

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Matija Bubalo

**UČINKOVITO UPRAVLJANJE TOKOVIMA
ENERGIJE U MIKROMREŽI UTEMELJENOJ NA
IZMJENJIVAČU KVAZI Z-TIPA S BATERIJAMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2025.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Matija Bubalo

**Učinkovito upravljanje tokovima energije u mikromreži utemeljenoj na
izmjenjivaču kvazi Z-tipa s baterijama**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2025.

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

Mentor: Prof. dr. sc. Mateo Bašić

Rad br.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: baterijski sustavi pohrane, distribuirana proizvodnja, fotonaponski izvor, izmjenjivač kvazi Z-tipa, kavezni asinkroni generator, mikromreža, optimizacija zasnovana na modelu, praćenje točke maksimalne snage, raspolaganje energijom, vjetroenergetski sustav

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Elektrotehnika

Znanstvena grana: Elektroenergetika

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

Mentor rada: Prof. dr. sc. Mateo Bašić

Broj stranica: 221

Broj slika: 139

Broj tablica: 2

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 178

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc.

2. Prof. dr. sc.

3. Prof. dr. sc.

4. Prof. dr. sc.

5. Prof. dr. sc.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc.

2. Prof. dr. sc.

3. Prof. dr. sc.

4. Prof. dr. sc.

5. Prof. dr. sc.

Disertacija obranjena dana:

Učinkovito upravljanje tokovima energije u mikromreži utemeljenoj na izmjenjivaču kvazi Z-tipa s baterijama

Sažetak

U ovoj doktorskoj disertaciji predložena je mikromreža utemeljena na izmjenjivaču kvazi Z-tipa (qZSI, od *engl.* quasi-Z-source inverter) te upravljački algoritmi nužni za pouzdan i učinkovit rad mikromreže i povezanih izvora. Mikromreže omogućuju učinkovitu integraciju obnovljivih izvora, čemu doprinose i jedinstvena svojstva qZSI-ja u smislu mogućnosti upravljanja i naponskog pojačanja. U predloženoj mikromreži, fotonaponski (FN) izvor i vjetroenergetski sustav povezani su na istosmjernu sabirnicu qZSI-ja, dok je baterijski sustav smješten unutar njegovog impedancijskog kruga. Trošila i glavna mreža spojeni su na izlaznu izmjeničnu sabirnicu. Vjetroenergetski sustav čine vjetroturbina i kavezni asinkroni generator te je on na qZSI povezan preko upravljivog poluvodičkog pretvarača. Razvijena su dva upravljačka algoritma: prvi karakterizira manji broj senzora, korištenje procijenjene brzine vrtnje generatora umjesto mjerene te se temelji na uzastopnom izvođenju optimizacija izvora, dok drugi omogućuje istovremeno izvođenje optimizacija i jednostavniju koordinaciju upravljanja, ali zahtijeva mjerenje brzine vrtnje generatora. Istovremena optimizacija izvora je omogućena razvojem algoritma za optimizaciju asinkronog generatora zasnovanog na modelu, čime je izbjegnuto međudjelovanje s optimizacijom vjetroturbine zasnovanoj na neizravnoj logici. Mikromreža i pripadajući algoritmi eksperimentalno su ispitani u otočnom režimu i u spoju s glavnom mrežom. Pokazana je funkcionalnost mikromreže u širokom rasponu brzine vjetra, osunčanosti i izlazne snage, stabilnost u dinamičkim režimima, visoka učinkovitost implementiranih optimizacija te mogućnost upravljanja tokovima energije uz pomoć baterija i raspolaganjem potrošnjom.

Ključne riječi:

baterijski sustavi pohrane, distribuirana proizvodnja, fotonaponski izvor, izmjenjivač kvazi Z-tipa, kavezni asinkroni generator, mikromreža, optimizacija zasnovana na modelu, praćenje točke maksimalne snage, raspolaganje energijom, vjetroenergetski sustav

Efficient Power Flow Control in a Microgrid based on a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter

Abstract:

In this doctoral dissertation, a microgrid based on a quasi-Z-source inverter (qZSI) and its control algorithms for reliable and efficient operation with distributed renewable energy sources is proposed. Microgrids enable effective integration of renewables, which is further enhanced by the qZSI's unique voltage-boosting and control capabilities. In the proposed system, a photovoltaic source and a wind energy conversion system (WECS) are connected to the qZSI's DC bus, while a battery is embedded within its impedance network. Loads and the main grid are connected at the inverter's AC output. The WECS consists of a wind turbine coupled to a squirrel-cage induction generator (SCIG), which is interfaced with the qZSI via a controllable power converter. Two control algorithms are developed: the first reduces the number of required sensors by estimating (rather than measuring) the SCIG rotor speed and sequentially optimizing the power sources; the second algorithm performs all optimizations simultaneously, offering simpler control coordination, but requires measurement of the SCIG rotor speed. Simultaneous optimizations are enabled through the implementation of a model-based SCIG optimization that operates independently of the wind turbine's fuzzy-logic-based optimization. The microgrid and its control algorithms have been experimentally validated in both islanded and grid-connected modes. The results demonstrate robust operational performance across a wide range of wind speeds, solar irradiance levels, and output power conditions. The system exhibits dynamic stability, high optimization efficiency, and effective energy management through battery support and demand-side management.

Keywords:

battery storage systems, distributed generation, energy management, maximum power point tracking, microgrid, model-based optimization, photovoltaic source, quasi-Z-source inverter, squirrel-cage induction generator, wind energy conversion system

Zahvala

...

Sadržaj

Sažetak	iv
Abstract:	v
Zahvala.....	vii
Popis tablica	xii
Popis slika	xiii
Popis oznaka	xxi
1. UVOD	1
1.1. Motivacija i osvrt na postojeća rješenja	1
1.2. Ciljevi i hipoteze rada	5
1.3. Pregled strukture doktorske disertacije	7
2. OSNOVNE ZNAČAJKE MIKROMREŽA	9
2.1. Osnovne konfiguracije mikromreža.....	11
2.1.1. Istosmjerne mikromreže	11
2.1.2. Izmjenične mikromreže	14
2.1.3. Hibridne mikromreže.....	15
2.2. Distribuirani izvori u mikromrežama.....	17
2.2.1. Fotonaponski paneli.....	20
2.2.2. Vjetroagregati	22
2.3. Sustavi za pohranu energije	25
2.3.1. Elektrokemijski sustavi pohrane.....	27
2.4. Upravljanje mikromrežom	29
2.4.1. Hijerarhijska struktura	29
2.4.2. Multi-agent sustav	35
2.4.3. Strategije upravljanja i raspolaganja energijom u mikromreži.....	37

2.5. Poluvodički energetske pretvarači u mikromrežama.....	41
2.5.1. Vrste poluvodičkih pretvarača s obzirom na broj stupnjeva pretvorbe	42
2.5.2. Upravljački ciljevi pretvarača u mikromrežama	48
3. OSNOVNE ZNAČAJKE IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA	51
3.1. Topologija i matematički model	51
3.2. Osnovne metode upravljanja.....	55
3.3. Regulacija izlaznog napona	58
3.4. Integracija baterija.....	61
4. IZMJENJIVAČ KVAZI Z-TIPA S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA	66
4.1. Primjena u fotonaponskim sustavima	66
4.2. Primjena u vjetroenergetskim sustavima	71
4.3. Primjena u mikromrežama i u sustavima s više distribuiranih izvora	74
5. OPTIMIZIRANI VJETROENERGETSKI SUSTAV SA SAMOUZBUĐNIM ASINKRONIM GENERATOROM I IZMJENJIVAČEM KVAZI Z-TIPA	80
5.1. Konfiguracija sustava.....	81
5.2. Algoritmi vektorskog upravljanja samouzbuđnim asinkronim generatorom	83
5.2.1. Algoritam zasnovan na klasičnom modelu samouzbuđenog asinkronog generatora	83
5.2.2. Algoritam zasnovan na naprednom modelu samouzbuđenog asinkronog generatora	90
5.3. Algoritmi optimizacije izlazne snage vjetroturbine i generatora	96
5.3.1. Princip optimizacije vjetroturbine	97
5.3.2. Princip optimizacije asinkronog generatora	99
5.3.3. Algoritmi optimizacije zasnovani na neizravnoj logici	101
5.3.4. Algoritam optimizacije kaveznog asinkronog generatora zasnovan na modelu	108

5.4.	Analiza i ispitivanje otočnog rada sustava	115
5.4.1.	Upravljačka strategija i raspolaganje energijom sustava	116
5.4.2.	Pokretanje sustava	121
5.4.3.	Analiza dinamičkih režima tijekom rada sustava	123
5.4.4.	Statičke karakteristike	129
5.4.5.	Rad sustava s nedovoljnom energijom vjetra	132
5.5.	Mogućnost rada u spoju s mrežom	135
5.5.1.	Konfiguracija sustava i prilagodbe upravljačkog algoritma	135
5.5.2.	Analiza dinamičkih režima u spoju s mrežom	138
6.	PREDLOŽENA MIKROMREŽA S IZMJENJIVAČEM KVAZI Z-TIPA I FOTONAPONSKIM I VJETROENERGETSKIM IZVORIMA.....	142
6.1.	Konfiguracija predložene mikromreže	143
6.2.	Upravljačke strategije i sustav raspolaganja energijom predložene mikromreže	145
6.2.1.	Struktura upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora	145
6.2.2.	Struktura upravljačkog algoritma s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora	154
6.3.	Analiza dinamičkih režima u otočnom režimu rada	157
6.3.1.	Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora u otočnom radu	159
6.3.2.	Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora u otočnom radu	165
6.3.3.	Usporedna analiza performansi predloženih algoritama u otočnom režimu rada	170
6.4.	Analiza dinamičkih režima u spoju s mrežom	173
6.4.1.	Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora u spoju s mrežom	173

6.4.2. Ispitivanje s upravljačkim algoritmom s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora u spoju s mrežom	179
6.4.3. Usporedna analiza performansi predloženih algoritama u spoju s mrežom ...	181
6.5. Regulacija struje baterija.....	185
6.6. Prelasci između otočnog rada i rada u spoju s glavnom mrežom	188
6.7. Statičke karakteristike predložene mikromreže	192
6.7.1. Analiza točnosti MPPT algoritama i učinkovitosti optimizacije generatora ..	193
6.7.2. Analiza korisnosti i raspodjele tokova energije u mikromreži	198
7. PREGLED ZNANSTVENOG DOPRINOSA RADA	201
8. ZAKLJUČAK	204
LITERATURA	208
ŽIVOTOPIS.....	221
CURRICULUM VITAE	222

Popis tablica

<i>Tablica 5.1 Tablica pravila FL regulatora brzine vrtnje</i>	<i>102</i>
<i>Tablica 6.1 Usporedba točnosti MPPT algoritama</i>	<i>196</i>

Popis slika

<i>Slika 2.1 Osnovna topologija istosmjerne mikromreže</i>	12
<i>Slika 2.2 Istosmjerna mikromreža s bipolarnom sabirnicom</i>	13
<i>Slika 2.3 Osnovna konfiguracija izmjenične mikromreže</i>	15
<i>Slika 2.4 Osnovna konfiguracija hibridne mikromreže</i>	16
<i>Slika 2.5 Karakteristike FN panela: a) izlazna struja u ovisnosti o naponu, b) izlazna snaga u ovisnosti o naponu</i>	20
<i>Slika 2.6. Karakteristike FN panela za različite temperature i osunčanosti</i>	21
<i>Slika 2.7 Konfiguracije povezivanja nizova i polja FN modula</i>	22
<i>Slika 2.8 Karakteristike koeficijenta snage rotora vjetroturbine u ovisnosti o TSR-u i za različite mehaničke kutove zakreta lopatica [79]</i>	24
<i>Slika 2.9 Konfiguracije povezivanja vjetroagregata na mrežu</i>	25
<i>Slika 2.12 Shematski prikaz hijerarhijske strukture upravljanja</i>	30
<i>Slika 2.13 Shematski prikaz a) decentraliziranog i b) centraliziranog upravljanja</i>	32
<i>Slika 2.14 Shematski prikaz decentralizirane strategije upravljanja [106]</i>	35
<i>Slika 2.15 Struktura multi-agent sustava</i>	36
<i>Slika 2.16 Osnovni dijagram EMS-a mikromreže</i>	38
<i>Slika 2.17 Blokowska shema pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe: a) DC-AC i b) DC-DC</i>	42
<i>Slika 2.18 VSC s jednim stupnjem pretvorbe</i>	43
<i>Slika 2.19 Višerazinski NPC pretvarač s jednim stupnjem pretvorbe [128]</i>	44
<i>Slika 2.20 Topologija izmjenjivača Z-tipa</i>	44
<i>Slika 2.21 Topologija izmjenjivača kvazi Z-tipa</i>	45
<i>Slika 2.22 Topologija jednofaznog SBI izmjenjivača</i>	45
<i>Slika 2.23 Blokowska shema pretvarača s dva stupnja pretvorbe: a) DC-DC-AC i b) AC-DC-AC</i>	46
<i>Slika 2.24 Topologija SST-a s jednim stupnjem pretvorbe</i>	47
<i>Slika 2.25 Topologije SST-a s: a) dva stupnja pretvorbe i LVDC međukrugom i b) tri stupnja pretvorbe</i>	48
<i>Slika 2.26 Pojednostavljene strukture upravljanja u izmjeničnoj mikromreži za: a) pretvarače za uspostavljanje mreže, b) pretvarače za napajanje mreže i c) strujno upravljane pretvarače za održavanje mreže</i>	49

<i>Slika 3.1 Topologija qZSI-ja s L filtrom postavljenim na izlaz izmjenjivača.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 3.2 Nadomjesne sheme qZSI-ja za vrijeme trajanja a) prostrijelnih stanja, b) aktivnih stanja i c) nultih stanja.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 3.3 Valni oblici kod metode jednostavnog pojačanja</i>	<i>56</i>
<i>Slika 3.4 Valni oblici kod metode maksimalnog konstantnog pojačanja s umetnutim trećim harmonikom.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 3.5 Topologija qZSI-ja s upravljivim izvorom, radnim trošilom i strukturom regulacijskog sustava izlaznog napona.....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 3.6 Indeks modulacije M_a dobiven na izlazu PI regulatora za različite vrijednosti ulaznog istosmjernog napona i parametra N_0 (trajanja ST stanja) [141]</i>	<i>60</i>
<i>Slika 3.7 Topologija qZSI-ja s baterijama povezanim na kondenzator C_2 u impedancijskom krugu.....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 3.8 Struktura sustava za upravljanje stanjem napunjenosti baterija povezanih na qZSI u otopnom režimu rada [143].....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 3.9 Topologija qZSI-ja s baterijama povezanim na kondenzator C_1 u impedancijskom krugu.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 4.1 Kombinirana konfiguracija FN sustava s qZSI-jem iz literature.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 4.2 Topologija sustava s qZSI-jem i pripadajuće upravljačke strukture iz [5].....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 4.3 Dijagram toka rule-based algoritma za upravljanje SOC-om iz [6]</i>	<i>69</i>
<i>Slika 4.4 Dijagram toka rule-based EMS-a iz [7]</i>	<i>70</i>
<i>Slika 4.5 Kombinirana topologija WECS-a s qZSI-jem</i>	<i>72</i>
<i>Slika 4.6 Topologija mikromreže predložene u [19].....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 4.7 Topologija mikromreže predložene u [20].....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 4.8 Konfiguracija sustava predloženog u [24].....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 5.1 Konfiguracija sustava za napajanje zasnovanog na baterijski potpomognutom qZSI-ju napajanom iz WECS-a [150]</i>	<i>82</i>
<i>Slika 5.2 Vektorski dijagram sinkrono rotirajućeg koordinatnog sustava orijentiranog prema magnetskom toku rotora.....</i>	<i>84</i>
<i>Slika 5.3 Vektorska nadomjesna T shema klasičnog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u dq koordinatnom sustavu</i>	<i>86</i>
<i>Slika 5.4 Vektorska nadomjesna T shema klasičnog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu</i>	<i>86</i>

<i>Slika 5.5 Struktura klasičnog indirektnog RFO vektorskog upravljanja SCIG-om u sustavu s qZSI-jem iz [150]</i>	<i>89</i>
<i>Slika 5.6 Vektorska nadomjesna T shema naprednog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu</i>	<i>92</i>
<i>Slika 5.7 Pojednostavljena vektorska nadomjesna T shema naprednog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu</i>	<i>93</i>
<i>Slika 5.8 Struktura naprednog indirektnog RFO vektorskog upravljanja SCIG-om u sustavu s qZSI-jem</i>	<i>95</i>
<i>Slika 5.9 Odnos momenta i brzine vrtnje na vratilu generatora pogonjenog vjetroturbinom .</i>	<i>97</i>
<i>Slika 5.10 Gubici u bakru, željezu i dodatni gubici u odnosu na iznos magnetskog toka rotora</i>	<i>100</i>
<i>Slika 5.11 Struktura FL MPPT algoritma vjetroturbine s optimizacijom po izlaznoj mehaničkoj snazi vjetroturbine (p_m).....</i>	<i>101</i>
<i>Slika 5.12 Funkcije pripadnosti varijabli FL regulatora brzine vrtnje SCIG-a: a) promjena mehaničke snage vjetroturbine, b) predznak korekcije referentnog iznosa brzine vrtnje i c) korekcija referentnog iznosa brzine vrtnje</i>	<i>103</i>
<i>Slika 5.13 Struktura FL MPPT algoritma vjetroturbine s optimizacijom po izlaznoj električnoj snazi WECS-a (p_{dc}).....</i>	<i>104</i>
<i>Slika 5.14 Dinamički odzivi izlazne snage vjetroturbine za FL MPPT algoritme s optimizacijom po p_{dc} i p_m pri promjeni brzine vjetra: a) 7 - 8 m/s, b) 8 - 9 m/s i c) 9 - 10 m/s</i>	<i>105</i>
<i>Slika 5.15 Dinamički odzivi mjerene i referentne brzine vrtnje SCIG-a za FL MPPT algoritme s optimizacijom po P_{dc} i P_m pri promjeni brzine vjetra a) 7 - 8 m/s, b) 8 - 9 m/s i c) 9 - 10 m/s.....</i>	<i>106</i>
<i>Slika 5.16 Struktura FL MPPT algoritma SCIG-a.....</i>	<i>106</i>
<i>Slika 5.17 Struktura MPPT algoritma SCIG-a zasnovanog na modelu stroja</i>	<i>109</i>
<i>Slika 5.18 Optimalne referentne vrijednosti magnetskog toka rotora određene za različite modele SCIG-a i IRFOC-a</i>	<i>110</i>
<i>Slika 5.19 Usporedba optimalnih referentnih vrijednosti magnetskog toka rotora određenih eksperimentalno i simulacijski uz primjenu predloženog naprednog modela stroja</i>	<i>112</i>
<i>Slika 5.20 Funkcije optimalnih referentnih vrijednosti magnetskog toka rotora dobivenih simulacijski za različite vrijednosti istosmjernog napona U_{dc}.....</i>	<i>112</i>

<i>Slika 5.21 Dinamički odzivi izlazne snage SCIG-a postignuti FL i predloženim MPPT algoritmom zasnovanim na modelu stroja</i>	<i>114</i>
<i>Slika 5.22 Dinamički odzivi reference magnetskog toka rotora dobiveni kod primjene MPPT-a zasnovanog na funkciji optimalnog magnetskog toka rotora i FL MPPT-a</i>	<i>114</i>
<i>Slika 5.23 Statičke karakteristike izlazne električne snaga SCIG-a u odnosu na mehaničku snagu vjetroturbine dobivene FL i predloženim MPPT algoritmom zasnovanim na modelu stroja.....</i>	<i>115</i>
<i>Slika 5.24 Konfiguracija predloženog otočnog vjetroatržišta zasnovanog na qZSI-ju s baterijama [150]</i>	<i>116</i>
<i>Slika 5.25 Struktura razvijenog upravljačkog algoritma integriranog WECS-qZSI sustava</i>	<i>117</i>
<i>Slika 5.26 Dijagram toka razvijenog EMS-a</i>	<i>120</i>
<i>Slika 5.27 Dinamički odziv brzine vrtnje SCIG-a u procesu pokretanja</i>	<i>122</i>
<i>Slika 5.28 Dinamički odzivi napona qZSI-ja u procesu pokretanja.....</i>	<i>122</i>
<i>Slika 5.29 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine, SCIG-a i baterija u procesu pokretanja.....</i>	<i>123</i>
<i>Slika 5.30 Dinamički odzivi snaga integriranog WECS-qZSI sustava na promjene snage trošila i brzine vjetra</i>	<i>124</i>
<i>Slika 5.31 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila i brzine vjetra</i>	<i>124</i>
<i>Slika 5.32 Dinamički odziv reference magnetskog toka rotora SCIG-a na promjene snage trošila i brzine vjetra</i>	<i>125</i>
<i>Slika 5.33 Dinamički odzivi napona integriranog WECS-qZSI sustava na promjene snage trošila i brzine vjetra</i>	<i>125</i>
<i>Slika 5.34 Dinamički odziv indeksa modulacije qZSI-ja na promjene snage trošila i brzine vjetra.....</i>	<i>126</i>
<i>Slika 5.35 Dinamički odzivi snaga pri dostizanju minimalne razine SOC-a</i>	<i>127</i>
<i>Slika 5.36 Dinamički odzivi napona pri dostizanju minimalne razine SOC-a.....</i>	<i>127</i>
<i>Slika 5.37 Dinamički odzivi a) brzine vrtnje SCIG-a, b) struja qZSI-ja i c) napona qZSI-ja pri dostizanju maksimalne razine SOC-a i regulaciji struje baterija</i>	<i>128</i>
<i>Slika 5.38 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon brzine vjetra ($U_{dc}=400\text{ V}$ $U_{ac}=230\text{ V}$): a) snage WECS-a i qZSI-ja; b) indeks modulacije i faktor pojačanja qZSI-ja.</i>	<i>130</i>
<i>Slika 5.39 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon ulaznog istosmjernog napona ($v_v=9\text{ m/s}$, $U_{ac}=230\text{ V}$): a) WECS i qZSI snage i b) qZSI struje.</i>	<i>131</i>

<i>Slika 5.40 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon izlaznog napona ($v_v=9$ m/s, $U_{dc}=400$ V): a) snage WECS-a i qZSI-ja; b) indeks modulacije i faktor pojačanja qZSI-ja.....</i>	<i>132</i>
<i>Slika 5.41 Dinamički odzivi na skokovitu promjenu opterećenja sustava u režimu rada bez vjetra: a) snaga baterije; b) naponi qZSI-ja; c) naponsko pojačanje.....</i>	<i>134</i>
<i>Slika 5.42 Konfiguracija integriranog WECS-qZSI sustava u spoju s mrežom</i>	<i>136</i>
<i>Slika 5.43 Struktura dijela upravljačkog algoritma integriranog WECS-qZSI sustava razvijenog za rad u spoju s mrežom</i>	<i>137</i>
<i>Slika 5.44 Dinamički odzivi struja pri skokovitim promjenama reference struje punjenja baterija</i>	<i>138</i>
<i>Slika 5.45 Dinamički odzivi napona a) i snaga b) pri skokovitim promjenama reference struje punjenja baterija</i>	<i>139</i>
<i>Slika 5.46 Dinamički odzivi a) snaga i b) qZSI napona pri uključenju i isključenju trošila u radu sa spojem na mrežu.....</i>	<i>140</i>
<i>Slika 6.1 Konfiguracija predložene mikromreže utemeljene na qZSI-ju, s dva distribuirana izvora i baterijskim SPE-om.....</i>	<i>144</i>
<i>Slika 6.2 Struktura dijela upravljačkog algoritma mikromreže s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, zaduženog za upravljanje qZSI-jem i FN izvorom</i>	<i>146</i>
<i>Slika 6.3 Struktura podsustava za upravljanje izlaznim izmjeničnim veličinama qZSI-ja.....</i>	<i>147</i>
<i>Slika 6.4 Struktura dijela upravljačkog algoritma mikromreže s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, zaduženog za upravljanje WECS-om</i>	<i>148</i>
<i>Slika 6.5 Struktura podsustava naprednog IRFOC algoritma</i>	<i>149</i>
<i>Slika 6.6 Blokovski dijagram MRAS algoritma za procjenu brzine vrtnje [169]</i>	<i>150</i>
<i>Slika 6.7 Dijagram toka EMS-a razvijenog u okviru upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>153</i>
<i>Slika 6.8 Struktura upravljačkog algoritma mikromreže s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora.....</i>	<i>154</i>
<i>Slika 6.9 Funkcija optimalnog iznosa magnetskog toka rotora korištena u MPPT algoritmu za SCIG.....</i>	<i>155</i>
<i>Slika 6.10 Fotografija izvedene laboratorijske makete.....</i>	<i>158</i>
<i>Slika 6.11 Vremenska crta eksperimenta u otopnom režimu rada za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>159</i>

<i>Slika 6.12 Dinamički odzivi snaga na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>161</i>
<i>Slika 6.13 Dinamički odzivi a) struja qZSI-ja, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>162</i>
<i>Slika 6.14 Izdvojeni dinamički odzivi a) snaga i b) napona na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora.....</i>	<i>164</i>
<i>Slika 6.15 Izdvojeni dinamički odzivi a) brzine vrtnje SCIG-a te b) reference magnetskog toka rotora i struje Δi_{std}^* na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora</i>	<i>165</i>
<i>Slika 6.16 Vremenska crta eksperimenta u otočnom režimu rada za algoritam s istovremenom optimizacijom</i>	<i>166</i>
<i>Slika 6.17 Dinamički odzivi a) snaga, b) struja qZSI-ja i c) napona qZSI-ja na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>167</i>
<i>Slika 6.18 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora.....</i>	<i>168</i>
<i>Slika 6.19 Izdvojeni dinamički odzivi a) snaga, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora.....</i>	<i>169</i>
<i>Slika 6.20 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra</i>	<i>171</i>
<i>Slika 6.21 Dinamički odzivi električne snage SCIG-a na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra.....</i>	<i>171</i>
<i>Slika 6.22 Dinamički odzivi izlazne snage FN izvora na porast osunčanosti.....</i>	<i>172</i>
<i>Slika 6.23 Dinamički odzivi ulaznog napona qZSI-ja (FN izvora) na porast osunčanosti....</i>	<i>173</i>
<i>Slika 6.24 Vremenska crta eksperimenta u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>173</i>
<i>Slika 6.25 Dinamički odzivi snaga na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>175</i>

<i>Slika 6.26 Dinamički odzivi a) struja qZSI-ja, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>176</i>
<i>Slika 6.27 Izdvojeni dinamički odzivi snaga na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora.....</i>	<i>177</i>
<i>Slika 6.28 Izdvojeni dinamički odzivi a) napona, b) brzine vrtnje SCIG-a i c) reference magnetskog toka rotora i struje Δi_{Td}^* na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora</i>	<i>178</i>
<i>Slika 6.29 Vremenska crta eksperimenta u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>179</i>
<i>Slika 6.30 Dinamički odzivi a) snaga i b) struja qZSI-ja na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora.....</i>	<i>180</i>
<i>Slika 6.31 Dinamički odzivi a) napona qZSI-ja i b) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	<i>181</i>
<i>Slika 6.32 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra</i>	<i>182</i>
<i>Slika 6.33 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra.....</i>	<i>183</i>
<i>Slika 6.34 Dinamički odzivi električne snage SCIG-a na porast a) brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra.....</i>	<i>183</i>
<i>Slika 6.35 Dinamički odzivi električne snage FN izvora na a) porast i b) smanjenje razine osunčanosti.....</i>	<i>184</i>
<i>Slika 6.36 Dinamički odzivi ulaznog napona qZSI-ja U_{dc} na a) porast i b) smanjenje razine osunčanosti.....</i>	<i>184</i>
<i>Slika 6.37 Dinamički odziv a) struja qZSI-ja i b) snaga pri promjeni reference struje baterije</i>	<i>186</i>
<i>Slika 6.38 Dinamički odziv struja qZSI-ja pri aktivaciji regulacije struje baterije u otočnom režimu rada</i>	<i>187</i>
<i>Slika 6.39 Dinamički odziv snaga pri aktivaciji regulacije struje baterije u otočnom režimu rada</i>	<i>188</i>

<i>Slika 6.40 Struktura podsustava za upravljanje izlaznim izmjeničnim veličinama qZSI-ja...</i>	189
<i>Slika 6.41 Mjereni naponi na izlazu qZSI-ja i u mreži u trenutku sinkronizacije</i>	190
<i>Slika 6.42 Dinamički odzivi a) napona i b) struja qZSI-ja u procesu sinkronizacije i uključenja na mrežu</i>	191
<i>Slika 6.43 Dinamički odzivi a) napona i b) struja qZSI-ja u procesu isključenja s mreže</i>	192
<i>Slika 6.44 Karakteristike statičke točnosti FN MPPT-a za upravljački algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	194
<i>Slika 6.45 Karakteristike statičke točnosti FN MPPT-a za upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora</i>	194
<i>Slika 6.46 Usporedba karakteristika statičke točnosti MPPT-a vjetroturbine za dva predložena upravljačka algoritma</i>	195
<i>Slika 6.47 Mjerena izlazna snaga SCIG-a s obzirom na brzinu vjetra</i>	197
<i>Slika 6.48 Gubici SCIG-a s obzirom na mehaničku snagu na vratilu.....</i>	198
<i>Slika 6.49 Korisnost qZSI-ja s obzirom na ulaznu snagu</i>	199
<i>Slika 6.50 Korisna i maksimalno dostupna izlazna snaga qZSI-ja s obzirom na ulaznu snagu</i>	199

Popis oznaka

A	površina koju opisuje rotor vjetroturbine
B	faktor pojačanja izmjenjivača kvazi Z-tipa
C_d	kondenzator u krugu pomoćnog trošila
C_f	kapacitet kondenzatora u LCL filtru
C_{dc}	kapacitet kondenzatora koji je spojen na ulaz izmjenjivača
C_1, C_2, C	kapacitet poprečnog i uzdužnog kondenzatora u istosmjernom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa, te kapacitet oba kondenzatora kada su jednaki
c_p	koeficijent snage vjetroturbine
D_d	dioda u krugu pomoćnog trošila
D_{ul}	dioda na ulazu u izmjenjivač kvazi Z-tipa
D_0, d_0	srednja i trenutna vrijednost faktora trajanja prostrijelnog stanja, slijedom
D_1	dioda u istosmjernom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa
e_a, e_b, e_c	trenutne vrijednosti faznih napona mreže
e_d, e_q	komponente vektora napona mreže
$\bar{f}^s$	vektor u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
f_d, f_q	komponente vektora u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
f_{sw}	frekvencija sklapanja sklopki izmjenjivača
G	naponsko pojačanje izmjenjivača kvazi Z-tipa
i_a, i_b, i_c	trenutne vrijednosti faznih struja na izlazu filtra
i_{bat}	trenutna vrijednost struje baterija
I_{bat}^*	referentna vrijednost struje baterija
i_{C1}, i_{C2}	trenutne vrijednosti struja kroz kondenzatore u impedancijskom krugu izmjenjivača
i_d, i_q	trenutne vrijednosti komponenata vektora struje na izlazu filtra u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
i_d^*, i_q^*	referentne vrijednosti komponenata vektora struje na izlazu filtra u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
i_{D1}	trenutna vrijednost struje diode u istosmjernom krugu izmjenjivača
i_{L1}, i_{L2}	trenutne vrijednosti struja kroz prigušnice u istosmjernom krugu izmjenjivača
I_{L1}, I_{L2}	srednja vrijednost struje kroz prigušnice $L1$ i $L1$ u istosmjernom krugu izmjenjivača

I_{ks}	srednja vrijednost struje kratkog spoja fotonaponskog panela
I_m	srednja vrijednost struje magnetiziranja stroja
$\bar{I}_m^0$	vektor struje magnetiziranja u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
i_{pn}	trenutna vrijednost struje na ulazu u most izmjenjivača
$\bar{I}_{rm}^0$	vektor struje gubitaka u željezu u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
i_{sd}, i_{sq}	komponente struje statora generatora sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
i_{sTd}, i_{sTq}	Theveninovi ekvivalenti komponenti struje statora generatora u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
$\bar{I}_s^s, \bar{I}_r^s$	vektori struja statora i rotora, slijedom, u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
$\bar{I}_s^0, \bar{I}_r^0$	vektori struja statora i rotora, slijedom, u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$\bar{I}_{sT}^0$	Theveninov ekvivalent vektora struje statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$i_{sa}, i_{s\beta}$	komponente struja statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$i_{sTa}, i_{sT\beta}$	komponente Theveninovih ekvivalenata struja statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
i_{rd}, i_{rq}	komponente struje rotora generatora sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
I_{fn}, i_{fn}	srednja i trenutna vrijednost struje fotonaponskog izvora, slijedom
K_h	koeficijent histereznih gubitaka
K_{in_ω}	ulazni faktor skaliranja regulatora brzine zasnovanog na neizrazitoj logici
K_{in_ψ}	ulazni faktor skaliranja regulatora toka rotora zasnovanog na neizrazitoj logici
K_{out_ω}	izlazni faktor skaliranja regulatora brzine zasnovanog na neizrazitoj logici
K_{out_ψ}	izlazni faktor skaliranja regulatora toka rotora zasnovanog na neizrazitoj logici
k_ψ	faktor toka rotora
L_f	induktivitet prigušnica u izlaznom filtru izmjenjivača
L_m	međuinduktivitet generatora
L_r	induktivitet rotora generatora
L_s	induktivitet statora generatora
L_1, L_2, L	induktiviteti prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa
$L_{\sigma r}$	rasipni induktivitet rotora generatora
$L_{\sigma s}$	rasipni induktivitet statora generatora
m_a, m_b, m_c	trenutne vrijednosti indeksa amplitudne modulacije u fazama izmjenjivača

$m_d, m_q,$	trenutne vrijednosti indeksa amplitudne modulacije u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
M	srednja vrijednost indeksa amplitudne modulacije izmjenjivača
M_{min}	minimalna dopuštena vrijednost indeksa amplitudne modulacije izmjenjivača
M_e, m_e	srednja i trenutna vrijednost elektromagnetskog momenta
M_m	srednja vrijednost mehaničkog momenta
n	brzina vrtnje rotora
N_0	broj koraka uzorkovanja u okviru trajanja jednog prostrijelnog stanja
p	broj pari polova generatora
P_{ac}, p_{ac}	srednja i trenutna vrijednost izlazne radne snage izmjenjivača kvazi Z-tipa
$P_{ac,max}$	maksimalna izlazna radna snaga sustava za napajanje
$P_{ac,min}$	minimalna izlazna radna snaga sustava za napajanje
$P_b^{praz,max}$	maksimalna snaga pražnjenja baterija
$P_b^{punj,max}$	maksimalna snaga punjenja baterija
P_{Cu}	gubici u bakru
P_{dc}	srednja vrijednost ulazne snage izmjenjivača
P_{ec}	gubici vrtložnih struja
P_{Fe}	gubici u željezu
P_h	gubici histereze
P_{fn}, p_{fn}	srednja i trenutna vrijednost snage fotonaponskog izvora, slijedom
$P_{fn,mpp}$	maksimalna snaga fotonaponskog izvora
$P_{gubitaka}$	snaga električnih gubitaka izmjenjivača kvazi Z-tipa
P_L	srednja vrijednost gubitaka prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača
P_m, p_m	srednja i trenutna vrijednost snage na vratilu vjetroturbine
P_{m-max}	snaga vjetroturbine u točki maksimalne snage
P_{maks}	maksimalna raspoloživa izlazna električna snaga izmjenjivača kvazi Z-tipa
P_{mr}, p_{mr}	srednja i trenutna vrijednost radne snage koja se razmjenjuje s mrežom, slijedom
P_{ODS}	referenca radne snage operatora distribucijskog sustava
P_{SCIG}, p_{SCIG}	srednja i trenutna vrijednost izlazne snage SCIG-a
P_{SLL}	dodatni gubici stroja
P_{ukupno}	ukupni električni gubici stroja
Δp_m	inkrementalna promjena trenutne vrijednosti snage na vratilu vjetroturbine između dva koraka uzorkovanja

Δp_{dc}	inkrementalna promjena trenutne vrijednosti snage na ulazu qZSI-ja između dva koraka uzorkovanja
Q_{ODS}	referenca radne snage operatora distribucijskog sustava
r	polumjer rotora vjetroturbine
R_{ac}	radni otpor trošila
R_{add}	nadomjesni otpor dodatnih gubitaka
$R_{add,nazivno}$	vrijednost nadomjesnog otpora dodatnih gubitaka određena standardnim pokusom s promjenjivim opterećenjem stroja
R_{bat}	nadomjesni unutarnji otpor baterija
R_{C1}, R_{C2}, R_C	unutarnji radni otpor kondenzatora C_1 i C_2 u impedancijskom krugu
R_d	prigušni otpor u LCL filtru
R_f	unutarnji radni otpor prigušnica izlaznog filtra izmjenjivača
R_{L1}, R_{L2}, R_L	unutarnji radni otpori prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača
R_m	nadomjesni otpor gubitaka u željezu
R_o	nadomjesni serijski otpor baterije
R_r	radni otpor namota rotora
R_s	radni otpor namota statora
R_{sT}	Theveninov ekvivalent radnog otpora namota statora
R_t	radni otpor trofaznog simetričnog trošila
s	kompleksna varijabla Laplaceove transformacije
S	upravljački signali za tranzistore u mostu izmjenjivača
T	trenutna temperatura fotonaponskog panela
t	vrijeme
T_n	nazivna temperatura fotonaponskog panela
T_r	vremenska konstanta rotora generatora
T_{r1-6}	oznaka tranzistora u mostu izmjenjivača
T_{rd}	tranzistor u krugu dodatnog trošila
T_s	period uzorkovanja signala
T_{sw}	period sklapanja sklopki izmjenjivača
T_0	period prostrijelnog stanja
t_w	vremenski period u kojem se akumuliraju energije gubitaka algoritma koji radi s trenutnim vrijednostima signala

$\hat{U}_{ac}$	vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na izlazu izmjenjivača
U_{ac}	efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona na izlazu izmjenjivača
U_{ac}^*	referentna efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona na izlazu izmjenjivača
u_a, u_b, u_c	trenutne vrijednosti izmjeničnih faznih napona
u_{C1}, u_{C2}	trenutna vrijednost napona na poprečnom i uzdužnom kondenzatoru u istosmjernom krugu izmjenjivača, slijedom
U_{C1}, U_{C2}	srednja vrijednost napona na poprečnom i uzdužnom kondenzatoru u istosmjernom krugu izmjenjivača, slijedom
u_d, u_q	trenutne vrijednosti komponenata vektora izmjeničnog napona u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
u_d^*, u_q^*	referentne vrijednosti komponenata vektora izmjeničnog napona u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
u_{D1}	trenutna vrijednost pada napona na diodi u istosmjernom krugu izmjenjivača
U_{dc}, u_{dc}	srednja i trenutna vrijednost ulaznog napona izmjenjivača kvazi Z-tipa, slijedom
U_{dc}^*	referentna vrijednost ulaznog napona izmjenjivača kvazi Z-tipa
U_{fn}, u_{fn}	srednja i trenutna vrijednost napona fotonaponskog izvora, slijedom
u_{L1}, u_{L2}	trenutne vrijednosti napona na prigušnicama u istosmjernom krugu izmjenjivača
$\hat{U}_m$	vršna vrijednost osnovnog harmonika mrežnog napona
U_n, U_p	referentni istosmjerni naponi korišteni za generiranje prostrijelnih stanja kod konvencionalne metode
U_{ph}	napon praznog hoda fotonaponskog panela
U_{pn}, u_{pn}	vršna i trenutna vrijednost napona na ulazu u most izmjenjivača kvazi Z-tipa, slijedom
u_{ref}	trenutna vrijednost referentnog signala kod pulsno-širinske modulacije
u_{RL1}, u_{RL2}	padovi napona na unutarnjim otpornicima prigušnica u impedancijskom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa
u_{RC1}, u_{RC2}	pad napona na unutarnjim otpornicima kondenzatora u impedancijskom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa
$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$	komponente vektora napona statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$u_{sT\alpha}, u_{sT\beta}$	komponente Theveninovih ekvivalenata vektora napona statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu

$\bar{u}_s^0$	Theveninov ekvivalent vektora napona statora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$\bar{u}_s^s, \bar{u}_r^s$	vektori napona statora i rotora, slijedom, u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
$\bar{u}_s^0, \bar{u}_r^0$	vektori napona statora i rotora, slijedom, u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
$\hat{U}_t$	vršna vrijednost osnovnog harmonika napona trošila
U_t	Efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona trošila
u_{tr}	trenutna vrijednost trokutastog signala nosioca
W	Energija
v_v	neometana brzina vjetra
Z	Osunčanost fotonaponskog izvora
β	kut zakreta lopatica
Δp_{dc}	razlika iznosa trenutne vrijednosti ulazne snage qZSI-ja između dva koraka uzorkovanja
Δu_{dc}	razlika iznosa trenutne vrijednosti ulaznog napona qZSI-ja između dva koraka uzorkovanja
ΔU_{dc}^*	korak promjene referentne vrijednosti ulaznog napona izmjenjivača kvazi Z-tipa na izlazu algoritma za traženje točke maksimalne snage fotonaponskog izvora
$\Delta\omega$	inkrementalna promjena kutne brzine rotora između dva koraka uzorkovanja
θ	kut vektora napona
θ_{mm}	kut vektora napona mikromreže
θ_{mr}	kut vektora napona mreže
θ_s	kut statorskih električnih veličina stroja
θ_r	kut rotorskih električnih veličina stroja
$\theta_{\bar{\psi}}$	kut vektora ulančenog magnetskog toka rotora
λ	omjer tangencijalne brzine vrha lopatica rotora i neometane brzine strujanja zraka
ψ_r	iznos ulančenog magnetskog toka rotora
ψ_s	iznos ulančenog magnetskog toka statora
$\psi_{s,nazivno}$	nazivni iznos ulančenog magnetskog toka statora
$\bar{\psi}_r$	vektor ulančenog magnetskog toka rotora

$\bar{\Psi}_r^s, \bar{\Psi}_s^s$	vektor ulančenog magnetskog toka rotora i statora, slijedom, u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
$\bar{\Psi}_s^0, \bar{\Psi}_s^0$	vektor ulančenog magnetskog toka rotora i statora, slijedom, u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
Ψ_{rd}, Ψ_{rq}	komponente vektora ulančenog magnetskog toka rotora u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
$\Psi_{ra}, \Psi_{r\beta}$	komponente vektora ulančenog magnetskog toka rotora u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu
ρ	gustoća zraka
ω	kutna brzina rotora
ω'	procijenjena vrijednost kutne brzina rotora
ω^*	referentna vrijednost kutne brzine rotora
ω_r	kutna brzina rotorskih veličina
ω_s	kutna brzina statorskih veličina
$\omega_{s,nazivno}$	nazivna kutna brzina statorskih veličina
ω_{ac}	kutna brzina vektora izmjeničnog napona
ω_{mr}	kutna brzina vektora napona mikromreže
ω_{mr}	kutna brzina vektora napona mreže

1. UVOD

1.1. Motivacija i osvrt na postojeća rješenja

Integracija obnovljivih izvora energije u energetske sustave je proces koji traje već više od desetljeća a potaknut je zelenom tranzicijom energetskog sustava. Integracija se odvija kako na razini prijenosnog sustava i energetskih postrojenja velikih snaga tako i na razini energetskih postrojenja srednjih i malih snaga, odnosno na razini distribucijske mreže. Dok s jedne strane integracija velikih energetskih postrojenja obnovljivih izvora ne predstavlja veliku promjenu u konfiguraciji energetskog sustava, integracija na razini distribucijske mreže predstavlja temeljitu promjenu u načinu funkcioniranja energetskog sustava. Značajno povećanje broja izvora povezanih na distribucijsku mrežu, odnosno distribuiranih izvora [1], je velikim dijelom uzrokovano i ulaganjima na razini država gdje je instalacija takvih izvora sufinancirana od strane države. Primjerice, samo u Hrvatskoj je između 2018. i 2023. proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora u narasla za 68 % [1, 2].

Ovaj proces integracije obnovljivih distribuiranih izvora i dalje traje, ali sa sobom nosi i neke negativne strane. To su prvenstveno poteškoće vezane za sustave zaštite, koordinaciju rada distribuiranih izvora, preopterećenja mreže uslijed neprilagođenosti distribuiranoj proizvodnji itd. Iz tog razloga se sve više kroz znanstvenu i tehničku literaturu predlaže integracija distribuiranih izvora kroz mikromreže. Mikromreža predstavlja izdvojeni sustav napajanja koji uključuje distribuirane izvore, lokalna trošila, sustave pohrane energije (SPE), koji pritom može raditi potpuno neovisno ili u spoju s glavnom mrežom. Takva integracija distribuiranih izvora pruža višestruke prednosti u odnosu na trenutne pristupe integraciji distribuiranih izvora. S tehničke strane, mikromreže nude veću sigurnost napajanja i otpornost na poremećaje u mreži, zahvaljujući mogućnosti neovisnog rada. Zahtjevi za upravljanje distribuiranim izvorima se s glavne mreže prenose na upravljački sustav mikromreže i na taj način se osnažuje stabilnost i pojednostavljuje koordinacija unutar distribucijske mreže. Isto tako, olakšava se i sama integracija obnovljivih izvora čija se stohastička priroda proizvodnje ublažava kada su povezani na zajedničku mikromrežu, posebno ako je u mikromrežu integriran i SPE. S ekonomskog gledišta, smanjuju se i zahtjevi za ulaganja u jačanje mrežnih kapaciteta budući da se energija proizvodi i troši lokalno, bez prijenosa na velike udaljenosti. To doprinosi i povećanju učinkovitost energetskog sustava uslijed manjih gubitaka prijenosa i distribucije.

U kontekstu obnovljivih distribuiranih izvora, dva najzastupljenija izvora su fotonaponski (FN) izvori i vjetroagregati. Kao takvi su razmatrani i u okviru ove doktorske disertacije, u kojoj se predlaže koncept mikromreže i pripadajućeg upravljačkog algoritma. Glavni cilj predložene mikromreže je postići učinkovitu proizvodnju i potrošnju električne energije na razini mikromreže, minimizirajući pritom broj implementiranih poluvodičkih energetske pretvarača. Poluvodički energetski pretvarači su ključne komponente svake mikromreže a i općenito su gotovo neizbježni pri integraciji obnovljivih izvora. Tradicionalni dvosmjerni pretvarači s utisnutim naponom su trenutno standard za integraciju obnovljivih izvora energije, ali ih karakteriziraju i određeni nedostaci: imaju ograničenu mogućnost naponskog pojačanja, osjetljivi su na prostrijelna stanja, odnosno kratkotrajne kratke spojeve u mostu izmjenjivača, i ograničene su im mogućnosti pri integraciji više izvora. U slučaju integracije više distribuiranih izvora, primjerice FN izvora i vjetroagregata, u konfiguracijama s klasičnim poluvodičkim pretvaračima potrebno je koristiti dodatni pretvarač za svaki izvor, pa i za SPE ako se koristi. Kako bi se nadišli ti nedostaci, ali i ponudila alternativa postojećim rješenjima, izmjenjivač kvazi Z-tipa (qZSI od *engl.* quasi-Z-source inverter) se nameće kao primamljivo rješenje.

Topologija qZSI-ja je jedna od izvedenica izvorne topologije izmjenjivača Z-tipa [3, 4]. Karakterizira ga jedinstveni impedancijski krug, postavljen na ulaz mosta izmjenjivača, kojim je omogućeno dodatno naponsko pojačanje i otpornost na kratke spojeve unutar mosta izmjenjivača. Upravo je postizanjem kratkotrajnih kratkih spojeva, odnosno prostrijelih stanja (ST, od *engl.* shoot through), uz povezani impedancijski krug, omogućeno naponsko pojačanje qZSI-ja. Implementacijom impedancijskog kruga dodana su i dodatna energetska sučelja na koja se mogu povezati ili drugi izvori ili SPE. Uz navedeno, qZSI omogućuje i drugi stupanj slobode upravljanja, koji je utemeljen na upravljanju trajanjem ST stanja, uz već postojeću mogućnost upravljanja pulsno-širinskom modulacijom (PWM, od *engl.* pulse-width modulation) izlaznog napona. Time se otvara mogućnost istovremenog upravljanja dvjema upravljačkim veličinama istovremeno. Te prednosti dakle u kontekstu konkretne mikromreže s FN izvorom, vjetroagregatom i SPE-om omogućuju izravno povezivanje FN izvora i SPE-a na qZSI, bez dodatnog pretvarača. Upravljanjem ulaznim naponom qZSI-ja se može postići upravljanje radnom točkom FN izvora, primjerice za potrebu optimizacije, a drugi stupanj slobode upravljanja se može iskoristiti ili za raspolaganje energijom SPE-a povezanog u impedancijski krug ili za upravljanje izlaznim veličinama izmjenjivača.

Unatoč navedenim prednostima, implementacija qZSI-ja u mikromrežama je minimalno istražena u literaturi. Najčešće razmatrana primjena je u sustavima za napajanje iz FN izvora,

što je i očekivano imajući u vidu karakteristike qZSI-ja i zahtjeve FN izvora [5-12]. U literaturi razmatrani sustavi za napajanje s qZSI-jem i FN izvorima su različite razine složenosti i s različitim funkcionalnim mogućnostima. Kako je u okviru ove doktorske disertacije razmatrano učinkovito upravljanje tokovima energije u mikromreži, predloženi radovi u literaturi su podijeljeni s obzirom na to je li u njima razmatrano upravljanje tokovima energije ili implementiran sustav za raspolaganje energijom. Primjerice, u radovima [5-8] su izvedeni sustavi za raspolaganje energijom, gdje je najčešće riječ o raspolaganju energijom baterija. Uz to su implementirani i algoritmi za praćenje točke maksimalne snage (MPPT, od *engl.* maximum power point tracking) kojima se osigurava maksimizacija proizvodnje FN izvora. Što se tiče integracije qZSI-ja s vjetroagregatima, broj znanstvenih radova koji se bavi tom tematikom je još i manji [13-16]. Od navedenih radova, samo je u [13] i [14] razmatrana implementacija qZSI-ja s vjetroagregatom a da je pritom predložena i strategija upravljanja tokovima energije. Isto tako, vrijedi naglasiti da je u svim navedenim radovima u okviru vjetroagregata razmatrana isključivo primjena sinkronog generatora s permanentnim magnetima (PMSG, od *engl.* permanent magnet synchronous generator). Pritom je mogućnost drugog stupnja slobode upravljanja qZSI-ja iskorištena za upravljanje PMSG-om, korekcijom ulaznog napona qZSI-ja. Treba istaknuti da su autori koristili dodatni poluvodički pretvarač za povezivanje vjetroagregata na qZSI. Primjena qZSI-ja s drugim tipovima generatora korištenih u okviru vjetroagregata se samo još može pronaći u ulogama gdje se trošila iz vjetroagregata ne napajaju preko qZSI-ja, već je qZSI povezan paralelno i koristi se u funkciji statičkog kompenzatora (STATCOM, od *engl.* static synchronous compensator) za održavanje vrijednosti napona [17, 18].

Primjeri integracije qZSI-ja kao središnje komponente mikromreže su u literaturi zastupljeni u svega dva rada [19, 20]. Nešto veći broj radova se može pronaći ako se sagleda ne samo klasična topologija qZSI-ja već i modificirana topologija koja omogućuje dvosmjerni tok energije [21-23]. Topologija dvosmjernog qZSI-ja se dobije dodavanjem dodatne poluvodičke sklopke u impedancijski krug izmjenjivača a čime se povećava složenost sustava. Iako mogućnost dvosmjernog toka energije ovu topologiju qZSI-ja čini potencijalno boljom opcijom za integraciju u mikromreže, upravljanje je također znatno složenije nego li kod klasičnog qZSI-ja. Valja spomenuti i kako je u svim radovima u kojima se predlaže, napravljena je isključivo simulacijska validacija predloženih sustava ali svakako, topologija dvosmjernog qZSI-ja nije tema ovog istraživanja. Što se tiče klasičnog qZSI-ja u mikromrežama, u radu [19] je predložena mikromreža s FN izvorom povezanim na istosmjerni ulaz qZSI-ja te s dodatnom istosmjernom

sabirnicom povezanom u impedancijski krug izmjenjivača. Autori su predložili i sustav za raspolaganje energijom kojem je cilj optimizacija raspolaganja vodikom (na istosmjernu sabirnicu je povezan elektrolizator i vodikova gorivna ćelija). Iako je navedeno u naslovu rada kako je riječ o mikromreži, predloženi sustav je ispitan isključivo u spoju s mrežom. Slično vrijedi i za [20], gdje je predložena mikromreža ispitana samo u otočnom režimu rada, a i upravljački sustav nije predviđen za rad u spoju s mrežom. U ovom slučaju je riječ o mikromreži s FN izvorom i vjetroagregatom – oba povezana preko dodatnog poluvodičkog pretvarača na ulaznu sabirnicu qZSI-ja, na koju su baterije povezane izravno. Takvom konfiguracijom mikromreže nisu iskorištene prednosti omogućene qZSI-jem te se značajno razlikuje od konfiguracije mikromreže razmatrane u okviru ove doktorske disertacije. U [24] je predložen sustav napajanja zasnovan na qZSI-ju, s dva distribuirana izvora. Korišteni su FN izvor i vjetroagregat (s PMSG-om) povezani na qZSI na isti način kao što je to izvedeno u mikromreži predloženoj u ovoj doktorskoj disertaciji. Ipak, u [24] je riječ o sustavu namijenjenom samo za rad u spoju s mrežom i bez baterijskog SPE-a.

Prethodno je istaknuto kako je u svim razmatranim slučajevima integracije vjetroagregata s qZSI-jem korišten PMSG. To je važno za istaknuti budući da je u vjetroagregatu kakav je implementiran u ovoj doktorskoj disertaciji korišten kavezni asinkroni generator (SCIG, od *engl.* squirrel-cage induction generator). Integracija vjetroagregata s qZSI-jem do sada nije razmatrana u literaturi. Iako je općenito u vjetroenergetskim sustavima sustavima (WECS, od *engl.* wind energy conversion system) manjih snaga do sada PMSG bio često preferiran zbog jednostavnosti upravljanja, veće učinkovitosti i mogućnosti rada bez vanjske uzbuđe [25, 26] u posljednje vrijeme SCIG postaje kvalitetna alternativa [27, 28]. To posebno vrijedi u slučajevima sustava manjih snaga, kakav je razmatran i ovdje, gdje cijena generatora može imati značajnu ulogu u ukupnom kapitalnom trošku cijelog sustava. Uz to, SCIG karakterizira jednostavnije održavanje, veća pouzdanost, niža cijena i manje dimenzije po kW nazivne snage. Napretkom računalnih i upravljačkih sustava te energetske elektronike omogućeno je izvođenje naprednih upravljačkih algoritama koji omogućuju kvalitetno upravljanje SCIG-om u stvarnom vremenu. S kvalitetnim upravljanjem se omogućuje i izvođenje različitih MPPT algoritama kojima se povećava učinkovitost ne samo SCIG-a nego i vjetroturbine kao pogonskog stroja.

1.2. Ciljevi i hipoteze rada

Osnovni cilj ove doktorske disertacije je razviti upravljački algoritam mikromreže zasnovane na qZSI-ju – s FN izvorom, WECS-om i baterijskim SPE-om – koji bi trebao omogućiti učinkovitu proizvodnju, pohranu i potrošnju električne energije kako u otočnom režimu rada tako i u spoju s mrežom te osigurati mogućnost prelazaka između ovih režima rada. Uz to je cilj i osigurati učinkovitu proizvodnju energije iz integriranog WECS-a, bez primjene mjernih senzora brzine vrtnje i momenta a uz korištenje naprednog modela SCIG-a i naprednih regulatora. Stoga su postavljene sljedeće hipoteze:

1. Primjena algoritma vektorskog upravljanja temeljenog na matematičkom modelu SCIG-a s uračunatim gubicima u željezu i dodatnim gubicima trebala bi rezultirati točnijom orijentacijom referentnog koordinatnog sustava i kvalitetnijom regulacijom SCIG-a pogonjenog vjetroturbinom.
2. Optimalni iznosi ulančenog magnetskog toka rotora SCIG-a, koji rezultiraju minimalnim gubicima stroja, određeni primjenom pripadajućeg matematičkog modela s uračunatim gubicima u željezu i dodatnim gubicima trebali bi bolje odgovarati iznosima koji zaista rezultiraju maksimalnom izlaznom snagom SCIG-a u usporedbi s iznosima toka dobivenim primjenom modela kod kojeg su spomenuti gubici zanemareni.
3. Primjena naprednog regulatora temeljenog na algebri granica (HA, od *engl.* hedge algebra) umjesto standardnog proporcionalno-integrirajućeg (PI) regulatora za regulaciju brzine vrtnje vjetroatregata trebala bi rezultirati bržom optimizacijom vjetroturbine i SCIG-a u cijelom radnom opsegu vjetroatregata.
4. Algoritmi za procjenu brzine vrtnje i elektromagnetskog momenta SCIG-a temeljeni na pripadajućem matematičkom modelu s uračunatim gubicima u željezu i dodatnim gubicima trebali bi biti točniji u usporedbi s algoritmima temeljenim na modelu kod kojeg su ovi gubici zanemareni.
5. Vektorski upravljani SCIG je moguće implementirati kao dio vjetroatregatskog sustava s PWM upravljanim ispravljačem, izmjenjivačem kvazi Z-tipa i baterijskim sustavom pohrane, kako u otočnom radu – za napajanje autonomnih trošila i/ili punjenje baterija – tako i u radu s priključkom na glavnu (distribucijsku) mrežu, te pritom omogućiti

regulaciju stanja napunjenosti baterija i ostvariti maksimalnu izlaznu snagu iz vjetroagregata.

6. U razmatranoj mikromreži sačinjenoj od vjetroagregata s vektorski upravljanim SCIG-om, PWM upravljanoj ispravljača, FN izvora, qZSI-ja s integriranim baterijama i autonomnih trošila, moguće je u okviru upravljačkog algoritma ostvariti višestruke ciljeve upravljanja poput:

- optimizacije izlazne snage vjetroturbine, SCIG-a i FN izvora
- regulacije stanja napunjenosti baterijskog sustava pohrane
- regulacije amplitude i frekvencije izlaznog napona qZSI-ja na mrežnim vrijednostima u otočnom režimu rada
- sinkronizacije i prijenosa električne energije iz mikromreže u distribucijsku mrežu ili obratno uz jedinični faktor snage u režimu rada s priključkom na mrežu
- prijelaza između ovih dvaju režima
- detekcije i zaštite od kvarnih stanja
- upravljanja potrošnjom
- stabilnog rada u uvjetima nedovoljne osunčanosti i/ili vjetra
- samostalnog pokretanja mikromreže (tzv. crni start)

7. U svrhu optimizacije izlazne snage vjetroturbine i SCIG-a moguće je umjesto pripadajućih izlaznih snaga u razmatranoj mikromreži koristiti ulaznu snagu qZSI-ja te time eliminirati potrebu za mjerenjem/procjenom mehaničkog momenta vjetroturbine kao i potrebu za poznavanjem upravljačkih impulsa ispravljača vjetroagregata. Ulaznu snagu qZSI-ja je, pritom, moguće odrediti kao umnožak referentne vrijednosti ulaznog napona qZSI-ja, koja je dostupna u okviru upravljačkog algoritma, i mjerene istosmjerne ulazne struje qZSI-ja.

1.3. Pregled strukture doktorske disertacije

Ova doktorska disertacija strukturno je podijeljena na 8 poglavlja. Nakon prvog, uvodnog poglavlja, drugo poglavlje je posvećeno upoznavanju s pojmom i ključnim karakteristikama mikromreža. Prikazane su različite moguće strukture mikromreža razmatrane u literaturi, istosmjerne, izmjenične i hibridne. Razmotreni su različiti distribuirani izvori koji se najčešće u praksi koriste u kombinaciji s mikromrežama. Pritom su detaljnije opisane karakteristike vjetroagregata i FN izvora koji su korišteni u okviru istraživanja obuhvaćenog ovom disertacijom. Uz distribuirane izvore razmotreni su i različiti SPE-ovi, s posebnim naglaskom na baterijske sustave koji su korišteni u predloženoj mikromreži. Sagledane su i različite strukture i strategije upravljanja mikromrežom te su izdvojeni najčešće korišteni poluvodički energetske pretvarači, kao i njihove uloge u upravljanju mikromrežom.

U trećem poglavlju je detaljno prikazan qZSI, počevši od topologije i osnovnog matematičkog modela preko osnovnih i naprednijih metode upravljanja pa do mogućnosti regulacije ulaznog i izlaznog napona te su pokazani i konkretni rezultati laboratorijskog ispitivanja. Razmotrene su i različite mogućnosti integracije baterijskog SPE-a u impedancijski krug qZSI-ja.

U četvrtom poglavlju je napravljen pregled literature po pitanju primjene qZSI-ja s distribuiranim izvorima i u mikromrežama. Posebno su istaknuta dostupna istraživanja kojima je razmatrano raspolaganje tokovima snaga u energetskim sustavima zasnovanim na qZSI-ju.

U petom poglavlju je prikazana izvedba integriranog WECS-qZSI sustava koja je jedinstvena u literaturi u smislu integracije SCIG-a s qZSI-jem. Najprije su razmotreni principi upravljanja i optimizacije vjetroturbine i SCIG-a, a potom su razmotreni u literaturi poznati MPPT algoritmi korišteni za optimizaciju vjetroturbine i SCIG-a. Prikazana je nova metoda optimizacije SCIG-a, zasnovana na modelu, koja je razvijena u okviru istraživanja prikazanog ovom disertacijom. Predstavljen je cjelokupni upravljački algoritam kojim je omogućen učinkovit rad integriranog WECS-ZSI sustava – u otočnom režimu rada i u spoju s mrežom. Prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja kojim su evaluirana dinamička i statička svojstva sustava.

Šesto poglavlje je posvećeno detaljnom prikazu i analizi predložene mikromreže i upravljačkog algoritma. Najprije je prikazana konfiguracija mikromreže i strukture dvaju predloženih upravljačkih algoritama. Zatim su predloženi upravljački algoritmi s istovremenim i s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora. Potom je prikazana laboratorijska maketa na kojoj su izvedena eksperimentalna ispitivanja te sami rezultati ispitivanja. Rezultati ispitivanja

su prikazani za oba predložena upravljačka algoritma napose, a potom su i međusobno uspoređeni. Uspoređeni su dinamički odzivi i statičke karakteristike kojima je prikazana točnost MPPT algoritama koja je postignuta u oba slučaja te je uspoređena s podacima iz literature. Statičkim karakteristikama je dodatno prikazana korisnost sustava kao i raspodjela snage u sustavu. Uz to su ispitane mogućnosti regulacije struje baterija u otočnom režimu rada i u spoju s mrežom a zasebno je prikazan i postupak sinkronizacije, uklopa i isklopa s mreže.

Sedmo poglavlje donosi pregled znanstvenih doprinosa na kojima je utemeljenja ova doktorska disertacija, uz sažetak ključnih rezultata ostvarenih kroz istraživanje, razvoj i eksperimentalnu provjeru predložene mikromreže.

Zaključak disertacije dan je u osmom poglavlju disertacije, a potom slijedi popis relevantne literature korištene tijekom njezine izrade.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE MIKROMREŽA

Mikromreže predstavljaju alternativni pristup razvoja elektroenergetskog sustava gdje sveobuhvatnu energetska mrežu zapravo čini skupina više manjih i međusobno neovisnih mreža, tj., mikromreža. Definicija mikromreže koja prevladava u literaturi je ona vladinog odjela za energiju SAD-a gdje je definirana kao skupina međusobno povezanih trošila i distribuiranih energetska izvora s jasno definiranim električnim granicama, koja s obzirom na glavnu mrežu predstavlja jedinstvenu upravljivu cjelinu i koja se može spojiti ili odspojiti od glavne mreže kako bi se omogućio mrežni ili otočni način rada [29]. Iz toga proizlazi da svaka mikromreža mora ispunjavati sve zahtjeve koji se postavljaju i pred klasične mreže. Prema tome, mikromreža mora sadržavati izvore električne energije, sustav prijenosa energije, lokalne potrošače te eventualno i SPE. Energetske izvore u mikromrežama čine distribuirani energetska izvori, koji su vrlo često obnovljivi izvori energije (OIE) te su manjih kapaciteta u odnosu na klasične elektrane. Kako bi se energija iz distribuiranih izvora iskoristila za napajanje lokalnih trošila, nužna je distribucijska infrastruktura koja, iako nije prostorno opsežna kao u slučaju klasičnih mreža, mora osigurati stabilan prijenos energije. Konfiguracija distribucijske infrastrukture unutar mikromreže u literaturi se jednostavno naziva konfiguracijom mikromreže i značajno ovisi o vrsti korištenih izvora, potrošača a isto tako i o namjeni mikromreže. S obzirom na raznolikosti izvora i trošila, u mikromrežama se mogu koristiti istosmjerne ili izmjenične sabirnice i vodovi a moguća je i kombinacija jednih i drugih. To je ujedno i osnovni kriterij podjele mikromreža prema kojem se razlikuju istosmjerne, izmjenične i hibridne mikromreže [30]. Dodatni element u mikromrežama su SPE-ovi koji, iako nisu nužni za funkcionalnost mikromreže, uvelike doprinose funkcionalnosti mikromreža i na njih povezanih distribuiranih izvora. Njihova primarna svrha je pohranjivanje eventualnih viškova u proizvodnji energije te kompenzacija manjka dostupne snage iz izvora. Kako bi mikromreža mogla neovisno djelovati, uz izvore i SPE potreban je i pripadajući upravljački sustav koji je zadužen za raspolaganje energijom unutar same mikromreže te za upravljanje tokovima energije između mikromreže i glavne mreže ili drugih mikromreža. Uz to, upravljački sustav je zadužen za regulaciju električnih veličina na zadanim vrijednostima.

Razvoj i implementacija mikromreža može biti vođena različitim motivima, koji se pritom ne moraju nužno podudarati s ekonomskom opravdanosti. Kao što je navedeno u [31-34], osim motiva temeljenih na ekonomskoj opravdanosti, to mogu biti motivi tehničke prirode ili zahtjevi prema sigurnosti napajanja i kvaliteti energije, bez obzira na tehničku složenost. Tehnička

opravdanost razvoja mikromreža utemeljena je na sve većoj integraciji obnovljivih izvora u postojeći distribucijski sustav, zbog čega se javlja sve više poteškoća sa stabilnošću i pouzdanošću postojećih distribucijskih sustava, koji su razvijeni i prilagođeni malobrojnim klasičnim upravljivim energetske izvorima [35]. Naime, s masovnom integracijom obnovljivih izvora pojavljuje se na tisuće dodatnih izvora, koji su pritom najčešće i neupravljivi, te se javlja potreba za koordinacijom svih tih izvora na razini distribucijske ili prijenosne mreže na koju su povezani. Kako bi se izbjeglo upravljanje velikim brojem izvora iz jedne centralne točke, moguće je više izvora povezati u mikromrežu, zajedno s lokalnim potrošačima, te koordinacijom unutar mikromreže postići da ona u odnosu na glavnu mrežu djeluje kao jedan izvor ili potrošač. U tom slučaju, izvorima unutar mikromreže koordinira upravljački sustav mikromreže, odnosno sustav za raspolaganje energijom (EMS, od *engl.* energy management system), koji također upravlja i SPE-ovima te potrošačima ako su upravljivi potrošači povezani na sustav. Kvalitetnim je upravljanjem oscilacije u izlaznoj snazi obnovljivih izvora moguće kompenzirati unutar same mikromreže, čime se postiže stabilna razmjena energije s glavnom mrežom. Time se otklanja potreba za koordinacijom većeg broja izvora od strane operatora glavne mreže. S druge strane, umanjuje se negativan utjecaj na stabilnost glavne mreže te se razmjena s mikromrežom može regulirati i postaviti prema trenutnim uvjetima u glavnoj mreži i mikromreži.

U kontekstu integracije obnovljivih izvora i povećanja efikasnosti sustava, doprinos mikromreža je isto tako i smanjenje gubitaka prijenosa energije, koja se u energetske sustavu sačinjenom od većeg broja mikromreža ne prenosi na velike udaljenosti, već se proizvodi i troši lokalno. Osim smanjenja gubitaka, smanjuje se i potreba za izgradnjom dodatnih prijenosnih/distribucijskih kapaciteta. Uzme li se u obzir i sve veći broj potrošača, primjerice električnih automobila, koji značajno utječu na potrošnju i vršna opterećenja, efikasnom implementacijom mikromreža s odgovarajućim upravljačkim strategijama moguće je, osim tehničkih, ostvariti i određene ekonomske koristi. To može biti smanjenje početne investicije uslijed manje zahtijevane snage u točki zajedničkog spoja (PCC, od *engl.* point of common coupling) ili smanjenje potrošnje energije iz mreže maksimalnim iskorištenjem lokalno proizvedene energije obnovljivih izvora [36]. Ekonomska korist može se očitati i smanjenjem potrošnje goriva neobnovljivih izvora, koji se upravljaju prema stanju i prognozi proizvodnje obnovljivih izvora, a isto tako i manjim potrebama za ranije spomenuta ulaganja u jačanje mrežnih kapaciteta budući da se energija proizvodi i troši lokalno.

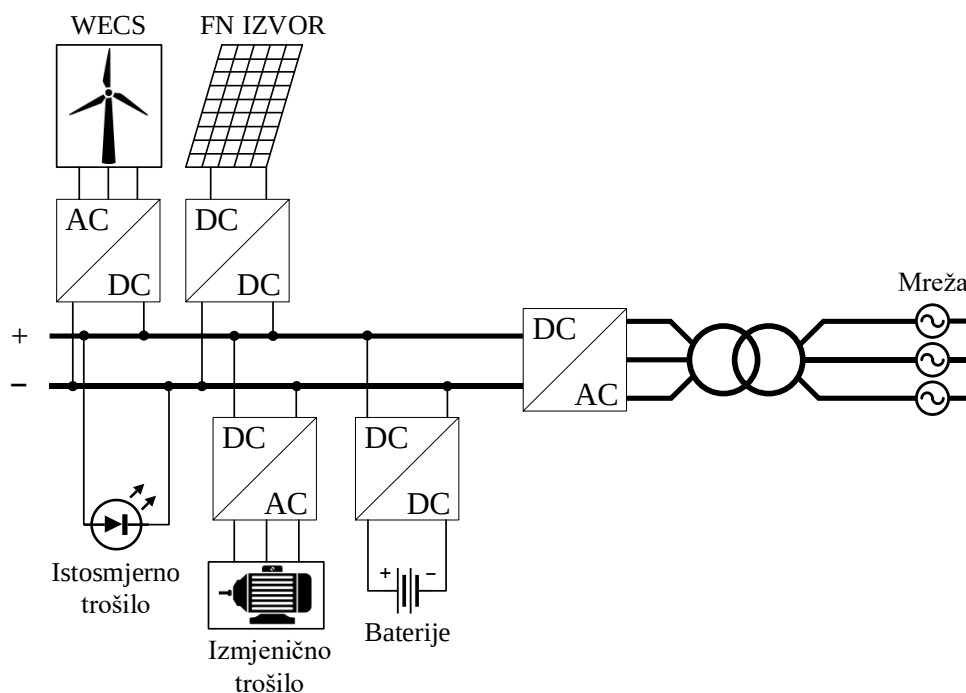
Potreba za sigurnim i kvalitetnim napajanjem zasigurno je bila jedan od izvornih motiva razvoja sustava poput mikromreža, koje je u nekim slučajevima nužno bez obzira na cijenu. Tu je prvenstveno riječ o izoliranim naseljima koja nemaju mogućnost povezivanja na stabilan energetska sustav, potom potrošačima poput bolnica, proizvodnih postrojenja ili energetskih postrojenja, koja u svakom trenutku moraju biti povezana na izvor napajanja te im je, kao takvima, mikromreža idealno rješenje koje nudi sigurnost napajanja bez obzira na stanje glavne mreže. Isto tako, mikromreža pruža i mogućnost prelaska na otočni režim rada bez kratkotrajnog prekida napajanja, što najčešće nije slučaj s tradicionalnim sustavima pomoćnog napajanja. Osim toga, određenim potrošačima je nužna i visoka razina kvalitete napajanja, primjerice pogonima za proizvodnju mikročipova ili podatkovnim centrima, a koju je teško osigurati napajajući se isključivo iz glavne mreže.

2.1. Osnovne konfiguracije mikromreža

2.1.1. Istosmjerne mikromreže

Mikromreže kod kojih se svi izvori i trošila međusobno povezuju preko jedne ili više sabirnica s istosmjernim naponom nazivaju se istosmjerne mikromreže (slika 2.1). Korištenje istosmjernog napona za povezivanje izvora i trošila u mikromrežama nametnulo se kao logično rješenje zbog značajnijeg udjela distribuiranih izvora koji se na sustav priključuju preko istosmjernog naponskog sučelja, kao što su FN izvori. Pritom je, zbog malih udaljenosti koje obično obuhvaćaju mikromreže, pojednostavljena istosmjerna distribucija električne energije [37]. Isto tako, sve više je i istosmjernih trošila za čije se povezivanje inače koriste različiti energetski pretvarači, poput računalnih sustava ili rasvjetnih tijela zasnovanih na LED tehnologiji. Korištenjem istosmjerne sabirnice u mikromreži smanjuje se broj potrebnih energetskih pretvarača a time i broj stupnjeva pretvorbe električne energije. Time se u konačnici povećava korisnost sustava, smanjuje početna cijena sustava i troškovi održavanja [38-40]. Osim toga, upravljanje mikromrežom je jednostavnije u odnosu na izmjenične sustave budući da nema potrebe za regulacijom radne i jalove snage unutar mikromreže te se otklanja potreba za sinkronizacijom prilikom povezivanja izvora. S druge strane, primjena istosmjernih mikromreža donosi i određene poteškoće u radu mikromreže kao i poteškoće sa sustavima zaštite u mikromreži [41-45]. Poteškoće koje se javljaju u radu istosmjerne mikromreže su primjerice pojava rezonantnih krugova uslijed međudjelovanja kondenzatora i impedancije

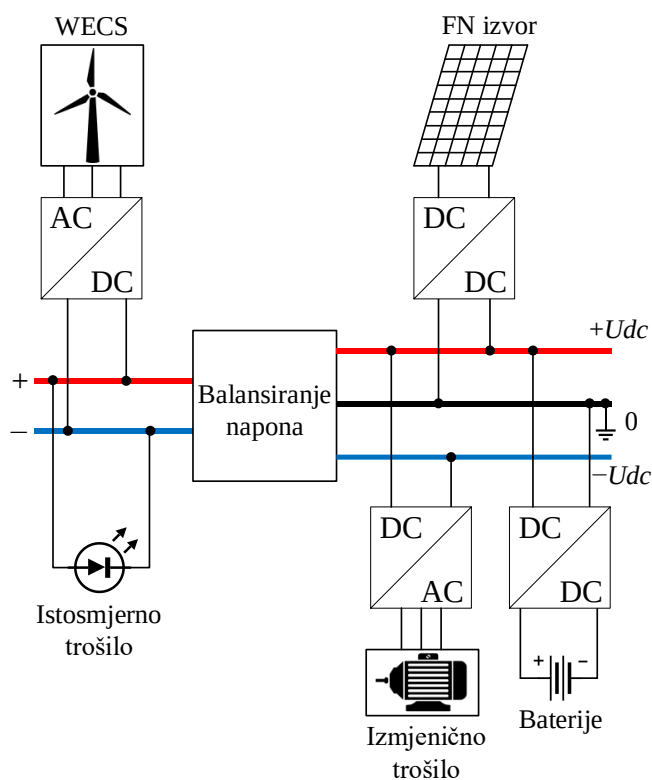
vodova, koji se mogu pojaviti u rasponu frekvencija u kojem rade energetske pretvarači, ili tranzijenti koji se javljaju kod uklapanja ili isklapanja trošila. Problemi s pouzdanosti sustava zaštite u istosmjernim sustavima, pa tako i u istosmjernim mikromrežama, su dobro poznati i obuhvaćaju poteškoće poput malih struja kvara koje ostaju neopažene, pogrešnog detektiranja kvara koje je posljedica velikog opterećenja ili samoodrživih električnih lukova.



Slika 2.1 Osnovna topologija istosmjerne mikromreže

Do sada je razvijeno više različitih konfiguracija istosmjernih mikromreža koje se međusobno mogu razlikovati po broju sabirnica ili po broju naponskih razina. Tako se s obzirom na broj sabirnica razlikuju mikromreže s jednostrukom sabirnicom ili s višestrukim sabirnicama, pri čemu su naponi sabirnica jednaki. Najčešće korištena istosmjerna mikromreža je s jednostrukom sabirnicom, prikazana na slici 2.1 [46], kod koje su svi potrošači povezani na istu sabirnicu te je napajanje svih potrošača u slučaju kvara ugroženo. Uvođenjem dodatne sabirnice, kao što je primjerice predloženo u [47], povećava se pouzdanost sustava na način da se napajanje potrošača prebacuje s jedne sabirnice na drugu u slučaju da amplituda napona na jednoj od sabirnica dostigne nepovoljnu vrijednost. Pouzdanost i funkcionalnost mikromreža mogu se poboljšati i uvođenjem višestrukih naponskih razina, kao što je slučaj kod mikromreže s bipolarnim sabirnicama, prikazane na slici 2.2 [48]. Kod ovih su mikromreža izvedena ukupno tri voda, tj., postoje dva pola istosmjernog napona i nula a pritom se dodatnim pretvaračem izvodi balansiranje napona istosmjernih sabirnica (vodova). Ovakvom izvedbom se može raspodijeliti opterećenje na više sabirnica i omogućiti napajanje u slučaju kvara na jednom od

vodova, odnosno omogućiti povezivanje potrošača na dvije naponske razine – između dva pola ili između pola u nule. Još jedna konfiguracija koju je nužno sagledati u okviru konfiguracija istosmjernih mikromreža je mikromreža s poluvodičkim transformatorom (SST od *engl.* solid state transformer) [49]. U SST-u se kombiniraju elementi energetske elektronike s visokofrekvencijskim transformatorom kako bi se postigla učinkovita pretvorba s uređajem manjih dimenzija. Istaknuto svojstvo SST-a su višestruke spojne točke koje najčešće uključuju ulazno sučelje za mrežni napon te dva izlazna sučelja – istosmjerno i izmjenično. Sabirnica istosmjerne mikromreže se može povezati na istosmjerno sučelje SST-a, koji u tom slučaju služi za povezivanje mikromreže s glavnom mrežom. Za to se inače koristi poluvodički energetski pretvarač, koji se u toj ulozi naziva IFC pretvarač (od *engl.* interfacing converter). Uz to, izmjenično sučelje SST-a se može dodatno koristiti za povezivanje izmjeničnih izvora i potrošača.

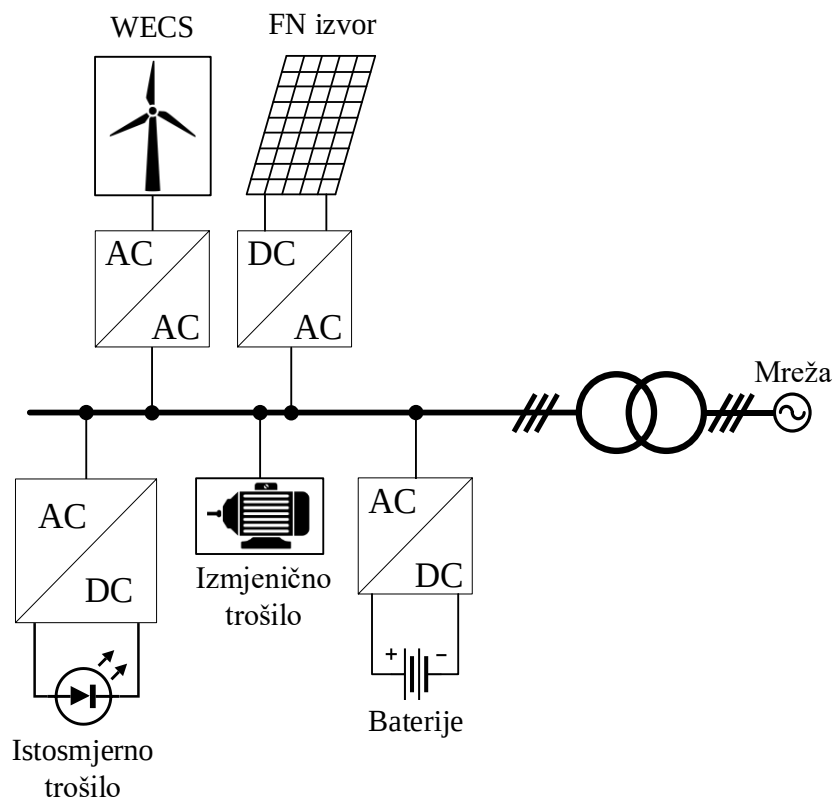


Slika 2.2 Istosmjerna mikromreža s bipolarnom sabirnicom

2.1.2. Izmjenične mikromreže

Za izmjenične mikromreže (slika 2.3) može se reći da dijele mnogo zajedničkih karakteristika s klasičnim mrežama. Kao i kod klasičnih mreža, napon sabirnica i vodova ovakve mikromreže je izmjeničan i reguliran po amplitudi i frekvenciji, pri čemu se koriste iste regulacijske metode. Osim toga, sličan je i sustav zaštite te se mogu koristiti isti zaštitni uređaji. Ipak, izmjenična mikromreža se razlikuje od klasične mreže upravo po osnovnim svojstvima zadanim definicijom mikromreže, tj., ograničena je na određeno geografsko područje te s izvorima i trošilima koje obuhvaća može raditi neovisno o drugim energetske sustavima. Prve mikromreže su zapravo i nastale iz potrebe da se omogući napajanje električnom energijom na područjima koja nije moguće ili ekonomski isplativo fizički povezati s glavnom energetske mrežom, kao što su otoci ili izolirana područja, a rađene su po principu klasičnih mreža [50].

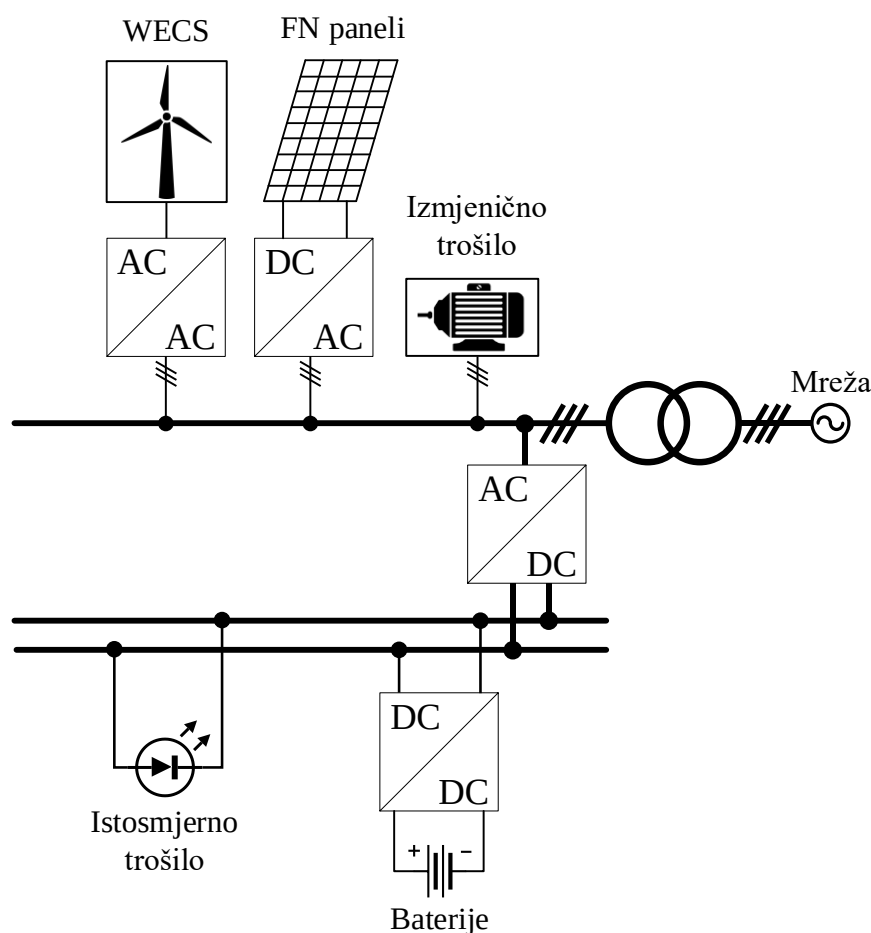
Povezivanje izvora na sabirnicu izmjenične mikromreže može se izvesti izravno, ako je riječ o izvoru koji generira izmjenični napon odgovarajuće frekvencije i amplitude kao što su male hidroelektrane ili reverzibilne hidroelektrane, ili se može izvesti preko energetske poluvodičkih pretvarača. Kako je često riječ o obnovljivim izvorima poput FN panela ili manjih vjetroagregata, uglavnom se koriste poluvodički pretvarači koji osim što prilagođavaju napon izvora naponu mikromreže, služe i za optimizaciju rada izvora ili regulaciju parametara mreže. Sa strane potrošača mogu se koristiti isti pretvarači i oprema koja se upotrebljava za povezivanje potrošača u klasičnim mrežama, što je jedna od prednosti primjene izmjeničnih mikromreža. Prednost je i sustav zaštite koji nije potrebno posebno razvijati za izmjenične mikromreže, kao što je to slučaj s istosmjernim, već se mogu koristiti već postojeći zaštitni uređaji te nema otežanog prekidanja električnih lukova karakterističnog za istosmjerne sustave [51]. Nedostatak izmjeničnih mikromreža je prije svega lošija kvaliteta napajanja budući da je potreban kompleksan sustav upravljanja kako bi se postigla regulacija amplitude i frekvencije napona te radne i jalove snage [52]. Isto tako, uslijed povezivanja distribuiranih izvora preko energetske poluvodičkih pretvarača, javljaju se problemi s pojavom viših harmonika u sustavu te se povećava broj stupnjeva pretvorbe, što u konačnici smanjuje učinkovitost sustava. Izmjenične mikromreže se mogu pronaći u raznim primjenama kao što su primjerice izolirana naselja i otoci ili javne ustanove poput sveučilišta ili zatvora [53-56].



Slika 2.3 Osnovna konfiguracija izmjenične mikromreže

2.1.3. Hibridne mikromreže

U praksi, vrlo često potrošači koji se napajaju iz mikromreža nisu isključivo istosmjerni ili izmjenični. Iz tog razloga, da bi se smanjio broj energetske poluvodičkih pretvarača te iskoristile prednosti istosmjernih i izmjeničnih mikromreža, razvijen je koncept hibridnih mikromreža. Konfiguraciju hibridnih mikromreža, prikazanu na slici 2.4, čini istosmjerna i izmjenična sabirnica, koje su međusobno povezane poluvodičkim ILC pretvaračem (od *engl.* interlinking converter), a na koje su povezani izvori i potrošači. U ovakvoj konfiguraciji mikromreže pojedina trošila se povezuju na pripadajuću sabirnicu pa se tako, primjerice, klasična izmjenična trošila mogu povezati na izmjeničnu sabirnicu dok se istosmjerna sabirnica može koristiti za trošila poput server soba i slično [57-60].



Slika 2.4 Osnovna konfiguracija hibridne mikromreže

U znanstvenoj literaturi postoje različite klasifikacije i podjele hibridnih mikromreža, a može se slobodno reći da neke od njih čak preispituju osnovnu podjelu mikromreža na istosmjerne, izmjenične i hibridne, kakva je korištena i u ovom radu. Primjerice, u radu [61], autori dijele hibridne mikromreže prema načinu povezivanja izvora, SPE-a i trošila te prema tome razlikuju tri vrste konfiguracije hibridne mikromreže: u AC spoju, u DC spoju i u AC-DC spoju. Razlike između navedenih vrsta mikromreža je prvenstveno u načinu povezivanja distribuiranih izvora, koji su kod mikromreža u AC spoju povezani na izmjeničnu sabirnicu, u DC spoju na istosmjernu, a kod hibridnih su raspodijeljeni.

Drugačija podjela hibridnih mikromreža je dana u radu [62], gdje autori razlikuju tri konfiguracije hibridnih mikromreža: osnovnu topologiju, tzv. *multi-microgrid* topologiju i topologiju zasnovanu na SST-u. Osnovna konfiguracija podrazumijeva mikromrežu s dvije sabirnice (izmjenična i istosmjerna), međusobno povezane ILC pretvaračem, koja ima samo jednog vlasnika. Kod *multi-microgrid* konfiguracije, vlasnici izmjeničnog i istosmjernog sustava nisu isti već se ta dva sustava međusobno povezuju u hibridnu mikromrežu. Konfiguracija zasnovana na SST-u je mikromreža s izmjeničnim i istosmjernim podsustavima

koji su međusobno povezani preko SST-a a koji ujedno služi i za povezivanje mikromreže s glavnom mrežom. U literaturi se može još pronaći i podjela hibridnih mikromreža s obzirom na tip IFC pretvarača koji se koristi za povezivanje mikromreže s glavnom mrežom [63]. Prema takvoj podjeli razlikuje se AC-povezana i AC-razdvojena konfiguracija mikromreže. AC-razdvojena konfiguracija podrazumijeva mikromrežu koja je s glavnom mikromrežom povezana preko najmanje jednog poluvodičkog pretvarača s istosmjernim međukrugom. Toj kategoriji hibridnih mikromreža pripadaju i mikromreže s SST-om. S druge strane, AC-povezanom topologijom mikromreže se smatra mikromreža koja je s glavnom mrežom povezana preko transformatora kojim se ujedno može i održavati napon izmjenične sabirnice mikromreže bez dodatnog regulacijskog kruga.

Prednosti hibridnih mikromreža su, između ostalih, veća korisnost zbog manjeg broja energetskih poluvodičkih pretvarača, a samim time i manja početna cijena, zatim mogućnost regulacije napona izmjenične sabirnice transformatorom povezanim na glavnu mrežu te jednostavna nadogradnja na postojeće izmjenične sustave izgradnjom istosmjernog podsustava. Primjena hibridnih mikromreža može biti raznovrsna i obuhvaća rezidencijalne objekte, javne ustanove ili industrijska postrojenja [59, 60, 64]. Zanimljiv primjer hibridne mikromreže je primjena u pomorskoj luci gdje se brod povezuje na obalni dio mreže i čini cjelovitu hibridnu mikromrežu [64]. Jedna od najpoznatijih primjena hibridne mikromreže je zasigurno Sendai mikromreža [60], koja se nalazi na Tohoku Fukushi sveučilištu u Japanu. Nakon razornog potresa i popratnog tsunamija koji je pogodio regiju 2011. godine, mikromreža je opskrbljivala sveučilišnu bolnicu i kampus električnom i toplinskom energijom za vrijeme dvodnevno perioda tijekom kojeg je glavna distribucijska mreža bila bez napona.

2.2. Distribuirani izvori u mikromrežama

Distribuirani izvori električne energije se temelje na istim tehnologijama pretvorbe drugih oblika energije u električnu energiju kao i klasične energetske centrale. Karakterizira ih značajno manja instalirana snaga i najčešće su prostorno distribuirani prema dostupnosti energetskog resursa ili prema lokaciji potrošača. Navedene karakteristike opisuju distribuirane izvore energije, ali u literaturi globalno priznata definicija još nije definirana [65, 66]. Tako, primjerice, američko udruženje regulatornih povjerenika za komunalne usluge (*engl.* National

Association of Regulatory Utility Commissioners) definira distribuirane izvore kao one izvore postavljene u neposrednoj blizini potrošača koji mogu pokriti cjelokupnu ili djelomičnu potrošnju potrošača te koje može koristiti i distribucijska energetska mreža za smanjenje potražnje, pokrivanje manjkova ili za pomoćne usluge [67]. S druge strane, Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (*engl.* Institute of Electrical and Electronics Engineers) definira distribuirane izvore kao izvore dovoljno manje od energetske centrala da se mogu povezati bilo gdje u energetske mreže [68]. Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA) distribuirane izvore definira kao manje izvore, geografski distribuirane i povezane na distribucijsku mrežu [69]. Jedan uvjet kojim se izvori karakteriziraju kao distribuirani, a koji je i općeprihvaćen, jest da ukupna instalirana snaga distribuiranog izvora ne premašuje 10 MW.

Iako su u različitim oblicima korišteni još od samog početka razvoja i primjene električne energije i elektroenergetskog sustava, primjena distribuiranih izvora je značajno porasla razvojem obnovljivih izvora energije i liberalizacijom tržišta električne energije. Naime, obnovljivi izvori energije su često manjih snaga i energetske resursi takvih izvora su ograničeni na određenu lokaciju. Prema tome, kao izravna posljedica sve veće implementacije obnovljivih izvora energije javlja se povećanje broja distribuiranih izvora energije. Iz izvješća HERA-e [2] za 2023. godinu može se vidjeti da se samo u toj godini broj distribuiranih izvora u Hrvatskoj više nego udvostručio u odnosu na 2022. godinu. Naime, na postojećih 7060 postrojenja, instalirano je dodatno 8701 postrojenje ukupne priključne snage 244 MW te je na kraju iste godine ukupna priključna snaga distribuiranih izvora iznosila 842 MW. To je ujedno 13,48 % ukupne priključne snage elektrana priključenih na teritoriju Republike Hrvatske. Ukupno je iz distribuiranih izvora u Hrvatskoj u 2023. godini isporučeno 1768 GWh električne energije, što je 4,6 % više u odnosu na 2022. godinu i 9,7 % ukupne potrošnje elektroenergetskog sustava, odnosno 12,4 % ukupno proizvedene električne energije na teritoriju Republike Hrvatske. Pritom je važno naglasiti da je u ukupnoj proizvodnji iz distribuiranih izvora udio energije proizvedene iz obnovljivih izvora iznosio 98 %. Povećanje broja distribuiranih izvora je zasigurno potpomognuto uvođenjem novih pravnih okvira kojima se u Hrvatskoj i svijetu nastoji potaknuti korištenje obnovljivih izvora i diversifikacija izvora energije kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima i omogućila tzv. zelena tranzicija. U Hrvatskoj je od 2018. godine Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji [70] uveden zakonski okvir kojim se uređuje povezivanje distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu, a koji pritom nisu isključivo proizvodno postrojenje već su povezani na lokalna trošila ili se primjerice nalaze u sklopu mikromreže. Navedenim zakonom definirani su pojmovi

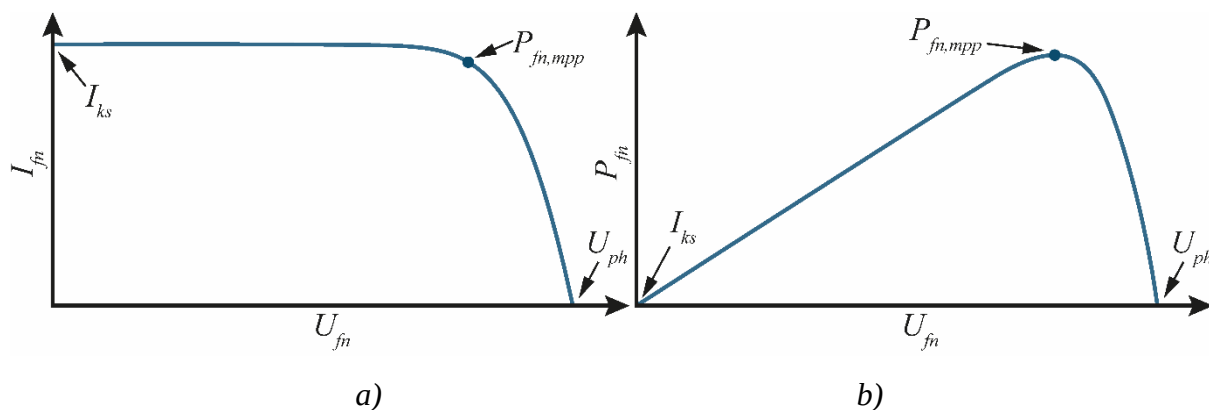
krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom, koji može biti povezan na prijenosnu ili distribucijsku mrežu, i *korisnika postrojenja za samoopskrbu*, koji pripada kategoriji kućanstva, te su definirani uvjeti razmjene električne energije između opskrbljivača električne energije i spomenutih subjekata. Otkad su uvedeni novi zakonski okviri pa do 2023. godine proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora u hrvatskoj se povećala za 68 % [1, 2].

Pored svih pozitivnih strana distribuiranih izvora, oni sa sobom donose i određene probleme, dio kojih je već ranije spominjan. Tu je prvenstveno riječ o poteškoćama pri integraciji distribuiranih izvora u postojeći energetska sustav, što dovodi do različitih poteškoća. Primjerice, komplicira se sustav zaštite mreže zbog pojave dvosmjernog toka energije koji može dovesti do tzv. *slijepih zona*. U takvim slučajevima klasični sustavi zaštite ne štite u potpunosti mrežu od kvarnih stanja poput kratkog spoja koji se napaja iz distribuiranih izvora povezanih na mrežu u blizini kvara [71]. U mreži se javljaju i oscilacije u frekvenciji napona uzrokovane oscilatornom proizvodnom karakteristikom OIE-a, koje zahtijevaju dodatne upravljive proizvodne kapacitete ili kapacitete iz SPE-a kojima bi se pokrile takve oscilacije. Osim navedenog, postoje i drugi problemi poput unošenja viših harmonika ili lokalnih preopterećenja vodova, koji zahtijevaju značajna unaprijeđena postojećih prijenosnih i/ili distribucijskih sustava.

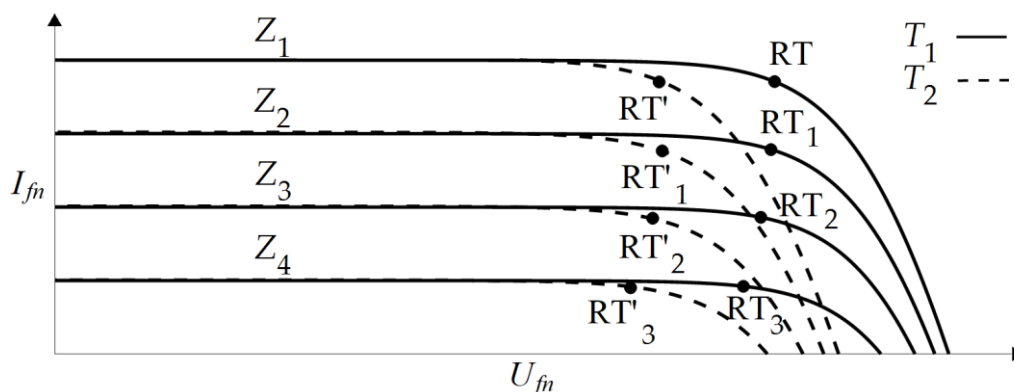
Autori su u [72] dali pregled različitih vrsta obnovljivih i neobnovljivih izvora energije koji se koriste u mikromrežama. Očekivano, dva najčešće korištena distribuirana izvora u kombinaciji s mikromrežama su FN izvori i vjetroagregati a slijede ih male hidroelektrane, gorivne ćelije, mikroturbine i dizel generatori. Prema zastupljenosti u Republici Hrvatskoj, ne uzimajući u obzir primjenu mikromreža, najzastupljeniji distribuirani izvori prema udjelu su: FN izvori, elektrane na biomasu, vjetroelektrane, hidroelektrane, elektrane na bioplin te geotermalni izvori energije. Uzimajući u obzir svrhu mikromreža i prethodno opisane motive implementacije, lako je zaključiti da FN izvori i vjetroagregati predstavljaju ključan segment implementacije i razvoja mikromreža zbog svoje zastupljenosti, specifičnosti upravljanja i vođenja te velikog raspona mogućih instaliranih snaga. Isti su korišteni i u istraživanjima na kojima je uzemljena ova doktorska disertacija te će iz navedenih razloga u nastavku biti detaljnije opisani.

2.2.1. Fotonaponski paneli

FN panele čini više međusobno povezanih poluvodičkih ćelija, koje pod utjecajem sunčevog zračenja generiraju istosmjernu struju. Za izradu poluvodičkih ćelija mogu se koristiti različiti materijali i tehnologije, a najčešće korištene vrste su: monokristalni silicij (c-Si), polikristalni silicij (p-Si), kadmij telurid (CdTe), bakar indij selen (CIS) i trakasti silicij (EFG-Si) [73]. Poluvodičke ćelije unutar FN panela su međusobno povezane u seriju kako bi se postigao veći napon i snaga na izlazu iz panela, a paneli se najčešće dodatno povezuju u nizove (serijski povezani paneli), koji se dalje mogu povezati u FN polje (paralelan spoj više nizova FN panela). Izlazna snaga FN izvora je proporcionalna ukupnoj površini korištenih panela te značajno ovisi o osunčanosti i temperaturi, a korisnost im se kreće u rasponu 10 % - 24 %, ovisno o tipu tehnologije. Električna svojstva FN panela se mogu opisati strujno-naponskom karakteristikom panela, kojom je definirana izlazna struja panela s obzirom na napon na stezaljkama. Na slici 2.5 prikazane su karakteristike ovisnosti izlazne struje (I_{fn}) i izlazne snage (P_{fn}) FN panela o naponu na stezaljkama panela (U_{fn}). Najveća struja panela se postiže u točki kratkog spoja (I_{ks}), dok se najveći napon postiže u točki praznog hoda (U_{ph}). Nasuprot tome, karakteristika na slici 2.5b pokazuje ovisnost izlazne snage o naponu na stezaljkama. Na njoj se jasno može identificirati radna točka u kojoj se postiže najveća izlazna snaga – točka maksimalne snage ($P_{fn,mpp}$) – za danu osunčanost (iradijaciju) i temperaturu. Karakteristika FN panela se mijenja s promjenom osunčanosti i temperature, čime se i točka maksimalne snage pomiče s obzirom na vrijednost pripadajućeg napona. Promjena karakteristika za različite razine osunčanosti (Z_{1-4}) i temperature (T_{1-2}) ilustrirana je na slici 2.6. Kako se može vidjeti, promjena položaja radne točke s obzirom na napon je izraženija u slučaju promjene temperature nego u slučaju promjene osunčanosti. Međutim, promjene u temperaturi su sporije od promjena osunčanosti.



Slika 2.5 Karakteristike FN panela: a) izlazna struja u ovisnosti o naponu, b) izlazna snaga u ovisnosti o naponu

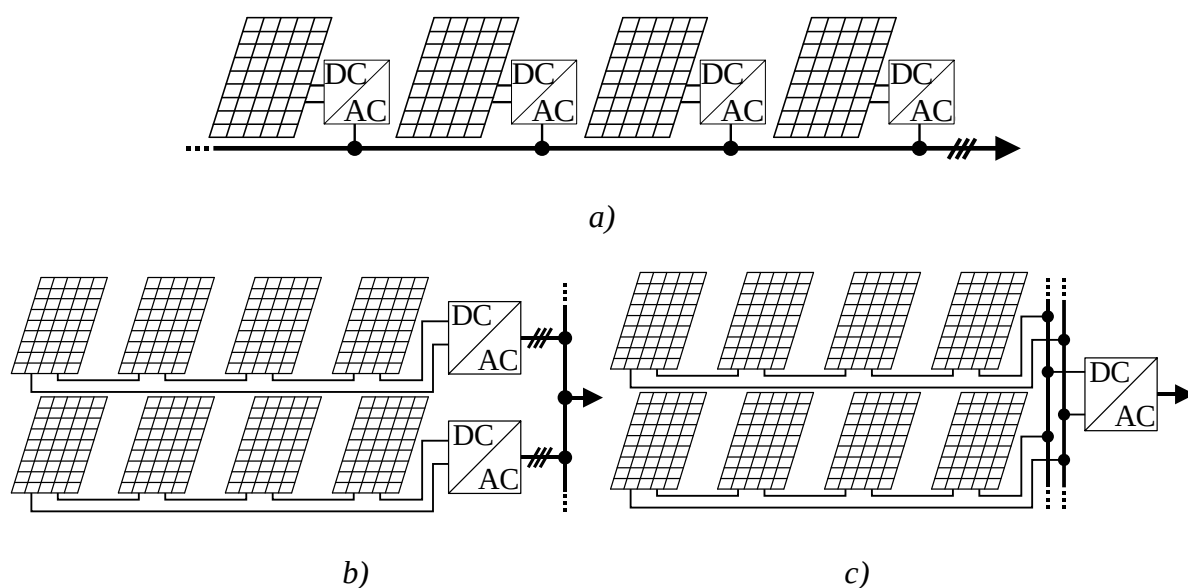


Slika 2.6. Karakteristike FN panela za različite temperature i osunčanosti

Kako bi se osiguralo da FN paneli rade u radnoj točki $P_{fn,mp}$ s obzirom na trenutnu osunčanost i temperaturu, koriste se različiti MPPT algoritmi [74]. MPPT algoritmi korigiraju napon ili struju panela kako bi s obzirom na trenutne atmosferske uvjete izlazna snaga panela bila maksimalna. Do danas su razvijene su brojne vrste MPPT algoritama, a u [74] ih autori dijele na: klasične, inteligentne, optimizacijske i hibridne. Neki od klasičnih MPPT algoritama su algoritmi pomaka i promatranja (P&O, od *engl.* perturb and observe), zatim algoritmi temeljeni na preglednim tablicama i mjerenjima osunčanosti i temperature te algoritmi s konstantnim naponom. U skupinu inteligentnih algoritama su između ostalih svrstani algoritmi temeljeni na neizrazitoj logici (FL, od *engl.* fuzzy logic), algoritmi temeljeni na neuronskim mrežama te algoritmi temeljeni na kliznim režimima (SMC, od *engl.* sliding mode control). Optimizacijski algoritmi se temelje na različitim metodama optimizacije poput optimizacije kolonijom mrava (*engl.* ant colony optimization) ili optimizacije rojem čestica (*engl.* particle swarm optimization). Hibridni algoritmi istovremeno koriste kombinaciju dviju metoda kao, primjerice, adaptivni sustav zaključivanja temeljen na neuronskim mrežama i neizrazitoj logici (ANFIS, od *engl.* adaptive neuro-fuzzy inference system)

Za izvođenje MPPT algoritma potreban je poluvodički energetski pretvarač kojim se ostvaruje regulacija struje ili napona FN panela. S obzirom na položaj i broj ovih pretvarača, povezivanje panela se može izvesti na više načina (slika 2.7) [75]: povezivanjem pojedinačnih panela na izmjeničnu sabirnicu pomoću zasebnih izmjenjivača, što omogućuje zasebno upravljanje svakim panelom, ali zahtijeva veći broj pretvarača; povezivanje niza panela na izmjeničnu sabirnicu pomoću jednog izmjenjivača, gdje je cijeli niz povezan na isti napon i jednako je upravljan; povezivanje cijelog polja panela na istu istosmjernu sabirnicu i dalje na središnji izmjenjivač, što zahtijeva najmanje pretvarača, ali se smanjuju i mogućnosti upravljanja. Osim MPPT algoritma, mogu se koristiti i različite tehnike praćenja položaja Sunca, kojima se paneli

tijekom cijelog dana usmjeravaju prema Suncu i time postiže povoljan kut upada sunčevih zraka. Kao što je već spomenuto ranije, FN paneli su uz vjetroelektrane najzastupljeniji distribuirani izvor. Često se koriste i u mikromrežama, bilo da je riječ o mikromrežama rezidencijalnih objekata ili industrijskih postrojenja [76], čemu pridonose raznovrsne mogućnosti instalacije.



Slika 2.7 Konfiguracije povezivanja nizova i polja FN modula

2.2.2. Vjetroagregati

Vjetroagregati se koriste za pretvorbu kinetičke energije gibanja zraka u električnu energiju. Ključni element svakog vjetroagregata je turbina koja kinetičku energiju zraka pretvara u mehaničku energiju kružnog gibanja rotora vjetroagregata. U osnovi se razlikuju dvije vrste vjetroturbina: vjetroturbine pogonjene otporom gibanju zraka i vjetroturbine temeljene na aerodinamičnom uzgonu. Vjetroturbine pogonjene aerodinamičnim uzgonom, koji se stvara strujanjem zraka, su prevladavajuća vrsta turbina radi značajno većeg koeficijenta snage, koji predstavlja odnos ukupne snage vjetra obuhvaćenog vjetroturbinom i mehaničke snage kružnog gibanja rotora vjetroturbine. Temelje se na istim zakonima fizike aeroprofila kao i krila aviona, gdje se aerodinamični uzgon generira kao djelovanje razlike u tlaku s gornje i donje strane krila, odnosno, u ovom slučaju, lopatice [77].

Prema Betzovoj teoriji vjetroturbina, u kojoj je analizirao strujanje zraka oko lopatica u dvodimenzionalnom prostoru [78], maksimalna teoretski iskoristiva snaga zraka koji se giba kroz radnu površinu koju zahvaća rotor vjetroturbine je 59,3 %. Drugim riječima, idealni koeficijent snage vjetroturbine (c_p), koji predstavlja njenu efikasnost, je 0,593 a definiran je kao:

$$c_p = \frac{p_m}{\frac{1}{2}\rho v_v^3 A} \quad (2.1)$$

gdje je ρ gustoća zraka, v_v neometana brzina vjetra, A radna površina rotora a p_m mehanička snaga na vratilu rotora.

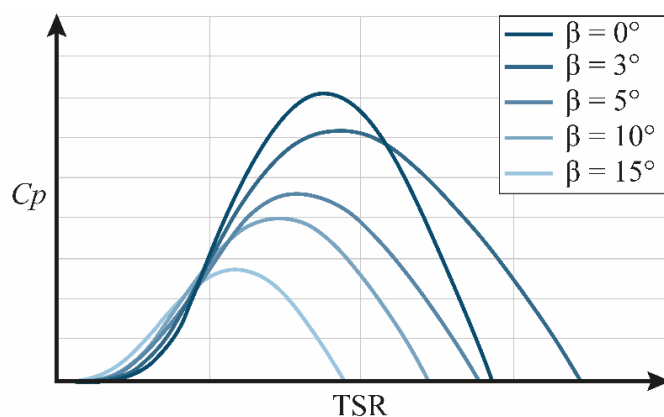
Analizirajući rad vjetroturbine u trodimenzionalnom prostoru, rotor svojim rotacijama u zrak koji izlazi iz njegove radne površine unosi dodatno kružno gibanje čiji je centar rotacije paralelan osi vrtnje rotora, a smjer rotacije suprotan momentu rotora. Opisano kružno gibanje predstavlja dodatni aerodinamički otpor pa koeficijent snage ovisi o omjeru energetske komponenti kružnog i translatornog gibanja zraka, koji može biti određen omjerom tangencijalne brzine vrha lopatica rotora i neometane brzine strujanja zraka (TSR, od *engl*, tip speed ratio) [79]:

$$\lambda = \frac{\omega r}{v_v} = \frac{2\pi n r}{60 v_v} \quad (2.2)$$

gdje je ω kružna frekvencija rotora, R polumjer rotora, a n brzina vrtnje rotora.

Dakle, budući da koeficijent snage ovisi o TSR-u, podešavanjem brzine vrtnje rotora za svaku brzinu vjetra se može postići optimalni TSR pri kojemu se postiže maksimalna izlazna snaga (slika 2.8). Treba imati na umu da karakteristika ovisnosti koeficijenta snage o TSR-u ovisi o fizičkim svojstvima lopatica, što uključuje oblik lopatica i mehanički kut zakreta lopatica β .

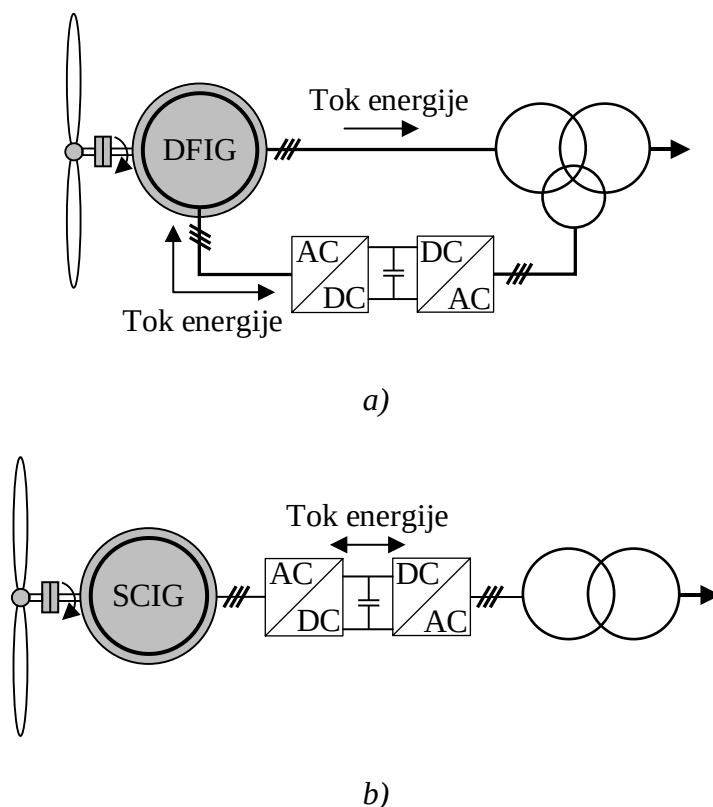
Slično kao i u slučaju FN panela, da bi se TSR zadržao u točki s najvećom snagom, odnosno na tjemenu krivulja na slici 2.8, koriste se različiti MPPT algoritmi. Njihova je zadaća da na različite načine reguliraju brzinu vrtnje vjetroturbine kako bi se zadržao idealni TSR. Regulacija brzine se može postići podešavanjem kuta zakreta lopatica, upravljanjem generatorom ili kombinacijom te dvije metode. Komercijalni vjetroagregati većih snaga najčešće koriste kombiniranu metodu, dok su oni manjih snaga najčešće izvedeni s fiksnim kutom zakreta lopatica te se brzina vrtnje može regulirati isključivo generatorom.



Slika 2.8 Karakteristike koeficijenta snage rotora vjetroturbine u ovisnosti o TSR-u i za različite mehaničke kutove zakreta lopatica [79]

Upravljanje brzinom vrtnje vjetroatregata generatorom je moguće kod vjetroatregata s promjenjivom brzinom vrtnje i s djelomično promjenjivom brzinom vrtnje [80]. Kod vjetroatregata s djelomično promjenjivom brzinom vrtnje najčešće se koriste klizno-kolutni asinkroni generatori (WRIG, od *engl.* wound rotor induction generator), čiji je stator povezan na mrežu preko transformatora. Promjena brzine vrtnje postiže se promjenom otpora u namotima rotora, što se izvodi uz pomoć poluvodičkih energetske pretvarača. Ovakav pristup upravljanja se danas rijetko koristi.

U slučaju vjetroatregata s promjenjivom brzinom vrtnje najčešće se koriste SCIG, PMSG te dvostrano napajani klizno-kolutni asinkroni generatori (DFIG, od *engl.* doubly-fed induction generator), a mogu se dodatno podijeliti na dva tipa sustava s obzirom na snagu pretvarača koji se koristi za povezivanje na mrežu. Prvi tip su vjetroatregati povezani na mrežu preko pretvarača djelomične snage, čija je nazivna snaga značajno manja od snage generatora (najčešće oko 30 %). U takvoj konfiguraciji, prikazanoj na slici 2.9a, stator se povezuje na mrežu izravno, dok se rotor povezuje preko poluvodičkog energetskog pretvarača. Pritom su najčešće rotor i stator povezani s mrežom preko transformatora s tercijarnim namotom a raspon upravljanja brzinom vrtnje je ograničen na raspon od ± 30 % sinkrone brzine vrtnje. Ovaj način povezivanja vjetroatregata se koristi isključivo u slučaju DFIG-a. Drugi tip sustava su vjetroatregati s pretvaračem pune snage, čija snaga odgovara snazi generatora te se spoj na mrežu izvodi na način da je stator povezan preko poluvodičkog energetskog pretvarača (slika 2.9b). U literaturi se može pronaći značajan broj znanstvenih istraživanja vezanih za različite vjetroatregate u funkciji distribuiranih izvora ili u kombinaciji s mikromrežom [26, 81-83].



Slika 2.9 Konfiguracije povezivanja vjetroagregata na mrežu

2.3. Sustavi za pohranu energije

Kako je sve većom implementacijom obnovljivih izvora potaknut razvoj mikromreža, tako SPE-ovi sve više dobivaju na važnosti. Kroz razne financijske poticaje u okviru programa kojima se potiče održiva proizvodnja energije, uvelike se potiče upravo implementacija SPE-ova s ciljem poboljšanja performansi obnovljivih izvora. Osim toga, cijene SPE-ova su se drastično smanjile proteklih godina, što dodatno doprinosi tome da postaju sve prihvatljivije rješenje, posebno u mikromrežama gdje je dostupnost napajanja od iznimne važnosti. Sigurnost napajanja u mikromrežama se ne može uvijek garantirati, bez obzira na performanse upravljačkog sustava ili napredne prognoze kojima se danas može predvidjeti proizvodnja obnovljivih izvora. Upravo se implementacijom SPE-a može kompenzirati stohastička priroda proizvodnje iz obnovljivih izvora, ali i ispuniti različiti zahtjevi dostupne snage s obzirom na potrošnju. Zadaci SPE-a u mikromreži mogu biti različiti ovisno o režimu rada mikromreže [84,

85]. Kada mikromreža radi u spoju s glavnom mrežom, SPE može djelovati kao veliki centralizirani spremnik ili se može koristiti za pružanje pomoćnih usluga.

U funkciji velikih centraliziranih spremnika SPE ima dva cilja: prvi je raspolaganje energijom, a drugi je pokrivanje vršnih opterećenja (*engl.* peak shaving). Raspolaganje energijom uz primjenu SPE-a se izvodi na način da se energija pohranjuje kada je otkupna i/ili prodajna cijena energije niska te prodaje kada je prodajna cijena energije visoka. Te razlike u cijenama mogu biti posebno izražene kod obnovljivih izvora, kao što su FN izvori, kod kojih je prisutan efekt kanibalizacije. Naime radi istovremenosti proizvodnje iz FN izvora, tržišna cijena prati krivulju proizvodnje na način da je cijena najmanja u periodu najveće proizvodnje. Pokrivanje vršnih opterećenja se koristi kada potrošnja prelazi snagu dostupnu iz energetske izvora. Time se može značajno uštedjeti jer je potrebno zakupiti manju priključnu snagu od opskrbljivača električnom energijom ili je potrebna manja instalirana snaga energetskog postrojenja koje se koristi za napajanje. Povezanost s glavnom mrežom otvara i mogućnost korištenja SPE-a integriranog u mikromrežu za pružanje različitih pomoćnih usluga, što je posebno izraženo ako mikromreža s obzirom na glavnu mrežu djeluje kao upravljivi izvor. SPE-ovi su prikladni za izvođenje pomoćnih usluga regulacije amplitude i frekvencije napona u mreži budući da se oni najčešće povezuju na mrežu preko poluvodičkih energetskih pretvarača kojima se lako može izvesti regulacija radne i jalove snage. Ova mogućnosti korištenja SPE-ova postaje posebno atraktivna sa sve većim udjelom obnovljivih izvora povezanih na mrežu, zbog čega su i cijene pomoćnih usluga relativno visoke.

U slučajevima kada mikromreža radi u otočnom režimu rada, SPE se može dodatno koristiti za crni start, gdje služi za početnu energizaciju distribuiranih izvora, te za olakšavanje integracije više obnovljivih izvora kompenziranjem varijabilnosti proizvodnje i vremenskim pomicanjem proizvodnje. Sami rad mikromreže u otočnom režimu zapravo je najčešće postignut integracijom SPE-ova odgovarajućih kapaciteta, koji adekvatnim upravljanjem i raspolaganjem energijom osiguravaju stabilnost napajanja bez obzira na trenutnu proizvodnju iz obnovljivih izvora.

Do sada su razvijene različite tehnologije SPE-a a radi lakšeg pregleda se mogu podijeliti prema obliku energije koji se u njima koristi. Prema tome se razlikuju: elektrokemijski, mehanički, električni i termalni SPE-ovi [86, 87]. U kategoriju mehaničkih SPE-ova spadaju zamašnjaci, reverzibilne hidroelektrane i sustavi pohrane energije u obliku komprimiranog plina. To su dakle sve sustavi u kojima se električna energija pohranjuje na način da se pretvara u mehaničku, bilo da je riječ o momentu rotacije zamašnjaka ili potencijalnoj energiji vodene

mase koja se pumpa na veću nadmorsku visinu. Kod termalnih SPE-ova električna energija se pretvara u toplinsku energiju ili led te se otpušta po potrebi. Samo se kod električnih SPE-ova pri pohrani ne izvodi transformacija energije u drugi oblik. To su superkondenzatori ili supravodljive zavojnice. Kod elektrokemijskih SPE-ova, energija se pohranjuje i crpi uz pomoć kemijskih reakcija. U ovu kategoriju SPE-ova spada i baterijski SPE, kakav je korišten u okviru ovog doktorskog rada, te su oni detaljnije opisani u nastavku.

2.3.1. Elektrokemijski sustavi pohrane

U elektrokemijskim sustavima pohrane, energija se kemijskom reakcijom pretvara i pohranjuje u aktivni materijal u ćeliji. Najčešća vrsta elektrokemijskih sustava pohrane su baterije, koje mogu biti izvedene različitim tehnologijama i s različitim materijalima. Osim baterija, u skupinu elektrokemijskih sustava pohrane spadaju i gorivne ćelije, kojima se iz kemijskih goriva, koja se dovode u ćeliju, generira električna struja. Gorivne ćelije se gotovo poistovjećuju s vodikovim gorivnim ćelijama, s obzirom na to da su najčešće korišteni tip gorivnih ćelija. Sam proces dobivanja električne energije iz vodikovih gorivnih ćelija se odvija na temelju obrnute elektrolize. Ukratko, vodik se dovodi na elektrodu, a oksidans (zrak) na katodu te se između elektroda odvija proces sagorijevanja kojim se generira električna struja između elektroda. Neke od prednosti gorivnih ćelija su [88]: veća korisnost u odnosu na motore s unutarnjim izgaranjem (čak i uzimajući u obzir cijeli proces, uključujući i proizvodnju vodika), nema emisije štetnih plinova, tihe su te imaju bolji omjer mase i energije u odnosu na klasične baterije. Nedostaci su ponajviše visoka cijena, manja korisnost procesa pohrane i iskorištenja energije u odnosu na baterijske i električne sustave pohrane, nedostatak infrastrukture te spor električni odziv, što stvara poteškoće kod napajanja brzo promjenjivih trošila.

Najrašireniji SPE-ovi u širokoj upotrebi su baterije s kapacitetom koji se kreće u rasponu od nekoliko Wh, za primjene u potrošačkoj elektronici, do više desetaka ili stotina MWh za primjene u energetsom sustavu [89]. Baterije su najčešće sačinjene od više ćelija, gdje svaka ćelija sadrži pozitivne i negativne elektrode međusobno razdvojene elektrolitom. Kemijska reakcija koja se odvija unutar baterije ovisi o vrsti baterije. Primjerice, kod olovno-kiselinskih (PbA) baterija, elektrode su izrađene od olova i olovnog dioksida te su uronjene u elektrolitnu

otopinu sačinjenu od sumporne kiseline i vode. Dok se baterija puni, električna struja teče kroz elektrolitnu otopinu, što uzrokuje reakciju olovnog dioksida sa sumpornom kiselinom te se stvara olovni sulfat i voda. Istovremeno, olovo na negativnoj elektrodi reagira sa sumpornom kiselinom stvarajući olovni sulfat i vodikov plin. Za pražnjenja baterije kemijska reakcija je obrnuta, olovni sulfat na elektrodama reagira sa sumpornom kiselinom te se stvara olovni dioksid na pozitivnoj elektrodi, olovo na negativnoj elektrodi i voda [90]. Osim olovno-kiselinskih, često se koriste litij-ionske (Li-ion) i nikal-metal hibridne (NiMh) baterije [87]. Olovno-kiselinske su dugo vremena bile najzastupljenija vrsta baterija korištenih u energetske sustavima zbog niske cijene, relativno visoke korisnosti (70 % - 80 %) i zrelosti tehnologije. Glavni nedostatak im je niska gustoća energije, kratak životni ciklus i štetan utjecaj na okoliš povezan s odlaganjem starih baterija. Nikal-metal hibridne baterije su znatno skuplje od olovno-kiselinskih, ali imaju bolje zadržavanje naboja i veću gustoću energije. Litij-ionske baterije se sve više nameću kao prvi izbor za primjenu u energetske sustavima radi visoke gustoće energije, dugog životnog ciklusa i male potrebe za održavanjem. Temelje se na principu kretanja litijevih iona i posljedičnim stvaranjem slobodnih elektrona na anodi. Nedostatak im je još uvijek visoka cijena te pogoršanje performansi s povećanjem temperature, kao i potreba za zaštitnim sklopovljem.

Pri izboru baterija za primjenu u manjim sustavima napajanja (i pomoćnog napajanja), poput rezidencijalnih mikromreža, ili sustava razmatranog u ovom doktorskom radu, prednosti naprednijih vrsta baterija ne opravdavaju nužno i značajno veću cijenu. Tako primjerice gustoća energije odabranog sustava ne predstavlja važan čimbenik, budući da je riječ o stacionarnom sustavu gdje masa baterija nije presudna. Nadalje, bolja sposobnost zadržavanja naboja također nije presudna budući da bi razmatrani sustav svakako većinu vremena bio povezan s prijenosnom mrežom, čime bi se i razina napunjenosti baterijskog sustava držala na optimalnoj (napunjenoj) razini. Osim toga, zadržavanjem napunjenosti baterija na optimalnoj razini, u slučaju olovno-kiselinskih baterija se značajno produljuje njihov životni vijek, koji je drastično kraći u primjenama gdje se baterije često nalaze u djelomično napunjenom stanju. U obzir treba uzeti i činjenicu da danas postoje moderne izvedbe olovno-kiselinskih baterija koje ne zahtijevaju održavanje te je značajan udio recikliranih materijala u novo proizvedenim baterijama (oko 80 %). Iz navedenog je jasno kako se za primjenu u sustavu razmatranom u ovom doktorskom radu olovno-kiselinske baterije nameću kao prihvatljiva opcija baterijskog sustava, a koja je pritom i značajno jeftinija u odnosu na alternative. Uz to treba napomenuti i da same karakteristike baterija ne utječu na topologiju predloženog sustava kao ni na svojstva

upravljačkog sustava te se u bilo kojem trenutku mogu zamijeniti drugima, poput litij-ionskih. U budućnosti je poželjno svakako razmotriti druge tehnologije s obzirom na značajnu štetnost olova po zdravlje ljudi.

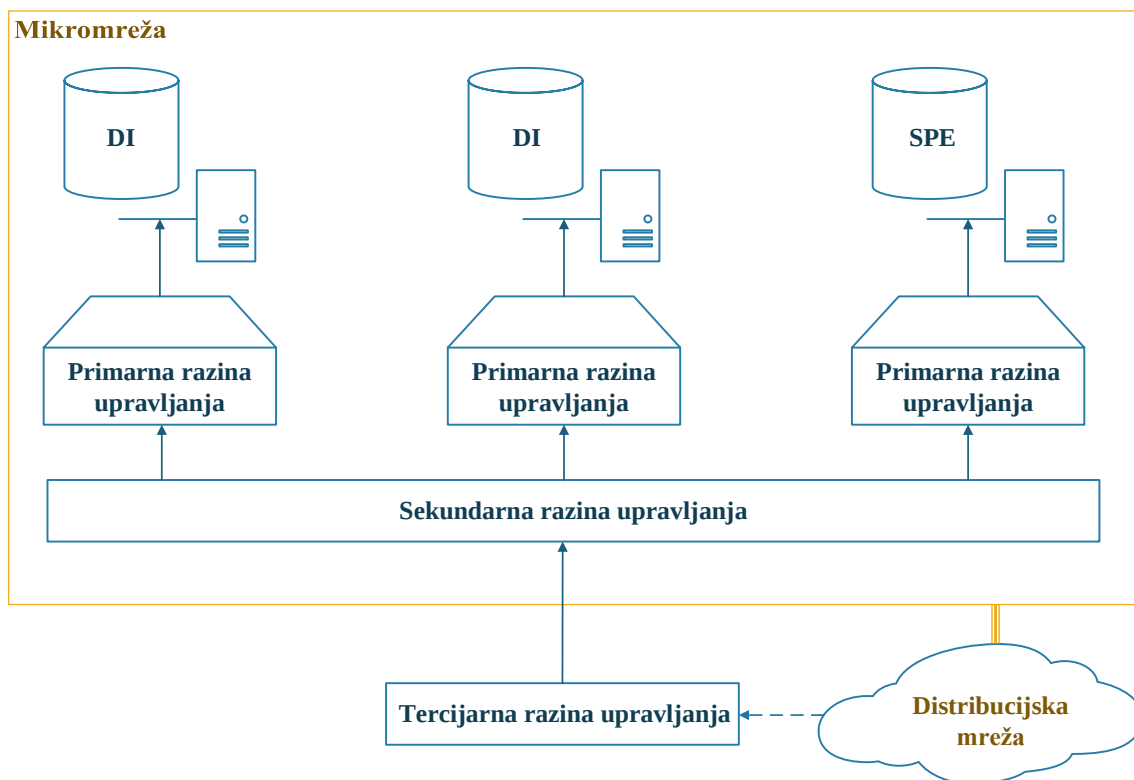
2.4. Upravljanje mikromrežom

Ključan segment mikromreža jest upravljački sustav koji omogućuje da mikromreža ispuni svoju osnovnu zadaću osiguravajući stabilno i sigurno napajanje povezanih potrošača, uz integraciju različitih distribuiranih izvora. Prema tome, osnovni zadaci koje upravljački sustav mora izvršavati su: regulacija električnih veličina distribuiranih izvora i mikromreže, uravnoteženje izlazne snage izvora kompenzacijom oscilatorne proizvodnje, upravljanje potražnjom gdje je to moguće, ekonomično raspolaganje proizvodnjom iz distribuiranih izvora te prelazak između radnih režima (otočni rad i spoj na mrežu) [91]. Metodologija izrade upravljačkih sustava se naslanja na metodologije upravljanja koje se koriste za upravljanje postojećim energetske mrežama. Dakle, slično kao i kod postojećih mreža, karakteristike upravljačkih sustava mikromreža se mogu razlikovati s obzirom na upravljačke strukture i upravljačke strategije. Upravljačke strukture predstavljaju različite strukture upravljačkih sustava kojima je definirano vrijeme odziva i međusobni odnos pojedinih jedinica u upravljačkom sustavu, dok upravljačke strategije određuju zadatke koje izvode pojedine upravljačke jedinice s obzirom na ciljeve upravljačkog sustava. Cjelokupni upravljački sustavi se mogu značajno razlikovati među različitim mikromrežama a njihova svojstva ovise ponajviše o karakteristikama mikromreže i prirodi potrošača koje opskrbljuju.

2.4.1. Hijerarhijska struktura

Hijerarhijska struktura je osnovna upravljačka struktura koja se često koristi u sustavima s više međusobno povezanih upravljačkih podsustava. Karakterizira je vertikalna raspodjela upravljačkih podsustava, nadređenost podsustava više razine podsustavu niže razine te ovisnost kvalitete upravljanja podsustava niže razine o podsustavima više razine. Takvim postavljanjem, koje je prikazano na slici 2.10, upravljački sustav se dijeli na više upravljačkih razina, a u

slučaju upravljačkih struktura energetskih sustava to su najčešće tri razine: primarna, sekundarna i tercijarna. Razine upravljanja se razgraničavaju s obzirom na upravljačke funkcije, vremenski okvir upravljanja ili prema infrastrukturnim zahtjevima, koji se često odnose na komunikacijsku mrežu.



Slika 2.10 Shematski prikaz hijerarhijske strukture upravljanja

Kako je prethodno spomenuto, kod hijerarhijske upravljačke strukture se obično razlikuju tri upravljačke razine, ali često se uvodi dodatna, najniža razina upravljanja, koja se naziva nulta razina upravljanja ili unutarnja upravljačka petlja [92]. Nulta razina upravljanja se obično koristi u mikromrežama s distribuiranim izvorima povezanim na izmjeničnu sabirnicu, gdje u slučaju otočnog režima rada upravljački uređaji distribuiranih izvora moraju osigurati iznos frekvencije i amplitude napona mikromreže. U režimu rada s mrežom regulira se izlazna struja distribuiranih izvora, čime se neizravno postavlja radna i jalova snaga koja ide u mrežu ili iz mreže [93]. Isto tako, na toj upravljačkoj razini se izvode različiti optimizacijski algoritmi distribuiranih izvora, primjerice MPPT algoritmi FN izvora ili algoritam za optimizaciju generatora vjetroagregata.

U slučaju kada nije izvedena nulta razina upravljanja, primarna razina je najniža razina upravljanja, čiji se upravljački ciljevi izvode lokalnim kontrolerima (upravljačkim jedinicama) mikromreže. Vrijeme odziva upravljačkih veličina primarne razine je kraće nego kod

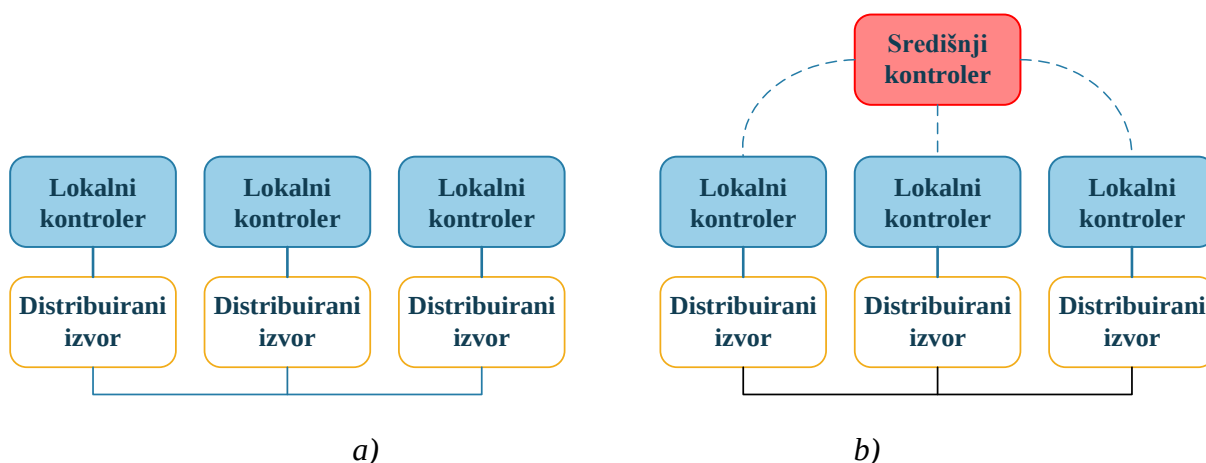
sekundarne i tercijarne razine a upravljanje se zasniva na lokalnim mjerenjima. U kontekstu upravljanja u mikromrežama, primarna razina je najčešće zadužena za regulaciju amplitude i frekvencije napona, raspodjelu radne i jalove snage među distribuiranim izvorima u paralelnom radu te omogućavanje jednostavnog povezivanja dodanih distribuiranih izvora, tj., omogućavanje tzv. *plug and play* sposobnosti. Primarna razina je zadužena i za održavanje stabilnosti napona i frekvencije za vrijeme prelaska između režima rada sa spojem na mrežu i otočnog režima rada, a koji može biti potencijalna ugroza stabilnosti dijela distribucijske mreže.

Odstupanja amplitude i frekvencije napona od zadanih vrijednosti u stacionarnom stanju se kompenziraju djelovanjem sekundarne razine upravljanja, koja ima duže vrijeme odziva u odnosu na primarnu razinu upravljanja te je najviša razina upravljanja u otočnom režimu rada. Osim korekcije električnih vrijednosti i održavanja kvalitete napajanja, sekundarna razina je najčešće zadužena i za upravljanje SPE-om ili za izvođenje upravljačkih zadataka EMS-a ako je takav sustav implementiran. Upravljački zadaci u sklopu EMS-a uključuju raspolaganje energijom, ekonomsku optimizaciju rada mikromreže te osiguravanje stabilnosti mikromreže u periodima značajnih poremećaja poput, primjerice, iznenadnog prelaska u otočni režim rada. U literaturi se ekonomska optimizacija, čija je svrha upravljanje tokom energije u točki zajedničkog spoja za postizanje zadanih ekonomskih ciljeva, ponegdje svrstava pod sekundarnu razinu [94], ali sve češće i pod tercijarnu razinu upravljanja [95, 96]. Bitno je spomenuti da se ekonomska optimizacija, bez obzira na razinu upravljanja, izvodi s većim vremenskim korakom u odnosu na regulaciju frekvencije i amplitude napona.

Tercijarna razina je najviša upravljačka razina s najvećim vremenskim korakom. Njen primarni zadatak je, pored spomenute ekonomske optimizacije, interakcija mikromreže s okolinom, što može biti distribucijska mreža, ali isto tako i jedna ili više drugih mikromreža koje su međusobno povezane u *multi-microgrid* sustav [94]. Iz tog se razloga često ne smatra dijelom same mikromreže, jer su upravljački zadaci koje izvodi više orijentirani ka vanjskom djelovanju mikromreže. Radi toga je i nužno da ima pristup informacijama kao što su vremenske prognoze, cijene električne energije, stanja napunjenosti SPE-a ili dostupnost upravljivih potrošača. Sve je to nužno kako bi tercijarna razina izvršavala zadane ciljeve, poput upravljanja razmjenom energije u PCC točki, i pritom osigurala siguran i ekonomski opravdan rad mikromreže. U konačnici, tercijarna razina izdaje naredbe sekundarnoj razini, koja na temelju njih postavlja regulacijske ciljeve primarnoj razini, a koja izravno regulira električne veličine.

Na različitim razinama upravljačke hijerarhije koriste se različite upravljačke metode. Vrsta korištene upravljačke metode ovisi o komunikacijskoj povezanosti upravljačkih jedinica te

njihovom međusobnom odnosu. S obzirom na to se razlikuje centralizirano i decentralizirano upravljanje [96] (slika 2.11). Centralizirano upravljanje podrazumijeva upravljanje s jednim središnjim kontrolerom koji nadgleda/upravlja cijelim sustavom. Takav kontroler je zadužen za praćenje stanja, regulaciju električnih veličina te donošenje odluka na razini cijelog sustava. Prednosti centraliziranog upravljanja su jednostavniji upravljački algoritam i jednostavnija međusobna koordinacija pojedinih upravljačkih jedinica. Nedostatak je smanjena mogućnost proširivosti sustava, veća podložnost kvarovima te ograničenja komunikacijske mreže budući da se sva mjerenja prosljeđuju u središnji kontroler. Kod decentraliziranog upravljanja je donošenje odluka razdvojeno na više razina, odnosno podsustava koji djeluju zasebno na postizanju zajedničkog upravljačkog cilja. Time se postiže otpornost na kvarove budući da kvar na jednom podsustavu ne uzrokuje nužno kvar cijelog sustavu, ali i jednostavnija proširivost sustava. S druge strane, decentraliziranim upravljanjem se teže postiže ravnoteža sustava u smislu raspolaganja snagom.



Slika 2.11 Shematski prikaz a) decentraliziranog i b) centraliziranog upravljanja

Na primarnoj razini se upravlja električnim veličinama a kao tipične centralizirane metode upravljanja koje se za to koriste mogu se navesti *central limit* metoda te *master-slave* metoda [97, 98]. Kod *central limit* metode upravljanja, središnji regulatori struje i napona zadaju reference za lokalne jedinice. Reference u tom slučaju ovise o potrošačima i broju lokalnih jedinica. Regulaciju napona kod *master-slave* metode izvodi vodeći kontroler (*master*) koji ujedno i zadaje reference za druge jedinice koje ga slijede (*slave* jedinice).

Kod decentraliziranog upravljanja, na primarnoj razini se najčešće koristi *droop* metoda budući da ona zahtijeva tek minimalnu ili nikakvu komunikaciju između pojedinih upravljačkih jedinica. Primarno se koristi za regulaciju struje i napona te raspodjelu snage a implementira se kroz lokalne kontrolere (pretvarače) [99]. Implementacija osnovne *droop* metode je

jednostavna, s principom upravljanja koji se temelji na balansiranju snage kakvo se izvodi sinkronim generatorima u velikim energetske sustavima. Naime, uslijed nedostatka radne snage u mreži, brzina sinkronog generatora koji napaja mrežu opada te dolazi do odstupanja u frekvenciji generiranog napona. Slično tome, oscilacije u izlaznoj jalovoj snazi uzrokuju oscilacije u amplitudi napona. Budući da se u mikromrežama distribuirani izvori najčešće povezuju poluvodičkim energetske pretvaračima koji na izlazu generiraju napon fiksne frekvencije i amplitude, uvodi se *droop* metoda kojom se simulira odziv distribuiranog izvora sličan onome kod sinkronog generatora. Pritom je odnos frekvencije i napona s obzirom na radnu i jalovu snagu u osnovnoj *droop* metodi definiran sljedećim izrazima [100]:

$$\omega_{ac} = \omega_{ac}^* - K_P(P_{ac} - P_{ac}^*) \quad (2.3)$$

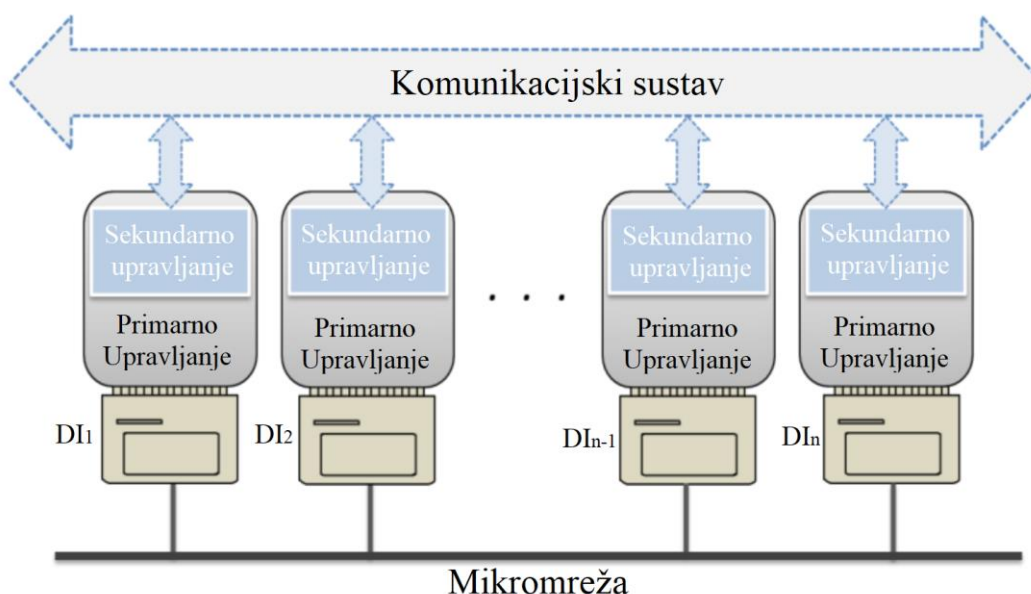
$$\hat{U}_{ac} = \hat{U}_{ac}^* - K_Q(Q_{ac} - Q_{ac}^*) \quad (2.4)$$

gdje su ω_{ac} i $\hat{U}_{ac}$ frekvencija i amplituda izlaznog napona, ω_{ac}^* i $\hat{U}_{ac}^*$ njihove reference, P_{ac} i Q_{ac} radna i jalova snaga, P_{ac}^* i Q_{ac}^* reference radne i jalove snage te K_P i K_Q pripadajući koeficijenti nagiba *droop* funkcije.

Bilo da je riječ o centraliziranom ili decentraliziranom upravljanju, implementirana metoda upravljanja ponajviše ovisi o konfiguraciji mikromreže, primjerice broju izvora te načinu povezivanja izvora ili trošila. Metode poput *droop* metode se koriste kada više jedinica sudjeluje u regulaciji iste veličine i kao takva nije primjenjiva za slučajeve gdje se upravljanje svodi na jednu jedinicu (npr. ako se jednim pretvaračem regulira amplituda i frekvencija napona izmjenične sabirnice mikromreže).

Sekundarna razina je u mikromrežama često izvedena sa središnjim kontrolerom, koji je zadužen za EMS, a što čini upravljanje na toj razini centraliziranim. Upravljački zadaci se pritom najčešće izvode PI regulatorima, kojima se kompenzira isključivo proporcionalno djelovanje regulatora na primarnoj razini, poput spomenute *droop* metode [101]. Izlazne upravljačke veličine središnjeg kontrolera prosljeđuju se primarnoj (i nultoj) upravljačkoj razini preko komunikacijske infrastrukture, gdje se onda izvodi regulacija napona i frekvencije prema zadanim vrijednostima. Algoritam za sinkronizaciju s mrežom također se izvodi na sekundarnoj razini, gdje se na osnovu mjerene amplitude i frekvencije napona mreže zadaje fazni kut napona u mikromreži, prema onom u distribucijskoj mreži. Ovakav pristup upravljanja je prikladan u malim i izoliranim mikromrežama [102] te je praktičan za primjenu online optimizacijskih algoritama budući da se svi podaci prikupljaju na jednom mjestu. Najveći nedostatak je

opsežnost potrebnih izmjena u sustavu za slučaj proširenja mikromreže i velika količina podataka i mjerenja koji se moraju prenositi u slučaju veće mikromreže. Budući da je sekundarna razina upravljačke hijerarhije mikromreže često i najviša upravljačka razina mikromreže u otočnom režimu, centralizirano upravljanje se teško može izbjeći. Različiti pristupi decentraliziranog upravljanja koji se javljaju u literaturi se ne mogu jasno podijeliti i često se poistovjećuju s naprednijim pristupima upravljanja poput distribuiranog upravljanja [94, 103, 104]. U literaturi se spominje i pojam razine decentralizacije upravljačkog sustava, koji je definiran razinom komunikacijske povezanosti pojedinih upravljačkih jedinica i po kojemu u potpuno decentraliziranom sustavu pojedine upravljačke jedinice rade u potpunosti samostalno [105]. Decentralizirana rješenja za kompenzaciju odstupanja amplitude i frekvencije napona od zadanih vrijednosti na sekundarnoj razini razmatrana su u radovima [103, 104], no za potrebe crnog starta kao i ekonomske optimizacije mikromreže i dalje je potrebna neka vrsta središnjeg kontrolera. U radu [106] autori predlažu upravljački sustav s više kontrolera sekundarne razine postavljenih između komunikacijskog sustava svake pojedine upravljačke jedinice primarne razine i komunikacijskog sustava (slika 2.12). U takvom sustavu kontroleri međusobno komuniciraju, ali je količina informacija koje se prenose komunikacijskim sustavom smanjena u odnosu na potpuno centralizirano upravljanje te u slučaju greške na jednom od kontrolera nije ugrožen rad cijelog sustava. Ovakva paradigma upravljanja zapravo je vrlo slična distribuiranom upravljanju na kojemu se temelji i multi-agent sustav (MAS) upravljanja, detaljnije opisan u sljedećem potpoglavlju. Dakle, kod distribuiranog upravljanja, kontroleri više razine međusobno komuniciraju s ciljem optimizacije rada, dok u potpuno decentraliziranom upravljanju, lokalni kontroleri djeluju u potpunosti samostalno.



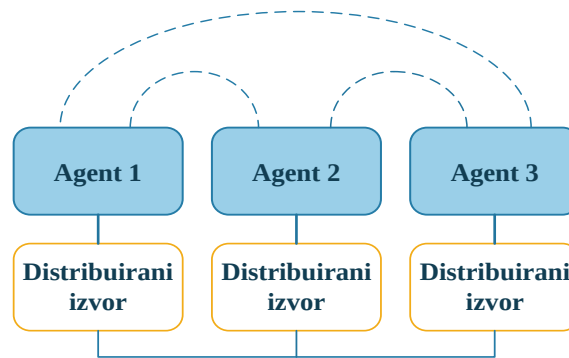
Slika 2.12 Shematski prikaz decentralizirane strategije upravljanja [106]

2.4.2. Multi-agent sustav

Razvojem komunikacijskih tehnologija i novih teorija upravljanja s primjenom sustava umjetne inteligencije i strojnog učenja, u posljednje vrijeme se sve više odstupa od korištenja klasične centralizirane strukture upravljanja energetske sustavom i mikromrežama s distribuiranim izvorima. Primjena centraliziranog upravljanja zahtijeva prikupljanje mjerenih podataka svih distribuiranih izvora te njihovu obradu u središnjem kontroleru što zahtijeva veću procesorsku snagu i veći kapacitet komunikacijske mreže a istovremeno umanjuje fleksibilnost sustava. S druge strane, decentraliziranim upravljanjem se teško postiže optimalan i stabilan rad mikromreže. Distribuiranjem upravljačkih zadataka, po principu MAS-a, na manje lokalne kontrolere povećava se pouzdanost sustava, smanjuje se količina informacija koja se razmjenjuje a zadržava se sposobnost optimizacije sustava. Struktura MAS sustava prikazana je na slici 2.13 a prednosti primjene su [107]:

- Robusnost: u slučaju kvara na lokalnom kontroleru ili u komunikacijskoj vezi ne dolazi do prekida rada cijelog sustava.
- Modularnost: distribuiranim upravljanjem omogućuje se jednostavno dodavanje novih elemenata (agenata) u mikromrežu, poput sustava pohrane ili distribuiranog izvora, bez značajnog utjecaja na rad drugih elemenata u sustavu.

- Jednostavnije održavanje: modularan sustav omogućuje i jednostavne popravke.
- *Plug and play* sposobnost.
- Učenje: pojedini agenti imaju sposobnost učenja i prilagodbe.
- Distribuiranje zahtjeva za procesorskom snagom: ne moraju svi agenti imati jednaku procesorsku snagu i pojedini agenti se mogu rasteretiti uvođenjem dodatnih agenata.



Slika 2.13 Struktura multi-agent sustava

Istraživanjem distribuiranih sustava upravljanja razvijena je MAS teorija, koja se u literaturi najčešće spominje u kontekstu distribuiranih izvora [94, 95] a predstavlja evoluciju klasičnog distribuiranog upravljanja. U MAS-u, agent je fizička ili programska (virtualna) jedinica koja reagira na promjene u svom okruženju [108], dok je MAS skupina više agenata koje karakterizira autonomnost (djeluju bez ljudske intervencije), interaktivnost (interakcija s drugim agentima), reaktivnost (reagiranje na okoliš) te proaktivnost (preuzimanje inicijative s radi postizanja cilja). Preneseno u inteligentni energetska sustav, poput cjelokupne mikromreže, MAS je sačinjen od skupa manje-više inteligentnih jedinica, poput lokalnih kontrolera [109] koji upravljaju potrošačem, distribuiranim izvorom ili sustavom pohrane energije. Virtualni agent može biti program kojim mikromreža sudjeluje na tržištu električne energije, agent distribuiranog izvora ili agent SPE-a [107]. Sloboda samostalnog djelovanja agenta određena je skupom osnovnih naredbi agenta. Primjerice, lokalni kontroler baterijskog sustava može imati naredbu da se baterije pune kada je niska prodajna cijena električne energije, uz uvjet da je stanje napunjenosti baterija (SOC, od *engl.* state of charge) nisko [109]. Prema tome, lokalni kontroler uključuje punjenje baterija bez vanjske naredbe.

U radu [110] autori su predstavili hijerarhijski sustav upravljanja mikromrežom uz primjenu MAS-a. Definirano je pet različitih vrsta agenata s obzirom na zadatke koje imaju a to su: mrežni agent, središnji agent, agent proizvodnje, agent potrošača i agent prekidača. Mrežni agent u komunikaciji sa središnjim agentom predstavlja mrežu te u slučaju kvara u mreži

obavještava središnjeg agenta. Središnji agent je zadužen za optimizaciju rada mikromreže u otočnom radu i u spoju s mrežom. Također, izravno komunicira s agentima proizvodnje i potrošača te im zadaje naredbe. Agent proizvodnje nadzire rad distribuiranog izvora te prenosi središnjem agentu informacije poput nazivne snage, metoda regulacije i slično. Agent potrošača promatra potrošnju energije na strani potrošača te šalje informacije o energetskeim zahtjevima potrošača i težinskom faktoru nužnosti trošila. Prema naredbama središnjeg agenta, agent potrošača može povećati ili smanjiti opterećenje. Agent prekidača upravlja prekidačima u mikromreži, uključujući prekidač u PCC-u. Primjerice, nakon crnog starta agent prekidača postepeno povezuje pojedine potrošače, koji formiraju mikromrežu prema naredbama središnjeg kontrolera. U radovima [107, 111] je dan pregled radova s primijenjenim upravljačkim sustavom zasnovanim na MAS teoriji.

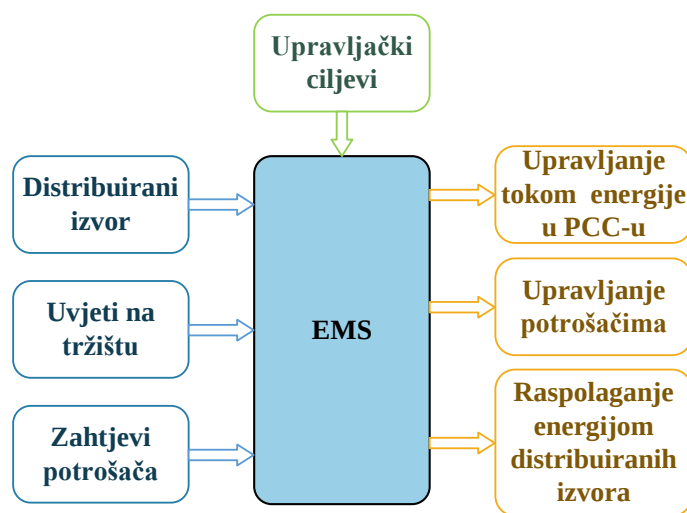
2.4.3. Strategije upravljanja i raspolaganja energijom u mikromreži

Upravljački sustavi se razvijaju kako bi se zadovoljila osnovna svrha objekta upravljanja. U kontekstu ovog rada kao objekt upravljanja razmatraju se različite mikromreže koje mogu imati i različite svrhe. Može se pretpostaviti da je većini mikromreža svrha, između ostaloga, osiguravanje stabilnog i sigurnog napajanja lokalnih potrošača. Za to se razvijaju upravljačke strategije čiji je fokus usmjeren ka upravljanju električnim parametrima mikromreže. Osim upravljanja električnim parametrima mikromreže, za postizanje sigurnog napajanja koriste se i različite optimizacije – tehničke, ekonomske i sl. – čija je uloga raspolaganje energijom unutar mikromreže i razmjenom energije s okolinom mikromreže. Za taj segment upravljanja zadužen je prethodno spomenuti EMS koji, osim što potpomaže upravljačku strategiju u osiguravanju osnovne stabilnosti rada mikromreže, mora zadovoljiti i ciljeve s obzirom na korisnost ili ekonomsku opravdanost mikromreže.

Budući da se mikromreže najčešće napajaju iz distribuiranih izvora, koji su vrlo često i OIE, nužna je implementacija upravljačkih strategija koje mogu osigurati stabilnost u frekvenciji i amplitudi napona usprkos stohastičkoj prirodi takvih izvora. Također, upravljačke strategije koordiniraju rad u slučaju više distribuiranih izvora povezanih na istu mikromrežu. Karakteristike korištene upravljačke strategije uvelike su određene topologijom mikromreže za koju se razvijaju. Tako je, primjerice, u istosmjernim mikromrežama potrebno regulirati samo

napon sabirnice mikromreže da bi se osigurao stabilan otočni rad [112]. Taj zadatak može izvoditi pripadajući kontroler jednog od distribuiranih izvora, dok su ostali zaduženi za regulaciju izlazne struje, odnosno snage. S druge strane, u slučaju izmjenične mikromreže potrebno je regulirati frekvenciju i amplitudu napona te radnu i jalovu snagu distribuiranih izvora [113]. U spoju s distribucijskom mrežom ili drugim mikromrežama, zadatak u okviru upravljačke strategije može biti i upravljanje radnom i jalovom snagom koja se razmjenjuje preko PCC-a. Zadaci upravljačkih strategija najčešće se izvode na nižim razinama upravljanja (nulta i primarna), a za to se koriste *droop* metode, PI regulatori ili slične tehnike od kojih su neke prethodno opisane u kontekstu upravljanja na različitim razinama hijerarhijske upravljačke strukture. Više izvedbi upravljačkih strategija za hibridne mikromreže prikazano je u preglednom radu [114].

Pojam EMS-a odnosi se na skup različitih metoda koje se koriste za upravljanje energetske resursima unutar sustava, s ciljem postizanja optimalnog ekonomskog ili tehničkog rada, uz osiguravanje stabilnog napajanja krajnjih potrošača. U okviru norme IEC 61970, međunarodna elektrotehnička komisija definira EMS kao računalni sustav s programskim paketima koji sadržavaju funkcionalnosti nužne za efikasan rad u proizvodnji i u prijenosu električne energije kako bi se osigurala potrebna sigurnost napajanja uz minimalne troškove [115]. Na slici 2.14 je prikazan primjer osnovnog dijagrama EMS-a mikromreže.



Slika 2.14 Osnovni dijagram EMS-a mikromreže

Raspologanje energijom ili usmjeravanje tokova energije svodi se na dvije osnovne metode. Prva metoda je upravljanje resursima (*engl.* resource scheduling), odnosno distribuiranim izvorima i sustavima za pohranu energije [116]. Upravljanje distribuiranim izvorima može se izvoditi ako je riječ o upravljivim izvorima, poput mikro-turbina. U slučaju obnovljivih izvora

gdje nije moguće upravljati energetske resursom (Sunce, vjetar i sl.), upravljanje se može postići samo u ograničenom rasponu na način da se odstupa od točke maksimalne snage. Druga metoda za raspolaganje energijom je upravljanje potražnjom, koje se može izvoditi na više načina i to:

- Vremenskim pomicanjem opterećenja
- Rezanjem potrošnje
- Korekcijom snage potrošača

Vremensko pomicanje opterećenja odnosi se na pomicanje potrošnje van perioda vršnog opterećenja mreže, koje se može uočiti na dnevnim krivuljama opterećenja, a kako bi se izbjeglo preopterećenje. U radu [117] autori su predložili EMS s vremenskim pomicanjem opterećenja, gdje je pokazano da primjena pomicanja opterećenja smanjuje troškove koji proizlaze iz vremenske razlike u proizvodnji i potrošnji (*engl.* mismatch cost), ne zanemarujući pritom utjecaj na zadovoljstvo potrošača koje može utjecati na promjenu profila opterećenja a, u konačnici, i na troškove. Rezanje potrošnje izvodi se isključenjem određenih potrošača. Najčešće je riječ o potrošačima čiji rad nije od iznimne važnosti i koji se u određenim situacijama isključuju s napajanja. Podjela potrošača na kritične i nekritične te njihovo isključenje prema potrebi je razmotreno u radu [116]. U slučaju preopterećenja, sustav automatski isključuje nekritične potrošače, počevši od onih s najmanjim prioritetom. Upravljanje potražnjom korekcijom snage potrošača moguće je izvesti kod trošila koja mogu za vrijeme rada odstupati od nazivne snage. Primjer takvih potrošača su grijači vode (bojleri) koji mogu raditi s različitim temperaturnim postavkama. Rad mikromreže s EMS-om koji ima mogućnost korekcije snage potrošača analiziran je u radu [118]. U spomenutom radu korišten je MAS gdje je svakom potrošaču dodijeljen agent, koji u slučaju nedostatka snage smanjuje potrošnju potrošača prema unaprijed dogovorenim scenarijima.

EMS se realizira u obliku algoritama koji se izvode na kontrolerima mikromreže. Različite su mogućnosti izvedbe EMS algoritama a tri najčešće korištena pristupa su pristup temeljen na utvrđenim pravilima (*engl.* rule-based), pristup temeljen na optimizaciji (*engl.* optimization-based) te pristup temeljen na metodama strojnog učenja i umjetne inteligencije. Kod prvog pristupa, algoritam prati skup prethodno postavljenih pravila. Takav tip algoritama je korišten u radovima [119, 120]. U radu [119] autori koriste EMS s *rule-based* algoritmom za upravljanje mikromrežom napajanom iz FN izvora s baterijskim SPE-om. Predloženi algoritam upravlja punjenjem ili pražnjenjem baterija na način da podešava ukupnu snagu potrošača mikromreže

s ciljem ekonomske optimizacije. U [120] predloženo je upravljanje s tri međusobno povezane mikromreže napajane iz FN izvora i vjetroturbina uz primjenu MAS-a. Predloženi EMS upravlja energetske resursima dajući prednost resursima na vlastitoj mikromreži, potom resursima susjedne mikromreže te u konačnici poseže za energijom iz SPE-a. Ukoliko i dalje nema dovoljno snage za napajanje potrošača, EMS upravlja potražnjom. Tek nakon što nema dovoljno energije ni za pokrivanje nužnih potrošača, EMS dopušta preuzimanje energije iz mreže. EMS temeljen na optimizaciji je napredniji u odnosu na prethodni i izvodi se na temelju matematičkih modela. U tu skupinu spadaju heuristički algoritmi te linearno programiranje. Heuristički algoritmi su programirani da pronađu rješenje brže i učinkovitije u odnosu na klasične metode, žrtvujući pritom optimalnost, točnost i potpunost. Linearno programiranje je metoda postizanja optimizacije na način da se minimizira ili maksimizira funkcija cilja, koji, primjerice, može biti trošak električne energije ili vrijeme bez napajanja. Optimizacija kolonijom mrava, koja spada u kategoriju heurističkih algoritama, korištena je za optimizaciju rada rezidencijalne mikromreže u [121]. Cilj predloženog algoritma je smanjenje troška električne energije te smanjenje omjera vršne i prosječne potrošnje. Još jedna vrsta optimizacijske tehnike koja spada u kategoriju heurističkih algoritama je optimizacija rojem čestica, prikazana u radu [122]. U spomenutom radu riječ je o mikromreži napajanoj iz obnovljivih izvora uz baterijski sustav i dizelski generator. Ciljevi koje EMS prikazan u navedenom radu mora ispuniti su smanjenje cijene proizvodnje električne energije, postizanje maksimalnog ekonomskog doprinosa primjene SPE-a te maksimalna iskoristivost obnovljivih izvora energije. Kod EMS-a temeljenog na strojnom učenju i umjetnoj inteligenciji koriste se metode poput neizrazite logike, neuronskih mreža i slično. U radu [123], autori su predložili EMS zasnovan na FL algoritmu kojim se na temelju prognoze proizvodnje i potražnje minimiziraju fluktuacije u razmjeni energije s distribucijskom mrežom. Uz to, EMS upravlja i SOC-om baterija na način da ga zadržava na približno 75%, s ciljem očuvanja ispravnosti (zdravlja) baterija. Pristup izvedbe EMS-a s neuronskim mrežama razmotren je u [124], gdje autori predlažu EMS čiji je cilj minimiziranje operativnih troškova mikromreže, što uključuje troškove goriva, održavanja i emisija distribuiranih izvora koji koriste goriva. Za raspolaganje izvorima, SPE-ovima i upravljanje potrošačima korištena je Lagrangeova neuronska mreža, dok je prognoza proizvodnje i potrošnje, koja se koristi za minimiziranje troškova, izvedena neuronskim mrežama zasnovanim na radijalnim baznim aktivacijskim funkcijama.

2.5. Poluvodički energetske pretvarači u mikromrežama

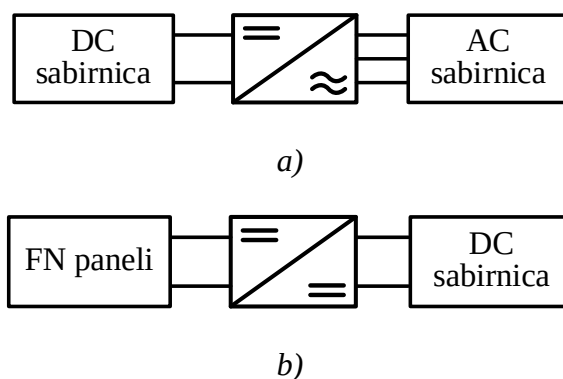
Poluvodički energetske pretvarači su okosnica energetskih sustava današnjice, a zasigurno i budućnosti. Mnoge moderne tehnologije ovise o poluvodičkim pretvaračima pa tako automatizirane industrijske pogone ili računalne sustave ne bi bilo moguće izvesti bez ove ključne tehnologije. Možda i najveću ulogu poluvodički pretvarači imaju u postrojenjima za proizvodnju električne energije, gdje je njihovom primjenom „otključana“ cijela lepeza različitih izvora koji su bez pretvarača bili praktički neiskoristivi. Već postojećim izvorima, poput malih hidroelektrana ili vjetroagregata, poluvodički pretvarači pružaju dodatne mogućnosti upravljanja, čime se olakšava njihova primjena [35]. S druge strane, veliki broj obnovljivih izvora, zbog karakteristika električne energije koju generiraju, ne bi bilo moguće primijeniti na način da se povezuju na energetske mreže bez korištenja pretvarača. Nadalje, otvaraju se dodatne mogućnosti upravljanja izvorima pa je tako primjenom pretvarača omogućeno izvođenje MPPT algoritama za OIE, čime se uvećava njihova učinkovitost te poboljšavaju dinamička i statička svojstva. Povezivanje SPE-a se isto tako najčešće ostvaruje preko pretvarača kako bi se upravljanje energijom iz SPE-a moglo izvoditi bez obzira na trenutnu bilancu snage u mreži. U kontekstu mikromreža pretvarači imaju još širu primjenu te se koriste za međusobno povezivanje mikromreža, povezivanje podsustava u unutar jedne mikromreže (ILC funkcija) i za povezivanje mikromreža s glavnom mrežom (IFC funkcija).

Raspored poluvodičkih sklopki i drugih pasivnih elemenata u pretvaraču, tj. topologija pretvarača, kod primjene u nekoj od prethodno navedenih funkcija ponajviše ovisi o karakteristikama sustava/podsustava koje povezuje [125]. Tako se u IFC pretvarači biraju s obzirom na vrstu mikromreže (AC, DC ili hibridna), vrstu mreže s kojom povezuje mikromrežu (mreža srednjeg ili niskog napona) te s obzirom na vrste distribuiranih izvora u mikromreži i način na koji je njihovo povezivanje izvedeno. Slično vrijedi i za ILC pretvarače a zadaci koje pretvarač u bilo kojoj od navedenih funkcija može izvršavati su: regulacija struje distribucijske mreže (upravljanje razmjenom energije), regulacija napona mikromreže, poboljšanje stabilnosti, balansiranje napona i snage među fazama, smanjivanje udjela harmonika, zaštita i dr. [62]. S obzirom na to da se u literaturi može pronaći veliki broj različitih topologija pretvarača koji se koriste u mikromrežama, osnovna podjela kojom bi se moglo smisleno obuhvatiti sve (ili većinu) korištenih konfiguracija bila bi prema stupnjevima pretvorbe. Prema tome se razlikuju pretvarači s jednim i s dva stupnja pretvorbe, a kao zasebna vrsta se mogu

izdvojiti poluvodički transformatori. Također, pretvarači se mogu podijeliti i prema upravljačkim ciljevima koji su im zadani.

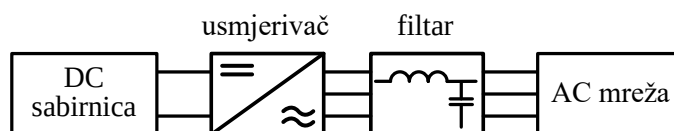
2.5.1. Vrste poluvodičkih pretvarača s obzirom na broj stupnjeva pretvorbe

Poluvodički pretvarači s jednim stupnjem pretvorbe su pretvarači kod kojih se pretvorba napona ili struje odvija u jednom koraku (slika 2.15). To može biti primjerice pretvorba istosmjernog napona jedne amplitude u napon druge amplitude ili pretvorba istosmjernog napona u izmjenični napon. Karakterizira ih jedan stupanj slobode upravljanja, što znači da se istovremeno može upravljati naponom ili strujom samo na jednoj strani pretvarača. Ovakve se topologije najčešće koriste kod pretvarača s jednosmjernim tokom energije za povezivanje distribuiranih izvora na sabirnice mikromreže te se tu posebno ističe primjena kod povezivanja FN izvora na istosmjernu sabirnicu. Naime, napon FN panela ili niza modula uglavnom ne odgovara naponu sabirnice mikromreže te ga je potrebno izjednačiti [126]. Osim toga, korištenje pretvarača za povezivanje FN izvora omogućuje i izvođenje MPPT algoritama čime se postiže veća iskoristivost energije sunčevog zračenja. Često se u FN postrojenjima koristi više ovakvih pretvarača, gdje se poseban pretvarač koristi za povezivanje niza panela (*engl.* string inverter) i izvođenje MPPT-a za svaki niz posebno, dok se dodatni pretvarač koristi za povezivanje više takvih nizova na sabirnicu (*engl.* central inverter) [35]. Takav pristup je potaknut upravo ograničenjima pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe a slična je situacija i kod povezivanja FN postrojenja na AC sabirnicu. U tom slučaju, napon na istosmjernoj strani se može mijenjati samo u uskom rasponu, a iznos ovisi o tipu modulacije korištene za upravljanje izmjenjivačem.



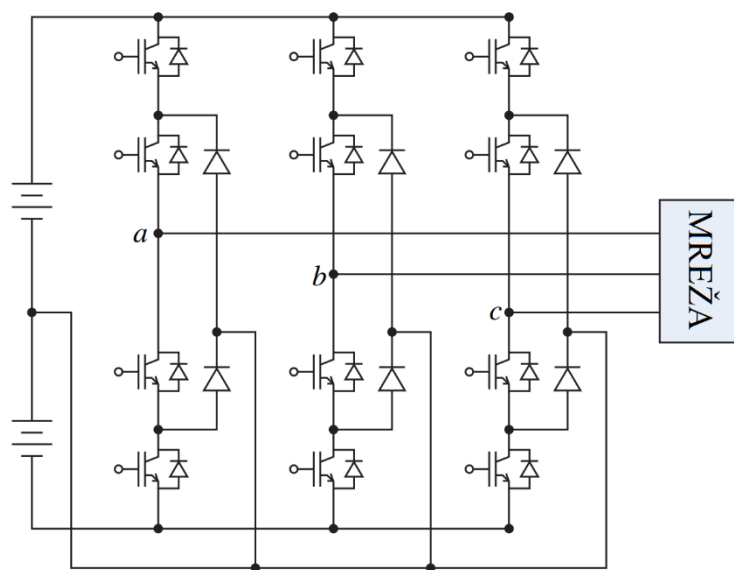
Slika 2.15 Blokovska shema pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe: a) DC-AC i b) DC-DC

Osim za povezivanje distribuiranih izvora, pretvarači s jednim stupnjem pretvorbe se koriste i za povezivanje SPE-a, u funkciji ILC pretvarača a u određenoj mjeri i u funkciji IFC pretvarača. U ovim se ulogama pretvarač koristi za upravljanje razmjenom energije, bilo između SPE-a i mikromreže, dvaju podsustava mikromreže ili mikromreže s glavnom mrežom pa je stoga nužno da korišteni pretvarač ima mogućnost dvosmjernog toka energije. U ulozi ILC ili IFC pretvarača mikromreže nužan je minimalno DC-AC pretvarač s jednim stupnjem pretvorbe budući da povezuje ili DC i AC podsustave hibridne mikromreže ili mikromrežu s glavnom mrežom. Konkretnije rečeno, najčešće se koristi PWM upravljani dvosmjerni pretvarač (usmjerivač) s utisnutim naponom (VSC, od *engl.* voltage source converter), prikazan na slici 2.16 [62]. Kako bi se smanjio udio harmonika u izlaznoj struji i naponu, najčešće se na izlazu postavlja i pasivni filter.



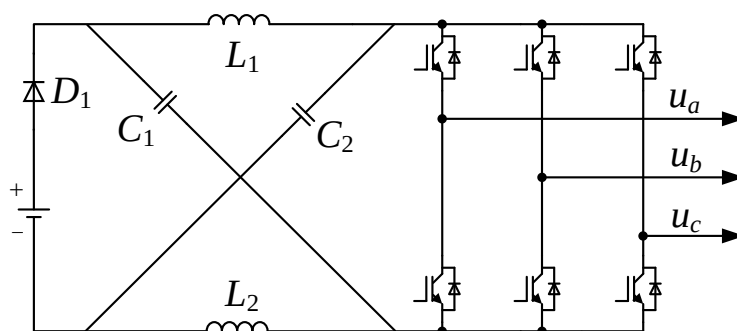
Slika 2.16 VSC s jednim stupnjem pretvorbe

Uz osnovne strukture pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe, moguće su i složenije topologije pretvarača koji i dalje pripadaju u istu kategoriju pretvarača. Jedan od takvih primjera je višerazinski pretvarač (*engl.* multi-level converter), kakav se koristi kod hibridnih mikromreža s bipolarnom DC sabirnicom i koji je prikazan na slici 2.17 [127], gdje je konkretno riječ o diodno pritegnutom (NPC, od *engl.* neutral point clamped) izmjenjivaču. Taj tip pretvarača se primjerice može koristiti i u funkciji IFC pretvarača kod bipolarnih istosmjernih mikromreža. Dodatna prednost višerazinskih pretvarača je i smanjenje udjela viših harmonika u naponu, što doprinosi smanjenju dimenzija potrebnog filtra, ali po cijenu većeg broja poluvodičkih sklopki [128].

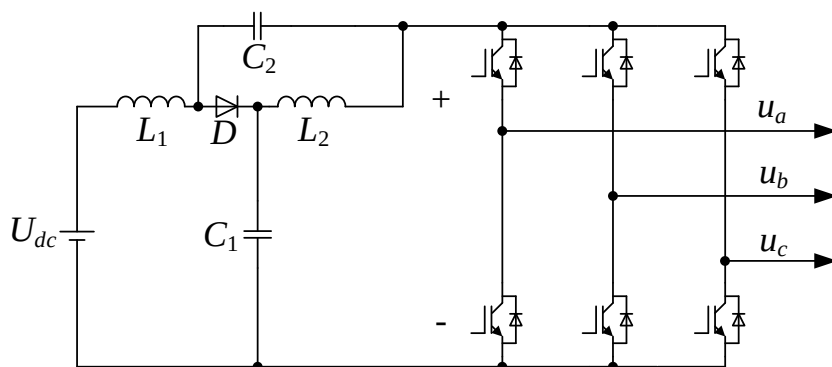


Slika 2.17 Višerazinski NPC pretvarač s jednim stupnjem pretvorbe [128]

Izmjenjivač Z-tipa, prikazan na slici 2.18, pa tako i izmjenjivač kvazi Z-tipa (slika 2.19) te druge topologije koje su izvedenica izmjenjivača Z-tipa također se uvrštavaju u skupinu pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe [4]. Kod ovih se izmjenjivača dodatnim impedancijskim krugom na ulazu u izmjenjivač te uz posebna, ST sklopna stanja u granama mosta izmjenjivača postiže dodatno naponsko pojačanje. Pritom se ne koriste dodatne poluvodičke sklopke a dobiva se i dodatni stupanj slobode upravljanja. Upravo je na izmjenjivaču kvazi Z-tipa zasnovana mikromreža razmatrana u okviru doktorskog rada.

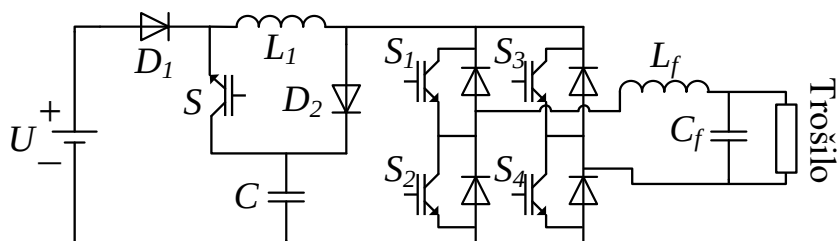


Slika 2.18 Topologija izmjenjivača Z-tipa



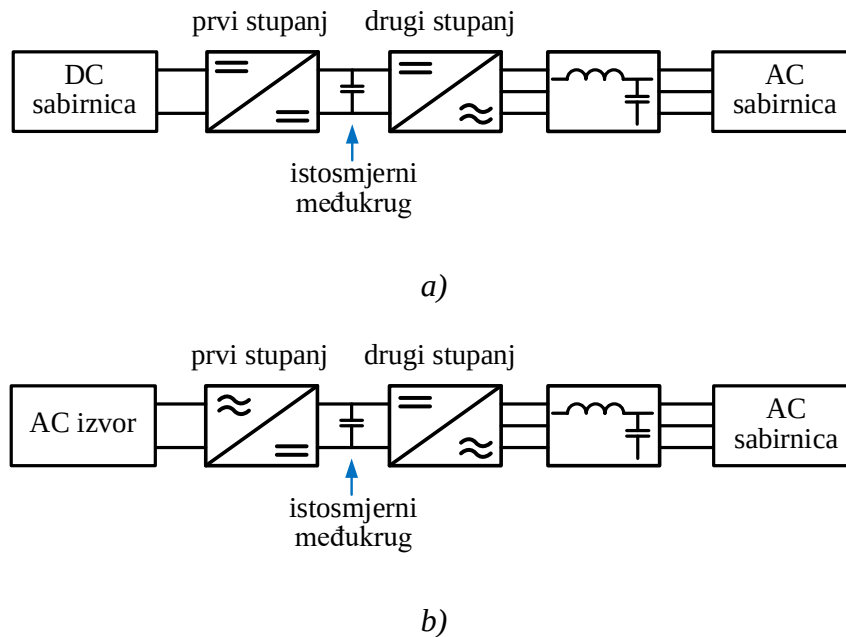
Slika 2.19 Topologija izmjenjivača kvazi Z-tipa

Uz izmjenjivač Z-tipa i njegove izvedenice, treba spomenuti i SBI izmjenjivač (od *engl.* switched boost inverter). SBI izmjenjivač je predložen kao zamjena za izmjenjivače Z-tipa u primjenama s manjim instaliranim snagama sustava. Naime, SBI izmjenjivač zahtijeva manje pasivnih komponenti u odnosu na izmjenjivač Z-tipa i njime se može postići smanjenje cijene i mase samog izmjenjivača. Odlikuju ga slične karakteristike kao i izmjenjivač Z-tipa po pitanju radnih svojstava i načina upravljanja te se može primijeniti za DC-DC i DC-AC pretvorbe. Ipak, za razliku od izmjenjivača Z-tipa, potrebna je dodatna poluvodička sklopka koja se postavlja u ulazni krug izmjenjivača, prije mosta izmjenjivača. Na slici 2.20 je prikazana topologija osnovnog jednofaznog SBI izmjenjivača, dok su različite izvedenice razmotrene u [129].



Slika 2.20 Topologija jednofaznog SBI izmjenjivača

Klasični pretvarači s jednim stupnjem pretvorbe imaju očita ograničenja, poput mogućnosti pojačanja, upravljanja i slično, te se stoga uvode pretvarači s dva stupnja pretvorbe koji imaju značajno veće mogućnosti. Pretvarač s dva stupnja pretvorbe dobije se kaskadnim ili paralelnim povezivanjem više pretvarača jednog stupnja pretvorbe, kao što je prikazano u blokovskoj shemi na slici 2.21. Time se dobivaju veće mogućnosti naponskog pojačanja, dodatne slobode upravljanja te eventualno i dodatno sučelje za povezivanje izvora ili SPE-a. Dodatno energetska sučelje se dobiva u obliku istosmjernog međukruga koji se nalazi između dva povezana pretvarača.

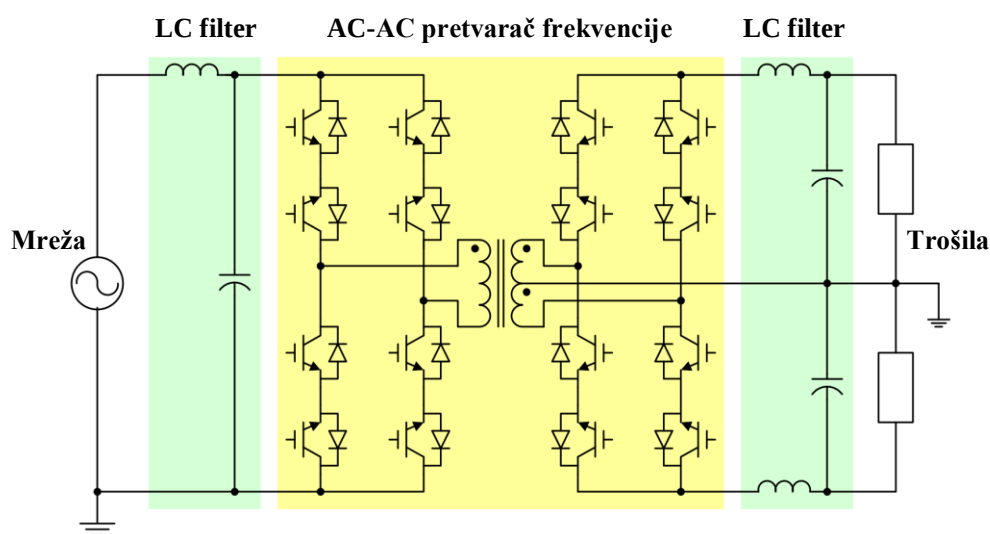


Slika 2.21 Blokowska shema pretvarača s dva stupnja pretvorbe: a) DC-DC-AC i
b) AC-DC-AC

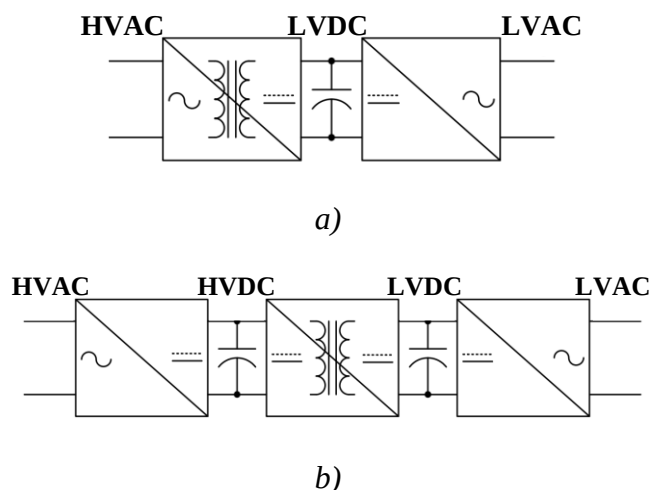
Zahvaljujući prednostima koje nude, pretvarači s dva stupnja pretvorbe su pronašli primjenu u raznim ulogama u industriji i energetici, a isti je slučaj i u mikromrežama gdje se mogu koristiti za povezivanje izvora, SPE-a te kao sučelje među podsustavima mikromreže (ILC) ili kao sučelje s glavom mrežom (IFC). Ovisno o potrebama razmatrane primjene, mogu se kombinirati AC i DC pretvarači jednog stupnja pretvorbe da se u konačnici dobije pretvarač koji u potpunosti odgovara primjeni. Primjena pretvarača s dva stupnja pretvorbe se ističe kod WECS-a, gdje se najčešće koriste upravo pretvarači s dva stupnja pretvorbe. Topologije pretvarača se mogu razlikovati s obzirom na snagu sustava, dok način povezivanja ponajviše ovisi o tipu generatora koji se koristi u vjetroagregatu. Ako je riječ o vjetroagregatu s DFIG-om, obično se koristi AC-AC pretvarač djelomične snage koji se povezuje na rotor generatora [35, 130], kao što je ranije pokazano na slici 2.9a. S druge strane, vjetroagregati s SCIG-om i PMSG-om gotovo uvijek koriste pretvarač s dva stupnja pretvorbe povezan na stator (slika 2.9b), koji po nazivnoj snazi odgovara vjetroagregatu [13, 131]. Primjena topologije s dva stupnja pretvorbe omogućuje, primjerice, da se VSC na strani WECS-a koristi za upravljanje generatorom i vjetroturbinom dok se VSC na strani mreže ili AC sabirnice mikromreže može koristiti za izvođenje drugih zadataka regulacije. Takva primjena je primjerice razmatrana u [81], gdje je istosmjerni međukrug pretvarača dodatno iskorišten za povezivanje baterijskog sustava i FN modula. Često se kod većih vjetroagregata prakticira i korištenje ovakvih pretvarača djelomične snage za povezivanje DFIG-a, koji se uz to koristi i

u funkciji STATCOM-a u periodima kada nema vjetra [132]. Ovi su pretvarači nezaobilazni i kod primjene u FN sustavima, gdje je vrlo često potrebno postići dodatno naponsko pojačanje kako bi se FN sustav povezao na mrežu/mikromrežu, a koje se ne može postići izmjenjivačem s jednim stupnjem pretvorbe [75].

Iako nije nužno vezan za temu ovog doktorskog rada, ranije je već u kontekstu konfiguracija mikromreža spomenuta istosmjerna i hibridna mikromreža sa SST-om, pa ga vrijedi ukratko pojasniti. Kod SST-a je riječ o poluvodičkom energetskom pretvaraču u kojem je kombinirana tehnologija transformatora i poluvodičkih pretvarača [133]. Načelo rada SST-a zasnovano je na svojstvu transformatora prema kojem se povećanjem frekvencije napona može smanjiti potreban volumen jezgre transformatora te se uz manji broj zavoja može postići jednaka impedancija. SST je sačinjen od poluvodičkog pretvarača koji pretvara srednji ili visoki napon niske frekvencije (50 Hz) u napon visoke frekvencije. Takav se napon visokofrekvencijskim transformatorom pretvara u niski napon, koji se potom ponovno sklopovima energetske elektronike pretvara u napon frekvencije 50 Hz. Opisana topologija se naziva SST s jednim stupnjem pretvorbe i prikazana je na slici 2.22, dok su topologije s više stupnjeva pretvorbe prikazane na slici 2.23.



Slika 2.22 Topologija SST-a s jednim stupnjem pretvorbe



Slika 2.23 Topologije SST-a s: a) dva stupnja pretvorbe i LVDC međukrugom i b) tri stupnja pretvorbe

Integrirane poluvodičke strukture SST-a omogućuju izvođenje zadataka poput regulacije napona, radne i jalove snage i slično, što SST čini privlačnim za povezivanje električnih energetskih izvora ili podsustava (npr., mikromreža) na mrežu. SST se, dakle, osim kao zamjena za klasični transformator može koristiti i za pružanje dodatnih usluga poput integracije SPE-a, upravljanja tokovima energije, upravljanja hibridnim mikromrežama i povećanja kvalitete napajanja [134].

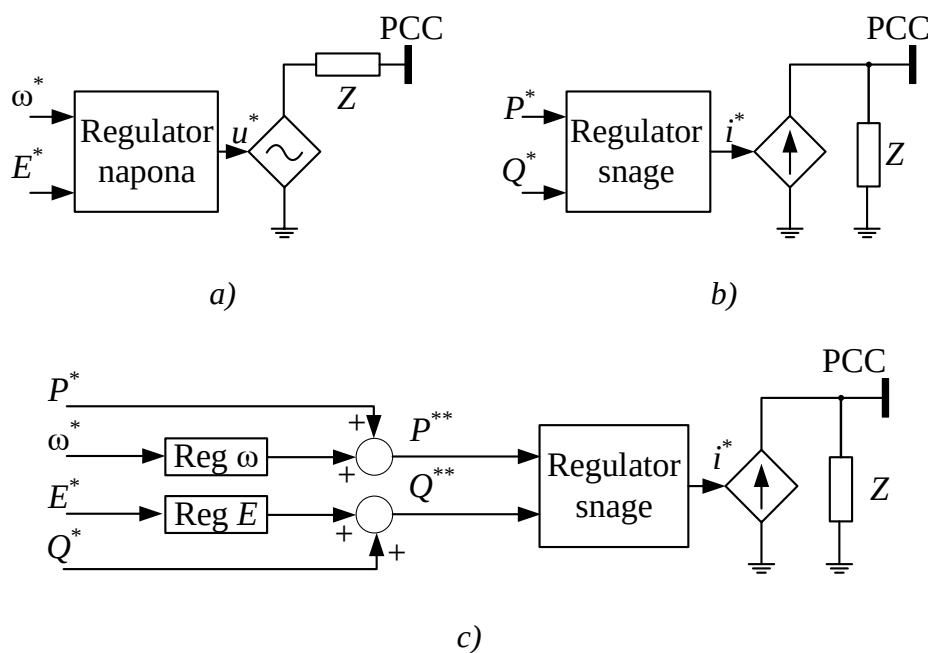
2.5.2. Upravljački ciljevi pretvarača u mikromrežama

Pored različitih funkcija za koje se pretvarači mogu koristiti u mikromrežama, poput povezivanja distribuiranih izvora, postoje i različite upravljačke uloge, odnosno ciljevi upravljanja za koje mogu biti zaduženi. Prema ciljevima upravljanja, svi pretvarači u mikromreži mogu se svrstati u jednu od sljedeće tri uloge:

- Pretvarači za uspostavljanje mreže (*engl. grid-forming*): aktivno utječu i održavaju parametre mreže
- Pretvarači za podržavanje mreže (*engl. grid-supporting*): potpomažu u održavanju zadanih parametara mreže
- Pretvarači za napajanje mreže (*engl. grid-feeding ili grid-following*): djeluju samo kao izvori snage u već uspostavljenoj mreži

Ogledne strukture upravljanja za navedena tri tipa implementiranog upravljanja pretvaračem su prikazane na slici 2.24

Pretvaračima za uspostavljanje mreže upravlja se u zatvorenoj regulacijskoj petlji s ciljem održavanja zadanih vrijednosti napona mikromreže, a može ih se promatrati i kao upravljive naponske izvore s malom impedancijom. Ovim se pretvaračima omogućuje stabilan rad mikromreže u otočnom režimu ako ne postoji neki drugi izvor povezan na mikromrežu bez pretvarača koji se koristi za uspostavljanje napona mikromreže [135]. U mikromreži u svakom trenutku može biti aktivan samo jedan pretvarač za uspostavljanje mreže koji zadaje sinkronu referencu a koju slijede ostali pretvarači povezani na istu mikromrežu. Ako je riječ o istosmjernoj mikromreži, pretvarač za uspostavljanje mreže regulira samo amplitudu napona mreže, dok u hibridnoj mikromreži svaki od podsustava mora imati po jedan pretvarač za uspostavljanje mreže. U tom slučaju ILC pretvarač također može služiti kao pretvarač za uspostavljanje mreže.



Slika 2.24 Pojednostavljene strukture upravljanja u izmjeničnoj mikromreži za:
a) pretvarače za uspostavljanje mreže, b) pretvarače za napajanje mreže i c) strujno upravljane pretvarače za održavanje mreže

Pretvarači za održavanje mreže potpomažu održavanju zadanih vrijednosti napona energetskog sustava. To može biti distribucijska mreža, gdje se ovakvim radom pretvarača poboljšava kvaliteta napajanja, ili mikromreža, gdje samo jedan pretvarač nije dovoljan za održavanje parametara mikromreže. To mogu biti pretvarači distribuiranih izvora, pretvarači

SPE-a, kao i IFC pretvarači. Ovisno o potrebama pojedinog sustava, pretvaračima za podržavanje mreže može se upravljati kao strujnim ili kao naponskim izvorima a regulacija se najčešće izvodi *droop* metodama. U slučaju primjene naponski upravljanih pretvarača za podržavanje mreže, potrebno je obratiti pozornost na malu izlaznu impedanciju pretvarača, zbog čega je ovaj pretvarač osjetljiviji na smetnje u mreži. Zbog toga u nekim slučajevima može biti nužno koristiti virtualnu impedanciju na izlazu pretvarača [136]. Primjena pretvarača za podržavanje mreže u kombinaciji s *droop* metodom, koja postavlja minimalne zahtjeve na komunikaciju među pojedinim jedinicama, čini opisani način regulacije napona mikromreže prikladnim za sustave s decentraliziranim i distribuiranim upravljačkim sustavima.

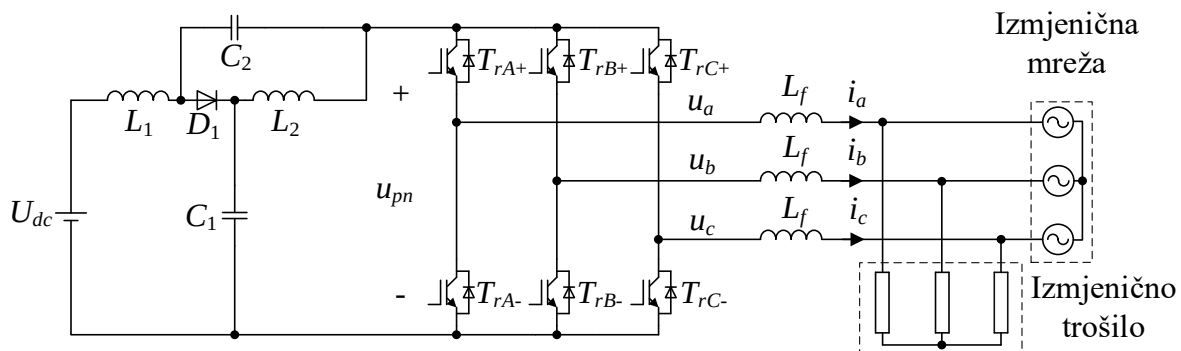
Pretvarači za napajanje mreže su strujno upravljani pretvarači kojima se zadaje vrijednost snage (ili struje) koja se šalje u stabilnu mrežu (npr., mikromrežu) na koju su povezani. Njihova uloga je isključivo prosljeđivanje snage u mrežu, bez mogućnosti izravne regulacije parametara mreže. Ipak, mogu sudjelovati i u regulaciji amplitude ili frekvencije napona mikromreže na način da im se s više hijerarhijske razine zadaju reference snage (ili struje) koje moraju slijediti [137]. Bitno je naglasiti da se isključivo s pretvaračima za napajanje ne može izvesti upravljanje mikromrežom te je pored njih nužno korištenje pretvarača za uspostavljanje mreže ili pretvarača za podržavanje mreže. U ulozi pretvarača za napajanje su najčešće pretvarači distribuiranih izvora, posebno ako je riječ o obnovljivim izvorima, koji onda svu raspoloživu snagu prosljeđuju u mrežu.

3. OSNOVNE ZNAČAJKE IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA

Kako je spomenuto u prethodnom poglavlju, poluvodički energetske pretvarači su okosnica modernog energetskog sustava i kao takvi su uvijek zanimljiv predmet istraživanja i razvoja. Svaki napredak u području pretvarača može donijeti značajan iskorak u načinu planiranja, razvoja i upravljanja mrežama i mikromrežama. Izmjenjivač Z-tipa zasigurno predstavlja jedan od većih iskoraka u području poluvodičkih pretvarača, kojim je otvorena cijela lepeza alternativnih topologija, a među kojima je i qZSI [3, 4]. Najznačajnije obilježje ZSI-ja i pripadajućih izvedenica je naponsko pojačanje koje se postiže modificiranim upravljanjem i dodavanjem impedancijskog kruga na ulazu u most izmjenjivača, odakle potječe i sam naziv ovog izmjenjivača. Bitno je naglasiti da se naponsko pojačanje postiže bez uvođenja dodatne upravljive poluvodičke sklopke, čime se pojednostavljuje upravljanje te smanjuje cijena sustava. Razvojem qZSI-ja kao alternativne topologije ZSI-ja, otklonjeni su nedostaci poput nemogućnosti rada s kontinuiranom strujom na ulazu u izmjenjivač te je smanjeno naponsko opterećenje jednog od kondenzatora u impedancijskom krugu.

3.1. Topologija i matematički model

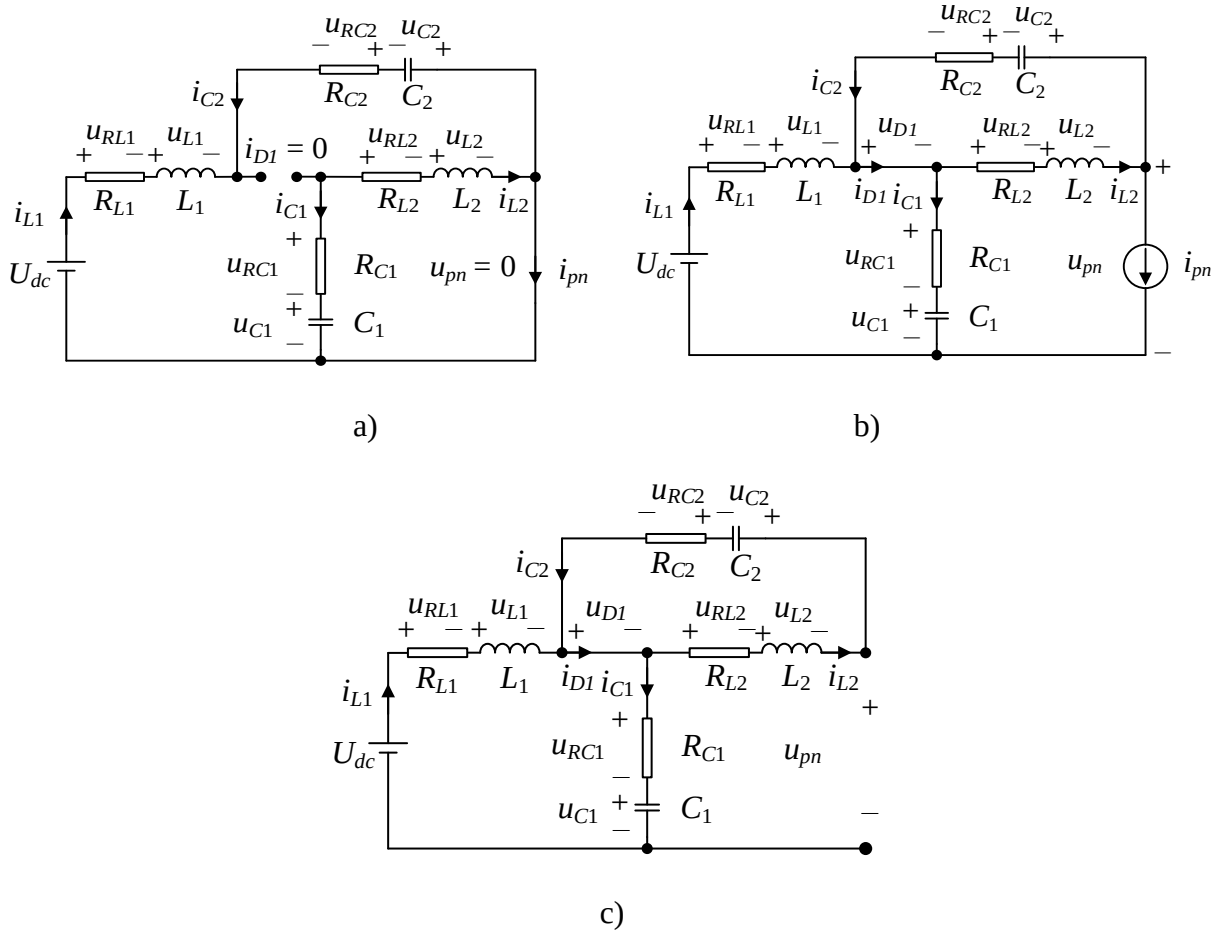
Topologiju qZSI-ja, prikazanu na slici 3.1, može se podijeliti na dvije osnovne cjeline a to su impedancijski krug na ulazu u izmjenjivač te klasični trofazni tranzistorski most, kakav se najčešće koristi u izmjenjivačima s utisnutim naponom. Impedancijski krug čine dvije prigušnice (L_1, L_2), dva kondenzatora (C_1, C_2) i dioda (D). U odnosu na osnovnu ZSI topologiju, kod qZSI-ja je izveden samo ponešto drugačiji raspored pasivnih komponenti unutar impedancijskog kruga. Topologija tranzistorskog mosta izmjenjivača je standardna a čini ga šest tranzistora s povratnim diodama. Na izmjenične izlazne kontakte mosta još se dodaje i filter koji može biti L, LC (kao na slici 3.1) ili LCL tipa, ovisno o zahtjevima sustava. Pretvaranje istosmjernog napona u izmjenični se postiže na isti način kao i kod klasičnih izmjenjivača s utisnutim naponom.



Slika 3.1 Topologija qZSI-ja s L filtrom postavljenim na izlaz izmjenjivača

Upravljanje tranzistorima se, dakle, koristi za pretvaranje istosmjernog napona u izmjenični, ali i za postizanje (istosmjernog) naponskog pojačanja, pri čemu važnu ulogu ima impedancijski krug. Pritom se koriste uobičajene metode upravljanja, poput PWM-a, koji se dodatno adaptira kako bi se postiglo naponsko pojačanje. Kod klasičnih PWM metoda upravljanja razlikuju se aktivna stanja, kada je ulazni istosmjerni krug energetski povezan s izlaznim izmjeničnim krugom, odnosno nulta stanja kada su isključeni svi donji ili gornji tranzistori u granama mosta te je ulazni istosmjerni krug energetski odvojen od izlaznog izmjeničnog kruga. Da bi se postiglo naponsko pojačanje qZSI-ja, koristi se dodatno, prostrijelno (ST) sklopno stanje, tijekom kojeg se aktiviraju oba tranzistora barem jedne grane mosta. Ovo dodatno sklopno stanje se implementira tijekom nultih PWM stanja. Time se postiže kratkotrajni kratki spoj u tranzistorskom mostu te se zatvara strujni krug s izvorom i pasivnim komponentima impedancijskog kruga, pri čemu prigušnice sprječavaju nagli porast struje.

Na slici 3.2 su prikazane nadomjesne sheme qZSI-ja tijekom aktivnih i nultih te ST stanja. U trenutku aktivacije ST stanja, uključanjem oba tranzistora iste grane (ili u sve tri grane), napon na ulazu u most izmjenjivača pada na nulu a dioda u impedancijskom krugu zapire. Kondenzatori se prazne kroz prigušnice u kojima se pritom akumulira magnetska energija. Prelaskom u aktivno ili nulto stanje, dioda u impedancijskom krugu prelazi u stanje vođenja, kondenzatori se nabijaju a prigušnice djeluju kao strujni izvori oslobađajući energiju akumuliranu za vrijeme trajanja ST stanja. Pri takvom radu dolazi do povećanja vršne vrijednosti napona na ulazu u most izmjenjivača u_{pn} , što u konačnici dovodi i do veće amplitude izmjeničnog napona, tj. na taj se način postiže naponsko pojačanje qZSI-ja.



Slika 3.2 Nadomjesne sheme qZSI-ja za vrijeme trajanja a) prostrijelnih stanja, b) aktivnih stanja i c) nultih stanja

Naponsko pojačanje izmjenjivača (G) se definira kao omjer vršne vrijednosti osnovnog harmonika izlaznog faznog napona izmjenjivača ($\hat{U}_{ac}$) i polovice ulaznog istosmjernog napona U_{dc} . Uz zanemarivanje parazitnih otpora R_C i R_L , ovo pojačanje može biti opisano izrazima:

$$G = \frac{\hat{U}_{ac}}{\frac{U_{dc}}{2}} = MB = M \frac{1}{1 - 2D_0} \quad (3.1)$$

$$U_{pn} = U_{dc} B \quad (3.2)$$

gdje je U_{pn} vršna vrijednost napona na ulazu u most izmjenjivača, B faktor pojačanja izmjenjivača, M indeks (amplitudne) modulacije a D_0 faktor trajanja ST stanja. Faktor D_0 je pritom određen kao omjer perioda ST stanja T_0 , koji predstavlja ukupno trajanje ST stanja unutar jednog sklopnog perioda T_{sw} , i sklopnog perioda:

$$D_0 = \frac{T_0}{T_{sw}} \quad (3.3)$$

Zanemarujući parazitne otpore, srednje vrijednosti napona na kondenzatorima C_1 i C_2 (U_{C1} i U_{C2}) mogu se odrediti s obzirom na faktor D_0 prema izrazima:

$$U_{C1} = \frac{1-D_0}{1-2D_0} U_{dc} \quad (3.4)$$

$$U_{C2} = \frac{D_0}{1-2D_0} U_{dc} \quad (3.5)$$

Dakle, pasivne komponente impedancijskog kruga u periodima ST stanja na sebe preuzimaju najveći dio energije kratkog spoja, koju po završetku ST stanja predaju trošilu. Time, osim što omogućuju naponsko pojačanje, doprinose i pouzdanosti izmjenjivača budući da ne postoji opasnost od kvara uslijed pojave neželjenog kratkotrajnog kratkog spoja u mostu izmjenjivača. Naime, kod klasičnih izmjenjivača je nužno implementiranje mrtvog vremena, tj., odgode uključenja tranzistora u odnosu na isključenje drugog tranzistora iz iste grane mosta, kako bi se izbjegli slučajni kratki spojevi koji najčešće rezultiraju uništenjem poluvodičkih sklopki. U slučaju qZSI-ja, slučajni kratki spojevi ograničenog trajanja rezultiraju samo povećanim gubicima i povećanim naponskim pojačanjem [138]. Prema prikazanim nadomjesnim shemama aktivnih i nultih te ST stanja mogu se izvesti jednadžbe koje opisuju rad izmjenjivača i koje mogu biti korištene za izradu matematičkog modela. Kako bi se dobio jednostavniji model izmjenjivača, pretpostavlja se da je istosmjerni krug simetričan na način da je $L_1 = L_2 = L$ i $C_1 = C_2 = C$. Unutarnji otpori prigušnica (R_L) i kondenzatora (R_C) se također pretpostavljaju jednakima, odnosno $R_{L1} = R_{L2} = R_L$ i $R_{C1} = R_{C2} = R_C$, te se zanemaruje pad napona na diodi za vrijeme trajanja nultih i aktivnih stanja. Uzimajući u obzir navedene pretpostavke, za vrijeme trajanja aktivnih i nultih stanja vrijedi:

$$u_{dc} = i_{L1} R_L + L \frac{di_{L1}}{dt} + i_{C1} R_C + u_{C1} \quad (3.6)$$

$$u_{C2} = -L \frac{di_{L2}}{dt} - i_{L2} R_L - i_{C2} R_C$$

$$i_{C1} = C \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1} - i_{pn} \quad (3.7)$$

$$i_{C2} = C \frac{du_{C2}}{dt} = i_{L2} - i_{pn}$$

Slične jednadžbe mogu se izvesti i za vrijeme trajanja ST stanja kako slijedi:

$$\begin{aligned} u_{dc} &= i_{L1}R_L + L \frac{di_{L1}}{dt} - i_{C2}R_C - u_{C2} \\ u_{C1} &= L \frac{di_{L2}}{dt} + i_{L2}R_L - i_{C1}R_C \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} i_{C1} &= -i_{L2} \\ i_{C2} &= -i_{L1} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Trenutne vrijednosti izmjeničnih faznih napona na izlazu izmjenjivača (u_a , u_b , u_c) mogu se odrediti pomoću trenutne vrijednosti napona na ulazu u most izmjenjivača (u_{pn}) i sklopnih stanja gornje (ili donje) grupe tranzistora u mostu (S_A , S_B i S_C):

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3}u_{pn}(2S_A - S_B - S_C) \\ u_b &= \frac{1}{3}u_{pn}(2S_B - S_C - S_A) \\ u_c &= \frac{1}{3}u_{pn}(2S_C - S_A - S_B) \end{aligned} \quad (3.10)$$

gdje je:

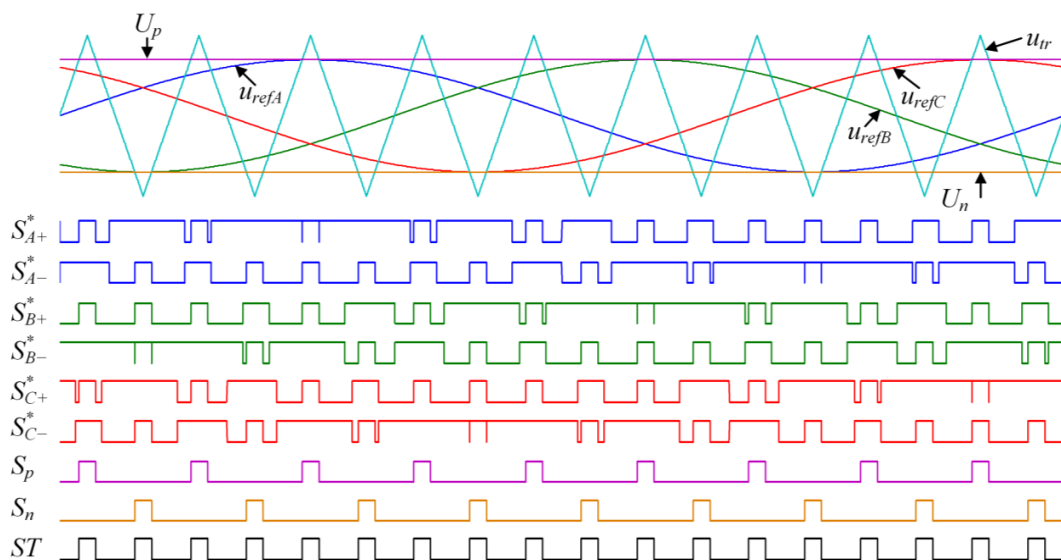
$$u_{pn} = u_{C1} + i_{C1}R_{C1} - u_{L2} - i_{L2}R_{L2} \quad (3.11)$$

3.2. Osnovne metode upravljanja

Upravljanje qZSI-jem se u odnosu na upravljanje konvencionalnim pretvaračima razlikuje samo po ST stanju, kao dodatnom sklopnom stanju koje se umeće unutar nultih PWM stanja. U literaturi se pritom najčešće koriste klasične PWM metode poput sinusnog PWM-a (SPWM) ili vektorskog PWM-a. Bez obzira na metodu upravljanja izmjenjivačem, naponsko pojačanje qZSI-ja ovisi o trajanju ST stanja, odnosno faktoru D_0 koji je ograničen trajanjem nultog sklopnog stanja. Kako bi se izvela ST stanja koja pritom ne prelaze okvire nultog sklopnog stanja, u literaturi su, među ostalim, predložene osnovne metode utiskivanja ST stanja za SPWM [139]. U tu skupinu upravljačkih metoda spadaju: metoda jednostavnog pojačanja (*engl.* simple boost control), metoda maksimalnog pojačanja (*engl.* maximum boost control) te

metoda maksimalnog konstantnog pojačanja (*engl.* maximum constant boost control). Karakteristika navedenih osnovnih metoda je da je faktor D_0 spregnut s indeksom modulacije M , odnosno njima se ne može upravljati zasebno.

Kod primjene SPWM-a, za generiranje upravljačkih signala za tranzistore (S_{A+} , S_{A-} , S_{B+} , S_{B-} , S_{C+} , S_{C-}) koriste se referentni naponski signali (u_{refA} , u_{refB} , u_{refC}) koji predstavljaju osnovni harmonik faznih napona na izlazu izmjenjivača i koji se uspoređuju s trokutastim signalom nosiocom (U_{tr}), čija frekvencija odgovara sklopnoj frekvenciji. Kada je referentni naponski signal određene faze veći od trokutastog signala, aktivan je gornji tranzistor u toj fazi/grani izmjenjivača, i obratno. ST stanja u slučaju metode jednostavnog pojačanja definiraju se usporedbom trokutastog signala i istosmjernih referentnih signala U_p i U_n , čiji iznos (pozitivan i negativan) odgovara amplitudi sinusnih referentnih signala, kako je prikazano na slici 3.3. Trajanje ST stanja je u ovom slučaju konstantno, ali ne traje uvijek jednako kao nulto stanje. To znači da se ne iskorištava u potpunosti trajanje nultih stanja pa naponsko pojačanje nije maksimalno moguće. Metoda maksimalnog pojačanja se tu razlikuje na način da se kod nje sva raspoloživa nulta stanja pretvaraju u ST stanja. Time se dobiva veće naponsko pojačanje, ali se zbog različitog trajanja pojedinih nultih (tj., ST) stanja unosi niskofrekvencijska valovitost u struje kroz zavojnice i napone na kondenzatorima. Pritom faktor D_0 oscilira s frekvencijom šest puta većom od frekvencije referentnih signala.

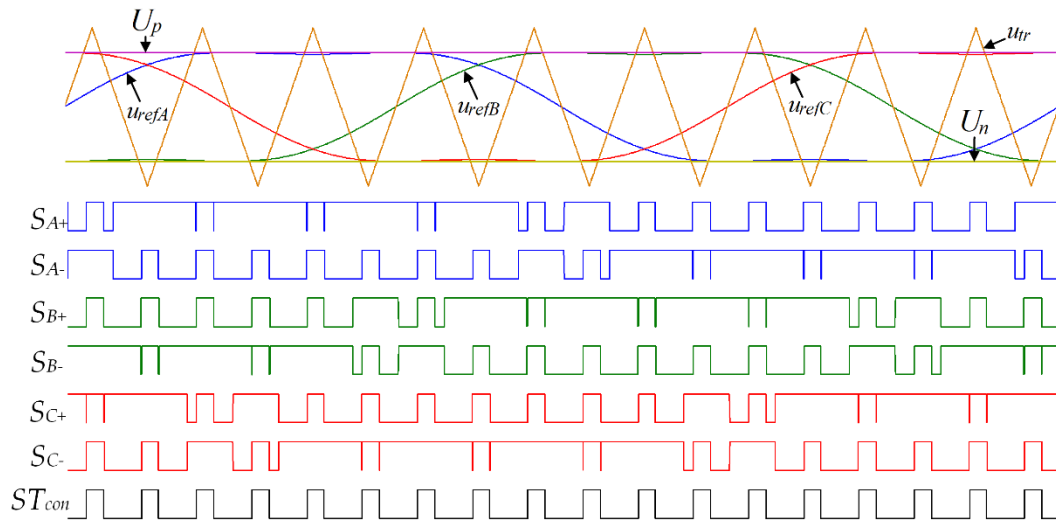


Slika 3.3 Valni oblici kod metode jednostavnog pojačanja

Oscilacije u strujama i faktoru D_0 se mogu izbjeći zamjenom vremenski nepromjenjivih signala U_p i U_n s periodičkim (sinusoidnim) signalima, tri puta veće frekvencije od referentnih naponskih signala. Time se postiže maksimalno pojačanje a istovremeno zadržava konstantan

iznos pojačanja i faktora D_0 . Takvo upravljanje se naziva metodom maksimalnog konstantnog pojačanja. Pojačanje koje se postiže metodama maksimalnog pojačanja i maksimalnog konstantnog pojačanja se može uvećati umetanjem trećeg harmonika u referentne sinusne trofazne signale [140]. U referentne sinusne signale se umeće treći harmonik sa šestinom amplitude osnovnog harmonika, a za usporedbu s trokutastim signalom se koriste vremenski nepromjenjivi signali U_p i U_n , koji odgovaraju amplitudi referentnih signala s umetnutim trećim harmonikom, prema slici 3.4. Na taj način se maksimalna vrijednost indeksa modulacije M u linearnom području upravljanja podiže s 1 na $2/\sqrt{3}$. To u konačnici rezultira većim naponskim pojačanjem a koje je pritom, kao i faktor D_0 , konstantno. Budući da se faktor D_0 u svim prethodno opisanim metodama određuje s obzirom na vrijednost indeksa modulacije, za metodu maksimalnog konstantnog pojačanja s umetnutim trećim harmonikom je određen prema izrazu:

$$D_0 = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} M \quad (3.12)$$



Slika 3.4 Valni oblici kod metode maksimalnog konstantnog pojačanja s umetnutim trećim harmonikom

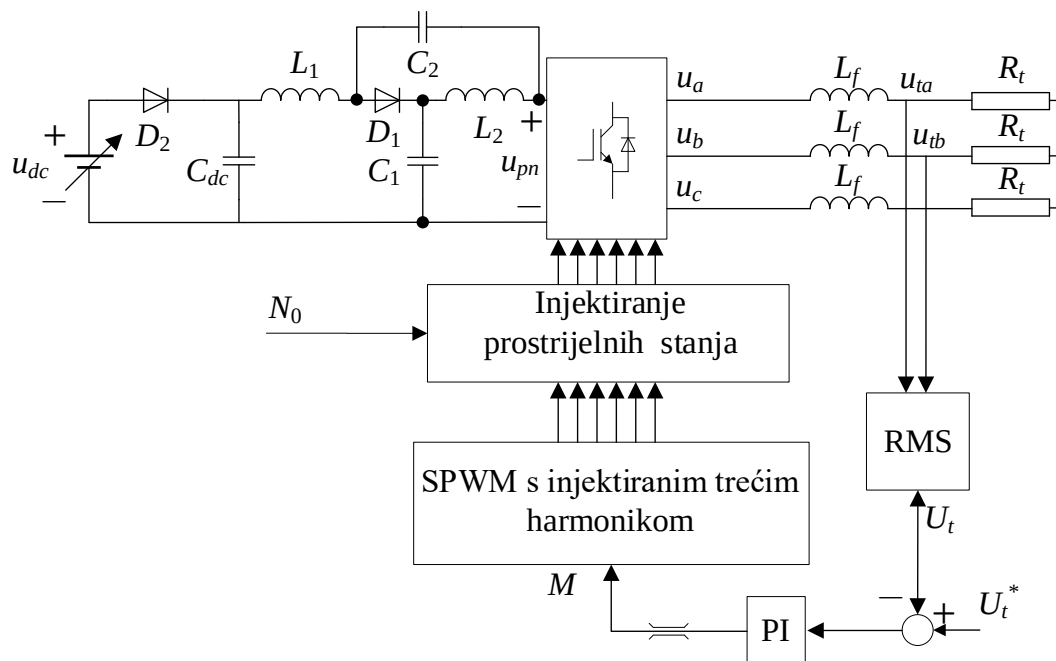
Izrazom (3.11) određen je najveći konstantan iznos faktora D_0 koji je moguće postići bez utjecaja na aktivna stanja izmjenjivača. Kod ove i ostalih prethodno opisanih osnovnih metoda upravljanja qZSI-jem, naponskim pojačanjem se upravlja promjenom indeksa modulacije, kojim je indirektno određen iznos faktora D_0 . Takvim pristupom se ne iskorištava mogućnost upravljanja s dva stupnja slobode, odnosno mogućnost raspregnutog upravljanja indeksom modulacije i faktorom D_0 , a što je potencijalno jedna od najznačajnijih prednosti qZSI-ja u odnosu na neke druge pretvarače s jednim stupnjem pretvorbe.

3.3. Regulacija izlaznog napona

Dva stupnja slobode upravljanja kod pretvarača otvaraju mogućnost istovremene regulacije dvije različite veličine u sustavu. Ta mogućnost predstavlja značajnu prednost jer se inače često u sustave moraju uvesti dodatni pretvarači čija je primarna svrha regulacija neke veličine. Primjerice, baterijski sustavi, iako se mogu povezati izravno na istosmjernu sabirnicu mikromreže ili u istosmjerni međukrug pretvarača, obično se povezuju preko pretvarača kojim se regulira struja punjenja i pražnjenja [81]. Dakle, s primjenom pretvarača koje karakteriziraju dva stupnja slobode upravljanja može se smanjiti kompleksnost i cijena sustava. U literaturi se dva stupnja slobode upravljanja qZSI-jem najčešće koriste za istovremenu regulaciju ulaznog i izlaznog napona (ili snage) [5, 13, 15]. Ipak, mogućnosti postavki regulacijskog sustava s qZSI-jem su raznolike te se mogu pronaći i razne druge varijante, ali se sve u konačnici svode na neovisno upravljanje *naponskim pojačanjem izmjenjivača i protokom energije preko mosta izmjenjivača*. Da bi se izvelo neovisno upravljanje tim dvjema veličinama, nužno je neovisno upravljanje faktorom trajanja ST stanja i indeksom modulacije. Dok je kod prethodno opisanih osnovnih metoda upravljanja qZSI-jem vrijednost faktora D_0 definirana vrijednošću indeksa modulacije (i obratno), neovisnom promjenom faktora D_0 može se postići različito naponsko pojačanje bez obzira na izlaznu snagu ili napon. To naravno vrijedi u ograničenom rasponu ulaznog i izlaznog napona te izlazne snage izmjenjivača budući da je naponsko pojačanje ograničeno fizičkim svojstvima komponenti izmjenjivača.

U okviru ove disertacije je ispitan optimalni raspon ulaznog napona za zadani izlazni napon u otočnom radu qZSI-ja s vlastitim trošilom, a rezultati su objavljeni u radu [141]. Kroz eksperimente je ispitan osnovni princip upravljanja pojačanjem izmjenjivača i izlaznim naponom te su analizirana statička i dinamička svojstva cjelokupnog sustava. Za istraživanje je korištena laboratorijska maketa izmjenjivača, koja je detaljno opisana u [141]. Na slici 3.5 je prikazana konfiguracija razmatranog sustava s qZSI-jem i upravljivim istosmjernim izvorom povezanim na ulazne stezaljke. Između izmjenjivača i izvora postavljena je zaštitna dioda (D_2), kojom je spriječen tok struje prema izvoru, te dodatni kondenzator (C_{dc}) za filtriranje ulaznog napona qZSI-ja. Na izlaznim izmjeničnim stezaljkama qZSI-ja nalazi se induktivni filter te trofazno radno trošilo spojeno u zvijezdu. Na slici 3.5 je prikazana i struktura pripadajućeg regulacijskog sustava. Za potrebe regulacije napona na trošilu mjerena su dva fazna napona (u_{ta} , u_{tb}) iz kojih je rekonstruiran napon treće faze (izolirano zvjezdište trošila) te je određena efektivna vrijednost napona trošila (U_t), koja se koristi u povratnoj vezi. Regulacija je izvedena

klasičnim PI regulatorom koji na temelju referentne i mjerene efektivne vrijednosti napona trošila zadaje indeks modulacije M kao upravljačku veličinu.



Slika 3.5 Topologija qZSI-ja s upravljivim izvorom, radnim trošilom i strukturom regulacijskog sustava izlaznog napona

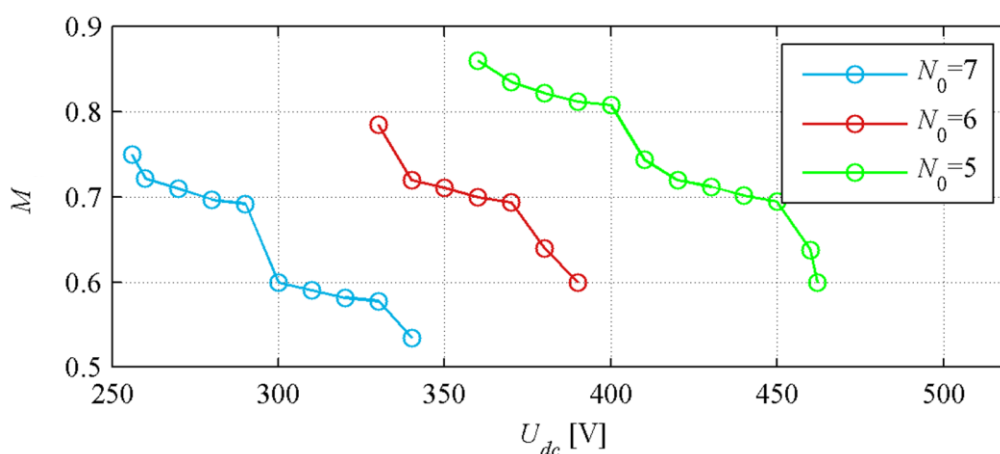
Istosmjernim naponskim pojačanjem qZSI-ja je u ovom radu upravljano neovisno o regulaciji izlaznog napona i to ručnim postavljanjem trajanja ST stanja. Trajanje ST stanja je pritom definirano parametrom N_0 , koji odgovara broju vremenskih uzoraka za koji se zadržava pojedino ST stanje a jednak je omjeru perioda ST stanja i dvostrukog perioda uzorkovanja regulacijskog algoritma T_s .

$$T_0 = 2N_0T_s \quad (3.13)$$

Tu treba naglasiti razliku naspram faktora D_0 , koji je definiran u odnosu na sklopnu frekvenciju izmjenjivača.

Ovakvim postavkama regulacijskog sustava, gdje je ručno zadano trajanje ST stanja, uz konstantan otpor trošila, regulator korigira vrijednost indeksa M kako bi se zadržao referentni iznos napona na trošilu bez obzira na promjene ulaznog napona ili pojačanja izmjenjivača. Iznos indeksa modulacije u odnosu na ulazni napon prikazan je na slici 3.6, gdje se može uočiti smanjenje indeksa modulacije s povećanjem ulaznog napona. Razmatrani sustav je laboratorijski ispitan za široki raspon vrijednosti ulaznog napona, uz korake od 10 V, za tri vrijednosti otpora trošila i parametra N_0 . Uz zadanu referentnu vrijednost izlaznog napona od

230 V, postignut je raspon ulaznog napona od 255 V do 465 V, što ne bi bilo izvedivo bez naponskog pojačanja koje se postiže qZSI-jem. Analizirana je i točnost regulacije i pokazalo se da pogreška regulacije u ispitivanju nije prelazila 10 %, koliko je i dopušteno odstupanje napona po mrežnim pravilima. Na pogrešku regulacije nije značajnije utjecala promjena trajanja ST stanja već ponajviše snaga trošila koja je utjecala na mjerni šum. Sustav regulacije izlaznog napona se pokazao zadovoljavajućim i kod dinamičkih promjena koje su uključivale skokovite promjene ulaznog napona, parametra N_0 i otpora trošila. Najveća odstupanja napona trošila za vrijeme prijelaznih pojava su zabilježena prilikom promjene parametra N_0 . Zabilježene vrijednosti napona i točnost regulacije su određeni neovisnim valnim analizatorom Norma 4000 (Fluke)



Slika 3.6 Indeks modulacije M_a dobiven na izlazu PI regulatora za različite vrijednosti ulaznog istosmjernog napona i parametra N_0 (trajanja ST stanja) [141]

Rezultati istraživanja u [141] ukazuju da se regulacija izlaznog napona qZSI-ja, za veliki raspon ulaznog napona, može postići i s jednostavnim regulacijskim sustavima gdje se pojačanje izmjenjivača zadaje ručno ili čak drži konstantnim. Pritom se regulacija izlaznog napona ne izvodi drugačije u odnosu na klasične izmjenjivače i potpuno je neovisna o upravljanju pojačanjem. Imajući u vidu pokazatelje kvalitete regulacije izlaznog napona i korisnost sustava, pokazalo se poželjnim, uz referentnu efektivnu vrijednost izlaznog napona od 230 V, ulazni napon zadržavati u određenim granicama. U ovom je slučaju to bilo između 390 V i 440 V, uz $N_0 = 5$, što bi bilo ekvivalentno $D_0 \approx 0,25$. Glavni nedostatak ovakve strukture upravljanja su diskretni koraci promjene trajanja ST stanja. Naime, ove diskretne promjene dovode do skokovitih promjena pojačanja izmjenjivača a time i napona na mostu izmjenjivača, čime se u konačnici otežava regulacija izlaznog napona. Naprednijim regulacijskim sustavima se može izvesti kvalitetnija regulacija, stabilniji rad te postići veći radni opseg izmjenjivača.

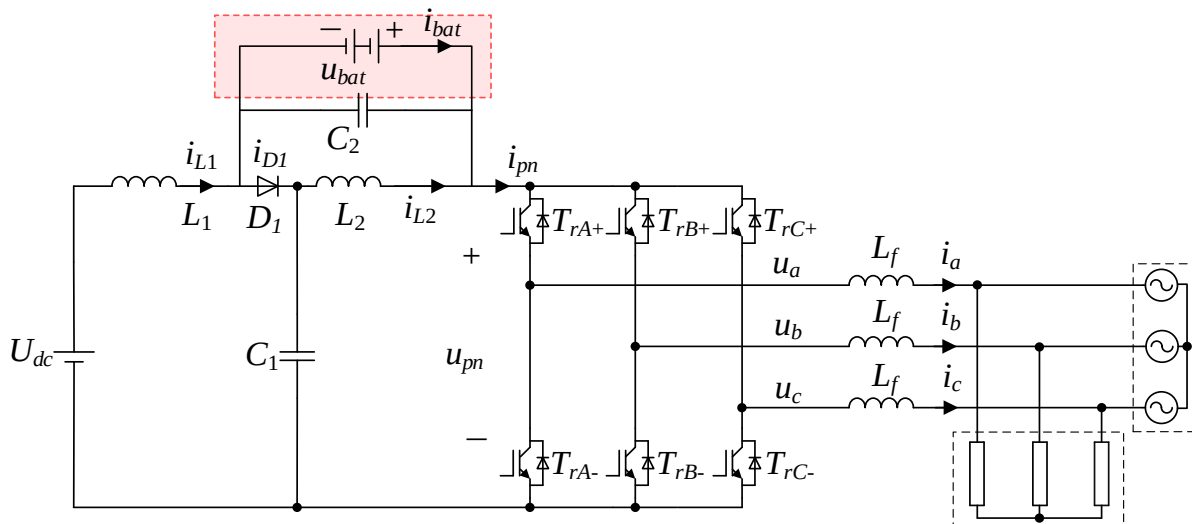
3.4. Integracija baterija

Implementacija sustava upravljanja s dva stupnja slobode pruža mogućnost maksimalnog iskorištavanja karakteristika topologije qZSI-ja i prednosti koje s njom dolaze. Jedna od tih prednosti je mogućnost integracije baterijskog sustava izravno u ulazni impedancijski krug izmjenjivača. Uz mogućnost upravljanja qZSI-jem s dva stupnja slobode, integracijom baterija izravno u impedancijski krug omogućuje se realizacija potpuno upravljivog baterijskog sustava bez dodatnog pretvarača. Baterijama povezanim u sustav s qZSI-jem postiže se veći radni opseg izmjenjivača s obzirom na dostupnu ulaznu i zahtijevanu izlaznu snagu. U otočnom režimu rada, to znači da je omogućeno izvođenje optimizacija proizvodnje iz obnovljivih izvora budući da se baterijama kompenziraju eventualni viškovi i manjkovi dostupne snage. S druge strane, kod rada u spoju s mrežom, baterije omogućuju implementaciju prethodno spominjanih EMS funkcija poput, primjerice, ekonomske optimizacije.

Povezivanje baterijskog sustava izravno u impedancijski krug qZSI-ja prvi puta je predloženo u [142]. Autori u spomenutom radu predlažu postavljanje baterija paralelno s kondenzatorom C_2 , kao što je prikazano na slici 3.7. Napon baterijskog sustava pritom ne mora odgovarati naponu izvora povezanog na ulaz izmjenjivača. Modificiranjem osnovne topologije izmjenjivača Z-tipa u qZSI topologiju promijenjen je raspored komponenti u impedancijskom krugu, što je rezultiralo manjim iznosom srednje vrijednosti napona na kondenzatoru C_2 . Time je omogućena integracija baterijskog sustava nižeg napona u odnosu na ZSI topologiju. Koristeći usrednjeni model izmjenjivača, naponi na kondenzatorima se mogu odrediti prema sljedećim izrazima [10]:

$$U_{C1} = \frac{1-D_0}{1-2D_0} U_{dc} \quad (3.14)$$

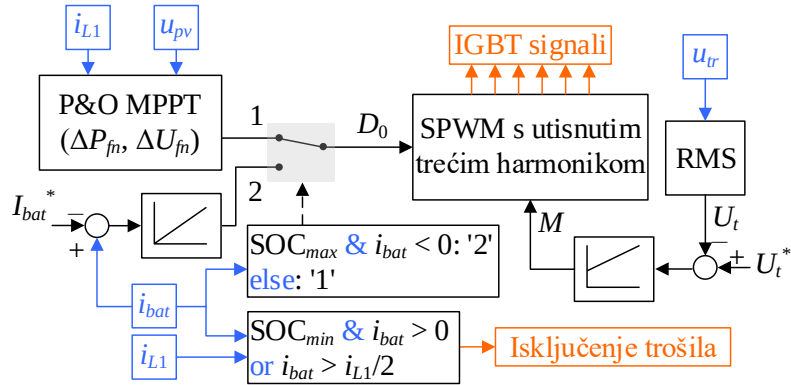
$$U_{C2} = \frac{D_0}{1-2D_0} U_{dc} \quad (3.15)$$



Slika 3.7 Topologija qZSI-ja s baterijama povezanim na kondenzator C_2 u impedancijskom krugu

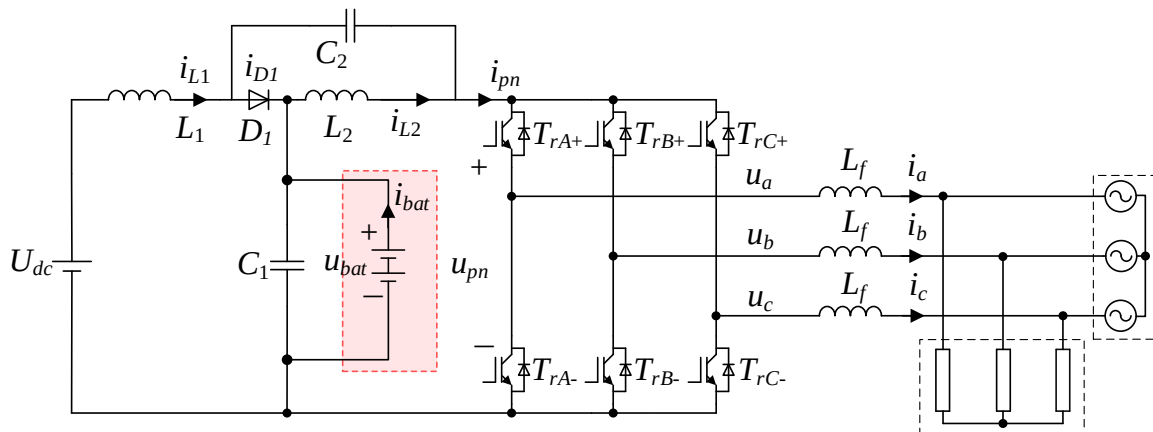
Iz jednadžbi (3.14) i (3.15) može se vidjeti da je odnos srednjih vrijednosti napona na kondenzatorima impedancijskog kruga određen faktorom D_0 . Prema tome, zadavanjem faktora D_0 može se izravno upravljati naponom na baterijama, odnosno njihovim punjenjem i pražnjenjem [9, 143]. Upravljanje baterijama povezanim na qZSI može se izvesti i neizravno koristeći se bilancom snage ili implementirajući kaskadne regulacijske sustave [6, 144]. Naime, ako bi razmatrani sustav s qZSI-jem i baterijama promatrali kao zatvoreni sustav, karakteriziraju ga tri izvora/potrošača energije: istosmjerni izvor na ulazu, baterije i izmjenično trošilo. Upravljanjem snagama dviju od tri navedene veličine, treća se postavlja automatski prema bilanci snaga u sustavu. Primjerice, zadavanjem izlazne snage izmjenjivača, uz fiksnu ulaznu snagu, snaga punjenja ili pražnjenja baterija se automatski postavlja na iznos kojim je zadovoljena bilanca snage u sustavu. Za upravljanje odabranim veličinama se pritom koriste prethodno opisane metode kojima su upravljačke veličine faktor D_0 i indeks modulacije M . U radu [143], koji je također proizašao iz istraživanja izvršenih u sklopu ove disertacije, izveden je upravljački sustav qZSI-ja koji prema potrebi omogućuje eksplicitno upravljanje strujom punjenja/pražnjenja baterija i na primjeru kojeg se jednostavno mogu prikazati principi upravljanja baterijama u sličnim sustavima. Prikazana upravljačka struktura se koristi u sustavu za napajanje lokalnog trošila uz primjenu FN izvora. Budući da je riječ o otočnom sustavu, baterije su implementirane s ciljem kompenzacije manjkova ili viškova proizvodnje iz FN izvora. Upravljački sustav, prikazan na slici 3.8, ima za cilj postići maksimalno iskorištenje dostupne energije Sunca uz održavanje stanja napunjenosti baterija unutar dozvoljenih granica. Otočni režim rada uvjetuje regulaciju izlaznog napona, odnosno napona trošila, koja se izvodi

PI regulatorom s indeksom M kao upravljačkom veličinom. U slučajevima kada je SOC baterija unutar dozvoljenih granica i nije potrebno upravljanje punjenjem i pražnjenjem baterija, faktor D_0 se koristi za izvođenje MPPT algoritma FN izvora. U ovom slučaju, optimalna radna točka panela postiže se prilagodbom ulaznog napona qZSI-ja a snaga baterija se prilagođava prema bilanci snaga. U slučajevima kada je SOC baterija na maksimalnoj ili minimalno dozvoljenoj razini, snagom punjenja ili pražnjenja baterija se upravlja izravno zadavanjem struje baterija (i_{bat}), za što se koristi PI regulator s faktorom D_0 kao upravljačkom veličinom.



Slika 3.8 Struktura sustava za upravljanje stanjem napunjenosti baterija povezanih na qZSI u otočnom režimu rada [143]

Isti ili slični principi upravljanja mogu se primijeniti i u slučaju alternativnog pristupa gdje se baterije povezuju na poprečni kondenzator u impedancijskom krugu (C_1) prema shemi na slici 3.9. Kod takvog je pristupa potreban veći napon baterija, koji je određen prema izrazu (3.14) a koji ujedno ukazuje da se faktor D_0 i u tom slučaju može koristiti za upravljanje baterijama.



Slika 3.9 Topologija qZSI-ja s baterijama povezanim na kondenzator C_1 u impedancijskom krugu

Iako su oba prikazana pristupa povezivanja baterija u sustav s qZSI-jem praktična i učinkovita u smislu postizanja upravljivog sustava pohrane bez povećanja složenosti sustava, ograničena su uvjetima rada qZSI-ja. Naime, u normalnim okolnostima, u radu qZSI-ja se javljaju aktivna, nulta i prostrijelna stanja. Međutim, postoje i druge, pojave ili stanja koja se mogu neplanirano javiti. Jedno od njih je stanje gdje za vrijeme aktivnog sklopnog stanja dolazi do zapiranja diode D_1 . U konfiguraciji s baterijama povezanim na C_2 ovo se stanje javlja, primjerice, u slučajevima kada srednja vrijednost struje pražnjenja baterija prekorači iznos struje I_{L1} . To proizlazi iz izraza (3.16) kojim je definiran odnos srednjih vrijednosti struja qZSI-ja. U slučaju kada bi struja I_{bat} bila veća od I_{L1} , to bi značilo da je srednja vrijednost struje kroz L_2 (I_{L2}) negativna:

$$I_{L2} = I_{L1} - I_{bat} \quad (3.16)$$

U stvarnosti to nije moguće zbog diode D_1 koja u tom slučaju prelazi u stanje zapiranja dok se qZSI još uvijek nalazi u aktivnom sklopnom stanju. Općenito se ovo netipično aktivno stanje javlja kada pražnjenje zavojnica L_1 i L_2 završi prije kraja aktivnog stanja, što dovodi do promjene naponskih odnosa i zapiranja diode. Posljedica je niži napon na ulazu u most pretvarača u_{pn} koji je uslijed zapiranja diode određen sljedećim izrazom:

$$u_{pn} = u_{C1} - u_{L2} \quad (3.17)$$

Osim opisanog neželjenog zapiranja diode tijekom aktivnog PWM stanja, može se javiti i vođenje diode u ST stanju. U literaturi se to stanje može pronaći pod akronimima LCC (od *engl.* load caused current) ili LIC (od *engl.* load induced current) a u oba slučaja je riječ o istoj pojavi [145-147]. Naime ako je suma struja i_{L1} i i_{L2} manja od struje trošila, završetkom ST stanja qZSI ne može prijeći u aktivno stanje jer poredne diode u istoj grani izmjenjivača ostaju u stanju vođenja. Takvo stanje se nastavlja dokle god struje i_{L1} i i_{L2} ne narastu na iznose pri kojima je struja i_{pn} veća od struje trošila. Tek tada poredne diode izlaze iz stanja vođenja i započinje normalno aktivno PWM stanje. Obje opisane pojave dovode do smanjenja napona u_{pn} . Osim toga, mogu se javiti kao posljedica veće struje pražnjenja baterija u slučaju oba prikazana smještaja baterija, premda se prema istraživanju danom u [10] u slučaju povezivanja baterija na kondenzator C_1 mogu postići veće snage pražnjenja baterija uz istu snagu trošila. Unatoč navedenim pojavama, pretvarač i dalje može raditi, ali je otežano upravljanje uslijed poremećenog odnosa zadanog trajanja ST stanja i postignutog naponskog pojačanja.

Uz opisane pristupe povezivanja baterija na qZSI, moguće je izvesti povezivanje i na oba kondenzatora istovremeno [8] ili koristeći dodatni pretvarač preko kojeg se baterije priključuju

na ulaznu sabirnicu izmjenjivača. U slučaju povezivanja baterija na oba kondenzatora istovremeno ograničavaju se mogućnosti upravljanja punjenjem i pražnjenjem te je potrebno uzeti u obzir različite naponske razine kondenzatora. S druge strane, povezivanje preko dodatnog pretvarača ne ograničava upravljačke mogućnosti i ne uvjetuje napon baterija, ali predstavlja uobičajen pristup kojim se uvode dodatne komponente pa samim time neke od prednosti koje qZSI inače pruža ostaju neiskorištene.

4. IZMJENJIVAČ KVAZI Z-TIPA S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA

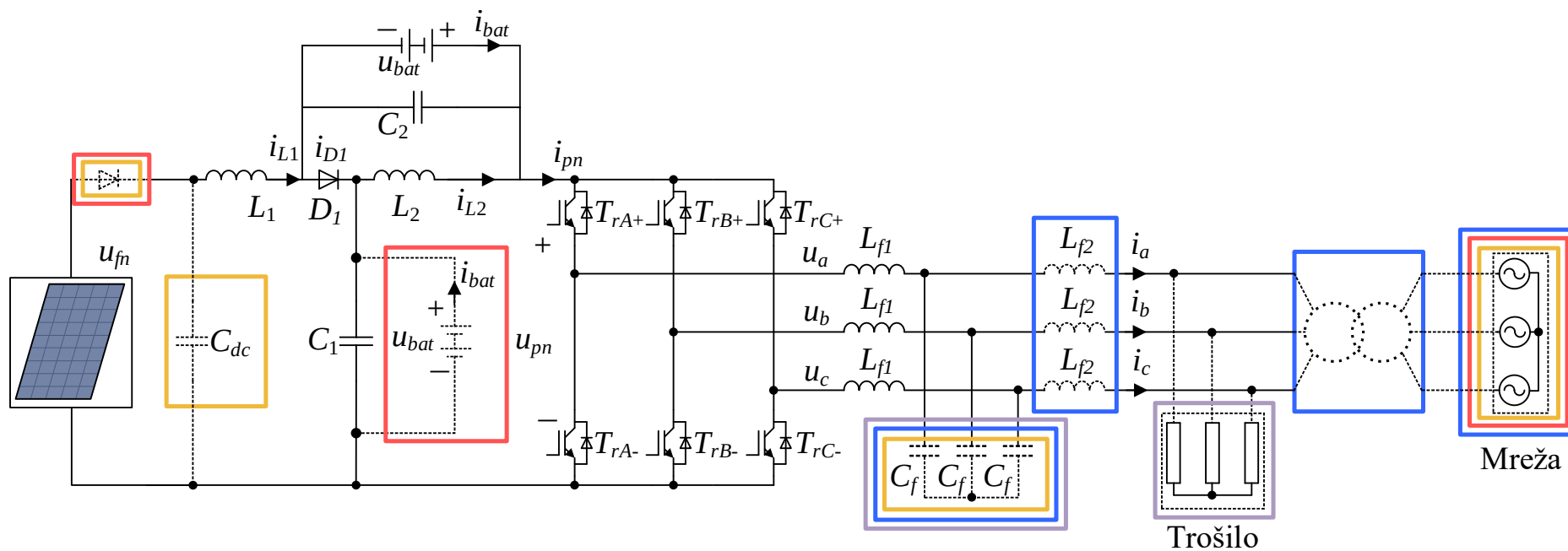
U literaturi se u posljednjih dvadesetak godina mogu pronaći razne primjene qZSI-ja i srodnih topologija izmjenjivača s distribuiranim izvorima i sustavima za napajanje te se razmatraju različiti aspekti njihove implementacije. Unatoč tome, tek manji broj radova razmatra upravljanje tokovima energije ili primjenu različitih EMS algoritama za energetske sustave s qZSI-jem kao središnjom komponentom, a što je ključan doprinos ove disertacije. Kako bi se upravljački algoritmi predloženi u narednim poglavljima smjestili u odgovarajući kontekst, u nastavku ovog poglavlja je dan kratak pregled postojećeg stanja i dosadašnjih istraživanja u ovom području. Pritom su posebno su izdvojeni radovi u kojima se razmatraju slični aspekti upravljanja tokovima energije qZSI-ja ili šireg sustava utemeljenog na qZSI-ju.

4.1. Primjena u fotonaponskim sustavima

Bez obzira na razmatrani aspekt primjene qZSI-ja, kod najvećeg broja objavljenih radova primjena qZSI-ja se ispituje u kombinaciji s FN izvorima – za napajanje lokalnih trošila ili za slanje energije u mrežu. To je i za očekivati s obzirom na povećanu popularnost FN sustava, ali i svojstava qZSI-ja koje ga čine primamljivom opcijom za integriranje takvih izvora. Kao što je spomenuto, u većini tih radova nije razmatrano raspolaganje i upravljanje tokovima energije. Neki od radova u kojima je to razmatrano su [5-12]. Pritom je u [5-8] implementiran i EMS, dok u radovima [9-12] nije razmatran EMS. U svim navedenim radovima je riječ o jako sličnim konfiguracijama s qZSI-jem kao središnjom komponentom, a konfiguracije sustava koji se razmatraju su prikazane jedinstvenom shemom na slici 4.1. Kako bi se dobio jasniji uvid u specifičnosti pojedinih konfiguracija iz navedenih radova, komponente sustava koje se javljaju samo u nekim od radova su na slici 4.1 posebno označene okvirima različitih boja. Ovdje radi jasnoće nisu uključeni radovi bez implementiranog EMS-a, a prikazana konfiguracija zapravo uključuje većinu različitih izvedbi koje se općenito javljaju u literaturi kada je riječ o kombinaciji FN izvora s qZSI-jem. Tu je riječ o sustavima za napajanje lokalnih trošila ili za rad u spoju s u mrežom u kojima se napredne mogućnosti upravljanja qZSI-jem koriste za izvođenje MPPT algoritma FN izvora, uz istovremeno održavanje izlaznih veličina izmjenjivača u zadanom rasponu.

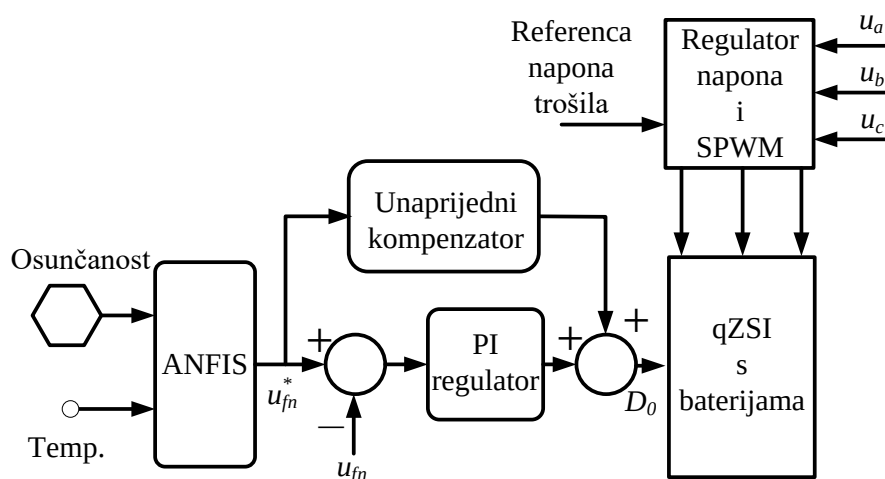
Legenda:

- [5] Abu-rub i dr. 2013
- [6] Liu i dr. 2014
- [7] de Oliveira-Assis i dr. 2022
- [8] Honarbari i dr. 2020



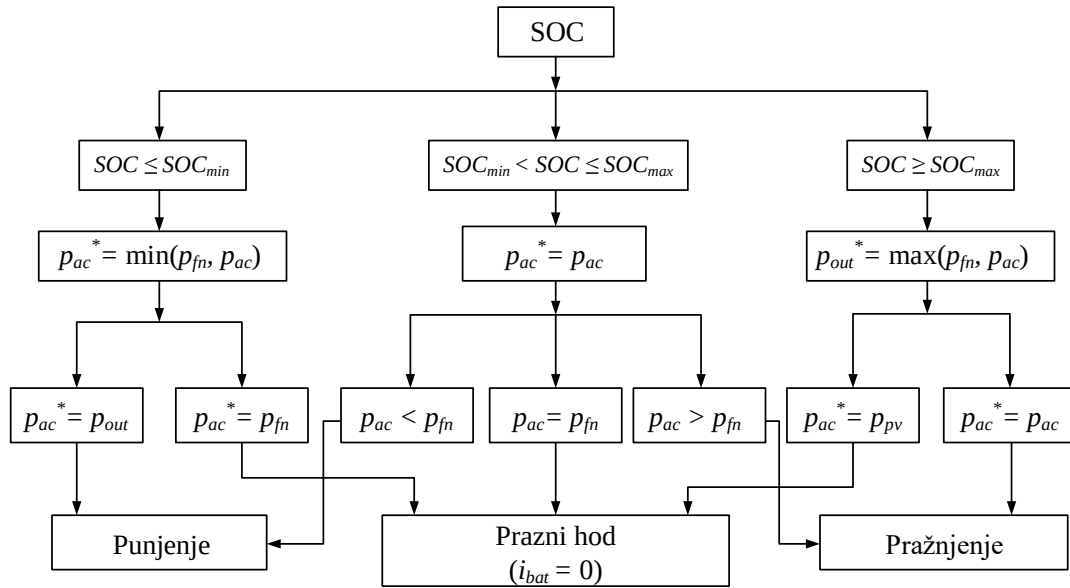
Slika 4.1 Kombinirana konfiguracija FN sustava s qZSI-jem iz literature

Prvi od prethodno navedenih radova s EMS-om je [5], u kojem je baterijski potpomognuti qZSI implementiran isključivo za rad u otočnom režimu i napajanje lokalnog trošila iz FN izvora. Na slici 4.2 je prikazana struktura implementiranog upravljačkog algoritma. U ovom slučaju je EMS izveden jedinstvenim adaptivnim sustavom zaključivanja ANFIS, u okviru kojega je izveden MPPT algoritam FN izvora, ali i upravljanje razinom SOC-a baterija kako bi se zadržala unutar željenih granica. Upravljanje električnim veličinama je izvedeno na istim osnovnim upravljačkim načelima qZSI-ja koji su opisani u prethodnom poglavlju. Ulazni napon je reguliran zadavanjem faktora D_0 , a izlazni napon indeksom modulacije SPWM-a. Ovaj rad je izdvojen kao primjer upravljačkog algoritma u kojem je izvedeno raspolaganje i upravljanje tokovima energije s ciljem održavanja SOC-a baterija unutar zadanih vrijednosti.



Slika 4.2 Topologija sustava s qZSI-jem i pripadajuće upravljačke strukture iz [5]

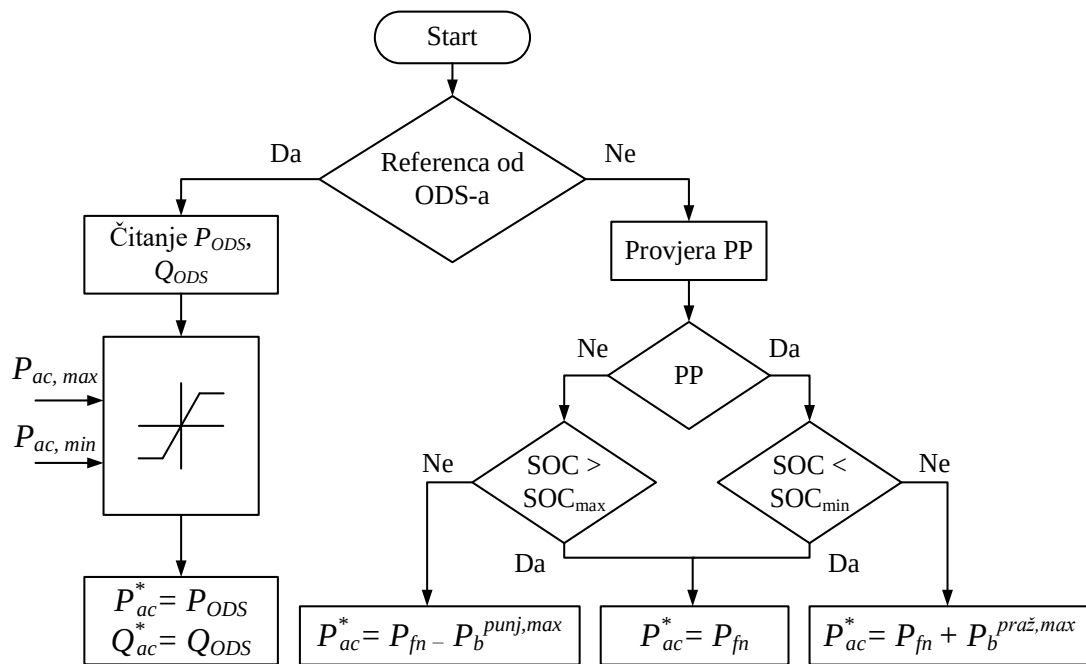
Gotovo isti fizički sustav je razmatran i u [6], ali u režimu rada sa spojem na mrežu, što zahtijeva nešto drugačiju upravljačku strukturu. I u ovom je slučaju implementiran EMS čija je primarna svrha održavanje SOC-a baterija unutar željenih granica. Iako su zadaci EMS-a slični prethodno spomenutom radu, ovdje su autori koristili *rule-based* pristup za implementaciju EMS-a. Struktura s pravilima predloženog EMS-a je prikazana na slici 4.3. Na temelju SOC-a, EMS zadaje vrijednost izlazne snage izmjenjivača kojom postiže željeni tok energije u ili iz baterija. Osnovna ideja predloženog EMS-a je postaviti referencu snage baterija koja omogućuje da se, kada god je to moguće, sva raspoloživa snaga FN izvora šalje u mrežu. I u ovom je primjeru, dakle, izvedeno raspolaganje energijom s ciljem održavanja SOC-a unutar zadanih granica, ali u spoju s mrežom.



Slika 4.3 Dijagram toka rule-based algoritma za upravljanje SOC-om iz [6]

U radu [7], autori su predložili složeniji EMS koji uz SOC baterija u obzir uzima i druge faktore, uključujući i ekonomske. U navedenom radu ponovno je razmatran sličan sustav za napajanje, tj., baterijski potpomognuti qZSI primijenjen za povezivanje FN izvora na mrežu. Fokus rada je usmjeren na EMS čiji je primarni zadatak održavati izlaznu snagu izmjenjivača prema referenci snage danoj od strane operatora distribucijskog sustava (ODS). Za izradu EMS-a je i ovdje korišten *rule-based* pristup, a pripadajući dijagram toka je prikazan na slici 4.4.

Kao što se može iščitati iz prikazanog dijagrama toka, EMS prosljeđuje referencu izlazne snage qZSI-ja – radne (P_{ODS}) i jalove (Q_{ODS}) – regulacijskom sustavu, čiji je zadatak postizanje željenog iznosa. U slučajevima kada nije zadana referenca snage prema mreži od strane ODS-a, referenca snage je određena s obzirom na ekonomsku isplativost. Ekonomska isplativost je pritom određena signalom PP (od *engl.* peak period) koji ukazuje vlada li trenutno period visoke tržišne cijene električne energije ili ne. U slučajevima visokih cijena, sva raspoloživa snaga se šalje u mrežu uz maksimalno dopuštenu struju pražnjenja baterija ($P_b^{prazn,max}$). S druge strane, u periodima niskih cijena izvodi se punjenje baterija s najvećom mogućom snagom punjenja ($P_b^{punj,max}$).



Slika 4.4 Dijagram toka rule-based EMS-a iz [7]

Iako je u [7] izveden relativno složen EMS s višestrukim ciljevima upravljanja, u navedenom radu je riječ o sustavu za napajanje namijenjenom isključivo za rad s mrežom. Isto tako, autori su predloženi sustav ispitali korištenjem pristupa *hardver u petlji*. Dok su algoritam upravljanja i EMS izvođeni u stvarnom vremenu na povezanom razvojnom računalnom sustavu, rad samog qZSI-ja je emuliran na temelju pojednostavljenog modela.

EMS u kombinaciji s qZSI-jem je predložen i u [8], gdje su autori prikazali sustav regulacije utemeljen na modelu izmjenjivača. Tu je riječ o osnovnom EMS-u čiji je zadatak zadržavanje SOC-a baterija unutar dozvoljenih granica. Za to je, kao i u prethodna dva opisana primjera, korišten *rule-based* pristup koji na temelju trenutnog SOC-a te odnosa snaga FN izvora i izlazne snage zadaje referencu snage baterija. Konfiguracija sustava za napajanje razmatrana u navedenome radu (slika 4.1) je karakteristična zbog istovremene primjene dva baterijska SPE-a: jedan je povezan paralelno s kondenzatorom C_1 , dok je drugi povezan s kondenzatorom C_2 . Autori su predloženi model i upravljački sustav ispitali isključivo simulacijskom analizom.

Razmatrajući radove iz literature s qZSI-jem i FN izvorom u kontekstu upravljanja tokovima energije, gdje uz upravljački sustav nije implementiran EMS, nema potrebe za pojedinačnim pregledom dostupne literature. Specifičnosti i različitosti pojedinih radova mogu se sažeti u dvije kategorije, tj., mogu se pronaći različite izvedbe topologije samog energetskog sustava ili različite regulacijske petlje. Što se tiče razlika u regulacijskom sustavu, postoje razne izvedbe, ali se sve u osnovi svode na upravljačke principe opisane u ranijim poglavljima. To je i za

očekivati s obzirom na to da se FN izvor povezuje izravno na istosmjerni ulaz izmjenjivača i njime se jednostavno upravlja. Razlike se najčešće javljaju u izvedbi regulacije napona na ulazu u izmjenjivač, koja je nužna za MPPT FN izvora, ili u izvedbi regulacije izlazne snage te snage baterija. Tako se, primjerice, u [9], gdje se koristi gotovo isto upravljanje kao u i ranije spomenutom radu [6], napon FN izvora regulira posredno regulirajući izlaznu struju izmjenjivača prostorno-vektorskom PWM modulacijom izlaznog napona, dok se u [10] napon FN izvora upravlja naponskim pojačanjem, odnosno, zadavanjem faktora D_0 . S druge strane, u [11] je regulacija izlazne snage izvedena zadavanjem indeksa modulacije M , dok se u [9] izlazna snaga regulira faktorom D_0 kao upravljačkom veličinom. Dakle, kao što je ranije više puta spomenuto, regulacijom dvaju od tri energetska izvora/trošila u sustavu koji čini qZSI s baterijama i izvorom na ulazu te mrežom ili trošilom na izlazu, treći se postavlja automatski prema bilanci snaga. Pritom se obje dostupne upravljačke veličine mogu koristiti za regulaciju bilo kojih od izvora/trošila u sustavu. Razlike u konfiguraciji energetskog sustava se najčešće svode na načine povezivanja baterija na qZSI ili na uvođenje dodatnih komponenti poput kondenzatora na ulazu u izmjenjivač ili dodatnih komponenti u izlaznom filteru. Na primjer, u [12] izlazni filter izmjenjivača čine samo prigušnice iako se u većini radova koristi LC filter, a u nekima, poput [7], LCL filter.

4.2. Primjena u vjetroenergetskim sustavima

U odnosu na primjene s FN izvorima, primjena qZSI-ja s vjetroagregatima ili u okviru WECS-a značajno je manje zastupljena u literaturi. Uz ranije spominjane prednosti kod primjene u FN sustavima, tome je zasigurno doprinijela i činjenica da se qZSI ponajviše razmatrao u sustavima manjih snaga, gdje su FN izvori puno zastupljeniji od vjetroagregata, koji su češće većih nazivnih snaga. U skladu s tim, u dostupnoj literaturi gdje se qZSI razmatra u kombinaciji s vjetroagregatima, najčešće se radi o sustavima manjih snaga [13, 15, 16], ali se mogu pronaći i primjeri radova s vjetroagregatima velikih nazivnih snaga [14]. Isto tako, dominantno je riječ o vjetroagregatima u kojima se nalazi PMSG tip generatora. Kombinacija s nekim drugim tipom korištenog generatora se svodi na primjenu qZSI-ja u funkciji STATCOM-a, koji služi za povećanje kvalitete napajanja iz WECS-a [17, 18]. U tom slučaju, WECS zapravo nije povezan s trošilom preko qZSI-ja već je povezan izravno, a qZSI je povezan paralelno i ima potpuno drugačiju ulogu. Izvedba sustava u slučaju primjene qZSI-ja

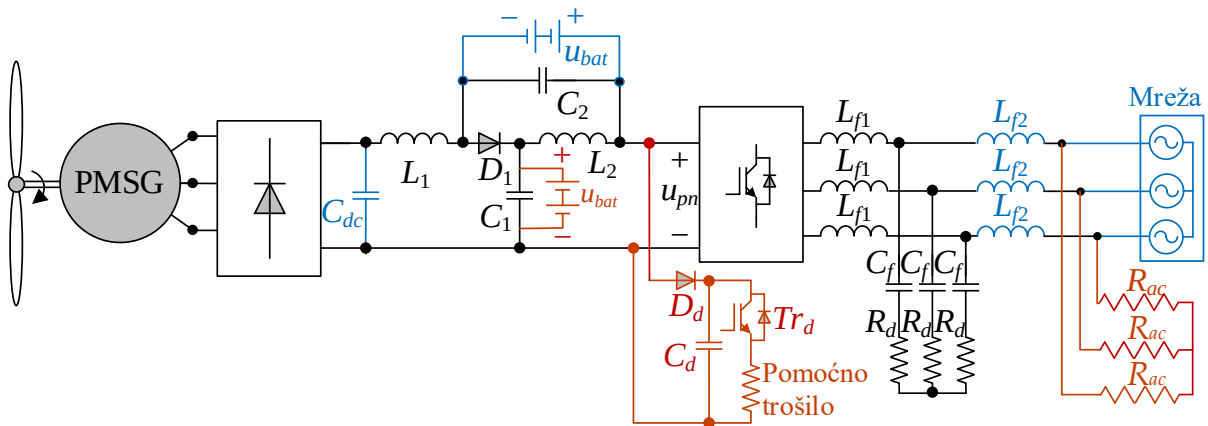
za povezivanje vjetroagregata s trošilima ili mrežom je u pravilu slična kao s FN izvorima. Dakle, na ulazne sabirnice izmjenjivača je povezan vjetroagregat, dok je na izlaznu stranu izmjenjivača povezana mreža ili su povezana lokalna trošila. Eventualna primjena SPE-a ostaje ista te se on može povezati u impedancijski krug, bilo na kondenzator C_1 ili C_2 , ali potencijalno i na ulaznu sabirnicu. U nastavku su izdvojeni radovi [13] i [14], u kojima je uz sustav napajanja utemeljen na qZSI-ju izveden i pripadajući EMS.

Energetski sustav predložen u [13] karakterizira topologija prikazana na slici 4.5. U predloženom sustavu je vjetroagregat, s PMSG-om, preko diodnog mosta povezan na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja kojim se napajaju lokalna trošila. Za FN izvor je primjena dodatnog poluvodičkog pretvarača poput diodnog mosta izbjegnuta korištenjem qZSI-ja, ali je u slučaju vjetroagregata nužna s obzirom na izmjenični napon generiran na stezaljkama generatora. Baterije su povezane u impedancijski krug preko kondenzatora C_1 i njihova je uloga još značajnija kod primjene s WECS-om s obzirom na to da su oscilacije u proizvodnji znatno izraženije nego kod FN izvora.

Legenda:

[13] Bajestan i dr. 2019

[14] E.P.P. Soares-Ramos i dr. 2021



Slika 4.5 Kombinirana topologija WECS-a s qZSI-jem

Autori su za predloženi sustav napajanja izveli i *rule-based* EMS čiji je zadatak postići maksimalnu iskorištenost dostupne energije vjetra uz održavanje stabilnog napajanja trošila i dozvoljene razine SOC-a. Da bi se postigli zadani upravljački ciljevi, u okviru EMS-a je izveden MPPT algoritam vjetroturbine, izvedena je mogućnost upravljanja potražnjom te je povezano pomoćno trošilo. Maksimalna iskorištenost energije vjetra je postignuta implementacijom MPPT-a. Pritom valja istaknuti da se za potrebe rada MPPT-a vjetroturbine,

čiji je princip opisan kasnije u poglavlju 5.3.1, radnom točkom vjetroturbine upravlja korekcijom ulaznog napona qZSI-ja. To je omogućeno svojstvom PMSG-a za čiju se brzinu vrtnje može pokazati da je funkcija napona na stezaljkama. Sama regulacija ulaznog napona qZSI-ja je izvedena s faktorom D_0 kao upravljačkom veličinom. Stabilnost napajanja trošila je postignuta implementacijom baterijskog SPE-a koji se pritom održava unutar dozvoljenih granica SOC-a. Da bi se spriječilo punjenje baterija preko dozvoljenih vrijednosti implementirano je pomoćno trošilo koje preuzima viškove snage. Alternativno se korigira kut zakreta lopatica vjetroturbine kako bi se smanjila izlazna snaga vjetroatregata i na taj način spriječilo daljnje punjenje. S druge strane, u slučaju manjka snage iz vjetroatregata, isključuju se sva trošila osim nužnih, tj., izvedeno je raspolaganje potrošnjom.

Dakle, EMS predložen u [13] omogućuje stabilnost napajanja trošila i održavanje SOC-a, ali je riječ o isključivo otočnom režimu rada i vjetroatregatu s PMSG-om koji omogućuje značajno jednostavnije upravljanje nego što je, primjerice, slučaj kod SCIG-a i koje je slično onom primijenjenom za integraciju FN izvora. Osim toga, za održavanje SOC-a je implementirano dodatno trošilo i poluvodička sklopka, dok MPPT algoritam vjetroturbine nema mogućnost odstupanja od točke maksimalne snage. Riječ je i o vjetroturbini s promjenjivim kutom zakreta lopatica, što isto tako nije za očekivati u manjim i jeftinijim sustavima kakav se razmatra u okviru ovog doktorskog rada. Konačno, autori su predloženu topologiju i upravljački sustav ispitali isključivo na simulacijskoj razini.

U radu [14], s konfiguracijom sustava također prikazanom na slici 4.5, razmatrano je korištenje qZSI-ja u kombinaciji s vjetroturbinom snage 5 MW, što znači da je riječ o velikoj vjetroturbini kakva se uobičajeno koristi u vjetroparkovima. Prema tome, prikazani sustav nije usporediv s manjim sustavom za napajanje kakav je predložen u okviru ove disertacije, ali se može usporediti upravljački algoritam. Naime, autori su predložili upravljački algoritam s EMS-om čiji je primarni cilj postizanje stabilne izlazne snage vjetroatregata. Predložen je *rule-based* EMS koji razlikuje dva slučaja rada s obzirom na naredbe ODS-a, slično ranije razmatranom radu u kontekstu primjene s FN izvorom [7]. U prvom slučaju, WECS prati naredbe ODS-a i u mrežu šalje snagu prema dobivenoj referenci, dok se u drugom slučaju izlazna snaga određuje s obzirom na SOC baterija i snagu turbine. Pritom se snaga punjenja i pražnjenja baterija prilagođava SOC-u i dostupnoj snazi vjetroatregata kako bi se postigla što stabilnija izlazna snaga. Valja spomenuti kako je regulacija struje baterija izvedena s faktorom D_0 kao upravljačkom veličinom, dok je radna točka PMSG-a (ujedno i vjetroturbine) korigirana izlaznom snagom zadavanjem indeksa modulacije M . Dakle, i ovdje se radi o posrednom

upravljanja bilancom snage te je i ovdje riječ o implementaciji naprednog EMS-a koji upravlja tokovima energije ali, kao i u prethodnom slučaju, ograničen je isključivo na rad u spoju s mrežom. Isto tako, riječ je o vjetroagregatu s PMSG-om, što znači da je upravljanje i povezivanje na qZSI jednostavnije. Tome doprinosi i mogućnost zakretanja lopatica vjetroturbine, karakteristična za sustave velikih snaga. Predloženi sustav je validiran samo simulacijskom analizom.

Primjeri implementacije qZSI-ja u okviru WECS-a još su razmatrani u [15] i [16] te je u oba slučaja ponovno riječ o primjeni s PMSG-om. U [15] je PMSG preko diodnog ispravljača povezan na qZSI, koji je preko L filtra povezan na mrežu. Nije predložena integracija SPE-a te nije izveden EMS već se sva raspoloživa snaga iz vjetroagregata prosljeđuje u mrežu. Sličan sustav je razmatran i u [16], gdje je fokus stavljen na izvedbu FL regulatora izlaznih struja qZSI-ja. Ni ovdje nije implementiran SPE niti je izveden EMS.

Ako se razmatra primjena qZSI-ja u kombinaciji sa SCIG-om pokretnim vjetroturbinom u okviru nekakvog sustava za napajanje, u literaturi se takvi primjeri mogu pronaći samo u radovima [17, 18, 148]. U navedenim radovima vjetroagregat sa SCIG-om i pripadajućom fiksnom kapacitivnom uzbudom je priključen izravno na izmjeničnu sabirnicu otočnog sustava za napajanje lokalnih linearnih i nelinearnih trošila. Na istu je točku u spomenutom sustavu, preko induktivnog filtra, povezan i STATCOM sačinjen od qZSI-ja napajanog iz FN izvora i/ili baterija u slučaju nedostatku snage iz FN izvora. Dakle, qZSI u navedenim radovima nije korišten u okviru samog WECS-a niti služi za povezivanje vjetroagregata s krajnjim potrošačima. Iz tog se razloga navedene sustave ne može smatrati zasnovanim na qZSI-ju pa nisu ni razmatrani u okviru ove disertacije.

4.3. Primjena u mikromrežama i u sustavima s više distribuiranih izvora

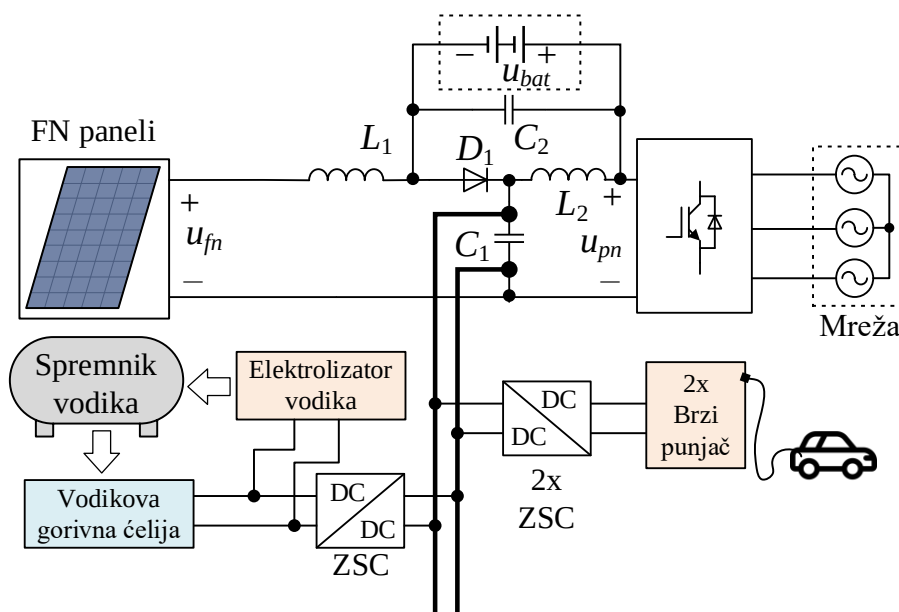
Primjena qZSI-ja u mikromrežama ili u sustavima s više distribuiranih izvora je još manje istražena nego u kombinaciji s WECS-om pa se u literaturi može pronaći tek nekoliko radova u kojima se razmatraju takvi sustavi. Sa sigurnošću se može ustvrditi da je to područje primjene qZSI-ja koje je malo istraženo a tome su definitivno doprinijela ograničenja samog izmjenjivača. To potvrđuje i činjenica da se po pitanju primjene qZSI topologije u mikromrežama u literaturi uglavnom razmatra dvosmjerni qZSI. Naime, kod klasične

topologije qZSI-ja nije moguć tok energije ka istosmjernoj sabirnici na ulazu izmjenjivača pa se tako energija može usmjeriti samo od istosmjerne sabirnice ka izmjeničnom trošilu/mreži na izlazu, odnosno iz istosmjernog izvora ili izmjenične mreže u baterije povezane u impedancijski krug. Osim toga, u slučajevima kada se značajno smanji dostupna snaga iz izvora povezanog na ulaz qZSI-ja, dolazi do nemogućnosti rada izmjenjivača bez obzira na raspoloživu snagu SPE-a povezanog s kondenzatorom C_2 (tj., struja izvora mora biti veća od struje SPE-a). Uparivanjem diode u impedancijskom krugu qZSI-ja s antiparalelno spojenim tranzistorom dobije se dvosmjerni qZSI. Na taj je način postignuta mogućnost dvosmjernog toka energije preko qZSI-ja te je omogućen i rad u slučaju male ili nikakve snage na ulazu izmjenjivača. U radovima [21-23] su razmatrane upravo mikromreže zasnovane na dvosmjernom qZSI-ju, za koje su i razmotreni različiti upravljački pristupi. S dodatnom poluvodičkom sklopkom već je sama topologija dvosmjernog qZSI-ja složenija u odnosu na klasični qZSI, a značajno je zahtjevnije i upravljanje. Navedeni radovi nisu detaljnije razmatrani u okviru ovog doktorskog rada s obzirom na to da dvosmjerni qZSI karakteriziraju drugačiji režimi rada i svojstva upravljanja, koja se ne mogu primijeniti za klasične topologije qZSI-ja. Vrijedi pritom i spomenuti kako su sustavi predloženi u [21-23] ispitani isključivo na simulacijskoj razini.

Primjena klasične topologije qZSI-ja u okviru mikromreža je razmotrena u [19, 20], a u [24] je razmatrana primjena qZSI-ja za povezivanje dvaju izvora, FN izvora i WECS-a s mrežom. Najkonkretniji primjer primjene i upravljanja qZSI-jem u mikromreži je dan u [19], gdje autori predlažu istosmjernu mikromrežu zasnovanu na qZSI-ju kao i EMS zadužen za optimizaciju tokova energije. Konfiguracija razmatrane mikromreže je prikazana na slici 4.6 a složena je na način da qZSI čini središnji element mikromreže na koji su povezani FN izvor, baterijski SPE te srednjenaponska istosmjerna sabirnica. FN izvor je pritom povezan na ulaz izmjenjivača, baterije paralelno s kondenzatorom C_2 , a istosmjerna sabirnica je izvedena paralelno na kondenzator C_1 u impedancijskom krugu izmjenjivača. Trošila, tj., dva brza punjača električnih automobila, su povezana na istosmjernu sabirnicu preko DC-DC pretvarača Z-tipa (ZSC, od *engl.* Z-source converter), kao i SPE zasnovan na vodiku. Ovakvom izvedbom mikromreže iskorištene su prednosti qZSI-ja u smislu mogućnosti povezivanja i istovremenog upravljanja FN izvorom i SPE-om. Uz to, smanjen je broj potrebnih pretvarača a omogućen je i tok energije iz mreže prema istosmjernoj sabirnici bez primjene dvosmjernog qZSI-ja. Da bi se izbjeglo korištenje energije iz mreže kada god je to moguće i mikromreža što više djelovala samostalno, autori su predložili EMS utemeljen na metodi biogeografije. Metoda biogeografije spada u

meta-heurističke optimizacijske metode i ovom je radu korištena za učinkovito raspolaganje zalihama vodika.

S obzirom na upravljačke ciljeve, EMS i upravljački algoritam prikazani u [19] nisu usporedivi s upravljačkim algoritmima razmatranim u okviru ovog doktorskog rada. Isto tako, prikazana konfiguracija mikromreže, SPE i implementirani distribuirani izvori su drugačiji. Treba naglasiti i da prikazana konfiguracija mikromreže zahtijeva da su sva trošila, izvori i SPE-ovi na istosmjernu sabirnicu povezani preko dodatnog pretvarača. Naime, s obzirom na to da je istosmjerna sabirnica izvedena paralelno s kondenzatorom C_2 , svaka promjena napona FN izvora ili baterija utjecat će i na napon istosmjerne sabirnice. Autori su predloženu mikromrežu ispitali isključivo simulacijskom analizom uz primjenu usrednjenog modela qZSI-ja. U radu nije demonstrirana mogućnost prelaska iz rada s priključkom na mrežu u otočni rad, kao ni mogućnost rada u otočnom režimu iako autori navode kako prikazana mikromreža može raditi potpuno neovisno od glavne mreže.

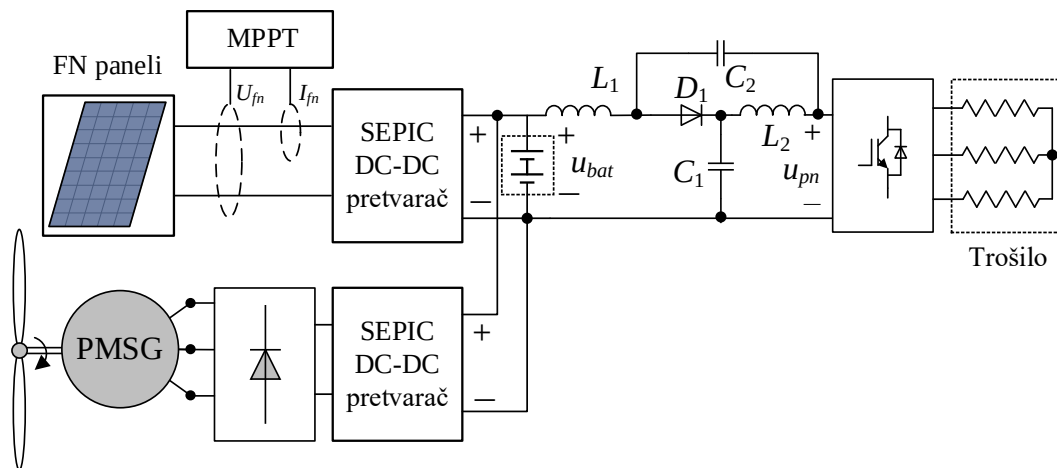


Slika 4.6 Topologija mikromreže predložene u [19]

Još jedna mikromreža zasnovana na qZSI-ju je predložena u [20], a riječ je o hibridnoj mikromreži s dva obnovljiva distribuirana izvora, SPE-om i lokalnim trošilima. Konfiguracija razmatrane mikromreže je prikazana na slici 4.7, na kojoj se vidi kako su trošila povezana na izlaznu, izmjeničnu stranu qZSI-ja, dok su distribuirani izvori i baterije povezane na istosmjerni ulaz. Distribuirane izvore energije čine FN izvor i vjetroagregat s PMSG-om, koji su na ulaz qZSI-ja povezani preko dodatnih SEPIC (od *engl.* single-ended primary inductance converter) poluvodičkih pretvarača. Bateriaški SPE je, pak, na ulaz qZSI-ja povezan izravno. Autori u radu

nisu specificirali upravljački algoritam niti se spominje implementacija EMS-a. Istaknuto je samo kako je izveden P&O MPPT algoritam FN izvora, a upravljanje s oba izvora je izvedeno pripadajućim SEPIC pretvaračima.

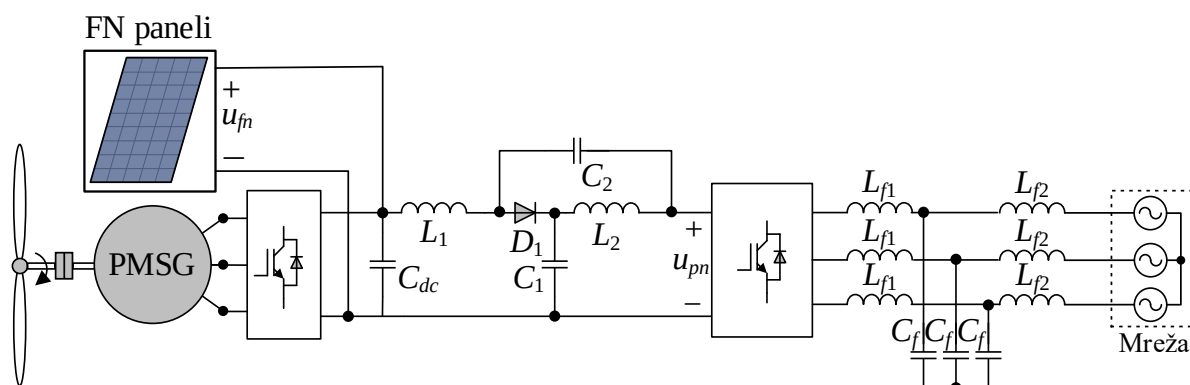
S upravljanjem izvorima izvedenim preko dodatnih pretvarača, iz prikazane konfiguracije bi se moglo zaključiti kako su dva stupnja slobode upravljanja qZSI-jem u ovom slučaju iskorištena za upravljanje izlaznim naponom i strujom baterija. Naime, budući da su baterije izravno povezane na ulaz qZSI-ja, struja punjenja/pražnjenja ovisi o naponskim odnosima na ulazu qZSI-ja. Što se tiče konfiguracije prikazane mikromreže, riječ je o drugačijoj konfiguraciji u odnosu na mikromrežu razmatranu u okviru ovog doktorskog rada, budući da su svi izvori povezani preko dodatnog poluvodičkog pretvarača. Primjena qZSI-ja je svedena na upravljanje baterijama i prijenos energije do trošila. Samo svrstavanje prikazanog sustava u kategoriju mikromreža je upitno s obzirom na to da je razmatran samo otočni režim rada.



Slika 4.7 Topologija mikromreže predložene u [20]

U [24] se razmatra isključivo mrežni rad qZSI-ja, primijenjenog za povezivanje WECS-a i FN izvora na mrežu. Tu nije riječ o mikromreži jer predloženi sustav nema SPE, lokalna trošila, niti mogućnost otočnog rada. Unatoč tome, ovaj rad treba izdvojiti kao primjer integracije višestrukih izvora s qZSI-jem. Isto tako, povezivanje izvora s qZSI-jem je izvedeno na sličan način kao u sustavu predloženom u okviru ovog doktorskog rada, s minimalnom primjenom dodatnih poluvodičkih pretvarača i s ciljem iskorištavanja prednosti qZSI topologije u smislu postizanja naponskog pojačanja i veće slobode upravljanja. Konfiguracija sustava je prikazana na slici 4.8, gdje se vidi kako je na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja izravno povezan FN izvor i WECS, a izlaz iz qZSI-ja je povezan na mrežu preko LCL filtra. Na isti način su WECS i FN izvori povezani i u mikromreži predloženoj u ovom doktorskom radu i prikazanoj u

poglavlju 6. Pritom treba naglasiti da se je u [24] ponovno riječ o primjeni PMSG-a u okviru WECS-a, a ne SCIG-a čija je primjena razmatrana u ovom doktorskom radu.



Slika 4.8 Konfiguracija sustava predloženog u [24]

Sustav na slici 4.8 je dakle zamišljen isključivo za prijenos energije iz izvora u mrežu uz istovremeno postizanje optimalne radne točke oba izvora. Za to su kao dio cjelovitog upravljačkog algoritma implementirani MPPT algoritmi vjetroturbine i FN izvora. Iako je u naslovu rada navedeno kako je riječ o upravljanju zasnovanom na strojnom učenju, zapravo je korištena klasična struktura upravljanja. S jedne strane, WECS-om se prema referenci iz MPPT algoritma upravlja zasebnim poluvodičkim pretvaračem i klasičnim vektorskim upravljanjem. Primjena vektorskog upravljanja omogućuje i efikasan rad generatora, koji je postignut minimiziranjem gubitaka u bakru. S druge strane, za izvođenje MPPT algoritma FN izvora je korišten qZSI na način da se napon ulazne sabirnice qZSI-ja, odnosno FN izvora, regulira posredno izlaznom snagom. U oba slučaja riječ je o klasičnim metodama upravljanja a algoritam strojnog učenja je korišten samo za inicijalnu optimizaciju parametara implementiranih PI regulatora.

Ovaj rad se ističe s obzirom na implementaciju više distribuiranih izvora uz minimiziranje broja korištenih pretvarača. Osim toga, ističe se i implementacija MPPT algoritma FN izvora i vjetroturbine, ali i optimizacija rada generatora WECS-a. Iako se navedena svojstva dijelom podudaraju sa svojstvima mikromreže i upravljačkih algoritama predloženih u okviru ovog dokorskog rada, treba istaknuti ključne razlike. Primjena PMSG-a u okviru WECS-a povezanog na qZSI je značajno jednostavnija nego u slučaju SCIG-a, kako zbog zahtjeva SCIG-a pri pokretanju tako i zbog jednostavnijih načela upravljanja. Implementirani MPPT algoritmi vjetroturbine i FN izvora su izvedeni na temelju mjerenja osunčanosti i brzine vjetra, a ne mjerenjem ili procjenom električnih i mehaničkih snaga kako je to napravljeno u ovom doktorskom radu. Isto tako, minimiziranje gubitaka PMSG-a nije izvedeno posebnim MPPT

algoritmom već jednostavno podešavanjem reference struje $i_d = 0$ A, čime su minimizirani gubici u bakru generatora. Takav pristup nije primjenjiv u slučaju SCIG-a, kod kojeg je struja i_d ključna za održavanje potrebne razine magnetizacije stroja.

5. OPTIMIZIRANI VJETROENERGETSKI SUSTAV SA SAMOUZBUDNIM ASINKRONIM GENERATOROM I IZMJENJIVAČEM KVAZI Z-TIPA

U okviru ove doktorske disertacije i istraživanja na kojima je utemeljena, razmatrana je mikromreža s qZSI-jem kao središnjom komponentom preko koje su međusobno povezani baterijski SPE, mreža, lokalna trošila i izvori – jedan od kojih je WECS. Kao što se može vidjeti iz pregleda literature danog u prethodnom poglavlju, primjena FN izvora s qZSI-jem je često razmatrana i sama za sebe ne predstavlja značajan iskorak. S druge strane, WECS je puno rjeđe implementiran s qZSI-jem i pritom je isključivo korišten WECS s PMSG-om. Primjena SCIG-a povezanog na qZSI u literaturi prethodno nije razmatrana, a najbliže tome su prethodno navedeni slučajevi [17, 18, 148], gdje se qZSI koristi isključivo kao STATCOM napajan iz FN izvora. Dakle primjena qZSI-ja napajanog iz SCIG-a (preko ispravljača) predstavlja jednu potpuno novu topologiju, bez obzira radi li se o samostalnom radu ili u kombinaciji s drugim izvorima, odnosno unutar nekakve mikromreže.

Proces funkcionalne integracije SCIG-a u sustav s qZSI-jem obuhvaća različite aspekte, uključujući načine same fizičke integracije SCIG-a u energetske sustav s qZSI-jem, princip pokretanja takvog sustava i usklađivanje upravljačkih i optimizacijskih algoritama kojima bi se osigurao optimalan paralelan rad SCIG-a s drugim izvorima povezanim na qZSI. Prema tome, i konfiguraciju konačne mikromreže je bilo potrebno razviti postepeno integrirajući pojedine komponente cjelokupnog sustava. U ovom poglavlju su napose izdvojeni i opisani glavni funkcionalni elementi WECS-a, uključujući upravljanje i optimizaciju, te je prikazana integracija WECS-a s qZSI-jem. Tu je posebno ključan sam aspekt povezivanja SCIG-a, odnosno u ovom slučaju SEIG-a, u integriran, potpuno funkcionalan i neovisan energetske sustav s qZSI-jem. Takav sustav je ujedno i prvi puta predložen u okviru istraživanja na temelju kojih je rađen ovaj doktorski rad.

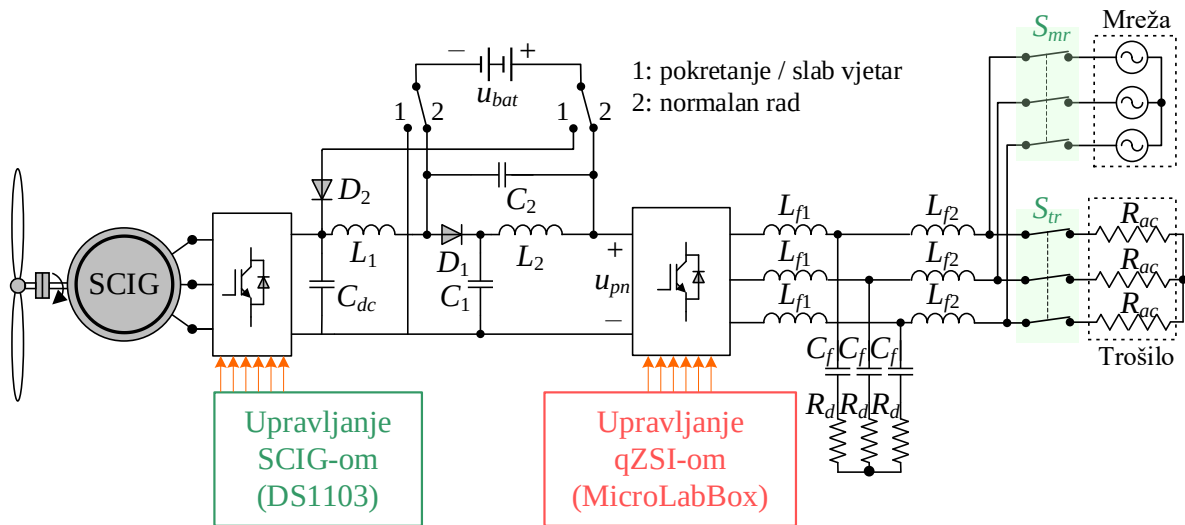
Najprije je prikazana konfiguracija integriranog sustava WECS-qZSI, zajedno sa svim ključnim funkcionalnim komponentama. Potom su detaljnije razrađene pojedine komponente, s naglaskom na WECS pošto su različiti aspekti qZSI-ja opisani u prethodnim poglavljima. Opisan je korišteni algoritam vektorskog upravljanja SEIG-om te matematički modeli stroja na kojima je zasnovan. Ukratko su prikazani principi optimizacije vjetroturbine i generatora, a detaljnije su razrađeni korišteni FL MPPT algoritmi, preuzeti iz literature. U ranoj fazi

istraživanja su napravljene i određene nadogradnje preuzetih optimizacijskih algoritama, što je također ovdje prikazano. Osim toga, u ovom poglavlju je predstavljena i potpuno nova metoda optimizacije SCIG-a, koja je razvijena u sklopu istraživanja i čini jedan od doprinosa ovog doktorskog rada. Riječ je metodi optimizacije generatora zasnovanoj na modelu stroja, koja je objavljena u znanstvenom radu [149] i koja je korištena u razmatranom sustavu kao alternativa FL optimizaciji. Konačno, prikazan je cjelokupni upravljački segment integriranog WECS-qZSI sustava, uključujući i EMS, te su predstavljena pripadajuća ispitivanja i analize koje su većim dijelom objavljene u znanstvenim radovima [150] i [151]. U [151], sustav s WECS-om i qZSI-jem je ispitan simulacijskom analizom uz izvedbu vektorskog upravljanja utemeljenog na naprednom modelu asinkronog stroja. S druge strane, u [150] je napravljena eksperimentalna analiza na laboratorijskoj maketi, ali uz primjenu klasičnog modela asinkronog stroja za vektorsko upravljanje. U oba slučaja su korišteni FL optimizacijski algoritmi WECS-a. Rad integriranog sustava u spoju s mrežom nije prikazan u navedenim znanstvenim radovima već je samo kratko prikazan u okviru ovog poglavlja. Opširnija analiza rada sustava u spoju s mrežom, kao i pri prijelazima između otočnog režima rada i rada u spoju s mrežom, nije funkcionalno usko vezana uz WECS te je detaljnije obrađena u sljedećem poglavlju u sklopu ispitivanja cjelokupne mikromreže.

5.1. Konfiguracija sustava

Konfiguracija razmatranog integriranog sustava WECS-qZSI prikazana je na slici 5.1. Vratilo rotora vjetroturbine s lopaticama fiksnog kuta zakreta povezano je preko multiplikatora s vratilom trofaznog SEIG-a. Slično kao i kod izvedbe WECS-a s PMSG-om, i ovdje je vjetroatregat povezan na istosmjerni ulaz qZSI-ja preko dodatnog pretvarača. Ipak, kod izvedbe sa SEIG-om je nužno korišten potpuno upravljivi pretvarač, tj., trofazni mosni pretvarač s IGBT tranzistorima. Primjena upravljivog pretvarača omogućuje implementaciju vektorskog upravljanja generatorom, bez kojeg ne bi bilo moguće izvesti učinkovito upravljanje cjelokupnim WECS-om, kakvo je razmatrano u okviru ovog rada. Upravljanje generatorom je nužno i prilikom pokretanja, koje je zbog karakteristika SEIG-a i ograničenja qZSI-ja složeno za izvesti i zahtijeva regulaciju izlazne snage generatora prije uključanja samog qZSI-ja. Osim toga, pokretanje zahtijeva i korištenje dvosmjernog pretvarača. Naime, prilikom pokretanja je

potrebno magnetizirati generator i održavati ga magnetiziranim kako bi se na ulazu qZSI-ja postigao stabilan napon nužan za uključenje sklopnih signala izmjenjivača.



Slika 5.1 Konfiguracija sustava za napajanje zasnovanog na baterijskoj potpomognutom qZSI-ju napajanom iz WECS-a [150]

Magnetiziranje generatora je ujedno i jedan od razloga zašto je baterijski SPE na izmjenjivač u razmatranoj konfiguraciji povezan preko preklopki. U položaju preklopki 1, baterije su povezane na ulaz izmjenjivača i njima se nabija ulazni kondenzator C_{dc} , korišten za početno magnetiziranje generatora (dioda D_2 u ovom položaju preklopke sprječava tok energije prema baterijama kad je $u_{dc} > u_{bat}$). Ovakav spoj baterija se osim za pokretanje koristi i za rad bez dostupne snage vjetra, kada baterije služe za samostalno napajanje trošila. U položaju 2, koji predstavlja normalno operativno stanje, baterije su povezane paralelno s kondenzatorom C_2 u impedancijskom krugu i koriste se u svoju primarnu svrhu a to je kompenzacija manjkova i viškova snage vjetroagregata. Valja napomenuti kako je u simulacijskoj analizi sustava prikazanoj u [151] baterijski SPE povezan izravno s kondenzatorom C_2 , bez dodatnih preklopki, jer u navedenom slučaju nije razmatrano pokretanje ili rad bez dostupne energije vjetra. Što se tiče preostalih komponenti, na izlazu izmjenjivača je postavljen LCL filtar preko kojeg je izmjenjivač povezan na lokalno trošilo. Između izlaznog filtra i trošila je postavljena upravljiva sklopka, kojom se prema zahtjevima upravljačkog sustava priključuje ili isključuje trošilo. Dodatnom upravljivom sklopkom je izveden i spoj qZSI-ja na distribucijsku mrežu, gdje su mreža i lokalna trošila povezani paralelno. To se može promatrati kao spoj na zajedničku sabirnicu.

Uz navedene komponente sustava, cjelokupni fizički sustav čine i komponente pomoću kojih je izvedeno upravljanje sustavom u stvarnom vremenu. Za to su u ovom radu korišteni razvojni sustav MicroLabBox i upravljačka ploča DS1103, oboje od proizvođača dSpace. Razvojni sustav MicroLabBox je zadužen za upravljanje qZSI-jem, baterijama i trošilima, dok je upravljačka ploča DS1103 korištena za upravljanje WECS-om. Dakle, pomoću upravljačke ploče DS1103 se u konačnici zadaju upravljački signali za tranzistore pretvarača kojim je SEIG povezan s qZSI-jem. S druge strane, pomoću sustava MicroLabBox se zadaju upravljački signali za tranzistore u mostu qZSI-ja, kao i upravljački signali za sklopku kojom se priključuje ili isključuje trošilo i mreža. Upravljanje qZSI-jem je izvedeno po ranije opisanom principu s dvije upravljačke veličine – indeksom modulacije M i faktorom trajanja ST stanja D_0 – dok se za upravljanje WECS-om koristi algoritam vektorskog upravljanja.

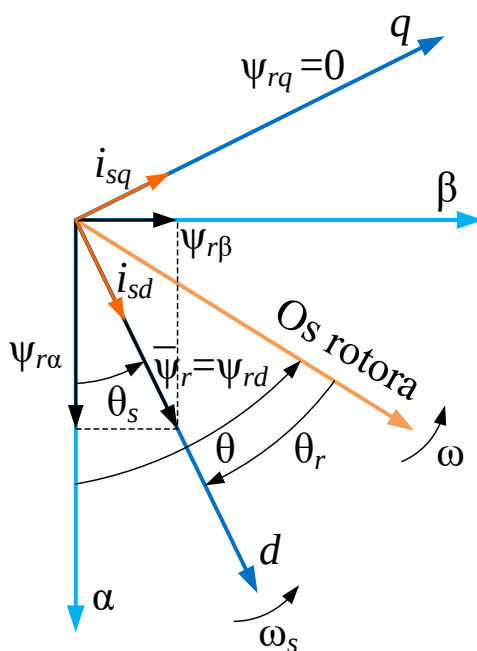
5.2. Algoritmi vektorskog upravljanja samouzbudnim asinkronim generatorom

Primjena algoritma vektorskog upravljanja SEIG-om u konfiguraciji sustava prikazanoj u ovom poglavlju, a i u okviru ovog doktorskog rada, nije nužna samo u smislu postizanja što veće učinkovitosti. Naime, kod potpuno neupravljanog SEIG-a, frekvencija i amplituda generiranog napona ovise o brzini vrtnje, parametrima generatora, kapacitetu uzbudnih kondenzatora i priključenom opterećenju. Dakle, primjena potpuno neupravljanog SEIG-a pogonjenog vjetroturbinom u kombinaciji s qZSI-jem nije moguća. Nadalje, primjenom skalarnog upravljanja ne mogu se postići željene dinamičke karakteristike sustava koje je moguće postići primjenom vektorskog upravljanja, kao i učinkovit rad u cijelom rasponu brzine vrtnje.

5.2.1. Algoritam zasnovan na klasičnom modelu samouzbudnog asinkronog generatora

Vektorsko upravljanje se svodi na upravljanje komponentama vektora statorske struje stroja i temelji se na pripadajućem matematičkom modelu, gdje je spomenuti vektor definiran u sinkrono rotirajućem dq koordinatnom sustavu. Koordinatni sustav je pritom orijentiran tako da jedna komponenta vektora struje (tipično d komponenta) utječe isključivo na magnetski tok, a druga (q komponenta) utječe isključivo na elektromagnetski moment stroja (u nastavku:

Uzevši za primjer ovdje korišteno RFO upravljanje, os d sinkrono rotirajućeg koordinatnog sustava se poravnava s vektorom ulančenog magnetskog toka rotora $\bar{\psi}_r^s$ (u nastavku: magnetski tok rotora) koji rotira električnom kutnom brzinom statorskijh veličina ω_s . Kao što se vidi na slici 5.2, poravnanjem osi d s vektorom magnetskog toka rotora, q komponenta magnetskog toka rotora se eliminira. Eliminacijom q komponente magnetskog toka rotora pojednostavljuju se jednačbe matematičkog modela stroja na kojem je vektorsko upravljanje utemeljeno a koje se koriste za definiranje upravljačkih veličina sustava.



Jednadžbe i struktura sustava vektorskog upravljanja dakle proizlaze iz matematičkog modela stroja. Kao što se mogu odabrati različiti pristupi pri orijentaciji vektorskog upravljanja, tako se ono može zasnivati i na različitim modelima stroja. Pri odabiru prikladnog modela potrebno je naći kompromis između jednostavnosti i točnosti modela. Jednostavnije modele je lakše

primijeniti i zahtijevaju manje računalnih resursa pri izvedbi u stvarnom vremenu, ali su pojednostavljenja najčešće praćena smanjenjem točnosti modela. U okviru ovog rada korištena su dva modela stroja: klasični dinamički model, koji je dobro poznat iz literature [152], i napredni dinamički model, koji je detaljnije obrađen u narednom potpoglavlju.

Naponske jednadžbe klasičnog dinamičkog modela SCIG-a u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu (oznaka ^s) glase:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s^s &= R_s \bar{i}_s^s + \frac{d\bar{\psi}_s^s}{dt} + j\omega_s \bar{\psi}_s^s \\ \bar{u}_r^s &= 0 = R_r \bar{i}_r^s + \frac{d\bar{\psi}_r^s}{dt} + j(\omega_s - \omega) \bar{\psi}_r^s\end{aligned}\tag{5.1}$$

gdje je:

ω_s i ω - kutne brzine koordinatnog sustava i rotora,

R_s i R_r - radni otpori statorskog i rotorskog namota,

$\bar{u}_s^s$ i $\bar{u}_r^s$ - vektori napona statora i rotora, slijedom, u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu

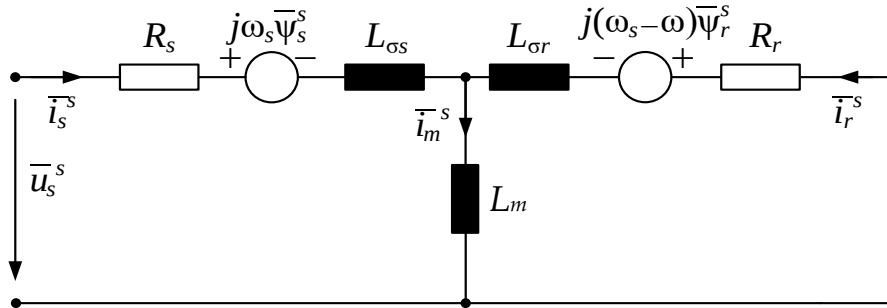
$\bar{i}_s^s$ i $\bar{i}_r^s$ - vektori struja statora i rotora, slijedom, u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu.

Ove jednadžbe su izvedene i vrijede za sinkrono rotirajući dq koordinatni sustav koji rotira kutnom brzinom ω_s i gdje za svaki vektor $\bar{f}^s$ vrijedi $\bar{f}^s = f_d + jf_q$. Dok su u stvarnosti elektromagnetske veličine u stroju definirane u domeni trofaznog stacionarnog (mirujućeg) koordinatnog sustava, za potrebe modeliranja i upravljanja prikladnije je korištenje dvoosnog (dvofaznog) sinkrono rotirajućeg (dq) koordinatnog sustava. Ukratko, modeliranjem stroja u dq koordinatnom sustavu značajno se smanjuje kompleksnost modela, a time i s njime povezani izračuni. Isto tako, omogućuje se raspregnuto upravljanje a izmjenične veličine stroja se zamjenjuju ekvivalentnim istosmjernim veličinama, što uvelike olakšava izradu regulacijskog sustava. Model stroja se, uz primjenu Clarkinih transformacija, može izvesti i u dvoosnom stacionarnom ($\alpha\beta$) koordinatnom sustavu, koji je zapravo međukorak pri transformaciji iz trofaznog stacionarnog sustava u dq sustav (uz naknadnu primjenu Parkovih transformacija). Dinamički model stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu se, primjerice, koristi kod simulacijskih analiza jer omogućuje dinamički i statičku analizu a ne zahtijeva točan kut orijentacije koordinatnog sustava za transformaciju te omogućuje izravno korištenje mjerenih veličina bez

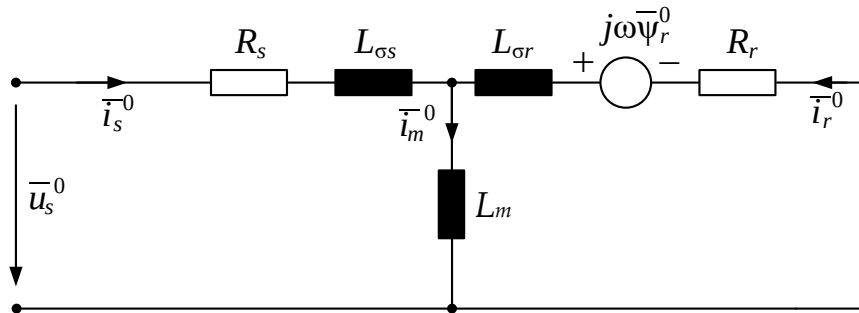
dodatne transformacije. Raspisivanjem naponskih jednažbi stroja (5.1) u stacionarnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu (oznaka 0 , $\omega_s = 0$), iz naponskih jednažbi statora i rotora potpuno nestaju članovi koji sadrže kutnu brzinu ω_s pa one glase:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s^0 &= R_s \bar{i}_s^0 + \frac{d\bar{\psi}_s^0}{dt} \\ \bar{u}_r^0 &= 0 = R_r \bar{i}_r^0 + \frac{d\bar{\psi}_r^0}{dt} - j\omega \bar{\psi}_r^0\end{aligned}\quad (5.2)$$

Za vizualizaciju modela stroja, u literaturi se najčešće koristi tzv. nadomjesna T shema, kakva je za klasični model i dq koordinatni sustav prikazana na slici 5.3, dok je na slici 5.4 prikazana takva shema za $\alpha\beta$ koordinatni sustav.



Slika 5.3 Vektorska nadomjesna T shema klasičnog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u dq koordinatnom sustavu



Slika 5.4 Vektorska nadomjesna T shema klasičnog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu

Uz prethodno dane pretpostavke rotorske orijentacije, gdje se os d poravnava s vektorom magnetskog toka rotora, odnos q komponente struje i magnetskog toka rotora se može izvesti počevši od osnovnih naponskih jednažbi. Raspisujući rotorsku jednažbu iz dq koordinatnog sustava (5.1) u skalarni oblik, dobiju se naponske jednažbe rotora za osi d i q :

$$\begin{aligned}
0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \psi_{rq} \\
0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \psi_{rd}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Pritom se komponente vektora magnetskog toka rotora mogu prikazati kao:

$$\begin{aligned}
\psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\
\psi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

gdje su L_r i L_m induktivitet rotora i međuinuktivitet stroja, slijedom.

Izlučivanjem struje rotora iz (5.4) i uvrštavanjem u rotorske naponske jednačbe iz (5.3) slijedi:

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{rd}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sd} - \omega_r \psi_{rq} &= 0 \\
\frac{d\psi_{rq}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \psi_{rq} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sq} - \omega_r \psi_{rd} &= 0
\end{aligned} \tag{5.5}$$

gdje je ω_r kutna brzina rotorskih veličina za koju vrijedi $\omega_r = \omega_s - \omega$.

Konačno, uvažavanjem pretpostavke rotorske orijentacije ($\psi_{rq} = 0$ i $\psi_r = \psi_{rd}$), dobiju se jednačbe:

$$T_r \frac{d\psi_r}{dt} + \psi_r = L_m i_{sd} \tag{5.6}$$

$$\omega_r = \frac{L_m}{\psi_r T_r} i_{sq} \tag{5.7}$$

gdje je $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ vremenska konstanta rotora.

Jednačba (5.6) se može dodatno pojednostaviti u stacionarnom stanju, kada je derivacija magnetskog toka rotora jednaka nuli, te se dobiva:

$$\psi_r = L_m i_{sd} \tag{5.8}$$

a posljedično i (5.7) postaje:

$$\omega_r = \frac{1}{T_r} \frac{i_{sq}}{i_{sd}} \tag{5.9}$$

S druge strane, za elektromagnetski moment generatora može se pokazati da vrijedi jednadžba:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (5.10)$$

gdje je p ukupan broj pari polova.

Jednadžba (5.10) uz prethodno navedene pretpostavke rotorske orijentacije postaje:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq} \quad (5.11)$$

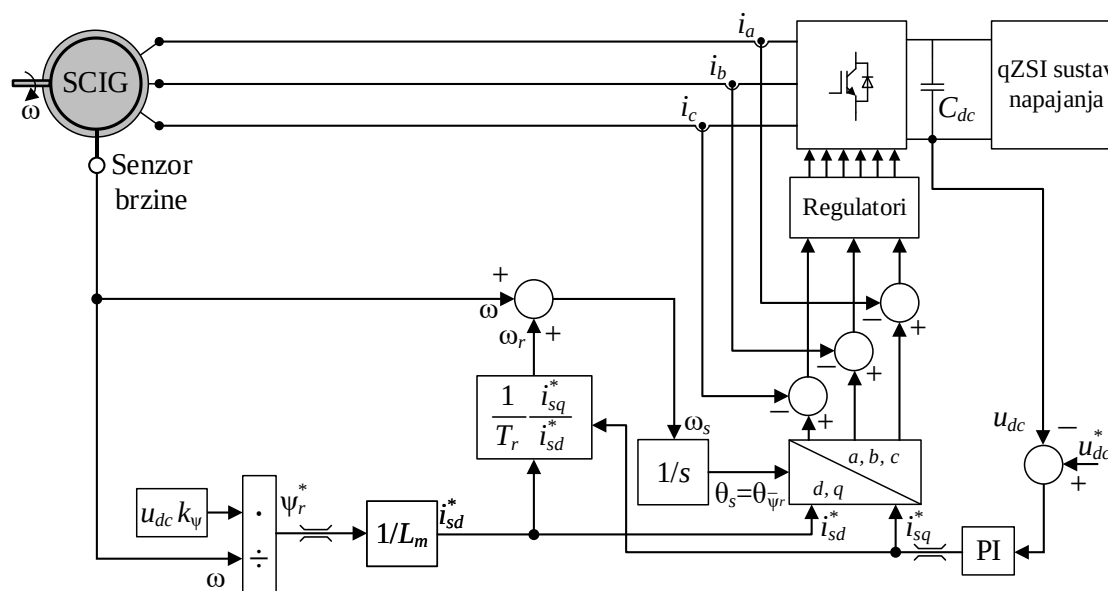
Jednadžbe (5.6)-(5.11) prikazuju odnose komponenata struje statora s magnetskim tokom rotora, kutnom brzinom rotorskih veličina i elektromagnetskim momentom stroja koji su ključni pri realizaciji vektorskog upravljanja. Uz to, za realizaciju vektorskog upravljanja nužno je i precizno poznavanje vektora magnetskog toka rotora. S obzirom na način određivanja, a i izvedbe regulacije magnetskog toka, razlikuju se direktne i indirektne metode vektorskog upravljanja.

Kod direktnog RFO vektorskog upravljanja, položaj vektora magnetskog toka rotora se određuje pomoću mjerenih elektromagnetskih varijabli (struje, naponi ili magnetski tok). Primjerice, na osnovu mjerenih napona i struja statora mogu se izračunati komponente magnetskog toka rotora izražene u $\alpha\beta$ sustavu. Iz njih se potom primjenom Pitagorinog poučka može odrediti iznos vektora magnetskog toka rotora. Tako dobiveni iznos se može koristiti u negativnoj povratnoj vezi za regulaciju magnetskog toka, a alternativno se može koristiti i izravno mjereni magnetski tok. Kut vektora magnetskog toka rotora, koji je neophodan za ispravnu orijentaciju koordinatnog sustava, jednak je (slika 5.2):

$$\theta_{\bar{\psi}_r} = \theta_s = \arctg \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}} \quad (5.12)$$

Kod indirektnog RFO vektorskog upravljanja (IRFOC, od *engl.* indirect RFO control), koje je korišteno u ovom radu, položaj vektora magnetskog toka rotora se ne računa analitički iz mjerenih struja i napona niti se izravno mjeri, već se određuje na temelju mjerene kutne brzine rotora ω i kutne brzina rotorskih veličina ω_r , koja se računa na temelju poznatih parametara modela stroja. Naime, kao što se vidi na slici 5.2, kut vektora magnetskog toka rotora (θ_s) je jednak zbroju kuta osi rotora (θ) i kuta rotorskih veličina (θ_r) a može se odrediti integracijom kutne brzine statorskih veličina ω_s . Kutna brzina ω_s je pritom određena zbrojem kutnih brzina

Na slici 5.5 je prikazana izvedba IRFOC algoritma kakva je korištena u [150]. Prikazana struktura je izvučena iz složenog upravljačkog sustava samo za potrebu opisa izvedbe IRFOC-a, dok je cjelokupni sustav detaljno opisan u nastavku potpoglavlja. Iz prikazane se strukture može vidjeti kako iznos vektora magnetskog toka nije računat već je zadan kao referentna vrijednost na temelju koje se iz jednadžbe (5.8) računa referenca struje i_{sd} . Pritom je k_ψ definiran kao konstantni faktor toka koji osigurava rad generatora u stabilnom području. Određen je pokusom praznog hoda i povezuje vrijednosti toka, brzine vrtnje i istosmjernog napona na izlazu izmjenjivača. S druge strane, iznos kuta vektora magnetskog toka rotora se koristi za transformaciju varijabli između stacionarnog i rotirajućeg koordinatnog sustava, tj., za orijentaciju sinkrono rotirajućeg koordinatnog sustava.



Slika 5.5 Struktura klasičnog indirektnog RFO vektorskog upravljanja SCIG-om u sustavu s qZSI-jem iz [150]

89

prikazani IRFOC, uz funkcionalna elektromagnetska svojstva stroja u obzir uzimaju samo još gubici u namotima rotora i statora, tj., njihov utjecaj na elektromagnetske varijable u stroju. Treba napomenuti kako je u klasičnom modelu zanemareno i magnetsko zasićenje pa se međuinuktivitet L_m uzima kao konstantan parametar iako je u stvarnom stroju promjenjiv. Prema tome, s upravljačkim algoritmom zasnovanim na klasičnom modelu za očekivati je manju točnost upravljanja u odnosu na upravljačke algoritme koji se temelje na naprednijim modelima. Smanjena točnost upravljanja generatorom se održava i kroz smanjenu korisnost sustava jer je narušena točnost optimizacijskih algoritama temeljenih na modelu stroja pa stroj ne radi u ciljanoj radnoj točki. Kako bi se to izbjeglo i minimizirala eventualna pogreška upravljanja, u sustavu razvijenom u ovom doktorskom radu implementiran je IRFOC algoritam zasnovan na naprednom modelu stroja.

5.2.2. Algoritam zasnovan na naprednom modelu samouzbuđenog asinkronog generatora

IRFOC algoritam koji je korišten u ovom doktorskom radu izvorno je predložen u [153], a utemeljen je na naprednom modelu asinkronog stroja prethodno predloženom u [154]. Razmatrani napredni model, uz svojstva stroja već uračunata klasičnim modelom, u obzir uzima i gubitke u željezu, dodatne gubitke te magnetsko zasićenje. Gubici u željezu (P_{Fe}) se odnose na gubitke u jezgri stroja i u pravilu se dijele na gubitke uslijed vrtložnih struja (P_{ec}) i gubitke uslijed histereze (P_h). Njihov ukupni iznos se najčešće procjenjuje u rasponu 1 % - 8 % nazivne snage a više su izraženi u strojevima manjih snaga. Gubici uslijed vrtložnih struja se generiraju u jezgri statora i rotora stroja uslijed izloženosti promjenjivom magnetskom polju što dovodi do indukcije vrtložnih struja (zatvorenih strujnih petlji unutar materijala jezgri) i, posljedično, zagrijavanja jezgri. Histerezni gubici su pak uzrokovani svojstvom magnetske histereze materijala. Naime, pri izloženosti jezgri stroja izmjeničnom magnetskom polju, u ciklusima magnetiziranja i demagnetiziranja magnetskih domena materijala koji prate krivulju histereze dio energije se troši na prevladavanje unutarnjeg trenja domena u materijalu prilikom preusmjeravanja magnetskog toka i ta se energija pretvara u toplinu. Iako se gubici u željezu, koji su ovisni o frekvenciji, javljaju u statorskoj i rotorskoj jezgri, obično se zanemaruje rotorska komponenta s obzirom na male iznose klizanja standardnih asinkronih strojeva i, posljedično, male frekvencije rotorskih veličina. U [154] su gubici u željezu stroja modelirani

pomoću pripadajućeg nadomjesnog otpora (R_m), koji je ovisan o frekvenciji i magnetskom toku statora. Iznos otpora R_m je pritom određen izrazom:

$$R_m = \frac{3\pi\omega_s}{K_h(\psi_s)} \quad (5.13)$$

gdje je $K_h(\psi_s)$ koeficijent histereznih gubitaka.

U jednadžbi (5.13) u obzir nisu uzeti gubici uslijed vrtložni struja. Njihovim zanemarivanjem značajno je pojednostavljen izračun nadomjesnog otpora, a u [155] je pokazano kako je utjecaj ovih gubitaka zanemariv u radnom rasponu do nazivne frekvencije stroja.

Što se tiče dodatnih gubitaka, oni se obično definiraju kao suma svih preostalih gubitaka u stroju koji nisu obuhvaćeni gubicima u bakru, gubicima u željezu ili mehaničkim gubicima. Različiti faktori doprinose pojavi ovih gubitaka a između ostalog to su oblik i broj utora u jezgri, skošenje rotorskih štapova, magnetsko zasićenje i slično. Kao primarni uzročnik pojave dodatnih gubitaka mogu se uzeti pulsacije magnetskog toka koje se javljaju u zračnom rasporu stroja kao posljedica međudjelovanja rotora i statora. Da bi se uvažili u modelu stroja, također se prikazuju nadomjesnim radnim otporom (R_{add}), koji se, kao i u slučaju gubitaka u željezu, može izraziti u ovisnosti o frekvenciji statorskih veličina i magnetskom toku. Vrijednost otpora R_{add} određena je jednadžbom:

$$R_{add} = R_{add,nazivno} \frac{\omega_s}{\omega_{s,nazivno}} \frac{\psi_s}{\psi_{s,nazivno}} \quad (5.14)$$

gdje je $R_{add,nazivno}$ vrijednost nadomjesnog otpora dodatnih gubitaka određena standardnim pokusom s promjenjivim opterećenjem stroja (iznos ovog otpora ne ovisi o opterećenju).

Dodavanjem promjenjivih nadomjesnih otpora R_m i R_{add} , u modelu stroja su u obzir uzeti gubici u željezu i dodatni gubici. Da bi se u modelu stroja uvažio i efekt magnetskog zasićenja, međuinduktivitet L_m je također potrebno prikazati kao parametar s promjenjivim iznosom, naspram konstantnog iznosa korištenog u klasičnom modelu. Efekt magnetskog zasićenja se javlja u slučaju kada povećanje jakosti magnetskog polja kojem je izložena feromagnetska jezgra ne dovodi do proporcionalnog povećanja gustoće magnetskog toka. To u konačnici dovodi do smanjenja vrijednosti međuinduktiviteta stroja, što izravno utječe na performanse stroja. Ako se uzme u obzir da je za SEIG karakterističan rad u području magnetskog zasićenja, lako se može zaključiti da je zanemarivanjem spomenutog efekta značajno umanjena točnost pripadajućeg modela [156]. Uvažavanje magnetskog zasićenja je posebno važno u situacijama

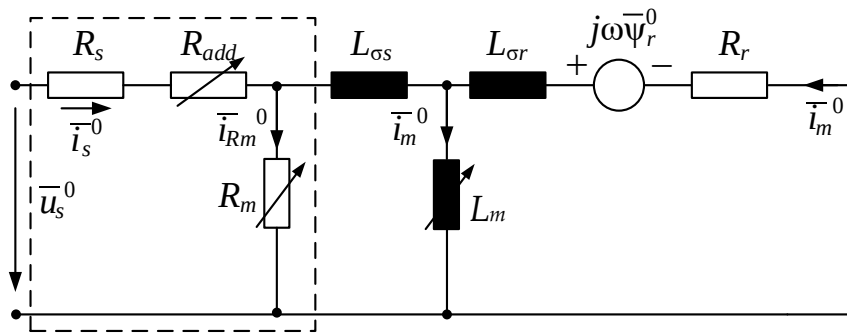
gdje se izvode korekcije vrijednosti magnetskog toka s ciljem postizanja što efikasnijeg rada ili gdje se primjenjuje procjena varijabli utemeljena na vektoru magnetskog toka, kao što je slučaj u ovom doktorskom radu. Kako bi se iznos međuinuktiviteta prilagodio magnetskom zasićenju jezgre stroja, u [156] je pokusom praznog hoda utvrđena ovisnost međuinuktiviteta o struji magnetiziranja, koja se dobije iz sljedeće jednadžbe:

$$I_m = \sqrt{i_{sTd}^{*2} + \left(\frac{L_{r\sigma}}{L_m + L_{r\sigma}} i_{sTq}^* \right)^2} \quad (5.15)$$

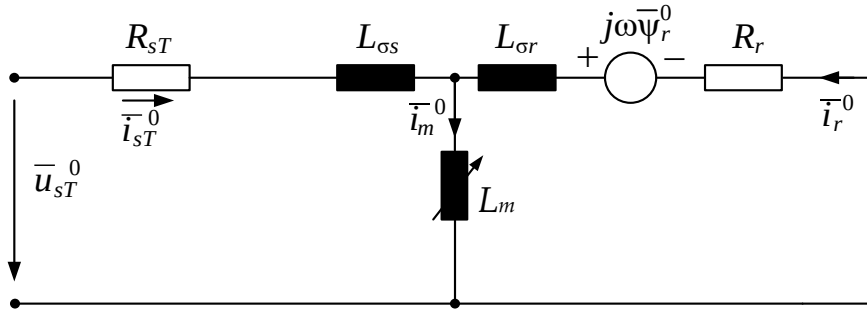
gdje je I_m iznos struje magnetiziranja, $L_{r\sigma}$ rasipni induktivitet rotora a i_{sTd}^* i i_{sTq}^* reference Theveninovih ekvivalenata struja i_{sd} i i_{sq} , slijedom, pojašnjenih u nastavku.

Istovremeno, nije utvrđena korelacija između međuinuktiviteta i frekvencije statora pa se tako dobivene vrijednosti parametra L_m mogu koristiti za cijeli raspon frekvencija. Konačno, interpolacijom mjerenih vrijednosti primjenom pregledne tablice ili aproksimacijske funkcije lako se može implementirati korekcija vrijednosti parametra L_m za vrijeme rada sustava.

Prethodno dani izrazi za određivanje vrijednosti nadomjesnih otpora gubitaka u željezu i dodatnih gubitaka vrijede za smještaj spomenutih otpora kakav je prikazan u nadomjesnoj T shemi na slici 5.6. Iako prikazana nadomjesna shema naizgled povećava kompleksnost naprednog modela stroja u odnosu na klasični model, otpornici obuhvaćeni crtanim pravokutnikom mogu se zamijeniti pripadajućim Theveninovim ekvivalentom. Na taj se način dobije nadomjesna shema prikazana na slici 5.7, koja je po konfiguraciji ista kao i ona za klasični model (slika 5.4), usprkos dodatnim parametrima.



Slika 5.6 Vektorska nadomjesna T shema naprednog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu



Slika 5.7 Pojednostavljena vektorska nadomjesna T shema naprednog dinamičkog modela kaveznog asinkronog stroja u $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu

Prethodno dani osnovni izrazi modela vrijede i za napredni model, uz prilagodbu oznaka, te se može napisati:

$$\begin{aligned}\bar{u}_{sT}^0 &= R_s \bar{i}_{sT}^0 + \frac{d\bar{\psi}_s^0}{dt} \\ \bar{u}_r^0 &= 0 = R_r \bar{i}_r^0 + \frac{d\bar{\psi}_r^0}{dt} - j\omega\bar{\psi}_r^0\end{aligned}\quad (5.16)$$

gdje je $\bar{u}_{sT}^0$ vektor Theveninovog ekvivalentnog napona, $\bar{i}_{sT}^0$ je vektor struje kroz rasipni induktivitet statora, a R_{sT} je Theveninov ekvivalentni radni otpor statora.

Dakle, struktura modela praktički ostaje ista kao kod klasičnog modela, a razlika je u definiciji spomenutih ekvivalentnih veličina, koje su u $\alpha\beta$ sustavu definirane sljedećim izrazima:

$$R_{sT} = \frac{(R_s + R_{add})R_m}{R_s + R_{add} + R_m} \quad (5.17)$$

$$u_{sT\alpha} = u_{s\alpha} \frac{R_m}{R_s + R_{add} + R_m} \quad (5.18)$$

$$u_{sT\beta} = u_{s\beta} \frac{R_m}{R_s + R_{add} + R_m}$$

$$\begin{aligned}i_{sT\alpha} &= i_{s\alpha} \frac{R_s + R_{add} + R_m}{R_m} - \frac{u_{s\alpha}}{R_m} \\ i_{sT\beta} &= i_{s\beta} \frac{R_s + R_{add} + R_m}{R_m} - \frac{u_{s\beta}}{R_m}\end{aligned}\quad (5.19)$$

Ovako izvedeni napredni model se može koristiti za simulacijsku analizu ili za potrebe izrade algoritma vektorskog upravljanja. Treba napomenuti kako svi prethodno razmatrani modeli

vrijede samo za osnovni harmonik statorskih veličina, što je u kontekstu razvoja algoritama vektorskog upravljanja, koji se također temelje na osnovnom harmoniku, opravdano pojednostavljenje.

Istraživanja prikazana u radovima [153-156] su preteča istraživanja provedenog u okviru ovog doktorskog rada te je u njima dani model preuzet u ovom istraživačkom radu. Primjena prikazanog naprednog modela za realizaciju upravljanja i optimizacije WECS-a je logičan izbor iz više razloga. Kao što je ranije spomenuto, s modelom čija je strukturna kompleksnost zadržana na razini osnovnog, zadržani su i manji softverski i hardverski zahtjevi a time i niža cijena implementacije upravljačkog algoritma u stvarnom sustavu. Osim toga, manji zahtjevi po pitanju hardvera i softvera posebno su važni kada se uzme u obzir da algoritam upravljanja SCIG-om treba biti izvođen na hardveru paralelno s drugim komponentama upravljačkog sustava WECS-a. U [153] je već predložen algoritam vektorskog upravljanja utemeljen na predstavljenom naprednom modelu stroja, a po istom principu je izvedeno i upravljanje SCIG-om u [151] i u drugim istraživanjima koja su prikazana u nastavku ovog doktorskog rada. Struktura primijenjenog IRFOC-a zasnovanog na naprednom modelu je prikazana na slici 5.8. Općenito gledano, razlika u strukturi IRFOC-a u odnosu na onu zasnovanu na klasičnom modelu je minimalna te se zapravo samo mijenja izračun kutne brzine rotorskih veličina ω_r i reference d komponente struje statora i_{sd} . Dodani elementi su na slici istaknuti žutom bojom. Dok se referenca struje i_{sq} u oba slučaja dobije izravno iz PI regulatora brzine vrtnje, u ovom slučaju se na temelju (5.8) zapravo dobije referenca ekvivalentne struje i_{sTd} . Referencu struje i_{sd} , korištenu kao konačnu upravljačku veličinu algoritma, može se onda odrediti na temelju sljedeće jednadžbe:

$$i_{sd}^* = i_{sTd}^* - i_{sTq}^* \omega_s \frac{\sigma L_s}{R_m} \quad (5.20)$$

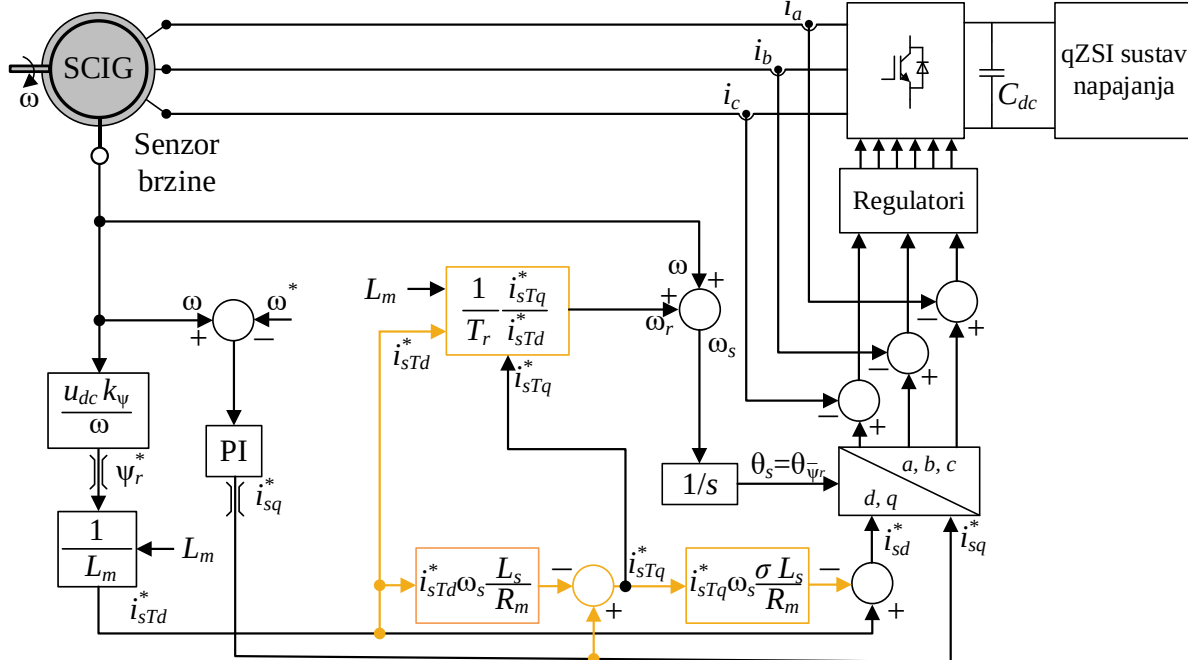
gdje je σ faktor rasipanja.

Struja i_{sTq} se dobije iz reference i_{sq} kako slijedi:

$$i_{sTq}^* = i_{sq}^* - i_{sTd}^* \omega_s \frac{L_s}{R_m} \quad (5.21)$$

Za određivanje kutne brzine rotorskih veličina, odnosno kutne brzine klizanja, koristi se izraz sličan jednadžbi (5.9), samo se umjesto stvarnih d i q struja koriste ekvivalentne vrijednosti:

(5.22)



Slika 5.8 Struktura naprednog indirektnog RFO vektorskog upravljanja SCIG-om u sustavu s qZSI-jem

Valja istaknuti kako se u prikazanoj strukturi IRFOC-a, a isto vrijedi i za ranije prikazanu strukturu zasnovanu na klasičnom modelu, regulatori i veličine iz kojih se dobije referenca struje i_{sq} mogu razlikovati ovisno o sustavu u kojem se IRFOC primjenjuje, odnosno ovisno o specifičnoj namjeni. Kao što je ranije spomenuto, raspregnuto upravljanje omogućuje da se struja i_{sd} koristi isključivo za upravljanje magnetiziranjem stroja i prema tome se u IRFOC sustavu koristi za upravljanje magnetskim tokom rotora. S druge strane, budući da se i_{sq} koristi za upravljanje momentom SCIG-a, posredno se može koristiti za regulaciju brzine vrtnje pogonskog stroja, izlazne snage, napona i slično. Tako je, primjerice, u [151] q komponenta struje statora korištena za regulaciju brzine vrtnje vjetroturbine, ali je pritom pripadajuća referenca određena MPPT algoritmom vjetroturbine ili regulatorom struje baterija, ovisno o trenutnom režimu rada sustava.

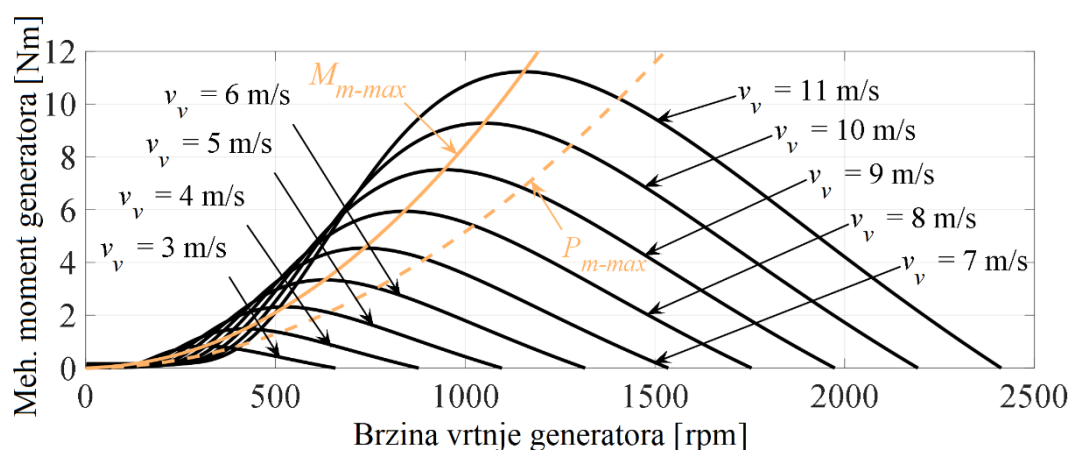
5.3. Algoritmi optimizacije izlazne snage vjetroturbine i generatora

Osim što rezultira točnijim i učinkovitijim upravljanjem, primjena vektorskog upravljanja otvara vrata i dodatnoj optimizaciji rada, kako generatora tako i pogonskog stroja – u ovom slučaju vjetroturbine. Budući da je u okviru ovog doktorskog rada razmatrano učinkovito upravljanje mikromrežom, učinkovitost distribuiranih izvora predstavlja ključan faktor u postizanju sveukupne učinkovitosti. Ovdje je posebna važnost dana učinkovitosti rada WECS-a. Naime, optimizacija WECS-a, kao složenog elektromehaničkog sustava, je značajno složeniji proces u odnosu na optimizaciju rada FN panela, kako zbog tehničkih karakteristika tako i zbog dinamičkih svojstava u radu. Tome ne pomaže ni činjenica da je ovdje konačno ciljano primjena WECS-a u kombinaciji s qZSI-jem, koji ima i neke svoje tehničke preduvjete. Isto tako, budući da je riječ o mikromreži s više izvora, potrebno je postići skladan rad unatoč različitim dinamičkim karakteristikama različitih komponenata sustava. To sve dodatno naglašava važnost i složenost postizanja učinkovitog rada WECS-a. Da bi se postigao zadani cilj, u okviru ovog istraživanja su najprije unaprijeđeni ranije predloženi algoritmi optimizacije WECS-a. Isti su potom prilagođeni za rad u sustavu s qZSI-jem a u konačnici su izvedeni na način da skladno rade zajedno s MPPT algoritmom FN izvora. Osim toga, predložena je i potpuno nova metoda optimizacije rada SEIG-a koja se može koristiti u istom sustavu.

Kada se govori o optimizaciji WECS-a, tu se zapravo radi o zasebnim optimizacijama vjetroturbine i generatora. U slučaju vjetroturbine, optimizacijom se tipično postiže najveća snaga na vratilu turbine za trenutnu brzinu vjetra. S druge strane, optimizacijom generatora se tipično postiže najveća izlazna električna snaga (tj., najmanji gubici generatora) za trenutnu mehaničku snagu na vratilu generatora. Dinamička svojstva WECS-a uvjetuju nešto drugačiju izvedbu optimizacije u odnosu na izvedbu kod FN izvora. To se ponajviše odnosi na optimizaciju vjetroturbine gdje brzina korekcije radne točke ovisi o vremenskoj konstanti mehaničkog sustava. U slučaju generatora je pak riječ o optimizaciji izlazne električne snage pa je odziv sustava na korekcije radne točke relativno brz, iako nije trenutni kao kod FN panela, i ovisi ponajviše o vremenskoj konstanti rotora. Dakle, proces optimizacije traje značajno dulje i u samom procesu je potrebno uvažiti dinamiku promjena. Unatoč tome, optimizaciji se pristupa na sličan način kao i optimizaciji FN izvora, u smislu da se mogu koristiti slične arhitekture MPPT algoritama.

5.3.1. Princip optimizacije vjetroturbine

Princip optimizacije vjetroturbine, tj., mehaničke snage koja se prenosi na rotor, temelji se na činjenici se da se za svaku brzinu vjetra može postići brzina vrtnje rotora pri kojoj se ostvaruje maksimalan mehanički moment na vratilu generatora. To je ilustrirano slikom 5.9 gdje su prikazane krivulje mehaničkog momenta generatora pogonjenog vjetroturbinom za različite brzine vjetra. S obzirom na brzinu vrtnje rotora, može se odrediti i ekvivalentna krivulja maksimalne mehaničke snage (P_{m-max}) za svaku brzinu vjetra. Prikazane krivulje su relevantne za model vjetroturbine i generator korišten u ovoj disertaciji. Model vjetroturbine je izrađen po uzoru na komercijalnu vjetroturbinu proizvođača Aerogenesis dizajniranu za rad s asinkronim generatorom [157], nazivne snage 5 kW i s promjerom rotora od 5 m a preuzet je iz ranijeg istraživanja gdje su radi usklađivanja s korištenim generatorom korigirani parametri modela spomenute vjetroturbine [158]. Nazivna snaga je reducirana na 1,5 kW, promjer rotora na 3,4 m a omjer mjenjačke kutije je uvećan 3 puta.



Slika 5.9 Odnos momenta i brzine vrtnje na vratilu generatora pogonjenog vjetroturbinom

Cilj MPPT algoritma vjetroturbine je postići i zadržati optimalnu brzinu vrtnje. To se u principu može postići na dva načina: korekcijom kuta zakreta lopatica vjetroturbine ili upravljanjem momentom generatora. U praksi se najčešće koristi upravljanje generatorom, gdje se implementacijom upravljačkih algoritama, poput ranije opisanog IRFOC-a, zadaje željeni moment ili brzina vrtnje generatora. Alternativno se radna točka vjetroturbine može korigirati i zakretanjem lopatica ako postoji ta mogućnost, ali ona je obično rezervirana za vjetroturbine većih snaga. Bitno je naglasiti da se zakretanjem lopatica zapravo mijenjaju aerodinamička svojstva pa se za svaku brzinu vjetra postižu različite krivulje momenta ovisno o kutu zakreta lopatica. Budući da je tu riječ o mehaničkom procesu, vrijeme odziva je veće u odnosu na

upravljanje generatorom, što u konačnici negativno utječe na kvalitetu upravljanja. U praksi se zapravo mogućnost korigiranja kuta zakreta, ako je dostupna, koristi samo pri pokretanju te u blizini nazivne snage [159]. Na taj se način smanjuje mehaničko opterećenje turbine pri velikim brzinama vjetra, a precizne korekcije radne točke se izvode upravljanjem generatorom.

MPPT algoritam je zadužen za određivanje referentnih vrijednosti veličina kojima se postiže optimalna radna točka. Ovisno o karakteristikama vjetroturbine i upravljačkog sustava, to mogu biti kut zakreta lopatica, brzina vrtnje generatora, moment ili bilo koja druga upravljačka veličina kojom se posredno ili neposredno postiže željena radna točka. S obzirom na to da je u okviru ovog rada razmatrana vjetroturbina s fiksnim kutom zakreta lopatica, mogućnost upravljanja zakretanjem lopatica nije dalje razmatrana. Način na koji se kod pojedinog MPPT algoritma određuju referentne vrijednosti upravljačkih veličina ovisi o tipu algoritma. Kratki pregledi različitih tipova MPPT algoritama vjetroturbina su dani u [159, 160] a kao najznačajniji se mogu izdvojiti algoritmi zasnovani na TSR-u, algoritmi zasnovani na mjerenoj snazi (PSF, od *engl.* power signal feedback) te algoritmi zasnovani na P&O principu.

Kod TSR algoritama se na temelju brzine vjetra i prethodno određene optimalne vrijednosti TSR-a zadaje brzina vrtnje kojom se postiže optimalna radna točka. Dakle, za izvođenje takvog MPPT algoritma potrebno je mjerenje ili procjena brzine vjetra, ali i brzine vrtnje rotora. Mjerenje brzine vjetra se izvodi postavljanjem anemometara na gondolu vjetroturbine što podiže cijenu sustava, a i sami anemometri zahtijevaju redovno održavanje. Treba naglasiti i da je točnost mjerenja anemometara na gondoli smanjena zbog neposredne blizine rotora, što izravno utječe na točnost MPPT algoritma. Veća točnost se postiže korištenjem procijenjene brzine vjetra, ali izvedba algoritama za procjenu brzine vjetra može biti zahtjevna.

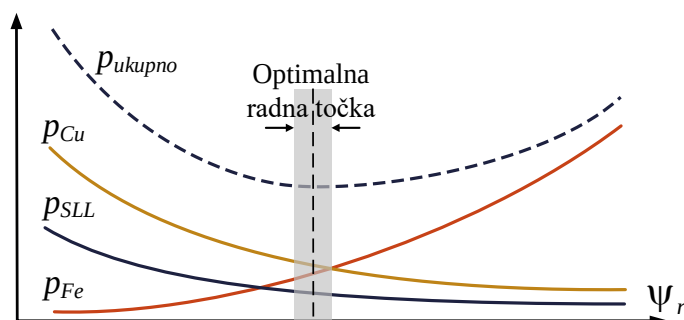
PSF algoritmi se temelje na primjeni predefinirane krivulje snage u odnosu na brzinu vrtnje rotora. Za vrijeme rada vjetroturbine se dakle mjeri brzina vrtnje rotora te se prema krivulji određuje optimalna referenca snage. Prema tome, točnost takvog MPPT-a ovisi o točnosti krivulje optimalne snage koju je potrebno eksperimentalno odrediti ili je definirati temeljem specifikacija vjetroturbine. S druge strane, ovakav algoritam ne zahtijeva poznavanje točne brzine vjetra i time otklanja potrebu za njenim mjerenjem ili procjenom. Vrijedi spomenuti i MPPT algoritam utemeljen na optimalnom momentu (OT, od *engl.* optimal torque), koji je sličan PSF algoritmu, samo se umjesto krivulje optimalne snage koristi krivulja optimalnog momenta. Zajednička karakteristika TSR, PSF i OT algoritama je visoka brzina praćenja točke optimalne snage. To je posebno važno za vjetroturbine većih snaga, čija velika inercija zahtijeva manji broj optimizacijskih koraka zbog njihove spore dinamike.

P&O algoritmi pak optimizaciju radne točke postižu kroz iterativnu promjenu reference upravljačke veličine. Kao što samo ime kaže, temelje se na postupku korekcije iznosa varijable koja utječe na veličinu koja se optimizira. Korekcija je praćena promatranjem reakcije sustava na nju, na temelju čega se onda određuje smjer i iznos korekcije u sljedećem koraku optimizacije. Najznačajnija prednost ovakvih algoritama je da za izvođenje nije potrebno provoditi eksperimentalno ispitivanje turbine radi određivanja relevantnih karakteristika, a nije potrebno ni mjerenje brzine vjetra. Uz to, mjerenje koje se koristi u povratnoj vezi, poput primjerice snage, ne mora biti apsolutno precizno jer se optimizacija izvodi s obzirom na trend promjene iznosa promatrane veličine, a ne s obzirom na iznos kao takav. Stoga su ovi algoritmi i manje podložni sustavnim greškama. Nedostatak je sporije praćenje točke maksimalne snage, koje se izvodi kroz više koraka/iteracija dok algoritam konačno ne konvergira u točku maksimalne snage. U kontekstu manjih turbina, navedeni nedostatak nije toliko značajan s obzirom na bržu dinamiku sustava. S druge strane, navedene prednosti P&O algoritama su značajne u kontekstu manjih, a time i jeftinijih sustava, gdje se može dodatno uštedjeti budući da nisu potrebni dodatni senzori, a izbjegava se i potreba za eksperimentalnim ispitivanjem koje je nepraktično u kontekstu takvih sustava.

5.3.2. Princip optimizacije asinkronog generatora

Optimizacija SCIG-a se zasniva na minimiziranju električnih gubitaka. Već je ranije pokazana prisutnost različitih gubitaka u stroju kroz razradu naprednog modela, u kojem su u obzir uzeti gubici u bakru, gubici u željezu i dodatni gubici. Pokazano je kako njihov iznos nije konstantan već promjenjiv s obzirom na različita radna stanja. Spomenuto je i vidljivo iz jednadžbi za određivanje nadomjesnih otpora za gubitke u željezu (5.13) i dodatne gubitke (5.14), gdje su oni definirani s obzirom na magnetski tok statora i frekvenciju statorskih veličina. Frekvenciju u radu nije moguće korigirati a da se istovremeno zadrži željena radna točka vjetroturbine, ali ostaje mogućnost korekcije iznosa magnetskog toka s ciljem smanjenja ukupnih gubitaka SCIG-a. Naime, u procesu upravljanja nije nužno zadržati iznos magnetskog toka na točno zadanoj vrijednosti za svaku radnu točku, a istovremeno je s IRFOC-om omogućeno neovisno upravljanje tokom preko struje i_{sd} . Iako su vrijednosti gubitaka i nadomjesnih otpora ranije definirane u ovisnosti o magnetskom toku statora, može se koristiti i vrijednost toka rotora koja je dostupna primjenom IRFOC-a bez unošenja značajne pogreške [161]. Dakle, korekcijom

magnetskog toka rotora za vrijeme rada generatora može se smanjiti iznos ukupnih gubitaka i na taj način povećati učinkovitost generatora. Za određenu radnu točku s konstantnim momentom i brzinom generatora, smanjivanjem iznosa magnetskog toka rotora smanjit će se i iznos gubitaka u željezu. Isto ne vrijedi i za iznos dodatnih gubitaka koji, kao što je prikazano na slici 5.10, raste sa smanjenjem magnetskog toka [155]. Osim toga, smanjivanje magnetskog toka rotora kod IRFOC-a dovodi do porasta struje i_{sq} , kako bi se zadržao potrební elektromagnetski moment. To u konačnici dovodi do povećanja gubitaka u bakru. Prema tome, optimizacija gubitaka se ne postiže jednosmjernom korekcijom magnetskog toka, već je potrebno pronaći optimalnu radnu točku u kojoj je ukupna suma gubitaka minimalna.



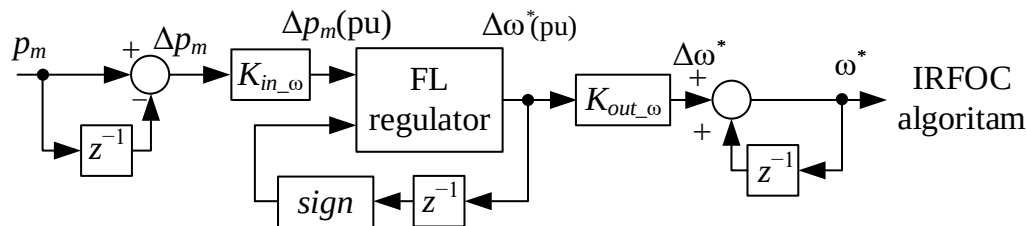
Slika 5.10 Gubici u bakru, željezu i dodatni gubici u odnosu na iznos magnetskog toka rotora

U literaturi su predloženi različiti tipovi optimizacijskih algoritama generatora, koji su zapravo također MPPT algoritmi jer im je svrha postići točku maksimalne snage. Većinu predloženih algoritama moguće je svrstati u dvije skupine: algoritme zasnovane na modelu generatora [162-165] i P&O algoritme [166, 167]. P&O algoritmi su već spomenuti u kontekstu optimizacije vjetroturbine te im je i u ovom slučaju princip rada jednak. Prema tome, odlikuju ih iste prednosti, poput jednostavnost u smislu da ne zahtijevaju dodatne senzore, odnosno isti nedostaci u smislu sporije konvergencije. Algoritmi zasnovani na modelu generatora rade na principu određivanja optimalne vrijednosti magnetskog toka rotora temeljem matematičkog modela stroja. Takva metoda optimizacije je značajno brža u odnosu na P&O algoritme, ali točnost joj uvelike ovisi o točnosti modela i zahtijeva poznavanje parametara stroja. Treba napomenuti kako se isti parametri koriste i kod izrade algoritma vektorskog upravljanja, tako da u kontekstu sustava s IRFOC-om ovakav pristup ne zahtijeva dodatno određivanje parametara. Dakle, iznosi optimalnog toka se određuju unaprijed na temelju modela u odnosu na jednu ili više varijabli te se onda tijekom rada učitavaju iz pregledne tablice ili se definiraju funkcijom u ovisnosti o promatranoj varijabli.

5.3.3. Algoritmi optimizacije zasnovani na neizrazitoj logici

Jedan od algoritama korištenih za optimizaciju WECS-a u okviru ovog rada je FL algoritam. Riječ o je o alternativnom pristupu izrade P&O algoritama gdje se upravljanje temelji na pravilima neizrazite logike. Klasični P&O algoritmi se temelje na iterativnoj konvergenciji u optimalnu radnu točku gdje su varijable isključivo binarne (0 ili 1), a iznosi korekcija su uvijek isti. S druge strane, neizrazita logika uvažava cijeli raspon realnih vrijednosti između 0 i 1, čime se postiže brža konvergencija u dinamičkim uvjetima i manje oscilacije oko optimalne radne točke. Može se reći da FL algoritmi bolje oponašaju ljudsku, nebinarnu logiku upravljanja. U početnoj fazi ovog istraživanja, razmotrena je optimizacija rada samostalnog WECS-a gdje su FL algoritmi korišteni za optimizaciju vjetroturbine i SCIG-a [168, 169]. Riječ je o istom WECS-u koji je korišten u ovom doktorskom radu, ali isključivo u samostalnoj izvedbi u kojoj vjetroturbina promjenjive brzine vrtnje i fiksnog kuta zakreta lopatica preko multiplikatora pogoni SCIG, koji je, pak, preko poluvodičkog energetskog pretvarača povezan na istosmjerni krug s baterijama i trošilom.

Optimizacija vjetroturbine je izvedena po principu opisanom u poglavlju 5.3.1. Brzina vrtnje vjetroturbine se korigira kako bi se postigla točka maksimalne snage (prikazana na slici 5.9). Upravljanje brzinom vrtnje je izvedeno IRFOC algoritmom upravljanja SCIG-om a njena referentna vrijednost ω^* je zadana FL MPPT algoritmom. Struktura MPPT algoritma je dana na slici 5.11. Referenca brzine vrtnje ω^* je dakle određena na temelju zbroja reference iz prethodnog koraka i iznosa korekcije $\Delta\omega^*$, koji se dobije na izlazu FL regulatora. Ulaz u FL MPPT algoritam, odnosno varijabla na temelju koje se izvodi optimizacija je mehanička snaga vjetroturbine, tj., njezina inkrementalna promjena Δp_m . U središtu MPPT algoritma je FL regulator koji na temelju Δp_m , i predznaka korekcije iz prethodnog koraka $\Delta\omega^*_{(k-1)}$, određuje novi iznos korekcije $\Delta\omega^*$.



Slika 5.11 Struktura FL MPPT algoritma vjetroturbine s optimizacijom po izlaznoj mehaničkoj snazi vjetroturbine (p_m)

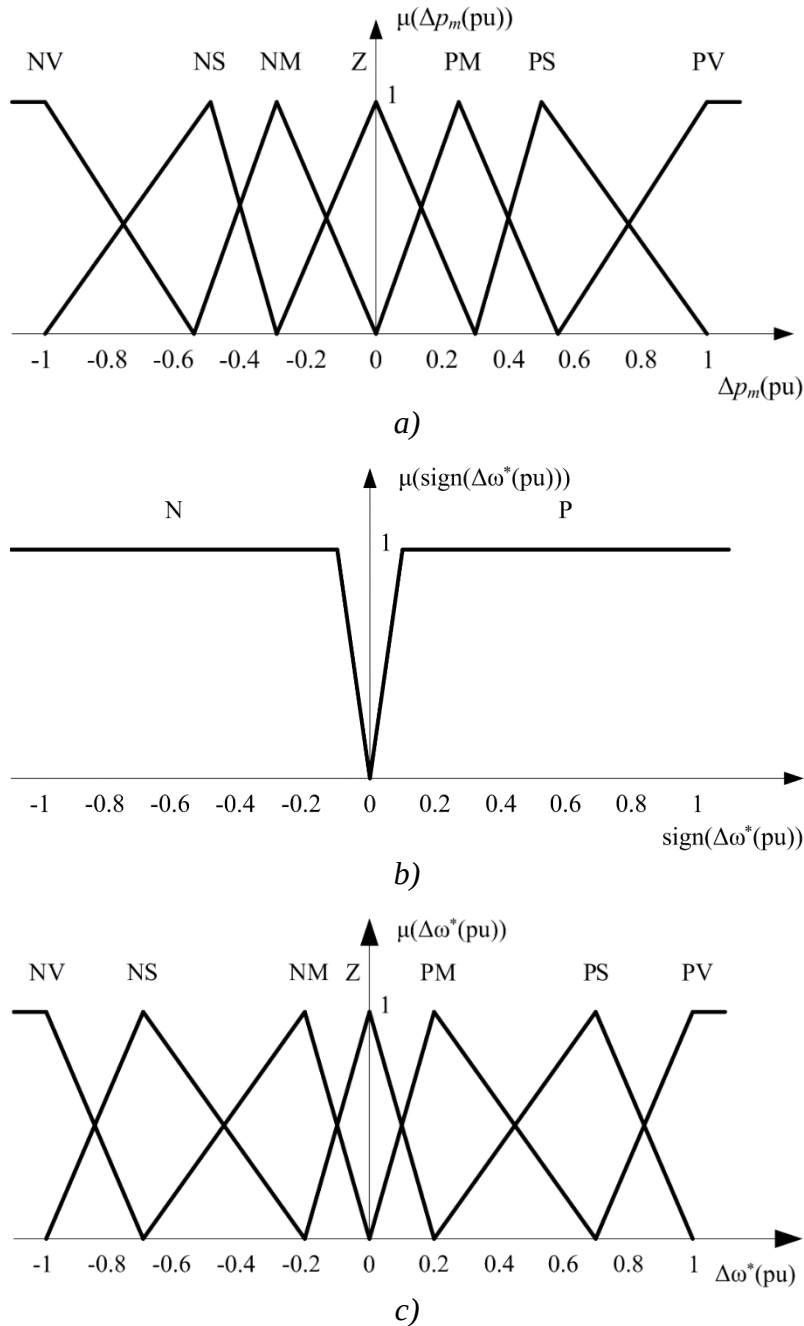
FL regulator radi s jediničnim veličinama (pu) zbog čega su na njegovom ulazu i izlazu uvedeni faktori skaliranja $K_{in_ω}$ i $K_{out_ω}$. Iznosi tih faktora su određeni metodom pokušaja i pogreške kroz simulacijsku analizu a njihov iznos ovisi o varijabli korištenoj za izvođenje optimizacije. U prikazanom slučaju riječ je o mehaničkoj snazi p_m , ali mogu se koristiti i druge varijable kojima je onda potrebno prilagoditi navedene faktore. Iznos mehaničke snage je u [168] određen na temelju mjerene brzine vrtnje SCIG-a i mjerenog momenta na vratilu. U [169], gdje je razmatran sličan sustav, korištena je mehanička snaga koja je određena na temelju procijenjene brzine vrtnje i procijenjenog elektromagnetskog momenta SCIG-a. Na taj je način otklonjena potreba za mjernim uređajima brzine vrtnje i momenta na vratilu. Dakle, FL regulator iterativno korigira referencu brzine vrtnje kako bi se postigla maksimalna mehanička snaga na vratilu vjetroturbine. Pravila djelovanja FL regulatora su prikazana tablicom 5.1, koja predstavlja pripadajuću tablicu IF-THEN pravila. Značenja kratica u tablici 5.1 su sljedeća: N – negativan, P – pozitivan, PV – pozitivan veliki, PS – pozitivan srednji, PM – pozitivan mali, Z – nula, NM – negativan mali, NS – negativan srednji i NV – negativan veliki.

Tablica 5.1 Tablica pravila FL regulatora brzine vrtnje

Δp_m	$sign(\Delta \omega^*)$	
	N	P
PV	NV	PV
PS	NS	PS
PM	NM	PM
Z	Z	Z
NM	PM	NM
NS	PS	NS
NV	PB	NV

Oblik i raspored funkcija pripadnosti je prikazan na slici 5.12. Prikazane funkcije i pravila osiguravaju da sustav postigne optimalnu radnu točku bez obzira na početnu vrijednost brzine vrtnje SCIG-a i to u što manje koraka. Pritom je za početnu vrijednost reference brzine vrtnje SCIG-a uzeta vrijednost u trenutku uključenja algoritma. Dakle, odgovarajućim definiranjem rasporeda i oblika funkcija pripadnosti, FL MPPT algoritam se prilagođava reakcijama sustava, što je ujedno i najveća prednost tih algoritama u odnosu na klasične P&O algoritme. Dok klasični P&O algoritmi u jednakim koracima konvergiraju u optimum, FL MPPT kod većeg odstupanja od optimuma radnu točku korigira u velikim koracima koji se smanjuju s

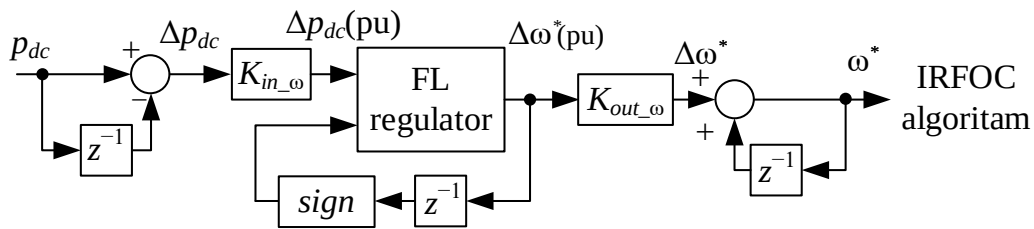
približavanjem optimalnoj radnoj točki. Na taj je način značajno ubrzana konvergencija u optimalnu radnu točku te su smanjene oscilacije oko optimuma.



Slika 5.12 Funkcije pripadnosti varijabli FL regulatora brzine vrtnje SCIG-a: a) promjena mehaničke snage vjetroturbine, b) predznak korekcije referentnog iznosa brzine vrtnje i c) korekcija referentnog iznosa brzine vrtnje

Nastavno na spomenute radove [168] i [169] te optimizaciju vjetroturbine s obzirom na mehaničku snagu, u okviru ovog istraživanja izvedena je i FL optimizacija vjetroturbine na temelju električne snage na izlazu WECS-a (p_{dc}). Kao što je ranije spomenuto, prikazana

struktura FL MPPT algoritma na slici 5.11 omogućuje jednostavnu izmjenu varijable u odnosu na koju se izvodi optimizacija. Za to je potrebno eventualno samo promijeniti iznose ulaznih i izlaznih faktora skaliranja te, naravno, osigurati pouzdanu veličinu iz koje će se moći očitavati trendovi izlazne snage vjetroturbine. Električna snaga p_{dc} , tj., snaga na izlazu iz WECS-a, je približno proporcionalna mehaničkoj snazi na vratilu vjetroturbine te prati iste trendove promjena. S druge strane, njenom primjenom se otklanja potreba za mjerenjem ili kompleksnom procjenom brzine vrtnje generatora. Dakle jednostavno se može smanjiti broj senzora, što je posebno važno u kontekstu manjih (jeftinijih) sustava kakvi su razmatrani u ovom radu. Upravo ovaj pristup optimizaciji vjetroturbine je jedan od dva pristupa korištena u konačno razmatranoj mikromreži u ovom radu.

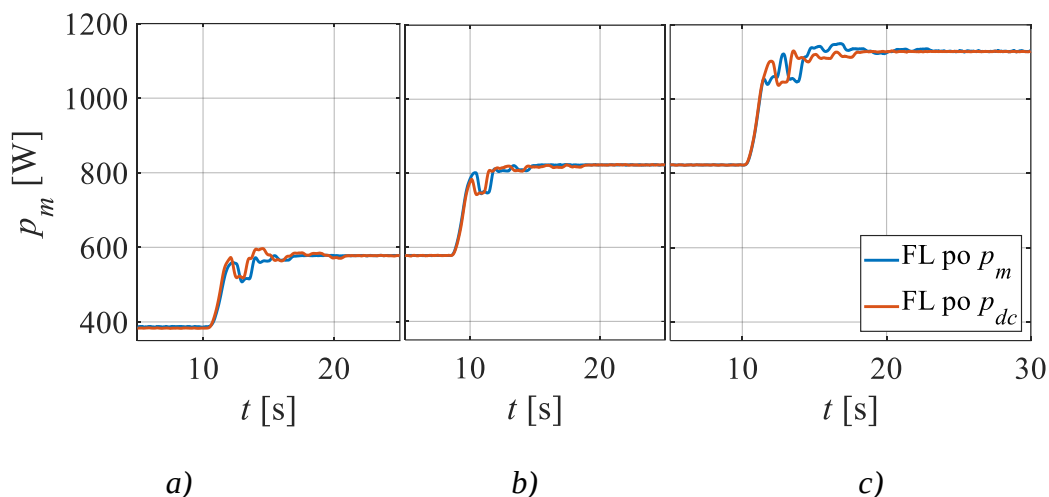


Slika 5.13 Struktura FL MPPT algoritma vjetroturbine s optimizacijom po izlaznoj električnoj snazi WECS-a (p_{dc})

Prije implementacije u okviru mikromreže, efikasnost optimizacije vjetroturbine po iznosu p_{dc} je ispitana na samostalnom WECS-u. Tu je izvedeno isključivo ispitivanje funkcionalnosti takvog pristupa optimizacije vjetroturbine. Detaljnije analize efikasnosti nisu rađene u ovoj fazi već kasnije, kod implementacije MPPT-a u okviru cjelokupne mreže. To je prikazano u poglavlju 6 ovog rada a i kroz znanstveni rad [170]. Za potrebe ispitivanja na samostalnom WECS-u korišten je isti sustav kao u [168]. Ukratko, korišten je WECS sa SCIG-om povezanim preko poluvodičkog energetskog pretvarača na istosmjerni krug s baterijama i trošilom. Korištena je i ista laboratorijska maketa, sa svim fizičkim komponentama sustava, osim vjetroturbine čiji je rad emuliran istosmjernim strojem povezanim na vrtilo SCIG-a. Provedeni su eksperimenti u kojima je sniman dinamički odziv sustava na različite promjene brzine vjetra. Isti eksperimenti su provedeni za FL optimizaciju po p_{dc} i p_m kako bi se mogla usporedno vidjeti eventualna razlika u performansama, kako dinamičkim tako i u konačno postignutim snagama vjetroturbine.

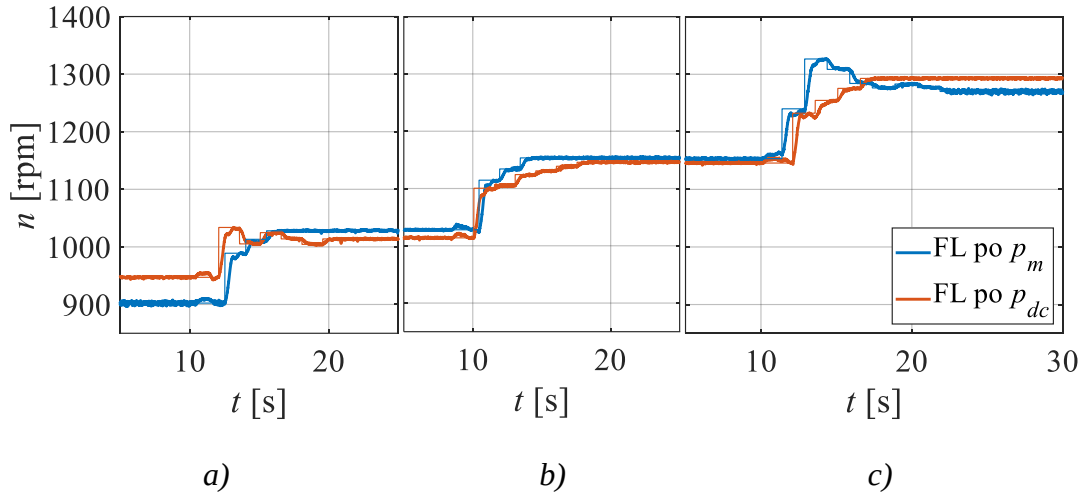
Na slici 5.14 su prikazani dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine pri promjenama brzine vjetra, počevši od 7 m/s do konačno 10 m/s. Snimljeni odzivi su izvedeni kroz više zasebnih eksperimenata zbog čega su prikazani u zasebnom sličicama gdje su vremenski

izjednačeni trenuci promjene brzine vjetra. Iz prikazanih odziva vidljivo je kako se za obje FL optimizacije postiže sličan dinamički odziv sustava, uz približno jednako brzu konvergenciju MPPT-a u optimum. Najvažnije što je ovo ispitivanje pokazalo jest da nema značajnih razlika u konačno postignutoj snazi vjetroturbine. Dakle, i s primjenom snage p_{dc} MPPT algoritam uspijeva postići praktički istu konačnu snagu.



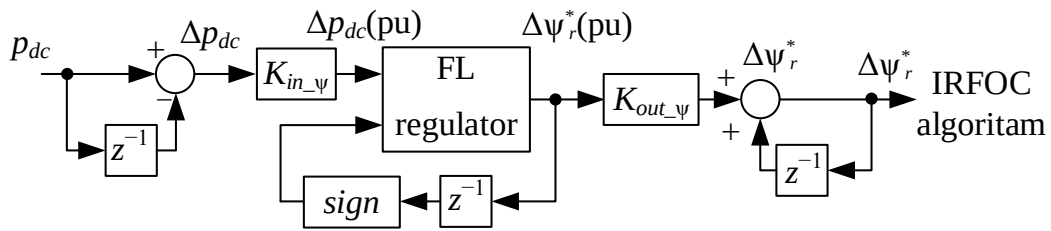
Slika 5.14 Dinamički odzivi izlazne snage vjetroturbine za FL MPPT algoritme s optimizacijom po p_{dc} i p_m pri promjeni brzine vjetra: a) 7 - 8 m/s, b) 8 - 9 m/s i c) 9 - 10 m/s

Određene razlike u odnosu na optimizaciju po p_m se vide iz odziva referentne i mjerene brzine vrtnje SCIG-a, prikazane na slici 5.15. Najveća razlika je uočljiva na slici 5.15, za brzinu vjetra od 7 m/s, gdje MPPT algoritam s korištenom p_{dc} snagom konvergira u nešto veću brzinu vrtnje generatora. Unatoč tome, razlika u postignutoj mehaničkoj snazi je minimalna (< 10 W). Za očekivati je ovakva odstupanja u slučajevima kada MPPT algoritam mora ispratiti male promjene u snazi p_m , koje se ne mogu uvijek proporcionalno prenijeti na p_{dc} snagu. Uslijed različitih radnih uvjeta se također može dogoditi da primjerice p_{dc} snaga blago naraste usprkos blagom smanjenju iznosa p_m i odvede konvergenciju MPPT-a u krivom smjeru. Osim toga, karakteristike vjetroturbine oko tjemena (tj., optimuma) imaju relativno blagu zakrivljenost a što znači da se može dogoditi da i veće razlike u brzini vrtnje rezultiraju gotovo istom snagom. Svakako, evaluacija predloženog pristupa je najrelevantnija u konačnom sustavu gdje je implementiran MPPT algoritam.



Slika 5.15 Dinamički odzivi mjerene i referentne brzine vrtnje SCIG-a za FL MPPT algoritme s optimizacijom po P_{dc} i P_m pri promjeni brzine vjetra a) 7 - 8 m/s, b) 8 - 9 m/s i c) 9 - 10 m/s

Ista struktura FL MPPT algoritma se može koristiti i za optimizaciju SCIG-a, što je i izvedeno u [168]. Struktura primijenjenog algoritma je prikazana na slici 5.16, gdje je zadržana ista struktura kao na slici 5.13, samo je zamijenjena upravljačka veličina. Upravljačka veličina je u ovom slučaju referenca toka rotora ψ_r^* kojom se uz primjenu IRFOC-a može neovisno upravljati. Korekcija iznosa magnetskog toka, prema ranije opisanom principu, izravno utječe na ukupan iznos gubitaka SCIG-a. To se u konačnici održava na postignutu električnu snagu na izlazu WECS-a (p_{dc}), koja se prema tome i uzima kao referentna ulazna veličina MPPT algoritma.



Slika 5.16 Struktura FL MPPT algoritma SCIG-a

Osim što je struktura FL MPPT algoritma SCIG-a ista kao i za vjetroturbinu, vrijede, uz promjenu oznaka, ista pravila djelovanja (tablica 5.1) te isti raspored i oblik funkcija pripadnosti (slika 5.12), samo su ponovno prilagođeni faktori skaliranja (K_{in_ψ} i K_{out_ψ}) na ulazu i izlazu FL regulatora. Oni su ovdje prilagođeni električnoj snazi p_{dc} i magnetskom toku rotora a također su određeni procesom pokušaja i pogreške u okviru simulacijske analize. Početna vrijednost magnetskog toka rotora je određena na temelju napona (na istosmjernoj strani) i brzine vrtnje rotora. To je standardno za IRFOC algoritme gdje se tako dobivenom vrijednosti osigurava

stabilan rad, kao što je izvedeno i u ranije prikazanim algoritmima na slikama 5.5 i 5.8. Aktivacijom MPPT-a, vrijednost magnetskog toka rotora odstupa od tako dobivene radne točke s konačnim ciljem minimiziranja gubitaka.

Svako odstupanje iznosa magnetskog toka rotora od referentne vrijednosti određene prema naponu i brzini vrtnje ili od pripadajuće nazivne vrijednosti ima i određeni negativan utjecaj na rad SCIG-a. Previsok iznos magnetskog toka rotora se može nepovoljno odraziti na harmoničko izobličenje statorskih struja. S druge strane, pre nizak iznos magnetskog toka može dovesti do znatno usporene dinamike SCIG-a ili, u krajnjem slučaju, do potpune demagnetizacije stroja. Kako bi se spriječilo eventualno zadavanje preniske ili previsoke vrijednosti reference magnetskog toka, referentna vrijednost na izlazu FL MPPT algoritma je ograničena. Samo ograničavanje nije dovoljno da bi se osigurala stabilnost rada budući da lako može doći do nepovoljne vrijednosti i unutar dozvoljenih granica kada SCIG prolazi kroz prijelaznu pojavu poput promjene brzine vjetra. Radi toga se pri prijelaznim pojavama odstupa od prethodno utvrđene optimalne vrijednosti magnetskog toka rotora i umjesto toga koristi vrijednost dobivena na temelju napona i brzine vrtnje, koja jamči stabilan rad. Takav pristup je korišten i u [168] gdje se na temelju Δp_m detektira promjena brzine vjetra te potom isključuje MPPT i resetira iznos reference magnetskog toka. Ponovna optimizacija SCIG-a se aktivira kada Δp_m dostigne vrijednost manju od 1 W, tj. kada se postigne optimalna mehanička snaga vjetroturbine.

Isključenje optimizacije SCIG-a pri promjenama brzine vjetra je uvjetovano i međudjelovanjem dva prikazana MPPT algoritma. Naime, tu je riječ o povezanim sustavima te djelovanjem MPPT algoritma vjetroturbine dolazi do promjene snage p_m , ali i snage p_{dc} na izlazu WECS-a. Ukoliko bi se istovremeno izvodile optimizacije SCIG-a i vjetroturbine, MPPT algoritam SCIG-a bi na takve promjene u iznosu snage p_{dc} reagirao kao da su posljedica prethodne promjene reference magnetskog toka. To bi u konačnici dovelo ili do konvergencije u radnu točku koja nije optimalna ili značajno dužeg procesa optimizacije SCIG-a. Iz istog razloga je potrebno kod optimizacije po varijabli p_{dc} pauzirati rad MPPT-a vjetroturbine odmah nakon što postigne pripadajuća maksimalna snaga za trenutnu brzinu vjetra i aktivira optimizaciju SCIG-a. Pri ponovnoj aktivaciji MPPT-a vjetroturbine, algoritam nastavlja s radom od zadnje zadane reference brzine vrtnje. Međusobna koordinacija MPPT algoritama implementiranih u sustavu jedan je od zadataka EMS-a. Kako EMS čini dio cjelokupnog upravljačkog sustava, detaljnija razrada EMS-a i koordinacije MPPT algoritama je obrađena u

potpoglavlju 5.4 – za WECS s qZSI-jem – te u poglavlju 6 – za EMS implementiran u mikromreži.

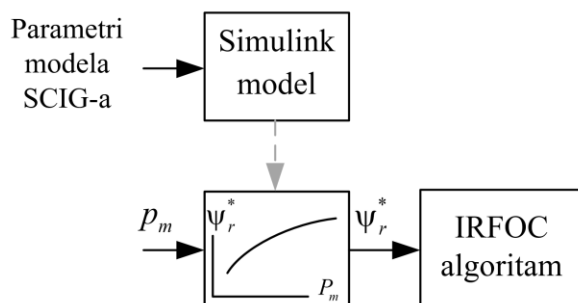
Vrijedi istaknuti zaključke koji su izvedeni u ranijim istraživanjima prikazanim kroz radove [168] i [169] s obzirom na to da je ovdje prikazano istraživanje dijelom nastavak spomenutih istraživanja. Dakle u [168] su prikazani doprinosi primjene FL MPPT algoritama, eksperimentalno ispitanih u samostalnom WECS-u. Slična optimizacija je ranije razmatrana u [166], ali uz značajno veći broj FL pravila – 29 naspram 14 korištenih u ovoj disertaciji. Manjim brojem FL pravila značajno je pojednostavljeno izvođenje pripadajućeg algoritma u stvarnom vremenu a pritom je zadržana stabilnost rada i brzina i točnost konvergencije vjetroturbine u optimalnu radnu točku. Optimizacija SCIG-a se pokazala osobito korisnom u rasponu nižih brzina vjetra, gdje je postignuto povećanje izlazne snage i do preko 5 %. Njome je postignut višak generirane snage za brzine vjetra u kojima to inače nije bilo moguće. Osim toga, optimizacija SCIG-a je doprinijela točnijem vektorskom upravljanju a pokazalo se i kako se postiže brža konvergencija MPPT-a vjetroturbine u sustavu gdje je implementirana i optimizacija SCIG-a. Upravljački sustav iz [168] je dodatno unaprijeđen u [169] na način da je izvedena procjena brzine vrtnje SCIG-a na temelju adaptivnog sustava s referentnim modelom (MRAS, od *engl.* model reference adaptive system). Izvedena je i procjena momenta na vratilu SCIG-a koji je u kombinaciji s procijenjenom brzinom vrtnje korišten za određivanje mehaničke snage p_m . Tako određena vrijednost mehaničke snage je korištena u FL MPPT-u kao ulazna optimizirana veličina, a procijenjena brzina vrtnje je korištena i u povratnoj vezi IRFOC algoritma. I IRFOC algoritam i MRAS su pritom izvedeni na temelju prethodno opisanog naprednog modela stroja. Primjena naprednog modela se pokazala ključnom za postizanje pouzdane procjene navedenih veličina. Također, pokazalo se kako performansama WECS-a više doprinosi primjena točnijeg modela stroja nego primjena stroja više klase korisnosti.

5.3.4. Algoritam optimizacije kaveznog asinkronog generatora zasnovan na modelu

Fleksibilnost i prilagodljivost FL algoritama te jednostavnost njihove implementacije za različite primjene ističe se kao značajna prednost takvih algoritama. Isto tako, pažljivom prilagodbom funkcija pripadnosti može se postići i značajno brža konvergencija u optimalnu radnu točku u odnosu na klasične P&O algoritme. Unatoč tome, proces konvergencije u

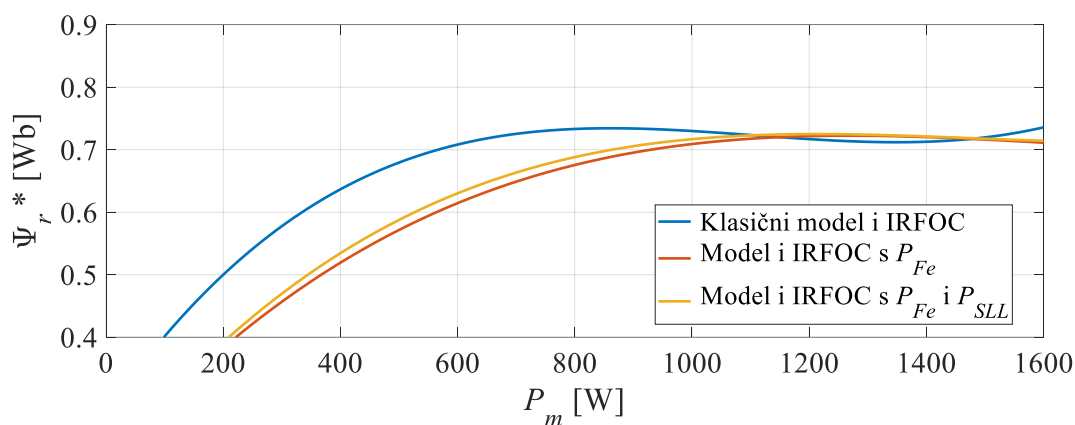
optimalnu radnu točku je iterativan i njegovo trajanje uvelike ovisi o dinamici sustava koji se optimizira. Značajno brža, gotovo trenutna konvergencija u točku maksimalne snage se postiže primjenom MPPT algoritama zasnovanih na modelu stroja. U okviru ovog istraživanja razvijena je nova metoda minimiziranja gubitaka SCIG-a zasnovana na modelu stroja. Predložena metoda je predstavljena u znanstvenom radu [149] gdje je primijenjena na samostalnom WECS-u i eksperimentalno ispitana usporedno s alternativnim metodama. Naknadno je implementirana i u WECS-u integriranom u ovdje razmatranu mikromrežu utemeljenu na qZSI-ju, što je detaljnije objašnjeno u 6. poglavlju ovog doktorskog rada.

Ranije je pokazano kako za svaku radnu točku SCIG-a teoretski postoji optimalni iznos magnetskog toka za koji su gubici u stroju minimalni (slika 5.10). Dok se u P&O metodama taj iznos određuje iterativno, ciljajući pritom primjerice maksimalnu izlaznu snagu SCIG-a, ovdje prikazana metoda se zasniva na simulacijskom određivanju optimalnih vrijednosti reference magnetskog toka rotora ψ_r^* , kasnije korištenih za optimizaciju u stvarnom vremenu (slika 5.17). Određivanje optimalnog iznosa reference magnetskog toka je izvedeno na sljedeći način. Najprije je izrađen simulacijski model korištenog WECS-a s pripadajućim upravljačkim sustavom. Pritom nije nužno simulirati rad vjetroturbine već se u ulozi primarnog pogonskog stroja SCIG-a može koristiti bilo koji drugi pogonski stroj kojim se na vratilu može postići željena brzina vrtnje i okretni mehanički moment. Koristeći izrađeni model, simuliran je rad sustava u očekivanom rasponu brzina vjetra. To je izvedeno na način da je za svaku brzinu vjetra određena pripadajuća brzina vrtnje i okretni moment koji odgovaraju točki maksimalne snage vjetroturbine – linija P_{m_max} na slici 5.9. Uz brzinu SCIG-a reguliranu na zadanu vrijednost, izvedena je iterativna korekcija iznosa referentnog magnetskog toka rotora dok nije postignuta maksimalna izlazna snaga SCIG-a. Postupak potrage za maksimalnom snagom SCIG-a pritom može biti izveden ručno ili nekim automatiziranim procesom. Svakako, sam postupak određivanja je nevažan i u konačnici se pohranjuju samo optimalni iznosi ψ_r^* .



Slika 5.17 Struktura MPPT algoritma SCIG-a zasnovanog na modelu stroja

Na temelju ovako određenih optimalnih iznosa reference toka, definiran je pripadajući polinom trećeg stupnja koji opisuje optimalni iznos ψ_r^* u odnosu na mehaničku snagu vjetroturbine P_m . U ovom je slučaju odabran polinom trećeg stupnja, ali zapravo se može koristiti i neka druga matematička funkcija koja bi najbolje opisivala prikupljeni skup podataka. Tako određeni polinom ili, općenito, funkcija optimalnog toka $\psi_r^*(P_m)$ spremna je za izravnu primjenu u upravljačkom sustavu za zadavanje iznosa ψ_r^* u odnosu na snagu P_m . S obzirom da točnost ovako određenih iznosa magnetskog toka uvelike ovisi o točnosti matematičkog modela SCIG-a korištenog u simulaciji za opis stroja i za pripadajući IRFOC, u predloženom postupku je korišten opisani napredni model stroja (slika 5.6). Kako bi se pokazao značaj primjene naprednog modela SCIG-a, opisani simulacijski postupak je dodatno proveden uz primjenu klasičnog modela SCIG-a s dodatno uračunatim magnetskim zasićenjem i za model SCIG-a u kojem su u obzir uzeti i magnetsko zasićenje i gubici u željezu, ali nisu u obzir uzeti dodatni gubici. Na slici 5.18 su prikazane funkcije optimalnog magnetskog toka određene za tri razmatrana modela. Iz slike je vidljivo kako funkcija određena za klasični model s magnetskim zasićenjem značajno odstupa od funkcija dobivenih s predloženim naprednim modelom i modelom bez dodatnih gubitaka. Utjecaj zanemarivanja dodatnih gubitaka je manji, ali ipak prisutan, što se vidi iz krivulja dobivenih s dva potonja modela.

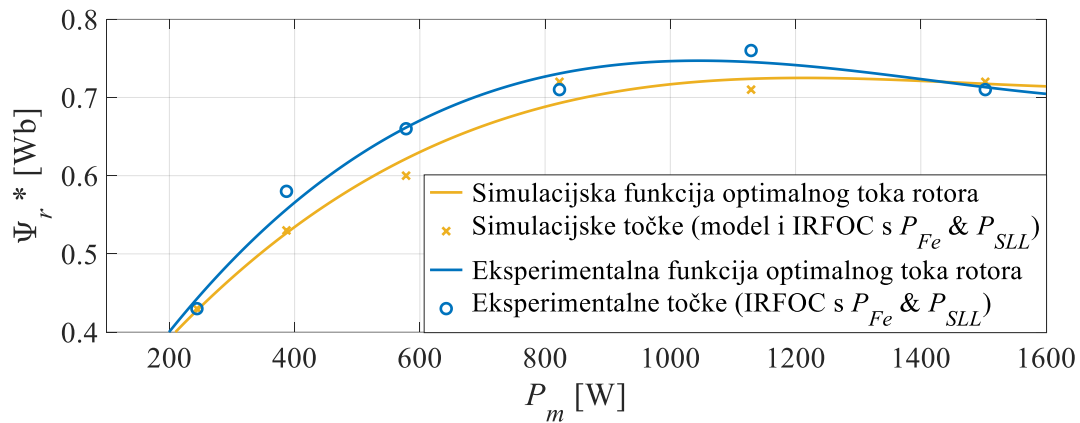


Slika 5.18 Optimalne referentne vrijednosti magnetskog toka rotora određene za različite modele SCIG-a i IRFOC-a

U literaturi je otprije poznato nekoliko MPPT algoritama zasnovanih na modelu stroja [162-165], ali u nijednom od njih nije korišten predloženi napredni model. Naime, u svim navedenim radovima je zanemareno magnetsko zasićenje a gubici u željezu su uzeti u obzir isključivo u vidu konstantnog nadomjesnog otpora. Pritom je nadomjesni otpor gubitaka u željezu u pripadajućim shemama stroja povezan paralelno s međuinuktiviteto, što dovodi do povećanja reda diferencijalnih jednadžbi kojima je stroj opisan (ili povećanja broja

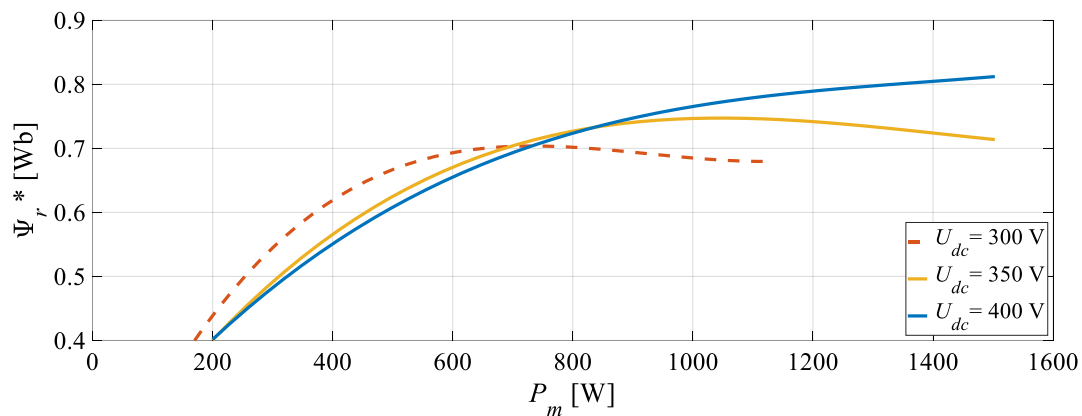
diferencijalnih jednadžbi prvog reda). Time se značajno povećava kompleksnost modela i otežava izvođenje MPPT algoritma u stvarnom vremenu. Dodatni gubici, pak, do sada uopće nisu razmatrani pri izradi MPPT algoritama zasnovanih na modelu SCIG-a. Isto tako, metode izvedbe predloženih algoritama [162-165] onemogućuju primjenu promjenjivih parametara stroja u samome modelu jer se temelje na izrazima koji su izvedeni za fiksne iznose parametara stroja i ne mogu se mijenjati tijekom rada. Korištenje fiksnih iznosa parametara predstavlja značajno zanemarivanje pojava u stroju s obzirom na različite brzine vrtnje i razine magnetizacije s kojima SCIG radi. Nasuprot tome, ovdje predloženi MPPT algoritam omogućuje primjenu promjenjivih parametara i uzima u obzir, obično zanemarivane, dodatne gubitke. Uz to, pristup određivanja optimalnih iznosa na temelju simulacija smanjuje tehničke zahtjeve za izvođenje optimizacije u stvarnom vremenu gdje se koristi samo unaprijed pripremljena funkcija.

Kako bi se dodatno pokazalo koliko simulacijski određeni optimalni iznosi ψ_r^* odgovaraju iznosima koji na stvarnom stroju rezultiraju minimalnim gubicima, proveden je isti postupak kao u simulaciji, samo na laboratorijskoj maketi. Pritom je u izvedbi IRFOC-a za upravljanje stvarnim strojem korišten predloženi napredni model stroja kako bi se postiglo što točnije upravljanje i što točniji iznosi ψ_r . Na slici 5.19 su usporedno prikazane funkcije optimalnog toka određene simulacijski i eksperimentalno. Pokazalo se kako postoji zadovoljavajuće slaganje u postignutim iznosima optimalne reference toka. Najveće odstupanje simulacijski određene vrijednosti ψ_r u odnosu na eksperimentalno određenu vrijednost je približno 7 % nominalne vrijednosti magnetskog toka, odnosno 0,06 Wb zabilježeno pri mehaničkoj snazi od približno 600 W. Isto tako, uspoređujući slike 5.19 i 5.18 lako je zaključiti da se primjenom modela SCIG-a bez dodatnih gubitaka funkcija optimalnog magnetskog toka dodatno udaljava od eksperimentalno određene funkcije, tj., manje je točna. Time se potvrđuje kako je primjena predloženog naprednog modela u ovom slučaju potpuno opravdana.



Slika 5.19 Usporedba optimalnih referentnih vrijednosti magnetskog toka rotora određenih eksperimentalno i simulacijski uz primjenu predloženog naprednog modela stroja

U postupku određivanja optimalne funkcije u obzir je uzet i iznos napona istosmjernog kruga na koji je SCIG povezan. Kao što se vidi na slici 5.20, za različite iznose napona postižu se različite optimalne vrijednosti parametra ψ_r^* . To je posebno izraženo pri većim snagama i u slučaju nižih napona, kao što se u prikazanom slučaju funkcija za $U_{dc} = 300$ V značajno razlikuje od ostale dvije. Prema tome, ako bi se predloženi MPPT algoritam koristio u sustavu gdje se očekuju veći rasponi napona, preporuča se korištenje funkcija optimalnog magnetskog toka rotora definiranih u odnosu na mehaničku snagu i napon $\psi_r^*(P_m, U_{dc})$.



Slika 5.20 Funkcije optimalnih referentnih vrijednosti magnetskog toka rotora dobivenih simulacijski za različite vrijednosti istosmjernog napona U_{dc} .

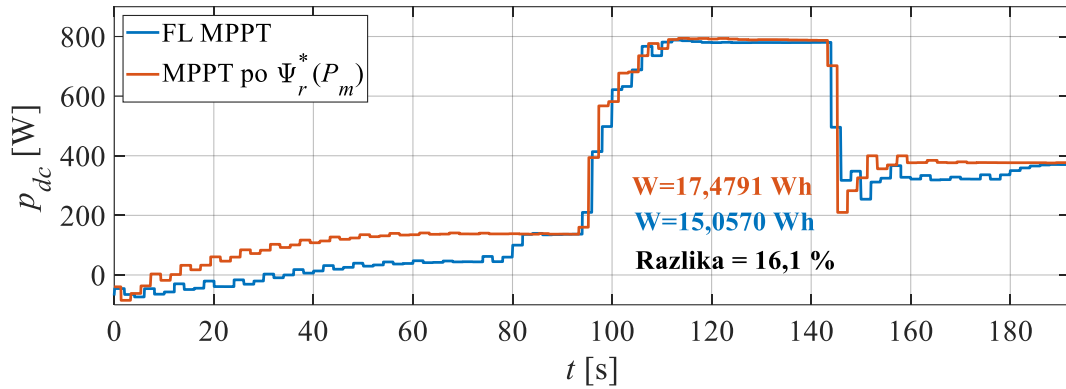
Predloženi algoritam dakle predstavlja praktičan pristup izradi MPPT algoritama zasnovanih na modelu. Temelji se na primjeni simulacijske analize za određivanje optimalnih vrijednosti, pri čemu su simulacijski model i parametri SCIG-a svakako potrebni za razvoj i implementaciju IRFOC algoritma te, samim time, dostupni. Uz primjenu prethodno određenih vrijednosti optimalnog toka, nije potrebno izvođenje kompleksnih diferencijalnih jednadžbi u stvarnom

vremenu kao kod drugih algoritama zasnovanih na modelu. S druge strane, moguće je kontinuirano održavati optimalan rad SCIG-a, čak i za vrijeme prijelaznih pojava, što nije slučaj kod P&O algoritama. Također, nije potrebno ni dodavati nove mjerne uređaje pošto je mehanička snaga već dostupna za potrebe MPPT algoritma vjetroturbine.

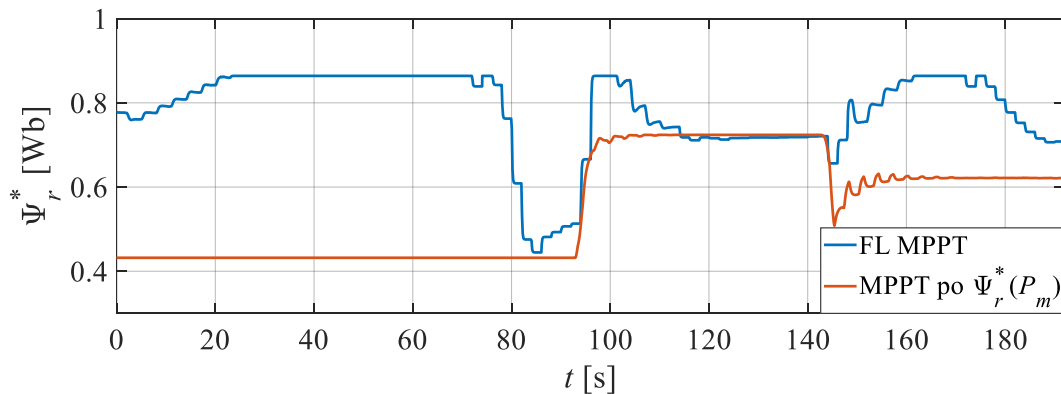
Rezultati dani u nastavku prikazuju razlike u performansama ranije opisanog FL MPPT algoritma iz [168] i ovdje prikazanog MPPT algoritma zasnovanog na modelu, tj., na funkciji optimalne reference magnetskog toka rotora $\psi_r^*(P_m)$. Prikazani su dinamički eksperimentalni odzivi snimljeni na pripadajućoj laboratorijskoj maketi sustava. Detalji korištenog WECS-a i makete kao i neki rezultati mjerenja već su prikazani u ranije spomenutom radu [149]. Za jasno tumačenje prikazanih rezultata ovdje je dovoljno reći kako je za slučaj primjene oba navedena MPPT algoritma izveden isti eksperiment. Maketu je pritom činio samostalni WECS, povezan preko poluvodičkog energetskog pretvarača na istosmjerni krug s baterijama i trošilom, čime je omogućeno ispitivanje rada WECS-a u maksimalnom radnom rasponu. U upravljački sustav WECS-a su dakle implementirani FL MPPT algoritam vjetroturbine te dvije varijante optimizacije SCIG-a: FL optimizacija i optimizacija zasnovana na funkciji $\psi_r^*(P_m)$. Cilj prikazanog eksperimenta je bio pokazati rad sustava u dinamičkim radnim uvjetima gdje MPPT algoritmi moraju osigurati rad WECS-a što je moguće bliže optimalnoj radnoj točki.

Eksperiment je započet uključenjem MPPT algoritama pri brzini vjetra od 6 m/s ($t \approx 0$ s). Nakon toga su izvedene dvije promjene brzine vjetra i to najprije povećanje na 10 m/s ($t \approx 95$ s) te potom smanjenje na 8 m/s ($t \approx 145$ s). Prva značajna razlika se može uočiti na slici 5.21 već na početku eksperimenta, gdje je izlazna snaga SCIG-a kod primjene MPPT-a zasnovanog na funkciji $\psi_r^*(P_m)$ značajno veća. To je posljedica mogućnosti istovremenog rada MPPT algoritama vjetroturbine i SCIG-a u slučaju korištenja takve optimizacije. Tek po završetku optimizacije vjetroturbine, oko $t \approx 75$ s, vidljiva je aktivacija FL optimizacije SCIG-a kada se izjednačavaju izlazne snage za oba slučaja. Početak optimizacije SCIG-a je vidljiv i iz odstupanja iznosa reference magnetskog toka od nominalne (0,86 Wb) u tom istom trenutku, što je prikazano na slici 5.22. Slično je zabilježeno i kod promjene brzine vjetra u $t \approx 145$ s. Može se uočiti kako kod FL optimizacije SCIG veći dio eksperimenta radi s iznosom ψ_r^* koji nije optimalan. Na istoj se slici vidi kako postoje određene razlike optimiziranog iznosa magnetskog toka rotora određenog dvama MPPT algoritmima pri brzini vjetra od 8 m/s ($t \approx 190$ s). Uzrok tih razlika može biti pogreška u mjerenju snage (p_{dc} ili p_m), pogrešna konvergencija FL algoritma, ali i pogrešno određeni iznos optimalne vrijednosti magnetskog toka rotora određen simulacijom za algoritam zasnovan na modelu. Iz slike 5.19 se vidi kako je

upravo oko vrijednosti $P_m \approx 600$ W najveća razlika simulacijski i eksperimentalno određenog iznosa optimalno magnetskog toka rotora, što odgovara brzini vjetra oko 8 m/s. U tom je dakle području za očekivati najmanju točnost algoritma zasnovanog na modelu. Ipak, primijećeno odstupanje referenci magnetskog toka rotora se nije odrazilo na izlazne snage koje su u konačnici gotovo iste za oba MPPT algoritma.

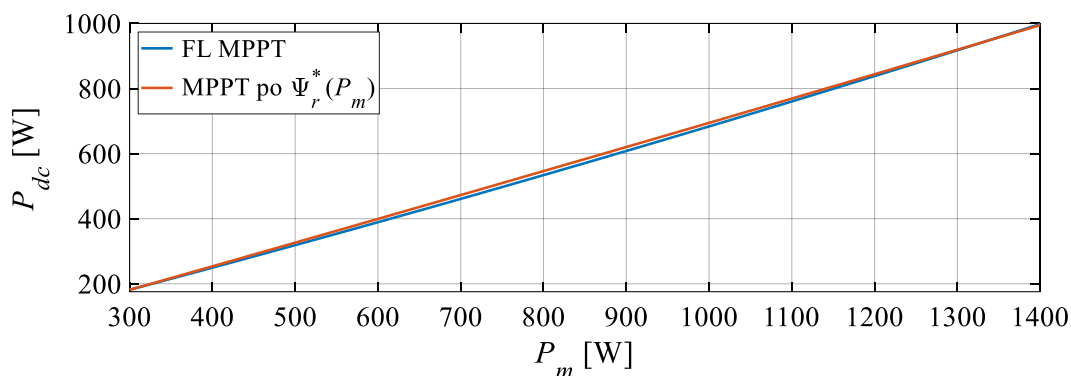


Slika 5.21 Dinamički odzivi izlazne snage SCIG-a postignuti FL i predloženim MPPT algoritmom zasnovanim na modelu stroja



Slika 5.22 Dinamički odzivi reference magnetskog toka rotora dobiveni kod primjene MPPT-a zasnovanog na funkciji optimalnog magnetskog toka rotora i FL MPPT-a

Iako se u konačnici za oba slučaja postigne slična izlazna snaga SCIG-a, brzina optimizacije i mogućnost paralelnog izvođenja MPPT algoritama SCIG-a i vjetroturbine se pokazala ključnom. Zahvaljujući praktički kontinuiranom radu u optimalnoj radnoj točki, primjena MPPT-a zasnovanog na funkciji $\psi_r^*(P_m)$ je rezultirala sa 16,1 % više proizvedene energije u odnosu na primjenu FL MPPT-a. Osim toga, ispostavilo se i kako je primjena opisane metode rezultirala s čak malo većom izlaznom snagom SCIG-a u cijelom rasponu mehaničkih snaga vjetroturbine. To se vidi na slici 5.23 gdje su prikazane postignute izlazne snage SCIG-a za cijeli raspon mehaničke snage vjetroturbine.

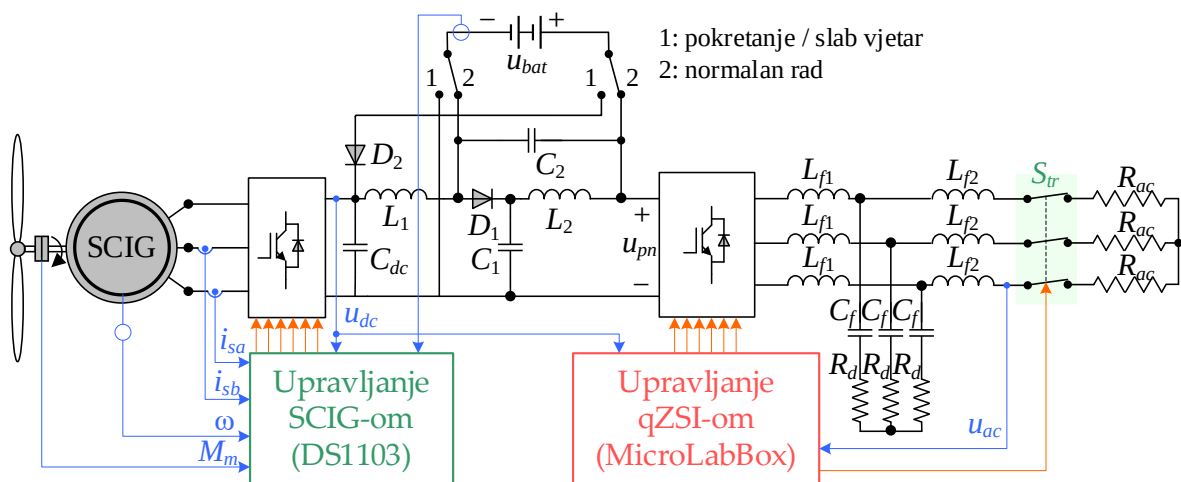


Slika 5.23 Statičke karakteristike izlazne električne snaga SCIG-a u odnosu na mehaničku snagu vjetroturbine dobivene FL i predloženim MPPT algoritmom zasnovanim na modelu stroja

5.4. Analiza i ispitivanje otočnog rada sustava

Nakon što su prethodno prikazani ključni aspekti upravljanja i optimizacije SCIG-a i vjetroturbine te je detaljno prikazan i koncept qZSI-ja, u nastavku je prikazan i opisan upravljački segment integriranog WECS-qZSI sustava predloženog u okviru ovog rada i istraživanja. Naglasak je pritom stavljen na ključne upravljačke koncepte vezane za integraciju WECS-a s qZSI-jem u otočnom režimu rada, dok je u potpoglavlju 5.5 ukratko prikazana mogućnost rada ovakvog sustava u spoju s mrežom. Isto tako, ovdje su prikazani i rezultati laboratorijskog ispitivanja kojima je potvrđena funkcionalnost integriranog WECS-qZSI sustava i pripadajućeg upravljačkog algoritma. Analiza ovdje prikazanog sustava i dani rezultati su dijelom već objavljeni kroz znanstveni rad [150].

Topologija sustava sa svim ključnim komponentama je već prikazana na slici 5.1 i opisana u prvom dijelu ovog poglavlja. Radi jednostavnosti praćenja je još jednom dana ispod na slici 5.24. U odnosu na sliku 5.1, ovdje je isključena opcija spoja na mrežu a dodani su mjereni signali korišteni za potrebe upravljanja (naznačeni plavom bojom). Kao što se može vidjeti na slici, a i ranije je spomenuto, upravljanje fizičkim sustavom je izvedeno kroz zadavanje upravljačkih signala za tranzistore qZSI-ja i poluvodičkog pretvarača u sklopu WECS-a te upravljačkog signala za relejnu sklopku trošila. Upravljačke signale generiraju sustav MicroLabBox – za qZSI i relejnu sklopku trošila – te upravljačka ploča DS1103 – za pretvarač u sklopu WECS-a.



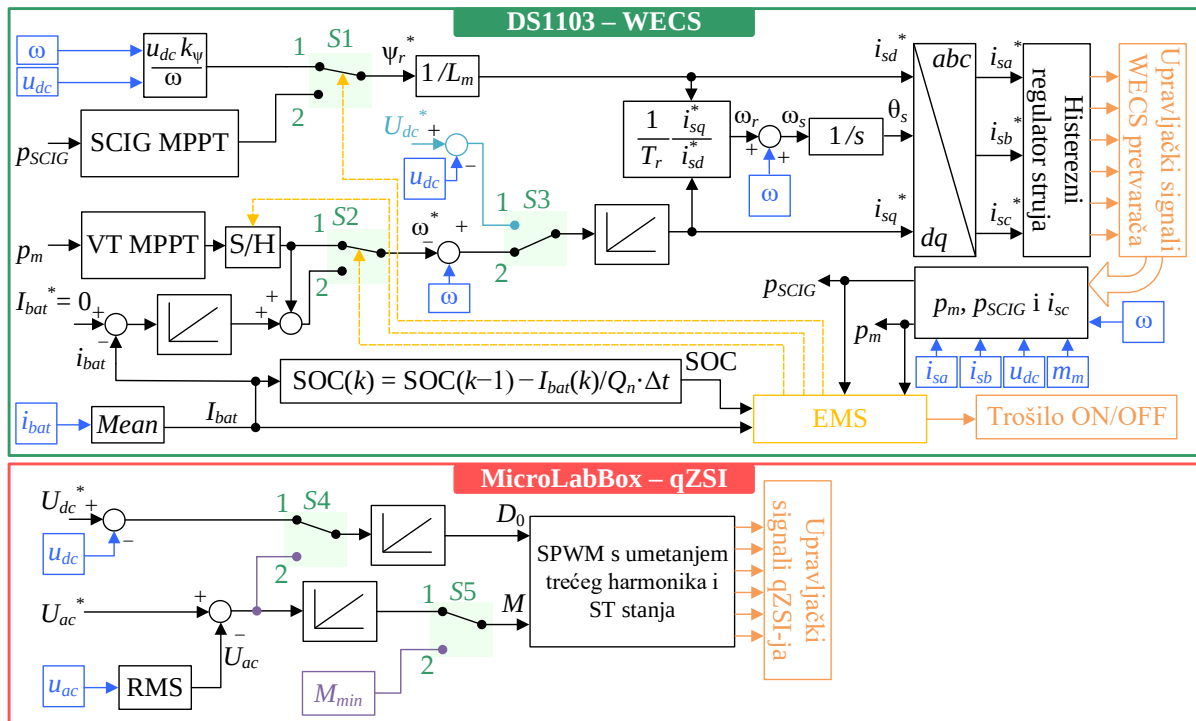
Slika 5.24 Konfiguracija predloženog otočnog vjetroenergetskog sustava zasnovanog na qZSI-ju s baterijama [150]

5.4.1. Upravljačka strategija i raspolaganje energijom sustava

Na slici 5.25 je prikazana struktura implementiranog upravljačkog algoritma čiji je cilj osigurati učinkoviti rad integriranog sustava, uz stabilno i pouzdano napajanje trošila. Jednako kao što je upravljanje fizički podijeljeno na dvije upravljačke jedinice – MicroLabBox i DS1103 – tako je i upravljački algoritam strukturalno podijeljen na dva, međusobno neovisna podsustava koji se izvode na te dvije jedinice. Na sustavu MicroLabBox je implementiran dio upravljačkog algoritma koji je zadužen za upravljanje qZSI-jem. Ovo upravljanje je izvedeno po ranije opisanim principima, s dvije regulacijske petlje i dvije upravljačke veličine. Prva je indeks amplitudne modulacije M preko kojega je primarno izvedena regulacija efektivne vrijednosti napona na trošilu (U_{ac}), uz primjenu PI regulatora i SPWM-a. Referenca napona U_{ac} je pritom zadana na fiksnu, standardnu mrežnu vrijednost od 230 V. Druga upravljačka veličina je određena regulacijskom petljom istosmjernog ulaznog napona qZSI-ja (u_{dc}) koji je PI regulatorom reguliran na konstantnoj referentnoj vrijednosti, a pritom su različiti iznosi reference korišteni u različitim eksperimentima. Ta je petlja izvedena s faktorom trajanja ST stanja D_0 kao upravljačkom veličinom.

Iz prikazanog je lako zaključiti da je u predloženoj konfiguraciji qZSI korišten isključivo kao neovisno sučelje WECS-a s trošilom. Za razliku od nekih implementacija koje su prikazane ranije, ovdje qZSI nije korišten za neposredno upravljanje izvorom, što je u slučaju SCIG-a i

teško izvedivo. Dva dostupna stupnja slobode upravljanja su iskorištena samo za održavanje napona na ulazu i izlazu qZSI-ja uz osiguravanje potrebnog naponskog pojačanja. Prema tome, tok energije iz WECS-a je raspoređen između baterija i trošila isključivo na temelju bilance snage. Riječ je o otočnom sustavu pa su svi viškovi i manjkovi snage WECS-a, u odnosu na potrebe trošila, automatski kompenzirani energijom iz baterija ako je dostupna. U upravljačkom algoritmu su izvedene i alternativne upravljačke petlje, istaknute ljubičastom bojom u donjem dijelu slike 5.25, koje su namijenjene za rad sustava bez dostupne energije vjetra. Ove upravljačke petlje se aktiviraju postavljanjem sklopki S4 i S5 u položaj 2, ali to nije moguće izvesti tijekom rada sustava. Princip i analiza rada sustava u takvom režimu su opisani zasebno u potpoglavlju 5.4.5.



Slika 5.25 Struktura razvijenog upravljačkog algoritma integriranog WECS-qZSI sustava

Budući da pri izvedbi upravljanja qZSI-jem nije uzet u obzir rad WECS-a, upravljanje svim aspektima WECS-a i aspektima vezanim za raspolaganje energijom je izvedeno kroz upravljanje SCIG-om. SCIG-om je upravljano primjenom IRFOC algoritma koji generira upravljačke signale na tranzistore strujno (histerežno) upravljanog poluvodičkog pretvarača WECS-a. Kao što se može vidjeti na slici 5.25, riječ je o IRFOC algoritmu zasnovanom na klasičnom modelu asinkronog stroja, ranije opisanom i prikazanom na slici 5.5. Radi jednostavnosti ovdje nije korišten napredni model stroja za izvedbu IRFOC-a jer je osnovni cilj bio pokazati funkcionalnost predložene strategije upravljanja i cjelokupnog integriranog

sustava. Osim toga, korišteni su FL algoritmi za optimizaciju WECS-a, a oni ne ovise značajno o točnosti modela stroja. Izvedeni IRFOC čine dvije upravljačke petlje, sa strujama i_{sd} i i_{sq} kao upravljačkim veličinama. Ranije je opisan koncept IRFOC-a koji omogućuje neovisno upravljanje magnetskim tokom rotora ψ_r preko struje i_{sd} te elektromagnetskim momentom generatora (tj., brzinom vrtnje) preko struje i_{sq} . Regulacijske petlje su ovdje također primarno izvedene na taj način, uz alternativnu opciju upravljanja izlaznim naponom WECS-a preko struje i_{sq} , označenu tirkiznom bojom u gornjem dijelu slike 5.25. U razmatranoj konfiguraciji, to je ujedno napon u_{dc} na ulazu qZSI-ja te je ova opcija korištena pri pokretanju (sklopka S3 postavljena u položaj 1). Navedeni režim rada je opisan u potpoglavlju 5.4.2, a u oba slučaja je za regulaciju željene veličine korišten PI regulator.

Sve ovdje opisane elemente prikazanog upravljačkog algoritma moguće je svrstati u segment upravljačke strategije. U kontekstu zadataka cjelokupnog upravljačkog algoritma, upravljačkom strategijom se osigurava stabilan i pouzdan rad sustava te napajanje potrošača. Kako bi se pritom postigao i učinkovit rad, implementiran je EMS kojim je postignuta maksimizacija proizvodnje te optimizacija potrošnje proizvedene energije. U konkretnom slučaju, implementirani elementi EMS-a su MPPT algoritmi SCIG-a i vjetroturbine te sklopke S1 i S2 kojima se za vrijeme rada prilagođavaju upravljačke strategije kako bi se optimizirao rad. Uz to, izvedena je i regulacija struje baterije koju aktivira EMS po ispunjenju zadanih uvjeta. Implementirani MPPT algoritmi su zapravo ranije opisani FL algoritmi. Konkretno, u slučaju vjetroturbine, riječ je o algoritmu čija su struktura i funkcije pripadnosti FL regulatora prikazane na slikama 5.11 i 5.12. Također, faktori skaliranja su za ovaj slučaj određeni kroz simulacijske analize metodom pokušaja i pogreške te su postavljeni na vrijednosti $K_{in_\omega} = 0,014$ i $K_{out_\omega} = 20$. Optimizacija izlazne snage vjetroturbine je dakle postignuta iterativnim korekcijama brzine vrtnje ω na temelju promjena zabilježenih u mjerenoj mehaničkoj snazi p_m . S druge strane, optimizacija SCIG-a je izvedena korekcijama reference magnetskog toka rotora koje zadaje pripadajući FL MPPT promatrajući promjene u električnoj snazi na izlazu SCIG-a (p_{SCIG}). Struktura FL MPPT algoritma SCIG-a je prikazana na slici 5.16 te su u njemu korištene iste funkcije pripadnosti kao kod FL MPPT algoritma vjetroturbine. Razlika je u oznakama i faktorima skaliranja, koji su za ovaj slučaj postavljeni na $K_{in_\psi} = 4,2/\omega$ i $K_{out_\psi} = 1$.

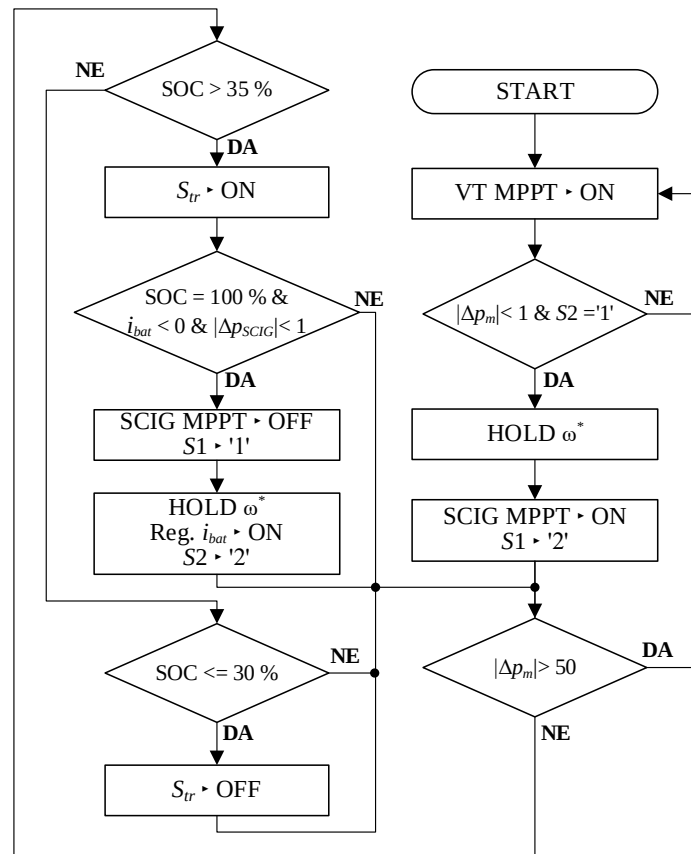
Spomenuta regulacijska petlja struje baterije je izvedena na način da se odstupa od točke maksimalne snage vjetroturbine povećavajući njenu brzinu vrtnje. Iako i povećanjem i smanjivanjem brzine vrtnje radna točka vjetroturbine odstupa od optimalne, povećanjem brzine vrtnje vjetroturbina se zadržava na stabilnom (desnom) dijelu karakteristike. Naime

usporavanjem, odnosno pomicanjem radne točke lijevo od optimuma, vjetroturbina bi se eventualno mogla naći u nestabilnoj radnoj točki gdje postoji opasnost od zaustavljanja vjetroturbine, i posljedično demagnetizacije SEIG-a, već pri maloj promjeni opterećenja. S obzirom na to da je upravljanje qZSI-jem ograničeno na regulaciju napona u_{dc} i U_{ac} , smanjenjem ulazne snage qZSI-ja, uz konstantnu snagu trošila, smanjuje se snaga (struja) baterija. U ovoj regulacijskoj petlji je također korišten PI regulator za regulaciju struje baterija, ali uz nešto veće vrijeme uzorkovanja zbog sporijeg odziva vjetroturbine. Upravljačka veličina na izlazu regulatora struje baterija je referenca brzine ω^* .

U poglavlju 2.4.3 je pojašnjeno kako se u okviru EMS-a raspolaganje energijom može izvesti na dva načina: upravljanjem resursima ili potražnjom. Implementacija pokazanih MPPT algoritama i sličnih optimizacijskih algoritama zasigurno spada u kategoriju upravljanja resursima. Ipak, kako bi se raspolaganje resursima, uključujući baterije, izvelo u potpunosti, potrebno je u stvarnom vremenu koordinirati rad pojedinih regulacijskih petlji i MPPT algoritama. Uz to, učinkovitost sustava se dodatno može povećati na način da se izvede i raspolaganje potražnjom. Sve to je izvedeno u okviru ovdje implementiranog *rule-based* EMS-a, čiji je dijagram toka prikazan na slici 5.26. Implementirani EMS ima za cilj osigurati dostupnost napajanja trošilu a da je pritom:

- Maksimalno iskorištena energija vjetra
- SOC baterija zadržan u rasponu 30 % - 100 %

Maksimalna eksploatacija energije vjetra je postignuta MPPT-ovima SCIG-a i vjetroturbine. Kao što se vidi u dijagramu toka na slici 5.26, MPPT algoritam vjetroturbine (VT MPPT) je aktivan dok se ne dostigne $|\Delta p_m| < 1 \text{ W}$, što se tumači kao dostizanje optimalne radne točke vjetroturbine. Nakon toga, zadržava se zadnja vrijednost reference ω^* te se aktivira MPPT SCIG-a. EMS ga aktivira prebacivanjem sklopke S1 iz položaja 1 u položaj 2. Optimizacija SCIG-a je uključena dokle god se ne detektira promjena brzine vjetra, kada se ponovno pokreće MPPT vjetroturbine i sklopka S1 vraća u položaj 1. Algoritam prepoznaje promjenu brzine vjetra u slučaju kada je $|\Delta p_m| > 50 \text{ W}$.



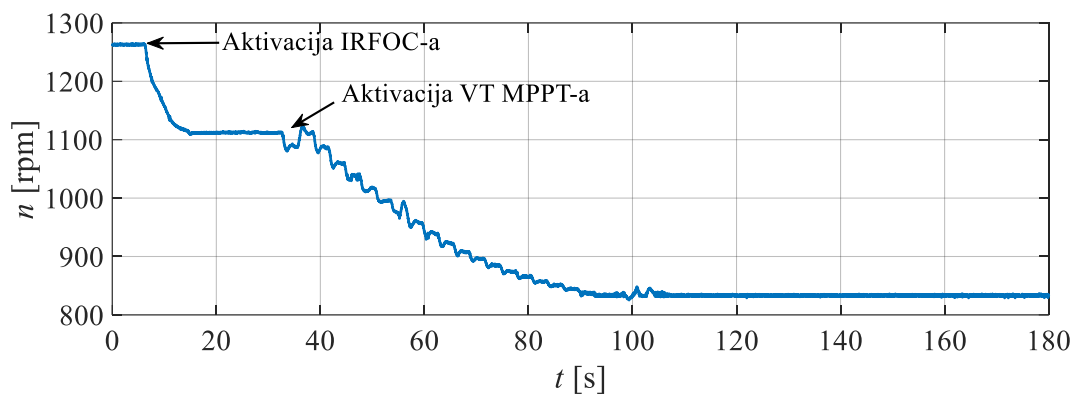
Slika 5.26 Dijagram toka razvijenog EMS-a

Osim praćenja promjena u brzini vjetra, EMS prati i SOC baterija. U slučaju kada je SOC na minimalno dopuštenoj razini (30 %), isključuje se trošilo kako bi se sva dostupna energija vjetra usmjerila u baterije. Trošilo ostaje isključeno dok se SOC ne vrati na iznos od 35 % ili više. Alternativno, u slučaju kada je SOC na maksimalno dopuštenoj razini (100%) a baterije se i dalje pune ($i_{bat} < 0$), aktivira se regulacija struje baterija. EMS prebacuje sklopku S2 u položaj 2 te se uz zadanu referencu struje baterije i_{bat} od 0 A zaustavlja daljnje punjenje baterije. Na taj se način sprječava potencijalno oštećenje baterijskog sustava. U slučaju promjene brzine vjetra dok je uključena regulacija i_{bat} , ponovno se uključuje MPPT algoritam vjetroturbine te nakon postizanja optimalne radne točke EMS evaluira je li potrebno ponovno ograničiti punjenje baterija. Dodatni uvjet za uključenje regulacije punjenja baterije je $|\Delta p_{SCIG}| < 1$ W, čime se sprječava aktivacija u prijelaznim pojavama. Navedeni iznosi SOC-a su u provedenom ispitivanju proizvoljno postavljeni u svrhu demonstracije principa, a mogli su biti implementirani i neki drugi iznosi. Određivanje samog SOC-a je izvedeno jednostavnom metodom Coulombovog brojača, gdje se integracijom struje baterije, u odnosu na nazivni kapacitet, određuje promjena SOC-a.

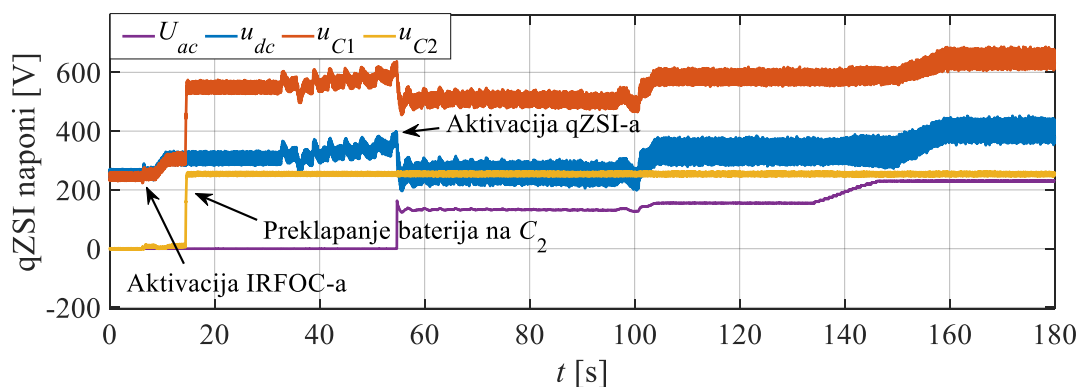
5.4.2. Pokretanje sustava

U predloženoj konfiguraciji, WECS sa SCIG-om je povezan na trošilo i baterije preko qZSI-ja koji ne dopušta tok energije u smjeru od izmjenične strane ili baterija prema istosmjernoj ulaznoj sabirnici s naponom U_{dc} . S druge strane, SCIG-u je za pokretanje potrebna energija za inicijalno magnetiziranje. Iz tog je razloga za potrebe pokretanja ostavljena mogućnost preklopa baterija na ulaznu sabirnicu qZSI-ja (položaj 1 sklopki na slici 5.24). Baterijama povezanim na istosmjerni ulaz qZSI-ja nabija se kondenzator C_{dc} i time osigurava energija potrebna za magnetiziranje generatora (dioda D_2 sprječava povrat struje u baterije). I uz osigurano početno magnetiziranje, pri pokretanju je potrebno pratiti definiranu proceduru koja je u nastavku opisana i prikazana kroz rezultate laboratorijskih ispitivanja. Laboratorijska maketa koja je u tu svrhu korištena uključuje radna trošila, qZSI, izlazni LCL filter, baterijski sustav, mosni poluvodički trofazni pretvarač u sklopu WECS-a, SCIG te istosmjerni stroj kojim je emuliran rad vjetroturbine. Detalji makete su navedeni u [150], ali i u poglavlju 6.3, gdje je izvedena maketa mikromreže s istim komponentama, uz dodatak FN izvora.

Postupak pokretanja započinje kada je prepoznata minimalna potrebna brzina vjetra $v_v \geq 6$ m/s, pri kojoj je WECS u stanju generirati snagu koja je veća od gubitaka sustava. Minimalna brzina vjetra se može prepoznati iz brzine vrtnje rotora koja se mjeri enkoderom prije uključanja generatora, tj., u neopterećenom stanju, a koja pritom iznosi $n = 1265$ rpm. S postignutom minimalno potrebnom brzinom vrtnje aktiviraju se IRFOC algoritam i impulsi za poluvodički pretvarač u sklopu WECS-a, što se odmah očituje u brzini vrtnje SCIG-a koja pada uslijed opterećenja, tj., pojave elektromagnetskog momenta (slika 5.27). Elektromagnetski moment generira struja i_{sq} čiju referencu pri uključanju zadaje regulator napona u_{dc} , uključen sa sklopkom S3 u položaju 1. Pri aktivaciji IRFOC-a, referenca napona u_{dc} je postavljena na 250 V, što odgovara naponu baterija. Nakon što je IRFOC uključen, iznos napona u_{dc} se postepeno podiže na 300 V, što se može vidjeti na slici 5.28 u trenutku $t \approx 10$ s. Treba napomenuti da je pritom punjenje baterija spriječeno diodom D_2 postavljenom između baterija istosmjernog ulaza. Nakon dostizanja zadanog napona u_{dc} , baterije se u trenutku $t \approx 15$ s preklapaju u paralelan spoj s kondenzatorom C_2 qZSI-ja. S baterijama povezanim na kondenzator C_2 i naponom u_{dc} reguliranim na 300 V, napon u_{C1} poprima iznos od ≈ 550 V (suma napona u_{dc} i napona baterija).



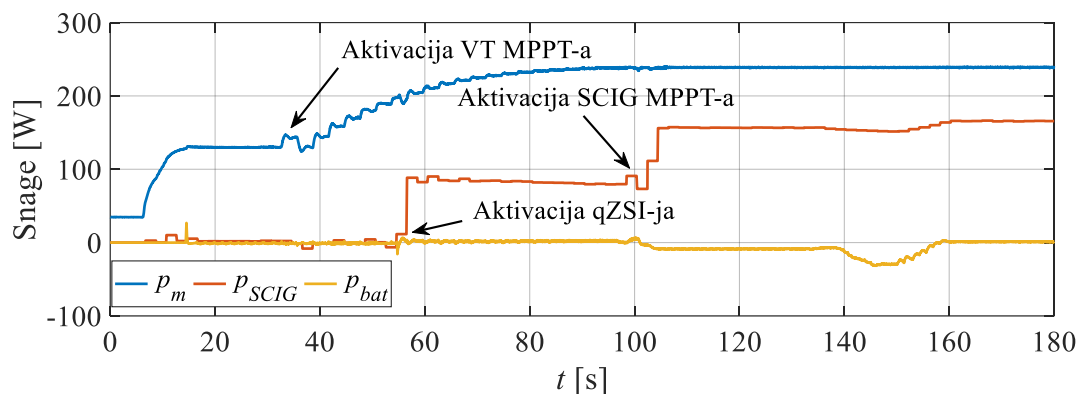
Slika 5.27 Dinamički odziv brzine vrtnje SCIG-a u procesu pokretanja



Slika 5.28 Dinamički odzivi napona qZSI-ja u procesu pokretanja

U ovom trenutku, WECS proizvodi tek toliko energije da zadrži napon u_{dc} na referentnoj vrijednosti pa se prije uključivanja qZSI-ja aktivira MPPT vjetroturbine (sklopka S3 na slici 5.25 prelazi u položaj 2). Uz isključeni qZSI i porast izlazne snage WECS-a, rastu naponi u_{dc} i u_{C1} koji pritom nisu regulirani. Upravljački algoritam prati iznos napona u_{dc} i čim dostigne vrijednost od 400 V aktivira impulse qZSI-ja, što se u prikazanom slučaju događa u $t \approx 55$ s. U trenutku aktivacije impulsa, qZSI radi uz fiksne iznose indeksa $M = 0,7$ i faktora $D_0 = 0,15$, tj., u otvorenoj petlji. Optimizacija vjetroturbine se nastavlja, kao što se vidi iz konvergencije brzine vrtnje na slici 5.27 i snage p_m na slici 5.29, i odmah potom se aktivira optimizacija SCIG-a. Nakon završetka optimizacije SCIG-a, izlazna snaga p_{SCIG} se skoro udvostručuje porastom s prvotnih 80 W na 155 W u $t \approx 105$ s. Valja primijetiti kako je snaga p_{SCIG} prikazana s korakom uzorkovanja od 2 s, kakvu je zapravo *vidi* MPPT algoritam SCIG-a koji radi s tim korakom. MPPT algoritam vjetroturbine pak radi s nešto većim korakom uzorkovanja (3 s) kako bi se brzina i snaga vjetroturbine uspjele stabilizirati između dva uzastopna uzorka. S WECS-om u optimalnoj radnoj točki, preostaje uključiti regulacijske petlje napona u_{dc} i U_{ac} , koje su aktivirane u $t \approx 115$ s i $t \approx 130$ s. Pri aktivaciji ovih regulacijskih petlji, reference napona su postavljene na zatečene mjerene vrijednosti iz prethodnog koraka uzorkovanja. Na taj se

način sprječava eventualna prijelazna pojava koja bi se javila sa skokovitom promjenom napona, odnosno faktora D_0 i indeksa M . Nakon što je uključena regulacija dvaju napona, napon trošila je postepeno podignut na 230 V a potom i ulazni napon qZSI-ja na 400 V. Valja primijetiti kako je uz konačno postignutu snagu WECS-a snaga baterija iznosila 0 W. Dakle pri brzini vjetra od 6 m/s, izlazna snaga SCIG-a odgovara približno električnim gubicima dijela sustava nakon SCIG-a. To znači da je za povezivanje trošila potrebna veća brzina vjetra ili bi se trošilo moralo primarno napajati iz baterija.



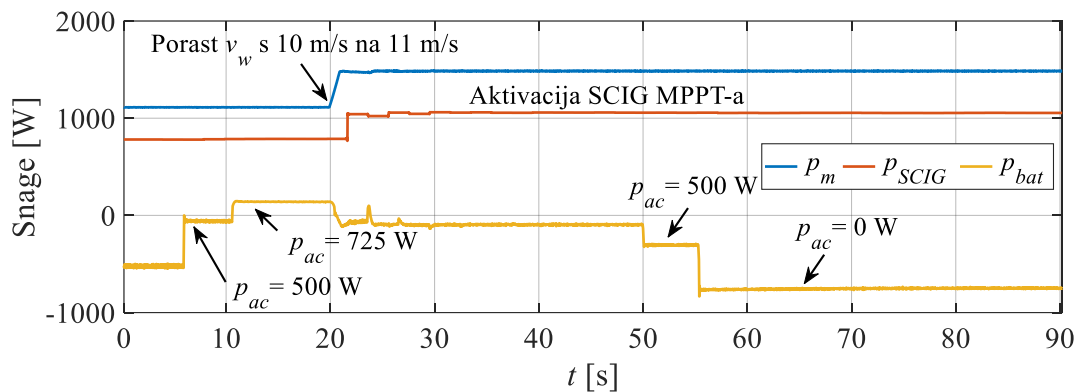
Slika 5.29 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine, SCIG-a i baterija u procesu pokretanja

5.4.3. Analiza dinamičkih režima tijekom rada sustava

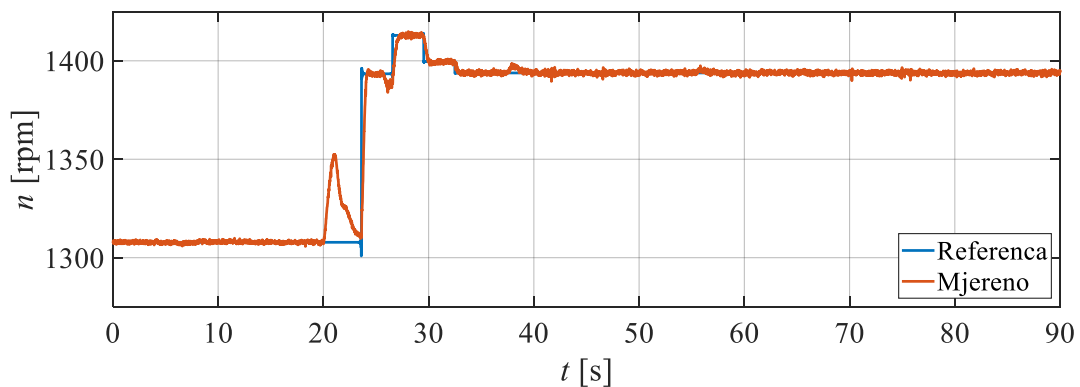
U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja dinamičkog rada integriranog WECS-qZSI sustava za različite brzine vjetra, iznose SOC-a baterija te snage trošila povezanih na izlazu izmjenjivača. Za potrebe dinamičkog ispitivanja izvedeno je više pojedinačnih eksperimenata, a u svakom od eksperimenata su ispitani različiti aspekti rada.

Na slikama 5.30 – 5.34 su prikazani dinamički odzivi različitih veličina sustava pri skokovitim promjenama snage trošila i brzine vjetra. Za ovo ispitivanje, sustav je najprije doveden u stabilnu radnu točku pri brzini vjetra od 10 m/s, bez trošila povezanog na izlaz izmjenjivača. U tom trenutku, s vjetroturbinom i SCIG-om u optimalnoj radnoj točki, izlazna snaga vjetroturbine je približno jednaka 1125 W, a SCIG-a približno 790 W. Sva raspoloživa snaga se pohranjuje u baterije s obzirom na to da nije povezano trošilo pa se baterije, uz određene gubitke qZSI-ja, pune s približno 530 W (negativan predznak snage predstavlja punjenje

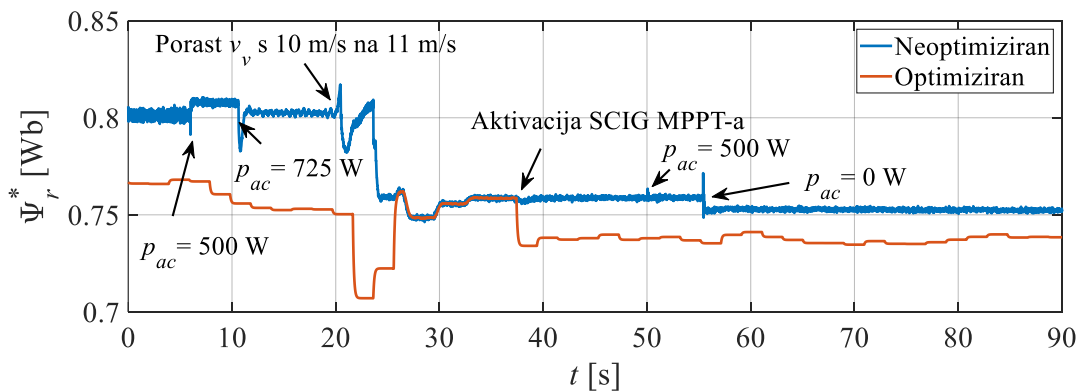
baterija, a isto vrijedi i za pripadajuću struju). U trenutku $t \approx 5$ s priključuje se trošilo snage 500 W, što se očituje smanjenjem snage punjenja baterija na slici 5.30. Uz priključeno trošilo, baterije se i dalje pune sa snagom od približno 60 W, ali se nakon povećanja snage trošila na 750 W u $t \approx 10$ s počinju prazniti snagom približno jednakom 140 W. U trenutku $t \approx 20$ s, izvedena je promjena brzine vjetra s 10 m/s na 11 m/s. Osim u promjeni izlazne snage vjetroturbine i SCIG-a, promjena brzine vjetra se očituje i u brzini vrtnje SCIG-a (slika 5.31). SCIG uslijed povećanja brzine vjetra najprije krene ubrzavati, ali regulacijski sustav ubrzo vraća brzinu prema referentnoj vrijednosti. Potrebno je kratko vrijeme, koje je u najgorem slučaju jednako koraku uzorkovanja MPPT-a (3 s), prije nego algoritam započne s korekcijom reference brzine vrtnje ka novoj optimalnoj brzini. Kroz četiri koraka korekcije brzine vrtnje, vjetroturbina je ponovno u optimalnoj radnoj točki. Nakon toga kreće i optimizacija SCIG-a, koja se ne očituje u vidljivoj promjeni snage, što je i očekivano za ovu brzinu vjetra. Rad MPPT-a SCIG se može uočiti iz iznosa magnetskog toka rotora koji se pri promjeni brzine vjetra najprije vrati na iznos određen naponom i brzinom vrtnje (EMS prebaci sklopku S1 u položaj 1), a potom ponovno odstupa od tog iznosa nakon aktivacije MPPT-a (slika 5.32).



Slika 5.30 Dinamički odzivi snaga integriranog WECS-qZSI sustava na promjene snage trošila i brzine vjetra

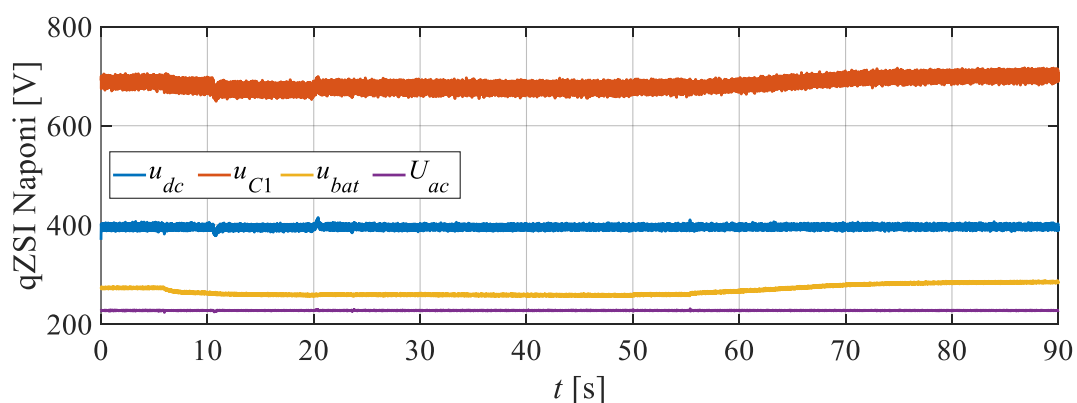


Slika 5.31 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila i brzine vjetra



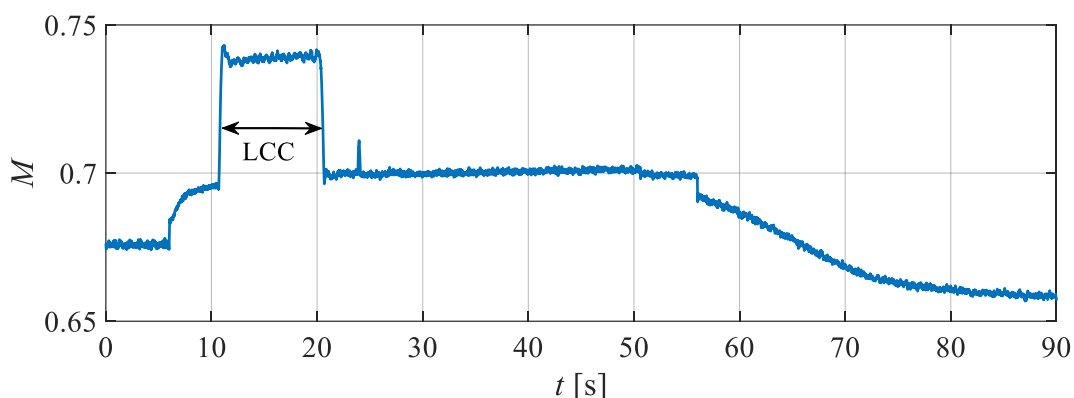
Slika 5.32 Dinamički odziv reference magnetskog toka rotora SCIG-a na promjene snage trošila i brzine vjetra

Pri novoj, većoj brzini vjetra, snaga na izlazu SCIG-a poraste za 200 W, a približno ista snaga se prenese na trošilo i baterije koje se sada ponovno pune i to snagom od približno 100 W. Nakon tridesetak sekundi stabilnog rada sustava pri danim uvjetima, snaga trošila se smanjuje kroz dva koraka. Najprije smanjenjem na 500 W u $t \approx 50$ s te konačno potpunim isključenjem trošila u $t \approx 55$ s. Provedeni eksperiment i prikazani rezultati govore kako promatrane dinamičke promjene snage trošila nisu imale utjecaj na rad WECS-a. Promjena brzine vjetra je pak rezultirala potragom za novom optimalnom radnom točkom WECS-a. Isto tako, qZSI je radio stabilno bez značajnih poremećaja u reguliranim veličinama. Manji poremećaji su vidljivi u snazi baterija, koji odgovaraju koracima korekcije reference brzine vrtnje SCIG-a u periodu nakon promjene brzine vjetra $t \approx 25$ s. Osim toga, manji propad i nadvišenje su vidljivi u naponu u_{dc} , prikazanom na slici 5.33, pri skokovitim promjenama snage trošila u $t \approx 10$ s i brzine vjetra u $t \approx 20$ s. Na istoj slici se vidi kako je regulirani napon U_{ac} stabilan, a napon baterija prati periode pražnjenja smanjenjem, odnosno periode punjenja porastom iznosa.



Slika 5.33 Dinamički odzivi napona integriranog WECS-qZSI sustava na promjene snage trošila i brzine vjetra

U ovom eksperimentu je uočena i pojava LCC stanja qZSI-ja, ranije opisanog u poglavlju 3.4. Naime, do ovog stanja je došlo u trenutku uključanja trošila najveće snage ($t \approx 10$ s), uslijed velike struje trošila i očito nedovoljnog iznosa ulazne struje i_{L1} . Ovo radno stanje se očitavalo značajnim porastom indeksa modulacije M prikazanog na slici 5.34. Posljedica ovakvog stanja je smanjenje napona u_{pn} , a kako bi to kompenzirao, regulacijski sustav reagira povećanjem indeksa M . Povećanjem snage WECS-a, a time i struje i_{L1} , qZSI je nastavio s normalnim radom. Regulacijski sustav se pokazao robusnim i na ovakve pojave koje se javljaju u krajnjim područjima mogućeg radnog raspona sustava.

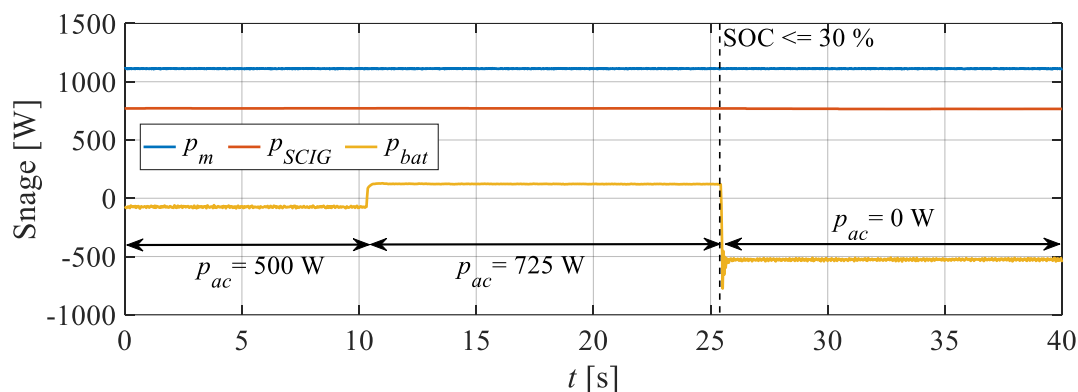


Slika 5.34 Dinamički odziv indeksa modulacije qZSI-ja na promjene snage trošila i brzine vjetra

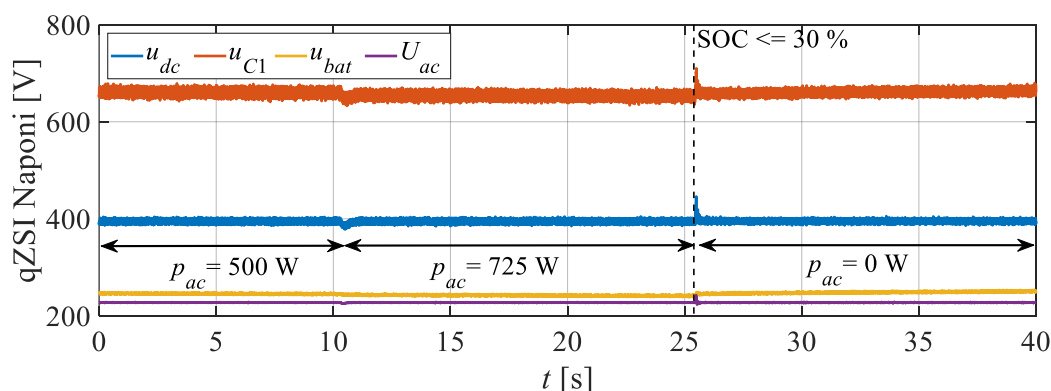
U prethodnom eksperimentu je ispitan dinamički rad sustava s obzirom na promjene brzine vjetra i snage trošila. U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja kojima je pokazan rad sustava za granične iznose SOC-a. Iz prikazanih rezultata može se očitati djelovanje regulacijskog sustava i EMS-a, kojima se uz održavanje stabilnosti održava i iznos SOC-a unutar dozvoljenih granica.

Na slikama 5.35 i 5.36 su prikazani dinamički odzivi u eksperimentu gdje SOC dostiže minimalni dozvoljeni iznos. Eksperiment započinje u stabilnoj radnoj točki s priključenim trošilom od 500 W i brzinom vjetra od 10 m/s, kojom se postiže višak snage WECS-a u odnosu na trošilo a time i punjenje baterija snagom približno jednakom 100 W (slika 5.35). U trenutku $t \approx 10$ s, snaga trošila je porasla na 725 W te započinje pražnjenje baterija. Pražnjenje baterija dovodi do pada razine SOC-a, koji u trenutku $t \approx 25$ s pada ispod minimalnog dopuštenog iznosa od 30 %. Nizak iznos SOC-a se očituje i u naponu baterija, prikazanom na slici 5.36, gdje je najniži zabilježen napon baterija $u_{bat} \approx 245$ V. Dostizanjem minimalnog SOC-a, EMS reagira isključenjem trošila. U tom trenutku sustav radi s relativno velikom ulaznom snagom, ali trenutno isključenje trošila uzrokuje tek manje poremećaje. Najznačajniji za rad sustava su

prebačaji reguliranih napona U_{ac} i u_{dc} koji su premašili referencu za 9 %. Pored toga, nikakvi drugi poremećaji u radu WECS-a nisu zabilježeni.



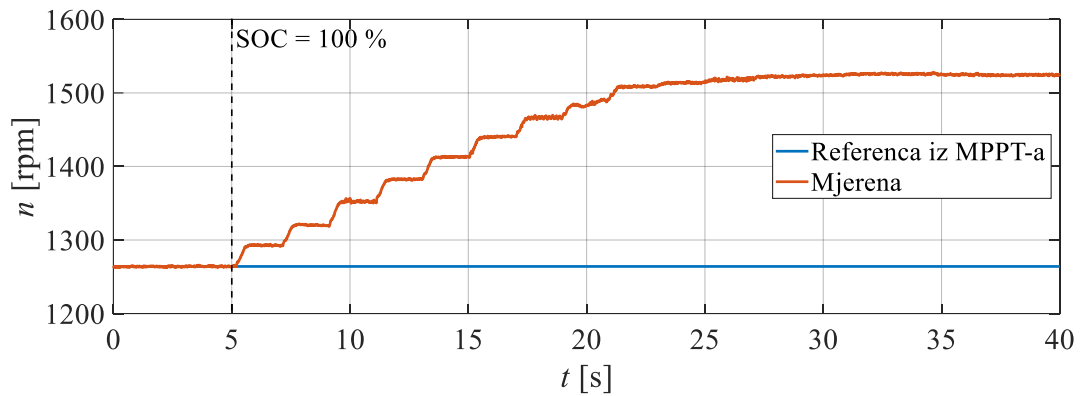
Slika 5.35 Dinamički odzivi snaga pri dostizanju minimalne razine SOC-a



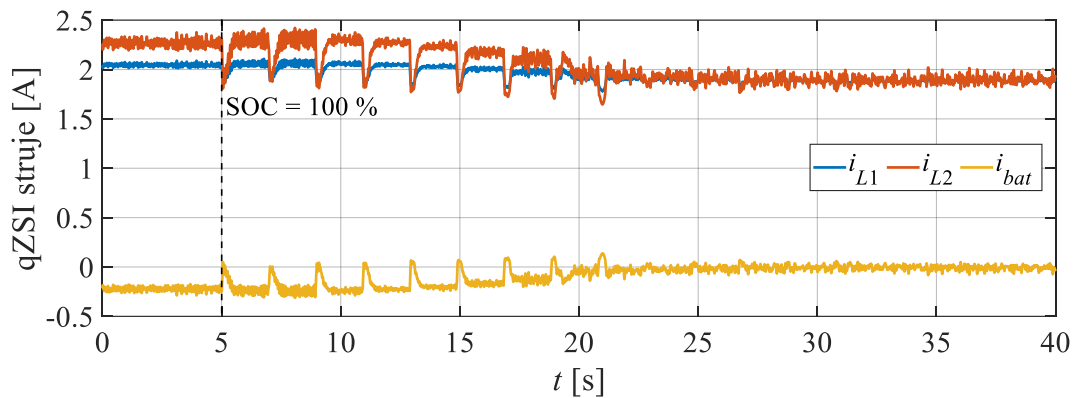
Slika 5.36 Dinamički odzivi napona pri dostizanju minimalne razine SOC-a

Rad sustava pri maksimalnom dozvoljenom SOC-u je prikazan na slici 5.37. Kao što je objašnjeno u opisu regulacijskog sustava, pri dostizanju maksimalnog dopuštenog SOC-a, EMS reagira aktivacijom regulacije struje baterije da bi spriječio daljnje punjenje. Uvjeti za to su dostignuti maksimalni iznos SOC-a i negativna struja baterija, koja indicira punjenje. Regulacija struje baterija se postiže smanjenjem izlazne snage vjetroturbine i, posljedično, WECS-a. Na taj se način uz konstantnu snagu trošila smanjuje višak energije koji bi se u protivnom po bilanci snage qZSI-ja pohranjivao u baterije. Smanjenje snage vjetroturbine se postiže kroz korekciju brzine vrtnje. Upravo se to vidi na slici 5.37a, gdje je prikazana referenca brzine vrtnje SCIG-a, kao i referenca određena MPPT-om, za koju se može reći da predstavlja optimalnu brzinu vrtnje. U trenutku $t \approx 5$ s, EMS detektira maksimalno dozvoljeni SOC te prebacuje sklopku S2 u položaj 2. Aktivira se regulacijska petlja struje baterije, koja radi s korakom uzrokovanja od 3 s kao i MPPT, te počevši od trenutne brzine vrtnje postepeno povećava njen iznos. Nakon približno dvadeset sekundi, struja baterije dostiže postavljeni

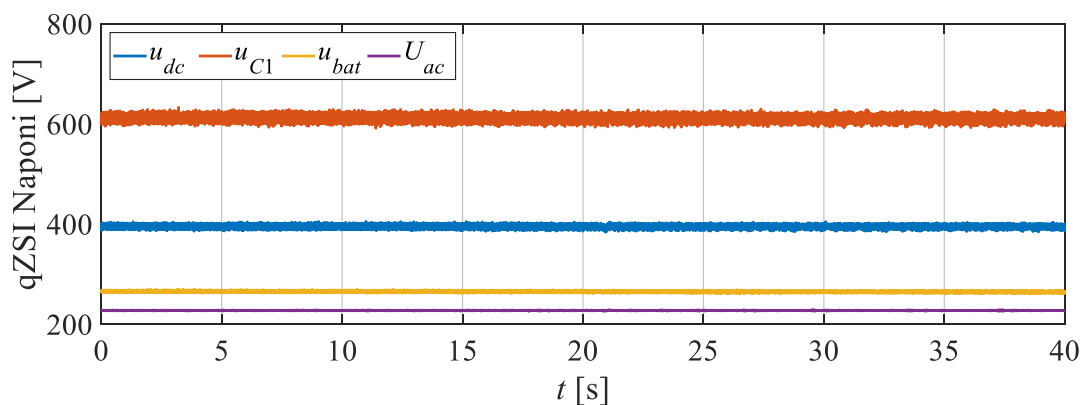
referentni iznos od 0 A (slika 5.37b) i time je zaustavljeno daljnje punjenje. Kako bi se postiglo željeno smanjenje snage WECS-a, brzina vrtnje SCIG-a se povećala za 260 rpm u odnosu na brzinu pri kojoj je WECS generirao maksimalnu snagu. Regulirani naponi U_{ac} i u_{dc} su ostali nepromijenjeni tijekom cijelog eksperimenta (slika 5.37c). Ovim eksperimentom je pokazano kako se za potrebu regulacije struje baterija može uspješno korigirati izlazna snaga WECS-a, bez utjecaja na druge komponente sustava.



a)



b)



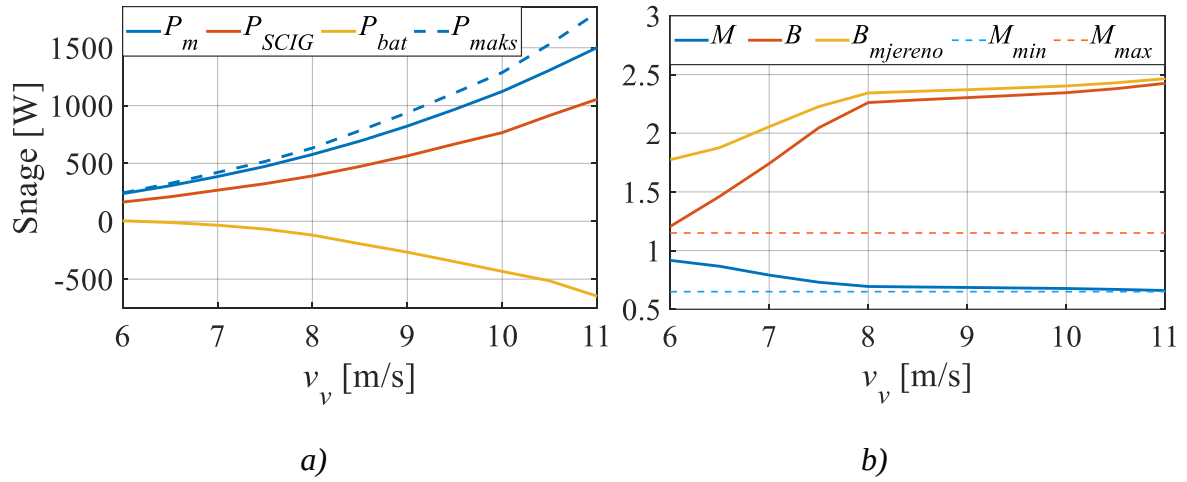
c)

Slika 5.37 Dinamički odzivi a) brzine vrtnje SCIG-a, b) struja qZSI-ja i c) napona qZSI-ja pri dostizanju maksimalne razine SOC-a i regulaciji struje baterija

5.4.4. Statičke karakteristike

U ovom potpoglavlju su prikazane statičke karakteristike predloženog integriranog WECS-qZSI sustava. Prikazane karakteristike rezultat su više pojedinačnih eksperimentalnih ispitivanja rada sustava bez priključenog trošila, za različite iznose brzine vjetra, ulaznog napona qZSI-ja i izlaznog napona trošila.

Statičke karakteristike ostvarene za promatrani raspon brzine vjetra su prikazane na slici 5.38. Raspon brzine vjetra se kreće od 6 m/s, što je brzina vjetra pri kojoj sustav može pokrivati vlastite gubitke, do 11 m/s, što predstavlja nazivnu brzinu vjetra za razmatranu vjetroturbinu. Rezultati pokazuju kako izlazna snaga vjetroturbine i SCIG-a (slika 5.38a) eksponencijalno raste s porastom brzine vjetra. Sukladno tome, snaga punjenja baterija se također povećava. Na slici 5.38 je prikazana i snaga P_{maks} koja predstavlja potencijalno dostupnu izlaznu snagu sustava, određenu kao sumu snage P_{SCIG} i maksimalno raspoložive snage pražnjenja baterija. Raspoloživa snaga pražnjenja baterija je pritom određena na temelju srednje vrijednosti umnoška i_{L1} i u_{bat} . To je u skladu s ranije opisanim zahtjevima qZSI-ja (poglavlje 3.4) prema kojima je maksimalna struja pražnjenja baterija ograničena na iznos struje i_{L1} kako bi se spriječilo zapiranje diode D_1 u aktivnom sklopnom stanju. Budući da je napon u_{dc} postavljen na fiksni iznos, porastom snage P_{SCIG} raste i struja i_{L1} a posljedično i raspoloživa snaga pražnjenja baterija. To se očituje sve većom razlikom među snagama P_{SCIG} i P_{maks} s porastom brzine vjetra. Rezultati sugeriraju kako je pri najvećoj razmatranoj brzini vjetra, integracijom WECS-a s baterijski potpomognutim qZSI-jem, omogućeno povećanje ukupno dostupne snage za približno 70 %. Iznos snage P_{maks} je u manjoj mjeri uvjetovan i SOC-om s obzirom na to da je za veći SOC veći i napon u_{bat} pa se ista snaga pražnjenja baterija može postići uz manju struju i_{bat} . Osim toga, ovisi i o tome da li se baterije trenutno prazne ili pune, što značajno utječe na iznos napona.



Slika 5.38 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon brzine vjetra ($U_{dc}=400$ V $U_{ac}=230$ V): a) snage WECS-a i qZSI-ja; b) indeks modulacije i faktor pojačanja qZSI-ja.

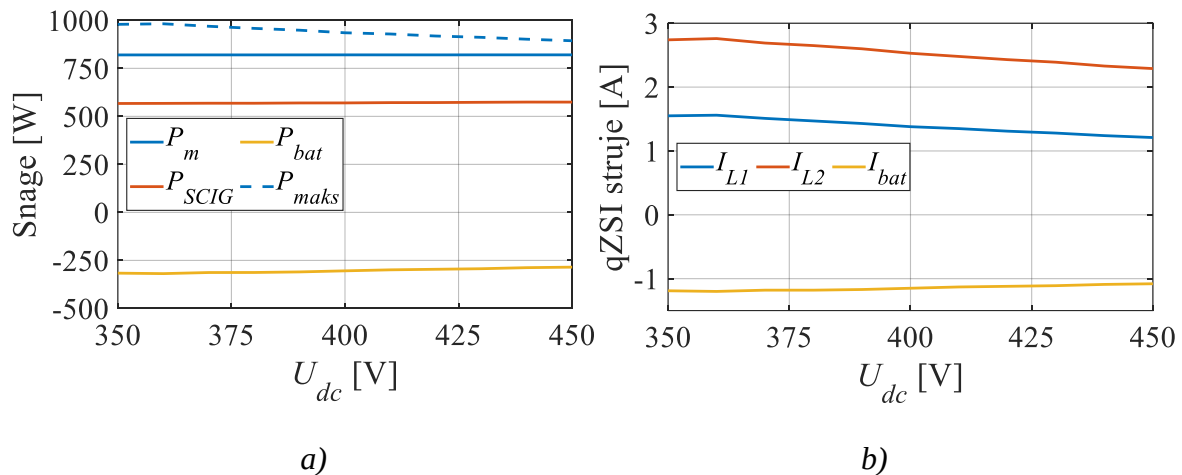
Analiza statičkih karakteristika je pokazala kako se iznos indeksa M (slika 5.38b) zadržava unutar dopuštenih granica za cijeli raspon brzine vjetra. Zapravo se indeks M za gotovo cijeli raspon zadržava u blizini minimalno dopuštenog iznosa, što je i očekivano za neopterećeni rad sustava. Odstupanje od minimalnog iznosa je uočljivo samo za brzine vjetra manje od 8 m/s. Razlog tome je zapiranje diode u aktivnom sklopnom stanju, koje se pri nižim brzinama vjetra javlja uslijed male ulazne snage a time i niskog iznosa struje i_{L1} . Da bi se kompenzirao takav rad koji rezultira nižim iznosom napona na ulazu u most (u_{pn}), upravljački algoritam zadaje veći indeks M , kojim se može postići napon $U_{ac} = 230$ V. Zapiranje diode se očituje i iz prikazane krivulje stvarnog faktora pojačanja ($B_{mjereno}$) određenog izrazom (5.23) na temelju mjerenih veličina. Naime, u periodima zapiranja diode dolazi do neželjenog naponskog pojačanja pa se iznos $B_{mjereno}$ značajno razlikuje od zadanog iznosa B , određenog na temelju zadanog iznosa D_0 prema izrazu (5.24).

$$B_{mjereno} = \frac{2\hat{U}_{ac}}{MU_{dc}} \quad (5.23)$$

$$B = \frac{1}{1 - 2D_0} \quad (5.24)$$

Treba spomenuti i kako postoji manja razlika između B i $B_{mjereno}$ u rasponu brzine vjetra preko 8 m/s, ali je ta razlika rezultat padova napona i parazitnih otpora komponenti, zanemarenih izrazom (5.23).

Na slici 5.39 su prikazane statičke karakteristike za raspon napona U_{dc} 350 V - 450 V. Za snimanje ovih karakteristika, brzina vjetra je zadržana na iznosu od 9 m/s, pri kojem ne dolazi do zapiranja diode, te je napon U_{ac} reguliran na iznos od 230 V. Pokazalo se kako promjena iznosa napona U_{dc} u promatranom rasponu nije utjecala na snage WECS-a. S druge strane se s porastom ovog napona smanjila snaga punjenja baterija, ali i maksimalno dostupna izlazna snaga sustava. Do smanjenja snage punjenja baterije je došlo zbog smanjenja struja i_{L1} i i_{bat} te povećanja napona u_{pn} , što dovodi do promjene električnih gubitaka sustava (npr., sklopni gubitaka qZSI-ja). Smanjenje snage P_{maks} s povećanjem napona U_{dc} je pak izraženije a izravna je posljedica smanjenja struje I_{L1} uslijed povećanja napona U_{dc} uz istu ulaznu snagu. To znači da se zadržavanjem nižeg ulaznog napona qZSI-ja može postići veći raspon dostupne snage iz baterija. Treba naglasiti kako prenizak iznos napona može prouzrokovati demagnetizaciju SCIG-a.

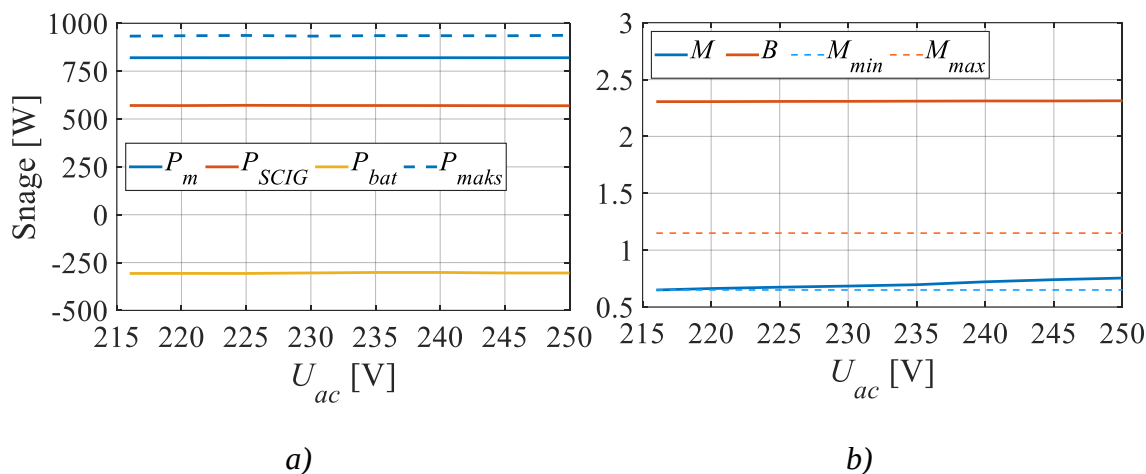


Slika 5.39 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon ulaznog istosmjernog napona ($v_v=9$ m/s, $U_{ac}=230$ V): a) WECS i qZSI snage i b) qZSI struje.

Statičke karakteristike za dani raspon napona U_{dc} su pokazale kako integrirani sustav WECS-qZSI može raditi stabilno u cijelom rasponu. Pritom se, ovisno o potrebama, ulazni napon može korigirati kako bi se umanjili gubici qZSI-ja ili povećala ukupna raspoloživa snaga.

Stabilan rad sustava se prema snimljenim statičkim karakteristikama može postići i za raspon izlaznog napona qZSI-ja. Za potrebe snimanja statičkih karakteristika ispitan je rad razmatranog sustava u rasponu napona U_{ac} 216 V - 250 V. Ulazni napon u_{dc} je pritom reguliran na konstantan iznos od 400 V a brzina vjetra zadržana na 9 m/s. Prikupljeni rezultati, prikazani na slici 5.40, pokazali su kako je promjena napona U_{ac} minimalno utjecala na rad sustava. Jedina veličina koja se zapravo mijenjala je indeks M , koji se očekivano povećavao s porastom napona.

Upravo je indeksom M uvjetovana najniža postignuta vrijednost napona od 216 V. Pritom iznosu napona, indeks M je pao na minimalno dopuštenu vrijednost. Treba naglasiti da takva radna točka predstavlja rubno područje rada uslijed relativno visoke ulazne snage, niske reference izlaznog napona i praznog hoda. Svakako, sustav je pokazao mogućnost rada u razumnom rasponu izlaznog napona. Ova se mogućnost primjerice može iskoristiti za rad u uvjetima pri kojim bi inače indeks M prelazio dozvoljene granice, tj., njome bi se eventualno mogao proširiti mogući radni raspon sustava.



Slika 5.40 Statičke karakteristike WECS-qZSI sustava za raspon izlaznog napona ($v_v=9$ m/s, $U_{dc}=400$ V): a) snage WECS-a i qZSI-ja; b) indeks modulacije i faktor pojačanja qZSI-ja.

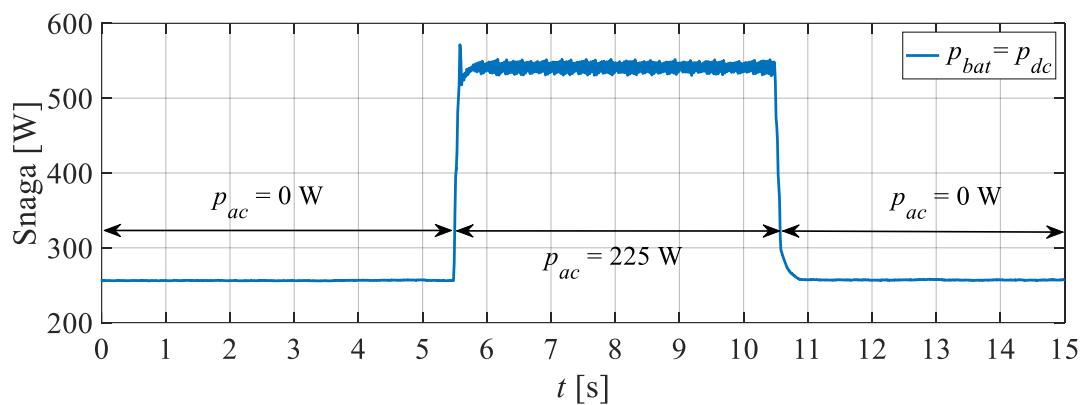
5.4.5. Rad sustava s nedovoljnom energijom vjetra

Kroz opis upravljačkog algoritma spomenuta je mogućnost rada sustava s nedovoljnom energijom vjetra. S obzirom na to da je u predloženom sustavu prisutan baterijski SPE, nameće se logičnim omogućiti napajanje trošila isključivo iz SPE-a u periodima kada vjetra ili uopće nema ili mu je brzina premala da bi se postigla neka konkretna snaga na izlazu WECS-a. Naime, u razmatranoj topologiji qZSI-ja, u kojoj su baterije povezane paralelno kondenzatoru C_2 (slika 5.24), rad sustava nije moguć bez dostupne energije iz WECS-a te je struja pražnjenja baterija ograničena ulaznom strujom qZSI-ja. Kako bi se postiglo napajanje trošila preko qZSI-ja samo iz baterija, potrebno ih je prespojiti na istosmjerni ulaz qZSI-ja. To odgovara konfiguraciji kakva je korištena za pokretanje, kada je sklopka na slici 5.24 u položaju 1.

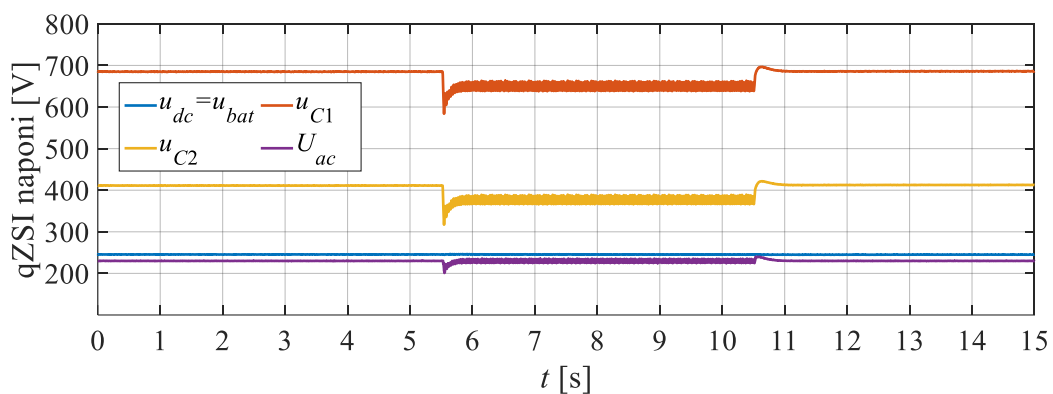
Baterije su u tom slučaju dakle povezane na ulaznu sabirnicu qZSI-ja, čije se mogućnosti naponskog pojačanja pritom koriste za napajanje trošila.

Budući da su WECS i pripadajući poluvodički energetske pretvarač isključeni, cjelokupno upravljanje je u ovom slučaju izvedeno preko MicroLabBoxa. Ranije su spomenute regulacijske petlje, istaknute ljubičastom bojom na donjem dijelu slike 5.25, koje su za to korištene a aktiviraju se prebacivanjem sklopki S4 i S5 u položaj 2. Regulacijska petlja izvedena preko sklopke S4 se odnosi na regulaciju napona trošila U_{ac} , koja je u ovom slučaju izvedena s faktorom D_0 kao upravljačkom veličinom. Kako je ulazni napon određen naponom baterija i nije ga potrebno regulirati $u_{dc} = u_{bat}$, dva stupnja slobode upravljanja qZSI-jem ovdje nisu korištena i indeks amplitudne modulacije M je postavljen na konstantan iznos. Pritom je korištena minimalna dozvoljena vrijednost indeksa M od 0,65 kako bi se omogućilo najveće moguće trajanje ST stanja, a time i naponsko pojačanje. Naponsko pojačanje qZSI-ja je tu ključno s obzirom na relativno niski napon baterija od približno 250 V i napon trošila koji je reguliran na efektivnu vrijednost od 230 V. Sustav može raditi u ovakvom režimu dokle god su baterije iznad minimalno dozvoljenog SOC-a i brzina vjetra manja od 6 m/s.

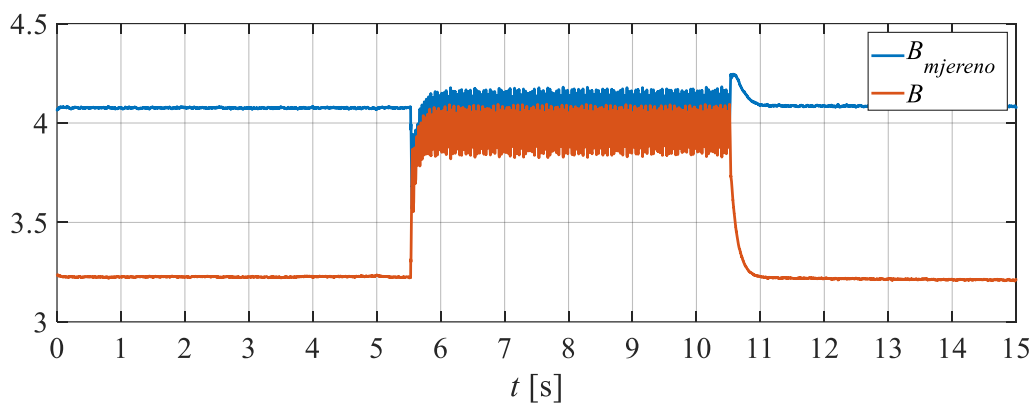
Na slici 5.41 su prikazani dinamički odzivi promatranih veličina sustava za režim rada bez vjetra. Dinamički odzivi su snimljeni kroz kratki eksperiment u kojem je izvedeno uključanje i isključenje trošila kako bi se pokazala funkcionalnost sustava. Prikazani odzivi započinju u stacionarnom stanju bez priključenog trošila na izlazu qZSI-ja. Bez priključenog trošila, sva snaga koja dolazi iz baterija (slika 5.41a) pritom predstavlja gubitke sustava. U trenutku $t \approx 5,5$ s uključuje se trošilo, što rezultira manjim propadom napona u_{C1} i u_{C2} . Manja prijelazna pojava je vidljiva i na reguliranom naponu U_{ac} , koji je reguliran na zadanom iznosu. Sustav nastavlja s radom i nakon isključenja trošila u trenutku $t \approx 10,5$ s. Uslijed relativno male struje baterija, odnosno ulazne struje qZSI-ja ($i_{bat} = i_{L1}$), u periodima s isključenim trošilom dolazi do zapiranja diode D_1 u aktivnim sklopnim stanjima. To se očituje odstupanjem mjerene vrijednosti naponskog pojačanja $B_{mjereno}$ od zadanog iznosa B , što je prikazano na slici 5.41c. Na toj slici se može vidjeti kako se uključanjem trošila i, posljedično, porastom struje i_{L1} qZSI vraća u normalno radno stanje. Iz prikazanih odziva može se konstatirati kako sustav može po potrebi raditi bez dostupne energije vjetra. Treba naglasiti da uz primjenu ovdje prikazanog upravljačkog algoritma nije moguće prijeći u ili iz ovog režima rada bez prethodnog privremenog isključenja sustava.



a)



b)



c)

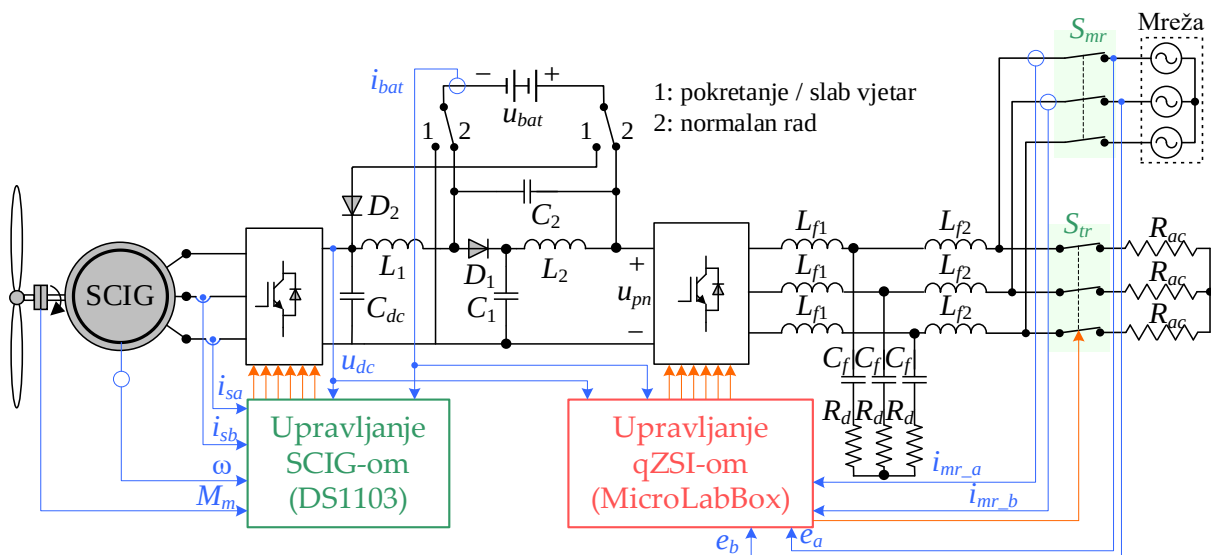
Slika 5.41 Dinamički odzivi na skokovitu promjenu opterećenja sustava u režimu rada bez vjetra: a) snaga baterije; b) naponi qZSI-ja; c) naponsko pojačanje

5.5. Mogućnost rada u spoju s mrežom

U ovoj fazi istraživanja bio je cilj pokazati kako je moguće izvesti sustav napajanja s qZSI-jem i WECS-om s asinkronim generatorom. Upravo to je i dokazano s prethodno prikazanim sustavom, što je bila osnova za daljnje proširenje sustava dodavanjem FN izvora i realizacijom svih funkcionalnosti koje sustav čine mikromrežom. Jedna od ključnih funkcionalnosti je i mogućnost rada sustava u spoju s mrežom. Iako je ta sposobnost temeljito ispitana i pokazana u kontekstu konačne mikromreže predstavljene u 6. poglavlju, principijelno je ispitana i u ovoj fazi istraživanja. Pritom nisu rađene temeljite i sveobuhvatne analize sustava, upravljačkih strategija ili EMS-a, već je samo pokazana osnovna mogućnost rada. Osim toga, modifikacije sustava za potrebe povezivanja s mrežom nisu izravno povezane s implementacijom WECS-a te ih kao takve nije nužno detaljno prikazivati u okviru integracije WECS-a s qZSI-jem.

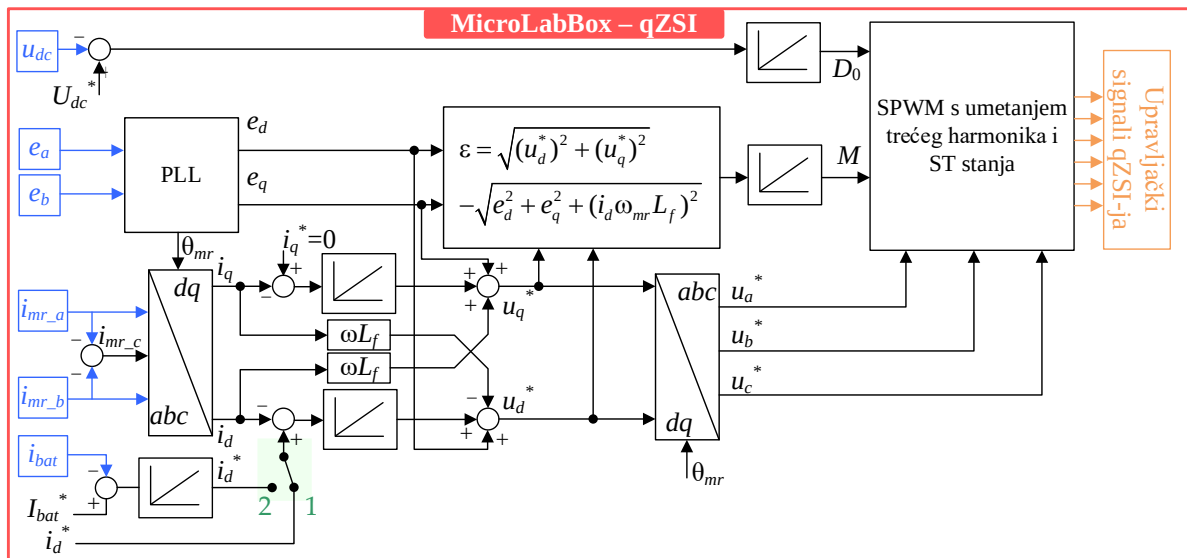
5.5.1. Konfiguracija sustava i prilagodbe upravljačkog algoritma

Da bi sustav mogao raditi u spoju s mrežom, postojeći sustav izveden za otočni režim rada je proširen na način da je izlaz iz qZSI-ja (iza filtra) preko trolejne relejne sklopke povezan s mrežom, kako je prikazano na slici 5.42. U takvoj konfiguraciji, povezana trošila se karakteriziraju kao lokalna trošila mikromreže jer su povezana na izlaz qZSI-ja paralelno s mrežom i mogu se uključivati/isključivati neovisno o režimu rada. Dodatno su uvedena dva mjerna senzora napona, u dvije faze na mrežnoj strani relejne sklopke, te dva strujna senzora. Ti su senzori potrebni za sinkronizaciju s mrežom i regulaciju toka energije u mjestu PCC-a.



Slika 5.42 Konfiguracija integriranog WECS-qZSI sustava u spoju s mrežom

Osim što su izvedene nadogradnje fizičkog sustava, za povezivanje s mrežom je bilo potrebno korigirati i upravljački algoritam. To se prvenstveno odnosi na dio upravljačkog algoritma koji je zadužen za upravljanje qZSI-jem, koji se u ovom slučaju koristi kao IFC pretvarač. Upravljanje WECS-om je ostalo nepromijenjeno. Kako u spoju s mrežom nema potrebe za regulacijom izlaznog napona, SPWM i indeks modulacije M (prikazani u donjem dijelu slike 5.25) sada su korišteni za regulaciju struje prema mreži. Kao što je prikazano na slici 5.43, izvedena je paralelna regulacija d i q komponenti struje mreže s PI regulatorima i referentnim naponima u_d i u_q kao upravljačkim veličinama. Ovakvom izvedbom regulacijskog kruga zapravo se postiže posredno upravljanje izlaznom snagom jer su struje i_d i i_q proporcionalne izlaznoj radnoj i jalovoj snazi. Referenca struje i_q je pritom postavljena na 0 A kako bi se s mrežom razmjenjivala isključivo radna snaga. Da bi se sinkrono rotirajući koordinatni sustav, odnosno d i q komponente struje i napona mogle pravilno orijentirati, potrebno je promatrati fazni kut vektora mrežnog napona. Za povezivanje poluvodičkih energetskih pretvarača na mrežu uz ovakve i slične upravljačke algoritme, fazni kut vektora mrežnog napona je potrebno pratiti cijelo vrijeme rada, a ne samo pri sinkronizaciji i povezivanju kao kod nekih drugih sustava napajanja ili izvora. U predloženom algoritmu upravljanja je to izvedeno fazno zatvorenom petljom (PLL, od *engl.* phase locked loop), koja za vrijeme rada aktivno prati fazni kut mreže θ_{mr} , nužan za izvođenje transformacija iz abc u dq koordinatni sustav i obratno. Točan kut korišten pri transformaciji osigurava sinkronizaciju generiranog napona na izlazu qZSI-ja s naponom mreže.



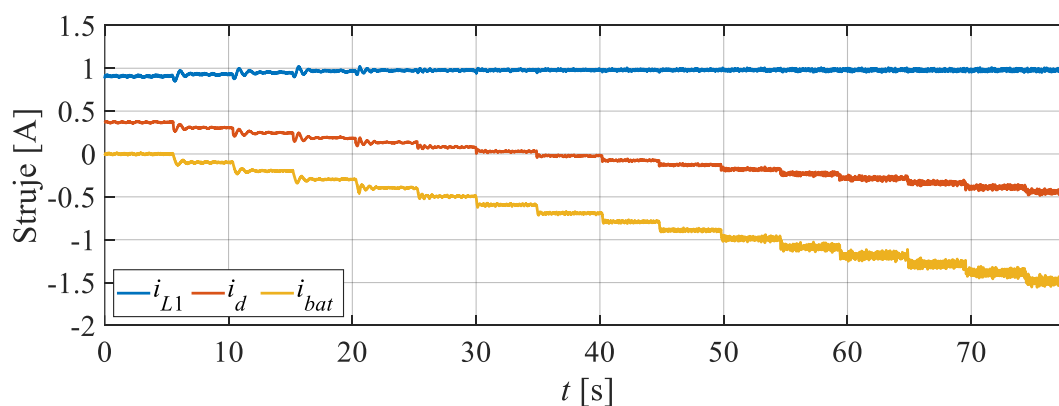
Slika 5.43 Struktura dijela upravljačkog algoritma integriranog WECS-qZSI sustava razvijenog za rad u spoju s mrežom

Uz to što je regulacija izlaznog napona qZSI-ja zamijenjena regulacijom izlazne struje, na tom je temelju izvedena i kaskadna regulacija struje baterija. Regulacija struje baterija u otočnom režimu rada je izvedena na način da se smanjuje izlazna snaga vjetroturbine kako bi se sukladno bilanci snage u sustavu smanjila i snaga punjenja baterija. Takvo upravljanje baterijama je pokazano kao funkcionalno, ali je ograničeno samo na mogućnost smanjenja intenziteta ili potpunog prestanka punjenja baterija. U spoju s mrežom otvara se mogućnost raspolaganja energijom baterija razmjenom energije s mrežom, bez potrebe za smanjenjem snage iz WECS-a ili isključenjem trošila. Ako se uzme da s jedne strane WECS radi u radnoj točki s konstantnom snagom, uz zadani iznos snage trošila, snaga koja se predaje ili uzima iz baterija je proporcionalna snazi koja se razmjenjuje s mrežom. Na tom principu je i izvedena regulacija struje baterija s PI regulatorom i referencom d komponente struje mreže (i_d^*) kao upravljačkom veličinom. Potrebno je naglasiti da se vrijednost mrežne struje u ovom sustavu može slobodno podešavati na pozitivne ili negativne iznose, neovisno o trenutnoj snazi WECS-a ili trošila. Time se omogućuje punjenje i pražnjenje baterija bez obzira na radne uvjete, dokle god je sustav povezan s mrežom. S obzirom na to da je trošilo spojeno paralelno s mrežom, u slučaju promjene njegove snage, a uz aktivnu regulaciju struje baterije, mrežna struja će se automatski prilagoditi. Na taj se način, pri konstantnoj izlaznoj snazi qZSI pretvarača, razlika u snazi trošila kompenzira razmjenom snage s mrežom.

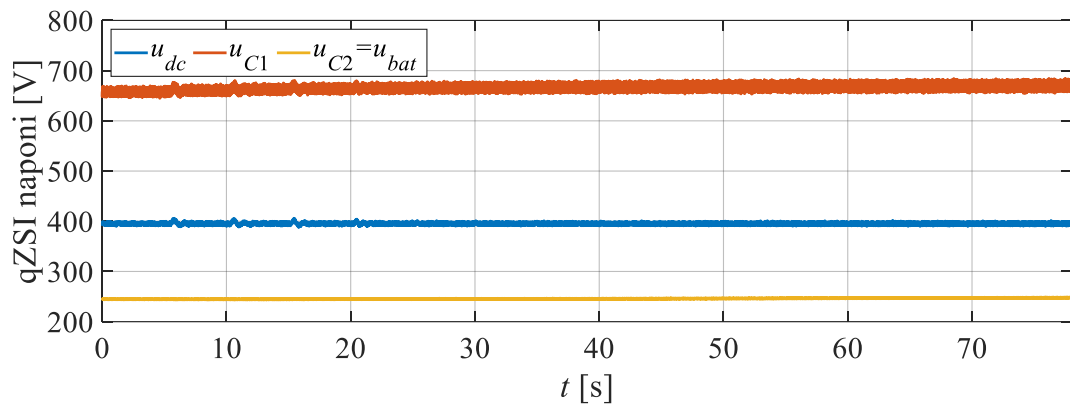
5.5.2. Analiza dinamičkih režima u spoju s mrežom

U nastavku su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja rada integriranog WECS-qZSI sustava u spoju s mrežom. Pokazani su relevantni aspekti rada s mrežom koji kao takvi nisu mogli biti pokazani u otočnom režimu rada. To se odnosi na kaskadnu regulaciju struje baterije, s unutarnjom petljom regulacije struje mreže, te dinamički odziv sustava pri uključenju i isključenju trošila. Ispitivanja su provedena na istoj laboratorijskoj maketi na kojoj su izvedena ispitivanja za otočni režim rada.

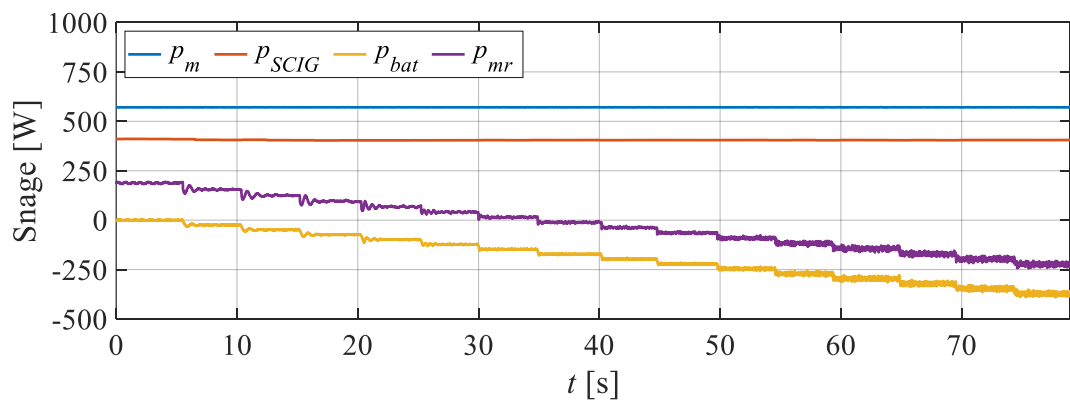
Prva skupina rezultata je prikazana na slikama 5.44 i 5.45 a odnosi se na eksperiment kojim je ispitana regulacija struje baterija, a time i struje mreže i_d . U okviru eksperimenta je za stacionarne radne uvjete, fiksnu brzinu vjetra od 8 m/s i bez uključenog trošila, pokazana funkcionalnost sustava pri postepenoj promjeni reference struje baterija od 0 A do $-1,5$ A. Referenca je mijenjana u koracima od 0,1 A, a negativan predznak struje i ovdje indicira punjenje baterija. Iz prikazanih odziva (slika 5.44) se može vidjeti kako mjerena struja baterije prati zadane vrijednosti reference. Jednako se ponaša i struja i_d , koja je prema ranije opisanom konceptu upravljačka veličina regulatora struje i_{bat} . U obje struje se vide manja nadvišenja i prigušene oscilacije pri skokovitim promjenama vrijednosti, što se ponajviše odnosi na početni period eksperimenta, a kasnije se promjena vrijednosti postiže bez vidljivih nadvišenja i oscilacija. U početnom periodu je zapravo u manjoj mjeri prisutna pojava zapiranja diode, što rezultira tromijim odzivom na promjenu indeksa modulacije. Za isti period se mogu na slici 5.45a vidjeti i manje oscilacije u naponima qZSI-ja pri promjeni reference struje baterija.



Slika 5.44 Dinamički odzivi struja pri skokovitim promjenama reference struje punjenja baterija



a)



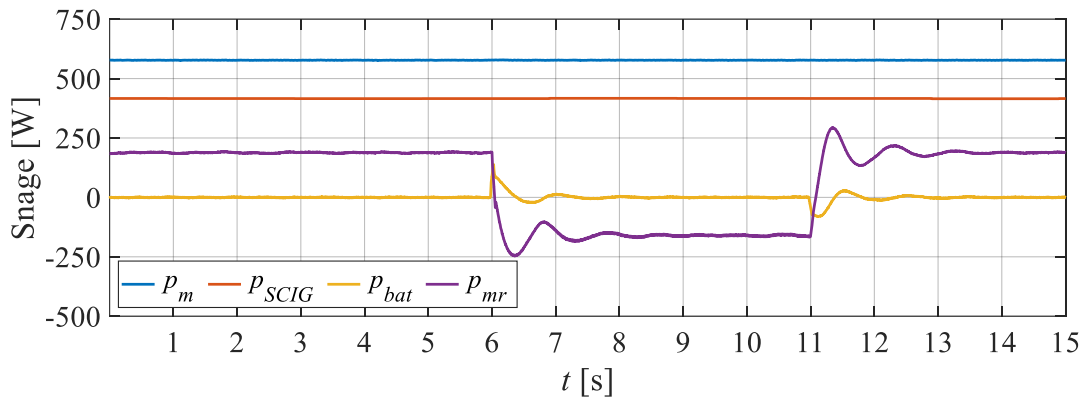
b)

Slika 5.45 Dinamički odzivi napona a) i snaga b) pri skokovitim promjenama reference struje punjenja baterija

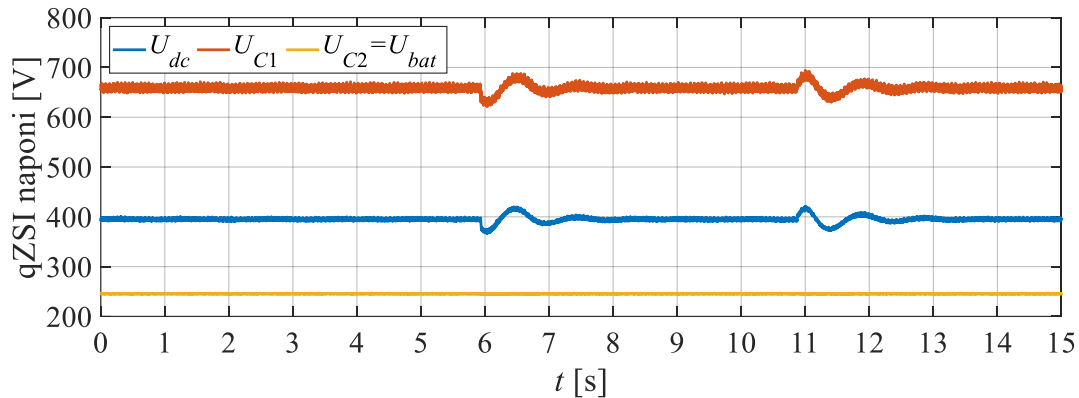
Kako je eksperiment izveden uz relativno nisku brzinu vjetra (snaga SCIG-a je iznosila približno 410 W), kontinuiranim povećanjem struje punjenja baterija u trenutku $t \approx 40$ s baterije se počinju puniti iz mreže. Pri konačnoj struji baterija od $-1,5$ A, baterije se pune snagom od približno 370 W, a od toga se približno 220 W opskrbljuje iz mreže. Time je pokazana funkcionalnost predloženog koncepta upravljanja u spoju s mrežom koji omogućuje punjenje baterija bez obzira na ulaznu snagu qZSI-ja. Struja punjenja baterija je zapravo ograničena samo iznosom maksimalno dozvoljene struje kroz zavojnicu L_2 . Budući da prema izrazima srednjih vrijednosti vrijedi $I_{L2} = I_{L1} - I_{bat}$, potrebno je paziti da ne dođe do zasićenja zavojnice L_2 , čime bi se smanjila vrijednost induktiviteta i posljedično povećala valovitost struje kroz zavojnicu L_2 .

Uz konfiguraciju sustava i mjernih senzora izvedenih prema slici 5.42, mreža je na qZSI povezana paralelno s trošilom te se bez obzira na to je li trošilo uključeno ili ne može neovisno regulirati struja, tj., snaga koja se injektira u mrežu. Da bi se pokazala funkcionalnost i

fleksibilnost rada sustava s trošilom i mrežom, izveden je eksperiment uključenja i isključenja trošila. Snimljeni rezultati su prikazani na slici 5.46 a predstavljaju odzive snaga i napona za vrijeme eksperimenta. Eksperiment je izveden uz konstantnu brzinu vjetra od 8 m/s i aktivnu regulaciju struje baterija s referencom struje postavljenom na iznos od 0 A. Prije uključenja trošila, sustav radi uz ulaznu snagu qZSI-ja približnog iznosa 415 W, od čega 185 W prenosi u mrežu. Uključenjem trošila snage 300 W u trenutku $t \approx 6$ s, mijenja se predznak snage mreže p_{mr} , dok snage WECS-a i baterija ostaju nepromijenjene. U tom se trenutku dakle dio snage trošila opskrbljuje iz mreže. Trošilo se ponovno isključuje u trenutku $t \approx 40$ s kada se iznos snage p_{mr} vraća na početnu vrijednost.



a)



b)

Slika 5.46 Dinamički odzivi a) snaga i b) qZSI napona pri uključenju i isključenju trošila u radu sa spojem na mrežu

Na odzivima napona na slici 5.46b mogu se vidjeti tek manje oscilacije u trenucima uključenja i isključenja trošila. Nešto veće prigušene oscilacije su pak vidljive u odzivima snaga p_{mr} i p_{bat} . Te oscilacije su primarno posljedica oscilacija u reguliranim strujama i_d i i_{bat} , odnosno podešenja pripadajućih regulatora i inherentne dinamike sustava. S druge strane, nije vidljiv nikakav utjecaj na rad WECS-a kao primarnog izvora napajanja. Treba naglasiti da je cilj

prikazanog eksperimenta i izvedenog upravljačkog algoritma bio pokazati funkcionalnost predloženog integriranog WECS-qZSI sustava i načela upravljanja. To je i postignuto te su na ovom temelju rađene daljnje nadogradnje, od kojih je jedna upravo unaprjeđenje upravljačkog algoritma s ciljem stabilnijeg rada i u konačnici robusnijeg sustava.

6. PREDLOŽENA MIKROMREŽA S IZMJENJIVAČEM KVAZI Z-TIPA I FOTONAPONSKIM I VJETROENERGETSKIM IZVORIMA

U prethodnim poglavljima ovog doktorskog rada su detaljno prikazani i opisani različiti aspekti svih ključnih dijelova mikromreže kakva je u konačnici realizirana u ovom doktorskog radu. Posebna važnost je pritom posvećena dijelovima koji nisu otprije poznati iz literature već su u okviru ovog istraživanja prvi puta predloženi ili unaprijeđeni. To se odnosi na specifične konfiguracije sustava napajanja s WECS-om i qZSI-jem te na napredne optimizacijske algoritme i EMS. Cilj ovog poglavlja je prikazati predloženu funkcionalnu mikromrežu i razvijene pripadajuće upravljačke algoritme. Predložena mikromreža predstavlja konfiguracijsku nadogradnju integriranog WECS-qZSI sustava iz prethodnog poglavlja, gdje je na ulaz qZSI-ja dodatno povezan i FN izvor. Konfiguracijski su ispunjeni svi preduvjeti nužni za funkcionalnosti koje sustav napajanja čine mikromrežom, a tu ključnu ulogu imaju upravljački algoritmi. Upravljački algoritmi su navedeni u množini jer su zapravo u konačnici izvedena dva upravljačka algoritma koja predstavljaju dva pristupa u postizanju učinkovitog upravljanja. S obzirom na njihovu strukturu, u okviru ovog istraživanja su za upravljanje mikromrežom izvedena sljedeća dva upravljačka algoritma:

- Upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora
- Upravljački algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

U prvom su slučaju za učinkovit rad WECS-a korišteni FL MPPT algoritmi, opisani u poglavlju 5.3.3. Pritom je za optimizaciju i vjetroturbine i SCIG-a kao referentna veličina korištena ulazna snaga qZSI-ja (p_{dc}). Ista snaga je korištena i za optimizaciju FN izvora, za koji je implementiran P&O MPPT algoritam. Korištenjem snage p_{dc} za sva tri MPPT algoritma otklonjena je potreba za mjerenjem izlazne struje FN izvora te brzine vrtnje (ω) i mehaničkog momenta (M_m) SCIG-a u svrhu optimizacije, ali je zato složenija koordinacija pojedinih MPPT algoritama. Budući da sva tri MPPT algoritma koriste istu referentnu vrijednost, nije ih moguće izvoditi istovremeno. Drugi upravljački algoritam, s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora, omogućuje istovremeni rad MPPT algoritama, ali po cijenu većeg broja senzora.

Učinkovito upravljanje postignuto predloženim algoritmima te sama konfiguracija ovdje razmatrane mikromreže čine je jedinstvenom te je kao takva po prvi puta izvedena u okviru istraživanja na kojem je utemeljen ovaj doktorski rad. Izvedba i analiza ove mikromreže i upravljačkog algoritma je dijelom već objavljena kroz znanstveni rad [170], a dio je po prvi put

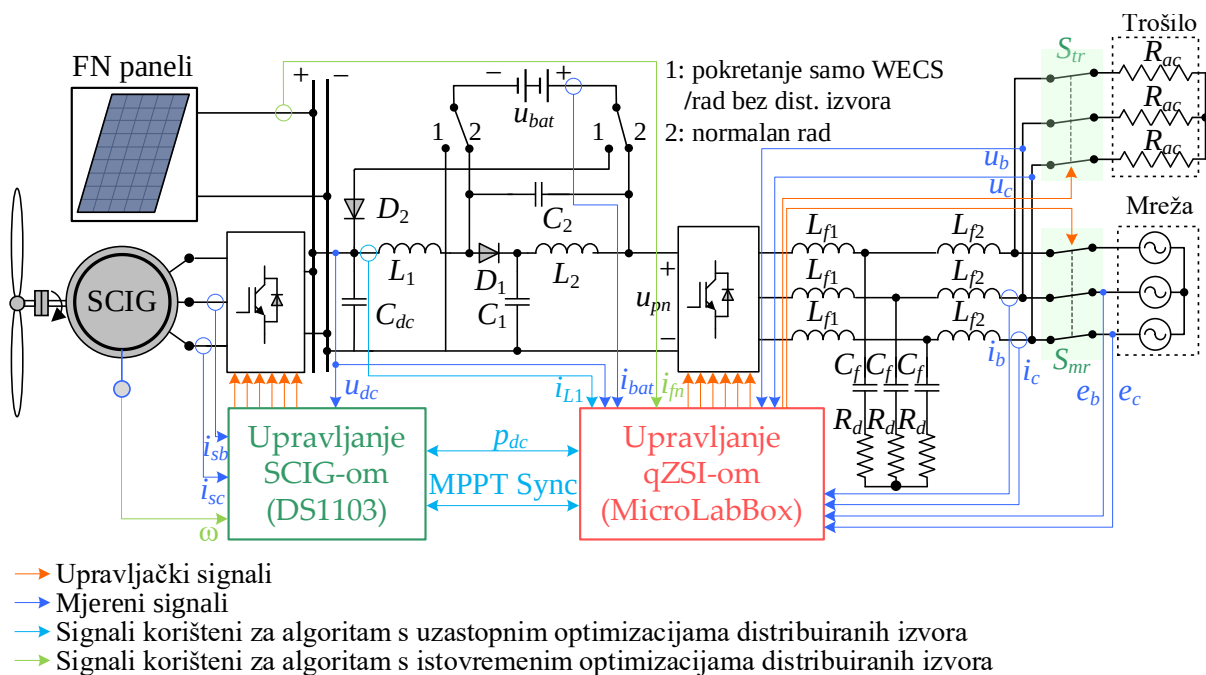
prikazan u okviru ovog poglavlja doktorskog rada. U ovom poglavlju je najprije prikazana konfiguracija mikromreže i navedene su ključne komponente. Većina komponenti je već ranije detaljno obrađena pa je naglasak pritom stavljen na segmente koji nisu ranije opisivani i na specifičnosti cjelokupne mikromreže. Zatim su prikazane strukture i načela upravljanja predloženih upravljačkih algoritama, gdje su detaljno opisani principi implementirane upravljačke strategije i EMS-a. Nakon toga su prikazani i opisani eksperimentalno snimljeni rezultati kojima je dokazana funkcionalnost predloženog upravljanja i cjelokupne mikromreže. To uključuje i otočni režim rada i rad u spoju s glavnom mrežom. U preostalim potpoglavljima su prikazane mogućnosti regulacije struje baterija, postupci prelazaka između otočnog režima rada i rada u spoju s mrežom. Konačno, prikazane su statičke karakteristike kojima je evaluiran rad upravljačkih algoritama te analiza korisnosti i raspodjele tokova energije mikromreže.

6.1. Konfiguracija predložene mikromreže

Mikromreža je u slučaju implementacije oba upravljačka algoritma konfiguracijski jednaka te je sukladno prikazanoj konfiguraciji na slici 6.1 čine: dva distribuirana obnovljiva izvora energije (WECS i FN izvor), qZSI, baterijski SPE i lokalna trošila. Vjetroagregat je i ovdje povezan na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja preko upravljivog poluvodičkog energetskeg pretvarača, kao i kod integriranog WECS-qZSI sustava. Tu je riječ o već opisanom vjetroagregatu sa SCIG-om. S druge strane, FN izvor čini set od 16 serijski povezanih FN panela, koji su povezani izravno na istosmjernu sabirnicu qZSI-ja. Već je spomenuto u poglavlju 0 kako se qZSI u literaturi najčešće koristi za sustave napajanja iz FN izvora. To je ponajviše zbog relativno malog napona tih izvora, odnosno zbog mogućnosti naponskog pojačanja qZSI-ja, čime se otklanja potreba za dodatnim istosmjernim pretvaračem. Osim toga, povezivanjem izravno na istosmjerni ulaz qZSI-ja, dodatni stupanj slobodne upravljanja qZSI-jem se može iskoristiti za podešavanje radne točke FN izvora. Treba naglasiti kako izravno povezivanje FN izvora na ulaznu sabirnicu qZSI-ja ne bi bilo izvedivo u slučaju da je i WECS na qZSI povezan izravno, bez dodatnog poluvodičkog pretvarača.

Preostale komponente sustava su povezane kao i kod integriranog WECS-qZSI sustava. Baterijski set od 20 serijski povezanih baterija je povezan paralelno s kondenzatorom C_2 u impedancijskoj mreži qZSI-ja. I ovdje je izvedena mogućnost preklopa na ulaznu sabirnicu za

potrebe rada bez dostupne energije iz distribuiranih izvora ili za pokretanje bez dostupne energije iz FN izvora. Naime, pokretanje samo s FN izvorom se izvodi jednostavnije negoli samo s WECS-om te nema potrebe za preklapanjem baterija kod pokretanja u tom slučaju. Na stezaljkama FN izvora je, uz odgovarajuću razinu sunčevog zračenja, i prije uključjenja sustava prisutan potreban napon te je porast izlazne snage po uključanju gotovo trenutno. Izlaz qZSI-ja je preko LCL filtra i dvije trolne relejne sklopke povezan s mrežom i lokalnim trošilima. Upravljanje je, kao i kod integriranog WECS-qZSI sustava, izvedeno razvojnim sustavom MicroLabBox i upravljačkom pločom DS1103. MicroLabBox je ponovno korišten za upravljanje qZSI-jem te relejnim sklopkama trošila i mreže, dok je upravljačka ploča DS1103 korištena za upravljanje pretvaračem zaduženim za WECS. Na slici 6.1 su zasebnim bojama prikazani mjereni i upravljački signali, odnosno ulazni i izlazni signali upravljačkih komponenti. Signali koji su korišteni samo u jednom od dvaju predloženih upravljačkih algoritama su također naznačeni zasebnim bojama, kako je navedeno u legendi.



Slika 6.1 Konfiguracija predložene mikromreže utemeljene na qZSI-ju, s dva distribuirana izvora i baterijskim SPE-om

Prikazana konfiguracija dakle predstavlja mikromrežu koja može funkcionirati kao potpuno neovisna jedinstvena cjelina, a istovremeno se može povezati za rad u spoju s glavnom mrežom. Integracijom FN izvora i baterija izravno u qZSI minimiziran je broj potrebnih poluvodičkih energetskih pretvarača. U sinergiji s predloženim upravljačkim algoritmima, takav pristup unatoč smanjenom broju pretvarača ne zahtijeva kompromise u smislu mogućnosti upravljanja

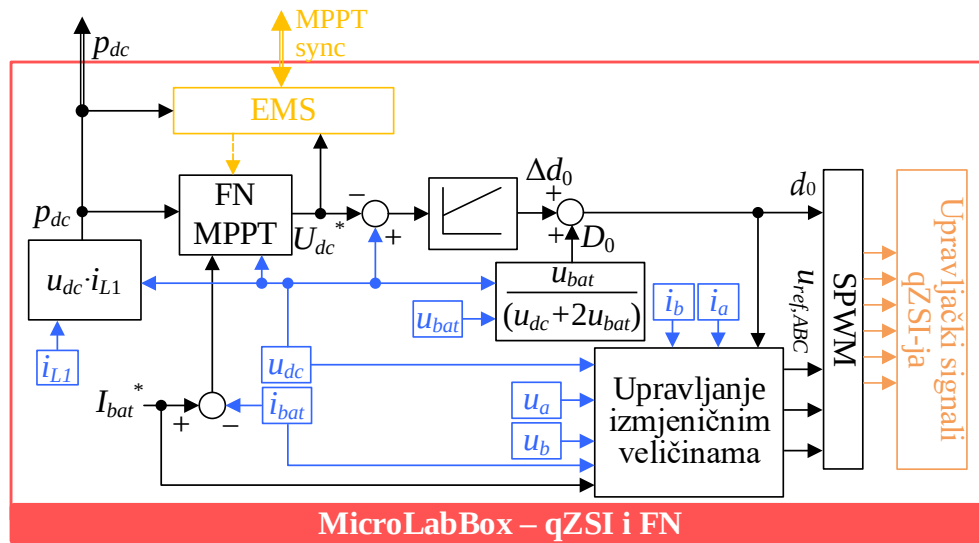
i raspolaganja energijom, kako iz baterija tako i iz distribuiranih izvora. Umanjivanje broja pretvarača doprinosi jednostavnosti i nižoj cijeni, što su ključni aspekti sustava manjih snaga kao što je ovaj. Značajna konfiguracijska specifičnost predložene mikromreže je i integracija WECS-a zasnovanog na SCIG-u. Implementacija SCIG-a s qZSI-jem je sama po sebi specifična, što je detaljno razrađeno u prethodnom poglavlju, ali nudi prednosti poput manjeg kapitalnog troška WECS-a te veće pouzdanosti i manjih dimenzija generatora po jedinici snage. Iako SCIG zahtijeva implementaciju dodatnog poluvodičkog energetskeg pretvarača, to bi bilo nužno i u slučaju primjene drugog tipa generatora s obzirom na to da je FN sustav izravno povezan na qZSI. Već je pokazano i kako se može izvesti pokretanje SCIG-a unatoč ograničenjima qZSI-ja po pitanju dvosmjernog toka energije i zahtjevima magnetiziranja SCIG-a pri pokretanju. U konačnici, predložena konfiguracija mikromreže omogućuje napajanje trošila i mreže iz distribuiranih izvora i baterija, napajanje trošila iz mreže te punjenje baterija iz izvora i/ili iz mreže.

6.2. Upravljačke strategije i sustav raspolaganja energijom predložene mikromreže

6.2.1. Struktura upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Za predloženu mikromrežu je cjelokupna upravljačka struktura, sukladno ranije pokazanoj konfiguraciji sustava, podijeljena na dvije zasebne cjeline koje se izvode na MicroLabBoxu i upravljačkoj ploči DS1103. Radi jednostavnosti praćenja i analize, te dvije funkcionalne cjeline su u nastavku prikazane na zasebnim slikama i zasebno su objašnjene. Isto tako, određeni dijelovi upravljačkog algoritma su smješteni u podsustave te su, ako nisu već ranije objašnjeni, ovdje dodatno pojašnjeni. Na slici 6.2 je prikazan dio upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, koji je zadužen za upravljanje qZSI-jem. Jednako kao u slučaju integriranog WECS-qZSI sustava, upravljačke funkcije kojima se u konačnici upravlja radom qZSI-ja i relejnim sklopkama mreže i lokalnog trošila su izvedene na MicroLabBoxu. Upravljanje qZSI-jem je izvedeno na istom načelu kao i kod integriranog WECS-qZSI sustava. Iskorištena su oba dostupna stupnja slobode upravljanja, gdje je faktor D_0 korišten za regulaciju ulaznog napona u_{dc} , a indeks modulacije za regulaciju izlaznih izmjeničnih napona i struja. S

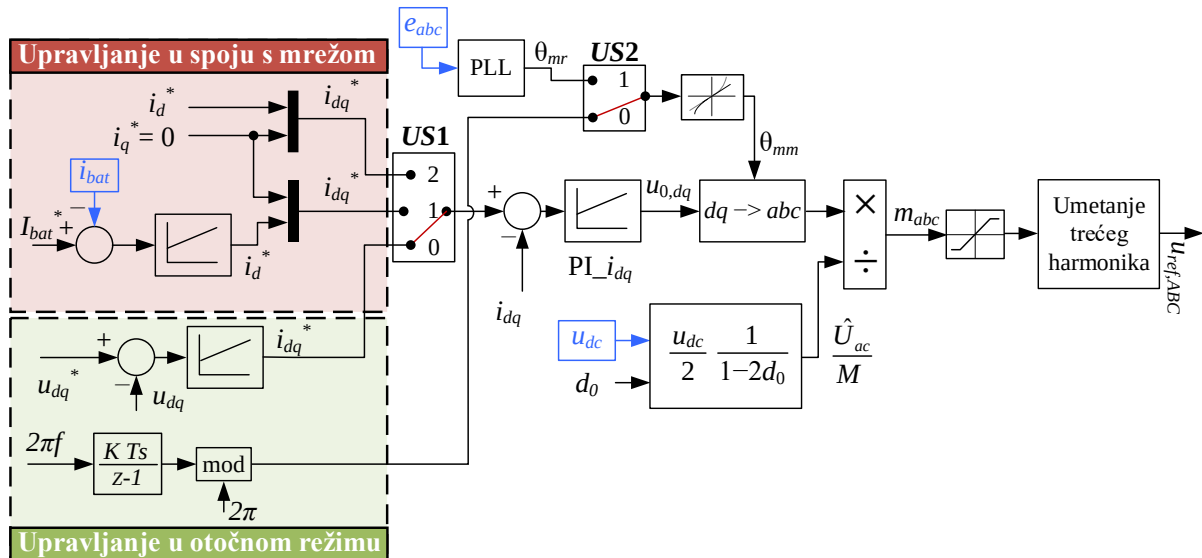
FN izvorom povezanim izravno na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja, regulacija napona u_{dc} je ujedno i regulacija napona FN izvora, tj., njime se korigira radna točka FN izvora. Prema tome je referenca napona u_{dc} određena MPPT algoritmom FN izvora kako bi se maksimalno iskoristila dostupna energija Sunca. Ovaj MPPT algoritam je dodatno opisan u kontekstu EMS-a u nastavku poglavlja. Sama regulacija napona u_{dc} je izvedena PI regulatorom s unaprijednom petljom, kojom se na temelju izraza (3.15) zadaje približan potreban iznos faktora D_0 . Time se postiže brži odziv i ublažavaju prijelazne pojave.



Slika 6.2 Struktura dijela upravljačkog algoritma mikromreže s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, zaduženog za upravljanje qZSI-jem i FN izvorom

Za otočni režim rada, regulacija struje baterije je izvedena kroz MPPT algoritam FN izvora, koji odstupa od točke maksimalne snage s ciljem postizanja zadane struje baterije. To je isti princip upravljanja bilancom snage po kojemu je i za integrirani WECS-qZSI sustav izvedena regulacija struje baterija u otočnom režimu rada, samo što se tamo radilo o odstupanju od točke maksimalne snage vjetroturbine. Dakle uz konstantnu snagu trošila, promjenom ulazne snage qZSI-ja korigira se snaga baterija. Budući da je ovdje razmatrani FN izvor po snazi dominantan u odnosu na WECS, ovdje ga ima više smisla koristiti za ovu potrebu. Osim toga, odziv FN izvora je značajno brži nego odziv vjetroturbine, što znači da se regulacija može brže izvesti. Regulacija struje baterije u spoju s mrežom se regulira posredno, regulacijom izlazne struje izmjenjivača i_d . Ta i druge regulacijske petlje zadužene za upravljanje izlaznim izmjeničnim veličinama, kako u otočnom tako i u režimu rada s mrežom, su radi jednostavnosti izvedene unutar podsustava *Upravljanje izmjeničnim veličinama* (slika 6.2), čija je struktura detaljnije prikazana na slici 6.3.

Upravljanje izmjeničnim veličinama mikromreže je prethodno – u algoritmu korištenom za integrirani WECS-qZSI sustav (slika 5.43) – bilo izvođeno uz korištenje zasebnih PI regulatora za otočni režim rada i rad u spoju s mrežom, koji su na izlazu generirali indeks M kao upravljački signal. Prilikom svakog prelaska između radnih režima bilo je potrebno aktivirati jedan, a deaktivirati drugi PI regulator, što je potencijalno moglo dovesti do izraženijih prijelaznih pojava tijekom prelaska između radnih režima ili čak rezultirati isključenjem sustava. Kako bi se to izbjeglo, regulacijski sustav je modificiran na način da su potpuno uklonjeni PI regulatori s indeksom M kao upravljačkom veličinom, koja je sada implicitno sadržana u jednadžbama modificiranog algoritma. U modificiranom sustavu, u oba radna režima koriste se PI regulatori d i q komponenti izlazne struje izmjenjivača. Prelaskom između radnih režima samo se promjenom položaja upravljačke sklopke $US1$ mijenja izvor referenci struja i_d i i_q . Naime, u radu sa spojem na glavnu mrežu, sklopka $US1$ se može nalaziti u položajima 1 ili 2. U položaju 2, reference struja i_d i i_q se zadaju ručno ili iz nekog drugog proizvoljnog izvora. Pritom je referenca struje i_q postavljena na iznos 0 A kako bi se iz qZSI uzimala samo radna snaga. U položaju 1, struja i_q je ponovno postavljena na iznos 0 A, a referenca struje i_d je zadana na izlazu regulatora struje baterija. Tu je dakle riječ o spomenutom principu regulacije gdje se uz zadani iznos snage iz izvora korigira izlazna struja qZSI-ja i_d (koja je proporcionalna radnoj snazi) tako da se po bilanci snaga posredno korigira i struja (snaga) baterija.

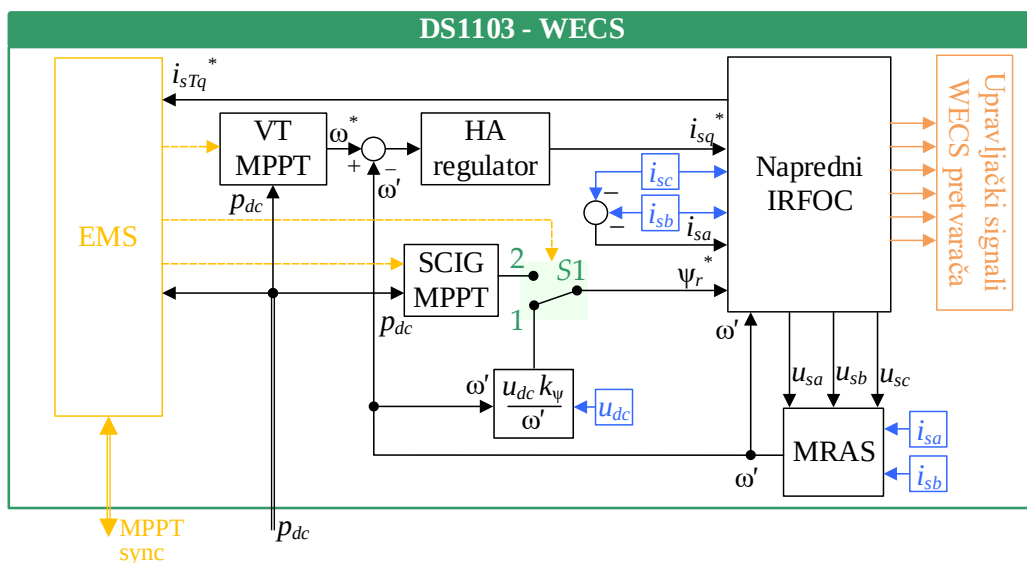


Slika 6.3 Struktura podsustava za upravljanje izlaznim izmjeničnim veličinama qZSI-ja

U otočnom režimu rada, upravljačka sklopka $US1$ je postavljena u položaj 0. U tom slučaju su reference struja i_d i i_q zadane kao izlazne veličine regulatora napona u_d i u_q koji predstavljaju d

i q komponente napona trošila. Te komponente napona su regulirane dvama PI regulatorima, s tim da je vrijednost napona u_q postavljena na 0 V, a napona u_d na željenu amplitudu izlaznog napona qZSI-ja (tipično $230 \cdot \sqrt{2}$). Ovakva izvedba je praktična jer nema potrebe za isključenjem i uključenjem regulatora izlaznih struja pri prelascima između režima. Osim toga, s regulatorima dq struja, koji su uključeni bez obzira na režim rada, lakše se izvodi sinkronizacija s mrežom. Fazni kut izlaznih napona qZSI-ja, tj., napona izmjenične sabirnice mikromreže, je definiran kutom θ_{mm} koji se koristi pri transformaciji upravljačkih naponskih signala $u_{0,dq}$ iz sinkrono rotirajućeg dq u trofazni abc koordinatni sustav. U otočnom režimu rada, kut θ_{mm} je određen na temelju referentnih u_d i u_q vrijednosti uz željenu frekvenciju izlaznog napona ($2\pi f$). Pri sinkronizaciji s mrežom, prebacivanjem upravljačke sklopke US2 u položaj 1, kut θ_{mm} se korigira u vrijednost faznog kuta mrežnog napona θ_{mr} određenu PLL-om iz mjerenih mrežnih napona (e_{abc}). Pritom je ograničena brzina promjene kuta θ_{mm} kako bi se spriječila trenutna promjena faznog kuta mikromreže, koja može prouzročiti kvarna stanja. Nakon što su signali $u_{0,dq}$ transformirani u abc koordinatni sustav i, u slučaju rada u spoju s mrežom, sinkronizirani s mrežnim naponom, izrazom izvedenim iz jednadžbe (3.1) se svode na jedinične signale m_{abc} u koje se naknadno umeće i treći harmonik radi povećanja linearnog područja rada SPWM-a.

Struktura dijela upravljačkog algoritma koja se izvodi na upravljačkoj ploči DS1103 i zadužena je za upravljanje WECS-om prikazana je na slici 6.4. Načela upravljanja WECS-om su također jednaka kao u slučaju integriranog WECS-qZSI sustava. Svo upravljanje se izvodi preko SCIG-a, odnosno signala za okidanje tranzistora pripadajućeg poluvodičkog energetskog pretvarača. Iako su načela upravljanja jednaka, ipak su napravljena određena unaprjeđenja.

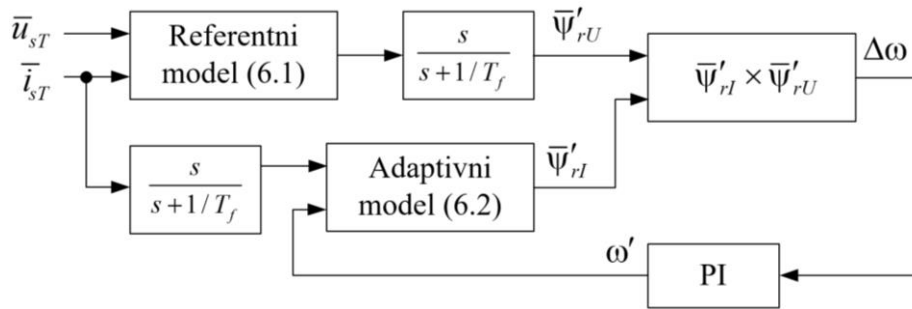


Slika 6.4 Struktura dijela upravljačkog algoritma mikromreže s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, zaduženog za upravljanje WECS-om

Primjena naprednog modela generatora u izvedbi IRFOC-a je izvedena s ciljem postizanja veće točnosti upravljanja. Osim toga, napredni model stroja je korišten i za procjenu brzine vrtnje korištene u povratnoj vezi regulacijskog kruga (ω') a koja je dobivena implementiranim MRAS-om. Za to korišteni MRAS je već poznat u literaturi a opisan je i ispitan u primjeni s istim WECS-om u [169], gdje se za točnost procjene brzine vrtnje pokazalo ključnim korištenje naprednog modela generatora. Uz primjenu naprednog modela generatora pri izradi MRAS-a, referenti i adaptivni model su određeni sljedećim izrazima danim u s domeni:

$$s\bar{\Psi}'_{rl} = \frac{L_m}{T_r} \bar{i}_{sT} - \left(\frac{1}{T_r} - j\omega' \right) \bar{\Psi}'_{rl} \quad (6.2)$$

gdje ' označava procijenjene vrijednosti, a indeksi U i I označavaju naponski (referentni) i strujni (adaptivni) model generatora. Na slici 6.6 je prikazan blokovski dijagram korištenog MRAS algoritma.



Slika 6.6 Blokovski dijagram MRAS algoritma za procjenu brzine vrtnje [169]

U strukturi upravljanja SCIG-om izmijenjen je i sam regulator brzine vrtnje. Naime, ranije korišteni linearni PI regulator je zamijenjen naprednim HA regulatorom, s ciljem postizanja bržeg odziva brzine vrtnje vjetroturbine uz manja nadvišenja. Brži odziv brzine vrtnje omogućuje skraćanje koraka uzorkovanja MPPT-a a to znači i bržu konvergenciju vjetroturbine u optimalnu radnu točku. HA regulator je pristup FL upravljanju gdje su klasične funkcije pripadnosti zamijenjene algebarskim modeliranjem lingvističkih varijabli [171, 172]. Ulazi u regulator (pogreška i njezina derivacija) kvantificiraju se preko diskretnih jezičnih oznaka (jako negativna, nula, jako pozitivna), dok se izlazno upravljačko djelovanje određuje jednostavnom tablicom pravila. Prednost ove metode regulacije u odnosu na FL pristup je u lakšoj čitljivosti i tumačenju pravila, kao i većoj fleksibilnosti u definiranju stupnja neizvjesnosti zahvaljujući tzv. hedgeovima, odnosno lingvističkim operatorima koji mijenjaju značenje osnovnih pojmova (npr., „vrlo“, „malo“, „izrazito“, „donekle“ i sl.) [173]. Implementirani HA regulator je preuzet iz ranijeg istraživanja [174], gdje je bio primijenjen i optimiziran u istom WECS-u. Opravdanost i prednosti implementacije HA regulatora brzine vrtnje, u istom WECS-u kakav je razmatran ovdje, je već potvrđena u okviru istraživanja na kojemu se temelji ovaj doktorski rad i dokumentirana u [149].

Uz prethodno opisane komponente upravljačkog algoritma koje spadaju pod upravljačku strategiju, preostaje za opisati dio upravljanja koji se odnosi na EMS. To su primarno MPPT algoritmi i funkcije kojima se koordinira njihov rad. MPPT algoritmi WECS-a su ponovno FL algoritmi, ali su za razliku od integriranog WECS-qZSI sustava ovdje obje optimizacije (vjetroturbine i SCIG-a) izvedene s obzirom na snagu p_{dc} . Struktura MPPT algoritma vjetroturbine je već prikazana na slici 5.13, a SCIG-a na slici 5.16. Ovdje je korak uzorkovanja

FL MPPT-a vjetroturbine postavljen na 1,5 s, dok je u ranijim izvedbama bio postavljen na 3 s [150, 169]. Ovo unaprjeđenje je omogućeno implementacijom naprednog HA regulatora kojim je postignut brži odziv regulirane brzine vrtnje SCIG-a na skokovitu promjenu reference bez nadvišenja. Uz implementaciju FN izvora, u upravljački sustav je uveden i pripadajući MPPT algoritam. Ranije je u poglavlju 2.2.1 opisan princip rada i optimizacije FN izvora. Sukladno opisanom i prikazanim strujno-naponskim karakteristikama, ukratko se može reći da za svaki intenzitet sunčevog zračenja i temperature FN panela postoji radna točka maksimalne snage koja se može postići korekcijom napona FN panela. U okviru ovog rada je implementiran relativno jednostavan P&O algoritam koji prati točku maksimalne snage iterativno korigirajući referencu napona u_{dc} . Princip rada je sljedeći: ako je referenca napona korigirana u jednom smjeru i rezultira pozitivnom promjenom snage (p_{dc}), u idućem koraku se izvodi korekcija napona ponovno u istom smjeru, a ako je promjena snage negativna (radna točka se udaljava od maksimuma), mijenja se smjer korekcije napona. Matematički, princip rada se može opisati kao:

$$U_{dc}^*(k) = \begin{cases} U_{dc}^*(k-1) + \Delta U_{dc}^*, & \frac{\Delta p_{dc}(k-1)}{\Delta u_{dc}(k-1)} > 0 \\ U_{dc}^*(k-1) - \Delta U_{dc}^*, & \frac{\Delta p_{dc}(k-1)}{\Delta u_{dc}(k-1)} < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

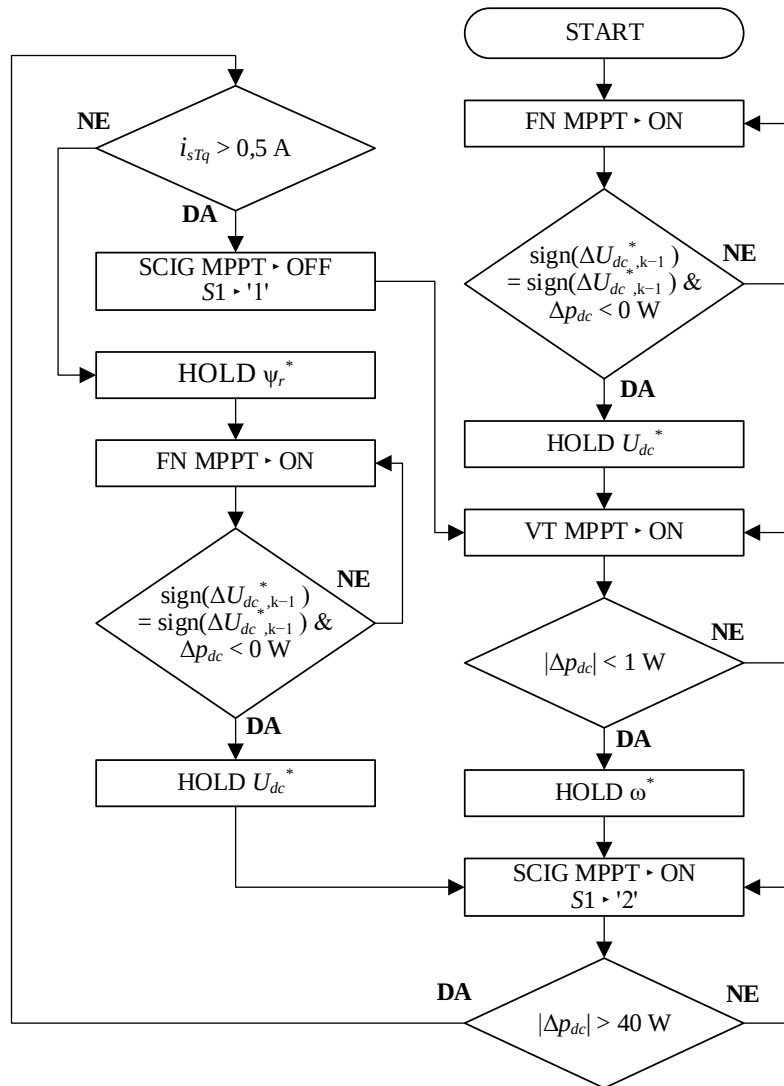
gdje je ΔU_{dc}^* iznos promjene napona u jednoj iteraciji.

Navedeno je dovoljno za funkcionalni MPPT algoritam koji bi u idealnom slučaju zadržavao radnu točku unutar iznosa jednog koraka napona oko optimalne radne točke.

Iz opisanog principa rada MPPT algoritma se može vidjeti da je snaga p_{dc} korištena kao referentna vrijednost po kojoj se izvodi optimizacija, jednako kao što je slučaj i kod MPPT algoritama za WECS. Prema tome, da bi se omogućio učinkovit rad ili općenito funkcionalan rad sustava, u okviru EMS-a je izvedena koordinacija rada MPPT algoritama. Istovremeni rad algoritama u ovako izvedenom energetsom sustavu bi rezultirao značajnim međudjelovanjem. Primjerice, korekcije radne točke FN sustava bi se algoritmu vjetroturbine mogle činiti kao korekcije radne točke vjetroturbine, ili obratno. Budući da se algoritmi WECS-a izvode na odvojenoj računalnoj jedinici od algoritma FN izvora, za rad EMS-a je bilo potrebno implementirati razmjenu informacija o statusu algoritama između upravljačkih jedinica. To je označeno kao signal *MPPT sync* na slikama 6.2 i 6.4. Osim toga, mjerena snaga p_{dc} , koja je korištena za sva tri algoritma, računata je na MicroLabBoxu na temelju mjerenih vrijednosti

struje i_{L1} i napona u_{dc} te je dijeljena s upravljačkom pločom DS1103, na kojoj se izvodi upravljanje WECS-om. Prema tome, EMS se, tehnički gledano, izvodi na dvije odvojene upravljačke jedinice, ali ga možemo promatrati kao jedinstveni *rule-based* EMS. Akcije koje se izvode na jednoj jedinici ovise o stanju na drugoj i obratno.

Implementirani EMS je opisan dijagramom toka prikazanim na slici 6.7. Kao što slijedi iz danog dijagrama toka, MPPT algoritmi se aktiviraju i deaktiviraju, odnosno pauziraju (zadnja izlazna referenca se zadržava) sukcesivno. Gledano od uključanja sustava, najprije se aktivira MPPT algoritam FN izvora koji radi dok ne prepozna da je dostignuta optimalna radna točka. Optimalna radna točka je prepoznata kada dođe do promjene predznaka Δp_{dc} iz pozitivnog u negativni a da je prethodno u dva uzastopna koraka predznak Δu_{dc} bio negativan. Nakon što je optimalna radna točka FN izvora dostignuta, zadržava se pripadajući iznos reference napona u_{dc} i aktivira MPPT vjetroturbine. On je aktivan dokle god se ne dostigne $\Delta p_{dc} < 1$ W, kada se zadržava zadnji iznos reference brzine vrtnje ω . Po završetku optimizacije vjetroturbine aktivira se optimizacija SCIG-a koja dalje radi bez prekida do prve detekcije promjene atmosferskih uvjeta. Pri detekciji ove promjene isključuje se optimizacija SCIG-a a vrijednost reference toka rotora se postavlja na iznos koji odstupa od optimalnog, za što je u strukturi upravljačkog algoritma na slici 6.4 sklopka S1 postavljena u položaj 1. To je slično kao i što je izvedeno za WECS-qZSI sustav, ali je ovdje bilo potrebno dodatno detektirati je li promjenu uvjeta, a posljedično i snage p_{dc} , prouzročila promjena brzine vjetra ili intenziteta sunčevog zračenja. Radi toga se, uz uvjet detekcije $\Delta p_{dc} > 40$ W, koji označava značajniju promjenu snage, prati i iznos reference struje i_{sTq} . U slučaju značajnije promjene brzine vjetra dolazi i do promjene brzine SCIG-a pa, da bi to kompenzirao, upravljački sustav djeluje na iznos reference i_{sTq} pokušavajući zadržati zadanu brzinu vrtnje. Prema tome je uveden kriterij da se u slučaju detekcije $\Delta p_{dc} > 40$ W i $\Delta i_{sTq}^* > 0,5$ A aktivira MPPT vjetroturbine, a u slučaju detekcije samo $\Delta p_{dc} > 40$ W, aktivira se MPPT FN izvora.

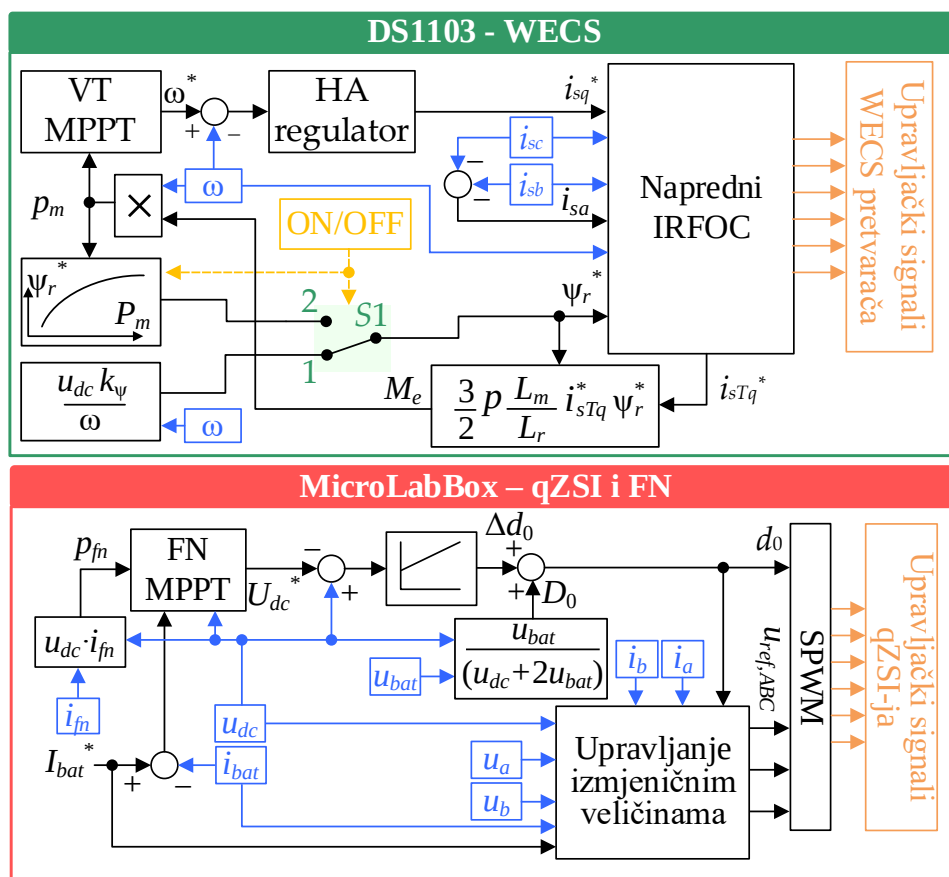


Slika 6.7 Dijagram toka EMS-a razvijenog u okviru upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Osim opisanih funkcija koordinacije MPPT algoritama, EMS može dodatno održavati SOC baterija unutar zadanih granica korekcijom struje punjenja baterija ili isključenjem trošila. Ti zadaci nisu uključeni u okviru prikazanog dijagrama toka jer se izvode relativno jednostavnim *if-else* uvjetima i ta funkcionalnost je već pokazana u okviru integriranog WEC-qZSI sustava. Ovdje je fokus stavljen primarno na maksimizaciju proizvodnje iz distribuiranih izvora i koordinaciju MPPT algoritama.

6.2.2. Struktura upravljačkog algoritma s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

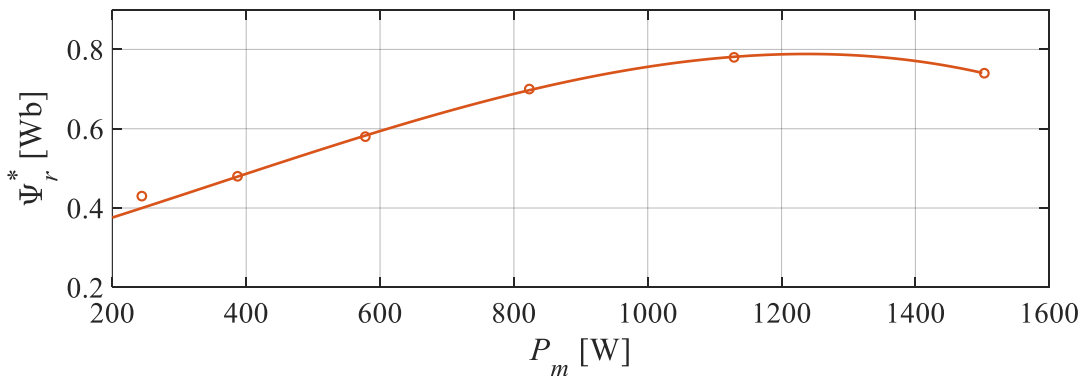
Na slici 6.8 je prikazana struktura upravljačkog algoritma s implementiranim istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora. Gledano iz perspektive upravljačke strategije i regulacijskih krugova, prikazana struktura je vrlo slična onoj korištenoj u prethodno razmatranom algoritmu. Najznačajnija razlika je odsutnost EMS upravljačkih signala za koordinaciju MPPT algoritama. Počevši od qZSI dijela, regulacijski krugovi izlaznih izmjeničnih veličina i ulaznog napona u_{dc} su ostali isti. Podsustav za upravljanje izmjeničnim veličinama je jednak prikazanom na slici 6.3 a princip rada MPPT algoritma je također jednak opisanom u prethodnom poglavlju. Iako MPPT radi po istom principu, ovdje se ne zaustavlja izvođenje algoritma po dostizanju optimalne radne točke, već on radi kontinuirano. To je omogućeno korištenjem struje i_{fn} za računanje izlazne snage p_{fn} koja predstavlja isključivo izlaznu snagu FN izvora. Time je postignuto da MPPT algoritam može raditi bez smetnji uzrokovanih radom drugih distribuiranih izvora.



Slika 6.8 Struktura upravljačkog algoritma mikromreže s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

U ovom slučaju je, kao što se vidi na slici 6.1, senzor struje i_{L1} premješten tako da mjeri struju i_{fn} i na taj način je zadržan isti broj senzora. Premještanje strujnog senzora je bilo moguće izvesti jer su MPPT algoritmi WECS-a izmijenjeni i u ovom slučaju ne koriste snagu p_{dc} kao referencu za izvođenje optimizacije. Može se vidjeti u cjelini upravljačke strukture zadužene za upravljanje WECS-om kako je za oba MPPT algoritma (vjetroturbine i SCIG-a) korištena mehanička snaga p_m . Za vjetroturbinu je ponovno riječ o FL algoritmu čija je struktura pokazana ranije na slici 5.11. MPPT algoritam SCIG-a je ovdje izmijenjen u odnosu na upravljanje s uzastopnim optimizacijama i korišten je algoritam zasnovan na modelu stroja, opisan u poglavlju 5.3.4.

U navedenom poglavlju je detaljno opisan postupak izrade i izvođenja ovog optimizacijskog algoritma. Ukratko, simulacijski su određeni optimalni iznosi magnetskog toka rotora s obzirom na mehaničku snagu, iz kojih se onda definira funkcija optimalnog toka $\psi_r^*(P_m)$ konačno korištena u algoritmu. Pokazano je ranije i kako dobiveni iznosi optimalnog magnetskog toka rotora mogu varirati s obzirom na napon na stezaljkama SCIG-a, tj., napon istosmjernog kruga s kojim je SCIG povezan preko poluvodičkog energetskog pretvarača. U ovom slučaju je to ulazni napon qZSI-ja, u_{dc} , koji blago varira s obzirom na radnu točku FN izvora. Pošto su promjene u naponu FN izvora relativno male, za MPPT algoritam SCIG-a je korištena funkcija optimalnog toka prikazana na slici 6.9, koja je dobivena za očekivani iznos napona u_{dc} od 400 V. Tu vrijedi spomenuti kako u provedenim eksperimentima nisu razmatrane promjene temperature FN izvora (FN modula) koje bi značajnije utjecale na napon radne točke FN izvora. U tom bi slučaju bilo poželjno koristiti funkciju optimalnog toka definiranu s obzirom na snagu i napon.



Slika 6.9 Funkcija optimalnog iznosa magnetskog toka rotora korištena u MPPT algoritmu za SCIG

Upravo je implementacija ovakvog MPPT algoritma SCIG-a omogućila istovremeni rad sva tri MPPT algoritama. S jedne strane, primjenom ovakve optimizacije SCIG-a može se izvoditi istovremena optimizacija vjetroturbine i SCIG-a. Bez obzira što oba algoritma koriste istu referentnu veličinu za optimizaciju, izvođenje MPPT algoritma zasnovanog na modelu generatora je trenutno i ne dolazi do međudjelovanja s MPPT-om vjetroturbine koji radi iterativno. S druge strane, više nije potrebno promatrati izlaznu električnu snagu WECS-a, u ovom slučaju p_{dc} , koja je zapravo sumarna snaga FN izvora i WECS-a. Dakle nema međudjelovanja s MPPT-om FN sustava. Osim toga, budući da nije potrebno mjeriti snagu p_{dc} , isti senzor je mogao biti implementiran za mjerenje snage p_{fn} , što je omogućilo neovisan rad MPPT algoritma FN izvora. S mogućnošću istovremenog rada algoritama otklonjena je potreba za njihovom koordinacijom. Jedina preostala upravljačka sklopka je S1, kojom se omogućuje korištenje (suboptimalnog) iznosa reference ψ_r^* pri pokretanju sustava. Čim je WECS aktiviran i postigao je prvo stacionarno stanje s još neoptimiziranim iznosom reference ψ_r^* , može se uključiti optimizacija SCIG-a i sklopka S1 prebaciti u položaj 2.

Nedostatak ovakve implementacije MPPT algoritama u odnosu na algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora je potreba za mjerenjem brzine vrtnje SCIG-a, koja se koristi u IRFOC algoritmu, ali i za određivanje snage p_m . Iako je u prethodno pokazanom upravljačkom algoritmu izvedena procjena brzine primjenom MRAS-a, ovdje je takav pristup teže za implementirati. Naime, kako se snaga p_m koristi u MPPT algoritmu SCIG-a, sustav se pokazao osjetljivim na oscilacije u procijenjenoj brzini ω' . Oscilacije procijenjene brzine vrtnje pri prijelaznim pojavama bi rezultirale neprimjerenim iznosima reference magnetskog toka ψ_r^* , što u krajnjem slučaju može rezultirati demagnetizacijom SCIG-a. Osim toga, iznos ψ_r je uključen u izraze MRAS-a te se javlja zatvorena petlja s dvije međusobno ovisne veličine, ω' i ψ_r . Stoga bi pri izraženijim prijelaznim pojava došlo do potpunog odstupanja procijenjene od mjerene vrijednosti brzine vrtnje.

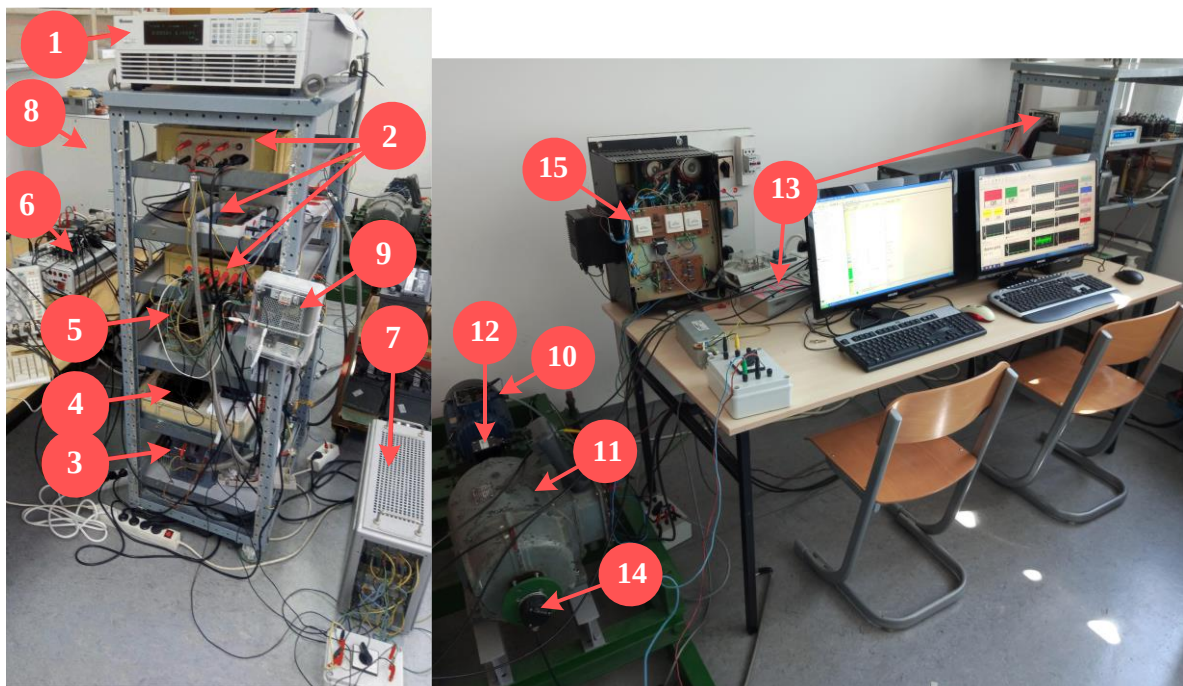
Iako je i dalje korištena mjerena brzina vrtnje, kao u sustavima pokazanim u 5.3.4 i [149], ovdje je uvedeno unaprjeđenje s implementacijom procjene elektromagnetskog momenta stroja (M_e). Iznos M_e je, kao i brzina vrtnje, nužan za određivanje snage p_m korištene u MPPT algoritmima. Naspram mjerenja brzine vrtnje, mjerenje momenta je zahtjevnije i u konačnici su mjerni uređaji skuplji. Implementacija procjene momenta se uvodi relativno jednostavno (korištenjem izraza na slici 6.8) i rezultira umanjnjem kapitalnog troška, koji je za ovakve manje sustave značajan. Iz rezultata eksperimentalnih ispitivanja pokazanih u nastavku se može vidjeti da procjena momenta nije utjecala nepovoljno na performanse sustava.

6.3. Analiza dinamičkih režima u otočnom režimu rada

Kako bi se pokazala funkcionalnost predložene mikromreže i pripadajućih upravljačkih algoritama, prevedena su eksperimentalna ispitivanja dinamičkih radnih režima sustava. To uključuje promjene brzine vjetra, razine sunčevog zračenja te snage priključenog trošila. Ispitivanja su provedena za upravljačke algoritme opisane u potpoglavljima 6.2.1 i 6.2.2, kako u otočnom režimu tako i u spoju s glavnom mrežom, što je prikazano u potpoglavlju 6.4. Za ova ispitivanja je korištena laboratorijska maketa cjelokupne mikromreže, izvedena u Istraživačkom laboratoriju za energetske elektroniku Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Splitu. Fotografije izvedene makete su prikazane na slici 6.10 a čine je sljedeće komponente:

1. Programibilni istosmjerni izvor 62050H 600S, proizvođača Chroma, programiran za emulaciju 16 serijski povezanih FN modula KC200GT, proizvođača Kyocera, nazivne snage 200 W
2. Mjerni senzori s Hallovim efektom, proizvođača LEM, korišteni za mjerenje struja SCIG-a (LA 50-P/S55), struja qZSI-ja (LA 55-P/SP52), napona qZSI-ja (DVL 500), izlaznog napona qZSI-ja (LV 25-P) i napona mreže (CV 3-500)
3. Zavojnice u impedancijskom krugu qZSI-ja s praškastim jezgrama tipa T520-26 (Micrometals), ($L_1 = L_2 = 20,2 \text{ mH}$ (nezasićeno), $RL = 0,5 \text{ } \Omega$ (pri 25°C)), i polipropilenski kondenzatori, proizvođača Miflex, tipa MKSPI35-50U/1000 ($C_1 = C_2 = 50 \text{ } \mu\text{F}$, $ESR = 7,8 \text{ m}\Omega$)
4. Trofazni most qZSI-ja sastavljen od IGBT tranzistora IXBX75N170 (IXYS) i drajverima SKHI 22B(R) (Semikron)
5. Izlazni LCL filter ($L_{f1} = 8,64 \text{ mH}$, $L_{f2} = 4,32 \text{ mH}$, $C_f = 4 \text{ } \mu\text{F}$, $R_d = 10 \text{ } \Omega$)
6. Razvojna upravljačka ploča MicroLabBox (dSpace), korištena za upravljanje qZSI-jem
7. Trofazno radno trošilo
8. Baterijski SPE s 20 serijski povezanih olovno kiselinskih baterija (nazivni napon 12 V, kapacitet 75 Ah)
9. Trofazna relejna sklopka za uključenje/isključenje trošila

10. SCIG nazivne snage 1,5 kW, proizvođača Končar
11. DC motor nazivne snage 1,62 kW (SIEC), vođen SIMOREG DC-MASTER poluvodičkim pretvaračem tipa 6RA7031 (Siemens), korišten za emuliranje rada vjetroturbine.
12. Senzor momenta TM 308 (Magtrol)
13. Upravljačka ploča DS1103 (dSpace), korištena za upravljanje SCIG-om
14. Inkrementalni enkoder ROD 426 B (Heidenhain)
15. Trofazni mosni poluvodički pretvarač izveden s IGBT modulima SKM100GB125DN (Semikron), drajverima SKHI 22B (Semikron) i kondenzatorima u istosmjernom međukrugu $C_{dc} = 470 \mu\text{F}$, korišten za povezivanje SCIG-a s qZSI-jem

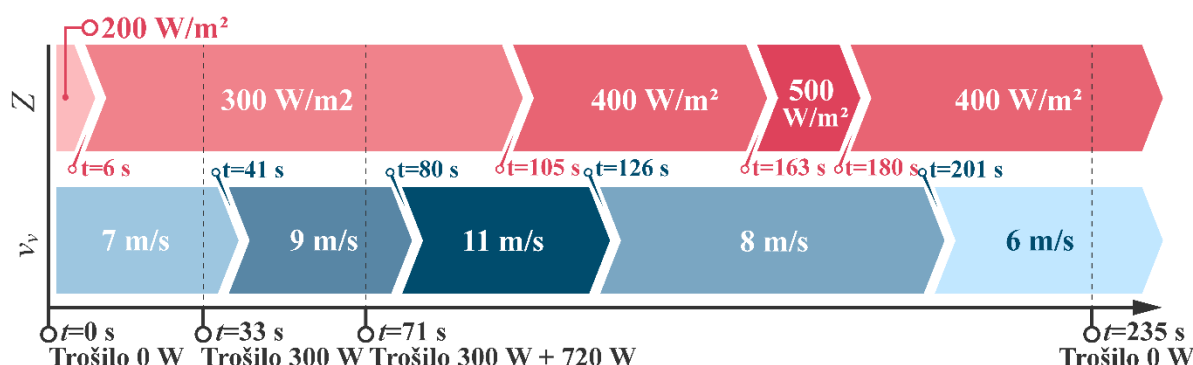


Slika 6.10 Fotografija izvedene laboratorijske makete

6.3.1. Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora u otočnom radu

U ovom potpoglavlju su prikazani i opisani eksperimentalni rezultati ispitivanja snimljeni u otočnom režimu rada za upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora. Snimljen je jedan duži eksperiment u okviru kojega su izvedene promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage priključenog trošila.

Na slici 6.11 je prikazana vremenska crta provedenog eksperimenta, gdje se vidi da su u okviru eksperimenta izmijenjene četiri razine jakosti sunčevog zračenja, pet različitih brzina vjetra i tri razine snage trošila. Prije početka snimanja, mikromreža je dovedena u stabilnu radnu točku, gdje su za postavljenu osunčanost $Z = 200 \text{ W/m}^2$ i brzinu vjetra $v_v = 7 \text{ m/s}$ već postignute radne točke maksimalne snage FN izvora i vjetroturbine, a optimizacija SCIG-a je aktivna i, sukladno EMS-u, ostaje aktivna do prve značajnije promjene stanja. U ovom i u sljedećim eksperimentima su za emulaciju rada FN izvora korištene karakteristike izlazne snage koje odgovaraju temperaturi modula od 20° C . Snimljeni dinamički odzivi različitih veličina sustava su prikazani na slikama 6.13 i 6.13.



Slika 6.11 Vremenska crta eksperimenta u otočnom režimu rada za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Mikromreža je na početku eksperimenta u stabilnoj radnoj točki maksimalne generirane snage za dane uvjete. Pritom je izlazna snaga FN izvora $p_{fn} \approx 600 \text{ W}$ a izlazna snaga SCIG-a $p_{SCIG} \approx 250 \text{ W}$, što rezultira s približno 850 W ukupne ulazne snage qZSI-ja (p_{dc}) (slika 6.13). U tom trenutku nije priključeno trošilo te se sva snaga, umanjena za gubitke qZSI-ja, pohranjuje u baterije. Prvi zabilježeni događaj je promjena osunčanosti na 300 W/m^2 u trenutku $t \approx 6 \text{ s}$, koja rezultira porastom snaga p_{fn} i p_{dc} za približno 300 W . Povećanje ulazne snage rezultira većom ulaznom strujom qZSI-ja (i_{L1}) i, posljedično, većom negativnom strujom punjenja

baterija i_{bat} (slika 6.13a). Povećala se i vrijednosti struje i_{L2} , sukladno izrazu (3.16), dok je izlazna struja i_d ostala nepromijenjena, što je i očekivano uz isključena trošila. Izlazni napon U_{ac} je također ostao nepromijenjen (6.13b), napon baterija u_{bat} je porastao sukladno većoj snazi punjenja a na naponu u_{dc} se očituje aktivacija MPPT algoritma FN izvora koji korigira pripadajuću referentnu vrijednost. Kasnije je detaljnije pokazano djelovanje pojedinog MPPT algoritma.

U trenutku $t \approx 33$ s uključeno je trošilo snage 300 W, što rezultira skokovitim porastom struje i_d na 0,67 A. Zabilježena je kratkotrajna prijelazna pojava u strujama i_d , i_{bat} i i_{L2} . Spomenute prijelazne pojave nisu imale značajnijeg utjecaja na rad sustava, a sve ostale relevantne veličine su ostale nepromijenjene ili su se ponašale sukladno promjeni u bilanci snaga. Primjerice, napon u_{bat} se s uključanjem trošila počeo smanjivati, prilagođavajući se novoj, manjoj struji punjenja. Valja spomenuti da kod prve dvije promjene radnih uvjeta nije došlo do vidljive promjene u radu WECS-a, što je očekivano, ali je i nužan pokazatelj stabilnosti rada sustava.

Prva promjena u radu WECS-a je vidljiva u trenutku $t \approx 41$ s kada je brzina vjetra porasla sa 7 m/s na 9 m/s. Porast brzine vjetra rezultira povećanjem mehaničke snage vjetroturbine P_m , snage p_{SCIG} a konačno i snage p_{dc} . Porast snage p_{dc} nije (gotovo) trenutak kao u slučaju skokovitog porasta osunčanosti, već raste postepeno i sukladno promjeni brzine SCIG-a prikazanoj na slici 6.13c. Osim što su se struje qZSI-ja prilagodile novoj bilanci snaga, promjena brzine vjetra i prilagodba WECS-a novim uvjetima nije uzrokovala poremećaj u radu mikromreže.

Snaga trošila je dodatno povećana u trenutku $t \approx 71$ s na 1020 W. Iako je promjena izlazne snage qZSI-ja sada zapravo bila veća nego kod prvog uključanja trošila, nisu zabilježene prijelazne pojave na mjeranim veličinama. Jedina zabilježena promjena je smanjenje reguliranog napona u_{dc} od 6 V, odnosno za 1,5 %. Budući da je napon u_{dc} reguliran, ovo smanjenje je zapravo rezultat greške mjerenja (a posljedično i regulacije) koja je uzrokovana promjenom intenziteta šuma u mjeranom signalu. Promjena intenziteta šuma se u istom trenutku vidi i u naponu U_{ac} , ali se u tom slučaju nije odrazila na točnost mjerenja.

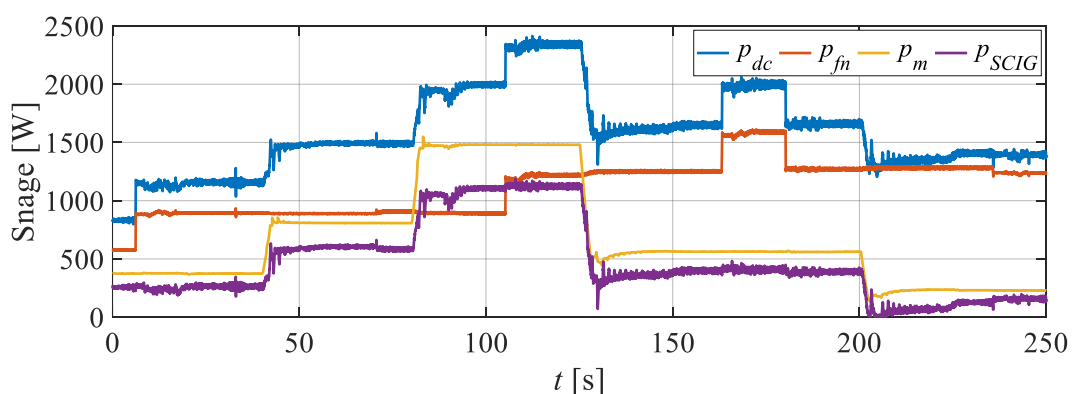
Brzina vjetra je ponovno porasla s 9 m/s na 11 m/s u $t \approx 80$ s, a osunčanost se povećala s 300 W/m^2 na 400 W/m^2 u $t \approx 105$ s. Porast brzine vjetra je rezultirao porastom snage p_{dc} za približno 520 W, dok je porast osunčanosti doprinio snazi p_{dc} s dodatnih 340 W. Ukupna ulazna snaga qZSI-ja je u ovom trenutku iznosila $p_{dc} \approx 2345$ W, s priključenim trošilom od 1020 W. Uz struju baterija $i_{bat} \approx -2,5$ A i napon baterija $u_{bat} \approx 280$ V, proizlazi da se baterije pune snagom od 700 W. Kod ovih promjena brzine vjetra i osunčanosti može se vidjeti djelovanje

MPPT algoritama SCIG-a i FN izvora pri čijoj se aktivaciji vide kratkotrajna smanjenja snage p_{dc} u trenucima $t \approx 110$ s i $t \approx 90$ s. U oba slučaja snaga brzo naraste na veći iznos od onog prije aktivacije MPPT-a.

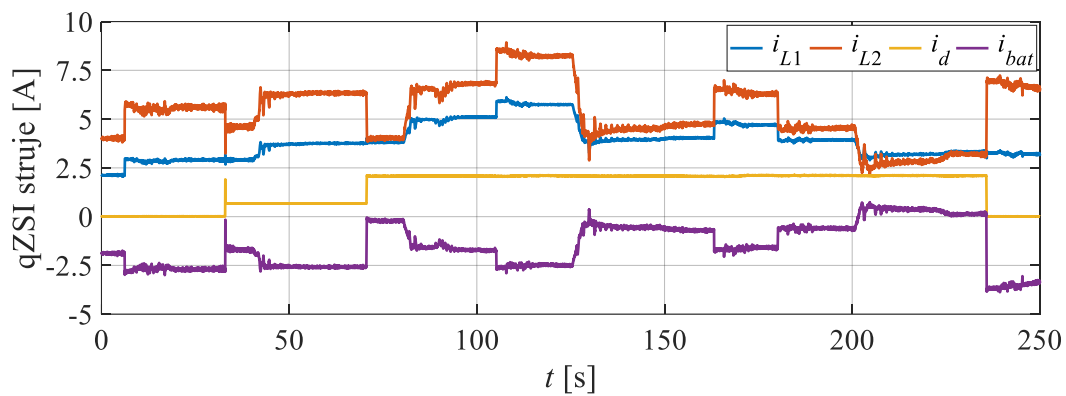
U trenutku $t \approx 126$ s, brzina vjetra se smanjila na 8 m/s, što je dovelo do brzog i značajnog smanjenja snage p_{SCIG} , koja se stabilizirala na približno 400 W. Za vrijeme ove prijelazne pojave, zabilježen je kratkotrajni propad snage p_{dc} od 1025 W, što je skoro 50 % snage iz prethodnog stacionarnog stanja. Tako značajno smanjenje snage se nije negativno odrazilo na rad cjelokupne mikromreže.

Uslijedile su potom dvije uzastopne promjene osunčanosti – povećanje na 500 W/m^2 pa smanjenje na 400 W/m^2 – koje također nisu prouzročile vidljive prijelazne pojave u strujama ili naponima. Kod konačnog smanjenja brzine vjetra na 6 m/s u trenutku $t \approx 201$ s, naponi su ostali stabilni, dok su se struje qZSI-ja mijenjale proporcionalno promjeni snage p_{dc} , koja se po završetku optimizacije WECS-a stacionirala na iznosu 1410 W. Uz napajanje trošila od 1020 W i pokrivanje gubitaka, dostupna snaga je bila malo manja od potrebne te su se baterije praznile snagom od približno 30 W.

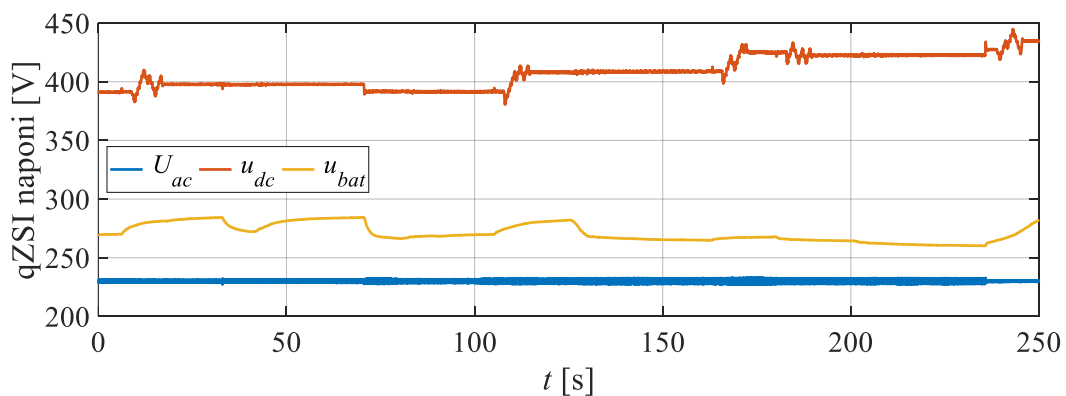
Konačno, u trenutku $t \approx 235$ s, potpuno je isključeno trošilo. Iako je riječ o značajnoj promjeni izlazne snage, to nije uzrokovalo značajnije prijelazne pojave u sustavu. Jedino je ponovno zabilježena promjena iznosa napona u_{dc} uzrokovana promjenom intenziteta šuma u mjerenim signalima. Ta promjena iznosa snage p_{dc} je prouzročila aktivaciju MPPT-a FN izvora, ali se to nije negativno odrazilo na rad sustava već je nakon kratkih oscilacija MPPT algoritam konvergirao natrag u točku maksimalne snage. Pritom nije zabilježen značajan utjecaj na konačan iznos snage p_{fn} postignut u stacionarnom stanju.



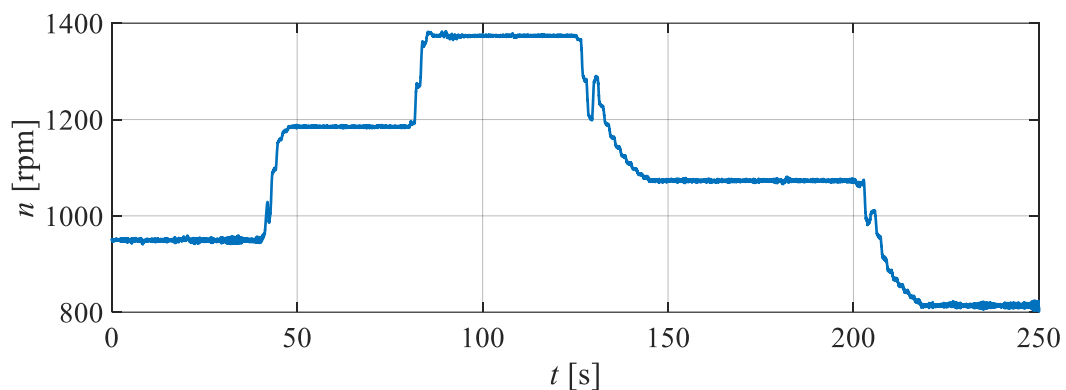
Slika 6.12 Dinamički odzivi snaga na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora



a)



b)



c)

Slika 6.13 Dinamički odzivi a) struja qZSI-ja, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Dok prethodno prikazani i opisani rezultati pokazuju općenitu funkcionalnost i stabilnost sustava, u nastavku je izdvojen kraći period eksperimenta kako bi se jasnije pokazalo djelovanje MPPT algoritama u dinamičkim režimima. Koordinacija MPPT algoritama u konfiguraciji gdje tri različita algoritma koriste istu veličinu kao referentnu vrijednost optimizacije je ključna da bi se izbjeglo konvergiranje u radnu točku koja nije točka maksimalne snage, a potencijalno i

potpuni kolaps sustava. U nastavku je izdvojen period eksperimenta 175 s – 250 s u okviru kojeg su izvedene promjena osunčanosti, brzine vjetra i značajna promjena snage trošila. Odzivi izdvojenog eksperimenta su prikazani na slikama 6.14 i 6.15.

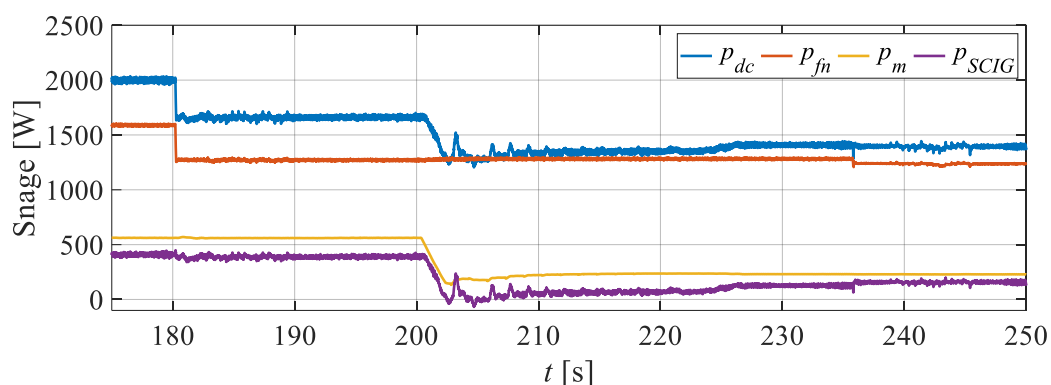
Za odabrani period, najprije se u trenutku $t \approx 180$ s dogodila promjena razine osunčanosti, s 500 W/m^2 na 400 W/m^2 , koja se očitovala smanjenjem snage p_{dc} na slici 6.14a. Reakcija upravljačkog algoritma na ovakve i sljedeće promatrane događaje je definirana EMS-om, čiji je dijagram toka prikazan na slici 6.7 i opisan u prethodnom poglavlju. MPPT algoritmi FN izvora i vjetroturbine su nakon postizanja optimalne radne točke zaustavljeni uz zadržane zadnje referentne vrijednosti ω^* i u_{dc}^* . To se očituje iz konstantnog iznosa napona (slika 6.14b), odnosno brzine vrtnje n (slika 6.15a) na početku izdvojenog dijela eksperimenta. Nakon što je detektirana značajna promjena snage ($\Delta p_{dc} > 40 \text{ W}$), EMS na temelju promjene iznosa i_{sTd}^* detektira uzrok poremećaja snage i aktivira pripadajući algoritam. Budući da vjetroturbina ima duži vremenski odziv u odnosu na FN izvor, odgoda aktivacije MPPT-a je određena korakom uzorkovanja MPPT-a vjetroturbine koji je ovdje postavljen na 1,5 s. Na slici 6.15b se vidi kako je došlo do porasta Δi_{sTd}^* , ali manjeg od zadanog praga od 0,5 A. Sukladno tome EMS aktivira MPPT algoritam FN izvora koji potom iterativno korigira referencu u_{dc}^* . Kada MPPT algoritam detektira da je postignuta optimalna radna točka, radi još tri sekunde, odnosno šest iteracija napona, te na izlazu zadržava srednju vrijednost reference napona u_{dc}^* određenu za te tri sekunde rada. Na taj se način sprječavaju daljnje oscilacije reference napona u_{dc}^* .

Tu se treba osvrnuti na očigledne poremećaje u struji i_{sTd}^* , brzini n i iznosu ψ_r^* u trenutku promjene osunčanosti. Iako promjena u radu FN izvora ne bi trebala utjecati na WECS, zapravo se dogodilo da je SCIG MPPT, koji je aktivan u trenutku promjene osunčanosti, reagirao na promjenu snage p_{dc} . Reagirao je na način da je značajnije korigirao iznos ψ_r^* koji se koristi u MRAS-u za procjenu brzine vrtnje. To je dovelo do promjene u procijenjenoj brzini vrtnje na koju je regulacijski sustav reagirao promjenom reference i_{sTd}^* , pokušavajući zadržati istu radnu točku pri, naizgled, promjeni brzine vrtnje. Iz tog razloga je određen prag detekcije porasta Δi_{sTd}^* od 0,5 A i nije za očekivati veći utjecaj ovakvog međudjelovanja od ovdje primijećenog.

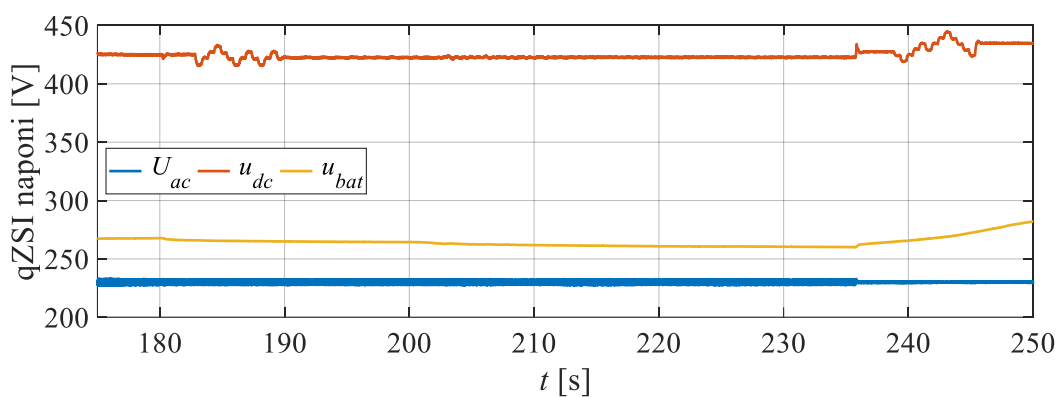
U izdvojenom periodu je došlo i do smanjenja brzine vjetra s 8 m/s na 6 m/s, u trenutku $t \approx 201$ s. MPPT algoritam SCIG-a ponovno reagira na ovu promjenu korekcijom iznosa ψ_r^* , ali već u prvom sljedećem koraku uzorkovanja aktivira se MPPT vjetroturbine. Iznos Δi_{sTd}^* najprije raste kao posljedica reakcije MPPT-a SCIG-a, ali ispod razine zadanog praga, dok u sljedećem koraku raste značajno preko postavljenog praga. To povećanje u konačnici aktivira optimizaciju vjetroturbine i zaustavlja optimizaciju SCIG-a, sklopka S1 se prebacuje u položaj

1 i ψ_r^* poprima suboptimalnu vrijednost koja jamči stabilan rad tijekom optimizacije vjetroturbine. Iznos brzine vrtnje SCIG-a se smanjuje sukladno zadanim referencama iz MPPT-a i vjetroturbina konvergira u optimalnu radnu točku (slika 6.15a). Ovdje treba istaknuti odziv brzine vrtnje koja bez prebačaja i unutar svega 1,5 s dostiže zadanu referencu, iz čega se očitava prednost korištenja HA regulatora. Nakon što je postignuta optimalna radna točka oko $t \approx 220$ s, ponovno se aktivira optimizacija SCIG-a i sklopka S1 se postavlja u položaj 2. Iznos ψ_r^* se iterativno smanjuje prelazeći iz maksimalno dozvoljene vrijednosti ($1,1 \cdot \psi_{r_nazivno}$), koliko je iznosio s isključenom optimizacijom, u minimalnu dozvoljenu vrijednost ($0,7 \cdot \psi_{r_nazivno}$) nakon završetka optimizacije. Utjecaj optimizacije SCIG-a na izlaznu snagu je veći upravo za manje brzine vjetra te se u ovom slučaju vidi značajnije povećanje snage p_{dc} od oko $t \approx 225$ s.

Promjena brzine vjetra nije utjecala na rad FN izvora i ostatka mikromreže, ali je utjecalo isključenje trošila u $t \approx 235$ s. Ranije je već opisana promjena napona u_{dc} i snage p_{fn} koja se javila nakon značajnije promjene opterećenja qZSI-ja. Ta promjena je prouzročila aktivaciju MPPT-a FN izvora, ali je nakon kratkog vremena MPPT ponovno konvergirao u optimalnu radnu točku, što se u konačnici nije odrazilo na vrijednost snage p_{fn} nakon prijelazne pojave.

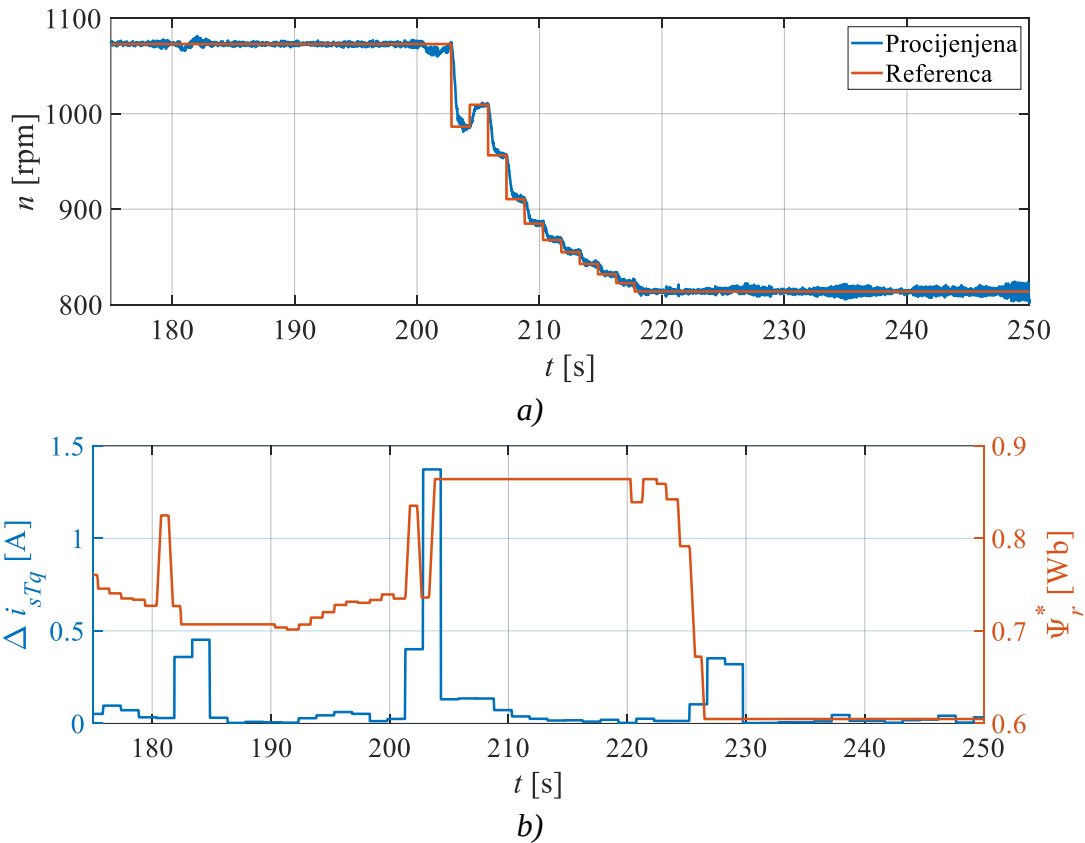


a)



b)

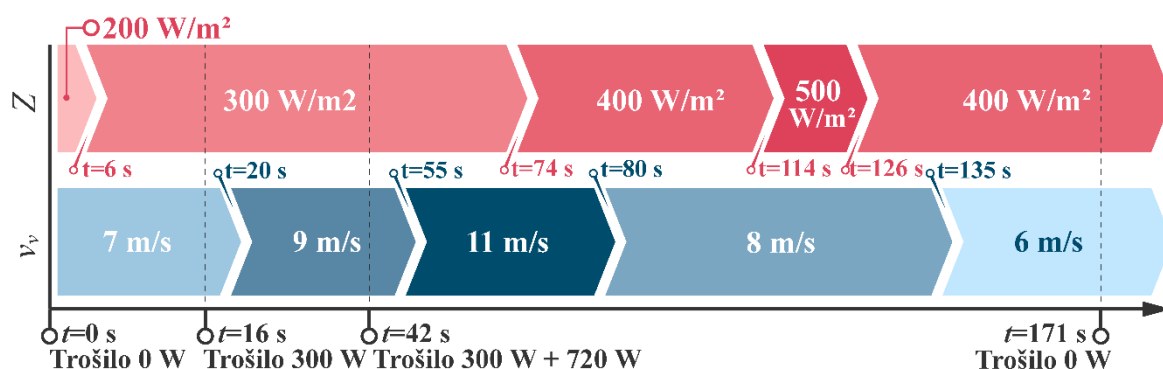
Slika 6.14 Izdvojeni dinamički odzivi a) snaga i b) napona na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora



Slika 6.15 Izdvojeni dinamički odzivi a) brzine vrtnje SCIG-a te b) reference magnetskog toka rotora i struje Δi_{sTd}^* na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora

6.3.2. Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora u otočnom radu

U nastavku su prikazani rezultati eksperimenta snimljenog uz primjenu upravljačkog algoritma s istovremenom optimizacijom vjetroturbine, SCIG-a i FN izvora. Za snimanje ovih dinamičkih odziva napravljen je isti eksperiment kao i za prethodno razmatrani algoritam. Eksperiment je u ovom slučaju izveden s manjim razmakom između pojedinih promjena radnih uvjeta s obzirom na to da nakon svake promjene osunčanosti ili brzine vjetra ne dolazi do kaskadnog uključivanja pojedinog MPPT algoritma pa mikromreža brže postigne novu stacionarnu radnu točku. Na slici 6.16 je prikazana vremenska crta eksperimenta. U odnosu na prethodni eksperiment, razlike su samo u vremenskim oznakama pojedinih događaja.



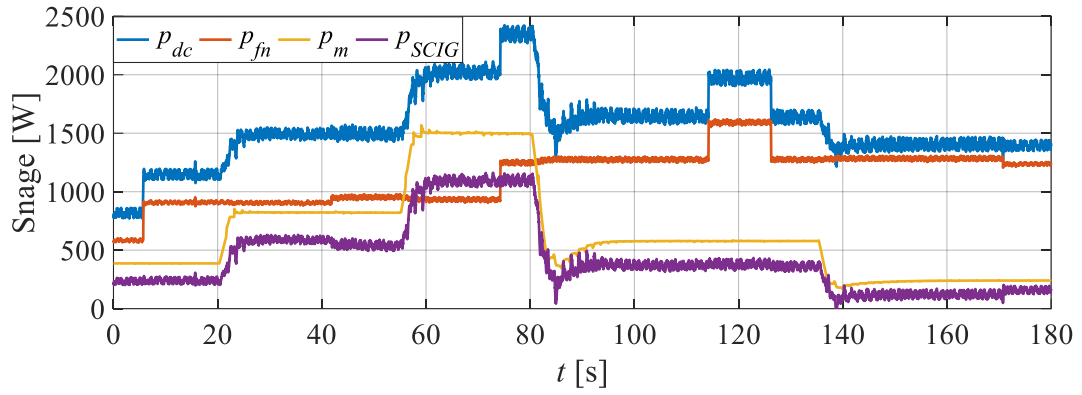
Slika 6.16 Vremenska crta eksperimenta u otočnom režimu rada za algoritam s istovremenom optimizacijom

Iz odziva prikazanih na slikama 6.17 i 6.18 može se uočiti paralelno djelovanje svih MPPT algoritama. To se prvenstveno očituje iz prijelaznih pojava kod promjene osunčanosti i brzine vjeta, gdje se nakon inicijalne prijelazne pojave ne izvodi naknadna korekcija radne točke. Osim toga, mogu se primijetiti kontinuirane oscilacije (korekcije) u snazi p_{fn} (slika 6.17a) i naponu u_{dc} (slika 6.17b) kao posljedica rada MPPT algoritma FN izvora.

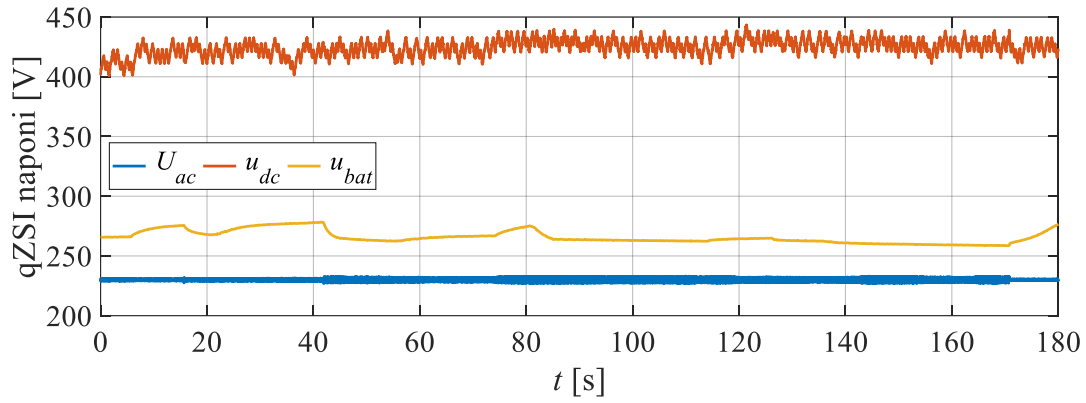
Iz perspektive dinamičke analize, na temelju prikazanih rezultata se može zaključiti kako se promjene osunčanosti ni u ovom slučaju ne odražavaju negativno na rad WECS-a ni cjelokupne mikromreže. S druge strane, uključenje i isključenje trošila se ponovno odražava na pojedine veličine u sustavu. Primjerice, u trenutku uključanja trošila u $t \approx 16$ s vide se kratkotrajne skokovite promjene vrijednosti struja i_d , i_{bat} i i_{L2} (slika 6.17c), kao i kod prethodno razmatranog algoritma. Ponavlja se i utjecaj povećanja snage trošila u trenutku $t \approx 42$ s i potpunog isključenja u trenutku $t \approx 171$ s, gdje dolazi do promjene iznosa u naponima uslijed promjene intenziteta šuma u mjeranim signalima. Zbog kontinuiranog rada MPPT algoritma FN izvora, to se teže uočava na naponu u_{dc} , ali se može vidjeti u promjeni snage p_{fn} i p_{SCIG} .

Kod rada WECS-a se može uočiti kako je MPPT vjetroturbine u dva navrata započeo optimizaciju s pogrešnim smjerom promjene reference brzine vrtnje (slika 6.18). Kod promjene brzine vjeta u $t \approx 80$ s dogodila su se i dva pogrešna koraka u prve tri korekcije. Pogrešan smjer korekcije P&O algoritma nije neočekivan događaj, pogotovo kada algoritam radi kontinuirano poput ovdje razmatranog. Najčešće do toga dođe zbog pogrešnog tumačenja promjene referentne veličine (snage) u odnosu na smjer korekcije iz prethodnog koraka. Svakako, radna točka vjetroturbine je ovdje konvergirala u optimalnu, samo malo sporije nego što bi to bio slučaj uz otpočetak ispravan smjer korekcija. Na prikazanim odzivima se ne može primijetiti negativan utjecaj dinamičkih promjena u radu WECS-a na ostatak mikromreže i veličine

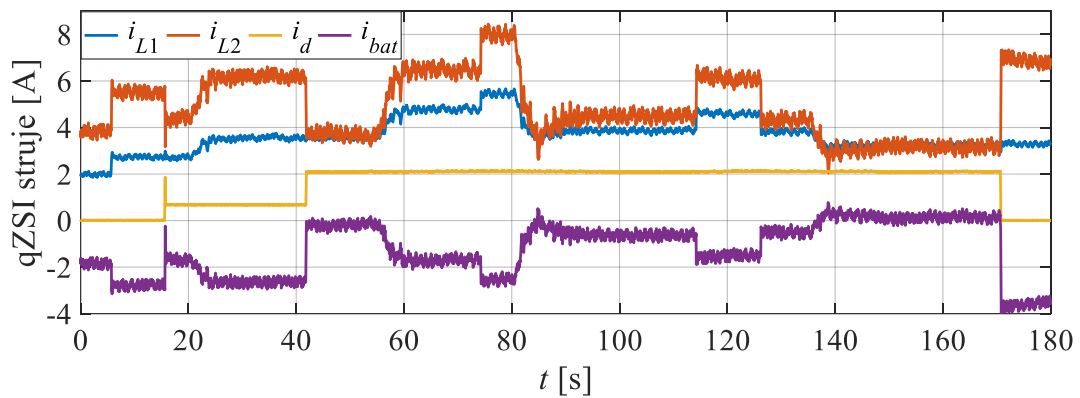
qZSI-ja. S druge strane, na odzivu struja se može vidjeti kako struje i_{bat} , i_{L1} i i_{L2} imaju nešto manje izražene oscilacije pri promjenama brzine vjetra nego u slučaju prethodno razmatranog algoritma.



a)

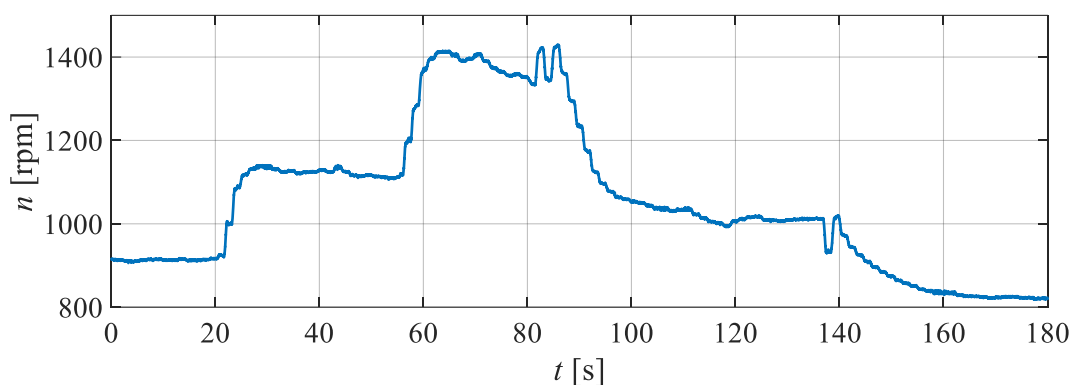


b)



c)

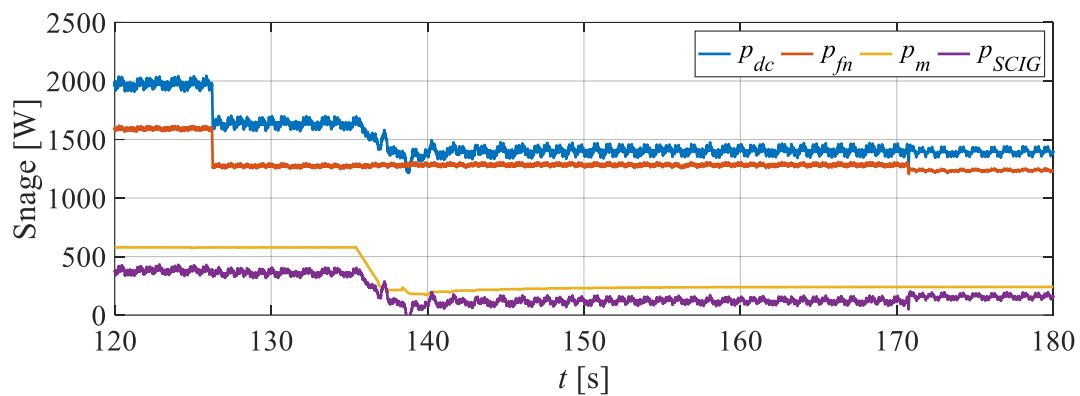
Slika 6.17 Dinamički odzivi a) snaga, b) struja qZSI-ja i c) napona qZSI-ja na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora



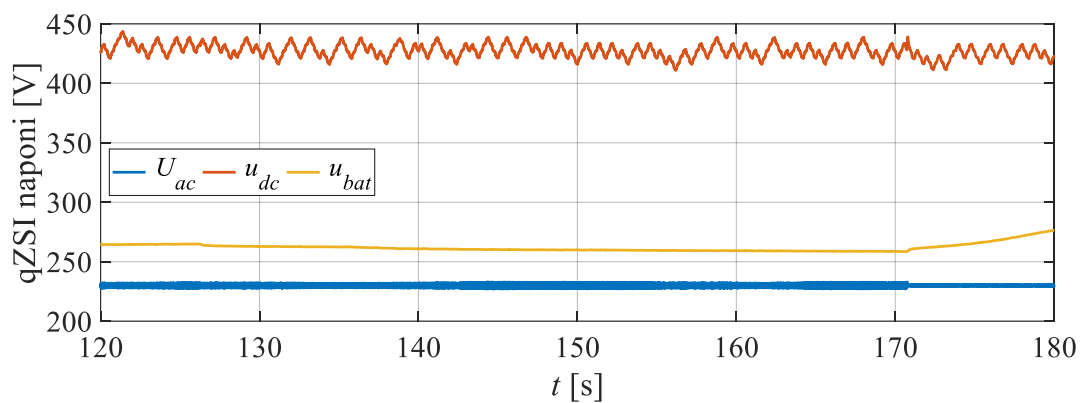
Slika 6.18 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

U nastavku je na slici 6.19 izdvojen period eksperimenta 120 s – 180 s, koji obuhvaća jednu promjenu osunčanosti, brzine vjetra i isključenje trošila. Na odzivima snaga ponovno se može istaknuti prisutnost blagih oscilacija kao posljedica kontinuirane optimizacije FN izvora. Naime klasični P&O algoritmi, kakav je u ovom slučaju algoritam FN izvora, ne zaustavljaju se u optimalnoj radnoj točki već kontinuirano osciliraju oko nje. Upravo se po odzivu napona na slici 6.19 može vidjeti kako algoritam oscilira s više od jednog koraka napona oko optimalnog iznosa. Svakako, primijećene oscilacije nisu utjecale na rad mikromreže i ni u najmanjoj mjeri se ne prenose na izlaz izmjenjivača, odnosno na trošilo.

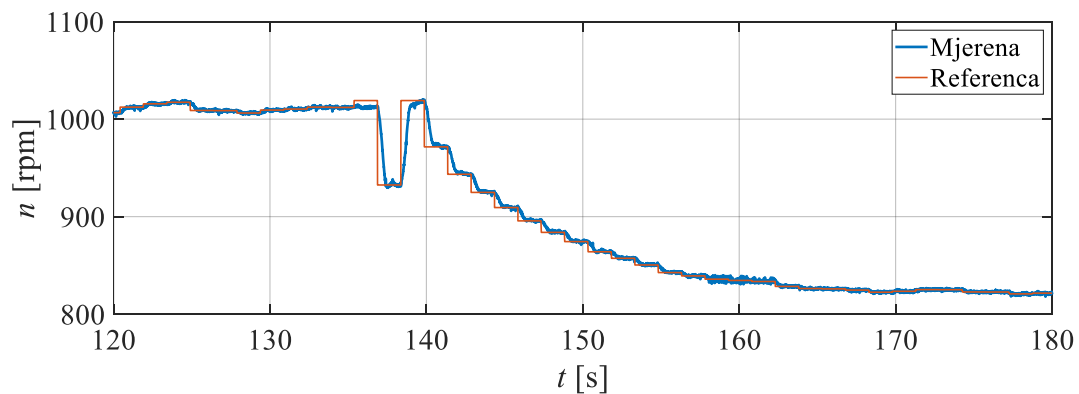
Na odzivu brzine vrtnje SCIG-a se može vidjeti i kontinuirani rad MPPT algoritma vjetroturbine koji u malim koracima kontinuirano korigira brzinu vrtnje. Ipak, unatoč tim korekcijama, ne vidi se gotovo nikakav utjecaj na snagu p_m u smislu oscilacija. Upravo u tome se odražava prednost FL P&O algoritama koji, iako rade na istom principu pomaka i promatranja, korekciju prilagođavaju udaljenosti/blizini točke maksimalne snage i osiguravaju brzu konvergenciju uz minimalne oscilacije oko maksimuma. U trenutku promjene brzine vjetra na slici 6.19c može se vidjeti kako algoritam napravi značajno veću korekciju u referenci brzine. U konkretnom slučaju se dogodilo i da je nakon inicijalno dobre korekcije brzine vrtnje algoritam krenuo u krivom smjeru, ali se naknadno ispravio. To je prouzročilo neznatno dužu konvergenciju u optimalnu radnu točku (snaga se stabilizirala već nakon 7 s), ali se nije odrazilo na točnost konvergencije. Sa završenom optimizacijom vjetroturbine u tom je trenutku i SCIG već u optimalnoj radnoj točki s iznosom ψ_r^* , koji se u ovakvom pristupu optimizaciji kontinuirano prilagođava iznosu snage p_m .



a)



b)



c)

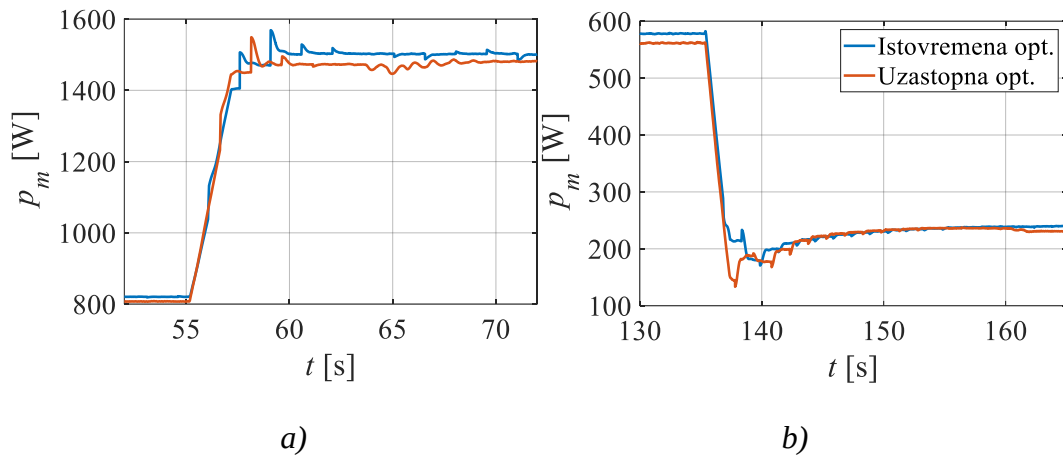
Slika 6.19 Izdvojeni dinamički odzivi a) snaga, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u otočnom režimu za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

6.3.3. Usporedna analiza performansi predloženih algoritama u otočnom režimu rada

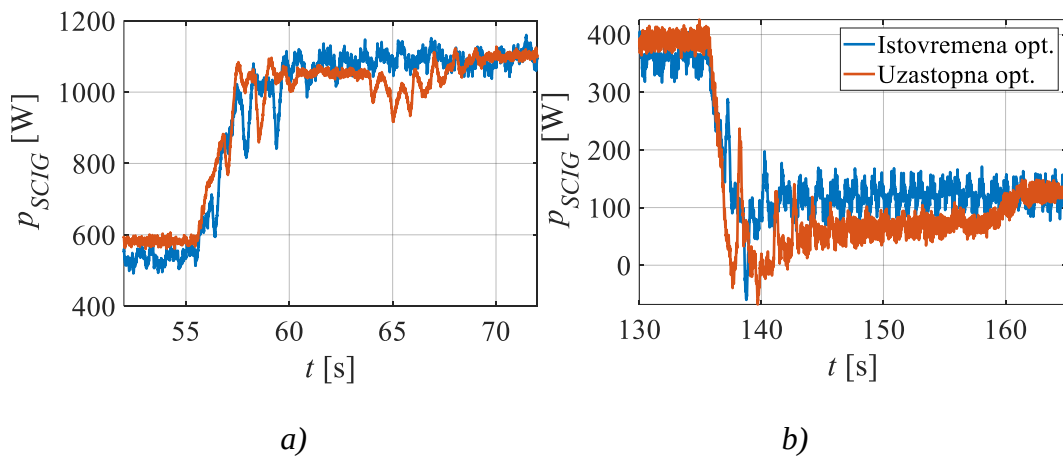
Kako bi se dobio potpuni uvid u performanse pojedinog algoritma pri dinamičkim radnim režimima, međusobno su uspoređeni odzivi relevantnih veličina. Budući da je za oba algoritma proveden isti eksperiment, samo različitog ukupnog trajanja, izjednačen je početak pojedinih promjena radnih uvjeta kako bi se mogli usporediti odzivi u stvarnom vremenu.

Na slici 6.20 su prikazani odzivi mehaničke snage p_m pri porastu brzine vjetra s 9 m/s na 11 m/s te pri smanjenju brzine vjetra s 8 m/s na 6 m/s. Za iste poremećaje su na slici 6.21 prikazani i odzivi električne snage p_{SCIG} . Iz odziva snage p_m se može zaključiti kako nema značajne razlike u dinamičkim performansama između dva algoritma. Eventualno se može istaknuti razlika u postignutim maksimalnim vrijednostima, gdje vjetroturbina kod algoritma s uzastopnim optimizacijama konvergira u točku manje snage p_m , s razlikom od približno 20 W. To, primjerice, može biti posljedica pogreške u procijenjenoj brzini vrtnje, koja se koristi u tom algoritmu a na koju mogu utjecati različiti faktori. S druge strane, po završetku prijelazne pojave u trenutku $t \approx 165$ s, premda snaga p_m algoritma s uzastopnim optimizacijama odstupa od one s istovremenom optimizacijom, električna snaga p_{SCIG} jednaka je za oba algoritma.

Iz odziva električnih snaga očituje se prednost istovremene optimizacije, tj., kontinuiranog rada MPPT algoritma SCIG-a. Nakon promjene brzine vjetra, u slučaju uzastopne optimizacije dolazi do smanjenja učinkovitosti SCIG-a, uslijed korištenja suboptimalnog iznosa toka rotora za vrijeme procesa optimizacije vjetroturbine. To se očituje nižom snagom p_{SCIG} u odnosu na onu postignutu istovremenom optimizacijom a koja se potencijalno i dodatno smanji aktivacijom FL optimizacije SCIG-a, kao primjerice u $t \approx 65$ s. Za razliku od odziva snage p_m , odzivi električne snage p_{SCIG} u izdvojenim slučajevima sugeriraju jednak ili čak veći konačno dostignuti iznos u slučaju primjene algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora.



Slika 6.20 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra



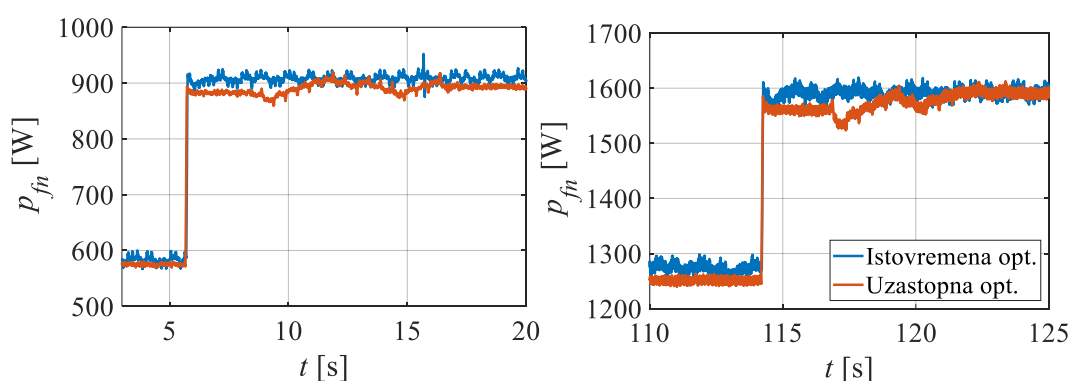
Slika 6.21 Dinamički odzivi električne snage SCIG-a na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra

Na slikama 6.22 i 6.23, su prikazani dinamički odzivi snage FN izvora, p_{fn} , odnosno istosmjernog napona u_{dc} iz kojih se jasno vidi djelovanje MPPT-a FN izvora. Kod upravljačkog algoritma s istovremenim optimizacijama, nakon završetka prijelazne pojave uzrokovane promjenom osunčanosti se unutar jedne sekunde snaga p_{fn} stabilizira u uskom rasponu oko točke maksimalne snage. S druge strane, kod algoritma s uzastopnim optimizacijama je vidljiva odgoda aktivacije MPPT-a FN izvora, koji čeka informaciju je li aktiviran MPPT vjetroturbine. Tek nakon što je potvrđeno da potonji MPPT algoritam nije aktiviran, aktivira se MPPT FN izvora koji kroz približno osam sekundi dostigne stacionarno stanje u optimalnoj radnoj točki. Tu treba naglasiti da je brža optimizacija u slučaju istovremene optimizacije izvora malo potpomognuta i kraćim korakom uzorkovanja MPPT-a u tom slučaju (0,2 s naspram 0,5 s kod uzastopne). Kraći korak uzorkovanja MPPT algoritma FN izvora kod istovremene optimizacije je omogućen korištenjem struje i_{fn} koja se u, odnosu na struju i_{L1} korištenu u slučaju uzastopne

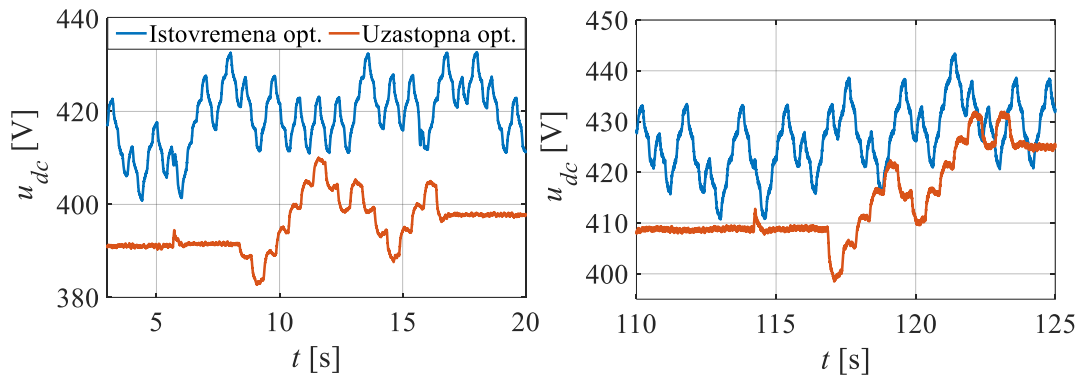
optimizacije, brže stabilizira na stacionarnu vrijednost nakon promjene reference napona. To se donekle može i očitati iz odziva napona na slici 6.23, gdje se oko $t \approx 7$ s može razlučiti značajnija korekcija iznosa u_{dc} kroz približno pet iteracija, što odgovara vremenu od jedne sekunde. Trenutak promjene razine osunčanosti se može očitati iz manjeg poremećaja napona vidljivog u odzivu snimljenom za uzastopnu optimizaciju izvora.

Odzivi napona potvrđuju kako je pri promjeni osunčanost riječ o malim promjenama iznosa napona optimalne radne točke a koje se uz korak korekcije napona od 5 V mogu brzo kompenzirati. Iz toga se može zaključiti kako na brzinu optimizacije puno više utječe vrijeme potrebno za aktivaciju MPPT algoritma. S druge strane, za algoritam s uzastopnim optimizacijama cijeli proces traje približno deset sekundi, što uz relativno mala odstupanja postignute snage od optimalne ne uzrokuje značajan gubitak energije. Dakle, dok s gledišta dinamičkog odziva postoje određene razlike između predloženih upravljačkih algoritama, razlike s gledišta iskoristivosti energije FN izvora su pokazane u nastavku kroz statičku analizu.

Na odzivima se mogu primijetiti i različiti iznosi napona u_{dc} snimljeni za iste razine osunčanosti, koji sugeriraju drugačiju radnu točku postignutu za dva promatrana algoritma. Uzrok tome može biti nepreciznost MPPT algoritma, ali i razlika u mjerenoj ulaznoj varijabli. Naime, dok se kod istovremene optimizacije za izračun snage mjeri struja FN izvora (i_{fn}), kod uzastopne se, radi minimiziranja broja senzora, koristi mjerenje struje na ulazu u qZSI (i_{L1}). Razlika između te dvije struje može prouzročiti odstupanje radnih točaka. Osim toga, na iznos snage izračunate korištenjem struje i_{L1} mogu utjecati različiti faktori, poput šuma u ulaznoj snazi qZSI-ja prouzročenog drugim izvorima ili poremećaja uzrokovanih priključkom trošila i slično.



Slika 6.22 Dinamički odzivi izlazne snage FN izvora na porast osunčanosti

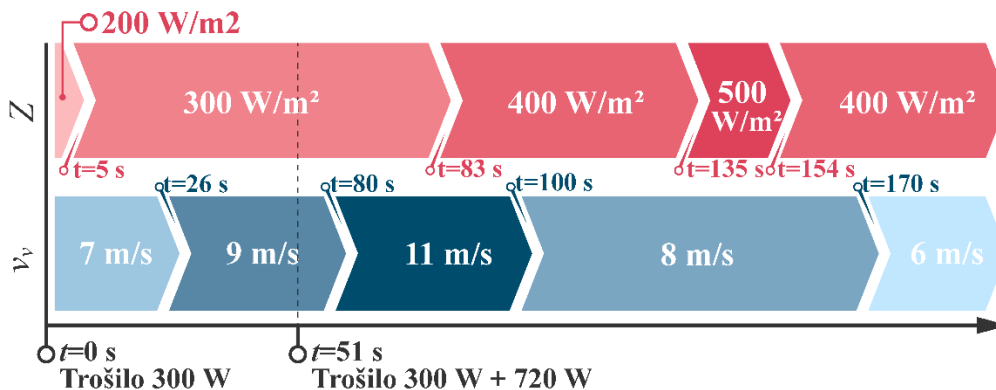


Slika 6.23 Dinamički odzivi ulaznog napona qZSI-ja (FN izvora) na porast osunčanosti

6.4. Analiza dinamičkih režima u spoju s mrežom

6.4.1. Ispitivanje mikromreže i upravljačkog algoritma s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora u spoju s mrežom

U nastavku su prikazani dinamički odzivi snimljeni u eksperimentu gdje je ispitan rad mikromreže u spoju s glavnom mrežom i upravljačkim algoritmom s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora. Vremenska crta provedenog eksperimenta je prikazana na slici 6.24 a sami eksperiment je sličan onom provedenom za otočni režim rada. Ponovno je u okviru jedinstvenog eksperimenta izmijenjeno pet različitih brzina vjetra i četiri različite razine osunčanosti. Drugačiji je samo raspored uključenja trošila, ali u ovom slučaju, zbog fizičke konfiguracije (točke mjerenja i regulacije izlaznih struja), trošilo ionako ne utječe na raspodjelu tokova energije unutar qZSI-ja.



Slika 6.24 Vremenska crta eksperimenta u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Rad mikromreže u spoju s glavnom mrežom bi trebao biti primarni radni režim, osim u iznimnim situacijama. Načela rada i upravljanja u ovom režimu rada razlikuju se u odnosu na otočni režim, što je objašnjeno u okviru prezentacije upravljačkih algoritama u poglavlju 6.2. U ovom slučaju mikromreža i dalje treba ispunjavati osnovne ciljeve upravljanja koji uključuju maksimizaciju proizvodnje, regulaciju ulaznog napona qZSI-ja i struje baterija te praćenje SOC-a. Razlike u ciljevima upravljanja se odnose na izlazne veličine te u spoju s mrežom upravljački algoritam nema zadatak osiguravati stabilan napon trošila odnosno izlazne sabirnice. Umjesto toga reguliraju se izlazne struje i_d i i_q (tj., radna i jalova snaga) a pritom je i regulacija struje baterija izvedena na način da se regulira posredno, zadavanjem izlazne struje i_d , što se može vidjeti na strukturi regulacijski petlji na slici 6.3. Za cijelo vrijeme trajanja ovdje prikazanog eksperimenta bila je uključena regulacija struje baterija s referencom od 0 A. Referenca struje i_q je bila također postavljena na 0 A. Time je postignuto da se sva generirana radna snaga (umanjena za gubitke) prenosi na mrežu i priključeno radno trošilo te je osiguran jedinični faktor snage u PCC točki.

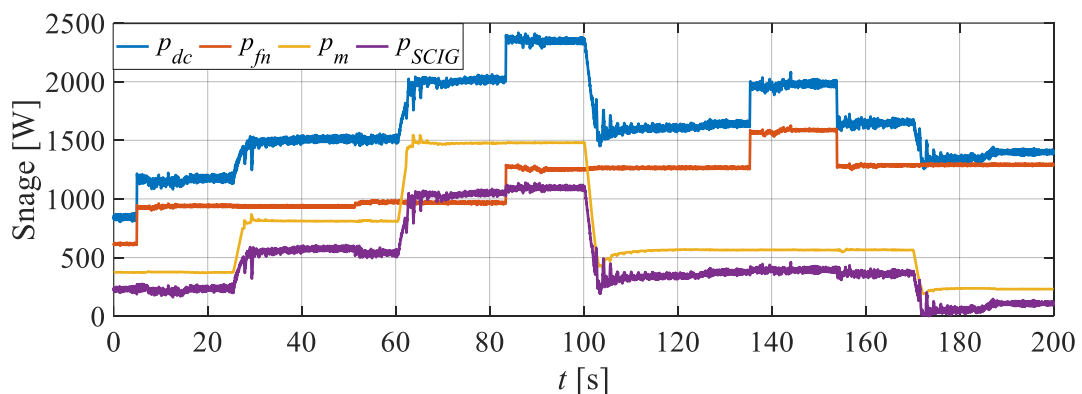
Na slikama 6.25 i 6.26 su prikazani dinamički odzivi za vrijeme trajanja eksperimenta. Snimljeni dio eksperimenta započinje u stabilnoj radnoj točki uz brzinu vjetra $v_v = 7$ m/s i razinu osunčanosti $Z = 200$ W/m². Optimizacije vjetroturbine i FN izvora su već završene te se samo optimizacija SCIG-a izvodi kontinuirano do sljedeće promjene uvjeta. Na početku eksperimenta je već uključeno i radno trošilo snage 300 W.

Prikupljeni rezultati ukazuju na performanse mikromreže slične onima snimljenim u otočnom režimu rada. Cijelo vrijeme trajanja eksperimenta mikromreža je radila stabilno bez značajnijih poremećaja. Snage prikazane na slici 6.25 ukazuju na odziv snage p_{dc} potpuno u skladu s promjenama u atmosferskim uvjetima. Pri promjenama brzine vjetra, odzivi snaga p_m i p_{SCIG} su očekivani, bez vidljivih anomalija. Detaljniji uvid u koordinaciju MPPT algoritama za vrijeme ovog eksperimenta je obrađen u nastavku gdje je izdvojeno prvih 60 sekundi eksperimenta radi boljeg uvida u dinamiku koordinacije MPPT algoritama. Vremena dostizanja stabilnog stanja nakon promjene brzine vjetra su također slična onima snimljenim u otočnom režimu rada za upravljački algoritam s uzastopnom optimizacijom i ne vide se anomalije u reakciji brzine vrtnje SCIG-a na slici 6.26c. Nije zabilježen nikakav negativan utjecaj rada WECS-a na ostatak mikromreže.

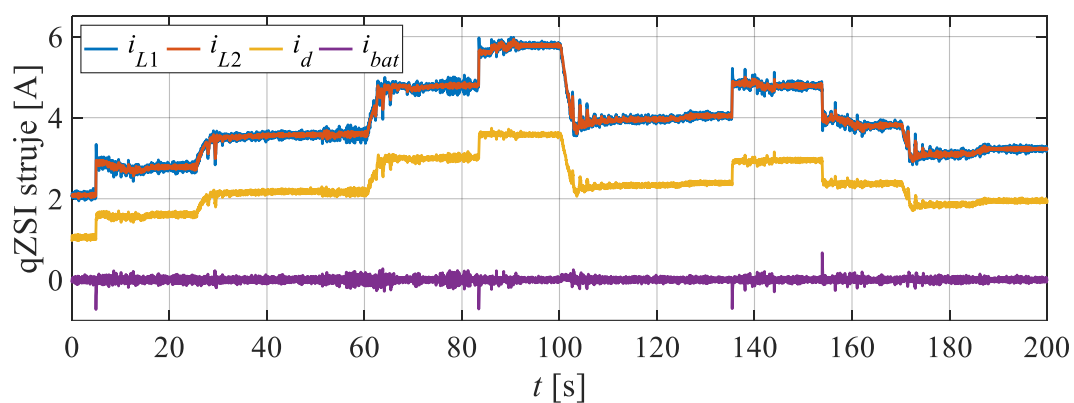
Reakcija snimljenih snaga na promjene u razini osunčanosti je gotovo trenutna, kao i kod otočnog režima rada. Naknadno svakoj promjeni osunčanosti se može uočiti aktivacija pripadajućeg MPPT algoritma, koji korigira iznos napona u_{dc} s obzirom na novu razinu

osunčanosti (slika 6.26b). Utjecaj rada FN izvora na ostatak mikromreže je vidljiv na strujama prikazanim na slici 6.26a, gdje se mogu uočiti skokoviti porasti ulazne struje qZSI-ja i_{L1} i struje i_{bat} u trenucima promjene osunčanosti. Takva reakcija struja je očekivana s obzirom na trenutnu promjenu osunčanosti, odnosno ulazne snage qZSI-ja u tom slučaju, što nije za očekivati kod realnih atmosferskih prilika. U stvarnom sustavu se mogu očekivati brže promjene osunčanosti, kroz nekoliko sekundi, kakve može izazvat naoblaka, na što bi algoritam trebao reagirati detekcijom promjene snage. Alternativno, kroz duži vremenski period može doći do postupene promjene osunčanosti (ili temperature), sukladno periodu dana, za što bi bilo potrebno periodički uključivati MPPT algoritam kako bi se radna FN izvora kontinuirano prilagođavala trenutnim uvjetima. Na prikazanim strujama se može vidjeti i kako su struje i_{L1} i i_{L2} jednake cijelo vrijeme trajanja eksperimenta. To je u skladu s izrazom (3.16), uz struju baterija reguliranu na 0 A. Uz tako reguliranu struju baterije, sva raspoloživa snaga se raspodjeljuje na trošilo i mrežu. Prema tome, struja i_d se cijelo vrijeme eksperimenta mijenja proporcionalno ulaznoj snazi. Uz najveću ulaznu snagu mikromreže od 2350 W, zabilježenu u periodu 92 s – 101 s, izlazna struja i_d je dosegla najveću vrijednost od 3,58 A, što odgovara 1830 W ukupne izlazne snage.

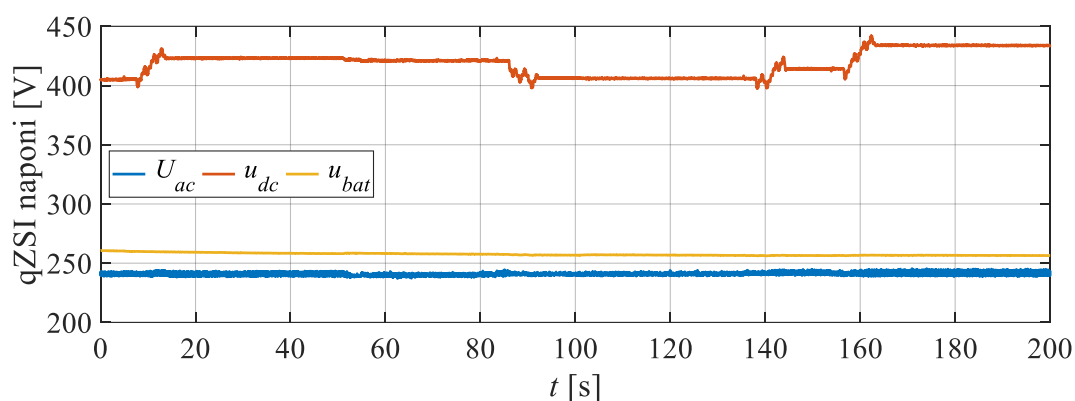
Uključenje trošila u $t \approx 51$ s se nije odrazilo na promjene odnosa snaga ili struja qZSI-ja. Prema konfiguraciji na slici 6.1, mjerna točka izlaznih struja (snage) je prije točke priključka trošila pa promjena trošila ne bi ni trebala imati utjecaja na električne veličine qZSI-ja. Razlika u snazi kod promjene trošila se u potpunosti kompenzira snagom iz mreže. Ipak, može se primijetiti smanjenje šuma u naponu U_{ac} i promjena iznosa napona u_{dc} , što je primijećeno i za otočni režim rada. Ni to u konačnici nije utjecalo na stabilnost rada mikromreže.



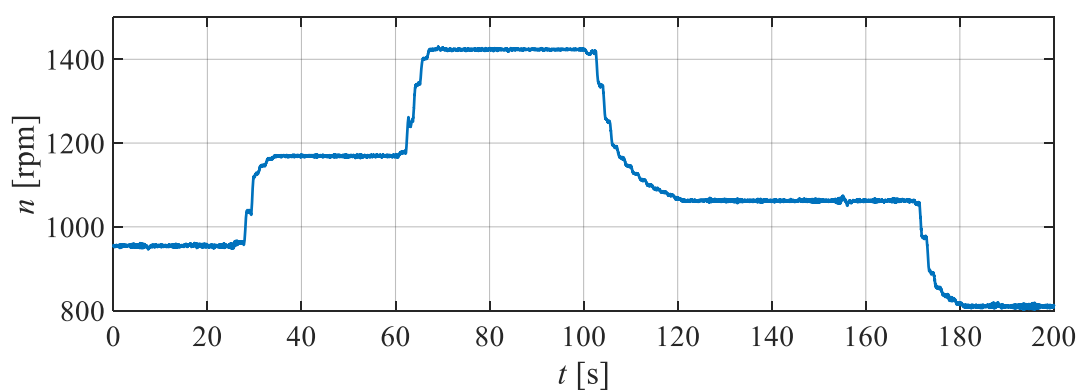
Slika 6.25 Dinamički odzivi snaga na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora



a)



b)



c)

Slika 6.26 Dinamički odzivi a) struja qZSI-ja, b) napona qZSI-ja i c) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

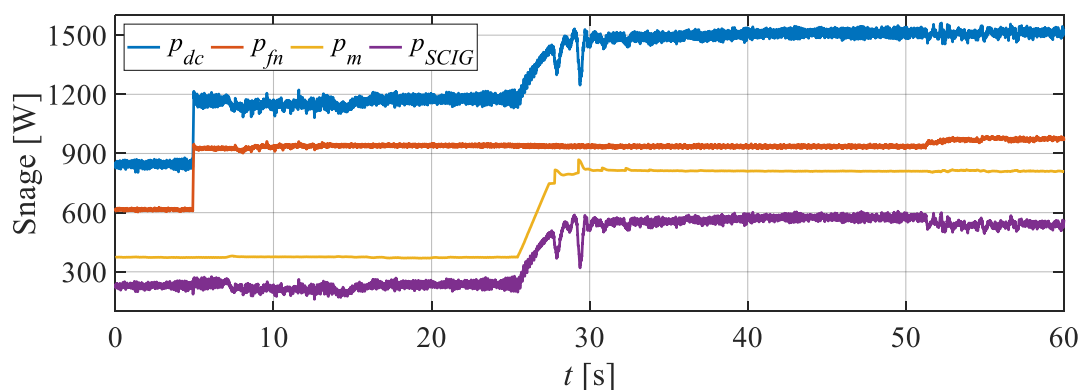
Jasniji uvid u uzastopnu aktivaciju MPPT algoritama i njihovo međudjelovanje je prikazan odzivima na slikama 6.27 i 6.28. Na danim slikama je izdvojeno prvih 60 s prethodno opisanog

eksperimenta kojim je obuhvaćena po jedna promjena brzine vjetra i razine osunčanosti kao i uključenje trošila.

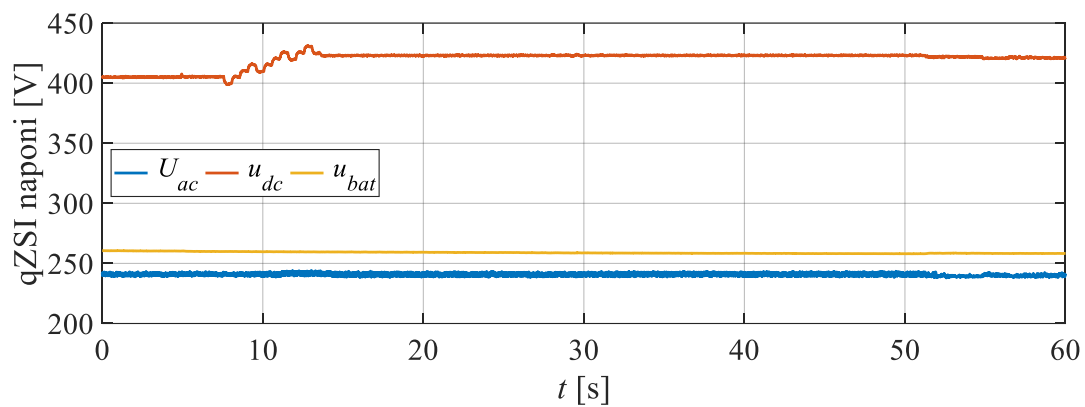
Iz izdvojenih odziva se vidi kako se nakon povećanja osunčanosti u $t \approx 5$ s, i skokovitog porasta snaga p_{fn} i p_{dc} (slika 6.27), s par sekundi odgode aktivira MPPT algoritam FN izvora. Aktivacija MPPT algoritma se očituje promjenom napona u_{dc} na slici 6.28a i blagim oscilacijama u snazi p_{fn} . U istom trenutku se vidi smanjenje snage p_{dc} , koje je zapravo posljedica smanjenja snage p_{SCIG} . To smanjenje snage SCIG-a je uzrokovano odstupanjem od optimalnog iznosa reference magnetskog toka rotora. Kao što se vidi na slici 6.28c, MPPT algoritam SCIG-a reagira na promjenu snage p_{dc} korekcijom iznosa ψ_r^* pa se u trenutku aktivacije MPPT algoritma FN izvora zadržava zatečena vrijednost ψ_r^* , koja je znatno veća od optimalne. Nakon što MPPT algoritam FN izvora konvergira u novu optimalnu radnu točku, s vidljivim blagim povećanjem snage, nastavlja se optimizacija SCIG-a, čija se snaga također vrati na onu prije poremećaja. Iako je došlo do međudjelovanja algoritama, ipak su negativne posljedice blage i kratkotrajne, može se reći i zanemarive.

Za promjenu brzine vjetra može se iz izdvojenih odziva zaključiti kako je zabilježena adekvatna reakcija algoritma. Unutar dvije sekunde od promjene brzine vjetra ($t \approx 26$ s) aktiviran je MPPT algoritam vjetroturbine koji korigira brzinu vrtnje ka novoj optimalnoj vrijednosti te je za pet iteracija vjetroturbina već dostigla točku maksimalne snage. U trenutku $t \approx 40$ s završena je i optimizacija SCIG-a koja se očituje konvergencijom ψ_r^* i blagim porastom snage SCIG-a. Negativan utjecaj promjene brzine vjetra na rad cjelokupne mikromreže nije zabilježen.

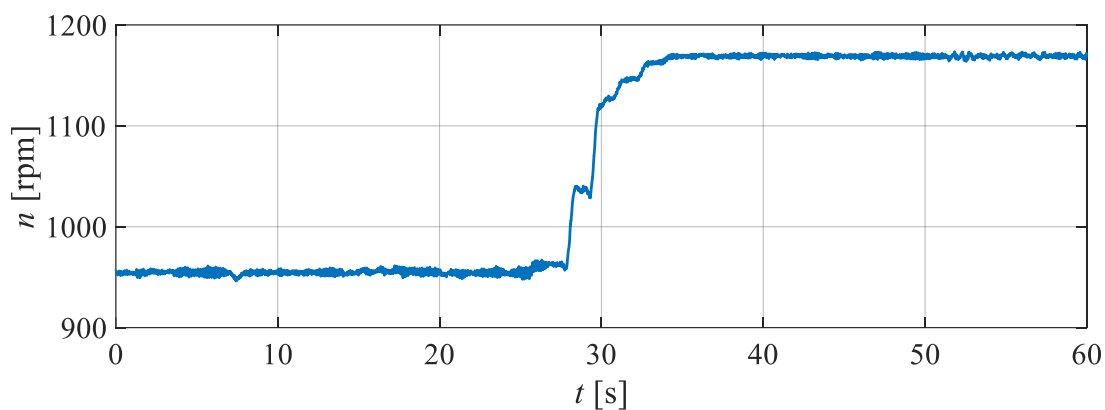
Na izdvojenim slikama se ponovno ističe i utjecaj uključanja trošila. Iako nema utjecaja na raspodjelu tokova energije unutar qZSI-ja, odražava se na šum napona U_{ac} te neznatnu promjenu iznosa napona u_{dc} .



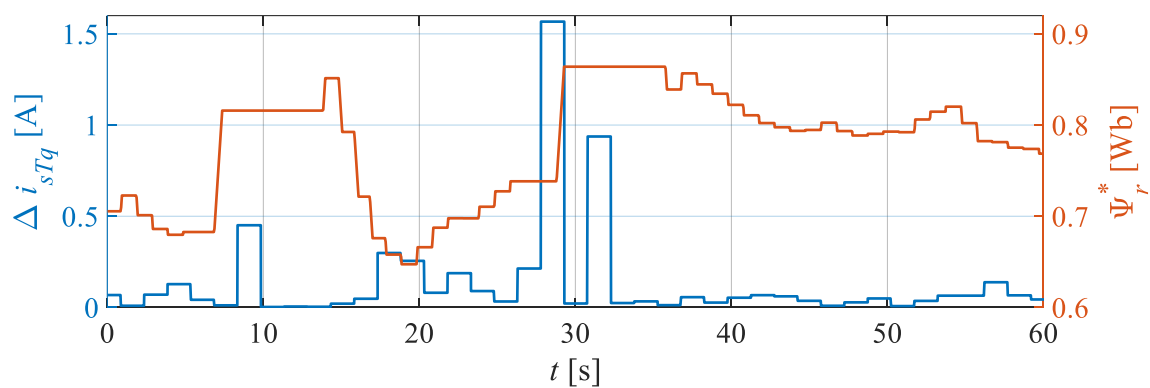
Slika 6.27 Izdvojeni dinamički odzivi snaga na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora



a)



b)

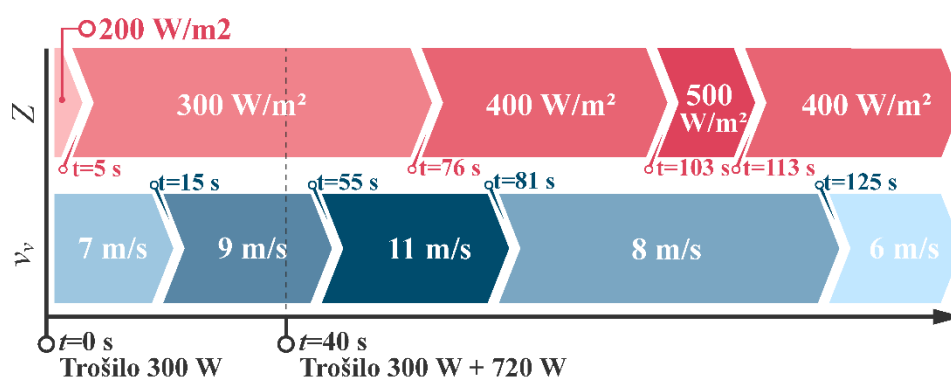


c)

Slika 6.28 Izdvojeni dinamički odzivi a) napona, b) brzine vrtnje SCIG-a i c) reference magnetskog toka rotora i struje Δi_{sTd}^* na promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila u spoju s mrežom za algoritam s uzastopnim optimizacijama izvora

6.4.2. Ispitivanje s upravljačkim algoritmom s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora u spoju s mrežom

Rad mikromreže u spoju s glavnom mrežom je ispitan i uz primjenu algoritma s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora. Proveden je isti eksperiment kao u prethodnom primjeru, ali uz malo kraći vremenski razmak između promjena u atmosferskim uvjetima. Kraći razmak između atmosferskih uvjeta je omogućen izostankom sukcesivne aktivacije MPPT algoritama nakon svake promjene, uslijed čega mikromreža brže dostigne stacionarno stanje. Točna vremenska crta eksperimenta je prikazana na slici 6.29.



Slika 6.29 Vremenska crta eksperimenta u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

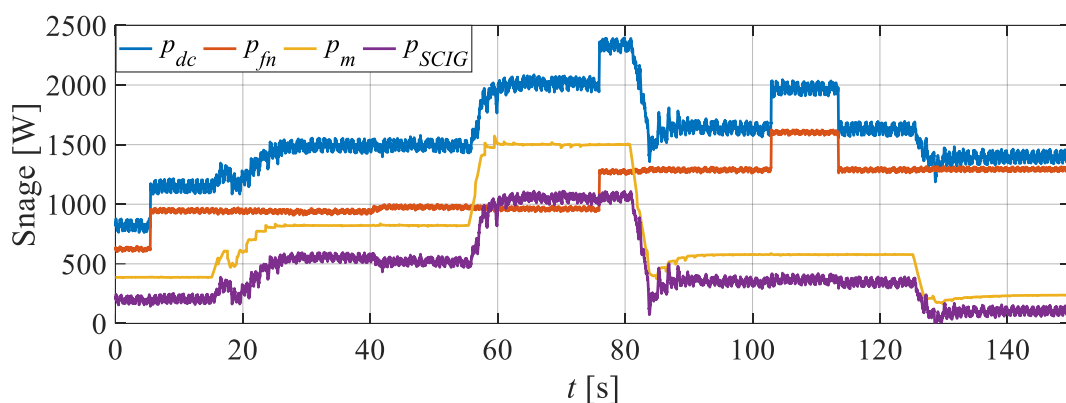
Odzivi veličina u sustavu snimljeni za ovaj eksperiment su prikazani na slikama 6.30 i 6.31. I ovdje, kao i u slučaju otočnog režima rada, istovremena optimizacija izvora naspram uzastopne doprinosi bržoj stabilizaciji ulazne snage qZSI-ja nakon promjene u uvjetima. To se odražava i na struje i_{L1} i i_{L2} koje su, uz regulaciju struje baterije na 0 A, jednake te proporcionalno prate promjene ulazne snage p_{dc} (slika 6.30). Proporcionalno ulaznoj snazi mijenja se i struja i_d , čija je referenca zadana kao izlazna veličina regulatora struje baterija. Struja i_d je pokazatelj izlazne snage i ima stabilan odziv za cijelo vrijeme trajanja eksperimenta.

Regulacija struje baterija se izvodi bez poteškoća i u dinamičkim režimima regulacijski sustav je uspjeva zadržati na zadanoj vrijednosti. Jedina anomalija su manji skokoviti porasti vrijednosti pri promjenama osunčanosti koji se vide na strujama i_{bat} i i_{L1} , kao i kod algoritma s uzastopnim optimizacijama. Treba ponoviti da su takve promjene nerealne u stvarnom sustavu. Osim toga, drugi utjecaj rada i dinamičkih režima FN izvora na rad mikromreže nije uočen.

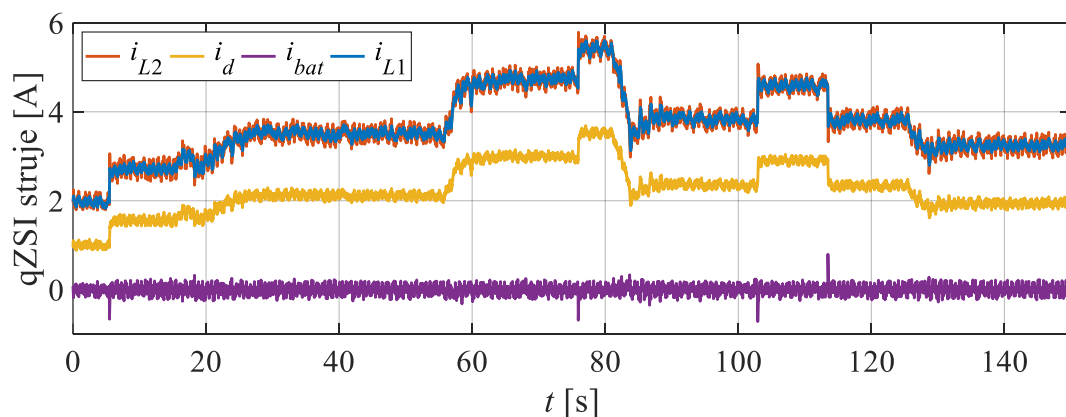
Slično vrijedi i za WECS čiji se dinamički odzivi i prilagodba atmosferskim uvjetima nisu odrazili na stabilnost rada mikromreže. U strujama i_{L1} i i_{L2} se ponovno može primijetiti kako su

oscilacije pri promjeni brzine vjetra manje izražene nego kod algoritma s uzastopnim optimizacijama.

Na odzivu brzine vrtnje SCIG-a na slici 6.31b ističu se dvije uzastopne korekcije brzine vrtnje SCIG-a u pogrešnom smjeru kod promjene brzine vjetra u $t \approx 15$ s. Osim toga, pogrešna korekcija je zabilježena u $t \approx 81$ s i $t \approx 125$ s. U sva tri slučaja algoritam je uspješno konvergirao u optimalnu radnu točku, bez većih poteškoća. U idućem poglavlju je usporedbom s algoritmom s uzastopnim optimizacijama u spoju s mrežom, gdje nije zabilježena ovakva anomalija, pokazan utjecaj pogrešnog koraka optimizacije na brzinu optimizacije i ulaznu snagu qZSI-ja.

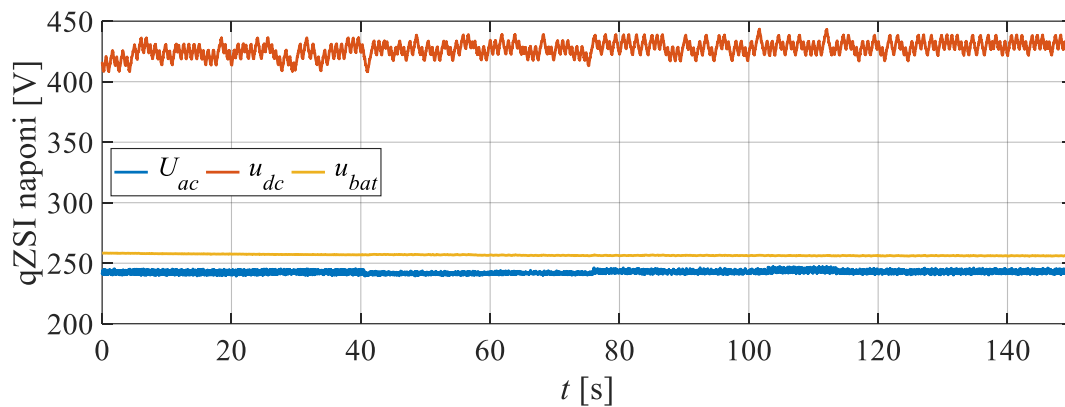


a)

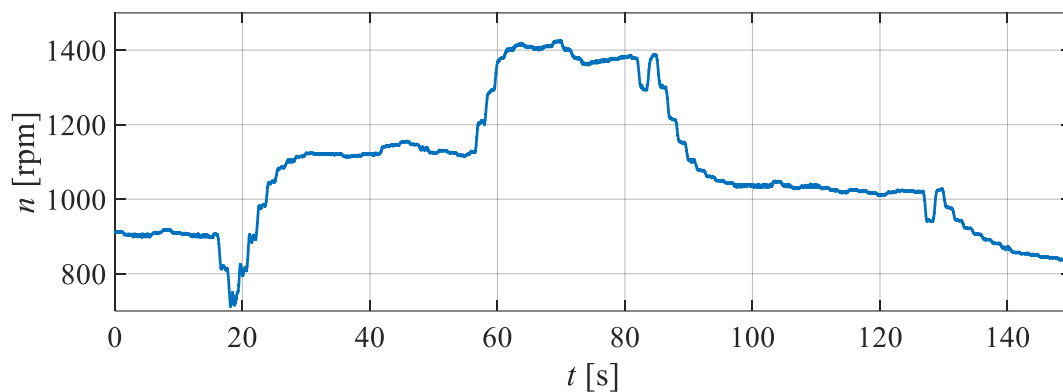


b)

Slika 6.30 Dinamički odzivi a) snaga i b) struja qZSI-ja na promjene snage trošila, brzine vjetra i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora



a)



b)

Slika 6.31 Dinamički odzivi a) napona qZSI-ja i b) brzine vrtnje SCIG-a na promjene snage trošila, brzine vjeta i osunčanosti u spoju s mrežom za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora

6.4.3. Usporedna analiza performansi predloženih algoritama u spoju s mrežom

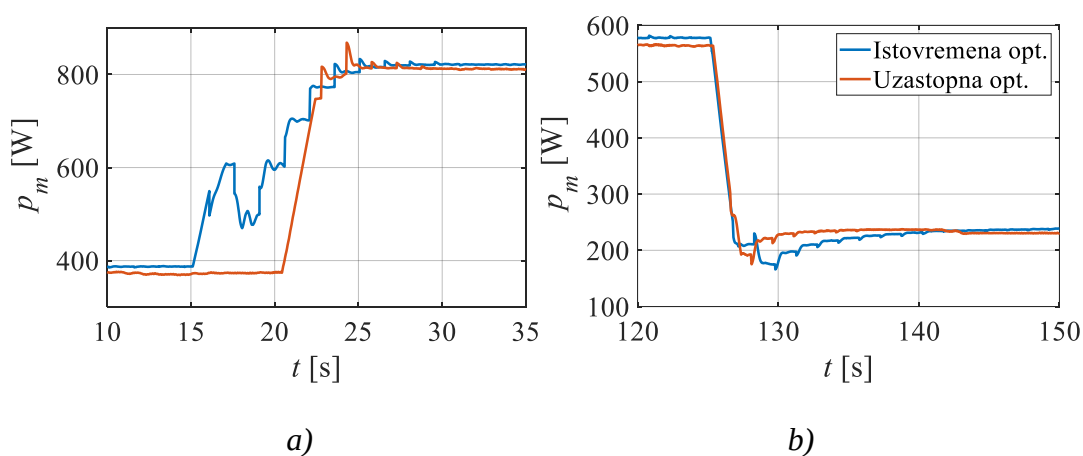
S ciljem jasnije usporedbe performansi predloženih algoritama u radu sa spojem na mrežu, u nastavku su usporedno prikazani odzivi veličina na promjene brzine vjeta i osunčanosti. S obzirom na to da za algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora i algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora nije potpuno isti vremenski raspored promjena, odzivi snimljeni za potonji algoritam su vremenski pomaknuti u dolje prikazanim odzivima. Na taj način je izjednačen trenutak promjene atmosferskih uvjeta i odzivi se mogu usporedno analizirati.

Na slikama 6.32 – 6.34 prikazani su dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine p_m , brzine vrtnje SCIG-a, n , te električne snage SCIG-a, p_{SCIG} , i to za slučaj porasta brzine vjetra sa 7 m/s na 9 m/s u trenutku $t \approx 15$ s te smanjenja brzine vjetra s 8 m/s na 6 m/s u trenutku $t \approx 125$ s. U oba slučaja je optimizacija vjetroturbine kod algoritma s istovremenom optimizacijom krenula s korekcijom brzine vrtnje u pogrešnom smjeru. To se jasno vidi iz odziva brzine vrtnje gdje su prikazane i referentne vrijednosti zadane MPPT-om.

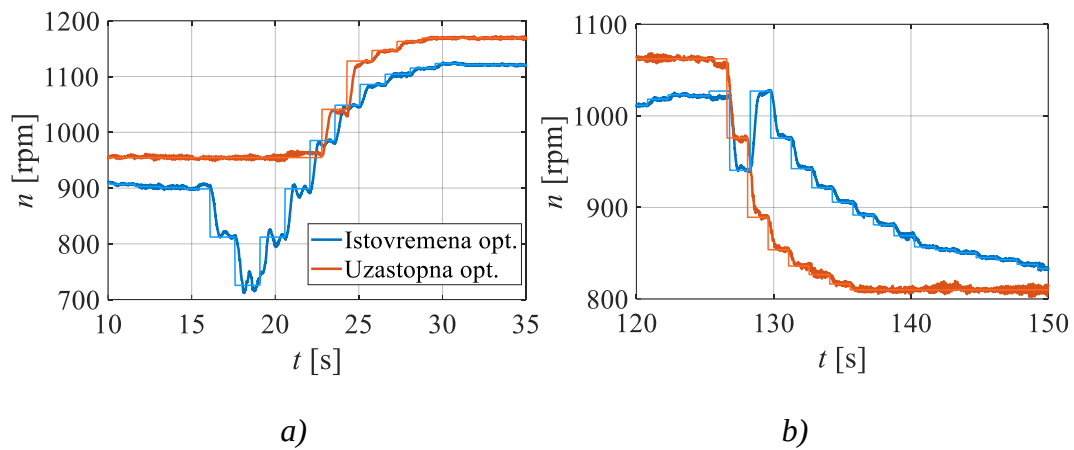
U slučaju porasta brzine vjetra dogodila su se dva pogrešna koraka kod algoritma s istovremenim optimizacijama, ali se to nije negativno odrazilo na snagu p_m . Naprotiv, ona je čak po iznosu veća veći dio trajanja prijelazne pojave nego kod algoritma s uzastopnim optimizacijama. Na električnoj se pak snazi vidi nadvišenje zabilježeno kod istovremene optimizacije u trenutku promjene brzine vjetra, ali se vrijednosti snage p_{dc} vrlo brzo izjednače za oba algoritma i ostaju jednake do kraja prijelazne pojave.

Kod smanjenja brzine vjetra je zabilježen jedan pogrešan korak kod algoritma s istovremenim optimizacijama i to se negativno odrazilo na snagu p_m koja je veći dio prijelazne pojave nižeg iznosa u odnosu na algoritam s uzastopnim optimizacijama. Unatoč tome, snaga p_{dc} je kod prvog algoritma veća za cijelo vrijeme trajanja prijelazne pojave, iako nakratko dostiže nižu vrijednost. Tu je veći iznos snage p_{dc} postignut prvenstveno doprinosom optimizacije SCIG-a, koja je kod uzastopne optimizacije isključena za vrijeme trajanja optimizacije vjetroturbine.

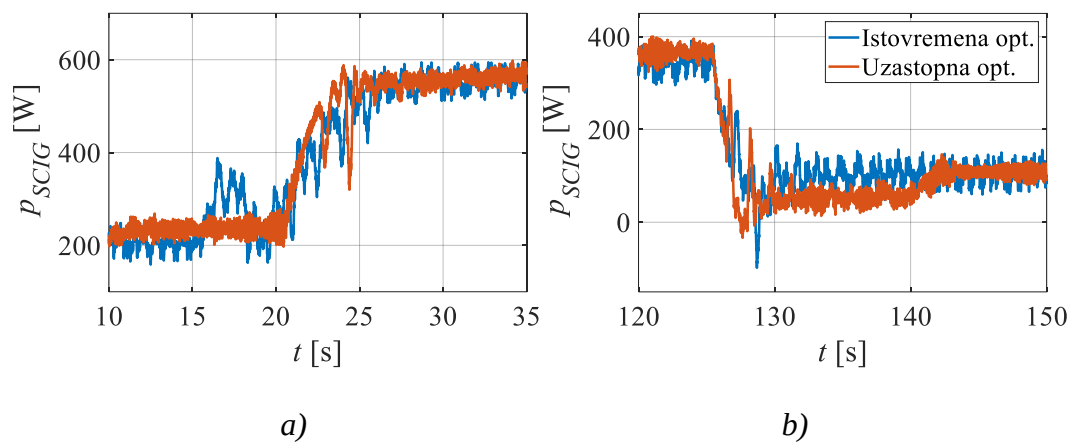
U oba promatrana slučaja se brzine vrtnje razlikuju u početnim i konačnim vrijednostima nakon prijelazne pojave. To je dijelom uzrokovano procjenom brzine vrtnje, gdje se može javiti greška u stacionarnom stanju, a dijelom je uzrokovano drugačijom postignutom radnom točkom, što ne mora nužno imati značajan utjecaj na snagu vjetroturbine.



Slika 6.32 Dinamički odzivi mehaničke snage vjetroturbine na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra



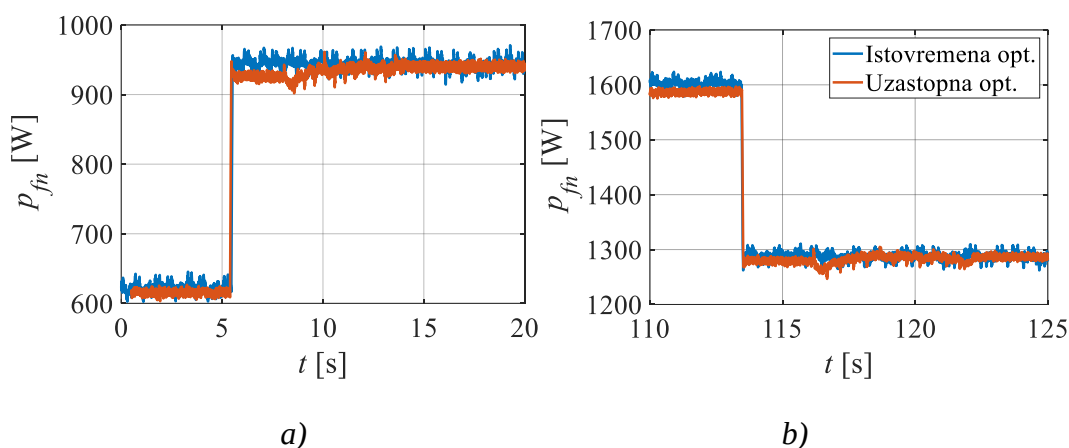
Slika 6.33 Dinamički odzivi brzine vrtnje SCIG-a na a) porast brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra



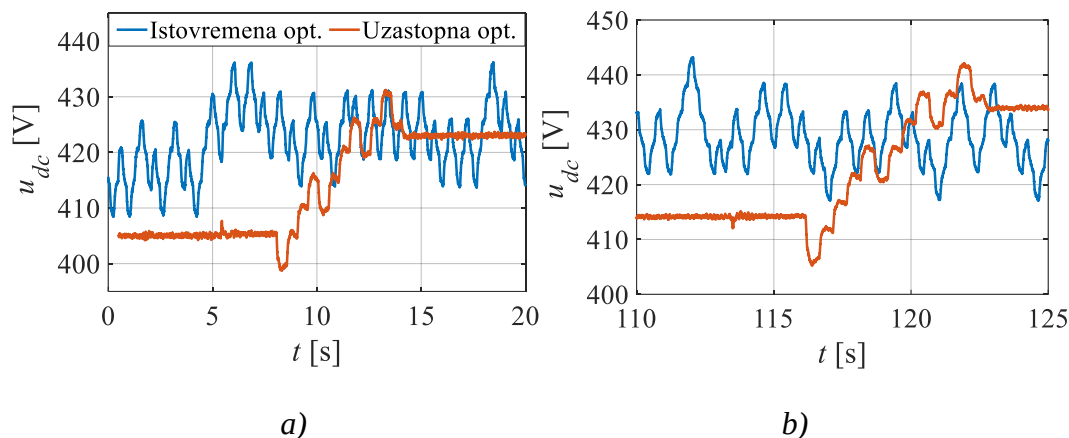
Slika 6.34 Dinamički odzivi električne snage SCIG-a na porast a) brzine vjetra i b) smanjenje brzine vjetra

Uspoređeni su i odzivi dvaju predloženih algoritama upravljanja pri promjenama osunčanosti. Na slikama 6.35 i 6.36 prikazani su odzivi izlazne snage FN izvora i ulaznog napona qZSI-ja snimljeni za povećanje i smanjenje razine osunčanosti. I ovdje se kao i kod analize u otočnom režimu rada ističe razlika u smislu praktički trenutnog dostizanja optimalne radne točke kod istovremene optimizacije distribuiranih izvora. Kod uzastopne optimizacije distribuiranih izvora se vidi vrijeme potrebno za aktivaciju nakon koje algoritam u relativno kratkom vremenu dostiže točku maksimalne snage. Dakle manji dio energije Sunca ostaje neiskorišten, ali je riječ o periodu kraćem od 3 s, s relativno malom razlikom u snazi. S druge strane, uzastopna optimizacija rezultira s puno stabilnijim vrijednostima napona i snage bez očitih oscilacija u stacionarnom stanju.

Na prikazanim odzivima se ponovno, kao i u otočnom režimu rada, mogu primijetiti i različiti iznosi srednje vrijednosti napona u_{dc} snimljeni za iste razine osunčanosti. Te razlike se slažu sa odstupanjima u snazi p_{fn} vidljivim na odzivima prikazanim na slici 6.35. U navedenim odzivima se snaga p_{fn} za dva predložena upravljačka algoritma razlikuje u radnim točkama snimljenim u periodu prije promatranih promjena osunčanosti. Konkretni točnosti MPPT algoritama postignute za dva predložena pristupa upravljanja su detaljnije razrađena u poglavlju 6.7.1.



Slika 6.35 Dinamički odzivi električne snage FN izvora na a) porast i b) smanjenje razine osunčanosti



Slika 6.36 Dinamički odzivi ulaznog napona qZSI-ja U_{dc} na a) porast i b) smanjenje razine osunčanosti

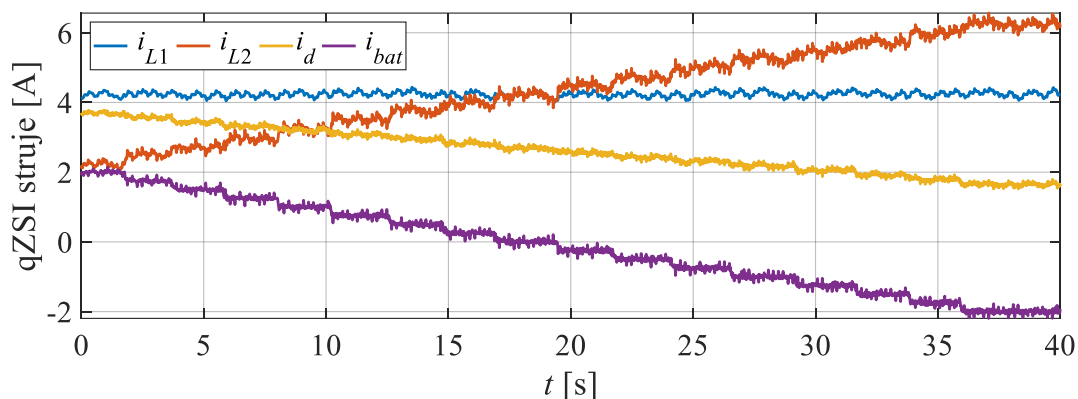
6.5. Regulacija struje baterija

Predložena mikromreža, osim osiguravanja stabilnosti i pouzdanosti napajanja, ima mogućnost upravljanja punjenjem i pražnjenjem baterija. Ta mogućnost sprječava eventualna oštećenja baterijskog sustava koja se mogu dogoditi u slučaju prekomjernog pražnjenja ili punjenja baterija. Isto tako, omogućuje izvođenje upravljačkih zadataka koji su vezani za neke ekonomske ciljeve upravljanja poput vremenskog pomicanje proizvodnje s ciljem postizanja boljih tržišnih cijena ili usluge poput operativne rezerve. Koncept održavanja SOC-a baterija unutar zadanih granica je već razrađen i u okviru integriranog WECS-qZSI sustava, gdje je uspješno izvedeno upravljanje strujom baterija u otočnom režimu rada i u spoju s mrežom. Upravljanje je na istom načelu izvedeno i u okviru predložene mikromreže, s dvije zasebne regulacijske petlje: jednom za otočni rad i drugom za rad u spoju s mrežom. Iako ranije nije eksplicitno navedena kao upravljački zadatak EMS-a, mogućnost upravljanja punjenjem/pražnjenjem baterija je predviđena upravljačkim algoritmom (slike 6.2, 6.3 i 6.8) i ispitana s ciljem pokazivanja funkcionalnosti.

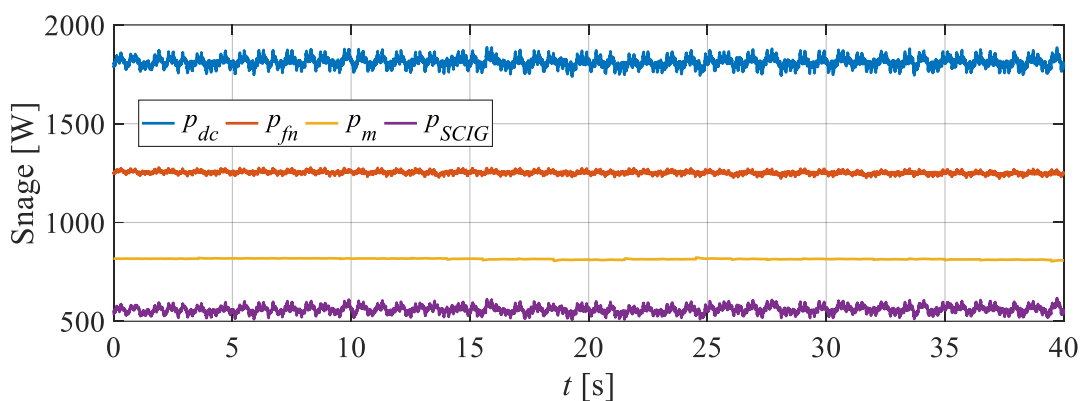
Ovo je već objašnjeno u više navrata, ali vrijedi ukratko ponoviti. U spoju s mrežom, regulacija struje baterija se može izvesti relativno jednostavno uz pretpostavku mogućnosti regulacije izlazne snage qZSI-ja. S tom mogućnošću implementiranom u strukturi predloženih upravljačkih algoritama (slika 6.3), upravljanje strujom baterija se izvodi na temelju bilance snage. Uz zadanu ulaznu snagu, korekcijom izlazne snage prilagođava se i snaga punjenja/pražnjenja baterija. Sukladno slici 6.3, regulacijska petlja struje baterija je u spoju s mrežom izvedena s PI regulatorom i referencom i_d^* kao izlaznom upravljačkom veličinom.

Na slici 6.37 su prikazani dinamički odzivi struja qZSI-ja i relevantnih snaga za vrijeme eksperimenta kojim je ispitana mogućnost regulacije struje baterija u spoju s mrežom. Iako je mogućnost regulacije struje baterije već donekle pokazana u poglavlju 6.4, gdje je u radu s mrežom regulirana na iznos od 0 A, ovdje je ispitan rad s promjenjivom pripadajućom referencom. Eksperiment je napravljen uz konstantnu brzinu vjetrova $v_v = 9$ m/s i osunčanost $Z = 400$ W/m², koji su rezultirali konstantnom ulaznom snagom $p_{dc} \approx 1812$ W. U okviru provedenog eksperimenta, referenca struje i_{bat} je postepeno mijenjana u rasponu od 2 A (pražnjenje) do -2 A (punjenje), s korakom od -0,25 A. Kao što se može vidjeti na slici 6.37a, struja i_{bat} je cijelo vrijeme pratila zadanu referencu bez vidljivih odstupanja, a proporcionalno se smanjivala struja i_d . Iz odziva snaga se može vidjeti kako razmatrana promjena struje baterija

nije utjecala na rad ostatka mikromreže. Proizvodnja iz distribuiranih izvora je ostala ista, samo se promijenila energija koja se razmjenjuje s mrežom.



a)



b)

Slika 6.37 Dinamički odziv a) struja qZSI-ja i b) snaga pri promjeni reference struje baterije

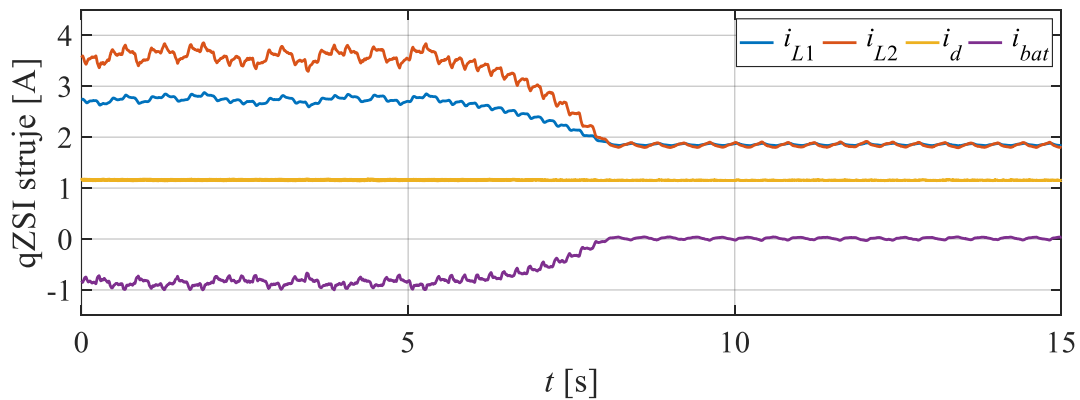
Pri opisu i analizi integriranog WECS-qZSI sustava u poglavlju 5.4 je već navedeno, a isto vrijedi i ovdje, kako se u otočnom režimu rada korekcija struje baterija može izvesti samo raspolaganjem potražnjom ili upravljanjem snagom izvora. Dakle, ako treba spriječiti daljnje pražnjenje baterija, potrebno je isključiti neka ili sva trošila. S druge strane, ako je potrebno spriječiti daljnje punjenje potrebno je ograničiti ulaznu snagu. Ovdje je fokus stavljen na princip korekcije ulazne snage predložene mikromreže, što može biti složeno i ovisi o povezanim izvorima. U predloženoj mikromreži su povezana dva distribuirana izvora: WECS i FN izvor. U poglavlju 5.4.3 je pokazano kako se izlazna snaga WECS-a može korigirati odstupanjem od optimalne radne točke vjetroturbine. U kontekstu predložene cjelovite mikromreže, premda se ponovno može pristupiti korekciji radne točke vjetroturbine, za potrebe regulacije struje baterija više smisla ima korigirati snagu FN izvora. Naime, FN izvor ima brži odziv, što znači da se

regulacija može brže i jednostavnije izvesti a, osim toga, u konkretnom je slučaju riječ o izvoru veće snage.

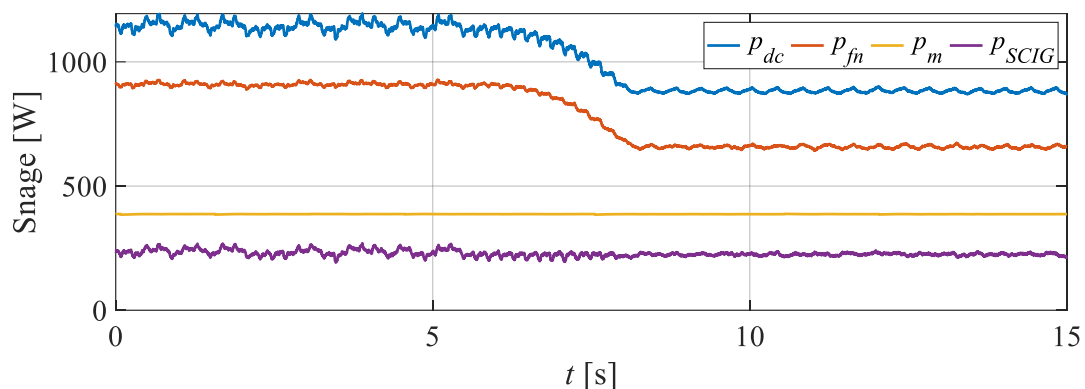
Regulacija struje baterija upravljanjem izlaznom snagom FN izvora je izvedena u okviru MPPT-a a zasniva se na sličnom načelu kao i kod upravljanja izlaznom snagom vjetroturbine. Nakon što je aktivirana regulacija struje baterija, uz zadanu referencu, MPPT iterativno povećava referencu napona u_{dc} dok se ne dostigne zadana vrijednost struje i_{bat} . MPPT algoritam FN izvora i dalje radi po istom P&O načelu, samo mu je izmijenjen cilj na način da konvergira s obzirom na referencu struje baterija. Matematički se to može opisati kao:

$$U_{dc}^*(k) = \begin{cases} U_{dc}^*(k-1) + \Delta U_{dc}^*, & i_{bat} < i_{bat}^* \\ U_{dc}^*(k-1) - \Delta U_{dc}^*, & i_{bat} > i_{bat}^* \end{cases} \quad (6.4)$$

U nastavku su na slikama 6.38 i 6.39 prikazani dinamički odzivi struja i snaga snimljeni u eksperimentu gdje je ispitana regulacija struje baterija u otočnom režimu rada. Eksperiment je izveden uz konstantnu brzinu vjetra $v_v = 6$ m/s i osunčanost $Z = 300$ W/m². Uz dane uvjete, baterije su se unatoč priključenom trošilu snage 560 W punile uz struju od $-0,86$ A. Kako bi se spriječilo daljnje punjenje, u trenutku $t \approx 5,5$ s je aktivirana regulacija struje baterija koja potom postepeno konvergira ka zadanoj vrijednosti. Kroz približno 4 s struja baterije je dostigla vrijednost od 0 A oko koje je dalje blago oscilirala. Blage oscilacije su uzrokovane prirodom P&O algoritma i nemogućnošću smirivanja u točki konvergencije. Paralelno sa smanjenjem struje punjenja baterija postepeno se smanjivala i snaga p_{fn} , sukladno korekciji radne točke. Struja trošila, tj., njena radna komponenta i_d , je ostala nepromijenjena cijelo vrijeme trajanja eksperimenta a nepromijenjene su također ostale i snage WECS-a. To ukazuje na zadovoljavajuću funkcionalnost implementirane regulacije struje baterija.



Slika 6.38 Dinamički odziv struja qZSI-ja pri aktivaciji regulacije struje baterije u otočnom režimu rada



Slika 6.39 Dinamički odziv snaga pri aktivaciji regulacije struje baterije u otočnom režimu rada

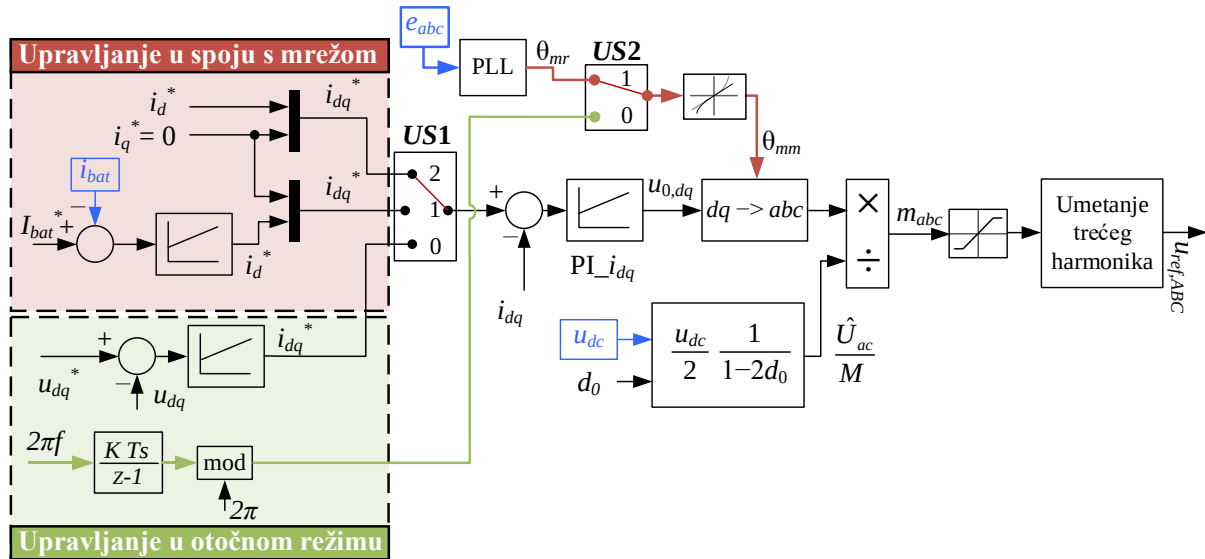
6.6. Prelasci između otočnog rada i rada u spoju s glavnom mrežom

Prethodno su opisani i pokazani različiti aspekti rada predložene mikromreže koji uključuju i rad u spoju s mrežom i otočni režim rada. Da bi mikromreža ispunila sve preduvjete potpuno funkcionalne mikromreže, potrebno je osigurati i pouzdane mehanizme glatkog prelaska između ta dva režima rada. Za prelazak iz otočnog režima rada u spoj na mrežu ključno je izvesti sinkronizaciju. Prije fizičkog povezivanja potrebno je da napon izmjenične sabirnice mikromreže u točki priključka na glavnu mrežu po amplitudi i frekvenciji odgovara naponu mreže te da su fazno izjednačeni, tj., da im je kut θ jednak.

U razvijenom upravljačkom algoritmu je cijeli postupak sinkronizacije automatiziran kako bi se minimizirala mogućnost pogreške pri izvođenju eksperimenata. Cijeli proces se može opisati kroz četiri koraka: provjera stanja mrežnog napona, izjednačavanje amplitude napona qZSI-ja s mrežnim, fazno sinkroniziranje s mrežnim naponom i na kraju uklop. Prvi korak procesa sinkronizacije je provjera vrijednosti d i q komponenti mrežnog napona te pripadajuće frekvencije. Time se izbjegava prenošenje eventualnih anomalija iz mreže na mikromrežu pri samom procesu sinkronizacije. Osim toga, upravo je nestabilnost u mreži jedan od motiva razvoja mikromreža te se u tom slučaju teži otočnom radu dok se uvjeti u mreži ne poprave. Nakon što su uvjeti u mreži ispitani, kreće fazna sinkronizacija, odnosno izjednačavanje faznog kuta napona mikromreže (θ_{mm}) s naponom mreže. Ranije je u poglavlju 6.2.1 opisan dio upravljačkog algoritma zadužen za upravljanje izmjeničnim veličinama koji je radi jasnoće prikazan i ispod na slici 6.40, gdje su posebno istaknute petlje za određivanje kuta θ_{mm} u spoju

s mrežom i u otočnom režimu rada. Iz strukture na slici 6.40 se može vidjeti kako je za to korišten klasični PLL kojim se određuje fazni kut mreže θ_{mr} . Nakon što je aktivirana ova sinkronizacija, upravljačka sklopka US2 se prebacuje u položaj 1 i time se fazni kut θ_{mm} izjednačava s kutom mreže. Fazni kut θ_{mm} je pritom kut koji se koristi u algoritmu upravljanja za transformaciju iz sinkrono rotirajućeg koordinatnog sustava dq u stacionarni trofazni abc sustav. Da bi se izbjegla trenutna promjena faznog kuta napona, θ_{mm} se mijenja postepeno uz ograničenu brzinu promjene s obzirom na dopušteni raspon frekvencija napona u otočnom režimu rada.

Istovremeno s početkom fazne sinkronizacije započinje i proces izjednačavanja amplitude napona, što se uz izvedeni upravljački algoritam izvodi relativno lako. Kao što se može vidjeti iz strukture upravljanja, u otočnom režimu rada se izmjenični napon zadaje referencama u_d i u_q . Prema tome, da bi se amplituda napona prilagodila mrežnom, potrebno je samo mrežne vrijednosti e_d i e_q zadati kao referentne (u_{dq}^*).



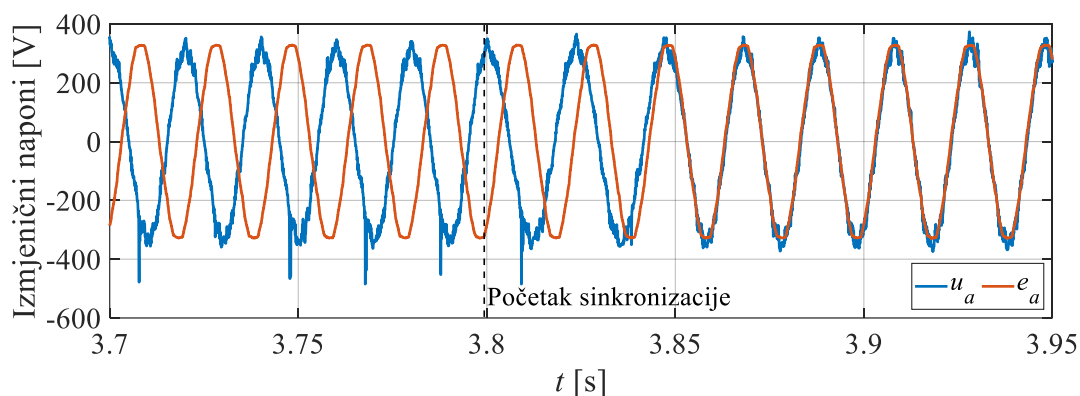
Slika 6.40 Struktura podsustava za upravljanje izlaznim izmjeničnim veličinama qZSI-ja

Nakon što je fazni kut i amplituda izlaznog napona qZSI-ja izjednačen s mrežnim, završen je proces sinkronizacije i qZSI se fizički povezuje s mrežom uključanjem relejne sklopke i postavljanjem sklopke US1 na slici 6.40 u položaj 2. S malom odgodom nakon povezivanja s glavnom mrežom, uključuje se i regulacija struje baterija (sklopka US1 na slici 6.40 se postavlja u položaj 1). Njena je referenca, radi sprječavanja prijelaznih pojava, inicijalno postavljena na trenutnu vrijednost prije uključanja, ali se ubrzo postavlja na 0 A. Za mikromreže s relativno malom snagom, poput ovdje predložene, za očekivati je da će raditi u spoju s mrežom kada je god to moguće. Pritom je logično pretpostaviti i da će u takvom režimu rada referenca struje

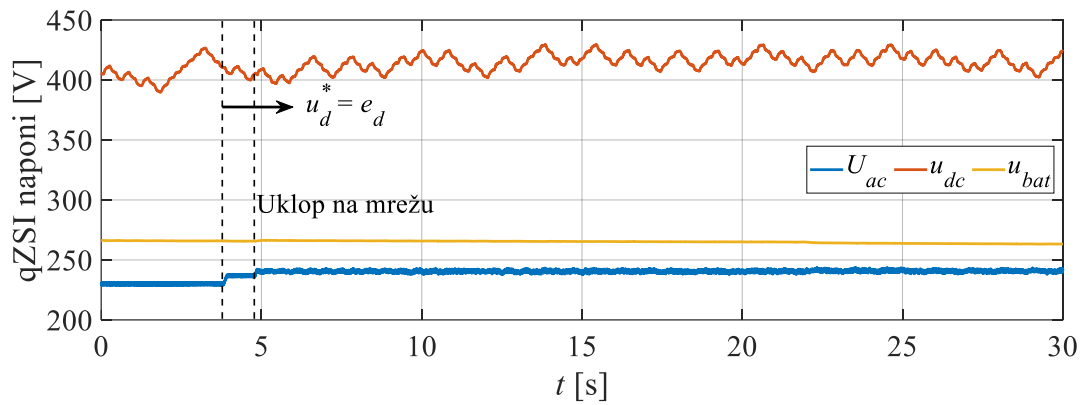
baterije biti stavljena na nulu. Na taj način bi se sva raspoloživa energija usmjeravala u lokalna trošila i mrežu, a eventualni manjkovi bi se pokrivali iz mreže. Pražnjenje ili punjenje baterija u spoju s mrežom se izvodi samo s ciljem ispunjavanja specifičnih tehničkih ili ekonomskih ciljeva EMS-a.

Postupak povezivanja s mrežom je prikazan kroz slike 6.41 i 6.42, gdje su dani dinamički odzivi relevantnih veličina. Na slici 6.41 su prikazani sinusni naponi faze a na izlazu qZSI-ja (u_a) i u mreži (e_a). Iz prikazanih napona se jasno vidi proces sinkronizacije koji se odvije kroz malo više od dva perioda mrežnog napona. Na slici 6.42 su prikazani naponi i struje qZSI-ja snimljeni kroz cijeli eksperiment. Na odzivu napona U_{ac} se vidi trenutak sinkronizacije, obilježen promjenom vrijednosti, te trenutak uključenja na mrežu ($t \approx 4,8$ s) kada ponovno dođe do manje promjene vrijednosti. Prva promjena vrijednosti napona U_{ac} je prilagodba amplitude mrežnoj vrijednosti, a druga je posljedica fizičkog povezivanja s mrežom. Na ulaznom naponu u_{dc} i naponu baterija u_{bat} se pritom ne može istaknuti neka vidljiva prijelazna pojava.

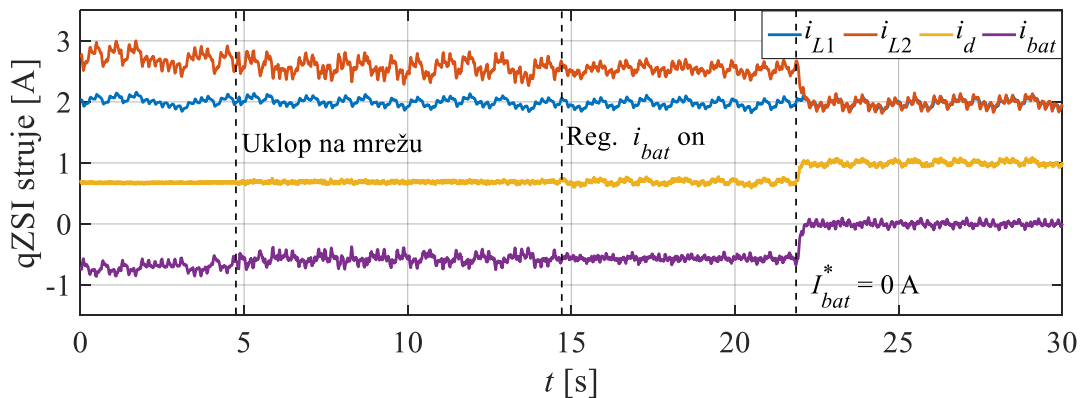
Trenutak uključenja na mrežu se očituje i iz struje i_d na slici 6.42b u vidu povećanja šuma u spomenutoj struji. Sami trenutak uključenja na mrežu se nije odrazio na struje i_{L1} , i_{L2} i i_{bat} . Na tim strujama se očituje trenutak uključenja regulacije struje baterija, oko $t \approx 14,8$ s, kada se može vidjeti smanjenje šuma i oscilacija u njihovim valnim oblicima. U trenutku $t \approx 22$ s, referenca struje baterija je postavljena na 0 A, što rezultira brzim smanjenjem struje punjenja baterija. Sa smanjenjem struje punjenja baterija proporcionalno je narasla struja i_d a time i snaga na izlazu iz qZSI-ja.



Slika 6.41 Mjereni naponi na izlazu qZSI-ja i u mreži u trenutku sinkronizacije



a)



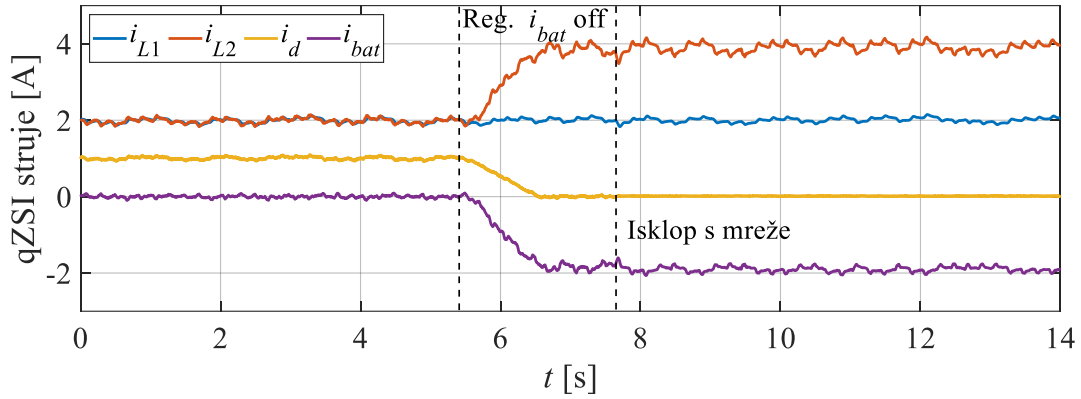
b)

Slika 6.42 Dinamički odzivi a) napona i b) struja qZSI-ja u procesu sinkronizacije i uključenja na mrežu

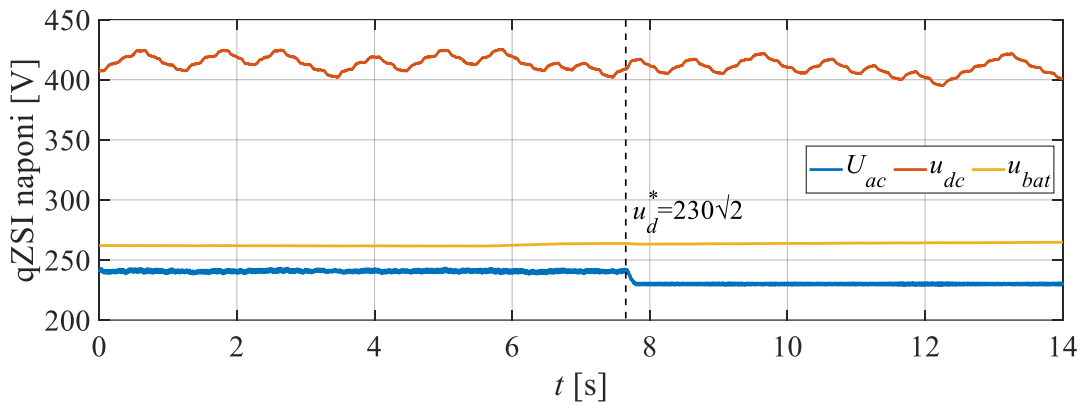
Isključenje s mreže je jednostavniji proces i ključno je samo da u trenutku isključenja struja u točki PCC bude jednaka ili približno jednaka nuli. Budući da u predloženoj konfiguraciji mikromreže nije izvedeno zasebno mjerenje struje u točki PCC, jer su mjerni senzori struje postavljeni prije točke povezivanja trošila (slika 6.1), prije isključenja s mreže se privremeno isključuju i trošila. Na taj se način osigurava da je regulirana struja i_d jednaka struji u točki PCC. Cijeli postupak isključenja s mreže je također automatiziran kako ne bi došlo do isklopa u nepovoljnim uvjetima.

Proces isključenja s mreže je prikazan na slici 6.43, gdje su dani odzivi struja i napona qZSI-ja. Prvi korak procesa je isključenje regulacije struje baterija te postavljanje reference $i_d^* = 0$ A. Na slici 6.43a se vidi kako se struja i_d po isključenju regulacije struje baterija smanjuje na novu zadanu vrijednost. Nakon što se postigne zadani iznos struje i_d , isključuje se i trošilo iako se zbog konfiguracije mikromreže to ne vidi na prikazanim odzivima. Konačno, u trenutku $t \approx 7,7$ s izvodi se i fizičko odvajanje mikromreže s glavne mreže isključenjem relejne sklopke.

U istom trenutku se zadaje referentna vrijednost napona u_d na vrijednost od $230\sqrt{2}$, što se očituje smanjenjem napona U_{ac} na slici 6.43b. Naime, u trenutku izvođenja eksperimenta napon mreže je bio malo veći od standardne vrijednosti zbog čega se i vidi ova razlika. Slična razlika je primijećena i u procesu sinkronizacije i uklopa na mrežu.



a)



b)

Slika 6.43 Dinamički odzivi a) napona i b) struja qZSI-ja u procesu isključenja s mreže

6.7. Statičke karakteristike predložene mikromreže

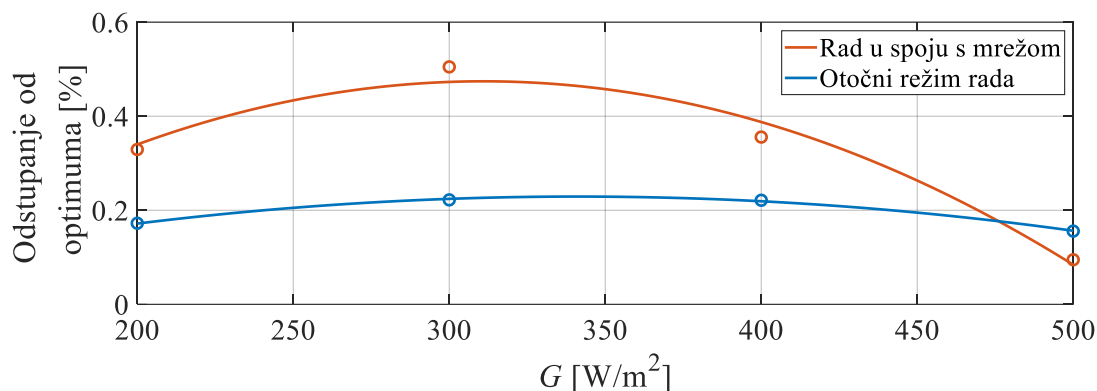
Za potpunu evaluaciju predložene mikromreže i upravljačkih algoritama, napravljena je i statička analiza performansi. Kroz statičku analizu je napravljena evaluacija korisnosti i raspodjele tokova energije mikromreže. Napravljena je procjena statičke učinkovitosti implementiranih MPPT algoritama vjetroturbine i FN izvora, kojom je pokazana njihova

točnost. Isto tako, zasebno je evaluirana i učinkovitost optimizacije SCIG-a postignuta za oba razvijena upravljačka algoritma.

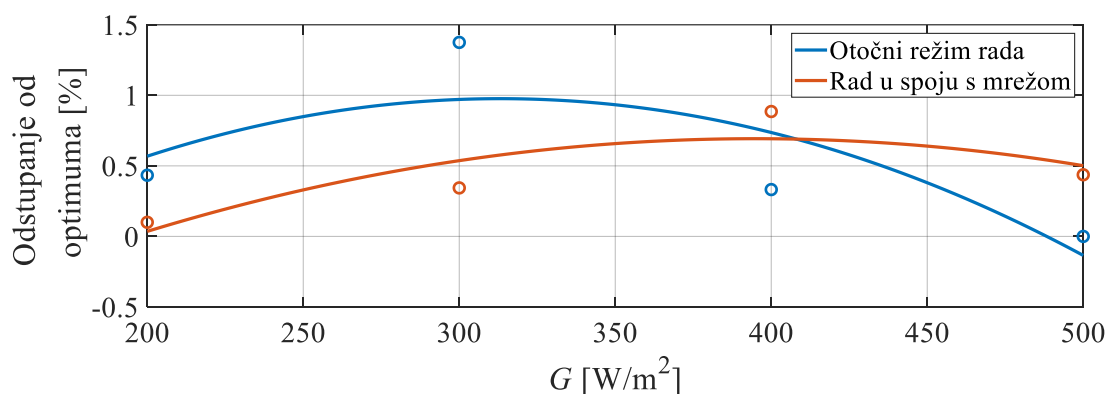
6.7.1. Analiza točnosti MPPT algoritama i učinkovitosti optimizacije generatora

Točnost MPPT algoritma FN izvora je izračunata prema odstupanju postignute radne točke od optimalne radne točke za pripadajuću razinu osunčanosti. Da bi se pritom minimizirao utjecaj točnosti mjerenja snage FN izvora, postignuta radna točka je određena na temelju srednje vrijednosti iznosa napona u_{dc} u promatranom stacionarnom stanju. Na slikama 6.44 i 6.45 su prikazane točnosti MPPT algoritma FN izvora za oba predložena algoritma upravljanja: s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora i s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora. Prikazani rezultati ukazuju na veću disperziju odstupanja od optimuma u slučaju implementacije algoritma s uzastopnim optimizacijama. Odstupanje se u tom slučaju kreće u rasponu 0 % – 1,5 %, dok je taj raspon kod algoritma s istovremenim optimizacijama 0,1 % – 0,51 %. Što se tiče utjecaja režima rada mikromreže na točnost MPPT algoritma, oprečni rezultati su dobiveni za dva predložena upravljačka algoritma. Kod uzastopne optimizacije veća točnost je postignuta u spoju s mrežom, dok je kod istovremene veća točnost postignuta u otočnom režimu rada. Tu treba istaknuti kako su točnosti MPPT algoritma dobivene u radu sa spojem na mrežu za oba predložena upravljačka algoritma slične, a najveće razlike su uočene u otočnom režimu rada.

Točnost MPPT algoritama za dva predložena upravljačka pristupa može se dodatno usporediti analizom srednjeg odstupanja, definiranog kao prosječna vrijednost odstupanja prikupljenih točaka. Za upravljački algoritam s istovremenom optimizacijom ostvarena je srednja točnost od 99,74 %, dok algoritam s uzastopnom optimizacijom postiže točnost od 99,51 %.



Slika 6.44 Karakteristike statičke točnosti FN MPPT-a za upravljački algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora



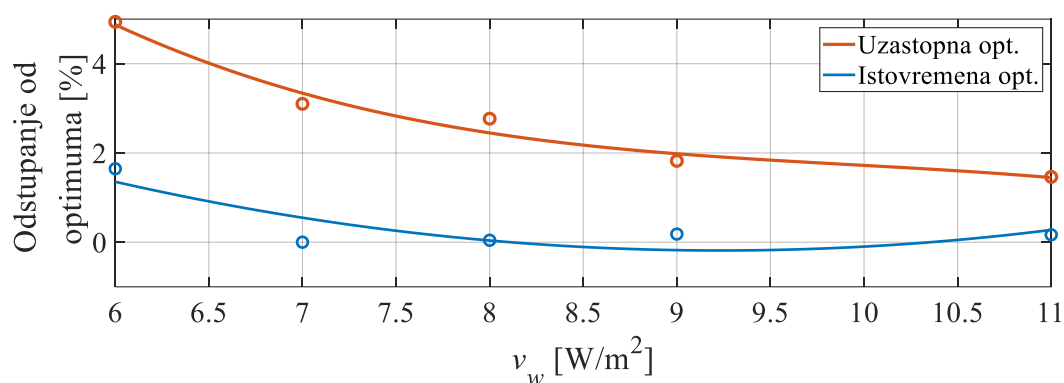
Slika 6.45 Karakteristike statičke točnosti FN MPPT-a za upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora

Evaluirana je i točnost MPPT algoritma vjetroturbine. U ovom slučaju nije bilo značajne razlike u rezultatima postignutim za otočni režim rada i u radu sa spojem na mrežu. Na slici 6.46 su prikazani podaci i krivulje točnosti određene za dva predložena upravljačka algoritma. Rezultati ukazuju na isti trend točnosti MPPT algoritma vjetroturbine s obzirom na brzinu vjetra (snagu). Najveća odstupanja od optimuma su zabilježena za najnižu brzinu vjetra te se odstupanje smanjivalo s povećanjem brzine vjetra. Iako prate isti trend, točnosti postignute za dva predložena algoritma upravljanja su se značajnije razlikovale. U slučaju algoritma s uzastopnim optimizacijama, najveće odstupanje je 4,94 % pri brzini vjetra od 6 m/s, a najmanje 1,46 % pri 11 m/s. Kod algoritma upravljanja s istovremenim optimizacijama najveće je odstupanje također na 6 m/s, od 1,65 %, a već na 7 m/s algoritam je konvergirao u optimalnu radnu točku bez zabilježenog odstupanja.

Iz danih rezultata se može zaključiti kako je kod algoritma s uzastopnim optimizacijama izvora odstupanje od optimalne radne točke vjetroturbine značajno veće u odnosu na algoritam s

istovremenom optimizacijom. To potvrđuju i srednje vrijednosti odstupanja koja za algoritam s uzastopnim optimizacijama iznosi 2,82 %, dok u slučaju algoritma s istovremenom optimizacijama izvora iznosi 0,41 %.

Ipak treba naglasiti kako je točnost MPPT algoritma vjetroturbine zabilježena za oba predložena pristupa upravljanja zadovoljavajuća uzimajući u obzir specifičnosti implementacije. To se prvenstveno odnosi na implementaciju s uzastopnim optimizacijama gdje se za optimizaciju vjetroturbine koristi ista električna snaga na temelju koje se optimiziraju i FN izvor i SCIG. Na taj je način, uz određeni kompromis po pitanju točnosti, smanjen broj potrebnih mjernih senzora. Naime korištenjem procijenjene brzine vrtnje za upravljanje SCIG-om, varijabilna pogreška u procjeni se izravno odražava na radnu točku vjetroturbine. Primjerice, optimizacija SCIG-a i korekcija iznosa magnetskog toka rotora može uzrokovati odstupanje procijenjene brzine vrtnje. Uz reguliranu referencu brzine zadanu MPPT-om vjetroturbine, koji je u tom trenutku kod uzastopnog pristupa optimizaciji zaustavljen, to znači promjenu radne točke i izgledno odstupanje od točke maksimalne snage do sljedeće aktivacije MPPT-a vjetroturbine.



Slika 6.46 Usporedba karakteristika statičke točnosti MPPT-a vjetroturbine za dva predložena upravljačka algoritma

Zadovoljavajuća razina točnosti MPPT-a za oba predložena pristupa upravljanja je pokazana i usporedbom s drugim algoritmima iz literature, što je napravljeno u okviru tablice 6.1. U navedenoj tablici su dani dostupni podaci iz literature prikupljeni za slične MPPT algoritme vjetroturbine i FN izvora. Za usporedbu je pritom korištena srednja vrijednost točnosti izračunata na temelju prikupljenih podataka.

Tablica 6.1 Usporedba točnosti MPPT algoritama

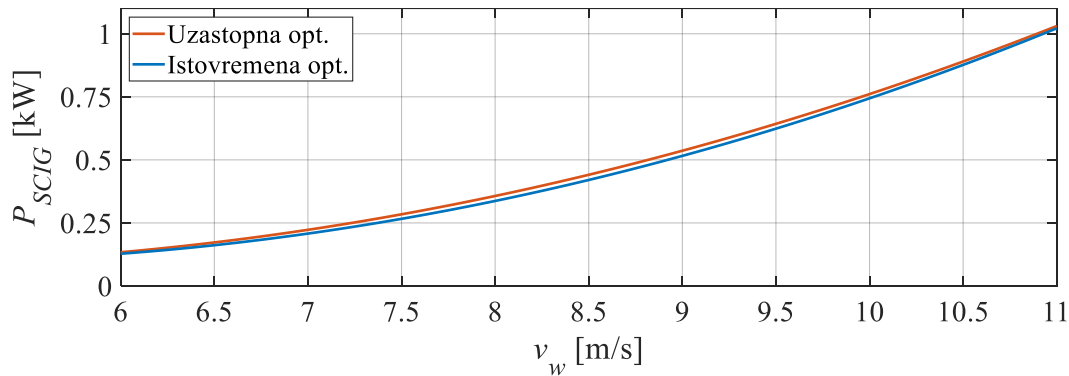
	Tip MPPT-a	Točnost MPPT-a vjetroturbine	Točnost MPPT-a FN izvora
Upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora	FL – sa zadržavanjem	97,18 %	
Upravljački algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora	FL	99,64 %	
[175]	OT	90,66 %	
[175]	P&O	87,94 %	
[159]	P&O	99,57 %	
[159]	Napredni OT	99,80 %	
Upravljački algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora	P&O – sa zadržavanjem		99,51 %
Upravljački algoritam s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora	P&O		99,74 %
[176]	P&O		94,96 %
[176]	FL		96,88 %
[177]	Multi-FL		97,87 %
[178]	Beta		97,6 %
[178]	Metoda inkrementalne vodljivosti		98,6 %

Za dva predložena upravljačka algoritma su uspoređeni i rezultati optimizacije rada SCIG-a. Za učinkovitost optimizacije SCIG-a nije rađena usporedba s rezultatima iz literature jer takva usporedba ne bi bila mjerodavna. Naime za takvu usporedbu rezultati bi se trebali uspoređivati za potpuno različite generatore (po snazi i vrsti) koji su, uz to, implementirani u različitim sustavima. U ovom slučaju je riječ o identičnom sustavu koji je za dva različita upravljačka algoritma ispitan u istim režimima rada. Iskorišteni su podaci prikupljeni u otočnom radu i sa spojem na mrežu. Na slici 6.47 su prikazane karakteristike koje za dva predložena upravljačka algoritma opisuju srednju postignutu električnu snagu SCIG-a (P_{SCIG}) s obzirom na srednju

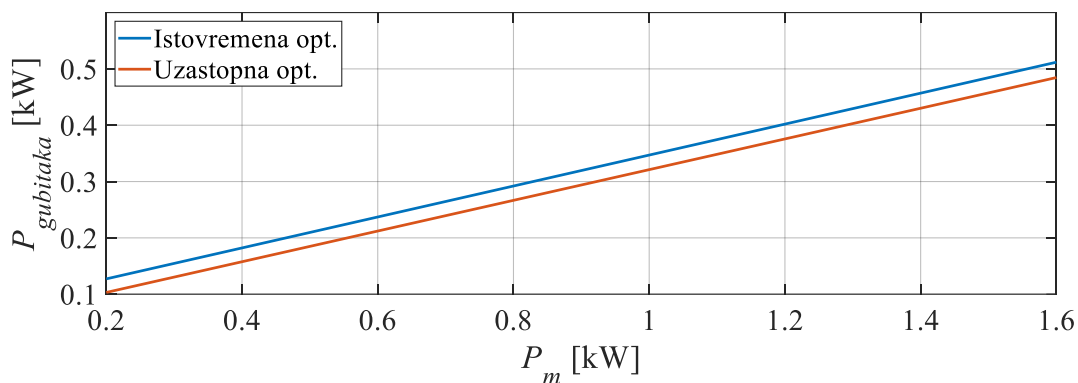
mehaničku snagu vjetroturbine (P_m). Prikazane krivulje ukazuju na jednaku ili veću snagu P_{SCIG} zabilježenu za algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora u promatranom rasponu brzine vjetra. Ti se rezultati mogu činiti oprečnim iznad prikazanim rezultatima točnosti MPPT-a vjetroturbine. Naime, tamo je pokazano kako je točnost MPPT-a vjetroturbine veća u slučaju istovremenih optimizacija. Iz toga slijedi da je veća i mehanička snaga na ulazu SCIG-a pa je za očekivati i veću snagu na njegovom izlazu.

Uzrok naizgled oprečnih rezultata se očituje iz karakteristika gubitaka SCIG-a ($P_{gubitaka}$) prikazanih na slici 6.48. Prikazane karakteristike gubitaka su određene na temelju razlike snaga P_m i P_{SCIG} na cijelom rasponu snage P_m . Dobiveni rezultati ukazuju na veće gubitke SCIG-a zabilježene u slučaju istovremenih optimizacija izvora. To znači da je učinkovitost MPPT-a SCIG-a zasnovanog na modelu bila lošija u odnosu na FL algoritam. Razlike u gubicima su praktički konstantne za cijeli raspon snaga. S obzirom na apsolutni iznos, gubici u slučaju istovremenih optimizacija izvora su u odnosu na uzastopne veći za 26 %, pri brzini vjetra od 6 m/s, te 4 % pri brzini vjetra od 11 m/s.

Iz dobivenih rezultata se može zaključiti kako su u konačnici performanse WECS-a bile slične za oba predložena upravljačka algoritma. Manja točnost optimizacije vjetroturbine postignuta kod uzastopnog pristupa optimizaciji distribuiranih izvora je kompenzirana točnijom optimizacijom SCIG-a.



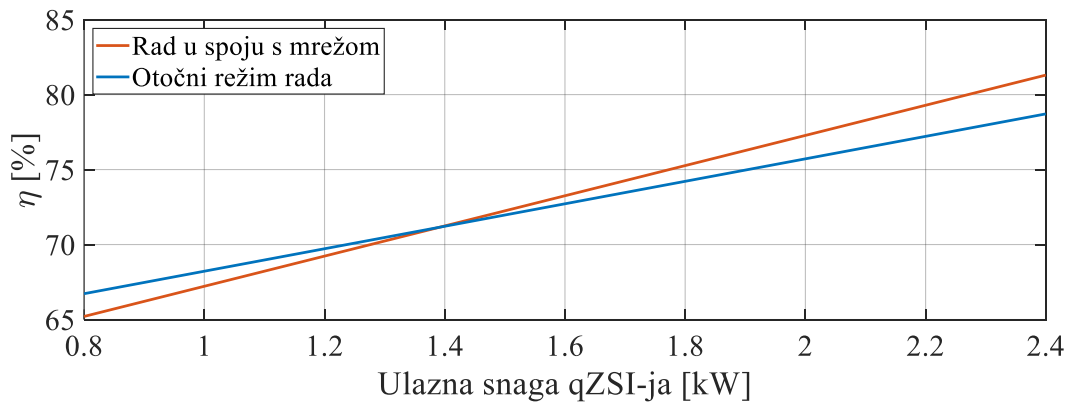
Slika 6.47 Mjerena izlazna snaga SCIG-a s obzirom na brzinu vjetra



Slika 6.48 Gubici SCIG-a s obzirom na mehaničku snagu na vratilu

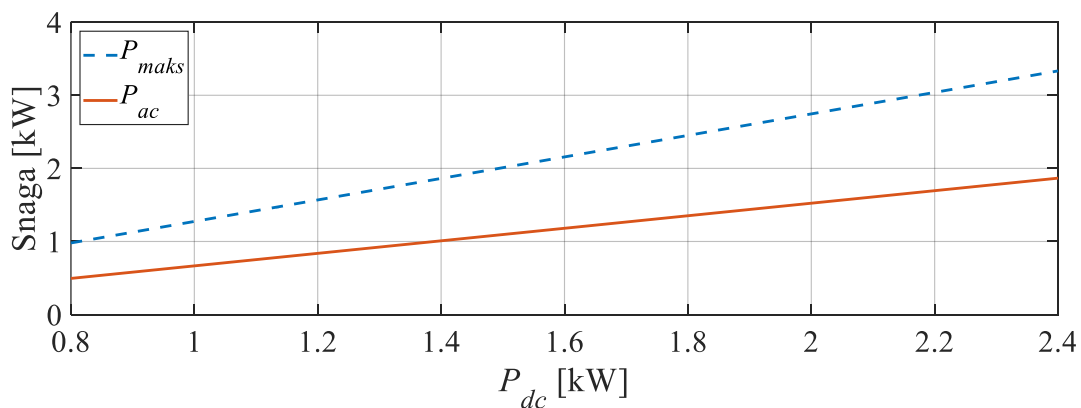
6.7.2. Analiza korisnosti i raspodjele tokova energije u mikromreži

Da bi dobili jasan uvid u korisnost i raspodjelu snaga u predloženoj mikromreži, u nastavku su prikazane statičke karakteristike određene na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja. Na slici 6.49 su prikazane krivulje korisnosti zabilježene u otočnom režimu rada i u radu sa spojem na mrežu. Prikazane krivulje korisnosti su dobivene kao omjer iskorištene snage i ulazne snage qZSI-ja (P_{dc}). Iskorištena snaga je pritom izračunata kao suma izlazne snage qZSI-ja (P_{ac}) i snage punjenja baterija (P_{bat}). Kao što se vidi na priloženoj slici, rezultati upućuju na različite krivulje korisnosti u otočnom režimu rada i u radu sa spojem na mrežu. To je potencijalno uzrokovano različitim vrijednostima struje baterija u otočnom režimu rada za razliku od rada u spoju s glavnom mrežom gdje je struja regulirana na 0 A. Za rad u spoju s mrežom je zabilježena nešto strmija krivulja, što implicira veće povećanje korisnosti s povećanjem ulazne snage. U ovdje promatranom rasponu ulazne snage, korisnost u spoju s mrežom se kreće u rasponu od 65 %, pri ulaznoj snazi od 0,8 kW, do 82 % pri najvećoj ispitanoj ulaznoj snazi od 2,4 kW.



Slika 6.49 Korisnost qZSI-ja s obzirom na ulaznu snagu

Na slici 6.50 su prikazane karakteristike kojima je opisana raspodjela snaga predložene mikromreže. Za određivanje ovih krivulja su korišteni podaci snimljeni u eksperimentu sa spojem na mrežu uz referencu struje baterije postavljenu na nulu. Krivulja korisne snage (P_{ac}) predstavlja snagu raspoloživu u točki spoja trošila ili mreže, s obzirom na ulaznu snagu iz distribuiranih izvora. Krivulja dostupne snage (P_{maks}) pak predstavlja potencijalno raspoloživu snagu u točki spoja trošila ili mreže, koja je određena na način da je korisna snaga uvećana za maksimalnu raspoloživu snagu iz baterija. Potonja snaga je pritom određena kao produkt srednje vrijednosti struje i_{L1} i napona u_{bat} . To proizlazi iz ranije spominjanog ograničenja (poglavlje 3.4) gdje bi s povećanjem struje pražnjenja baterija preko iznosa srednje vrijednosti i_{L1} došlo do neželjenog zapiranja diode D_1 u qZSI mreži. Prema tome, povećanjem ulazne snage, a time i struje i_{L1} , povećava se i maksimalna raspoloživa snaga iz baterija. To se vidi i iz razlike među prikazanim krivuljama koja raste s povećanjem ulazne snage te P_{maks} doseže približno 3,3 kW pri najvećoj ispitanoj ulaznoj snazi od 2,4 kW.



Slika 6.50 Korisna i maksimalno dostupna izlazna snaga qZSI-ja s obzirom na ulaznu snagu

Vrijedi istaknuti kako je pri izvođenju laboratorijskih ispitivanja maksimalna ulazna snaga ograničena na 2,4 kW prvenstveno zbog ograničenja laboratorijske makete. Isto tako, za izradu

laboratorijske makete nije u potpunosti optimiziran dizajn pasivnih komponenti qZSI-ja koje također utječu na korisnost sustava. Unatoč tome, na temelju dobivenih krivulja se mogu pretpostaviti performanse sustava pri većoj ulaznoj snazi uz postojeće komponente. Primjerice, ako bi uzeli nazivne snage distribuiranih izvora (pri atmosferskim uvjetima sa osunčanosti $Z = 1000 \text{ W/m}^2$, temperaturom FN modula od 20° C i brzinom vjetra $v_v = 11 \text{ m/s}$), ulazna snaga qZSI-ja bi bila oko 4,5 kW. Pri toj snazi bi prema krivulji na slici 6.49 korisnost bila približno 95 % a maksimalna dostupna snaga, prema krivulji na slici 6.50, bila bi približno 6,5 kW. Nije za očekivati potpuno lineran daljnji rast korisnosti, ali rezultati sugeriraju zadovoljavajuće performanse unatoč ograničenjima laboratorijske makete.

7. PREGLED ZNANSTVENOG DOPRINOSA RADA

Izvorni znanstveni doprinosi teme doktorske disertacije su sljedeći:

1. Upravljačka strategija otočne mikromreže, utemeljene na izmjenjivaču kvazi Z-tipa s baterijama, s učinkovitom proizvodnjom, pohranom i potrošnjom električne energije.
2. Upravljačka strategija mikromreže, utemeljene na izmjenjivaču kvazi Z-tipa s baterijama i priključene na distribucijsku mrežu, s regulacijom radne i jalove snage te prijelazima između otočnog i mrežnog načina rada
3. Algoritam praćenja točke maksimalne snage vjetroagregata bez mjerenja brzine vrtnje i momenta, s primjenom naprednog modela samouzbudnog asinkronog generatora te regulatora zasnovanih na neizrazitoj logici i algebri granica

Prvi i drugi znanstveni doprinosi su ispunjeni kroz različite faze istraživanja prikazanog u okviru ovog dokorskog rada, čiji je konačni rezultat mikromreža i pripadajuće upravljačke strategije razrađene u okviru poglavlja 6. Prikazana mikromreža je utemeljena na qZSI-ju s baterijskim SPE-om, napajanom iz dva distribuirana izvora: WECS-a i FN izvora. Uz predložene upravljačke algoritme, razvijena mikromreža nudi mogućnost rada u spoju s distribucijskom mrežom ili u otočnom režimu, odnosno mogućnost prelaska među njima. Razvijena je kroz više faza istraživanja, počevši od inicijalnog ispitivanja upravljačkih mogućnosti, predstavljenog u okviru poglavlja 3. Pritom je ispitan i radni opseg qZSI-ja s obzirom ulazni i izlazni napon te su razmotrene mogućnosti integracije baterijskog SPE-a. U okviru poglavlja 5 je prikazana implementacija qZSI-ja napajanog iz WECS-a, pri čemu je za vjetroagregat korišten SCIG. Takav, u literaturi jedinstveni, integrirani WECS-qZSI sustav je temeljito razrađen u otočnom režimu rada a ispitan je i u radu sa spojem na mrežu. Izvedba funkcionalnog WECS-qZSI sustava s WECS-om zasnovanom na SCIG-u je bila ključan korak za izvedbu predložene mikromreže. Predložena mikromreža je konfiguracijski postignuta dodavanjem FN izvora kao drugog distribuiranog izvora.

Kako bi predloženi sustav napajanja ispunio sve nužne zahtjeve koji ga čine mikromrežom, bilo je potrebno razviti i upravljački algoritam koji bi omogućio otočni režim rada te povezivanje i rad u spoju s mrežom. U konačnici su predložena dva upravljačka algoritma koja su također razvijena postepeno, a uvelike su nadogradnja algoritma upravljanja integriranim WECS-qZSI sustavom, prikazanim u poglavlju 5 i većim dijelom objavljenim u [150]. Spomenutim

algoritmom upravljanja je obuhvaćena upravljačka strategija – zadužena za upravljanje električnim veličinama – i EMS kojim je osigurana učinkovita proizvodnja i pohrana energije. Za maksimizaciju izlazne energije WECS-a su u okviru EMS-a implementirani MPPT algoritmi vjetroturbine i SCIG-a te je izvedena njihova koordinacija. Isto tako, izvedena je mogućnost praćenja i održavanja željenih vrijednosti SOC-a baterija čime se doprinosi kako učinkovitoj proizvodnji tako i učinkovitoj potrošnje energije. Za potrebe učinkovite potrošnje i održavanja zadanih vrijednosti SOC-a implementirana je i mogućnost raspolaganja potrošnjom.

Upravljački algoritam izveden za integrirani WECS-qZSI sustav je unaprijeđen i proširen za implementaciju u predloženoj mikromreži, što je pokazano u okviru poglavlja 6.2. Pritom su unaprijeđeni regulacijski krugovi istosmjernih i izmjeničnih veličina qZSI-ja, čime je omogućeno stabilno napajanje trošila i mreže, kako u stacionarnom stanju tako i u dinamičkim režimima. U okviru regulacijskih petlji za upravljanje izmjeničnim veličinama izvedena je regulacija izlaznih dq struja qZSI-ja, koje su proporcionalne radnoj i jalovoj snazi na izlazu iz izmjenjivača. Posredno je preko regulacije d komponente izlazne struje regulirana i struja baterija u spoju s mrežom. IRFOC algoritam korišten za upravljanje SCIG-om je unaprijeđen na način da je zasnovan na naprednom modelu generatora, čime je povećana točnost upravljanja. Naprednim modelom SCIG-a su, kao što je opisano u poglavlju 5.2, osim klasičnih gubitaka u bakru u obzir uzeti i gubici u željezu, dodatni gubici te efekt magnetskog zasićenja. Za poboljšanje kvalitete upravljanja SCIG-om implementiran je i napredni HA regulator brzine vrtnje umjesto linearnog PI regulatora. Implementacija IRFOC-a zasnovanog na naprednom modelu i HA regulatora omogućila je brži odziv i bolju kontrolu radne točke SCIG-a i vjetroturbine. Time je omogućeno i skraćanje koraka MPPT algoritma vjetroturbine a, u konačnici, unaprijeđenja su doprinijela većoj korisnosti WECS-a. Uz MPPT algoritme vjetroturbine i SCIG-a dodan je i MPPT algoritam FN izvora, u okviru kojega je izvedena i regulacija struje baterije u otočnom režimu rada. S tri MPPT algoritma implementirana u sustavu pokazalo se ključnim izvesti sveobuhvatnu koordinaciju MPPT algoritama ili ih prilagoditi na način da se spriječi međudjelovanje. Za to su predložena dva različita pristupa: jedan s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora (i manjim brojem implementiranih senzora) i drugi s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora. Ključne razlike između dva predložena algoritma su tip korištenog MPPT algoritma SCIG-a i referentne vrijednosti na temelju kojih se izvodi optimizacija pojedinih izvora. Bez obzira na razlike, s oba algoritma upravljanja je postignut učinkovit rad mikromreže.

Treći navedeni izvorni znanstveni doprinos je ispunjen kroz predloženi algoritam s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora, objavljen u [170] i opisan u poglavlju 6.2.1. U predloženom algoritmu upravljanja su implementirani MPPT algoritmi vjetroagregata, SCIG-a i FN izvora, na način da sva tri koriste istu ulaznu veličinu na temelju koje se optimizacija izvodi. U konkretnom slučaju to je električna snaga na ulazu u qZSI, koja je ujedno i suma snaga iz WECS-a i FN izvora. U ranijim izvedbama MPPT algoritama vjetroturbine i SCIG-a, primjerice kod integriranog WECS-qZSI sustava, korišteni su FL MPPT algoritmi kojima je ulazna referentna veličina bila mehanička snaga vjetroturbine (za optimizaciju vjetroturbine), odnosno izlazna električna snaga SCIG-a (za optimizaciju SCIG-a). U ovom slučaju je dakle korištenjem električne snage za optimizaciju vjetroturbine izbjegnuta potreba za mjerenjem brzine vrtnje i momenta na vratilu, na temelju kojih bi se inače računala mehanička snaga korištena u MPPT algoritmu. Optimizacija SCIG-a se i u ovom slučaju izvodi na temelju električne snage, ali one na ulazu qZSI-ja, zbog čega dolazi do mogućnosti međudjelovanja s MPPT algoritmima FN izvora i vjetroturbine. Pritom bi međudjelovanje s MPPT algoritmom vjetroturbine bilo moguće i u slučaju korištenja izlazne električne snage SCIG-a. Iz tog razloga je u okviru ovog predloženog upravljačkog algoritma izveden sveobuhvatni EMS koji ima za zadatak koordinirati rad MPPT algoritama. Iako uz ovakvu izvedbu MPPT algoritama nema potrebe za mjerenjem brzine vrtnje SCIG-a, njeno poznavanje je i dalje potrebno za upravljanje SCIG-om, odnosno regulaciju radne točke vjetroturbine. Za to je izvedena procjena brzine vrtnje uz korištenje MRAS-a zasnovanog na naprednom modelu generatora. Primjena naprednog modela generatora pri izradi MRAS-a se pokazala ključnom za stabilan rad u širokom rasponu brzina vrtnje vjetroagregata. Napredni model stroja je korišten i u izvedbi upravljanja SCIG-om, tj., izrazi korišteni za izvedbu IRFOC-a su dobiveni na temelju naprednog modela generatora. Napredni IRFOC algoritam doprinosi točnosti upravljanja generatorom, a u ovom slučaju, gdje se njime postavlja radna točka vjetroagregata, točnost upravljanja se izravno odražava i na učinkovitost cjelokupnog sustava. Uz veću točnost upravljanja postignutu naprednim IRFOC-om, implementiran je HA regulator kojim je postignut brži odziv bez nadvišenja u cijelom radnom rasponu. Navedena unaprjeđenja upravljanja SCIG-om su omogućila i skraćanje koraka uzorkovanja MPPT-a vjetroturbine s 3 s iz ranijih izvedbi na 1,5 s u predloženom algoritmu upravljanja. To znači i potencijalno dva puta bržu optimizaciju vjetroturbine.

8. ZAKLJUČAK

U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrana je primjena qZSI-ja kao središnje komponente mikromreže sačinjene još od dva distribuirana izvora, FN izvora i WECS-a, baterijskog SPE-a i lokalnih trošila. Predloženi su i upravljački algoritmi koji su ključni za postizanje potpune funkcionalnosti predložene mikromreže i višestrukih upravljačkih ciljeva. Predložena mikromreža i upravljački algoritmi su razvijani postepeno kroz nekoliko faza istraživanja.

Prva faza istraživanja je posvećena ispitivanju ključnih svojstava qZSI-ja koja ga čine atraktivnom opcijom za integraciju obnovljivih izvora energije. To se odnosi na mogućnosti naponskog pojačanja, integraciju SPE-a i dodatni stupanj slobode upravljanja. Provedena su eksperimentalna ispitivanja na laboratorijskoj maketi kojima je pokazana mogućnost istovremene regulacije ulaznog i izlaznog napona izmjenjivača. Isto tako, izvedena je integracija baterija, paralelno s kondenzatorom C_2 u impedancijskom krugu a kojima se i upravlja preko qZSI-ja. Rezultati provedenog ispitivanja su pokazali kako qZSI može raditi u širokom rasponu ulaznog istosmjernog napona održavajući pritom stabilnu zadanu vrijednost izlaznog napona.

Sljedeća faza razvoja, i važan korak ka integraciji cjelokupne mikromreže bilo je povezivanje baterijski potpomognutog qZSI-ja i WECS-a, u ovom slučaju sa SCIG-om u ulozi generatora. Za predloženi WECS-qZSI sustav izveden je i upravljački algoritam u okviru kojega su izvedene upravljačka strategija, za regulaciju i upravljanje električnim veličinama, i EMS za optimizaciju proizvodnje iz WECS-a te održavanje SOC-a unutar zadanih vrijednosti. Integrirani WECS-qZSI sustav je eksperimentalno ispitan na laboratorijskoj maketi u otočnom režimu, za napajanje lokalnih trošila, i u spoju s mrežom. Ispitan je rad sustava u dinamičkim režimima, pri skokovitim promjenama brzine vjetra i snage trošila. Također, pokazane su reakcije upravljačkog algoritma i djelovanje pri dostizanju maksimalne i minimalno dozvoljene razine SOC-a. Rezultati su ukazali na zadovoljavajuće dinamičke odzive sustava. Najznačajnije devijacije su zabilježeni prebačaji u reguliranim naponima od najviše 9 %. Pri dostizanju maksimalne vrijednosti SOC-a je pokazana mogućnost regulacije struje baterija korekcijom radne točke vjetroturbine. S druge strane, pri minimalnim dozvoljenim vrijednostima je pokazana reakcija sustava isključivanjem trošila i prelaskom u režim punjenja baterija. Regulacija struje baterija je demonstrirana i u spoju s mrežom, pri čemu je pokazana i mogućnost punjenja baterija iz mreže. Analizirane su i statičke karakteristike sustava a koje su pokazale eksponencijalni rast dostupne izlazne snage sustava za porast brzine vjetra. Pri najvećoj razmatranoj brzini vjetra je integracijom WECS-a s baterijski potpomognutim

qZSI-jem omogućeno povećanje ukupno dostupne snage za približno 70 %. Osim toga, statičke karakteristike su pokazale i kako sustav može raditi u širokom rasponu ulaznih i izlaznih napona, što omogućuje postizanje različitih upravljačkih ciljeva poput minimizacije gubitaka, maksimizacije dostupne izlazne snage, a omogućuje i izravnu integraciju FN izvora na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja. Uz navedeno, pokazana je mogućnost pokretanja sustava, tj., crni start, uz pomoć baterija i rad bez dostupne energije vjetra. U oba slučaja je izvedeno preklapanje baterija na ulaznu istosmjernu sabirnicu qZSI-ja.

Integracija FN izvora u sustav s qZSI-jem i WECS-om je bio sljedeći korak kojim je kompletirana integracija fizičkih komponenti predložene mikromreže. Najznačajnije nadogradnje su napravljene po pitanju upravljačkog algoritma. Za postizanje učinkovitog upravljanja mikromrežom predložena su dva upravljačka algoritma, s istovremenim optimizacijama distribuiranih izvora i s uzastopnim optimizacijama distribuiranih izvora. Rad predloženih upravljačkih algoritama i cjelokupne mikromreže je evaluiran laboratorijskim ispitivanjem. Pritom su ispitani dinamički odzivi, analizirane statičke karakteristike te pokazani različiti specifični slučajevi rada.

Dinamička ispitivanja su pokazala kako je s oba predložena upravljačka algoritma postignut stabilan rad mikromreže i napajanje trošila i mreže. Skokovite promjene osunčanosti, brzine vjetra i snage trošila nisu se negativno odražavale na rad mikromreže i održavanje stabilnosti napajanja. Najznačajnije anomalije su zabilježene pri skokovitoj promjeni snage trošila, za oba upravljačka algoritma, koja je djelovanjem na razinu šuma u mjerenom ulaznom naponu qZSI-ja uzrokovala odstupanje od željene vrijednosti za približno 1,5 %. Vrijednosti napona trošila i struje baterija, ključne iz perspektive upravljačke strategije i EMS-a su pri tom zadržane na referentnim iznosima. Osim toga, treba spomenuti i prijelazne pojave zabilježene u strujama qZSI-ja pri skokovitim promjenama osunčanosti ali kakve nisu za očekivati u realnim uvjetima gdje se razina osunčanosti ne mijenja trenutno.

Razlike u odzivima dva predložena upravljačka algoritma su uočljive u periodima odmah nakon promjene atmosferskih uvjeta. Kod algoritma s istovremenim optimizacijama izvora je zahvaljujući implementaciji MPPT algoritma SCIG-a zasnovanog na modelu omogućen gotovo kontinuiran rad SCIG-a u radnoj točki maksimalne snage. To se očituje u periodima nakon promjene brzine vjetra kada se u slučaju istovremene optimizacije izvora postiže veća izlazna snaga WECS-a. Slično je pokazano i ranije, kroz opis predloženog MPPT algoritma zasnovanog na modelu, gdje je u okviru jednog eksperimenta s tri promjene brzine vjetra generirano 16 % više električne energije u odnosu na FL algoritam. Nakon što se izvrši

optimizacija SCIG-a kod algoritma s uzastopnim optimizacijama, iznosi postignutih snaga WECS-a se gotovo izjednače. Na odzivima mehaničke snage vjetroturbine pak nisu zabilježene značajnije razlike za dva predložena upravljačka algoritma. Slično kao u slučaju optimizacije SCIG-a je zabilježeno i kod optimizacije FN izvora. Kod FN izvora je promjena osunčanosti, pa i snage, gotovo trenutna, ali se do trenutka optimizacije kod algoritma s uzastopnim optimizacijama postiže nešto manja izlazna snaga FN izvora. I ovdje se nakon toga snage za oba upravljačka algoritma izjednače. Tu valja istaknuti i kako je kod algoritma s istovremenim optimizacijama korištenje pripadajuće struje FN izvora, omogućilo kraći korak optimizacije u odnosu na uzastopnu optimizaciju gdje je korištena ulazna struja qZSI-ja.

U okviru analize dinamičkog rada ispitana je mogućnost regulacije struje baterija, u spoju s mrežom i u otočnom režimu rada. Slično kao u slučaju WECS-qZSI sustava, u spoju s mrežom je regulacija struje baterija izvedena kaskadnom petljom s unutarnjom petljom regulacije izlazne struje qZSI-ja. Pokazan je besprijekoran odziv struje baterija koja bez vidljivih prijelaznih pojava prati zadanu referencu. U otočnom režimu rada je regulacija struje baterija izvedena odstupanjem od točke maksimalne snage FN izvora. I ovdje su zabilježeni zadovoljavajući rezultati, te su time, uz sličnu korekciju radne točke vjetroagregata izvedenu za WECS-qZSI sustav, pokazane mogućnosti korekcije radne točke obaju povezanih izvora.

Kroz analizu statičkih karakteristika evaluirana je točnost implementiranih MPPT algoritama i učinkovitost cjelokupne mikromreže. Postignuta točnost MPPT algoritama zabilježena za oba upravljačka algoritma je uspoređena međusobno ali i s primjerima iz literature. Pokazano je kako MPPT algoritmi u oba slučaja postižu visoke razine točnosti, preko 99,5 %, što je više u odnosu na primjere iz literature. Točnost MPPT algoritama vjetroturbine se pak pokazala za 2,46 % većom, apsolutno gledano, u slučaju istovremene optimizacije izvora, gdje je iznosila 99,64 %. To je i očekivano s obzirom na mogućnost prilagodbe radne točke vjetroturbine u tom slučaju kroz veći vremenski period gdje je za očekivati konvergenciju u točku maksimalne snage. Kod uzastopne optimizacije može doći do prepoznavanja lažnog optimuma i zaustavljanja daljnje optimizacije. Unatoč većoj učinkovitosti MPPT algoritma vjetroturbine kod algoritma s istovremenim optimizacijama, za cijeli raspon brzine vjetra je zabilježena jednaka ili manja snaga SCIG-a. Pokazalo se kako je optimizacija SCIG-a zasnovana na modelu stroja manje učinkovita te su gubici SCIG-a u tom slučaju veći za 26 %, pri brzini vjetra od 6 m/s, te za 4 % pri brzini vjetra od 11 m/s. Dakle, iako je kod uzastopne optimizacije izvora smanjen broj senzora korištenjem procijenjene brzine vrtnje za upravljanje SCIG-om, i korištenjem iste veličine za izvođenje svih optimizacija, u konačnici je kvalitetna koordinacija

MPPT algoritama omogućila čak bolje performanse WECS-a. Što se tiče FN izvora, kod algoritma s uzastopnim optimizacijama izvora je zabilježena 0,23 % manja točnost. Dakle nema značajne razlike ali se kontinuiran rad MPPT algoritma pokazao učinkovitijim.

Statička analiza učinkovitosti predložene mikromreže ukazuje kako korisnost sustava raste s povećanjem ulazne snage. Pri najvećoj ispitanoj ulaznoj snazi od 2,4 kW dostignuta je korisnost sustava od 85 %, a integracija baterija je pritom omogućila ukupno 3,3 kW dostupne izlazne snage. Drugim riječima, u ispitanoj rasponu snaga, integracija FN izvora i WECS-a u predloženu mikromrežu s qZSI-jem i baterijskim SPE-om je omogućila povećanje raspona izlazne snage za 38 %. Kako su zbog ograničenja same makete ispitivanja rađena ispod razine nazivnih snaga FN izvora i WECS-a, ekstrapolacijom dobivenih statičkih karakteristika se može pretpostaviti da bi pri nazivnoj ulaznoj snazi od 4,4 kW korisnost bila 95 %. Pritom bi ukupno dostupna izlazna snaga, zahvaljujući baterijskom SPE-u, bila za 69 % veća u odnosu na ulaznu snagu iz distribuiranih izvora.

Na temelju provedenog istraživanja prepoznate su brojne mogućnosti za daljnji razvoj sustava. Rad predloženih optimizacija izvora bi vrijedilo ispitati kroz duži vremenski period, osobito s obzirom na utjecaj postepenih promjena, primjerice temperature FN izvora. Optimizacija SCIG-a mogla bi se dodatno poboljšati korištenjem više funkcija optimalnog toka rotora za različite napone. Na razini mikromreže, moguće je razmotriti prelazak iz mrežnog u otočni režim rada, bez privremenog isključivanja trošila, kao i nadogradnju EMS-a radi ostvarivanja naprednijih ciljeva upravljanja, uključujući razmjenu energije s mrežom ili drugim mikromrežama. Paralelan rad više mikromreža predstavlja dodatnu potencijalnu temu istraživanja. Također, konfiguracija mikromreže mogla bi se prilagoditi, primjerice izvedbom istosmjerne sabirnice paralelno s kondenzatorom C_1 , kao i razmatranjem drugih izvedbi temeljenih na postojećim komponentama.

LITERATURA

- [1] HERA: "Godišnje izvješće o radu Hrvatske energetske regulatorne agencije za 2018. godinu". 2019, Hrvatska energetska regulatorna agencija.
- [2] HERA: "Godišnje izvješće o radu Hrvatske energetske regulatorne agencije za 2023. godinu". 2024, Hrvatska energetska regulatorna agencija.
- [3] Fang Zheng, P.: "Z-source inverter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 39, izd. 2, str. 504-510, 2003.
- [4] Anderson, J.; Peng, F. Z.: "Four quasi-Z-Source inverters", *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, str. 2743-2749, 2008.
- [5] Abu-Rub, H. i dr.: "Quasi-Z-Source Inverter-Based Photovoltaic Generation System With Maximum Power Tracking Control Using ANFIS", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, sv. 4, izd. 1, str. 11-20, 2013.
- [6] Liu, Y. i dr.: "Modelling and controller design of quasi-Z-source inverter with battery-based photovoltaic power system", *IET Power Electronics*, sv. 7, izd. 7, str. 1665-1674, 2014.
- [7] de Oliveira-Assis, L. i dr.: "Simplified model of battery energy-stored quasi-Z-source inverter-based photovoltaic power plant with Twofold energy management system", *Energy*, sv. 244, str. 122563, 2022.
- [8] Honarbari, S.; Alizadeh Bidgoli, M.: "Designing a Quasi-Z-Source Inverter with Energy Storage to Improve Grid Power Quality", *IETE Journal of Research*, str. 1-9, 2020.
- [9] Liu, Y. i dr.: "Control System Design of Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter for Grid-Tie Photovoltaic Power Generation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, sv. 4, izd. 4, str. 994-1001, 2013.
- [10] Ge, B. i dr.: "An Energy-Stored Quasi-Z-Source Inverter for Application to Photovoltaic Power System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 60, izd. 10, str. 4468-4481, 2013.
- [11] Liang, W.; Liu, Y.; Shen, Y.: "Active Power Control Integrated With Reactive Power Compensation of Battery Energy Stored Quasi-Z Source Inverter PV Power System Operating in VSG Mode", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, sv. 11, izd. 1, str. 339-350, 2023.
- [12] Elmorshedy, M. F. i dr.: "A Grid-Connected PV System Based on Quasi-Z-Source Inverter With Maximum Power Extraction", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 59, izd. 5, str. 6445-6456, 2023.
- [13] Bajestan, M. M.; Madadi, H.; Shamsinejad, M. A.: "Control of a new stand-alone wind turbine-based variable speed permanent magnet synchronous generator using quasi-Z-source inverter", *Electric Power Systems Research*, sv. 177, 2019.

- [14] Soares-Ramos, E. P. P. i dr.: "Large-Scale Wind Turbine With Quasi-Z-Source Inverter and Battery", *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, sv. 1, str. 403-408, 2021.
- [15] Liu, Y. i dr.: "Quasi-Z-Source inverter based PMSG wind power generation system", *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, str. 291-297, 2011.
- [16] E. Rajendran; Kumar, C.: "Power quality extension using fuzzy logic controller based pmsg and quasi z-source inverter for grid connected wind energy conversion system", *World Scientific and Engineering Academy and Society*, sv. 13, str. 8, 2018.
- [17] Kanagaraj, N. i dr.: "Energy Management and Power Quality Improvement of Hybrid Renewable Energy Generation System Using Coordinated Control Scheme", *IEEE Access*, sv. 11, str. 93254-93267, 2023.
- [18] Ramachandran, S.; Ramasamy, M.: "Solar Photovoltaic Interfaced Quasi Impedance Source Network Based Static Compensator for Voltage and Frequency Control in the Wind Energy System", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, sv. 16, izd. 3, str. 1253-1272, 2021.
- [19] de Oliveira-Assis, L. i dr.: "Optimal energy management system using biogeography based optimization for grid-connected MVDC microgrid with photovoltaic, hydrogen system, electric vehicles and Z-source converters", *Energy Conversion and Management*, sv. 248, str. 114808, 2021.
- [20] Priyadarshi, N. i dr.: "Hybrid PV-Wind, Micro-Grid Development Using Quasi-Z-Source Inverter Modeling and Control—Experimental Investigation", *Energies*, sv. 11, izd. 9, str. 2277, 2018.
- [21] Sun, D. i dr.: "An Energy-Stored Quasi-Z Source Converter Based Interlinking Converter for Hybrid AC/DC Microgrids", *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, str. 3821-3826, 2018.
- [22] Khajesalehi, J. i dr.: "Maximum constant boost approach for controlling quasi-Z-source-based interlinking converters in hybrid AC–DC microgrids", *IET Generation, Transmission & Distribution*, sv. 10, izd. 4, str. 938-948, 2016.
- [23] Khajesalehi, J. i dr.: "A new control strategy for a bidirectional qZSI as an interlink converter in a hybrid AC/DC microgrid", *The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014)*, str. 458-463, 2014.
- [24] Sreenu, C. i dr.: "High Gain Quasi Z-Source Converters with Artificial Bee Colony Control for Grid-Integrated Solar-Wind Energy Sources", *Green Energy and Intelligent Transportation*, str. 100264, 2025.
- [25] Cornea, O. i dr.: "Step-Down Switched-Inductor Hybrid DC-DC Converter for Small Power Wind Energy Conversion Systems With Hybrid Storage", *IEEE Access*, sv. 8, str. 136092-136107, 2020.

- [26] Shafiei, A. i dr.: "A Control Approach for a Small-Scale PMSG-Based WECS in the Whole Wind Speed Range", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 32, izd. 12, str. 9117-9130, 2017.
- [27] Satpathy, A. S.; Kastha, D.; Kishore, N. K.: "Vienna Rectifier-Fed Squirrel Cage Induction Generator Based Stand-Alone Wind Energy Conversion System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 36, izd. 9, str. 10186-10198, 2021.
- [28] Cuesta, A. B. i dr.: "Feasibility of a Simple Small Wind Turbine with Variable-Speed Regulation Made of Commercial Components", *Energies*, sv. 6, izd. 7, str. 3373-3391, 2013.
- [29] Ton, D. T.; Smith, M. A.: "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative", *The Electricity Journal*, sv. 25, izd. 8, str. 84-94, 2012.
- [30] Shrivastwa, R. R. i dr.: "Understanding Microgrids and Their Future Trends", *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, str. 1723-1728, 2019.
- [31] Chandak, S.; Rout, P. K.: "The implementation framework of a microgrid: A review", *International Journal of Energy Research*, sv. 45, izd. 3, str. 3523-3547, 2020.
- [32] Hirsch, A.; Parag, Y.; Guerrero, J.: "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 90, str. 402-411, 2018.
- [33] Ishraque, M. F. i dr.: "Techno-Economic and Power System Optimization of a Renewable Rich Islanded Microgrid Considering Different Dispatch Strategies", *IEEE Access*, sv. 9, str. 77325-77340, 2021.
- [34] Saeed, M. H. i dr.: "A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives", *IEEE Access*, sv. 9, str. 166502-166517, 2021.
- [35] Souza Junior, M. E. T.; Freitas, L. C. G.: "Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review", *Sustainability*, sv. 14, izd. 6, str. 3597, 2022.
- [36] Khemir, M. i dr.: "Real-World Application of Sustainable Mobility in Urban Microgrids", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 58, izd. 2, str. 1396-1405, 2022.
- [37] Lago, J.; Heldwein, M. L.: "Operation and Control-Oriented Modeling of a Power Converter for Current Balancing and Stability Improvement of DC Active Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 26, izd. 3, str. 877-885, 2011.
- [38] Hakala, T.; Lähdeaho, T.; Komsa, R.: "LVDC PILOT IMPLEMENTATION IN PUBLIC DISTRIBUTION NETWORK", 2015.
- [39] Pratt, A.; Kumar, P.; Aldridge, T. V.: "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency", *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, str. 32-39, 2007.

- [40] Ali, S. i dr.: "A Review of DC Microgrid Energy Management Systems Dedicated to Residential Applications", *Energies*, sv. 14, izd. 14, str. 4308, 2021.
- [41] Kwasinski, A.: "Advanced power electronics enabled distribution architectures: Design, operation, and control", *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, str. 1484-1491, 2011.
- [42] Lazaroiu, G. C. i dr.: "Transient analysis of DG interfaced low voltage dc system", *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, str. 1-6, 2010.
- [43] Whaite, S.; Grainger, B.; Kwasinski, A.: "Power Quality in DC Power Distribution Systems and Microgrids", *Energies*, sv. 8, izd. 5, str. 4378-4399, 2015.
- [44] Rajagopalan, S.; Fortenbery, B.; Symanski, D.: "Power quality disturbances within DC data centers", *Intelec 2010*, str. 1-7, 2010.
- [45] Graham, A. D.: "The importance of a DC side harmonic study for a DC distribution system", *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, str. 1-5, 2012.
- [46] Valenciaga, F.; Puleston, P. F.: "High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 23, izd. 3, str. 860-867, 2008.
- [47] Balog, R. S.; Krein, P. T.: "Bus Selection in Multibus DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 26, izd. 3, str. 860-867, 2011.
- [48] Kakigano, H.; Miura, Y.; Ise, T.: "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 25, izd. 12, str. 3066-3075, 2010.
- [49] She, X. i dr.: "On Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 3, izd. 2, str. 975-985, 2012.
- [50] Arulampalam, A. i dr.: "Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids", *International Journal of Electronics*, sv. 91, izd. 9, str. 503-523, 2004.
- [51] Salomonsson, D.; Sannino, A.: "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, sv. 22, izd. 3, str. 1620-1627, 2007.
- [52] Hatziargyriou, N.: "Microgrids: Architectures and Control", WileyIEEE Press, 2013.
- [53] International Microgrid Symposium: "Borrego Springs Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/borrego-springs-microgrid/>, 1. 4. 2022.
- [54] International Microgrid Symposiums: "Santa Rita Jail Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/santa-rita-jail-microgrid/>, 1. 4. 2022.

- [55] Enel X: "Marcus Garvey Village Microgrid, NYC", s Interneta, <https://www.enelx.com/n-a/en/resources/case-studies/cs-marcus-garvey-village>, 1. 4. 2022.
- [56] International Microgrid Symposium: "New York University Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/new-york-university-microgrid/>, 1. 4. 2022.
- [57] Patrao, I. i dr.: "Microgrid architectures for low voltage distributed generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, sv. 43, str. 415-424, 2015.
- [58] Rahman, M. S.; Hossain, M. J.; Lu, J.: "Coordinated control of three-phase AC and DC type EV–ESSs for efficient hybrid microgrid operations", Energy Conversion and Management, sv. 122, str. 488-503, 2016.
- [59] Chandrasena, R. P. S. i dr.: "Dynamic operation and control of a hybrid nanogrid system for future community houses", IET Generation, Transmission & Distribution, sv. 9, izd. 11, str. 1168-1178, 2015.
- [60] International Microgrid Symposium: "Sendai Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/sendai-microgrid/>, 1. 4. 2022.
- [61] Nejbatkhah, F.; Li, Y. W.: "Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, sv. 30, izd. 12, str. 7072-7089, 2015.
- [62] Gupta, A.; Doolla, S.; Chatterjee, K.: "Hybrid AC–DC Microgrid: Systematic Evaluation of Control Strategies", IEEE Transactions on Smart Grid, sv. 9, izd. 4, str. 3830-3843, 2018.
- [63] Unamuno, E.; Barrena, J. A.: "Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, sv. 52, str. 1251-1259, 2015.
- [64] Fang, S. i dr.: "Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships", IEEE Transactions on Vehicular Technology, sv. 69, izd. 1, str. 207-219, 2020.
- [65] Shen, B.; Kahrl, F.; Satchwell, A. J.: "Facilitating Power Grid Decarbonization with Distributed Energy Resources: Lessons from the United States", Annual Review of Environment and Resources, sv. 46, izd. 1, str. 349-375, 2021.
- [66] FERC: "Distributed energy resources: technical considerations for the bulk power system.", u *Staff Rep. AD18-10-000*. 2018: Washington, DC.
- [67] NARUC: "NARUC manual on distributed energy resources rate design and compensation", u *Report*. 2016: Washington, DC.
- [68] El-Khattam, W.; Salama, M. M. A.: "Distributed generation technologies, definitions and benefits", Electric Power Systems Research, sv. 71, izd. 2, str. 119-128, 2004.

- [69] HERA: "Godišnje izvješće o radu Hrvatske energetske regulatorne agencije za 2020. godinu". 2021, hrvatska energetska regulatorna agencija.
- [70] "Zakon o obnovljivim izvorima i visokoučinkovitoj kogeneraciji, NN 111/18". Preuzeto s: <https://www.zakon.hr/z/3034/Zakon-o-obnovljivim-izvorima-energije-i-visokou%C4%8Dinkovitoj-kogeneraciji-2019-2021>.
- [71] Sahebkar Farkhani, J. i dr.: "Impact of Recloser on Protecting Blind Areas of Distribution Network in the Presence of Distributed Generation", *Applied Sciences*, sv. 9, izd. 23, 2019.
- [72] Akorede, M. F.; Hizam, H.; Pouresmaeil, E.: "Distributed energy resources and benefits to the environment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 14, izd. 2, str. 724-734, 2010.
- [73] Li, C.: "Comparative Performance Analysis of Grid-Connected PV Power Systems with Different PV Technologies in the Hot Summer and Cold Winter Zone", *International Journal of Photoenergy*, sv. 2018, str. 8307563, 2018.
- [74] Bollipo, R. B.; Mikkili, S.; Bonthagorla, P. K.: "Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, sv. 7, izd. 1, str. 9-33, 2021.
- [75] Zeb, K. i dr.: "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 94, str. 1120-1141, 2018.
- [76] Bacha, S. i dr.: "Photovoltaics in Microgrids: An Overview of Grid Integration and Energy Management Aspects", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, sv. 9, izd. 1, str. 33-46, 2015.
- [77] Hau, E.: "Physical Principles of Wind Energy Conversion", *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, E. Hau, Editor. 2013, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. str. 79-87.
- [78] Betz, A.: "Wind-energie und ihre ausnutzung durch windmühlen" Vol. 2, Vandenhoeck & Ruprecht, 1926.
- [79] Hau, E.: "Rotor Aerodynamics", *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, E. Hau, Editor. 2013, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. str. 89-166.
- [80] Bin, W. i dr.: "Wind Energy System Configurations", *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. 2011, IEEE. str. 153-171.
- [81] Puchalapalli, S. i dr.: "A Microgrid Based on Wind-Driven DFIG, DG, and Solar PV Array for Optimal Fuel Consumption", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 56, izd. 5, str. 4689-4699, 2020.
- [82] Mesemanolis, A.; Mademlis, C.; Kioskeridis, I.: "Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System With Induction Generator", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, sv. 1, izd. 4, str. 238-246, 2013.

- [83] Goel, P. K. i dr.: "Isolated Wind–Hydro Hybrid System Using Cage Generators and Battery Storage", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 58, izd. 4, str. 1141-1153, 2011.
- [84] Faisal, M. i dr.: "Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges", *IEEE Access*, sv. 6, str. 35143-35164, 2018.
- [85] Calero, F. i dr.: "A Review of Modeling and Applications of Energy Storage Systems in Power Grids", *Proceedings of the IEEE*, str. 1-26, 2022.
- [86] Ter-Gazarian, A. G.: "Energy Storage for Power Systems", 2020.
- [87] Chen, H. i dr.: "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, sv. 19, izd. 3, str. 291-312, 2009.
- [88] Ali, D. M.; Salman, S. K.: "A Comprehensive Review of the Fuel Cells Technology and Hydrogen Economy", *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, sv. 1, str. 98-102, 2006.
- [89] Alegria, E. i dr.: "CERTS Microgrid Demonstration With Large-Scale Energy Storage and Renewable Generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 5, izd. 2, str. 937-943, 2014.
- [90] Lopes, P. P.; Stamenkovic, V. R.: "Past, present, and future of lead–acid batteries", *Science*, sv. 369, izd. 6506, str. 923-924, 2020.
- [91] Ishaq, S. i dr.: "A review on recent developments in control and optimization of micro grids", *Energy Reports*, sv. 8, str. 4085-4103, 2022.
- [92] Guerrero, J. M. i dr.: "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 60, izd. 4, str. 1254-1262, 2013.
- [93] Guerrero, J. M. i dr.: "Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 56, izd. 3, str. 726-736, 2009.
- [94] Olivares, D. E. i dr.: "Trends in Microgrid Control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 5, izd. 4, str. 1905-1919, 2014.
- [95] Parhizi, S. i dr.: "State of the Art in Research on Microgrids: A Review", *IEEE Access*, sv. 3, str. 890-925, 2015.
- [96] Gao, F. i dr.: "Primary and secondary control in DC microgrids: a review", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, sv. 7, izd. 2, str. 227-242, 2019.
- [97] Kawabata, T.; Higashino, S.: "Parallel operation of voltage source inverters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 24, izd. 2, str. 281-287, 1988.
- [98] Pascual, M. i dr.: "Robust Model-Following Control of Parallel UPS Single-Phase Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 55, izd. 8, str. 2870-2883, 2008.

- [99] Wang, X.; Zhang, H.; Li, C.: "Distributed finite-time cooperative control of droop-controlled microgrids under switching topology", *IET Renewable Power Generation*, sv. 11, izd. 5, str. 707-714, 2017.
- [100] Li, Y.; Vilathgamuwa, D. M.; Loh, P. C.: "Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for Multibus Microgrid System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 19, izd. 5, str. 1195-1204, 2004.
- [101] Lopes, J. A. P.; Moreira, C. L.; Madureira, A. G.: "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, sv. 21, izd. 2, str. 916-924, 2006.
- [102] Zamora, R.; Srivastava, A. K.: "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 14, izd. 7, str. 2009-2018, 2010.
- [103] Lou, G. i dr.: "Decentralised secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrid based on adaptive state estimator", *IET Generation, Transmission & Distribution*, sv. 11, izd. 15, str. 3683-3693, 2017.
- [104] Madureira, A.; Moreira, C.; Lopes, J. A.: "Secondary Load-Frequency Control for Microgrids in Islanded Operation", 2005.
- [105] Ahmethodzic, L.; Music, M.: "Comprehensive review of trends in microgrid control", *Renewable Energy Focus*, sv. 38, str. 84-96, 2021.
- [106] Shafiee, Q.; Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C.: "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 29, izd. 2, str. 1018-1031, 2014.
- [107] Sujil, A.; Verma, J.; Kumar, R.: "Multi agent system: concepts, platforms and applications in power systems", *Artificial Intelligence Review*, sv. 49, izd. 2, str. 153-182, 2018.
- [108] Balaji, P. G.; Srinivasan, D.: "An Introduction to Multi-Agent Systems", *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications - 1*. 2010. str. 1-27.
- [109] Dimeas, A. L.; Hatziargyriou, N. D.: "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, sv. 20, izd. 3, str. 1447-1455, 2005.
- [110] Cai, N.; Xu, X.; Mitra, J.: "A hierarchical multi-agent control scheme for a black start-capable microgrid", *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, str. 1-7, 2011.
- [111] Han, Y. i dr.: "MAS-Based Distributed Coordinated Control and Optimization in Microgrid and Microgrid Clusters: A Comprehensive Overview", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 33, izd. 8, str. 6488-6508, 2018.
- [112] Dragicevic, T. i dr.: "DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques", *IEEE Transactions on Power Electronics*, str. 1-1, 2015.

- [113] Rocabert, J. i dr.: "Control of Power Converters in AC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 27, izd. 11, str. 4734-4749, 2012.
- [114] Arul, P. G.; Ramachandaramurthy, V. K.; Rajkumar, R. K.: "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 42, str. 597-608, 2015.
- [115] Zia, M. F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M.: "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects", *Applied Energy*, sv. 222, str. 1033-1055, 2018.
- [116] Cruz May, E. i dr.: "Forecast and Energy Management of a Microgrid with Renewable Energy Sources Using Artificial Intelligence", *Intelligent Computing Systems*. 2018. str. 81-96.
- [117] Rahmani, R.; Moser, I.; Seyedmahmoudian, M.: "Multi-agent based operational cost and inconvenience optimization of PV-based microgrid", *Solar Energy*, sv. 150, str. 177-191, 2017.
- [118] Ghorbani, S.; Rahmani, R.; Unland, R.: "Multi-agent Autonomous Decision Making in Smart Micro-Grids' Energy Management: A Decentralized Approach", *Multiagent System Technologies*. 2017. str. 223-237.
- [119] Kamala Devi, V.; Premkumar, K.; Bisharathu Beevi, A.: "Energy management using battery intervention power supply integrated with single phase solar roof top installations", *Energy*, sv. 163, str. 229-244, 2018.
- [120] Leo, R.; Morais, A. A.: "Multi-Agent Systems Based Advanced Energy Management of Smart Micro-grid". 2020.
- [121] Fatima, I. i dr.: "Home Energy Management System Using Ant Colony Optimization Technique in Microgrid", *Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications*. 2018. str. 267-279.
- [122] Eseye, A. T. i dr.: "Optimal energy management strategy for an isolated industrial microgrid using a Modified Particle Swarm Optimization", *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, str. 494-498, 2016.
- [123] Arcos-Aviles, D. i dr.: "Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting", *Applied Energy*, sv. 205, str. 69-84, 2017.
- [124] Wang, T.; He, X.; Deng, T.: "Neural networks for power management optimal strategy in hybrid microgrid", *Neural Computing and Applications*, sv. 31, izd. 7, str. 2635-2647, 2019.
- [125] Ansari, S.; Chandel, A.; Tariq, M.: "A Comprehensive Review on Power Converters Control and Control Strategies of AC/DC Microgrid", *IEEE Access*, sv. 9, str. 17998-18015, 2021.

- [126] Kouro, S. i dr.: "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, sv. 9, izd. 1, str. 47-61, 2015.
- [127] Najafi, P.; Houshmand Viki, A.; Shahparasti, M.: "Evaluation of Feasible Interlinking Converters in a Bipolar Hybrid Microgrid", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, sv. 8, izd. 2, str. 305-314, 2020.
- [128] Suleiman, M. S. i dr.: "Introduction", *Power Electronic Converters for Microgrids*. 2014, IEEE. str. 1-12.
- [129] Palanidoss, S. i dr.: "Comprehensive review of single stage switched boost inverter structures", *IET Power Electronics*, sv. 14, izd. 12, str. 2031-2051, 2021.
- [130] Rodríguez-Amenedo, J. L. i dr.: "Black-Start Capability of DFIG Wind Turbines Through a Grid-Forming Control Based on the Rotor Flux Orientation", *IEEE Access*, sv. 9, str. 142910-142924, 2021.
- [131] Catalán, P. i dr.: "A Comprehensive Overview of Power Converter Applied in High-Power Wind Turbine: Key Challenges and Potential Solutions", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 38, izd. 5, str. 6169-6195, 2023.
- [132] Karaagac, U. i dr.: "STATCOM integration into a DFIG-based wind park for reactive power compensation and its impact on wind park high voltage ride-through capability", *Electric Power Systems Research*, sv. 199, str. 107368, 2021.
- [133] Tomislav Dragičević, P. W., Frede Blaabjerg: "Overview and design of solid-state transformers", *DC Distribution Systems and Microgrids*, P.W. Tomislav Dragičević, Frede Blaabjerg, Editor. 2018, IET.
- [134] Rehman, A.; Ashraf, M.: "Design and Analysis of PWM Inverter for 100KVA Solid State Transformer in a Distribution System", *IEEE Access*, sv. 7, str. 140152-140168, 2019.
- [135] Bayhan, S. i dr.: "Power electronic converters and control techniques in AC microgrids", *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, str. 6179-6186, 2017.
- [136] Dragičević, T. i dr.: "Control of Power Converters in ac and dc Microgrids", *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. 2019. str. 1-23.
- [137] Zeineldin, H. H.; El-saadany, E. F.; Salama, M. M. A.: "Distributed Generation Micro-Grid Operation: Control and Protection", *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, str. 105-111, 2006.
- [138] Grgić, I. i dr.: "Efficiency Boost of a Quasi-Z-Source Inverter: A Novel Shoot-Through Injection Method with Dead-Time", *Energies*, sv. 14, izd. 14, str. 4216, 2021.
- [139] Fang Zheng, P.; Miaosen, S.; Zhaoming, Q.: "Maximum boost control of the Z-source inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 20, izd. 4, str. 833-838, 2005.

- [140] Shen, M. i dr.: "Maximum constant boost control of the Z-source inverter", *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, sv. 1, str. 1-147, 2004.
- [141] Bubalo, M. B., Mateo; Grgić, Ivan; Vukadinović, Dinko: "Otočni rad trofaznog izmjenjivača kvazi Z-tipa s regulacijom napona trošila", u *XVIII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2019*. 2019: Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina,.
- [142] Cintron-Rivera, J. G. i dr.: "Quasi-Z-Source inverter with energy storage for Photovoltaic power generation systems", *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, str. 401-406, 2011.
- [143] Bašić, M. B., Matija ; Vukadinović, Dinko ; Grgić, Ivan: "OPTIMAL POWER FLOW CONTROL IN A STAND-ALONE PV SYSTEM WITH A BATTERY-ASSISTED QUASI-Z-SOURCE INVERTER", *B&H Electrical Engineering (Bosanskohercegovačka elektrotehnika)*, sv. 14, 2020.
- [144] Liu, Y. i dr.: "Modeling and controller design of quasi-Z-Source inverter with battery based photovoltaic power system", *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, str. 3119-3124, 2012.
- [145] Kayiranga, T. i dr.: "Abnormal Operation State Analysis and Control of Asymmetric Impedance Network-Based Quasi-Z-Source PV Inverter (AIN-qZSI)", *IEEE Transactions on Power Electronics*, sv. 31, izd. 11, str. 7642-7650, 2016.
- [146] Grgić, I. i dr.: "Photovoltaic System with a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter: Improved Control System Design Based on a Novel Small-Signal Model", *Energies*, sv. 15, izd. 3, str. 850, 2022.
- [147] Liu, W. i dr.: "Critical Parameter Analysis and Design of the Quasi-Z-Source Inverter", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, str. 474-480, 2019.
- [148] Jeyanthi, S.; Krishnamoorthi, K.: "Quasi Z-Source Network-Based Photovoltaic Supported STATCOM for Voltage and Frequency Control of Stand-Alone WECS", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, str. 2250003, 2021.
- [149] Bubalo, M. i dr.: "Wind Energy Conversion System Using Advanced Speed Control and Model-Based Loss Minimization", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 38, izd. 2, str. 869-878, 2023.
- [150] Bubalo, M. i dr.: "Experimental Investigation of a Standalone Wind Energy System with a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter", *Energies*, sv. 14, izd. 6, 2021.
- [151] Bubalo, M. i dr.: "Optimized Isolated Operation of a WECS- Powered Microgrid with a Battery-Assisted qZSI", *2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, str. 1-6, 2020.
- [152] Jadrić, M. F., Božidar: "Dinamika električnih strojeva", *Graphis d.o.o., Zagreb (CRO)*, 1997.

- [153] Bašić, M.; Vukadinović, D.; Grgić, I.: "Compensation of Stray Load and Iron Losses in Small Vector-Controlled Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 34, izd. 3, str. 1677-1685, 2019.
- [154] Bašić, M.; Vukadinović, D.: "Small-Size Induction Machine Equivalent Circuit Including Variable Stray Load and Iron Losses", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, sv. 13, str. 1603-1612, 2018.
- [155] Bašić, M.; Vukadinović, D.; Polić, M.: "Stray Load and Iron Losses in Small Induction Machines Under Variable Operating Frequency and Flux: A Simple Estimation Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 33, izd. 2, str. 869-876, 2018.
- [156] Bašić, M.; Vukadinović, D.: "Vector control system of a self-excited induction generator including iron losses and magnetic saturation", *Control Engineering Practice*, sv. 21, str. 395–406, 2013.
- [157] "The Aerogenesis 5 kW Wind Turbine", Aerogenesis Wind Energy, brošura, https://web.archive.org/web/20110217053259/http://aerogenesis.com.au/Images/Aerogenesis_5kW_product_description.pdf
- [158] Bašić, M.: "Sustav vektorske regulacije samouzbudnog asinkronog generatora s uračunatim gubicima u željezu", doktorska disertacija, Odjel. Zavodu za elektroenergetiku, Sveučilište u Splitu, Split, 2013.
- [159] Zhang, X. i dr.: "Maximum power point tracking algorithms for wind power generation system: Review, comparison and analysis", *Energy Science & Engineering*, sv. 11, izd. 1, str. 430-444, 2023.
- [160] Pande, J. i dr.: "A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems", *Journal of Marine Science and Engineering*, sv. 9, izd. 11, 2021.
- [161] Bašić, M. i dr.: "Speed-Sensorless Vector Control of an Induction Generator Including Stray Load and Iron Losses and Online Parameter Tuning", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, sv. 35, izd. 2, str. 724-732, 2020.
- [162] Abo-Khalil, A. G.: "Model-based optimal efficiency control of induction generators for wind power systems", *2011 IEEE International Conference on Industrial Technology*, str. 191-197, 2011.
- [163] Piazza, M. C. D.; Luna, M.; Pucci, M.: "Electrical Loss Minimization Technique for Wind Generators Based on a Comprehensive Dynamic Modeling of Induction Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, sv. 53, izd. 4, str. 3696-3706, 2017.
- [164] Senjyu, T. i dr.: "Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator", *Renewable Energy*, sv. 34, izd. 4, str. 994-999, 2009.

- [165] Leidhold, R.; Garcia, G.; Valla, M. I.: "Field-oriented controlled induction generator with loss minimization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, sv. 49, izd. 1, str. 147-156, 2002.
- [166] Simoes, M. G.; Bose, B. K.; Spiegel, R. J.: "Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system", IEEE Transactions on Industry Applications, sv. 33, izd. 4, str. 956-965, 1997.
- [167] Bašić, M.; Vukadinović, D.: "Online Efficiency Optimization of a Vector Controlled Self-Excited Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, sv. 31, izd. 1, str. 373-380, 2016.
- [168] Bašić, M. i dr.: "Energy efficient control of a stand-alone wind energy conversion system with AC current harmonics compensation", Control Engineering Practice, sv. 93, str. 104185, 2019.
- [169] Bašić, M. i dr.: "Sensorless Maximum Power Control of a Stand-Alone Squirrel-Cage Induction Generator Driven by a Variable-Speed Wind Turbine", Journal of Electrical Engineering & Technology, sv. 16, izd. 1, str. 333-347, 2021.
- [170] Bubalo, M. i dr.: "Hybrid Wind-Solar Power System with a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter: Optimal Power Generation by Deploying Minimum Sensors", Energies, sv. 16, izd. 3, str. 1488, 2023.
- [171] Cat Ho, N.; Wechler, W.: "Hedge algebras: An algebraic approach to structure of sets of linguistic truth values", Fuzzy Sets and Systems, sv. 35, izd. 3, str. 281-293, 1990.
- [172] Ho, N. C.; Wechler, W.: "Extended hedge algebras and their application to fuzzy logic", Fuzzy Sets and Systems, sv. 52, izd. 3, str. 259-281, 1992.
- [173] Ho, N. C.; Lan, V.: "Hedge algebras: An algebraic approach to domains of linguistic variables and their applicability", ASEAN Journal on Science and Technology for Development, sv. 22, izd. 4, str. 1-18, 2023.
- [174] Vukadinović, D. i dr.: "Optimization of a Hedge-Algebra-Based Speed Controller in a Stand-Alone WECS", *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, str. 1-6, 2020.
- [175] Abdullah, M. A. i dr.: "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, sv. 16, izd. 5, str. 3220-3227, 2012.
- [176] Devarakonda, A. K. i dr.: "A Comparative Analysis of Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems", Energies, sv. 15, izd. 22, str. 8776, 2022.
- [177] Rajesh, R.; Mabel, M. C.: "Efficiency analysis of a multi-fuzzy logic controller for the determination of operating points in a PV system", Solar Energy, sv. 99, str. 77-87, 2014.
- [178] Brito, M. A. G. d. i dr.: "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, sv. 60, izd. 3, str. 1156-1167, 2013.

ŽIVOTOPIS

Rođen sam u Imotskom 14. prosinca 1991. godine. Osnovnu školu sam završio u Prološcu, a u Imotskom sam 2010. godine završio srednju Ekonomsku školu. Nakon završene srednje škole upisao sam stručni preddiplomski studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu. Nakon završenog stručnog studija upisao sam razlikovni studij te potom i sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, 2016. godine, na kojem sam diplomirao 2018. godine na smjeru Automatizacija i pogoni i time stekao naziv magistar inženjer elektrotehnike.

Od srpnja 2016. do kolovoza 2018. godine sam bio zaposlen preko studentskog ugovora u firmi Sintaksa d.o.o., sa sjedištem u Splitu, gdje sam radio na sustavima automatizacije energetske postrojenja. U rujnu 2018. godine zaposlio sam se na FESB-u u Splitu, na radno mjesto asistenta-istraživača na Katedri za energetske elektroniku i automatizaciju, u okviru istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost, pod nazivom *Sustav vjetar-sunce za optimiziranu proizvodnju električne energije u rezidencijalnim objektima*.

U listopadu iste godine upisao sam poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na FESB-u Sveučilišta u Splitu, kao student s punim radnim vremenom. Ovaj studij sam upisao u okviru programa Hrvatske zaklade za znanost *Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti*. U lipnju 2022. godine sam se trajno zaposlio u tvrtki Fractal d.o.o. sa sjedištem u Splitu i time postao student s dijelom radnog vremena. U okviru trenutnog zaposlenja radim na poslovima vođenja i tehničkog savjetovanja u području projekata obnovljivih izvora energije.

Tijekom poslijediplomskog studija sam objavio ukupno osamnaest znanstvenih radova, od čega sam pet objavio kao glavni autor. Od pet znanstvenih radova koje sam objavio kao glavni autor, tri su objavljena u časopisima indeksiranim u WoSCC bazi te dva u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa.

CURRICULUM VITAE

I was born in Imotski on December 14, 1991. I completed primary school in Proložac and graduated from the Secondary School of Economics in Imotski in 2010. After finishing high school, I enrolled in the professional undergraduate study program in Electrical Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split (FESB-Split). Upon completion of the professional program, I enrolled in a bridging program, followed by the university graduate program in Electrical Engineering at FESB-Split in 2016. I earned my master's degree in 2018, specializing in Automation and Drives, thus obtaining the title of Master of Engineering in Electrical Engineering.

From July 2016 to August 2018, I was employed under a student contract at the company Sintaksa d.o.o., based in Split, where I worked on automation systems for power plants. In September 2018, I began working at FESB-Split as a research assistant within a research project funded by the Croatian Science Foundation titled *Wind-Solar System for Optimized Residential Electric Generation*.

In October 2018, I enrolled in the postgraduate doctoral study program in Electrical Engineering and Information Technology at FESB-Split as a full-time student. I enrolled in this program as part of the the Croatian Science Foundation's Young Researchers' Career Development Project – Training New Doctoral Students. In June 2022, I became permanently employed at the company Fractal d.o.o. based in Split, thus continuing my studies as a part-time student. My current position involves project management and technical consulting in the field of renewable energy projects.

During my doctoral studies, I published a total of eighteen scientific papers, five of which as the first author. Of these five, three were published in journals indexed in the WoSCC database, and two were published in the proceedings of international scientific conferences.