

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

FLEXIBASE

Dokumentacija modela optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga uz uvjet otpornosti na vanjske kvarove

prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić
izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder
doc. dr. sc. Mateo Beus
Nikolina Čović, mag. ing.
Domagoj Badanjak, mag. ing.
Ivan Grcić, mag. ing.



Europska unija
Zajedno do fondova EU



05-2023

Sadržaj

1	Uvod	1
2	O kvarovima	2
2.1	Upravljanje	2
3	Nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga uz poseban naglasak na uvjet otpornosti na vanjske kvarove	5
3.1	Matematički model	5
3.2	O modelu zaštite	11
4	Laboratorijski postav	12
5	Smjernice za primjenu	15
6	Zaključna razmatranja	16
	Literatura	17

1. Uvod

Ovaj izvještaj predstavlja jedan u nizu završnih dokumenata o provedbi i rezultatima projekta FLEXIBASE, a koji se fokusira na otpornost mikromreža na vanjske kvarove i siguran prijelaz na otočni način rada. Ova tema je dopunjena obzirom na prethodne izvještaje koji su opisali osnovne principe nastupa mikromreža na tržištima električne energije, kao što je recimo u izvještaju D.3.19. Naglasak ovog dokumenta je na važnosti i mogućnostima sigurnog i nesmetanog prijelaza na otočni način rada, dok mikromreža aktivno sudjeluje na tržištima prema strategiji matematičkog modela koji je razvijen u sklopu ovog projekta.

Razumijevanje otpornosti mikromreža na vanjske kvarove postaje sve važnije u današnjem energetsom okruženju. Izazovi kao što su nestabilnost mreže, prirodne katastrofe i tehnički problemi mogu izazvati prekid u opskrbi električnom energijom. Stoga, sposobnost mikromreža da se pouzdano prebace na otočni način rada postaje ključna za održavanje kontinuiteta napajanja i sigurnosti korisnika.

Uzimajući u obzir prethodna istraživanja i izvještaje, ovaj izvještaj se usredotočuje na otpornost na vanjske kvarove kao integralni dio razvoja algoritma i alata koji omogućavaju mikromrežama optimalan nastup na tržištima, uz pošivanje svih zadanih ograničenja. Implementirani matematički model pruža optimalnu strategiju za nastup na odabranim tržištima, uzimajući u obzir sastavnice mikromreže i njihova tehnička ograničenja. No, istovremeno, iznimno je važno osigurati da mikromreža bude otporna na vanjske kvarove i da može sigurno preći na otočni način rada u slučaju pojave tehničkih problema ili nestabilnosti mreže. U takvim situacijama, mikromreža mora osigurati kontinuiranu isporuku električne energije svojim korisnicima, unatoč nemogućnosti sudjelovanja na tržištima dok traje otočni način rada.

U nastavku ovog dokumenta bit će dan pregled ključnih informacija za razumijevanje kako se pristupilo problemu otpornosti na vanjske kvarove.

2. O kvarovima

U sklopu FLEXIBASE projekta, ovaj dokument se fokusira upravo na otpornost na vanjske kvarove.

Naime, prelazak na otočni način rada predstavlja izazov koji zahtijeva uzimanje u obzir tehničkih ograničenja i osiguranje pouzdane opskrbe energijom. U sklopu provedenog projekta, razvijen je pouzdan upravljački model mikromreže koji je prikladan za mrežni i otočni rad, te prijelaze između ta dva načina rada.

U nastavku ovog poglavlja, detaljnije će biti prikazan utjecaj upravljanja na kvarove u mikromreži te će se istaknuti mjere i strategije koje osiguravaju otpornost na vanjske kvarove i pouzdan rad sustava.

Kvarovi u mikromreži mogu se javiti na različitim dijelovima sustava, a njihova pojava ovisi o karakteristikama distribuiranih izvora energije, pretvarača, ispravljača i drugih komponenti. Obično se kvarovi manifestiraju na sabirnici ili kabelima/vodovima koji povezuju te komponente. Svaki dio mikromreže ima svoju specifičnu izvedbu, prilagođenu određenoj primjeni i vrsti izvora energije. Distribuirani izvori energije mogu biti rotacijski, poput vjetroagregata, ili statički, poput solarnih panela. Pretvarači dolaze u različitim topologijama, ovisno o njihovoj namjeni i zadatku koji obavljaju. Važno je istaknuti da struja kvara uvelike ovisi o načinu povezivanja distribuiranog izvora energije s mrežom, bilo izravno ili putem pretvarača. Također, na razinu struje kvara utječe i sustav uzemljenja mikromreže. Ovisno o izvedbi sustava uzemljenja, struja kvara može se razlikovati. Upravljačka struktura mikromreže također može imati utjecaj na razinu struje kvara, posebno ako uključuje komponente koje ograničavaju struju na određene vrijednosti. Pri projektiranju mikromreže važno je pažljivo odabrati odgovarajuće komponente i pravilno ih integrirati kako bi se minimizirao rizik od kvarova te osigurala sigurnost i pouzdanost rada sustava. Uz to, treba primijeniti odgovarajuće mjere zaštite i sigurnosti kako bi se smanjili rizici i osigurala pouzdanost mikromreže. Ukratko, kvarovi u mikromreži mogu se pojaviti na različitim dijelovima sustava, a njihova pojava ovisi o specifikacijama distribuiranih izvora energije, pretvarača, ispravljača i drugih komponenti. Uzemljenje i upravljačka struktura također mogu utjecati na razine struje kvara. Projektiranje mikromreže treba obuhvatiti odgovarajuće mjere zaštite i sigurnosti kako bi se smanjili rizici i osigurala pouzdanost sustava.

2.1 Upravljanje

Utjecaj upravljanja na kvarove je opisan na primjeru upravljanja izmjenjivačem pri otočnom načinu rada mikromreže. U otočnom načinu izmjenjivač je upravlján tako da održava napon i frekvenciju sustava stabilnima. Na slici 2.1 je izlazni napon izmjenjivača, odnosno napon na kondenzatoru izlaznog filtera C_f označen $V_{o,abc}$, a napon zajedničke sabirnice $V_{o,abc}$. Otpor

linije između izmjenjivača i sabirnice je zanemariv u usporedbi s reaktancijom induktiviteta filtera. Izlazna radna i jalova snaga su zadane izrazima:

$$P = \frac{V_{o,abc}V_{o,abc}}{X_c} \sin(\delta_{abc} - \delta_{pcc}) \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{V_{o,abc}V_{o,abc} \cos(\delta_{abc} - \delta_{pcc}) - V_{pcc}^2}{X_c}. \quad (2.2)$$

Snaga se može regulirati promjenom razlike kutova $\delta_{abc} - \delta_{pcc}$ ili amplitude $V_{o,abc}$. Proporcionalno (engl. *Droop*) upravljanje je zadano sa:

$$\omega_{ref} = \omega^* - m(P - P^*) \quad (2.3)$$

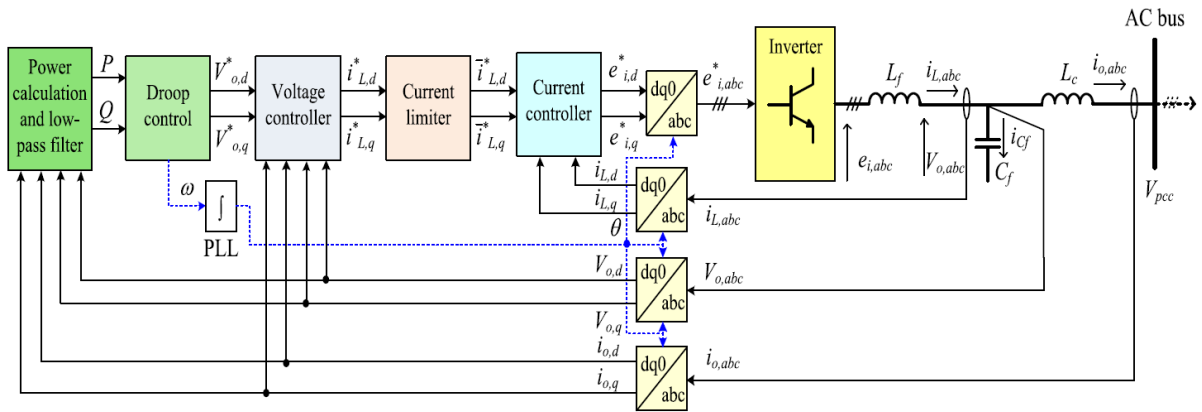
$$V_{o,abc,ref} = V_{o,abc}^* - n(Q - Q^*), \quad (2.4)$$

gdje su P^* i Q^* radna i jalova snaga, ω^* i $V_{o,abc}^*$ izlazna frekvencija i amplituda napona, ω_{ref} i $V_{o,abc,ref}$ referentne vrijednosti frekvencije i napona izmjenjivača, a m i n nagibi karakteristike proporcionalnog upravljanja. Nadalje, regulatori frekvencije i napona su zadani:

$$\delta\omega = k_{p\omega}(\omega_{ref} - \omega) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt \quad (2.5)$$

$$\delta V = k_{pV}(V_{o,abc,ref} - V_{o,abc}) + k_{iV} \int (\omega^* - \omega) dt. \quad (2.6)$$

$k_{p\omega}$, $k_{i\omega}$, k_{pV} i k_{iV} proporcionalni i integralni parametri PI regulatora. Također, $\delta\omega$ i δV moraju biti ograničeni kako se ne bi prekoračile maksimalna dozvoljena devijacija napona i frekvencije. Izlazi regulatora napona su referentne vrijednosti izlazne struje u $d - q$ referentnom sustavu, $i_{L,d}^*$ i $i_{L,q}^*$. Reference vrijednosti struje su ulazi u blok za ograničavanje struje (engl. *Current limiter*). Zadaća ovog bloka je da spriječi visoke referentne vrijednosti struje prilikom kvara u mikromreži.



Slika 2.1: Upravljački dijagram izmjenjivača pri otočnom načinu rada mikromreže [?].

3. Nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga uz poseban naglasak na uvjet otpornosti na vanjske kvarove

U okviru ovog projekta, fokusirali smo se na razvoj i implementaciju inovativnog matematičkog modela koji omogućuje optimalno sudjelovanje mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga, a jedan od ciljeva je bio osigurati otpornost na vanjske kvarove i postići pouzdanost i stabilnost mikromreže u različitim uvjetima.

Istraživanje je obuhvatilo sve relevantne aspekte mikromreže, uključujući različite komponente i njihove karakteristike. Jedan od ključnih faktora pri razvoju modela bilo je prepoznavanje potencijala mikromreže na kratkoročnim tržištima elektroenergetskog sektora, kao što su dan-unaprijed tržište, unutarodnevno tržište i tržišta pomoćnih usluga. Naš pristup je omogućio mikromreži da maksimizira korist prilagođavajući se promjenjivim uvjetima i zahtjevima tržišta, a ujedno imajući na umu latentnu opasnost prelaska u otopni način rada kao način zaštite od vanjskih kvarova.

Mikromreža se sastoji od različitih oblika potrošača i proizvođača električne energije, uz mogućnost skladištenja energije. Ova raznolikost otvara brojne mogućnosti za optimalno sudjelovanje na tržištima energije i pomoćnih usluga. Kako bismo ostvarili dodatni profit i smanjili troškove, važno je razviti strategiju koja uzima u obzir tehnička ograničenja i osigurava pouzdanu opskrbu energijom te stabilnost mikromreže, čak i u nepredviđenim situacijama, kao što su prelasci na otopni način rada.

U sklopu našeg projekta, uspješno smo razvili pouzdan upravljački model mikromreže koji je prilagodljiv mrežnom i otopnom radu te prijelazima između njih. Kroz matematičke formulacije, algoritme i opsežna testiranja, osigurali smo da naš model postiže maksimalnu korist od sudjelovanja na tržištima električne energije i pomoćnih usluga. Uzimajući u obzir regulatorne okvire i tehničke zahtjeve, naš model pruža stabilnost, pouzdanost i dugoročnu profitabilnost mikromreže na tržištima elektroenergetskog sektora.

U nastavku će prvo biti dan matematički model nastupa na tržištima električne energije, a onda pobliže biti opisan sustav zaštite.

3.1 Matematički model

U finalnom izvještaju projekta FLEXIBASE, predstavljena je trenutna matematička formulacija modela optimalnog nastupa mikromreže na tržištu energije i pomoćnih usluga. Iako je ekonomska strana projekta, odnosno optimalan nastup na tržištu, glavni fokus izvještaja, važno je naglasiti da je u cjelokupnom projektu velika pažnja posvećena i tehničkoj strani rada mikromreže.

Model je osmišljen tako da uzima u obzir mrežni i otočni način rada mikromreže, kao i prijelazna stanja između njih. Stavljjen je veliki naglasak na zaštitu mikromreže te osiguravanje stabilnog i pouzdanog pogona čak i u ekstremnim situacijama.

Trenutno su u modelu uzeti u obzir baterijski spremnik i generički prikaz generatora (bez definiranog tipa) kao komponente koje sudjeluju na tržištu. Time je obuhvaćen velik dio potencijalnih komponenti mikromreže, ali u budućem radu postoji prostor za dodavanje drugih elemenata i mogućnosti.

Izvještaj pruža cjelovit pregled trenutnog stanja i postignutih rezultata u razvoju modela optimalnog nastupa mikromreže na tržištu energije i pomoćnih usluga. Ističe se važnost ekonomske i tehničke strane projekta te ukazuje na mogućnosti daljnjeg proširivanja i poboljšanja modela kako bi se obuhvatili svi relevantni aspekti mikromreže i postigla maksimalna korist na tržištu.

<https://www.overleaf.com/project/5ef9faaf9c8e9200012720dc>

U nastavku je dan pregled matematičke formulacije kakva je već predstavljena u prijašnjim izvještajima, a pritom je bitno istaknuti sljedeće sastavnice:

- Funkcija cilja minimizira trošak sudjelovanja na raznim tržištima (tj. maksimizira profit)
- Promatrana tržišta su, dan-unaprijed tržište, unutarдневно i tržište uravnoteženja
- U obzir su uzeta i moguća kratkotrajna odstupanja (uz penalizaciju) od tehničkih ograničenja za normalni pogon mikromreže - *soft constraints*
- Korišten je AC OPF
- Problem je relaksiran u konveksni te se solver GUROBI koristi za samo rješavanje optimizacijskog problema
- U obzir su uzeta i frekvencijska ograničenja

Funkcija cilja (3.1) minimizira trošak sudjelovanja na raznim tržištima (tj. maksimizira profit). Promatrana tržišta su, dan-unaprijed tržište, unutarдневно i tržište uravnoteženja. Parametar λ_t^* označava satne cijene za promatrana tržišta, odnosno λ_i^{gen} trošak proizvodnje iz pojedinog generatora. Zadnja dva člana $\lambda^{\uparrow bound} \cdot x_{i,t}^{\uparrow bound} + \lambda^{\downarrow bound} \cdot x_{i,t}^{\downarrow bound}$ predstavljaju penalizaciju odstupanja od dozvoljenih granica kretanja napona po principu "*soft constraints*". Naime, u pojedinim trenucima se ovim načinom dopušta prelaženje nazivnih granica (bilo ispod ili iznad), ali uz strogu kaznu kako bi se to koristilo isključivo u trenucima prijeke potrebe za sustav. Pripadno ograničenje zabranjuje uzastopno prekršenje nazivnih granica.

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

gdje je

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

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

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

Ograničenja (3.5) i (3.6) ograničavaju maksimalne snage punjenja i pražnjenja na dan-unaprijed tržištu, pritom uzimajući u obzir binarnu varijablu $x_{i,t}^{\text{DA}}$ koja određuje puni li se ili prazni baterijski spremnik u određenom vremenskom trenutku, a $dev_{i,t}^*$ predstavlja devijaciju od rasporeda nastupa na dan-unaprijed tržištu koje se onda mora rješavati na tržištu uravnoteženja.

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

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

Isti princip je korišten i za nastup na unutar dnevnom tržištu. Stoga su navedena ograničenja (3.7) i (3.8).

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

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

Kako bi se objedinili nastupi baterijskog spremnika na različitim tržištima te uvela razlika između "financijskog" i "fizikalnog" nastupa, ograničenje (3.9) sumira sve aktivnosti baterijskog spremnika te, posljedično, varijabla $g_{i,t}$ prikazuje neto aktivnost baterije.

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

Ograničenje (3.10) je poveznica između neto aktivnosti baterijskog spremnika ($g_{i,t}$), te procesa fizikalnog punjenja ($c_{i,t}$) i pražnjenja ($d_{i,t}$) baterijskog spremnika.

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

Ograničenje (3.11) prikazuje tok aktivne snage između dva povezana čvorišta. $P_{ij,t}$ predstavlja aktivnu snagu između čvorišta $i - j$, dok je $i_{ij,t}$ kvadrat struje, a R_{ij} otpor kabela. $p_{j,t}^{gen}$ je varijabla koja predstavlja izlaznu snagu generatora u čvorištu j u vremenskom trenutku t , dok je $P_{j,t}^{load}$ parametar koji određuje potrebe tereta u čvorištu j . Pražnjenje baterije predstavlja varijabla $d_{j,t}$, dok $c_{j,t}$ predstavlja punjenje baterije. Pritom treba imati na umu da se u jednom trenutku određena baterija može isključivo ili puniti ili prazniti, stoga u svakom od promatranih trenutaka samo jedna od dvije varijable ($d_{j,t}, c_{j,t}$) može biti različita od nule. Model je tako koncipiran da u svakom čvorištu može promatrati isključivo jednu bateriju, no uz male preinake se vrlo lako postigne opcija razlikovanja baterija unutar čvorišta j . Zadnji član ograničenja je $\sum P_{jm,t}$ te predstavlja sumu svih tokova aktivne snage između čvorišta j i ostalih susjednih čvorišta.

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

Tokovi reaktivne snage modelirani su ograničenjem (3.12). Princip je analogan kao i u prethodnom ograničenju, uz napomenu kako su tu sada prisutne varijable vezane za reaktivnu snagu te pripadni parametri. Primjerice, reaktancija je relevantna mjera za jalovi električni otpor. (X_{ij}). Reaktivnu snagu mogu pružati generatori, ali i baterije koje koriste prikladne izmjenjivače, stoga su u matematičkoj formulaciji pretpostavljene obje opcije (uvedene obje varijable), dok je reaktivni teret parametar.

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

Ograničenje (3.13) se odnosi na pad napona između čvorišta. Pritom treba naglasiti da varijabla $u_{i,t}$ predstavlja kvadrat napona.

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

Ograničenje (3.14) bi u egzaktnoj formulaciji trebalo biti jednakost, no takva formulacija je nekonveksna što može prouzročiti velike probleme pri proračunu optimalnog rješenja, odnosno problem može biti i neizvediv. Stoga je praksa nekonveksni problem relaksirati tako da bude konveksan, a pritom da ograničenje zadrži svoju bit. U ovom slučaju, originalno ograničenje u obliku jednakosti relaksirano je u oblik konusa drugog stupnja (SOCP)[?], odnosno nejednakost koja povezuje struju, napon te snagu.

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

Ograničenje (3.15) po principu analognom kao i u slučaju baterijskih spremnika razlaže proizvodnju iz generatora prema nastupima na različitim tržištima, pritom uzimajući u obzir i moguće devijacije. Štoviše, ograničenja (3.16) i (3.17) sumiraju devijacije generatora i baterijskih spremnika kako bi onda u funkciji cilja to bilo ispravno penalizirano.

$$p_{i,t}^{\text{gen}} = p_{i,t}^{\text{gen,DA}} + p_{i,t}^{\text{gen,ID}} - dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.15)$$

$$dev_{i,t}^{\uparrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} \quad \forall i, t \quad (3.16)$$

$$dev_{i,t}^{\downarrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (3.17)$$

Ograničenja (3.18) i (3.19) ograničavaju minimalne i maksimalne dozvoljene snage generatora, kako za aktivnu, tako i za reaktivnu snagu.

$$P_i^{\text{gen,min}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}} \leq p_{i,t}^{\text{gen}} \leq P_i^{\text{gen,max}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (3.18)$$

$$Q_i^{\text{gen,min}} x_{i,t}^{\text{gen}} \leq q_{i,t}^{\text{gen}} \leq Q_i^{\text{gen,max}} x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (3.19)$$

Ograničenje (3.20) limitira iznos kvadrata napona u svakom od čvorišta na vrijednost između U_i^{min} te U_i^{max} , s time da varijabla $BND_{i,t}^{\downarrow}$ pruža mogućnost smanjivanja te granice uz propisanu kaznu u funkciji cilja, dok varijabla $BND_{i,t}^{\uparrow}$ omogućuje pak povećanje gornje granice, također uz primjerenu penalizaciju. Štoviše, binarne varijable su prisutne iz razloga što je takvo kršenje zabranjeno uzastopno u više vremenskih trenutaka, a to je određeno ograničenjem (3.21) za donju granicu, odnosno ograničenjem (3.22) za gornju granicu.

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

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

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

Stanje energije dostupnih baterijskih spremnika je modelirano ograničenjem (3.23), gdje varijabla $soe_{i,t}$ prikazuje stanje napunjenosti energijom baterijskog spremnika na čvorištu i u vremenskom trenutku t , dok parametar η predstavlja neefikasnost prisutnu tijekom punjenja i pražnjenja baterije.

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

Ograničenje (3.24) ograničava maksimalnu snagu punjenja baterijskog spremnika u čvorištu i , dok ograničenje (3.25) po istom principu ograničava maksimalnu snagu pražnjenja baterijskog spremnika u čvorištu i .

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

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

Početno stanje energije baterijskog spremnika u čvorištu i određeno je ograničenjem (3.26).

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

Ograničenje (3.27) označava kapacitet promatrane baterije u čvorištu i . B_i^{cap} je parametar, odnosno jedna od glavnih tehničkih karakteristika svake baterije.

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

Uz prikladni izmjenjivač, baterijski spremnik može uz aktivnu snagu pružati i reaktivnu. Kako bi se ograničila ukupna snaga koju određeni baterijski spremnik može otpustiti ili primiti u određenom trenutku, uvedena su ograničenja (3.28) i (3.29). Varijabla q^{batt} može biti i negativna i pozitivna, jer reaktivna snaga može biti nuđena kako u induktivnom tako i u kapacitivnom režimu.

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

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

Ograničenja 3.30, 3.31, 3.32 i 3.33 se odnose na frekvenciju sustava uvrštene u model po uzoru na [2]

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

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

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

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

3.2 O modelu zaštite

Sustav zaštite mikromreže ima ključnu ulogu u sprječavanju štetnih posljedica za ljude i opremu tijekom kvarova. Njegova osnovna funkcija je brza reakcija na kvarove s ciljem minimiziranja njihovog utjecaja na mikromrežu.

Važno je da sustav zaštite bude brz i selektivan, djelujući samo na dio mikromreže koji je pogođen kvarom ili na cijelu mikromrežu ukoliko je to potrebno. Pouzdanost zaštite također je ključna, što podrazumijeva prepoznavanje kvarova i razlikovanje od privremenih pojava na koje zaštita ne bi trebala reagirati. Nepotrebno aktiviranje zaštite može dovesti do prekida opskrbe električnom energijom krajnjim korisnicima i financijskih gubitaka za opskrbljivača.

Model zaštite mikromreže koji se koristi temelji se na principu relaksacije fiksnih granica zaštite prilikom graničnog pogona mikromreže. Ovaj pristup omogućuje povećanje fleksibilnosti mikromreže u određenom vremenskom intervalu koji je ograničen tehničkim svojstvima vodova i kabela mikromreže. Naponska i strujna ograničenja zaštite mogu se prilagoditi kako bi se osigurala potrebna fleksibilnost. Na primjer, razine na kojima zaštita aktivira svoje mehanizme mogu se pomicati u pozitivnom ili negativnom smjeru u odnosu na prethodno definirani prag. Prije aktivacije zaštite, potrebno je postaviti parametre algoritma koji će osigurati optimalan rad mikromreže. Ovaj algoritam ima zadatak minimizirati trošak pogona mikromreže, uzimajući u obzir ograničenja izvora energije. Ovisno o potrebama korisnika, odabire se odgovarajući algoritam, kao što je Dynamic Economic Dispatch (DED).

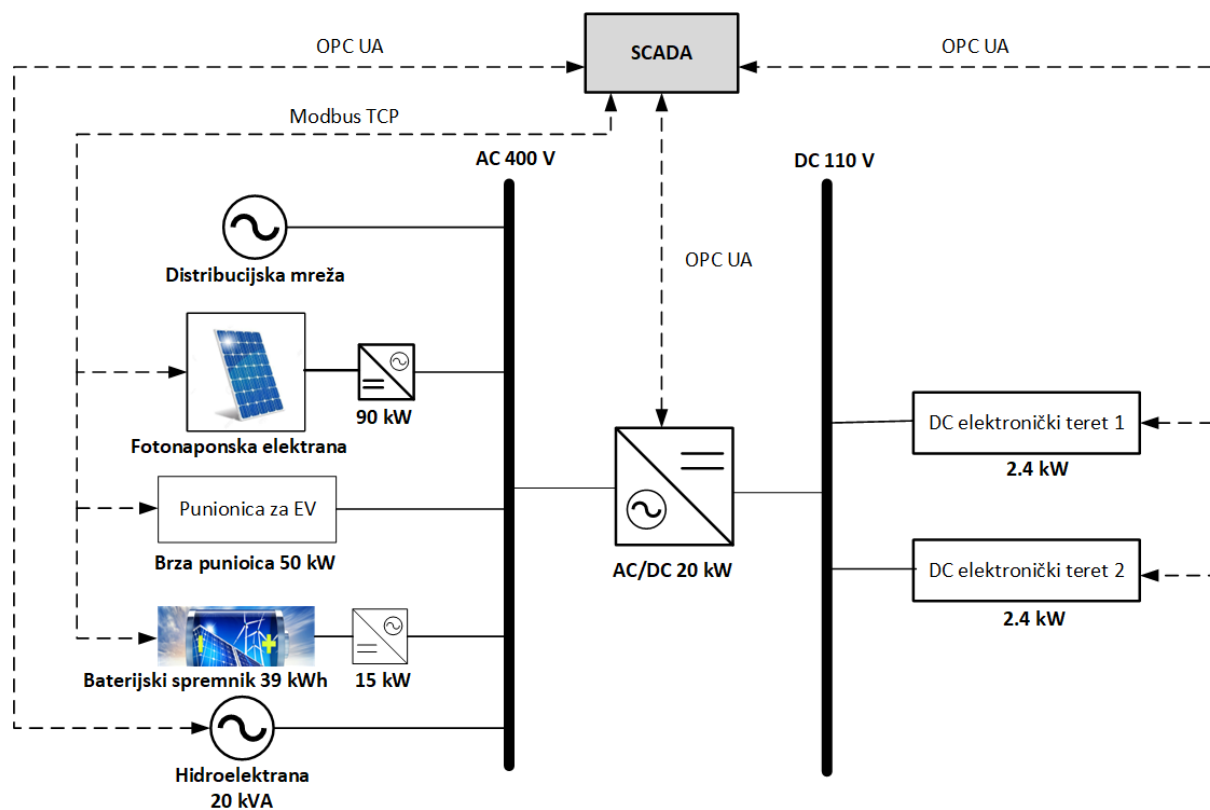
Nakon postavljanja parametara zaštite i pokretanja algoritma, sustav se kontinuirano izvršava. Periodički se izvršava mjerenje stanja mikromreže kako bi se odredila nova radna točka. Na temelju tih mjerenja, postavke proizvodnje se ažuriraju i šalju na upravljive jedinice u mikromreži. Očitavaju se i naponi na svakoj sabirnici te se na temelju njih proračunavaju tokovi snage i struje u granama mikromreže.

U slučaju prekoračenja inicijalnih ograničenja nadstrujne ili naponske zaštite, ta ograničenja se privremeno povećav

4. Laboratorijski postav

U svrhu provedbe eksperimentalne validacije razvijenih algoritama u sklopu projekta, 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.

U nastavku ovoga poglavlja detaljno je opisan korišteni laboratorijski postav mikromreže. Struktura laboratorijske mikromreže prikazana je na Slici 4.1.



Slika 4.1: SGLab - struktura laboratorijske mikromreže.

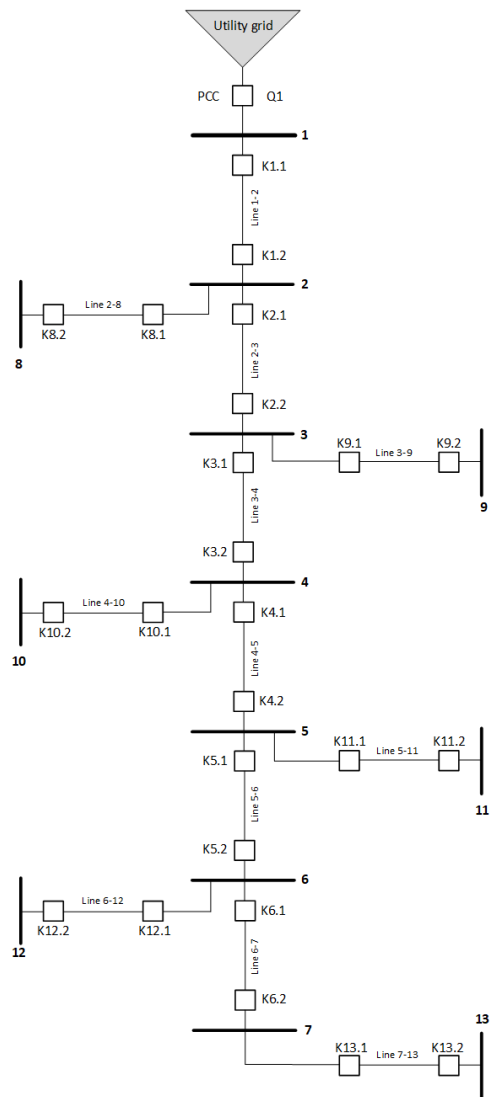
Na Slici 4.1 vidljivo je da je korišten laboratorijski postav hibridne mikromreže, tj. mikromreže koja se sastoji od izmjeničnog AC i istosmjernog DC dijela koji su međusobno povezani korištenjem dvosmjernog pretvarača. Nadalje, na Slici 4.1 izmjenični dio mikromreže zbog jednostavnosti prikaza prikazan 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.

Arhitektura komunikacijske mreže je distribuirana što znači da se nadzorni i upravljački sustav (engl. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) pokreće na serveru različitom od onog na kojem se pokreće sustav za upravljanje energijom (engl. Energy Managements System - EMS). Za komunikaciju su korišteni komunikacijski protokoli OPC UA te Modbus TCP. Za pristup parametrima zaštitnih funkcija generatora koristi se IEC 61850.

Izmjenični dio mikromreže je radijalne strukture, s vrijednostima parametara kabela koje se mogu tipično pronaći u Republici Hrvatskoj, međutim druga konfiguracija kabela odgovara vrijednostima niskonaponske CIGRE mreže. Svaka dionica napona ima mjerenja faznog i linijskog napona, struje, frekvencije, hramoničkog izobličenja, radnih i jalovih snaga, te nesimetrije faza. Jednopolna shema izmjeničnog dijela je prikazana na slici 4.2.

Na izmjeničnoj strani mikromreže nalaze se različiti izvori energije, trošilo i baterijski spremnik energije. Laboratorijska hidroelektrana sastoji se od sinkronog generatora snage 20 kVA. Rotacijski generator pruža brojne prednosti za mikromrežu, uključujući održavanje frekvencije i povećanje stabilnosti mikromreže. Osim toga, hidroelektrana je upravljivi izvor energije. Fotonaionska elektrana predstavlja neupravljivi izvor energije ukupne snage 108 kW. Da bi se omogućio spoj solarnih panela istosmjernog napona na izmjenični dio mikromreže, koriste se pretvarači (inverteri) snage 10 kW. Trošilo koje je povezano s izmjeničnom stranom mikromreže je punionica za električna vozila. Punionica ima nazivnu snagu od 50 kW s mogućnošću brzog punjenja za istosmjerne priključke, dok je izmjenični priključak snage 43 kW. Baterijski spremnici energije ukupne snage 113 kWh podijeljeni su na 6 modula i spojeni na mrežu putem pretvarača snage 2,5 kW. Svaki baterijski spremnik upravlja se vlastitim sustavom za upravljanje baterijom (engl. Battery Management System - BMS). Na istosmjernom dijelu mikromreže nalaze se dva elektronička tereta koja su spojena preko dvosmjernog pretvarača. Pretvarači imaju mogućnost upravljanja naponom istosmjerne sabirnice i izlaznom snagom. Nazivna snaga tereta iznosi 2,4 kW, dok pretvarač može isporučivati snagu u rasponu od 0 do 20 kW.



Slika 4.2: SGLab - jednopolna shema izmjeničnog dijela mikromreže.

5. Smjernice za primjenu

Ovaj algoritam, zajedno s alatima koji ga koriste, pruža efikasan način upravljanja mikromrežom s ciljem postizanja minimalnih operativnih troškova prilikom nastupa na tržištu, a pritom imajući na umu uvjet otpornosti na vanjske kvarove. Ključno je unijeti sastavnice mikromreže i njihova tehnička ograničenja u sam alat, te se povezati s relevantnim tržišnim podacima na kojima operator mikromreže želi djelovati. Nakon toga, matematički modul omogućava izračun optimalne strategije za nastup na odabranim tržištima, pod uvjetom da se ne javljaju tehnički kvarovi.

U slučaju da se pojavi tehnički kvar, algoritam je osmišljen tako da omogućava glatki prijelaz u otočni način rada kako bi mikromreža i dalje bila funkcionalna. Otočni način rada se aktivira kako bi se održala kontinuirana opskrba električnom energijom, iako više nije moguće nastupati na tržištu sve dok se kvar ne otkloni.

Ova promjena u načinu nastupa na tržištu za vrijeme otočnog načina rada ima značajan utjecaj na operativne aktivnosti mikromreže. Umjesto fokusiranja na sudjelovanje na tržištu i maksimiziranje prihoda, operator mikromreže mora se usredotočiti na internu stabilnost i kontinuitet napajanja. Ovo zahtijeva promjenu prioriteta i prilagodbu strategije kako bi se osigurala neometana isporuka električne energije korisnicima mikromreže.

Važno je napomenuti da, iako se u otočnom načinu rada gubi mogućnost sudjelovanja na tržištu, algoritam i dalje pruža vrijedne informacije i smjernice za optimalno upravljanje mikromrežom. Tijekom otočnog načina rada, alat se fokusira na efikasno korištenje raspoloživih resursa unutar mikromreže, kako bi se osiguralo stabilno napajanje korisnika uz minimalne troškove

6. Zaključna razmatranja

Razvoj i implementacija naprednog matematičkog modela za optimalan nastup mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga predstavlja značajan korak prema ostvarivanju otpornosti na vanjske kvarove i postizanju stabilnosti i pouzdanosti mikromreže u različitim uvjetima.

Kroz sveobuhvatno istraživanje i razumijevanje koncepta mikromreže, uspjeli smo identificirati potencijal mikromreže na kratkoročnim tržištima elektroenergetskog sektora. Fokusirajući se na dan-unaprijed tržište, unutarдневно tržište i tržišta pomoćnih usluga, omogućili smo mikromreži da maksimizira svoje koristi prilagođavajući se promjenjivim uvjetima i potrebama tržišta.

Raznovrsnost komponenti mikromreže, uključujući potrošače, proizvođače i mogućnost skladištenja energije, pružila nam je mnoge mogućnosti za optimalan nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga. Kroz razvoj pouzdanog upravljačkog modela mikromreže, uspjeli smo postići maksimalnu korist od sudjelovanja na tržištima električne energije. Naš model uzima u obzir tehnička ograničenja i osigurava stabilnost i pouzdanost mikromreže, čak i u nepredviđenim situacijama kao što je prelazak na otočni način rada.

Implementacija našeg modela uzima u obzir regulatorne okvire i tehničke zahtjeve, pružajući stabilnost i dugoročnu profitabilnost nastupa mikromreže na tržištima elektroenergetskog sektora. Ovaj projekt je značajno doprinio napretku u području mikromreža i pružio osnovu za daljnje istraživanje i razvoj u ovom području.

U zaključku, rezultati našeg projekta potvrđuju da je moguće postići otpornost na vanjske kvarove i osigurati stabilnost i pouzdanost mikromreže kroz implementaciju naprednog matematičkog modela. Naš rad pruža temelj za daljnji razvoj i primjenu ovih koncepta u stvarnim scenarijima, pridonoseći napretku elektroenergetskog sektora i održivom razvoju energetike u cjelini

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] I.Pavić, M. Miletić, P. Miljan, Ž. Tomšić, D. Badanjak, "Popis uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa na tržištima energije i pomoćnih usluga", *Tehničko izvješće, FLEXIBASE* 2022.
- [2] Y. Wen, C. Y. Chung, X. Liu, C. Che, "Microgrid Dispatch with Frequency-Aware Islanding Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3 2019