

Mag. ing. Marijo Knezović
SIGMATEK, Beč, Austrija
marijo.knezovic@outlook.com

Doc. dr. sc. Tomislav Capuder
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Hrvatska
tomislav.capuder@fer.hr

FLEKSIBILNOST MIKROMREŽA I SPOSOBNOST PRUŽANJA POMOĆNIH USLUGA OPERATORU SUSTAVA

SAŽETAK

Tranzicijom energetskeg sustava prema konceptu koji stavlja krajnjeg korisnika u centar postaje izuzetno važno razviti odgovarajuće optimizacijske i upravljačke modele novih subjekata u elektroenergetskom sustavu. Pri tome koncepti poput mikromreža, koji imaju mogućnost pružanja više usluga tržištu i operatorima sustava, su od izuzetnog značenja u budućim sustavima. U ovom slučaju mikromreža radi kao energetska zajednica koja je spojena paralelno ostatku sustava te je njezin rad definiran tržišnim signalima. Međutim, mikromreža također mora biti u stanju da se odvoji od ostatka mreže te održi stabilan rad u izvanmrežnom režimu rada. Stoga su u ovom diplomskom radu izrađena dva modela mikromreže: i) Mješoviti cjelobrojni linearni optimizacijski model koji određuje optimalne veličine jedinica unutar mikromreže za njen rad u otočnom režimu; ii) Dinamički model stabilizacije mikromreže pri prelasku u otočni rad. Granice dobivene iz ovih modela se koriste kako bi se dobila monetarna vrijednost pružanja usluge fleksibilnosti prema operatoru sustava, ali i samim korisnicima.

Ključne riječi: Pomoćne usluge, prelazak u otočni rad, mikromreže, višeenergijski sustavi, dinamika sustava

MICROGRID FLEXIBILITY AND THEIR ABILITY TO PROVIDE ANCILLARY SERVICES TO THE SYSTEM OPERATOR

SUMMARY

With the transition of electrical power systems towards a concept that puts end-user into the center, it becomes very important to develop suitable optimization and control models of the newly formed subjects in the system. Because of their ability to provide multiple services to the market and system operators, concepts like microgrids are of great significance to be the key element of the future systems. Microgrid proposed in this paper operates as an energy community connected parallel to the rest of the system and its operation is driven by market signals. However, it also needs to be able to detach from the main grid and maintain stable operation in the off-grid regime. Therefore, this thesis contains 2 microgrid models: i) Mixed-integer linear programming model which determines the optimal sizes of units within the microgrid for the operation of the proposed microgrid in the island mode; ii) Dynamical model of stabilizing the microgrid when going into island mode. The boundaries obtained from these models are used in order to determine the monetary value of providing flexibility to the system operator and its end users.

Key words: Ancillary services, islanding, microgrids, multi-energy systems, power system dynamics

NOMENKLATURA

Varijable odlučivanja:	Parametri:
$P_i^{Network}$ – Snaga iz mreže u i-tom periodu	$P^{NetworkMax}$ – Maksimalna snaga iz(u) mreže(u)
P_i^{CHP} – Snaga CHP-a u i-tom periodu	η^{CHP_heat} – Toplinska efikasnost CHP-a
P_i^{HP} – Snaga toplinske pumpe u i-tom periodu	η^{CHP_el} – Električna efikasnost CHP-a
$H_i^{CHPTotal}$ – Ukupna toplina CHP-a u i-tom periodu	η^{Boiler} – Toplinska efikasnost bojlera
H_i^{CHP} – Korisna toplina CHP-a u i-tom periodu	CoP – Faktor pretvorbe toplinske pumpe
$H_i^{CHPWaste}$ – Bačena toplina CHP-a u i-tom periodu	$T^{WaterMin}$ – Minimalna temperatura vode
H_i^{HP} – Toplina toplinske pumpe u i-tom periodu	$T^{WaterMax}$ – Maksimalna temperatura vode
H_i^{Boiler} – Toplina bojlera u i-tom periodu	V – Volumen toplinskog spremnika vode
H_i^{HSIn} – Toplina na ulazu u spremnik u i-tom periodu	ρ^{Water} – Prosječna gustoća vode
H_i^{HSOut} – Toplina na izlazu iz spremnika u i-tom periodu	c^v – Specifični toplinski koeficijent vode
H_i^{Losses} – Gubici u prijenosu topline u i-tom periodu	k^{Losses} – Faktor gubitaka u prijenosu topline
T_i^{Water} – Temperatura vode u spremniku u i-tom periodu	c^{CO2} – Cijena emisije po 1 kWh spaljenog plina
f_i^{CHP} – Ulaz plina u CHP u i-tom periodu	P_i^{Demand} – Potražnja snage u i-tom periodu
f_i^{Boiler} – Ulaz plina u boiler u i-tom periodu	H_i^{Demand} – Potražnja topline u i-tom periodu
P^{CHPNom} – Nominalna snaga CHP-a	c_i^e – Cijena električne energije u i-tom periodu
P^{HPNom} – Nominalna snaga toplinske pumpe	c_i^{Gas} – Cijena plina u i-tom periodu
$H^{BoilerNom}$ – Nominalna snaga bojlera	c^{EAC} – Koeficijent ekvivalentnog godišnjeg troška
$H^{BoilerRamp}$ – Maksimalna promjena snage bojlera	d^{Rate} – Godišnja diskontna stopa
C^{EAC_Boiler} – Anuitet bojlera	y – Godine povrata investicije
C^{EAC_CHP} – Anuitet CHP-a	c^{Boiler} – Cijena bojlera po kWt instaliranom
C^{EAC_HP} – Anuitet toplinske pumpe	c^{CHP} – Cijena CHP-a po kWe instaliranom
C^{OPEX} – Godišnji operativni troškovi	c^{HP} – Cijena toplinske pumpe po kWt instaliranom
C^{Total} – Ukupni godišnji troškovi	

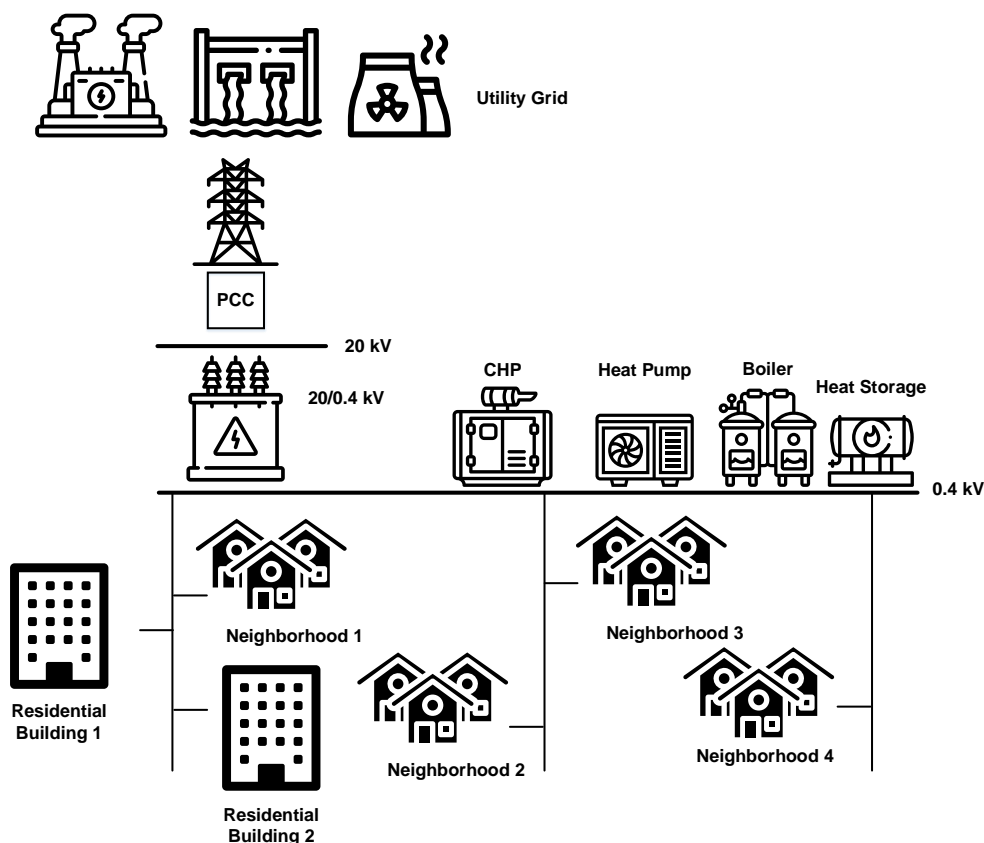
1. UVOD

Posljednjih godina Europska Unija doživljava veliki porast broja instaliranih distribuiranih izvora baziranih na obnovljivim izvorima energije (OIE). Zbog njihove varijabilnosti i nepredvidljivosti, planiranje i upravljanje sustavom je postalo znatno teže u odnosu na vođenje tradicionalnih sustava. S decentralizacijom proizvodnih resursa i demokratizacije investitora u te resurse, novi modeli su se pojavili mijenjajući poznate principe vođenja, i u smislu usluga, ali i u smislu vremenskih okvira kad se one mogu pružiti. Veliki broj članaka proučava mikromreže kao koncept gdje je energetska zajednica dovoljna sama sebi, npr. može raditi paralelno sa sustavom, ali puno češće radi u kompletno odvojenom režimu rada.

Mikromreža (engl. *Microgrid*) je skupina distribuiranih izvora energije, spremnika energije te upravljivih i neupravljivih potrošača, predstavljena kao jedinstveni entitet prema ostatku mreže. Zbog svojih relativno malih jedinica, mikromreža može brzo promijeniti svoju snagu kako bi odgovorila zahtjevima operatora sustava, te tako generirala profit za sve svoje korisnike. Ako se pravilno dimenzionira i vodi, mikromreža može ispuniti zadane zahtjeve u roku minuta ili čak sekundi od njihove objave. Prisutnost dvaju energetskih vektora (električne snage i topline) daje joj dodatnu fleksibilnost u vidu pomoćnih usluga koje može pružati. Stoga je zanimljivo ispitati njezinu sposobnost pružanja takvih usluga operatoru sustava kako bi se maksimizirala sveukupna dobit, ali i održala željena kvaliteta električne energije krajnjim korisnicima.

Iako postoje mnogi radovi koji opisuju optimalno dimenzioniranje i vođenje mikromreže na jednoj strani [1], [2], [3], te dinamiku mikromreže na drugoj strani [4], [5], nijedan od tih radova ne povezuje iste kako bi istražili vođenje mikromreže prilikom pružanja tih pomoćnih usluga operatoru sustava. Posljedično, takvi proračuni mogu dovesti do nezadovoljavajućih rezultata kad se koriste kao referentno mjerilo za potencijalne primjene u stvarnosti. Stoga ovaj rad povezuje ta dva modela kako bi se dobila optimalna točka rada pri kojoj bi dana mikromreža trebala raditi kako bi bila sposobna pružati pomoćne usluge operatoru sustava.

Mikromreža pretpostavljena u ovom radu je udaljeni dio niskonaponske distribucijske mreže u zagrebačkom području. Sastoji se od kogeneracijskog postrojenja (engl. *Combined Heat and Power*, CHP) koje proizvodi električnu energiju i toplinu, toplinske pumpe, bojlera, spremnika topline, dvije stambene zgrade te četiri mala susjedstva. Slika 1 grafički prikazuje predloženu mikromrežu.



Slika 1. Shema mikromreže

Prvi dio ovog rada demonstrira princip proračuna optimalnih veličina jedinica predstavljene mikromreže za godišnji rad u otočnom režimu rada, te analizu za godišnji rad na mreži uz jedinice proračunate za izvanmrežni rad. Koristeći izračunate veličine kao ulaze, u drugom dijelu je kreiran i predstavljen dinamički model dane mikromreže. Ovaj model proračunava promjenu frekvencije tijekom prelaska mikromreže iz rada paralelno s mrežom u otočni rad.

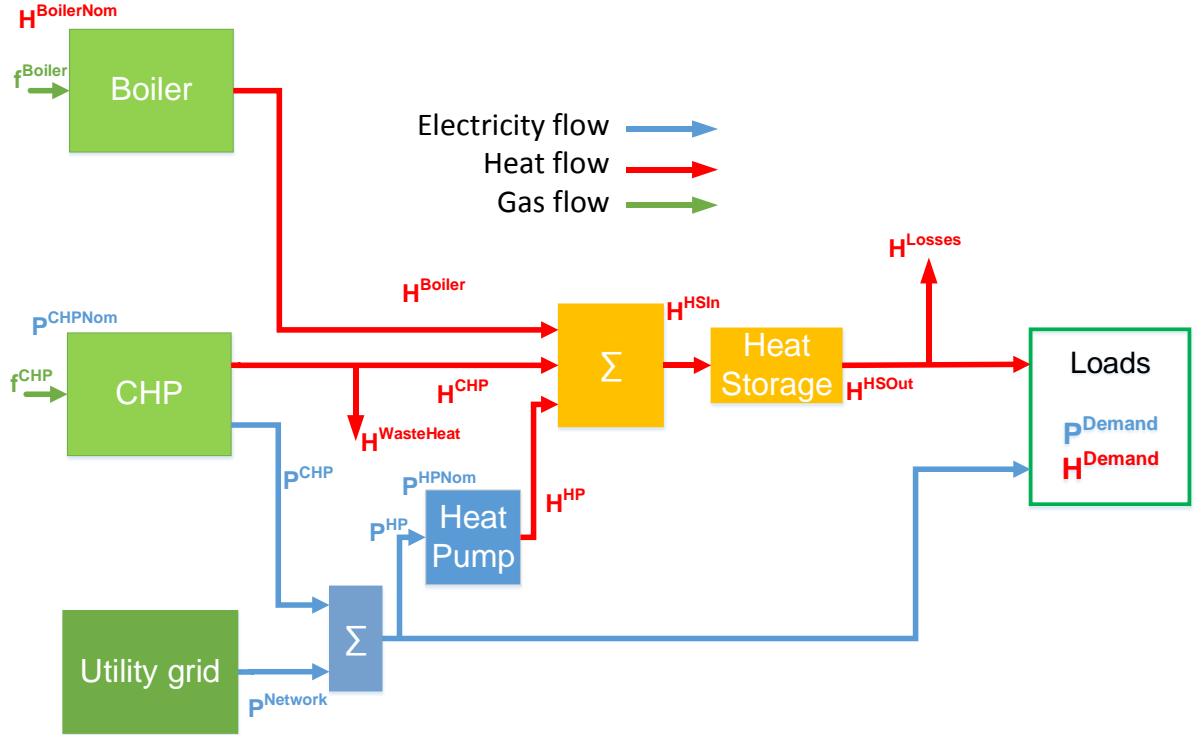
2. OPTIMIZACIJSKI MODEL

Kako bi se izračunala optimalna veličina CHP-a, bojlera i toplinske pumpe, napravljen je optimizacijski model mikromreže. Komponente optimizacijskog modela mikromreže dane u ovom radu su:

- CHP generator koji proizvodi električnu energiju i toplinu
- Bojler koji proizvodi toplinu
- Toplinska pumpa koja proizvodi toplinu
- Spremnik topline koji služi za izmjenu topline
- Potrošači koji troše električnu energiju i toplinu
- Aktivna mreža koja proizvodi ili troši električnu energiju

Snaga iz mreže može biti ili pozitivna ili negativna, što znači da mikromreža može slati ili primati električnu energiju kroz mjesto razdvajanja (*engl. Point of Common Coupling, PCC*). Potrošači unutar mikromreže su pasivna trošila, bez mogućnosti proizvodnje električne i toplinske energije, dok je njihova potrošnja ovisna o razdoblju godine i sata u danu. CHP, bojler i toplinska pumpa se koriste za dobivanje potrebne topline za daljinsko grijanje korisnika mikromreže. CHP je moguće upravljati na višoj toplinskoj snazi nego što je to potrebno, dobivajući tako višak električne energije za prodaju, dok se višak topline izbaci u okolinu.

Model se optimizira tijekom jedne godine, tijekom koje balans proizvodnje i potrošnje električne snage i topline mora biti zadovoljen tijekom svih perioda. Električna snaga se može dobiti iz aktivne mreže ili CHP-a, dok se toplina može dobiti iz svih jedinica koje proizvode toplinu (CHP, toplinska pumpa, bojler). Proizvedena toplina se zatim sprema u spremnik topline koji se ponaša kao posrednik između proizvodnje i potrošnje topline. Stoga sva toplinska snaga mora proći kroz njega kako bi dospjela do krajnjih korisnika. Slika 2 sadrži grafički prikaz optimizacijskog modela dane mikromreže.



Slika 2. Optimizacijski model mikromreže

2.1. Modeliranje elemenata mikromreže

Kako bi se modelirali elementi mikromreže, vrijeme je diskretizirano na satne periode tijekom jedne godine. Indeks "i" kraj svake varijable označava vrijednost te varijable tijekom pojedinog sata promatrane godine. Sveukupno se godina sastoji od 8760 sati što je i konačna vrijednost broja i^{Max} . Nadalje, maksimalna snaga iz aktivne mreže je ograničena na određenu vrijednost $P^{NetworkMax}$ (1). Ova vrijednost je ograničena nominalnom snagom transformatora koji povezuje mikromrežu i aktivnu mrežu. Međutim, tijekom inicijalne optimizacije dozvoljena snaga iz mreže je postavljena na nulu. Na ovaj način se kreira model mikromreže koji može raditi ili samostalno ili paralelno s ostatkom mreže.

Aktivna mreža se može ponašati ili kao izvor ili kao trošilo električne energije. Ako je snaga iz mreže u određenom trenutku godine $P_i^{Network}$ pozitivna, aktivna mreža se ponaša kao izvor, te obratno. Na ovaj način se stvara potpuno fleksibilna mikromreža, koja može ili slati ili dobivati električnu energiju u mrežu, gdje je jedino ograničenje veličina priključnog transformatora.

$$-p^{NetworkMax} \leq p_i^{Network} \leq p^{NetworkMax}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (1)$$

CHP je modeliran kao stroj koji uzima ulaz plina f_i^{CHP} kao ulaz te proizvodi toplinu (2) i električnu snagu (3) na izlazu, svaku sa svojom efikasnošću. S obzirom na to da tržište plina koristi energiju kao tržišnu jedinicu, te je vrijeme diskretizirano na satne periode, ulazi plina u boiler i CHP su ubačeni u kW.

Ukupna snaga koja izlazi iz CHP-a se sastoji od električne snage P_i^{CHP} i ukupne korisne toplinske snage $H_i^{CHPTotal}$. Ukupna korisna toplinska snaga se sastoji od topline koja se koristi za daljinsko grijanje H_i^{CHP} i viška topline koja se baci u okolinu $H_i^{WasteHeat}$ (4). Na ovaj način CHP može proizvoditi više električne energije na trošak bačene topline, te tako povećati sveukupnu dobit mikromreže. S obzirom na to da ovaj model razmatra i kapitalni trošak instalacije jedinica, potrebno je izračunati nominalnu snagu CHP-a kako bi se odredio kapitalni trošak, te tako našla optimalna veličina jedinice. Električna snaga iz CHP-a mora biti u svakom trenutku manja od svoje nominalne snage P^{CHPNom} (5).

$$\eta^{CHP_heat} \cdot f_i^{CHP} = H_i^{CHPTotal}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (2)$$

$$\eta^{CHP_el} \cdot f_i^{CHP} = P_i^{CHP}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (3)$$

$$H_i^{CHPTotal} = H_i^{CHP} + H_i^{WasteHeat}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (4)$$

$$P_i^{CHP} \leq P^{CHPNom}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (5)$$

Bojler je modeliran kao uređaj koji koristi plin f_i^{Boiler} na svom ulazu te proizvodi toplinu H_i^{Boiler} na svom izlazu, uz danu efikasnost (6). Izlaz topline iz bojlera tijekom svih perioda je ograničen s njegovom nominalnom veličinom $H^{BoilerNom}$ (7). Ova nominalna veličina se koristi u izračunu ukupnog troška instalacije bojlera kako bi se dobila optimalna veličina bojlera za danu mikromrežu. S obzirom na to da bojler koristi

kemijsku reakciju izgaranja za dobivanje topline, boiler ne može brzo mijenjati svoju snagu u bilo kojem smjeru. Stoga je implementirana i maksimalna promjena snage bojlera tijekom jednog perioda $H^{BoilerRamp}$ te je postavljena na 40% nominalne snage bojlera (8, 9, 10).

$$\eta^{Boiler} \cdot f_i^{Boiler} = H_i^{Boiler}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (6)$$

$$H_i^{Boiler} \leq H^{BoilerNom}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (7)$$

$$H_i^{Boiler} - H_{i-1}^{Boiler} \leq H^{BoilerRamp}, \forall i \in \langle 1, i^{Max} \rangle \quad (8)$$

$$H_{i-1}^{Boiler} - H_i^{Boiler} \leq H^{BoilerRamp}, \forall i \in \langle 1, i^{Max} \rangle \quad (9)$$

$$H^{BoilerRamp} \leq 0.4 \cdot H^{BoilerNom} \quad (10)$$

Toplinska pumpa je modelirana kao uređaj koji koristi električnu snagu P_i^{HP} na svom ulazu te proizvodi toplinu H_i^{HP} na svom izlazu. Izlazna toplina je linearno ovisna o ulaznoj električnoj snazi s konstantnim faktorom CoP (engl. Coefficient of Performance) (11). Kao u prethodnim jedinicama, toplinska pumpa također ima svoju nominalnu snagu H^{HPNom} koja se koristi za računanje kapitalnih troškova njene instalacije. Generirana toplina iz pumpe u svakom trenutku mora biti manja od njene nominalne snage (12).

$$CoP \cdot P_i^{HP} = H_i^{HP}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (11)$$

$$H_i^{HP} \leq H^{HPNom}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (12)$$

Ukupna toplina proizvedena iz CHP-a, bojlera i toplinske pumpe se koristi za grijanje spremnika topline. Suma ta tri vektora H_i^{HSIn} je spojena na ulaz spremnika topline (13). Spremnik topline je modeliran kao izolirani spremnik vode koji sadrži vodu na temperaturi T_i^{Water} unutar dozvoljenih granica $T^{WaterMin}$ i $T^{WaterMax}$ (14). Ukupna jednadžba koja opisuje princip rada spremnika topline je prikazana jednadžbom (15). Kako bi se izvršila pretvorba Joulea u kWh, cijela desna strana jednadžbe je podijeljena s faktorom $3.6 \cdot 10^6$.

$$H_i^{HSIn} = H_i^{CHP} + H_i^{Boiler} + H_i^{HP}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (13)$$

$$T^{WaterMin} \leq T_i^{Water} \leq T^{WaterMax}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (14)$$

$$H_i^{HSOut} - H_i^{HSIn} = \frac{\rho^{Water} \cdot V \cdot c^v \cdot (T_{i-1}^{Water} - T_i^{Water})}{3.6 \cdot 10^6}, \forall i \in \langle 1, i^{Max} \rangle \quad (15)$$

Toplina koja izađe iz spremnika topline H_i^{HSOut} ide kroz niz cijevi kako bi došla do krajnjih korisnika i opskrbila ih s traženom toplinom H_i^{Demand} . Ovaj prijenos generira gubitke H_i^{Losses} (16) koji su ovisni o izolaciji cijevi, njihovoj duljini te razlici temperatura. Stoga se ovdje uzima aritmetička sredina stvarnih mjerenja gubitaka iz [6].

$$H_i^{Losses} = k^{Losses} \cdot H_i^{HSOut}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (16)$$

Trošila u ovom modelu su modelirana kao vremenski ovisna. Njihova potrošnja ovisi o razdoblju dana i godine. S obzirom na to da za područje grada Zagreba nema javno dostupnih podataka o potrošnji kućanstva, ovaj model uzima klimatski najbliži grad iz SAD-a gdje postoje javno dostupna mjerenja na stranicama američkog ministarstva energetike [7]. Dani podaci se nadalje množe s brojem kućanstava po pojedinoj grupi mikromreže kako bi se dobio stvarni broj. Tablica I pokazuje broj kućanstava po grupi.

Tablica I. Broj kućanstava po grupi

Naziv	Broj kućanstava
Residential Building 1	50
Residential Building 2	50
Neighborhood 1	20
Neighborhood 2	15
Neighborhood 3	25
Neighborhood 4	30

Jednadžbe (17) i (18) prikazuju ukupne jednadžbe balansa proizvodnje i potrošnje.

$$H_i^{Demand} = H_i^{HSOut} - H_i^{Losses}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (17)$$

$$P_i^{Demand} = P_i^{CHP} + P_i^{Network} - P_i^{HP}, \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (18)$$

Funkcija cilja ovog poglavlja je minimizacija troškova mikromreže tijekom jedne godine. Osim operativnih troškova, u ukupni trošak potrebno je uključiti i ekvivalentni godišnji trošak (engl. *Equivalent Annual Cost*, EAC) izgradnje jedinica. Operativni troškovi C^{OPEX} se sastoje od električne energije razmijenjene s mrežom, cijene plina i troška emisija CO_2 (19). Cijene električne energije su cijene s CROPEX-a za dan unaprijed tržište 2017. godine. Cijene plina su proračunate iz prosječnih cijena plina u EU u 2017. godini [8], dok su cijene emisija CO_2 preuzete isto iz EU za godinu 2018 [9].

$$C^{OPEX} = \sum_i^{i^{Max}} \left(c_i^e \cdot P_i^{Network} + (c_i^{Gas} + c^{CO2}) \cdot (f_i^{CHP} + f_i^{Boiler}) \right), \forall i \in \langle 0, i^{Max} \rangle \quad (19)$$

EAC uzima trošak imovine, diskontnu stopu d^{Rate} i broj godina potrebnog plaćanja y (20). S obzirom na to da svaka jedinica ima svoj vlastiti jedinični trošak po instaliranom kW snage, moguće je pisati jednačbe (21, 22, 23) koje opisuju ukupni godišnji trošak izgradnje pojedine jedinice. Naposljetku, kombinirajući dane jednačbe uz jednačbu (19) moguće je napisati ukupnu jednačbu koja opisuje godišnji trošak mikromreže (24).

$$c^{EAC} = \frac{d^{Rate}}{1 - (1 + d^{Rate})^{-y}} \quad (20)$$

$$C^{EAC_Boiler} = c^{EAC} \cdot c^{Boiler} \cdot H^{BoilerNom} \quad (21)$$

$$C^{EAC_CHP} = c^{EAC} \cdot c^{CHP} \cdot P^{CHPNom} \quad (22)$$

$$C^{EAC_HP} = c^{EAC} \cdot c^{HP} \cdot H^{HPNom} \quad (23)$$

$$C^{Total} = C^{OPEX} + C^{EAC_Boiler} + C^{EAC_CHP} + C^{EAC_HP} \quad (24)$$

2.2. Rezultati optimizacije mikromreže

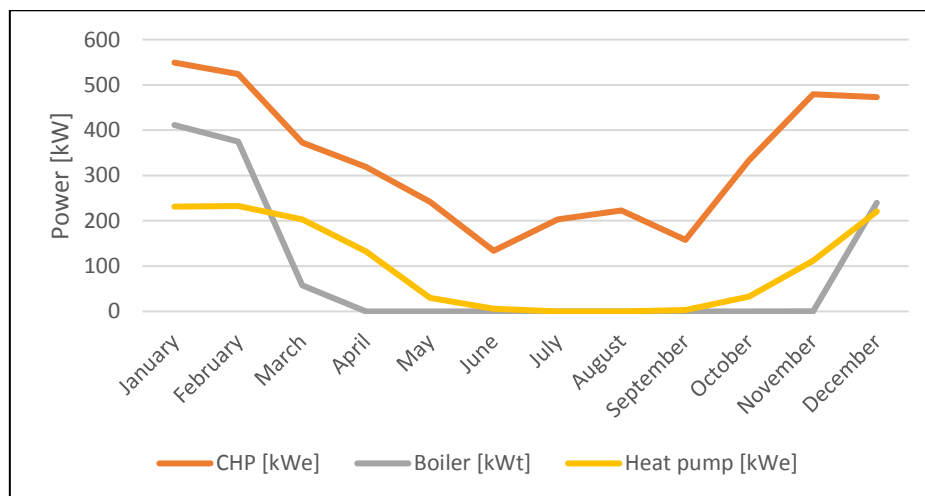
Opisani optimizacijski model je optimiziran pomoću Gurobi solvera u Java okruženju. Tablica II prikazuje nominalne veličine jedinica dobivenih optimizacijom modela, uz uvjet da je mikromreža konstantno u otopnom režimu rada.

Tablica II. Nominalne veličine jedinica

Jedinica	Vrijednost
Bojler	1500 kW
CHP	550 kW
Toplinska pumpa	1050 kW
Ukupni godišnji trošak	469 741.89 €

Kako bi se dobila optimalna veličina priključnog transformatora, ponovno se optimizira isti model, uz razliku da algoritam samostalno izračuna snagu iz mreže u svakom trenutku uz fiksnu nominalnu veličinu jedinica. U tom slučaju maksimalna snaga kroz transformator iznosi 644 kW. Sigurnosti radi, u ovom slučaju se uzima priključni transformator veličine 1 MVA. Uz takvu veličinu jedinica, godišnji trošak pogona paralelno s mrežom iznosi 436 558.55 €.

S obzirom na to da je optimizacijski period ovog modela jedna godina, grafički prikaz svakog trenutka bio bi neprikladan. Stoga su uzete prosječne mjesečne vrijednosti snaga pojedinih komponenti te prikazana na sljedećem grafikonu. Vidljivo je da CHP radi tijekom cijele godine, dok bojler i toplinska pumpa rade samo u hladnijem dijelu godine.



Slika 3. Prosječna mjesečna snaga jedinica

3. DINAMIČKI MODEL

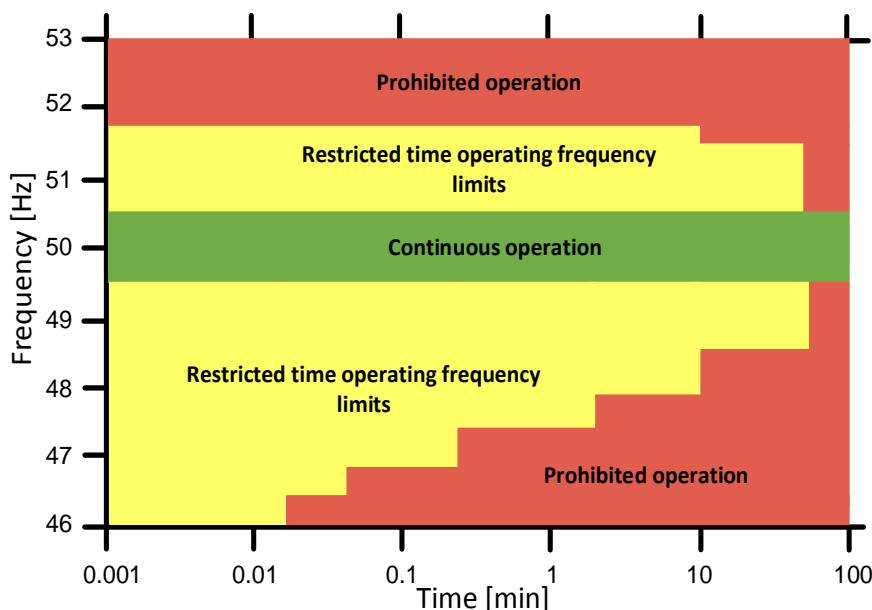
Kako bi se dobio dinamički odziv dane mikromreže, ovaj rad koristi MATLAB softver. Statički uvjeti su pritom prethodno proračuni koristeći metodu tokova snaga (engl. *Load Flow Analysis*) te direktno uvršteni u dinamički model. Na ovaj način se otklanjaju početne oscilacije u sustavu, dok se frekvencija nalazi na 50 Hz te su svi čvorovi na vrijednosti vrlo blizu 1.0 p.u. (engl. *per unit*, po jedinici). Periodi koji su uzeti u obzir u dinamičkoj analizi su periodi kad je snaga kroz PCC na maksimumu, u jednom ili u drugom smjeru. Nakon što su implementirani u MATLAB, simulira se odvajanje od mreže u tim scenarijima te se promatra promjena frekvencije mikromreže. Ako frekvencija mikromreže izađe izvan dozvoljenih granica, uzima se niža maksimalna dozvoljena snaga kroz PCC te se ponovno unosi u optimizacijski model, uz istu nominalnu veličinu jedinica. Izlaz iz tog modela je nova radna točka u kojoj mikromreža radi tijekom godine. Ta nova radna točka ponovno se unosi u dinamički model te se ponovno simulira odvajanje od mreže. Ovaj proces se iterativno ponavlja sve dok frekvencija tijekom odvajanja ne ostane unutar dozvoljenih granica. Koristeći ovu metodu, odredit će se izvediva točka pri kojoj mikromreža ostane stabilna i nakon odvajanja.

3.1. Modeliranje elemenata mikromreže

CHP generator u danoj mikromreži je modeliran kao *Synchronous machine pu Standard* blok u *Simulinku*. Na njegov ulaz su spojeni ulazi iz blokova turbine i uzbudnog sustava, dok je na njegovom izlazu simetrični trofazni napon. Blok turbine u ovom modelu je modeliran koristeći *GAST* model turbine [10], dok je za blok uzбудnika uzet *IEEE type 1 excitation system* iz *Simulinka*. Primarna regulacija frekvencije već je ukomponirana u blok turbine, dok je sekundarna regulacija frekvencije modelirana koristeći PID regulator s parametrima koji su podešeni metodom pokušaja i pogreške kako bi najbolje odgovarali danoj mikromreži. Ipak, valja naglasiti da je sekundarna regulacija frekvencije isključena tijekom rada na mreži, te tada CHP ne služi za regulaciju frekvencije. Trošila i aktivna mreža su modelirani kao *Three-Phase Series RLC Load*, odnosno *Three Phase Source* blok. Toplinska pumpa je modelirana kao *Asynchronous machine* blok iz *Simulinka*. Zbog svoje velikog kapaciteta, kabeli su modelirani koristeći π -model, dok je priključni transformator modeliran pripadajućim blokom u *Simulinku*.

3.2. Kriterij stabilnosti

S obzirom na to da je svaki sinkroni stroj napravljen za rad na određenoj frekvenciji, od velikog je značaja održati devijacije frekvencije što manje mogućim. Razlog tome je što svaka turbina ima prirodnu frekvenciju pri kojoj vibrira. Ako se turbina rotira frekvencijom ekvivalentnom nekom višekratniku svoje prirodne frekvencije, ona generira vibracije koje mogu znatno oštetiti turbinu, a i cijeli stroj. Šteta koja nastaje na turbinama je kumulativna te je stoga potrebno rad pri tim frekvencijama smanjiti na minimum. Takvi efekti mogu se opisati Campbellovim dijagramima.



Slika 4. Dozvoljene frekvencije turbine

Slika 4 prikazuje Campbellov dijagram preuzet iz *IEEE* odrednica za kontrolu frekvencije [11] koji se koristi u ovom radu. S obzirom na to da ovaj rad pretpostavlja da mikromreža može neograničen broj puta prijeći u otočni režim rada, potrebno je očuvati turbinu što je više moguće. Uzimajući u obzir prethodnu sliku gdje je dozvoljeni režim rada između 49.5 Hz i 50.5 Hz, za maksimalnu devijaciju frekvencije mikromreže uzima se ± 0.5 Hz.

3.3. Proračun stabilnosti

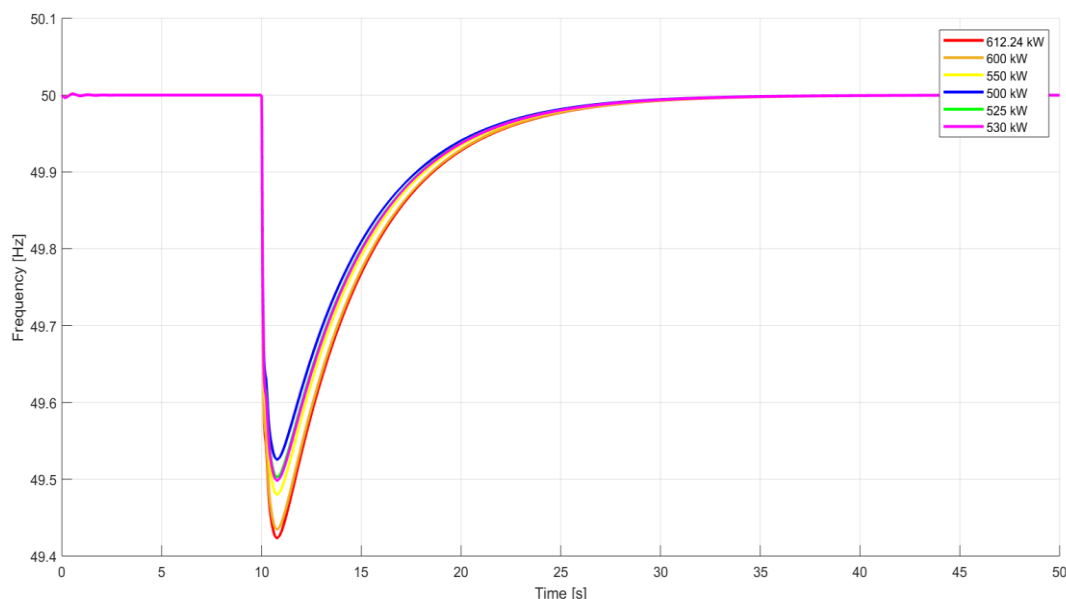
Nakon što su implementirani svi parametri u MATLAB, provedena je dinamička analiza kako bi se dobile izvedive točke odvajanja. Trenutne snage pojedinih jedinica su implementirane u analizu tokova snaga kako bi se dobili početni uvjeti i uklonila prijelazna stanja. S obzirom na to da snaga kroz PCC može ići u oba smjera, potrebno je izračunati granične slučajeve u oba smjera. Ti slučajevi se događaju tijekom najvećih snaga kroz PCC, za vrijeme uvoza ili izvoza električne energije iz mreže.

Princip računanja graničnih slučajeva već je objašnjen na početku ovog poglavlja, te se stoga neće ovdje ponavljati. Maksimalna greška u proračunu je postavljena na 5 kW, te je metoda pokušaja i pogreške uzeta s takvim korakom. Tablica III prikazuje iterativne korake računanja maksimalne izvedive snage pri kojoj frekvencija mikromreže ostaje unutar granica. Crvenim slovima prikazane su neizvedive točke, dok su zelenim prikazane izvedive točke. Prvi korak iteracije odgovara izlazu inicijalne optimizacije s početka rada. Oscilacije frekvencije za svaki korak prikazane su grafički na slici 5.

Tablica III. Računanje dozvoljene snage kroz PCC

Korak	Snaga ulazi u mikromrežu		Snaga izlazi iz mikromreže	
	Snaga [kW]	Izvedivo?	Snaga [kW]	Izvedivo?
1.	612.24	Ne	448.96	Da
2.	600	Ne	/	/
3.	550	Ne	/	/
4.	500	Da	/	/
5.	525	Da	/	/
6.	530	Ne	/	/

Rezultati pokazuju da je maksimalna snaga koja izlazi iz mikromreže već zadovoljena tijekom inicijalne optimizacije. S druge strane, maksimalna snaga koja ulazi u mikromrežu je prevelika te je potrebno smanjiti na najmanje 525 kW. Koristeći smanjenu dozvoljenu snagu kroz PCC, mikromreža je u stanju uvijek pružiti uslugu rezerve operatoru sustava tako da prijeđe u otočni rad. Sljedeće poglavlje sadrži financijsku analizu takve usluge.



Slika 5. Promjena frekvencije za svaku iteraciju

4. USPOREDBA TROŠKOVA

Kako bi se dobili minimalni troškovi pružanja mogućnosti odlaska u otočni pogon tijekom godine, potrebno je poznavati troškove optimalnog i ograničenog rada. Godišnji trošak optimalnog godišnjeg rada na mreži je izračunat u poglavlju 2.2. S druge strane, godišnji trošak ograničenog pogona je izračunat koristeći model koji je opisan u poglavlju 2.1., uz jedinu razliku da je smanjena maksimalna dozvoljena snaga kroz PCC kako bi bio moguć prelazak u otočni rad. S obzirom na to da najveća izvediva snaga dobivena proračunom iz poglavlja 3.3. iznosi 525 kW, trebala bi se koristiti kao maksimalna dozvoljena snaga koja ide kroz PCC. Ipak, kako bi se kompenzirali moguće pogreške pri računanju ili mjerenju, maksimalna snaga je postavljena na 500 kW. Godišnji troškovi takvih pogona su prikazani u Tablici IV.

Tablica IV. Godišnji trošak pogona

Slučaj	1	2	3
Maksimalno dozvoljena snaga [kW]	1000	525	500
Godišnji trošak [€]	437 390.01	437 394.09	437 397.24
Razlika u godišnjem trošku [€]	0	+4.08	+7.23

Razlika u trošku prikazana u Tablici IV. pokazuje da vođenje mikromreže pri nižoj maksimalnoj snazi kroz PCC povećava godišnji trošak. Taj dodatni trošak prelijeva se na korisnike mikromreže kako bi se financijski opravdalo pružanje usluge odlaska u otočni rad tijekom bilo kojeg trenutka u godini, ali i održavanje napona čak i u neželjenim ispadima, kratkim spojevima ili prirodnim katastrofama. Minimalni poticaj u ovom slučaju bi trebao iznositi 7.23 € godišnje.

Nadalje, Tablica IV prikazuje samo dodatni trošak u odnosu na referentni slučaj, u kojem su jedinice dimenzionirane optimalno za stalni rad u otočnom pogonu. Na ovaj način nije uključen i dodatni trošak različitog dimenzioniranja jedinica. Kako bi se uključili i ti troškovi, provodi se dodatna analiza koja izračunava optimalne veličine jedinica za stalan rad na mreži. Godišnji trošak takvog rada paralelno s mrežom iznosi 355 967.63 €. Usporedi li se taj trošak s troškom različitog dimenzioniranja jedinica, vidljivo je da je razlika velika. Stoga se u dodatni trošak mora pridodati i razlika zbog drukčijeg dimenzioniranja jedinica. Tablica V prikazuje ukupni porast troškova koji sadrži i drukčije dimenzioniranje jedinica, ali i sposobnost za prelazak u otočni rad. Valja napomenuti da predstavljeni dodatni trošak uključuje samo mogućnost prelaska u otočni rad, ne i sami rad u otočnom režimu. Stoga je potrebno uključiti i dodatni trošak tijekom samog rada u otočnom režimu.

Tablica V. Ukupni godišnji porast troškova

Slučaj	Optimalni pogon na mreži	Optimalni pogon van mreže
Godišnji trošak [€]	355 967.63	437 397.24
Razlika u godišnjem trošku [€]	0	+81 429.61

5. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani ovim radom pokazuju potencijal mikromreža u planiranju i upravljanju elektroenergetskog sustava. Koristeći višeenergijske sustave, moguće je postići efikasnije sustave s manjim troškovima i manjim emisijama. Optimizacijski model koji se koristi u ovom radu koristi brojne ulaze kako bi se stvorila što stvarnija slika realne mikromreže. Neki ulazi su uzeti iz stvarnih primjena, dok su neki uzeti iz iskustva. Stoga se ovaj model može i u budućnosti primijeniti na neku drugu mikromrežu.

Potencijalna buduća istraživanja na ovu temu su velika. Jedan od potencijalnih radova može biti implementacija obnovljivih izvora energije u ovaj model mikromreže te izračunavanje optimalne instalirane snage prema nekim mjerenjima. Ako se u to još uključi i neki spremnik električne energije, mikromreža može pružati uslugu fleksibilnosti i bez prisustva CHP-a. Nadalje, moguća su i poboljšanja na termičkom dijelu. Primjerice, izlazi iz bojlera i toplinske pumpe najčešće nisu linearno povezani s njihovim ulazom. Da bi se potpuno opisali, potrebno je implementirati i njihove osnovne parametre kao što su tlak, protok, kondenzacija, gubici itd.

Mikromreže u budućnosti mogu biti od vitalnog značaja pri pružanju usluga fleksibilnosti koje postaju sve važnije ulaskom obnovljivih izvora energije u sustave. Sposobnost mikromreže da prijeđe u otočni režim rada bez narušavanja kvalitete električne energije svojim korisnicima čini ih savršenom organizacijskom jedinicom za očuvanje stabilnosti sustava. Upravo ta sposobnost mogla bi biti presudna u budućim niskougličnim elektroenergetskim sustavima.

5. LITERATURA

- [1] A. Parisio, E. Rikos, G. Tzamalidis and L. Glielmo, "Use of model predictive control for experimental microgrid optimization", *Applied Energy*, vol. 115, no. 0306-2619, pp. 37-46, 2014.
- [2] Y.-H. Chen, L. Su-Ying, C. Yung-Ruei, L. Ta-Tung and H. Ming-Che, "Economic analysis and optimal energy management models for microgridsystems: A case study in Taiwan," *Applied Energy*, vol. 103, pp. 145-154, 2013.
- [3] Q. Deng, X. Gao, H. Zhou and W. Hu, "System modeling and optimization of microgrid using genetic algorithm," in *2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, Harbin, 2011.
- [4] R. J. Vijayan, C. Subrahmanyam and R. Roy , "Dynamic Modeling of Microgridfor Grid Connected and Intentional Islanding Operation," in *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, Mylavaram, 2012.
- [5] A. A. Renjit, A. Mondal, M. S. Illindala and A. S. Khalsa, "Analytical Methods for Characterizing Frequency Dynamics in Islanded Microgrids with Gensets and Energy Storage," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1815-1823, 2017.
- [6] V. Masatin, E. Latošev and A. Volkova, "Evaluation Factor for District Heating Network Heat Loss with Respect to Network Geometry," in *International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2015*, Riga, 2015.
- [7] U.S. Department of Energy, "Commercial and Residential Hourly Load Profiles for all TMY3 Locations in the United States," [Online]. Dostupno na: https://openei.org/datasets/files/961/pub/RESIDENTIAL_LOAD_DATA_E_PLUS_OUTPUT/BASE/. [Pristupljeno 12. 05. 2019.]
- [8] Eurostat, "Natural gas price statistics," [Online]. Dostupno na: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural_gas_price_statistics#Natural_gas_prices_for_non-household_consumers. [Pristupljeno 13. 05. 2019.]
- [9] "European Emission Allowances," European Energy Exchange AG, [Online]. Dostupno na: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/06/07>. [Pristupljeno 07. 06. 2019.]
- [10] NEPLAN, "Turbine-Governor Models," [Online]. Dostupno na: https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/08/Nep_TURBINES_GOV.pdf. [Pristupljeno 30. 04. 2019.]
- [11] A. N. S. Institute, "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants," ANSI/IEEE, New York, 1987.