

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ ELEKTROTEHNIKE I
INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

PRIMJENA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA U SUSTAVIMA S
DISTRIBUIRANIM IZVORIMA I MIKROMREŽAMA

Matija Bubalo

Split, rujan 2021.

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OSNOVNE TOPOLOGIJE I KOMPONENTE MIKROMREŽA	4
2.1.	Vrste mikromreža	4
2.1.1.	Istosmjerne mikromreže.....	4
2.1.2.	Izmjenične mikromreže	7
2.1.3.	Hibridne mikromreže	8
2.2.	Distribuirani izvori.....	9
2.2.1.	Fotonaponski paneli.....	10
2.2.2.	Vjetroagregati.....	11
2.2.3.	Male hidroelektrane.....	12
2.2.4.	Gorive ćelije	13
2.2.5.	Mikro-turbine.....	14
2.3.	Sustavi za pohranu energije	15
2.3.1.	Baterije	16
2.3.2.	Mehanički sustavi pohrane	17
2.3.3.	Električni sustav pohrane.....	18
2.3.4.	Termalni sustavi pohrane.....	19
3.	UPRAVLJAČKE STRUKTURE, STRATEGIJE I RASPOLAGANJE ENERGIJOM U MIKROMREŽAMA	20
3.1.	Upravljačke strukture.....	20
3.1.1.	Hijerarhijska struktura	20
3.1.2.	Multi-agent sustav.....	24
3.2.	Raspolaganje energijom u mikromrežama	26
4.	ENERGETSKI PRETVARAČI U MIKROMREŽAMA	29
4.1.	Podjela pretvarača prema topologiji	29
4.1.1.	Pretvarači s jednim stupnjem pretvorbe	29
4.1.2.	Pretvarači s dva stupnja pretvorbe	32
4.1.3.	Poluvodički transformator	34
4.2.	Upravljački ciljevi pretvarača u mikromrežama	36
5.	IZMJENJIVAČ KVAZI Z-TIPA	38
5.1.	Topologija i matematički model izmjenjivača kvazi Z-tipa	38
5.2.	Upravljanje izmjenjivačem kvazi Z-tipa.....	40
6.	PRIMJENA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA	42
6.1.	Sustavi namijenjeni za otočni rad.....	42

6.1.	Sustavi namijenjeni za rad u spoju s mrežom	47
7.	PRIMJENA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA U MIKROMREŽAMA	51
8.	ZAKLJUČAK	57
9.	LITERATURA.....	59
	POPIS OZNAKA I KRATICA	73
	SAŽETAK.....	77

1. UVOD

Ubrzani napredak civilizacije u posljednjem stoljeću, koji se nastavlja i dalje, sa sobom nosi i sve veću potrebu za energijom. Osim što je povećanje energetske potrebe uvjetovano rastom svjetske populacije, automatizacija industrijskih procesa i povećanje opće kvalitete života također pridonosi povećanju zahtjeva za energijom. Sukladno tome rastu i potrebe za električnom energijom koja ima ključnu ulogu kako u industrijskim procesima tako i u povećanju kvalitete života, sa sve značajnijom ulogom raznih električnih i elektroničkih uređaja u svakodnevnom životu. Zahtjevi za električnom energijom se dodatno povećavaju zadnjih nekoliko godina sa sve većom upotrebom električnih vozila. Većina električne energije danas u svijetu dolazi iz centraliziranih energetske postrojenja, koja vrlo često električnu energiju proizvode iz različitih fosilnih goriva. Iako postoje nuklearne elektrane velikih kapaciteta, koje se mogu smatrati čistim izvorima energije, njihov broj se sve više smanjuje [1]. Jednostavnost izgradnje, upravljanja i ekonomski faktori zaslužni su za veliki udio električne energije iz fosilnih goriva. Taj udio je u svijetu 2019. godine bio približno 62 % dok je u Europi bio oko 38 % [2]. Veliki udio energije iz fosilnih goriva vodeći je razlog klimatskih promjena uslijed velikih emisija stakleničkih plinova. Kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova i spriječile katastrofalne posljedice na okoliš, sve više se donose političke odluke kojima se pokušava smanjiti potrošnja energije iz fosilnih goriva. Direktivom Europske unije iz 2018. godine, postavljen je cilj prema kojem u 2030. godini 32 % energije u konačnoj potrošnji energije u EU-u mora biti iz obnovljivih izvora energije (OIE) [3], a taj udio je 2019 godine bio 16 % [4].

Za razliku od klasičnih izvora energije, OIE su najčešće manjeg kapaciteta i njihova primjena uvelike ovisi o lokaciji. Također, stohastička priroda obnovljivih energetske izvora poput vjetrova ili Sunca, čini proizvodnju energije nepredvidivom i nepouzdanom. Uzimajući u obzir navedene karakteristike, ne čudi pojava dodatnih problema pri integraciji OIE u postojeće energetske sustave. Naime, manji kapacitet i geografska distribuiranost OIE implicira povezivanje takvih izvora na mreže srednjeg i nižeg napona, odnosno najčešće na distribucijske mreže. Kada su projektirane, svrha distribucijskih mreža bila je prijenos energije iz energetske centrala, točnije iz prijenosne visokonaponske mreže, do krajnjih potrošača. Tok energije takvog sustava je jednosmjerni i svi ključni dijelovi, poput zaštite i vodova, dizajnirani su s tim na umu. Pojavom geografski distribuiranih izvora, koji mogu a ne moraju biti OIE, tok energije više nije jednosmjerni te se javljaju se problemi rada distribucijske mreže, poput pogrešnog djelovanja ili nedjelovanja zaštitnih elemenata i preopterećenja vodova [5, 6]. Također, potrošači sve više teže energetskej neovisnosti instalirajući distribuirane izvore na ili u samoj blizini rezidencijalnih objekata ili različitih proizvodnih postrojenja. Kako bi se navedeni problemi zaobišli i omogućila optimalna integracija distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav te potaknuo daljnji rast udjela proizvodnje električne energije iz OIE, stvoren je koncept mikromreže.

Odjel za energiju vlade SAD-a definirao je mikromrežu kao skupinu međusobno povezanih trošila i distribuiranih energetske 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 [7]. Koncept mikromreže pruža određene ekonomske i tehničke benefite. S tehničke strane gledano, proizvodno postrojenje, kampus ili bolnica koja ima mogućnost instalacije distribuiranih izvora, koristeći se uz to i sustavom za pohranu energije (SPE), može imati svoju vlastitu mikromrežu koja joj osigurava napajanje i u slučaju kvara distribucijske mreže [8]. Primjer ekonomskog benefita može se pokazati u Hrvatskoj, gdje zakonom nije definiran pojam

mikromreže, ali je definiran pojam „krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom“, tj., potrošač koji ima vlastiti distribuirani izvor. Prema aktualnom zakonu [9] takav kupac energiju proizvedenu iz vlastitih izvora može prodati samo po cijeni manjoj od cijene po kojoj kupuje energiju od opskrbljivača. Koristeći mikromrežu sa SPE-om, kupac može pohraniti višak energije iz OIE, koji troši u periodima manje proizvodnje ili veće potrošnje.

Mikromreže se mogu razlikovati prema namjeni, mogućnostima spoja na mrežu, geografskoj lokaciji, tipu SPE-a ili korištenim distribuiranim izvorima. Distribuirani izvori korišteni u mikromrežama, kao što je već spomenuto, mogu a ne moraju biti OIE. Primjer distribuiranog izvora koji nije OIE je dizel generator, koji se često koristi za napajanje nužnih potrošača, poput bolnica. Većina OIE-a također se može iskoristiti u funkciji distribuiranog izvora, a najčešće se koriste PV (od *engl.* photovoltaic) paneli i vjetroturbine. Mikromreža osim što može napajati rezidencijalne ili industrijske objekte, može biti i veća i koristiti se za napajanje naselja udaljenih od distribucijske mreže ili otočna naselja koja nemaju mogućnost spoja na distribucijsku mrežu. Primjer mikromreže kojom se napaja sveučilišni kampus je sveučilište University of California San Diego (Kalifornija), gdje se mikromreža koristi za napajanje električnom energijom, grijanje i hlađenje. Za napajanje mikromreže koriste se dvije plinske turbine od 13,5 MW, jedna plinska turbina od 3 MW te PV s 1,2 MW instalirane snage. To je dovoljno za pokrivanje 85 % potreba za električnom energijom te 95 % potreba za grijanje i hlađenje kampusa [10]. Na otočiću Eigg na zapadu Škotske realizirana je otočna mikromreža sa 110 kW snage iz hidroenergije, 24 kW snage iz vjetroturbina te 32 kW iz PV panela uz pomoćni dizelski generator. Od početka rada u 2008. godini, mikromreža napaja energijom 90 stanovnika otoka 24 sata dnevno te 95 % energije dolazi iz obnovljivih izvora [11]. Njemačko naselje Mannheim-Wallstadt s 1200 stanovnika napaja se iz mikromreže s 4,7 kW snage iz gorivih ćelija, 3,8 kW snage iz PV panela, sustavom pohrane energije zamašnjakom snage 1.2 kW te dva kogeneracijska postrojenja instalirane snage od 9 kW i 5.5 kW. Također, ventilacijski sustavi i bojleri, ukupne snage 60 kW i 48 kW, koji su instalirani u objektima, mogu se kontrolirati s ciljem redukcije potrošnje. Ova mikromreža ima mogućnost i otočnog režima rada, što je i uspješno ispitano odvajanjem od mreže [12].

Prema topologiji, mikromreže je moguće podijeliti na istosmjerne, izmjenične i hibridne, ovisno o tome na kakvu sabirnicu se povezuju distribuirani izvori, SPE i trošila. Hibridna mikromreža ima i istosmjernu i izmjeničnu sabirnicu, pružajući tako mogućnost povezivanja izvora, trošila i SPE-a bez dodatnih pretvarača ili barem preko pretvarača s manje stupnjeva pretvorbe. Za upravljanje radom mikromreže te postizanje optimalnog rada zadužene su upravljačke strategije te sustavi za raspolaganje energijom. Upravljačke strategije se izводе s ciljem održavanja zadanih parametara mikromreže, poput amplitude i frekvencije napona, dok je namjena sustava za raspolaganje energijom postizanje optimalnih ekonomskih i tehničkih ciljeva. Upravljački sustavi na mikromrežu djeluju posredstvom energetske pretvarača, koji se osim za povezivanje distribuiranih izvora koriste i za povezivanje DC i AC podsustava hibridne mikromreže, a vrlo često i za povezivanje mikromreže s glavnim mrežom. Zbog toga je utjecaj energetske pretvarača na učinkovitost i stabilnost rada mikromreže značajan te se u znanstvenoj zajednici kontinuirano radi na poboljšanju starih i uvođenju novih topologija pretvarača.

Jedna od novijih topologija pretvarača je izmjenjivač Z-tipa [13], kasnije modificiran u izmjenjivač kvazi Z-tipa (qZSI) [14]. Topologiju qZSI-a čini trofazni tranzistorski most te impedancijski krug s dvije zavojnice, dva kondenzatora i diodom, koji se nalazi na ulazu u tranzistorski most. Prednost qZSI-a u odnosu na klasične energetske pretvarače jest što može raditi u funkciji izmjenjivača uz dodatnu mogućnost naponskog pojačanja i dva stupnja slobode upravljanja, a da pri tom zadržava jedan stupanj pretvorbe. Osim toga, qZSI omogućuje jednostavnu integraciju baterijskog sustava na DC strani, koji ne mora biti iste naponske razine

kao izvor priključen na ulaz qZSI-a. Navedena svojstva čine qZSI primamljivim za upotrebu s distribuiranim izvorima, gdje se njime istovremeno može regulirati i DC ulaz (distribuirani izvor ili DC sabirnica) i AC izlaz izmjenjivača (AC sabirnica, trošilo ili mreža) te SPE. Isto tako, zbog spomenutih povoljnih svojstava qZSI može značajno pridonijeti kvaliteti rada mikromreže. Posljednjih godina se u literaturi sve više razmatra primjena qZSI-a s distribuiranim izvorima, ali i s mikromrežama, iako u nešto manjem obimu.

U drugom poglavlju su opisane osnovne topologije mikromreža kao i distribuirani izvori i SPE-ovi koji se najčešće koriste u mikromrežama. Zatim su, u trećem poglavlju, prikazane različite upravljačke strukture, strategije i sustavi za raspolaganje energijom mikromreže. U četvrtom poglavlju je dan pregled energetske pretvarača korištenih u mikromrežama. U petom poglavlju je opisan qZSI, izveden njegov osnovni matematički model te su opisane osnovne metode upravljanja. U šestom poglavlju je dan pregled radova s primjenom qZSI-a u kombinaciji s distribuiranim izvorima a u sedmom poglavlju je dan pregled radova u koji razmatraju primjenu qZSI-a u mikromrežama.

2. OSNOVNE TOPOLOGIJE I KOMPONENTE MIKROMREŽA

Topologije mikromreža su zasnovane na topologiji klasičnih mreža. Samim time, osnovne komponente mikromreža jednake su kao i kod klasičnih mreža te ih čine energetske izvori, trošila i sustavi prijenosa električne energije. Ipak, kod pojedinih vrsta mikromreža, sustav prijenosa energije između izvora i trošila je značajno manji ili ga gotovo i nema, što je ujedno i njihovo najvažnije svojstvo. Ovisno o namjeni mikromreže, u praksi se mogu pronaći različite topologije mikromreža izvedenih s različitim pojedinačnim komponentama.

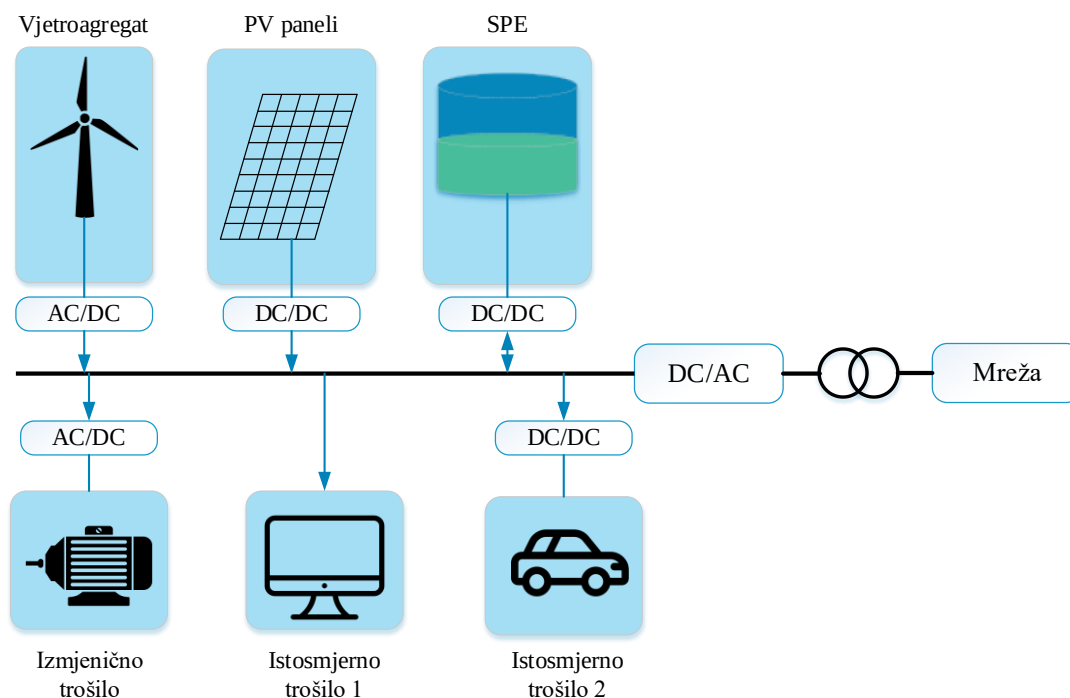
Primarni izvor napajanja mikromreža su distribuirani izvori, bilo da je riječ o obnovljivim ili neobnovljivim izvorima energije. Za napajanje mikromreže se može koristiti jedan ili više distribuiranih izvora, a često se koriste i različiti SPE-ovi, posebice u kombinaciji s obnovljivim izvorima, čime se kompenzira nepredvidivost i nestabilnost u proizvodnji. Trošila i distribuirani izvori se povezuju u mikromrežu preko sabirnica, uz različite energetske pretvarače koji se smještaju sukladno korištenoj topologiji. Prema tome, kao osnovni kriterij podjele mikromreža nameće se vrsta sabirnica, odnosno sučelja kojima se povezuju potrošači i izvori. Različite mikromreže koriste različite kombinacije istosmjernih i izmjeničnih sabirnica te je, stoga, prema tom kriteriju mikromreže moguće podijeliti na istosmjerne, izmjenične i hibridne [15].

2.1. Vrste mikromreža

2.1.1. Istosmjerne mikromreže

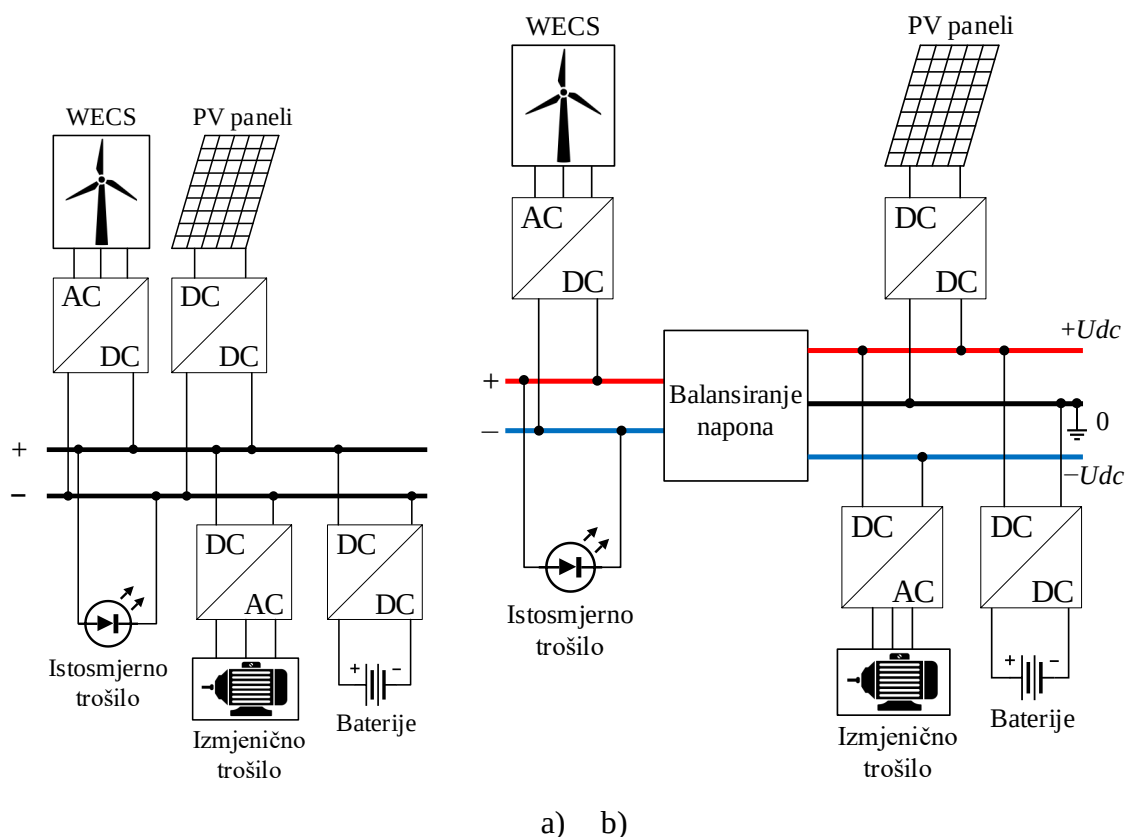
U slučaju istosmjernih mikromreža, svi izvori i potrošači se povezuju na sabirnicu s istosmjernim naponom. Za povezivanje izmjeničnih izvora i trošila koriste se energetske pretvarači, a osnovna topologija istosmjerne mikromreže prikazana je na slici 2.1. Istraživanje i primjena istosmjernih mikromreža je potaknuta prednostima koje nudi primjena istosmjernog napona za distribuciju energije, poput bolje kvalitete energije i veće pouzdanosti sustava u odnosu na klasičnu izmjeničnu distribucijsku mrežu [16].

Značajna prednost istosmjernih mikromreža je povećana korisnost cijelog sustava. Kako se neki od obnovljivih izvora, poput PV panela, na mrežu povezuju preko istosmjernog naponskog sučelja te postoji veliki broj potrošača napajanih istosmjernom strujom, potreban je manji broj energetske pretvarača u odnosu na izmjeničnu mikromrežu, čime se povećava korisnost sustava [17, 18]. Ipak, postoje određeni nedostaci kod primjene istosmjerne distribucije poput pojavljivanja rezonantnih krugova uslijed djelovanja kondenzatora koji se nalaze u DC krugu mreže i impedancije vodova. Ukoliko se rezonantne frekvencije jave u rasponu frekvencija harmonika koje generiraju razni pretvarači u sustavu, može doći do poteškoća u radu sustava [19]. U literaturi [20-23] su još razmatrani i problemi poput male struje kvara koja može ostati neopažena od strane sustava zaštite, a istovremeno u drugim dijelovima sustava može prouzročiti anomalije u naponu. Isto tako, veliko opterećenje može biti krivo protumačeno kao kvar u mreži. Javljaju se i samoodrživi električni lukovi uslijed više uzastopnih kvarova kao i tranzijenti pri čestom uklapanju i isklapanju trošila.

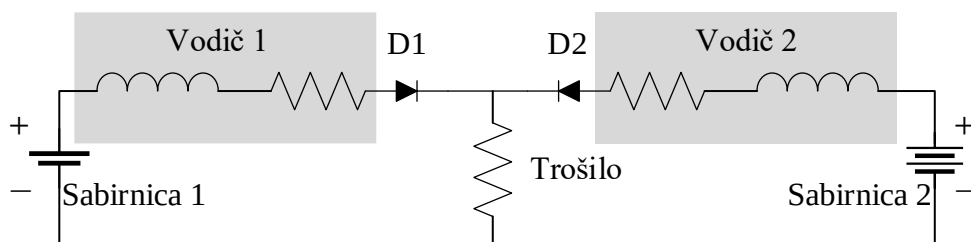


Slika 2.1 Osnovna topologija istosmjerne mikromreže

U literaturi se može pronaći više različitih topologija istosmjernih mikromreža, gdje je najčešće korištena ona s jednostrukom sabirnicom [24]. Kod unipolarne varijante, sabirnicu mikromreže čine dva voda, pozitivni i negativni, a shema ovakve mikromreže je prikazana na slici 2.2a. Nedostatak topologije s unipolarnom jednostrukom sabirnicom je, između ostalog, činjenica da su svi potrošači povezani na istu sabirnicu. Kako bi se otklonio navedeni nedostatak, u radu [25] je predložena mikromreža s bipolarnom jednostrukom sabirnicom (tri voda), s naponskom razinom ± 170 V. Topologija mikromreže s bipolarnom jednostrukom sabirnicom prikazana je na slici 2.2b. Primjenom bipolarne sabirnice omogućeno je povezivanje potrošača na dvije različite naponske razine, tj. između dva pola ili između pola i nule. Također, u slučaju kvara na jednom od vodova, trošila se još uvijek mogu napajati preko preostala dva voda pomoću rezervnog pretvarača. Kako bi se dodatno povećala pouzdanost sustava predložene su i strukture s više sabirnica poput one dane u [26], čija je pojednostavljena topologija prikazana na slici 2.3. U ovoj topologiji trošilo se prespaja s jedne sabirnice na drugu, ovisno o naponskoj razini na pojedinoj sabirnici. Naime, praznjenjem baterija napon sabirnice koja se iz njih napaja opada te se trošila prebacuju na drugu sabirnicu. Dodatno rješenje kojim se povećava pouzdanost mikromreža je međusobno povezivanje dviju ili više istosmjernih mikromreža. Povezivanjem mikromreža omogućuje se međusobna razmjena energije a, osim toga, ovisno o strukturi pojedine mikromreže, u slučaju pojave kvara na pojedinoj sabirnici moguće ju je premostiti [27-29].

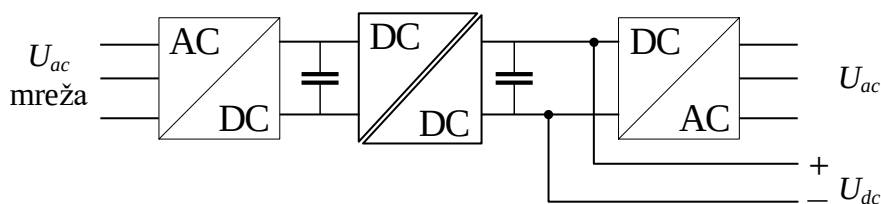


Slika 2.2 Topologija unipolarne (a) i bipolarne (b) istosmjerne mikromreže



Slika 2.3 Topologija istosmjerne mikromreže sa višestrukom sabirnicom

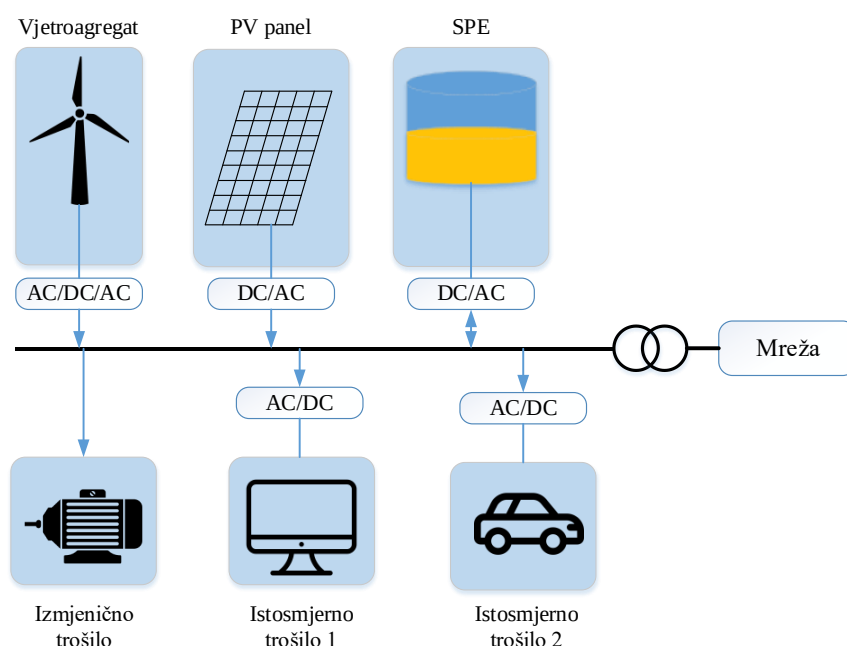
U literaturi se posljednjih godina intenzivno istražuje i topologija istosmjerne mikromreže s poluvodičkim transformatorom (SST od *engl.* solid state transformer) [30], prikazana na slici 2.4. Primjenom SST-a pojednostavljuje se povezivanje istosmjerne mikromreže s postojećom distribucijskom mrežom. Korištenjem poluvodičke tehnologije, mrežni napon – niski, srednji ili visoki – pretvara se u napon više frekvencije koji se zatim u transformatoru manjih dimenzija i gubitaka svodi na nižu naponsku razinu, mrežne frekvencije. Ovakvi transformatori najčešće imaju tri spojne točke: sučelje za ulazni mrežni napon, izlazni istosmjerni napon prilagođen naponu mikromreže te izmjenični napon na koji se povezuju izmjenična trošila ili izmjenični izvori poput vjetroturbina. Značajnim razvojem energetske pretvarača i novih tehnologija zadnjih desetak godina, odnosno sve većom upotrebom električnih automobila i sustava za pohranu energije, došlo je do sve šire primjene istosmjernih mikromreža uključujući energetske parkove, rezidencijalne objekte, punionice električnih vozila i energetske sustave na plovilima [31-36]. S obzirom na navedeno, istosmjerne mikromreže će zasigurno imati značajnu ulogu u energetske sustavu budućnosti.



Slika 2.4 Topologija istosmjerne mikromreže s poluvodičkim transformatorom

2.1.2. Izmjenične mikromreže

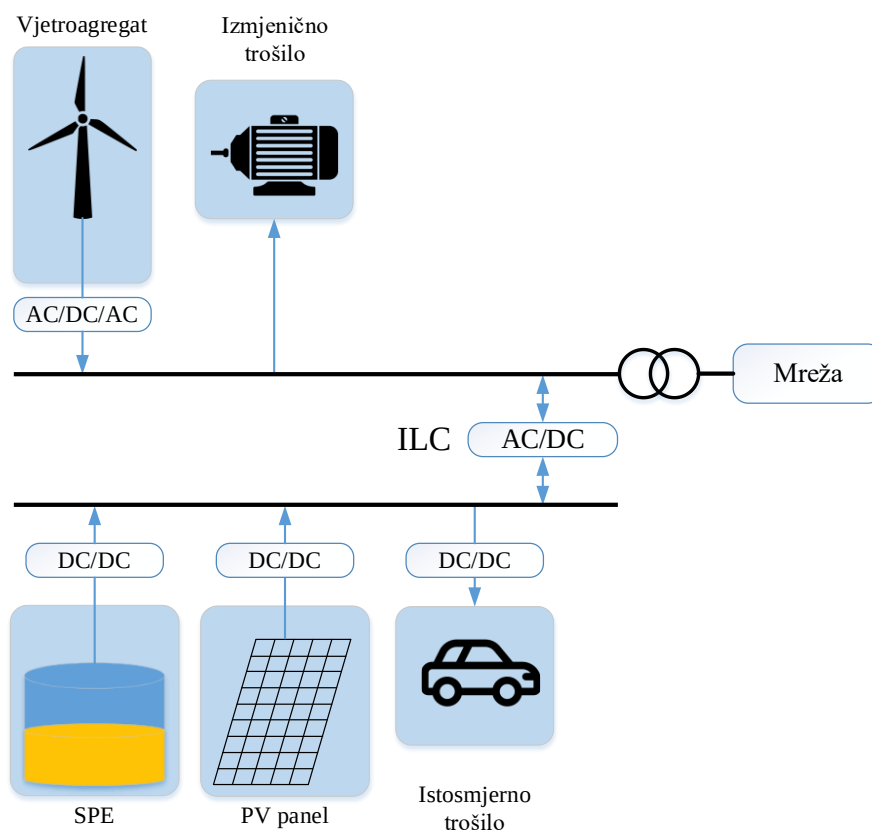
Izmjenične mikromreže predstavljaju konvencionalan pristup u izgradnji mreža a prve takve mreže su zapravo bile otočne mreže ili mreže u izoliranim područjima koje ovise o vlastitom izvoru energije [37]. Na slici 2.5 prikazana je osnovna topologija izmjenične mikromreže. Ove mikromreže su u mnogočemu slične klasičnim mrežama, počevši od glavne sabirnice mreže, na koju se povezuju trošila i distribuirani izvori, a čiji napon je reguliran po amplitudi i frekvenciji, zatim elemenata sustava zaštite pa sve do regulacijskih metoda i tehnika. Za povezivanje istosmjernih distribuiranih izvora potrebno je korištenje izmjenjivača, dok su ispravljači potrebni za povezivanje istosmjernih trošila. Nužni su i usmjerivači za povezivanje SPE, osim ako je riječ o sustavima poput reverzibilnih hidroelektrana (RHE), koje se mogu povezivati izravno na izmjeničnu sabirnicu. Upravo je potreba za velikim brojem energetskih pretvarača jedna od mana ovakvih sustava, posebice ako se uzme u obzir da se mikromreže često koriste za napajanje sustava ili postrojenja s većim brojem istosmjernih trošila. U ovakvim sustavima je potrebno regulirati i radnu i jalovu snagu, kao i harmonike. Uzevši u obzir potrebu za regulacijom ne samo amplitude nego i frekvencije napona te jalove snage, može se naslutiti da je kvaliteta napajanja jedan od većih nedostataka ovakvog tipa mikromreža [8]. Prednost u odnosu na istosmjernu mikromrežu je jednostavnije izvođenje sustava zaštite. Osim što se mogu koristiti zaštitni elementi namijenjeni za distribucijske mreže, ne javljaju se problemi poput otežanog prekidanja luka koji se javlja u istosmjernim sustavima [38]. Danas u svijetu postoji velik broj izmjeničnih mikromreža, kako u aktivnoj upotrebi tako i u testnom radu [39-41].



Slika 2.5 Osnovna topologija izmjenične mikromreže

2.1.3. Hibridne mikromreže

Kako bi se iskoristile prednosti istosmjernih i izmjeničnih mikromreža razvijene su hibridne mikromreže (slika 2.6), koje imaju i izmjeničnu i istosmjernu sabirnicu. Takvom strukturom mreže omogućuje se izravno povezivanje različitih distribuiranih izvora, SPE i potrošača na mikromrežu. Primjerice, izmjenična trošila poput kućanskih aparata mogu se povezati izravno na izmjeničnu sabirnicu [42], dok se istosmjerna trošila povezuju na istosmjernu sabirnicu, gdje se, po potrebi, može koristiti dodatni istosmjerni pretvarač [43, 44]. Prednosti hibridnih mikromreža u odnosu na AC i DC topologije mikromreža su između ostalog: veća korisnost zbog manjeg broja korištenih pretvarača, mogućnost održavanja naponske razine transformatorom povezanim na distribucijsku mrežu te činjenica da se hibridna mikromreža može izgraditi nadopunom već postojeće distribucijske mreže s dodatnim istosmjernim krugom i usmjerivačem. Hibridne mikromreže su još uvijek relativno nov koncept te se u literaturi mogu pronaći raznolika rješenja po pitanju topologije. Klasifikacija topologija se razlikuje kod različitih autora pa je tako u radu [45] podjela hibridnih mikromreža određena prema vrsti spoja distribuiranih izvora, SPE i trošila. Autori definiraju tri vrste topologije hibridnih mikromreža: mikromreže u AC spoju, gdje su svi distribuirani izvori, SPE i trošila povezana na AC sabirnicu, zatim mikromreže u DC spoju, gdje se DC sabirnica koristi za spoj distribuiranih izvora, SPE i trošila te mikromreže u AC-DC spoju, gdje se distribuirani izvori, SPE i trošila povezuju na obje sabirnice. Drugačiju podjelu koristili su autori u radu [46], gdje su podijelili hibridne mikromreže na tri tipa topologije. Prvi tip topologije mikromreže je tzv. osnovna topologija, gdje su AC i DC sabirnice međusobno povezane ILC pretvaračem (od *engl.* interlinking converter) u mikromrežu s jednim vlasnikom. Drugi tip topologije je *multi-microgrid* topologija, kod koje su različiti vlasnici AC i DC podsustava, koji se međusobno povezuju i čine hibridnu mikromrežu. Treći i posljednji tip topologije zasnovan je na SST-u, koji je korišten za međusobno povezivanje istosmjerne i izmjenične sabirnice te za spoj mikromreže s distribucijskom mrežom. Podjela topologija s obzirom na tip IFC pretvarača (od *engl.* interfacing converter), odnosno pretvarača koji povezuje mikromrežu s distribucijskom mrežom, je napravljen u radu [47], gdje je definirana AC povezana i AC razdvojena topologija. U slučaju AC povezane topologije, između mikromreže i distribucijske mreže nalazi se energetski transformator kojim se ujedno može održavati napon AC sabirnice bez dodatnog regulacijskog kruga. U slučaju AC razdvojene topologije, između AC sabirnice mikromreže i distribucijske mreže nalazi se barem jedan energetski pretvarač s istosmjernim međukrugom. Kao jedno od rješenja za AC razdvojene topologije susreće se i SST. Hibridne mikromreže se mogu implementirati za raznolike upotrebe poput mreže za napajanje domova [42] ili, primjerice, lučne mreže, koju povezivanje broda s lukom čini cjelovitom hibridnom mikromrežom [48].



Slika 2.6 Načelna shematska struktura hibridne mikromreže

2.2. Distribuirani izvori

Distribuirani izvori su alternativan pristup proizvodnji električne energije kod kojeg se proizvodnja električne energije umjesto isključivo u velikim energetske postrojenjima, tj., centralama, prostorno distribuira na manje izvore energije. Kao takvi, distribuirani izvori mogu biti postavljeni u neposrednoj blizini krajnjih potrošača ili u manjim postrojenjima. Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE, od *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 mreži [49]. Općeprihvaćen je uvjet prema kojem se energetski izvor kategorizira kao distribuirani izvor ako ima ukupnu instaliranu snagu do 10 MW [50].

Prednosti korištenja distribuirane proizvodnje su brojne te od njih koristi imaju kako operateri distribucijskog sustava tako i krajnji potrošači. Takvim pristupom proizvodnja električne energije smanjuju se troškovi prijenosa i distribucije, lakše je pronaći lokacije za smještanje energetske postrojenja, na raspolaganju su pristupačni resursi poput prirodnog plina koji se često koristi za male plinske turbine te je potrebno manje planiranje i manja početna investicija uz kraći rok izgradnje u odnosu na klasične elektrane. Osim toga, nove tehnologije su omogućile izgradnju učinkovitijih postrojenja i liberalizaciju tržišta električne energije, otvarajući tako mogućnosti novim proizvođačima električne energije [51-54]. Jedan od razloga sve raširenije primjene distribuirane proizvodnje je razvoj OIE, koji razvojem novih tehnologija postaju sve isplativiji i već sada imaju velik udio u proizvodnji energije iz distribuiranih izvora [55].

Nedostatci korištenja distribuiranih izvora su također značajni i u velikoj mjeri utječu na oblikovanje distribucijskih sustava budućnosti [5, 6, 56-59]. Uzimajući u obzir raznolikost

topologija distribucijskih mreža koje su projektirane s jednosmjernim tokom energije u vidu, integracija distribuiranih izvora u sadašnje distribucijske mreže predstavlja kompleksan zadatak. Mnogi problemi tehničke prirode javljaju se uslijed implementacije distribuiranih izvora poput, primjerice, reverznog toka energije, koji može izazvati poteškoće u sustavu zaštite distribucijske mreže. Također, može se javiti i nedostatak jalove snage u mreži uslijed velikog broja asinkronih generatora koji se često koriste u distribuiranim izvorima te se javljaju i oscilacije u frekvenciji i amplitudi mrežnog napona uslijed oscilacija u proizvodnji energije iz distribuiranih izvora. Takve se oscilacije mogu javiti lokalno u mreži te zahtijevaju kompleksno upravljanje mrežom kako bi se izbjegle. Isto tako, potrebno je redimenzionirati postojeću distribucijsku mrežu kako bi se prilagodila novim tokovima energije i sustavu zaštite. U distribucijsku mrežu se dodatno unose viši harmonici uslijed velikog broja distribuiranih izvora koji koriste različite energetske pretvarače za spoj na mrežu. Upravo kako bi se riješili neki od navedenih problema i dodatno pospješila integracija distribuiranih izvora, a s time i OIE, u zadnjem desetljeću se razvio koncept mikromreže. Iako je primjena mikromreža riješila neke od problema s integracijom distribuiranih izvora u distribucijski sustav, još uvijek ostaju poteškoće s projektiranjem zaštite u mikromrežama i distribucijskim mrežama s integriranim distribuiranim izvorima. Jedan od primjera je pojava tzv. *sljepih zona* zaštite koje se jave kada se kratki spoj napaja iz distribuiranog izvora, time umanjujući struju kvara koju mjeri zaštitni uređaj [60].

Opsežan pregled različitih vrsta obnovljivih i neobnovljivih distribuiranih izvora koji se koriste u mikromrežama dan je u radu [61]. Prema autorima, najčešće korišteni distribuirani izvori u mikromrežama su: PV paneli, vjetroagregati, male hidroelektrane, gorive ćelije, mikroturbine i dizel generatori.

2.2.1. Fotonaponski paneli

PV paneli pretvaraju sunčevu energiju izravno u električnu energiju. Pretvorba se događa unutar poluvodičke ćelije PV panela a, generira istosmjernu struju kada je izložena sunčevom zračenju. Za izradu ćelija PV panela koriste se različite tehnologije i materijali izrade, a najčešće korištene su: monokristalni silicij (c-Si), polikristalni silicij (p-Si), kadmij telurid (CdTe), bakar indij selen (CIS) i trakasti silicij (EFG-Si) [62]. Jedan PV panel čini više međusobno (paralelno i serijski) povezanih PV ćelija. PV paneli se najčešće dodatno povezuju u nizove panela (serijski povezani paneli), koji se dalje mogu povezati u PV polje (paralelan spoj više nizova PV panela). Izlazna snaga PV sustava je proporcionalna ukupnoj površini korištenih panela te značajno ovisi o osunčanosti i temperaturi, a korisnost im se kreće u rasponu od 10 % do 24 %, ovisno o tipu tehnologije. Kako bi se postigla maksimalna izlazna snaga koju je moguće postići za trenutnu osunčanost i temperaturu, koriste se različiti algoritmi za praćenje točke maksimalne snage (MPPT, od *engl.* maximum power point tracking) [63]. MPPT algoritmi korigiraju napon ili struju panela kako bi s obzirom na trenutne atmosferske uvjete izlazna snaga panela bila maksimalna. Za izvođenje MPPT algoritma potrebno je korištenje energetskog pretvarača kojim se ostvaruje regulacija struje ili napona PV panela. S obzirom na položaj i broj pretvarača, povezivanje panela se može izvesti na više načina [64]: povezivanje pojedinačnih panela na zasebne pretvarače, što omogućuje zasebno upravljanje svakim panelom, ali zahtijeva veći broj pretvarača; povezivanje niza panela na jedan pretvarač, gdje je cijeli niz povezan na isti napon i jednako je upravljan; povezivanje cijelog polja panela na središnji pretvarač, što zahtijeva najmanje pretvarača, ali se smanjuju i mogućnosti upravljanja. Osim MPPT algoritma, mogu se koristiti i različite tehnike praćenja Sunca, kojima se paneli tijekom cijelog dana usmjeravaju prema Suncu i time postiže povoljan kut upada sunčevih zraka. Zastupljenost PV panela među distribuiranim izvorima je značajna, a procjenjuje se da ukupno instalirana snaga PV panela danas iznosi približno 137 GW [65]. Često se koriste i u mikromrežama, bilo da je riječ o

mikromrežama rezidencijalnih objekata ili industrijskih postrojenja [66], čemu pridonosi raznovrsnost u mogućnostima instalacije.



Slika 2.7. Fotografija PV panela

2.2.2. Vjetroagregati

Vjetroagregati se koriste za pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Postoje različite izvedbe vjetroagregata s obzirom na postavljenu os turbine, brzinu vrtnje i vrstu korištenog električnog generatora [67]. S obzirom na os vrtnje razlikujemo vjetroagregate s vertikalnom (slika 2.8a) i horizontalnom osi (slika 2.8b), koji se najčešće i koriste. Podjela s obzirom na brzinu vrtnje odnosi se na brzinu vrtnje spoja turbine i generatora, a prema tome se razlikuju vjetroagregati s fiksnom, djelomično promjenjivom i promjenjivom brzinom vrtnje. U slučaju vjetroagregata s fiksnom brzinom vrtnje, generator je direktno povezan na mrežu preko transformatora te se za tu primjenu koristi kavezni asinkroni generator (SCIG, od *engl.* squirrel-cage induction generator), koji radi u uskom području brzina oko sinkrone brzine vrtnje. Ovo usko područje brzine je određeno dopuštenim klizanjem generatora, a brzina vrtnje se održava zakretanjem lopatica [68, 69]. Ovakav tip vjetroagregata je podložniji generiranju oscilacija i tzv. flikera koji se unose u mrežu. Kod vjetroagregata s djelomično promjenjivom brzinom vrtnje koriste se kliznokolutni 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 energetskih pretvarača. U slučaju vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje koriste se osim SCIG-a još i sinkroni generatori s permanentnim magnetima (PMSG, od *engl.* permanent magnet synchronous generator) te dvostruko napajani klizno-kolutni asinkroni generatori (DFIG, od *engl.* doubly-fed induction generator). Ovaj tip vjetroagregata se dodatno dijeli na dva tipa sustava s obzirom na snagu pretvarača koji se koristi za povezivanje na mrežu [69]. Prvi tip sustava su vjetroagregati povezani na mrežu preko energetskog pretvarača djelomične snage, čija je nazivna snaga značajno manja od snage generatora (najčešće oko 30 %). U takvoj konfiguraciji stator se povezuje izravno na mrežu dok se rotor povezuje preko energetskog pretvarača. Ovaj način povezivanja generatora može se izvesti samo u slučaju korištenja DFIG-a. Drugi tip sustava su vjetroagregati s pretvaračem pune snage, čija snaga odgovara snazi generatora te se spoj na mrežu izvodi isključivo preko pretvarača. U literaturi se može pronaći značajan broj znanstvenih istraživanja vezanih za različite vjetroagregate u funkciji distribuiranih izvora ili u kombinaciji s mikromrežom [68, 70-74].



Slika 2.8 Fotografija vjetroturbine s vertikalnom (a) i horizontalnom (b) osi

2.2.3. Male hidroelektrane

Generiranje električne energije iz kinetičke energije vode jedan je od prvih načina kojim se generirala električna energija. Iako se većina električne energije iz hidroagregata generira u velikim hidrocentralama – čak 16 % ukupne svjetske proizvodnje energije [75] – distribucijom proizvodnje električne energije u upotrebu su sve više ušle i male hidroelektrane (slika 2.9). Za hidroelektrane se može reći da pripadaju skupini malih hidroelektrana ukoliko im je ukupna instalirana snaga do 500 kW [76]. Prednost korištenja malih hidroelektrana je veća korisnost i upravljivost u odnosu na druge OIE i malen utjecaj na okoliš [77]. Isto tako, male hidroelektrane su odlično rješenje za proizvodnju električne energije u izoliranim ruralnim sredinama u razvoju, daleko od distribucijske ili prijenosne energetske mreže. Za njihovu izgradnju mogu se iskoristiti i manji vodeni tokovi ili čak umjetni kanali koji se koriste za natapanje poljoprivrednih površina, bez potrebe za izgradnjom masivnih i skupih brana [78]. Male hidroelektrane moguće je po konstrukciji podijeliti na tri skupine:

- Protočne hidroelektrane
- Hidroelektrane s branom
- Hidroelektrane na sporednom kanalu (kanal za natapanje)

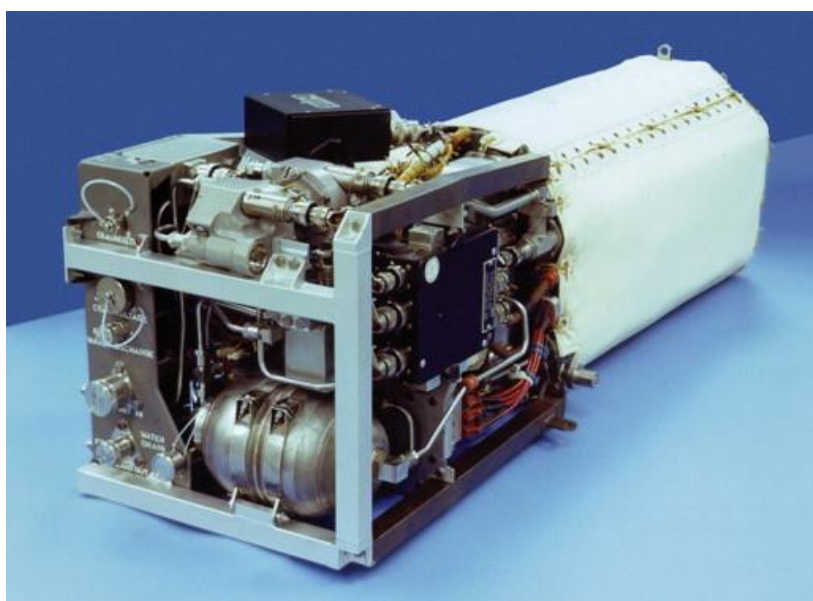
Hidroelektrane s branom imaju najveći utjecaj na okoliš zbog izgradnje brane, dok najmanji utjecaj na okoliš ima izgradnja postrojenja na već postojećem kanalu za natapanje, čime se ne remeti tok rijeke [79]. Zahvaljujući prednostima malih hidroelektrana, idealno su rješenje za napajanje mikromreža. Zanimljiv primjer je primjena male hidroelektrane za napajanje mikromreže izolirane ruralne sredine, koja radi u spoju s mrežom a isto tako nudi mogućnost isključenja i samostalnog rada ukoliko je to potrebno [80].



Slika 2.9. Fotografija male hidroelektrane

2.2.4. Gorive ćelije

Gorive ćelije su elektrokemijski generator kojim se iz različitih goriva i posredstvom katalizatora dobiva električna energija. Riječ je elektrokemijskom procesu obrnute elektrolize, koji koristi vodikom bogata goriva ili ugljikovodike te oksidans. Osnovni elementi gorive ćelije su anoda i katoda te elektrolitska membrana [81]. Gorivo se dovodi na elektrodu, a oksidans na katodu te se između elektroda odvija proces sagorijevanja kojim se generira električna struja između elektroda. Neke od prednosti gorivih ćelija su [82]: veća korisnost u odnosu na motore s unutarnjim izgaranjem (može ići do 90 % u kogeneraciji, odnosno ako se koristi kombinirana proizvodnja topline i električne energije) [83], nema emisije štetnih plinova, tihe su, nema pokretnih dijelova čime se smanjuju troškovi održavanja, modularne su, moguće je korištenje različitih goriva te imaju bolji omjer mase i energije u odnosu na baterije. Nedostatci su ponajviše visoka cijena, nedostatak infrastrukture te spor električni odziv što stvara poteškoće kod napajanja brzo promjenjivih trošila. Primjena gorivih ćelija je raznolika [81], od primjene u električnim automobilima, svemirskim letjelicama do napajanja rezidencijalnih objekata, gdje vodikove ćelije imaju funkciju distribuiranog izvora unutar mikromreže [84].



Slika 2.10 Fotografija gorive ćelije snage 18 kW korištene u svemirskoj letjelici

2.2.5. Mikro-turbine

Mikro-turbine su nova tehnologija, a riječ je plinskim turbinama manjih dimenzija i snage od 25 kW do 500 kW, koje se koriste za proizvodnju električne energije. Mikro-turbine usisavaju zrak u komoru za izgaranje gdje se miješa s gorivom koje se pali, čime se povećava temperatura, volumen te u konačnici, brzina plina. Zagrijani plin se usmjerava preko lopatica turbine čime se zakreće turbina i pokreće kompresor zraka. Većina je mikro-turbina za proizvodnju električne energije povezana na PMSG ili SCIG [85-88]. Postoje izvedbe mikro-turbina s jednom ili dvije osovine. Kada se koristi jedna osovina, na nju je obično povezan kompresor, turbina i generator. Brzine vrtnje osi generatora u ovom slučaju se kreću od 50000 o/min do 120000 o/min. S druge strane, u slučaju turbina s dvije osovine generator je povezan na turbinu preko mjenjačke kutije, s brzinom vrtnje od približno 3000 o/min [89-91]. Pogonsko gorivo može biti bilo koje plinsko gorivo uključujući plinove koji su nusproizvodi nekih drugih industrijskih procesa ili bioplin, što ih čini sve atraktivnijim rješenjem u posljednje vrijeme [92]. Prednosti mikro-turbina su male dimenzije, izdržljivost, smanjena razina buke i vibracija te jednostavna instalacija. Korisnost im se kreće od 25 % do 30 %, a u kogeneracijskim postrojenjima i preko 80 %.



Slika 2.11 Prikaz mikroturbine

Osim navedenih distribuiranih izvora, u mikromrežama su dosta zastupljeni još i dizel generatori. To su generatori pogonjeni motorima na unutarnje izgaranje, koji predstavljaju jedan od najstarijih oblika distribuiranih izvora. Već desetljećima se koriste u funkciji pomoćnog napajanja u raznim industrijskim objektima, vojnim objektima, bolnicama i sl. [70]. Najveće prednosti dizel generatora su niska početna cijena, jednostavno održavanje i mobilnost. Nedostatak je onečišćenje okoliša uslijed izgaranja goriva te niska korisnost od samo oko 30 %. U literaturi se može pronaći mnoštvo primjera primjene dizel generatora u različitim mikromrežama, gdje se često kombiniraju s različitim OIE [70, 93-95].



Slika 2.12 Fotografija dizel generatora

2.3. Sustavi za pohranu energije

Korištenjem mikromreža i sve većeg broja obnovljivih izvora do izražaja dolazi nepredvidivost i nestabilnost OIE. Nestabilnost u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora prenosi se u mrežu na koju je OIE povezan, gdje dolazi do oscilacija u amplitudi ili frekvenciji napona. To je posebno izraženo, primjerice, ako se iz vjetroagregata napaja mikromreža u otočnom režimu rada; oscilacije u proizvodnji u tom slučaju se ne mogu kompenzirati iz mreže već se prenose u mikromrežu u obliku flikera ili oscilacija. Također, na stabilnost sustava može utjecati i brza promjena profila opterećenja sustava koje mali distribuirani izvori nisu u stanju učinkovito korigirati [96, 97]. Iako je kratkoročno uz vremenske prognoze i statističke podatke moguće predvidjeti promjene dostupne energije iz OIE, dugoročno je jako teško biti siguran u stabilnost napajanja. Kako bi se osiguralo konstantno napajanje u mikromrežama, posebice onima koje rade u otočnom režimu rada, potrebno je integrirati SPE. Postoji više različitih funkcija SPE-a i načina na koji se oni mogu koristiti. To uvelike ovisi o tipu mreže, strukturi, ekonomskim ciljevima i vrsti energetskog izvora koji se koristi. Autori su u radu [98] predstavili različite funkcije koje može izvršavati SPE, a dijele se u četiri kategorije:

- Veliki centralizirani spremnici
- Pružanje pomoćnih usluga
- Održavanje kvalitete i pouzdanosti napajanja
- Integracija OIE

Kada radi u funkciji velikih centraliziranih spremnika, SPE ima dva cilja. Prvi cilj je raspolaganje energijom na način da se energija pohranjuje kada je otkupna i/ili prodajna cijena energije niska te prodaje kada je prodajna cijena energije visoka. Drugi cilj SPE-a u navedenoj funkciji je pokrivanje vršnih opterećenja, kada potrošnja prelazi snagu dostupnu iz generatora. Pokrivanjem vršnih opterećenja može se značajno uštediti jer je time potrebno zakupiti manju priključnu snagu od opskrbljivača električnom energijom ili je potrebna manja instalirana snaga energetskog postrojenja koje se koristi za napajanje. Pomoćne usluge koje se mogu pružati iz SPE-a su praćenje opterećenja, operativna rezerva, regulacija napona, regulacija frekvencije te samostalno pokretanje elektrane ili distribuiranog izvora u mreži bez napajanja, odnosno tzv. crni start (*engl.* black start). Jedna od karakteristika SPE-a je mogućnost brze promjene snage, što omogućuje njihovu primjenu u funkciji praćenja opterećenja. Ova funkcija je posebno važna kada se SPE koristi u kombinaciji s OIE koji imaju spor dinamički odziv. Operativna rezerva

predstavlja dio kapaciteta koji se inače ne koristi u normalnom radu, ali uslijed nedostatka snage može neko određeno vrijeme nadoknađivati manjak snage. SPE bi trebao imati mogućnost kompenzacije nedostatka snage barem jedan sat kako bi se pomoćni sustavi napajanja mogli pokrenuti [99]. Regulacija amplitude i frekvencije napona je bitna stavka u radu svake mikromreže te ovi parametri moraju biti unutar zadanih mrežnih vrijednosti. Uvjet za sposobnost regulacije amplitude napona je mogućnost reguliranja jalove snage [100]. Još važnija je regulacija frekvencije u mikromreži kojom se postiže ravnoteža između proizvodnje i potrošnje energije u sustavu. Posljednja pomoćna usluga koju može pružati SPE je crni start. U ovom slučaju se SPE može koristiti za napajanje većih elektrana prilikom pokretanja ili, primjerice, za početno magnetiziranje SCIG-a u slučaju manjih distribuiranih izvora [101].

Kod održavanja kvalitete i pouzdanosti napajanja, SPE ima zadatak osigurati pouzdano i kvalitetno napajanje krajnjem korisniku. Kada se mikromreža napaja iz obnovljivih izvora, lako može doći do oscilacija koje, ako se ne kompenziraju, dolaze do krajnjih korisnika. SPE se nameće kao dobro rješenje za otklanjanje nedostataka koji se javljaju pri napajanju iz obnovljivih izvora. Primjene SPE-a pri integraciji OIE dijele se u dvije kategorije: vremensko pomicanje i osiguravanje kapaciteta. Vremensko pomicanje odnosi se na pohranu energije u SPE za vrijeme niske potrošnje te napajanje energijom u periodima niske proizvodnje ili visoke potrošnje. Osiguravanje kapaciteta je naziv za kratkoročno „peglanje“ izlazne snage i napona iz generatora uslijed oscilacija u proizvodnji.

Vrste SPE-a se mogu podijeliti prema obliku koji se koristi za pohranu energije. Prema tome se razlikuju: elektrokemijski, mehanički, električni i termalni SPE [102, 103].

2.3.1. Baterije

Baterije predstavljaju elektrokemijski tip sustava za pohranu energije u kojem se električna energija kemijskom reakcijom pretvara i pohranjuje u aktivni materijal u ćeliji. Ovaj tip pohrane energije se koristi još od samih početaka istraživanja električne energije, a dostupnost različitih oblika i veličina baterija čini ga atraktivnim rješenjem. U upotrebi se danas mogu pronaći baterije od nekoliko Wh koje se koriste u prijenosnoj elektronici do baterija kapaciteta nekoliko MWh za primjenu u energetsom sustavu [104]. Željene naponske i strujne razine postižu se povezivanjem više ćelija serijski odnosno paralelno. S obzirom na materijale koji se u njima koriste, danas postoji velik broj različitih vrsta baterija od kojih se najčešće koriste olovno-kiselinske (PbA), litij-ionske (Li-ion) i nikal-metal hibridne (NiMh) [103]. Olovno-kiselinske baterije su najčešće korištene punjive baterije. Imaju veliku korisnost (70 % - 80 %) te najveći napon ćelije. Jeftinije su u odnosu na druge vrste baterija, što ih čini prikladnima za upotrebu u velikim baterijskim sustavima ili mikromrežama. Nedostatak im je manja gustoća energije u odnosu na NiMh, potreba za povremenim održavanjem te otkazivanje uslijed sulfatizacije. Nikal-metal hibridne baterije su znatno skuplje od olovno-kiselinskih, ali imaju bolje zadržavanje naboja i veću gustoću energije. Litij-ionske baterije imaju mogućnost brzog punjenja, veliku gustoću energije i mali gubitak naboja tijekom vremena (5 % mjesečno). S druge strane, performanse im se umanjuju s povećanjem temperature te zahtijevaju zaštitno sklopovlje, a cijena im je još uvijek dosta visoka iako se smanjuje sve masovnijom proizvodnjom.



Slika 2.13 Fotografija instalacije baterijskog sustava Tesla Megapack kapaciteta 15 MWh zasnovanog na litij-ionskim baterijama

2.3.2. Mehanički sustavi pohrane

Mehaničkim SPE-om električna energija se pohranjuje pretvarajući je u neki mehanički oblik. Tri najčešće vrste mehaničkih SPE-a su: zamašnjak, komprimirani zrak i reverzibilne hidroelektrane.

Pohrana energije zamašnjakom izvodi se brzo-rotirajućim tijelom, odnosno rotorom, čija se brzina povećava kada se želi pohraniti energiju i kada stroj na koji je rotor povezan radi u režimu motora. U slučaju pražnjenja energije zamašnjaka, električni stroj prelazi u generatorski režim rada te proizvodi električnu energiju usporavanjem rotirajućeg tijela. Zamašnjak čini masivni rotirajući cilindar koji je povezan na stator, najčešće magnetskim ležajem. U praksi se koriste zamašnjaci male brzine vrtnje (do 10000 o/min) i velike brzine vrtnje (preko 10000 o/min) [105]. Korisnost zamašnjaka kreće se od 90 % do 95 % sa snagama do 50 MW. Iako imaju veliku gustoću snage, gustoća energije im je niska i kreće se u rasponu od 5 Wh/kg do 100 Wh/kg, što im uvelike ograničava upotrebu. Ipak, zbog svojih prednosti poput velike gustoće snage, malih potreba za održavanjem, ekološke prihvatljivosti i visoke korisnosti, često se primjenjuju u mikromrežama [106]. U primjenama gdje je korišten za kompenzaciju naglih promjena u proizvodnji energije iz OIE, zamašnjak se pokazao boljim rješenjem od baterija [106]. Najveći nedostaci zamašnjaka su visoka stopa samopražnjenja i mala gustoća energije.

Pohranjivanje energije komprimiranim zrakom izvodi se utiskivanjem plina, najčešće zraka, u zatvoreni rezervoar gdje se energija pohranjuje u obliku tlaka pohranjenog zraka [107, 108]. Kako bi se energija pohranila, motor ili generator pokreće kompresore kojima se utiskuje plin u rezervoar, koji može biti umjetno izrađeni rezervoar ili prirodna podzemna špilja, a nekada se koriste i ispražnjene naftne bušotine. Da bi se oslobodila pohranjena energija, zrak se ispušta iz rezervoara, dodatno zagrijava te usmjerava u turbinu koja je povezana na električni generator. Ovaj način pohrane energije je pogodan za SPE malog i velikoga kapaciteta te se energija može zadržati duže vrijeme. Može se koristiti za raspolaganje energijom u smislu raspoređivanja opterećenja, pokrivanja vršnih opterećenja te regulaciju frekvencije i napona. Nedostaci ovakvoga načina pohrane energije su cijena, potreba za velikim spremnicima, te problem pronalaženja prikladne lokacije ako je riječ o prirodnim špiljama u funkciji rezervoara.

Pohrana energije reverzibilnim hidroelektranama izvodi se pumpanjem vode s niže na višu razinu. Time se u periodima kada postoji višak električne energije ona može pohraniti u obliku

potencijalne energije vode. Konstrukcijski se reverzibilne hidroelektrane ne razlikuju značajno od klasičnih hidroelektrana. Najveće prednosti su im dug životni vijek, niska stopa samopražnjenja i veliki kapacitet. Nedostatci su ovisnost o topološkim uvjetima te značajna projektna dokumentacija potrebna za izgradnju, koja može dugo trajati [109]. Reverzibilne hidroelektrane se u svijetu dosta koriste za balansiranje proizvodnje i potrošnje energije, korisnost im je od 70 % do 85 % a po instaliranoj snazi idu do 4000 MW [110].



Slika 2.14 Fotografija sustava za pohranu energije zamašnjakom

2.3.3. Električni sustav pohrane

Pohranjivanje električne energije bez mijenjanja njenog oblika može se izvesti samo električnim SPE-ovima. U tu kategoriju spadaju superkondenzatori i supravodljive zavojnice.

Superkondenzatori pohranjuju energiju u dvoslojnom prostoru između dvije elektrode, slično kao i obični kondenzatori. Ipak, u slučaju superkondenzatora riječ je o puno većoj gustoći energije, što je postignuto korištenjem materijala velike površine pri manjim udaljenostima elektroda [111]. Prednosti ovakvoga načina pohrane su neusporedivo veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja u odnosu na baterije te brz odziv i mogućnost oslobađanja velike količine energije u kratkom vremenu [112]. Nedostatci su mu visoka stopa samopražnjenja i visoka cijena. Nameću se kao izvrsno rješenje u zatvorenim sustavima ili mikromrežama s trošilima koja imaju impulsni profil opterećenja [113].

Supravodljive zavojnice su drugi tip električnog SPE-a a čini ga zavojnica izrađena od supravodljivog materijala rashlađena na kriogene temperaturne uvjete. Kroz zavojnicu se propušta istosmjerna struja kojom se magnetizira zavojnica te se električna energija pohranjuje u magnetskom polju. Ovakav SPE ima korisnost od 95 % do 98 %, životni vijek od 30 godina te je komercijalno dostupan u rasponu snaga od 0,1 MW do 10 MW. Nedostatak mu je visoka cijena i kompleksnost sustava hlađenja. Privlačan je za korištenje u mikromrežama u funkciji povećanja kvalitete napajanja te radi mogućnosti izmjenjivanja radne i jalove snage.



Slika 2.15 Prikaz superkondenzatora

2.3.4. Termalni sustavi pohrane

Termalni sustavi pohrane energiju pohranjuju u obliku topline ili leda, koja se može otpustiti kad je potrebna. Dije se na nisko-temperaturne i visoko-temperaturne sustave. Nisko-temperaturni sustavi rade s temperaturama manjim od 200 °C, a primjenjuju se za kuhanje ili grijanje. Visoko-temperaturni sustavi koriste različite tekuće i krute materijale za pohranu, a mogu se koristiti primjerice u toplinskim elektranama za generiranje pare koja pokreće turbinu [114]. Najveća prednost termalnih sustava pohrane je velika gustoća energije. Osim toga, prednost im je i niska ukupna cijena, niska stopa samopražnjenja i ekološka prihvatljivost. Nedostatak im je kratak životni vijek. Najčešća primjena ovakvih sustava u mikromrežama je korištenje vode koja se tijekom noći smrzne, zatim se preko dana led koristi za hlađenje zraka u sustavima klimatizacije [115].



Slika 2.16 Fotografija niskotemperaturnog termalnog sustava pohrane energije

3. UPRAVLJAČKE STRUKTURE, STRATEGIJE I RASPOLAGANJE ENERGIJOM U MIKROMREŽAMA

Primjena mikromreža i njihova integracija u energetske sustav donosi brojne prednosti. Mogućnost rada neovisno od distribucijske mreže, povezivanje većeg broja distribuiranih izvora s ciljem ekonomičnog raspolaganja energijom iz obnovljivih izvora, primjena sustava pohrane te druge prednosti mikromreža sa sobom nose i brojne tehničke izazove. Jedan od većih tehničkih izazova zasigurno je izvedba upravljačkih sustava kojima bi se osigurao stabilan i ekonomičan rad mikromreže. Osnovni zadatci koje mora izvršavati upravljački sustav obuhvaćaju sljedeće:

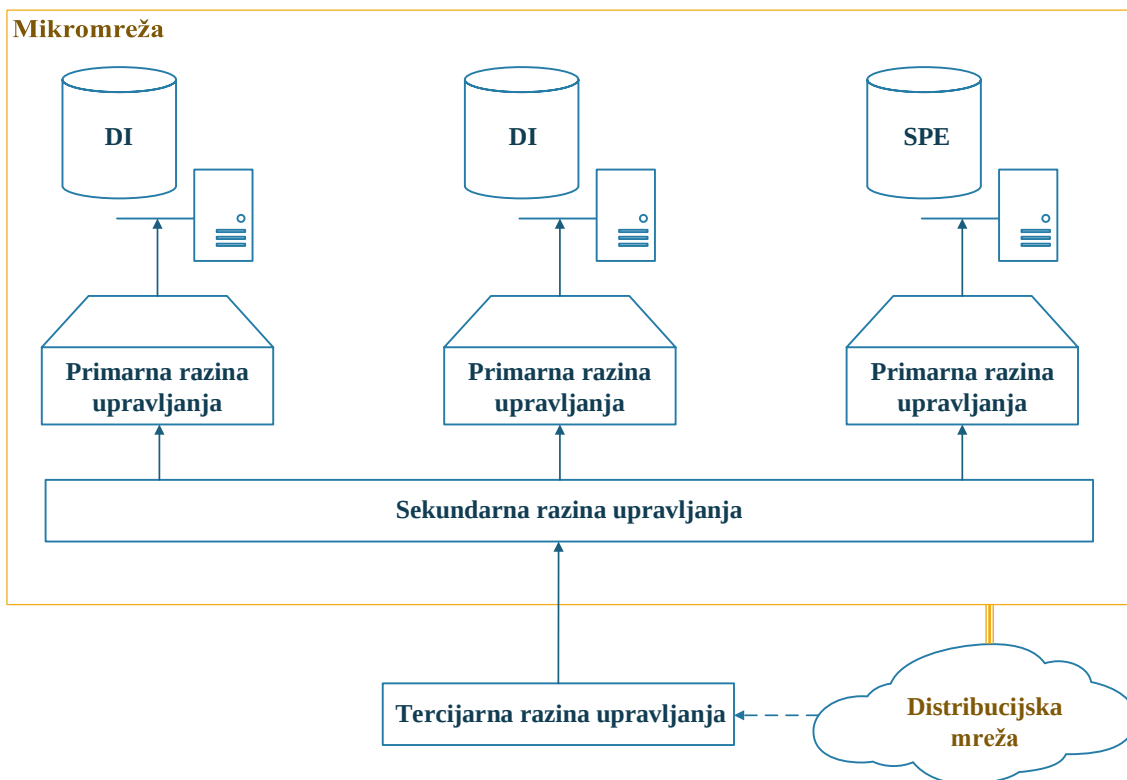
- Regulacija izlaznog napona ili struje distribuiranog izvora
- Uravnoteženje snage distribuiranih izvora kompenziranjem iznenadnih viškova ili manjkova
- Upravljanje potražnjom
- Ekonomično raspolaganje distribuiranim izvorima
- Prelazak između režima rada

Kao i topologije mikromreža, upravljačke strukture korištene u mikromrežama slične su onima korištenim u klasičnim energetskim mrežama. Također, mogu se značajno razlikovati među pojedinim mikromrežama, što uvelike ovisi o topologiji i vrsti mikromreže. Unatoč već više od 20 godina intenzivnog istraživanja mikromreža, još uvijek ne postoji konsenzus u znanstvenoj zajednici po pitanju točne definicije upravljačkih struktura. Ipak, kod većine mikromreža se može prepoznati hijerarhijska struktura upravljanja kao osnovna struktura raspodjele upravljačkih zadataka [116].

3.1. Upravljačke strukture

3.1.1. Hijerarhijska struktura

Hijerarhijska struktura upravljanja, prikazana na slici 3.1, prepoznaje se po nekoliko karakterističnih svojstava: vertikalni raspored upravljačkih podsustava, nadređenost podsustava više razine podsustavu niže razine te ovisnost kvalitete upravljanja podsustava niže razine o podsustavima više razine [117]. Dakle, primjenom hijerarhijske upravljačke strukture upravljački sustav je podijeljen u pravilu na tri glavne upravljačke razine: primarnu, sekundarnu i tercijarnu [116]. Nema usuglašenog pravila gdje se točno povlače granice između pojedinih upravljačkih razina. Obično se razine upravljanja određuju s obzirom na upravljačke funkcije, vremenski okvir upravljanja ili s obzirom na infrastrukturne/komunikacijske zahtjeve (npr., komunikacijska mreža). Osim navedene tri osnovne razine, u nekim mikromrežama javlja se dodatna najniža razina upravljanja, koja se naziva nulta razina upravljanja ili unutarnja upravljačka petlja [118]. Nulta razina upravljanja zadužena je za upravljanje pojedinim distribuiranim izvorima, a upravljački zadaci mogu se značajno razlikovati ovisno o vrsti mikromreže i režimu rada. Najčešće se 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 [119]. Na ovoj razini upravljanja izvode se MPPT algoritmi distribuiranih izvora kao što su PV paneli ili vjetroagregati.



Slika 3.1 Shematski prikaz hijerarhijske strukture upravljanja

Primarna razina upravljanja je najniža razina upravljanja u sustavima u kojima nulta razina nije izdvojena kao zasebna razina upravljanja i izvodi se na lokalnim kontrolerima mikromreže. Ima manje vrijeme odziva upravljačkih veličina u odnosu na sekundarnu i tercijarnu razinu i upravljanje se najčešće zasniva na lokalnim mjerenjima. Osnovni zadaci primarne razine su [120]:

- Održavanje amplitude i frekvencije napona na zadanim vrijednostima
- Raspodjela radne i jalove snage među distribuiranim izvorima u paralelnom radu
- Osiguravanje jednostavnog priključka dodatnih distribuiranih izvora (tzv. *plug and play* sposobnost)

Za vrijeme prelaska između radnih režima (s otočnog u mrežni režim rada ili obratno), primarna razina upravljanja mora osigurati stabilnost napona i frekvencije [121] jer u suprotnom može doći do nestabilnosti u cijeloj mikromreži. Stabilnost u takvim situacijama osigurava se, između ostalog, prilagodbom proizvodnje potrošnji. Ovu razinu upravljanja čine strujne i naponske regulacijske petlje distribuiranih izvora ili energetske pretvarača kojima su izvori povezani na mikromrežu. Kada su distribuirani izvori povezani preko energetske pretvarača s utisnutim naponom (VSC, od *engl.* voltage source converter), može ih se koristiti kao strujno upravljane ili naponski upravljane pretvarače.

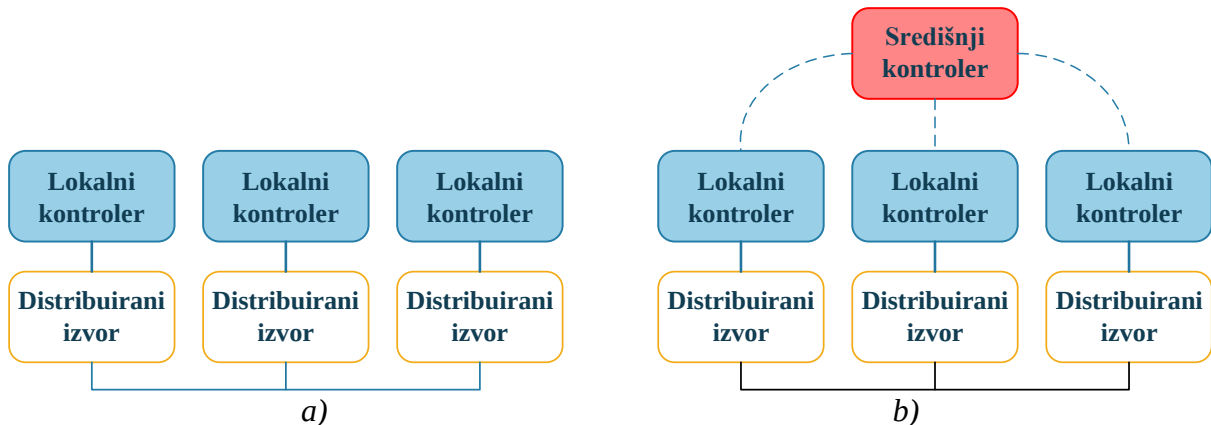
Za upravljanje mikromrežom na primarnoj razini koriste se različite metode upravljanja, a, kao i na višim razinama, vrsta primijenjene metode ovisi o komunikacijskoj povezanosti upravljačkih jedinica. S obzirom na komunikacijsku povezanost, upravljačka struktura može biti centralizirana ili decentralizirana. Centralizirana struktura upravljanja zahtijeva sveobuhvatnu komunikacijsku mrežu budući da se u tom slučaju svi lokalni kontroleri (primarna razina upravljanja), kao i oni više hijerarhijske razine, povezuju na središnji kontroler. Sva mjerenja koja se provode na lokalnoj razini šalju se u središnji kontroler, koji na

osnovu mjerenja i prognoza proizvodnje zadaje referentne veličine za upravljački sustav. Kao tipične metode upravljanja na primarnoj razini s centraliziranom upravljačkom strukturom mogu se navesti *central limit* metoda te *master-slave* metoda [122, 123]. Kod *central limit* upravljanja središnji regulatori struje i napona zadaju reference za lokalne jedinice. Referenca struje u tom slučaju ovisi o potrošačima i broju lokalnih jedinica. Regulaciju napona kod *master-slave* metode izvodi vodeći kontroler (*master*), te zadaje referencu struje za druge jedinice koje ga slijede (*slave* jedinice). Decentralizirana upravljačka struktura podrazumijeva minimalnu ili čak nikakvu komunikaciju između jedinica koje djeluju samostalno. Najčešće se kod takve upravljačke strukture na primarnoj razini koriste različite *droop* metode upravljanja [124, 125]. Implementacija osnovne *droop* metode je jednostavna i ne zahtijeva komunikacijsku vezu među jedinicama a princip upravljanja je zasnovan na balansiranju snage sinkronih generatora 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. S druge strane, energetske pretvarači koji se najčešće nalaze na spoju distribuiranog izvora s mikromrežom, na izlazu generiraju napon fiksne frekvencije i amplitude što u slučaju male neravnoteže u proizvodnji i potrošnji dovodi do nestabilnosti sustava. Radi toga se uvodi *droop* metoda kojom se simulira odziv distribuiranog izvora sličan onome kod sinkronog generatora, a da bi se to postiglo, odnos radne snage i frekvencije te jalove snage i amplitude napona je definiran sljedećim izrazima [126]:

$$\omega_0 = \omega^* - K_P(P_0 - P^*) \quad (2.1)$$

$$U_0 = U^* - K_Q(Q_0 - Q^*) \quad (2.2)$$

gdje su ω_0 i U_0 frekvencija i amplituda izlaznog napona, ω^* i U^* njihove reference, P i Q radna i jalova snaga, P^* i Q^* reference radne i jalove snage te K_P i K_Q pripadajući koeficijenti nagiba *droop* funkcije. Ovo vrijedi za osnovnu, proporcionalnu *droop* metodu, međutim razvijen je značajan broj naprednih ili modificiranih metoda kako bi se otklonili nedostaci osnovne *droop* metode poput loših performansi ili nestabilnost prilikom prijelaznih pojava, nemogućnosti crnog starta, nemogućnosti postavljanja fiksne frekvencije sustava neovisno o opterećenju i sl. [127].



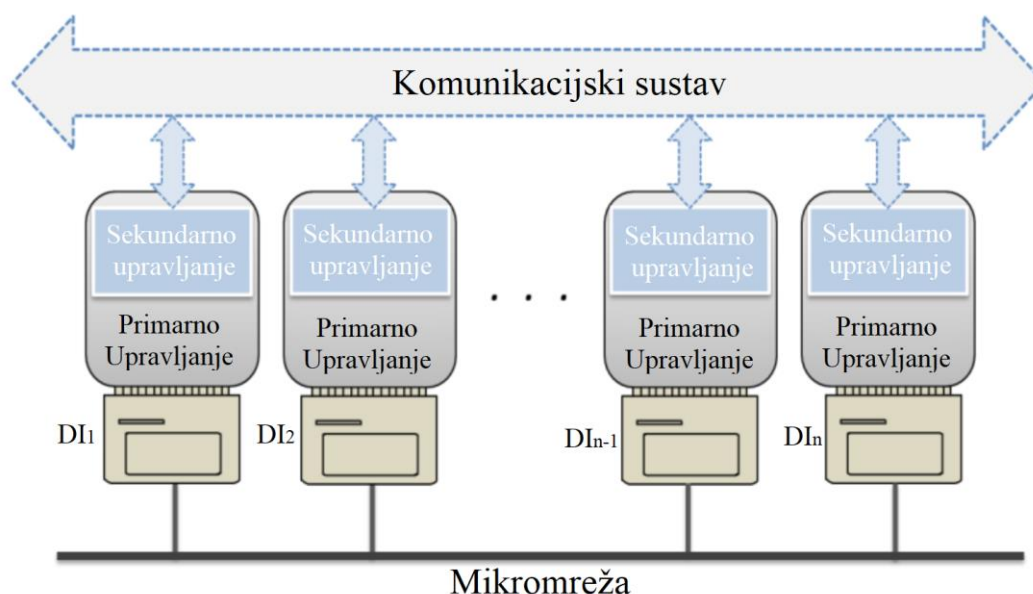
Slika 3.2 Shematski prikaz decentraliziranog (a) i centraliziranog (b) upravljanja

Sekundarna razina upravljanja radi s većim vremenskim korakom u odnosu na primarnu razinu te manjim u odnosu na tercijarnu razinu upravljanja. Odstupanja napona i frekvencije od

zadanih vrijednosti u stacionarnom stanju, koja su rezultat djelovanja primarne razine, kompenziraju se na sekundarnoj razini. Osim toga, sekundarna razina zadužena je za upravljanje sustavima za pohranu energije u mikromreži te djeluje u sklopu strategije za raspolaganje energijom (EMS, od *engl.* energy management strategy), koja podrazumijeva i optimalan rad sustava s ekonomskog aspekta. Iako se zadaci sekundarne razine u literaturi ne podudaraju u potpunosti pa se u nekim od preglednih radova [128, 129] optimalan ekonomski rad sustava svrstava pod tercijarnu razinu upravljanja, može se reći da taj zadatak pripada sekundarnoj razini upravljanja ukoliko se optimizacija odnosi na rad pojedinačne mikromreže [127], isključujući upravljanje s više međusobno povezanih mikromreža. Kako bi se postigao savršeni energetska sustav, prema Galvin Electricity inicijativi [130], EMS osim postizanja ekonomskih ciljeva mora osigurati stabilan, pouzdan i siguran rad sustava kad god je to moguće. Time se podrazumijeva rad sustava prilikom značajnih poremećaja sustava, poput isključenja s glavne mreže, te normalan rad u spoju s mrežom. Ekonomska optimizacija izvodi se s malo većim vremenskim korakom u odnosu na regulatore frekvencije i amplitude napona, kojima se prosljeđuju izlazne referentne veličine.

U konvencionalnim mikromrežama, sekundarnu razinu upravljanja najčešće čini središnji kontroler koji ima funkciju EMS-a, a čime je upravljanje mikromrežom centralizirano. Za izvođenje regulacije kod centraliziranog upravljanja uglavnom se koriste proporcionalno-integralni (PI) regulatori [131], kojima se kompenzira isključivo proporcionalno djelovanje regulatora na primarnoj razini (*droop* metode). 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 vektora napona u mikromreži. Ovakav pristup upravljanja je prikladan u malim i izoliranim mikromrežama [132] te je praktičan za primjenu online optimizacijskih algoritama budući da se svi podaci prikupljaju na jednom mjestu. Najveći nedostatak je opsežnost izmjena u sustavu koje su potrebne ako se želi povezati više distribuiranih izvora.

Kada je riječ o decentraliziranom upravljanju na sekundarnoj razini, u literaturi se ono često poistovjećuje s distribuiranim upravljanjem [127]. Mogu se pronaći decentralizirana rješenja za kompenzaciju odstupanja amplitude i frekvencije napona od zadanih vrijednosti [133, 134] na sekundarnoj razini, no za potrebe crnog starta kao i ekonomske optimizacije mikromreže i dalje je potrebna neka vrsta središnjeg kontrolera. Kako bi se izbjegao središnji kontroler, u radu [135] je sekundarna razina upravljanja postavljena između komunikacijskog sustava i primarne razine upravljanja. Takav način izvedbe sekundarne razine upravljanja, gdje svaki distribuirani izvor ima pripadajuću kontroler sekundarne razine, naziva se distribuiranim upravljanjem. Struktura distribuiranog upravljanja predložena u [135], prikazana je na slici 3.3. Za razliku od upravljanja sa središnjim kontrolerom, u slučaju greške na jednom od danih kontrolera ne dolazi do prestanka rada cijeloga sustava. Distribuiranim upravljanjem se razmjenjuje manje informacija između pojedinih kontrolera nego što je to slučaj u centraliziranom upravljanju, čime se umanjuju zahtjevi na komunikacijski sustav. Detaljnijom analizom distribuiranog sustava upravljanja se može uočiti da je multi-agent sustav (MAS), koji je detaljnije opisan u sljedećem potpoglavlju, moguće poistovjetiti s distribuiranim upravljanjem budući da je riječ o istoj paradigmi upravljanja [136].



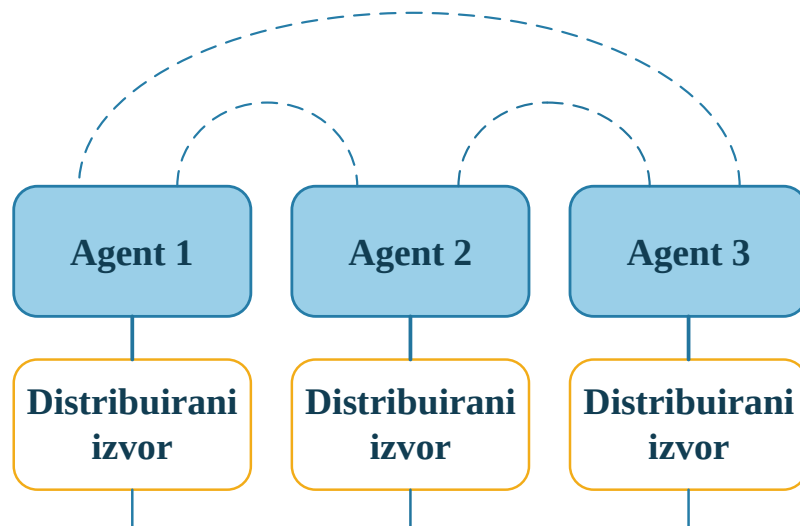
Slika 3.3 Shematski prikaz decentralizirane strategije upravljanja [135]

Najviša razina upravljanja mikromrežom s najvećim vremenskim korakom je tercijarna razina. Tercijarnom razinom upravljanja definira se interakcija mikromreže s drugim mikromrežama ili distribucijskom mrežom na koju je lokalna mikromreža povezana [127]. Povezivanjem mikromreža u *multi-microgrid* sustave postiže se veća sigurnost i stabilnost napajanja u svim povezanim mikromrežama [137]. U tom se slučaju upravljanje tokovima snaga među pojedinim mikromrežama izvodi na tercijarnoj razini. Interakcija mikromreže, kao i *multi-microgrid* sustava, s distribucijskom mrežom također se definira tercijarnom razinom upravljanja [129]. Ciljeve regulacije sekundarne razine upravljanja, poput toka snage u točki spoja s mrežom, zadaje tercijarna razina. Kako bi se realiziralo optimalno raspolaganje energijom na razini distribucijske mreže, na tercijarnoj razini se u obzir moraju uzeti utjecaji iz okoline poput vremenske prognoze i cijene električne energije. Također, mora se uzeti u obzir i elemente mikromreže poput sustava pohrane i distribuiranih izvora, koji izravno utječu na energetska kapacitet mikromreže. Još jedan način na koji tercijarna razina može utjecati na rad mikromreže je upravljanje potražnjom energije [138]. Uključivanjem i isključivanjem potrošača, tj., upravljanjem potrošnjom energije u mikromreži mogu se postići zadani ciljevi na tercijarnoj razini upravljanja. Kako se tercijarna razina upravljanja ne smatra isključivo dijelom upravljačkog sustava mikromreže, ne razmatra se u kontekstu centraliziranog ili decentraliziranog upravljanja mikromrežom.

3.1.2. Multi-agent sustav

Razvojem komunikacijskih tehnologija i novih teorija upravljanja, u posljednje vrijeme se sve više odstupa od korištenja klasične centralizirane strukture upravljanja energetskim sustavom i mikromrežama s distribuiranim izvorima. Primjena centraliziranog upravljanja zahtijeva prikupljanje mjerenih podataka svih distribuiranih izvora te njihovu obradu u središnjem kontroleru. S druge strane, decentraliziranim upravljanjem se teško postiže optimalan i stabilan rad mikromreže. Distribuiranjem upravljačkih zadataka na manje lokalne kontrolere povećava se pouzdanost sustava, smanjuje se količina informacija koja se razmjenjuje a zadržava sposobnost optimizacije sustava. Moguće je istaknuti sljedeće prednosti ovog načina upravljanja:

- **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 u mikromrežu, poput sustava pohrane ili distribuiranog izvora, bez značajnog utjecaja na rad drugih elemenata u sustavu.
- **Plug and play svojstvo:** omogućuje jednostavno priključenje novih distribuiranih izvora



Slika 3.4 Multi-agent sustav upravljanja

Istraživanjem distribuiranih sustava upravljanja razvijena je MAS teorija koja se u literaturi najčešće spominje u kontekstu distribuiranih izvora [127, 128], a predstavlja evoluciju klasičnog distribuiranog upravljanja. U MAS-u, agent je fizička ili programska (virtualna) jedinica koja reagira na promjene u svom okruženju [139]. Agenti međusobno komuniciraju, ali ne dijele zajednički cilj već svaki agent može djelovati samostalno. Komunikacija i djelovanje pojedinačnih agenata je definirano MAS teorijom. U MAS teoriji, inteligentni sustav, poput cjelokupne mikromreže, sačinjen je od skupa više-manje inteligentnih jedinica, poput lokalnih kontrolera [140]. Dakle, u slučaju mikromreža, fizički agent je kontroler koji upravlja distribuiranim izvorom ili sustavom pohrane energije. Virtualni agent može biti program kojim mikromreža sudjeluje na tržištu električne energije. 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 [140]. Prema tome, lokalni kontroler uključuje punjenje baterija bez vanjske naredbe.

U radu [141] 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 energetskim 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 točki zajedničkog spoja s mrežom (PCC, od *engl.* point of common coupling). Primjerice, nakon crnog starta agent prekidača postepeno povezuje pojedine potrošače, koji formiraju mikromrežu prema naredbama središnjeg kontrolera. U radu [142] je dan pregled radova s primijenjenim upravljačkim sustavom zasnovanim na MAS teoriji.

3.2. Raspolaganje energijom u mikromrežama

Zadatak upravljačkog sustava svake mikromreže je osiguravanje stabilnog i sigurnog napajanja. Kao što je već spomenuto, najčešće anomalije koje se javljaju u radu mikromreže su devijacije u frekvenciji i amplitudi napona, gubitak sinkronizacije među generatorima te propadi u naponu [143]. Upravljačke strategije se razvijaju kako bi se koordiniranim upravljanjem predvidio i spriječio nastanak anomalija koje ugrožavaju rad mikromreže i umanjuju kvalitetu napajanja krajnjih potrošača. U literaturi se pod pojmom upravljačka strategija može pronaći mnoštvo radova koji razmatraju različite aspekte upravljanja u mikromrežama. Pri tome autori pod aspektima upravljanja podrazumijevaju sve od osnovnih metoda regulacije napona na najnižoj hijerarhijskoj razini, do naprednih algoritama za raspolaganje energijom zasnovanih na neuronskim mrežama. Radi jasnoće, upravljačke zadatke je moguće podijeliti u dvije skupine: prva skupina su takozvane upravljačke strategije a druga skupina je EMS. Ciljevi upravljačkih strategija su orijentirani prema parametrima mreže dok su ciljevi EMS-a orijentirani prema tehničkim i ekonomskim optimizacijama rada.

Kako se mikromreže napajaju iz distribuiranih izvora, koji su vrlo često OIE, upravljačke strategije moraju osigurati stabilnost u frekvenciji i amplitudi napona usprkos stohastičkoj prirodi takvih izvora. Također, upravljačke strategije koordiniraju rad u slučaju više distribuiranih izvora povezanih na mikromrežu. Topologija mikromreže uvelike određuje karakteristike korištene upravljačke strategije. Tako je, primjerice, u istosmjernim mikromrežama potrebno samo regulirati napon sabirnice mikromreže kako bi se osigurao stabilan otočni rad [144]. Taj zadatak može izvoditi pripadajući kontroler jednog od distribuiranih izvora, dok su ostali zaduženi za regulaciju izlazne struje, tj., snage. U slučaju izmjenične mikromreže potrebno je regulirati frekvenciju i amplitudu napona te radnu i jalovu snagu distribuiranih izvora [145]. U spoju s distribucijskom mrežom, frekvenciju i amplitudu napona nije potrebno regulirati budući da su zadane mrežom. Zadaci upravljačke strategije izvode se na nižim razinama upravljanja upotrebom *droop* metoda, PI regulatora te sličnih tehnika 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 [146], dok su u radu [144] opisane upravljačke strategije za isključivo istosmjerne mikromreže.

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 i uz osiguravanje stabilnog napajanja krajnjih potrošača. Raspolaganje energijom ili usmjeravanje tokova snage svodi se na dvije osnovne metode. Prva metoda je upravljanje resursima (*engl.* resource scheduling), odnosno distribuiranim izvorima i sustavima za pohranu energije [147]. Upravljanje distribuiranim izvorima može se izvoditi ukoliko 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. Upravljanje potražnjom može se izvoditi na više načina i to:

- Vremenskim pomicanjem opterećenja

- Rezanjem potrošnje
- Korekcijom snage potrošača

Vremensko pomicanje opterećenja odnosi se na pomicanje potrošnje sa sati vršnog opterećenja na sate manjeg opterećenja. Na taj se način smanjuje vršna snaga kako bi se izbjeglo preopterećenje. U radu [148] autori su predložili EMS s vremenskim pomicanjem opterećenja, gdje je pokazano da primjena pomicanja opterećenja smanjuje troškove koji proizlaze iz razlike u proizvodnji i potrošnji (*engl.* mismatch cost), ne zanemarujući 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. Takav sustav je prikazan u radu [147], gdje su autori potrošače podijelili na kritične i nekritične. 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 [149]. 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. Dva osnovna principa rada EMS algoritama su *rule-based* (pristup temeljen na utvrđenim pravilima) i *optimization-based* (pristup temeljen na optimizaciji) princip. Kod *rule-based* principa rada, algoritam prati skup prethodno postavljenih pravila. Takav tip algoritama je korišten u radovima [150-152]. U radu [150] autori koriste EMS s *rule-based* algoritmom za upravljanje mikromrežom napajanom iz PV panela s baterijskim SPE-om. Predloženi algoritam upravlja punjenjem ili pražnjenjem baterija na način da podešava ukupnu snagu potrošača mikromreže s ciljem ekonomske optimizacije. U [151] predloženo je upravljanje s tri međusobno povezane mikromreže napajane iz PV panela i vjetroturbina uz primjenu MAS-a. Predloženi EMS upravlja energetskim 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. U radu [152] je također korišten algoritam s *rule-based* principom gdje autori kombiniraju kontroler više razine zasnovan na prediktivnom modelu s *rule-based* algoritmom na nižoj razini. U takvoj konfiguraciji prediktivni algoritam kompenzira eventualne pogreške u prognozi proizvodnje iz obnovljivih izvora s korakom od 10 minuta, dok u međuvremenu upravljanje preuzima *rule-based* algoritam niže razine. Drugi princip, poznat kao *optimization-based* princip, je napredniji u odnosu na prethodni a 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 pri tome 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 (*engl.* ant colony optimization), koja spada u kategoriju heurističkih algoritama, korištena je za optimizaciju rada rezidencijalne mikromreže u [153]. 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 roja čestica (*engl.* particle swarm optimization), prikazana u radu [154]. 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. Linearnim programiranjem postignuta je optimizacija rada mikromreže prikazane u radu [155]. U spomenutom radu riječ je mikromreži napajanoj iz solarnog kogeneracijskog sustava kojim se proizvodi električna i toplinska energija uz potporu SPE-a. Ciljevi postavljene višestruke ciljne funkcije su smanjenje cijene proizvodnje i napajanja iz izvora mikromreže te maksimizacija korištenja raspoložive energije iz obnovljivih izvora. Na sličan način je postignuta i optimizacija mikromreže s kombiniranim sustavom hlađenja, grijanja i proizvodnje električne energije, čija je primjena u rezidencijalnim i komercijalnim objektima, poput supermarketa, obećavajuća [156]. Optimizacija je postignuta minimizacijom ciljne funkcije koja u obzir uzima sljedeće cijene: cijenu razmjene energije s mrežom, cijenu starenja baterija, cijenu prirodnog plina te cijenu rada i održavanja sustava.

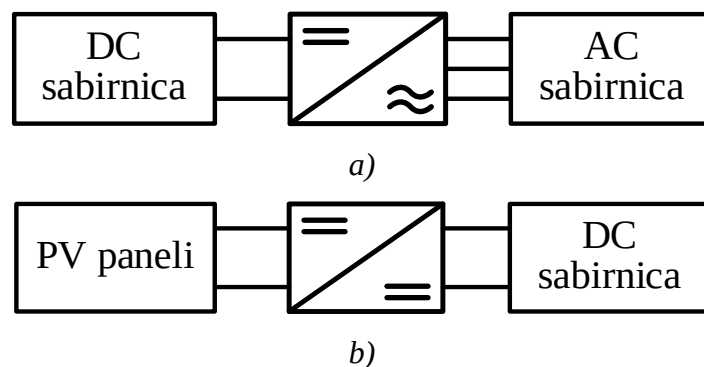
4. ENERGETSKI PRETVARAČI U MIKROMREŽAMA

Razvoj obnovljivih izvora energije, a samim time i mikromreža, ne bi bio moguć bez razvoja energetskih pretvarača. Korištenjem energetskih pretvarača omogućeno je povezivanje različitih distribuiranih izvora, posebice obnovljivih izvora energije, na distribucijsku mrežu ili mikromrežu. Većina obnovljivih izvora na svom izlazu generira električni napon koji svojim svojstvima ne odgovara naponu mreže na koju se povezuje te ih bez primjene energetskih pretvarača nije moguće povezati izravno na mrežu. Iako se neki OIE mogu povezati izravno na AC ili DC sabirnicu mikromreže, poput malih hidroelektrana, korištenjem energetskog pretvarača omogućeno je dodatno upravljanje takvim izvorom. Tako je primjenom energetskih pretvarača omogućeno izvođenje MPPT algoritama za OIE te poboljšanje dinamičkih i statičkih svojstava obnovljivih izvora. Osim za povezivanje distribuiranih izvora, energetski pretvarači se vrlo često koriste i za povezivanje SPE-a. Povezivanjem SPE-a preko energetskih pretvarača omogućuje se upravljanje SOC-om neovisno o bilanci snage u mikromreži. Primjena energetskih pretvarača u mikromrežama ne zadržava se samo na izvorima i SPE-u. Povezivanje mikromreže s glavnom mrežom izvodi se najčešće također preko energetskog pretvarača, odnosno IFC-a. Vrsta pretvarača koji se koristi u funkciji IFC-a ovisi o vrsti i topologiji mikromreže, a njegovi zadaci ovise kako o samoj mikromreži tako i mreži na koju se povezuje (npr., riječ može biti o mreži niskog ili srednjeg napona). Mogući zadaci upravljanja koje treba provoditi IFC, između ostalih, mogu biti: regulacija struje distribucijske mreže, poboljšanje stabilnosti, balansiranje napona i snage među fazama, smanjivanje udjela harmonika, zaštita itd. [46]. Funkciju sličnu IFC-u ima ILC, koji je zadužen za međusobno povezivanje AC i DC sabirnica u hibridnoj mikromreži [157]. Topologije pretvarača koji se koriste za bilo koju od prethodno spomenutih funkcija ponajviše ovise o zadacima koje moraju izvršavati.

4.1. Podjela pretvarača prema topologiji

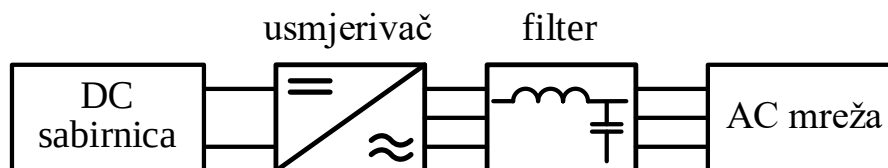
4.1.1. Pretvarači s jednim stupnjem pretvorbe

U skupinu pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe spadaju svi pretvarači koji, kako im samo ime kaže, imaju samo jedan stupanj pretvorbe napona ili struje (slika 4.1). Za taj je tip pretvarača karakteristično da se u danom trenutku može regulirati samo ulazna ili izlazna amplituda napona. U mikromreži se ovakva topologija može koristiti za različite funkcije, a jedna od mogućih primjena je povezivanje distribuiranih izvora, poput PV panela, na mikromrežu. Iako se može koristiti za povezivanje PV panela na AC i DC sabirnicu, češće se koristi u slučaju spoja na DC sabirnicu [158]. U tom slučaju se naponska razina PV panela ne mora podudarati s naponskom razinom sabirnice što ostavlja mogućnost implementacije MPPT algoritma, odnosno upravljanja izlaznom snagom panela. U slučaju korištenja pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe za spoj PV panela na AC sabirnicu, napon na istosmjernoj strani se može mijenjati samo u uskom rasponu, a iznos ovisi o tipu modulacije korištene za upravljanje izmjenjivačem. Ovakva topologija pretvarača često se koristi i za povezivanje samo jednog PV modula ili niza u PV sustavima gdje je potrebno izvoditi MPPT algoritam za dijelove PV polja pa se MPPT algoritam ne može izvoditi središnjim pretvaračem. Često su i pretvarači za povezivanje SPE-a također s jednim stupnjem pretvorbe. Mogućnosti upravljanja su slične kao u slučaju povezivanja distribuiranog izvora osim što je u slučaju SPE-a nužan dvosmjernan tok energije [159, 160].



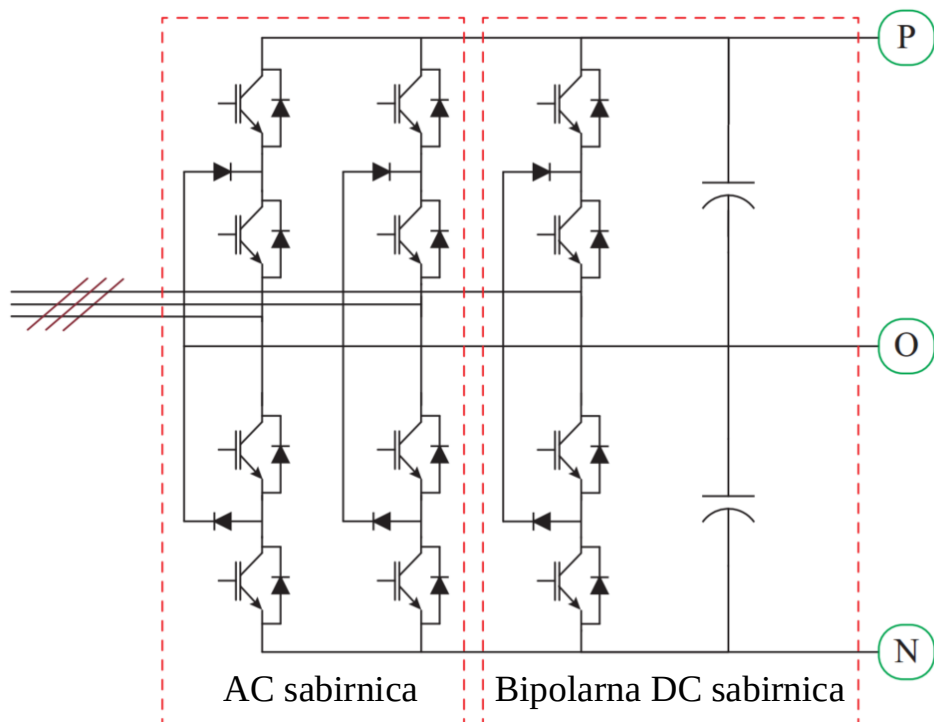
Slika 4.1 Blokova shema pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe: a) DC-AC i b) DC-DC

Osim u funkciji ILC-a (slika 4.1a), primjena DC-AC pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe u funkciji IFC-a je isto tako moguća ako je riječ o istosmjernoj mikromreži gdje IFC povezuje DC sabirnicu s distribucijskom mrežom. Od ovih pretvarača za tu ulogu se najčešće koristi pulsno-širinski modulirani (PWM, od *engl.* pulse-width modulation) dvosmjerni VSC prikazan na slici 4.2 [46]. Takav pretvarač može raditi u režimu regulacije napona ili u režimu regulacije struje. Češće se koristi u režimu regulacije struje jer je tada moguće korištenje *droop* metode upravljanja radnom i jalovom snagom. Kako bi se smanjio udio harmonika u izlaznoj struji i naponu, najčešće se na izlazu postavlja pasivni filter.



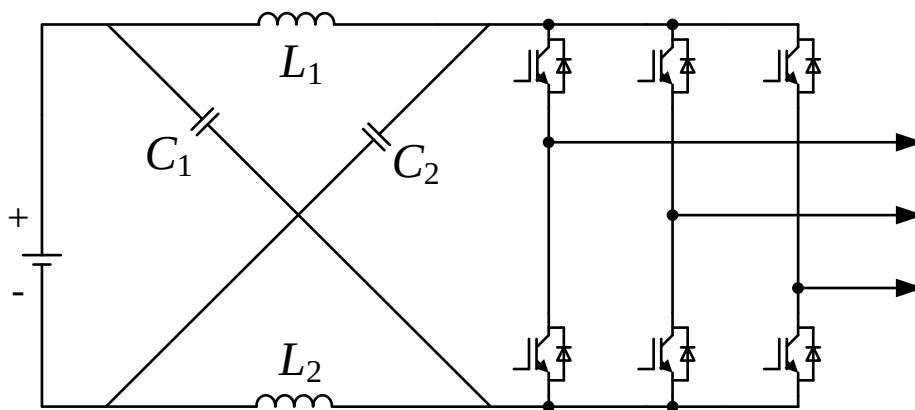
Slika 4.2 VSC s jednim stupnjem pretvorbe

Pored ovakve osnovne strukture pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe, moguće su 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, a koji je prikazan na slici 4.3 [161]. Isti tip pretvarača se može koristiti i u funkciji IFC-a kod bipolarnih istosmjernih mikromreža.

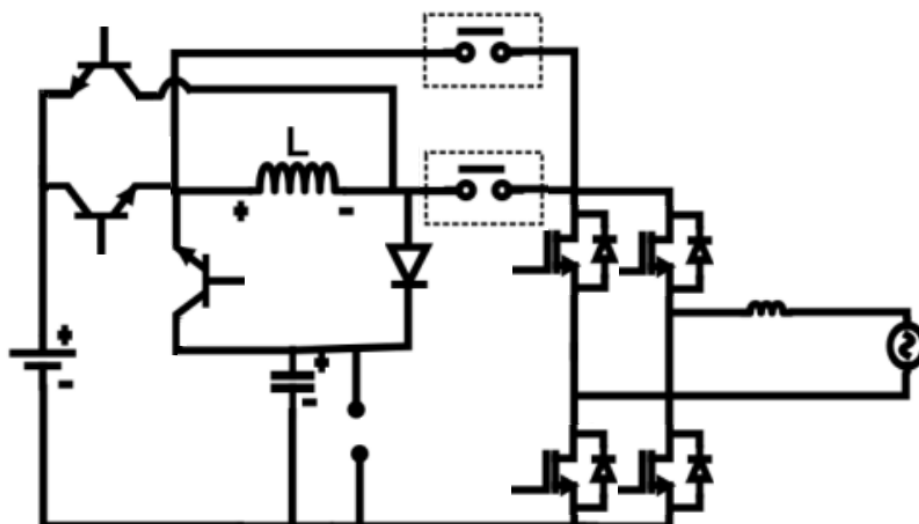


Slika 4.3 Višerazinski pretvarač s jednim stupnjem pretvorbe [161]

U skupinu složenijih pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe spadaju i izmjenjivači Z-tipa (slika 4.4), odnosno kvazi Z-tipa, kakav je, primjerice, korišten u mikromreži u radu [101]. U odnosu na klasični pretvarač s utisnutim naponom koji je prethodno spomenut, izmjenjivač kvazi Z-tipa na ulazu ima impedancijski krug kojim se postiže dodatno povećanje napona bez dodatnih upravljivih poluvodičkih sklopki. Treba spomenuti i dvosmjerni SBC (od *engl.* switched boost converter) pretvarač predložen u radu [162] (slika 4.5), koji u odnosu na izmjenjivač Z-tipa zahtijeva manji broj pasivnih komponenti i osigurava veću stabilnost, ali i zahtijeva veći broj poluvodičkih sklopki.



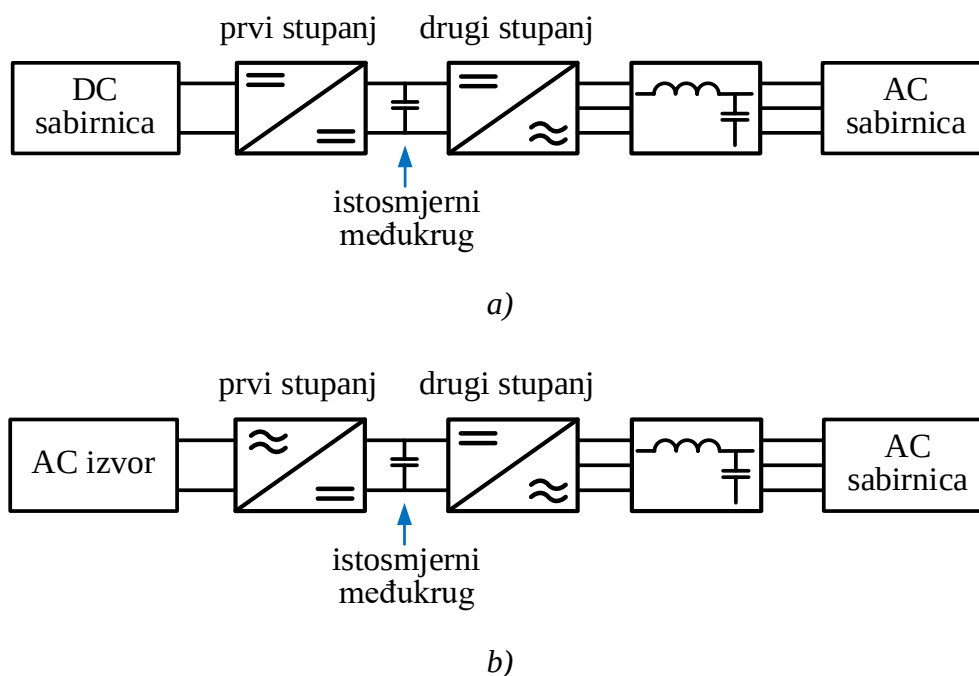
Slika 4.4 Topologija izmjenjivača Z-tipa



Slika 4.5 Topologija dvosmjernog SVB pretvarača [162]

4.1.2. Pretvarači s dva stupnja pretvorbe

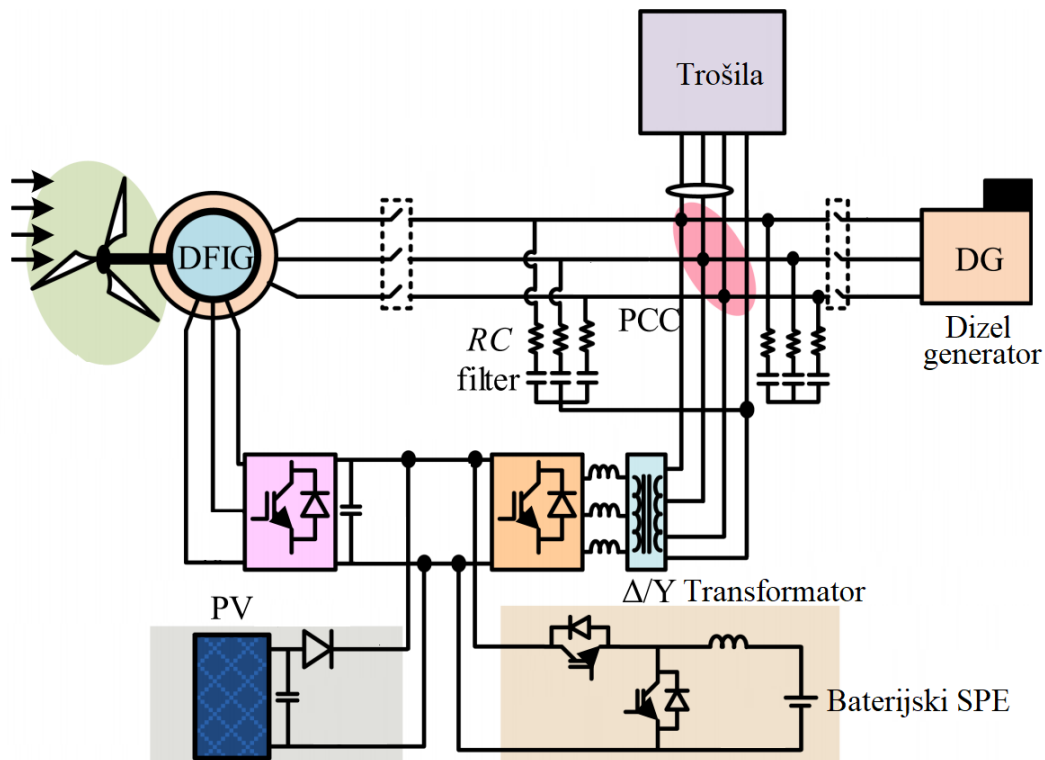
Kako bi se nadomjestila ograničenja pretvarača s jednim stupnjem pretvorbe, poput ograničenih mogućnosti upravljanja, kaskadnim ili paralelnim spojem dvaju pretvarača različitog tipa moguće je ostvariti dodatni stupanj pretvorbe. Na slici 4.6 prikazane su ogledne topologije takvog pretvarača. Mogućnost primjene pretvarača s dva stupnja pretvorbe u mikromrežama je široka, ponajviše zbog većeg stupnja slobode upravljanja u odnosu na prethodno opisanu topologiju pretvarača. Isto tako, otvara se mogućnost povezivanja drugih elemenata mikromreže, poput SPE-a, na dodatno energetske sučelje (tj., istosmjerni međukrug) koje se dobiva ovom topologijom.



Slika 4.6 Blokova shema pretvarača s dva stupnja pretvorbe: a) DC-DC-AC i b) AC-DC-AC

Ovakva topologija pretvarača se često koristi za povezivanje distribuiranih izvora, a posebice manjih vjetroenergetskih sustava (WECS, od *engl.* wind energy conversion system),

gdje je radi optimizacije rada turbine i generatora nužno imati mogućnost nezavisnog upravljanja WECS-om [72]. 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. Slična topologija za povezivanje WECS-a je korištena i u radu [70], gdje je istosmjerni međukrug pretvarača iskorišten za povezivanje baterijskog sustava i PV modula (slika 4.7). U tom slučaju se pretvarač na strani AC sabirnice mikromreže može koristiti za održavanje zadanih vrijednosti amplitude i frekvencije napona mikromreže ili za regulaciju napona istosmjernog međukruga u funkciji MPPT algoritma PV panela. Baterijski sustav je na istosmjerni međukrug povezan s dodatnim silazno-uzlaznim (*engl.* buck/boost) pretvaračem, čime je omogućeno upravljanje SOC-om baterija neovisno o stanju u istosmjernom međukrugu. Pretvarač na strani WECS-a povezan je na klizne kolutove DFIG-a te, uz primjenu vektorskog upravljanja, omogućuje postizanje maksimalne snage vjetroturbine. U radu [163] autori predlažu korištenje ovakve topologije pretvarača u funkciji ILC-a u hibridnoj mikromreži. U predloženoj konfiguraciji autori ostavljaju mogućnost izravnog povezivanja dvaju pretvarača samo s kondenzatorom u međukrugu ili korištenja međukruga za povezivanje baterijskog SPE-a. Nadalje, primjena topologije s dva stupnja pretvorbe u funkciji IFC-a prikazana je u radu [164]. U navedenom radu autori ovu topologiju pretvarača koriste za međusobno povezivanje izmjenične mikromreže s drugim nezavisnim izmjeničnim mikromrežama te s distribucijskom mrežom. Drugi stupanj pretvorbe se u literaturi često koristi kada je riječ o bipolarnim istosmjernim mikromrežama. Tako je u radu [161] korištena topologija s dva stupnja pretvorbe u funkciji IFC-a, gdje je drugi stupanj pretvorbe korišten za generiranje dvije naponske razine, kako bi se dobila druga razina istosmjernog napona u bipolarnoj mikromreži. U ovom slučaju, na strani mreže nalazi se klasični VSC povezan s pretvaračem za balansiranje napona.

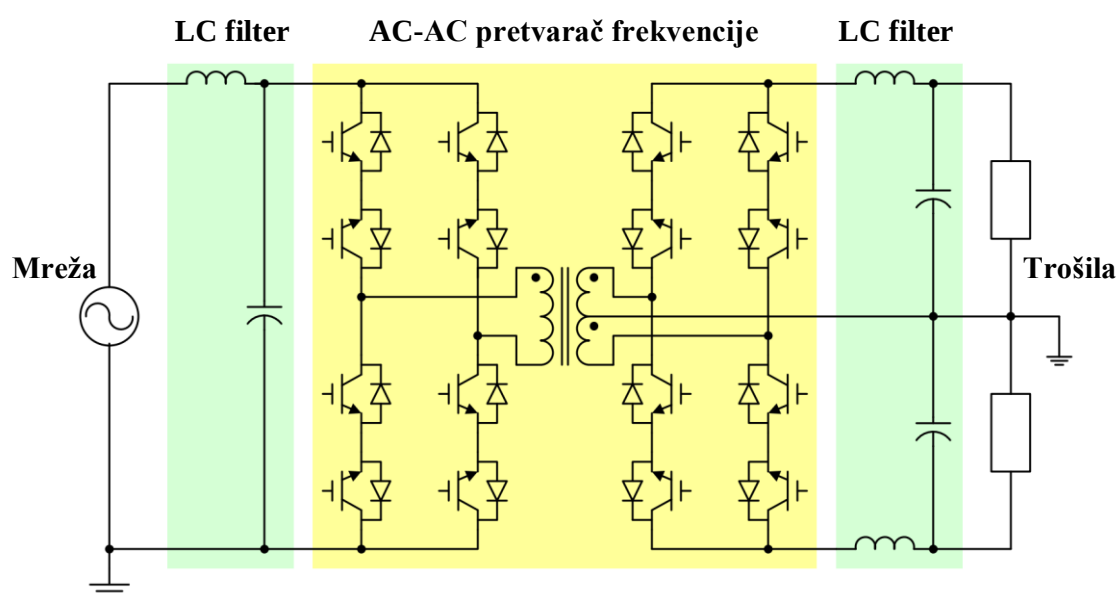


Slika 4.7 Spoj distribuiranih izvora i SPE-a na pretvarač s istosmjernim međukrugom [70]

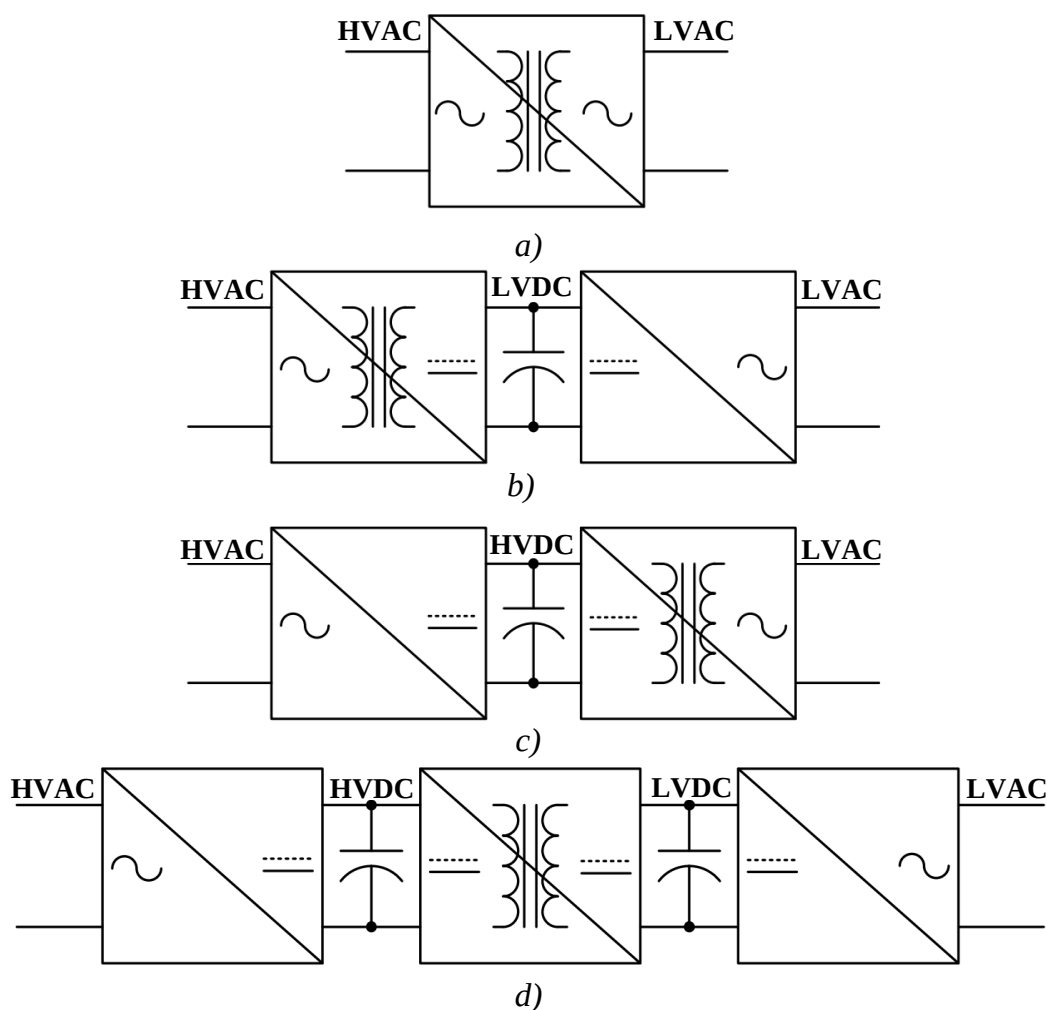
4.1.3. Poluvodički transformator

Uzevši u obzir različite prethodno opisane topologije mikromreža te različite oblike distribuiranih izvora i trošila koja se povezuju na mikromrežu, uočljivo je da primjena hibridnih mikromreža najviše odgovara raznovrsnosti izvora i trošila. Iako se primjenom hibridnih mikromreža dobilo na fleksibilnosti i korisnosti mikromreže, ponajviše smanjenjem broja pretvarača ili stupnjeva pretvorbe, učinkovita koordinacija DC i AC podsustava predstavlja iznimno zahtjevan zadatak, posebice u slučaju velikog broja distribuiranih izvora. Za tu svrhu bi idealan bio pretvarač koji bi omogućio istovremeno povezivanje više podsustava i jednostavno raspolaganje pripadajućim snagama.

U prošlom i tekućem desetljeću znanstvena zajednica aktivno radi na razvoju SST-a. Prema MIT-u (Massachusetts Institute of Technology), SST je 2011. godine smatran jednom od deset najznačajnijih nadolazećih tehnologija [30]. SST se može koristiti za povezivanje mikromreže na distribucijsku mrežu preko AC i DC energetske sučelja a u odnosu na klasični transformator SST se može koristiti, između ostalog, za: kompenzaciju jalove snage, regulaciju napona, regulaciju tokova snage, limitiranje struje kvara te galvansku izolaciju [165]. Princip rada SST-a zasnovan je na svojstvu transformatora prema kojem se povećanjem frekvencije može smanjiti volumen samog transformatora. Dakle SST pretvara napon niske frekvencije (50 Hz) u napon visoke frekvencije koristeći sklopove energetske elektronike. Nakon transformacije napona preko visokofrekvencijskog transformatora (VFT) na izlazu se ponovno generira napon niske frekvencije. Razvijeno je više topologija SST-a, ali bez obzira na topologiju, u svakom SST-u je ugrađen stupanj transformacije AC napona s galvanskim odvajanjem, sačinjen od poluvodičkog pretvarača i VFT-a, kao što je prikazano na slici 4.8. Osim topologije s jednim stupnjem pretvorbe, SST se može izvesti sa dva ili tri stupnja pretvorbe [166]. U slučaju SST-a s dva stupnja pretvorbe, visokonaponsko (HVAC, od *engl.* high voltage AC) ili niskonaponsko AC (LVAC, od *engl.* low voltage AC) AC sučelje VFT-a, izmjenom topologije postaje DC sučelje, te se povezuje s dodatnim usmjerivačem (AC-DC). Na taj se način dobiva istosmjerni međukrug koji može biti na strani visokog napona (HVDC, od *engl.* high voltage DC) ili niskog napona (LVDC, od *engl.* low voltage DC), ovisno s koje strane VFT-a se dodaje usmjerivač. Topologija s tri stupnja pretvorbe dobiva se povezivanjem usmjerivača (AC-DC) s obje strane VFT-a čija su sučelja istosmjerna. Na slici 4.9 su prikazane opisane topologije.



Slika 4.8 SST s jednim stupnjem pretvorbe [166]



Slika 4.9 Topologije SST-a s: (a) jednim stupnjem pretvorbe, (b) dva stupnja pretvorbe i LVDC međukrugom, (c) dva stupnja pretvorbe i HVDC međukrugom te (d) tri stupnja pretvorbe [166]

Dodavanjem drugog stupnja pretvorbe, primjerice u slučaju topologije s LVDC međukrugom, SST postaje usmjerivač tokova snage s tri sučelja: HVAC, LVDC i LVAC. Takva topologija idealna je za funkciju IFC-a u mikromreži kakva je prikazana u radu [30]. U priloženom radu mikromreža se povezuje izravno na distribucijsku mrežu srednjeg napona, čime je izbjegnuta transformator na razini distribucijske mreže, a samim time su smanjeni i gubici. Isto tako, kvarovi u distribucijskoj mreži se ne prenose u mikromrežu kao ni obratno. Na niskonaponska sučelja SST-a su povezane AC i DC sabirnice mikromreže te se na razini SST-a izvodi algoritam raspolaganja energijom unutar mikromreže i razmjena energije s distribucijskom mrežom. Topologija s dva stupnja pretvorbe korištena je u [167] za realizaciju hibridne mikromreže, koju čini skupina nanomreža. Svaka nanomreža je pritom sačinjena od više pojedinačnih zgrada, a međusobno su povezane u mikromrežu preko SST-a. Na zasebno sučelje SST-a povezan je središnji baterijski SPE, a cjelokupnom mikromrežom se upravlja koristeći hijerarhijsku strukturu. Konfiguracija SST-a s tri stupnja pretvorbe korištena je u radu [168] za povezivanje hibridne mikromreže s dvije istosmjerne sabirnice naponskih razina 48 V i 415 V, te izmjeničnom sabirnicom s naponom od 380V. Mikromreža je preko SST-a povezana na distribucijsku mrežu srednjeg napona. Korištenjem SST spriječena je pojava kružnih struja među podsustavima mikromreže.

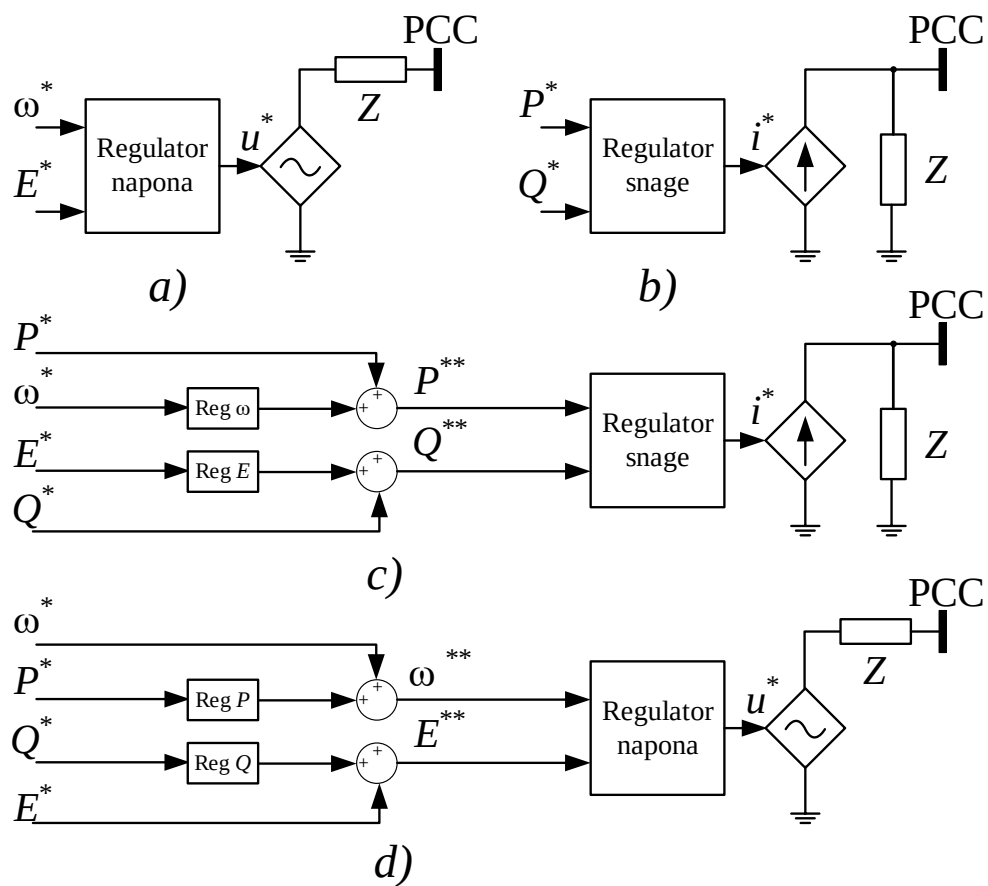
4.2. Upravljački ciljevi pretvarača u mikromrežama

S obzirom na ciljeve upravljanja, pretvarači u mikromrežama se mogu podijeliti na pretvarače za uspostavljanje mreže (*engl.* grid-forming), koji imaju aktivan utjecaj na parametre mreže, zatim pretvarače za podržavanje mreže (*engl.* grid-supporting), koji svojim radom potpomažu održavanju zadanih parametara mreže, te pretvarače za napajanje mreže (*engl.* grid-feeding), koji djeluju kao izvori snage u već postojećoj mreži [169]. Na slici 4.10 prikazani su pojednostavljeni modeli upravljanja svakim pojedinim tipom pretvarača u mikromreži.

Upravljanje pretvaračima za uspostavljanje mreže izvodi se u zatvorenoj petlji s ciljem održavanja zadanih vrijednosti frekvencije i amplitude napona mikromreže. Pretvarač upravljan na ovaj način se može u mreži promatrati kao idealni naponski izvor s malom izlaznom impedancijom. U mikromreži koja radi u otočnom režimu rada potrebno je da barem jedan od pretvarača radi u funkciji pretvarača za uspostavljanje mreže [169], dok ostali pretvarači prate zadanu sinkronu referencu. Ako je riječ o istosmjernoj mikromreži, pretvarač za uspostavljanje mreže regulira samo amplitudu napona mreže. Ovi se pretvarači najčešće koriste u mikromrežama s centraliziranim upravljanjem.

Pretvarači za podržavanje mreže potpomažu održavanju zadanih vrijednosti frekvencije i amplitude mreže. Naime, za održavanje frekvencije i amplitude napona izmjenične sabirnice unutar željenih granica u otočnom načinu rada, u nekim je slučajevima potrebno angažirati dodatne izvore (npr. dizelski generator ili baterije), koji se onda povezuju putem pretvarača za podržavanje mreže. U radu s priključkom na glavnu mrežu, ovi pretvarači se ili ne koriste ili se dodaju sustavu radi poboljšanja kvalitete električne energije. Potreba za ovako upravljanim pretvaračima javlja se u mrežama gdje nema dovoljno velike rezerve u kapacitetu izvora kojim se napaja pretvarač za uspostavljanje mreže te su potrebni dodatni izvori kako bi se osigurala stabilnost mreže. U toj su ulozi najčešće pretvarači preko kojih su distribuirani izvori ili SPE povezani na mikromrežu, ili IFC koji u spoju na distribucijsku mrežu može poprimiti ulogu pretvarača za podržavanje mreže. Primjena ovih pretvarača je česta kod decentraliziranog ili distribuiranog upravljanja, gdje svi distribuirani izvori sudjeluju u podržavanju mikromreže i potrebna je minimalna ili nikakva komunikacija među pretvaračima. Ovim pretvaračima se može upravljati kao strujnim izvorom ili kao naponskim izvorom. U oba slučaja se može koristiti *droop* metoda kojom se na temelju mjerenih vrijednosti frekvencije i amplitude napona određuje referenca struje/napona koja se zadaje pretvaraču. U slučaju primjene naponski upravljanog pretvarača za podržavanje mreže potrebno je obratiti pozornost na malu izlaznu impedanciju pretvarača zbog čega je pretvarač osjetljiviji na smetnje u mreži. Zbog toga u nekim slučajevima može biti nužno koristiti virtualnu impedanciju na izlazu pretvarača [170].

Pretvarači za napajanje mreže (u literaturi se može pronaći i naziv *grid-following* [157]) su strujno upravljani pretvarači velike izlazne paralelne impedancije, koji u mrežu šalju zadanu vrijednost snage. Ovakvi pretvarači ne mogu raditi samostalno u otočnoj mikromreži bez pretvarača za uspostavljanje ili podržavanje mreže. Postoji mogućnost da pretvarači za napajanje mreže sudjeluju u regulaciji amplitude ili frekvencije napona mikromreže na način da im se s više hijerarhijske razine upravljanja zadaju reference radne i jalove snage koje moraju slijediti, ali sami nemaju mogućnost regulacije parametara mikromreže [171]. Najveći broj distribuiranih izvora se povezuje na mrežu ili mikromrežu preko pretvarača ovog tipa, posebice OIE zbog svoje nepredvidljive prirode.



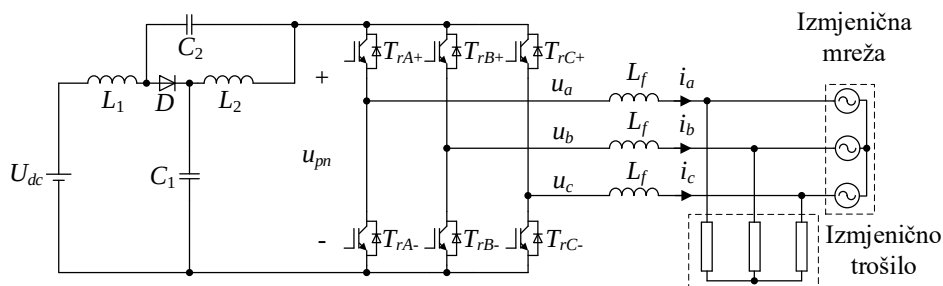
Slika 4.10 Pojednostavljeni model upravljanja u izmjeničnoj mikromreži za: (a) pretvarač za uspostavljanje mreže, (b) pretvarač za napajanje mreže, (c) strujno upravljani pretvarač za održavanje mreže, (d) naponski upravljani pretvarač za održavanje mreže

5. IZMJENJIVAČ KVAZI Z-TIPA

U literaturi se može naći veliki broj različitih energetskih pretvarača za različite primjene u mikromrežama i sustavima s distribuiranim izvorima, od kojih su neki prikazani u prethodnom poglavlju. Svakodnevno se istražuju i nove vrste i topologije pretvarača kako bi se smanjile cijene i povećala korisnost energetskih sustava, a posebno onih s OIE. Jedna relativno novija vrsta pretvarača je izmjenjivač Z-tipa, prvi put predložen u radu [10], te naknadno izvedene modificirane topologije toga izmjenjivača. Impedancijski krug na istosmjernoj strani ovog izmjenjivača omogućuje podizanje razine ulaznog napona, slično kao kod uzlaznih ili silazno-uzlaznih pretvarača, bez dodavanja upravljivih poluvodičkih sklopki. Iako je izmjenjivač Z-tipa ispunio očekivanja po pitanju mogućnosti podizanja napona, kasnije su uslijedile modifikacije izvorne topologije kako bi se umanjili ili otklonili uočeni nedostaci a jedna od tih modificiranih topologija je poznata kao izmjenjivač kvazi Z-tipa (qZSI) [14]. U odnosu na izvornu topologiju, qZSI zahtijeva manji nazivni napon kondenzatora C_2 i omogućuje kontinuiranu ulaznu struju.

5.1. Topologija i matematički model izmjenjivača kvazi Z-tipa

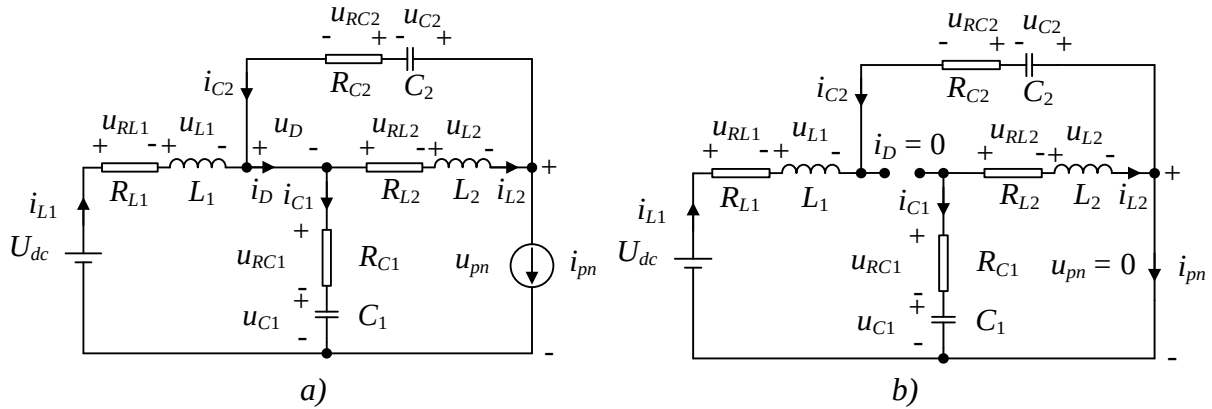
Topologija qZSI-a je prikazana na slici 5.1 a čini je, kao i kod klasičnog izmjenjivača Z-tipa, klasični trofazni tranzistorski most te impedancijski krug postavljen na istosmjernoj strani mosta izmjenjivača, koji je sačinjen od dvije prigušnice (L_1 , L_2), dva kondenzatora (C_1 , C_2) i diode (D). qZSI se od klasičnog ZSI-a razlikuje isključivo po razmještanju komponenti unutar impedancijskog kruga. Tranzistorski most čini šest tranzistora s porednim diodama. Ovisno o zahtjevima sustava u kojem se qZSI primjenjuje, na izlaz izmjenjivača može se postaviti L, LC ili LCL filter.



Slika 5.1 Topologija izmjenjivača kvazi Z-tipa s filtrom

Naponsko pojačanje qZSI-a postiže se uvođenjem dodatnog sklopnog stanja tranzistorskog mosta koje se naziva prostrijelno stanje (*engl.* shoot-through state). Prostrijelno stanje aktivira se za vrijeme nultog stanja, kada su obično isključeni svi tranzistori donje ili gornje grane mosta i tijekom kojeg su linijski naponi na izlazu mosta jednaki nuli. Tijekom prostrijelnog stanja uključena su oba tranzistora u jednoj ili svim granama mosta. Na slici 5.2 prikazane su nadomjesne sheme qZSI-a za vrijeme trajanja aktivnih i nultih sklopnih stanja (bez prostrijelnog stanja) te tijekom prostrijelnog sklopnog stanja. Još jedna prednost qZSI-a u odnosu na klasične pretvarače je ta što nema potrebe za mrtvim vremenom, koje se inače koristi kako bi se izbjegao kratki spoj u fazama mosta pretvarača, budući da je kratki spoj sastavni dio rada ovog pretvarača i izvodi se aktiviranjem prostrijelnih stanja. Za vrijeme trajanja prostrijelnog stanja, dioda u impedancijskom krugu zapire, most je u kratkom spoju, kondenzatori se prazne a struja kroz prigušnice raste te se u njih pohranjuje magnetska energija. Po završetku prostrijelnog stanja kondenzatori se ponovno pune, zavojnice djeluju kao strujni izvori, oslobađajući

nagomilanu energiju, čime se postiže naponsko pojačanje i povećanje srednje vrijednosti napona na ulazu u most u_{pn} .



Slika 5.2 Nadomjesne sheme qZSI-a za vrijeme trajanja (a) aktivnih i nultih stanja i (b) prostrijelnog stanja

Na temelju prikazanih nadomjesnih shema izveden je matematički model kojim se opisuje rad izmjenjivača, posebno za prostrijelna stanja i za aktivna/nulta stanja [172]. Radi jednostavnijeg modeliranja izmjenjivača, istosmjerni krug se smatra simetričnim, tj., vrijedi da je $L_1 = L_2 = L$ i $C_1 = C_2 = C$. Isto tako, pretpostavljeno je da su unutarnji otpori prigušnica (R_L) i kondenzatora (R_C) također jednaki, odnosno $R_{L1} = R_{L2} = R_L$, $R_{C1} = R_{C2} = R_C$.

Ako se zanemari pad napona na diodi, za vrijeme trajanja nultih i aktivnih stanja vrijedi:

$$\begin{aligned} u_{dc} &= i_{L1}R_L + L \frac{di_{L1}}{dt} + i_{C1}R_C + u_{C1} \\ u_{C2} &= -L \frac{di_{L2}}{dt} - i_{L2}R_L - i_{C2}R_C \end{aligned} \quad (5.1)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} i_{C1} &= C \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1} - i_{pn} \\ i_{C2} &= C \frac{du_{C2}}{dt} = i_{L2} - i_{pn} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Također, na temelju nadomjesne sheme 5.2b mogu se izvesti izrazi koji opisuju rad pretvarača za vrijeme trajanja prostrijelnog stanja pa vrijedi:

$$\begin{aligned} u_{dc} &= i_{L1}R_L + L \frac{di_{L1}}{dt} - i_{C2}R_C - u_{C2} \\ u_{C1} &= L \frac{di_{L2}}{dt} + i_{L2}R_L - i_{C1}R_C \end{aligned} \quad (5.3)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} i_{C1} &= -i_{L2} \\ i_{C2} &= -i_{L1} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Iz prikazanih jednadžbi mogu se izvesti jednadžbe izmjenjivača u prostoru stanja za aktivna i nulta stanja, odnosno za prostrijelna stanja. Uzevši u obzir faktor trajanja prostrijelnog stanja (D_0) i faktor trajanja aktivnih i nultih stanja ($1 - D_0$), dobije se združeni model sustava u prostoru stanja [172]:

$$F\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.5)$$

pri čemu je:

$$A = \begin{bmatrix} -(R_L + R_C) & 0 & D_0 - 1 & D_0 \\ 0 & -(R_L + R_C) & D_0 & D_0 - 1 \\ 1 - D_0 & -D_0 & 0 & 0 \\ -D_0 & 1 - D_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & (1 - D_0)R_C \\ 0 & (1 - D_0)R_C \\ 0 & D_0 - 1 \\ 0 & D_0 - 1 \end{bmatrix},$$

$$x = [i_{L1} \quad i_{L2} \quad u_{C1} \quad u_{C2}]^T, \quad u = [u_{dc} \quad i_{pn}]^T,$$

$$D_0 = \frac{T_0}{T_{sw}}$$

T_0 period prostrijelnog stanja koji se definira kao duljina trajanja prostrijelnog stanja unutar jednog sklopnog perioda (T_{sw}).

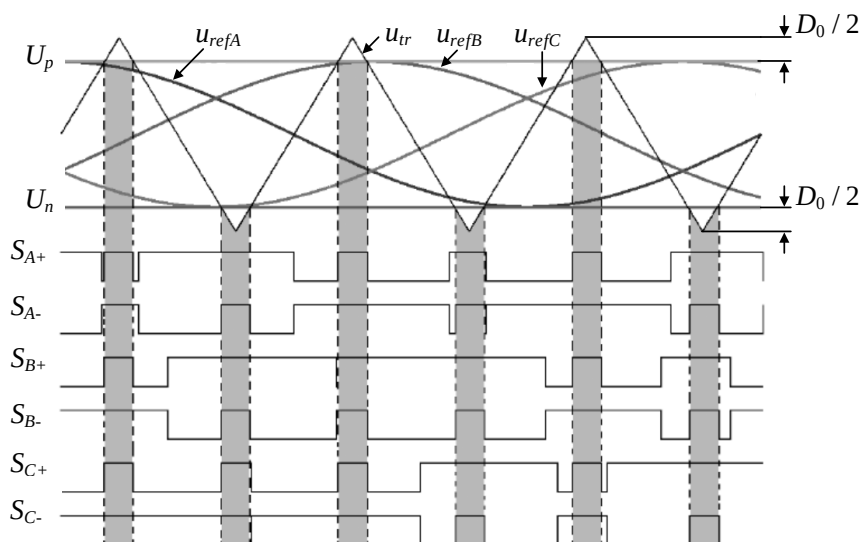
Ako se zanemare paraziti otpori R_C i R_L , naponsko pojačanje izmjenjivača (G), definirano kao omjer vršne vrijednosti osnovnog harmonika izlaznog faznog napona izmjenjivača ($\hat{U}_{ac}$) i polovice napona U_{dc} , određeno je izrazom:

$$G = \frac{\hat{U}_{ac}}{\frac{U_{dc}}{2}} = MB = M \frac{1}{1 - 2D_0} \quad (5.5)$$

gdje je B faktor pojačanja izmjenjivača, a M indeks amplitudne modulacije.

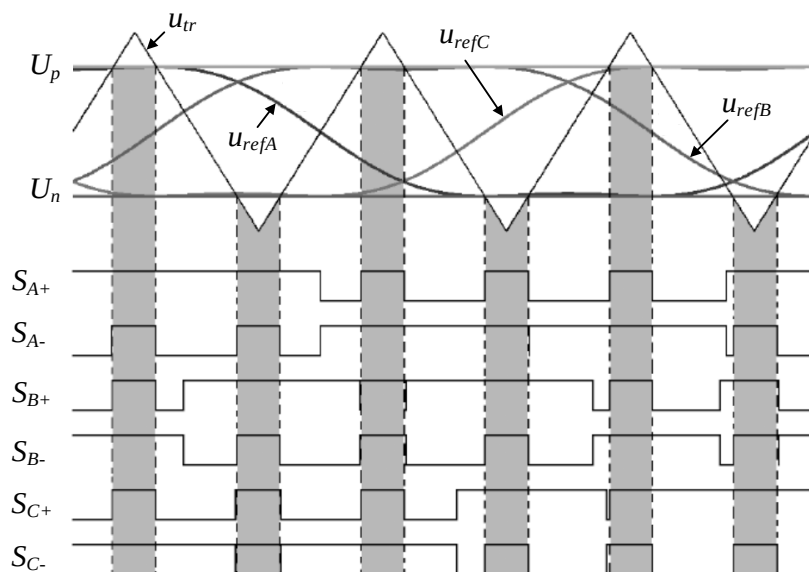
5.2. Upravljanje izmjenjivačem kvazi Z-tipa

Upravljanje qZSI-om izvodi se slično kao i klasičnim VSC-om, na način da se zadaju upravljački signali za tranzistore. Upravljački signali se mogu dobiti koristeći PWM metode poput, npr., sinusne PWM (SPWM) metode ili vektorske PWM (SVPWM, od *engl.* space-vector PWM) metode. Za razliku od klasičnih pretvarača, u slučaju qZSI-a potrebno je dodatno generirati i signale za prostrijelna stanja. U literaturi je predloženo više različitih metoda dodavanja prostrijelnog stanja, a osnovne metode predložene za SPWM su [173]: metoda jednostavnog pojačanja, metoda maksimalnog pojačanja i metoda maksimalnog konstantnog pojačanja. Kod metode jednostavnog pojačanja (*engl.* simple boost control), standardna sklopna stanja se određuju usporedbom referentnih napona (u_{refA} , u_{refB} , u_{refC}) i trokutastog signala (u_{tr}), a prostrijelna stanja se određuju usporedbom trokutastog signala i referentnih istosmjernih signala U_p i U_n , čiji iznos odgovara amplitudi referentnih sinusnih napona. Valni oblici ove metode su prikazani na slici 5.3.



Slika 5.3 Valni oblici metode jednostavnog pojačanja [174]

U slučaju metode maksimalnog pojačanja (*engl.* maximum boost control), za cijelo vrijeme trajanja nultih stanja aktivno je prostrijelno stanje. Na taj se način dobiva maksimalno pojačanje izmjenjivača, ali je trajanje prostrijelnog stanja promjenjivo. Metoda maksimalnog konstantnog pojačanja (*engl.* maximum constant boost control) pruža maksimalno pojačanje izmjenjivača uz nepromjenjivo trajanje prostrijelnog stanja. Ova se metoda može unaprijediti utiskivanjem trećeg harmonika u referentne sinusne signale. Pritom je amplituda trećeg harmonika jednaka $1/6$ amplitude osnovnog harmonika referentnih sinusnih signala. Za signale prostrijelnog stanja tada se koriste istosmjerni signali U_p i U_n koji se uspoređuju s referentnim signalima u_{refA} , u_{refB} , u_{refC} u koje je utisnut treći harmonik. Valni oblici za unaprijeđenu metodu maksimalnog konstantnog pojačanja prikazani su na slici 5.4. U slučaju korištenja SVPWM-a također se mogu koristiti prethodno opisane metode utiskivanja prostrijelnog stanja, ali se pritom prostrijelna dobivaju dodavanjem vektora prostrijelnog stanja. Pregled SVPWM modulacija za izmjenjivače Z-tipa i kvazi Z-tipa dan je u radu [175].



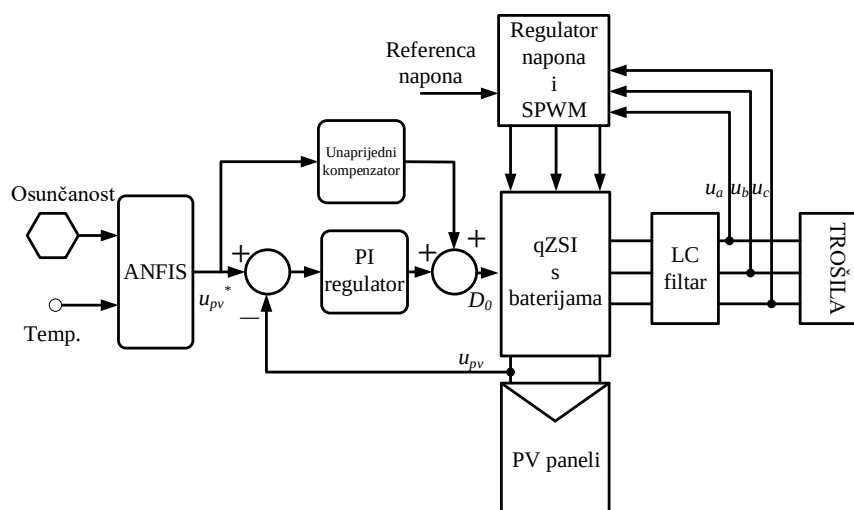
Slika 5.4 Valni oblici metode maksimalnog konstantnog pojačanja s utisnutim trećim harmonikom [174]

6. PRIMJENA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA

U literaturi se najviše primjena qZSI-a odnosi upravo na povezivanje distribuiranih izvora i to u prvom redu PV panela. Razlog tome je mogućnost istovremenog reguliranja izlazne struje ili napona qZSI-a, u svrhu postizanja nivoa koji zahtijeva priključeno trošilo ili mreža, i ulaznog DC napona, u svrhu podešavanja radne točke PV panela, najčešće s ciljem postizanja točke maksimalne snage. Osim za PV panele, qZSI se često koristi za povezivanje WECS-a, a samo se mali broj radova može pronaći u kojima se predlaže primjena qZSI-a s drugim distribuiranim izvorima. U nastavku su izdvojeni radovi koji prikazuju primjenu qZSI-a s distribuiranim izvorima, posebno u slučaju rada u otočnom režimu i u radu sa spojem na mrežu.

6.1. Sustavi namijenjeni za otočni rad

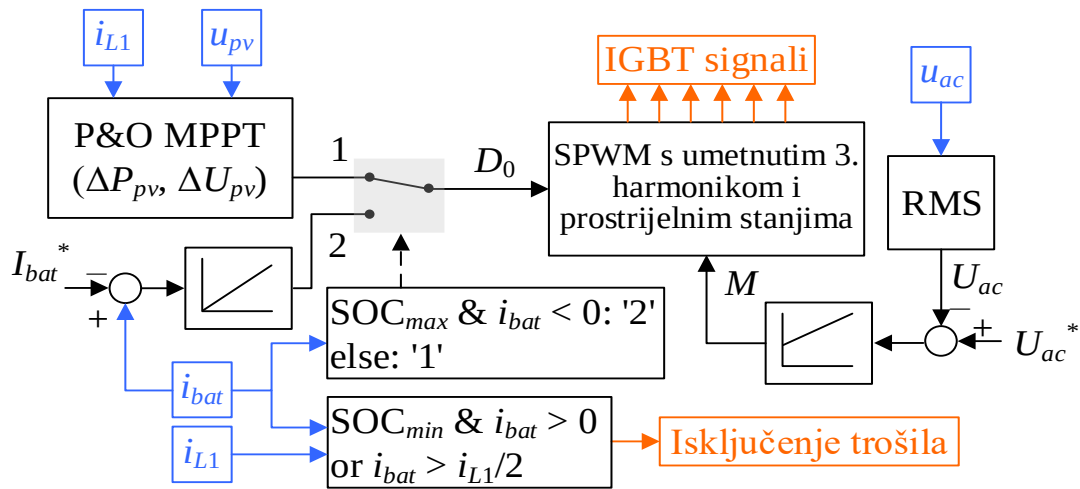
Primjena qZSI-a za napajanje izoliranih trošila iz PV panela prikazana je u radu [176]. U razmatranom radu, uz PV panele, na qZSI je povezan i baterijski sustav i to tako da je izravno priključen u paralelu s manjim, uzdužno postavljenim kondenzatorom C_2 . Primarni cilj upravljanja pripadajućeg upravljačkog sustava, prikazanog na slici 6.1, je osiguravanje stabilnog napajanja trošila te maksimalna eksploatacija obnovljivog izvora (sunčevog zračenja) koristeći MPPT algoritam. MPPT algoritam je zasnovan na adaptivnom sustavu zaključivanja temeljenom na neuronskim mrežama i neizrazitoj logici (ANFIS, od *engl.* adaptive neuro-fuzzy inference system). Na osnovu mjerenja osunčanosti i temperature, za što je korišten komercijalni piranometar i meteorološke postaje, ANFIS određuje referentnu vrijednost ulaznog DC napona qZSI-a (u_{dc}) takvu da odgovara vrijednosti napona točke maksimalne snage PV panela za dane uvjete. Iako u radu nije izričito navedeno, prema opisanome se da zaključiti da je u ANFIS-u u obzir uzet i SOC baterija, koji se održava unutar zadanih granica a koje autori nisu precizno definirali kao, uostalom, ni korištenu metodu procjene SOC-a. Zadana vrijednost napona postiže se PI regulatorom s unaprijedim kompenzatorom, koji zadaje vrijednost faktora trajanja prostrijelnog stanja D_0 . Regulator izlaznog napona qZSI-a zadaje vrijednost indeksa amplitudne modulacije kako bi postigao referentnu vrijednost linijskog napona trošila, postavljenu na 104 V, za laboratorijski eksperiment, te na 208 V za simulacijsku analizu. Razlikuju se tri specifična radna stanja u kojima se sustav može nalaziti: 1) Baterije nisu u potpunosti prazne ni pune te MPPT algoritam osigurava maksimalnu snagu iz PV panela. Ako je raspoloživa snaga iz PV panela prevelika s obzirom na potrebe trošila (i gubitke sustava), višak se pohranjuje u baterije. U suprotnom, ako je raspoloživa snaga nedovoljna, manjak se nadoknađuje iz baterija. Kako je ulazna snaga qZSI-a postavljena MPPT algoritmom, a izlazna određena trošilima (i gubicima u sustavu), snaga baterija se, bez potrebe za regulacijom, prilagodi razlici ove dvije snage. 2) Ukoliko su baterije u potpunosti napunjene a postoji višak snage iz PV panela, MPPT algoritam odstupa od točke maksimalne snage s ciljem svođenja struje punjenja baterija na nulu. 3) Ukoliko su baterije ispražnjene a postoji manjak snage iz PV panela, pristupa se rezanju potrošnje, koje u radu nije detaljnije opisano, kako bi se zadržala zadana vrijednost izlaznog napona. U radu nisu detaljnije opisani svi dijelovi regulacijskog kruga, poput mjerenih veličina ili primijenjenog PWM-a, iako, sudeći po upotrebi indeksa amplitudne modulacije, za pretpostaviti je da je korišten SPWM.



Slika 6.1 Upravljački sustav za otočni rad qZSI-a s baterijskim sustavom, napajanog iz PV panela

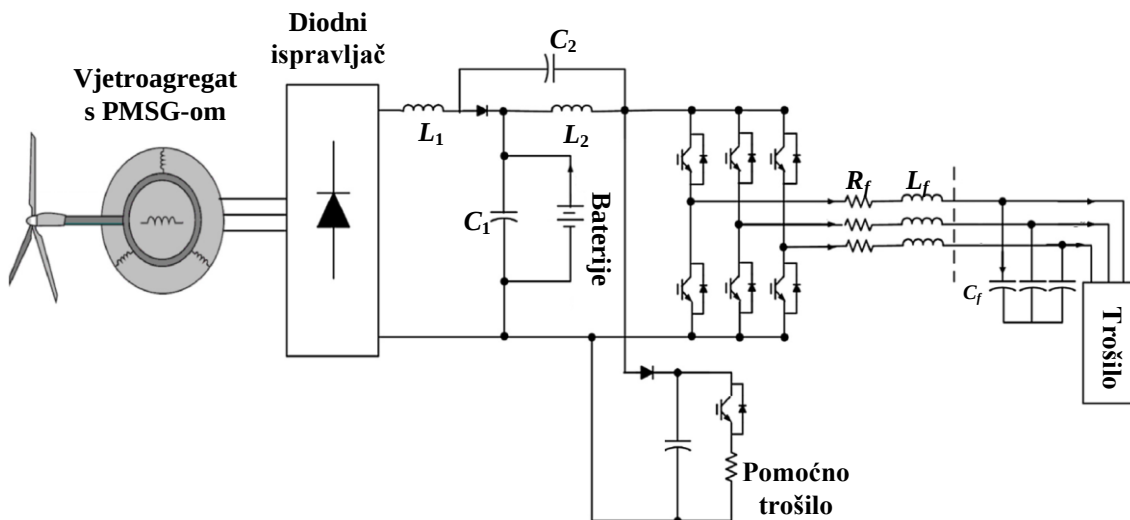
Ista topologija sustava predložena je i u radu [177], a korišteni upravljački sustav je prikazan na slici 6.2. I u ovom slučaju, autori u obzir uzimaju SOC baterija u okviru analize rada sustava u tri osnovna, prethodno opisana, režima rada. Pri tome, autori pretpostavljaju da je SOC poznat te u radu nije obrađen algoritam za njegovu estimaciju. Za razliku od prethodno razmatranog rada, ovdje je korišten upravljački algoritam temeljen na *rule-based* principu, koji na osnovu razine SOC-a i trenutne struje baterija bira između aktivacije MPPT algoritma i regulatora struje baterije (preklopka na slici 6.2) te ima mogućnost isključenja trošila. MPPT algoritam se zasniva na principu pomaka i promatranja (P&O, od *engl.* perturb and observe) a regulator struje baterije je PI tipa. I MPPT algoritam i regulator struje baterije (i_{bat}), budući da nikad nisu istovremeno aktivni, na svom izlazu kao upravljačku veličinu zadaju faktor trajanja prostrijelnog stanja D_0 .

Ako je SOC baterija unutar dozvoljenih granica, nisu postavljena ograničenja na punjenje ili pražnjenje te je aktivan MPPT algoritam. Jedino ograničenje u ovom režimu je gornja granica struje pražnjenja. Naime, kako bi se spriječilo zapiranje diode u ulaznom impedancijskom krugu qZSI-a za vrijeme aktivnih i nultih sklopnih stanja, struja baterije ne smije biti veća od struje i_{L1} . Autori su postavili sigurnosnu granicu vrijednosti struje baterija na $i_{L1}/2$, koju su odredili temeljem simulacija. U slučaju dostizanja postavljene granice, upravljački sustav isključuje trošila i time svu raspoloživu snagu usmjerava u baterije. Ako je SOC na maksimalnoj dopuštenoj vrijednosti i struja baterija je pozitivna – baterije se pune – aktivira se regulator struje baterije koji svodi struju na nulu i sprječava daljnje punjenje. S druge strane, ako je SOC na minimalnoj dopuštenoj vrijednosti i baterije se još uvijek prazne, trošila se isključuju kako bi se spriječilo daljnje pražnjenje. I u ovom radu, cilj upravljačkog algoritma je osiguravanje stabilnog napajanja trošila, uz primjenu baterija za kompenzaciju promjenjive izlazne snage PV sustava.



Slika 6.2 Upravljački sustav s implementiranim MPPT algoritmom, sustavom za raspolaganje energijom baterija i sustavom upravljanja potražnjom [177]

Sustav za napajanje izoliranih trošila iz vjetroagregata uz primjenu qZSI-a, čija je shema prikazana na slici 6.3, razmatran je u radu [178]. Osnovni ciljevi predloženog sustava su maksimalno iskorištavanje dostupne energije vjetra te održavanje zadane vrijednosti amplitude i frekvencije napona trošila. Kako bi se maksimalno iskoristila energija vjetra i istovremeno kompenzirala nepredvidljivost u proizvodnji energije iz vjetroagregata, iskorišten je baterijski SPE. Za razliku od prethodna dva obrađena sustava, baterije su u ovom radu izravno povezane u paralelu s većim, poprečno postavljenim kondenzatorom C_1 u ulaznom impedancijskom krugu qZSI-a. Kao dodatni element za balansiranje proizvodnje i potrošnje energije korišteno je privremeno pomoćno trošilo (*engl.* dump load), koje je preko dodatne poluvodičke sklopke povezano na ulaz u tranzistorski most izmjenjivača. Pri tome, ovo trošilo može biti grijač zraka ili vode, čime se ne rasipa proizvedena energija.



Slika 6.3 Shema sustava s qZSI-om u otočnom radu, napajanim iz vjetroagregata [178]

Vjetroturbina primijenjena u razmatranom vjetroagregatu ima mogućnost upravljanja kutom lopatica (*engl.* pitch control) te je izravno povezana s PMSG-om. U upravljačkom sustavu implementiran je MPPT algoritam, kojim se korigira brzina vrtnje vjetroturbine, odnosno PMSG-a, tako da se za svaku brzinu vjetra postigne maksimalna izlazna snaga vjetroturbine. Upravljanje brzinom vrtnje PMSG-a, za koju se može pokazati da je funkcija

efektivne vrijednosti napona na stezaljkama generatora (U_t), izvodi se podešavanjem ulaznog DC napona qZSI-a (U_{dc}). Odnos ulaznog DC napona qZSI-a i napona na stezaljkama generatora, povezanog preko trofaznog diodnog ispravljača, određen je izrazom (6.1). Regulacija ulaznog DC napona qZSI-a, prema referenci zadanoj MPPT algoritmom, izvodi se podešavanjem faktora trajanja prostrijelnog stanja D_0 . Za regulaciju napona trošila, kao upravljačka veličina koristi se indeks amplitudne modulacije.

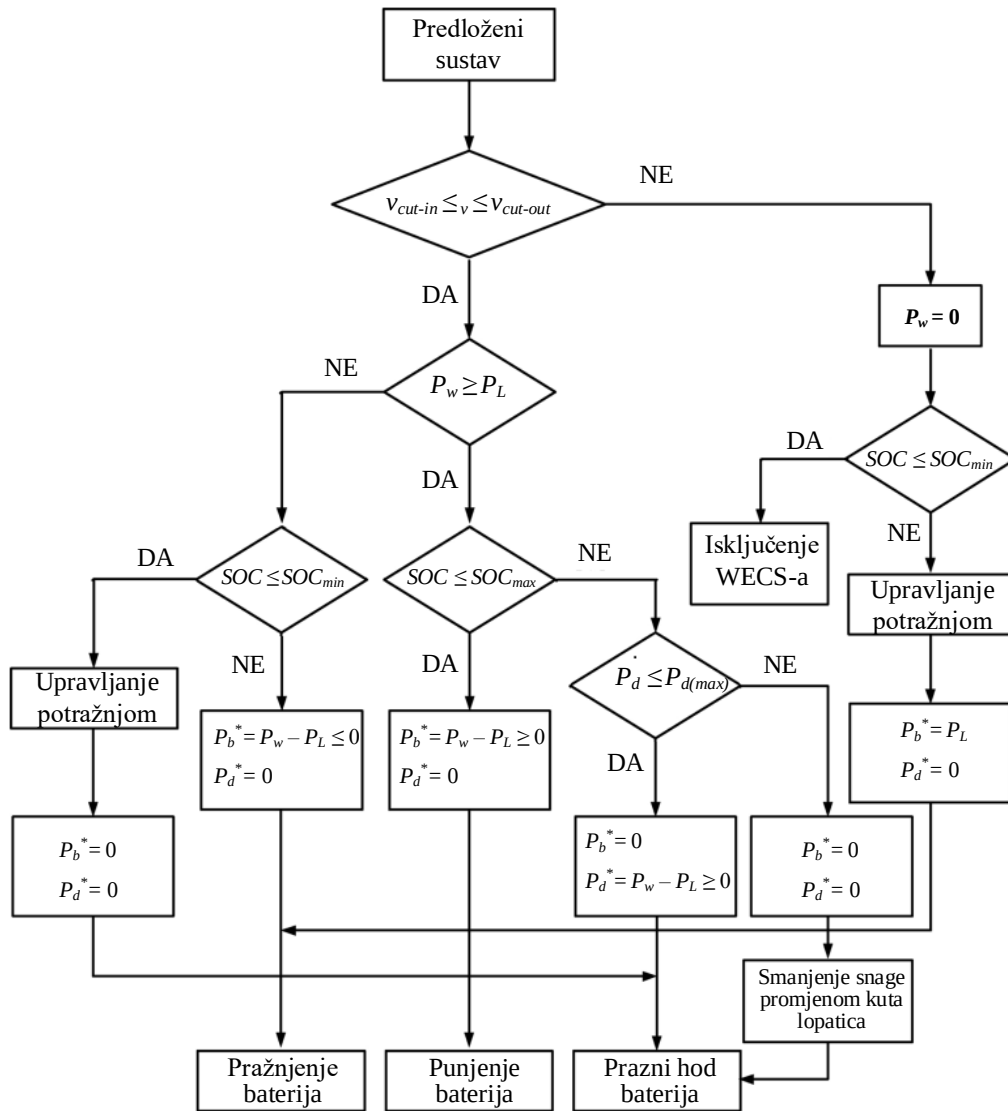
$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_t \quad (6.1)$$

U ovom radu je također korišten *rule-based* tip upravljačkog sustava, koji na temelju dostupne snage iz vjetroagregata (P_w), koja približno odgovara ulaznoj snazi qZSI-a, snage trošila (P_L) i SOC-a baterija raspolaže snagom među elementima sustava. Bilanca snage u sustavu određena je izrazom:

$$P_w = P_L + P_b + P_d \quad (6.2)$$

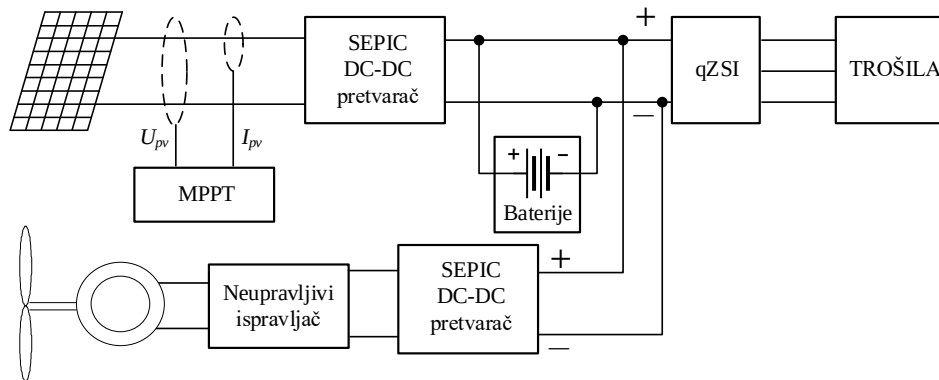
gdje je P_b snaga baterija a P_d snaga pomoćnog trošila.

Na slici 6.3 prikazan je pojednostavljeni dijagram toka odlučivanja predloženog upravljačkog sustava. Osim odnosa ulazne i izlazne snage qZSI-a, za optimalno usmjeravanje tokova snage upravljački sustav kontinuirano prati i SOC baterija. Ukoliko postoji višak snage qZSI-a a SOC je manji od maksimalno dopuštene razine (SOC_{max}), sustav dozvoljava pozitivnu referencu snage P_b , tj., punjenje baterija, koja se postavlja prema izrazu (6.2). U tom slučaju, struja punjenja baterija je određena naponom baterija i referencom snage P_b . Ukoliko postoji višak ulazne snage a SOC baterija je na maksimalnoj dopuštenoj vrijednosti, višak snage se usmjerava na pomoćno trošilo. Pri tome, snaga na pomoćnom trošilu (P_d) ne smije prijeći maksimalnu dopuštenu vrijednost ($P_{d(max)}$). U protivnom upravljački sustav korekcijom kuta lopatica vjetroturbine smanjuje izlaznu snagu vjetroagregata. U slučaju kada je snaga iz vjetroagregata manja od potrebne za napajanje trošila, manjak se nadoknađuje iz baterija sve dok je SOC veći od minimalne dopuštene vrijednosti (SOC_{min}). Ako SOC nije veći od minimalne dopuštene vrijednosti, upravljački sustav pristupa upravljanju potražnjom te smanjuje snagu trošila. Međutim, način na koji je implementirano upravljanje potražnjom nije detaljnije opisan u razmatranom radu. Ukoliko brzina vjetra nije dovoljna za rad vjetroagregata ili je prevelika pa tako ugrožava sigurnost sustava, vjetroagregat se isključuje te se trošila dalje napajaju iz baterija bez potrebe za njihovim prespajanjem na ulaz qZSI-a (za razliku od slučaja kad su baterije priključene paralelno s uzdužnim kondenzatorom), uz pretpostavku da SOC nije na minimalno dopuštenoj vrijednosti. Ako je SOC jednak ili manji od minimalno dopuštene vrijednosti, sustav se isključuje.



Slika 6.4 Dijagram toka upravljanja otočnim qZSI-om s baterijama napajanog iz WECS-a

U radu [179], razmatrana je primjena qZSI-a napajanog iz PV panela i vjetroagregata, uz primjenu baterijskog sustava. U razmatranom sustavu, prikazanom na slici 6.5, distribuirani izvori su povezani na DC ulaz qZSI-a preko pripadajućih SEPIC (od *engl.* single ended primary inductance converter) DC-DC pretvarača, dok su baterije povezane izravno. U analizi rada sustava SOC baterija nije uzet u obzir. Za rad PV panela implementiran je P&O MPPT algoritam koji zadaje impulse za SEPIC pretvarač na osnovu mjenog napona i struje PV panela, s ciljem postizanja maksimalne snage. U radu nije naveden tip generatora korištenog u vjetroagregatu, a isto tako nije detaljnije opisan ni regulacijski krug qZSI-a. Navedeno je samo da se za regulaciju izlazne struje qZSI-a koriste regulatori veličina stacionarnog koordinatnog sustava. Budući da su autori izostavili veći broj podataka vezanih za izvedbu regulacijskih algoritama a koji bi omogućili reprodukciju istraživanja i provjeru valjanosti, objektivno vrednovanje predloženog koncepta je otežano. Analiza sustava u radu je fokusirana na odziv sustava na skokovitu promjenu brzine vjetra, promjenu osunčanosti te spajanje i odspajanje trošila. Međutim, za razliku od većine dostupnih radova iz ovog područja, ovaj rad uključuje eksperimentalnu analizu, što je, s unatoč nedorečenostima u samom radu, razlog zašto je uzet u obzir u ovom pregledu.



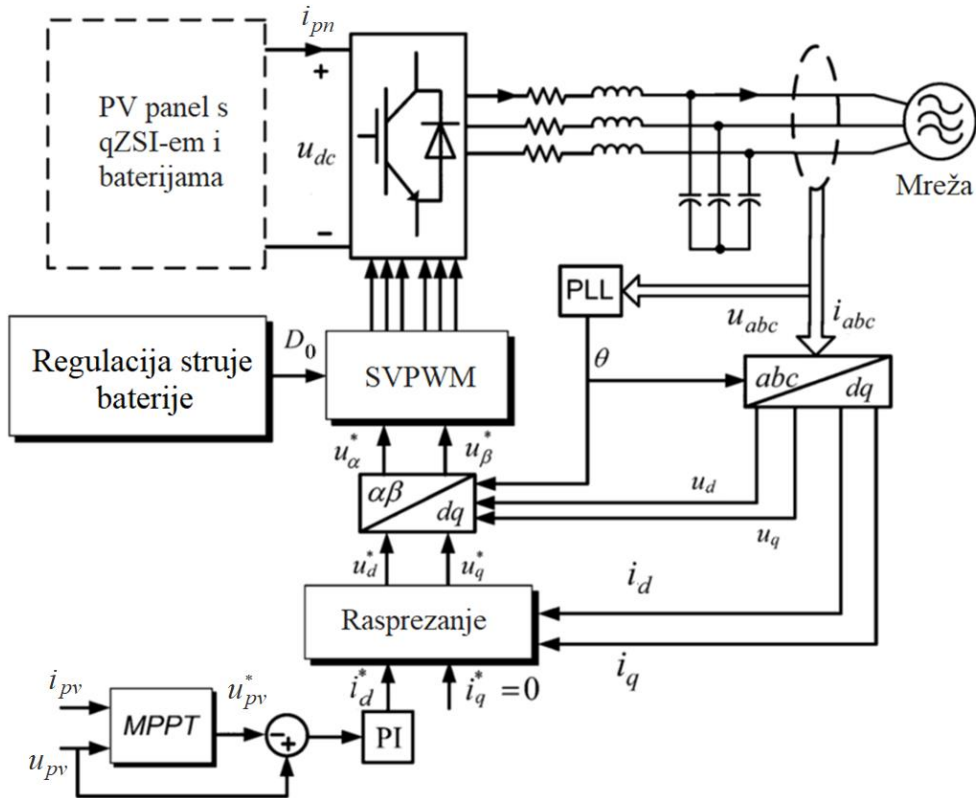
Slika 6.5 Shema sustava s qZSI-om u otočnom radu, napajanim iz vjetroagregata i PV panela [179]

Primjena qZSI-a s drugim vrstama distribuiranih izvora je mnogo manje zastupljena u literaturi. Jedan od primjera je primjena qZSI-a s gorivim ćelijama, kao što je prikazano u radu [180]. U predloženom sustavu, goriva ćelija s polimernom membranom (*engl.* proton exchange membrane fuel cell) preko qZSI pretvarača napaja trofazno trošilo u otočnom radu. Koristeći qZSI izbjegnuto je korištenje dodatnog DC-DC pretvarača koji je inače nužan u sustavima s gorivim ćelijama zbog niskog iznosa napona te širokog raspona promjene napona za vrijeme rada. Za regulaciju istosmjernog napona korištena je metoda povratnog koraka (*engl.* backstepping controller), čija je upravljačka veličina faktor trajanja prostrijelnog stanja D_0 . Za upravljanje izmjenjivačem korištena je modificirana vektorska pulsno-širinska modulacija. Autori uz to nisu posebno razmatrali strategiju upravljanja tokovima snaga ili EMS.

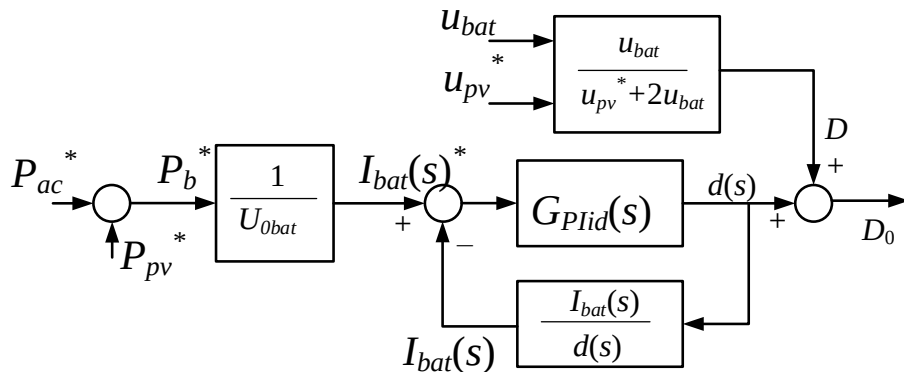
6.1. Sustavi namijenjeni za rad u spoju s mrežom

Primjena qZSI-a za povezivanje različitih distribuiranih izvora na mrežu razmatrana je u radovima [181-183]. Povezivanje PV panela na mrežu preko qZSI-a s baterijskim SPE-om prikazano je u radu [182]. Pripadajući upravljački sustav prikazan je na slici 6.6. Fokus autora u spomenutom radu je izvedba spomenutog sustava u smislu odabira odgovarajućeg izlaznog filtra, regulatora izlazne snage qZSI-a te odabira odgovarajućeg PWM-a. PV paneli su na mrežu povezani preko qZSI-a uz primjenu MPPT algoritma. Baterije su povezane izravno u paralelu s uzdužno postavljenim kondenzatorom C_2 u impedancijskoj mreži, a koriste se kako bi se osigurala konstantna snaga koja se šalje u mrežu, bez obzira na radnu točku PV panela. Na izlaz izmjenjivača postavljen je LC filtar s ciljem smanjenja izobličenja struje koja se utiskuje u mrežu. Cilj upravljačkog sustava na slici 6.4 je postizanje konstantne izlazne snage qZSI-a, tj. struje, uz izvođenje MPPT algoritma PV panela. Za realizaciju MPPT-a korištena je P&O strategija, a sam algoritam na sustav djeluje zadavanjem reference regulacijskom krugu napona u_{pv} , koji je izveden s unutarnjom regulacijskom petljom d komponente struje prema mreži (i_d). Referenca d komponente struje i_d^* se, kao i referenca q komponente struje i_q^* , potom prosljeđuje u blok za raspredanje. U bloku za raspredanje se, između ostalog, nalaze i PI regulatori struja i_d i i_q , dok se na izlazu dobivaju referentne vrijednosti napona u dq sustavu. Nakon raspredanja i transformacije referenci napona iz dq stacionarni $\alpha\beta$ sustav, nove reference $\alpha\beta$ napona se koriste se za generiranje upravljačkih signala SVPWM-om. Referenca struje i_q^* je postavljena na nulu kako bi se u mrežu slala samo radna snaga. Referenca željene izlazne radne snage P_{ac}^* postavlja se zadavanjem snage baterije P_b , koja je određena razlikom ulazne snage P_{pv} i reference izlazne snage. Na temelju tako određene snage baterije, zadana je referenca struje baterije I_{bat}^* , koja se regulira PI regulatorom. Izlazna veličina regulatora struje baterije je faktor trajanja prostrijelnog stanja D_0 . Upravljačkim sustavom predloženim u ovom radu, upravljanje tokovima snaga

zadržano je na razini praćenja dane reference izlazne snage qZSI-a. Razlika u snazi na ulazu i izlazu qZSI-a kompenzira se baterijama, bilo da je riječ o manjku ili višku snage. Pri analizi sustava, autori u obzir nisu uzeli SOC baterija.



a)

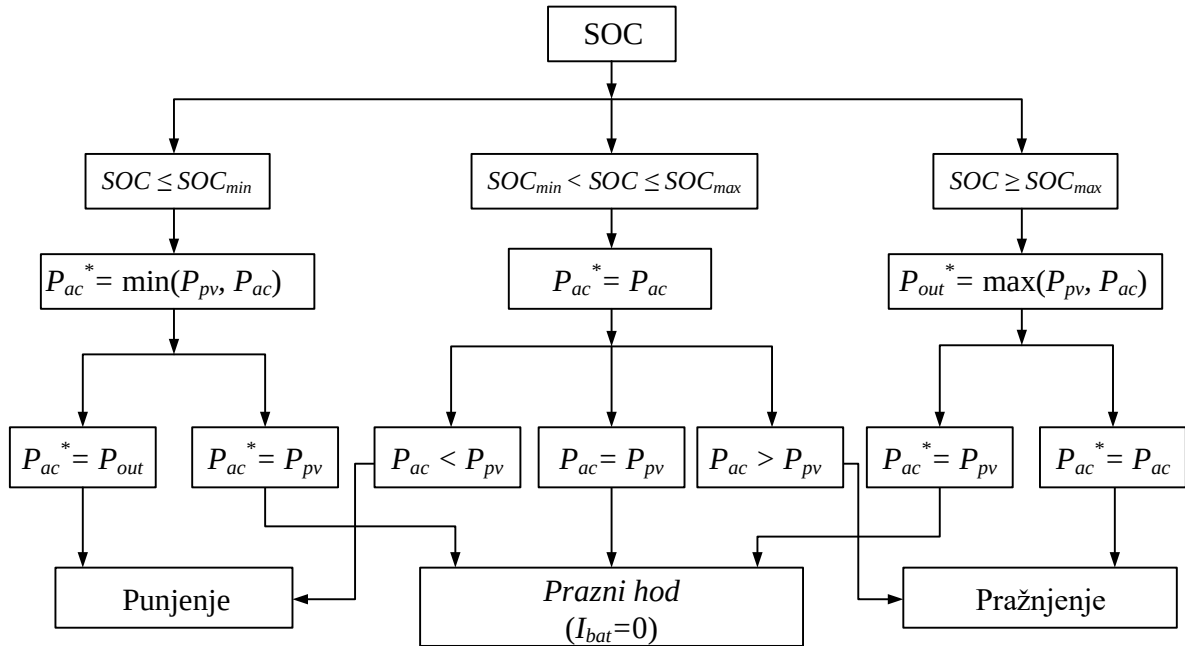


b)

Slika 6.6 (a) Shema pravljački sustav qZSI-a s baterijama i PV panelima, povezanim na mrežu, (b) unutrašnjost bloka „Regulacija struje baterije“ [182]

Isti fizički sustav kao u radu [182] korišten je i u radu [181] od istih autora. U ovom radu, autori su dodatno nadogradili upravljački sustav uzimajući u obzir SOC, s ciljem raspolaganja energijom baterija. U odnosu na prethodno opisano upravljanje, u ovom slučaju se izlazna snaga qZSI-a postavlja s obzirom na SOC baterija, gdje su SOC_{min} i SOC_{max} minimalna i maksimalna dopuštena vrijednost SOC-a. Vrijednost SOC_{min} u radu nije definirana, a vrijednost SOC_{max} je postavljena na 80%. Dijagram toka algoritma za upravljanje SOC-om prikazan je na slici 6.7. Kao i u prethodno opisanim radovima sa sličnim topologijama, razlikuju se tri karakteristična

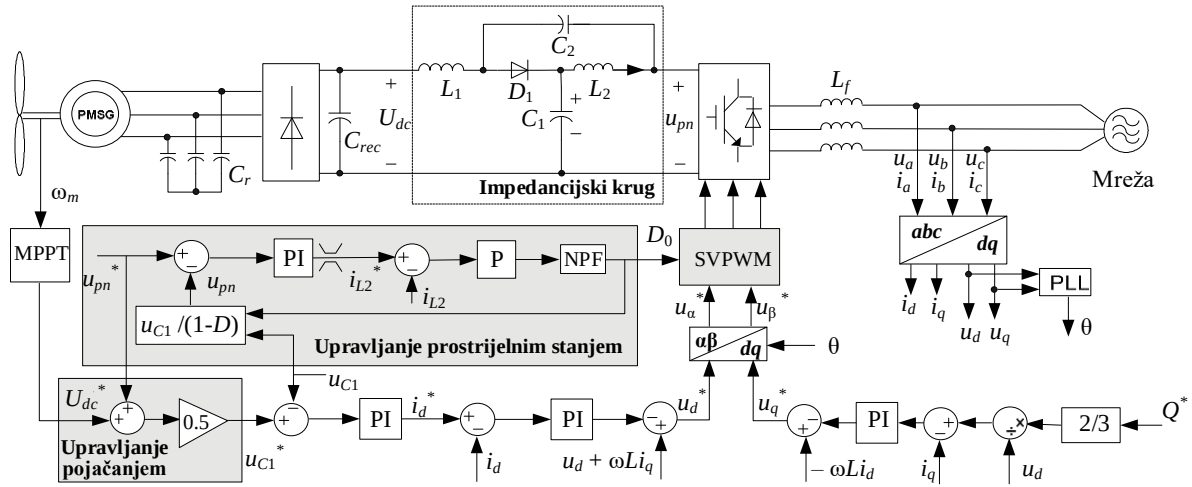
slučaja s obzirom na SOC. U slučaju kada je SOC manji ili jednak SOC_{min} , baterije se ne smiju dalje prazniti pa se, prema tome, referenca snage prema mreži (P_{ac}^*) postavlja na vrijednost jednaku manjoj od dviju snaga: ulazne snage qZSI-a (P_{pv}) i mjerene izlazne snage qZSI-a (P_{ac}). Dakle, ako je snaga P_{ac} manja od snage P_{pv} , referenca izlazne snage koja se prosljeđuje u regulacijski krug P_{ac}^* jednaka je P_{ac} . To znači da će se višak snage koji postoji u sustavu pohranjivati u baterije. Ako je snaga P_{ac} veća od P_{pv} , tj., postoji manjak snage iz PV-a, referenca P_{ac}^* se postavlja na vrijednost koja je jednaka snazi P_{pv} . Time se postiže struja baterija koja je jednaka nuli. U slučaju kada je SOC veći od SOC_{min} i manji od SOC_{max} , dopušteno je punjenje i pražnjenje baterija. U tom slučaju referenca P_{ac}^* ostaje jednaka P_{ac} . Snaga koja ide u ili iz baterija se u tom slučaju prilagođava snagama P_{pv} i P_{ac} na način da se dobije ravnoteža snaga u sustavu. Kada je SOC veći od SOC_{max} , nije dopušteno daljnje punjenje, te se P_{ac}^* postavlja prema većoj od snaga P_{pv} i P_{ac} čime se sva raspoloživa snaga šalje u mrežu. Ovakvim upravljanjem SOC se zadržava unutar dozvoljenih granica kako bi baterije mogle u svakom trenutku kompenzirati oscilacije u proizvodnji energije iz PV panela. Referenca P_{ac}^* se prosljeđuje sustavu regulacije struje baterije, čija je upravljačka veličina faktor D_0 . Unutar spomenutog sustava regulacije, prema referenca struje baterije se određuje prema referenci snage baterije koja je određena izrazima balance snage. Na taj način se kompenzira pogreška u izračunu uslijed gubitaka u sustavu, koja bi mogla rezultirati pogrešnom strujom baterije..



Slika 6.7 Dijagram toka rule-based algoritma za upravljanje SOC-om [181]

Primjena qZSI-a za povezivanje WECS-a na mrežu prikazana je u radu [183]. U razmatranom sustavu, WECS čini vjetroturbina s fiksnim kutom lopatica povezana s PMSG-om, diodni ispravljač i kondenzator C_{drec} na istosmjernoj strani ispravljača. Implementiran je MPPT algoritam kako bi se maksimalno iskoristila energija vjetra. Upravljački sustav, primijenjen u razmatranom sustavu, prikazan je na slici 6.8. Upravljanje je izvedeno na način da MPPT algoritam zadaje referencu ulaznog napona qZSI-a (U_{dc}), koja se regulira kaskadnim regulacijskim krugom s dva PI regulatora (u_{C1} i i_d) a koji na izlazu daje reference izlaznog napona izmjenjivača u stacionarnom koordinatnom sustavu $\alpha\beta$. Faktor trajanja prostrijelnog stanja D_0 se koristi za održavanje konstantne (1500 V) vršne vrijednosti ulaznog napona u most izmjenjivača, čime se osigurava naponska razina nužna za postizanje mrežnih vrijednosti napona na izlazu izmjenjivala., odnosno, kako bi se osiguralo potrebno pojačanje napona B . Dakle, s gledišta upravljanja tokovima snaga, razmatrani sustav svu raspoloživu radnu snagu iz

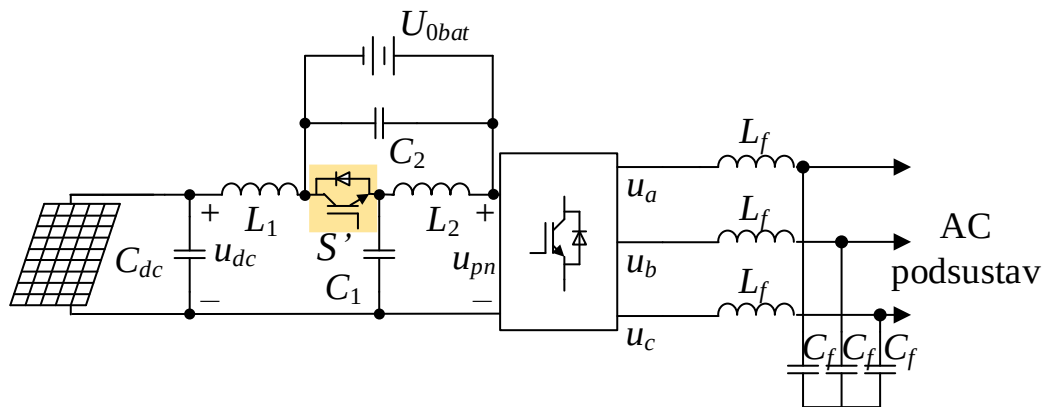
WECS-a prosljeđuje u mrežu. Izvedena je i mogućnost zadavanja reference jalove snage na izlazu izmjenjivača, koja se potom preračunava u odgovarajuću referentnu vrijednost q komponente struje i regulira pomoću PI regulatora. Autori nisu analizirali rad sustava s referencom jalove snage većom od nule.



Slika 6.8 Topologija i upravljački sustav $qZSI$ -a napajanog iz WECS-a povezanog na mrežu [183]

7. PRIMJENA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA U MIKROMREŽAMA

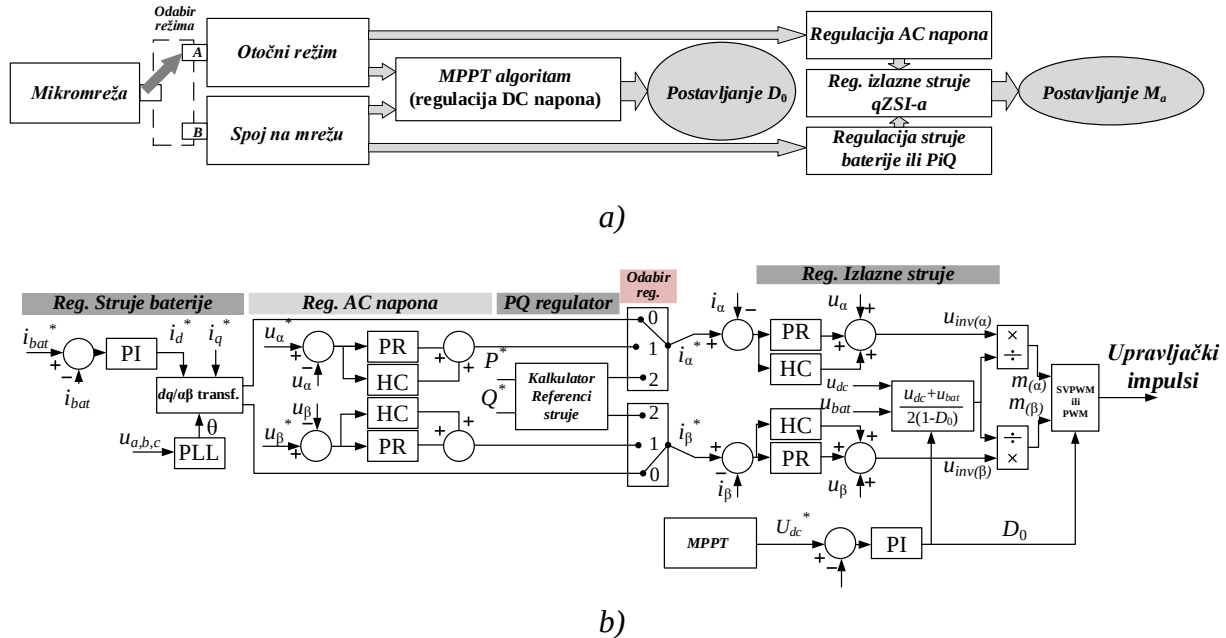
U ovom poglavlju su razmatrani radovi u kojima je prikazana primjena qZSI-a u mikromrežama. Pri tome su u obzir uzeti radovi u kojima opisani sustav odgovara definiciji mikromreže dane u uvodnom poglavlju. U obzir su dodatno uzeti radovi u kojima se razmatra specifična funkcija sustava s qZSI-om karakteristična za rad mikromreža, poput metoda dijeljenja snage, premda prikazani sustav u radu ne odgovara u potpunosti definiciji mikromreže. Dvosmjerni qZSI razmatran je u radu [184] u mikromreži s PV panelima i baterijama te u radovima [185, 186], gdje se koristi u funkciji ILC-a hibridne mikromreže. Primjena dvosmjernog qZSI-a je prikladna za mikromreže ovog tipa radi dodatne mogućnosti toka snage iz AC podsustava u DC podsustav. Za razliku od klasičnog qZSI-a, kod dvosmjernog qZSI-a na mjestu diode u impedancijskom krugu nalazi se tranzistor s porednom diodom (S'). Aktiviranjem tranzistora za vrijeme aktivnih i nultih sklopnih stanja mosta sprječava se pojava zapiranja diode, koja se inače može javiti kod klasičnog qZSI-a. Tranzistor je isključen za vrijeme prostrijelnih stanja. Topologija dvosmjernog qZSI-a prikazana je na slici 7.1.



Slika 7.1 Topologija sustava s dvosmjernim qZSI-om korištenim u [184]

U radu [184] mikromrežu čine: PV paneli povezani na DC ulaz qZSI-a, baterijski SPE povezan paralelno s kondenzatorom C_2 u impedancijskom krugu qZSI-a te AC sabirnica mikromreže, na koju je preko LC filtra povezan izlaz iz qZSI-a. Za optimalan rad PV panela, u upravljački sustav implementiran je MPPT algoritam koji zadaje referencu ulaznog DC napona qZSI-a (U_{dc}^*). Regulacija ovog napona izvodi se PI regulatorom neovisno o drugim regulacijskim krugovima u sustavu, bez obzira radi li sustav u otočnom režimu ili u spoju na mrežu. Upravljačka veličina regulatora napona u_{dc} je faktor D_0 . U otočnom režimu rada, osim regulacije napona u_{dc} , izvodi se i regulacija izlaznog napona qZSI-a, kako bi se vrijednost amplitude i frekvencije faznog napona AC sabirnice mikromreže zadržala na mrežnim vrijednostima (120 V, 60 Hz). Za regulaciju AC napona korištena je kaskadna regulacija, gdje unutarnju petlju čine proporcionalno-rezonantni (PR) regulatori α i β komponenti struje na izlazu qZSI-a, s harmoničkim kompenzatorom (HC, od *engl.* harmonic compensator), a vanjsku petlju čine regulatori, također PR, α i β komponenti napona. Na slici 7.2 prikazan je dijagram toka i struktura upravljačkog sustava razmatrane mikromreže. U režimu kada je mikromreža povezana s glavnim mrežom, nema potrebe za regulacijom AC napona, koji je zadan mrežom. Umjesto regulacije napona, u ovom režimu je aktivna regulacija radne i jalove snage (PQ) koja se šalje u mrežu. Na osnovu zadanih referenci P i Q , koje mogu biti zadane, primjerice, s više upravljačke razine, računaju se reference α i β komponenti struje na izlazu qZSI-a, tj., struje mreže. Za regulaciju navedenih struja, koriste se isti PR regulatori korišteni u unutarnjoj petlji kaskadne regulacije AC napona. U spoju s mrežom, izvedena je i regulacija struje baterija na

način da se struja baterija regulira PI regulatorom koji na izlazu daje referencu d komponente struje mreže. Referencu struje baterije zadaje nadređeni sustav upravljanja. Na taj način, korekcijom radne snage koja se šalje u mrežu, uz ulaznu snagu definiranu radnom točkom PV panela, struja baterija se prilagođava kako bi se postigla ravnoteža snaga u sustavu. U isto vrijeme ne može biti aktivna regulacija struje baterije i regulacija radne i jalove snage mreže.

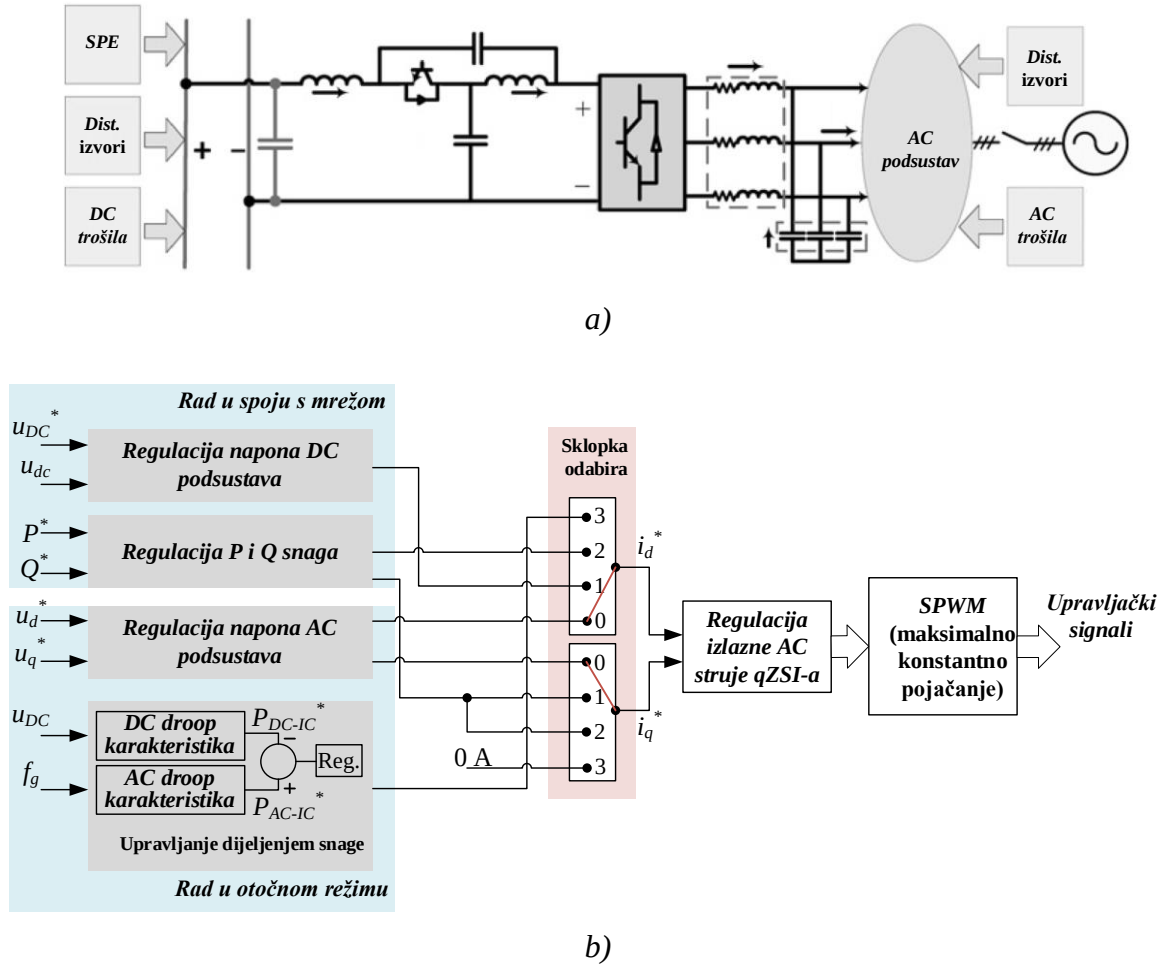


Slika 7.2 (a)Dijagram toka i (b) funkcionalna struktura upravljačkog sustava [184]

Hibridna mikromreža s distribuiranim izvorima i trošilima povezanim na AC i DC podsustave, SPE-om i qZSI-om u funkciji ILC-a razmatrana je u radu [185]. Topologija razmatrane mikromreže prikazana je na slici 7.3a. Upravljački sustav prikazan u ovom radu je zapravo unaprijeđena verzija sustava predloženog u [186], gdje, između ostalog, nije razmatrano dijeljenje snage u otočnom režimu rada te nije izveden PLL (od engl. phase locked loop) algoritam za sinkronizaciju s distribucijskom mrežom. Za razliku od prethodno razmatranih slučajeva, SPE u [185] nije povezan na jedan od kondenzatora u impedancijskom krugu qZSI-a, već na DC sabirnicu. Upravljački sustav podrazumijeva rad mikromreže u otočnom režimu ili u spoju s mrežom. Bez obzira na režim rada, uvijek je aktivna regulacija d i q komponenti izlazne struje qZSI-a. Promjenom režima rada samo se mijenja izvor reference spomenutih struja. Na temelju izlazne veličine regulatora struja generiraju se upravljački impulsi koristeći SPWM, uključujući i prostrijelna stanja, koja su zadana prema metodi maksimalnog konstantnog pojačanja. Pojednostavljena struktura upravljačkog sustava prikazana je na slici 7.3b.

U radu mikromreže sa spojem na mrežu, sklopka odabira na slici 7.3b nalazi se u pozicijama „1“ ili „2“. U poziciji „1“, aktivna je regulacija DC napona mikromreže, koja se izvodi PI regulatorom čija je upravljačka veličina referenca d komponente izlazne struje qZSI-a (i_d). Referenca q komponente struje (i_q) se u tom slučaju može neovisno postaviti. U poziciji „2“, reference struja se zadaju s obzirom na željene vrijednosti snaga P i Q . U ovom slučaju, regulaciju DC napona mikromreže izvide distribuirani izvori i SPE-ovi povezani na DC podsustav. U slučaju rada mikromreže u otočnom režimu, sklopka odabira nalazi se u pozicijama „0“ ili „3“. U poziciji „0“, aktivna je regulacija d i q komponenti napona AC podsustava (u_d , u_q), kojom se zadaju reference izlazne struje qZSI-a. U poziciji „3“, mikromrežom se upravlja dijeljenjem snage koristeći *droop* metodu. Dijeljenje snage je aktivno za AC i DC podsustave te je za svaki definirana *droop* karakteristika. Na temelju vrijednosti

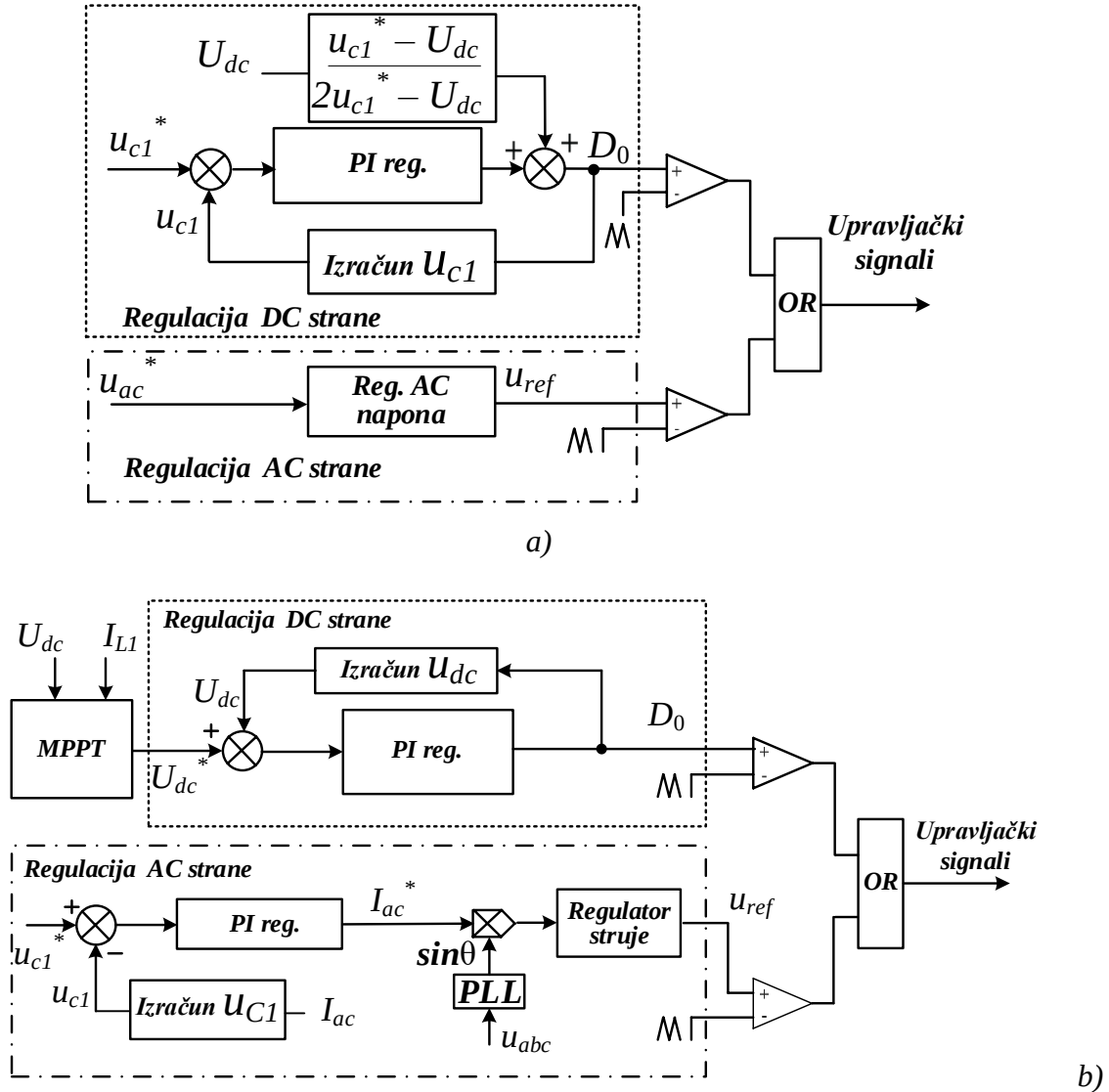
napona DC podsustava (U_{dc}) i DC *droop* karakteristike, definirana je snaga P_{DC-IC} , koja predstavlja snagu koja ulazi u qZSI na DC sabirnici. Isto tako, AC *droop* karakteristikom i frekvencijom AC podsustava (f_{ac}) definirana je snaga P_{AC-IC} , koja predstavlja snagu koja izlazi iz qZSI-a u AC podsustav. Razlikom snaga $P_{AC-IC} - P_{DC-IC}$ određen je signal greške na ulazu u PI regulator koji zadaje referencu struje i_d . Dok je aktivno dijeljenje snage, referenca struje i_q je postavljena na nulu kako bi se smanjili gubici ILC-a.



Slika 7.3 (a) Topologija hibridne mikromreže s dvosmjernim qZSI-om u funkciji ILC-a, (b) pojednostavljena struktura upravljačkog sustava

U radu [187], korišten je qZSI napajan iz PV panela koji ima mogućnost napajanja lokalnih trošila, ili rad u spoju s mrežom. Uzevši u obzir definiciju mikromreže iz uvodnog poglavlja, može se reći da razmatrani sustav predstavlja mikromrežu jer ima vlastiti distribuirani izvor, lokalna trošila te mogućnost rada u otočnom režimu ili sa spojem na mrežu. Autori su predložili upravljački sustav s dvije regulacijske strategije, posebno za otočni režim rada i za spoj na mrežu. U otočnom režimu rada, regulacija amplitude i frekvencije napona trošila (u_{ac}) izvedena je regulacijom naponskih veličina u stacionarnom koordinatnom sustavu, a autori samo navode kako je za to korišten neki od konvencionalnih tipova regulatora. Upravljačka veličina regulatora napona trošila su referentni signali (u_{ref}) SPWM-a. Napon kondenzatora C_1 u impedancijskom krugu (u_{C1}) održava se na zadanoj konstantnoj vrijednosti, koja mora biti veća od dvostruke amplitudne vrijednosti izlaznog napona. Na taj način se raspoređuje djelovanje faktora D_0 i indeksa amplitudne modulacije M . Kako bi se napon u_{C1} zadržao na zadanoj vrijednosti, regulatorom se zadaje faktor D_0 , čijom se promjenom, uz fiksni napon na izlazu qZSI-a, ujedno mijenja napon U_{dc} , pomičući tako radnu točku PV-a. Snaga PV-a u postignutoj

stacionarnoj radnoj točki mora odgovarati zbroju snage trošila i gubitaka sustava. U spoju s mrežom implementiran je MPPT algoritam za PV panele. Izlazna veličina MPPT algoritma je referentni iznos napona U_{dc} , koji se regulira zadavanjem faktora D_0 . Regulacija AC strane izmjenjivača se sada zasniva na regulaciji napona u_{C1} koji se ponovno regulira na konstantnu vrijednost. Kako je sada napon U_{dc} definiran MPPT-om, reguliranjem napona u_{C1} izlazna snaga se prilagođava kako bi se zadržala ravnoteža u sustavu. Izlazna veličina regulatora napona u_{C1} je amplituda referenci izlaznih struja qZSI-a (I_{ac}^*).



Slika 7.4 Pojednostavljene upravljačke strategije za otočni režim (a) i režim rada u spoju s mrežom (b) [187]

Autori su u radu [188] koristili qZSI za implementaciju strategije virtualnog sinkronog generatora (VSG) u mikromrežu, koja podrazumijeva primjenu energetskog pretvarača za emuliranje stvarnog sinkronog generatora uvođenjem svojstvene inercije i prigušenja, tako pridonoseći stabilnijem radu mikromreže. Primjena ovakvog sustava prvenstveno se odnosi na mikromreže s distribuiranim izvorima, povezanim preko energetskih pretvarača. Upravljački sustav, prikazan na slici 7.5, je izveden na način da se preko D_0 , kaskadnim regulacijskim krugom, regulira napon na kondenzatoru C_1 u impedancijskom krugu. Kako bi se emulirao rad sinkronog generatora u kombinaciji s qZSI-om, prema autorima, zahtjev za snagom iz izvora –

u ovom slučaju je to qZSI – treba biti obrnuto proporcionalan prvoj derivaciji frekvencije mreže. Dakle, povećanjem snage trošila u mikromreži, frekvencija mikromreže će se smanjivati. Prema tome, postavlja se vrijednost izlazne snage VSG-a prema izrazu:

$$P_{VSG} = -k_{vi} \frac{df_{ac}}{dt} + k_{vd} (f_{ac}^* - f_{ac}) \quad (7.1)$$

gdje je: P_{VSG} izlazna snaga VSG-a, f_{ac} frekvencija mikromreže, f_{ac}^* referenca frekvencije mikromreže, k_{vi} konstanta virtualne inercije, k_{vd} konstanta virtualnog prigušenja.

Dakle, sa smanjenjem frekvencije VSG će povećati izlaznu snagu sustava primjenjujući virtualnu inerciju i prigušenje. Referenca izlazne snage koja se prosljeđuje u regulacijski sustav P_{VSG}^* , određena je izrazom:

$$P_{VSG}^* = P_{VSG} + P^* \quad (7.2)$$

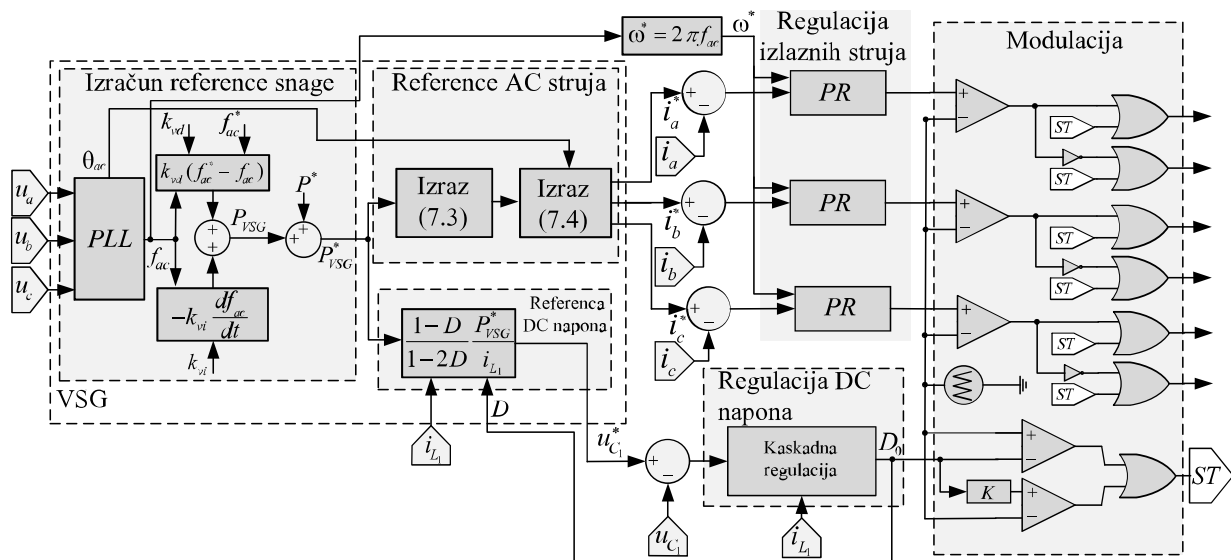
gdje je P^* referenca snage zadana, primjerice, od EMS-a mikromreže.

Na osnovu dobivene reference snage računa se referenca napona u_{c1} kao što je prikazano na slici 7.5, te se zadaju reference izlaznih struja qZSI-a (i_a , i_b , i_c), pri čemu je amplituda ovih struja određena izrazom (7.3). Uz tako definiranu amplitudu struja, referentne vrijednosti struja određene su izrazima (7.4).

$$I_{VSG} = \frac{P_{VSG}^*}{\hat{U}_{ac}} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} i_a^* &= I_{VSG} \sin(\theta_{ac}), \\ i_b^* &= I_{VSG} \sin\left(\theta_{ac} - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c^* &= I_{VSG} \sin\left(\theta_{ac} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (7.4)$$

gdje je θ_{ac} fazni kut napona mikromreže izračunat PLL algoritmom.



Slika 7.5 Shema VSG strategije primijenjene na qZSI-u

8. ZAKLJUČAK

Mikromreže omogućuju optimalnu integraciju distribuiranih energetskih izvora u distribucijsku mrežu. Izbor topologije mikromreže – istosmjerne, izmjenične ili hibridne – ponajviše je zadan namjenom mikromreže i izvorima koji se na nju povezuju. S druge strane, distribuirani izvori su ponajviše ograničeni raspoloživim resursom, osim ako je riječ o izvorima koji koriste neku vrstu goriva. Hijerarhijska struktura upravljanja mikromrežama i MAS predstavljaju dva osnovna pristupa u strukturiranju upravljanja mikromrežama. U hijerarhijskom pristupu, upravljački zadaci su podijeljeni na više upravljačkih razina (primarna, sekundarna i tercijarna), gdje su više razine nadređene nižim a pripadajući zadaci se izvode s većim vremenskim korakom. Hijerarhijska struktura upravljanja mikromrežama je naslijeđena iz klasičnih energetskih mreža te se zbog učinkovitosti i fleksibilnosti u upravljanju čini najprikladnijom upravljačkom strukturom u kontekstu mikromreža. Sve češće se kombinira i s MAS-om, na način da se MAS uvodi na nižim razinama hijerarhijske strukture. MAS se zasniva na pojedinačnim agentima, koji mogu biti fizički ili virtualni, a neovisno upravljaju zadanim segmentom mikromreže uz komunikaciju s drugim agentima. Granice podjela različitih struktura upravljanja su sve manje vidljive i u literaturi se često koriste kombinacije različitih pristupa. Uloga EMS-a u mikromrežama je ključna za njihov daljnji razvoj. Postizanje ekonomskih i tehničkih ciljeva, tj., optimalno raspolaganje energijom mikromreže, što je cilj EMS-a, čini mikromreže isplativima i privlačnima, a u protivnom, smisao mikromreža bio bi izgubljen. Optimalno raspolaganje energijom izvodi se upravljanjem distribuiranim izvorima, SPE-om i snagom koja se šalje u mrežu, kako bi se maksimalno iskoristio potencijal obnovljivog izvora i minimizirao trošak kupnje električne energije iz mreže. Posebnu pažnju treba posvetiti upravljanju energijom SPE-a, koji mora biti spreman napajati potrošače ukoliko dođe do iznenadnog kvara distribucijske mreže a i spriječiti eventualnu kupovinu energije po nepovoljnoj cijeni.

Povećanje učinkovitosti i cijene rada sustava u konačnici je ipak ograničeno energetskim pretvaračima korištenima za različite uloge u mikromreži. U tom pogledu su posebno zanimljive neke novije topologije koje nude bolju učinkovitost i veće upravljačke sposobnosti, poput SST-a i qZSI-a. Primjena potonjeg pretvarača s distribuiranim izvorima i u mikromrežama posebno je obrađena u ovom radu. qZSI omogućuje povezivanje izvora ili SPE-a niže naponske razine u odnosu na klasične izmjenjivače, bez korištenja dodatnog stupnja pretvorbe, te jednostavniju integraciju baterija. Pritom je moguće neovisno upravljati faktorom trajanja prostrijelnih stanja i indeksom amplitudne modulacije. U literaturi se pomoću faktora trajanja prostrijelnog stanja najčešće regulira ulazni napon qZSI-a, a indeks amplitudne modulacije se koristi za upravljanje izlaznim naponom ili strujom. Tako upravljan qZSI pokazao se odličnim rješenjem za povezivanje PV panela na mrežu ili za napajanje lokalnih trošila.

Upravljanje naponom na ulazu qZSI-a može se iskoristiti za izvođenje MPPT-algoritma. Upravo ovakva primjena qZSI-a je razmatrana u većem broju radova, a na sličan način se može izvesti i MPPT algoritam za WECS s PMSG-om. Povezivanje baterija na qZSI najčešće se izvodi paralelno s kondenzatorom C_2 , iako je u literaturi korišteno i povezivanje paralelno s C_1 , čime se omogućuje rad qZSI i u slučaju da nestane napajanja na DC ulazu bez prespajanja baterija, ali je potreban veći napon baterija. Raspolaganje energijom sustava s qZSI-om i baterijama svodi se na balansiranje energije izvora, trošila i baterija. S dva stupnja slobode upravljanja, qZSI se može koristiti u primjeni s mikromrežom, gdje se, primjerice, istovremeno može regulirati AC napon ili struja i DC napon ili tok snage u i iz baterija. Nemogućnost toka snage od AC strane prema DC stran kod osnovne topologije qZSI-a razlog je veće zastupljenosti dvosmjernog qZSI-a u mikromrežama u literaturi. Iz razmatranih radova se može zaključiti da

se pravilnim raspolaganjem snagom iz izvora i baterija, uz primjenu odgovarajuće upravljačke strategije, može postići stabilan rad mikromreže s qZSI-om kako u otočnom radu tako i u spoju s mrežom.

Iako su se istraživanja u području mikromreža intenzivirala proteklih desetak godina, ipak još uvijek preostaju određeni izazovi koje je potrebno riješiti kako bi se omogućila jednostavnija implementacija održivih strategija upravljanja. Problem stvara raznolikost distribuiranih izvora, njihova nepredvidivost i brza dinamika, veliki broj različitih energetske pretvarača, manjak inercije i sl. Kako bi se riješili navedeni problemi i mikromreže ostvarile svoj potencijal, daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena prema razvijanju strategija upravljanja kojima se ispunjavaju višestruki ciljevi, poput zadovoljavajuće kvalitete električne energije, ekonomske isplativosti i slično. Još neke od smjernica su potreba za razvojem upravljačke strukture za nesmetan prijelaz između radnih režima (otočni režim, spoj na mrežu), realizacija mogućnosti prepoznavanja rizičnih radnih režima mikromreže, realizacija mogućnost postizanja optimalnog toka snage upravljanjem na razini distribuiranih izvora, postavljanje naglaska na provjeru stabilnosti mikromreža tijekom testiranja strategija upravljanja pri čemu analizu treba proširiti i na prijelazne pojave te integriranje sposobnosti ograničenja kvarnih stanja u upravljački sustav mikromreže.

9. LITERATURA

- [1] Hannah Ritchie; Roser, M.: "How much of our electricity comes from low-carbon sources?", s Interneta, <https://ourworldindata.org/electricity-mix#how-much-of-our-electricity-comes-from-low-carbon-sources>, 5.9.2021.
- [2] Hannah Ritchie; Roser, M.: "Electricity Mix", s Interneta, <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels>, 5.9.2021.
- [3] Ciucci, M.; Keravec, A.: "Energija iz obnovljivih izvora", s Interneta, <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/70/energija-iz-obnovljivih-izvora>, 5.9.2021.
- [4] Hannah Ritchie; Roser, M.: "Energy mix: what sources do we get our energy from?", s Interneta, <https://ourworldindata.org/energy-mix#energy-mix-what-sources-do-we-get-our-energy-from>, 5.9.2021.
- [5] Karger, C.; Hennings, W.: "Sustainability evaluation of decentralized electricity generation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 583-593, 2009.
- [6] Hammons, T.; Styczynski, Z.: "Europe: Impact of Dispersed Generation on Power System Structure and Secure Power System Operation", *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-5, 2007.
- [7] Reliability, D. o. E. O. o. E. a. E.: "Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop". 2012. p. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2012%20Microgrid%20Workshop%20Report%2009102012.pdf>.
- [8] Hatziargyriou, N.: "Microgrids: Architectures and Control", WileyIEEE Press, 2013.
- [9] "Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 111/18)". 2018, Narodne novine d.d.
- [10] Symposium, M.: "UC San Diego Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/uc-san-diego-microgrid/>, 2.9.2021.
- [11] Symposium, M.: "Isle of Eigg Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/isle-of-eigg-microgrid/>, 2.9.2021.
- [12] Symposium, M.: "MVV Mannheim-Wallstadt Microgrid", s Interneta, <https://microgrid-symposiums.org/microgrid-examples-and-demonstrations/mvv-mannheim-wallstadt-microgrid/>, 2.9.2021.
- [13] Fang Zheng, P.: "Z-source inverter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 2, pp. 504-510, 2003.

- [14] Anderson, J.; Peng, F. Z.: "Four quasi-Z-Source inverters", *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2743-2749, 2008.
- [15] Shrivastwa, R. R. i dr.: "Understanding Microgrids and Their Future Trends", *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 1723-1728, 2019.
- [16] 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*, Vol. 26, No. 3, pp. 877-885, 2011.
- [17] Hakala, T.; Lähdeaho, T.; Komsu, R.: "LVDC PILOT IMPLEMENTATION IN PUBLIC DISTRIBUTION NETWORK", 2015.
- [18] 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*, pp. 32-39, 2007.
- [19] 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)*, pp. 1-5, 2012.
- [20] Kwasinski, A.: "Advanced power electronics enabled distribution architectures: Design, operation, and control", *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, pp. 1484-1491, 2011.
- [21] 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*, pp. 1-6, 2010.
- [22] Whaite, S.; Grainger, B.; Kwasinski, A.: "Power Quality in DC Power Distribution Systems and Microgrids", *Energies*, Vol. 8, No. 5, pp. 4378-4399, 2015.
- [23] Rajagopalan, S.; Fortenbery, B.; Symanski, D.: "Power quality disturbances within DC data centers", *Intelec 2010*, pp. 1-7, 2010.
- [24] 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*, Vol. 23, No. 3, pp. 860-867, 2008.
- [25] Kakigano, H.; Miura, Y.; Ise, T.: "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 3066-3075, 2010.
- [26] Balog, R. S.; Krein, P. T.: "Bus Selection in Multibus DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, pp. 860-867, 2011.
- [27] Dragicevic, T. i dr.: "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks", *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, No. 1, pp. 54-65, 2014.

- [28] Shafiee, Q. i dr.: "Hierarchical Control for Multiple DC-Microgrids Clusters", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, pp. 922-933, 2014.
- [29] Shafiee, Q. i dr.: "Modeling, stability analysis and active stabilization of multiple DC-microgrid clusters", *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pp. 1284-1290, 2014.
- [30] She, X. i dr.: "On Integration of Solid-State Transformer With Zonal DC Microgrid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 2, pp. 975-985, 2012.
- [31] Dong, D. i dr.: "Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems—Part One: High-Density Two-Stage Topology", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 4, pp. 1655-1666, 2013.
- [32] Dragičević, T. i dr.: "Flywheel-Based Distributed Bus Signalling Strategy for the Public Fast Charging Station", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 6, pp. 2825-2835, 2014.
- [33] Rivera, S. i dr.: "Electric Vehicle Charging Station Using a Neutral Point Clamped Converter With Bipolar DC Bus", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 4, pp. 1999-2009, 2015.
- [34] Hredzak, B.; Agelidis, V. G.; Jang, M.: "A Model Predictive Control System for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Power Source", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 3, pp. 1469-1479, 2014.
- [35] Valderrama-Blavi, H. i dr.: "Power Adaptor Device for Domestic DC Microgrids Based on Commercial MPPT Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 3, pp. 1191-1203, 2013.
- [36] Mardani, M. M. i dr.: "Model Predictive Control of DC–DC Converters to Mitigate the Effects of Pulsed Power Loads in Naval DC Microgrids", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 7, pp. 5676-5685, 2019.
- [37] Arulampalam, A. i dr.: "Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids", *International Journal of Electronics*, Vol. 91, No. 9, pp. 503-523, 2004.
- [38] Salomonsson, D.; Sannino, A.: "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, pp. 1620-1627, 2007.
- [39] Jha, S. K.; Kumar, D.; Lehtonen, M.: "Modified V-I droop based adaptive vector control scheme for demand side management in a stand-alone microgrid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 130, pp. 106950, 2021.
- [40] Hatti, M.; Meharrar, A.; Tioursi, M.: "Power management strategy in the alternative energy photovoltaic/PEM Fuel Cell hybrid system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 9, pp. 5104-5110, 2011.

- [41] Arai, J. i dr.: "Power electronics and its applications to renewable energy in Japan", IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 8, No. 3, pp. 52-66, 2008.
- [42] Chandrasena, R. P. S. i dr.: "Dynamic operation and control of a hybrid nanogrid system for future community houses", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 11, pp. 1168-1178, 2015.
- [43] Patrao, I. i dr.: "Microgrid architectures for low voltage distributed generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, pp. 415-424, 2015.
- [44] 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, Vol. 122, pp. 488-503, 2016.
- [45] Nejabatkhah, F.; Li, Y. W.: "Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 12, pp. 7072-7089, 2015.
- [46] Gupta, A.; Doolla, S.; Chatterjee, K.: "Hybrid AC–DC Microgrid: Systematic Evaluation of Control Strategies", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3830-3843, 2018.
- [47] Unamuno, E.; Barrena, J. A.: "Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, pp. 1251-1259, 2015.
- [48] Fang, S. i dr.: "Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 69, No. 1, pp. 207-219, 2020.
- [49] El-Khattam, W.; Salama, M. M. A.: "Distributed generation technologies, definitions and benefits", Electric Power Systems Research, Vol. 71, No. 2, pp. 119-128, 2004.
- [50] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", IEEE Std 1547-2003, pp. 1-28, 2003.
- [51] Taylor, T. M.; Willis, H. L.; Engel, M. V.: "New considerations for distribution network planning and design", *14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1. Contributions (IEE Conf. Publ. No. 438)*, Vol. 6, pp. 1/1-1/5 vol.6, 1997.
- [52] Ackermann, T.; Andersson, G.; Söder, L.: "Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research, Vol. 57, No. 3, pp. 195-204, 2001.
- [53] Ackermann, T.; Andersson, G.; Soder, L.: "Electricity market regulations and their impact on distributed generation", *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No.00EX382)*, pp. 608-613, 2000.
- [54] Carpinelli, G. i dr.: "Distributed generation siting and sizing under uncertainty", *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, Vol. 4, pp. 7 pp. vol.4, 2001.

- [55] Rob van Gerwent, K.: "Distributed generation and renewable", Introduction power quality and utilization guide.
- [56] Hernandez, J. A.; Velasco, D.; Trujillo, C. L.: "Analysis of the effect of the implementation of photovoltaic systems like option of distributed generation in Colombia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, pp. 2290-2298, 2011.
- [57] Nadarajah, M.; Oo, T.; Vãn Phú, L.: "Distributed generator placement in power distribution system using genetic algorithm to reduce losses", *The Thammasat International Journal of Science and Technology*, Vol. 9, 2004.
- [58] Nabuurs, P.; Vaessen, P.: "Dispersed generation and system structure - the crucial exchange layer", *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 4 pp., 2006.
- [59] Kumpulainen, L. K.; Kauhaniemi, K. T.: "Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing", *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, pp. 603-608 vol.1, 2004.
- [60] Sahebkar Farkhani, J. i dr.: "Impact of Recloser on Protecting Blind Areas of Distribution Network in the Presence of Distributed Generation", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 23, 2019.
- [61] Akorede, M. F.; Hizam, H.; Pouresmaeil, E.: "Distributed energy resources and benefits to the environment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 2, pp. 724-734, 2010.
- [62] 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*, Vol. 2018, pp. 8307563, 2018.
- [63] 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*, Vol. 7, No. 1, pp. 9-33, 2021.
- [64] Zeb, K. i dr.: "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94, pp. 1120-1141, 2018.
- [65] Hemetsberger, W.; Beauvais, A.; Schmela, M.: "SolarPower Europe's EU Market Outlook for Solar Power 2020–2024.", s Interneta, <https://www.solarpowereurope.org/european-market-outlook-for-solar-power-2020-2024/>, 30.4.2021.
- [66] Bacha, S. i dr.: "Photovoltaics in Microgrids: An Overview of Grid Integration and Energy Management Aspects", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 9, No. 1, pp. 33-46, 2015.
- [67] Rashad, A.; Kamel, S.; Jurado, F.: "The Basic Principles of Wind Farms", *Distributed Generation Systems*. 2017. p. 21-67.

- [68] Dhoub, B.; Kahouli, A.; Abdallah, H. H.: "Dynamic behavior of grid-connected fixed speed wind turbine based on proportional-integral pitch controller and fault analysis", *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, pp. 1-7, 2017.
- [69] Li, H.; Chen, Z.: "Overview of different wind generator systems and their comparisons", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 2, No. 2, pp. 123-138, 2008.
- [70] 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*, Vol. 56, No. 5, pp. 4689-4699, 2020.
- [71] 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*, Vol. 32, No. 12, pp. 9117-9130, 2017.
- [72] Zhao, H. i dr.: "Adaptive Speed Control of a Small Wind Energy Conversion System for Maximum Power Point Tracking", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 3, pp. 576-584, 2014.
- [73] 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*, Vol. 1, No. 4, pp. 238-246, 2013.
- [74] Goel, P. K. i dr.: "Isolated Wind-Hydro Hybrid System Using Cage Generators and Battery Storage", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1141-1153, 2011.
- [75] Ardizzon, G.; Cavazzini, G.; Pavesi, G.: "A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 746-761, 2014.
- [76] Mohibullah, M.; Radzi, A. M.; Hakim, M. I. A.: "Basic design aspects of micro hydro power plant and its potential development in Malaysia", *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004.*, pp. 220-223, 2004.
- [77] Okot, D. K.: "Review of small hydropower technology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, pp. 515-520, 2013.
- [78] Adhau, S. P.; Moharil, R. M.; Adhau, P. G.: "Mini-hydro power generation on existing irrigation projects: Case study of Indian sites", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4785-4795, 2012.
- [79] Ferreira, J. H. I. i dr.: "Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 380-387, 2016.
- [80] Zhang, Z. i dr.: "Highly applicable small hydropower microgrid operation strategy and control technology", *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 3179-3191, 2020.
- [81] Cook, B.: "Introduction to fuel cells and hydrogen technology", *Engineering Science and Education Journal*, Vol. 11, pp. 205-216, 2002.

- [82] 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*, Vol. 1, pp. 98-102, 2006.
- [83] US Department of Energy: "Comparison of Fuel Cell Technologies ". 2021. p. https://web.archive.org/web/20130301120203/http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc_comparison_chart.pdf.
- [84] Valverde, L.; Bordons, C.; Rosa, F.: "Integration of Fuel Cell Technologies in Renewable-Energy-Based Microgrids Optimizing Operational Costs and Durability", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp. 167-177, 2016.
- [85] Gaonkar, D. N.; Patel, R. N.; Pillai, G. N.: "Dynamic Model of Microturbine Generation System for Grid Connected/Islanding Operation", *2006 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 305-310, 2006.
- [86] Bertani, A. i dr.: "A microturbine generation system for grid connected and islanding operation", *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, pp. 360-365 vol.1, 2004.
- [87] Zhu, Y.; Tomsovic, K.: "Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells", *Electric Power Systems Research*, Vol. 62, No. 1, pp. 1-11, 2002.
- [88] Al-Hinai, A.; Feliachi, A.: "Dynamic model of a microturbine used as a distributed generator", *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory (Cat. No.02EX540)*, pp. 209-213, 2002.
- [89] Gaonkar, D. N.; Patel, R. N.: "Modeling and simulation of microturbine based distributed generation system", *2006 IEEE Power India Conference*, pp. 5 pp., 2006.
- [90] Guda, S. R.; Wang, C.; Nehrir, M. H.: "A Simulink-based microturbine model for distributed generation studies", *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005.*, pp. 269-274, 2005.
- [91] Hatziargyriou, N. i dr.: "Modelling of micro-sources for security studies", 2004.
- [92] Rasul, M. G.; Ault, C.; Sajjad, M.: "Bio-gas Mixed Fuel Micro Gas Turbine Co-Generation for Meeting Power Demand in Australian Remote Areas", *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 1065-1071, 2015.
- [93] Das, I.; Canizares, C. A.: "Renewable Energy Integration in Diesel-Based Microgrids at the Canadian Arctic", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 107, No. 9, pp. 1838-1856, 2019.
- [94] Kant, K.; Jain, C.; Singh, B.: "A Hybrid Diesel-Wind-PV-Based Energy Generation System With Brushless Generators", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 4, pp. 1714-1722, 2017.
- [95] Tiwari, S. K.; Singh, B.; Goel, P. K.: "Control of Wind–Diesel Hybrid System With BESS for Optimal Operation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, No. 2, pp. 1863-1872, 2019.

- [96] Aghamohammadi, M. R.; Abdolahinia, H.: "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded Microgrid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 325-333, 2014.
- [97] D'Iaz-Gonzalez, F. i dr.: "Control of a Flywheel Energy Storage System for Power Smoothing in Wind Power Plants", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, 2013.
- [98] Bragard, M. i dr.: "The Balance of Renewable Sources and User Demands in Grids: Power Electronics for Modular Battery Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 3049-3056, 2010.
- [99] Brown, P. D.; Lopes, J. A. P.; Matos, M. A.: "Optimization of Pumped Storage Capacity in an Isolated Power System With Large Renewable Penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 523-531, 2008.
- [100] Akhil, A. A., Huff, Georgianne, Currier, Aileen B., Hernandez, Jacquelynne, Bender, Donald Arthur, Kaun, Benjamin C., Rastler, Dan M., Chen, Stella Bingqing, Cotter, Andrew L., Bradshaw, Dale T., Gauntlett, William D., Eyer, James, Olinsky-Paul, Todd, Ellison, Michelle, and Schoenung, Susan.: "DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA", 2016.
- [101] 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)*, pp. 1-6, 2020.
- [102] Ter-Gazarian, A. G.: "Energy Storage for Power Systems", 2020.
- [103] Chen, H. i dr.: "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 291-312, 2009.
- [104] Alegria, E. i dr.: "CERTS Microgrid Demonstration With Large-Scale Energy Storage and Renewable Generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 937-943, 2014.
- [105] Veszpremi, K.; Schmidt, I.: "Flywheel Energy Storage Drive for Wind Turbines", *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 916-923, 2007.
- [106] Arani, A. A. K. i dr.: "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 9-18, 2017.
- [107] Raju, M.; Kumar Khaitan, S.: "Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant", *Applied Energy*, Vol. 89, No. 1, pp. 474-481, 2012.
- [108] Steinmann, W.-D.: "Thermo-mechanical concepts for bulk energy storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 205-219, 2017.

- [109] Alto, P.: "Results from case studies of pumped-storage plants", EPRI ID 10231422012, 2012.
- [110] Dunn, B.; Kamath, H.; Tarascon, J.-M.: "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices", *Science*, Vol. 334, No. 6058, pp. 928, 2011.
- [111] Wang, G. i dr.: "Solid-State Supercapacitor Based on Activated Carbon Cloths Exhibits Excellent Rate Capability", *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 17, pp. 2676-2682, 2014.
- [112] Farhadi, M.; Mohammed, O.: "Energy Storage Technologies for High-Power Applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 3, pp. 1953-1961, 2016.
- [113] Crider, J. M.; Sudhoff, S. D.: "Reducing Impact of Pulsed Power Loads on Microgrid Power Systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 270-277, 2010.
- [114] Pflieger, N. i dr.: "Thermal energy storage - overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage", *Beilstein J Nanotechnol*, Vol. 6, pp. 1487-97, 2015.
- [115] Rachel Carnegie, D. G., David Nderitu, Paul V. Preckel: "Utility Scale Energy Storage Systems: Benefits, Applications, and Technologies", State Utility Forecasting Group 2013.
- [116] Guerrero, J. M. i dr.: "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 1, pp. 158-172, 2011.
- [117] Mesarovic, M. i dr.: "Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems", 1970.
- [118] Guerrero, J. M. i dr.: "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 4, pp. 1254-1262, 2013.
- [119] Guerrero, J. M. i dr.: "Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 3, pp. 726-736, 2009.
- [120] Blaabjerg, F. i dr.: "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 5, pp. 1398-1409, 2006.
- [121] Katiraei, F.; Iravani, M. R.; Lehn, P. W.: "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, 2005.
- [122] Kawabata, T.; Higashino, S.: "Parallel operation of voltage source inverters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 24, No. 2, pp. 281-287, 1988.

- [123] Pascual, M. i dr.: "Robust Model-Following Control of Parallel UPS Single-Phase Inverters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 8, pp. 2870-2883, 2008.
- [124] De Brabandere, K. i dr.: "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1107-1115, 2007.
- [125] Fang, G.; Iravani, M. R.: "A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, pp. 850-859, 2008.
- [126] 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, Vol. 19, No. 5, pp. 1195-1204, 2004.
- [127] Olivares, D. E. i dr.: "Trends in Microgrid Control", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, 2014.
- [128] Parhizi, S. i dr.: "State of the Art in Research on Microgrids: A Review", IEEE Access, Vol. 3, pp. 890-925, 2015.
- [129] Bidram, A.; Davoudi, A.: "Hierarchical Structure of Microgrids Control System", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1963-1976, 2012.
- [130] Chuang, A.; McGranaghan, M.; Grady, M.: "Master Controller Requirements Specification for Perfect Power Systems", 2007.
- [131] Lopes, J. A. P.; Moreira, C. L.; Madureira, A. G.: "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, 2006.
- [132] Zamora, R.; Srivastava, A. K.: "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 7, pp. 2009-2018, 2010.
- [133] Lou, G. i dr.: "Decentralised secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrid based on adaptive state estimator", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 15, pp. 3683-3693, 2017.
- [134] Madureira, A.; Moreira, C.; Lopes, J. A.: "Secondary Load-Frequency Control for Microgrids in Islanded Operation", 2005.
- [135] Shafiee, Q.; Guerrero, J. M.; Vasquez, J. C.: "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, pp. 1018-1031, 2014.
- [136] Bidram, A.; Davoudi, A.; Lewis, F. L.: "A Multiobjective Distributed Control Framework for Islanded AC Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 3, pp. 1785-1798, 2014.

- [137] Vasiljevska, J.; Peças Lopes, J. A.; Matos, M. A.: "Evaluating the impacts of the multi-microgrid concept using multicriteria decision aid", *Electric Power Systems Research*, Vol. 91, pp. 44-51, 2012.
- [138] Palma-Behnke, R. i dr.: "A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 2, pp. 996-1006, 2013.
- [139] Balaji, P. G.; Srinivasan, D.: "An Introduction to Multi-Agent Systems", *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications - 1*. 2010. p. 1-27.
- [140] Dimeas, A. L.; Hatziargyriou, N. D.: "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 1447-1455, 2005.
- [141] 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*, pp. 1-7, 2011.
- [142] Han, Y. i dr.: "MAS-Based Distributed Coordinated Control and Optimization in Microgrid and Microgrid Clusters: A Comprehensive Overview", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 8, pp. 6488-6508, 2018.
- [143] Ourahou, M. i dr.: "Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 167, pp. 19-31, 2020.
- [144] Dragicevic, T. i dr.: "DC Microgrids–Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques", *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1-1, 2015.
- [145] Rocabert, J. i dr.: "Control of Power Converters in AC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4734-4749, 2012.
- [146] Arul, P. G.; Ramachandaramurthy, V. K.; Rajkumar, R. K.: "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 597-608, 2015.
- [147] Cruz May, E. i dr.: "Forecast and Energy Management of a Microgrid with Renewable Energy Sources Using Artificial Intelligence", *Intelligent Computing Systems*. 2018. p. 81-96.
- [148] Rahmani, R.; Moser, I.; Seyedmahmoudian, M.: "Multi-agent based operational cost and inconvenience optimization of PV-based microgrid", *Solar Energy*, Vol. 150, pp. 177-191, 2017.
- [149] Ghorbani, S.; Rahmani, R.; Unland, R.: "Multi-agent Autonomous Decision Making in Smart Micro-Grids' Energy Management: A Decentralized Approach", *Multiagent System Technologies*. 2017. p. 223-237.
- [150] Kamala Devi, V.; Premkumar, K.; Bisharathu Beevi, A.: "Energy management using battery intervention power supply integrated with single phase solar roof top installations", *Energy*, Vol. 163, pp. 229-244, 2018.

- [151] Leo, R.; Morais, A. A.: "Multi-Agent Systems Based Advanced Energy Management of Smart Micro-grid". 2020.
- [152] Kneiske, T. M.; Braun, M.; Hidalgo-Rodriguez, D. I.: "A new combined control algorithm for PV-CHP hybrid systems", *Applied Energy*, Vol. 210, pp. 964-973, 2018.
- [153] 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. p. 267-279.
- [154] 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)*, pp. 494-498, 2016.
- [155] Prinsloo, G.; Mammoli, A.; Dobson, R.: "Discrete cogeneration optimization with storage capacity decision support for dynamic hybrid solar combined heat and power systems in isolated rural villages", *Energy*, Vol. 116, pp. 1051-1064, 2016.
- [156] Luo, Z. i dr.: "A robust optimization method for energy management of CCHP microgrid", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 132-144, 2017.
- [157] Ansari, S.; Chandel, A.; Tariq, M.: "A Comprehensive Review on Power Converters Control and Control Strategies of AC/DC Microgrid", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 17998-18015, 2021.
- [158] Kouro, S. i dr.: "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-61, 2015.
- [159] Abdi, H. i dr.: "Energy Storage Systems", *Distributed Generation Systems*. 2017. p. 333-368.
- [160] Wang, G. i dr.: "A Review of Power Electronics for Grid Connection of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1778-1790, 2016.
- [161] 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*, Vol. 8, No. 2, pp. 305-314, 2020.
- [162] Sahoo, M.; Kumar, K. S.: "Bidirectional switched boost converter for AC-DC hybrid microgrid", *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, pp. 2231-2236, 2014.
- [163] Loh, P. C. i dr.: "Autonomous Control of Interlinking Converter With Energy Storage in Hybrid AC–DC Microgrid", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 3, pp. 1374-1382, 2013.

- [164] Naderi, M. i dr.: "Interconnected Autonomous AC Microgrids via Back-to-Back Converters—Part I: Small-Signal Modeling", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 5, pp. 4728-4740, 2020.
- [165] Rehman, A.; Ashraf, M.: "Design and Analysis of PWM Inverter for 100KVA Solid State Transformer in a Distribution System", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 140152-140168, 2019.
- [166] Falcones, S.; Mao, X.; Ayyanar, R.: "Topology comparison for Solid State Transformer implementation", *IEEE PES General Meeting*, pp. 1-8, 2010.
- [167] Arboleya, P. i dr.: "Hierarchical coordination of a hybrid AC/DC smartgrid with central/distributed energy storage", *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1-7, 2016.
- [168] Nair, A. C.; Fernandes, B. G.: "A novel multi-port solid state transformer enabled isolated hybrid microgrid architecture", *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 651-656, 2017.
- [169] Bayhan, S. i dr.: "Power electronic converters and control techniques in AC microgrids", *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6179-6186, 2017.
- [170] Dragičević, T. i dr.: "Control of Power Converters in ac and dc Microgrids", *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. 2019. p. 1-23.
- [171] 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*, pp. 105-111, 2006.
- [172] Yushan Liu i dr.: "Impedance Source Power Electronic Converters", Pondicherry, John Wiley & Sons, 2016.
- [173] Rostami, H.; Khaburi, D. A.: "Voltage gain comparison of different control methods of the Z-source inverter", *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, pp. I-268-I-272, 2009.
- [174] Ellabban, O.; Van Mierlo, J.; Lataire, P.: "Experimental Study of the Shoot-Through Boost Control Methods for the Z-Source Inverter", *EPE Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 18-29, 2015.
- [175] Liu, Y. i dr.: "Overview of Space Vector Modulations for Three-Phase Z-Source/Quasi-Z-Source Inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 2098-2108, 2014.
- [176] 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*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-20, 2013.

- [177] Bašić, M. i dr.: "OPTIMAL POWER FLOW CONTROL IN A STAND-ALONE PV SYSTEM WITH A BATTERY-ASSISTED QUASI-Z-SOURCE INVERTER", 2020.
- [178] 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*, Vol. 177, 2019.
- [179] Priyadarshi, N. i dr.: "Hybrid PV-Wind, Micro-Grid Development Using Quasi-Z-Source Inverter Modeling and Control—Experimental Investigation", *Energies*, Vol. 11, No. 9, pp. 2277, 2018.
- [180] Herizi, O.; Barkat, S.: "Backstepping Control Associated to Modified Space Vector Modulation for Quasi Z-source Inverter Fed by a PEMFC", *European Journal of Electrical Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-132, 2019.
- [181] Liu, Y. i dr.: "Modelling and controller design of quasi-Z-source inverter with battery-based photovoltaic power system", *IET Power Electronics*, Vol. 7, No. 7, pp. 1665-1674, 2014.
- [182] 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*, Vol. 4, No. 4, pp. 994-1001, 2013.
- [183] Liu, Y. i dr.: "Quasi-Z-Source inverter based PMSG wind power generation system", *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 291-297, 2011.
- [184] Khajesalehi, J. i dr.: "High-performance hybrid photovoltaic -battery system based on quasi-Z-source inverter: application in microgrids", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 10, pp. 895-902, 2015.
- [185] 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*, Vol. 10, No. 4, pp. 938-948, 2016.
- [186] 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)*, pp. 458-463, 2014.
- [187] Li, Y. i dr.: "Modeling and Control of Quasi-Z-Source Inverter for Distributed Generation Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 4, pp. 1532-1541, 2013.
- [188] Díaz, M. A. i dr.: "A Virtual Synchronous Generator Strategy for a Grid-Connected qZSI", *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 1, pp. 4985-4990, 2019.

POPIS OZNAKA I KRATICA

B	faktor pojaćanja izmjenjivaća kvazi Z-tipa
$\cos \varphi$	faktor snage
C_{dc}	kondenzator na ulazu izmjenjivaća
C_1, C_2	kapaciteti kondenzatora u istosmjernom krugu izmjenjivaća kvazi Z-tipa
D	dioda u istosmjernom krugu izmjenjivaća kvazi Z-tipa
DFIG	dvostruko napajani klizno-kolutni asinkroni generator
D_{pv}	dioda u modelu fotonaponskog panela
D_0	faktor trajanja prostrijelnog stanja
EMS	sustav za raspolaganje energijom
engl.	Engleski
f_{ac}	frekvencija napona i struje mreže
G	naponsko pojaćanje izmjenjivaća kvazi Z-tipa
HVAC	visokonaponski AC (sustav)
HVDC	visokonaponski DC (sustav)
HC	harmonički kompenzator
i_a, i_b, i_c	trenutne vrijednosti faznih struja na izlazu izmjenjivaća
I_{ac}	efektivna vrijednost struje na izlazu izmjenjivaća
i_{bat}	trenutna vrijednost struje baterija
I_{bat}	srednja vrijednost struje baterija
i_{C1}, i_{C2}	trenutne vrijednosti struja kroz kondenzatore u istosmjernom krugu izmjenjivaća
i_α, i_β	trenutne vrijednosti faznih struja u stacionarnom koordinatnom sustavu
i_d, i_q	trenutne vrijednosti faznih struja u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
i_α^*, i_β^*	trenutne vrijednosti referentnih faznih struja u stacionarnom koordinatnom sustavu
i_d^*, i_q^*	trenutne vrijednosti referentnih faznih struja u sinkrono rotirajućem koordinatnom sustavu
i_D	trenutna vrijednost struje diode u istosmjernom krugu izmjenjivaća
i_{L1}, i_{L2}	trenutne vrijednosti struja kroz prigušnice u istosmjernom krugu izmjenjivaća
IEEE	institut inženjera elektrotehnike i elektronike
IFC	interfacing converter
ILC	inerlinking converter
i_{pn}	trenutna vrijednost struje na ulazu u most izmjenjivaća
I_{pv}	struja fotonaponskog panela
k_{ii}	integracijsko pojaćanje regulatora

k_{pi}	proporcionalno pojačanje regulatora
K_P, K_R	parametri proporcionalno-rezonantnog regulatora
L_f	induktivitet prigušnica u filtru koji je spojen na izlaz izmjenjivača
LVAC	niskonaponski AC (sustav)
LVDC	niskonaponski DC (sustav)
L_1, L_2	induktiviteti prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača kvazi Z-tipa
M	indeks amplitudne modulacije izmjenjivača
MAS	multi agent sustav
MPPT	algoritam za praćenje točke maksimalne snage
NPF	nisko-propusni filter
P	radna snaga
OIE	obnovljivi izvori energije
PWM	pulsno-širinska modulacija
PMSG	sinkroni generator s permanentnim magnetima
P_{ac}	radna snaga koja se predaje u mrežu
P_b	snaga baterija
PCC	točka zajedničkog spoja s mrežom
P_d	snaga pomoćnog trošila
$P_{d(max)}$	maksimalna dopuštena snaga pomoćnog trošila
PI	proporcionalno integralni
P_{pv}	snaga fotonaponskog panela
P_L	snaga trošila
PLL	fazno zatvorena petlja
P_{VSG}	snaga virtualnog sinkronog generatora
P_w	izlazna snaga vjetroagregata
P&O	pomak i promatranje
R_{C1}, R_{C2}	unutarnji radni otpori kondenzatora u istosmjernom krugu izmjenjivača
R_{L1}, R_{L2}	unutarnji radni otpori prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača
R_f	unutarnji radni otpor prigušnica spojenih na izlaz izmjenjivača
s	kompleksna varijabla Laplaceove transformacije
SBC	switched boost pretvarač
SCIG	kavezni asinkroni generator
SEPIC	single ended primary inductance converter
SOC	stanje napunjenosti baterija
SOC_{max}	maksimalno dopušteno stanje napunjenosti baterija

SOC_{min}	minimalno dopušteno stanje napunjenosti baterija
SPE	sustavi porane energije
SPWM	sinusna pulsno-širinska modulacija
SST	poluvodički transformator
SVPWM	vektorska pulsno-širinska modulacija
ST	signal prostrijelnog stanja
T_r	oznaka tranzistora u mostu izmjenjivača
T_{sw}	period sklapanja sklopki izmjenjivača
T_0	period prostrijelnog stanja
u_{ac}	trenutna vrijednost faznog napona na izlazu izmjenjivača kvazi Z-tipa
$\hat{U}_{ac}$	vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na izlazu izmjenjivača
U_{ac}	efektivna vrijednost vrijednost faznog napona na izlazu izmjenjivača
u_a, u_b, u_c	trenutne vrijednosti faznih napona mreže
u_α, u_β	trenutne vrijednosti faznih napon mreže u stacionarnom koordinatnom sustavu
u_b	trenutne vrijednosti napona baterija
u_{C1}, u_{C2}	trenutne vrijednosti napona na kondenzatorima u istosmjernom krugu izmjenjivača
u_D	trenutna vrijednost pada napona na diodi u istosmjernom krugu izmjenjivača
U_{dc}	srednja vrijednost ulaznog napona izmjenjivača kvazi Z-tipa
u_{dc}	trenutna vrijednost ulaznog napona izmjenjivača kvazi Z-tipa
u_{pv}	trenutna vrijednost napona fotonaponskog izvora
u_{RC1}, u_{RC2}	trenutne vrijednosti padova napona na parazitnim otporima kondenzatora u istosmjernom krugu izmjenjivača
u_{RL1}, u_{RL2}	trenutne vrijednosti padova napona na parazitnim otporima prigušnica u istosmjernom krugu izmjenjivača
u_{L1}, u_{L2}	trenutne vrijednosti padova napona na prigušnicama u istosmjernom krugu izmjenjivača
U_{pv}	srednja vrijednost napona fotonaponskog panela
u_{pn}	trenutna vrijednost napona na ulazu u most izmjenjivača kvazi Z-tipa
U_{pn}	vršna vrijednost napona na ulazu u most izmjenjivača kvazi Z-tipa
U_p, U_n	referentni istosmjerni signali za umetanje prostrijelnih stanja
u_{ref}	trenutna vrijednost referentnog signala kod pulsno-širinske modulacije
U_t	efektivna vrijednost napona na stezaljkama generatora
u_{tr}	trenutna vrijednost trokutastog signala kod pulsno-širinske modulacije
U_{0bat}	napon otvorenog kruga baterija
VSC	energetski pretvarač s utisnutim naponom

VSG	virtualni sinkroni generator
Q	jalova snaga
VFT	visokofrekvencijski transformator
WECS	wind energy conversion system
ω	kružna frekvencija
ω_m	mehanička kružna frekvencija
WRIG	kliznokolutn asinkorni generator
θ	fazni kut mreže

SAŽETAK

U ovom je radu dan pregled stanja u mikromrežama, s fokusom na upravljanje tokovima snaga u mikromrežama s izmjenjivačem kvazi Z-tipa. Najprije su opisane različite topologije mikromreža, gdje su prikazana svojstva i istaknute razlike između istosmjernih, izmjeničnih i hibridnih mikromreža. Zatim je dan pregled distribuiranih izvora u mikromrežama, gdje se kao najčešće korišteni izdvajaju PV paneli i vjetroturbine, te različitih tipova SPE-a, s baterijama kao najčešće korištenim tipom SPE-a u mikromrežama.

U nastavku su razmatrane osnovne strukture upravljačkih sustava mikromreža, gdje se ističu hijerarhijska struktura, koja podrazumijeva upravljačke zadatke podijeljene na više upravljačkih razina, i multi-agent sustav upravljanja, kod kojega svaki pojedinačni agent radi neovisno, ali može djelovati i u koordinaciji s drugim agentima. Pregledane su i različite vrste upravljačkih strategija i sustava za raspolaganje energijom u mikromrežama. Dok su upravljačke strategije fokusirane na reguliranje parametara mikromreže, sustav za raspolaganje energijom mora postići zadane tehničke i ekonomske ciljeve. U tu svrhu se koristi usmjeravanje tokova snaga između distribuiranih izvora, sustava pohrane energije i mreže ili trošila.

Ukratko su zatim prikazane i opisane različite topologije energetskih pretvarača koje su u literaturi korištene u mikromrežama. Budući da je u radu poseban fokus stavljen na qZSI izmjenjivač, opisana je pripadajuća topologija i princip rada te su dane osnovne metode upravljanja qZSI-om. Osim toga, navedene su njegove prednosti i nedostaci u odnosu na klasične izmjenjivače. Svojstvo dodatnog naponskog pojačanja i integracija baterija bez dodavanja stupnjeva pretvorbe čini qZSI primamljivim rješenjem za povezivanje distribuiranih izvora i primjenu u mikromrežama. Prikazane su do sada razmatrane primjene qZSI-a s distribuiranim izvorima, posebno za napajanje izoliranih trošila i za spoj s mrežom. Također je dan pregled literature u kojoj se razmatra korištenje qZSI-a u mikromrežama. Iako postoje rješenja i za primjenu klasičnog, jednosmjernog qZSI-a, vidljivo je da se u mikromrežama češće koristi qZSI s mogućnošću dvosmjernog toka energije, što podrazumijeva nešto izmijenjenu topologiju.