

Hrvatska zaklada za znanost  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
Zavod za visoki napon i energetiku

# FLEXIBASE

## Upravljačka struktura mikromreže

izv. prof. Hrvoje Pandžić  
izv. prof. Juraj Havleka  
Mateo Beus, mag. ing.  
Ivan Grcić, mag.ing.



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



29-09-2020

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Upravljačke strukture mikromreže - pregled literature</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Struktura mikromreže u SGLab-u</b>	<b>8</b>
3.1	Laboratorijski postav . . . . .	8
3.1.1	Hidroelektrana . . . . .	10
3.1.1.1	Tehnički opis - Sepam G87 . . . . .	12
3.1.2	Fotonaponska elektrana . . . . .	15
3.1.3	Dvosmjerni pretvarač . . . . .	17
3.1.4	Elektronički tereti . . . . .	18
3.1.5	SCADA sustav . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Koncept hijerahijske upravljačke strukture mikromreže</b>	<b>24</b>
4.1	Optimizacijski algoritam gornje upravljačke razine . . . . .	26
4.2	Optimizacijski algoritam donje upravljačke razine . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Zaključna razmatranja</b>	<b>31</b>

## Popis slika

2.1	Prikaz tradicionalnog hijerarhijskog modela upravljanja izmjeničnom mikromrežom [4]. . . . .	3
2.2	Arhitektura shema upravljanja u izmjeničnim mikromrežama: a) decentralizirana b) centralizirana c) distribuirana. LC: lokalni kontroler [4]. . . . .	4
2.3	Decentralizirane upravljačke sheme. . . . .	4
2.4	Centralizirane upravljačke sheme. . . . .	6
2.5	Kategorizacija hijerarhijskog upravljanja u DC mikromrežama. . . . .	7
3.1	Struktura laboratorijske mikromreže. . . . .	9
3.2	Prikaz hidroelektrane. . . . .	11
3.3	Razvodni i upravljački ormar hidroelektrane. . . . .	11
3.4	Komponente numeričkog uređaja [18]. . . . .	12
3.5	Jednopolna shema fotonaponske elektrane 1 [20]. . . . .	15
3.6	Dvosmjerni pretvarač. . . . .	17
3.7	Elektronički teret [23]. . . . .	18
3.8	Dvosmjerni pretvarač i elektronički tereti. . . . .	19
3.9	Blokovska shema programskih modula sustava PROZA NET [24] . . . . .	22
3.10	Komunikacijska shema u SGLab-u . . . . .	23
4.1	Hijerarhijski upravljački slojevi mikromreže s velikim udjelom pretvarača . . . . .	25
4.2	Dijagram izvođenja hijerarhijske strukture upravljanja . . . . .	29

# Popis tablica

2.1	Usporedba značajki hijerarhijskih i distribuiranih upravljačkih struktura mikromreža [15]. . . . .	7
3.1	Parametri hidroelektrane [17]. . . . .	10
3.2	Zaštitne funkcije Sepam G87 [18]. . . . .	14
3.3	Tehničke specifikacije izmjenjivača SMA Sunny Tripower 10000TL-20 [21]. . . . .	16
3.4	Tehničke specifikacije dvosmjernog pretvarača [22]. . . . .	17
3.5	Tehničke specifikacije elektroničkog tereta. . . . .	18
4.1	Parametri i varijable optimizacijskog algoritma gornje upravljačke razine. . . . .	26

# 1. Uvod

Težnja za zadovoljavanjem potreba za električnom energijom na održivi način dovela je do povećane proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE). U elektroenergetskom sustavu (EES) u kojem preovladava proizvodnja električne energije iz OIE dolazi do smanjenog pogona konvencionalnih elektrana koje su do sada osiguravale potrebnu fleksibilnost EES-a što za posljedicu ima smanjenje cjelokupne fleksibilnosti EES-a. U tom smislu potrebno je reagirati i pronaći alternativne ekološki prihvatljivije izvore fleksibilnosti za EES u cjelini. Fleksibilnost tradicionalnog EES-a s visokim udjelom konvencionalnih elektrana osiguravala se na način da upravljive konvencionalne elektrane svoju proizvodnju prilagođavaju potrošnji. U slučaju EES-a s visokim udjelom OIE prilagođavanje proizvodnje potrošnji nije uvijek moguće, budući da električna energija iz OIE nije uvijek dostupna. Potencijalno rješenje za osiguravanje dodatne fleksibilnosti u EES-u s visokim udjelom OIE nameće se u korištenju odziva potrošnje (engl. Demand Response) kao i korištenju fleksibilnosti iz distribuiranih izvora (DI) priključenih na distribucijsku mrežu. Naime, do sada su distribucijske mreže promatrane isključivo kao jednosmjerni pasivni potrošači koji preuzimaju električnu energiju iz prijenosne mreže. Povećanje udjela različitih vrsta DI priključenih na distribucijsku mrežu, kao i korištenje različitih programa odziva potrošnje, dovelo je do promjene paradigme u vođenju distribucijske mreže jer se pojavljuju dvosmjerni tokovi snaga, tj. električna energija se sada može injektirati iz distribucijske u prijenosnu mrežu. Otežavajuća okolnost za DI leži u malim iznosima njihovih instaliranih snage te stoga ne mogu samostalno nastupati na elektroenergetskom tržištu. U cilju omogućavanja slobodnog sudjelovanja na elektroenergetskom tržištu različitih tipova DI potrebno je provesti njihovo grupiranje osiguravajući tako da više DI djeluje kao jedinstven subjekt na tržištu. Jedan od načina grupiranja različitih vrsta DI svakako je korištenje koncepta mikromreže. Ovdje svakako treba istaknuti i da primjena koncepta mikromreže ublažava utjecaj DI na distribucijsku mrežu te tako omogućava integraciju većih količina DI u distribucijskoj mreži [1]. Mikromreža predstavlja skupinu međusobno povezanih DI i tereta koji su s ostatkom distribucijske mreže povezani isključivo preko jedne spojne točke (engl. Point of Common Coupling) te mogu raditi paralelno s mrežom ili biti u otočnom pogonu [2]- [3]. Tipična mikromreža sastoji se od:

- spremnika energije;
- upravljivih DI (kogeneracijska postrojenja, male hidroelektrane, bioplinska postrojenja, dizel agregati itd.)
- varijabilnih OIE (fotonaponski sustav, vjetroagregati, itd);
- upravljivih i neupravljivih tereta.

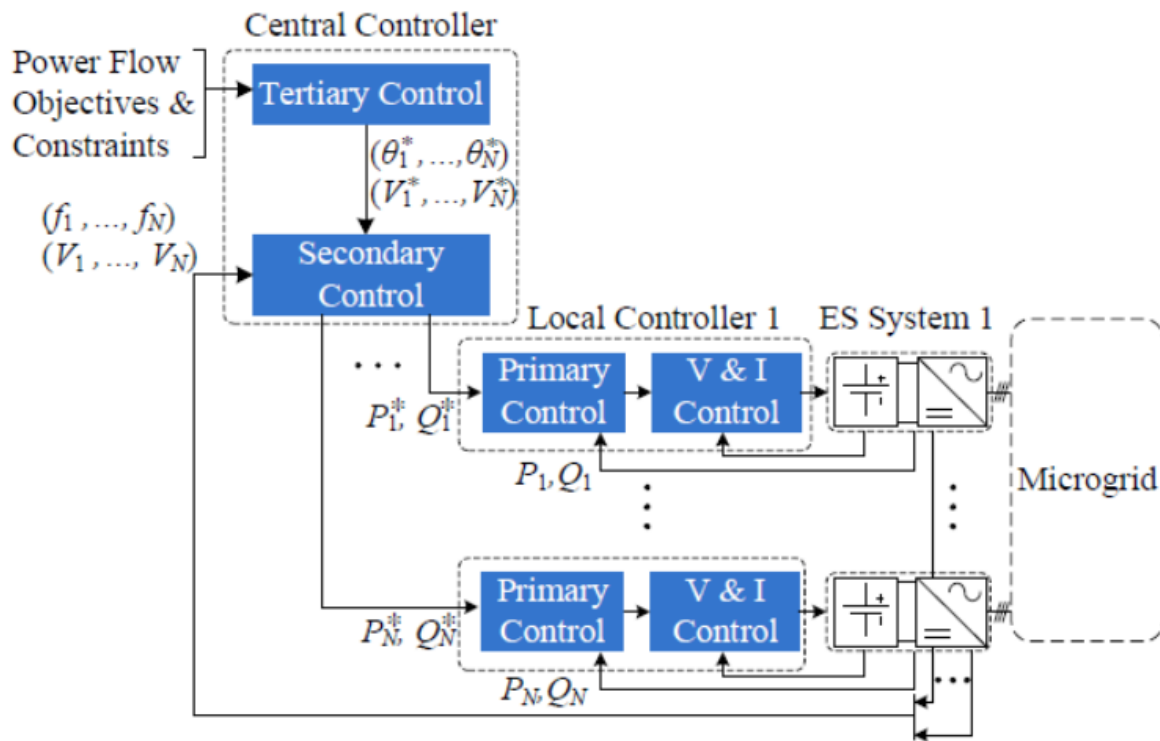
U ovom izvještaju predstavljen je koncept hijerarhijskog upravljanja koji će se koristiti za ostvarenje projektnih ciljeva. Izvještaj se sastoji od tri dijela. U prvom dijelu izvještaja pregledom relevantne znanstvene i stručne literature identificirat će se postojeći koncepti za upravljanje mikromrežom. U drugom dijelu izvještaja predstaviti će se detaljno struktura laboratorijske mikromreže s velikim udjelom pretvarača koja je sastavni dio SGLab-a na Fakultetu elektrotehnike i računarstva te koja će se koristiti za testiranje i validiranje upravljačkog koncepta razvijenog u sklopu ovog projekta. Budući da je bolja koordinacija zaštitnih uređaja jedan od ciljeva projekta u sklopu izvještaja pobliže će se predstaviti tehničke specifikacije numeričkih zaštitnih uređaja koji se koriste u

sklopu laboratorijske mikromreže. U zadnjem dijelu ovog izvještaja detaljno će se predstaviti upravljački koncept mikromreže zasnovan na hijerarhijskoj strukturi upravljanja. Nadalje, glavni doprinos ovog projekta leži u razvoju napredne upravljačke strukture mikromreže kao i njezinoj integraciji i validaciji koristeći računalne simulacije te laboratorijsko testiranje. Iako znanstvena i stručna zajednica ulažu velike napore u istraživanja vezana uz mikromreže, niti jedno prethodno provedeno istraživanje ne povezuje upravljanje i sheme zaštite s algoritmima optimalnog pogona mikromreže čiji su glavni rezultati ponude za kupnju/prodaju električne energije i nuđenje energetske fleksibilnosti. Nadalje, ovaj projekt rješava i problem otpornosti mikromreže na vanjske kvarove prilikom određivanja njenog optimalnog pogona. Predložena upravljačka struktura mikromreže omogućit će realizaciju sljedećih projektnih ciljeva:

- algoritam za estimaciju i maksimizaciju dostupne fleksibilnosti u mikromreži s visokim udjelom pretvarača;
- algoritam za bolju koordinaciju rada zaštitnih uređaja (engl. Intelligent Electronic Device - IED) koji će omogućiti pogon mikromreže bliže granicama stabilnosti;
- nastup mikromreže na tržištu pomoćnih usluga;
- model optimalnog pogona mikromreže.

## 2. Upravljačke strukture mikromreže - pregled literature

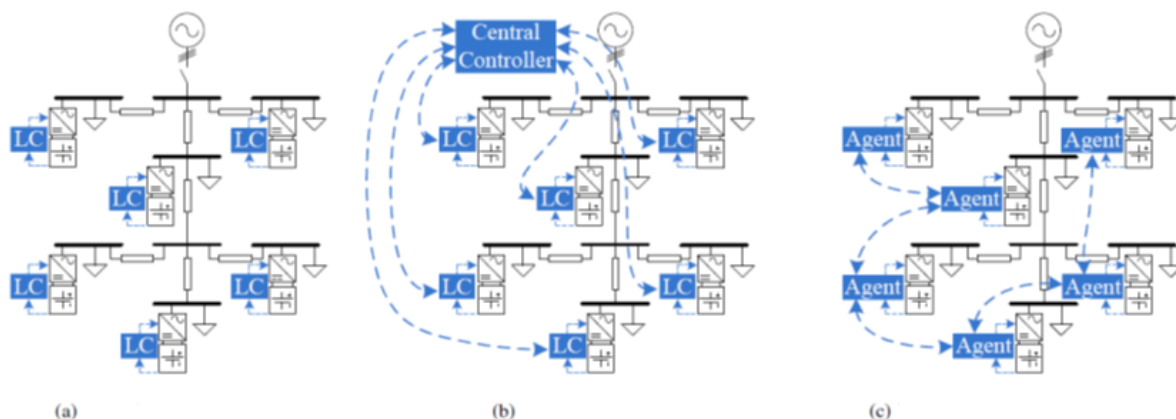
U ovom poglavlju prikazane su najnovije upravljačke sheme za mikromreže s velikim udjelom pretvarača koji se koriste prvenstveno za povezivanje baterijskih spremnika i fotonaponskih elektrana na mikromrežu kao i samo povezivanje izmjeničnog (engl. Alternating Current - AC) i istosmjernog (engl. Direct Current - DC) dijela mikromreže. U tom smislu dan je pregled najnovijih decentraliziranih, centraliziranih i distribuiranih upravljačkih shema koje se koriste za koordinaciju rada komponenti mikromreže s posebnim naglaskom na one komponente mikromreže koje se na nju povezuje korištenjem pretvarača. Slika 2.1 prikazuje tradicionalni hijerarhijski model upravljanja mikromrežom.



Slika 2.1: Prikaz tradicionalnog hijerarhijskog modela upravljanja izmjeničnom mikromrežom [4].

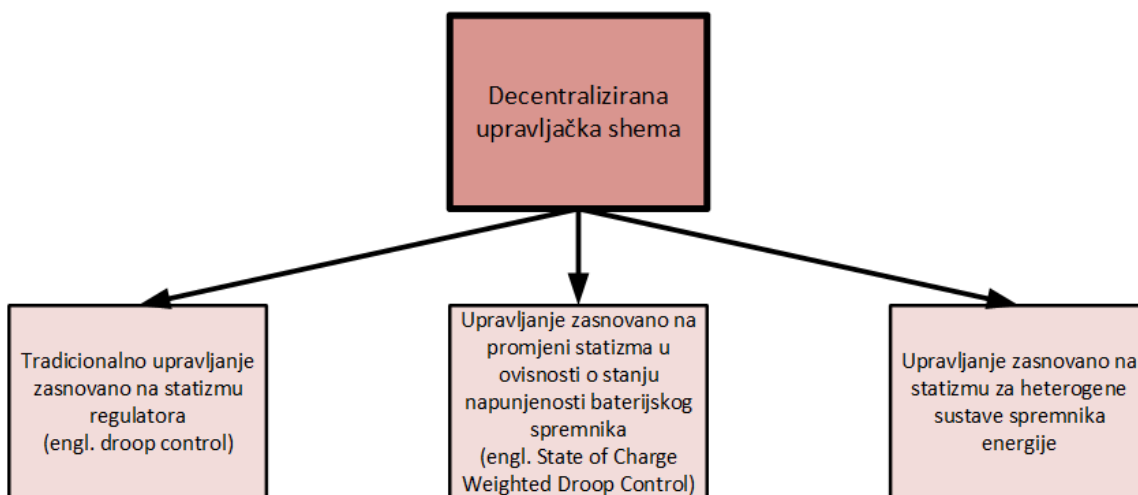
Centralni tercijarni upravljački sloj (engl. tertiary control level) rješava problem optimalnih tokova snaga te proslijeđuje reference kuta i amplituda napona sekundarnom upravljačkom sloju (engl. secondary control level). Sekundarni upravljački sloj generira optimalne reference izlazne snage svake komponente mikromreže te služi za otklanjanje odstupanja frekvencije i napona od nominalnih vrijednosti uzrokovanih djelovanjem

primarnog upravljačkog sloja (engl. primary control level) mikromreže. Unutar svakog DI-a lokalni primarni regulator generira reference za strujno/naponsko upravljanje pretvaračem u svrhu održavanja ravnoteže snaga unutar mikromreže. Na Slici 2.2 ilustrirane su decentralizirane, centralizirane i distribuirane sheme upravljanja mikromrežom.



Slika 2.2: Arhitektura shema upravljanja u izmjeničnim mikromrežama: a) decentralizirana b) centralizirana c) distribuirana. LC: lokalni kontroler [4].

U cilju ostvarenja autonomnog pogona mikromreže u svakom trenutku je potrebno zadovoljiti uvjet ravnoteže snaga proizvodnje i potrošnje unutar mikromreže. U tradicionalnom hijerarhijskom modelu upravljanja mikromrežom najniži upravljački sloj je odgovoran za zadovoljavanje uvjeta ravnoteže snaga. Izvedba primarnog upravljačkog sloja u ovoj strukturi upravljanja najčešće se izvodi korištenjem decentralizirane upravljačke strukture zasnovane na statizmu lokalnih regulatora (engl. droop control) koja osigurava raspodjelu opterećenja između DI-a koji su na mikromrežu spojeni preko pretvarača bez upotrebe komunikacijskih veza između lokalnih regulatora. Slika 2.3 prikazuje podjelu decentraliziranih upravljačkih shema koje se koriste u mikromrežama s velikim udjelom baterijskih spremnika.



Slika 2.3: Decentralizirane upravljačke sheme.

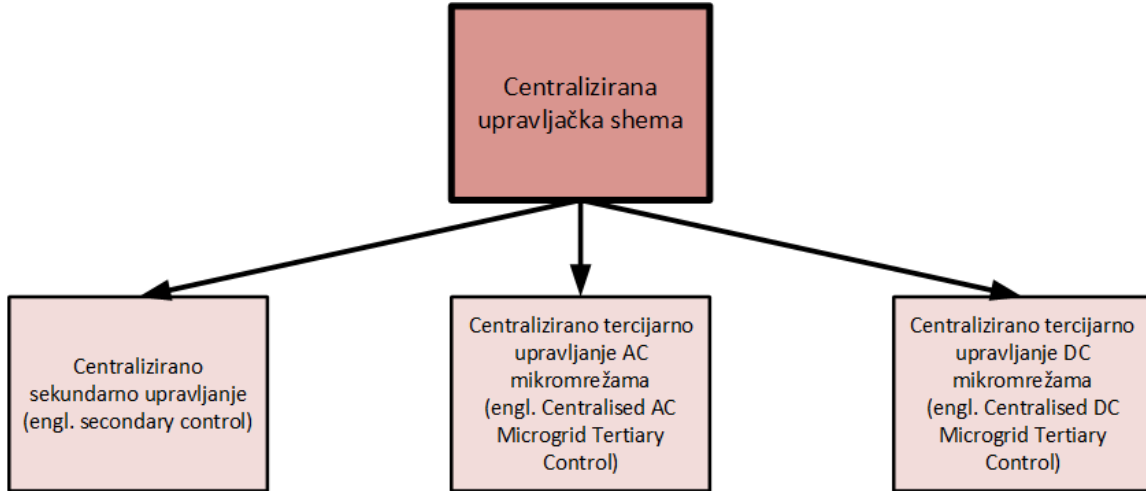


Kod izmjeničnih mikromreža s reaktivnim karakterom tokovi djelatnih snaga su ovisni o kutu napona, dok su tokovi jalovih snaga ovisni o amplitudi napona u mikromreži. Iz toga razloga najčešće se koriste tradicionalne f-P i V-Q sheme upravljanja zasnovane na statizmu regulatora. U tim shemama upravljanja pretvarači snižavaju frekvenciju proporcionalno njihovoj izlaznoj djelatnoj snazi. Isto tako dolazi i do snižavanja napona pretvarača ovisno o izlaznoj jalovoj snazi pretvarača. Ovo znači da u ustaljenom stanju (engl. steady state) pretvarači raspodjeljuju opterećenje djelatne i jalove snage obrnuto proporcionalno njihovim statičkim koeficijentima regulatora. Niskonaponske mikromreže često imaju djelatni karakter što implicira da je moguća i upotreba V-P te f-Q upravljanja zasnovanog na statizmu regulatora. Nadalje, moguća je i primjena virtualne impedancije koja se uvodi u svrhu smanjenja povezanosti između tokova djelatne i jalove snage [5]. U istosmjernim mikromrežama uobičajena je primjena V-I upravljanja zasnovanog na statizmu. Statički koeficijenti se izabiru na način da izvori u mikromreži dijele opterećenje u ovisnosti o njihovoj instaliranoj snazi unutar dopuštenih granica frekvencije/napona mikromreže. Ovakav način izbora statičkih koeficijenata je neprikladan za distribuirane baterijske spremnike koji se nalaze unutar mikromreže budući da ne uzima u obzir stanje napunjenosti (engl. state of charge) baterijskih spremnika. Dakle kod primjene fiksnih vrijednosti statičkih koeficijenata za raspodjelu opterećenja unutar mikromreže čije vrijednosti se određuju isključivo u ovisnosti o instaliranom kapacitetu svake komponente do problema dolazi kada spremnici s niskim stanjem napunjenosti ostanu bez energije te više ne mogu doprinijeti u regulaciji frekvencije/napona mikromreže. Iz toga razloga došlo je do razvoja adaptivnih upravljačkih strategija zasnovanih na statizmu kod kojih dolazi do promjene vrijednosti statičkih koeficijenata ovisno o promjeni stanja napunjenosti baterijskih spremnika te njihovom naponu. U [6] i [7], definirano je upravljanje zasnovano na korištenju neizrazite logike (engl. fuzzy control) koja se koristi za prepodešenje statičkih koeficijenata pretvarača baterijskih spremnika u ovisnosti o stanju napunjenosti i izlaznom naponu spremnika.

Tehnologije spremnika energije ugrubo se mogu podijeliti u dvije kategorije. Prvoj kategoriju pripadaju spremnici energije prikladni za rezanje vršnog opterećenja (engl. peak shaving) i regulaciju kvalitete električne energije (engl. power quality), dok u drugu kategoriju pripadaju tehnologije spremnika energije prikladne za pomjeranje potrošnje (engl. energy shifting) te rotirajuću rezervu (engl. spinning reserve). Superkondenzatori kao tehnologija spremnika energije imaju relativno niske troškove snage [EUR/kW], visoku specifičnu snagu [kW/kg] te mogu podnijeti veliki broj ciklusa punjenja/pražnjenja što ih čini izuzetno podobnim za brze regulacije frekvencije unutar mikromreže. Nadalje, zbog visokih troškova energije [EUR/kWh] te niske specifične energije [kWh/kg] superkondenzatori su neprikladni za zadovoljenje baznih energetske potrebe unutar mikromreže. U referenci [8], predložene su različite upravljačke strategije za pojedine hibridne sustave spremnika energije. Pojam hibridni spremnik podrazumijeva da sustav spremnika energije kombinira primjenu različitih tehnologija spremnika energije. Nadalje, autori u referenci [9], razmatraju upravljačku strategiju za istosmjernu mikromrežu s distribuiranim superkondenzatorima u kombinaciji s tehnologijom olovnih baterija (engl. lead-acid) koji čine hibridni spremnik.

Centralizirane upravljačke strategije mogu se koristiti za nadzor i upravljanje mikromrežama. Tehnička literatura o centraliziranim upravljačkim strategijama može se podijeliti na onu koja se odnosi na sekundarni te tercijarni upravljački sloj. U tom smislu, upravljačke strategije s upravljačkim ciljevima koji uzimaju u obzir bržu dinamiku kao što je regulacija kvalitete električne energije pripadaju tzv. sekundarnom upravljačkom sloju unutar centralizirane upravljačke sheme, dok upravljačke strategije koje se odnose na optimalan pogon mikromreže te uzimaju u obzir sporiju dinamiku sustava pripadaju tzv. tercijarnom upravljačkom sloju.

Slika 2.4 prikazuje podjelu centraliziranih upravljačkih shema za mikromreže.



Slika 2.4: Centralizirane upravljačke sheme.

U sklopu tradicionalnog hijerarhijskog modela upravljanja mikromrežom centralizirano sekundarno upravljanje je uvedeno s ciljem povećanja kvalitete električne energije ispravljajući odstupanja napona/frekvenije uzrokovana kao rezultat djelovanja primarnog upravljačkog sloja [10]. Nadalje, sekundarne upravljačke strategije su također predložene za korekciju nesimetričnog opterećenja [11], harmonijsku kompenzaciju te unapređenje raspodjele opterećenja jalovom snagom [12]. Problem optimalnih tokova snaga koji je sastavni dio centraliziranog tercijarnog upravljanja AC i DC mikromrežom pokušava pronaći optimalno rješenje postavnih vrijednosti snaga za distribuirane izvore uzimajući u obzir ograničenja uzrokovana samom mrežom kao i pogonska ograničenja samih distribuiranih izvora [13]. Općeniti problem optimalnih tokova snaga u AC mikromreži je nekonveksan zbog nelinearnih ovisnosti amplituda i kuta napona mikromreže s tokovima djelatnih i jalovih snaga. Ova nekonveksnost dovodi do toga da su izračuni optimalnih tokova snaga izuzetno zahtjevni te su metode rješavanje ili aproksimativne ili heurističke te ne garantiraju pronalaženje globalnog optimuma [14].

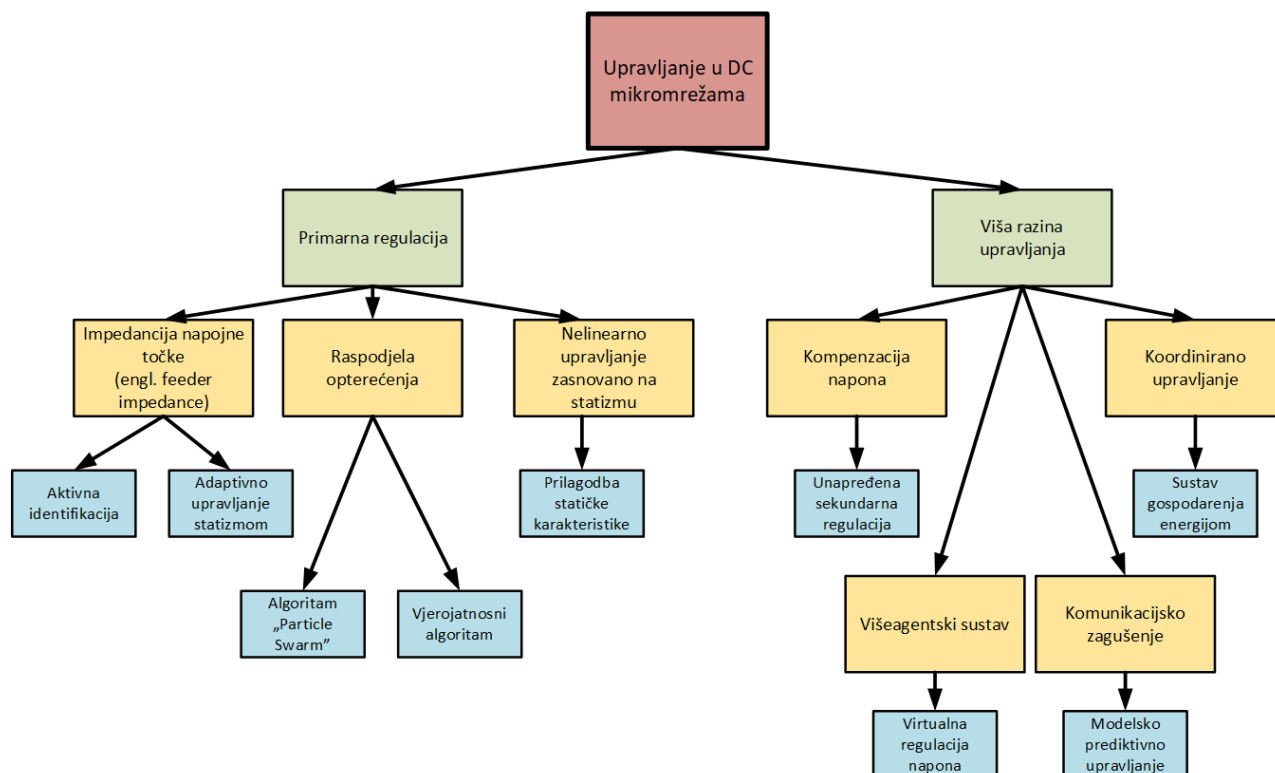
U referenci [15], autori predstavljaju sveobuhvatnu usporedbu između hijerarhijskih i distribuiranih upravljačkih struktura mikromreža. Glavna prednost hijerarhijskih u usporedbi s distribuiranim strukturama upravljanja ogleda su u korištenju optimalnog rješenja budući da hijerarhijske strukture upravljanja podrazumijevaju upotrebu centraliziranog sustava za gospodarenje energijom (engl. Energy Management System). Ovo implicira da je u slučaju korištenja hijerarhijskog upravljanja veće računalno opterećenje budući da se koriste kompleksniji optimizacijski algoritmi u usporedbi s distribuiranim upravljanjem. Glavni nedostatak toga je da u slučaju hijerarhijskog upravljanja hardverska platforma zahtjeva upotrebu snažnijih računala. Iako je komunikacijska mreža nužna u oba načina upravljanja glavna prednost distribuiranog upravljanja je da prekid komunikacije neće dovesti do značajnijeg poremećaja u radu upravljačkog sustava.

U Tablici 3.1 prikazan je pregled glavnih značajki hijerarhijskog i distribuiranog upravljanja mikromrežama.

Nadalje, referenca [16] daje pregled kategorizacije hijerarhijskog upravljanja u istosmjernim mikromrežama. Slika 2.5 ilustrira kategorizaciju hijerarhijskog upravljanja u istosmjernim mikromrežama.

Tablica 2.1: Usporedba značajki hijerarhijskih i distribuiranih upravljačkih struktura mikromreža [15].

Značajke	Hijerarhijsko upravljanje	Distribuirano upravljanje
Ekonomski aspekt	Optimalno	Podoptimalno
Pouzdanost upravljačkog sustava	Ograničena pouzdanost	Pouzdan
Složenost upravljačkog sustava	Složen	Jednostavan
Skalabilnost	Visoka	Niska
Složenost izračuna	Visoka	Niska
Hardverska platforma	Serversko računalo	Ugradbeno računalo
Komunikacijska fleksibilnost	Niska	Visoka



Slika 2.5: Kategorizacija hijerarhijskog upravljanja u DC mikromrežama.

## 3. Struktura mikromreže u SGLab-u

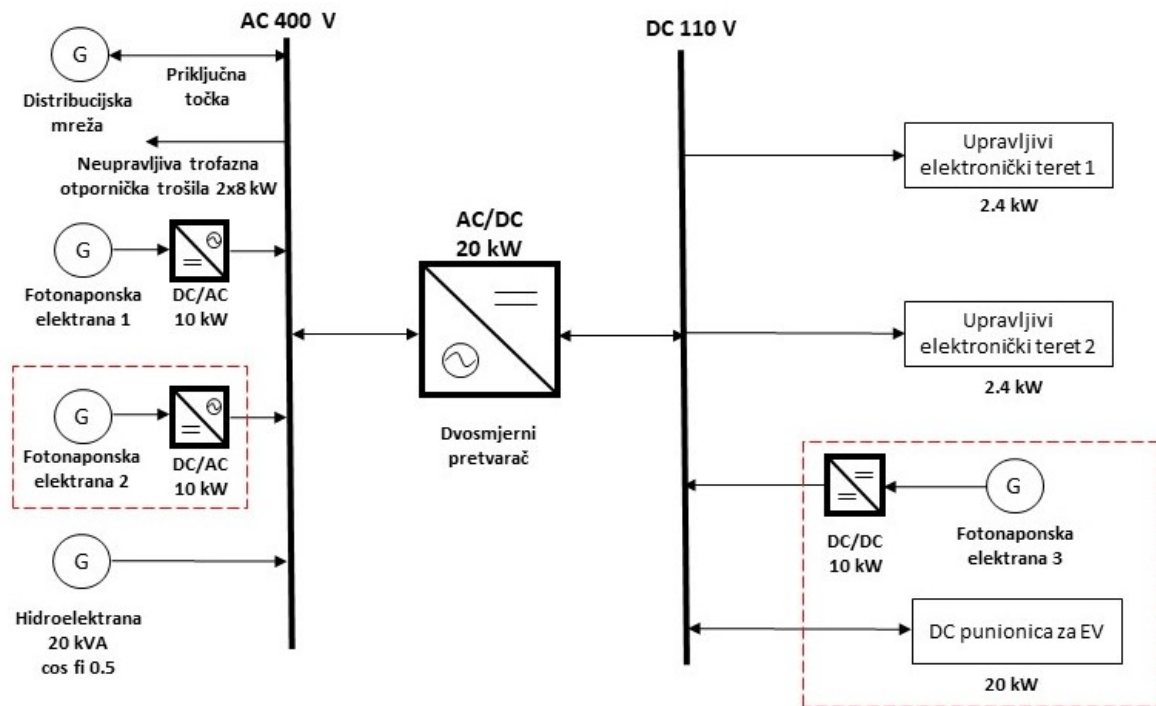
Kao platforma za validaciju hijerarhijske strukture upravljanja u mikromreži u sklopu ovog projekta koristit će se mikromreža s velikim udjelom pretvarača dostupna u SGLab-u na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Mogućnost implementacije razvijene upravljačke strukture na stvarnom sustavu od iznimne je važnosti jer će osigurati identifikaciju i otklanjanje eventualnih nedostataka upravljačkog algoritma koji se teško mogu uzeti u obzir na računalnim simulacijama. Ova činjenica svakako predstavlja dodatnu vrijednost ovoga projekta. Potencijalni problemi se prije svega očekuju s korištenjem raznih komunikacijskih protokola kojima je osigurana komunikacija između svih komponenti mikromreže, npr. pretvarači te numerički zaštitni uređaji s centralnim nadzornim i upravljačkim sustavom (eng. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) mikromreže. U nastavku ovoga poglavlja detaljno će biti predstavljen laboratorijski postav te tehničke specifikacije svih komponenti mikromreže.

### 3.1 Laboratorijski postav

U sklopu SGLab-a centralnu komponentu čini hibridna mikromreža. Pojam hibridna mikromreža označava činjenicu da se mikromreža sastoji od izmjeničnog i istosmjernog dijela mikromreže koja su međusobno povezana. Mikromreža se sastoji od sljedećih glavnih komponenti:

- hidroelektrana;
- trofazna otpornička trošila;
- dvosmjerni pretvarač;
- istosmjerni elektronički tereti.

Na Slici 3.1 prikazana je struktura laboratorijske mikromreže.



Slika 3.1: Struktura laboratorijske mikromreže.

Iz Slike 3.1 vidljivo je da se laboratorijska mikromreža sastoji od izmjeničnog i istosmjernog dijela. Izmjenični dio mikromreže sastoji se od upravljive proizvodnje u obliku male hidroelektrane, te neupravljive proizvodnje u obliku fotonaponske elektrane 1 koja će se instalirati u sklopu ovog projekta. Osim proizvodnih jedinica u izmjeničnom dijelu mikromreže nalaze se i dva neupravljiva trofazna otpornička trošila koja predstavljaju bazno opterećenje mikromreže. Snaga svakog otporničkog trošila je 8 kW. Nadalje, izmjenični dio laboratorijske mikromreže direktno je spojen i sa distribucijskom mrežom. Ovdje svakako treba istaknuti da je na Slici 3.1 topologija izmjenične mikromreže prikazana pojednostavljeno u obliku jednog čvorišta iako u stvarnosti izmjenični dio mikromreže ima 12 čvorišta. Detaljan prikaz topologije izmjeničnog dijela mikromreže nije relevantan za predstavljanje same upravljačke strukture mikromreže te neće biti prikazan u sklopu ovoga izvještaja. Istosmjerni dio prikazane laboratorijske mikromreže sastoji se od dva u potpunosti upravljiva elektronička tereta. Nadalje, potrebno je istaknuti da su izmjenični i istosmjerni dio mikromreže međusobno povezani preko upravljivog dvosmjernog pretvarača. U crvenim okvirima označene su dodatne komponente koje trenutno nisu prisutne u mikromreži, a koje će se nabaviti u sklopu ovoga projekta. Tu se prije svega misli na fotonaponske elektrane 1 i 2 (solarni paneli + inveter snage 10 kW) prikazane na Slici 3.1. Od dodatnih komponenti mikromreže koje će se nabaviti u sklopu ovoga projekta svakako treba napomenuti i nabavu dodatnog DC/DC pretvarača preko kojeg će se dodatni paneli priključiti u istosmjerni dio mikromreže formirajući tako fotonaponsku elektranu 3. Kao dodatnu komponentu koja će biti nabavljena i integrirana u istosmjerni dio mikromreže kroz ovaj projekt treba istaknuti i istosmjernu punionicu za električna vozila. Sve postojeće komponente mikromreže integrirane su u laboratorijski SCADA sustav te se mogu daljinski nadzirati i upravljati. Laboratorijski SCADA sustav će imati ključnu ulogu u izvedbi hijerarhijske strukture upravljanja mikromrežom budući da podržava korištenje različitih komunikacijskih protokola. U nastavku su detaljno opisane tehničke specifikacije svih prethodno spomenutih komponenti laboratorijske mikromreže.

### 3.1.1 Hidroelektrana

U sklopu izmjeničnog dijela mikromreže hidroelektrana predstavlja upravljivu distribuiranu proizvodnju. Na Slikama 3.2 i 3.3 prikazane su sve komponente hidroelektrane. Na Slici 3.2 sinkroni generator je obojen crvenom bojom, dok je kućište petlon turbine obojeno plavom bojom. Osim turbine i generatora na Slici 3.2 prikazan je još i hidraulički agregat pozicioniran ispred kućišta turbine koji se koristi za pogon hidrauličkih cilindara igle i deflektora kojima se regulira dotok vode na turbinu, a samim time i proizvodnja djelatne snage. U slučaju ove hidroelektrane regulacija dotoka vode na turbinu se uglavnom regulira korištenjem igle na izlazu iz tlačnog cjevovoda iako postoji i opcija promjene načina upravljanja na regulaciju dotoka vode korištenjem deflektora. Nadalje, na Slici 3.3 prikazani su razvodni ormar (lijevo) te upravljački ormar (desno) hidroelektrane. Izvedba upravljačke strukture turbinske regulacije i regulacije sustava uzbude hidroelektrane pripadaju tzv. lokalnoj razini upravljanja koja služi isključivo za sljeđenje referenci poslanih iz gornjih upravljačkih razina mikromreže te se u sklopu ovoga izvještaja neće detaljnije analizirati. Potrebno je samo istaknuti da je sustav upravljanja hidroelektranom izveden korištenjem programibilnog logičkog kontrolera (engl. Programmable Logic Controller) tvrtke SIEMENS koji ima oznaku ET200-SP. Ovaj PLC podržava korištenje različitih komunikacijskih protkova kao što su OPC UA, Modbus TCP/IP, Profibus i Profinet. Nadalje, zaštitne funkcije hidroelektrane izvedene su korištenjem numeričkog zaštitnog uređaja tvrtke Schneider Electric oznake Sepam G87. Budući da je jedan od ciljeva projekta ostvarenje bolje koordinacije zaštitnih uređaja u sklopu mikromreže u zasebnom odjeljku su prikazane tehničke specifikacije ovog zaštitnog uređaja s posebnim naglaskom na njegove komunikacijske mogućnosti. Hidroelektrana dostupna u sklopu SGLab-a pripada kategoriji visokotlačnih hidroelektrana budući da je simulirani neto pad hidroelektrane 64 metra. Naime, korištenjem vodene pumpe voda na izlazu iz tlačnog cjevovoda ima tlak od 6.4 bara što približno odgovara neto padu od 64 metra. Detaljniji parametri same hidroelektrane kao što su duljina i presjek tlačnog cjevovoda te nazivna snaga elektrane prikazani su u Tablici 3.1 .

Tablica 3.1: Parametri hidroelektrane [17].

Specifikacije hidroelektrane	
Prividna snaga	20 kVA
Nazivna brzina vrtnje turbine	1000 okr/min
Neto pad	64 m
Duljina tlačnog cjevovoda	3 m
Promjer cjevovoda	0.15 m
Nazivni protok	0.027 m/s
Tip turbine	pelton



Slika 3.2: Prikaz hidroelektrane.

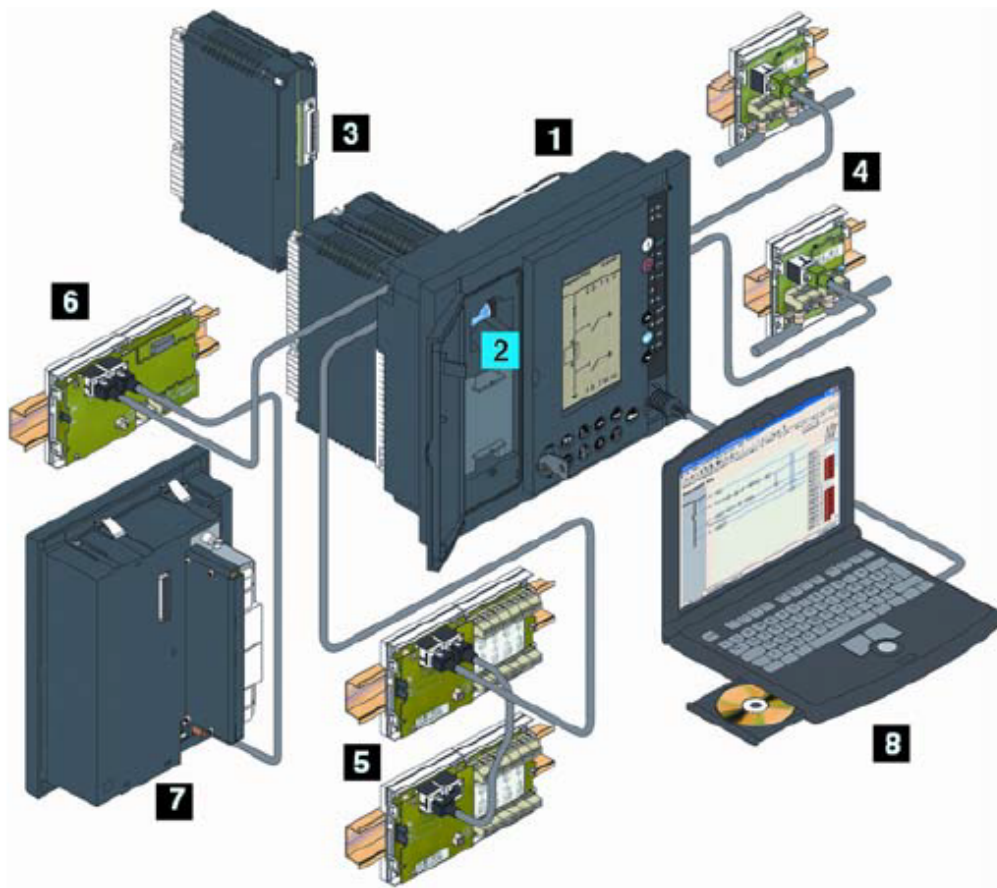


Slika 3.3: Razvodni i upravljački ormar hidroelektrane.



### 3.1.1.1 Tehnički opis - Sepam G87

Glavna karakteristika Sepam G87 numeričkog releja koji se koristi za zaštitu hidroelektrane je fleksibilnost kroz mogućnost proširenja zaštitnih funkcija jednostavnom nadogradnjom dodatnih modula. Na Slici 3.4 prikazane su pojedine komponente releja Sepam G87. Komponenta označena brojem 1 predstavlja baznu jedinicu koja može imati različite tipove sučelja čovjek-stroj (engl. Human Machine Interface). Komponenta pod brojem 2 predstavlja prijenosnu memorijsku jedinicu na koju se pohranjuju parametri i podešenja zaštitnih funkcija. Brojem 3 predstavljen je modul digitalnih ulaza i izlaza. Ovaj modul ima 42 digitalna ulaza i 6 relejnih izlaza uz napomenu da se na baznoj jedinici nalaze dodatni utori za dodavanje dodatna 2 modula digitalnih ulaza i izlaza. Brojem 4 predstavljena su 2 neovisna komunikacijska ulaza koji omogućavaju direktno povezivanja na 2-žičnu ili 4-žičnu RS485 mrežu, optičku mrežu ili Ethernet TCP/IP mrežu. Brojem 5 predstavljen je modul koji se koristi za obradu temperaturnih mjerenja do 16 temperaturnih senzora (Pt100, Ni100 ili Ni120). Modul analognih izlaza predstavljen je brojem 6. Ovaj modul podržava generiranje analognih strujnih signala sljedećih razina: 0-10 mA, 4-20 mA, 0-20 mA. Prvenstvena namjena analognih izlaza je prijenos mjerenih ili izračunatih podataka na programibilni logički kontroler (engl. Programmable Logical Controller). Modul označen brojem 7 služi za provjeru sinkronizma. Brojem 8 predstavljen je softver koji se koristi za parametrisiranje numeričkog releja. Svi tipovi Sepam numeričkih releja podešavaju se korištenjem SFT2841 softvera.



Slika 3.4: Komponente numeričkog uređaja [18].



Višefunkcijski numerički relej Sepam G87 za zaštitu generatora ima sljedeće funkcije:

- zaštitne funkcije;
- mjerne funkcije;
- nadzor kvalitete električne energije;
- upravljačke funkcije;
- uređaj za snimanje poremećaja;
- komunikacijske funkcije.

U Tablici 3.2 prikazane su zaštitne funkcije releja Sepam G87 s pripadajućim ANSI brojevima.

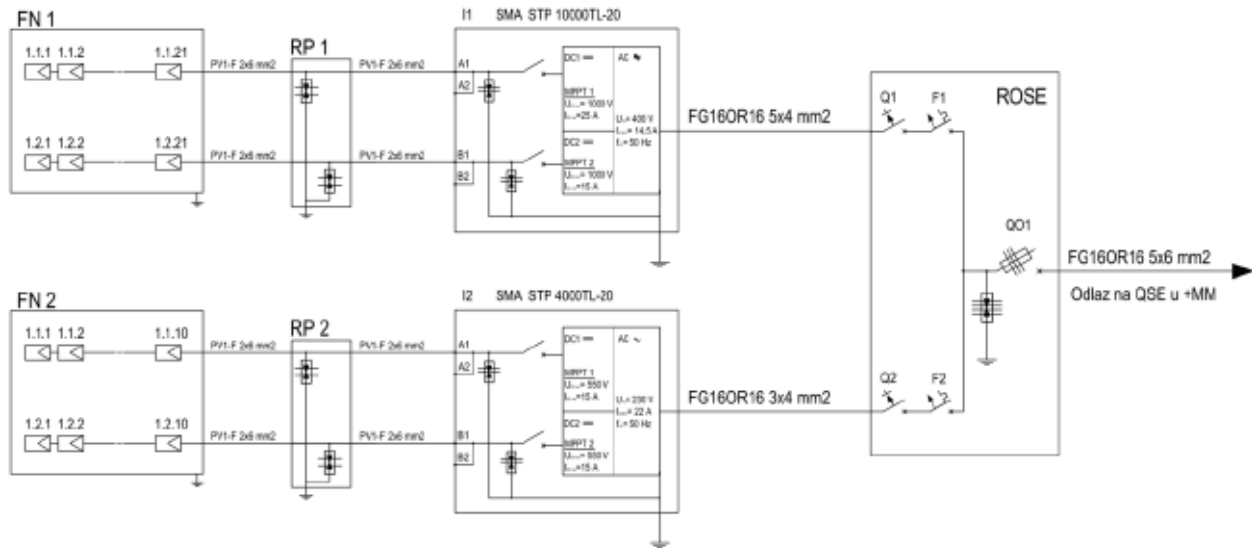
Komunikacijske mogućnosti numeričkog zaštitnog releja Sepam G87 ovise o tipu komunikacijskog sučelja na koje se spaja bazna jedinica releja. Komunikacijska sučelja s oznakom ACE949-2 i ACE959 podržavaju upotrebu samo Modbus RTU komunikacijskog protokola uz korištenje 2-žičnog ili 4-žičnog RS485 kao fizičkog sloja mreže [19]. Komunikacijsko sučelje ACE937 također podrazumijeva korištenje samo Modbus RTU komunikacijskog protokola uz korištenje optičke mreže kao fizičkog sloja. Nadalje, komunikacijsko sučelje oznake ACE969TP-2 podržava korištenje Modbus RTU, DNP3 ili IEC 60870-5-103 komunikacijskih protokola na 2-žičnom RS485 kao fizičkom sloju [19]. Također 3 prethodno spomenuta komunikacijska protokola moguće je koristiti i u komunikacijskom sučelju oznake ACE969FO-2 uz razliku da ovo komunikacijsko sučelje podražava korištenje 2-žičnog RS485 i optike kao fizičkog sloja mreže [19]. U sklopu ove hidroelektrane bazna jedinica numeričkog zaštitnog uređaja Sepam G87 spojena je na komunikacijsko sučelje oznake ACE850TP koje podržava upotrebu Modbus TCP/IP i IEC 61850 komunikacijskih protokola na Ethernet-u kao fizičkom sloju mreže.

Tablica 3.2: Zaštitne funkcije Sepam G87 [18].

<b>ANSI broj</b>	<b>Zaštitne funkcije Sepam G87</b>
50/51	Neusmjerena nadstrujna 3-f zaštita
50N/51N	Neusmjerena zemljospojna zaštita
50BF	Zaštita od zatajenja prekidača
46	Zaštita od nesimetričnog opterećenja
49	Termička zaštita uređaja
49R	Nadstrujna zaštita rotora pri preopterećenju
49S	Nadstrujna zaštita rotora pri preopterećenju
87M	Diferencijalna zaštita generatora
67	Usmjerena nadstrujna 3-f zaštita
67N	Usmjerena zemljospojna zaštita
32P/32Q	Zaštita od povratne snage
40	Zaštita od gubitka uzbuđivanja
24	Zaštita od naduzbuđivanja
50V/51V	Nadstrujna zaštita s naponskom kontrolom
27TN	Zaštita od zemnog spoja statora pomoću trećeg harmonika napona
78PS	Zaštita od gubitka uzbuđivanja
59	Nadnaponska zaštita
59N	Nadnaponska zaštita od zemnog spoja statora
27	Podnaponska zaštita
21B	Podimpedantna zaštita
12	Zaštita od premale brzine vrtnje
14	Zaštita od prevelike brzine vrtnje
81H	Nadfrekvencijska zaštita
81L	Podfrekvencijska zaštita

### 3.1.2 Fotonaponska elektrana

Na Slici 3.5 prikazana je jednopolna shema fotonaponske elektrane 1 koja će se instalirati u sklopu ovoga projekta.



Slika 3.5: Jednopolna shema fotonaponske elektrane 1 [20].

Fotonaponska elektrana 1 će se sastojati od 42 fotonaponska modula (Trinsolar TSM-PE05H) snage 280 Wp te izmjenjivača snage 10 kW (SMA Sunny Tripower 10000TL-20). Fotonaponski moduli na krov će biti pričvršćeni korištenjem aluminijske konstrukcije za prihvat modula. Nadalje, fotonaponski moduli montirat će se fiksno na ravni krov orijentacije istok-zapad s nagibom modula od  $10^\circ$ . Sastavni dio fotonaponske elektrane 1 biti će i izmjenjivač SMA Sunny Tripower preko kojeg će fotonaponski moduli biti povezani na izmjenični dio mikromreže. SMA Sunny Tripower 10000TL-20 je trofazni izmjenjivač bez transformatora, nominalne snage 10 kW i maksimalne učinkovitosti 97,6 %. Na njegov ulaz A bit će spojen jedan *MPP tracker* orijentacije zapad od 21 fotonaponskog modula, a na ulaz B spojit će *MPP tracker* od također 21 fotonaponskog modula. Izmjenjivač je opremljen nadstrujnom zaštitom stringova, sustavom za praćenje rada mreže, uređajem za automatsku sinkronizaciju na napon mreže, sustavom za praćenje valnog oblika napona mreže, sustavom zaštite od injektiranja istosmjerne struje u mrežu (1 A; 0.2 s) te s uređajem za isključenje s mreže i uključanje na mrežu (isključenje s mreže u slučaju nedozvoljenog pogona i uključanje na mrežu nakon ispunjenja uvjeta paralelnog rada). Nadalje, inverter ima integriran i Modbus TCP/IP komunikacijski protokol koji će se koristiti za povezivanje invertera s laboratorijskim SCADA sustavom. U Tablici 3.3 prikazane su tehničke specifikacije ovog izmjenjivača.

Tablica 3.3: Tehničke specifikacije izmjenjivača SMA Sunny Tripower 10000TL-20 [21].

Maksimalna ulazna (DC) snaga	13500 Wp
Maksimalni ulazni napon (DC)	1000 V
Radno područje ulaznog napona (DC)	370-800 V
Maksimalna izlazna (AC) snaga	10 kW
Maksimalna ulazna struja po MPPT	25/15 A
Broj MPPT jedinica	2
Nominalni izlazni napon (AC)	230/400 V
Maksimalna izlazna struja	14,5 A A
Frekvencija mreže	50 Hz
AC izlaz	trofazan
Komunikacija	Modbus TCP/IP

### 3.1.3 Dvosmjerni pretvarač

Pretvarači TC.GSS serije su u potpunosti digitalna napajanja koji omogućavaju upravljanje energijom u oba smjera. Imaju široke mogućnosti primjene kao što su [22]:

- testiranje i evaluacija baterijskih sustava;
- razvoj pogona za vlakove;
- simulacija sustava napajanja vozila i zrakoplova;
- testiranje pogona liftova, kranova, vlakova, itd.
- evaluacija i testiranje hibridnih koncepata;
- električni procesi u procesnoj automatizaciji.

Za povezivanje izmjeničnog i istosmjernog dijela mikromreže u SGLab-u koristi se upravljivi dvosmjerni pretvarač tvrtke REGATRON AG. Na Slici 3.6 prikazan je izgled samog pretvarača.



Slika 3.6: Dvosmjerni pretvarač.

Iako pretvarač ovog tipa podržava korištenje različitih komunikacijskih protokola u slučaju laboratorijske mikromreže pretvarač je s laboratorijskim SCADA sustavom povezan korištenjem galvaniski izoliranog analognog sučelja.

Detaljne tehničke specifikacije dvosmjernog pretvarača prikazane su u Tablici 3.4.

Tablica 3.4: Tehničke specifikacije dvosmjernog pretvarača [22].

AC strana (nazivne vrijednosti)	400 V, 50 Hz, trofazno
Raspon snage na DC strani	0-20 kW
Raspon napona na DC strani	0-400 V
Raspon struje na DC strani	0-63 A
Komunikacija	analogno sučelje, Profibus, CAN

### 3.1.4 Elektronički tereti

Elektronički tereti serije EL 9000 B su osobito prikladni za laboratorijske primjene kao i primjene u industrijskom okruženju zbog svog kompaktnog dizajna koji ima omogućava montažu u standardne industrijske ormare širine 19-inča. Osim osnovnih funkcionalnosti elektroničkog tereta postavne vrijednosti odnosno profil opterećenja elektroničkog trošila može se dodatno zadati i korištenjem integriranog funkcijskom generatora (sinusni profil, trokutastki profil, pravokutni profil ili bilo koji drugi proizvoljni). Proizvoljne krivulje opterećenja se mogu također učitati na trošilo koristeći USB memoriju. Za potrebe daljinskog upravljanja pomoću PC-a ili PLC-a elektronički tereti su opremljeni sa standardnim USB ulazom kao i galvanski izoliranim analognim sučeljem. Nadalje, ugradnjom dodatnih komunikacijskim modula elektronički tereti podržavaju i korištenje dodatnih komunikacijskih protokola za daljinsko upravljanje kao što su: Modbus TCP/IP, Profibus, Profinet, CAN i CAN open [23]. Nadalje, zbog svoje modularne izvedbe moguće je povezati više elektronički tereta paralelno da bi se podigla ukupna snaga tereta. U sklopu mikromreže u SGLab-u dostupna su dva elektronička tereta. Snaga svakog od tih tereta iznosi 2.4 kW i spojeni su na istosmjerni dio mikromreže napona 110 VDC. Izgled elektroničkog tereta prikazan je na Slici 3.7.



Slika 3.7: Elektronički teret [23].

Tehničke specifikacije elektroničkog tereta dane su u Tablici 3.5.

Tablica 3.5: Tehničke specifikacije elektroničkog tereta.

Napajanje	90-264 V, 45-65 Hz, jednofazno
Raspon snage na DC strani	0-2,4 kW
Raspon napona na DC strani	0-400 V
Raspon struje na DC strani	0-50 A
Komunikacija	analogno sučelje, Profinet, Profibus, CAN, CANopen, Modbus TCP/IP

Daljinsko upravljanje elektroničkim teretima kao i dvosmjernim pretvaračem snage u laboratorijskom mikromreži ostvareno je korištenjem analognog sučelja. Naime, korištenjem analognom sučelja elektronički tereti i dvosmjerni pretvarač su spojeni na PLC S7-1215C AC/DC/Rly koji je potom korištenjem protokola Modbus TCP/IP povezan na laboratorijski SCADA sustav. Na taj način je moguće slati komande za uključenje/isključenje elektroničkih tereta i dvosmjernog pretvarača. Nadalje, kroz SCADA sustav ostvaren je i trenutni prikaz mjerenja snage, struje i napona tereta i pretvarača, dok je također moguće i mijenjati postavne vrijednosti struje, napona i snage za pretvarač te snaga i struje za elektroničke terete. Na Slici 3.8 prikazan je ormar s elektroničkim teretima i dvosmjernim pretvaračem u SGLab-a.



Slika 3.8: Dvosmjerni pretvarač i elektronički tereti.

### 3.1.5 SCADA sustav

SCADA sustavi imaju široku primjenu u automatizaciji elektroenergetskih postrojenja u stvarnom vremenu. Oni predstavljaju područje istraživanja u kojem se svakodnevno razvijaju novi proizvodi i usluge. SCADA sustavi se međusobno razlikuju po specifičnim namjenama i prilagođenosti pojedinoj industrijskoj grani. Imaju veliku važnost jer se primjenjuju za jednostavne nadzore (npr. mjerenje napona, struje, temperature, tlaka) kao i za kompleksne nadzore i upravljanja (npr. procesi proizvodnje u tvornicama, upravljanje elektroenergetskim postrojenjima, regulacija željezničkog i cestovnog prometa). SCADA sustavi omogućavaju nadzor nad jednim ili više udaljenih objekata pomoću čega operater utvrđuje stanje nekog uređaja ili procesa ažurirano u odgovarajućim vremenskim intervalima te uzroke događaja koji su nastali bez njegove fizičke prisutnosti. Općenito govoreći osnovne funkcije koje obavlja SCADA sustav su:

- **Prikupljanje i obrada podataka** - Sustav prikupljanja podataka je komunikacijska veza između dispečerskog centra i opreme za daljinsko upravljanje u stanicama kao što su daljinske stanice ili stanična računala. Daljinske stanice ili stanična računala prikupljaju podatke na razini stanice i šalju ih u nadređeni centar preko određene komunikacijske linije kao što su radioveza, optička veza, upletena parica i slično. Obrada podataka jest rukovanje podacima elektroenergetskog sustava na aplikacijskoj razini. Ti podatci mogu biti prikupljeni iz procesa, ručno uneseni ili proizvod nekih drugih aplikacija. Obrada podataka moguća je na temelju mjerenja, indikacija, brojila, oznaka i podataka iz drugih sustava.
- **Obrada događaja** - Događaj se generira kao posljedica promjene stanja nadziranog objekta u EES. Događaj koji se obrađuje može potaknuti jednu ili više aktivnosti ovisno o prioritetu događaja: zvučni alarm, nepotvrđeni i trajni alarmi, događaj se uključuje u listu događaja.
- **Kontrola i prebacivanje nadležnosti operatera** - Sustav sadrži provjeru kontrole nadležnosti da bi se izbjegle nedozvoljene radnje u nadziranom sustavu. Također je moguće i ograničiti funkcije koje se mogu koristiti s određenim stupnjem nadležnosti. Funkcija kontrole nadležnosti definira nadležnosti i odgovornosti za operatere i ostale korisnike u sustavu.
- **Ručni unos podataka** - Ručni unos podataka jest funkcija kojom se u sustav upisuju vrijednosti indikacije, mjerenja i ostali podatci iz sustava u bazu kroz prikaze. Ručno uneseni podatci obrađuju se na isti način kao i podatci prikupljeni daljinskim mjerenjima. Ručni unos podataka na podatak koji je u sustav ušao daljinskim putem rezultira automatskom blokadom osvježavanja tog podatka. Blokada osvježavanja podatka ostaje dok se ne ukine ručni unos podatka.
- **Blokiranje funkcija** - Svaki podatak je moguće ručno upisati kao i blokirati osvježavanje podataka iz procesa.
- **SCADA izračuni** - SCADA izračuni namijenjeni su za operacije koje se obavljaju nad podacima. Kombinacijom nekoliko poznatih podataka moguće je raditi izračune nad indikacijama, mjerenjima ili kombinirano.
- **Dinamičko bojanje mreže** - Topološkim bojanjem mreže razlikuju se aktivni dijelovi mreže (boja ovisi o naponskoj razini) od pasivnih i uzemljenih dijelova. Topologija je integrirana u SCADA sustav. Uz objekte mreže prikazuju se odgovarajući mjereni ili izračunati podatci.
- **Obrada, zapisivanje i analiza povijesnih podataka i slika** - Povijesna baza podataka je spremište podataka koje je povezano sa SCADA sustavom i omogućava spremanje podataka i iz ostalih sustava u okruženju. Temelji se na MS SQL server bazi podataka. Podacima se može pristupiti preko aplikacija koje su sastavni dio sustava SCADA. Tako se mogu čitati arhive događaja, mjerenja i povijesni trendovi.
- **Trendovi mjerenja** - Funkcija trendova mjerenja koristi se za prezentaciju povijesnih podataka kao i podataka on-line.

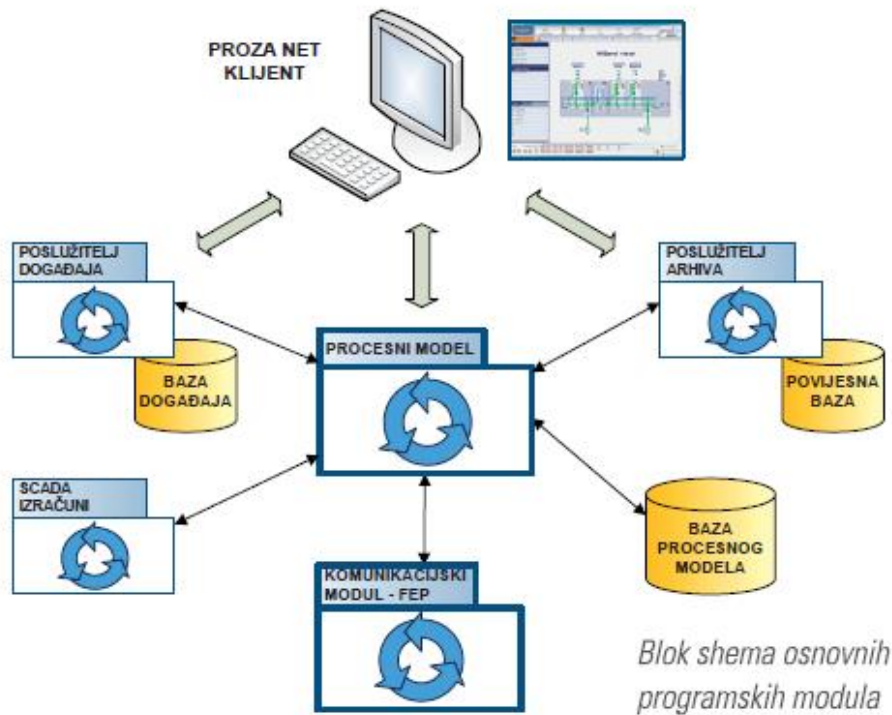


- **Razvojni paket** - Sustav pruža korisničke programe za konfiguriranje: podršku za izradu baze podataka, podršku za kreiranje komunikacijske strukture, podršku za izradu grafičkih prikaza, podršku za izradu topološke konfiguracije prikaza jednopolne sheme i podršku za izradu korisničkih izvještaja.
- **Pristup sustavu preko intraneta/interneta - web sučelje** - Web sučelje omogućava korisnicima uvid i pristup povijesnim podacima te trenutnom stanju sustava. No, preko njega nije omogućena izmjena niti upravljanje parametrima sustava.

U sklopu SGLab-a daljinsko upravljanje i nadzor svih komponenti mikromreže omogućene je korištenjem SCADA sustava tvrke Končar koji se zove PROZA NET. Ovaj programski sustav podržava sve SCADA funkcije potrebne u nekoj transformatorskoj stanici, elektrani ili drugom objektu. Nadalje, PROZA NET je fleksibilan i modularan sustav visokih performansi koji se može koristiti za različite razine nadzora. Sustav se temelji na otvorenim i standardnim tehnologijama te kao takav omogućava proširenje novim funkcijama. Uz pomoć PROZA NET sustava može se nadzirati rad elektroenergetskog sustava u realnome vremenu ( SCADA funkcije) i analizirati stanje mreže (on-line ili off-line na temelju zadnjeg ili arhiviranog stanja). PROZA NET omogućava prikupljanje, nadzor i upravljanje koje projektant sustava lako prilagođava posebnim potrebama, a operater sustava jednostavno koristi. Sastoji od više međusobno povezanih funkcionalnih cjelina [24]:

- prikupljanje i nadzor stanja uređaja i aparata (prekidača, rastavljača uzemljivača, itd.);
- prikupljanje i nadzor mjerenja (struja, snaga, napon itd.);
- nadzor ispravnosti komunikacijskog podsustava;
- daljinsko upravljanje uređaja i postavnim vrijednostima;
- formiranje lista događaja, alarma i kvarova te rad s njima;
- prijava/odjava korisnika tj. definiranje nadležnosti za pojedine korisničke funkcije u sustavu.

PROZA NET sustav ima distribuiranu arhitekturu tj. aplikacije su smještene na različitim poslužiteljima. Na Slici 3.9 prikazana je blokovska shema glavnih programskih modula PROZA NET sustava.



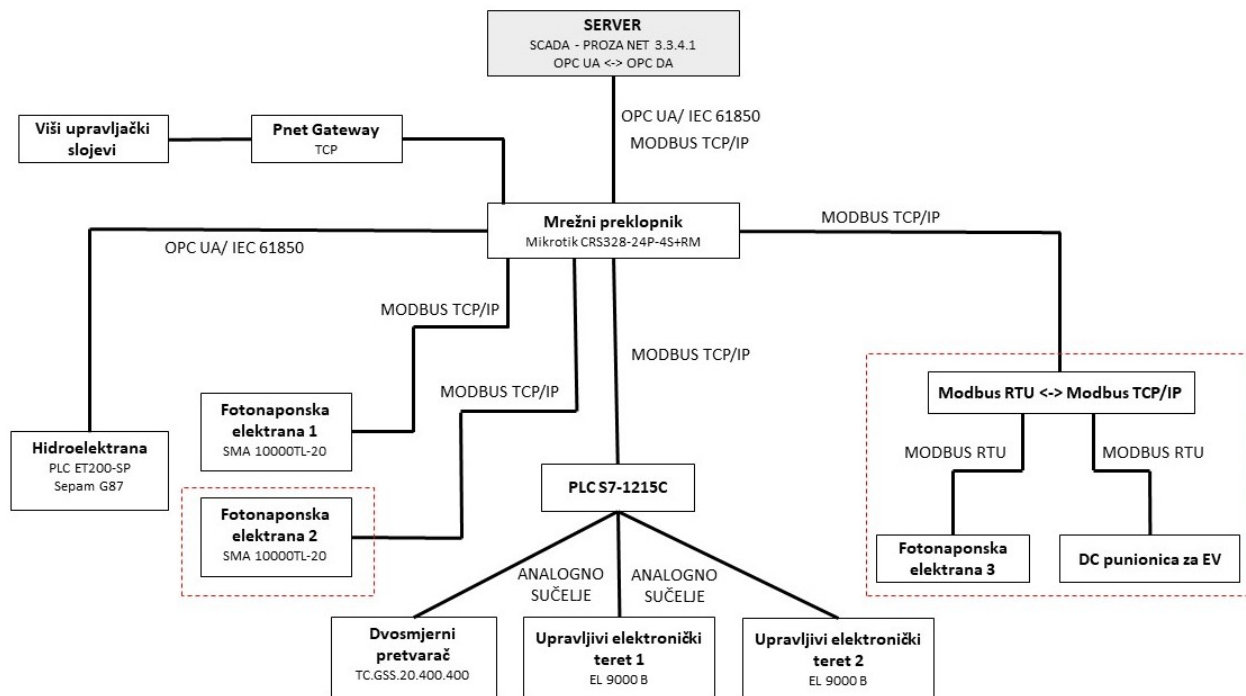
Slika 3.9: Blokvska shema programskih modula sustava PROZA NET [24]

Iz Slike 3.9 vidljivo je da su svi programski moduli međusobno povezani te obavljaju sljedeće funkcije:

- **FEP (Front-End Processor) modul** – komunikacijski servis koji prikuplja postojeće informacije iz procesno-komunikacijskog modela. Informacije se izmjenjuju komunikacijskim protokolima, najčešće IEC 60870-5-104. Međutim, podržani su i ostali standardni protokoli: LON, MODBUS RTU, MODBUS TCP/IP, OPC, DNP 3.0, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-103 te IEC 61850.
- **Modul procesnog modela (Process Server)** – prihvaća informacije od FEP-a te ih konvertira i prikazuje na razumljiv i pristupačan način operateru. Predstavlja real-time bazu podataka jer se podaci učitavaju iz baze procesnog modela prilikom njegovog podizanja.
- **Modul za obradu liste događaja, alarma i kvarova (Event Server)** – informacije procesnog modela razvrstavaju se u listama događaja. S obzirom na korisničke definicije, informacije su organizirane u stupcima s pridruženom vremenskom konstantom kako bi se mogla pratiti kronologija događaja.
- **Modul za arhiviranje podataka (Archive Server)** – arhivira tj. pohranjuje podatke u bazu podataka na različitim poslužiteljima (lokalni, udaljeni, itd).
- **Modul SCADA izračuna (PmBlock Server)** – provodi logičke i aritmetičke operacije nad real-time podacima, a dobivene rezultate predaje modulu procesnog modela.

Klijentska aplikacija služi krajnjem korisniku (dispečer, operater) za pregled procesnih informacija, lista događaja i prikaza trendova. Programski moduli SCADA sustava implementirani su u PROZA NET klijentsku aplikaciju te omogućavaju krajnjim korisnicima interakciju s procesom putem grafičkog sučelja.

Glavna prednost PROZA NET programskog sustava je mogućnost izravnog pristupa modulu procesnog modula koristeći komponentu PNET Gataeway baziranu na TCP-u koja predstavlja komunikacijsko sučelje ovog sustava. Na ovaj način osigurava se mogućnost izravnog pristupa trenutnim mjerenjima dostupnih procesnih veličina u PROZA NET sustavu. Korištenjem istog komunikacijskog sučelja moguće je izravno mijenjati postavne veličine upravljanih objekata. Uzimajući to u obzir PROZA NET se koristi kao svojevrsna baza, tj. komunikacijsko čvorište hijerarhijske strukture upravljanja koja je detaljno opisana u nastavku ovog izvješćaja. Komunikacijska shema svih komponenti mikromreže u SGLab-u prikazana je na Slici 3.10.



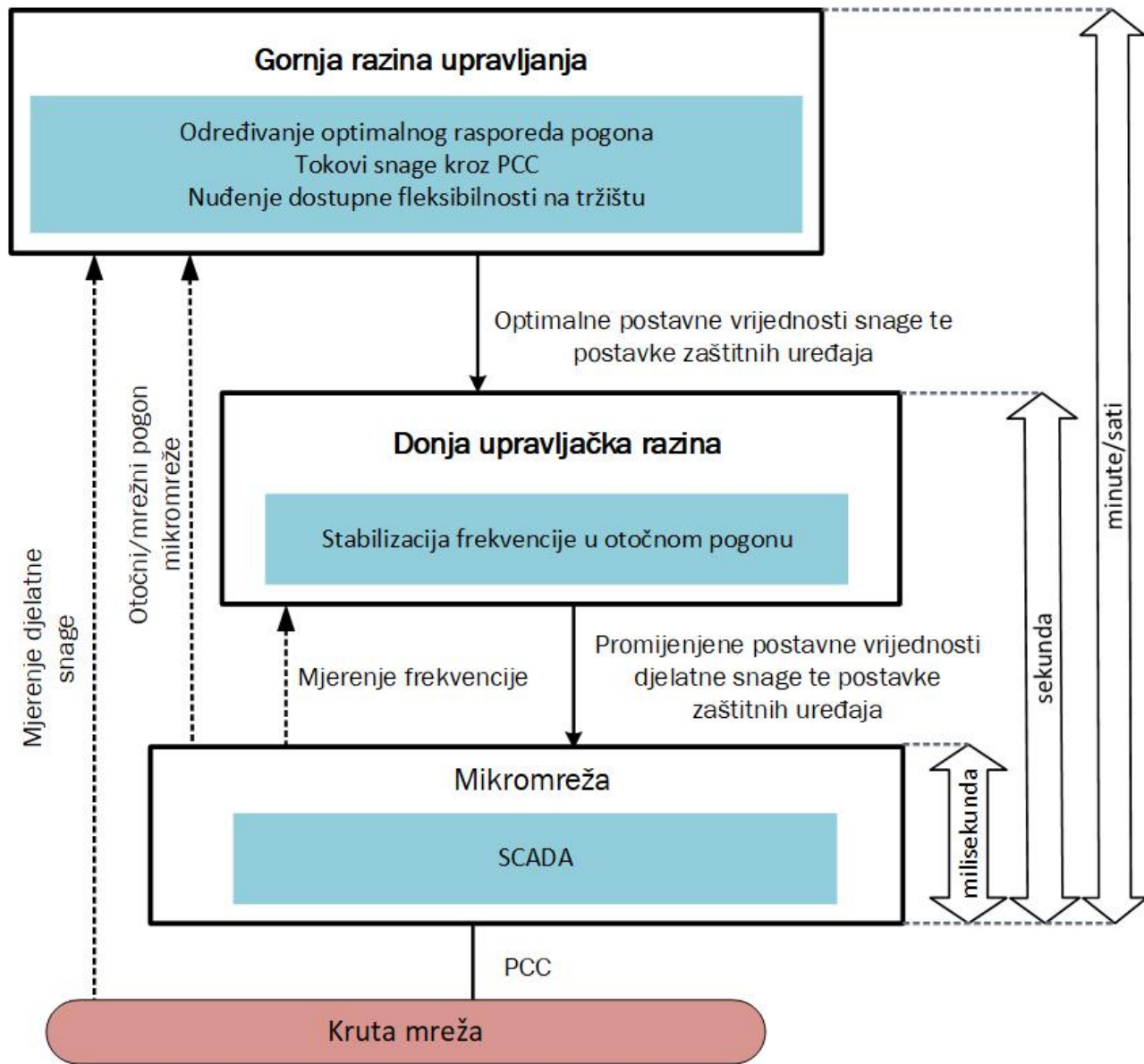
Slika 3.10: Komunikacijska shema u SGLab-u

Iz Slike 3.10 vidljivo je korištenje različitih komunikacijskih protokola za povezivanje pojedinih komponenti mikromreže sa SCADA sustavom. Lokalno upravljanje hidroelektrane povezano je s laboratorijskim SCADA sustavom korištenjem OPC UA komunikacijskog protokola budući da PLC oznake ET200SP koji se koristi u hidroelektrani ima integriran OPC UA server. PROZA NET ima integriran OPC DA klijent koji nije kompatibilan s OPC UA specifikacijom OPC protokola te je na samom serveru gdje je instalirana SCADA izvršena konverzija OPC UA u OPC DA protokol korištenjem protokola konvertera. Nadalje, numerički zaštitni uređaj Sepam G87 koji se koristi za zaštitu hidroelektrane povezan je s laboratorijskim SCADA sustavom korištenjem IEC 61850 komunikacijskog protokola. Inverter fotonaponske elektrane 1 povezan je s laboratorijskim SCADA sustavom korištenjem Modbus TCP/IP komunikacijskog protokola. Dvosmjerni pretvarač kao i elektronički tereti povezani su na PLC oznake S7-1215C AC/DC/Rly korištenjem galvanski izoliranog analognog sučelje, dok je taj PLC dalje integriran na SCADA sustav korištenjem Modbus TCP/IP protokola. Od komponenti koje još nisu dostupne u mikromreži inverter fotonaponske elektrane 2 bit će povezan s laboratorijskim SCADA sustavom korištenjem Modbus TCP/IP protokola, dok će se DC/DC pretvarač fotonaponske elektrane 3 povezati korištenjem Modbus RTU protokola. Nadalje, DC punionica električnih vozila će također sa SCADA sustavom biti povezana korištenjem komunikacijskih protokopa Modbus RTU ili OCCP 1.6.

## 4. Koncept hijerahijske upravljačke strukture mikromreže

Mikromreže su složeni sustavi koji se sastoje od različitih tipova tehnologija distribuiranih izvora energije. Fokus znanstvene i stručne zajednice usmjeren je na mogućnosti mikromreže kao koncepta koji će omogućiti aktivaciju distribucijske mreže kao i veći stupanj integracije OIE u EES-u u cjelini. Uzimajući to u obzir mnogi istraživački projekti su usredotočeni na optimizaciju rada mikromreže razvojem i poboljšanjem optimizacijskih algoritama [24]. Zbog složenosti mikromreža kao energetske sustava, a osobito zbog specifičnosti mikromreža s visokim udjelom pretvarača u pogledu zahtjeva na zaštitu takvih mikromreža upravljačka struktura mikromreža treba uzeti u obzir nekoliko aspekata čiji zahtjevi uključuju različite vremenske skale i različite pristupe upravljanja. Naime, promjene frekvencije i napona pojedinih komponenti definiraju se na vremenskim skalama od nekoliko sekundi ili manje, dok se optimalan raspored pogona i ekonomsko upravljanje baterijskim spremnicima, distribuiranom proizvodnjom, upravljanje potrošnjom te razmjena električne energije između mikromreže i distribucijske mreže kroz priključnu točku definiraju na duljoj vremenskoj skali, npr. sati. Hijerahijska upravljačka struktura koja će se razviti u sklopu ovog projekta sastoji se od dvije upravljačke razine. Upravljanje na obje razine temelji se na primjeni algoritma modelskog prediktivnog (engl. Model Predictive Control). Gornja upravljačka razina zadužena je za dugoročno ponašanje i optimizaciju rada mikromreže. Rezultati sekvencijalnog izvođenja gornje upravljačke razine su optimalne postavne vrijednosti snage za sve komponente mikromreže (npr. upravljiva distribuirana proizvodnja, upravljiva potrošnja, itd.). Nadalje, u svakom ciklusu izvođenja gornja razina upravljanja će provjeravati trenutno topološko stanje mikromreže te da li je mikromreža u otopnom ili mrežnom radu te će na osnovu toga vršiti i izračune kratkih spojeva ta kao rezultat toga slati nove postavne vrijednosti na zaštitne uređaje. Sami izračuni kratkih spojeva i postavki zaštitnih uređaja će se vršiti izdvojene iz optimizacijskog algoritma korištenjem profesionalnih alata za izračune kratkih spojeva u distribucijskim mrežama kao što su NEPLAN ili ETAP. Ovi alati će biti integrirani u gornju upravljačku razinu kroz posebna aplikacijska sučelja (engl. Application Interface - API) korištenjem ko-simulacijskog okruženja. Donja upravljačka razina u ovoj upravljačkoj strukturi bit će zadužena za stabilizaciju frekvencije mikromreže u otopnom načinu rada. U nastavku je definiran okvir optimizacijskog algoritma koji će se koristiti kao podloga za implementaciju dugoročne optimizacije pogona mikromreže kao i nudi usluga fleksibilnosti na tržištu pomoćnih usluga od strane mikromreže. Na Slici 4.1 prikazana je hijerahijska struktura mikromreže koja će se razviti u sklopu ovog projekta.

Dodatna komponente ovdje definirane hijerahijske strukture upravljanja, a koja je sastavni dio oba upravljačka sloja sadržana u bloku viši upravljački slojevi na Slici 3.10 te koja služi za razmjenu podataka te pozivanje na sekvencijalno izvođenje algoritama pojedinog upravljačkog sloja te njihovu koordinaciju je ko-simulacijsko okruženje MOSAIK. MOSAIK je fleksibilno ko-simulacijsko okruženje za napredne mreže čiji glavni ciljevi su koordiniranje rada upravljačkih algoritama svake upravljačke razine kao i upravljanje tokovima podataka između njih [26]. Dakle, MOSAIK kontrolira koliko kada će biti pozvan upravljački algoritam svake razine upravljanja te koliko često će se podaci razmjenjivati između upravljačkih razina. Osim toga MOSAIK upravlja i time koji podaci će se razmjenjivati. Prethodno spomenuti ciljevi MOSAIKA otkrivaju i glavnu snagu ovako predložene strukture upravljanja mikromrežom koja je prije svega fleksibilna i skalabilna. Naime, nadogradnjom API-a u MOSAIK je moguće uključiti dodatne simulatore ukoliko postoji potreba za proširenjem funkcija upravljačkih razina. Osim toga, budući da je i SCADA sustav zajedno sa svim svojim komponentama integriran u MOSAIK preko PNet Gateway-a integracijom novih fizičkih komponenti u SCADA sustava one su automatski integrirane i u hijerahijsku strukturu upravljanja mikromrežom.



Slika 4.1: Hijerarhijski upravljački slojevi mikromreže s velikim udjelom pretvarača

## 4.1 Optimizacijski algoritam gornje upravljačke razine

Formulacija linearnog optimizacijskog problema (engl. Linear Programming) u obliku dinamičkog ekonomskog dispečiranja (engl. Dynamic Economic Dispatch) koja će se koristiti kao okvir za daljni razvoj svih zahtjevanih funkcionalnosti gornje upravljačke razine predstavljena je u ovom odjeljku. Parametri i varijable koji se koriste u formulaciji optimizacijskog problema definirani su u Tablici 4.1. Osnovni cilj ovako definiranog optimizacijskog problema je minimizacija troškova pogona mikromreže pokrivajući potrošnju u svakom trenutku uz zadovoljenje svih tehničkih ograničenja komponenti mikromreže dužinom cijelog pomičnog vremenskog intervala (engl. receding horizon) optimizacije. Nadalje, potrebno je istaknuti da je ovakvom formulacijom uzet u obzir najjednostavniji mogući deterministički slučaj. Daljnjim proširivanjem funkcionalnosti gornje upravljačke razine uz mogućnosti nastupa na tržištima prije svega pomoćnih usluga bit će potrebno uzeti u obzir stohastičku prirodu cijena električne energije kao i pomoćnih usluga. Nadalje, bit će potrebno također uzeti u obzir i varijabilnost proizvodnje električne energije iz OIE. Uzimajući to sve u obzir sljedeći korak u proširenju definiranog optimizacijskog problema bit će njegova transformacija u stohastički optimizacijski problem koji će uzeti u obzir prethodno spomenute čimbenike.

Tablica 4.1: Parametri i varijable optimizacijskog algoritma gornje upravljačke razine.

Parametri	Opis
$N_g$	broj DI u mikromreži
$N_l$	broj fleksibilnih tereta u mikromreži
$BL$	snaga potrošnje nefleksibilnih tereta u mikromreži [kW]
$P_g^{\text{MIN}}$	minimalna snaga proizvodnje pojedine DI jedinice [kW]
$P_g^{\text{MAX}}$	maksimalna snaga proizvodnje pojedine DI jedinice [kW]
$RU_g^{\text{MAX}}$	maksimalna brzina povećanja snage pojedine DI jedinice [kW/h]
$RD_g^{\text{MAX}}$	maksimalna brzina smanjenja snage pojedine DI jedinice [kW/h]
$P_{RES}$	ukupna proizvodnja varijabilnih OIE jedinica u mikromreži [kW]
$L_l$	predviđena potrošnja fleksibilnih tereta u mikromreži [kW]
$p_g^{\text{INIT}}$	mjerenje djelatne snage DI jedinica [kW]
$c_1$	troškovi rada i održavanja DI jedinica [EUR/kWh]
$c_2$	cijena električne energije [EUR/kWh]
Varijable	Opis
$D_l$	postavna vrijednost snage potrošnje fleksibilnih tereta [kW]
$p_g$	postavna vrijednost izlazne snage DI [kW]
$s$	snaga koja se razmjenjuje između mikromreže i distribucijske mreže [kW]

### Funkcija cilja

Cilj optimizacijskog algoritma gornje upravljačke razine je zadovoljenje sljedeće funkcije cilja:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_g} c_1 p_g(t) + c_2 s(t) \quad (4.1)$$

u kojoj prvi član predstavlja troškove povezane s proizvodnjom električne energije iz upravljivih DI jedinica u mreži, dok drugi član predstavlja troškove/profit od interakcije mikromreže s distribucijskom mrežom. Nadalje,

$t$  je vremenski korak dok  $T$  predstavlja duljinu predikcijskog horizonta.

### Pogonska ograničenja

Za očuvanje frekvencijske stabilnosti nužan je uvjet da snaga proizvodnje u mikromreži u svakom trenutku  $t$  mora biti jednaka snazi potrošnje pritom uzimajući u obzir i razmjenu električne energije između mikromreže i distribucijske mreže. Sljedeće ograničenje definira ravnotežu snaga koja uvijek mora vrijediti kako u mikromreži tako i u EES-u u cjelini.

$$\sum_{g=1}^{N_g} p_g(t) + p^{\text{RES}} \geq \sum_{l=1}^{L_c} D_l(t) + BL(t) \quad (4.2)$$

U ograničenju (4.2) prvi član s lijeve strane predstavlja proizvodnju iz upravljivih DI u trenutku  $t$  dok drugi član predstavlja sumarno mjerenje proizvodnje na početku optimizacijskog intervala iz varijabilnih OIE. Nadalje, prvi član na desnoj strani ograničenja (4.2) predstavlja potrošnju fleksibilnih tereta u mikromreži dok drugi član predstavlja potrošnju nefleksibilnih tereta. Nadalje svaka DI jedinica u mikromreži mora zadovoljiti i sljedeća tehnička ograničenja:

$$p_{g,t}^{\text{MIN}} \leq p_{g,t} \leq p_{g,t}^{\text{MAX}} \quad (4.3)$$

$$p_{g,t+1} - p_{g,t} \leq RU_g^{\text{MAX}} \quad (4.4)$$

$$p_{g,t_1} - p_g^{\text{INIT}} \leq RU_g^{\text{MAX}} \quad (4.5)$$

$$p_{g,t-1} - p_{g,t} \leq RD_g^{\text{MAX}} \quad (4.6)$$

$$p_g^{\text{INIT}} - p_{g,t_1} \leq RD_g^{\text{MAX}} \quad (4.7)$$

U ograničenjima (4.3)–(4.7) vrijedi  $g=1, \dots, N_g$ . Ograničenje (4.3) ograničava snagu proizvodnje pojedinog DI  $p_{g,t}$  između minimalne i maksimalne fizički ostvarive snage proizvodnje. Nadalje, ograničenja (4.4)–(4.5) ograničavaju brzinu povećanja snage proizvodnje pojedinog DI, dok ograničenja (4.6)–(4.7) ograničavaju brzinu smanjenja snage pojedinog DI.

Budući da fleksibilni tereti u mikromreži imaju mogućnost pružanja odziva potrošnje (engl. Demand Response) dodatno ograničenje je uvedeno kako bi se osiguralo da je ukupna energija koju potroši fleksibilni teret nepromijenjena na kraju optimizacijskog intervala.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} D_{l,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} L_{l,t} \quad (4.8)$$

U (4.8)  $L_{l,t}$  predstavlja predviđanje potrošnje upravljivih tereta dok  $D_{l,t}$  predstavlja postavnu vrijednost snage potrošnje fleksibilnih tereta.

## 4.2 Optimizacijski algoritam donje upravljačke razine

Algoritam donje upravljačke razine koji je zasnovan na MPC formulaciji osobito bitnu ulogu će imati u regulaciji frekvencije mikromreže u otopnom načinu rada. Problem regulacije frekvencije na razini agregiranog sustava (u ovom slučaju na razini mikromreže) uobičajeno se izražava korištenjem jednadžbe njihanja kao načinom za izražavanje inercije sustava. Jednadžba njihanja u linearnoj aproksimaciji se izražava kao:

$$\frac{d}{dt}\Delta f_t = -\frac{D_{\text{load}}}{2H_t}\Delta f_t + \frac{1}{2H_t}\Delta P_t^{\text{m}} \quad (4.9)$$

U jednadžbi (4.9)  $\Delta f$  predstavlja odstupanje frekvencije od nominalne vrijednosti,  $H_t$  predstavlja inerciju sustava dok je  $D_{\text{load}}$  koeficijent prigušenja tereta.

$\Delta P^{\text{m}}$  opisuje ravnotežu mehaničke snage unutar promatrane mreže te se može izraziti kao razlika snage koja se injektira odnosno povlači iz sustava:

$$\Delta P_t^{\text{m}} = P_t^+ - P_t^- \quad (4.10)$$

Za razvoj daljnji razvoj MPC formulacije potrebno je definirati model mikromreže iz kojeg će se izvjesti predikcijski model korišten u MPC algoritmu. U tom smislu model definiran je linearni model mikromreže prikazan u prostoru stanja kako slijedi:

$$\Delta x_{i,k+1} = A_{i,k}\Delta x_{i,k} + B_{i,k}\Delta u_{i,k} + G_{i,k}\Delta d_{i,k} + r_{i,k} + w_t \quad (4.11)$$

$$\Delta y_{i,k} = C\Delta x_{i,k} + v_t \quad (4.12)$$

U (4.11)  $\Delta u_{i,k}$  predstavlja upravljačke ulaze u trenutku  $i$  te vremenskom trenutku  $k$  predikcijskog horizonta. Na sličan način može promatrati stanje sustava  $x_{i,k}$  kao i poremećaj koji djeluje na sustav  $\Delta d_{i,k}$ . U najjednostavnijem obliku  $\Delta y_{i,k}$  izjednačava stanja jednadžbe njihanja. Transformacijom inkrementalnih varijabli  $\Delta y_{i,k}, \Delta x_{i,k}, \Delta u_{i,k}, \Delta d_{i,k}$  iz (4.11)–(4.12) dolazimo do varijabli  $y_k, x_k, u_k, d_k$ . U ovoj formulaciji  $x_k$  i  $d_k$  su estimacije izražene kao  $\hat{x}_k$  i  $\hat{d}_k$ . Uzimajući to u obzir možemo izraziti kvadratičnu funkciju cilja i ograničenja algoritma donje razine upravljanja kako slijedi:

$$\min J = \|\Phi_x \hat{x}_{k|k} + \Gamma_u u_k + \Gamma_d \hat{d}_{k|k} + \Phi_r r_{k|k}\|_{W_z}^2 + \|u_k\|_{W_{\Delta u}}^2 \quad (4.13)$$

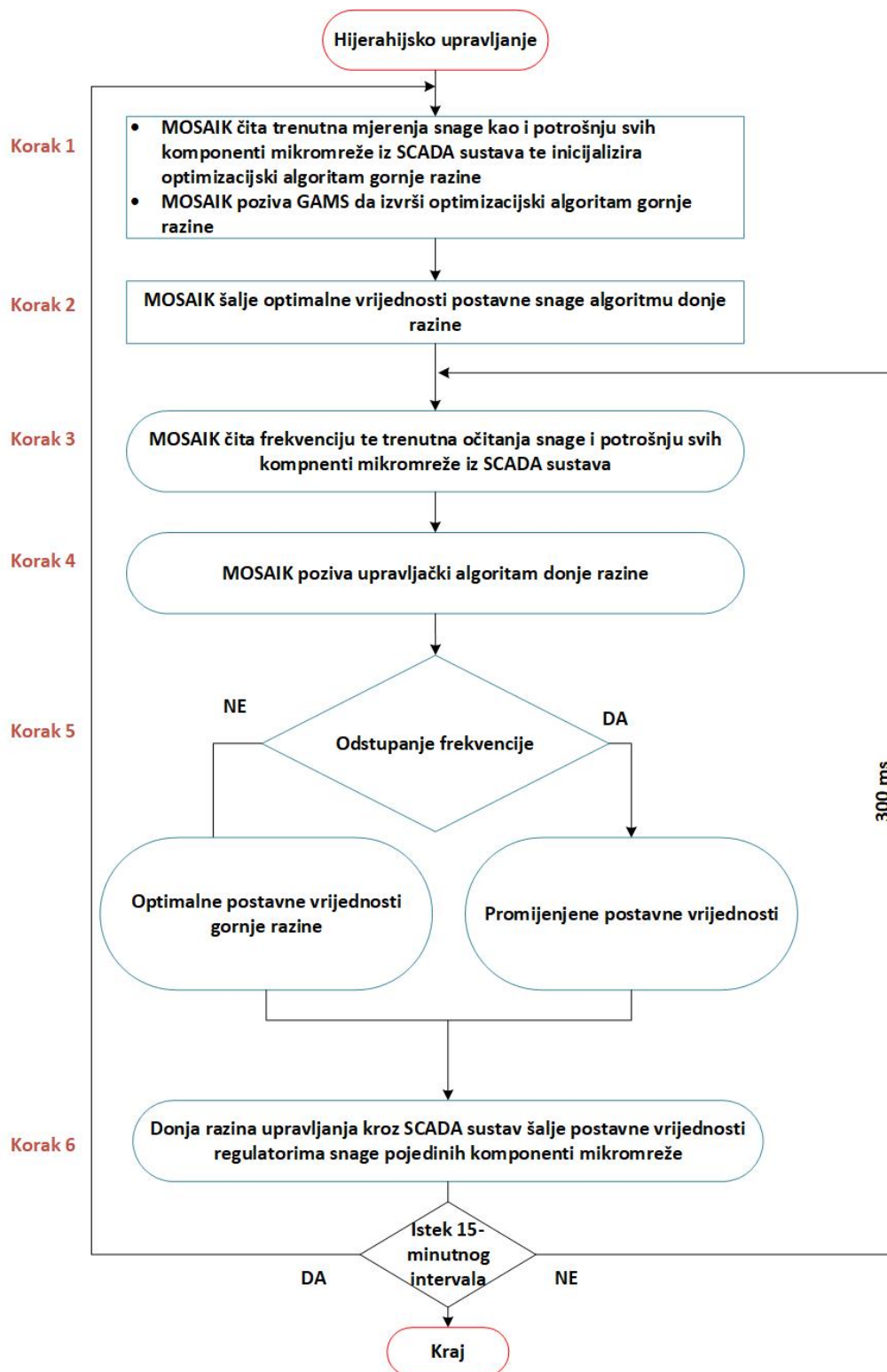
$$u_k^{\text{MIN}} \leq u_k \leq u_k^{\text{MAX}} \quad (4.14)$$

$$\Delta u_k^{\text{MIN}} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_k^{\text{MAX}} \quad (4.15)$$

$$G_k u_k \leq h_k \quad (4.16)$$

Uzimajući u obzir formulacije upravljačkih problema gornje i donje razine upravljanja na Slici 4.2 prikazana je sekvenca izvođenja hijerarhijske strukture upravljanja mikromrežom.





Slika 4.2: Dijagram izvođenja hijerarhijske strukture upravljanja

Iz Slike 4.2 vidljivo je da se hijerarhijska struktura upravljanja sastoji od 6 glavnih koraka. U prvom koraku ko-simulacijsko okruženje MOSAIK čita trenutnu vrijednosti snage proizvodnje svih DI kao i potrošnju tereta unutar mikromreže iz SCADA sustava te na osnovu tih vrijednosti inicijalizira optimizacijski algoritam gornje razine. Kako je prethodno naglašeno MOSAIK ima mogućnost integracije različitih simulatora i alata korištenjem odgovarajućeg API sučelja. U tom smislu ovdje je predviđeno korištenje programskog alata GAMS za izvođenje optimizacijskog algoritma iako to naravno može biti bilo koji drugi prikladni alat koji sadrži rješavače (engl. solver) za različite tipove optimizacijskih algoritama. Nakon završetka izračuna optimizacijskog algoritma gornje razine u drugom koraku MOSAIK prosljeđuje rješenja optimizacijskog algoritma gornje razine optimizacijskom algoritmu donje razine. U trećem koraku MOSAIK čita mjerenja frekvencije te trenutna mjerenja snage kao i potrošnju svih komponenti mikromreže iz SCADA sustava. U četvrtom koraku MOSAIK poziva na izvođenje algoritam donje razine. U petom koraku promatraju se odstupanja frekvencije. U šestom koraku ako su odstupanja frekvencije iz prethodnog koraka unutar zadovoljavajućih granica donja razina upravljanja kroz SCADA sustav prosljeđuje postavne vrijednosti izračunate algoritmom gornje upravljačke razine regulatorima snage pojedinih komponenti mikromreže. Ukoliko su odstupanja frekvencije veća od dopuštenih izvodi se MPC algoritam definiran u prethodnom poglavlju te se nove postavne vrijednosti prosljeđuju regulatorima snage pojedinih komponenti mikromreže. Nakon isteka 15 minutnog razdoblja cijela sekvenca upravljanja se ponovo izvodi.

## 5. Zaključna razmatranja

Glavna ideja ovog izvještaja bila je prikazati okvir za razvoj hijerarhijske strukture upravljanja mikromrežom s velikim udjelom pretvarača. Kako je vidljivo iz predložene hijerarhijske upravljačke strukture teži se korištenju rješenja koje se sastoji od dvije upravljačke razine. Gornja upravljačka razina zadužena je za dugoročnu optimizaciju pogona mikromreže dok je glavni zadatak donje upravljačke razine stabilizacija frekvencije mikromreže u otočnom radu. Funkcionalnost ovdje predloženog rješenja testirat će se na primjeru laboratorijske mikromreže dostupne u SGLab-u na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Eksperimentalni rezultati će zasigurno istaknuti prednosti ovako predloženog rješenja kao što su fleksibilnost i skalabilnost. Isto tako za očekivati je pojavljivanje i određenih poteškoća prilikom puštanja u rad ovako predloženog sustava upravljanja budući da se sastoji od velikog broja komponenti koje su integrirane u laboratorijski SCADA sustav korištenjem različitih vrsta komunikacijskih protokola.

*Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.*

## Literatura

- [1] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, “Recent developments in microgrids and example cases around the world — A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, issue 8, pp. 4030–4041, 2011.
- [2] R. H. Lasseter, and P. Paigi, “Microgrid: a conceptual solution” in *Proceeding of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialist Conference*, Aachen, 2004.
- [3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Irvani and C. Marnay, “Microgrids” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [4] T. Morstyn, B. Hredzak, and V.G. Agelidis, “Control Strategies for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems: An Overview” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, issue 9, pp. 3652–3666, 2018.
- [5] J. Matas, M. Castilla, L.G. Vicuna et al., “Virtual Impedance Loop for Droop-Controlled Single-Phase Parallel Inverters Using a Second-Order General-Integrator Scheme” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, issue 12, pp. 2993–3002, 2010.
- [6] N.L. Diaz, T. Dragičević, J.C. Vasquez et al., “Fuzzy-Logic-Based Gain-Scheduling Control for State-of-Charge Balance of Distributed Energy Storage Systems for DC Microgrids” *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, March 2014, pp. 2171–2176.
- [7] J. Matas, M. Castilla, L.G. Vicuna et al., “Intelligent Distributed Generation and Storage Units for DC Microgrids - A new concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, issue 5, pp. 2476–2485, 2014.
- [8] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong et al., “Hybrid Energy Storage Systems for renewable Energy Sources Integration in microgrids: A review” in *Conference Proceedings IPEC*, pp. 2476–2485, 2010.
- [9] Y. Gu, W. Li and X. He, “Frequency-Coordinating Virtual Impedance for Autonomous Power Management of DC Microgrid” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, issue 4, pp. 2328–2337, 2015.
- [10] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas et al., “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, issue 1, pp. 158–172, 2011.
- [11] M. Savaghebi, A. Jalilian, J.C. Vasquez et al., “Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, issue 2, pp. 797–807, 2012.
- [12] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines et al., “Reactive Power Sharing and Voltage Harmonic Distortion Compensation of Droop-Controlled Single Phase Islanded Microgrid” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, issue 3, pp. 1149–1158, 2014.
- [13] J.A. Momoh, R. Adapa and M.E. El-Hawary, “A review of selected optimal power flow literature to 1993. I. Nonlinear and quadratic programming approaches” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, issue 1, pp. 96–104, 1999.

- [14] J. Lavaei and S.H. Low, “Zero Duality Gap in Optimal Power Flow Problem” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, issue 1, pp. 92–107, 2012.
- [15] X. Feng, A. Shekhar, F. Yang et al., “Comparison of Hierarchical Control and Distributed Control for Microgrid” *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, issue 10, pp. 1043–1056, 2017.
- [16] Y. Han, X. Ning, P. Yang et al., “Review of Power Sharing, Voltage Restoration and Stabilization Techniques in Hierarchical Controlled DC Microgrids” *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [17] University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing, Smart Grid Laboratory. [www.fer.unizg.hr/zvne/research/research\\_labs/sglab/laboratory](http://www.fer.unizg.hr/zvne/research/research_labs/sglab/laboratory)
- [18] Schneider Electric, “Sepam TM Series 80 Protective Relays”
- [19] Schneider Electric, “Sepam accessories communication”,2013.
- [20] Goran Oreški, “Glavni projekt elektroinstalacija sunčana elektrana FER-ZVNE Mapa I”, Solektra projekt d.o.o., Čakovec,2019.
- [21] PV Inverter, “SUNNY TRIPOWER 10000TL/12000TL/15000TL/17000TL - Installation Manual”, SMA Solar Technology AG.
- [22] TC.GSS Grid-tie Source Sink, “Bidirectional DC power supply”, Regatron.
- [23] Electronic DC Load - EL 9000 B, “Operating Manual”, Elektro-Automatik AG.
- [24] PROZA NET 3, “Korisnički priručnik”, KONČAR.
- [25] “Strategic deployment document for Europe’s electricity networks of the future”, <http://www.smartgrids.eu>, 2008.
- [26] MOSAIK, <https://www.offis.de/en/applications/energy/co-simulation-of-multi-modal-energy-systems.html>