

Optimalno planiranje pogona eksperimentalnog modela krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije

Katić, Matko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:302275>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-18**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

**OPTIMALNO PLANIRANJE POGONA
EKSPERIMENTALNOG MODELA KRAJNJEG KUPCA
S VLASTITOM PROIZVODNjom I SUSTAVOM
POHRANE ENERGIJE**

Diplomski rad

Matko Katić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

| | |
|---|--|
| Ime i prezime pristupnika: | Matko Katić |
| Studij, smjer: | Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika |
| Mat. br. pristupnika, god. | D-1458, 07.10.2022. |
| JMBAG: | 0165083058 |
| Mentor: | prof. dr. sc. Damir Šljivac |
| Sumentor: | dr. sc. Matej Žnidarec |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | izv. prof. dr. sc. Goran Knežević |
| Član Povjerenstva 1: | dr. sc. Matej Žnidarec |
| Član Povjerenstva 2: | izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete |
| Naslov diplomskog rada: | Optimalno planiranje pogona eksperimentalnog modela krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije |
| Znanstvena grana diplomskog rada: | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | Optimalno planiranje pogona eksperimentalnog modela krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije Opis teme: U uvodnom dijelu rada je potrebno napraviti pregled literature u području upravljanja energijom kod krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije. Razviti optimizacijski problem sustava upravljanja energijom za optimalno planiranje pogona krajnjeg kupca s ciljem minimizacije troška za električnu energiju. U laboratoriju testirati dobivene rezultate na eksperimentalnom modelu. Sumentor -voditelji: dr.sc. Matej |
| Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora: | 20.09.2024. |
| Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora: | Izvrstan (5) |
| Datum obrane diplomskog rada: | 30.9.2024. |
| Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane): | Izvrstan (5) |
| Ukupna ocjena diplomskog rada: | Izvrstan (5) |
| Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij: | 05.10.2024. |



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 05.10.2024.

| | |
|-------------------------------------|--|
| Ime i prezime Pristupnika: | Matko Katić |
| Studij: | Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika |
| Mat. br. Pristupnika, godina upisa: | D-1458, 07.10.2022. |
| Turnitin podudaranje [%]: | 11 |

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimalno planiranje pogona eksperimentalnog modela krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada | 1 |
| 2. PREGLED LITERATURE | 2 |
| 3. MIKROMREŽE | 4 |
| 3.1. Što su mikromreže? | 4 |
| 3.2. Podjela mikromreža | 7 |
| 3.2.1. Prema načinu rada | 7 |
| 3.2.2. Prema distribucijskom sustavu | 8 |
| 3.3. Mikromreža vs. virtualna elektrana (engl. <i>Virtual power plant</i>) | 10 |
| 3.4. Elementi mikromreže | 11 |
| 3.4.1. Promjenjivi obnovljivi izvori energije | 12 |
| 3.5. Operacijske strategije mikromreže | 12 |
| 3.6. Tržišni modeli za mikromreže | 14 |
| 3.7. Kupac s vlastitom proizvodnjom | 15 |
| 4. KRATKOROČNO PLANIRANJE POGONA MIKROMREŽE | 17 |
| 4.1. Optimizacijski model mikromreže | 17 |
| 4.2. Rezultati kratkoročnog planiranja pogona mikromreže | 22 |
| 4.2.1. Ulazni parametri | 22 |
| 4.2.2. Rezultati optimizacije | 26 |
| 5. KRATKOROČNO EMULIRANJE POGONA MIKROMREŽE | 33 |
| 5.1. Eksperimentalni postav za emulaciju pogona mikromreže | 33 |
| 5.2. Rezultati emulacija | 45 |
| 6. ZAKLJUČAK | 53 |
| LITERATURA | 54 |
| SAŽETAK | 57 |
| ABSTRACT | 58 |
| ŽIVOTOPIS | 59 |

1. UVOD

Elektroenergetski sustav (EES) napreduje i mijenja se otkako postoji. Te promjene obično nisu brze, jer se radi o najvećoj ljudskoj tvorevini na svijetu, a ujedno i jednoj od najbitnijih za funkcioniranje čovječanstva. U današnje vrijeme teži se decentraliziranju EES i većoj samostalnosti krajnjih potrošača. Potiče se distribuirana proizvodnja i smatra se da je to budućnost EES-a. Kako bi se to i ostvarilo potrebno je u distribucijsku mrežu implementirati mikromreže. To su strukture koje mogu funkcionirati same za sebe i biti neovisne o mreži na koju su spojeni, a mogu biti i dio većeg sustava, te doprinosti poboljšanju toga sustava. Kako bi se neki sustav smatrao mikromrežom, mora zadovoljavati određene zahtjeve. Neki od njih su postojanje elektrane na obnovljive izvore energije i mogućnost centraliziranog upravljanja. Mogućnost centraliziranog upravljanja pridonosi digitalizaciji EES i lakšem upravljanju, a postojanje obnovljivih izvora energije svakako je plus radi neiscrpnih i besplatnih izvora energije, ali i u ekološkom smislu. Mikromreže mogu promijeniti način funkcioniranja EES, ali ono što je bitnije za krajnje potrošače, mogu pomoći pri uštedi novčanih sredstava. Nadređeni sustav koji koordinira i planira rad svih sustava i elemenata unutar mikromreže osiguravajući optimalan i pouzdan rad uz minimalne troškove te na taj način omogućava sudjelovanje na tržištu električne energije naziva se sustav upravljanja energijom. Upravo ovaj sustav mogao bi pomoći krajnjim potrošačima kako bi maksimalno uštedjeli svoja novčana sredstva na električnoj energiji. U ovom radu opisan je i testiran sustav upravljanja energijom na razini kućanstva, odnosno krajnjeg potrošača sa vlastitom proizvodnjom i baterijskim spremnikom. Opisan je matematički model i definirana su sva ograničenja. Računalnom simulacijom dobiveni su optimalni rezultati za određene ulazne parametre, te je u konačnici takav sustav primijenjen na stvarnoj mikromreži. Nakon dobivenih rezultata testiranja dobiven je uvid u ponašanje takvog sustava u stvarnom svijetu.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U uvodnom dijelu rada potrebno je napraviti pregled literature u području upravljanja energijom kod krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije. Razviti optimizacijski problem sustava upravljanja energijom za optimalno planiranje pogona krajnjeg kupca s ciljem minimizacije troška za električnu energiju. U laboratoriju testirati dobivene rezultate na eksperimentalnom modelu.

2. PREGLED LITERATURE

Promjenjivost obnovljivih izvora energije poput vjetra i sunčevog zračenja, tržišnih cijena i opterećenja dovela je do poteškoća u osiguravanju kvalitete električne energije i uravnoteženja proizvodnje i potrošnje. Kako bi se riješili ovi problemi, mikromreže bi trebale biti upravljane sustavom za upravljanje energijom (EMS), koji omogućuje minimiziranje operativnih troškova, emisija i vršnih opterećenja, uz ispunjavanje tehničkih ograničenja mikromreže [1]. Literatura [2] predstavlja pregled PHIL (engl. *Power hardware-in-the-loop*) primjene za mreže i mikromreže, uključujući nedavne napretke i zahtjeve poput simulatora u stvarnom vremenu, hardverskih sučelja te razmatranja komunikacije i stabilnosti. Literatura [3] pruža pregled organizacijskih i kontrolnih struktura krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom, tipova i elemenata, metoda predviđanja ulaznih parametara, optimizacijskih okvira, metoda optimizacije, ciljanih funkcija, ograničenja i tržišnog okruženja. Posebna pažnja posvećuje se optimizacijskom okviru i predviđanju ulaznih parametara kako bi se ublažio utjecaj neizvjesnosti, povezanih s proizvodnjom temeljenom na obnovljivim izvorima energije, potrošnjom i tržišnim cijenama, na optimalno poslovanje. Autori u literaturi [4] daju pregled ispitnih tehnika i raspravljaju o trendovima u raznim tehnologijama koje se koriste za testiranje mikromreža. Prvo se ukratko raspravljaju različite metode i pruža se usporedba. Zatim se različiti istraživački naporu u području testiranja mikromreža kategoriziraju i predstavljaju jedan po jedan. Nadalje, istaknute su nove metodologije i novi pristupi u testiranju, te su predstavljeni izazovi i smjerovi budućih istraživanja. U literaturi [5] predstavljen je model za dobivanje optimalne ponude na tržištu dan unaprijed za virtualnog krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom koji predstavlja grupu krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom. Optimizacijski model pruža optimalan plan korištenja baterijskog skladišta kako bi se postigao maksimalan profit na tržištu dan unaprijed te je primijenjen na promatranom slučaju kako bi se prikazale opće značajke modela. Literatura [6] prikazuje implementaciju sustava za upravljanje energijom u stvarnom vremenu s ciljem maksimiziranja učinkovitosti distribucije električne energije u izoliranom hibridnom sustavu mikromreže koji sadrži fotonaponski sustav, vjetroturbinu, sustav za pohranu energije u baterijama i dizelski generator koji se koristi kao rezervni izvor. U literaturi [7] predstavljen je novi sustav upravljanja energijom za male mikromreže. Predloženi sustav upravljanja energijom usmjeren je na smanjenje dnevnih troškova energije preuzete iz glavne električne mreže te na povećanje potrošnje energije iz lokalnih obnovljivih izvora energije. Autori u literaturi [8] navode kako ovisno o vrsti jedinica distribuiranih izvora energije, karakteristikama opterećenja i ograničenjima kvalitete električne energije te strategijama sudjelovanja na tržištu, potrebne strategije upravljanja i rada mikromreže mogu biti značajno, pa čak i konceptualno, drugačije od

onih u konvencionalnim elektroenergetskim sustavima. U literaturi [9] predstavljen je sustav pametnog upravljanja energijom za optimizaciju rada mikromreže. Sustav se sastoji od modula za predviđanje snage, modula za upravljanje sustavom za pohranu energije i modula za optimizaciju. Zbog različitih stajališta, postupaka, ograničenja i ciljeva, problem rasporeda distribuiranih energetske izvora vrlo je važan problem u elektroenergetskim sustavima. Mikromreže i virtualne elektrane dva su poznata i prikladna koncepta kojima se ovaj problem rješava unutar njihovih okvira. Literatura [10] proučava problem raspoređivanja distribuiranih izvora s različitih aspekata kao što su tehnike modeliranja, metode rješavanja, pouzdanost, emisija, nesigurnost, stabilnost, odziv potražnje i stajalište s više ciljeva u okvirima mikromreže i virtualnih elektrana.

3. MIKROMREŽE

Današnje društvo uvelike ovisi o pouzdanoj opskrbi električnom energijom. Zabrinutost za dostupnost energije i starenje infrastrukture prijenosnih i distribucijskih mreža sve su veći izazov za sigurnost, pouzdanost i kvalitetu opskrbe električnom energijom. Biti će potrebna velika ulaganja u razvoj i obnovu postojeće infrastrukture. Ipak, najučinkovitiji način za zadovoljavanje društvenih zahtjeva je primjena inovativnih rješenja, tehnologije i mrežnih arhitektura [11].

U nadolazećim godinama očekuje se da će električne mreže napredovati i biti pametnije, fleksibilnije, pouzdanije, učinkovitije, te imati mogućnost dvosmjernog toka energije. Za sve navedeno potrebna je odgovarajuća infrastruktura. U tom kontekstu mikromreže imaju ključnu ulogu [12].

Mreže za prijenos i distribuciju električne energije moraju se nositi s promjenama u tehnologiji, vrijednostima društva, okolišu i gospodarskim promjenama. Pojam napredne mreže odnosi se na evoluciju električnih mreža. Pametna mreža je električna mreža koja može inteligentno integrirati radnje svih korisnika koji su na nju povezani, generatora, potrošača i onih koji pretpostavljaju obje uloge, kako bi učinkovito isporučili električnu energiju. Napredna mreža koristi inovativne proizvode i usluge zajedno s inteligentnim tehnologijama nadzora, upravljanja, komunikacije i samoobnavljanja [11].

U globalu, distribucijske mreže pretvaraju se iz pasivnih u aktivne, na način da su donošenje odluka i kontrola podijeljeni i tokovi snaga nisu jednosmjerni, već dvosmjerni. S dolaskom aktivnih distribucijskih mreža, potrebno je implementirati potpuno novi sustav. Mikromreže često su okarakterizirane kao osnovne jedinice za izgradnju naprednih mreža [11].

3.1. Što su mikromreže?

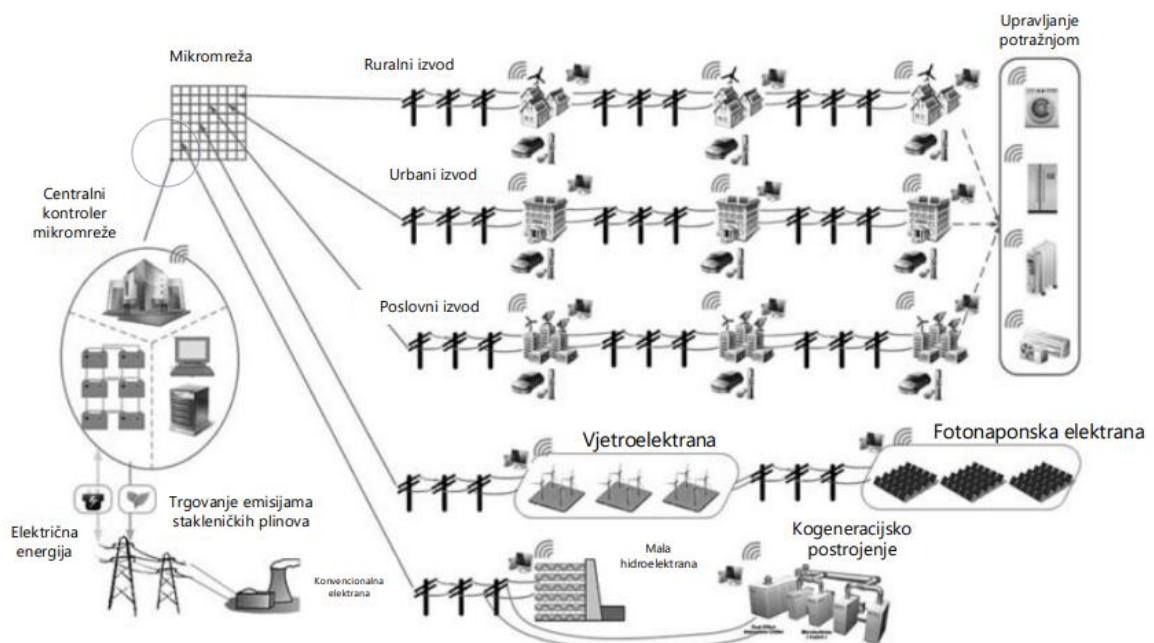
Mikromreže obuhvaćaju niskonaponske (NN) distribucijske sustave s distribuiranim izvorima (mikroturbine, gorivne ćelije, fotonapon, itd.) zajedno s uređajima za pohranu (zamašnjaci, energetske kondenzatori i baterije) i fleksibilna opterećenja. Takvim sustavima može se upravljati na neautonoman način, ako su međusobno povezani s mrežom ili kao otočni pogon ako su odvojeni od glavne mreže. Rad malih izvora u mreži može osigurati bolje funkcioniranje cjelokupnog sustava, sa učinkovitim upravljanjem i koordinacijom [11].

U konceptu mikromreže fokus je na lokalnoj opskrbi električnom energijom obližnjih potrošača, dakle modeli agregatora koji zanemaruju fizičke lokacije generatora i opterećenja nisu

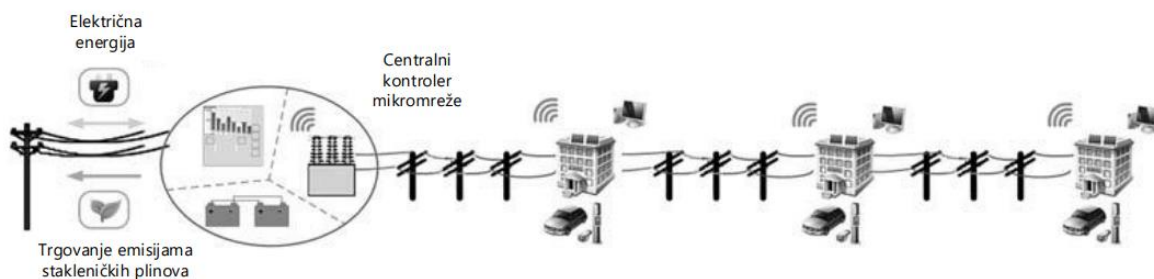
mikromreže. Mikromreže se obično nalaze na NN razini sa ukupnom instaliranom snagom ispod reda vrijednosti manjeg od jednog MW. Međutim postoje i iznimke, u slučaju da dijelovi visokonaponske mreže pripadaju mikromreži zbog međusobnog spajanja [11].

Mikromreža bi trebala moći izdržati normalan rad, kada je spojena na mrežu i otočni pogon, te kada nije spojena na mrežu. Većina mikromreža u budućnosti veći će dio vremena raditi priključene na mrežu. Za dugotrajan otočni pogon, mikromreža mora zadovoljiti visoke zahtjeve za veličinu spremnika električne energije i instalirane snage mikrogeneratora za kontinuirano napajanje svih opterećenja, u suprotnom mora se osloniti na vrlo fleksibilnu potražnju. Jedna od velikih prednosti koncepta mikromreže u odnosu na druga "pametna" rješenja jest sposobnost rješavanja sukoba interesa različitih dionika i pronalazak optimalnog rješenja za sve sudionike [11].

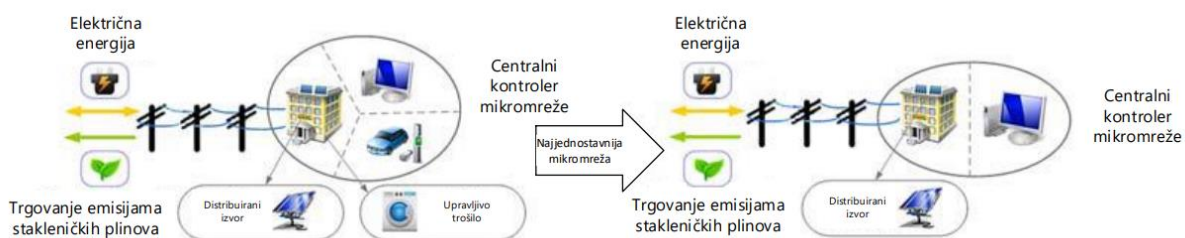
Mikromreže mogu biti raznih veličina, od NN razine, pa sve do snage od nekoliko MW. Na slikama 3.1., 3.2. i 3.3. prikazani su razni oblici mikromreža. Na slici 3.1. prikazana je niskonaponska mreža u obliku mikromreže, koja napaja kućanstva, stambene zgrade i poslovne prostore. Na slici 3.2. prikazana je mikromreža kao dio NN mreže, koji napaja određeni dio naselja. Na slici 3.3. prikazana je mikromreža na razini kućanstva, odnosno mikromreža u kući na NN razini [11].



Sl. 3.1. Mikromreža kao NN mreža [11]

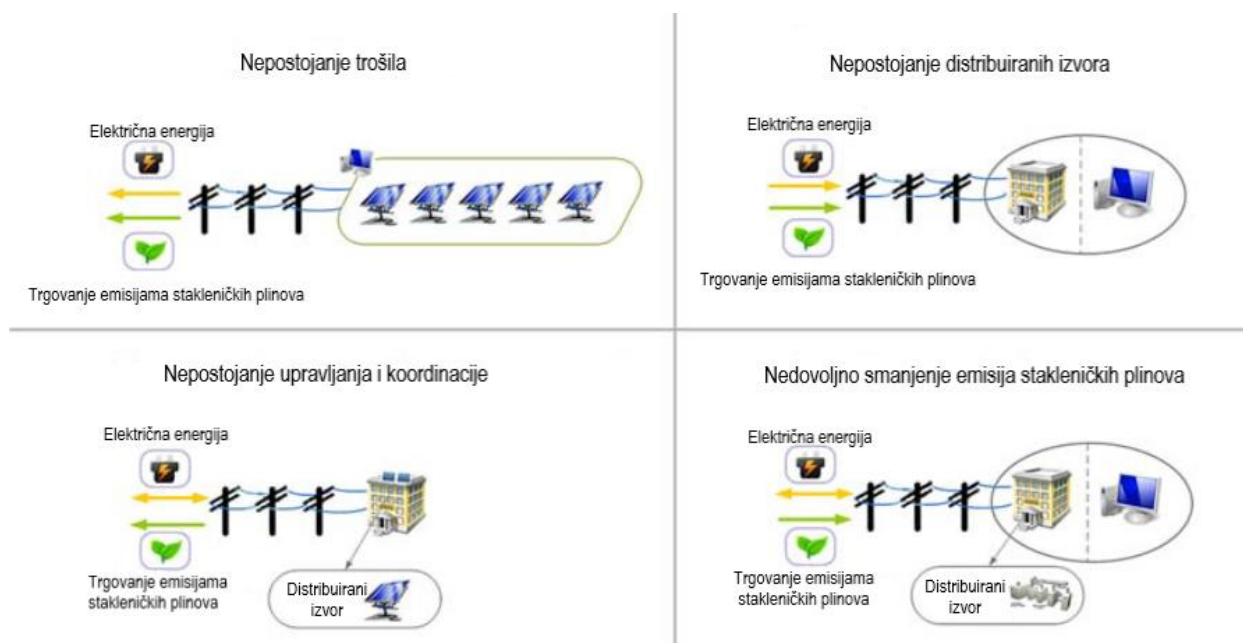


Sl. 3.2. Mikromreža kao dio NN mreže [11]



Sl. 3.3. Mikromreža kao NN kuća [11]

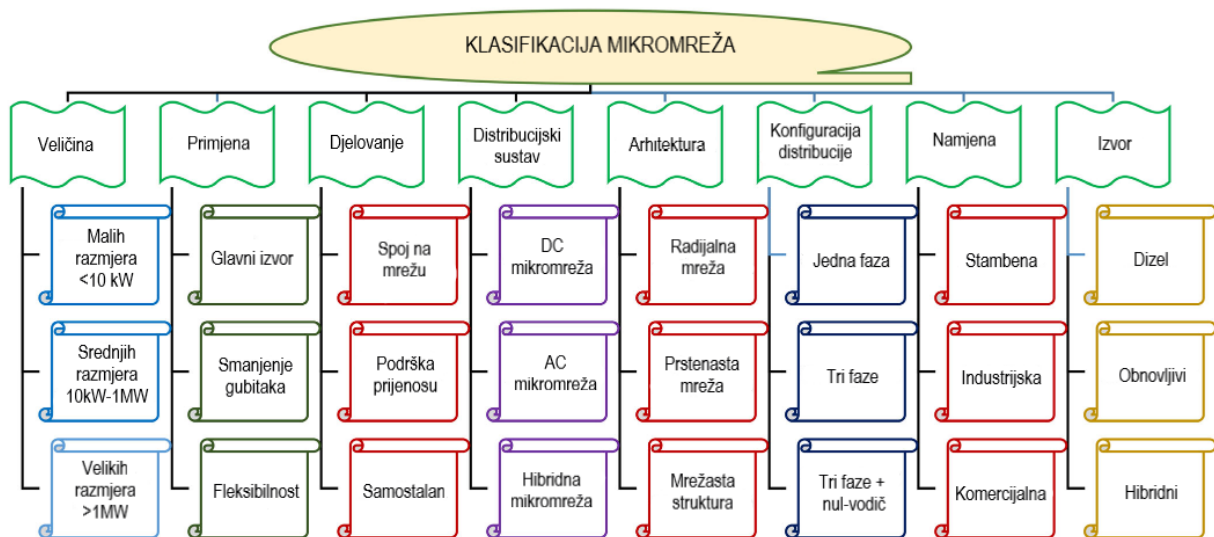
Na slici 3.4. prikazani su određene kombinacije sastavnica mikromreže, ali ni jedna od prikazanih nije mikromreža, jer nedostaje jedna ili više komponenata, kako bi se moglo reći da je to mikromreža [11].



Sl. 3.4. Primjeri onoga što mikromreža nije [11]

3.2. Podjela mikromreža

Kao što je prikazano na slici 3.5., mikromreže se mogu podijeliti u više kategorija. Za fleksibilnu mikromrežu podrazumijeva se da je sposobna uvoziti/izvoziti energiju iz/u mrežu, istovremeno kontrolirajući tokove radne i jalove snage, pomoću upravljanja skladištenjem energije [13].



Sl. 3.5. Klasifikacija mikromreža [13]

3.2.1. Prema načinu rada

Postoji više načina rada mikromreža, a definirani su na sljedeći način [13]:

- Mikromreža je povezana na mrežu
- Otočni način rada
- Način ponovnog povezivanja

Mikromreža, u otočnom (samostalnom) načinu rada, mora moći neovisno, odnosno samostalno održavati ravnotežu jalove snage. U takvom načinu rada dva su glavna izazova [13]:

- a) održavanje odgovarajuće frekvencije i veličine napona
- b) održavanje ravnoteže snage u mikromreži

Stoga se predlaže postavljanje optimalne vrijednosti kapaciteta paralelne kondenzatorske baterije u mikromreže i u distribucijskim mrežama u kojima je otočni način rada bitan, a troškovna funkcija sadrži [13]:

- trošak snage i gubitak energije
- investicijski trošak paralelne kondenzatorske baterije
- trošak prekida opskrbe potrošača

U otopnom načinu rada nema pomoći iz mreže i upravljanje mikromrežom postaje mnogo složenije. U načinu rada povezanom s mrežom, mikromreža je spojena s mrežom putem statičke sklopke. Napon mikromreže nameće glavna mreža. Mikromreža može razmjenjivati snagu s glavnom mrežom kako bi održala opskrbu u lokalnoj mikromreži, a protok energije je dvosmjernan. Dok je u otopnom načinu rada, mikromreža sama mora zadovoljiti zahtjeve opterećenja [13].

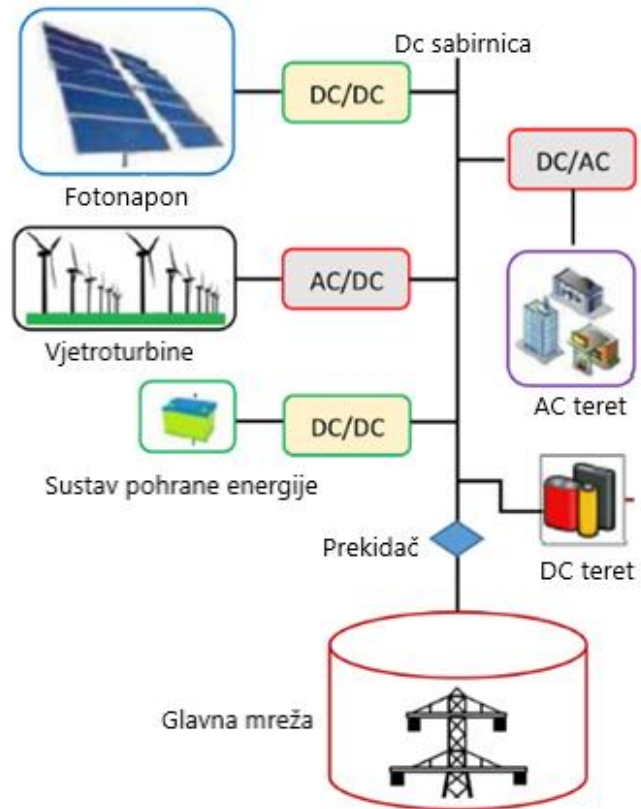
3.2.2. Prema distribucijskom sustavu

S obzirom na snagu, mikromreže mogu se podijeliti na [13]:

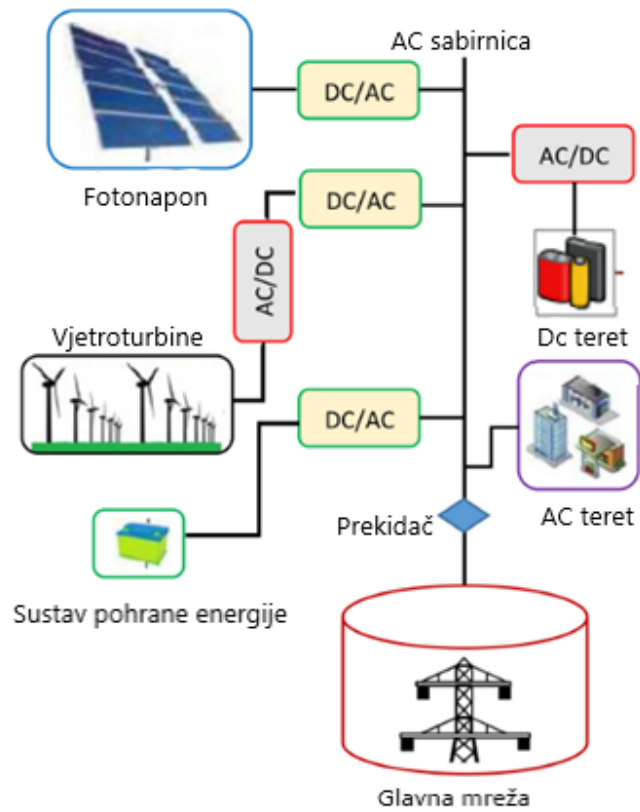
- Izmjenične mikromreže
- Istosmjerne mikromreže
- Hibridne mikromreže

Izmjenične i istosmjerne mikromreže imaju svoje prednosti i nedostatke. Istosmjerne mikromreže mogu raditi u načinu priključenom na mrežu ili u autonomnom načinu. Distribucijska mreža istosmjerne mikromreže može biti: monopolarna, bipolna i homopolarna. Istosmjerne mreže u usporedbi sa izmjeničnima imaju veću pouzdanost i učinkovitost, te jednostavnost u spajanju na različite distribucijske izvore energije. Na slici 3.6. prikazana je najčešća struktura istosmjerne mikromreže [13].

U izmjeničnoj mikromreži svi obnovljivi izvori energije i potrošači povezani su na zajedničku sabirnicu izmjenične struje. Glavni problem kod izmjeničnih mikromreža je otežano upravljanje i poteškoće u radu. Izmjenična mikromreža može se podijeliti u tri vrste obzirom na distribucijski sustav: jednofazna, trofazna bez vodova neutralne točke i trofazna s vodovima neutralne točke. Na slici 3.7. prikazana je najčešća struktura izmjenične mikromreže [13].

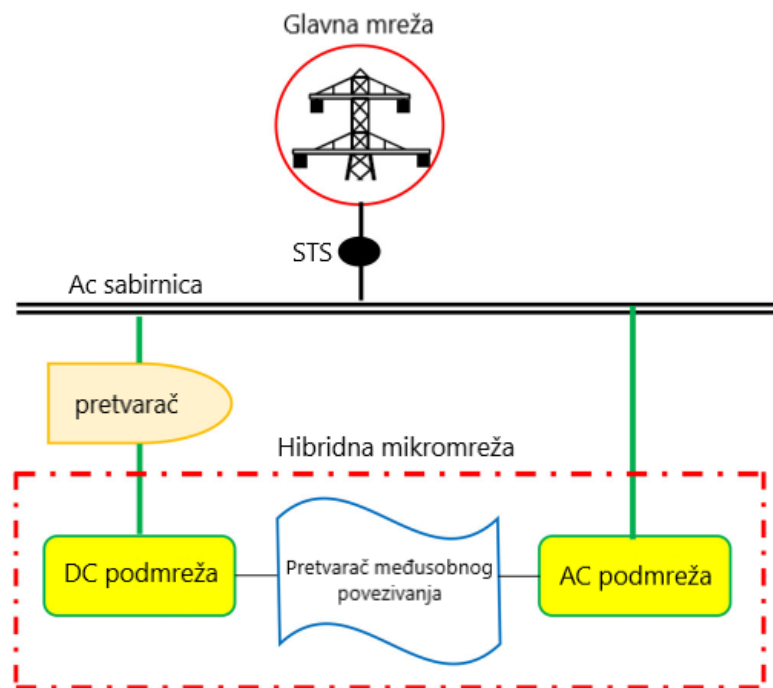


Sl. 3.6. Struktura DC mikromreže [13]



Sl. 3.7. Struktura AC mikromreže [13]

Struktura hibridne mikromreže prikazana je na slici 3.8., gdje je spojena na glavnu mrežu preko statičke sklopke (engl. *Static Transfer Switch, STS*). Protok energije između mreža i javne mreže kontrolira se preko sučelja energetskog pretvarača. Smjer snage ovisi o odnosu proizvodnje i opterećenja. Cilj izgradnje hibridnih mikromreža je minimiziranje stupnjeva pretvorbe, poboljšanje ukupne učinkovitosti mreže, povećanje pouzdanosti, smanjenje uređaja za sučelje i smanjenje troškova energije [13].

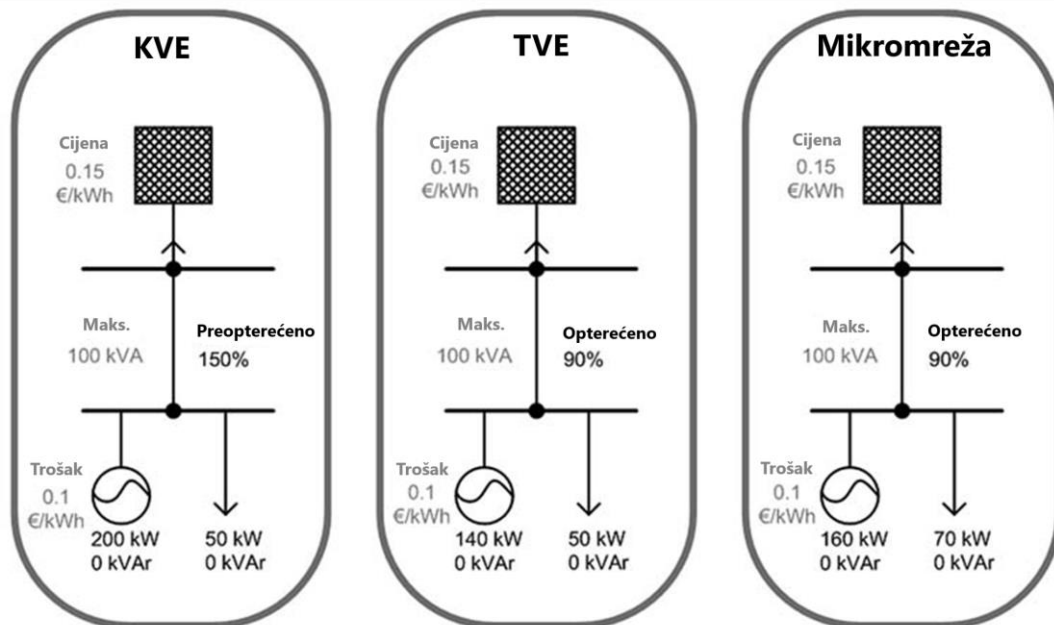


Sl. 3.8. Struktura hibridne mikromreže [13]

3.3. Mikromreža vs. virtualna elektrana (engl. *Virtual power plant*)

Virtualna elektrana je udruženje različitih subjekata spojenih na EES od strane jednog tijela/operatora. Ona može zamijeniti konvencionalnu elektranu, imajući pri tome veću učinkovitost i fleksibilnost. Virtualna elektrana i mikromreža naizgled su vrlo slične, ali postoji nekoliko važnih značajki po kojima se bitno razlikuju. Fizička lokacija mikromreža podrazumijeva fizičku/električku bliskost svih elemenata mikromreže dok subjekti kod virtualne elektrane ne moraju biti fizički/električki blizu. Udruženjem (agregiranjem) distribuiranih izvora i ostalih sudionika u virtualnu elektranu postiže se mogućnost sudjelovanja na veleprodajnim tržištima električne energije. Instalirana snaga mikromrežnih izvora je tipično između nekoliko kW i nekoliko MW dok instalirana snaga virtualnih elektrana je puno veća. Fokus mikromrežnog operatora je na zadovoljenju lokalne potražnje za energijom dok virtualna elektrana promatra

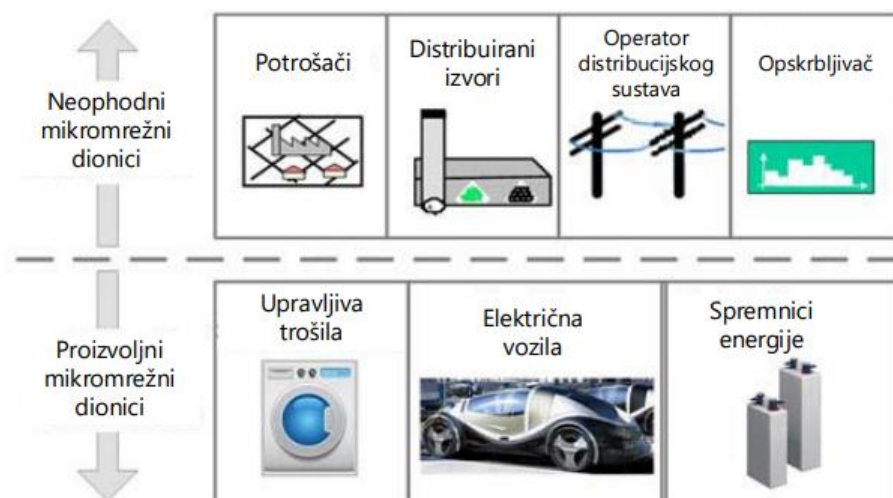
potražnju kao izvor fleksibilnosti prilikom trgovanja na tržištima električne energije. Virtualna elektrana može biti komercijalna i tehnička. Komercijalna virtualna elektrana (KVE) ne uzima u obzir ograničenja lokalne mreže, dok tehnička virtualna elektrana (TVE) uzima [11]. Na slici 3.9. prikazane su prednosti mikromreže u odnosu na komercijalnu i tehničku virtualnu elektranu.



Sl. 3.9. Prednosti mikromreže u odnosu na komercijalnu i tehničku virtualnu elektranu zbog integracije strane potrošača [11]

3.4. Elementi mikromreže

Mikromreža potencijalno se može opremiti s elementima za uravnoteženje energije, kao što su upravljiva trošila i spremnici energije, koji bi mogli pridonijeti smanjenju snage razmjene ili maksimiziranju profita od trgovanja. Na slici 3.10. prikazani su mogući sudionici u mikromreži [11].



Sl. 3.10. Sudionici mikromreže [11]

Za proizvodnju električne energije mikromreže u većini slučajeva koriste kombinaciju rezervnih dizelskih generatora i obnovljivih izvora energije kao što su fotonaponski (FN) moduli. Mikromreže ponekad sadrže i baterijske sustave za pohranu električne energije, koja se koristi u slučaju prekida napajanja ili rasta potražnje [14].

3.4.1. Promjenjivi obnovljivi izvori energije

Upravlјivost promjenjivih obnovljivih izvora energije (OIE) znatno ovisi o izvoru primarne energije. Poželјno je ne ograničavati proizvodnju električne energije iz promjenjivih OIE radi velikih investicijskih troškova i malih troškova održavanja, te radi prednosti koje imaju u usporedbi sa konvencionalnim izvorima energije u kontekstu emisije štetnih plinova i utjecaja na okoliš. Također, nije preporučljivo smanjivati broj promjenjivih obnovljivih izvora energije, osim ako su štetni za mrežu, odnosno ako izazivaju prevelike napone u vodovima. Radi toga promjenjivi OIE nisu ograničeni „voznim redom“, odnosno rasporedu po kojemu se elektrane uključuju i isključuju. Oni imaju prednost pred ostalim izvorima energije, ponajviše jer je primarni oblik energije, odnosno „gorivo“, koje oni pretvaraju u električnu energiju, besplatno. Također poneki OIE mogu služiti za kompenzaciju jalove snage, te tako poboljšati performanse mikromreže [11].

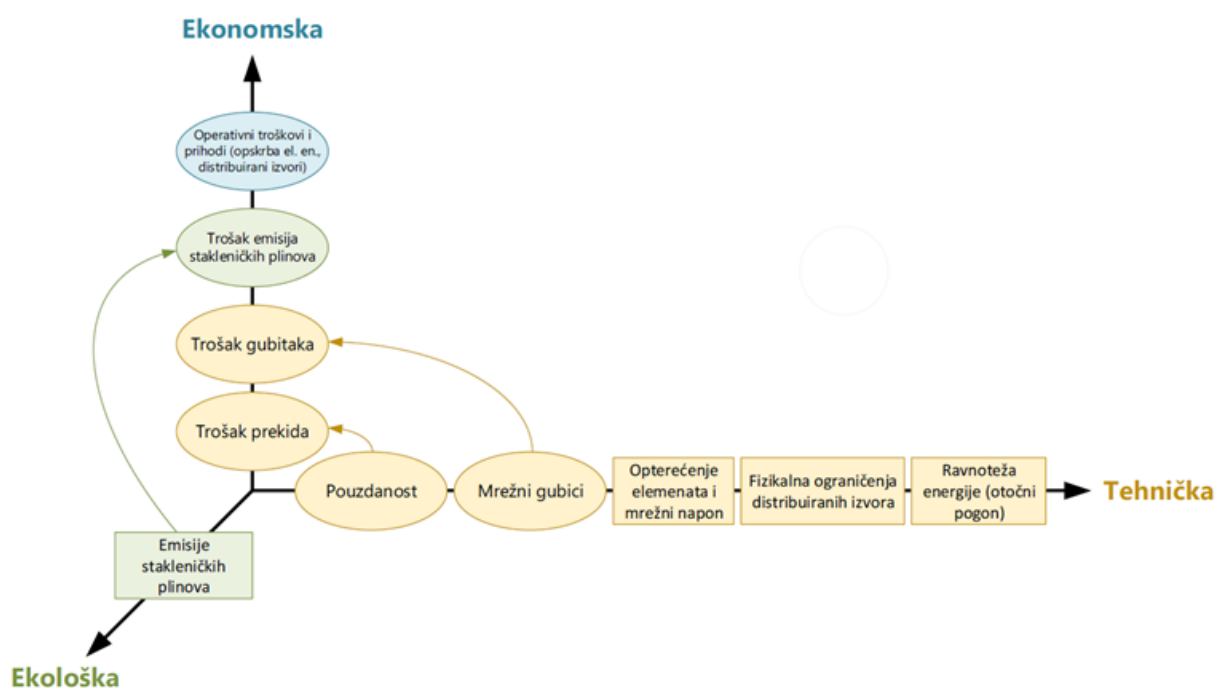
3.5. Operacijske strategije mikromreže

Operacijske sheme mikromreže i konačna konfiguracija ovise o potencijalno sukobljenim interesima različitih dionika koji su uključeni u mikromrežu. Među te dionike spadaju: vlasnici distribuiranih izvora energije, operatori sustava, korisnici mikromreže, odnosno potrošači, regulatorna tijela i drugi [11].

Usklađivanjem lokalne potrošnje s lokalnom proizvodnjom električne energije iz distribuiranih izvora te ovisno o dionicima uključenim u proces planiranja i/ili vođenja pogona mogu se klasificirati četiri operacijske strategije, odnosno cilja, operatora vlasnika mikromreže [11]:

- Ekonomska
- Tehnička
- Ekološka
- Kombinacija više strategija

Na slici 3.11. umnom mapom su prikazane operacijske strategije mikromreže.



Sl. 3.11. Operacijske strategije mikromreže [11]

Ekološki cilj podrazumijeva minimiziranje emisije štetnih plinova koje distribuirani izvori emitiraju, pritom zanemarujući tehničke i ekonomske aspekte. Ova strategija se koristi za postizanje ekoloških ciljeva na način da se primjenjuju samo fizikalna ograničenja elemenata mikromreže [11].

Tehnički cilj optimizira pogon elektroenergetske mreže. Smanjuje mrežne gubitke, kolebanja napona i opterećenja elemenata mikromreže uz zanemarivanje pogonskih troškova i prihoda. Ovaj cilj uglavnom koriste operatori elektroenergetskog sustava [11].

Ekonomski cilj najčešće je korišten cilj, a zadatak mu je minimizirati troškove, odnosno maksimizirati dobit bez obzira na ekološki utjecaj i tehničke aspekte pogona elektroenergetskog sustava. Ovom strategijom najviše se služe operatori ili vlasnici mikromreža, pri tom primjenjujući samo fizikalna ograničenja elemenata mikromreže [11].

Kombinacija više strategija podrazumijeva postizanje više ciljeva odjednom. U obzir se uzimaju svi ekološki, tehnički i ekonomski faktori. Ovaj pristup može biti relevantan za aktere koji sudjeluju ne samo na klasičnim energetske tržištima, nego i na drugim potencijalnim tržištima za pružanje mrežnih usluga i certifikata emisije [11].

3.6. Tržišni modeli za mikromreže

Ovisno o operativnom modelu, mogu se razlikovati dva glavna tržišta: veleprodajno tržište i maloprodajno tržište. Ta dva različita tržišta mogu funkcionirati u interakciji jedno s drugim. Obavezno otvoreni prijenosni pristup proizvođačima i uvoznicima energije stvorio je veću konkurentnost veleprodajnog tržišta električne energije. Na razini maloprodaje uspostavljena je konkurencija u mnogim zemljama, što kupcima daje dodatni izbor u opskrbi i cijenama električne energije. Zbog svoje relativno male veličine mikromreže ne mogu izravno sudjelovati niti u jednom tržištu. Iz tog razloga mogu eventualno sudjelovati kao dio portfelja maloprodajnog opskrbljivača ili tvrtke za energetske usluge [11].

Ključni akteri na tržištu električne energije su [11]:

- Potrošač
- Vlasnik / operator lokalne proizvodnje
- Potrošač sa vlastitom proizvodnjom
- Klijent
- Regulator tržišta
- Maloprodajni opskrbljivač
- Operator distribucijskog sustava

Potrošač može predstavljati kućanstvo, srednje ili malo poduzeće. Obično potrošač ima ugovor s maloprodajnom tvrtkom za opskrbu energijom. Potrošači, tj. bilo tko priključen na distribucijsku mrežu, treba platiti naknade vlasniku distribucijske mreže za korištenje mreže [11].

Vlasnici lokalnih proizvodnih jedinica odgovorni su za svoje postupke. Vlasnici lokalne proizvodnje šalju svoju proizvodnju u mrežu, vjerojatno uživajući u prioritetnom dispečiranju i fiksnim otkupnim tarifama, posebno za elektrane sa obnovljivim izvorima energije, ili možda imaju ugovore s maloprodajnom tvrtkom. Mogu plaćati naknade za distribucijsku mrežu. Pretpostavlja se da će neke ili sve jedinice lokalne proizvodnje biti opremljene nekom vrstom nadzora i možda imati mogućnost upravljanja [11].

Potrošač sa vlastitom proizvodnjom je posebna vrsta potrošača koji ima instaliranu malu elektranu na svojem posjedu. Ta elektrana lokalne proizvodnje može u potpunosti ili djelomično pokriti

njegove troškove električne energije, a višak može biti poslan u mrežu sa povoljnim otkupnim tarifama [11].

Klijenti su potrošači, vlasnici lokalnih proizvodnih jedinica i potrošači sa vlastitom proizvodnjom [11].

Regulatorno tijelo za energiju neovisno je tijelo odgovorno za otvoreno, pošteno i transparentno djelovanje tržišta. Osigurava otvoreni pristup mreži i učinkovitu raspodjelu mrežnih troškova. Ovisno o lokalnim uvjetima, također odobrava visinu naknada za korištenje mreže i u nekim slučajevima cijene za krajnje korisnike [11].

Opskrbljivač izravno komunicira s kupcima i ima ugovore s njima. Njegove glavne dužnosti su opskrba električnom energijom i eventualno druge energetske usluge [11].

Operator distribucijskog sustava odgovoran je za rad, održavanje i razvoj distribucijske mreže u određenom području. Obično upravlja VN, SN i NN distribucijskim sustavima, obvezan je isporučivati električnu energiju potrošačima ili primati energiju iz lokalnih proizvodnih jedinica, odnosno elektrana na obnovljive izvore energije i ne bavi se maloprodajom [11].

3.7. Kupac s vlastitom proizvodnjom

U literaturi [15] krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom definiran je kao: „krajnji kupac električne energije na čiju je instalaciju priključeno proizvodno postrojenje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije ili visokoučinkovite kogeneracije kojom se podmiruju potrebe krajnjeg kupca i s mogućnošću isporuke viška proizvedene električne energije u prijenosnu ili distribucijsku mrežu“.

Opskrbljivači električne energije obvezni su preuzimati viškove električne energije od krajnjih kupaca s vlastitom proizvodnjom koji zadovoljavaju sljedeće uvjete [15]:

- Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom ima status povlaštenog proizvođača električne energije;
- Ostvarili su pravo trajnog priključka na elektroenergetsku mrežu;
- Ukupna snaga svih proizvodnih postrojenja na jednom obračunskom mjernom mjestu ne prelazi 500 kW;
- Priključna snaga kupca s vlastitom proizvodnjom kao proizvođača ne prelazi priključnu snagu kao kupca;

- Kupac s vlastitom proizvodnjom isporučuje električnu energiju preko istog obračunskog mjernog mjesta preko kojeg i kupuje;
- Kupac s vlastitom proizvodnjom vodi podatke o proizvedenoj i isporučenoj električnoj energiji.

4. KRATKOROČNO PLANIRANJE POGONA MIKROMREŽE

S jedne strane elektrane na obnovljive izvore energije imaju dosta nedostataka, kao što su izazivanje smetnji u mreži, promjenjiva i nepredvidiva proizvodnja, smanjenje pouzdanosti i otpornosti elektroenergetskog sustava i ostale. Međutim, s druge strane, ako se koriste na složenijoj razini, mogu pružiti mnogo prednosti za mrežu, ekologiju i smanjenje troškova električne energije za krajnje korisnike. Sustav upravljanja električnom energijom glavni je sustav koji koordinira i planira rad svih sustava i elemenata unutar mikromreže osiguravajući optimalan i pouzdan rad uz minimalne troškove i tako omogućava sudjelovanje na tržištu električne energije. U ovom poglavlju definiran je matematički model takvog sustava na razini jednog kućanstva, odnosno krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i sustavom pohrane energije.

4.1. Optimizacijski model mikromreže

Ovakav sustav upravljanja energijom minimizira troškove korištenja električne energije optimizacijom tokova snaga u promatranoj mikromreži.

Funkcija cilja:

$$funktija\ cilja = \tau \cdot \sum_{t=1}^T (c_t^{kup} \cdot P_t^{PCC\ uvoz}) - (c_t^{prod} \cdot P_t^{PCC\ izvoz}) \quad (4-1)$$

gdje:

- τ – trajanje svakog vremenskog intervala
- c_t^{kup} [eur/kWh] – kupovna cijena električne energije u vremenu t
- $P_t^{PCC\ uvoz}$ [W] – uvezena snaga iz distribucijske mreže u mikromrežu na mjestu priključka u vremenu t
- c_t^{prod} [eur/kWh] – prodajna cijena električne energije u vremenu t
- $P_t^{PCC\ izvoz}$ [W] – izvezena snaga iz mikromreže u distribucijsku mrežu na mjestu priključka u vremenu t

Ograničenja:

1. Ravnoteža snaga

Optimizacija u svakom koraku t je ograničena jednadžbom ravnoteže snage:

$$P_t^{PCC \text{ uvoz}} + P_{PV,t} + P_{BSS,t}^{praz} = P_t^{PCC \text{ izvoz}} + P_{BSS,t}^{punj} + P_{teret,t}; \forall t \in T \quad (4-2)$$

gdje:

- $P_{PV,t}$ [W] – AC izlazna snaga FN sustava
- $P_{BSS,t}^{praz}$ [W] – snaga pražnjenja baterijskog spremnika u vremenu t
- $P_{BSS,t}^{punj}$ [W] – snaga punjenja baterijskog spremnika u vremenu t
- $P_{teret,t}$ [W] – razina tereta u vremenu t

2. Mjesto spoja mikromreže na distribucijsku mrežu

Mjesto spoja mikromreže ograničeno je ugovorenim razmjenom snage sa operatorom distribucijskog sustava u slučaju uvoza (4-3) i izvoza (4-4) energije. Jednadžba (4-5) predstavlja ograničenja u radu mikromreže, koja sprječava da mikromreža uvozi i izvozi energiju u isto vrijeme.

$$P_t^{PCC \text{ uvoz}} \leq P_{ugovoreni \text{ uvoz}}^{PCC} \cdot s_{PCC,t}^{uvoz}; \forall t \in T \quad (4-3)$$

$$P_t^{PCC \text{ izvoz}} \leq P_{ugovoreni \text{ izvoz}}^{PCC} \cdot s_{PCC,t}^{izvoz}; \forall t \in T \quad (4-4)$$

$$s_{PCC,t}^{uvoz} + s_{PCC,t}^{izvoz} \leq 1; \forall t \in T \quad (4-5)$$

gdje:

- $P_{ugovoreni \text{ uvoz}}^{PCC}$ [kW] – zakupljena snaga mikromreže u smjeru preuzimanja iz mreže sa operatorom distribucijskog sustava

- $P_{ugovoreni\ izvoz}^{PCC}$ [kW] – zakupljena snaga mikromreže u smjeru predaje u mrežu sa operatorom distribucijskog sustava
- $s_{PCC,t}^{uvoz}$ – binarna varijabla mikromreže zakupljene snage u smjeru preuzimanja iz mreže u vremenu t
- $s_{PCC,t}^{izvoz}$ – binarna varijabla mikromreže zakupljene snage u smjeru predaje u mrežu u vremenu t

3. FN sustav

Matematički modul FN sustava izračunava izlaznu AC snagu FN sustava u odnosu na upadno sunčevo zračenje i temperaturu modula. Kao ulazne podatke uzima lako mjerljive meteorološke parametre kao što su sunčevo zračenje i temperatura okoline te koeficijenti iz tablica s podacima proizvođača.

Matematički model izveden je iz uobičajeno korištenog izraza za izračun temperature modula i izlazne izmjenične snage fotonaponskog sustava. Temperatura FN modula izračunava se kao:

$$t_{mod,t} = t_{okol,t} + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G_t; \forall t \in T \quad (4-6)$$

gdje:

- $t_{mod,t}$ [°C] – izračunata temperatura modula u vremenu t
- $t_{okol,t}$ [°C] – temperatura okoline u vremenu t
- $NOCT$ [°C] – nazivna radna temperatura ćelije
- G_t [W/m²] – razina sunčevog zračenja u vremenu t

AC Izlazna snaga FN sustava u vremenskom koraku t izračunava se kao u (4-7), gdje STU označava standardne testne uvjete:

$$P_{FN,t} = P_{niz,STU} \cdot \frac{G_t}{G_{STU}} \cdot \frac{\eta_{inv}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100} \cdot (t_{mod,t} - t_{STU}) \right); \forall t \in T \quad (4-7)$$

gdje:

- $P_{FN,t} [W]$ – izlazna snaga FN sustava u vremenu t
- $P_{niz,STU} [W_p]$ – nazivna izlazna snaga FN niza pri STU
- $G_{STU} [W/m^2]$ – sunčevo zračenje pri STU
- $\eta_{inv} [\%]$ – korisnost invertera
- $\gamma [\%/^{\circ}C]$ – temperaturni koeficijent snage FN modula
- $t_{STU} [^{\circ}C]$ – temperatura modula pri STU

4. Baterijski spremnik energije

Baterije su elektrokemijski uređaji koji imaju složene mehanizme rada. Na njihovu izvedbu značajno utječu trenutni i prijašnji radni uvjeti, stoga što su stroži radni uvjeti koji im se nametnu, njihova je izvedba više očuvana.

Baterijski spremnik energije modela ograničen je višestrukim ograničenjima. Snaga punjenja i pražnjenja BSS-a ograničena je fizikalnim ograničenjima elemenata, kako je navedeno u (4-8), odnosno (4-9).

$$P_{BSS,t}^{punj} \leq P_{BSS}^{maks_punj} \cdot s_{BSS,t}^{punj}; \forall t \in T \quad (4-8)$$

$$P_{BSS,t}^{praz} \leq P_{BSS}^{maks_praz} \cdot s_{BSS,t}^{praz}; \forall t \in T \quad (4-9)$$

gdje:

- $P_{BSS}^{maks_punj} [W]$ – maksimalna snaga punjenja baterijskog spremnika
- $s_{BSS,t}^{punj}$ - binarna varijabla punjenja baterijskog spremnika u vremenu t
- $P_{BSS}^{maks_praz} [W]$ – maksimalna snaga pražnjenja baterijskog spremnika
- $s_{BSS,t}^{praz}$ - binarna varijabla pražnjenja baterijskog spremnika u vremenu t

Izraz (4-10) sprječava da se načini punjenja i pražnjenja pojave u istom vremenskom koraku:

$$s_{BSS,t}^{punj} + s_{BSS,t}^{praz} \leq 1; \forall t \in T \quad (4-10)$$

Stanje napunjenosti baterije (engl. *State of Charge (SOC)*) ograničeno je maksimalnim i minimalnim vrijednostima koje se mogu pojaviti tijekom rada jer su istraživanja potvrdila da visoka dubina pražnjenja tijekom ciklusa i visoko prosječno stanje napunjenosti mogu smanjiti kapacitet i snagu baterije. Opća optimalna dubina pražnjenja u radu za očuvanje životnog vijeka baterije je ispod 30 %, dok se povećava do 50 %, što rezultira niskim opterećenjem baterije. Na temelju toga, model baterijskog spremnika ograničen je izrazom (4-12) na minimalno i maksimalno stanje napunjenosti baterije.

$$SOC_{BSS,t} = SOC_{BSS,t-1} + \eta_{BSS}^{punj} \cdot P_{BSS,t}^{punj} \cdot \Delta t - \frac{P_{BSS,t}^{praz} \cdot \Delta t}{\eta_{BSS}^{praz}}; \forall t \in T \quad (4-11)$$

$$\frac{SOC_{BSS}^{min\%} \cdot C_{BSS}}{100} \leq SOC_{BSS,t} \leq \frac{SOC_{BSS}^{maks\%} \cdot C_{BSS}}{100}; \forall t \in T \quad (4-12)$$

gdje:

- $SOC_{BSS,t}$ [Wh] - stanje napunjenosti baterijskog spremnika u vremenu t
- $SOC_{BSS,t-1}$ [Wh] - stanje napunjenosti baterijskog spremnika u vremenu $t - 1$
- η_{BSS}^{punj} - učinkovitost punjenja baterijskog spremnika
- Δt – trajanje vremenskog perioda
- η_{BSS}^{praz} - učinkovitost pražnjenja baterijskog spremnika
- $\Delta SOC_{BSS}^{gubitak}$ [%] – postotak gubitaka energije u praznom hodu (bez opterećenja) u svakom vremenu t
- C_{BSS} [kWh] – nazivni kapacitet energije baterijskog spremnika
- $SOC_{BSS}^{min\%}$ [%] - minimalno stanje napunjenosti u radu baterijskog spremnika

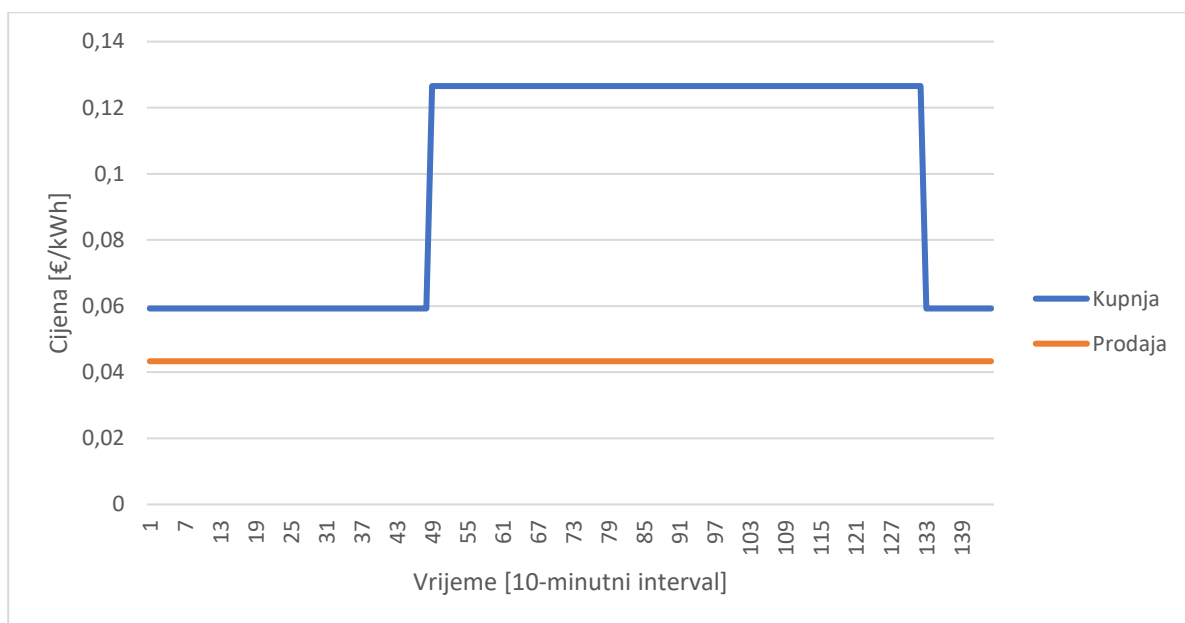
- $SOC_{BSS}^{maks\%}$ [%] - maksimalno stanje napunjenosti u radu baterijskog spremnika

4.2. Rezultati kratkoročnog planiranja pogona mikromreže

U ovom poglavlju promatrani su rezultati optimizacije modela sustava upravljanja energijom koji je opisan u prethodnom poglavlju. U obzir je uzeto nekoliko ograničenja. Ograničenja su iz raznih područja vezanih za cjelokupni sustav mikromreže: ravnoteža snaga, mjesto spoja, FN sustav i baterijski spremnik energije. Kao i od ograničenja, model se sastoji i od funkcije cilja, kojom je opisan cilj ovog optimizacijskog modela. Ovakav model minimizira troškove korištenja električne energije optimizacijom tokova snaga u promatranoj mikromreži. Simulacija se odvija na način da je zadan određen broj vremenskih intervala, u ovom slučaju 144, što odgovara jednom vremenskom intervalu svakih 10 minuta unutar 24 sata u danu. U svakom vremenskom intervalu model uzima ulazne vrijednosti i s njima radi operacije koje su definirane u skripti modela, koja je napisana u programskom jeziku Python. Nakon toga model daje izlazne vrijednosti, odnosno rezultate simulacije, koji su obrađeni u ovom poglavlju. Optimizacijski model realiziran je kao mješovito cjelobrojni linearni program (engl. *Mixed-Integer Linear Program*).

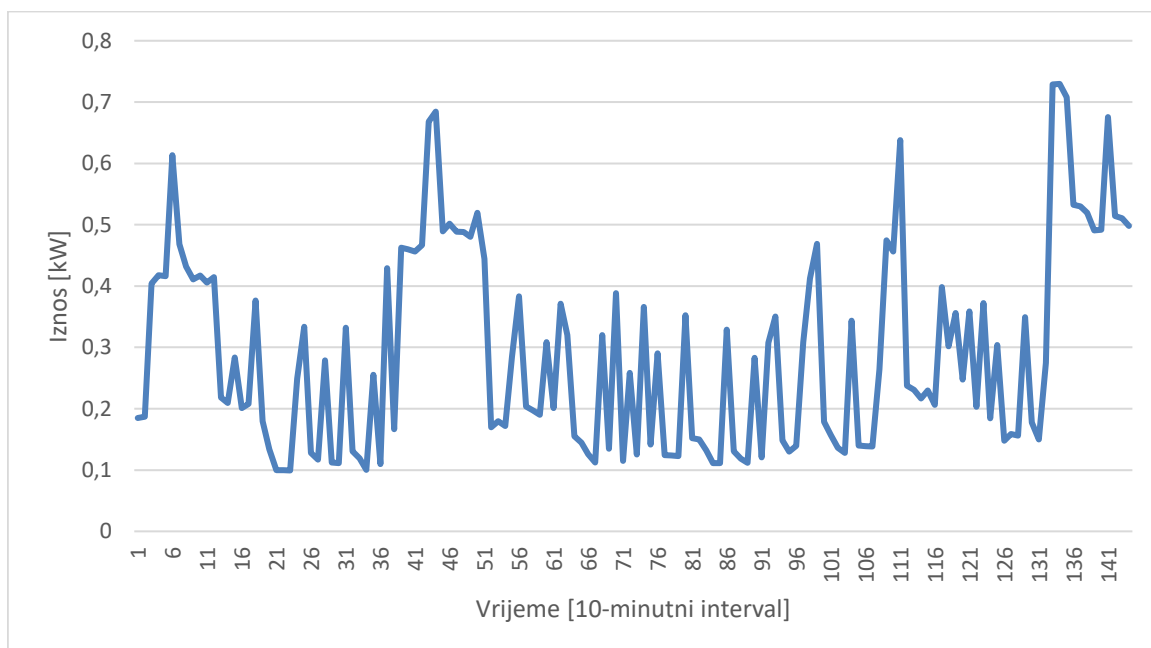
4.2.1. Ulazni parametri

Cijena energije prilikom preuzimanja iz mreže je dobivena iz tarifnih stavki HEP Elektre i HEP ODS za bijeli tarifni model. Cijena energije prilikom predaje u mrežu dobivena je uz pretpostavku da je kupac s vlastitom proizvodnjom u obračunskom mjernom razdoblju potrošio 30% ukupne energije u višoj tarifi, a 70% u nižoj tarifi pomnoženo s 0,9 (90%). Na slici 4.1. grafički su prikazane tarife predaje energije u mrežu i iz mreže.



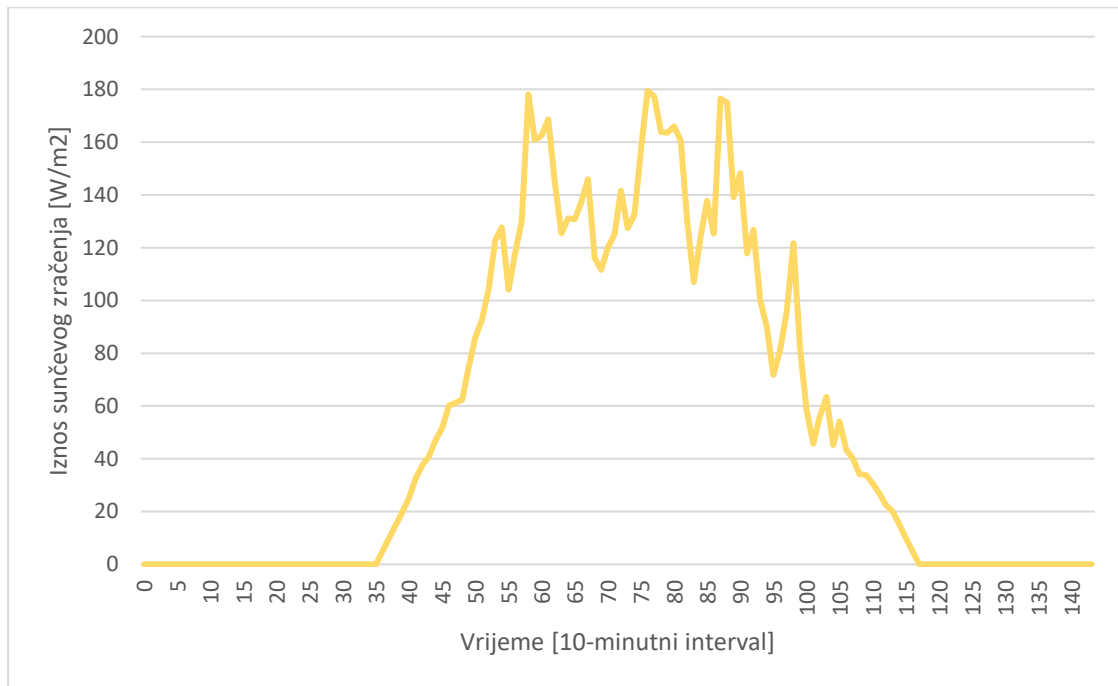
Sl. 4.1. Grafički prikaz tarifa

Za opterećenje korišteno u simulaciji iznosi su između 90 i 750 W, što se vidi u grafičkom prikazu na slici 4.2..



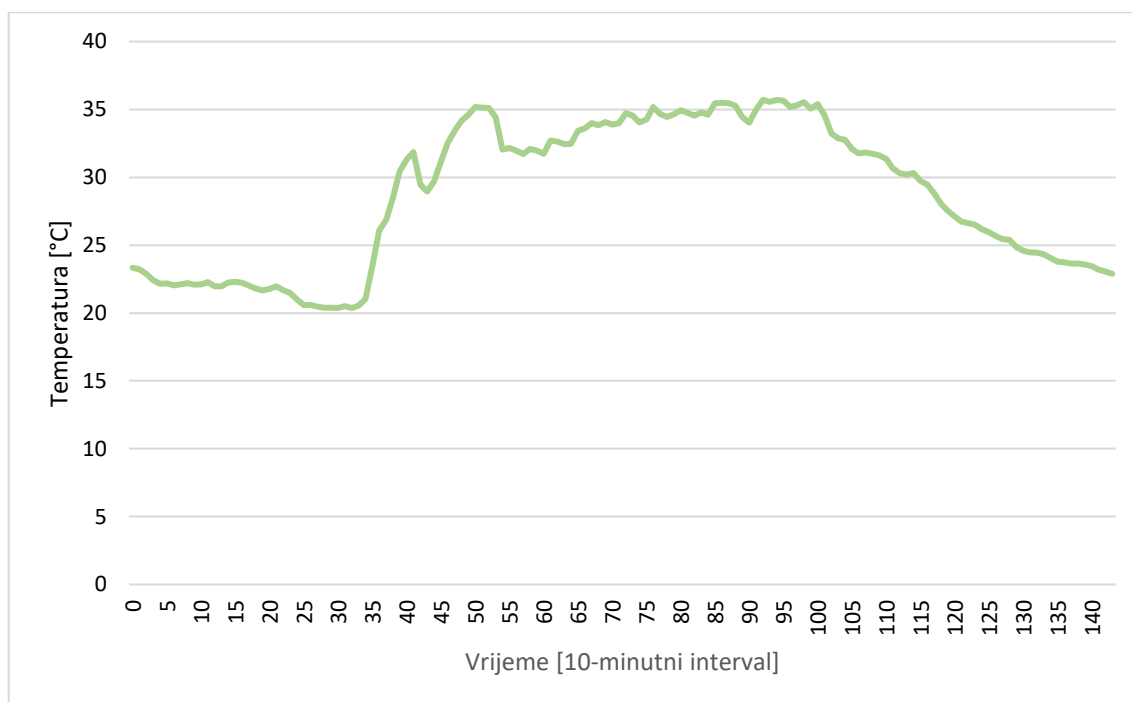
Sl. 4.2. Opterećenje u simulaciji

Za sunčevo zračenje uzete su vrijednosti do 180 W/m^2 , što odgovara oblačnom danu u ljetnom razdoblju. Na slici 4.3. vidljiv je grafički prikaz razine sunčevog zračenja koja je korištena u simulaciji.



Sl. 4.3. Grafički prikaz razine sunčevog zračenja [W/m^2]

Na slici 4.4. grafički su prikazane temperature okoline tokom dana koji je uzet za ulazne podatke simulacije. S obzirom da se radi o ljetnom danu, temperature se kreću između 20 i $36 \text{ }^\circ\text{C}$.



Sl. 4.4. Grafički prikaz temperatura okoline

U modelu je prisutna baterija, pa je stoga prisutna i u simulaciji i mora imati početne, odnosno ulazne parametre. U tablici 4.1. vidljivi su parametri koji su uzeti u obzir, kao i njihove vrijednosti.

Tablica 4.1. Prikaz parametara baterije

| Parametar | Vrijednost |
|---|------------|
| Učinkovitost punjenja baterije | 95% (0,95) |
| Učinkovitost pražnjenja baterije | 95% (0,95) |
| Minimalno stanje napunjenosti baterije | 70% |
| Maksimalno stanje napunjenosti baterije | 100% |
| Početno stanje napunjenosti baterije | 100% |
| Konačno stanje napunjenosti baterije | 100% |
| Maksimalna snaga punjenja | 400 W |
| Maksimalna snaga pražnjenja | 800W |

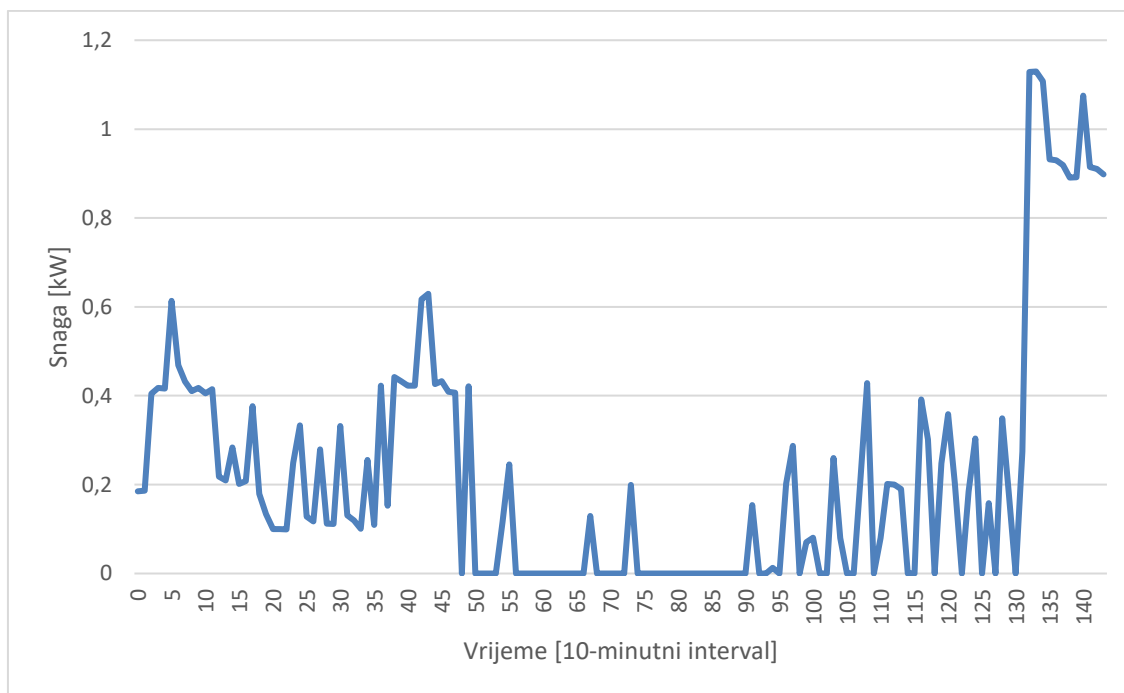
Učinkovitost punjenja baterije podrazumijeva postotak predane energije koja uđe u bateriju. Iznos nije 100% jer postoje gubici pri punjenju. Isto vrijedi i za pražnjenje baterije. Minimalno stanje napunjenosti baterije iznosi 70% zbog praktičnih razloga. Maksimalno stanje napunjenosti baterije

iznosi 100%, odnosno baterija se može napuniti do kraja. Početno i konačno stanje napunjenosti baterije iznosi 100%. To znači da je na početku i na kraju simulacije potrebno da baterija bude napunjena do kraja, odnosno model se mora pobrinuti da optimalno iskoristi energiju, kako bi baterija na početku i na kraju dana bila napunjena do kraja.

4.2.2. Rezultati optimizacije

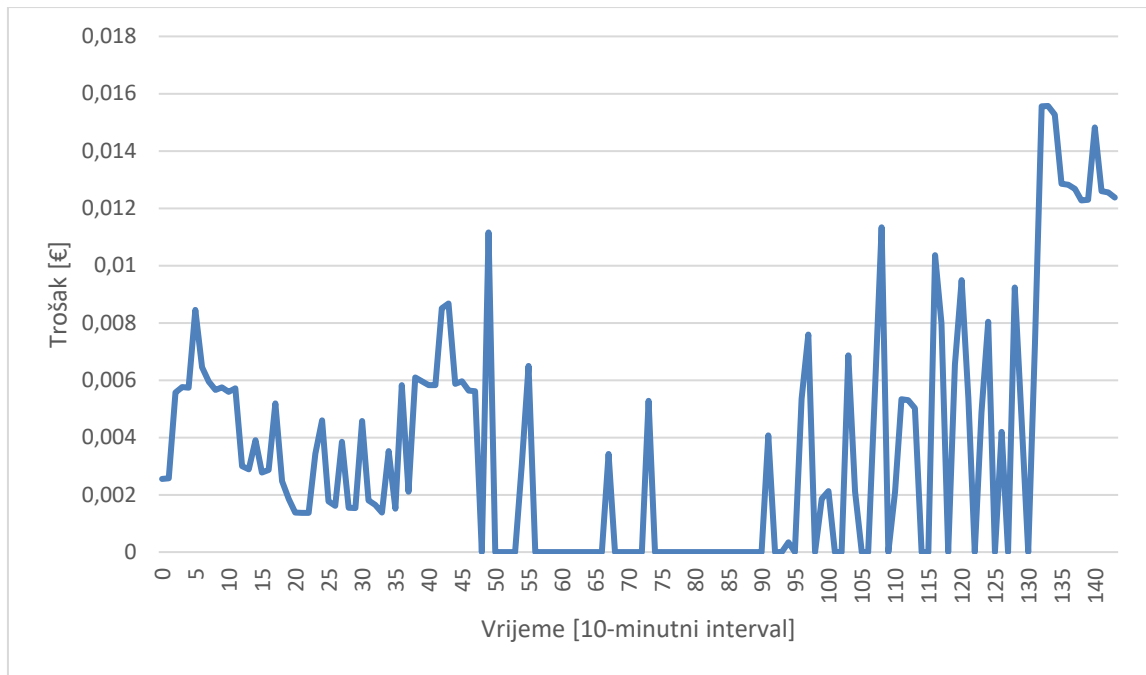
Svrha ove simulacije je optimizacija tokova snaga u mikromreži kako bi se uštedjelo na električnoj energiji. Program za rješavanje optimizacijskih problema „Gurobi“ je odredio optimalne tokove snaga za maksimalnu uštedu električne energije za navedene početne parametre. Tokovi snaga uključuju: trošenje električne energije direktno iz FN, punjenje baterije iz FN, uzimanje električne energije iz mreže i davanje električne energije u mrežu. Model je morao uskladiti sve te tokove snaga i izračunati kada i gdje je optimalno da snaga ide u određenom trenutku, uzimajući u obzir potrebu za električnom energijom tokom cijeloga dana, koja je bila već unaprijed poznata. Isto tako unaprijed je poznata i proizvodnja FN, stoga je moguće matematičkim putem izračunati tokove snaga uz koje će se uštedjeti najviše novčanih sredstava.

Na slici 4.5. grafički je prikazana razmjena snage sa mrežom, odnosno koja količina snage je preuzeta iz mreže, a koja količina je predana u mrežu u svakom trenutku. S obzirom da je dan oblačan, za očekivati je da će snaga iz mreže biti potrebna i tokom dana u određenim trenucima. U ovom slučaju najviše snage je uzeto iz mreže u jutarnjim i večernjim satima, što je logično, s obzirom da je tada najmanja proizvodnja električne energije u FN i koristi se niža tarifa za naplatu, što je isplativije. S obzirom da je za simulaciju uzet oblačan dan, za očekivati je da proizvodnja električne energije u FN sustavu neće biti velika. To se naravno odražava i na snagu koja je isporučena u mrežu. U ovoj simulaciji snaga koja je isporučena u mrežu u svakom trenutku iznosi 0 kW, jer uz korišteni profil proizvodnje i potrošnje model je u optimizaciji izračunao da se ni u jednom trenutku ne isplati isporučivati snagu u mrežu.



Sl. 4.5. Grafički prikaz tokova snage u razmjeni s mrežom

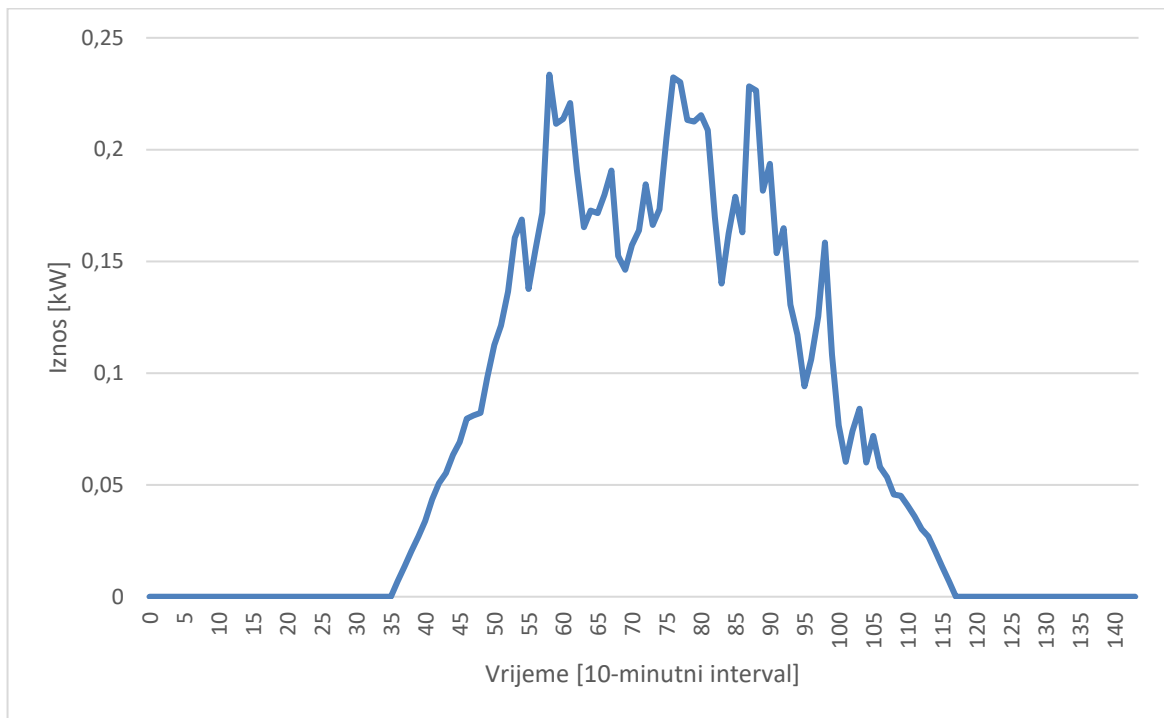
Na slici 4.6. grafički je prikazana potrošnja novčanih sredstava u eurima, za svaki vremenski interval. Za pretpostaviti je da će ovaj graf i graf snage uvoza iz mreže biti slični, što i je slučaj. Ako se ovaj graf uspoređi sa grafom na slici 4.5., može se uočiti da su grafovi gotovo identični, što znači da je jedini izvor troška uvoz snage iz mreže, te ovisi najviše o potrošnji. S obzirom da postoje dvije tarife za energiju uvoza, niža i viša, postoje razlike između troškova kada je aktualna viša tarifa i kada je aktualna niža tarifa. Razlog tome je veća potreba za energijom iz mreže u periodu niže tarife, te je zbog toga trošak u periodu niže tarife nešto veći. Može se primijetiti da je optimizacijski model izračunao kako se ne isplati uzimati energiju iz mreže kada je aktualna viša tarifa, pa u tom razdoblju uzima samo koliko je potrebno da zadovolji potrošnju. U razdoblju niže tarife moguće je primijetiti da su puno veće vrijednosti i ukupna količina uvezene snage iz mreže. Na izgled grafa ne utječe snaga predana u mrežu jer je ona u svakom trenutku iznosila 0 kW. Razlog tomu je veća isplativost punjenja baterije sa pozitivnom razlikom između proizvodnje i potrošnje, nego predaja u mrežu.



Sl. 4.6. Grafički prikaz troška električne energije u eurima

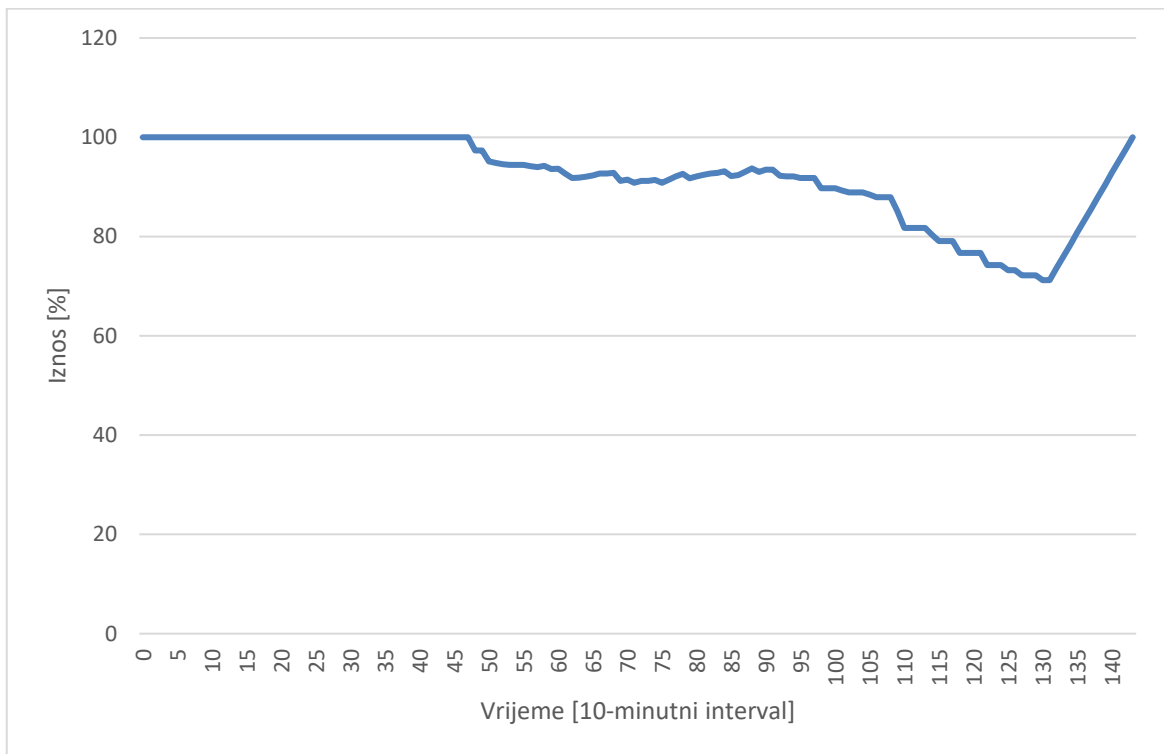
Jedan od mogućih smjerova snage u simulaciji je smjer iz FN sustava u mrežu. Međutim, proizvodnja električne energije nije bila dovoljna da bi optimizacijski model u bilo kojem trenutku izračunao da se to isplati, i iz tog razloga zarada od predaje energije u mrežu iznosi 0 € u svakom trenutku.

Jedan od početnih parametara je intenzitet sunčevog zračenja. Rezultat tog sunčevog zračenja je proizvodnja električne energije putem FN sustava. Za očekivati je da će graf snage koja izlazi iz FN sustava izgledati slično kao i graf intenziteta sunčevog zračenja, što i je slučaj. Na slici 4.7. grafički je prikazana izlazna snaga FN sustava. Ako se uspoređi graf na slici 4.3. sa grafom na slici 4.7. vidimo da su grafovi gotovo identični.



Sl. 4.7. Grafički prikaz izlazne snage FN sustava

Kao što je navedeno ranije, jedni od početnih parametara, odnosno zahtjeva baterije su ti da baterija na početku i na kraju dana mora biti u potpunosti napunjena. Na slici 4.8. prikazan je graf stanja napunjenosti baterije. Iz tog grafa može se vidjeti da je stanje napunjenosti baterije na početku i na kraju simulacije na 100%, što je korisno jer uvijek je dobro imati bateriju punog kapaciteta na početku dana kako bi ju bilo moguće koristiti kada se stvori potreba za tim. Optimizacijski model morao je izračunati optimalne tokove snaga kako bi zadovoljio ovaj uvjet.

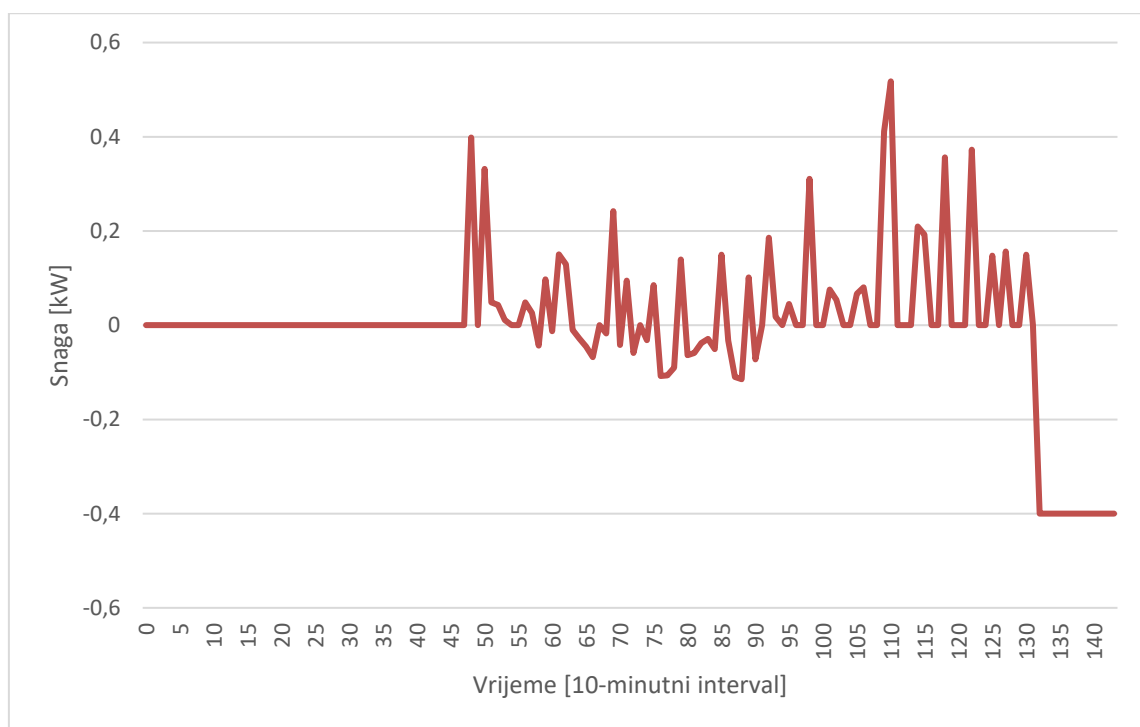


Sl. 4.8. Grafički prikaz stanja napunjenosti baterije

Na slici 4.9. vidljiv je grafički prikaz tokova snage u bateriji. Pozitivni iznosi snage odgovaraju snazi pražnjenja baterije, jer se na bateriju tada gleda kao na izvor energije. Što znači da negativni iznosi odgovaraju snazi punjenja baterije, jer se tada baterija gleda kao potrošač. Većinu vremena iznos snage punjenja baterije je nula, osim kada je najveća proizvodnja u sredini dana i pred kraj dana, kako bi se zadovoljio uvjet od maksimalne napunjenosti baterije na kraju dana. U sredini dana proizvodnja je bila u određenim trenutcima veća od potrošnje, pa je to rezultiralo punjenjem baterije sa ostatkom proizvedene energije. Kako se dan bliži kraju, tako se može uočiti nagli skok snage punjenja baterije, jer je potrebno zadovoljiti uvjet maksimalne napunjenosti baterije na kraju dana. Optimizacijski model je izračunao točno vrijeme kada je potrebno krenuti puniti bateriju, u ovom slučaju iz mreže, kako bi uz maksimalnu snagu punjenja, napunio bateriju do kraja, prije nego što dan završi. S obzirom da je jedan od početnih zahtjeva za bateriju maksimalna snaga punjenja od 400 W, na grafu je vidljiva ravna linija na $-0,4$ kW, što označava punjenje maksimalnom snagom.

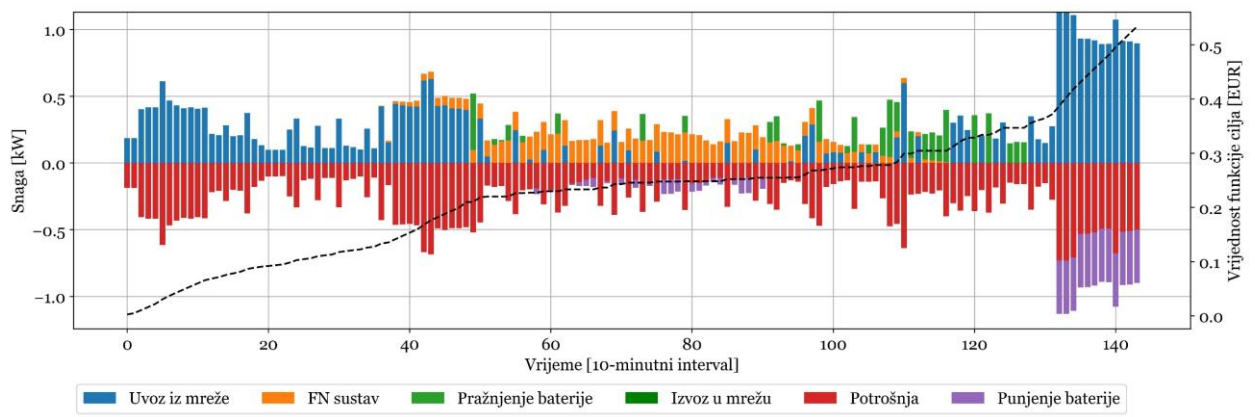
Kada je potrošnja veća od proizvodnje potrošači zahtijevaju dodatan izvor energije. U ovoj simulaciji to su mreža i baterija. Model je izračunao optimalnu količinu snage koja se uzima iz mreže i optimalnu količinu snage koja se uzima iz baterije. Uvijek je isplativije koristiti snagu iz

baterije jer je to uskladištena „besplatna“ energija iz FN sustava. Međutim postoji više parametara koje treba zadovoljiti, a jedan od njih je da stanje napunjenosti baterije na kraju dana mora biti 100%. Iz tog razloga optimizacijski model morao je voditi računa da ne koristi previše energije iz baterije, kako se ona ne bi previše ispraznila i bila u nemogućnosti postići stanje napunjenosti od 100%. Snaga iz baterije najviše se koristila u razdoblju više tarife u trenucima u kojima nema dovoljno sunčevog zračenja. Što je za očekivati s obzirom da je tok snage razmjene s mrežom u smjeru preuzimanja u razdoblju više tarife većinu vremena iznosa 0 kW. Dakle snaga iz baterije optimalna je u svakom trenutku njezinog korištenja.



Sl. 4.9. Grafički prikaz tokova snage baterije

Konačno, na slici 4.10. prikazani su svi tokovi snaga u mikromreži, iz kojih se može dobiti uvid u širu sliku o optimizacijskom modelu i vrijednosti funkcije cilja. Može se vidjeti kako su sve vrijednosti proizvodnje i uvoza električne energije, te pražnjenja baterije usklađeni sa svim vrijednostima potrošnje i izvoza električne energije, te punjenja baterije. To je zahtjev kojega mora ispunjavati svaka mikromreža, jer na tome se temelji funkcioniranje cjelokupnog elektroenergetskog sustava. Uz to prikazana je i krivulja koja prikazuje vrijednosti funkcije cilja, koja je definirana ranije, u svakom trenutku, te njezinu konačnu vrijednost koja iznosi 0,53 €. To znači da je u cijelom danu potrošeno 0,53 eura na električnu energiju.



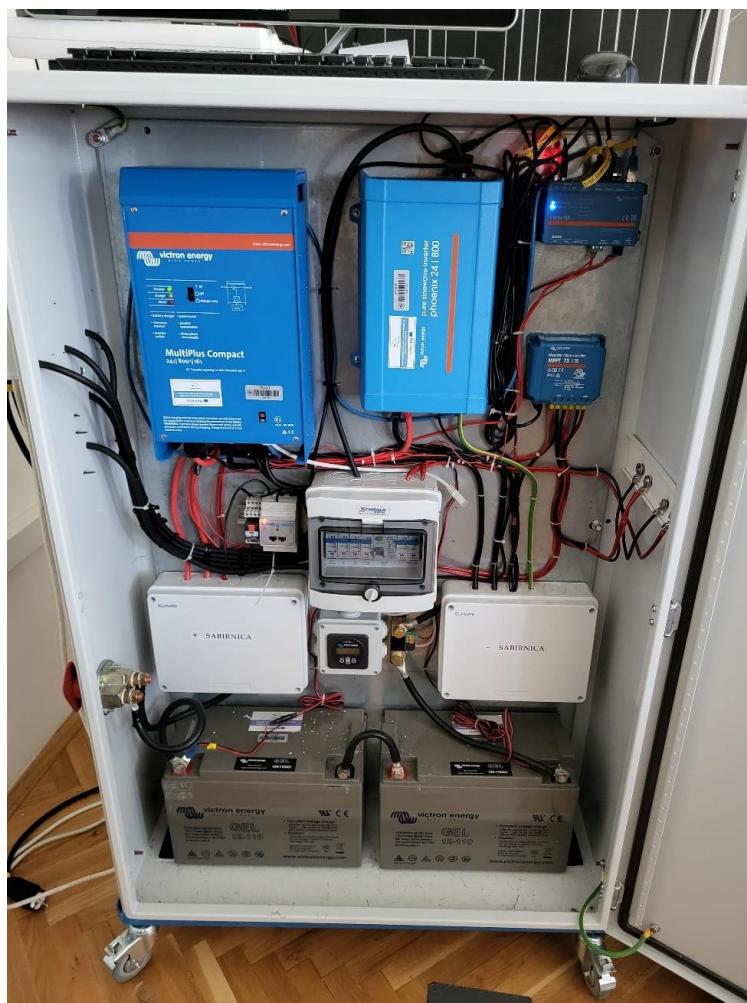
Sl. 4.10. Grafički prikaz najbitnijih rezultata simulacije

5. KRATKOROČNO EMULIRANJE POGONA MIKROMREŽE

Svaka simulacija je korisna za dobivanje novih saznanja o nekom sustavu, pogotovo ako je nešto vrlo komplicirano odraditi u stvarnosti. Međutim, simulacije nisu iste kao i fizički svijet. Simulacija služi za okvirno predviđanje mogućih događaja u stvarnosti kada se odvija nekakav proces i ne garantira da će se i u stvarnosti za iste ulazne parametre dobiti iste izlazne parametre, odnosno rezultate. U ovom poglavlju ispitana je razlika rezultata simulacije i rezultata emulacije optimizacijskog modela u stvarnosti, odnosno u fizičkoj mikromreži.

5.1. Eksperimentalni postav za emulaciju pogona mikromreže

Nakon provedene računalne simulacije, provedeno je kratkoročno emuliranje pogona postojeće mikromreže. Za opterećenje korišteno je integrirano istosmjerno programabilno trošilo, a umjesto FN sustava korišten je emulator električnog vozila, odnosno EV emulator. Na slici 5.1. prikazana je mikromreža na kojoj je odrađena emulacija, a na slici 5.2. prikazan je EV emulator.



Sl. 5.1. Mikromreža



Sl. 5.2. EV emulator

Jedan od dijelova mikromreže je izmjenjivač/punjač Multiplus Compact. Ovaj izmjenjivač/punjač u promatranim ormarima dolazi u dvije izvedbe: 24 | 800 | 16 i 24 | 1600 | 40, gdje prvi broj označava ulazni napon, drugi broj označava snagu, a treći broj označava struju punjenja. Ovaj uređaj može raditi na dva načina. Može raditi kao izmjenjivač/punjač i samo kao punjač. Uređaj je vidljiv na slici 5.1. u gornjem lijevom kutu ormara, te na slici 5.2. u gornjem lijevom i desnom kutu ormara. U tablici 5.1. vidljive su tehničke karakteristike navedenog uređaja u obje izvedbe [16].

Tablica 5.1. Tehničke karakteristike uređaja Multiplus Compact [16]

| Multiplus Compact | 24/800/16 | 24/1600/40 |
|---|------------------|-------------------|
| Raspon ulaznog napona invertera (<i>UDC</i>) [V] | 19-33 | 19-33 |
| Izlazni napon (<i>UAC</i>) [V] | 230 +/- 2% | 230 +/- 2% |
| Frekvencija invertera [Hz] | 50 +/- 0,1% | 50 +/- 0,1% |
| Maksimalna prividna snaga na AC priključnicama pri 25°C (<i>SAC</i>) [VA] | 800 | 1600 |
| Maksimalna radna snaga na AC priključnicama pri 25°C/40°C/65°C (<i>PAC</i>) [W] | 700/650/400 | 1300/1200/800 |
| Vršna snaga (<i>Pmax</i>) [W] | 1600 | 3000 |
| Maksimalna učinkovitost (η) [%] | 94 | 94 |
| Vlastita potrošnja [W] | 10 | 10 |
| Napon punjenja (<i>absorption</i>) [V] | 28,8 | 28,8 |
| Napon punjenja (<i>float</i>) [V] | 27,6 | 27,6 |
| Napon na razini storage [V] | 26,4 | 26,4 |
| Struja punjenja baterije [A] | 16 | 40 |
| Senzor za mjerenje temperature baterije | Da | Da |
| Raspon ulaznog napona punjača (<i>UAC</i>) [V] | 187-265 | 187-265 |
| Raspon ulazne frekvencije punjača (<i>f</i>) [Hz] | 45-65 | 45-65 |

Za kontrolu sustava korištena je centralna komunikacijska jedinica Venus GX. Ona omogućuje dvosmjernu komunikaciju s krajnjim korisnikom. Niz uređaja povezuje se žičano na centralnu komunikacijsku jedinicu putem komunikacijskih protokola te se povezuje s internetom radi olakšanog kompletnog upravljanja sustavom. Venus GX podržava više programskih jezika te se automatski ažurira nakon povezivanja sa internetom. Moguće je spajanje putem RJ 45, VE.direct te USB komunikacije. Komunikacija se odvija putem mobilne aplikacije ili web preglednika. Na slici 5.3. prikazana je komunikacijska jedinica Venus GX. U tablici 5.2. vidljive su tehničke karakteristike uređaja Venus GX [17].



Sl. 5.3. Venus GX [18]

Tablica 5.2. Tehničke karakteristike uređaja Venus GX [17]

| Karakteristika | Vrijednost |
|--------------------------------|------------------------|
| Raspon ulaznog napona (DC) [V] | 8-70 |
| Nazivna Struja[mA] | 210@12V 110@24V 60@48V |
| Raspon radne temperature [°C] | od -20 do +50 |

Nadalje, u emulacije je korišten visoko precizni mjerač stanja baterije modela BMV-702. Njegova glavna funkcija je izračunavanje potrošnje u amper-satima i stanja napunjenosti baterije. Potrošnja se izračunava pomoću struje koja teče u ili iz baterije. Ovaj uređaj daje povratne informacije o: naponu, snazi, struji, stanju napunjenosti, mogućem vremenu korištenja baterije pod zadanim opterećenjem. Uz uređaj dolaze senzor temperature i mjerni pretvornik. Prije korištenja potrebno ga je programirati, unijeti podatke potrebne za rad te ga uskladiti sa sustavom. Na slici 5.4. vidljiv je nadzornik baterije BMV-702. U tablici 5.3. vidljive su tehničke karakteristike nadzornika baterije BMV-702 [19].



Sl. 5.4. Nadzornik baterije BMV-702 [20]

Tablica 5.3. Tehničke karakteristike nadzornik baterije BMV-702 [19]

| Karakteristika | Vrijednost |
|--------------------------|-------------------------|
| Vlastita potrošnja | <4 mA |
| Raspon ulaznog napona | 6,5-95 V-DC |
| Kapacitet baterija | 1-9999 Ah |
| Razlučivost i preciznost | +/- 0,01 A +/- 0,01 V |
| Raspon napona napajanja | 6,5-95 V-DC |

Za mjerenje snage i energije u glavnom razvodnom ormaru korišteno je pametno brojilo. Na slici 5.5. prikazano je pametno brojilo ET340, koje je korišteno u ovoj emulaciji. U tablici 5.4. vidljive su tehničke karakteristike navedenog pametnog brojila.



Sl. 5.5. Pametno brojilo ET340 [21]

Tablica 5.4. Tehničke karakteristike pametnog brojila ET340 [22]

| Karakteristika | Vrijednost |
|---------------------------------------|------------|
| Broj faza | 3 |
| Najveća dopuštena struja mjerenja [A] | 65 po fazi |
| Vrsta komunikacijskog protokola | RS485 |
| Vrijeme osvježavanja podataka[ms] | 2000 |

Za spremnike energije korištene su dvije Victron Energy GEL 12-110 baterije. Ove baterije spadaju u kategoriju baterija sa VRLA tehnologijom (engl. *Ventil Regulated Lead Acid*), odnosno tehnologija gdje je olovna kiselina regulirana ventilima, što znači da su baterije zatvorene. Plin izlazi kroz sigurnosne ventile jedino u slučaju prekomjernog punjenja ili otkaza ćelije. U ovim baterijama elektrolit se imobilizira kao gel. Zahvaljujući olovnim kalcijevim rešetkama i materijalima visoke čistoće, Victron VRLA baterije mogu se skladištiti duže vrijeme bez potrebe za ponovnim punjenjem. Njihova stopa samopražnjenja iznosi manje od 2% mjesečno na temperaturi od 20 °C. Samopražnjenje se udvostručuje sa svakim povećanjem temperature za 10 °C. Stoga se Victron VRLA baterije mogu skladištiti do godinu dana bez potrebe za punjenjem, pod uvjetom da se čuvaju u hladnim uvjetima. Victron VRLA baterije odlikuju se izvrsnim oporavkom nakon pražnjenja, čak i u slučaju dubokog ili dugotrajnog pražnjenja. Međutim, ponovljeno duboko i dugotrajno pražnjenje značajno skraćuje vijek trajanja svih olovnih baterija, uključujući i Victron baterije [23][24]. Na slici 5.6. prikazana je Victron Energy GEL 12-110 baterije, a u tablici 5.5. vidljive su neke od njenih tehničkih karakteristika.



Sl. 5.6. Victron Energy GEL 12-110 baterija [23]

Tablica 5.5. Tehničke karakteristike Victron Energy GEL 12-110 baterije [24]

| Karakteristika | Vrijednost |
|----------------|------------|
| Kapacitet [Ah] | 110 |
| Napon [V] | 12 |
| Masa [kg] | 33 |

Emulator električnog vozila je korišten kao zamjena za FN sustav. Energija koja je predstavljala energiju proizvedenu u FN modulima skladištena je u Victron Energy Lithium Smart baterijama. Za emulaciju su korištene dvije takve baterije. To su litij-željezo-fosfatne (LiFePO₄) baterije i dostupne su u verzijama od 12,8 V ili 25,6 V s različitim kapacitetima. Mogu se povezivati serijski, paralelno ili kombinirano kako bi se izgradio baterijski sustav za napone od 12 V, 24 V ili 48 V. Maksimalan broj baterija u jednom sustavu je 20, što omogućuje maksimalno skladištenje energije od 84 kWh u 12 V sustavu te do 102 kWh u 24 V i 48 V sustavima [25]. Na slici 5.7. prikazana je Victron Energy Lithium Smart baterija, a u tablici 5.6. prikazane su neke od njezinih tehničkih karakteristika.



Sl. 5.7. Victron Energy Lithium Smart baterija [26]

Tablica 5.6. Tehničke karakteristike Victron Energy Lithium Smart baterije [25]

| Karakteristika | Vrijednost |
|----------------------------------|------------|
| Nazivni napon [V] | 12,8 |
| Nazivni kapacitet na 25 °C [Ah] | 160 |
| Nazivni kapacitet na 0°C [Ah] | 130 |
| Nazivni kapacitet na -20°C [Ah] | 80 |
| Nazivni energija na 25°C [Wh] | 2048 |
| Maksimalna struja pražnjenja [A] | 320 |
| Maksimalna struja punjenja [A] | 320 |

Kao sustav upravljanja baterijom korišten je VE.bus BMS (engl. *Battery Management System*). Svaka ćelija LiFePO4 baterije mora biti zaštićena od prenapona, preniskog napona i previsoke temperature. Victron LiFePO4 baterije imaju ugrađenu kontrolu balansa, temperature i napona (BTV, engl. *Balance, Temperature, Voltage*), koja se povezuje s VE.Bus BMS-om putem dva seta M8 kružnih konektora. BTV sustavi mogu se povezati u lanac kako bi se upravljalo s više baterija.

Moguće je spojiti do pet baterija paralelno i do četiri serijski, omogućujući stvaranje 48V baterijskog sustava kapaciteta do 1500Ah [27].

Sustav upravljanja baterijom VE.bus može[27]:

- isključiti ili odvojiti opterećenja u slučaju preniskog napona ćelije
- smanjiti struju punjenja u slučaju prenapona ili previsoke temperature ćelije
- isključiti ili odvojiti punjače u slučaju prenapona ili previsoke temperature ćelije.

Na slici 5.8. prikazan je sustav upravljanja baterijom VE.bus BMS, a u tablici 5.7. prikazane su njegove tehničke karakteristike.

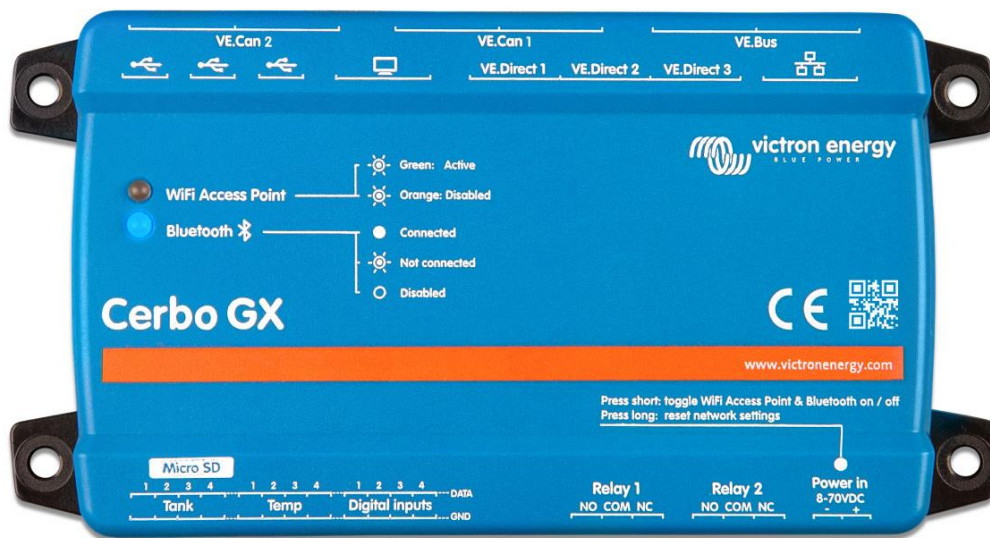


Sl. 5.8. VE.bus BMS [28]

Tablica 5.7. Tehničke specifikacije za VE.bus BMS [27]

| Karakteristika | Vrijednost |
|---|--------------------|
| Raspon ulaznog napona (DC) [V] | 9-70 |
| Nazivna Struja[mA], normalan rad | 10 |
| Nazivna struja [mA], nizak napon ćelije | 2 |
| Radna temperatura | od -20 °C do +50°C |
| Vrsta komunikacijskog protokola | 2xRJ45 |

Nadalje, korišten je Cerbo GX, fleksibilni komunikacijski centar. On omogućuje nadzor i kontrolu sustava s bilo kojeg mjesta u bilo koje vrijeme. Ova središnja komunikacijska jedinica omogućuje izravno povezivanje s VRM (engl. *Victron Remote Management*) portalom ili pristup putem GX Touch uređaja ili VictronConnect aplikacije, zahvaljujući ugrađenoj Bluetooth funkciji [29]. Na slici 5.9. prikazan je uređaj Cerbo GX, a u tablici 5.8. neke od njegovih tehničkih karakteristika.



Sl. 5.9. Cerbo GX [30]

Tablica 5.8. Tehničke specifikacije za Cerbo GX [29]

| Karakteristika | Vrijednost |
|------------------------|------------|
| Raspon napona (DC) [V] | 8-70 |
| Snaga [W] | 2.8@12V |
| Bluetooth | DA |

U emulaciji je za opterećenje korišteno programabilno istosmjerno trošilo PeakTech P2280. Ovo elektroničko opterećenje s PC sučeljem idealno je za ključne testne postupke u osiguranju kvalitete, kao i za testiranje napajanja, kontrolnih jedinica, baterija, gorivih i solarnih ćelija. Za preciznu kontrolu opterećenja u različitim primjenama, uređaj omogućuje kontrolu pomoću konstantnog napona, struje, otpora ili snage, s izuzetnom preciznošću od 1mW, 1mV, 1mΩ i 1mA.

Uz to, uređaj nudi dodatne testne modove, poput testa baterije i dinamičkog testa. PC sučelje omogućava slobodno programiranje testnih sekvenci s evaluacijom podataka [31]. Uređaj je prikazan na slici 5.10., a u tablici 5.9. navedene su njegove tehničke karakteristike.



Sl. 5.10. Integrirano istosmjerno programabilno trošilo PeakTech P2280 [31]

Tablica 5.9. Tehničke specifikacije PeakTech-a P2280 [31]

| Karakteristika | Vrijednost |
|------------------------------|------------|
| Maksimalni ulazni napon [V] | 360 |
| Maksimalna ulazna struja [A] | 30 |
| Maksimalna ulazna snaga [W] | 300 |

S obzirom da je u ovoj emulaciji korištena izmjenična mikromreža, a kao opterećenje je korišteno istosmjerno programabilno trošilo, potreban je ispravljač kako bi se opterećenje napajalo iz izmjenične mikromreže.. U tu svrhu korišten je ispravljač MEAN WELL MSP-300-24. Ispravljači pretvaraju AC struju u DC struju. Na slici 5.11. prikazan je ispravljač MEAN WELL MSP-300-24. U tablici 5.10. prikazane su njegove tehničke karakteristike.



Sl. 5.11. MEAN WELL MSP-300-24 [32]

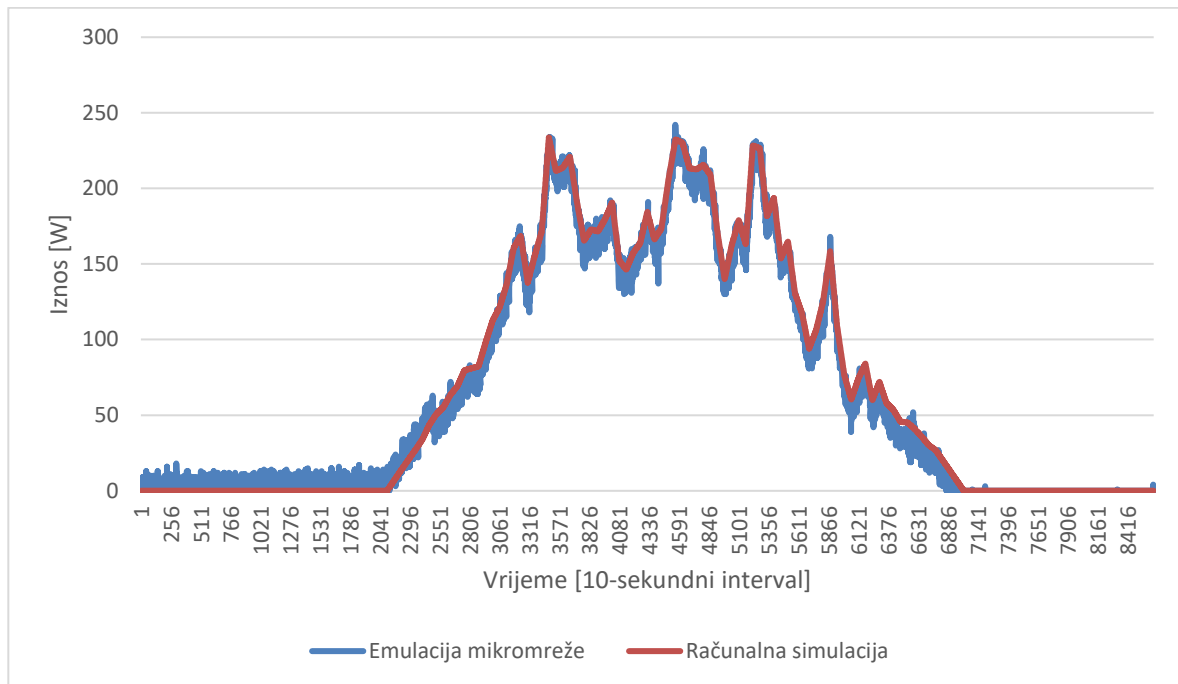
Tablica 5.10. Tehničke karakteristike ispravljača MEAN WELL MSP-300-24 [32]

| Karakteristika | Vrijednost |
|-------------------------|------------|
| DC napon [V] | 24 |
| Nazivna struja [A] | 14 |
| Nazivna snaga [W] | 336 |
| Raspon frekvencija [Hz] | 47 – 63 |
| Korisnost [%] | 89 |

5.2. Rezultati emulacija

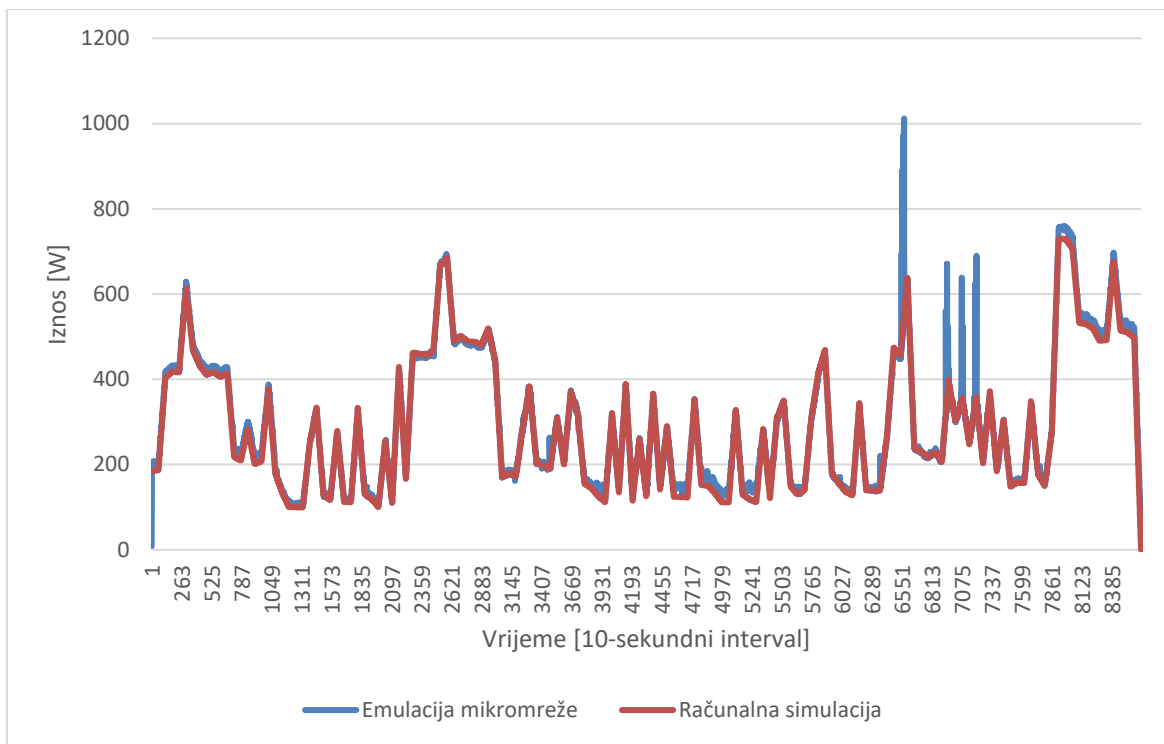
Nakon odrađene emulacije na navedenim elementima mikromreže i EV emulatora, dobiveni su rezultati u obliku 10 sekundnih vremenskih intervala. Dakle svakih 10 sekundi u vremenu trajanja emulacije zabilježena je jedna vrijednost svih izlaznih parametara. S obzirom da su svi rezultati računalne simulacije, odnosno optimizacije bili temeljeni na 10 minutnim vremenskim intervalima, prebačeni su u domenu 10 sekundnih vremenskih intervala kako bi se što bolje mogli usporediti grafovi računalne simulacije i emulacije. Na grafovima su prikazane obje vrijednosti, kako bi se što bolje uočile razlike. Crvenom bojom označeni su rezultati simulacije, odnosno grafovi koji su nastali iz simulacije, a plavom bojom rezultati koji su proizašli iz emulacije, odnosno grafovi.

Na slici 5.12. prikazana je proizvodnja u svakom vremenskom intervalu u oba promatrana slučaja. Može se primijetiti kako proizvodnja od mikromreže dobro prati proizvodnju računalne simulacije u većini vremenskih intervala. Grafovi imaju poprilično sličan oblik, ali graf od emulacije mikromreže izgleda puno deblje. Razlog tomu je titranje izlazne snage u kratkim intervalima, odnosno vrlo brzo povećanje i smanjenje proizvodnje, što rezultira takvim izgledom grafa.



Sl. 5.12. Proizvodnja električne energije u svakom vremenskom intervalu

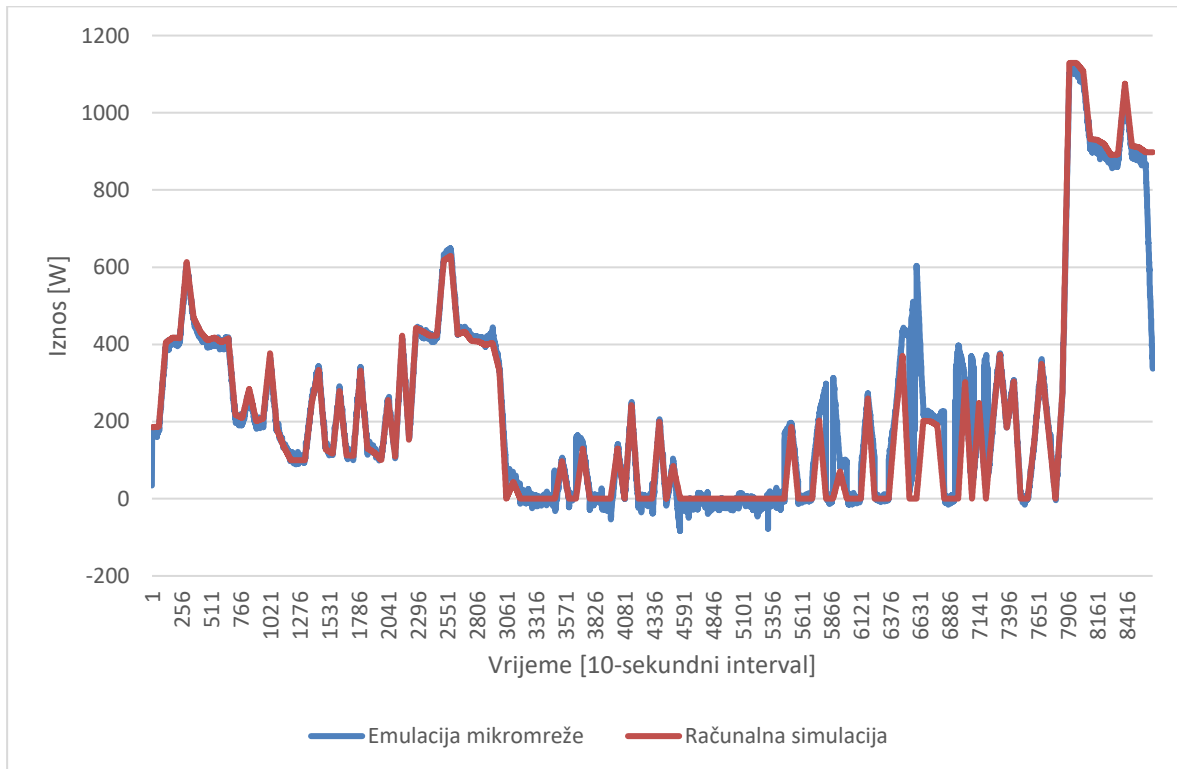
Na slici 5.13. prikazano je opterećenje u oba promatrana slučaja. U mikromreži u kojoj je izvršena emulacija dolazi do gubitaka u elementima mikromreže, najviše u ispravljaču. U računalnoj simulaciji ti gubici su izračunati i uzeti u obzir kod odrađivanja simulacije. Na prikazu je vidljivo kako većinu vremena integrirano istosmjerno programabilno trošilo dobro prati simulirano opterećenje. U određenim trenucima dolazi do odstupanja, najčešće kada se opterećenje ustali, odnosno kada nije toliko promjenjivo. Međutim, u nekoliko trenutaka dolazi i do znatnih odstupanja, ali kratkoga su trajanja. Događaju se kada se u računalnoj simulaciji odvija brza i trenutna promjena opterećenja sa razlikom od oko 100W. U emulaciji mikromreže te promjene znatno su izraženije i većih su iznosa. U oba grafa ti trenutci izgledaju kao šiljci, što označava skokovitu promjenu iznosa opterećenja.



Sl. 5.13. Opterećenje u svakom vremenskom intervalu

S obzirom da je sustav spojen na glavnu mrežu, postoji snaga razmjene sustava s mikromrežom. Na slici 5.14. grafički je prikazana snaga razmjene s mrežom. Na prikazu se vidi kako plavi graf, odnosno graf koji predstavlja emulaciju mikromreže, ne prati u svim trenucima crveni graf, odnosno graf računalne simulacije. U prvom dijelu grafovi su gotovo identični. Plavi graf dobro prati crveni graf, odnosno može se reći da je računalna simulacija predvidjela ponašanje stvarne mikromreže. Međutim u trenucima ustaljene snage, odnosno kada se ne događaju velike promjene u snazi ili gotovo nikakve, grafovi se vidljivo razlikuju. U određenim trenucima graf emulacije mikromreže ima niže vrijednosti, a u nekim dijelovima ima više vrijednosti, ali u tim trenucima kada su male promjene snage generalno su niže vrijednosti plavoga grafa, odnosno grafa emulacije. Pred kraj emulacije događaju se vidljiva odstupanja između plavoga i crvenoga grafa. Odstupanja su najveća u skokovitim promjenama snage u kojima plavi graf generalno ima veće iznose. Plavi graf pred kraj naglo opada, a crveni ima nekoliko promjena u snazi, ali na samom kraju ima gotovo konstantne vrijednosti. U tom dijelu emulacije i simulacije odvija se punjenje baterije, odnosno upotrebljavanje snage iz mreže, u razdoblju niže tarife, kako bi se zadovoljio zadani zahtjev da baterija mora biti napunjena do maksimalnog kapaciteta na kraju dana. Iz toga se da zaključiti da u emulaciji mikromreže nije došlo do punjenja baterije do maksimalnog kapaciteta u zadanom vremenu, jer zbog fizičkih ograničenja korištene baterije pred kraj punjenja snaga punjenja morala se znatno sniziti kako se ne bi oštetila baterija. U simulaciji nije bilo toka

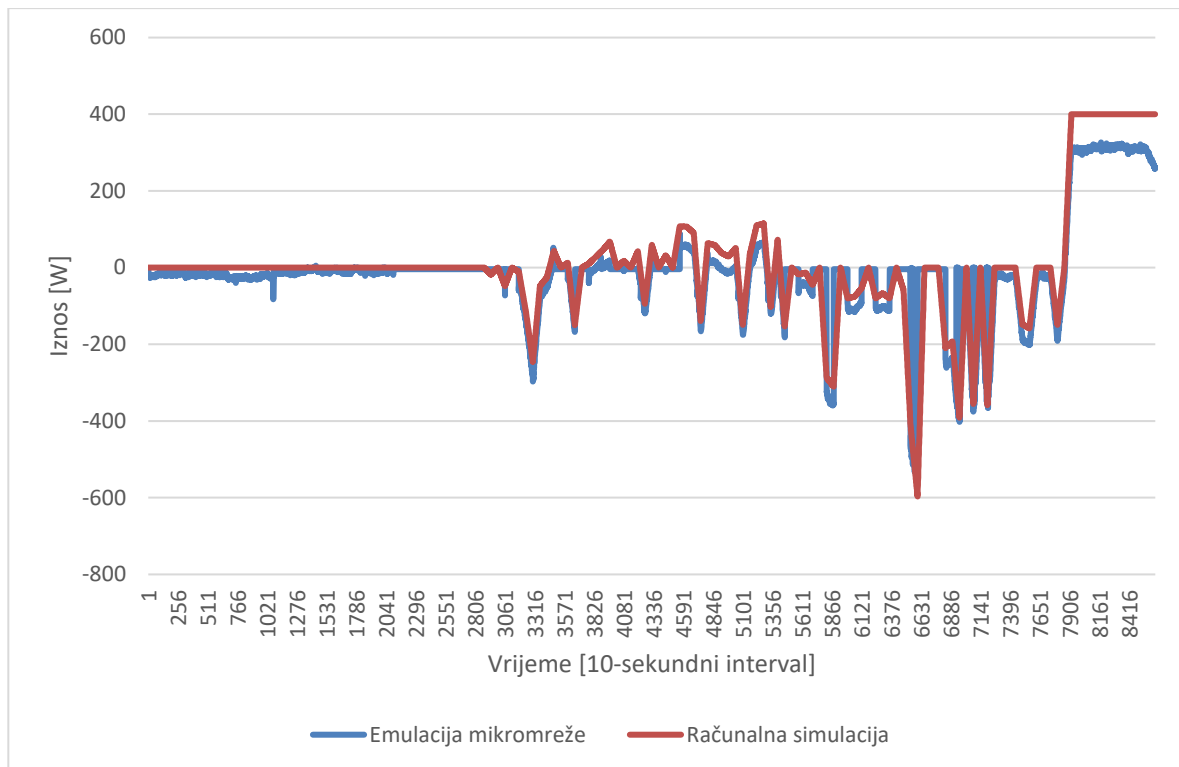
snage u smjeru predaje u mrežu, međutim plavi graf u određenim dijelovima ide ispod nule, što znači da se odvija predaja snage u mrežu. To se najviše događa u trenucima kada je snaga razmijene s mrežom u simulaciji jednaka nuli.



Sl. 5.14. Razmjena snage s mrežom u svakom vremenskom intervalu

Sustav sadrži baterijske spremnike energije, pa stoga postoje i tokovi snage unutar tih spremnika. Mogući tokovi snage su iz baterije i u bateriju. Na slici 5.15. prikazani su grafovi tokova snage unutar baterije. Energija koja je skladištena u bateriji najviše se koristi u trenucima kada je proizvodnja iz FN sustava mala, a razdoblje je više tarife. U simulaciji su dobiveni upravo takvi rezultati, što je vidljivo na crvenom grafu. Plavi graf, odnosno graf emulacije mikromreže, većinu vremena dobro prati crveni graf, odnosno u većini vremenskih intervala ima sličan iznos. Postoje blaga odstupanja na početku i u sredini mjerenja, ponajviše zbog nesavršenosti fizičke opreme. Najveća odstupanja događaju se na kraju mjerenja, odnosno na kraju dana, kada je potrebno ispuniti zadani zahtjev za punjenjem baterijskog spremnika do maksimalnog kapaciteta. Na grafu simulacije vidljiva je ravna linija na 400W, što znači da se baterija puni maksimalnom snagom, jer je to optimalno u tim trenucima. Na grafu emulacije vidimo da pred kraj dana graf jednim dijelom prati graf simulacije, ali kada dosegne određenu vrijednost, koja je manja od maksimalne snage punjenja, graf postaje gotovo konstantnog iznosa i pred sam kraj opada. Iz toga se može

zaključiti da se baterija u emulaciji nije punila maksimalnom snagom na kraju dana, zbog čega nije ispunjen zahtjev za punjenjem baterije do maksimalnog kapaciteta na kraju dana.



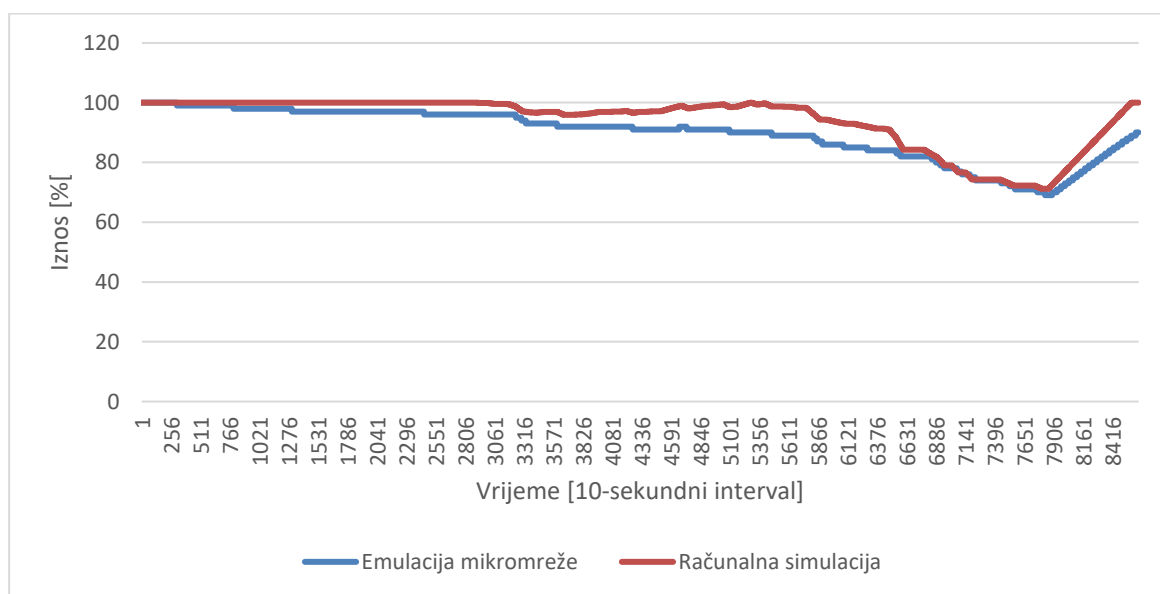
Sl. 5.15. Tokovi snage u bateriji u svakom vremenskom intervalu

Na slici 5.16. prikazani su grafovi koji prikazuju stanje napunjenosti baterije u svakom vremenskom intervalu. Kao što je vidljivo na slici, oba grafa su ravna linija iznosa 100% na početku simulacije, odnosno emulacije. Crveni graf predstavlja graf računalne simulacije, odnosno optimalno stanje napunjenosti baterije u svakom vremenskom intervalu kako bi se maksimalno uštedjelo na novčanim sredstvima. Plavi graf predstavlja graf emulacije mikromreže. Može se vidjeti da u nekim trenucima plavi graf dobro prati crveni, ali većinu vremena plavi graf nema iste iznose kao crveni graf, ali ima sličan oblik. Plavi graf većinu vremena ima niže postotke napunjenosti baterije i sporije promjene u postotku napunjenosti. Na zadnjem punjenju baterije, kada se u simulaciji odvija punjenje maksimalnom snagom, oba grafa izgledaju kao pravac, iako se kod plavog grafa vide male promjene u iznosima. To znači da se u oba slučaja baterija puni gotovo konstantnom snagom, a s obzirom da crveni graf u tom dijelu ima veći nagib nego plavi graf može se zaključiti da se u simulaciji baterija puni brže, odnosno većom snagom nego u emulaciji. Rezultat toga je to što je crveni graf dosegnuo iznos od 100% napunjenosti baterije do kraja dana, a plavi graf nije. To je vidljivo i u prethodnom grafu, u kojemu snaga punjenja baterije opada pred kraj, što naravno rezultira sporijim punjenjem, odnosno sporijom promjenom stanja

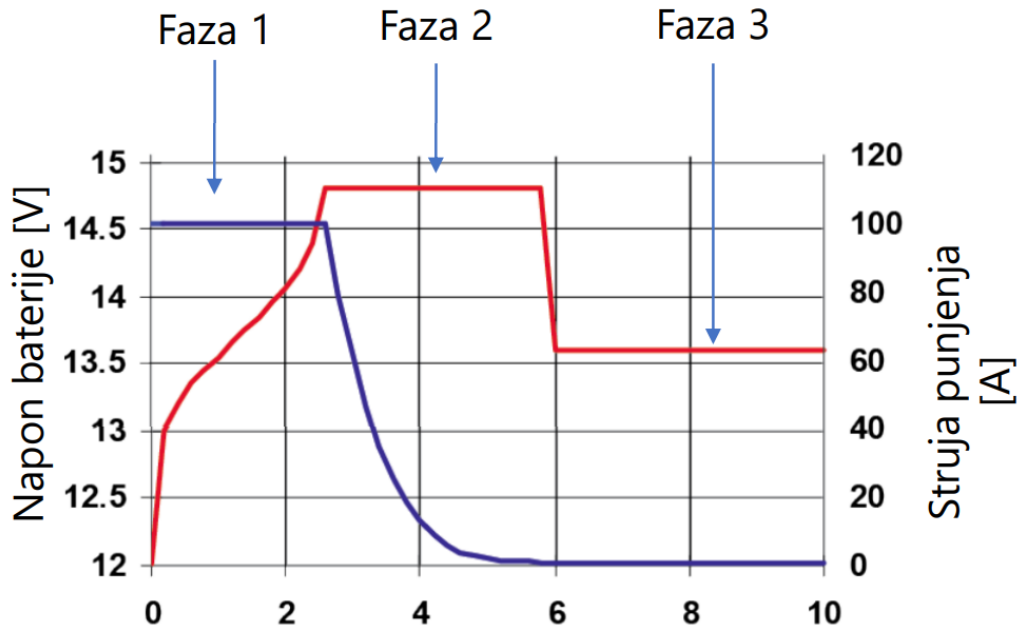
napunjenosti baterije. Baterija ne može dosegnuti maksimalno stanje napunjenosti u zadanom vremenu jer porastom stanja napunjenosti povećava se i napon. Kada napon dosegne određenu vrijednosti struja drastično opada kako bi se baterija osigurala od prepunjenosti. Na slici 5.17. vidljiv je prikaz najčešćeg algoritma punjenja za VRLA baterije. To je algoritam punjenja u tri faze. U prvoj fazi, odnosno fazi konstantne struje (engl. *bulk phase*) struja je konstantna, a iznos je jednak nazivnoj struji punjenja. U drugoj fazi napon je visok i konstantnog iznosa (engl. *Absorption voltage*) kako bi se baterija potpuno napunila u razumnom vremenskom roku. Zatim u trećoj fazi napon je konstantan, ali ima nižu vrijednost nego u prethodnoj fazi (engl. *Float voltage*), te služi za kompenzaciju samopražnjenja baterije [24].

Nedostatci algoritma punjenja u tri koraka [24]:

- Zbog velike struje punjenja kod olovno-kiselinskih baterija u 1. fazi može se dogoditi isplinjavanje (engl. *Gassing*) zato što se prelazi iznos napona isplinjavanja (engl. *Gassing voltage*) koji iznosi 14,34 V za 12 V baterije. Ovi procesi mogu dovesti do povećanja tlaka u bateriji. Pomoću sigurnosnih ventila dio plina može izaći iz baterije, ali također to sve će joj smanjiti vijek trajanja.
- Druga faza ima konstantnu duljinu trajanja koja ne ovisi o dubini pražnjenja prethodnog ciklusa. To je problem jer u slučaju ciklusa s malom dubinom pražnjenja doći će do prepunjenosti baterije.
- Istraživanjima je dokazano da se smanjenjem napona u trećoj fazi produljuje životni vijek baterije.



Sl. 5.16. Stanje napunjenosti baterije u svakom vremenskom intervalu

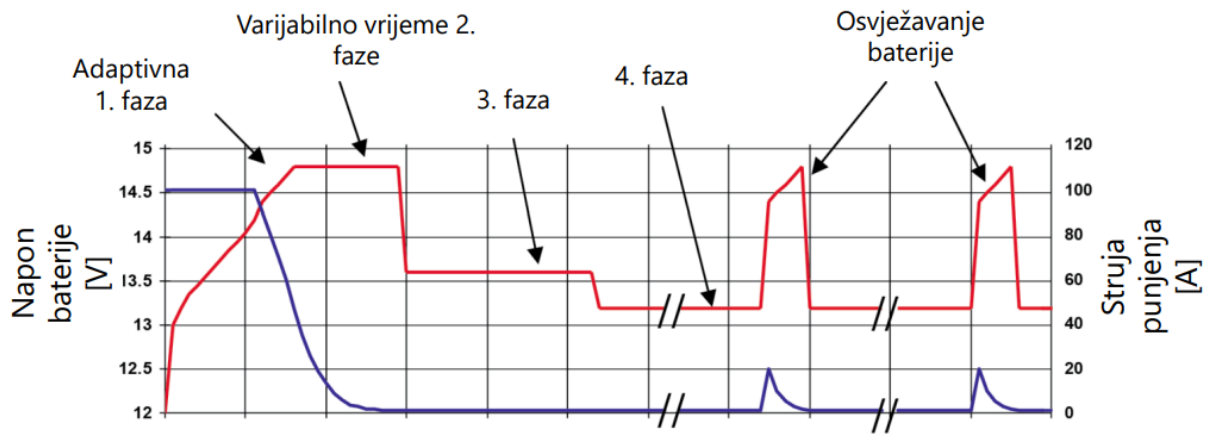


Sl. 5.17. Algoritam punjenja u tri faze [24]

Za nedostatke i probleme kod navedenog algoritma punjenja postoje rješenja. Ona su implementirana u algoritmu punjenja u četiri faze [24]:

- Nakon prelaska napona isplinjavanja brzina promjene, odnosno porasta napona u prvoj fazi se ograničava, što rezultira smanjenjem proces isplinjavanja u bateriji.
- Vrijeme druge faze, koje je potrebno da se baterija napuni do kraja, je varijabilno, a izračunava se na temelju trajanja duljine prve faze.
- Ako se baterija nakon punjenja ne koristi barem 24h napon u četvrtoj fazi snižava se ispod razine u trećoj fazi, te joj se tako produljuje vijek trajanja. Kako bi se kompenziralo samopražnjenje napon se jednom tjedno povećava na razinu napona u drugoj fazi.

Na slici 5.18. grafički je prikazan algoritam punjenja u četiri faze.



Sl. 5.18. Algoritam punjenja u četiri faze [24]

6. ZAKLJUČAK

Mikromreže zbog svojih mnogih prednosti postaju sve zastupljenije u EES. Pridonose povećanju broja elektrana na obnovljive izvore energije, uvode digitalizaciju i veće mogućnosti upravljanja potrošnjom i proizvodnjom na razini krajnjeg potrošača, ali i na razini EES. Kada se u mikromreže implementira sustav za upravljanje energijom to rezultira mnogim prednostima. Za krajnje kupce s vlastitom proizvodnjom najveći od njih je smanjenje troška električne energije, odnosno maksimalna ušteda novčanih sredstava. Simulacija je pokazala da je takav sustav optimizirao tokove snaga kako bi u svakom trenutku vlasnik mikromreže bio siguran da se sve odvija optimalno za smanjenje troškova električne energije. Sustav optimalno upravlja svim izvorima energije i svim trošilima, što je dobar pravac za budućnost i poboljšanje EES. Testovi na stvarnoj mikromreži su pokazali nešto drugačije rezultate. S obzirom da simulacija pokazuje optimalne tokove snaga, za očekivati je da rezultati neće biti u potpunosti isti u stvarnom svijetu zbog ograničenosti korištenih uređaja. Uz očekivana odstupanja, bilo je nekoliko neočekivanih, kao što je nemogućnost ispunjenja zahtjeva za punjenjem baterije do njezinog maksimalnog kapaciteta. Dakle može se zaključiti da je u stvarnosti puno teže imati optimalne tokove snaga u svakom trenutku. Uz to za simulaciju i testiranje bili su potrebni određeni ulazni parametri, konkretno iznos sunčevog zračenja u svakom trenutku i iznos opterećenja u svakom trenutku. Naravno ova dva parametra je nemoguće odrediti unaprijed u potpunosti točno. Stoga je to prvi problem kod implementacije ovakvog sustava u stvarnosti. Moguće je odrediti ta dva ulazna parametra, ali ne u potpunosti točno. Iznos sunčevog zračenja aproksimacijom uz pomoć stručnjaka za vremensku prognozu, a opterećenje na principu funkcioniranja voznog reda EES. Naravno kada bi takav sustav radio, ne bi bili optimalni tokovi snage u svakom trenutku, jer je nemoguće predvidjeti ta dva parametra bez pogreške. Ali bez obzira na to takav sustav može i dalje pridonijeti smanjenju troškova električne energije i mogao bi se koristiti u stvarnom svijetu.

LITERATURA

- [1] H. Shayeghi, E. Shahryari, M. Moradzadeh, P. Siano, „A Survey on Microgrid Energy Management Considering Flexible Energy Sources“, *Energies*, sv. 12, br. 11, lipanj 2019.
- [2] A. von Jouanne, E. Agamloh, A. Yokochi, „Power Hardware-in-the-Loop (PHIL): A Review to Advance Smart Inverter-Based Grid-Edge Solutions“, *Energies*, sv. 16, br. 2, siječanj 2023.
- [3] N. Mišljenović, M. Žnidarec, G. Knežević, D. Šljivac, A. Sumper, „A Review of Energy Management Systems and Organizational Structures of Prosumers“, *Energies*, sv. 16, br. 7, ožujak 2023.
- [4] A. S. Vijay, S. Doolla, M. C. Chandorkar, „Real-Time Testing Approaches for Microgrids“, *IEEE Journal of emerging and selected topics in Power Electronics*, sv. 5, br. 3, rujan 2017.
- [5] G. Knežević, M. Maligec, V. Golub, D. Topić, „The optimal utilization of the battery storage for a virtual prosumer participating on a day-ahead market“, 2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), Osijek, listopad 2020.
- [6] M. Boussetta, S. Motahhir, R. El Bachtiri, A. Allouhi, M. Khanfara, Y. Chaibi, „Design and Embedded Implementation of a Power Management Controller for Wind-PV-Diesel Microgrid System“, *International Journal of Photoenergy*, prosinac 2019.
- [7] M. Elkazaz, M. Sumner, D. Thomas, „Real-Time Energy Management for a Small Scale PV-Battery Microgrid: Modeling, Design, and Experimental Verification“, *Energies*, sv. 12, br. 14, srpanj 2019.
- [8] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, „Microgrids management“, *IEEE Power and Energy Magazine*, sv. 6, br. 3, lipanj 2008.
- [9] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, „Smart energy management system for optimal microgrid economic operation“, *IET Renewable Power Generation*, sv. 5, br. 3, svibanj 2011.
- [10] S. M. Nosratabadi, R. Hooshmand, E. Gholipour, „A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 67, str. 341-363, siječanj 2017.
- [11] N. Hatziargyriou, „Microgrids architectures and control“, John Wiley and Sons Ltd, Athens, 2014.

- [12] M. Aragüés-Peñalba, A. Sumper, „Special Issue on Microgrids“, Applied Sciences, sv. 9, br. 21, studeni 2019.
- [13] G. Shahgholian, „A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control“, International Transactions on Electrical Energy Systems, ožujak 2021., dostupno na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2050-7038.12885> [6.9.2024.]
- [14] Schneider Electric, EcoStruxure mikromreže, Schneider Electric, dostupno na: <https://www.se.com/hr/hr/work/solutions/microgrids/> [8.7.2024.]
- [15] Hrvatski sabor, „Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji“ [online], Narodne Novine, Zagreb, 2021., dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_138_2272.html [10.9.2024.]
- [16] Victron Energy, „MultiPlus Inverter/Charger“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.europe-solarstore.com/download/victron/Victron-MultiPlus-800VA-5000VA-datasheet.pdf> [11.9.2024.]
- [17] Victron Energy, „Venus GX“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Venus-GX-EN.pdf> [6.9.2024.]
- [18] Victron Energy, „Venus GX“ [online], Victron Energy, dostupno na: <https://www.victronenergy.com/communication-centres/venus-gx#pd-nav-image> [4.9.2024.]
- [19] Victron Energy, „BMV-700 series: Precision Battery Monitoring“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-BMV-700-series-EN.pdf> [3.9.2024.]
- [20] Zola e-shop, „Victron Energy BMV-702 monitor za nadzor baterije“ [online], Zola e-shop, dostupno na: https://www.zola.hr/contents/hr/p118221_Battery-Monitor-BMV-702-.html [6.9.2024.]
- [21] NKON, „Victron Energy ET340“ [online], NKON, dostupno na: <https://eu.nkon.nl/victron-energy-et340-energiemeter.html> [6.9.2024.]
- [22] Victron Energy, „Energy Meter Selection Guide“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Energy-Meters-Selection-Guide-EN.pdf> [3.9.2024.]

- [23] Muziker, „Victron Energy GEL Solar 12 V 110 Ah Akumulator“ [online], Muziker, dostupno na: <https://www.muziker.hr/victron-energy-gel-solar-battery-12v-110ah> [3.9.2024.]
- [24] Victron Energy, „Gel and AGM Batteries“ [online], Victron Energy, 2022., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf> [7.9.2024.]
- [25] Victron Energy, „12,8 & 25,6 Volt Lithium-Iron-Phosphate Batteries Smart“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12,8-&-25,6-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-Smart-EN.pdf> [3.9.2024.]
- [26] Energy2store, „Baterija Victron LiFePO4 12,8V, 160Ah, 2048Wh, BTV, Bluetooth Smart – nema BMS“ [online], Energy2store, 2024., dostupno na: <https://www.energy2store.hr/baterija-victron-lifepo4-128v-160ah-2048wh-btv/> [6.9.2024.]
- [27] Victron Energy, „VE.Bus BMS“ [online], Victron Energy, 2022., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-VE-Bus-BMS-EN.pdf> [4.9.2024.]
- [28] WASI, „Battery management system ve.bus bms“ [online], WASI, 2024., dostupno na: <https://wasi.hr/battery-management-system-vebus-bms-bms300200000> [4.9.2024.]
- [29] Victron Energy, „Cerbo GX, Cerbo-S GX and GX Touch“ [online], Victron Energy, 2023., dostupno na: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Cerbo-GX-GX-Touch-EN.pdf> [6.9.2024.]
- [30] WASI, „Cerbo GX“ [online], WASI, 2024., dostupno na: <https://wasi.hr/cerbo-gx-bpp900450100> [3.9.2024.]
- [31] PeakTech, „PeakTech® P 2280» DC electronic load with USB“ [online], PeakTech, dostupno na: <https://www.peaktech.de/uk/PeakTech-P-2280-DC-electronic-load-with-USB/P-2280> [6.9.2024.]
- [32] MEAN WELL, „MSP-300-24“ [online], MEAN WELL, dostupno na: <https://www.meanwell-web.com/en-gb/ac-dc-single-output-medical-enclosed-power-supply-msp--300--24> [4.9.2024.]

SAŽETAK

U ovom radu definiran je sustav upravljanja električnom energijom koji optimizira tokove snaga u mikromreži sa ciljem smanjenja troškova električne energije. Za promatrani slučaj korišten je model krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom i pohranom električne energije. Iz matematičkog modela stvoren je računalni model i odrađena računalna simulacija. Računalna simulacija iz ulaznih parametara stvara rezultate koji predstavljaju optimalne tokove snaga u promatranom sustavu. Ulazni parametri simulacije su: tarife u smjeru predaje i u smjeru preuzimanja energije iz mreže, razina sunčevog zračenja, opterećenje, temperatura okoline i parametri koji definiraju bateriju. Dobiveni rezultati simulacije su: tokovi snage u razmjeni s mrežom, izlazna snaga FN sustava, trošak električne energije u eurima, stanje napunjenosti baterije i tokovi snaga u bateriji. Dobiveni tokovi snage simulacije korišteni su zatim u emulaciji mikromreže. Rezultati računalne simulacije i emulacije mikromreže grafički su prikazani i uspoređeni. Grafovi su generalno slični, ali u nekim trenucima postoje i veća odstupanja iz čega se zaključuje da stvarni sustav ne može u potpunosti pratiti računalnu simulaciju u svakom trenutku.

Ključne riječi: emulacija, mikromreža, optimizacija, računalna simulacija, tokovi snaga

ABSTRACT

In this paper, an energy management system that optimizes power flows in a microgrid with the aim of reducing electricity costs is defined. For the observed case, a model of an end consumer with its own energy production and storage was used. A computer model was created from the mathematical model, and a computer simulation was carried out. The computer simulation, based on input parameters, generates results that represent the optimal power flows in the observed system. The input parameters for the simulation are: tariffs for energy export and import from the grid, solar radiation levels, load, ambient temperature, and battery parameters. The simulation results are: power flows in exchange with the grid, output power of the PV system, electricity cost in euros, battery state of charge and power flows in the battery. The obtained power flows from the simulation were then used in the emulation of the microgrid. The results of the computer simulation and microgrid emulation are graphically presented and compared. The graphs are generally similar, but in some instances, there are larger deviations, from which it is concluded that the real system cannot fully follow the computer simulation at every moment.

Keywords: computer simulation, emulation, microgrid, optimization, power flows

ŽIVOTOPIS

Matko Katić rođen je 23.9.2000. u Vinkovcima. Završio je Osnovnu školu Vladimira Nazora u Vinkovcima. Nakon završetka osnovne škole upisuje Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima, smjer opća gimnazija. Srednju školu završava 2019. godine. Po završetku srednje škole polaže maturu i iste godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Za smjer odabire Sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnike, a na drugoj godini opredjeljuje se za izborni blok Elektroenergetika. Nakon završenog preddiplomskog studija 2022. godine upisuje Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Elektroenergetski sustavi.