0.39 naspram 0.29 u CD-1). Sustavu nije potrebno toliko duboko prazniti bateriju jer zna da će dobiti energetska nadopunu, što pozitivno utječe na životni vijek baterije.
- **Širina pojasa histereze (F_{hys}):** Izrazita preferencija za širok pojas histereze još je naglašenija. Minimalna optimalna vrijednost sada je 0.30 (u usporedbi s 0.06 u CD-1), a

izrazito negativna asimetrija (-1.96) pokazuje da algoritam gotovo isključivo bira najširi mogući pojas (medijan je 0.40). Ovo potvrđuje da je izbjegavanje reaktivnog i čestog korigiranja rada motora ključna optimalna strategija u oba CD scenarija.

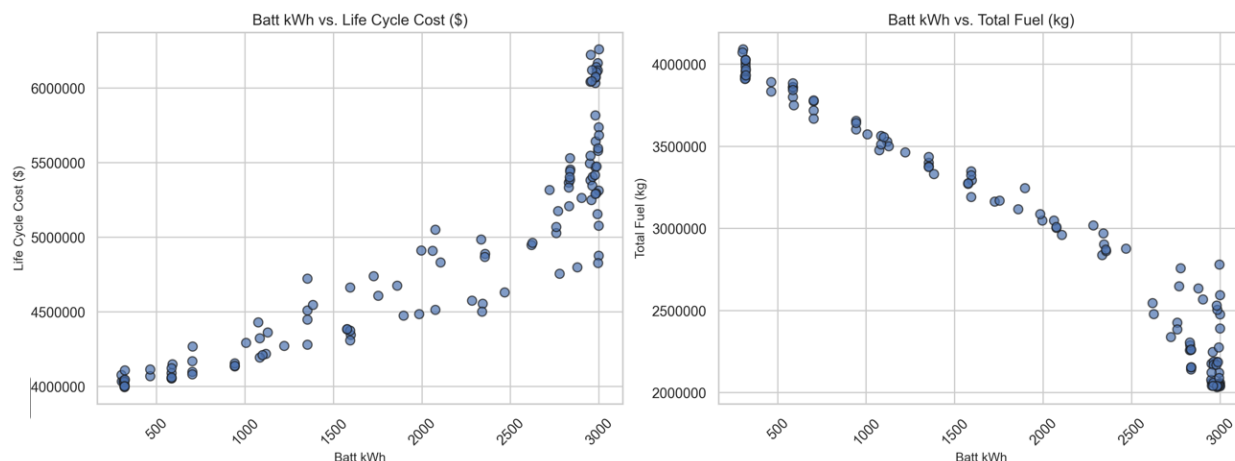
Utjecaj na funkcije cilja

Najvažniji rezultati vidljivi su u promjenama raspona ciljnih funkcija:

- **Ukupna potrošnja goriva:** Minimalna moguća potrošnja goriva je drastično smanjena, s 2.81 milijuna kg u CD-1 na 2.03 milijuna kg u CD-2. Ovo je najznačajniji dobitak koji donosi nova strategija.
- **Troškovi životnog ciklusa (LCC):** Minimalni LCC je ostao gotovo isti, ali je maksimalni LCC porastao (sa 5.73 M\$ na 6.26 M\$). To je očekivano – postizanje novih, nižih razina potrošnje goriva zahtijeva veća početna ulaganja.
- **Indeks degradacije:** Raspon je nešto uži. Minimalna vrijednost je neznatno viša (0.44 u CD-2, a 0.39 u CD-1), što je posljedica intenzivnijeg korištenja baterije u rješenjima s apsolutno najnižom potrošnjom goriva.

3. Utjecaj parametara dizajna na funkcije cilja

Nakon analize raspona i distribucija, ovo poglavlje detaljnije istražuje kako najutjecajniji parametri dizajna, prvenstveno kapacitet baterijskog sustava i njegova izlazna i ulazna snaga, direktno oblikuju konačne performanse sustava.



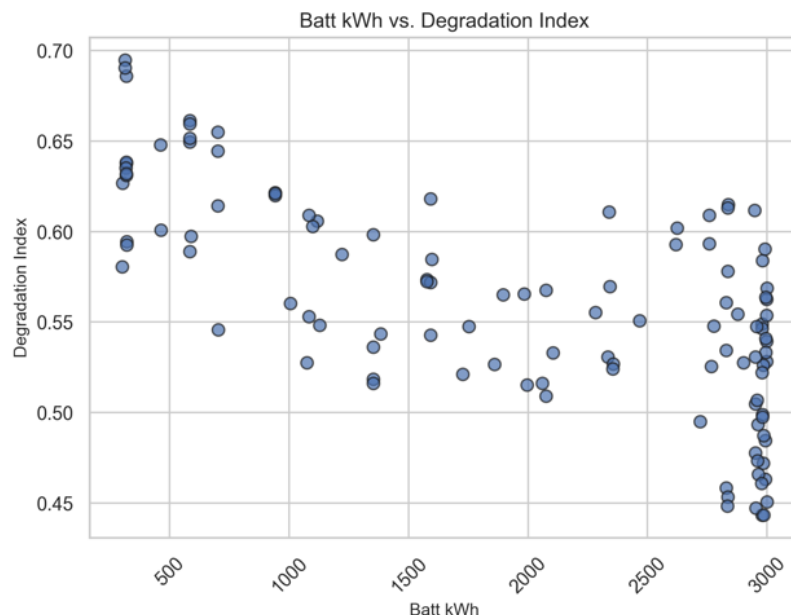
Slika 6.15: Utjecaj kapaciteta baterije na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 2.

Utjecaj kapaciteta baterije

Dijagram na slici 6.15 prikazuje fundamentalni kompromis vezan uz veličinu baterije.

- **LCC i Potrošnja goriva:** Veza između kapaciteta baterije i potrošnje goriva je, očekivano, gotovo savršeno inverzno linearna. Svaki dodatni kWh kapaciteta omogućuje pohranu više jeftinije energije s kopna, što direktno i predvidljivo smanjuje potrošnju goriva. Međutim, ova operativna korist dolazi uz jasnu ekonomsku cijenu: dijagram LCC-a pokazuje jednako snažnu pozitivnu korelaciju, gdje veći kapacitet baterije gotovo linearno povećava ukupne troškove životnog ciklusa. Za razliku od CD-1 slučaja, gdje su se nazirale dvije "obitelji" rješenja, ovdje je trend homogeniji, što potvrđuje da dnevno punjenje omogućuje fluidniji i kontinuiraniji spektar optimalnih dizajna.

- **Indeks degradacije:** Na slici 6.16 je prikazan odnos između kapaciteta baterije i degradacije. Iako postoji opći trend gdje veće baterije vode ka nižoj degradaciji (jer smanjuju opterećenje motora), primjetno je veliko raspršenje vrijednosti. Posebno kod najvećih kapaciteta (blizu 3000 kWh), moguće je postići i vrlo niske i osjetno više indekse degradacije. Ovo pokazuje da sama veličina baterije nije jedini faktor; način na koji se ona koristi (upravljačka strategija) jednako je ključan. Velika baterija može se koristiti konzervativno za postizanje maksimalne dugovječnosti, ili vrlo agresivno za postizanje apsolutno minimalne potrošnje goriva, što onda povećava degradaciju same baterije.

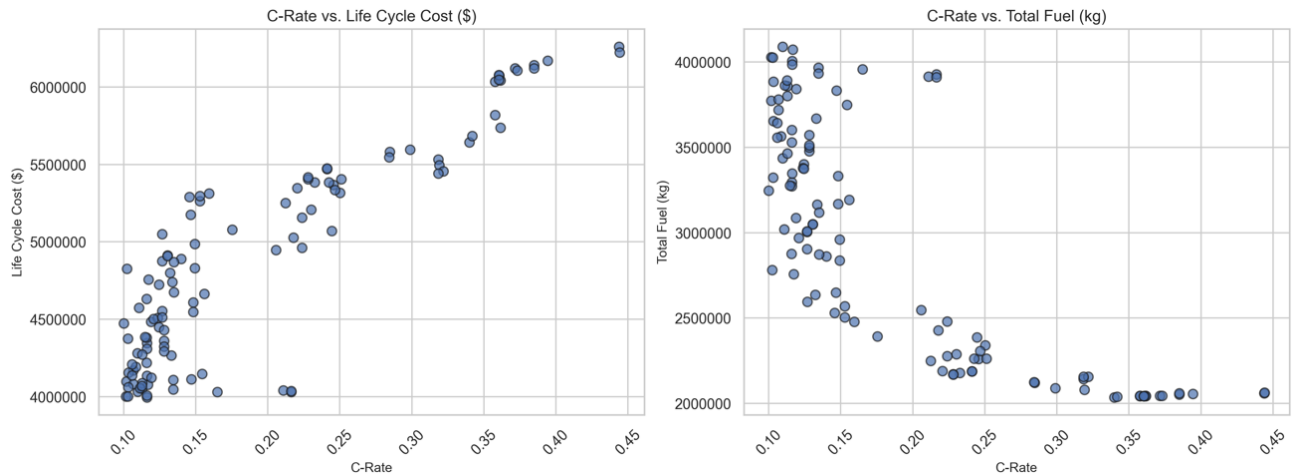


Slika 6.16: Utjecaj kapaciteta baterije na degradaciju sustava, slučaj 2.

Utjecaj C-stope baterije

Donji red dijagrama otkriva ključnu ulogu snage baterije, odnosno C-stope.

- **LCC i Potrošnja goriva:** Na slici 6.17 se može vidjeti da C-stopa ima direktan i linearan utjecaj na LCC, što odražava višu cijenu tehnologije sposobne za veća strujna opterećenja. Zanimljivo je da odnos C-stope i potrošnje goriva ima karakterističan "L" oblik. Potrošnja goriva drastično opada s povećanjem C-stope do vrijednosti od otprilike 0.20-0.25. Nakon te točke, daljnje povećanje snage baterije donosi tek minimalne ili nikakve dodatne uštede u gorivu. Ovo ukazuje na točku zasićenja: potrebna je određena minimalna snaga baterije kako bi sustav mogao efikasno provoditi "peak shaving", ali iznad tog praga, ograničavajući faktor za daljnje uštede postaje ukupna raspoloživa energija, a ne snaga.

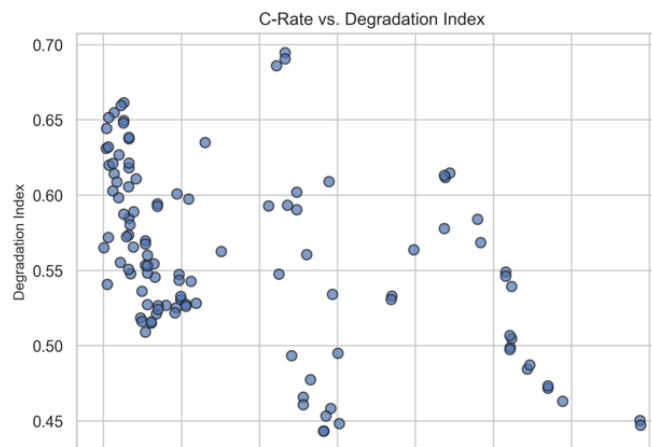


Slika 6.17: Utjecaj C-stopa na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 2.

- **Indeks degradacije:** Dijagram na slici 6.18 otkriva najdublji uvid u optimizaciju dizajna. Na prvi pogled, uočava se opći trend gdje viša C-stopa vodi ka nižem ukupnom indeksu degradacije, što se objašnjava boljom zaštitom mehaničkih komponenti. Međutim, puno je značajnija pojava dva odvojena klastera rješenja koji postižu istu razinu dugovječnosti kroz različite dizajnerske pristupe. Primjerice, moguće je postići indeks degradacije od ~ 0.55 i s C-stopom od ~ 0.15 i s C-stopom od ~ 0.25 .

Kada se ovaj uvid kombinira s prethodnim zaključcima, da viša C-stopa linearno povećava LCC, a ne donosi značajne uštede u gorivu nakon točke zasićenja (~ 0.25), nameće se jasan zaključak: klaster rješenja s višom C-stopom je tehno-ekonomski inferioran.

Ova rješenja predstavljaju predimenzioniran dizajn u kojem se ulaže u skuplju baterijsku tehnologiju (viši LCC) koja ne donosi nikakvu dodatnu korist ni u vidu uštede goriva niti u vidu poboljšane dugovječnosti sustava u odnosu na jeftiniju alternativu. Identifikacija ovakvih suboptimalnih dizajnerskih zamki predstavlja jednu od ključnih vrijednosti provedene višeciljne optimizacije, jer pruža jasne smjernice za izbjegavanje nepotrebnih troškova i neefikasnih konfiguracija.



Slika 6.18: Utjecaj C-stopa na indeks degradacije, slučaj 2.

6.2.2 Mikro analiza

Za dubinsku analizu odabrana su četiri rješenja s Pareto fronte: tri ekstrema koja minimiziraju svaku od ciljnih funkcija pojedinačno te jedno kompromisno, “Balansirano” rješenje koje definirano na isti način kao i u prethodnom poglavlju.

1. Komparativna analiza reprezentativnih rješenja

Tablica 6.6 i slika 6.19 u nastavku pružaju kvantitativne i vizualne podatke za komparativnu analizu odabranih rješenja.

Tablica 6.6: Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 2.

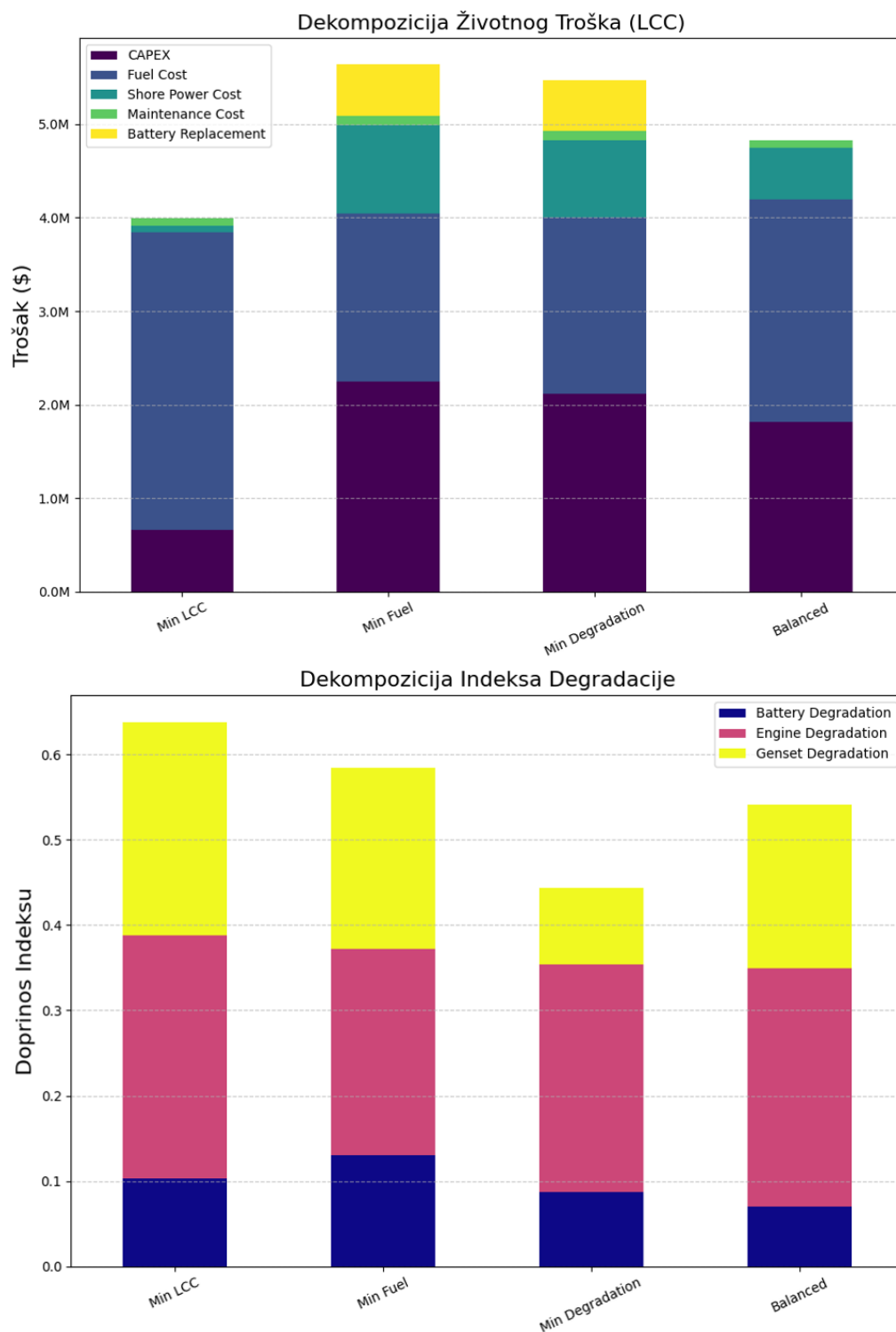
	Najniži LCC	Najniža potrošnja goriva	Najniži indeks degradacije	Balansirano
E_{batt} [kWh]	319	2,980	2,980	2,995
P_{ice} [kW]	825	983	1,037	809
P_{gen} [kW]	200	200	200	200
C_{rate} [–]	0.12	0.34	0.24	0.1
SOC_{end} [–]	0.35	0.4	0.45	0.25
F_{hys} [–]	0.4	0.4	0.4	0.4
LCC [\$]	3,995,478	5,642,967	5,470,875	4,826,694
Ukupna potrošnja goriva [kg]	4,006,863	2,034,449	2,187,785	2,780,519
Index degradacije	0.638	0.584	0.443	0.541

Rješenje “Najniži LCC”

- **Dizajn:** Ovo rješenje, očekivano, temelji se na minimalnim komponentama: najmanji kapacitet baterije (319 kWh), najmanja snaga glavnog motora (825 kW) i najmanja C-stopa (0.12)
- **Analiza troškova (LCC):** Dijagram dekompozicije LCC-a na slici 6.19 pokazuje da, iako su kapitalni troškovi (CAPEX) najniži, troškovi goriva čine gotovo polovicu ukupnih troškova životnog ciklusa, što potvrđuje neefikasnost sustava.
- **Analiza degradacije:** S indeksom od 0.638, ovo je degradacijski najlošije rješenje. Dijagram dekompozicije indeksa degradacije jasno pokazuje da je degradacija gotovo u potpunosti posljedica trošenja glavnog motora i pomoćnog motora. Mala baterija ne može pružiti adekvatnu asistenciju, zbog čega su mehaničke komponente izložene konstantnim promjenama opterećenja i neefikasnom radu.
- **Zaključak:** Ova strategija je gotovo identična onoj iz CD-1 slučaja i predstavlja klasičan dizajn s prioritetom na niskoj početnoj investiciji, što se plaća visokim operativnim troškovima i ubrzanim trošenjem komponenti.

Rješenje “Najmanja potrošnja goriva”

- **Dizajn:** Da bi se postigla apsolutno najniža potrošnja goriva (2,034,449 kg), algoritam je odabrao veliku bateriju (2,980 kWh) s najvišom C-stopom (0.34), uparenu sa snažnim glavnim motorom (983 kW).
- **Analiza troškova (LCC):** Ovo je najskuplje rješenje (5,642,967 \$). Dijagram LCC-a pokazuje da je CAPEX dominantan trošak, dok je udio goriva najmanji od svih rješenja.



Slika 6.19: Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 2.

Rješenje “Najniži indeks degradacije”

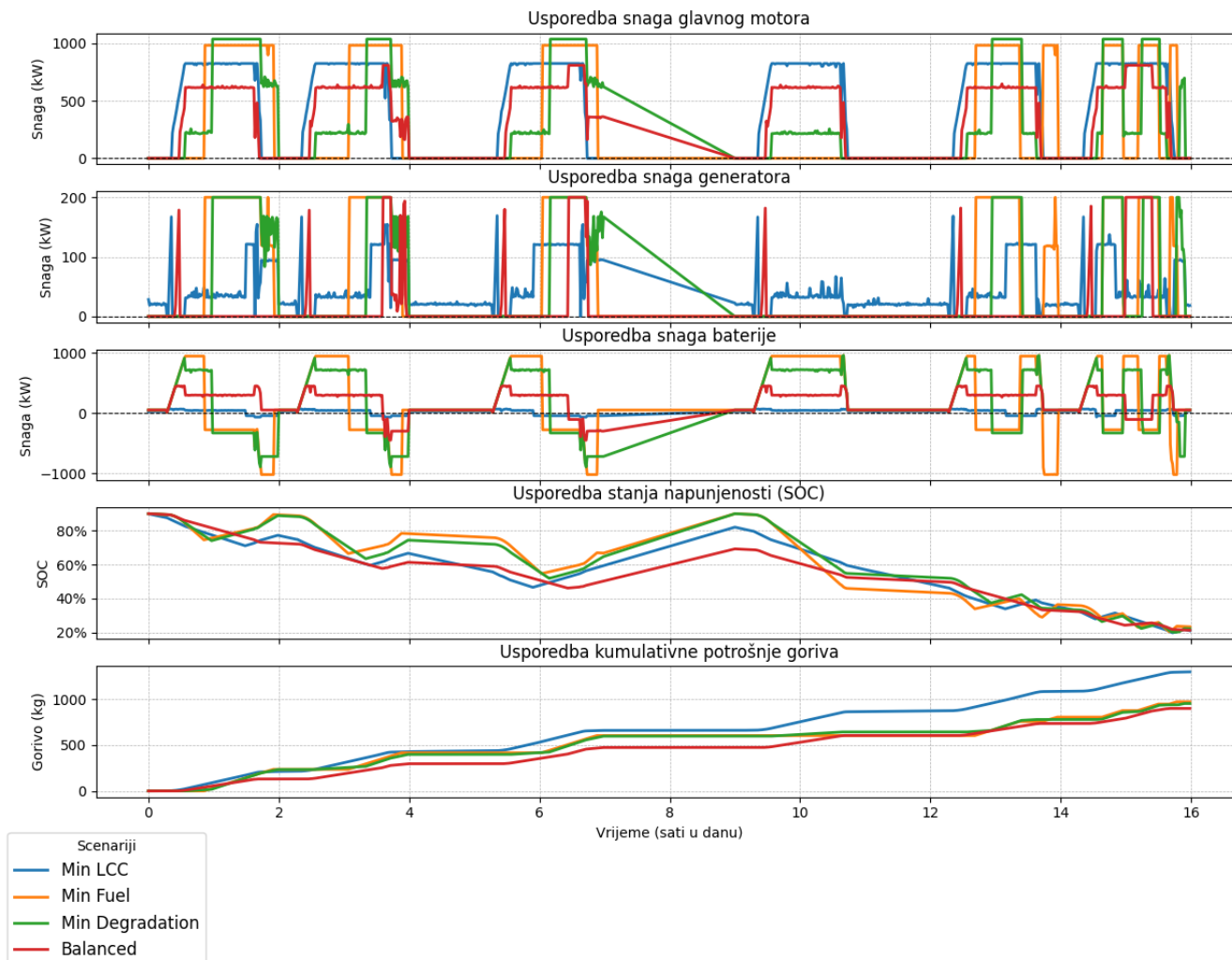
- **Dizajn:** Ova strategija postiže najnižu degradaciju (0.443) kombinacijom velike baterije (2,980 kWh) i najsnažnijeg glavnog motora (1,037 kW).
- **Analiza troškova (LCC):** Cijena ove strategije je visok LCC (5,470,875 \$), dominantno zbog visokog CAPEX-a.
- **Analiza degradacije:** Dijagram dekompozicije potvrđuje uspjeh strategije. Ukupna degradacija je najniža, a opterećenje je relativno ravnomjerno raspoređeno na sve komponente, s najmanjim zabilježenim doprinosom degradacije pomoćnog motora. Velik motor i velika baterija osiguravaju da nijedna komponenta nikada nije izložena visokom stresu.
- **Zaključak:** Ovo je tehnički najrobusnije rješenje koje osigurava najduži životni vijek, ali uz vrlo visoku cijenu.

“Balansirano” rješenje

- **Dizajn:** Balansirano rješenje nudi najzanimljiviji i najsofisticiraniji dizajn. Kombinira gotovo najveću bateriju (2,995 kWh) s jednim od najmanjih glavnih motora (809 kW) i najnižom C-stopom (0.1) izuzev Min LCC rješenja. Uz to, cilja na najdublje pražnjenje na kraju dana.
- **Analiza troškova (LCC):** Postiže značajno niži LCC (4,826,694 \$) od rješenja fokusiranih na performanse, uz dobro uravnotežen omjer između CAPEX-a i troškova goriva te bez troška zamjene baterije.
- **Analiza degradacije:** Dijagram degradacije otkriva ključ strategije. Doprinos degradacije baterije je apsolutno najmanji od svih promatranih rješenja. Degradacija je dominantno uzrokovana trošenjem motora.
- **Zaključak:** Ovo je strategija gdje baterija služi kao ogroman energetska spremnik, a ne kao izvor velike snage (zbog niske C-stope). Sustav se oslanja na veliku zalihu jeftine energije koju planira intenzivno trošiti tijekom dana. Zbog ogromnog kapaciteta, baterija nikada nije izložena stresu (duboki ciklusi u odnosu na ukupan kapacitet su mali), što objašnjava njezinu minimalnu degradaciju. Manji motor se koristi ciljano i efikasno. Ova vrsta efikasnog dizajna izravna je posljedica fleksibilnosti koju je uvela mogućnost dnevnog punjenja.

2. Usporedba reprezentativnih rješenja na primjeru prosječnog dana

Kako bi se u potpunosti razumjele strategije koje stoje iza svakog od četiri odabrana rješenja, ključno je analizirati njihovo ponašanje tijekom reprezentativnog operativnog dana. Slika 6.20 prikazuje vremenske serije ključnih parametara, gdje svaka boja odgovara jednom rješenju. Ključna vizualna razlika u odnosu na prethodni (CD-1) scenarij uočava se u središnjem periodu. Dijagram stanja napunjenosti bilježi jasan porast SOC-a. Ovaj period predstavlja implementirano dnevno punjenje, koje pruža dodatnu energiju sustavu i utječe na operativne strategije tijekom ostatka dana.



Slika 6.20: Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 2.

Analiza operativnih strategija

- **Rješenje “Najniži LCC” (plava linija):** Ovo rješenje se ponaša najslabije konvencionalnom dizelskom pogonu, što je direktna posljedica njegovog dizajna s minimalnom baterijom (319 kWh).
 - **Glavni motor** vrlo dinamično prati profil opterećenja, s čestim i naglim promjenama snage. Ovakav rad izvan optimalne točke je energetski neučinkovit.
 - **Stanje napunjenosti (SOC)** prati opći trend pražnjenja i punjenja kao i kod ostalih rješenja. Međutim, zbog izuzetno malog kapaciteta baterije, ove promjene predstavljaju malu količinu energije, dovoljnu praktički samo za pokrivanje osnovnog električnog opterećenja broda.
 - Budući da se sustav ne može osloniti na bateriju za vršna opterećenja, često se uključuje pomoćni motor.
 - **Posljedica:** Ova strategija, s oba motora koja rade u nestabilnim režimima, rezultira najvišom kumulativnom potrošnjom goriva.

- **Rješenja “Najmanja potrošnja goriva” i “Najniži indeks degradacije”**
 - Ova dva rješenja, iako s različitim ciljevima, primjenjuju vrlo sličnu, hibridnu strategiju, omogućenu velikim i snažnim baterijama.
 - **Glavni motor** radi u dugim intervalima na visokoj i gotovo konstantnoj snazi, držeći se tako u točki svoje najviše učinkovitosti. U periodima nižeg opterećenja, motor se u potpunosti gasi, a pogon postaje potpuno električni.
 - Sva razlika između konstantne snage motora i varijabilnog opterećenja plovila kompenzira se pomoću **baterije**, koja radi izuzetno agresivno, s velikim snagama pražnjenja i punjenja.
 - **Pomoćni motor** se koristi ciljano i sustavno, značajno rjeđe nego kod “Najniži LCC” rješenja.
 - **Posljedica:** Ova strategija rezultira globalno najnižom kumulativnom potrošnjom goriva, ali ne i u ovom dnevnom slučaju
- **Rješenje “Balansirano”**
 - Ovo rješenje primjenjuje jedinstvenu i sofisticiranu strategiju kompromisa, postižući izvrsne performanse.
 - **Glavni motor**, koji je najmanji od svih rješenja izuzev “Najniži LCC” (809 kW), ne prati opterećenje dinamično, niti radi potpuno statično, već operira u nekoliko diskretnih, stabilnih razina snage.
 - **Baterija** (treći graf), iako ogromnog kapaciteta (2,995 kWh), ima nisku C-stopu (0.10), stoga radi sa značajno manjim snagama od narančastog i zelenog rješenja. Njena uloga nije isporuka vršne snage, već služi kao veliki spremnik energije
 - **Posljedica:** Ova strategija postiže vrlo nisku globalnu kumulativnu potrošnju goriva (2,780,519 kg), značajno bolju od “Najniži LCC” rješenja te čak postiže najmanju potrošnju na ovom dnevnom i nameće se kao odličan kompromis između performansi i cijene.

Zaključak

Dnevna operativna analiza savršeno objašnjava cjeloživotne rezultate. Često i dinamično korištenje oba motora kod rješenja “Najniži LCC” objašnjava zašto je njegova degradacija dominantno uzrokovana trošenjem mehaničkih komponenti. Strategija optimizacije opterećenja kod rješenja “Najmanja potrošnja goriva” i “Najniži indeks degradacije” objašnjava njihovu superiornu učinkovitost, dok uravnotežena strategija “Balansiranog” rješenja dokazuje kako se pametnim dizajnom (velika baterija niske snage) može postići izvrstan tehno-ekonomski kompromis.

6.3 Slučaj 3: Strategija održavanja konstantnog stanja napunjenosti

Treći i posljednji analizirani scenarij istražuje fundamentalno drugačiju operativnu filozofiju, poznatu kao strategija održavanja stanja napunjenosti (Charge Sustaining - CS). Za razliku od prethodna dva (CD) scenarija, gdje je baterija služila kao primarni spremnik energije koja se planski trošila tijekom dana, u CS scenariju njezina je uloga redefinirana. Baterija ovdje funkcionira prvenstveno kao energetska i snažni međuspremnik. Glavni cilj sustava za upravljanje energijom (EMS) nije pražnjenje baterije, već održavanje njenog stanja napunjenosti (SOC) oko unaprijed zadane, konstantne vrijednosti, koja je i sama jedna od optimizacijskih varijabli. Ključna posljedica ovakvog pristupa jest potpuna energetska neovisnost broda o vanjskoj infrastrukturi za punjenje.

Ova strategija implementirana je kroz adaptivnu prirodu razvijenog A-ECMS kontrolera. Umjesto da slijedi unaprijed definiranu putanju od visokog početnog do niskog konačnog SOC-a, PI

regulator unutar kontrolera sada ima zadatak minimizirati odstupanje stvarnog SOC-a od ciljne, konstantne vrijednosti (SOCs). Svako odstupanje, bilo da je uzrokovano pražnjenjem baterije radi asistencije motoru ili njenim punjenjem viškom energije, registrira se kao greška koju regulator aktivno ispravlja. To čini moduliranjem ekvivalentnog faktora, čime potiče sustav da kroz rad glavnog ili pomoćnog motora vrati SOC na zadanu razinu

Ovaj scenarij uvodi potpuno drugačije tehno-ekonomske kompromise u odnosu na CD strategije, stoga se i očekivanja od rezultata optimizacije značajno razlikuju:

- **Optimalna veličina baterije:** Budući da je uloga baterije primarno vezana za isporuku snage (brzo primanje i davanje energije), a ne za dugotrajno skladištenje, očekuje se da će optimalna rješenja naginjati manjim i ekonomičnijim baterijskim sustavima.
- **Ukupna efikasnost i troškovi:** U pogledu ukupne efikasnosti i troškova, predviđa se da će CS sustavi, zbog termodinamičkih gubitaka pri proizvodnji električne energije na brodu, imati višu ukupnu potrošnju primarne energije i potencijalno viši LCC u usporedbi s CD sustavima koji koriste jeftiniju i efikasniju energiju s kopna.
- **Optimalna razina SOC-a:** Konačno, sama optimalna razina SOC-a oko koje će sustav oscilirati bit će rezultat finog kompromisa. Viša razina nudi veću rezervu snage za asistenciju motoru, ali može ubrzati kalendarsku degradaciju, dok niža razina pruža veći kapacitet za apsorpciju viška energije (npr. iz PTO-a), ali smanjuje raspoloživu snagu za asistenciju motoru.

Analiza koja slijedi istražiti će ove kompromise kako bi se definirale karakteristike optimalnog, energetski samodostatnog hibridnog sustava.

6.3.1 Makro analiza

Analiza započinje vizualizacijom Pareto fronte, nakon čega se ispituju rasponi optimalnih dizajnerskih varijabli te istražuje kako najutjecajnije varijable, poput kapaciteta baterije, oblikuju prirodu kompromisnih rješenja.

1. Pareto fronta

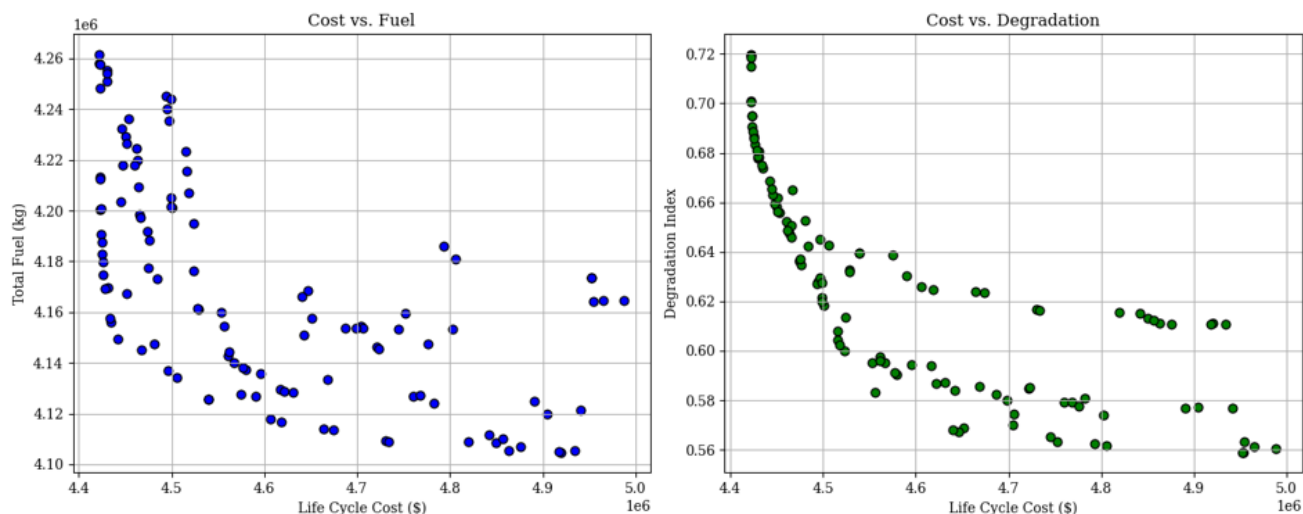
Vizualizacija Pareto fronte za CS scenarij otkriva fundamentalno drugačije odnose između ciljnih funkcija u usporedbi s prethodno analiziranim CD (Charge Depleting) scenarijima. Ove razlike direktna su posljedica energetske samodostatnosti sustava, odnosno nepostojanja vanjskog izvora za punjenje baterije.

Dijagram na slici 6.21 lijevo pokazuje da je kompromis između LCC-a i potrošnje goriva značajno manje izražen nego u CD slučajevima. Dok postoji blagi trend smanjenja goriva s porastom LCC-a, raspon mogućih ušteda je izuzetno uzak (približno 4.10 do 4.26 milijuna kg). Za razliku od jasne "L" krivulje u CD scenarijima, ovdje su rješenja grupirana u relativno vertikalnom klasteru.

Ovo je ključni pokazatelj ograničenja CS strategije: budući da se sva energija mora proizvesti na brodu, potencijal za uštedu goriva korištenjem baterije je inherentno limitiran. Baterija služi za optimizaciju rada motora, a ne kao spremnik jeftinije vanjske energije. Stoga, velika ulaganja u LCC (npr. kroz veću bateriju) donose tek marginalna poboljšanja u potrošnji goriva.

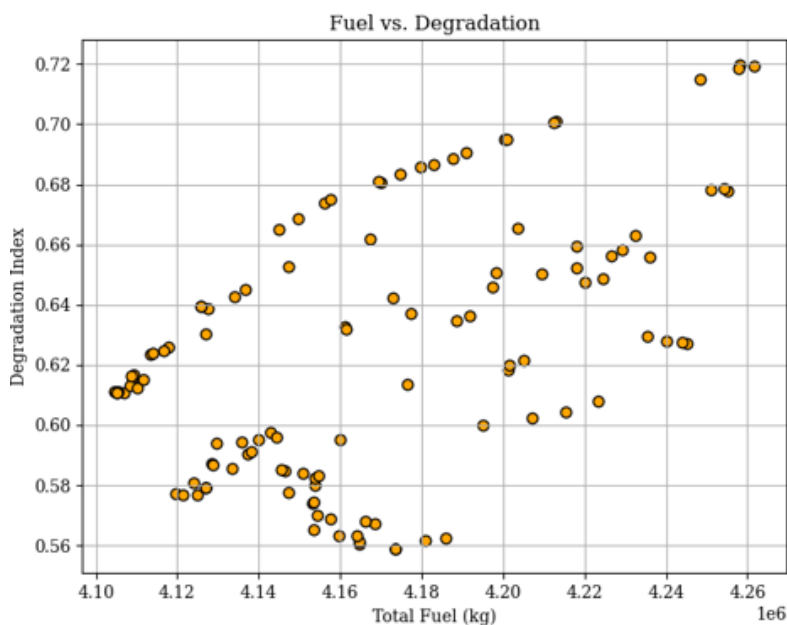
Dijagram na slici 6.21 desno pokazuje da je, za razliku od goriva, odnos između LCC-a i indeksa degradacije vrlo jasan i izražen, slično kao u CD slučajevima. Rješenja s niskim LCC-om imaju izrazito visok indeks degradacije (preko 0.7), dok se najniži indeksi (ispod 0.58) postižu uz značajno viši LCC.

Ovaj odnos ostaje snažan jer princip ostaje isti: ulaganje u veće i snažnije komponente (veći CAPEX, time i veći LCC) omogućuje njihov rad s manjim relativnim opterećenjem, što direktno smanjuje trošenje i produžuje životni vijek cijelog sustava. U CS scenariju, ovo se pokazuje kao dominantan i najefikasniji kompromis.



Slika 6.21: Prikaz odnosa količine potrošenog goriva (lijevo) i indeksa degradacije (desno) s troškovima životnog ciklusa kod Pareto rezultata, slučaj 3.

Dijagram na slici 6.22 otkriva najznačajniju i fundamentalnu razliku u odnosu na CD scenarije. Sinergija između niske potrošnje goriva i niske degradacije, koja je bila ključna karakteristika CD strategija, ovdje više ne postoji. Umjesto toga, uočava se kompleksan odnos koji nalikuje novom kompromisu:



Slika 6.22: Prikaz odnosa količine potrošenog goriva i indeksa degradacije kod Pareto rezultata, slučaj 3.

- Rješenja s apsolutno najnižom potrošnjom goriva ne postižu najnižu degradaciju.
- Da bi se postigao najniži mogući indeks degradacije, potrebno je prihvatiti blago povećanje potrošnje goriva.

Ova promjena je logična posljedica energetske bilance sustava. U CD slučaju, baterija je donosila jeftinu energiju, pa je njezino korištenje istovremeno smanjivalo i potrošnju goriva i opterećenje motora. U CS slučaju, energija potrošena iz baterije mora se kasnije nadoknaditi radom motora. Agresivna strategija za minimizaciju goriva (npr. često gašenje glavnog motora) može zahtijevati kasnije neefikasno paljenje pomoćnog motora samo radi punjenja baterije, što povećava njegovu degradaciju. S druge strane, strategija za minimalnu degradaciju može zahtijevati konstantan i stabilan rad većeg motora, što nije nužno režim s apsolutno najnižom specifičnom potrošnjom. Time se stvara novi, složeni kompromis između operativne efikasnosti i dugovječnosti sustava.

2. Rasponi optimalnih rješenja

Statistička analiza optimalnih rješenja za CS scenarij otkriva fundamentalno drugačiju dizajnersku filozofiju u usporedbi s CD strategijama. Gotovo svaka dizajnerska varijabla pokazuje izrazito drugačije trendove, što potvrđuje da energetska samodostatnost sustava zahtijeva potpuno novi pristup optimizaciji.

Tablica 6.7: Statistički sažetak za optimizacijske varijable i ciljne funkcije, slučaj 3.

	E_{batt} [kWh]	P_{ice} [kW]	P_{gen} [kW]	C_{rate} [–]	SOC_{CS} [–]	F_{hys} [–]	LCC [\$]	Ukupna potrošnja goriva [kg]	Index degradacije [–]
Min	500	800.02	300	0.3	0.4	0.05	4.42E+06	4.10E+06	0.56
Medijan	500.38	1021.61	300.15	0.3	0.4	0.2	4.54E+06	4.16E+06	0.62
Max	897.04	1199.79	364.1	0.36	0.49	0.3	4.99E+06	4.26E+06	0.72
Aritmetička sredina	565.15	1015.09	302.58	0.31	0.41	0.2	4.61E+06	4.17E+06	0.62
Asimetrija	1.61	-0.08	5.47	1.52	2.19	-0.57	0.78	0.42	0.35

Minimalistički baterijski sustav

- Najznačajnija razlika vidljiva je kod kapaciteta baterije. Dok su u CD slučajevima optimalni kapaciteti pokrivali širok raspon do 3000 kWh, u CS slučaju raspon je znatno uži i niži (500 – 897 kWh). Medijalna vrijednost je na samom minimumu raspona (500 kWh), a izrazito visoka pozitivna asimetrija (1.61) potvrđuje gotovo jednoglasnu preferenciju algoritma za najmanji mogući baterijski sustav. Ovo savršeno oslikava promjenu uloge baterije: ona više nije veliki spremnik jeftine energije, već isključivo kao asistencija motoru, te je stoga velika i skupa baterija nepotrebna i neisplativa.

Centralna uloga glavnog motora

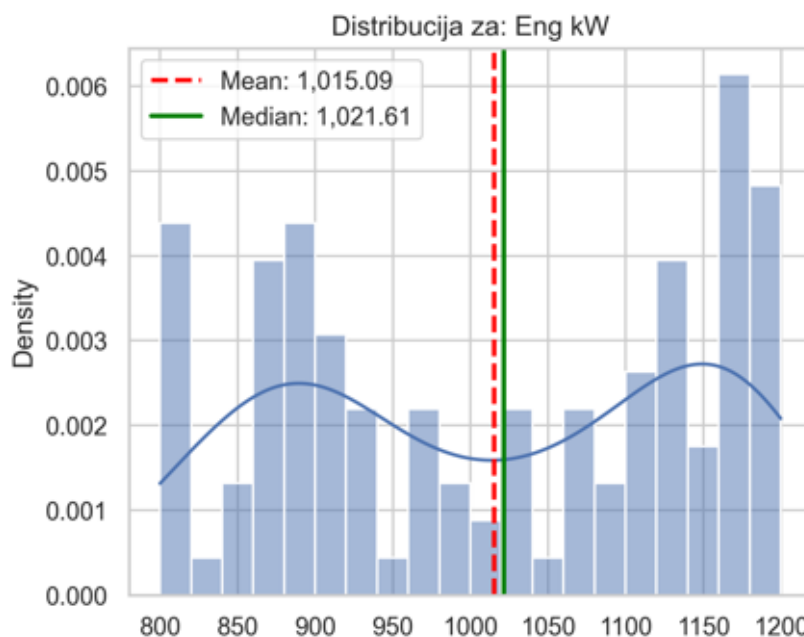
- **Snaga glavnog motora** : Iako statistički pokazatelji poput gotovo identične srednje vrijednosti (1,015 kW) i medijana (1,021 kW) te zanemarive asimetrije mogu upućivati na jednostavnu, simetričnu distribuciju, priloženi histogram otkriva izraženu bimodalnu prirodu optimalnih rješenja. Umjesto jednog optimuma, algoritam je identificirao dvije fundamentalno različite, ali jednako isplative dizajnerske filozofije:

1. **Klaster niže snage (oko 800-900 kW)**: Prva grupa rješenja favorizira motore manje snage. Ovo su vjerojatno ekonomski orijentirani dizajni koji smanjuju

početnu investiciju. Manji motor se u radu više oslanja na asistenciju baterije za pokrivanje vršnih opterećenja.

2. **Klaster više snage (oko 1150-1200 kW):** Druga, dominantnija grupa rješenja preferira motore značajno veće snage. Ovaj pristup je usmjeren na performanse i dugovječnost, gdje snažan motor može samostalno i bez naprezanja pokriti gotovo sve operativne potrebe, smanjujući time stres na ostatak sustava i osiguravajući efikasno dopunjavanje baterije.

Zanimljivo je da se srednja vrijednost i medijan nalaze u "dolini" između ova dva vrha, što predstavlja područje kompromisnih, ali u konačnici suboptimalnih rješenja. Optimizacija je jasno pokazala da je za CS strategiju isplativije odabrati jednu od ove dvije specijalizirane strategije nego se odlučiti za motor "srednje" snage.



Slika 6.23: Distribucija optimalnih rješenja za glavni motor, slučaj 3.

- **Snaga pomoćnog motora:** Unatoč očekivanjima da će pomoćni motor imati veću ulogu, optimizacija pokazuje ekstremnu sklonost minimizaciji njegove snage (medijan 300.15 kW, asimetrija 5.47). To sugerira da je najefikasnija strategija za dopunjavanje baterije korištenje viška snage glavnog motora (PTO), dok se pomoćni motor zadržava na minimumu kako bi se smanjili troškovi i koristio samo u nuždi.

Filozofija upravljanja

- **Širina pojasa histereze:** Iako osnovni statistički podaci pokazuju da su srednja vrijednost i medijan na istoj vrijednosti (0.20), histogram otkriva da ne postoji samo jedna preferirana širina pojasa. Umjesto toga, uočava se izražena trimodalna distribucija, s tri različite upravljačke strategije:

1. **Klaster uskog pojasa (~0.05):** Jedna skupina rješenja preferira vrlo uzak pojas, što ukazuje na strategiju agresivne i precizne regulacije. Kontroler u ovom slučaju reagira i na najmanja odstupanja SOC-a, ne dopuštajući sustavu da se udalji od zadane točke.

2. **Klaster srednjeg pojasa (~0.20):** Druga skupina rješenja grupirana je oko srednje vrijednosti, predstavljajući kompromisnu strategiju koja balansira između brze reakcije i dopuštanja sustavu da prirodnije fluktuiraju.
3. **Klaster širokog pojasa (~0.30):** Treća i najizraženija skupina preferira najširi mogući pojas, slično CD scenarijima. Ova strategija **pasivnije regulacije** minimizira broj upravljačkih akcija i dopušta SOC-u da se slobodnije kreće.

Postojanje ove tri odvojene filozofije sugerira da je optimalna širina pojasa histereze snažno povezana s fizičkim dizajnom sustava. Vjerojatno je da svaka od dvije prethodno identificirane skupine motora (manji i veći) zahtijeva drugačiji pristup regulaciji kako bi postigla najbolje performanse.

- **Ciljani SOC:** Optimizacija pokazuje izrazitu preferenciju za najnižu moguću razinu održavanja SOC-a (medijan 0.40, asimetrija 2.19). Održavanje baterije na nižoj razini napunjenosti ostavlja maksimalan prostor za apsorpciju viška energije generirane radom glavnog motora u optimalnoj točki, a istodobno smanjuje utjecaj kalendarskog starenja.

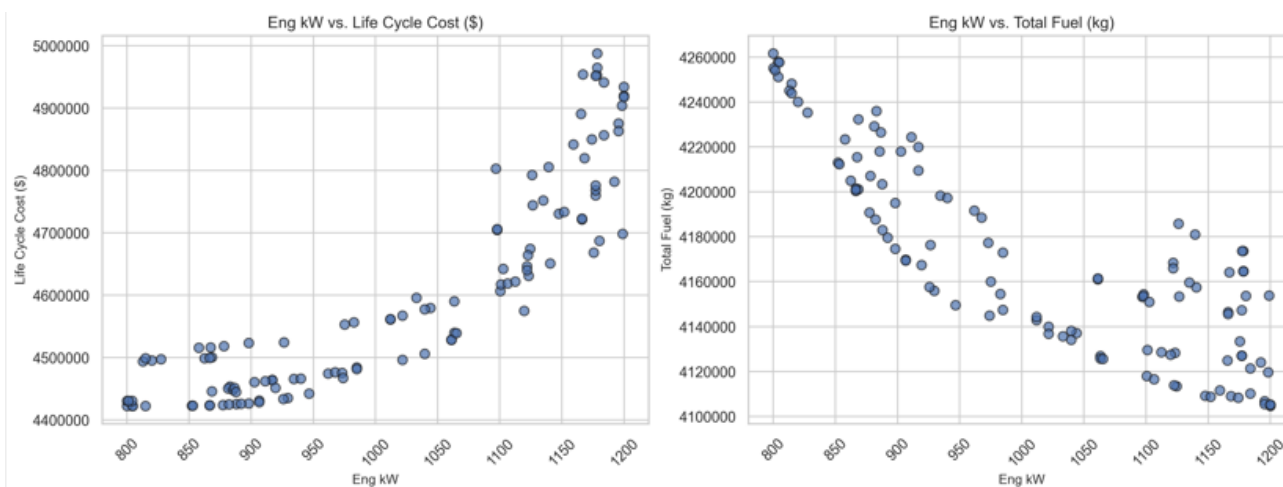
3. Utjecaj parametara dizajna na funkcije cilja

Nakon analize raspona i distribucija, ovo poglavlje detaljnije istražuje kako najutjecajniji parametri dizajna direktno oblikuju konačne performanse sustava u energetske samodostatnom CS scenariju.

Utjecaj snage glavnog motora

Dijagrami koji prikazuju utjecaj snage glavnog motora vizualno potvrđuju i dodatno pojašnjavaju prethodno uočenu bimodalnu prirodu optimalnih rješenja.

- **LCC, Potrošnja goriva i Degradacija:** Slike 6.24 i 6.25 otkrivaju jasne i međusobno povezane trendove. Dijagram utjecaja snage glavnog motora na LCC potvrđuje postojanje dviju filozofija dizajna: klaster rješenja niže snage (800-900 kW) koji postiže niske troškove životnog ciklusa, te klaster više snage (>1000 kW) gdje LCC raste s povećanjem motora. Ključni uvid dolazi iz druga dva dijagrama: odabir snažnijeg glavnog motora dovodi do konzistentnog i značajnog smanjenja i ukupne potrošnje goriva i, još izraženije, indeksa degradacije.
- **Objašnjenje:** U CS scenariju, gdje sustav ne dobiva energiju izvana, efikasnost i robusnost glavnog motora postaju presudni. Veći motor može pokriti veći dio profila opterećenja radeći u svom optimalnom, najefikasnijem području. Istovremeno, veća rezerva snage



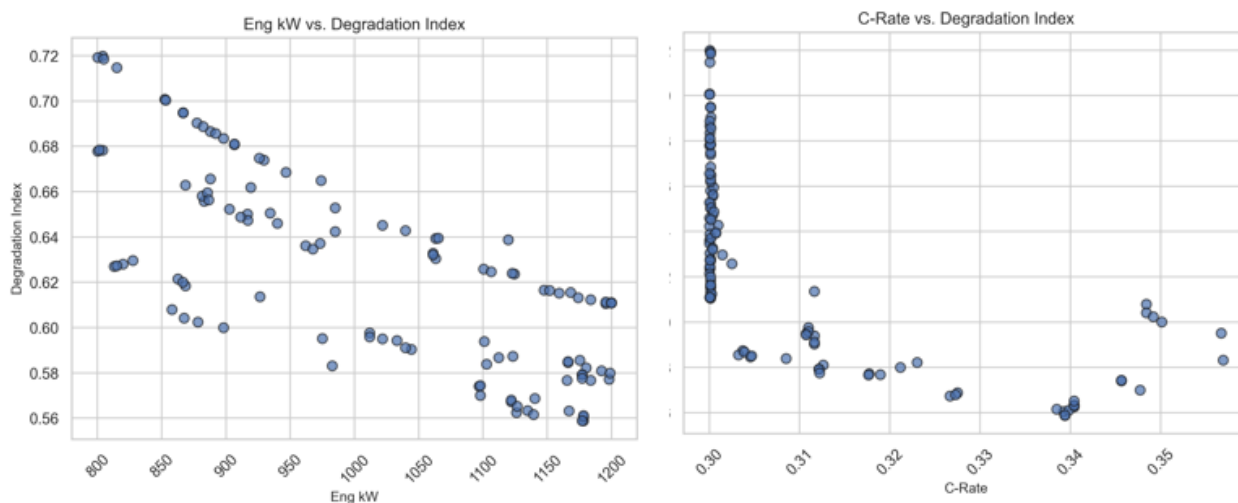
Slika 6.24: Utjecaj nazivne snage glavnog motora na LCC i ukupnu potrošnju goriva, slučaj 3.

znači da je motor izložen manjem stresu, a sustav se manje mora oslanjati na asistenciju baterije i pomoćnog motora. To direktno smanjuje broj radnih ciklusa i opterećenje svih komponenti, što rezultira nižom potrošnjom goriva i drastično nižim ukupnim indeksom degradacije. Snaga glavnog motora je, dakle, primarni parametar za postizanje vrhunskih operativnih performansi u ovom scenariju.

Utjecaj C-stope na degradaciju

Dijagram na slici 6.25 desno pruža uvid u suptilniju, sekundarnu ulogu baterije u postizanju maksimalne dugovječnosti sustava.

- **Analiza:** Na dijagramu se ističe velika skupina rješenja grupirana na minimalnoj C-stopi (0.30), koja rezultira širokim rasponom indeksa degradacije (od ~0.58 do preko 0.70). Ovo pokazuje da, uz osnovnu bateriju, konačna degradacija sustava gotovo isključivo ovisi o dimenzioniranju motora. Međutim, da bi se postigle apsolutno najniže vrijednosti indeksa degradacije (ispod 0.58), potreban je blagi porast C-stope (u rasponu od 0.31 do 0.36).
- **Zaključak:** Iako je snaga glavnog motora dominantan faktor, C-stopa baterije igra ključnu ulogu u pronalasku optimalnih rješenja. Nešto veća snaga baterije pruža kontroleru dodatnu fleksibilnost da apsorbira i najbrže i najoštrije promjene opterećenja koje bi inače opteretile glavni motor. To je tehno-ekonomski kompromis gdje malo dodatno ulaganje u sposobniju bateriju omogućuje postizanje najviše razine robusnosti i dugovječnosti cjelokupnog sustava.



Slika 6.25: Utjecaj nazivne snage glavnog motora na indeks degradacije (lijevo) i C-stope na indeks degradacije (desno), slučaj 3.

6.3.2 Mikro analiza

Za dubinsku analizu odabrana su četiri rješenja s Pareto fronte: tri ekstrema koja minimiziraju svaku od ciljnih funkcija pojedinačno te jedno kompromisno, “Balansirano” rješenje koje definirano na isti način kao i u prethodnim poglavljima.

1. Komparativna analiza reprezentativnih rješenja

Tablica 6.8 i slika 6.26 u nastavku pružaju kvantitativne i vizualne podatke za komparativnu analizu odabranih rješenja.

Tablica 6.8: Prikaz parametara dizajna i funkcija cilja za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 3.

	Najniži LCC	Najniža potrošnja goriva	Najniži indeks degradacije	Balansirano
E_{batt} [kWh]	500	886	771	500
P_{ice} [kW]	800	1,200	1,178	1,012
P_{gen} [kW]	300	300	300	300
C_{rate} [–]	0.3	0.3	0.34	0.31
SOC_{end} [–]	0.4	0.4	0.44	0.4
F_{hys} [–]	0.05	0.3	0.18	0.28
LCC [\$]	4,422,139	4,919,993	4,952,941	4,561,360
Ukupna potrošnja goriva [kg]	4,261,732	4,104,588	4,173,611	4,142,961
Index degradacije	0.719	0.611	0.559	0.598

1. Rješenje “Najniži LCC”:

- **Dizajn:** Ovo rješenje kombinira najmanju bateriju (500 kWh) i najmanji glavni motor (800 kW). Cilj je očito minimizacija početnog ulaganja (CAPEX).
- **Analiza troškova (LCC):** Gornji dijagram na slici 6.26 potvrđuje da je ova strategija uspješna u smanjenju CAPEX-a, koji je najniži od svih rješenja. Međutim, ta ušteda dolazi po cijenu najviših troškova goriva, koji su dominantna komponenta ukupnog LCC-a.
- **Analiza degradacije:** S indeksom od 0.719, ovo je degradacijski najlošije rješenje. Za razliku od ostalih rješenja gdje degradacija motora dominira, ovdje sve tri komponente podjednako značajno doprinose ukupnom indeksu. Posebno je važno naglasiti da ovo rješenje ima daleko najveći doprinos degradacije baterije od svih promatranih slučajeva.
- **Zaključak:** Minimalna početna investicija rezultira sustavom u kojem je mali motor konstantno preopterećen, što dovodi do neefikasne potrošnje. Istovremeno, mala baterija je izložena visokom stresu jer mora neprestano kompenzirati dinamička opterećenja, što uzrokuje njezinu ubranu degradaciju uz degradaciju oba motora.

2. Rješenje “Najniža potrošnja goriva”

- **Dizajn:** Za postizanje najniže potrošnje goriva (4,104,588 kg), algoritam je odabrao najsnažniji glavni motor (1,200 kW) uparen s baterijom većeg kapaciteta (886 kWh).
- **Analiza troškova (LCC):** Visok LCC ovog rješenja direktna je posljedica visokog CAPEX-a zbog velikog motora i baterije. Uspjeh strategije vidljiv je u najmanjem udjelu troškova goriva od svih rješenja.

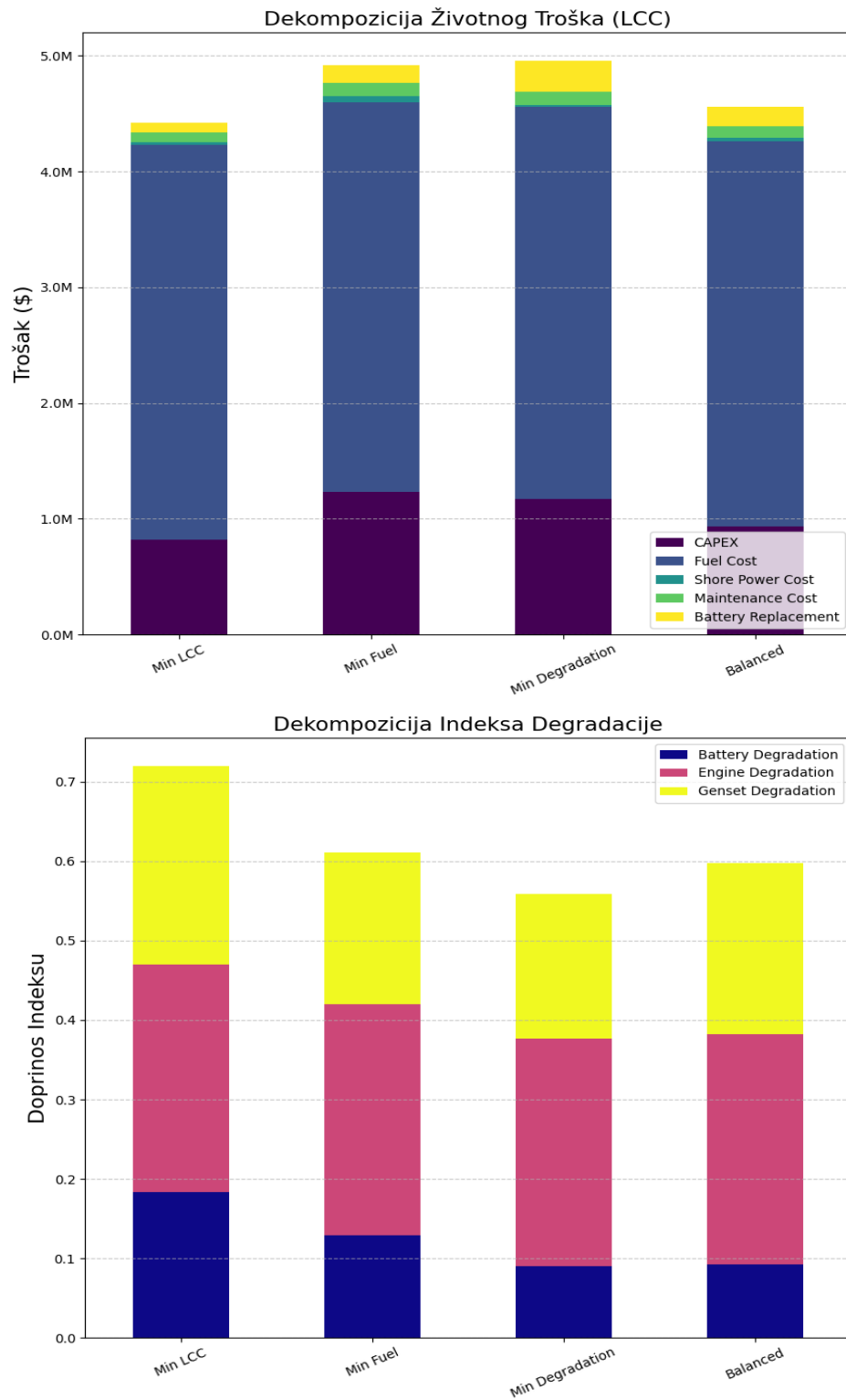
- **Analiza degradacije:** Iako je najefikasnije po pitanju goriva, ovo rješenje ima drugi najviši indeks degradacije (0.611). Dekompozicija pokazuje da je i ovdje degradacija motora dominantan faktor.
- **Zaključak:** Strategija se svodi na korištenje velikog motora koji većinu vremena radi u svom optimalnom režimu. Iako se time postiže maksimalna efikasnost, visoka cijena komponenti i činjenica da motor i dalje akumulira značajan broj radnih sati objašnjavaju visok LCC i relativno visoku degradaciju.

3. Rješenje “Najniži indeks degradacije”

- **Dizajn:** Najniža degradacija (0.559) postignuta je kombinacijom snažnog motora (1,178 kW) i baterije srednjeg kapaciteta (771 kWh) s najvišom C-stopom (0.34).
- **Analiza troškova (LCC):** Ovo je najskuplje rješenje (4,952,941\$), s najvećim zabilježenim CAPEX-om, što odražava ulaganje u dugovječnost.
- **Analiza degradacije:** Dijagram dekompozicije potvrđuje uspjeh strategije. Apsolutni doprinosi svih komponenti, a posebno glavnog motora, najmanji su od svih rješenja. Snažan motor i sposobna baterija osiguravaju da nijedna komponenta nije izložena prevelikom stresu.
- **Zaključak:** Ovo je pristup predimenzioniranja s ciljem maksimalne dugovječnosti, koji postiže cilj, ali uz najvišu cijenu.

4. “Balansirano” rješenje: Sofisticirani kompromis

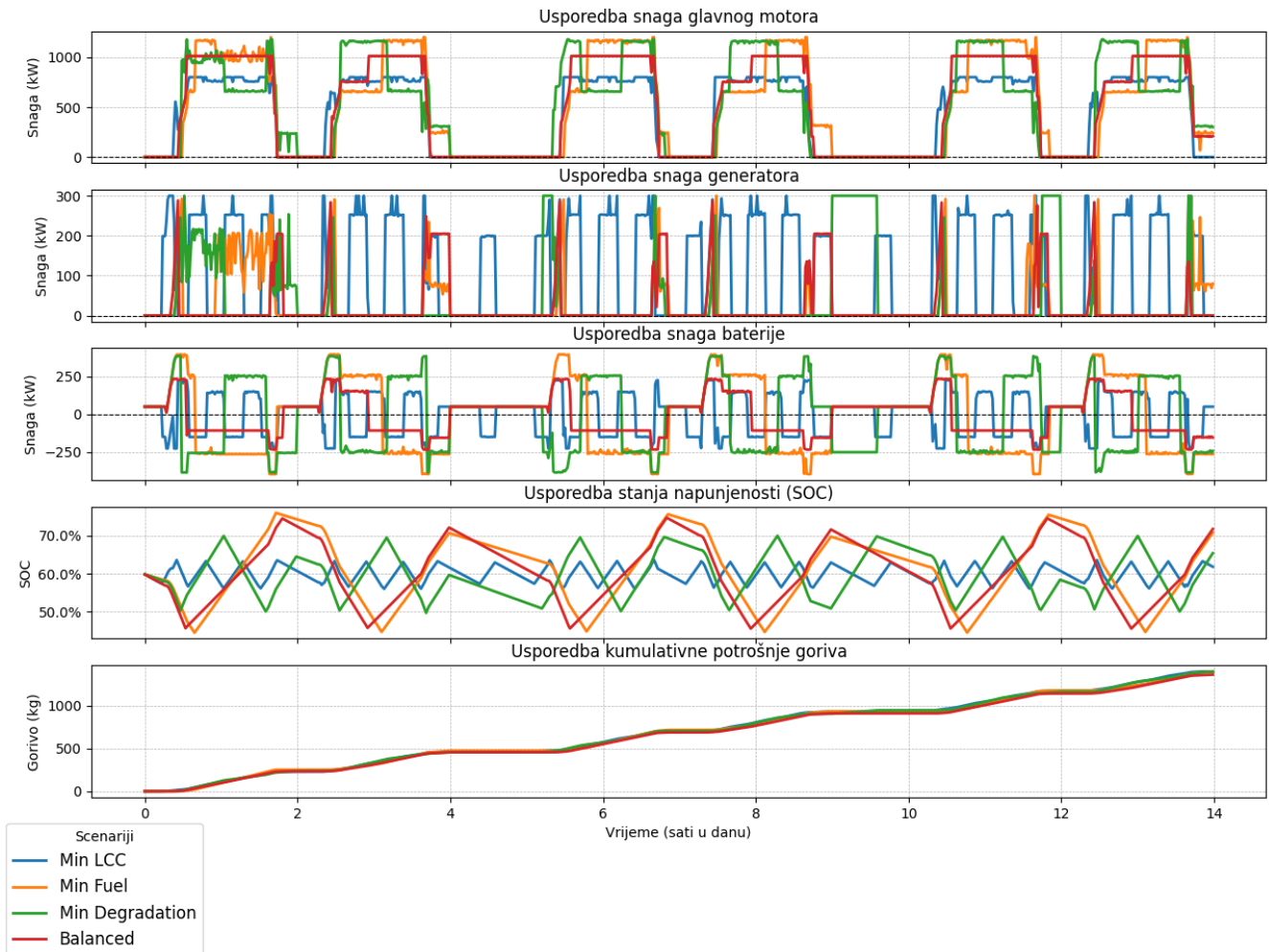
- **Dizajn:** Balansirano rješenje otkriva najsofisticiraniju strategiju, kombinirajući malu bateriju (500 kWh), slično “Najniži LCC” rješenju, ali s velikim i efikasnim glavnim motorom (1,012 kW).
- **Analiza troškova (LCC):** Postiže drugi najniži LCC. Dijagram pokazuje odličnu ravnotežu između CAPEX-a (koji je veći od “Najniži LCC” zbog motora) i troškova goriva (koji su značajno niži).
- **Analiza degradacije:** Indeks degradacije (0.598) je odličan kompromis, bolji od “Najniži LCC” i “Najniža potrošnja goriva” rješenja. Opet, degradacija je dominantno vezana uz motor.
- **Zaključak:** Ovo rješenje pokazuje da je u CS scenariju ključ dugoročnih performansi pravilno dimenzioniran glavni motor. Optimizacija je utvrdila da je isplativije investirati u veći motor, a zadržati minimalnu, jeftinu bateriju koja služi samo kao pomoćni buffer. Time se izbjegava visok CAPEX velikih baterija, a istovremeno se ostvaruju prednosti efikasnosti i dugovječnosti snažnog motora, što se pokazuje kao tehno-ekonomski najrobusniji pristup.



Slika 6.26: Prikaz dekompoziranog LCC-a i indeksa degradacije za 4 reprezentativna rješenja, slučaj 3.

. Usporedba reprezentativnih rješenja na primjeru prosječnog dana

Završna analiza pruža vizualni uvid u operativne strategije četiriju reprezentativna rješenja i objašnjava kako njihove različite dizajnerske filozofije dovode do specifičnih cjeloživotnih performansi. Dijagrami prikazuju izuzetno dinamičnu interakciju svih komponenti, što je karakteristika CS sustava koji mora neprestano balansirati opterećenje i stanje napunjenosti baterije. Slika 6.27 prikazuje vremenske serije ključnih parametara, gdje svaka boja odgovara jednom rješenju.



Slika 6.27: Prikaz ponašanja strategije upravljanja energijom za četiri reprezentativna rješenja, slučaj 3.

Rješenje “Najniži LCC” (plava linija)

Ova strategija je posljedica izbora najmanjeg glavnog motora (800 kW) i najmanje baterije (500 kW).

- **Rad motora:** Glavni motor (prvi graf) radi gotovo neprekidno na svojoj maksimalnoj snazi. Zbog nedovoljne snage, sustav se intenzivno oslanja na pomoćni motor (drugi graf), koji se pali i gasi u vrlo kratkim intervalima kako bi pokrio manjak snage.
- **Rad baterije i SOC:** Baterija (treći graf) je pod konstantnim stresom, s vrlo brzim i čestim ciklusima punjenja i pražnjenja. Upravljačka strategija s vrlo uskim pojasom histereze

(0.05) rezultira agresivnom i brzom oscilacijom SOC-a oko zadane vrijednosti od 40 % (četvrti graf).

- **Zaključak:** Sustav je kronično poddimenzioniran. Oba motora rade neefikasno i pod konstantnim opterećenjem, a baterija trpi visoku cikličku degradaciju. To direktno objašnjava zašto ovo rješenje ima najvišu potrošnju goriva i najviši indeks degradacije, s podjednako visokim trošenjem svih komponenti.

Rješenja “Najmanja potrošnja goriva” (narančasta) i “Najniži indeks degradacije” (zelena)

Ova rješenja koriste svoje snažne glavne motore (1,200 kW i 1,178 kW) i veće baterije kako bi postigla superiorne performanse.

- **Rad motora:** Njihova strategija temelji se na radu glavnog motora u diskretnim vremenskim blokovima na visokoj, optimalnoj snazi, nakon čega slijede dugi periodi u kojima je motor potpuno ugašen. Tijekom tih perioda, cjelokupno opterećenje preuzima baterija.
- **Rad baterije i SOC:** Širi pojasevi histereze (0.30 i 0.18) omogućuju sporije i dublje zamahe SOC-a, dajući sustavu fleksibilnost da se osloni na bateriju na duže vrijeme. “Najniži indeks degradacije” rješenje (zelena linija) koristi ovu strategiju najefikasnije, postižući najduže periode gašenja motora, što rezultira najmanjim brojem radnih sati i najnižom degradacijom.
- **Zaključak:** Ova rješenja postižu najnižu potrošnju goriva i degradaciju jer omogućuju motorima rad isključivo u najefikasnijim režimima. Cijena je, naravno, visok početni trošak takvih komponenti.

Rješenje “Balansirano” (crvena linija):

Balansirano rješenje primjenjuje inteligentnu hibridnu strategiju.

- **Rad motora:** Poput rješenja visokih performansi, i ono koristi svoj snažni glavni motor (1,012 kW) u efikasnim, diskretnim blokovima, s periodima gašenja.
- **Rad baterije i SOC:** Budući da je uparen s malom baterijom (500 kWh), njezino korištenje je intenzivno, sa značajnim i brzim ciklusima punjenja i pražnjenja, sličnije “Najniži LCC” rješenju. Širok pojas histereze (0.28) omogućuje fleksibilno upravljanje.
- **Zaključak:** Dnevni profil savršeno ilustrira zašto je ovo rješenje robustan kompromis. Ono koristi prednosti snažnog i efikasnog motora (što smanjuje potrošnju goriva i degradaciju motora), ali ih uparuje s jeftinom, malom baterijom (što smanjuje CAPEX). Iako baterija i pomoćni motor rade intenzivnije nego kod “Najniži indeks degradacije” rješenja, ukupne performanse predstavljaju najbolji tehno-ekonomski kompromis.

7. ZAKLJUČAK

Ovaj doktorski rad bavio se jednim od mnogih izazova u modernoj brodogradnji: problemom dimenzioniranja i upravljanja energijom brodskih hibridnih energetske sustava. Cilj je bio razviti sveobuhvatnu metodologiju koja je u stanju, na temelju dugoročnog profila opterećenja, istovremeno optimizirati i fizičke dimenzije komponenti i strategiju upravljanja energijom u stvarnom vremenu, uzimajući u obzir složene tehničke, ekonomske i eksploatacijske faktore.

U tu svrhu razvijen je i primijenjen inovativan dvostupanjski optimizacijski okvir. Na višem stupnju, višeciljni genetski algoritam NSGA-II istraživao je prostor mogućih dizajna (dimenzije komponenti i ključni parametri upravljanja), dok je na nižem stupnju detaljna simulacija životnog ciklusa, vođena naprednom A-ECMS strategijom upravljanja, evaluirala performanse svakog pojedinog rješenja kroz period od deset godina.

Provedeno istraživanje je u potpunosti potvrdilo početnu hipotezu da je dvostupanjskom optimizacijom moguće precizno dimenzionirati komponente i optimizirati strategiju upravljanja. Razvijeni okvir uspješno je balansirao suprotstavljene ciljeve, istovremeno minimizirajući trošak životnog ciklusa (LCC) te zadovoljavajući tehničke zahtjeve za energetskom učinkovitosti i dugovječnosti sustava.

Analiza tri različita operativna scenarija dovela je do ključnih spoznaja o tehno-ekonomskoj isplativosti hibridizacije:

- **Ekonomska neisplativost CS strategije:** Analiza je nedvosmisleno pokazala da je strategija održavanja stanja napunjenosti (CS), koja podrazumijeva potpunu energetsku samodostatnost, u promatranim uvjetima ekonomski neisplativa. Nemogućnost korištenja jeftinije energije s kopna rezultira višim troškovima goriva i LCC-om, čineći ovu opciju manje atraktivnom za plovila s definiranim rutama i pristupom obalnoj mreži.
- **Superiornost CD strategija:** Nasuprot tome, strategije pražnjenja baterije (CD) pokazale su se znatno superiornijima. Mogućnost punjenja s kopna fundamentalno mijenja ekonomsku računicu, omogućujući značajne uštede u gorivu koje mogu opravdati višu početnu investiciju u baterijski sustav.
- **Utjecaj infrastrukture na odabir (CD-1 vs. CD-2):** Odabir između sustava bez dnevnog punjenja (CD-1) i onog s tom mogućnošću (CD-2) direktno ovisi o dostupnosti i isplativosti obalne infrastrukture. Iako oba sustava nude značajna poboljšanja, CD-2 scenarij otključava dodatni potencijal za uštedu goriva i omogućuje razvoj sofisticiranijih, neintuitivnih dizajna koji postižu bolji kompromis između cijene i performansi.

Kroz ovo istraživanje ostvareni su svi planirani znanstveni doprinosi:

- Razvijena je i uspješno primijenjena metoda dvostupanjske optimizacije koja na jedinstven način integrira problem dimenzioniranja komponenti s problemom upravljanja energijom u stvarnom vremenu, što predstavlja značajan metodološki napredak u odnosu na sekvencijalne i pojednostavljene pristupe.
- Pokazano je da se strategija upravljanja temeljena na A-ECMS-u s varijabilnim faktorom ekvivalencije može uspješno dinamički prilagođavati složenom profilu opterećenja, postižući rezultate koji su, iako sub-optimalni, vrlo blizu globalnom optimumu uz drastično smanjenje računalne zahtjevnosti.
- Istraživanje je kvantitativno dokazalo kako profil opterećenja i odabrana makro-strategija (CS, CD-1, CD-2) presudno utječu na optimalno dimenzioniranje komponenti. Dokazano

je da CS sustavi preferiraju baterije manjeg kapaciteta za pokrivanje trenutnih opterećenja i precizno dimenzionirane motore, dok CD sustavi teže baterijama dosta većeg kapaciteta, a uloga pomoćnih motora postaje gotovo suvišna u slučaju dostupnosti dnevnog punjenja.

Razvijena metodologija predstavlja moćan alat za projektante hibridnih sustava, omogućujući im da unutar nekoliko dana donesu informirane odluke o ključnim parametrima dizajna koje imaju dugoročne tehno-ekonomske posljedice. Istraživanje je pokazalo da je profil opterećenja najkritičniji ulazni podatak u procesu dimenzioniranja. Konkretno odluke, poput odabira kapaciteta baterije, presudno ovise o operativnom kontekstu, odnosno duljini rute i dostupnosti punjenja, a ne o općenitim pravilima.

Iako je postavljen robustan okvir, ovo istraživanje ima određena ograničenja koja ujedno otvaraju i vrata za budući rad. Uočeno je da je optimizacija u CD scenarijima konzistentno birala najširi mogući pojas histereze kako bi se osigurala stabilnost, što je ponekad kompromitiralo precizno postizanje ciljnog konačnog SOC-a. Buduća istraživanja mogla bi istražiti dinamičku promjenu širine pojasa histereze, koja bi se sužavala pri kraju putovanja kako bi se osigurala veća preciznost uz zadržavanje fleksibilnosti.

Ostale smjernice za buduća istraživanja uključuju:

- Razvoj složenijih modela komponenti, posebno motora s unutarnjim izgaranjem, uključujući mape efikasnosti ovisne o broju okretaja.
- Uključivanje emisija štetnih plinova (NO_x, SO_x, CO₂) kao dodatnih funkcija cilja uz potrošnju goriva.
- Integracija drugih energetske pretvornika, poput gorivnih članaka ili solarnih panela, u hibridni sustav.
- Istraživanje širih granica optimizacijskih parametara i primjena metodologije na drugačije profile opterećenja karakteristične za druge tipove plovila.

U konačnici, ovaj rad ne samo da pruža konkretna rješenja za promatrani problem, već nudi i robustan, proširiv okvir za buduća istraživanja i razvoj naprednih, ekološki prihvatljivih i ekonomski optimiziranih brodskih energetske sustava.

LITERATURA

- [1] N. Gray, S. McDonagh, R. O'Shea, B. Smyth, and J. D. Murphy, "Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors," *Advances in Applied Energy*, vol. 1, p. 100008, 2021.
- [2] T.-H. Joung, S.-G. Kang, J.-K. Lee, and J. Ahn, "The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050," *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 4, no. 1, pp. 1-7, 2020.
- [3] J. E. Jonson, M. Gauss, M. Schulz, J.-P. Jalkanen, and H. Fagerli, "Effects of global ship emissions on European air pollution levels," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 20, no. 19, pp. 11399-11422, 2020.
- [4] P. Ghimire, M. Zadeh, S. Thapa, J. Thorstensen, and E. Pedersen, "Operational Efficiency and Emissions Assessment of Ship Hybrid Power Systems with Battery; Effect of Control Strategies," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024.
- [5] D. Oh, D.-S. Cho, and T.-W. Kim, "Design and evaluation of hybrid propulsion ship powered by fuel cell and bottoming cycle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 22, pp. 8273-8285, 2023.
- [6] W. Litwin, W. Leśniewski, D. Piątek, and K. Niklas, "Experimental research on the energy efficiency of a parallel hybrid drive for an inland ship," *Energies*, vol. 12, no. 9, p. 1675, 2019.
- [7] R. Geertsma, R. Negenborn, K. Visser, and J. Hopman, "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments," *Applied energy*, vol. 194, pp. 30-54, 2017.
- [8] J. Zhang *et al.*, "A bi-level program for the planning of an islanded microgrid including CAES," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 2768-2777, 2016.
- [9] C. Shang, D. Srinivasan, and T. Reindl, "Generation-scheduling-coupled battery sizing of stand-alone hybrid power systems," *Energy*, vol. 114, pp. 671-682, 2016.
- [10] L. Xu, C. D. Mueller, J. Li, M. Ouyang, and Z. Hu, "Multi-objective component sizing based on optimal energy management strategy of fuel cell electric vehicles," *Applied energy*, vol. 157, pp. 664-674, 2015.
- [11] E. Silvas, E. Bergshoeff, T. Hofman, and M. Steinbuch, "Comparison of bi-level optimization frameworks for sizing and control of a hybrid electric vehicle," in *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014: IEEE, pp. 1-6.
- [12] C. Dere and C. Deniz, "Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency," *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 206-217, 2019.
- [13] P. Ni, X. Wang, and H. Li, "A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines," *Fuel*, vol. 279, p. 118477, 2020.
- [14] T. Vidović, J. Šimunović, G. Radica, and Ž. Penga, "Systematic overview of newly available technologies in the green maritime sector," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 641, 2023.
- [15] O. B. Inal, J.-F. Charpentier, and C. Deniz, "Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111965, 2022.

- [16] F. Mylonopoulos, H. Polinder, and A. Coraddu, "A comprehensive review of modeling and optimization methods for ship energy systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32697-32707, 2023.
- [17] S. E. Damian *et al.*, "Review on the challenges of hybrid propulsion system in marine transport system," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, p. 105983, 2022.
- [18] H. P. Nguyen *et al.*, "The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review," *International Transactions on electrical energy systems*, vol. 31, no. 11, p. e12580, 2021.
- [19] W. Corporation. "Wärtsilä extends leadership in hybrid vessel segment." <https://www.wartsila.com/media/news/20-05-2022-wartsila-extends-leadership-in-hybrid-vessel-segment-3104424> (accessed 27th October, 2024).
- [20] R. A. Ltd. "Port of Luleå 36 Metre Hybrid Icebreaker Tug." <https://ral.ca/2019/07/05/port-of-lulea-36-metre-hybrid-icebreaker-tug/> (accessed 27th October, 2024).
- [21] H. press. "World's first hybrid cruise ship completes sea trial." <https://press.hurtigruten.com/pressreleases/worlds-first-hybrid-cruise-ship-completes-sea-trial-2917534> (accessed 27th October, 2024).
- [22] O. energy. "World's First Electric Car Ferry Enters Service." <https://www.offshore-energy.biz/worlds-first-electric-car-ferry-enters-service/> (accessed 27th October, 2024).
- [23] D. M. Authority. "The longest journey with an electric ferry has taken place in Denmark." <https://www.dma.dk/news/2019/august/the-longest-journey-with-an-electric-ferry-has-taken-place-in-denmark> (accessed 27th October, 2024).
- [24] T. Brown. "Viking Energy to be retrofit for ammonia fuel in 2024." <https://ammoniaenergy.org/articles/viking-energy-to-be-retrofit-for-ammonia-fuel-in-2024/> (accessed 27th October, 2024).
- [25] CalMac. "Third hybrid ferry launches on the Clyde." <https://www.calmac.co.uk/press/ferry-launch> (accessed 27th October, 2024).
- [26] Crowley. "Crowley Accepts Delivery of eWolf, the First Fully Electric Tugboat in the U.S." <https://www.crowley.com/news-and-media/press-releases/crowley-accepts-delivery-of-ewolf-the-first-fully-electric-tugboat-in-the-u-s/> (accessed 27th October, 2024).
- [27] B. Ferries. "Brittany Ferries' Saint-Malo will be the largest hybrid-vessel ever built." <https://brittanyferriesnewsroom.com/brittany-ferries-saint-malo-will-be-the-largest-hybrid-vessel-ever-built/> (accessed 27th October, 2024).
- [28] J. Meng *et al.*, "Advances in structure and property optimizations of battery electrode materials," *Joule*, vol. 1, no. 3, pp. 522-547, 2017.
- [29] R. Yin *et al.*, "Risk analysis for marine transport and power applications of lithium ion batteries: A review," *Process Safety and Environmental Protection*, 2023.
- [30] S. De Breucker, E. Peeters, and J. Driesen, "Possible applications of plug-in hybrid electric ships," in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009: IEEE, pp. 310-317.
- [31] P. Taheri, M. Yazdanpour, and M. Bahrami, "Analytical assessment of the thermal behavior of nickel-metal hydride batteries during fast charging," *Journal of Power Sources*, vol. 245, pp. 712-720, 2014.
- [32] Y. Lu, "Study on the performance of lithium iron phosphate battery based on its application in transportation field," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2798, no. 1: IOP Publishing, p. 012019.

- [33] G. Lucà Trombetta, S. G. Leonardi, D. Aloisio, L. Andaloro, and F. Sergi, "Lithium-ion batteries on board: A review on their integration for enabling the energy transition in shipping industry," *Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1019, 2024.
- [34] M. Bayraktar and M. Nuran, "Multi-criteria decision making using TOPSIS method for battery type selection in hybrid propulsion system," *Transactions on Maritime Science*, vol. 11, no. 01, pp. 45-53, 2022.
- [35] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *Journal of power sources*, vol. 226, pp. 272-288, 2013.
- [36] A. Haseltalab and R. R. Negenborn, "Predictive on-board power management for all-electric ships with DC distribution architecture," in *OCEANS 2017-Aberdeen*, 2017: IEEE, pp. 1-8.
- [37] D. N. How, M. Hannan, M. H. Lipu, and P. J. Ker, "State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 136116-136136, 2019.
- [38] A. Haseltalab, R. R. Negenborn, and G. Lodewijks, "Multi-level predictive control for energy management of hybrid ships in the presence of uncertainty and environmental disturbances," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 3, pp. 90-95, 2016.
- [39] L. He, Z. Gu, Y. Zhang, H. Jing, and P. Li, "Review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles: advances, challenges, and outlook," *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 7, pp. 4835-4857, 2023.
- [40] X. Feng, D. Ren, X. He, and M. Ouyang, "Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries," *Joule*, vol. 4, no. 4, pp. 743-770, 2020.
- [41] P. Wu and R. Bucknall, "Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry," *International journal of hydrogen energy*, vol. 45, no. 4, pp. 3193-3208, 2020.
- [42] E. K. Dedes, D. A. Hudson, and S. R. Turnock, "Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping," *Energy policy*, vol. 40, pp. 204-218, 2012.
- [43] S. Karimi, M. Zadeh, and J. A. Suul, "Shore charging for plug-in battery-powered ships: Power system architecture, infrastructure, and control," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 47-61, 2020.
- [44] J. Hansson, S. Månsson, S. Brynolf, and M. Grahn, "Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders," *Biomass and Bioenergy*, vol. 126, pp. 159-173, 2019.
- [45] Y. Bicer and I. Dincer, "Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 9, pp. 4583-4596, 2018.
- [46] F. M. Guangul and G. T. Chala, "A comparative study between the seven types of fuel cells," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 13, no. 3, pp. 185-194, 2020.
- [47] R. Delpizzo, *Fuel Cells-A New Wave of Marine Power Technology?* 2011.
- [48] J. J. De-Troya, C. Alvarez, C. Fernández-Garrido, and L. Carral, "Analysing the possibilities of using fuel cells in ships," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2853-2866, 2016.
- [49] J. Baschuk and X. Li, "Carbon monoxide poisoning of proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Energy Research*, vol. 25, no. 8, pp. 695-713, 2001.

- [50] T. Tronstad, H. H. Åstrand, G.-P. Haugom, and L. Langfeldt, "Study on the use of fuel cells in shipping," 2017.
- [51] A. Haseltalab, L. van Biert, H. Sapra, B. Mestemaker, and R. R. Negenborn, "Component sizing and energy management for SOFC-based ship power systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 245, p. 114625, 2021.
- [52] V. Cigolotti, M. Genovese, and P. Fragiaco, "Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4963, 2021.
- [53] T. S. Karakatsanis, "Optimization and Performance Evaluation of PM Motor and Induction Motor for Marine Propulsion Systems," *Applied System Innovation*, vol. 8, no. 3, p. 58, 2025.
- [54] N. Bennabi, H. Menana, J.-F. Charpentier, J.-Y. Billard, and B. Nottelet, "Design and comparative study of hybrid propulsions for a river ferry operating on short cycles with high power demands," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 6, p. 631, 2021.
- [55] Z. Zwierzewicz, D. Tarnapowicz, and A. Nerc, "Adaptive PMSM Control of Ship Electric Propulsion with Energy-Saving Features," *Energies*, vol. 17, no. 9, p. 2178, 2024.
- [56] J. L. Kirtley, A. Banerjee, and S. Englebreton, "Motors for ship propulsion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2320-2332, 2015.
- [57] A. H. Isfahani and S. Vaez-Zadeh, "Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities," *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1755-1763, 2009.
- [58] H. Chen, Y. Zuo, K. Chau, W. Zhao, and C. H. Lee, "Modern electric machines and drives for wind power generation: A review of opportunities and challenges," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 9, pp. 1864-1887, 2021.
- [59] G. Jegadeeswari, D. Lakshmi, B. Kirubadurai, and Z. Harith, "Performance evaluation of four phase 8/6 switched reluctance motor for ship propulsion system," *J. Eng. Sci. Technol. Special Issue on ICIT2022*, vol. 19, no. 1, pp. 109-120, 2024.
- [60] G. Jegadeeswari, D. Lakshmi, and B. Kirubadurai, "Performance enrichment of switched reluctance motors through bio-inspired algorithm for electric propulsion system," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2025.
- [61] A. Abdel-Aziz, M. Elgenedy, and B. Williams, "Review of switched reluctance motor converters and torque ripple minimisation techniques for electric vehicle applications," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3263, 2024.
- [62] I. C. Proimadis, D. V. Spyropoulos, and E. D. Mitronikas, "An Alternative for All-Electric Ships Applications: The Synchronous Reluctance Motor," *Advances in Power Electronics*, vol. 2013, no. 1, p. 862734, 2013.
- [63] A. Kumar and N. Neogi, "Bidirectional converter and energy storage system," *Int. J. Enhanced Res. Sci. Technol. Eng.*, vol. 4, no. 6, pp. 15-23, 2015.
- [64] D. Park, M. K. Zadeh, and R. Skjetne, "DC-DC Converter Control for Peak-Shaving in Shipboard DC Power System via Hybrid Control," in *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2020: IEEE, pp. 681-686.
- [65] H. Mahdi, B. Hoff, and T. Østrem, "A review of power converters for ships electrification," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 4, pp. 4680-4697, 2022.
- [66] S.-Y. Kim, B.-G. Cho, and S.-K. Sul, "Consideration of active-front-end rectifier for electric propulsion navy ship," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013: IEEE, pp. 13-19.

- [67] H. Jeon, J. Kim, and K. Yoon, "Large-scale electric propulsion systems in ships using an active front-end rectifier," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 168, 2019.
- [68] S. P. Sunddararaj, S. Srinivasarangan Rangarajan, and S. N, "An extensive review of multilevel inverters based on their multifaceted structural configuration, triggering methods and applications," *Electronics*, vol. 9, no. 3, p. 433, 2020.
- [69] F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, and K. Andersson, "Energy and exergy analysis of ship energy systems—the case study of a chemical tanker," *International Journal of Thermodynamics*, vol. 18, no. 2, pp. 82-93, 2015.
- [70] P. Van Spronsen and R. Tousain, "An optimal control approach to preventing marine diesel engine overloading aboard Karel Doorman class frigates," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 34, no. 7, pp. 493-498, 2001.
- [71] Y. Linden, "NO-emission prediction in a Diesel Engine: Using a two zone in-cylinder simulation model," 2017.
- [72] D. Stapersma, P. Schulten, and H. Grimmelius, "A fresh view on propulsion control," in *7th international naval engineering conference and exhibition, Amsterdam, 2004: IMarEST*, pp. 221-240.
- [73] A. Vrijdag, D. Stapersma, and T. Van Terwisga, "Control of propeller cavitation in operational conditions," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 15-26, 2010.
- [74] N. Xiros, *Robust control of diesel ship propulsion*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [75] J.-R. Guillemette and P. Bussieres, "Proposed optimal controller for the Canadian patrol frigate diesel propulsion system," in *The 1997 11th Ship Control Systems Symposium. Part 1 (of 2), Southampton, UK, 04/97, 1997*, pp. 219-236.
- [76] A. Vrijdag, D. Stapersma, and T. Van Terwisga, "Tradeoffs in ship propulsion control: engine overloading and cavitation inception in operational conditions," in *9th International naval conference and exhibition, Hamburg, Germany, 2008: IMarEST*, pp. 82-93.
- [77] J. F. Hansen and F. Wendt, "History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2229-2242, 2015.
- [78] K. Mollenhauer, H. Tschöke, and K. G. Johnson, *Handbook of diesel engines*. Springer Berlin, 2010.
- [79] O. Simmonds, "DC: Is it the alternative choice for naval power distribution?," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 37-43, 2014.
- [80] N. Karim, R. Lisner, H. Kazemi, and F. Annaz, "Rule-based power management for the all-electric ship," in *Proceedings of the Australian University power engineering conference*, 2002: Citeseer.
- [81] R. Amgai and S. Abdelwahed, "Power management of shipboard power systems using Interaction Balance Principle," in *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, 2014: IEEE, pp. 1-6.
- [82] T. J. McCoy, "Trends in ship electric propulsion," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, vol. 1: IEEE, pp. 343-346.
- [83] G. Castles, G. Reed, A. Bendre, and R. Pitsch, "Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships," in *2009 IEEE electric ship technologies symposium*, 2009: IEEE, pp. 515-520.

- [84] M. Wijsmuller and T. Hasselaar, "Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels," *Ship and boat international*, pp. 34-7, 2007.
- [85] R. Barcellos, "The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations," in *Offshore Technology Conference Brasil*, 2013: OTC, pp. OTC-24467-MS.
- [86] D. De Waard, "Parameterization of ship propulsion drives and their fuel efficiency under different operational modes and configurations," in *Proceedings of the engine as a weapon VI conference. Bath, UK*, 2015, pp. 44-57.
- [87] Wärtsilä. "Wärtsilä Shaft Generators." <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shaft-generator> (accessed November 3rd, 2024).
- [88] G. Sulligoi, S. Castellan, M. Aizza, D. Bosich, L. Piva, and G. Lipardi, "Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation," 2012.
- [89] S. K. Topaloglou, G. I. Papalambrou, and N. P. Kyrtatos, "Controller Design for Hybrid Diesel Electric Ship Propulsion during Transient Operation," in *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2016, vol. All Days, ISOPE-I-16-397.
- [90] B. Zahedi, L. E. Norum, and K. B. Ludvigsen, "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems," *Journal of power sources*, vol. 255, pp. 341-354, 2014.
- [91] A. Breijs and E. Amam, "Energy management—adapt your engine to every mission," in *Proceedings of the 13th international naval engineering conference*, 2016, pp. 1-8.
- [92] E. Ovrum and T. Bergh, "Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation," *Applied Energy*, vol. 152, pp. 162-172, 2015.
- [93] T. Völker, "Hybrid Propulsion Concepts on Ships," 2013.
- [94] P. van Loon and P. van Zon, "From operational profile to hybrid propulsion," in *Proceedings of the 24th international HISWA symposium on yacht design and yacht construction, Amsterdam, The Netherlands*, 2016, pp. 14-15.
- [95] J. Drijver, "Evaluation of transmission losses, heat flows and temperatures of propulsive drive lines," Master's thesis, Delft university of technology, 2013.
- [96] H. Grimmeliuss, P. de Vos, M. Krijgsman, and E. van Deursen, "Control of hybrid ship drive systems," in *10th International conference on computer and IT applications in the maritime industries*, 2011, pp. 1-15.
- [97] M. Butcher, R. Maltby, and P. Parvin, "Compact DC power and propulsion systems-the definitive solution?," in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009: IEEE, pp. 521-528.
- [98] N. Doerry and K. McCoy, "Next generation integrated power system: NGIPS technology development roadmap," *Naval Sea Systems Command*, 2007.
- [99] D. Bosich and G. Sulligoi, "Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid electric propulsion and LVDC distribution," in *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013: IEEE, pp. 1-6.
- [100] H. Park *et al.*, "Real-time model predictive control for shipboard power management using the IPA-SQP approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 2129-2143, 2015.
- [101] A. Smirnov, A. Burt, H. Zhang, and I. Celik, "Component-based modelling of multi-physics systems," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 30, no. 4, pp. 409-415, 2010.

- [102] G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, and L. Yang, "Physics-informed machine learning," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 6, pp. 422-440, 2021.
- [103] K. M. Bagherabadi, S. Skjong, and E. Pedersen, "Dynamic modelling of PEM fuel cell system for simulation and sizing of marine power systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 40, pp. 17699-17712, 2022.
- [104] L. Balestra and I. Schjølberg, "Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10924-10938, 2021.
- [105] S. Donnarumma, M. Martelli, F. D'Agostino, D. Kaza, and F. Silvestro, "Multiphysics modeling and simulation of integrated electric propulsion system for ship dynamic positioning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024.
- [106] W. Zhu, J. Shi, and S. Abdelwahed, "End-to-end system level modeling and simulation for medium-voltage DC electric ship power systems," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 37-47, 2018.
- [107] H. Abrougui, H. Bouaicha, H. Dallagi, C. Zaoui, and N. Samir, "Study and modeling of the electric propulsion system for marine boat," in *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, 2019: IEEE, pp. 173-180.
- [108] H. H. Zhu and Z. Dong, "Modeling and Simulation of Hybrid Electric Ships with AC Power Bus-A Case Study," in *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2018: IEEE, pp. 1-8.
- [109] I. Hemdana, H. Bouaicha, H. Dallagi, C. Zaoui, and S. Nejim, "Study, Modeling and Simulation of a Hybrid Ship Propulsion System," in *2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, 2019: IEEE, pp. 136-143.
- [110] C. Gomes *et al.*, "The fmi 3.0 standard interface for clocked and scheduled simulations," in *Modelica Conferences*, 2021, pp. 27-36.
- [111] F. Perabo, D. Park, M. K. Zadeh, Ø. Smogeli, and L. Jamt, "Digital twin modelling of ship power and propulsion systems: Application of the open simulation platform (osp)," in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020: IEEE, pp. 1265-1270.
- [112] P. Ghimire, M. Zadeh, and E. Pedersen, "Co-simulation of a marine hybrid power system for real-time virtual testing," in *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2021: IEEE, pp. 1-6.
- [113] P. Ghimire, M. Zadeh, E. Pedersen, and J. Thorstensen, "Dynamic modeling, simulation, and testing of a marine DC hybrid power system," *IEEE Transactions on transportation electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 905-919, 2020.
- [114] S. Skjong, B. Taskar, E. Pedersen, and S. Steen, "Simulation of a hybrid marine propulsion system in waves," *Proc. 28th CIMAC World Congr*, pp. 1-16, 2016.
- [115] P. Ghimire, M. Zadeh, J. Thorstensen, and E. Pedersen, "Data-driven efficiency modeling and analysis of all-electric ship powertrain: A comparison of power system architectures," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 1930-1943, 2021.
- [116] A. Swider, H. Langseth, and E. Pedersen, "Application of data-driven models in the analysis of marine power systems," *Applied Ocean Research*, vol. 92, p. 101934, 2019.
- [117] S. Fang, Y. Xu, S. Wen, T. Zhao, H. Wang, and L. Liu, "Data-driven robust coordination of generation and demand-side in photovoltaic integrated all-electric ship microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 1783-1795, 2019.

- [118] P. Karagiannidis and N. Themelis, "Data-driven modelling of ship propulsion and the effect of data pre-processing on the prediction of ship fuel consumption and speed loss," *Ocean Engineering*, vol. 222, p. 108616, 2021.
- [119] A. Coraddu, L. Oneto, F. Baldi, F. Cipollini, M. Atlar, and S. Savio, "Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling," *Ocean Engineering*, vol. 186, p. 106063, 2019.
- [120] N. Assani, P. Matic, and M. Katalinić, "Ship's digital twin—a review of modelling challenges and applications," *Applied sciences*, vol. 12, no. 12, p. 6039, 2022.
- [121] I. Lazakis, C. Gkerekos, and G. Theotokatos, "Investigating an SVM-driven, one-class approach to estimating ship systems condition," *Ships and Offshore Structures*, vol. 14, no. 5, pp. 432-441, 2019.
- [122] H. Li, B. Xu, G. Lu, C. Du, and N. Huang, "Multi-objective optimization of PEM fuel cell by coupled significant variables recognition, surrogate models and a multi-objective genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 236, p. 114063, 2021.
- [123] W. Zhang, Z. Liang, W. Wu, G. Ling, and R. Ma, "Design and optimization of a hybrid battery thermal management system for electric vehicle based on surrogate model," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 174, p. 121318, 2021.
- [124] A. Balasubramanian, F. Martin, M. M. Billah, O. Osemwinyen, and A. Belahcen, "Application of surrogate optimization routine with clustering technique for optimal design of an induction motor," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5042, 2021.
- [125] D.-K. Lim, K.-P. Yi, S.-Y. Jung, H.-K. Jung, and J.-S. Ro, "Optimal design of an interior permanent magnet synchronous motor by using a new surrogate-assisted multi-objective optimization," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [126] V.-H. Bui *et al.*, "Deep neural network-based surrogate model for optimal component sizing of power converters using deep reinforcement learning," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78702-78712, 2022.
- [127] R. Rafiezadeh, S. Busquets-Monge, and S. Alepuz, "Design optimization of switching-cell-array-based power converters," in *2022 IEEE 31st International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2022: IEEE, pp. 39-46.
- [128] V. Madanipour, M. Montazeri-Gh, and M. Mahmoodi-k, "Multi-objective component sizing of plug-in hybrid electric vehicle for optimal energy management," *Clean technologies and environmental policy*, vol. 18, no. 4, pp. 1189-1202, 2016.
- [129] S. Milićević, I. Blagojević, S. Milojević, M. Bukvić, and B. Stojanović, "Numerical Analysis of Optimal Hybridization in Parallel Hybrid Electric Powertrains for Tracked Vehicles," *Energies*, vol. 17, no. 14, p. 3531, 2024.
- [130] F. Balsamo, C. Capasso, G. Miccione, and O. Veneri, "Hybrid storage system control strategy for all-electric powered ships," *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 1083-1090, 2017.
- [131] D. Da Rù, M. Morandin, S. Bolognani, and M. Castiello, "A threshold logic control strategy for parallel light hybrid electric vehicle implementation," in *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, 2016: IET, pp. 1-6.
- [132] J. Torreglosa, P. García, L. Fernández, and F. Jurado, "Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 514-526, 2014.

- [133] Y. Yuan, T. Zhang, B. Shen, X. Yan, and T. Long, "A fuzzy logic energy management strategy for a photovoltaic/diesel/battery hybrid ship based on experimental database," *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2211, 2018.
- [134] M. M. S. Khan, M. O. Faruque, and A. Newaz, "Fuzzy logic based energy storage management system for MVDC power system of all electric ship," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 798-809, 2017.
- [135] M. D. Al-Falahi, K. S. Nimma, S. D. Jayasinghe, H. Enshaei, and J. M. Guerrero, "Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries," *Energy conversion and management*, vol. 172, pp. 50-66, 2018.
- [136] F. D. Kanellos, G. J. Tsekouras, and N. D. Hatziaargyriou, "Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1166-1175, 2014.
- [137] M. A. Ancona *et al.*, "Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 42-58, 2018.
- [138] W. Tarelko and K. Rudzki, "Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption," *Neural computing and applications*, vol. 32, no. 23, pp. 17379-17395, 2020.
- [139] R. Kumar and M. Fozdar, "Optimal sizing of hybrid ship power system using variants of particle swarm optimization," in *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2017: IEEE, pp. 527-532.
- [140] Y. Xiang and X. Yang, "An ECMS for multi-objective energy management strategy of parallel diesel electric hybrid ship based on ant colony optimization algorithm," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 810, 2021.
- [141] B. Wang, J. Xu, B. Cao, and B. Ning, "Adaptive mode switch strategy based on simulated annealing optimization of a multi-mode hybrid energy storage system for electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 194, pp. 596-608, 2017.
- [142] L. Wu, Y. Wang, X. Yuan, and Z. Chen, "Multiobjective optimization of HEV fuel economy and emissions using the self-adaptive differential evolution algorithm," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2458-2470, 2011.
- [143] R. Tang, X. Li, and J. Lai, "A novel optimal energy-management strategy for a maritime hybrid energy system based on large-scale global optimization," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 254-264, 2018.
- [144] M. D. Al-Falahi, S. D. Jayasinghe, and H. Enshaei, "Hybrid algorithm for optimal operation of hybrid energy systems in electric ferries," *Energy*, vol. 187, p. 115923, 2019.
- [145] K. Song, X. Wang, F. Li, M. Sorrentino, and B. Zheng, "Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability," *Energy*, vol. 205, p. 118064, 2020.
- [146] R. Geertsma, "Autonomous control for adaptive ships: with hybrid propulsion and power generation," 2019.
- [147] A. Sciarretta *et al.*, "A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle," *Control engineering practice*, vol. 29, pp. 287-298, 2014.
- [148] P. Wu, J. Partridge, and R. Bucknall, "Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships," *Applied Energy*, vol. 275, p. 115258, 2020.

- [149] V. Shagar, S. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, "Frequency transient suppression in hybrid electric ship power systems: A model predictive control strategy for converter control with energy storage," *Inventions*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2018.
- [150] M. A. Hannan *et al.*, "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103023, 2021.
- [151] C. Bordin and O. Mo, "Including power management strategies and load profiles in the mathematical optimization of energy storage sizing for fuel consumption reduction in maritime vessels," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 425-441, 2019.
- [152] M. R. Patel, *Shipboard electrical power systems*. Crc Press, 2021.
- [153] R. Martins, H. C. Hesse, J. Jungbauer, T. Vorbuchner, and P. Musilek, "Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2048, 2018.
- [154] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, P. Taylor, J. Ekanayake, S. L. Walker, and S. Padmanaban, "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 489-504, 2019.
- [155] T. M. Masaud, F. Eluyemi, and R. Challoo, "Optimal sizing of battery storage systems for microgrid expansion applications," in *2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [156] M. Swierczynski, D. I. Stroe, A. I. Stan, and R. Teodorescu, "Lifetime and economic analyses of lithium-ion batteries for balancing wind power forecast error," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 6, pp. 760-770, 2015.
- [157] R. Barrera-Cardenas, O. Mo, and G. Guidi, "Optimal sizing of battery energy storage systems for hybrid marine power systems," in *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2019: IEEE, pp. 293-302.
- [158] K. Kim, K. Park, J. Lee, K. Chun, and S.-H. Lee, "Analysis of battery/generator hybrid container ship for CO₂ reduction," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 14537-14543, 2018.
- [159] I. S. Association, "IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications," *IEEE, New York*, 2010.
- [160] X.-S. Yang, "Metaheuristic optimization: algorithm analysis and open problems," in *International symposium on experimental algorithms*, 2011: Springer, pp. 21-32.
- [161] Y. Meraihi, A. B. Gabis, A. Ramdane-Cherif, and D. Acheli, "A comprehensive survey of Crow Search Algorithm and its applications," *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, no. 4, pp. 2669-2716, 2021.
- [162] F. Fausto, A. Reyna-Orta, E. Cuevas, Á. G. Andrade, and M. Perez-Cisneros, "From ants to whales: metaheuristics for all tastes," *Artificial Intelligence Review*, vol. 53, pp. 753-810, 2020.
- [163] E. Sciberras and R. Norman, "Multi-objective design of a hybrid propulsion system for marine vessels," *IET electrical systems in transportation*, vol. 2, no. 3, pp. 148-157, 2012.
- [164] J. Zhu, L. Chen, B. Wang, and L. Xia, "Optimal design of a hybrid electric propulsive system for an anchor handling tug supply vessel," *Applied energy*, vol. 226, pp. 423-436, 2018.
- [165] S. E. Damian and L. A. Wong, "Optimal Energy Storage Placement and Sizing in Distribution System," in *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, 2022: IEEE, pp. 1-6.

-
- [166] S. Wen *et al.*, "Optimal sizing of hybrid energy storage sub-systems in PV/diesel ship power system using frequency analysis," *Energy*, vol. 140, pp. 198-208, 2017.
 - [167] R. Tjandra, S. Wen, D. Zhou, and Y. Tang, "Optimal sizing of BESS for hybrid electric ship using multi-objective particle swarm optimization," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia)*, 2019: IEEE, pp. 1460-1466.
 - [168] J. Zhu, L. Chen, X. Wang, and L. Yu, "Bi-level optimal sizing and energy management of hybrid electric propulsion systems," *Applied Energy*, vol. 260, p. 114134, 2020.
 - [169] Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, B. Shen, and T. Long, "A review of multi-energy hybrid power system for ships," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110081, 2020.
 - [170] J. K. Woud and D. Stapersma, *Design of propulsion and electric power generation systems*. IMarEST, 2002.
 - [171] P. Gasper, A. Saxon, Y. Shi, E. Endler, K. Smith, and F. M. Thakkar, "Degradation and modeling of large-format commercial lithium-ion cells as a function of chemistry, design, and aging conditions," *Journal of Energy Storage*, vol. 73, p. 109042, 2023.
 - [172] N. Omar *et al.*, "Rechargeable energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles—Assessment of electrical characteristics," *Energies*, vol. 5, no. 8, pp. 2952-2988, 2012.
 - [173] F. Mylonopoulos, S. Durgaprasad, A. Coraddu, and H. Polinder, "Lifetime design, operation, and cost analysis for the energy system of a retrofitted cargo vessel with fuel cells and batteries," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 91, pp. 1262-1273, 2024.

Životopis

Tino Vidović rođen je 28.05.1997. u Splitu. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja, 2016. godine upisuje studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu. Diplomski studij strojarstva završava u srpnju 2021. godine, čime stječe akademski naziv magistra inženjera strojarstva. Tijekom diplomskog studija posebno se usmjerio na područja toplinskih strojeva, simulacija i metoda optimiranja.

Svoje prvo radno iskustvo stječe još tijekom studija, gdje 2019. godine radi kao demonstrator na kolegiju Toplinski strojevi. Angažman na fakultetu nastavlja i tijekom diplomskog studija kao demonstrator na kolegiju Motori i vozila. U studenom 2021. godine zapošljava se na radnom mjestu asistenta na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu kada upisuje i doktorski studij. Na trenutnom radnom mjestu sudjeluje kao istraživač na projektu Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom Povećanje učinkovitosti, smanjenje štetnih emisija i hibridizacija brodskog energetskeg sustava. U sklopu asistentskog rada, sudjeluje i u izvođenju nastave na kolegijima "Motori i vozila" te "Automobilski pogonski sustavi u virtualnom okruženju", kojeg održava u suradnji s tvrtkom AVL - AST d.o.o.

Do danas je kao glavni autor ili koautor objavio ukupno 10 znanstvenih radova kategorije A u međunarodnim časopisima, sedam radova kategorije C u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom. Tematika njegovih radova usko je vezana uz područje njegova istraživanja te obuhvaća napredne energetske sustave u pomorstvu, s posebnim naglaskom na primjenu i performanse gorivnih članaka (PEM), modeliranje hibridnih pogonskih sustava te analizu performansi i emisija motora s unutarnjim izgaranjem. Značajan dio radova posvećen je i primjeni alternativnih goriva te razvoju metoda za dijagnostiku brodskih motora.

Curriculum vitae

Tino Vidović was born on May 28, 1997, in Split. After completing his high school education, he enrolled in undergraduate studies in mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture at the University of Split in 2016. He completed his graduate studies in July 2021, earning the academic title of Master of Science in Mechanical Engineering. During his graduate studies, he particularly focused on the fields of thermal machinery, simulations, and optimization methods.

He gained his first work experience during his studies, working as a demonstrator for the "Thermal Machinery" course in 2019. He continued his engagement at the faculty during his graduate studies as a demonstrator for the "Engines and Vehicles" course. In November 2021, he was employed as an assistant at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split, at which time he also enrolled in postgradual studies. In his current position, he participates as a researcher on a project funded by the Croatian Science Foundation, titled "Increasing efficiency, reducing harmful emissions and hybridization of the ship's energy system." As part of his assistantship, he is also involved in teaching the courses "Engines and Vehicles" and "Automotive Propulsion Systems in a Virtual Environment," the latter of which is held in collaboration with the company AVL - AST d.o.o.

To date, as a main author or co-author, he has published a total of 10 category A scientific papers in international journals and seven category C papers in peer-reviewed conference proceedings. The topics of his papers are closely related to his research area and cover advanced energy systems in the maritime sector, with a special emphasis on the application and performance of proton-exchange membrane (PEM) fuel cells, the modeling of hybrid propulsion systems, and the analysis of the performance and emissions of internal combustion engines. A significant portion of his work is also dedicated to the application of alternative fuels and the development of diagnostic methods for marine engines.
