

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

FLEXIBASE

Testirana verzija koordiniranog upravljačkog sustava

prof. Hrvoje Pandžić
izv. prof. Danijel Topić
dr. sc. Mateo Beus
dr. sc. Damir Novosel
dr. sc. Ivan Pavić
Domagoj Badanjak, mag.ing.
Hrvoje Bašić, mag. ing.
Marija Čuljak, mag. ing.
Ivan Grečić, mag. ing.
Marija Miletić, mag. ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



04-2022

Sadržaj

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Uvod | 1 |
| 2 | Upravljački sustav | 2 |
| 2.1 | Mrežni način rada | 2 |
| 2.1.1 | Obnovljivi izvori energije | 2 |
| 2.1.2 | Spremnici energije | 3 |
| 2.1.3 | Nastup na tržištu | 3 |
| 2.2 | Otočni način rada | 4 |
| 2.2.1 | Neplanirani prelazak u otočni način rada | 4 |
| 2.3 | Model upravljačkog sustava | 4 |
| 3 | Testirana verzija upravljačkog sustava | 8 |
| 3.1 | Test mrežnog načina rada | 8 |
| 3.2 | Otočni način rada | 10 |
| 3.3 | Unaprjeđenja testirane verzije | 10 |
| 4 | Zaključna razmatranja | 12 |
| | Literatura | 13 |

1. Uvod

Pravilan rad koordiniranog upravljačkog sustava mikromreže osigurava optimalno iskorištavanje dostupnih resursa te teži ostvarenju maksimalne zarade prilikom nastupa na tržištu električne energije. Pošto se zahtjev za električnom energijom te proizvodnja iz obnovljivih izvora energije ne mogu egzaktno predvidjeti, a niti cijena na tržištu, upravljački sustav sadrži mehanizme koji pomažu prilikom donošenja odluka. Uzimajući u obzir navedene nesigurnosti, upravljački će sustav odrediti pogonska stanja upravljivih izvora električne energije i spremnika energije. Ograničenja se uobičajeno odnose na gornju i donju granicu izlazne/ulazne snage, stanja napunjenosti te brzinu promjene radne točke. Pri tome, upravljački sustav također mora uzeti u obzir tehnička ograničenja mikromreže u cjelini. Ograničenja ovog tipa podrazumijevaju naponska, frekvencijska te termička ograničenja mreže. Nadalje, upravljački sustav treba uzeti u obzir i način rada mikromreže, te promjenu između stanja. Prilikom mrežnog načina rada mreža nudi čvrst napon i frekvenciju, međutim u otočnom načinu rada mikromreža mora osigurati postojanost spomenutih veličina iz vlastitih resursa. Način na koji upravljački sustav ostvaruje potrebnu funkcionalnost, te zaključci donešeni nakon njegovog testiranja se nalaze u ostatku ovog izvještaja.

2. Upravljački sustav

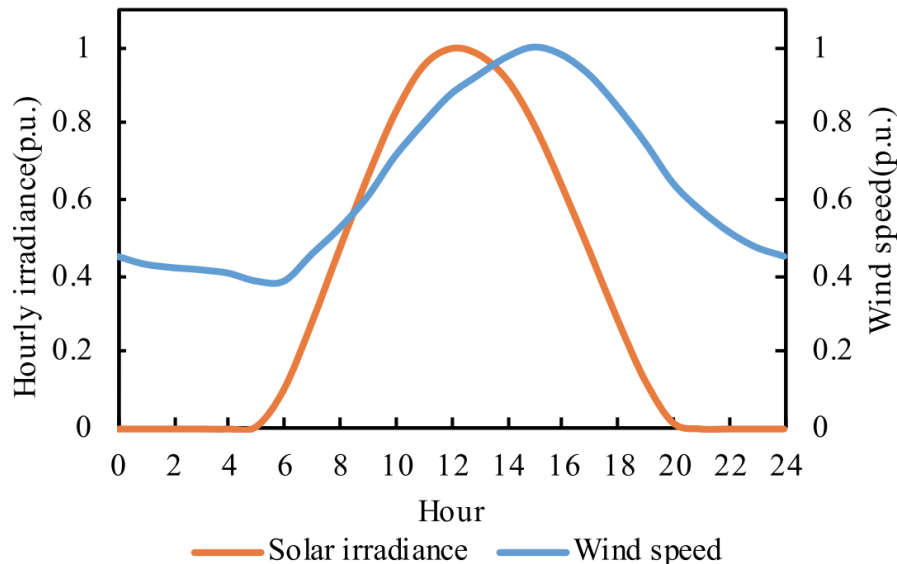
Zadatci upravljačkog sustava uključuju nastup na tržištu te optimalno iskorištavanje resursa bilo u mrežnom ili otočnom načinu rada. Ciljevi upravljačkog sustava su ekonomske prirode: zarada na tržištu u mrežnom načinu rada te osiguravanje opskrbe električnom energijom potrošača u otočnom načinu rada kad je energija iz mreže nedostupna. U nastavku poglavlja će pojedini ciljevi biti opisani uključujući ograničenja kojima podliježu. Model upravljačkog sustava koji u obzir uzima navedena ograničenja će također biti predstavljen.

2.1 Mrežni način rada

U mrežnom načinu rada je mikromreža spojena na prijenosnu ili distribucijsku mrežu s kojom ima mogućnost razmjene električne energije. U slučaju nedostatne proizvodnje iz vlastitih izvora, mikromreža nedostatke može zadovoljiti iz mreže. U suprotnom slučaju, višak energije može predati u mrežu te ostvariti financijsku korist prodavajući istu u slučaju nastupa na tržištu električne energije. Za uspješan nastup, upravljački sustav mora poznavati radna ograničenja instanci mikromreže te što preciznija predviđanja cijene električne energije. Iskorištavanje obnovljivih izvora energije (OIE) je u snažnom porastu pa tako i mikromreže sve češće sadrže takve izvore, najčešće one koji iskorištavaju energiju vjetra ili Sunca. Osnovna karakteristika takvih izvora je da se njihova proizvodnja u određenom trenutku u budućnosti ne može odrediti egzaktno već ju je potrebno procijeniti. Nadalje, benefiti spremnika energije se također mogu iskoristiti za nastup na tržištu ali i za osiguravanje neprekinutosti opskrbe u otočnom načinu rada.

2.1.1 Obnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije nisu dostupni u svakom trenutku pošto ovise o prirodnim pojavama, npr. vjetroagregat će proizvoditi električnu energiju samo kad vjetar puše, solarni panel samo ako je osunčan. Intermitentnost ovih izvora zahtjeva određenu vrstu predviđanja ako se pogon mikromreže želi planirati unaprijed kao i ako se želi nastupati na tržištu. Tipični dijagram osunčanosti i brzine vjetra se nalazi na slici 2.1, međutim odstupanja od prikazanih vrijednosti su česta. Kako bi se ovakve devijacije uzele u obzir koriste se različiti scenariji koji su prilagođeni prema dobu dana, godišnjem dobu ili drugim karakteristikama. Ono što se da jasno zaključiti je da je proizvodnja iz solarnih panela jednaka nuli u noćnim satima. Prema sredini dana osunčanost raste, međutim oblaci mogu utjecati na proizvodnju. Vršna vrijednost brzine vjetra se pojavljuje u popodnevnim satima, no devijacije također postoje. Važnost navedenih krivulja za nastup na tržištu je očita. Ako se mikromreža obaveže isporučiti određenu energiju na tržištu (npr. dan-unaprijed tržištu) i proizvodnja OIE bude niža od procijenjene, korištenje skupih generatora će biti neophodno čime se smanjuje financijska dobit.



Slika 2.1: Tipična krivulja osunčanosti i brzine vjetra tijekom jednog dana [1].

2.1.2 Spremnici energije

Benefiti spremnika energije u mikromreži su mnogostruki. Iz pogleda opskrbe potrošača unutar mikromreže, neprekinutost opskrbe može biti osigurana čak i ako OIE nisu dostupni. Naime, spremnik će pohraniti višak energije proizveden od strane OIE ukoliko proizvodnja premašuje potrošnju. Energija iz spremnika se poslije može iskoristiti za napajanje trošila bez potrebe za kupovinom energije iz mreže ili korištenja skupljih generatora. Nadalje, spremnik energije se može iskoristiti za nastup na tržištu i to na način da se puni dok je cijena niža, a kad cijena energije poraste onda se prazni. Najčešći oblik spremnika energije je baterijski spremnik u kojem se energija pohranjuje u kemijskom obliku. Karakteristike baterijskog spremnika omogućavaju pohranu većih količina energije te pražnjenje i punjenje u zadovoljavajućem vremenskom periodu. Energija se također pohranjuje u kondenzatorima, mehaničkim zamašnjacima, itd.

2.1.3 Nastup na tržištu

Obnovljivi izvori energije te općenito distribuirani izvori energije (DIE), kao i spremnici energije mogu znatno doprinijeti smanjenju troškova opskrbe. Međutim, predviđanje proizvodnje, potrošnje te cijene električne energije su od iznimne važnosti. Predviđanje proizvodnje se uobičajeno odnosi na obnovljive izvore energije, poglavito solarne panele te vjetroagregate. Generalno se procjena proizvodnje zasniva na modelima koji u obzir uzimaju povijesne podatke. Konkretno, proizvodnja energije iz solarnih panela ovisi o razini osunčanosti i temperaturi koji su pak ovisni o dobu dana odnosno godišnjem dobu. Navedeni podaci su dostupni iz meteo-

roloških mjerenja ili lokalnih mjerenja u sklopu postrojenja za proizvodnju električne energije. Korelacija meteoroloških uvjeta koji vladaju te proizvodnja u danom trenutku se može modelirati pomoću statističkih i inih modela. Predviđanje cijena električne energije je zadatak koji zahtijeva uključenje raznih ulaznih varijabli u model, čime se predviđanje dodatno komplicira.

2.2 Otočni način rada

Upravljači sustav mikromreže prilikom pogona mikromreže u otočnom načinu rada ima za zadatak osigurati neprekinutu opskrbu potrošača električnom energijom ako je to moguće. Bez mogućnosti razmjene električne energije s mrežom, mikromreža gubi mogućnost izvršavanja obaveza na tržištu, stoga su neplanirani prelasci u otočni način rada nepoželjni. Međutim, ako se takav prelazak planirano ili neplanirano dogodi upravljački sustav mora prepoznati novonastale okolnosti i djelovati shodno tome. Cilj upravljačkog sustava je tada minimizacija troškova pogona uz uvjet da je teret zadovoljen ako je to moguće. Prilikom planiranog prelaska u otočni način rada u obzir je potrebno uzeti vremensko trajanje radi lakšeg planiranja pogona. Nadalje, mreža nudi čvrst napon i frekvenciju. Prelaskom u otočni način rada ove veličine moraju biti održane u adekvatnim granicama.

2.2.1 Neplanirani prelazak u otočni način rada

Upravljački sustav se može prilagoditi tako da pokuša umanjiti posljedice neočekivanog prelaska u otočni način rada. Naime, prilikom planiranja pogona, rezerva energije se određuje da bi se upotrijebila prilikom pojave ovog slučaja. Problem nastaje prilikom određivanja trajanja neplaniranog prekida. Uzme li se u obzir predugo trajanje prekida, ekonomski benefiti se mogu umanjiti. U suprotnom slučaju, uzme li se prekratko trajanje prekida riskira se da određeni dio potrošača ostane bez opskrbe energijom. Rezerva energije se može nalaziti u spremnicima energije ili se radne točke generatora unutar mikromreže postavljaju na određenu razinu koja nudi zalihost energije.

2.3 Model upravljačkog sustava

U ovom poglavlju je navedena i opisana formulacija problema planiranja pogona mikromreže s nastupom na tržištu te određenom otpornošću na neplanirani prelazak u otočni način rada. Naime, kako su upravljački problemi gornje i donje razine spojeni u jedan koji se brine o nastupu na tržištu električne energije gdje maksimizira financijsku korist te u isto vrijeme brine da su tehnička ograničenja generatora, spremnika energije i mikromreže zadovoljena. Prvo je opisana funkcija cilja optimizacijskog modela koju je potrebno minimizirati a tada i sva ograničenja kojima podliježu varijable.

Pošto je mikromreža većinu vremena spojena na mrežu funkcija cilja je 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 ograničenja će biti dopušteno uz određenu kaznu.

$$\min \sum_t^T \sum_i^I [DAM_{i,t}^{\text{cost}} + IDM_{i,t}^{\text{cost}} + BM_{i,t}^{\text{cost}} + p_{i,t}^{\text{gen}} \cdot \lambda_{gen_i} + \lambda^{\uparrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\uparrow \text{bound}} + \lambda^{\downarrow \text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\downarrow \text{bound}}] \quad (2.1)$$

$$DAM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{DA}} - dis_{i,t}^{\text{DA}}) \cdot \lambda_t^{\text{DA}}, \quad \forall i, t \quad (2.2)$$

$$IDM_{i,t}^{\text{cost}} = (ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{ID}}) \cdot \lambda_t^{\text{ID}}, \quad \forall i, t \quad (2.3)$$

$$BM_{i,t}^{\text{cost}} = dev_{i,t}^{\uparrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\uparrow} + dev_{i,t}^{\downarrow} \cdot \lambda^{\text{BM}\downarrow}, \quad \forall i, t \quad (2.4)$$

Punjenje i pražnjenje spremnika energije na dan-unaprijed i unutar dnevnom tržištu (ograničenja 2.5-2.8) 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/pražnjenja od razine dogovorene na dan-unaprijed tržištu. Konačno, izraz 2.9 objedinjuje aktivnosti spremnika na dva navedena tržišta a izraz 2.10 povezuje aktivnost spremnika sa fizikalnim modelom punjenja ($c_{s,k,t}$) i pražnjenja ($d_{s,k,t}$).

$$dis_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\uparrow} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{DA}} \quad \forall i, t \quad (2.5)$$

$$ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\downarrow} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{DA}}) \quad \forall i, t \quad (2.6)$$

$$dis_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{dch}} \cdot x_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (2.7)$$

$$ch_{i,t}^{\text{ID}} \leq \bar{P}_i^{\text{ch}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{ID}}) \quad \forall i, t \quad (2.8)$$

$$g_{i,t} = ch_{i,t}^{\text{DA}} - dev_{i,t}^{\downarrow} + ch_{i,t}^{\text{ID}} - dis_{i,t}^{\text{DA}} + dev_{i,t}^{\uparrow} - dis_{i,t}^{\text{ID}} \quad \forall i, t \quad (2.9)$$

$$g_{s,k,t} = c_{s,k,t} - d_{s,k,t} \quad \forall s, k, t \quad (2.10)$$

Izraz 2.11 i 2.12 opisuju tokove snaga između čvorišta mikromreže. Izraz 2.11 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.

$$p_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot R_{ij} - (p_{j,t}^{\text{gen}} + d_{j,t} - p_{j,t}^{\text{load}} - c_{j,t}) + \sum_{m:j \rightarrow m} P_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (2.11)$$

$$q_{ij,t} = i_{ij,t} \cdot X_{ij} - (q_{j,t}^{\text{gen}} - q_{j,t}^{\text{load}} + q_{j,t}^{\text{batt}}) + \sum_{m:j \rightarrow m} Q_{jm,t}, \quad \forall ij, t \quad (2.12)$$

Razlika napona između čvorišta je modelirana ograničenjem 2.13. Varijabla $u_{i,t}$ predstavlja kvadrat napona čvorišta. Pad napona ovisi o otporu voda između čvorova i struji koja teče.

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(R_{ij,e}P_{ij,t} + X_{ij,e}Q_{ij,t}) + i_{ij}(R_{ij,e}^2 + X_{ij,e}^2), \quad \forall i, j, t \quad (2.13)$$

Ograničenje 2.14 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 [2].

$$i_{ij,t} \cdot u_{i,t} \geq p_{ij}^2 + q_{ij}^2, \quad \forall ij, t \quad (2.14)$$

Maksimalna i minimalna razina proizvodnje generatora je ograničena (Ograničenja 2.15 i 2.16). Binarna varijabla $x_{i,t}^{\text{gen}}$ označava stanje generatora: upaljen ili ugašen.

$$P_i^{\text{gen},\min} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}} \leq p_{i,t}^{\text{gen}} \leq P_i^{\text{gen},\max} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (2.15)$$

$$Q_i^{\text{gen},\min} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}} \leq q_{i,t}^{\text{gen}} \leq Q_i^{\text{gen},\max} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (2.16)$$

Proizvodnja generatora jednaka je prodanoj energiji na tržištima te odstupanjima koja proizlaze iz tog.

$$p_{i,t}^{\text{gen}} = p_{i,t}^{\text{gen,DA}} + p_{i,t}^{\text{gen,ID}} - dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (2.17)$$

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

$$dev_{i,t}^{\uparrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} \quad \forall i, t \quad (2.18)$$

$$dev_{i,t}^{\downarrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (2.19)$$

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 2.21 i 2.22. Naime, samo u jednom od N slijednih trenutaka će biti moguće aktivirati ovu mogućnost.

$$U_i^{\min} - BND_{i,t}^{\downarrow} \cdot x_{i,t}^{\downarrow\text{bound}} \leq u_{i,t} \leq U_i^{\max} + BND_{i,t}^{\uparrow} \cdot x_{i,t}^{\uparrow\text{bound}} \quad \forall i, t \quad (2.20)$$

$$\sum_t^{t+N} x_{i,t}^{\downarrow\text{bound}} \leq 1 \quad (2.21)$$

$$\sum_t^{t+N} x_{i,t}^{\uparrow\text{bound}} \leq 1 \quad (2.22)$$

Set ograničenja 2.23 - 2.29 predstavlja ograničenja spremnika energije, u ovom slučaju baterijskog spremnika. Ograničenje stanja napunjenosti baterije je određeno izrazom 2.23. Punjenje odnosno pražnjenje baterije rezultira promjenom stanja napunjenosti. Snaga kojom se puni/prazni je također ograničena (2.24-2.25). 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 2.28 i 2.29).

$$soe_{i,t} = soe_{i,t-1} - d_{i,t} \cdot \frac{1}{\eta} + c_{i,t} \cdot \eta \quad (2.23)$$

$$P_i^{\text{ch,max}} \cdot x_{i,t}^{\text{bat}} \geq c_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (2.24)$$

$$P_i^{\text{dch,max}} \cdot (1 - x_{i,t}^{\text{bat}}) \geq d_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (2.25)$$

$$soe_{i,0} = 0, \quad \forall i \quad (2.26)$$

$$soe_{i,t} \leq B_i^{\text{cap}} \quad (2.27)$$

$$(p_i^{\text{ch}})^2 \geq (c_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{\text{batt}})^2, \quad \forall i, t \quad (2.28)$$

$$(p_i^{\text{dch}})^2 \geq (d_{i,t})^2 + (q_{i,t}^{\text{batt}})^2, \quad \forall i, t \quad (2.29)$$

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 [3]. Brzina promjene frekvencije (engl. *Rate of change of frequency - rocof*) ima presudnu ulogu u očuvanju stabilnosti. Prema izrazu 2.30, 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 2.31-2.33).

$$rocof_t = \left(\sum_{i=i}^N [p_{i,t}^{\text{gen}} + g_{i,t}] - Df_{t-1} - u_t \right) / 2H, \quad \forall t \quad (2.30)$$

$$rocof_t^{\text{MIN}} \leq rocof_t \leq rocof_t^{\text{MAX}}, \quad \forall t \quad (2.31)$$

$$f_t = f_{t-1} + rocof_t, \quad \forall t \quad (2.32)$$

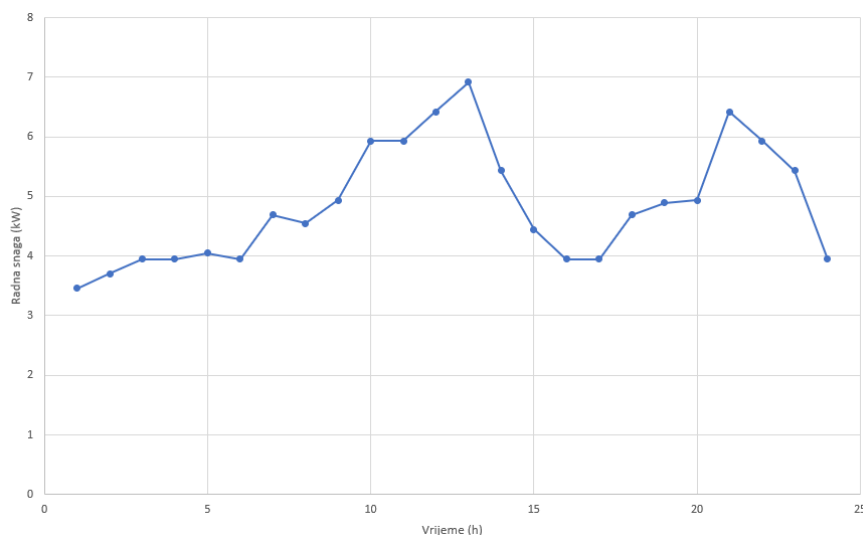
$$f^{\text{MIN}} \leq f_t \leq f^{\text{MAX}}, \quad \forall t \quad (2.33)$$

3. Testirana verzija upravljačkog sustava

Upravljački sustav određuje radne točke prema zadanoj funkciji cilja uz određena ograničenja. Ograničenja uključuju tehnička ograničenja elemenata mikromreže, mreže na koju je mikromreža spojena ali i same mikromreže. Navedena ograničenja moraju biti poznata prije pokretanja optimizacijskog problema upravljačkog sustava inače bi rješenje moglo biti neizvedivo u stvarnosti ili sam problem ne bi bio uspješno riješen. U nastavku će se optimizacijski problem opisan u prethodnom poglavlju riješiti za primjer laboratorijske mikromreže te implementirati na njen simulacijski model kako bi se ispitala valjanost rješenja. Nadalje, prelazak u otočni način rada će biti testiran, također na simulacijskom modelu.

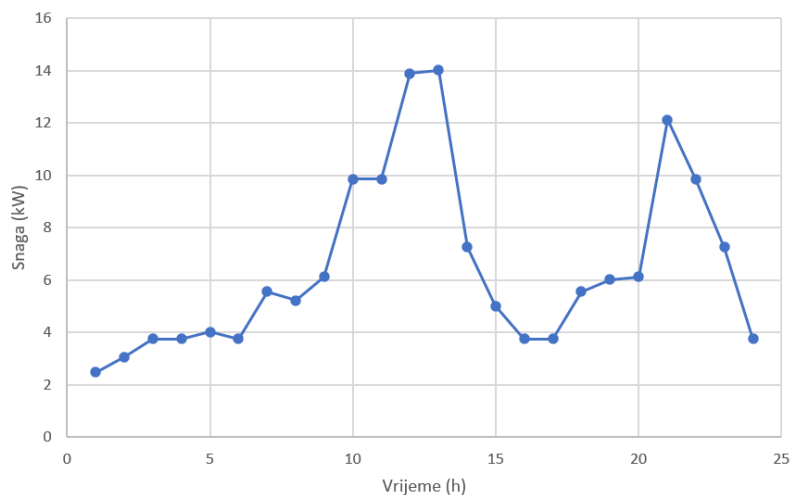
3.1 Test mrežnog načina rada

Korištena testna mikromreža je detaljno opisana u članku [4]. Mikromreža je radijalne strukture, s distribuiranim izvorima energije i teretima na različitim lokacijama. Dnevna karakteristična krivulja opterećenja je odabrana te primijenjena za opterećenje pojedinog tereta u mikromreži. Primjer radne snage tereta u čvorištu 15 mikromreže je prikazan na slici 3.1. Upravljački sustav pronašao valjano rješenje te odredio radne točke svih generatora za period od 24 sata. Valjano rješenje podrazumijeva da su sva navedena ograničenja navedena u prethodnom poglavlju zadovoljena. Simulacijska provjera ovog rješenja nije naročito potrebna pošto se optimizacijski problem brine da su sva tehnička ograničenja sustava zadovoljena.

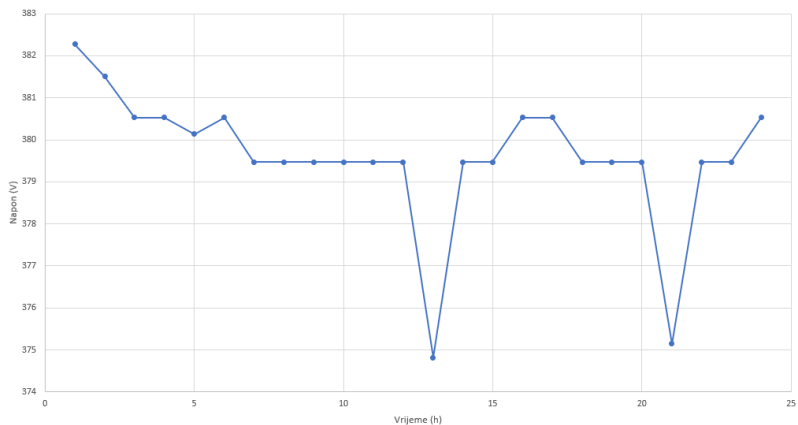


Slika 3.1: Radna snaga potrošača u čvoru 15 mikromreže.

Primjer dobivenoga rješenja za generator u čvorištu 18 je prikazan na slici 3.2. Iz slike se vidi da profil proizvodnje generatora prati profil potrošnje električne energije prikazan na slici 3.1, što pokazuje da optimizacijski problem radi ispravno. Nadalje, kako bi se pokazalo da upravljački sustav zadovoljava i tehnička ograničenja mikromreže, profil napona na čvorištu 15 je prikazan na slici 3.3. Napon je većinu vremena unutar fiksno određenih ograničenja. Pošto je dozvoljena devijacija napona od fiksnih ograničenja, s određenom cijenom, upravljački sustav će iskoristiti ovu mogućnosti i dozvoliti spuštanje ispod navedenih ograničenja u određenim trenutcima.



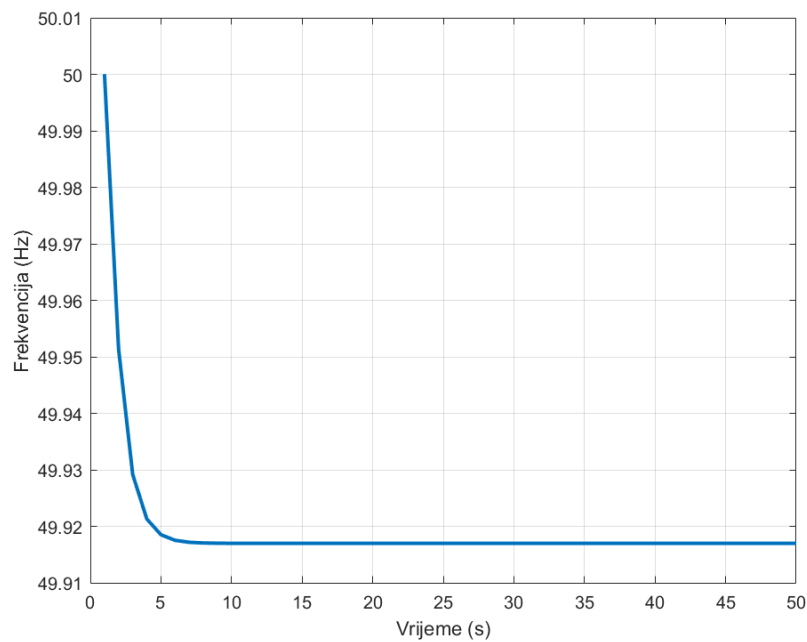
Slika 3.2: Radna snaga generatora.



Slika 3.3: Napon u čvoru 15 mikromreže.

3.2 Otočni način rada

Otočni način rada, kako je prije opisano, označava samostalan rad mikromreže prilikom odvajanja od mreže. Ograničenja optimizacijskog problema 2.30 - 2.33 određuju upravo stabilnost mikromreže prilikom neplaniranog prelaska u otočni način rada. Ispitivanje je provedeno pomoću simulacijskog modela koji će biti prisilno postavljen u otočni način rada. Kako bi se razmotrio najgori slučaj, odabran je trenutak $t=12\text{h}$ u kojem je opterećenje najviše, a ograničenja napona oslabljena. Na slici 3.4 je prikazan prelazak u otočni način rada. U početnom trenutku dolazi do odvajanja od mreže čija je frekvencija 50 Hz da bi se frekvencija spustila na nižu vrijednost bez narušavanja donje granice. Pokazuje se da upravljački sustav odrađuje svoju zadaću pošto mikromreža ostaje u pogonu i prilikom neplaniranog prelaska u otočni način rada.



Slika 3.4: Frekvencija tijekom prelaska u otočni način rada.

3.3 Unaprjeđena testirane verzije

Testirana verzija ovisi o više eksternih faktora od kojih neki uključuju predviđanje zahtjeva za električnom energijom kao i proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. Scenariji koji su razmatrani uključuju mnogo različitih događaja, međutim oslanjanje na već viđene scenarije može za posljedicu imati neodgovarajuće ponašanje pri pojavi neviđenih scenarija. Gledajući

iz tehničke perspektive, prijelaz mikromreže u otočni način rada ovisi o tromosti mikromreže H (izraz 2.30) koja se može mijenjati u vremenu. Stoga je potrebno razmotriti i promjenu radnog stanja svih elemenata mikromreže koji pružaju tromost sustavu. Kazna za prekoračenje naponskih ograničenja je također parametar koji je potrebno odrediti imajući na umu utjecaj na dugotrajnu financijsku korist mikromreže. Uz navedenu kaznu potrebno je i odrediti trajanje opuštenih ograničenja. Razmatrajući prelazak u otočni način rada, nameće se pitanje trajanja takvog načina rada. Dulje očekivano trajanje zahtijeva alokaciju više resursa za opskrbu potrošača, a može imati negativne financijske posljedice. Popis unaprjeđenja se nalazi u tablici 3.1.

Tablica 3.1: Unaprjeđenja testirane verzije

| Br. | Unaprjeđenja testirane verzije |
|------------|--|
| 1. | Odabir scenarija korištenih za optimizaciju. |
| 2. | Implementirati promjenjivu tromost mikromreže. |
| 3. | Odabir kazne za narušavanje naponskih ograničenja. |
| 4. | Odabir trajanja opuštenih naponskih ograničenja. |
| 5. | Određivanje očekivanog trajanja neplaniranog otočnog rada. |

4. Zaključna razmatranja

U izvještaju je opisana formulacija optimizacijskog problema koju izvršava upravljački sustav kako bi planirao rad mikromreže, odnosno odredio radne točke generatora i spremnika energije. U obzir su također uzeta ograničenja koja dopuštaju neometan prelazak mikromreže u otočni način rada prilikom neplaniranog odvajanja od mreže. Navedeni upravljački sustav je testiran na 24-satnom periodu i pokazuje se da zadovoljava sva ograničenja. Prelazak u otočni način rada je testiran simulacijski. Radne točke dobivene od upravljačkog sustava su postavljene te je mikromreža električki odvojena od mreže. Pokazuje se da mikromreža nema poteškoća i ostaje u pogonu, uz zadovoljena sva ograničenja pogona. Unaprjeđenja koja se mogu primijeniti na testiranu verziju upravljačkog sustava su navedena, te će biti razmotrena u budućnosti.

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] Xiyuan Liu and Zhaohong Bie. Cooperative planning of distributed renewable energy assisted 5g base station with battery swapping system. *IEEE Access*, 9:119353–119366, 2021.
- [2] Daniel K Molzahn, Ian A Hiskens, et al. A survey of relaxations and approximations of the power flow equations. 2019.
- [3] 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.
- [4] Mateo Beus, Ivan Grcić, and Hrvoje Pandžić. Microgrid dispatch with protection constraints. In *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pages 1–6, 2021.