

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

# FLEXIBASE

## Dokumentacija koordiniranog sustava upravljanja

prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić  
doc. dr. sc. Mateo Beus  
Bojana Barać, mag. ing.  
Marija Miletić, mag. ing.  
Nikolina Čović, mag. ing.  
Petra Miljan, mag. ing.  
Ivan Grcić, mag. ing.  
Domagoj Badanjak, mag. ing.



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



# Sadržaj

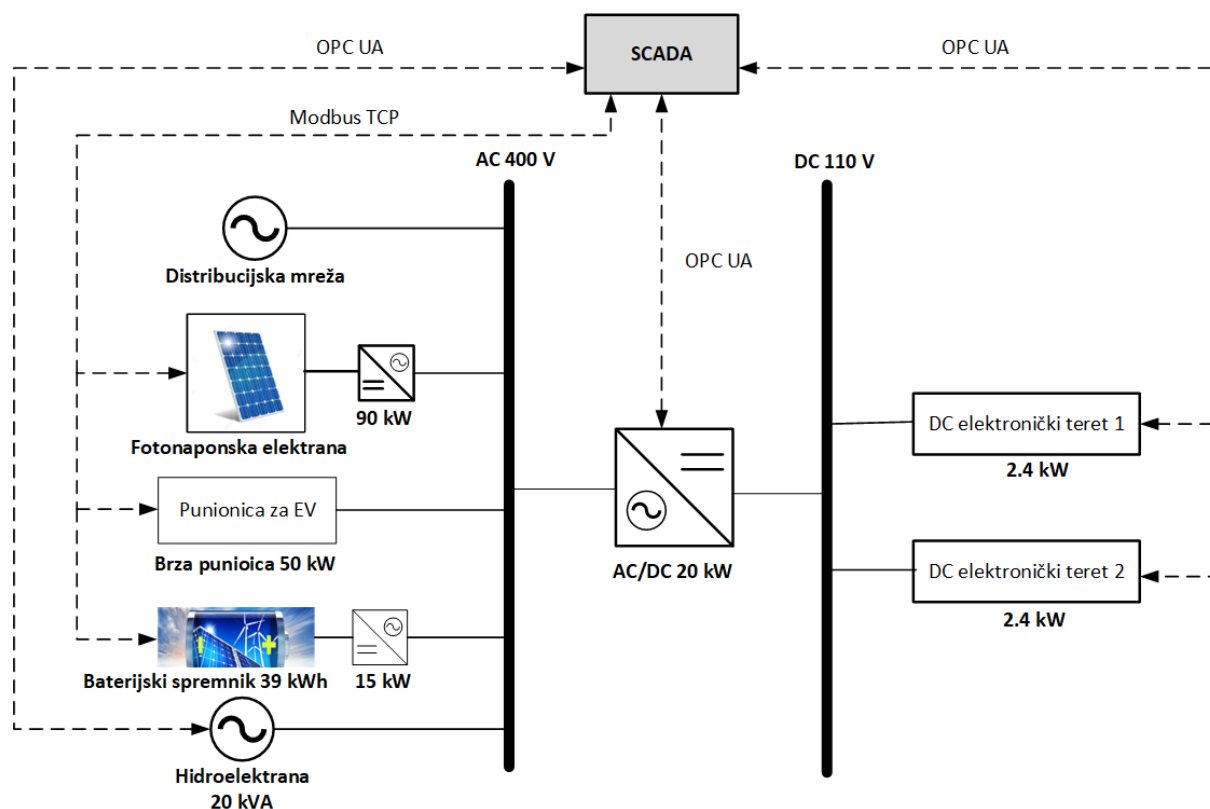
<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Laboratorijski postav mikromreže</b>	<b>2</b>
2.1	Komunikacijska mreža . . . . .	3
2.2	AC mikromreža . . . . .	3
2.3	Hidroelektrana . . . . .	5
2.4	Fotonaponska elektrana . . . . .	7
2.5	Punionica za EV . . . . .	8
2.6	Baterijski spremnik . . . . .	9
2.7	Elektronički tereti i dvosmjerni pretvarač . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Model upravljanja</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Zaključna razmatranja</b>	<b>21</b>
	<b>Literatura</b>	<b>22</b>

# 1. Uvod

Upravljanje mikromrežama je koncept u domeni energetike i informacijskih tehnologija koji se sve više ističe u suvremenom svijetu. Mikromreže predstavljaju lokalne distribuirane sustave koji kombiniraju obnovljive izvore energije, skladištenje energije i napredne komunikacijske tehnologije kako bi osigurale energetske neovisnost, efikasnost i pouzdanost. Upravljanje mikromrežama obuhvaća različite aspekte, uključujući tehničko upravljanje, ekonomsku optimizaciju, zaštitu, kao i integraciju mikromreže s većim energetske mrežama. Tehničko upravljanje uključuje praćenje i nadzor mikromreže, upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije, kao i upravljanje skladištenjem energije radi postizanja optimalne ravnoteže između ponude i potražnje. Ekonomski aspekti upravljanja mikromrežama obuhvaćaju optimizaciju troškova energije, uključujući upravljanje proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora, upravljanje potrošnjom energije kako bi se smanjila vršna opterećenja i optimizacija upotrebe skladišta energije. Integracija mikromreže s većim energetske mrežama zahtijeva upravljanje tokom energije između mikromreže i glavne mreže, kao i mogućnost prelaska na autonomno funkcioniranje mikromreže u slučaju prekida napajanja s glavne mreže. Sigurnost i zaštita igraju ključnu ulogu u upravljanju mikromrežama. S obzirom na to da mikromreže kombiniraju različite izvore energije i napredne komunikacijske sustave, nužno je osigurati sigurnost i integritet mreže od potencijalnih prijetnji kao što su hakerski napadi ili kvarovi opreme. Osim toga, upravljanje zaštitom u mikromrežama uključuje i osiguranje pouzdanog napajanja tijekom prekida napajanja, kao i brzu detekciju i oporavak nakon prekida.

## 2. Laboratorijski postav mikromreže

U svrhu provedbe eksperimentalne validacije upravljačkog modela koji je sastavni dio EMS sustava razvijenog u sklopu projekta FLEXIBASE korišten je laboratorijski postav mikromreže koja se nalazi u sklopu Laboratorija za napredne elektroenergetske mreže (engl. *Smart Grid Laboratory* - SGLab) koji se nalazi na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva [1]. U nastavku ovoga poglavlja detaljno je opisan korišteni laboratorijski postav mikromreže. Struktura laboratorijske mikromreže prikazana je na Slici 2.1.



Slika 2.1: SGLab - struktura laboratorijske mikromreže.

Na Slici 2.1 vidljivo je da je korišten laboratorijski postav hibridne mikromreže, tj. mikromreže koja se sastoji od izmjeničnog AC i istosmjernog DC dijela koji su međusobno povezani korištenjem dvosmjernog pretvarača. Nadalje, na Slici 2.1 izmjenični dio mikromreže zbog jednostavnosti prikaza prikazan je samo jednim čvorištem iako u stvarnosti izmjenični dio mikromreže ima 13 čvorišta. Nadalje, sve komponente mikromreže integrirane su centralni nadzorni i upravljački sustav mikromreže (engl. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) koji služi kao aplikacijska platforma za integraciju i testiranje razvijenog EMS sustava. U nastavku su detaljno objašnjene sve komponente laboratorijskog postava.

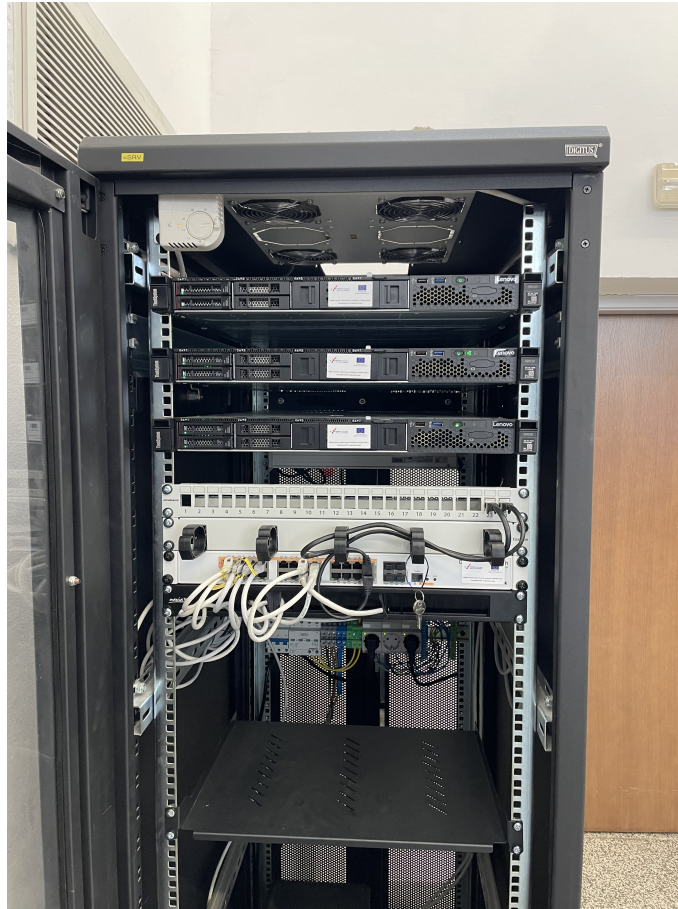
## 2.1 Komunikacijska mreža

Za laboratorijsku validaciju razvijenog EMS algoritma, korištena je distribuirana arhitektura koja uključuje tri servera Lenovo SR 530 [2]. U ovom slučaju, jedan server se koristi za izvođenje SCADA sustava, dok su zadaci EMS algoritma (gornji i donji upravljački model) podijeljeni između preostala dva servera. Korištenje distribuirane arhitekture omogućuje bolje performanse izvršavanja algoritma. Na slici 2.2 prikazan je ormar u SGLab-u gdje su smješteni spomenuti serveri.

Za integraciju svih komponenti laboratorijske mikromreže, koristili smo različite komunikacijske protokole s Ethernetom kao fizičkim slojem mreže. OPC UA protokol korišten je kao komunikacijski protokol za integraciju hidroelektrane, dvosmjernog pretvarača i elektroničkih tereta unutar SCADA sustava. Modbus TCP protokol koristio se za integraciju invertera fotonaponske elektrane, punionica za električna vozila i baterijskog spremnika u SCADA sustav. IEC 61850 protokol korišten je za pristup parametrima zaštitnih funkcija generatorske zaštite hidroelektrane. Na slici 2.3 prikazan je komunikacijski ormar u kojem se nalaze mrežni preklopnici koji povezuju sve komponente mikromreže.

## 2.2 AC mikromreža

U nastavku ovog poglavlja opisuje se izmjenični dio laboratorijske mikromreže koji se koristi kao dio postava za validaciju razvijenog EMS algoritma. Na slici 2.4 prikazani su ormari u kojima se nalaze komponente izmjenične mikromreže. Prvi ormar sadrži integrirani sustav upravljanja mikromrežom, dok se u sljedeća tri ormara nalaze sklopke koje su povezane na početku i na kraju svakog dijela/kabela mikromreže. Na taj način je moguće uključivati ili isključivati pojedine segmente mikromreže. Također, u tim ormarima nalaze se i mjerni pretvornici koji mjere električne parametre na početku svakog dijela mikromreže. Električni parametri koji su dostupni za mjerenje na svakom dijelu mikromreže uključuju fazne i linijske naponske vrijednosti, struje za svaku fazu, ukupno harmonijsko izobličenje (Total Harmonic Distortion - THD) napona i struje, frekvenciju, nesimetriju, ukupnu aktivnu snagu kroz dio



Slika 2.2: SGLab - ormar sa serverima.

mikromreže, aktivnu snagu po fazi, ukupnu reaktivnu snagu kroz svaki dio mikromreže, reaktivnu snagu po fazi, ukupnu prividnu snagu kroz svaki dio mikromreže i prividnu snagu po fazi. Zadnja četiri ormara sadrže otpornike i zavojnice s vrijednostima koje odgovaraju kabelima različitih vrsta, presjeka i duljina.

Slika 2.5 prikazuje jednopolnu shemu izmjeničnog dijela laboratorijske mikromreže. Iz prikazane jednopolne sheme jasno je da izmjenični dio mikromreže ima ukupno 13 čvorišta i strukturu koja je radijalna. Važno je napomenuti da se radijalna struktura mikromreže ne može mijenjati, osim što je moguće uključiti ili isključiti pojedine dijelove mikromreže. Međutim, parametri kabela u izmjeničnom dijelu mikromreže dostupni su u dvije različite konfiguracije. Jedna konfiguracija odgovara referentnim niskonaponskim parametrima CIGRE mikromreže, dok druga konfiguracija koristi tipične vrijednosti parametara kabela distribucijske mreže u Republici Hrvatskoj.



Slika 2.3: SGLab - komunikacijski ormar.

## 2.3 Hidroelektrana

U laboratorijskom postavu u SGLab-u, upravljiva proizvodnja ostvarena je korištenjem hidroelektrane. Na slici 2.6 prikazana je laboratorijska hidroelektrana. Iz slike je vidljivo da se glavne komponente hidroelektrane sastoje od hidrauličkog agregata, peltonove turbine i sinkronog generatora. U podrumu laboratorija nalaze se spremnik s vodom i pumpa koja pumpa vodu kroz tlačni cjevovod prema turbini. Ukupna prividna snaga sinkronog generatora hidroelektrane iznosi 20 kVA. Hidroelektrana koristi Peltonovu turbinu, a izlazna snaga hidroelektrane upravlja se promjenom položaja igle u mlaznici na kraju tlačnog cjevovoda. Na taj način se regulira protok vode kroz turbinu i, sukladno tome, izlazna snaga hidroelektrane.

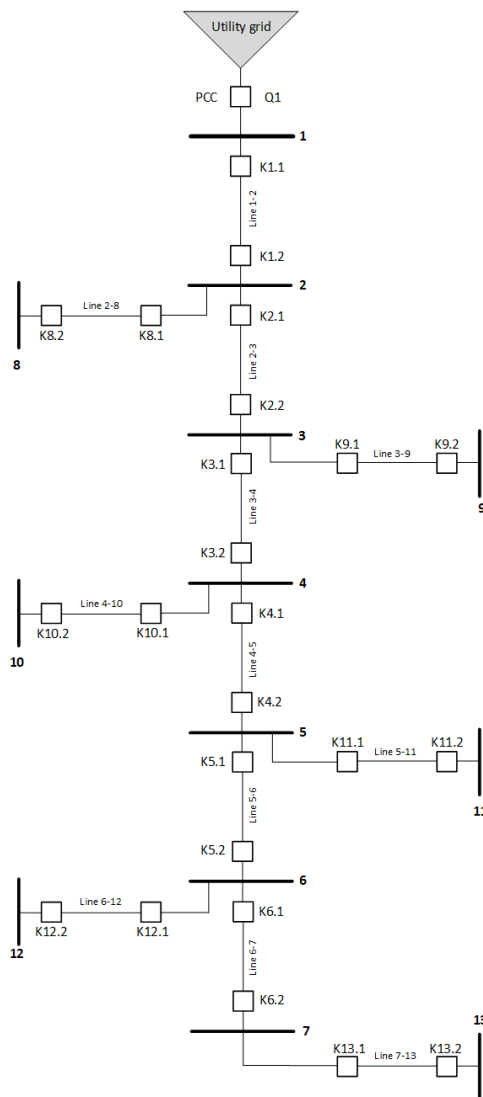
Na slici 2.7 možemo vidjeti razvodni i upravljački ormar hidroelektrane. Važno je naglasiti da laboratorijska hidroelektrana posjeduje sve potrebne upravljačke i mjerni sustave koji su karakteristični za stvarno industrijsko okruženje. U implementaciji turbinskog regulatora ko-



Slika 2.4: SGLab - ormari mikromreže.

risti se programabilni logički kontroler (PLC) tipa ET200-SP, regulacija uzbude izvodi se putem regulatora tipa KONreg S1000, dok se za generatorsku zaštitu koristi numerički zaštitni relej SepamG80.





Slika 2.5: SGLab - jednopolna shema izmjeničnog dijela mikromreže.

## 2.4 Fotonaponska elektrana

U laboratorijskom postavu, neupravljiva proizvodnja ostvarena je kroz fotonaponsku elektranu. Ukupna instalirana snaga fotonaponskih panela na krovu laboratorija iznosi 108 kW, dok je ukupna instalirana snaga invertera 90 kW. Fotonaponska elektrana sastoji se od ukupno sedam invertera. Na slici 2.8 prikazan je ormar u kojem su smješteni inverteri proizvođača SMA, svaki s nazivnom snagom od 10 kW. Također, na slici 2.9 prikazan je ormar s inverterima tipa Fronius, s nazivnom snagom od 12,5 kW po inverteru. Svi inverteri su integrirani u SCADA i EMS



Slika 2.6: SGLab - hidroelektrana.

sustav putem Modbus TCP komunikacijskog protokola. Korištenjem ovog protokola moguće je pristupiti mjerenjima s svakog invertera, uključujući ukupnu djelatnu, jalovu i prividnu snagu, djelatnu, jalovu i prividnu snagu po fazi, linijski i fazni napon, te ukupno proizvedenu električnu energiju. Također se mogu pristupiti i postavke zaštite na inverterima, kao što su naponska i frekvencijska zaštita, kao i ograničenje izlazne snage invertera. Na slici 2.10 prikazan je položaj fotonaponskih panela na krovu laboratorija.

## 2.5 Punionica za EV

U laboratorijskom postavu mikromreže, kako bi se validirao utjecaj punionica za električna vozila (EV) na učinkovitost razvijenog EMS algoritma, dodana je brza punionica snage 50 kW. Na slici 2.11 možemo vidjeti da punionica ima tri priključka za punjenje električnih vozila. Krajnji desni priključak opremljen je s Type2 utičnicom za izmjenično punjenje maksimalne snage od 43 kW, dok prva dva priključka (CCS i CHAdeMO) koriste se za istosmjerno punjenje maksimalne snage od 50 kW. Punionica je integrirana u SCADA i EMS sustav putem



Slika 2.7: SGLab - ormar razvoda i upravljački ormar hidroelektrane.

komunikacijskog protokola Modbus TCP, što omogućuje prikupljanje ukupnih mjerenja snage punionice, kao i snage s pojedinog priključka. Nadalje, putem SCADA i EMS sustava moguće je ograničiti ukupnu snagu punjenja punionice, kao i snagu punjenja na pojedinom priključku.

## 2.6 Baterijski spremnik

Ukupni dostupni kapacitet baterijskih spremnika iznosi 113 kWh. Za eksperimentalnu validaciju EMS algoritma u mikromreži integrirano je 6 baterijskih modula tipa VARTA PLUSE 6. Svaki modul sastoji se od baterijskog spremnika s pripadajućim BMS sustavom kapaciteta 6,6 kWh i jednofaznim pretvaračem snage 2,5 kW. Ovaj dizajn omogućuje veću fleksibilnost uporabe spremnika, jer se putem jednofaznog priključka mogu povezati na različita čvorišta u mikromreži kako bi se simulirale nesimetrije. Također, ako je potrebno povezati dva spremnika na istu fazu jednog čvorišta u mikromreži, moguće je spojiti ih trofazno. U takvom slučaju, potrebno je integrirati nadređeni sustav koordiniranog upravljanja za svih 6 baterijskih modula. Slika 2.12 prikazuje dostupne baterijske module u SGLab-u.



Slika 2.8: SGLab - ormar sa SMA inverterima fotonaponske elektrane.

## 2.7 Elektronički tereti i dvosmjerni pretvarač

Dvosmjerni pretvarač i dva DC elektronička tereta koriste se za implementaciju istosmjernog dijela mikromreže. Na DC strani dvosmjernog pretvarača su povezani elektronički tereti. U kontekstu upravljanja, moguće je slati postavne vrijednosti snage, struje i napona na DC strani pretvarača, kao i postavne vrijednosti snage i struje za svaki od elektroničkih tereta. Mjerenja snage, struje i napona s DC strane dvosmjernog pretvarača, kao i mjerenja snage i struje za svaki od elektroničkih tereta, mogu se prikupljati putem OPC UA komunikacijskog protokola. Važno je napomenuti da je moguće promijeniti izlaznu snagu dvosmjernog pretvarača u rasponu od 0-20 kW, struju u rasponu od 0-63 A, te napon na DC strani u rasponu od 0-400 V. Za elektroničke terete, izlazna snaga se može mijenjati u rasponu od 0-2,4 kW. Slika 2.13 prikazuje ormar u kojem su smješteni dvosmjerni pretvarač i elektronički tereti.



Slika 2.9: SGLab - ormar s FRONIUS inverterima fotonaponske elektrane.



Slika 2.10: SGLab - fotonaponski paneli na krovu laboratorija.



Slika 2.11: SGLab - brza punionica za električna vozila.



Slika 2.12: SGLab - baterijski spremnik.





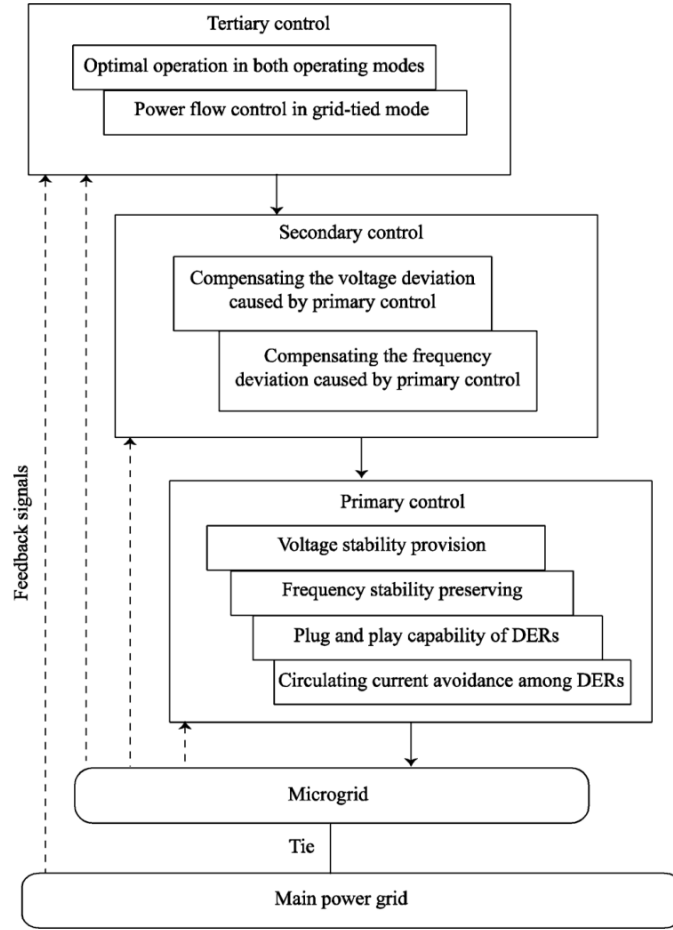
Slika 2.13: SGLab - istosmjerna mikromreža i elektronički tereti.

### 3. Model upravljanja

Uređaji opisani u prethodnom poglavlju su osnova laboratorijskog postava mikromreže. Kako bi mikromreža pravilno funkcionirala, jedinice se moraju koordinirati. Pravilno funkcioniranje mikromreže znači da su sva tehnička ograničenja sustava poštovana, odnosno da su napon i frekvencija u određenom rasponu vrijednosti a struja ne prelazi gornju granicu interval vremena duži od dopuštenoga. Slika 3.1 najbolje dočarava ulogu i obaveze sustava upravljanja u mikromreži. U hijerarhijskom sustavu upravljanja svaka razina odrađuje dio upravljačkog posla. Primarna kontrola osigurava stabilnost napona i frekvencije te omogućava da se bilo koju uređaj spoji ili odspoji bez da naruši stabilnost. Na primjeru laboratorijskog postava, hidroelektrana može održavati stabilan napon i/ili frekvenciju mikromreže prikladnom regulacijom, dok ostali uređaji tada mogu davati određenu snagu u sustav bez straha od pojave nestabilnosti. Sekundarna kontrola sprječava odstupanje napona i frekvencije od nominalnog. Pošto primarno upravljanje održava navedene veličine stabilnima, moguće je da dođe stabilnosti u točki koja previše odstupa od nominalne vrijednosti, što može imati negativne posljedice za sustav. Naposljetku, tercijarna kontrola brine o izmjeni snage između mikromreže i vanjske mreže prilikom spoja na mrežu odnosno osigurava optimalan pogon mikromreže ako je mikromreža autonomna.

Pošto se za primarnu i sekundarnu kontrolu koriste već dobro poznate metode, a razvijeni upravljački model se odnosi na nastup mikromreže na tržištima energije, njegov opis je dan u nastavku. U ovom poglavlju se raspravlja i opisuje formulacija problema planiranja pogona mikromreže s integracijom na tržište i otpornošću na neplanirani prijelaz u otočni način rada. U suštini, ovaj problem ujedinjuje upravljačke izazove na gornjoj i donjoj razini kako bi se postigao optimalan financijski rezultat na tržištu električne energije, uz istovremeno poštivanje tehničkih ograničenja generatora, pohrane energije i mikromreže. Najprije je opisana ciljna funkcija optimizacijskog modela koja se treba minimizirati, a zatim su navedena sva ograničenja koja vrijede za varijable u sustavu.

Mikromreža je većinu vremena priključena na vanjsku mrežu pa je funkcija cilja minimizacija troškova na tržištu ili tržištima na kojima sudjeluje te samog pogonskog troška. Oznaka DAM označava dan-unaprijed tržište (engl. *Day Ahead Market*), IDM unutardnevno tržište (engl. *Intraday Market*) te BM tržište uravnoteženja (engl. *Balancing Market*). Mikromreža ima pravo nastupa na bilo kojem od navedenih tržišta. U funkciji cilja se također našao i parametar koji se odnosi na opuštanje naponskih ograničenja. Naime, granice napona su fiksno zadane, no kako bi mikromreža ostala u pogonu odnosno kako bi potrošači bili opskrbljeni, kršenje ovih



Slika 3.1: Hijerarhijska kontrola mikromreže [3].

ograničenja će biti dopušteno uz određenu kaznu.

$$\min \sum_t \sum_i [DAM_{i,t}^{\text{cost}} + IDM_{i,t}^{\text{cost}} + BM_{i,t}^{\text{cost}} + p_{i,t}^{\text{gen}} \cdot \lambda_{gen_i} + \lambda^{\uparrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\uparrow \text{bound}} + \lambda^{\downarrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\downarrow \text{bound}}] \quad (3.1)$$

$$DAM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{DA}} - dis_{i,t}^{\text{DA}}) \cdot \lambda_t^{\text{DA}}, \quad \forall i, t \quad (3.2)$$

$$IDM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{ID}}) \cdot \lambda_t^{\text{ID}}, \quad \forall i, t \quad (3.3)$$

$$BM_{i,t}^{\text{cost}} = dev_{i,t}^{\uparrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\uparrow} + dev_{i,t}^{\downarrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\downarrow}, \quad \forall i, t \quad (3.4)$$

Punjenje i pražnjenje spremnika energije na dan-unaprijed i unutrašnjem tržištu (ograničenja 3.5-3.8) je ograničeno maksimalnom snagom punjenja odnosno pražnjenja spremnika. Nemoguće

je istodobno puniti i prazniti spremnik energije što je u modelu osigurano binarnim varijablama  $x_{i,t}^{\text{DA}}$  i  $x_{i,t}^{\text{ID}}$ . Varijabla  $dev_{i,t}^{\uparrow}$  označava devijaciju snage punjenja/praznjenja od razine dogovorene na dan-unaprijed tržištu. Konačno, izraz 3.9 objedinjuje aktivnosti spremnika na dva navedena tržišta a izraz 3.10 povezuje aktivnost spremnika sa fizikalnim modelom punjenja ( $c_{s,k,t}$ ) i pražnjenja ( $d_{s,k,t}$ ).

$$dis_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\uparrow} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{DA}} \quad \forall i, t \quad (3.5)$$

$$ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\downarrow} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{DA}}) \quad \forall i, t \quad (3.6)$$

$$dis_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (3.7)$$

$$ch_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{ID}}) \quad \forall i, t \quad (3.8)$$

$$g_{i,t} = ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\downarrow} + ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{DA}} + dev_{i,t}^{\uparrow} - dis_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (3.9)$$

$$g_{s,k,t} = c_{s,k,t} - d_{s,k,t} \quad \forall s, k, t \quad (3.10)$$

Izraz 3.11 i 3.12 opisuju tokove snaga između čvorišta mikromreže. Izraz 3.11 opisuje tok radne snage između čvorišta  $i$  i  $j$ . Radna snaga u čvorištu je jednaka zbroju proizvodnje od strane generatora i/ili spremnika energije, potrošnje energije te energije koja dolazi odnosno odlazi iz čvorišta. Varijabla  $p_{ij,t}$  predstavlja iznos snage koja teče između čvorova  $i$  i  $j$ . Kvadrat struje između čvorišta označava varijabla  $i_{ij,t}$ , a pomnožena s otporom voda  $R_{ij}$  predstavlja snagu gubitaka na vodu. Analogno vrijedi i za tok jalove snage, s iznimkom da se koristi reaktancija voda umjesto njegovog otpora.

$$p_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot R_{ij} - (p_{j,t}^{\text{gen}} + d_{j,t} - p_{j,t}^{\text{load}} - c_{j,t}) + \sum_{m:j \rightarrow m} P_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (3.11)$$

$$q_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot X_{ij} - (q_{j,t}^{\text{gen}} - q_{j,t}^{\text{load}} + q_{j,t}^{\text{batt}}) + \sum_{m:j \rightarrow m} Q_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (3.12)$$

Razlika napona između čvorišta je modelirana ograničenjem 3.13. Varijabla  $u_{i,t}$  predstavlja kvadrat napona čvorišta. Pad napona ovisi o otporu voda između čvorova i struji koja teče.

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(R_{ij,e}P_{ij,t} + X_{ij,e}Q_{ij,t}) + i_{ij,t}(R_{ij,e}^2 + X_{ij,e}^2), \quad \forall i, j, t \quad (3.13)$$

Ograničenje 3.14 povezuje radnu i jalovu snagu s iznosom napona i struje. Formulacija bi u originalu trebala sadržavati jednakost, međutim tada je ovaj optimizacijski problem nekonveksan što uzrokuje određene probleme prilikom pronalaska rješenja. Relaksacijom ograničenja problem on postaje konveksan te lakše rješiv [4].

$$i_{ij,t} \cdot u_{i,t} \geq p_{ij,t}^2 + q_{ij,t}^2, \quad \forall ij, t \quad (3.14)$$

Maksimalna i minimalna razina proizvodnje generatora je ograničena (Ograničenja 3.15 i 3.16). Binarna varijabla  $x_{i,t}^{gen}$  označava stanje generatora: upaljen ili ugašen.

$$P_i^{gen,min} \cdot x_{i,t}^{gen} \leq p_{i,t}^{gen} \leq P_i^{gen,max} \cdot x_{i,t}^{gen}, \quad \forall i, t \quad (3.15)$$

$$Q_i^{gen,min} \cdot x_{i,t}^{gen} \leq q_{i,t}^{gen} \leq Q_i^{gen,max} \cdot x_{i,t}^{gen}, \quad \forall i, t \quad (3.16)$$

Proizvodnja generatora jednaka je prodanoj energiji na tržištima te odstupanjima koja proi-  
zlaze iz tog.

$$p_{i,t}^{gen} = p_{i,t}^{gen,DA} + p_{i,t}^{gen,ID} - dev_{i,t}^{gen,\uparrow} + dev_{i,t}^{gen,\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.17)$$

Devijacije za generatore i spremnike energije su zbrojene kako bi se ispravno prikazale u funkciji cilja.

$$dev_{i,t}^{\uparrow} = dev_{i,t}^{gen,\uparrow} + dev_{i,t}^{batt,\uparrow} \quad \forall i, t \quad (3.18)$$

$$dev_{i,t}^{\downarrow} = dev_{i,t}^{gen,\downarrow} + dev_{i,t}^{batt,\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.19)$$

Napon na čvorštima je također ograničen, čime se osigurava stabilnost sustava. Donja i gornja granica napona se mogu pomaknuti za iznos  $BND_{i,t}^{\downarrow}$  odnosno  $BND_{i,t}^{\uparrow}$ , no trajanje popuštanja je ograničeno na određen vremenski period  $N$  izrazima 3.21 i 3.22. Naime, samo u jednom od  $N$  slijednih trenutaka će biti moguće aktivirati ovu mogućnost.

$$U_i^{min} - BND_{i,t}^{\downarrow} \cdot x_{i,t}^{\downarrow bound} \leq u_{i,t} \leq U_i^{max} + BND_{i,t}^{\uparrow} \cdot x_{i,t}^{\uparrow bound} \quad \forall i, t \quad (3.20)$$

$$\sum_t^{t+N} x_{i,t}^{\downarrow bound} \leq 1 \quad (3.21)$$

$$\sum_t^{t+N} x_{i,t}^{\uparrow bound} \leq 1 \quad (3.22)$$

Set ograničenja 3.23 - 3.29 predstavlja ograničenja spremnika energije, u ovom slučaju baterijskog spremnika. Ograničenje stanja napunjenosti baterije je određeno izrazom 3.23. Punjenje odnosno pražnjenje baterije rezultira promjenom stanja napunjenosti. Snaga kojom se puni/prazni je također ograničena (3.24-3.25). Početno stanje napunjenosti je uobičajeno zadano, kao i maksimalno stanje napunjenosti baterije ( $B_i^{cap}$ ). Baterija je povezana preko pretvarača koji ima mogućnost pružanja reaktivne energije (izrazi 3.28 i 3.29).

$$soe_{i,t} = soe_{i,t-1} - d_{i,t} \cdot \frac{1}{\eta} + c_{i,t} \cdot \eta \quad (3.23)$$

$$P_i^{ch,max} \cdot x_{i,t}^{bat} \geq c_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (3.24)$$

$$P_i^{dch,max} \cdot (1 - x_{i,t}^{bat}) \geq d_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (3.25)$$

$$soe_{i,0} = 0, \quad \forall i \quad (3.26)$$

$$soe_{i,t} \leq B_i^{cap} \quad (3.27)$$

$$(p_i^{ch})^2 \geq (c_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{batt})^2, \quad \forall i, t \quad (3.28)$$

$$(p_i^{dch})^2 \geq (d_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{batt})^2, \quad \forall i, t \quad (3.29)$$

Stabilnost frekvencije je izrazito bitna stavka, posebno pri neplaniranom prelasku mikromreže u otočni način rada. Sljedeće jednadžbe omogućavaju da se frekvencijska stabilnost mikromreže osigura ako se takav slučaj dogodi [5]. Brzina promjene frekvencije (engl. *Rate of change of frequency - rocof*) ima presudnu ulogu u očuvanju stabilnosti. Prema izrazu 3.30, promjena brzine frekvencije ovisi o stanju generatora i spremnika energije, faktoru prigušenja  $D$  ali i tromosti mikromreže ( $H$ ). Izrazito je važno zadržati promjenu frekvencije unutar određenih okvira pošto se na taj način ograničava apsolutni iznos frekvencije same mikromreže (ograničenja 3.31-3.33).

$$rocof_t = \left( \sum_{i=i}^N [p_{i,t}^{gen} + g_{i,t}] - Df_{t-1} - u_t \right) / 2H, \quad \forall t \quad (3.30)$$

$$rocof_t^{MIN} \leq rocof_t \leq rocof_t^{MAX}, \quad \forall t \quad (3.31)$$

$$f_t = f_{t-1} + rocof_t, \quad \forall t \quad (3.32)$$

$$f^{MIN} \leq f_t \leq f^{MAX}, \quad \forall t \quad (3.33)$$

## 4. Zaključna razmatranja

Upravljački sustav mikromreže predstavlja ključni element u postizanju optimalne učinkovitosti i pouzdanosti rada sustava. U ovom razmatranju, fokusirali smo se na opis različitih komponenti i njihovu integraciju u laboratorijskom postavu mikromreže. Jedan od glavnih ciljeva upravljačkog sustava je osigurati ravnotežu između proizvodnje i potrošnje energije u mikromreži. EMS algoritam igra ključnu ulogu u praćenju i upravljanju energijom, uzimajući u obzir različite parametre i uvjete. U laboratorijskom postavu, EMS algoritam je razvijen i validiran na različitim komponentama, kao što su izmjenični i istosmjerni dijelovi mikromreže, hidroelektrana, fotonaponska elektrana, punionica za električna vozila i baterijski spremnici. Hidroelektrana pruža upravljivu proizvodnju energije kroz regulaciju protoka vode kroz turbinu, dok fotonaponska elektrana koristi solarne panele i invertore za pretvorbu sunčeve energije u električnu energiju. Punionica za električna vozila omogućuje punjenje električnih vozila, uz mogućnost ograničavanja ukupne snage punjenja i snage po pojedinom priključku. Integracija punionice u SCADA i EMS sustav omogućuje prikupljanje mjerenja i upravljanje raznim postavkama. Baterijski spremnici pružaju mogućnost pohrane viška energije i njenog iskorištavanja u razdobljima veće potražnje. Integracija više baterijskih modula omogućuje fleksibilnost u primjeni i simuliranju različitih scenarija, uz mogućnost trofaznog i jednofaznog spajanja na mikromrežu. Upravljački sustav mikromreže također uključuje komunikacijske protokole kao što su Modbus TCP i OPC UA, koji omogućavaju prijenos podataka između komponenti sustava i centralnog upravljačkog mjesta. Zaključno, integrirani upravljački sustav mikromreže u laboratorijskom postavu pruža mogućnost testiranja i validacije različitih scenarija i algoritama upravljanja. Kombinacija upravljivih izvora energije, baterijskih spremnika, punionice za električna vozila i optimalnog upravljanja omogućuje postizanje visoke učinkovitosti, pouzdanosti i fleksibilnosti u radu mikromrežnog sustava.

*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] Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER). Available Online: <https://sglab.fer.hr/>.
- [2] Lenovo. Available Online: <https://www.lenovo.com/au/en/data-center/servers/racks/ThinkSystem-SR530/>.
- [3] Ali Bidram and Ali Davoudi. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):1963–1976, 2012.
- [4] Daniel K Molzahn, Ian A Hiskens, et al. A survey of relaxations and approximations of the power flow equations. 2019.
- [5] Yunfeng Wen, C. Y. Chung, Xuan Liu, and Liang Che. Microgrid dispatch with frequency-aware islanding constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3):2465–2468, 5 2019.