

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

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



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



05-2023

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga</b>	<b>2</b>
2.1	Matematički model . . . . .	2
2.2	Uočeni i riješeni problemi . . . . .	8
2.3	Alati . . . . .	9
2.3.1	Alat za pružanje fleksibilnosti . . . . .	9
2.3.2	Alat za optimalan pogon mikromreže . . . . .	10
2.4	Smjernice za primjenu . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Zaključna razmatranja</b>	<b>12</b>
	<b>Literatura</b>	<b>13</b>

# 1. Uvod

U sklopu uspješno provedenog projekta FLEXIBASE, postignut je značajan napredak u razvoju modela za optimalan nastup mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga. Jedan od ciljeva projekta bio je minimizirati dugoročne troškove pogona mikromreže, uzimajući u obzir tehnička ograničenja i pružajući stabilnost u mrežnom i otočnom radu. Kroz sveobuhvatno istraživanje i testiranje, tim je uspio razviti napredni upravljački algoritam koji omogućava mikromreži da maksimizira svoj profit na elektroenergetskom tržištu.

Model optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga razvijen je uzimajući u obzir različite faktore, uključujući sastavnice mikromreže, tehnička ograničenja, zakonske propise i zahtjeve tržišta. Važno je istaknuti da je tijekom razvoja modela pažnja posvećena minimizaciji dugoročnih troškova uz poštivanje svih regulatornih i tehničkih ograničenja.

Da bi se model uspješno primijenio u laboratorijskim uvjetima, terenskom testiranju i stvarnoj praksi, razvijeni model je dodatno prilagođen svim ograničenjima koje takvo okruženje zahtijeva. Paralelno s razvojem modela, također je razvijen softver koji omogućuje jednostavno korištenje modela od strane čovjeka/operatora.

Osim što se lako usvaja korištenje modela, operator dobiva i pregledne grafičke prikaze važnih informacija koji mu pomažu u donošenju daljnjih odluka i praćenju stanja mikromreže. Jedna od glavnih prednosti modela koji je razvijen u okviru projekta FLEXIBASE je što uzima u obzir mrežni i otočni način rada, kao i prijelazna stanja. Također, velika pažnja posvećena je postavkama zaštite i maksimiziranju tehničkih mogućnosti mikromreže, osiguravajući istovremeno njezin siguran i pouzdan rad.

U nastavku ovog dokumenta, pružena je detaljna dokumentacija koja opisuje model. Ova dokumentacija sadrži sve relevantne informacije o modelu, uključujući arhitekturu generalno, matematičke formulacije, ulazne parametre, izračune i analizu rezultata, odnosno sposobnost modela da minimizira dugoročne troškove pogona mikromreže i ostvari maksimalan profit na tržištima električne energije i pomoćnih usluga.

## 2. Nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga

U sklopu FLEXIBASE projekta glavni fokus ovog dokumenta je izvještaj o razvoju i implementaciji naprednog matematičkog modela za optimalan nastup mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga. Projekt je pružio sveobuhvatno istraživanje i razumijevanje koncepta mikromreže, uključujući različite komponente i njihove mogućnosti.

Jedan od ključnih aspekata razvoja modela bio je prepoznavanje potencijala mikromreže na kratkoročnim tržištima elektroenergetskog sektora. Umjesto fokusiranja na dugoročna tržišta, poput tržišta kapaciteta, usredotočili smo se na dan-unaprijed tržište, unutarдневно tržište te tržišta pomoćnih usluga. Ovaj pristup omogućava mikromreži da maksimizira svoje koristi prilagođavajući se promjenjivim uvjetima i potrebama tržišta.

Mikromreža se sastoji od različitih oblika potrošača i proizvođača električne energije, a pojedini entiteti unutar mikromreže mogu imati i mogućnost skladištenja energije. Ova raznolikost sastavnica pruža mnoge mogućnosti za optimalan nastup na tržištima energije i pomoćnih usluga. No, kako bismo ostvarili dodatni profit ili 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 je prelazak na otočni način rada.

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. Kroz matematičke formulacije, algoritme i testiranja, osigurana je sposobnost modela da postigne maksimalnu korist od sudjelovanja na tržištima električne energije i pomoćnih usluga. Uzimajući u obzir regulatorne okvire i tehničke zahtjeve, model pruža stabilnost i pouzdanost u radu mikromreže te smanjuje dugoročne troškove i povećava profitabilnost nastupa na tržištima elektroenergetskog sektora.

### 2.1 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. Stavljen je veliki naglasak na zaštitu mikromreže te osiguravanje stabilnog i pouzdanog pogona čak i u ekstremnim situacijama. Međutim, budući da je razgovor o nastupu na tržištu relevantan u mrežnom načinu rada, to je i tema kojom se ovaj izvještaj bavi.

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.

Izveštaj 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. 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 GURUBI koristi za samo rješavanje optimizacijskog problema
- U obzir su uzeta i frekvencijska ograničenja

Funkcija cilja (2.1) minimizira trošak sudjelovanja na raznim tržištima (tj. maksimizira profit). Promatrana tržišta su, dan-unaprijed tržište, unutarдневно i tržište uravnoteženja. Parametar  $\lambda_t^*$  označava satne cijene za promatrana tržišta, odnosno  $\lambda_i^{gen}$  trošak proizvodnje iz pojedinog generatora. Zadnja dva člana  $\lambda^{\uparrow\text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\uparrow\text{bound}} + \lambda^{\downarrow\text{bound}} \cdot x_{i,t}^{\downarrow\text{bound}}$  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.

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

gdje je

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

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

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

Ograničenja (2.5) i (2.6) 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.

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

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

Isti princip je korišten i za nastup na unutar dnevnom tržištu. Stoga su navedena ograničenja (2.7) i (2.8).

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

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

Kako bi se objedinili nastupi baterijskog spremnika na različitim tržištima te uvela razlika između "financijskog" i "fizikalnog" nastupa, ograničenje (2.9) sumira sve aktivnosti baterijskog spremnika te, posljedično, varijabla  $g_{i,t}$  prikazuje neto aktivnost baterije.

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

Ograničenje (2.10) je poveznica između neto aktivnosti baterijskog spremnika ( $g_{i,t}$ ), te procesa fizikalnog punjenja ( $c_{i,t}$ ) i pražnjenja ( $d_{i,t}$ ) baterijskog spremnika.

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

Ograničenje (2.11) 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 kabla.  $p_{j,t}^{\text{gen}}$  je varijabla koja predstavlja izlaznu snagu generatora u čvorištu  $j$  u vremenskom trenutku  $t$ , dok je  $P_{j,t}^{\text{load}}$  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.

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

Tokovi reaktivne snage modelirani su ograničenjem (2.12). 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.

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

Ograničenje (2.13) se odnosi na pad napona između čvorišta. Pritom treba naglasiti da varijabla  $u_{i,t}$  predstavlja kvadrat napona.

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

Ograničenje (2.14) 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.

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

Ograničenje (2.15) 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 (2.16) i (2.17) sumiraju devijacije generatora i baterijskih spremnika kako bi onda u funkciji cilja to bilo ispravno penalizirano.

$$p_{i,t}^{\text{gen}} = p_{i,t}^{\text{gen,DA}} + p_{i,t}^{\text{gen,ID}} - dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (2.15)$$

$$dev_{i,t}^{\uparrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\uparrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\uparrow} \quad \forall i, t \quad (2.16)$$

$$dev_{i,t}^{\downarrow} = dev_{i,t}^{\text{gen},\downarrow} + dev_{i,t}^{\text{batt},\downarrow} \quad \forall i, t \quad (2.17)$$

Ograničenja (2.18) i (2.19) ograničavaju minimalne i maksimalne dozvoljene snage generatora, kako za aktivnu, tako i za reaktivnu snagu.

$$P_i^{\text{gen,min}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}} \leq p_{i,t}^{\text{gen}} \leq P_i^{\text{gen,max}} \cdot x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (2.18)$$

$$Q_i^{\text{gen,min}} x_{i,t}^{\text{gen}} \leq q_{i,t}^{\text{gen}} \leq Q_i^{\text{gen,max}} x_{i,t}^{\text{gen}}, \quad \forall i, t \quad (2.19)$$

Ograničenje (2.20) limitira iznos kvadrata napona u svakom od čvorišta na vrijednost između  $U_i^{\text{min}}$  te  $U_i^{\text{max}}$ , 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 (2.21) za donju granicu, odnosno ograničenjem (2.22) za gornju granicu.

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

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

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

Stanje energije dostupnih baterijskih spremnika je modelirano ograničenjem (2.23), gdje varijabla  $soe_{i,t}$  prikazuje stanje napunjenosti energijom baterijskog spremnika na čvorištu  $i$  u vremenskom trenutku  $t$ , dok parametar  $\eta$  predstavlja neefikasnost prisutnu tijekom punjenja i pražnjenja baterije.

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

Ograničenje (2.24) ograničava maksimalnu snagu punjenja baterijskog spremnika u čvorištu  $i$ , dok ograničenje (2.25) po istom principu ograničava maksimalnu snagu pražnjenja baterijskog spremnika u čvorištu  $i$ .



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

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

Početno stanje energije baterijskog spremnika u čvorištu  $i$  određeno je ograničenjem (2.26).

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

Ograničenje (2.27) označava kapacitet promatrane baterije u čvorištu  $i$ .  $B_i^{\text{cap}}$  je parametar, odnosno jedna od glavnih tehničkih karakteristika svake baterije.

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

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 (2.28) i (2.29). Varijabla  $q^{\text{batt}}$  može biti i negativna i pozitivna, jer reaktivna snaga može biti nuđena kako u induktivnom tako i u kapacitivnom režimu.

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

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

Ograničenja 2.30, 2.31, 2.32 i 2.33 se odnose na frekvenciju sustava uvrštene u model po uzoru na [2]

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

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

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

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

## 2.2 Uočeni i riješeni problemi

Kao podsjetnik na uočene nepravilnosti, u nastavku ovog poglavlja prvo je priložen pregled istih, a onda i izvještaj o njihovom rješavanju. U Tablici 2.1 prikazan je popis uočenih nepravilnosti/nedostataka u modelu optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga koje su uočene prilikom eksperimentalne analize.

Tablica 2.1: Popis uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga

1.	Razvijene softverske komponente upravljačkog softvera gornje razine u pozadini počivaju na Python kodu te je potrebno imati instaliran Python na računalu koje koristi alate
2.	Brzina izvođenja optimizacijskog problema može predstavljati problem u slučaju većih i kompleksnijih mikromreža
3.	Bitan ulazni parametar za pravilnu upotrebu modela jesu (predviđene) cijene na tržištima električne energije i pomoćnih usluga, samim time to je kritična točka koja može utjecati na rezultate optimizacijskog problema
4.	Responzivnost komponenata mikromreže na signale upravljačkog programa
5.	Povezivanje softvera razvijenog u sklopu projekta FLEXIBASE s upravljačkim softverima namijenjenima za pojedine komponente mikromreže - API
6.	Nesavršenosti softvera koje prilikom izvanrednih okolnosti dovode do pada sustava

Uočene nepravilnosti u upravljačkom modelu gornje razine detaljno su prikazane u tablici 2.1. Prvi problem koji je identificiran odnosi se na instalaciju potrebnih alata na računalima koja se koriste za testiranje. Iako je trenutno riješen, ovakvo rješenje nije održivo dugoročno. Predloženo rješenje je pretvoriti kod u .exe datoteku koja će sadržavati sve potrebne komponente za samostalnu instalaciju i izvođenje softvera.

Druga uočena nepravilnost je uvjetna i odnosi se na memorijsko zauzeće optimizacijskog problema i brzinu izvođenja te prijenosa upravljačkih signala na komponente mikromreže. Iako trenutno zadovoljava dopuštene granice brzine izvođenja, potrebno je provjeriti mogućnosti optimizacije koda i minimizacije memorijskog prostora koji softver koristi prilikom korištenja razvijenih modula.

Treći problem, iako izvan opsega ovog projekta, važno je napomenuti jer utječe na kvalitetu rezultata. Kvaliteta ulaznih parametara, posebno podataka o cijenama električne energije i pomoćnih usluga na tržištu, ima veliki utjecaj na rezultate modela. Stoga je bitno koristiti kvalitetne modele predikcije cijena kako bi se osigurala pouzdanost izlaznih podataka.

Točka četiri upozorava na vremensko kašnjenje između slanja signala upravljačkog programa i njegovog izvršavanja. Prilikom implementacije softvera u različite mikromreže, važno je uzeti u obzir komunikacijsku infrastrukturu i karakteristike korištenih komponenti kako bi se minimalizirao utjecaj kašnjenja na rad cijelog sustava. S druge strane, brzina odziva mjernih pretvornika također je važan faktor i treba se uzeti u obzir prilikom odabira i opremanja mikromreže.

Točka pet ukazuje na potrebu za unaprjeđenjem i potpunim razvojem aplikacijskog sučelja kako bi se riješili problemi koji su se pojavili prilikom uspostavljanja komunikacije između različitih slojeva i komponenti razvijenog rješenja te mikromreže.

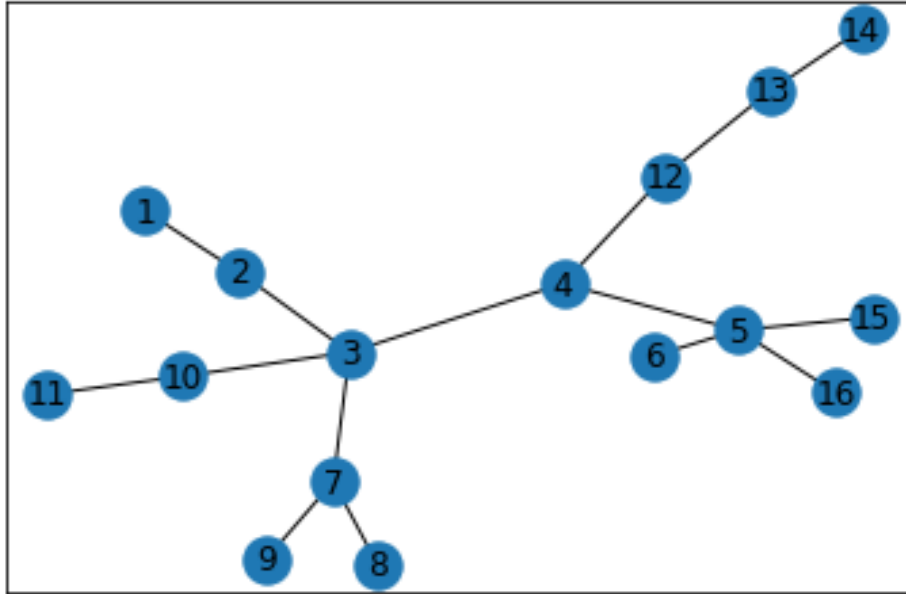
Konačno, točka šest naglašava važnost testiranja i stvaranja različitih scenarija kako bi se osigurala pouzdanost softverskog rješenja u rubnim uvjetima.

## 2.3 Alati

### 2.3.1 Alat za pružanje fleksibilnosti

Alat promatra mikromreže i način na koji odrediti kako pružiti, ali ujedno i kako vrednovati, fleksibilnost. Naime, mikromreža ima mogućnost nastupa na elektroenergetskim tržištima, ali isto tako nuditi i fleksibilnost koja je nekad prijeko potrebna operatoru distribucijskog sustava. U sklopu ovog softverskog alata naglasak je stavljen na programsku pomoć upravitelju mikromreže, ali i operatoru distribucijskog sustava, za određivanje i vrednovanje fleksibilnosti koju promatrana mreža može pružiti u određenim kritičnim trenucima. Odnosno, da bi se kritični trenutci izbjegli. Pritom je u pozadini vrlo bitno voditi računa o tehničkim ograničenjima mikromreže, odnosno svemu onom za što je zadužena donja upravljačka razina razvijena u sklopu ovog projekta. Već je rečeno da je jedna od glavnih vrlina softvera to što vrlo zorno

može dočarati neke podatke korisniku. Tako na slici 2.1 možemo vidjeti kako izgleda grafički prikaz topologije jedne od promatranih mikromreža.



Slika 2.1: Struktura promatrane mreže

Sami rezultati optimizacijskog problema su dostupni u dvije varijante. Odmah po uspješnom izvršenju optimizacije, rezultati uz vrijednosti svih varijabli i ostalih bitnih informacija spremaju se u takozvanu log datoteku koja je tekstualna datoteka i pomoću nje korisnik može proučiti sve rezultate ali i koristiti ih vrlo jednostavno u svrhu daljnje analize u nekom drugom softveru ako želi ili ima potrebu.

### 2.3.2 Alat za optimalan pogon mikromreže

Ovaj programski alat u pozadini vrti python kod te optimizacijski problem riješen pomoću solvera Gurobi kojim određuje optimalni nastup na tržištima obzirom na mogućnosti zarade uslijed razlika u cijenama te općenito karakteristikama različitih niša elektroenergetskog tržišta. Kao što smo već spomenuli, suboptimalna strategija može dovesti do brojnih problema poput zaostajanja za konkurencijom, nemogućnosti novih investicija, tehnički nemoguć rad elemenata mikromreže i mnogih drugih. Dakle, uz veoma bitno pravilno upravljanje zaštitom mikromreže i općenito tehničkim karakteristikama, veliku ulogu u osiguravanju neupitnog rada mikromreže te zadovoljavanje preduvjeta analiza isplativosti igra optimalan pogon mikromreže.

## 2.4 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. 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

### 3. Zaključna razmatranja

U ovom poglavlju, zaključujemo kako je razvijeni matematički model za optimalan nastup mikromreže na tržištu energije i pomoćnih usluga ispravan i temeljit te funkcionalni temelj i za neka buduća istraživanja. Kroz prethodna poglavlja ovog izvještaja pružena je dokumentacija koja podržava ovu tvrdnju, pružajući detaljan uvid u metodologiju, parametre i postupke korištene u modeliranju. Analiza i evaluacija modela pokazuju da je on dobra osnova za daljnja unaprjeđenja i razvoj. Obzirom na kompleksnost suvremenih elektroenergetskih sustava i izazove koje ti sustavi predstavljaju, naš model predstavlja rješenje koje se usklađuje s regulativama i smjernicama Europske unije. Ovakav pristup podržava potrebu za učinkovitom upotrebom resursa, integracijom obnovljivih izvora energije te osiguranjem stabilnosti i pouzdanosti električne mreže. Kroz provedena laboratorijska testiranja, naš model je pokazao sposobnost pružanja optimalnih strategija za mikromrežu na tržištu energije i pomoćnih usluga, uzimajući u obzir tehnička i ekonomska ograničenja. Softver koji je razvijen u sklopu projekta omogućuje jednostavno korištenje modela, pružajući korisnicima ilustrativne grafičke prikaze relevantnih informacija. Daljnja unaprjeđenja mogu se temeljiti na našem radu, proširujući model s dodatnim komponentama i mogućnostima mikromreže. Također, moguće je dalje istraživati i optimizirati parametre modela kako bi se postigla još veća preciznost i učinkovitost. Kao konačni zaključak, razvijeni matematički model za optimalan nastup mikromreže na tržištu energije i pomoćnih usluga predstavlja korisno rješenje za suvremene elektroenergetske sustave. U skladu s regulativama i smjernicama Europske unije, model pruža osnovu za učinkovito upravljanje i iskorištavanje resursa, te osigurava stabilnost i pouzdanost električne mreže. Njegova primjena može potaknuti daljnji napredak u ovom području i doprinijeti transformaciji prema suvremenoj strukturi elektroenergetskog 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] 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