

# Usporedba performansi različitih tipova fotonaponskih eksperimentalnih mikromreža sa pohranom električne energije

---

Ištvanfi, Ivor

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:200:923503>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH TIPOVA  
FOTONAPONSKIH EKSPERIMENTALNIH  
MIKROMREŽA S POHRANOM ELEKTRIČNE  
ENERGIJE**

**Diplomski rad**

**Ivor Ištvanfi**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 07.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Ivor Ištvanfi
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1173, 23.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	77726462833
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Usporedba performansi različitih tipova fotonaponskih eksperimentalnih mikromreža sa pohranom električne energije
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Opisati karakteristike različitih tipova fotonaponskih mikromreža sa baterijskom pohranom električne energije. Opisati DC, AC, AC/DC i hibridne AC/DC mikromreže (s dodatnim izvorom). Na osnovu mjerenja u Laboratoriju za obnovljive izvore energije usporediti performanse različitih tipova mikromreža.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	07.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 18.09.2020.

Ime i prezime studenta:

Ivor Ištvani

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1173, 23.09.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba performansi različitih tipova fotonaponskih eksperimentalnih mikromreža sa pohranom električne energije**

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

i sumentora 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 studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MIKROMREŽE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Što je mikromreža?</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2. Razvoj i prednosti mikromreža</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Strategije upravljanja mikromrežom</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4. Upravljivi elementi mikromreže</b> .....	<b>11</b>
<b>3. UPRAVLJANJE MIKROMREŽOM</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1. Funkcije upravljanja</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2. Uloga informacijsko komunikacijskih tehnologija</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3. Arhitektura upravljanja mikromrežom</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4. Centralizirano i decentralizirano upravljanje</b> .....	<b>25</b>
<b>4. EKSPERIMENTALNA MJERENJA NA RAZLIČITIM TIPOVIMA MIKROMREŽA</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1. Popis korištene opreme</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2. Istosmjerna (DC) mikromreža</b> .....	<b>38</b>
<b>4.3. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža</b> .....	<b>41</b>
<b>4.4. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža</b> .....	<b>46</b>
<b>4.5. Analiza rezultata mjerenja</b> .....	<b>59</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>62</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>63</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>65</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>66</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>67</b>
<b>PRILOZI</b> .....	<b>68</b>

## **1. UVOD**

Zbog sve veće potrebe za električnom energijom, smanjenjem emisije štetnih plinova i povećanja energetske učinkovitosti stvorena je potreba za unaprjeđenjem elektroenergetskog sustava (EES) odnosno njegovih dijelova. U tu svrhu razvijen je koncept mikromreža koje kao dio niskonaponske (NN) distribucijske mreže omogućavaju implementaciju obnovljivih izvora energije, pohranu električne energije te upravljanje potrošnjom. Rad odnosno upravljanje mikromreže temelji se na dvosmjernoj komunikaciji kojom je omogućeno upravljanje svim elementima mikromreže u realnom vremenu.

U sklopu praktičnog dijela u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija provedena su mjerenja za tri vrste mikromreža: istosmjerna (DC) , izmjenično/istosmjerna (AC/DC) te hibridna (s dodatnim izvorom) izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža. Unutar te tri vrste proučavani su posebni slučajevi s obzirom na vrstu opterećenja te rad pojedinih elemenata mikromreže. Iz rezultata mjerenja pomoću Sankey dijagrama prikazana je energetska bilanca svake mikromreže te je računata učinkovitosti korištenih pretvarača energetske elektronike.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Zadatak ovoga rada je opisati način upravljanja i karakteristike mikromreža te u praktičnom dijelu rada na osnovu mjerenja provedenih u Laboratoriju za obnovljive izvore energije usporediti performanse istosmjerne (DC), izmjenično/istosmjerne (AC/DC) i hibridne (s dodatnim izvorom) izmjenično/ istosmjerne (AC/DC) mikromreže.

## 2. MIKROMREŽE

U vremenu kada se konstantno povećava potreba za električnom energijom i potrebno je smanjiti troškove proizvodnje te negativan utjecaj na okoliš uslijed korištenja fosilnih goriva primorani smo pronaći načine za integraciju OIE u postojeći EES. Stoga se počelo razmišljati o načinima kako bi cijeli EES postao učinkovitiji. Prvo su osmišljeni planovi kako poboljšati trenutnu odnosno izgraditi novu infrastrukturu EES-a budući da je ona glavna prepreka kako za povećanje kapaciteta postojećih tako i za integraciju novih izvora električne energije. Budući da postojeći EES obuhvaća velike (centralizirane) proizvodne jedinice, prijenos te distribuciju nije pogodan za implementaciju novih tehnologija i rješenja. Također, postojeći EES je jedan od rijetkih pružatelja usluga korisnicima koji u realnom vremenu ne dobiva povratnu informaciju o načinu korištenja iste. EES funkcionira kao otvorena petlja unutar koje podaci poput onih o trenutnoj potražnji, profilu potrošača te karakteristikama sustava nisu dostupni u realnom vremenu. Takav sustav ne može omogućiti pohranu električne energije niti integraciju OIE kao što su vjetar, sunčeva energija, biomasa i valovi budući da oni zbog svog stohastičkog ponašanja zahtijevaju sustave upravljanja kako bi bili što učinkovitiji i mogli pohranjivati višak proizvedene energije. EES koji je izgrađen u prošlom stoljeću je jednosmjerni sustav unutar kojeg se energija proizvodi i distribuira na temelju prethodno prikupljenih podataka umjesto na temelju trenutnih podataka. Kao takav, sustav je predimenzioniran s obzirom na vršna opterećenja, koja su rijetka i kratkotrajna. Pogon takvog sustava je skup i u većini vremena neučinkovit. Sustavom se upravlja pomoću frekvencije koja prikazuje balans između proizvodnje i potrošnje. Kada je potrošnja veća od proizvodnje dolazi do smanjenja frekvencije čija se vrijednost vraća na nazivnu povećanjem proizvodnje odnosno njenog izjednačenja sa potrošnjom. Također kada je potrošnja manja od proizvodnje frekvencija raste te je potrebno smanjiti proizvodnju odnosno izjednačiti ju sa potrošnjom kako bi se frekvencija vratila na nazivnu vrijednost. Ovaj način upravljanja je trom te ukoliko se promjene između potrošnje i proizvodnje događaju brže nego što inercija sustava to može pratiti doći će do pada sustava. [1]

Tradicionalni EES ima velike gubitke zbog svoje neučinkovitosti. Također, susreće se s problemima kao što su sve veća potražnja, povećanje troškova, smanjenje opskrbnih mogućnosti, smanjenje marže te smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Nikada u stoljetnoj povijesti EES nije se morao istodobno suočiti s toliko raznovrsnih izazova kao što mora danas. U posljednjih par desetljeća isporučitelji električne energije susreli su se s jednim ili više od sljedećih izazova [1] :

- zastarjela infrastruktura (više od 70% infrastrukture EES-a u SAD-u je starije od 25 godina);
- pouzdanost sustava (nagli pad sustava u Kaliforniji, sjeveroistočnom SAD-u i istočnoj Kanadi);
- sigurnost (znanstvenici u SAD-u su dokazali da je EES SAD-a sklon napadima);
- tržišna dinamika (pojavom više konkurenata mijenja se cijena);
- naplata potrošnje (potrebno uvođenje višetarifnog modela, pametna brojila);
- distributivna proizvodnja (pristup mreži nezavisnim proizvođačima);
- učinkovitost i optimizacija (korištenje podataka o trenutnoj potrošnji i smanjenje vršne potrošnje);
- poskupljenje proizvodnje (ovisno o cijeni korištenog energenta);
- ograničene rezerve fosilnih goriva;
- elektrifikacija novih područja (sve veća potreba za električnom energijom);
- obnovljivi izvori energije (integracija u mrežu) i
- smanjenje negativnog utjecaja na okoliš.

## 2.1. Što je mikromreža?

Mikromreža se sastoji od niskonaponske distribucijske mreže, distributivne proizvodnje (mikroturbine, gorive ćelije, fotonapon, itd.) zajedno s jedinicama za pohranu energije (zamašnjaci, superkondenzatori i baterije) te promjenjivih opterećenja. Ovaj sustav može raditi neautonomno, kada je spojen na mrežu, ili autonomno, kada nije spojen na glavnu mrežu. Svaki dio mikromreže može na različite načine može pridonijeti sveukupnom radu mikromreže ukoliko se njima upravlja učinkovito. [2]

Iz ove definicije mogu se izvesti tri glavna zaključka [2]:

1. Mikromreža je sustav za opskrbu, pohranu i ispunjavanje trenutne potražnje (upravljiva opterećenja) koji je smješten unutar lokalne distributivne mreže.

- U konceptu mikromreže naglasak je na ispunjenju potreba za električnom energijom lokalne potrošnje. Dakle, modeli koji zanemaruju fizičku lokaciju proizvodnje i potrošnje (poput virtualnih elektrana) nisu mikromreža.
- Mikromreža se uglavnom nalazi na niskonaponskoj razini s ukupnom instaliranom snagom proizvodnje manjom od 1 MW. Tu postoje iznimke kada se unutar mikromreže nalazi i dio sredjenaponske razine zbog potrebe interkonekcije.



2. Mikromreža mora biti u mogućnosti raditi u normalnom pogonu (povezana na mrežu) i izvanrednom (otočnom) pogonu.

- Većina budućih mikromreža radit će povezana na mrežu osim onih koje su fizički izgrađene na otocima – dakle, većina prednosti mikromreže proizlazit će iz njenog spoja s mrežom.
- Kako bi mikromreža dugoročno mogla raditi u otočnom pogonu mora zadovoljiti visoke zahtjeve po pitanju kapaciteta pohrane te instaliranoj snazi proizvodnje koja mora pokrivati sveukupnu potrošnju ili će se morati osloniti na značajnu fleksibilnost potražnje. U posljednje navedenom slučaju pouzdanost se može postići tako da važna opterećenja stavimo u nove, zasebne otočne pogone.

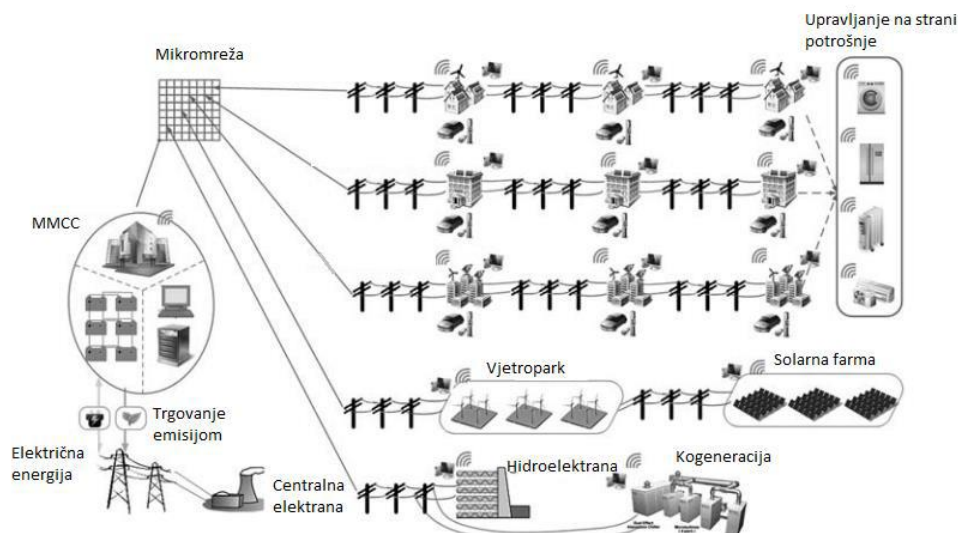
3. Razlika između mikromreže i klasične mreže na koju su spojeni distributivni izvori je u vođenju i koordinaciji trenutno raspoloživih izvora.

- Sustav mikromreže je puno više od distributivne proizvodnje, komunikacije, upravljanja tereta i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš jer on sve ove funkcije odrađuje istovremeno i to optimizirajući ekonomske, tehničke i ekološke ciljeve.
- Jedna od glavnih prednosti koncepta mikromreže u odnosu na ostala „pametna“ rješenja je to što onemogućava stvaranje sukoba interesa budući da donosi optimalne odluke za sve sudionike.

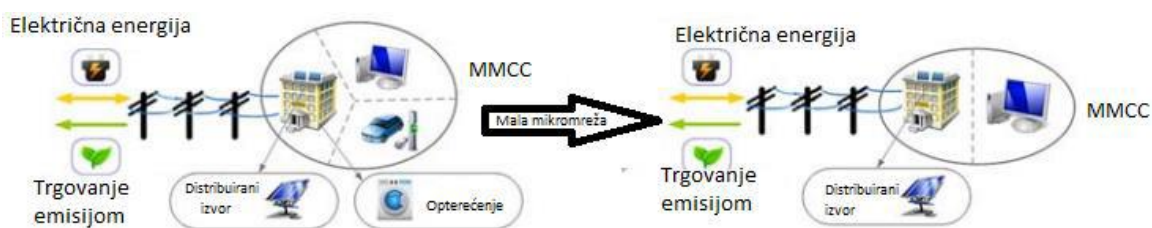
Mikromreža se pojavljuje na razini niskonaponske mreže, niskonaponskog opskrbnog voda i na razini niskonaponskog kućanstva – primjer na slikama 2.1.-2.3.. Kako raste veličina mikromreže za očekivati je da će imati povoljniji odnos između proizvodnje i potrošnje te bolje upravljanje što osigurava kvalitetniju opskrbu i iskorištavanje dobivene energije iz OIE. U prosjeku maksimalna instalirana snaga (s obzirom na vršno opterećenje) je ograničena na nekoliko MW (u Europi). [2]



Slika 2.1. Mikromreža na razini opskrbnog voda [2]



Slika 2.2. Mikromreža na razini niskonaponske mreže [2]



Slika 2.3. Mikromreža na razini kućanstva [2]

Tri glavna obilježja mikromreže su: lokalna potrošnja, lokalni distributivni izvori te pametno upravljanje. Također, kao jedno od obilježja može se uzeti i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš budući da se ono u mnogim zemljama promovira kroz upotrebu tehnologija OIE i kogeneracijskih postrojenja (CHP). Stoga, ukoliko jedno ili više ovih obilježja nedostaje ne govorimo o mikromreži. U sljedećih nekoliko točaka navedene su neke od najčešćih zabluda vezanih za mikromreže [2]:

- Mikromreže su isključivo otočni pogoni.
  - Iako su mikromreže uglavnom povezane na mrežu one također imaju mogućnost da se prebace u otočni način rada u hitnim situacijama kako bi povećale pouzdanost korisnika. Male otočne sustave karakterizira upravljanje vlastitima

resursima u skladu sa svojom veličinom i opsegom distributivne proizvodnje zbog čega se i oni mogu smatrati mikromrežom.

- Korisnici koji su vlasnici distributivnih izvora grade mikromrežu.
  - Proizvodnja energije iz distributivnih izvora je jedna od karakteristika mikromreže, ali mikromreža je puno više od skupa distributivnih izvora jer ona vrši nadzor, upravljanje i optimizaciju svi resursa.
- Mikromreže se sastoje od obnovljivih izvora koji su ovisni o vremenskim prilikama stoga su nepouzdana te često dolazi do ispada dijelova odnosno potpunog ispada mikromreže.
  - Mikromreža problem variranja proizvodnje OIE nadoknađuje iz jedinica za pohranu energije (u otočnom pogonu) odnosno apsorpcijom energije iz vanjske mreže (kada radi spojena na mrežu). Štoviše, mogućnost mikromreže da se prebaci iz rada kada je spojena na mrežu na rad u otočnom pogonu povećava sigurnost opskrbe.
- Izgradnja mikromreža je skupa stoga će biti ograničena na testna polja ili samo u udaljenim dijelovima gdje nema pristupa tradicionalnoj mreži.
  - Implementacije distributivne proizvodnje iz OIE svakodnevno raste u cijelome svijetu. Načini sufinanciranja za OIE i CHP osiguravaju profitabilnost. Također, daljnja smanjenja cijene opreme za proizvodnju i skladištenje energije učinit će da mikromreže postanu komercijalno dostupne. Također, za nadogradnju postojeće mreže s distributivnim izvorima kako bi postala mikromreža iziskuju se samo troškovi uvođenja komunikacija i upravljanja. Ti troškovi se mogu lako kompenzirati zbog ekonomičnosti koja se postiže upravljanjem distributivnim izvorima energije.
- Koncept mikromreže je još jedan od načina reklamiranja prodavača električne energije kako bi povećali svoju dobit.
  - Ukoliko krajnji potrošač energije ne želi instalirati fotonaponske module na svoj krov ili imat udio u CHP elektrani koja je u vlasništvu zajednice on i dalje može imati koristi budući da može birati svog dobavljača energije čime utječe na iznos naknade za emisiju štetnih plinova na svom računu.
- Sustav upravljanja mikromrežom će prisiljavati korisnike da mijenjaju svoju potrošnju ovisno o proizvodnji iz OIE npr. perilica rublja će se uključivati samo kada ima dovoljno sunčeve energije ili energije vjetra.

- Program promjene potražnje u kućnoj upotrebi trebao bi se primjenjivati samo na uređaje koji se duže vremena nalaze u pripravnosti (poput hladnjaka i klima uređaja) ili na vremenski neosjetljive uređaje (poput grijača vode).
- Mikromreža je novi koncept koji zahtjeva potpunu rekonstrukciju mreže.
  - Iako su potrebni novi mjerni, komunikacijski i upravljački uređaji prelazak iz tradicionalne distributivne mreže u mikromrežu ne zahtjeva previše investicija u postojeću infrastrukturu. Naprotiv, mikromreža može odgoditi troškove za zamjenu nekih uređaja.
- Mikromreža se nikada neće suočiti s prekidom opskrbe.
  - Ukoliko dođe do prekida opskrbe sa strane mreže mikromreža može preći u otočni način rada samo ako ima veliki kapacitet pohranjene energije ili veliku proizvodnju i uz uvjet da će se ovisno o raspoloživosti električne energije isključiti opterećenja koja nisu neophodna.

Također važno je napraviti razliku između pojmova mikromreže i virtualne elektrane (VEE). Virtualna elektrana je grupa sastavljena od distributivnih izvora energije kojom upravlja središnji kontrolni sustav. VEE može zamijeniti konvencionalnu elektranu u odnosu na koju osigurava veću učinkovitost i fleksibilnost pogona. Iako se mikromreže i VEE čine sličnima postoji nekoliko razlika [2]:

- Položaj - Unutar mikromreže distributivni izvori energije se nalaze unutar iste distributivne mreže i njihov primarni zadatak je zadovoljiti lokalnu potrošnju. Kod VEE distributivni izvori energije ne moraju nužno biti unutar iste mreže i njima se upravlja na širem geografskom području. Proizvedena energija u VEE se prodaje na klasičnom tržištu električne energije.
- Veličina - Instalirana snaga mikromreža je relativno mala (od nekoliko kW do par MW) dok instalirana snaga VEE može biti puno veća.
- Ciljani kupci - U mikromreži je primarni cilj zadovoljiti lokalnu potrošnju dok VEE prodaje svoju energiju na tržištu.

## 2.2. Razvoj i prednosti mikromreža

Neki od glavnih pokretača koji osiguravaju brz i kvalitetan razvoj mikromreža su [3]:

- Zaštita okoliša: vlasnici mikromreža imaju koristi od vladinih inicijativa budući da je integracija i razvoj OIE u mikromreži znatno olakšan. Također, mikromreže na učinkovit način razvijaju proizvodnju energije iz OIE što pomaže u ispunjavanju postavljenih ciljeva na koje su se određene države obvezale.
- Isplativost električne energije: mikromreže osiguravaju relativno jeftinu i učinkovitu elektrifikaciju ruralnih područja budući da za mnoge države nije isplativo graditi potrebnu infrastrukturu za udaljena područja s malo korisnika.
- Pouzdanost: do sada su se problemi uzrokovani preopterećenjem rješavali povećanjem prijenosne moći vodova što je izuzetno skupo. Sada se kao rješenje može koristiti koncept mikromreže koji će osigurati pouzdaniju i jeftiniju isporuku električne energije potrošačima.
- Sigurnost: mogućnost rada u otočnom pogonu je također jedan od načina na koji mikromreža osigurava sigurnu isporuku električne energije u trenutku kada vanjska mreža ne može osigurati isporuku električne energije. Ova mogućnost je od velike važnosti za ustanove koje ne mogu dugo vremena funkcionirati bez napajanja (npr. bolnice).
- Energetska učinkovitost: distributivna proizvodnja omogućava smanjenje gubitaka u prijenosu.
- Integracija OIE: mikromreže su glavni pokretač u integraciji OIE. Mnoge države su se obvezale da će povećati udio proizvodnje iz OIE u ukupnoj proizvodnji što bi trebalo dodatno olakšati razvoj mikromreža.
- Nove tehnologije pohrane energije: pohrana energije je jedan od glavnih dijelova mikromreže. Razvoj električnih automobila koji bi mogli služiti kao sustav pohrane energije imat će veliki utjecaj na razvoj mikromreža. Jasno je da mikromreže imaju brojne prednosti pogotovo zato što se proizvodi energija iz OIE koja se troši na lokalnom području. Mikromreže bi trebale smanjiti gubitke, povećati stabilnost i sigurnost te smanjiti troškove kako za potrošače tako i za operatore distributivnog sustava (ODS-ove). Brojne su ekonomske, tehničke i prednosti zaštite okoliša.

### Ekonomске prednosti [3]:

- Prednosti kupaca: sustav mikromreže može razviti veoma složen sustav naplate unutar kojeg bi softver računao trenutno najjeftiniji izvor energije te od njega kupovao električnu energiju.
- Prednosti vlasnika distributivnih izvora: mnoge države putem raznih inicijativa potiču implementaciju OIE. Takve inicijative uključuju i otkupljivanje energije od povlaštenih proizvođača po cijeni većoj od prodajne.
- Smanjenje ulaganja u infrastrukturu mreže: kao što je i ranije spomenuto, u određenim područjima nije isplativo provoditi elektrifikaciju i povoljnija opcija u tom slučaju bi bila izgradnja mikromreže. Time se smanjuje ili barem odgađa potreba za velikim investicijama.

### Zaštita okoliša [3]:

- Smanjenje negativnog utjecaja na okoliš: mikromreže se u velikoj mjeri oslanjaju na proizvodnju iz OIE. Također, distributivna proizvodnja smanjuje gubitke u prijenosnim vodovima (gubici koji znače tone smanjenja emisije CO<sub>2</sub>).

### Tehničke prednosti [3]:

- Smanjenje vršne potrošnje: promjenjivi sustav naplate zajedno s lokalnom proizvodnjom može biti značajan faktor u smanjenju vršne, ali i ukupne potrošnje. Dokazano je da može smanjiti potražnju za 10%, a ukupnu potrošnju za 15%.
- Povećanje pouzdanosti: zahvaljujući svojoj učinkovitosti, lokalnom položaju te pametnom upravljanju resursima mikromreže osiguravaju stabilnost i pouzdanost isporuke električne energije.
- Naponska regulacija: mogućnost odabira isporuke električne energije iz mreže ili lokalne proizvodnje može poboljšati kvalitetu napona koju osigurava automatsko upravljanje odnosno odabir najboljeg rješenja u tom trenutku.
- Smanjenje gubitaka: kako je i objašnjeno ranije, lokalna proizvodnja smanjuje potrebu za prijenosom električne energije na velike udaljenosti što za posljedicu ima smanjenje gubitaka.

### 2.3. Strategije upravljanja mikromrežom

Trenutno dostupne tehnologije distributivne proizvodnje pružaju različite mogućnosti proizvodnje radne i jalove energije. Konačne postavke i način upravljanja mikromrežom ovisi o potencijalnom sukobu interesa različitih sudionika koji su uključeni u opskrbu električnom energijom, kao što su dispečeri mreže, vlasnici distributivne proizvodnje, dispečeri distributivne proizvodnje, isporučitelji energije, kupci te regulatorna tijela. Zato optimalan rad mikromreže ovisi o ekonomskim, tehničkim i ekološkim strategijama (Slika 2.4.). [2]



Slika 2.4. Operacijske strategije mikromreže [2]

Ovisno o tome tko sudjeluje u planiranju i upravljanju, moguće su četiri različite strategije rada mikromreže: ekonomska strategija, tehnička strategija, ekološka strategija i kombinirana strategija. [2]

Cilj ekonomske strategije je smanjiti ukupne troškove bez obzira kako će to utjecati na rad mreže. Ova strategija bi mogla biti predložena od strane vlasnika distributivne proizvodnje. Distributivna proizvodnja radi bez obzira na zahtjeve mreže i zahtjeve za smanjenje emisije stakleničkih plinova. Glavno ograničenje proizlazi iz fizičkih karakteristika samih distributivnih izvora. [2]

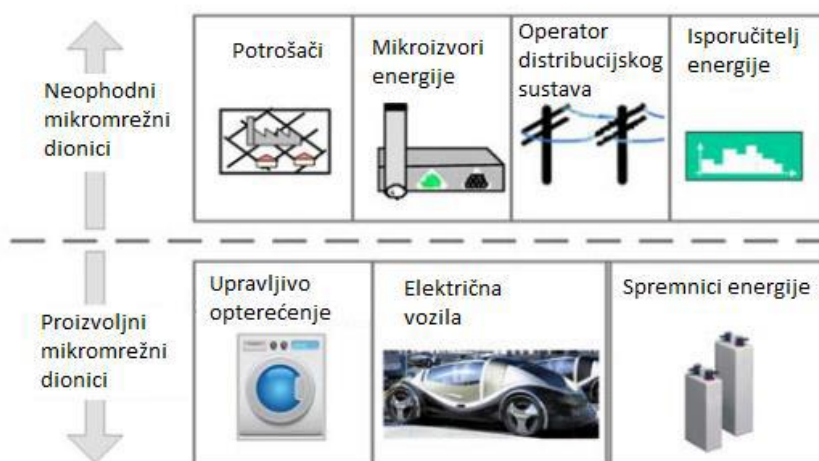
Tehnička strategija je usmjerena na optimizaciju rada mreže (smanjenje gubitaka, naponska stabilnost i napajanje potrošnje) bez obzira na prihode i rashode proizvodnje iz distributivnih izvora. Ova strategija bi najviše odgovarala dispečerima, odnosno sustavu za vođenje EES-a. [2]

Ekološka strategija kao prioritet uzima distributivnu proizvodnju s najmanjom emisijom stakleničkih plinova, bez obzira na financijske i tehničke karakteristike. Ovu strategiju uglavnom podupiru regulatorna tijela budući da je njihov cilj postići ciljeve u smanjenju negativnog utjecaja na okoliš. Jedino ograničenje distributivne proizvodnje koja ima najmanju emisiju stakleničkih plinova su njene fizičke karakteristike. [2]

Kombinirana strategija osigurava optimalno korištenje distributivne proizvodnje uzimajući u obzir ekonomske, tehničke i ekološke čimbenike. Ona pretvara tehničke i ekološke karakteristike u ekonomske pri čemu u obzir uzima fizičke karakteristike mreže i distributivne proizvodnje. Ovakav pristup mogao bi biti interesantan sudionicima kako ne bi samo sudjelovali na klasičnom tržištu energije, već i na potencijalnim tržištima za pružanje mrežnih usluga. [2]

## 2.4. Upravljivi elementi mikromreže

Mikromreža može potencijalno sadržavati postrojenja za uravnoteživanje proizvodnje i potrošnje kao što su upravljiva opterećenja (električni automobil) i spremnici energije koji ili doprinose smanjivanju razmjene energije ili maksimiziraju dobit od trgovanja. [2]



Slika 2.5. Mikromrežni dionici [2]



### 2.4.1. Promjenjivi izvori električne energije

Upravljaljivost promjenjivih OIE je ograničena fizičkom prirodom primarnog izvora energije. Također, ograničavanje proizvodnje iz OIE je nepoželjno zbog velikih investicija i malih troškova pogona te njihovog pozitivnog utjecaja na smanjenje emisije štetnih plinova. Stoga nije preporučljivo ograničavati proizvodnju iz OIE, osim ako ona uzrokuje preopterećenje vodova ili prenapone. [2]

Za strategiju upravljanja promjenjivih OIE može se reći da je prioritarna, odnosno te proizvodne jedinice nisu uključene u dnevni raspored pogona sve dok nemaju štetne posljedice za sustav. Jedinice koje imaju odvojeno sučelje za jalovu od onoga za radnu snagu mogu sudjelovati u regulaciji naponskih prilika mikromreže. [2]

#### Vjetroagregat

U hibridnim mikromrežama uz fotonapon najčešće se integriraju i vjetroagregati. Varijabilnost, odnosno promjenjivost u brzini i smjeru čine vjetar promjenjivim izvorom električne energije. Teorijska snaga vjetra koji prolazi kroz vjetroturbinu ovisi o trećoj potenciji brzine  $v$ , gustoći zraka  $\rho$  te o površini  $A$ . Gustoća zraka ovisi o temperaturi, nadmorskoj visini i vlažnosti. [4]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2-1)$$

Maksimalna teorijski ostvariva snaga vjetroturbine:

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2-2)$$

$C_p$  predstavlja učinkovitost rotora vjetroturbine, odnosno omjer između ekstrahirane snage (na vratilu vjetroturbine) i dostupne snage vjetra. Maksimalna učinkovitost rotora vjetroturbine iznosi 59.3% i naziva se Betzovim limitom. [4]

Snaga vjetroagregata na priključnicama generatora je jednaka:

$$P_{VE} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta_m \eta_e \quad (2-3)$$

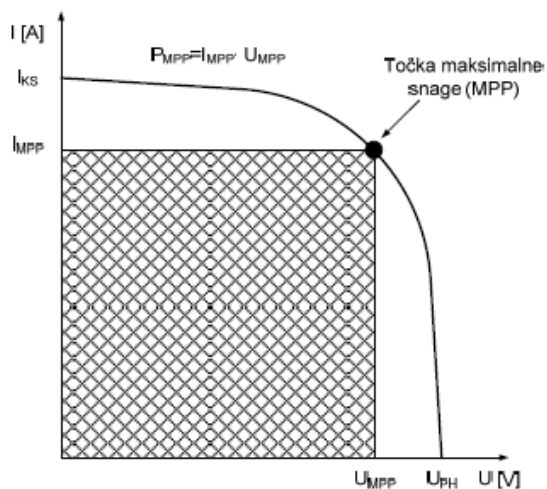
gdje je:

- $\eta_m$  - ukupni mehanički stupanj korisnog djelovanja pogonskog mehanizma
- $\eta_e$  - stupanj korisnog djelovanja električnog generatora

## Fotonaponska pretvorba

Sunčeva energija može se koristiti za proizvodnju isključivo toplinske energije (pasivno ili aktivno solarno grijanje), isključivo električne energije (fotonaponske ćelije) ili za proizvodnju i toplinske i električne energije (solarne termoelektrane). Budući da se u praktičnom dijelu rada koriste fotonaponske (FN) ćelije odnosno fotonaponski (FN) modul dalje u tekstu promatrani su samo utjecaji na tu tehnologiju iskorištavanja sunčevog zračenja.

Svaki fotonaponski modul opisan je svojom strujno-naponskom ( $I-U$ ) karakteristikom. Na njoj se ističu tri karakteristične točke:



1. Točka kratkog spoja
2. Točka praznog hoda (otvorenog kruga)
3. Točka maksimalne snage (MPP)

Slika 2.6. Strujno naponska karakteristika FN modula [4]

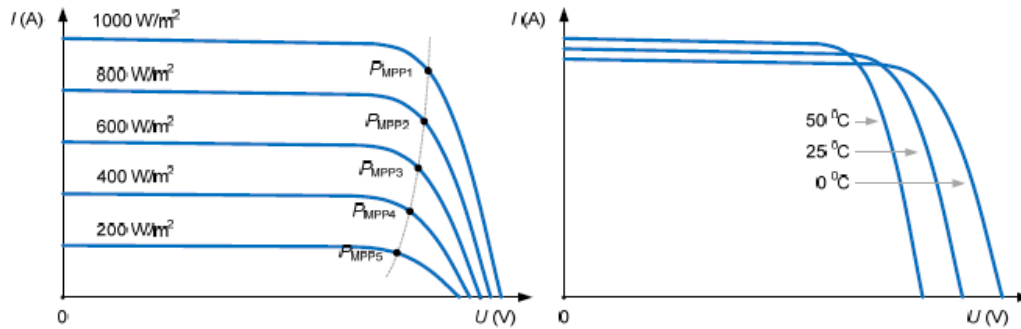
Učinkovitost (stupanj korisnog djelovanja) fotonaponskog modula  $\eta_{FN}$  – omjer električne snage koju može ostvariti FN modul i snage sunčevog zračenja na njegovu površinu i jednak je [4]:

$$\eta_{FN} = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A_{FN}} \cdot 100 \quad (2-4)$$

Gdje je:

- $G$  - snaga sunčevog zračenja [ $W/m^2$ ]
- $A$  - površina FN modula [ $m^2$ ]
- $P_{MPP}$  – nazivna vršna snaga FN modula [W]

Na  $U-I$  karakteristiku odnosno učinkovitost FN modula također utječu intenzitet sunčevog zračenja, temperatura te moguće zasjenjenje. Što je veća snaga sunčevog zračenja  $G$  to će biti i veća proizvedena snaga modula. Također sa povećanjem vanjske temperature odnosno temperature samog modula dolazi do smanjenja snage. [4]



Slika 2.7. Ovisnost I-U karakteristike FN modula o intenzitetu zračenja te o temperaturi [4]

Izlazna snaga može biti drastično smanjena ukoliko je samo mali dio modula zasjenjen. Zasjenjenje samo jedne ćelije FN modula može dovesti do smanjenja izlazne snage za više od 50 %. No, smanjenje izlazne snage može se djelomično smanjiti dodavanjem prenosnih dioda. [4]

#### 2.4.2. Upravljivi mikroizvori i kogeneracijska postrojenja

Kogeneracijska postrojenja s kombiniranim ciklusom omogućavaju kombiniranu proizvodnju topline i električne energije. Za proizvodnju se koriste dvije vrste pogona generatora, u većini slučajeva su to plinska i parna turbina. [4]

Vrste kogeneracijskih postrojenja [4]:

- kombinirani ciklus s protutlačnom turbinom
- kombinirani ciklus s kondenzacijskom turbinom s oduzimanjem pare
- plinska turbina s rekuperacijskim generatorom pare.

Sve tri navedene vrste mogu biti opremljene dodatnim potpaljivanjem kako bi im stupanj djelovanja bio veći te je tim omogućena i veća fleksibilnost u radu samog postrojenja. Proizvodnja vruće vode ili pare može se regulirati neovisno o proizvodnji električne energije zato što plinska turbina regulira izlaznu snagu električne energije, a dodatno paljenje se brine i o količini proizvedene vruće vode ili pare. [4]

Dvije su osnovne primjene ovakvog tipa kogeneracije [4]:

- industrijske proizvodne jedinice – proizvodnja pare za procese u industriji
- toplinske proizvodne jedinice – toplina za područne sustave grijanja.

Zbog poboljšane mogućnosti upravljanja upravljivih mikroizvora, mikromreža s više mikroizvora morati će riješiti tradicionalan problem obvezivanja izvora, a mikromrežni operator će se morati nositi sa puno izraženijim promjenama opterećenja tj. s umanjnim opterećenjem zbog povremene proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. [1]

### 2.4.3 Jedinice za pohranu energije

Uređaji za pohranu energije mogu biti vođeni na temelju opterećenosti, da djeluju na uravnoteženje energije, ili cijene, ovisno o cilju. U isto vrijeme, mogu pružiti rezerve za uravnoteženje u rasponu od kratkoročnih (reda milisekunde do minute) do dugoročnih razdoblja (reda nekoliko sati do nekoliko dana). Jedinice za pohranu energije na DC tehnologiji (baterije, superkondenzatori, itd.) sa pravilno dizajniranim elektroničkim pretvaračima mogu pridonijeti uravnoteženju jalove snage sustava bez značajnih troškova rada. [2]

U praksi najčešći oblik pohrane energije u mikromrežama su baterije koje su također korištene u praktičnom dijelu ovoga rada. U praktičnom dijelu rada korištene su dvije VRLA GEL baterije od 12 V. Riječ je o olovnim baterijama koje su nepropusne i hermetički zatvorene te kod kojih je elektrolit imobiliziran kao gel. Glavne karakteristike ove vrste baterije su dugačak životni vijek i veliki broj ciklusa pražnjenja u odnosu na ostale vrste baterija. Također brzina samopražnjenja je 2% kapaciteta na mjesec pri 20°C, no udvostručava se za svaki porast temperature od 10°C. Visoka temperatura negativno utječe i na životni vijek baterije stoga uređaji kojima se baterije pune moraju pratiti temperaturu baterije i temperaturu okoline i osnovom izmjerenih temperatura optimirati proces punjenja. Tako optimirani proces punjenja neće dodatno, nepotrebno povisivati temperaturu baterije. [5]

### 2.4.4. Upravljanje potražnjom

Upravljanje potražnjom bazirano je na konceptu gdje je kupcima omogućeno da između ponuđenih mjera odaberu onaj koji njima najviše odgovara. Ovaj inovativni paket mjera od strane dobavljača poslat će jasnu poruku potrošačima o važnosti promjene dosadašnjeg korištenja energije. Mjere uključuju [2]:

- vrijeme upotrebe (eng. *Time of use – ToU*) - viša cijena energije za vrijeme vršnih opterećenja, a niža za vrijeme niskih opterećenja (dvotarifni sustav koji je već dostupan u većini članica Europske unije)
- mijenjanje cijene ovisno o potražnji (u stvarnom vremenu) – osciliranje cijene se reflektira na veleprodajne cijene.
- cijene za vrijeme vršnog opterećenja – slično principu na kojem radi *ToU*, ali sa puno većom cijenom kada su veleprodajne cijene visoke ili kada pouzdanost sustava može biti narušena.

Upravljanje potrošnjom korisnika može biti [2]:

- ručno: kupci dobivaju informacije o cijeni na temelju čega odlučuju hoće li i kako promijeniti svoju potrošnju (naredbe je moguće davati daljinski npr. putem mobilnog telefona).
- automatski: potrošnja kupca se mijenja automatski na automatiziranim uređajima koji mogu biti programirani da rade na temelju dobivenih signala bilo tehničkih bilo na temelju cijene. Ova mogućnost se dogovara pri potpisu ugovora sa dobavljačem i to samo za uređaje po želji kupca.

Mjere upravljanja potražnjom ovise o predviđenoj potrošnji te proizvodnji iz OIE koja je promjenjiva te samim time nepredvidiva. Uspješna primjena mjere upravljanja potrošnjom zahtjeva pametna brojila i pametno upravljanje kućanstvima te poslovnim i poljoprivrednim objektima koji se nalaze unutar mikromreže. Mjere upravljanja potrošnjom ne obuhvaćaju sve električne uređaje zbog čega imamo podjelu s obzirom na važnost njihove raspoloživosti na uređaje čiji se rad može odgoditi i na uređaje čiji se rad ne smije odgoditi. Implementacijom mjera upravljanja potrošnjom očekuje se ispunjenje puno potencijala „pametnih kuća“, „pametnih ureda“ i „pametnih farmi“ unutar mikromreže. [2]

### **3. UPRAVLJANJE MIKROMREŽOM**

Glavni pojam koji se veže uz mikromreže je upravljanje. Upravo je mogućnost upravljanja ono što čini razliku između mikromreže i distributivnog sustava s distributivnim izvorima. Ta mogućnost čini mikromrežu upravljivom jedinicom gledano od strane nadređene mreže. U ovom poglavlju naglasak je na načinu upravljanja energijom kao resursom. Kako bi se postigla što veća učinkovitost mikromreže ključno je na učinkovit način njome upravljati, odnosno optimizirati proizvodnju i potrošnju topline, prirodnog plina i električne energije. Važno je imati na umu da je mikromreža sastavni dio tržišta električne energije vođenog od strane pružatelja usluge koji također upravlja različitim distributivnim izvorima te ostalim mikromrežama. [2]

Usklađeno upravljanje velikim brojem distributivnih izvora energije može se postići različitim načinima, od potpuno centraliziranog upravljanja do potpuno decentraliziranog pristupa upravljanju. Odabir načina određuje se ovisno o razini upravljanja koje je moguće glavnim (centralnim) upravljačem odnosno lokalnim upravljačima distributivnih izvora i upravljive potrošnje. U praksi, upravljanje ograničeno dostupnošću komunikacije i računalne opreme predstavlja problem zbog kojega smo primorani odabrati decentralizirani pristup. Problem postaje složeniji sve većim brojem distributivnih izvora i mogućim sukobom interesa njihovih vlasnika. Glavni zadatak ovog poglavlja je predstaviti moguća tehnička rješenja za implementaciju upravljanja. Također, biti će predstavljeni i problemi vezani uz informacijsko komunikacijske tehnologije. [2]

#### **3.1. Funkcije upravljanja**

Prije analize tehničkih specifičnosti sustava upravljanja prikazan je opći pregled funkcija upravljanja u mikromreži. Te funkcije možemo podijeliti u tri grupe, kako je prikazano na tablici 3.1.. Donja razina se odnosi na pojedine komponente i lokalno upravljanje (mikroizvori, pohrana, tereti te elektronička sučelja), srednja razina se odnosi na cjelokupno upravljanje mikromreže, a gornja razina na njenu interkonekciju s nadređenom mrežom. [2]

Tablica 3.1. Opći pregled glavnih kontrolnih funkcija u mikromreži [2]

Mrežno sučelje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• odluka o otočnom radu</li> <li>• sudjelovanje na tržištu</li> </ul>
Mikromrežno upravljanje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• regulacija napona i frekvencije</li> <li>• regulacija djelatne i jalove snage</li> <li>• crni start</li> </ul>
Lokalno upravljanje i zaštita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zaštita</li> <li>• primarna regulacija napona i frekvencije</li> <li>• primarna regulacija djelatne i jalove snage</li> <li>• raspolaganje kapacitetom za skladištenje energije</li> </ul>

### Mrežno sučelje

Svrha mrežnog sučelja jest sudjelovanje na tržištu električne energije, točnije uvoz i izvoz električne energije. Zahvaljujući relativno maloj veličini mikromreže opskrbljivač električne energije može upravljati većim brojem mikromreža te na taj način maksimizirati svoj profit, ali i pružiti usluge nadređenoj mreži. [2]

### Mikromrežno upravljanje

Ova razina upravljanja uključuje sve funkcije unutar mikromreže koje zahtijevaju suradnju više od dva sudionika, kao što su [2]:

- predviđanje opterećenja i dostupnosti OIE
- rasterećenje i upravljanje opterećenjem
- raspoloživost proizvodnih resursa
- sekundarna regulacija napona i frekvencije
- sekundarna regulacija radne i jalove snage
- sigurnosno praćenje
- crni start

Prema mrežnim pravilima distribucijskog sustava donesenima od strane HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o. objavljenom u Narodnim novinama 74/2018 postrojenje i instalacija proizvođača priključeni na mrežu moraju imati sposobnost aktivnog doprinosa održavanju napona unutar propisanih granica, što se ne smatra pomoćnom uslugom. Također, postrojenje i instalacija proizvođača priključeni na mrežu moraju imati mogućnosti pogona s

faktorom snage od 0,9 induktivno do 0,9 kapacitivno. Podešenja regulacije napona proizvođač ne smije mijenjati bez suglasnosti ODS-a. Pomoćne usluge isporuke električne energije u otočnom pogonu, crnog starta te povećanja/smanjenja proizvodnje ODS odabire na temelju tehničkih zahtjeva, uvjeta sigurnosti opskrbe električnom energijom i tržišnim načelima. [6]

### **Lokalno upravljanje i zaštita**

Ova razina upravljanja uključuje sve funkcije koje su dane lokalno i od strane pojedinog distributivnog izvora, jedinice za pohranu ili upravljivog potrošača, kao što su [2]:

- zaštita
- primarna regulacija napona i frekvencije
- primarna regulacija radne i jalove snage
- raspolaganje kapacitetom za skladištenje energije

Važno je napomenuti da su ove funkcije dostupne u normalnom pogonskom stanju dok u kritičnom stanju i stanju hitnih slučajeva mogu biti promijenjene. Normalno pogonsko stanje odnosi se i na otočni rad i rad kada je mikromreža spojena na nadređenu mrežu, ali ne i na prijelazno stanje s jednog na drugi način rada. [2]

### **3.2. Uloga informacijsko komunikacijskih tehnologija**

Informacijsko komunikacijske tehnologije su baza budućih električnih mreža. Upravljanje i rad budućih električnih mreža ,uključujući i mikromreže, ovisit će o informacijskim sustavima te naprednim komunikacijskim mrežama. Trenutno se koristi i testira nekoliko vrsta tehnologija u distributivnim mrežama te se očekuje njihova široka primjena u bliskoj budućnosti. Početna točka svih tehnologija su postojeća rješenja koja se zatim razvijaju i nadograđuju prema potrebama mikromreža. [2]

Glavna tehnološka rješenja su [2]:

#### **Mikroprocesori:**

Suvremeni mikroprocesori imaju široku primjenu unutar mikromreže. Oni omogućuju razvoj energetskih pretvarača te upravljača potrošača i ostalih aktivnih uređaja unutar mikromreže. Zanimljiva karakteristika novijih verzija mikroprocesora je što imaju veliku moć obrade podataka, potrebne komunikacijske mogućnosti i siguran softver i sve to po niskim cijenama.



## **Komunikacija:**

Ovo stoljeće je obilježio razvoj komunikacijskih mreža i sustava. Ove mreže osiguravaju potrebnu povezanost te nude korisnicima više usluga. Očito je da će se aktivno upravljanje mikromrežom temeljiti na postojećoj komunikacijskoj infrastrukturi zbog smanjenja troškova.

## **Softver:**

Servisno orijentirana arhitektura (SOA) je novi trend u komunikacijskim sustavima. Osnova ovog pristupa je mrežna usluga. WorldWideWebConsortium (W3C) definira mrežnu uslugu kao softverski sustav osmišljen kako bi uređaji mogli međusobno komunicirati preko mreže. Postoji više definicija koncepta SOA-e, a u svrhu ovog poglavlja ona se definira kao skup mrežnih usluga organiziranih u više slojeva koji omogućava rješavanje složenih problema. U Europi se za softver postavlja standard IEC61970 koji se bavi sučeljima aplikacijskih programa za sustave upravljanja energijom. Ovim standardom definiran je način integracije aplikacija razvijenih od strane vanjskih sudionika EES-a, razmjena informacija sa sustavim koji trebaju razmjenjivati podatke u realnom vremenu sa sustavom upravljanja energijom, a koji nisu dio njega te pružanje prikladnih sučelja za postojeće i nove sustave.

## ***The internet of energy;***

*The internet of energy* je izraz koji označava korištenje tehnologije za internetsku povezanost koja omogućava izbjegavanje troškova instalacije i održavanja uređaja zaduženih za upravljanje distributivnom proizvodnjom i opterećenjem. S ovakvim pristupom, sve funkcije za upravljanje kućanstvom će biti sadržane u jednom softveru i moći će se koristiti putem uređaja koji imaju mogućnost spajanja na Internet (pametni televizori, pametni telefoni, itd.). Također, pretpostavlja se da će iduće generacije kućanskih aparata biti opremljene s potrebnim sučeljima koja omogućuju daljinsko upravljanje putem kućne mreže.

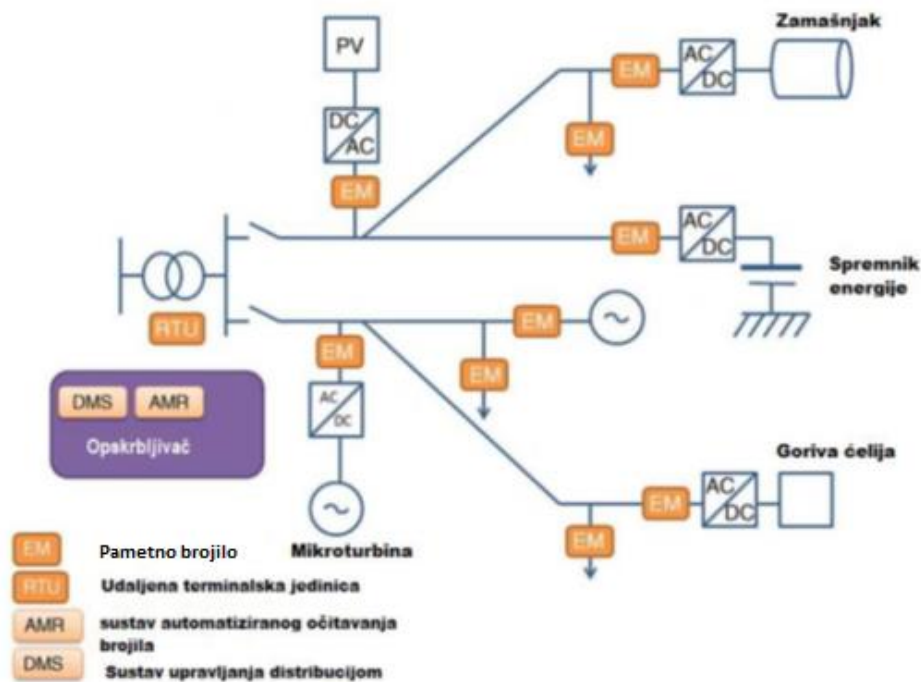
Značajan dio ove tehnologije već postoji: internetska povezanost, IPv6, pametni telefoni, odgovarajući operacijski sustavi, itd. Štoviše, neka kućanstva i danas su već poprilično automatizirana pa imaju napredna kućna kina s internetskom vezom, bežični alarmni sustav, centralnu automatiziranu jedinicu sustava klimatizacije, itd. [2]

## **3.3. Arhitektura upravljanja mikromrežom**

### **3.3.1. Hijerarhijska razina upravljanja**

Ne postoji standard po kojem se izvodi upravljanje mikromrežom budući da ono ovisi o njejoj konfiguraciji te postojećoj infrastrukturi. Prije analize upravljanja mikromrežom proučit ćemo

današnji distributivni sustav. Na slici 3.1. prikazana je struktura upravljanja distributivnog sustava s distributivnom proizvodnjom. Možemo razlikovati distribucijski upravljački sustav (eng. *distribution management system – DMS*) te sustav automatiziranog očitavanja brojila (eng. *automated meter reading system - AMR*). Distribucijski upravljački sustav je uglavnom odgovoran za nadzor glavnih visokonaponskih i srednjenaponskih trafostanica te nekih kritičnih srednjenaponskih i niskonaponski trafostanica. Sklopovlje se sastoji od glavnog servera i nekoliko udaljenih terminala ili inteligentnih elektroničkih uređaja proširenih diljem distribucijskog sustava. Obično sustav upravljanja distribucijom ne kontrolira obnovljive izvore energije (osim onih velike instalirane snage) ni potrošnju. Tipične akcije upravljanja su mrežni preustroj koji se vrši prebacivanjem operacija u glavnom vodu i regulacija napona putem uključanja kondenzatora ili transformatorske preklopke. Sustav automatiziranog očitavanja brojila je odgovoran za prikupljanje elektroničkih očitavanja mjerača te se uglavnom koristi u svrhu naplate. Na slici 3.1. nije uzeto u obzir postojanje napredne mjerne infrastrukture (eng. *advanced meter infrastructure – AMI*) budući da se ona smatra upravljačkim dijelom mikromreže. Pod naprednom mjernom infrastrukturom misli se na mogućnost upravljanja teretom lokalno, bilo izravno preko brojila ili putem kućne mreže u čijem slučaju je elektroničko brojilo računalo koje povezuje više različitih mreža i usmjerava podatke među njima. [2]



Slika 3.1. Struktura upravljanja distribucijskim sustavom [2]

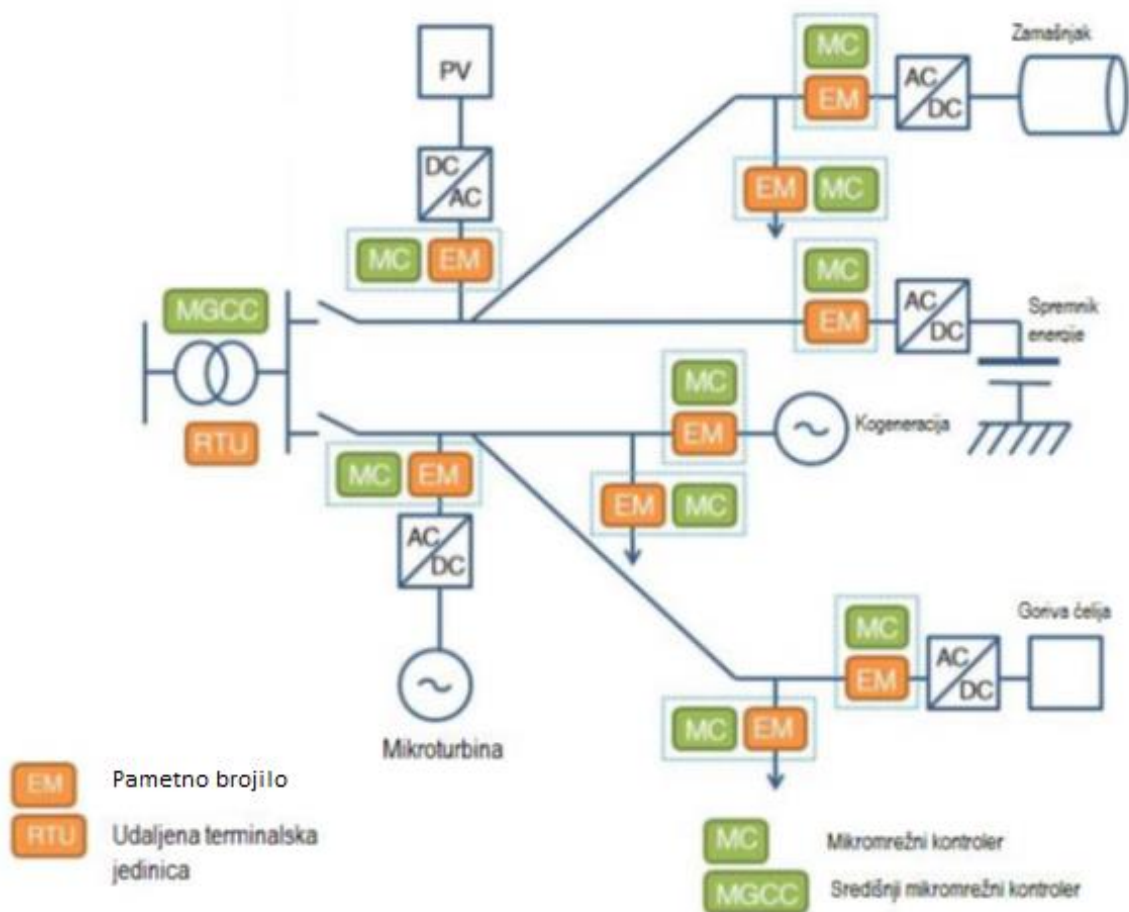
Operator distribucijskog sustava (ODS) je odgovoran za upravljanje i nadzor distribucijskog sustava, ali je također odgovoran i za prikupljanje mjernih podataka o očitanoj energiji, iako u nekim zemljama očitavanje može biti obrađeno od strane neovisnog entiteta. Prikupljene podatke ODS šalje ESCO-u (*energy service company*) koji je tržišni sudionik. [2]

Struktura prikazana na prethodnoj slici 3.1. nije dovoljna za upravljanje mikromrežom jer pruža ograničene kapacitete upravljanja, posebno u tržišnom okruženju. Važno je uspostaviti novu razinu upravljanja opterećenjem i distributivnim izvorima na lokalnoj razini koja bi ispunila sljedeće ciljeve [2]:

- omogućavanje svim mjerodavnim čimbenicima sudjelovanje na tržištu
- prilagodljivost kako bi se omogućila integracija velikog broja korisnika
- dopuštanje integracije komponenti različitih proizvođača što bi dakle označavalo otvorenu arhitekturu
- jednostavnost instaliranja novih komponenti
- jednostavnost integracije novih funkcionalnosti

Korištenjem lokalne razine upravljanja, kompliciranija hijerarhijska struktura je predočena na slici 3.2.. Ona obuhvaća [2]:

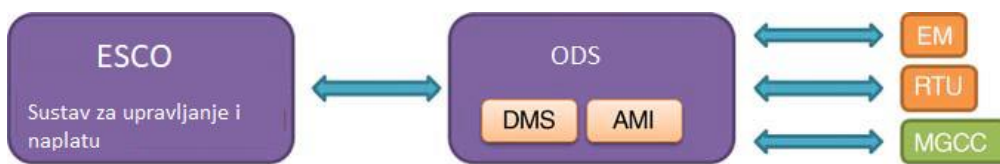
- MC (mikromrežni kontrolor) odgovoran je za upravljanje i nadzor distributivnih izvora energije. MC se može koristiti kao zasebni hardverski uređaj, kao komad softvera instaliran u bilo koje elektronsko brojilo, kao elektronsko sučelje napajano distributivnim izvorima ili kao bilo koji uređaj u polju sa dovoljnim kapacitetima obrade.
- MGCC (središnji mikromrežni kontrolor) pruža glavno sučelje između mikromreže i drugih sudionika kao npr. ODS-a ili ESCO-a. Može imati različite uloge, od glavne odgovornosti za maksimizaciju vrijednosti mikromreže do jednostavne koordinacije lokalnih mikromrežnih kontrolora tako što može osigurati zadane vrijednosti MC-a ili jednostavno pratiti i nadzirati njihov rad. MGCC je smješten u srednjenaponskom ili niskonaponskom razvodnom postrojenju i obuhvaća čitav niz softverskih rutina različitih funkcionalnosti ovisno o svojoj ulozi.



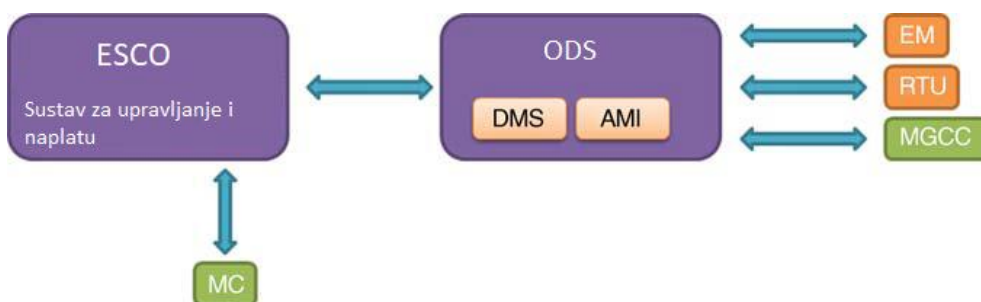
Slika 3.2. Tipična struktura upravljanja mikromrežom [2]

### 3.3.2. Mikromrežni operator

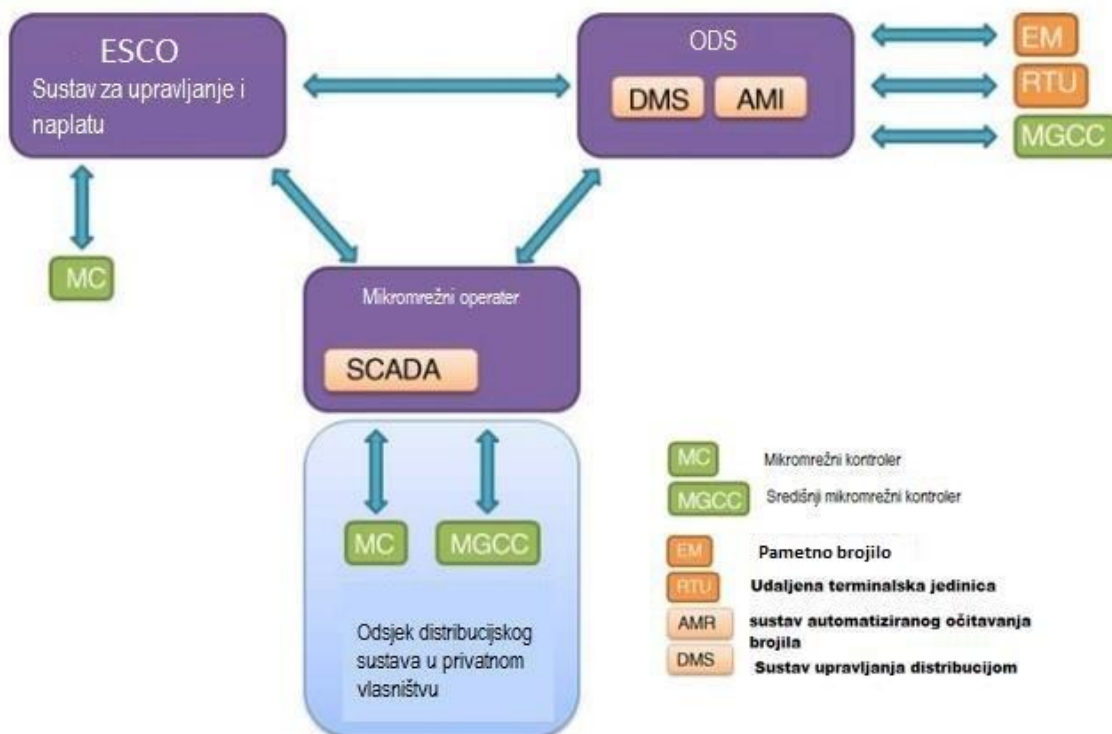
Mikromrežni operator je odgovoran za rad, održavanje i razvoj lokalne niskonaponske mreže koja čini mikromrežu. Mikromrežni operator se može razlikovati ovisno o vrsti mikromreže i ulogama ODS-a i ESCO-a. Prema tome možemo definirati tri glavne konfiguracije mikromrežnog operatora koja su prikazane na slikama 3.3.-3.5. U prvoj konfiguraciji prikazanoj na slici 3.4. ODS upravlja svom distributivnom proizvodnjom te ESCO svoje zahtjeve šalje ODS-u, a ne direktno distributivnim izvorima. U drugoj konfiguraciji prikazanoj na slici 3.5. ESCO ima instaliranu vlastitu opremu u mikromreži putem koje može izravno upravljati barem dijelom distributivnih izvora, a ostatkom preko ODS-a. Treći konfiguracija, prikazana na slici 3.6. predstavlja poseban slučaj kada je dio mikromreže u privatnom vlasništvu te mikromrežni operator upravlja samo tim dijelom mreže. [2]



Slika 3.3. Prva konfiguracija mikromrežnog operatora [2]



Slika 3.4. Druga konfiguracija mikromrežnog operatora [2]



Slika 3.5. Treća konfiguracija mikromrežnog operatora [2]

### 3.4. Centralizirano i decentralizirano upravljanje

Struktura mikromreže prikazana na slici 3.2. može biti upravljana centralizirano ili decentralizirano, ovisno o raspodjeli odgovornosti pojedinih razina upravljanja. U centraliziranom načinu upravljanja glavna zadaća je maksimizirati rad mikromreže što se postiže putem središnjeg mikromrežnog kontrolora (MGCC-a). MGCC na osnovu trenutnih cijena električne energije i plina na tržištu i zahtjeva ODS-a za pomoćnim uslugama i bez narušavanja stabilnosti sustava određuje količinu energije koju će mikromreža uvesti iz nadređene mreže kako bi mogućnosti lokalne proizvodnje i potrošnje bile optimizirane. Takav optimizirani način rada provodi se upravljanjem mikroizvora te upravljivih tereta unutar mikromreže. U tom slučaju, doći će do odgode rada uređaja čiji rad nije prioritetan kada je to isplativo. Također, neophodan je nadzor toka radne i jalove snage. U potpuno decentraliziranom načinu upravljanja glavnu ulogu imaju mikromrežni kontrolori (MC-ovi) koji se međusobno natječu ili surađuju kako bi optimizirali svoju proizvodnju, zadovoljili lokalnu potražnju te omogućili isporuku što više energije u nadređenu mrežu uzimajući u obzir trenutne cijene na tržištu. Ovakav način rada je poželjan kada imamo više različitih vlasnika distributivnih izvora gdje je potrebno donositi pojedine odluke lokalno što bi bila prepreka u slučaju centraliziranog načina upravljanja. Usprkos glavnim ciljevima upravljanja mikromreže, odluka o centraliziranom ili decentraliziranom načinu upravljanja mikromrežom ovisi o dostupnim i pristupačnim resursima: osoblju i opremi. Ova dva načina upravljanja prikazana su na slikama 3.6. i 3.7.. U oba slučaja su dostupne osnovne funkcije poput predviđanja lokalne proizvodnje i potražnje te sigurnosnog nadzora. [2]



Slika 3.6. Centralizirani način upravljanja [2]



Slika 3.7. Decentralizirani način upravljanja [2]

Ova dva načina upravljanja razlikuju se s obzirom na vrijeme izračuna, mogućnost skaliranja i točnost. Tu je važno spomenuti složenost algoritma o kojoj ovisi vrijeme potrebno da algoritam izvrši svoj zadatak. Ovaj izračun povezuje vrijeme provedbe s jednim ili više članova, npr. vrijeme potrebno da se sustav opredijeli za proizvodnju iz neke jedinice ovisi o broju trenutno dostupnih proizvodnih jedinica. Slovo „O“ koristi se za razvrstavanje algoritma prema njihovom odzivu (npr. vremenu obrade, broju izmijenjenih podataka ili zauzeću memorije) na ulaznu veličinu. Na primjer, zamislimo da je potrebno složiti  $n$  brojeva od najmanjega prema najvećemu. Algoritam to izvršava tako da pri svakoj iteraciji uspoređuje i prema zadanom kriteriju mijenja mjesta dva susjedna broja. U ovom slučaju glavni problem je mogući broj iteracija. Ukoliko želimo složiti  $n^2$  brojeva od najmanjega prema najvećemu to znači da će i broj mogućih iteracija biti  $n^2$ . Pa tako je za 10 brojeva maksimalni broj iteracija 100, a za 100 brojeva 10 000 itd. Ovo je važno uzeti u obzir kada uspoređujemo dva načina upravljanja ne samo zbog broja ulaznih veličina već i zbog potrebnog vremena obrade te složenost algoritma. Ključni parametri koji utječu na algoritme upravljanja mikromrežom su [2]:

- Broj petlji: Mikromreža se sastoji od nekoliko mikroizvora i upravljivih tereta čiji broj ima veliki utjecaj na složenost algoritma i njegovo vrijeme provedbe.
- Količina izmijenjenih podataka: Distributivna proizvodnja i tereti unutar mikromreže su na različitim lokacijama. Komunikacijski sustav u niskonaponskoj mreži ima ograničenu propusnost što predstavlja problem u određenim situacijama budući da je

izmjena podataka ključna za provedbu nekih zadataka. U decentraliziranom načinu upravljanja nema toliko izmijenjene podataka budući da se samo mali dio informacija prenosi na hijerarhijski višu razinu upravljanja.

- Veličina i struktura sustava: Struktura i složenost sustava mora se uzeti u obzir. Odluke različitih sudionika mogu ne samo povećati broj petlji nego i uzrokovati dodatna tehnička i netehnička opterećenja za sustav. Pitanje koje se postavlja je koje informacije i na kojoj razini trebaju biti dostupne. Na primjer, informacija o razini napunjenosti baterije može biti važna susjednim distributivnim izvorima dok informacija o unutarnjoj temperaturi i slični tehnički podaci o bateriji njima nisu toliko važni.
- Točnost i optimalnost: Rješenje algoritma može biti približno optimalno ili u potpunosti optimalno. Očito je da točnost i optimalnost rješenja ovise o točnosti korištenog modela te relevantnosti ulaznih podataka. Tu se postavlja pitanje je li prihvatljivo približno optimalno rješenje i ako da, po kojoj je to cijeni.

Centralizirani način upravljanja je pogodniji ako korisnici mikromreže (vlasnici distributivne proizvodnje i tereta) imaju zajedničke ciljeve i međusobno surađuju kako bi ih postigli. Za primjer možemo uzeti industrijsku mikromrežu u kojoj jedan vlasnik može ostvariti potpunu kontrolu svih njegovih izvora energije i tereta koje može konstanto pratiti i na osnovu toga težiti da sustav radi u najekonomičnijem režimu. Ako uzmemo u obzir prije navedene ključne parametre koji utječu na algoritam upravljanja, broj petlji je ograničen te je relativno lako instalirati brzi komunikacijski sustav i potrebne senzore. Također potrebno je naći odgovarajuće osoblje koje će upravljati mikromrežom. Traženo rješenje bi trebalo biti što je moguće točnije budući da o točnosti ovisi konačan profit koji se može ostvariti. [2]

Mikromreže koje se nalaze na tržištu zahtijevaju određeni stupanj neovisnosti i inteligencije pojedine jedinice kako bi se mogle donositi pravovremene odluke u svrhu ostvarenja što većeg profita. Također, vlasnici lokalnih distributivnih izvora mogu imati različite ciljeve: uz prodaju energije u nadređenu mrežu mogu imati i druge, kao što je proizvodnja topline za lokalne potrošače, održavanje lokalne razine napona na određenoj razini ili mogu biti rezerva sustavu u slučaju nastanka problema. Neki potrošači u mikromreži primarno žele smanjiti vlastite troškove, iako bi svi sudionici mogli imati koristi od zajedničkog cilja smanjenja operativnih troškova koje ima ESCO. Na primjer, jedno kućanstvo u mikromreži moglo bi u jednom određenom trenutku imati veće potrebe za električnom energijom, dok drugo kućanstvo možda uopće nema potrebu za električnom energijom jer su svi stanari odsutni. Oba kućanstva bi htjela višak proizvedene energije prodati u nadređenu mrežu, ali vrlo vjerojatno ne bi pristali na



daljinsko upravljanje njihovom proizvodnjom. Ako ponovno uzmemo u obzir ključne parametre koji utječu na algoritam upravljanja vidimo da se u tom slučaju značajno povećava broj petlji. U susjedstvu bi mogla biti nekolicina kućanstava ili distributivnih izvora i ukoliko uzmemo u obzir mogućnost postojanja više povezanih mikromreža taj broj se i dalje povećava. U takvim slučajevima može doći do problema u komunikaciji bilo zbog smanjene propusnosti komunikacijskih kanala ili previsokih troškova za provođenje iste. Stoga je za centralizirani način upravljanja potrebno povećati kapacitet prijenosa podataka te imati dostupne snažne kompjuterske jedinice što izaziva povećanje troškova. [2]

Nadalje, problem optimizacije postaje sve kompleksniji zbog specifičnih zahtjeva. Na primjer, veoma je zahtjevno osmisliti model rada kućanstva bez narušavanja komfora i postaviti tehnička rješenja svih uređaja unutar jednog algoritamskog problema. Stoga decentralizirani način upravljanja predlaže da se problemi ovog tipa rješavaju lokalno, unutar pojedinog kućanstva ili distributivnog izvora. Zato u algoritmu svako kućanstvo je definirano kao teret, koji ima mogućnost promjene, ili kao proizvodnja koja daje određenu količinu energije i kod koje nisu važni tehnički podaci. Pa tako u slučaju decentralizirane proizvodnje prihvatljivo je i rješenje koje nije u potpunosti optimalno budući da nisu potrebne skupe investicije u komunikacijsku infrastrukturu. [2]

Opći zaključak je da je centralizirani način upravljanja pogodniji za sustav koji ima jedan zajednički cilj, a decentralizirani način upravljanja za sustav u kojem sudionici mogu imati različite ciljeve. [2]

## 4. EKSPERIMENTALNA MJERENJA NA RAZLIČITIM TIPOVIMA MIKROMREŽA

U praktičnom dijelu rada izvršena su mjerenja za tri različite vrste mikromreže:

1. DC mikromreža
2. AC/DC mikromreža
3. AC/DC hibridna mikromreža

U sva tri slučaja mjerile su se električne veličine struje, napona i snage u karakterističnim točkama mikromreže kako bi dobili uvid u tokove električne energije između pojedinih elemenata mikromreže. Ovisno o vrsti mikromreže korišteni su različiti elementi koji su detaljnije opisani u potpoglavlju 4.1.. Sva mjerenja provedena su na FERIT-u u laboratoriju za OIE i u gotovo istim uvjetima (intenzitet umjetnog sunčevog zračenja  $G$ , razina napunjenosti baterija te okolna temperatura).

### 4.1. Popis korištene opreme

#### 4.1.1. Regulator punjenja BlueSolar MPPT 75/15

Regulator punjenja povezuje FN module, baterije te DC opterećenje. Njegove glavne karakteristike su: tragač maksimalne snage (*MPPT*), mogućnost spajnja na PC ili slične uređaje kako bi smo vidjeli podatke u realnom vremenu te mogućnost isljučenja spojenog opterećenja kada se baterije isprazne do unaprijed određene vrijednosti napona. Također, omogućava tri razine punjenja: *bulk*, *absorption* i *float*, koje će biti detaljnije objašnjene kod opisa korištenih baterija (potpoglavlje 4.1.2.). Korišteni regulator punjenja prikazan je na slici 4.1., a njegove tehničke karakteristike dane su u tablici 4.1.

U praktičnom dijelu na regulator punjenja bili su spojeni FN modul, DC opterećenje te dvije serijski spojene baterije od 12V. Napon baterija određuje napon regulatora punjenja te spojenog opterećenja i u našem slučaju zbog dvije serijski spojene baterije od 12V iznosi 24V.



Slika 4.1. Regulator punjenja BlueSolar MPPT 75/15

Tablica 4.1. Tehnički podaci regulatora punjenja BlueSolar MPPT 75/15 [7]

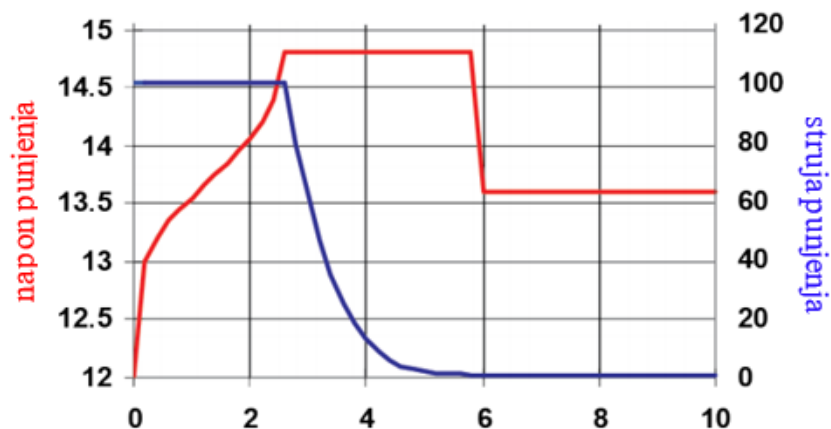
BlueSolar MPPT 75/15	
Napon baterije [V]	24
Struja punjenja [A]	15
Nominalna snaga FN modula [W]	440
Maksimalna struja kratkog spoja FN modula [A]	15
Maksimalni napon praznog hoda FN modula [V]	75
Vlastita potrošnja [mA]	15
Napon punjenja ( <i>absorption</i> ) [V]	28,8
Napon punjenja ( <i>float</i> ) [V]	27,6
Maksimalna konstantna struja opterećenja [A]	15

#### 4.1.2 GEL baterije 12V, 110Ah

Karakteristike ovog tipa baterija ranije su objašnjene u potpoglavlju 2.4.3. Jedinice za pohranu energije. U praktičnom dijelu korištene su dvije serijski povezane baterije GEL 12V, 110Ah prikazane na slici 4.2..Ova vrsta baterija ima tri razine punjenja: *bulk*, *absorption* i *float*. Na *bulk* razini regulator punjenja baterije puni maksimalnom dozvoljenom strujom kako bi se što prije napunile. Zatim slijedi razina *absorption* koja osigurava da se baterija ne bi previše napunila. To se postiže tako da se napon drži konstantnim a struja se mijenja i to tako da se smanjuje što je baterija bliže punom kapacitetu. Razina *absorption* prestaje kada struja punjenja padne ispod 1A i tada nastupa razina *float* unutar koje je napon prilagođen kako bi baterija zadržala puni kapacitet. Razine uz odgovarajuću struju i napon punjenja za ovu vrstu baterija prikazane su na slici 4.3.



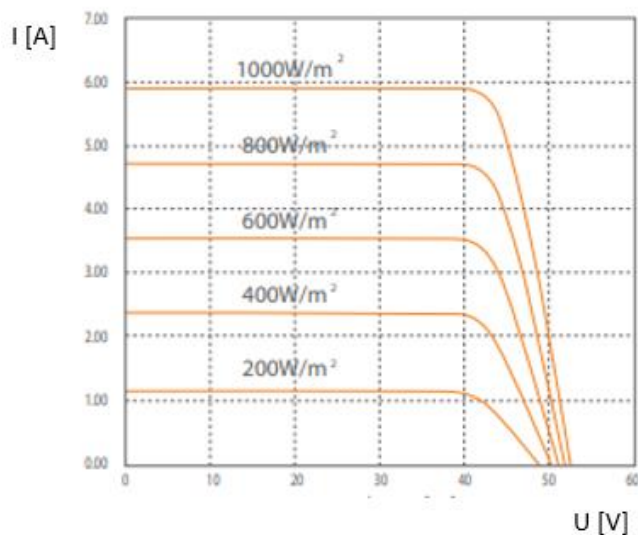
Slika 4.2. GEL baterije 12V, 110Ah



Slika 4.3. Tri razine punjenja GEL baterije 12V, 110Ah [8]

#### 4.1.3. Fotonaponski modul Panasonic VBHN240SE10

Ovaj modul koristi višeslojnu (*HIT*) tehnologiju FN ćelija što znači da se one sastoje od tankog umetka monokristalnog silicija obloženog ultra tankim slojevima amorfnog silicija. Ova tehnologija osigurava veću učinkovitost na višim temperaturama u odnosu na tehnologiju kristalnog silicija. Također ovaj modul nema štetnih emisija te ne proizvodi buku. I-U karakteristika u ovisnosti o intenzitetu sunčevog zračenja prikazana je na slici 4.4., a tehničke karakteristike modula dane su u tablici 4.2..



Slika 4.4. I-U karakteristika FN modula Panasonic VBHN240SE10 ovisno o intenzitetu sunčevog zračenja  $G$  [9]

Tablica 4.2. Tehničke karakteristike FN modula Panasonic VBHN240SE10 [9]

Panasonic VBHN240SE10	
Maksimalna snaga ( $P_{max}$ ) [W]	240
Napon pri maksimalnoj snazi ( $V_{mp}$ ) [V]	43,7
Struja pri maksimalnoj snazi ( $I_{mp}$ ) [A]	5,51
Napon praznog hoda ( $U_{PH}$ ) [V]	52,4
Struja kratkog spoja ( $I_{KS}$ ) [A]	5,85
Dimenzije (d×š×v) [cm]	158×79,8×3,5
Učinkovitost ( $\eta$ ) [%]	19

U praktičnom dijelu korišten je jedan FN modul Panasonic VBHN240SE10 koji je prikazan na slici 4.5.. Modul je bio osvijetljen pomoću umjetnog svjetlosnog izvora pri čemu je intenzitet zračenja  $G$  iznosio  $400 \text{ W/m}^2$  pod  $\alpha 0^\circ$  (mjereno na sredini FN modula pomoću uređaj SOLAR SURVEY200).



Slika 4.5. FN modul Panasonic VBHN240SE10

#### 4.1.4. Otočni izmjenjivač Phoenix 24/800

Otočni izmjenjivač Phoenix 24/800 korišten je samo u AC/DC mikromreži. AC kraj izmjenjivača spojen je na AC trošilo, a DC kraj je spojen na baterije. Prikazan je na slici 4.6., a njegove tehničke karakteristike dane su u tablici 4.3..

Tablica 4.3. Tehničke karakteristike izmjenjivača Phoenix 24/800 [10]

Phoenix 24/800	
Maksimalna prividna snaga na AC priključnicama pri 25°C ( $S_{AC}$ ) [VA]	800
Maksimalna radna snaga na AC priključnicama pri 25°C/40°C ( $P_{AC}$ ) [W]	700/650
Vršna snaga ( $P_{max}$ ) [W]	1600
Izlazni AC napon ( $U_{AC}$ ) [V]	230 +/-3%
Raspon ulaznog napona ( $U_{DC}$ ) [V]	18,4 - 34,0
Maksimalna učinkovitost ( $\eta$ ) [%]	93
Vlastita potrošnja [W]	6



Slika 4.6. Otočni izmjenjivač Phoenix 24/800

#### 4.1.5. Izmjenjivač/punjač Multiplus Compact 24/800/16

Izmjenjivač/punjač Multiplus Compact 24/800/16 prikazan na slici 4.7. ima funkciju izmjenjivača koji daje čisti sinusni oblik te funkciju punjača baterije. Na njegovu AC može se spojiti generator kao dodatan izvor energije ili se može spojiti na nadređenu mrežu, a na njegovu DC stranu spajaju se baterije te ima i AC izlaz na kojega se spajaju AC trošila. Ima dva režima rada: izmjenjivač/punjač ili samo punjač.



Slika 4.7. Izmjenjivač/punjač Multiplus Compact 24/800/16

Ovaj izmjenjivač omogućava četiri razine punjenja baterije: *bulk*, *absorption*, *float* i *storage*. Prve tri razine objašnjene su u potpoglavlju 4.1.2.. Razina *storage* osigurava duži vijek baterije uz manje održavanja. Ova razina nastupa ako unutar 24 nije došlo do pražnjenja baterije odnosno potrošnje pohranjene energije. Tada dolazi do dodatnog smanjenja napona *float* razine na vrijednost 13,2V za 12V bateriju čime se smanjuje emisija plinova te korodiranje pozitivnih (+) priključnica. Ukoliko baterija ostane u ovom stanju onda se jednom tjedno napon diže na razinu *absorption* kako bi se izjednačio napon svih ćelija.

U praktičnom dijelu rada ovaj izmjenjivač/punjač je korišten u AC/DC hibridnoj vrsti mikromreže i to u dva slučaja: kada je spojen na mrežu odnosno kada imamo dodatni izvor energije te kada je odspojen sa mreže. U oba slučaja radio je u modu rada: izmjenjivač/punjač. Također na AC izlazu je spojeno AC opterećenje, a na DC strani izmjenjivača punjača spojene su baterije. Tehnički podaci ovog izmjenjivača punjača dani su u tablici 4.4..

Tablica 4.4. Tehničke karakteristike izmjenjivača/punjača Multiplus Compact  
24/800/16 [11]

Multiplus Compact 24/800/16	
Raspon ulaznog napona ( $U_{DC}$ ) [V]	19 - 33
Izlazni napon ( $U_{AC}$ ) [V]	230 +/- 2%
Frekvencija (f) [Hz]	50 +/- 0,1%
Maksimalna prividna snaga na AC priključnicama pri 25°C ( $S_{AC}$ ) [VA]	800
Maksimalna radna snaga na AC priključnicama pri 25°C/40°C/65°C ( $P_{AC}$ ) [W]	700/650/400
Vršna snaga ( $P_{max}$ ) [W]	1600
Maksimalna učinkovitost ( $\eta$ ) [%]	94
Vlastita potrošnja [W]	10
Raspon ulaznog napona ( $U_{AC}$ ) [V]	187 - 265
Raspon ulazne frekvencije (f) [Hz]	45 - 65
Napon punjenja ( <i>absorption</i> ) [V]	28,8
Napon punjenja ( <i>float</i> ) [V]	27,6
Napon na razini <i>storage</i> [V]	26,4
Struja punjenja baterije [A]	16
Senzor za mjerenje temperature baterije	da

#### 4.1.6. Mjerni instrumenti

##### Multimetar Metrix PX 120/ PX 110

Oba multimetra predviđena su za ispitivanje instalacija kategorije 3 (CAT III) gdje naponi ne prelaze 600 V (AC/DC). Instalacije u CAT III sadrže uređaje veće snage te u njima može doći do tranzijentne pojave prenapona visoke razine

Njihova mjerna područja su:

- za izmjenični (AC) napon: od 500mV do 600V (RMS)
- za istosmjerni (DC) napon: od 500mV do 600V
- za izmjeničnu (AC) struju: od 10mA do 10A
- za istosmjernu (DC) struju: od 10mA do 10 A



- za istosmjernu (DC) radnu snagu do 6kW
- za izmjeničnu (AC) radnu snagu do 6kW

Tablica 4.5. Preciznosti mjerenja napona, struje i snage multimetra Metrix PX 120/ PX 110  
[12]

Preciznost mjerenja napona	600 V	
Izmjenični (AC) napon	0,5% od očitavanja +/- 2 digita	
Istosmjerni (DC) napon	1% od očitavanja +/-3 digita	
Preciznost mjerenja struje	2 A	10 A
Izmjenična (AC) struja	0,7 % od očitavanja +/-5 digita + 1mA	0,7 % od očitavanja +/-5 digita
Istosmjerna (DC) struja	1,5% od očitavanja +/-5 digita + 1mA	1,5% od očitavanja +/-5 digita
Preciznost mjerenja radne snage	1000W	6kW
Pri 50 Hz	1,5% od očitavanja +/-2 digita	1,5% od očitavanja +/-5 digita
Istosmjerno (DC)	2,5% od očitavanja +/-5 digita	2,5% od očitavanja +/-5 digita

### Multimetar PeakTech 3320

Multimetar je predviđen za ispitivanje instalacija CAT III i CAT II. Instalacije CAT II su kućne instalacije u kojima se mogu pojaviti tranzijentne pojave prenapona srednje razine.

Njegova mjerna područja su:

- za izmjenični (AC) napon: od 600mV do 600V (RMS)
- za istosmjerni (DC) napon: od 600mV do 600V
- za izmjeničnu (AC) struju: od 10mA do 10A
- za istosmjernu (DC) struju: od 10mA do 10 A

Tablica 4.6. Preciznosti mjerenja napona i struje multimetra PeakTech 3320 [13]

Preciznost mjerenja napona	600 V
Izmjenični (AC) napon	+/- (1,5% od očitavanja +10 digita)
Istosmjerni (DC) napon	+/- (1,2% od očitavanja +2 digita)
Preciznost mjerenja struje	10 A
Izmjenična (AC) struja	+/- (3 % od očitavanja +5 digita)
Istosmjerna (DC) struja	+/- (2,5% od očitavanja +5 digita)

#### 4.1.7. Opterećenja

Kao opterećenja korišteni su klizni otpornici CONTREX čije su tehničke karakteristike dane u tablici 4.7., a prikazani su na slikama 4.8.



a)

b)

c)

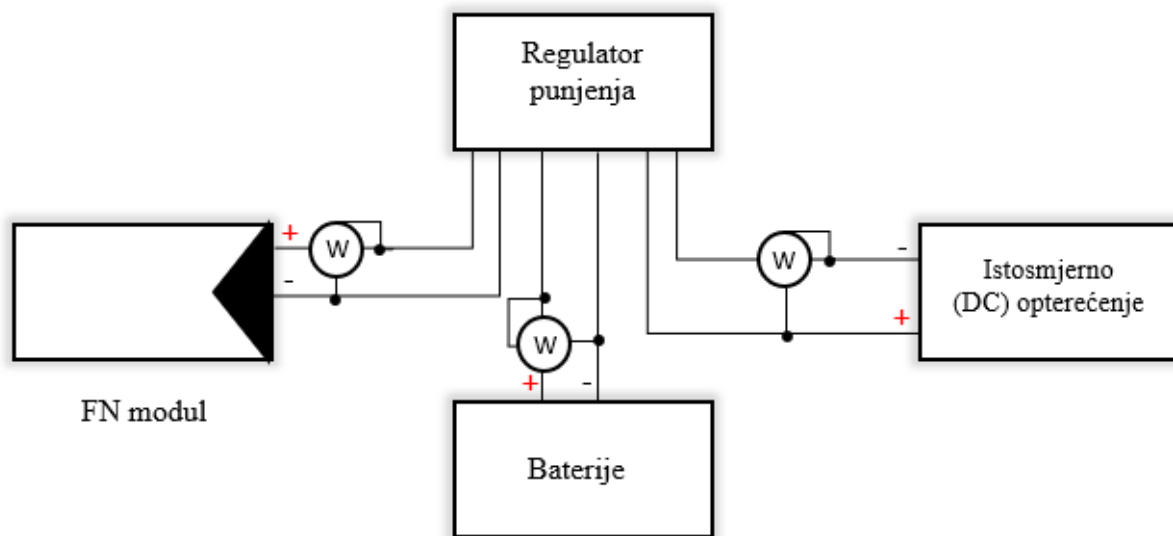
Slika 4.8. Korištena opterećenja: a) izmjenično, b) i c) istosmjerno

Tablica 4.7. Korištena opterećenja

Izmjenično (AC) opterećenje	Istosmjerno (DC) opterećenje	
CONTREX klizni otpornik		
3300Ω – 0,31 A; $I_{max} = 0,44A/15 \text{ min}$	1000Ω – 0,57 A; $I_{max} = 0,8A/15 \text{ min}$	33Ω – 3,1 A; $I_{max} = 4,4A/15 \text{ min}$

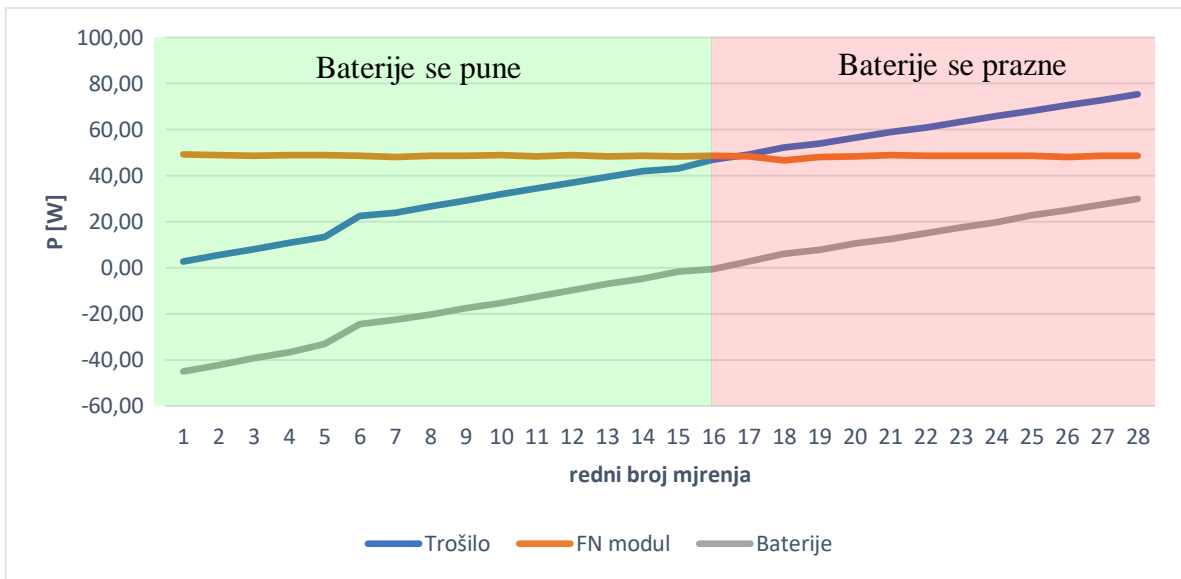
## 4.2. Istosmjerna (DC) mikromreža

Otočna istosmjerna (DC) mikromreža prikazana je na slici 4.9.. Ova vrsta mikromreže sastoji se od regulatora punjenja, FN modula, baterija i istosmjernog (DC) opterećenja. Napon baterija određuje napon regulatora punjenja i on u našem slučaju iznosi 24V. Tim naponom definiran je i napon istosmjernog (DC) opterećenja čije se tehničke karakteristike nalaze u tablici 4.7.. Regulator punjenja nadzire stanje napunjenosti baterija, vrši njihovo punjenje/praznjenje te osigurava napajanje trošila. Također osigurava kako ne bi došlo do prevelike ispražnjenosti ili napunjenosti baterija.



Slika 4.9. Shema spoja istosmjernne (DC) mikromreže

Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno opterećenje, a višak se pohranjuje u baterije. U slučaju većeg opterećenja od proizvodnje iz FN modula razlika potrebne električne energije pokriva se iz baterija. Iz toga zaključujemo da istosmjerna (DC) mikromreža ima dva režima rada ovisno o opterećenju (graf 4.1.): dok je opterećenje manje od proizvodnje iz FN modula baterije se pune (zeleno osjenčani dio grafa) i kada je opterećenje veće od proizvodnje iz FN modula pa je potrebna energija iz baterija (crveno osjenčani dio grafa). Mjerenje je provedeno u dvadeset i osam točaka od struje opterećenja 0,1 A do struje opterećenja 3A s porastom od 0,1A u svakoj točki mjerenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.1..

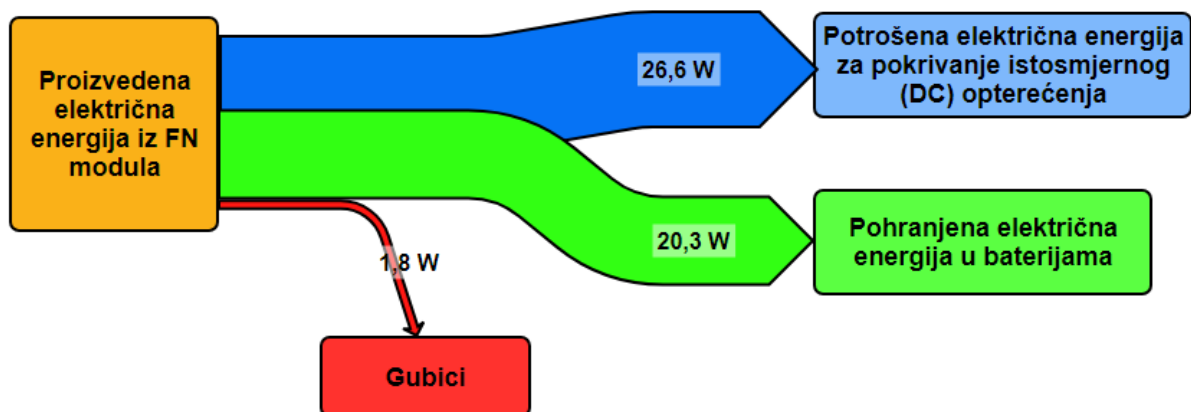


Graf 4.1. Snaga pojedinih elemenata istosmjerne (DC) mikromreže

Mjerenjem električnih veličina struje, napona i snage FN modula, trošila i baterija možemo ustanoviti koliki su gubici električne energije odnosno energetske bilancu proizvedene električne energije iz FN modula, tokove energije između pojedinih elemenata mikromreže te kolika je vlastita potrošnja i učinkovitost regulatora punjenja. Na slici 4.10. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu istosmjerne (DC) mikromreže za radnu točku čiji se podaci nalaze u tablici 4.8..

Tablica 4.8. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata istosmjerne (DC) mikromreže

Trošilo			FN modul			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
26,6	1,002	26,6	43,3	1,126	48,7	26,7	-0,760	-20,3



Slika 4.10. Sankey dijagram energetske bilance istosmjerne DC mikromreže [14]

Učinkovitost regulatora punjenja dobiva se iz omjera dobivene i uložene energije. U režimu kada se baterije pune dobivenu energiju čine energija koja se pohranjuje u baterije te energija koja se troši za pokrivanje opterećenja, a uložena energija je ona koju proizvodi FN modul. Za primjer je uzeta jedna radna točka unutar režima punjenja baterija. Učinkovitost regulatora punjenja za radnu točku čije se električne veličine nalaze u tablici 4.8. iznosi:

$$\eta_{RP} = \frac{P_T + P_{BAT}}{P_{FN}} \cdot 100 = \frac{26,6 + 20,3}{48,7} \cdot 100 = 96,304\% \quad (4-1)$$

U režimu kada se baterije prazne dobivenu energiju čini energija koja se troši za pokrivanje opterećenja, a uložena energija je ona dobivena iz FN modula i baterija. Za primjer je uzeta jedna radna točka unutar režima punjenja baterija.

Tablica 4.9. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata istosmjerne (DC) mikromreže

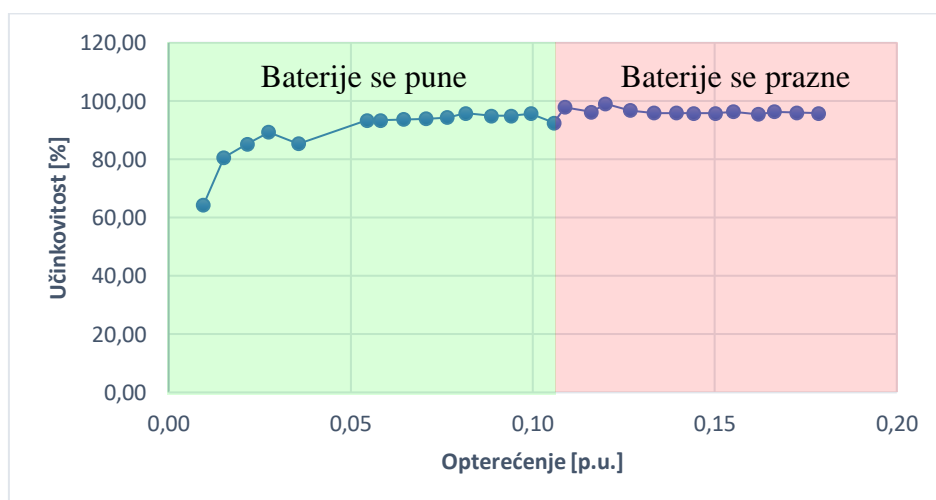
Trošilo			FN modul			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
25,3	2,690	68,1	42,6	1,138	48,5	25,6	0,889	22,8

Učinkovitost regulatora punjenja za radnu točku čije se električne veličine nalaze u tablici 4.9.

iznosi:

$$\eta_{RP} = \frac{P_T}{P_{FN} + P_{BAT}} \cdot 100 = \frac{68,1}{48,5 + 22,8} \cdot 100 = 95,511\% \quad (4-2)$$

Iz izmjerenih podataka unutar oba režima rada istosmjerne (DC) mikromreže dobiven je graf 4.2. na kojemu je prikazana učinkovitosti regulatora punjenja u ovisnosti o udjelu istosmjernog (DC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u per unit (p.u.) vrijednostima.

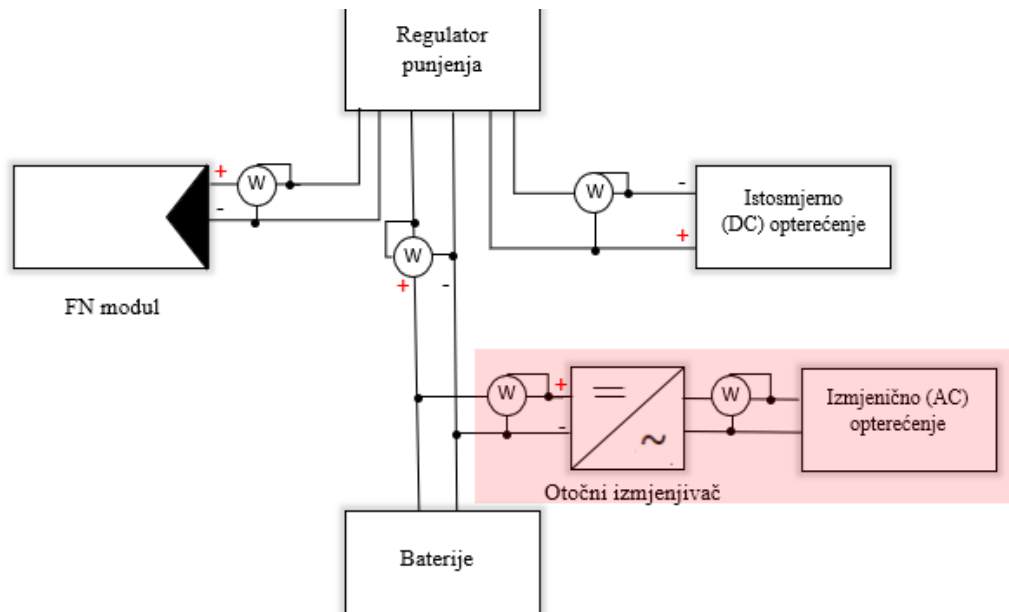


Graf 4.2. Učinkovitosti regulatora punjenja za oba režima rada u ovisnosti o udjelu istosmjernog (DC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u p.u. vrijednostima

Iz grafa 4.2. vidi se da učinkovitost regulatora punjenja ne ovisi o režimu rada mikromreže te u prosjeku iznosi oko 96%. U prvih nekoliko radnih točaka učinkovitost regulatora punjenja je nešto manja zbog malog opterećenja.

### 4.3. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža

Na slici 4.11. nalazi se shema spoja izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem s naznačenim karakterističnim točkama mjerenja električnih veličina napona, struje i snage kako bi se mogli utvrditi tokovi električne energije između pojedinih elemenata mikromreže te opterećenje i učinkovitost otočnog izmjenjivača. Opterećenje i učinkovitost regulatora punjenja je jednako kao i u istosmjernoj (DC) mikromreži budući da je ona u ovom slučaju samo nadograđena izmjeničnim (AC) dijelom.



■ izmjenični (AC) dio nadograđen na postojeću DC mikromrežu

Slika 4.11. Shema spoja izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem

S obzirom na vrstu opterećenja obrađeni su sljedeći slučajevi:

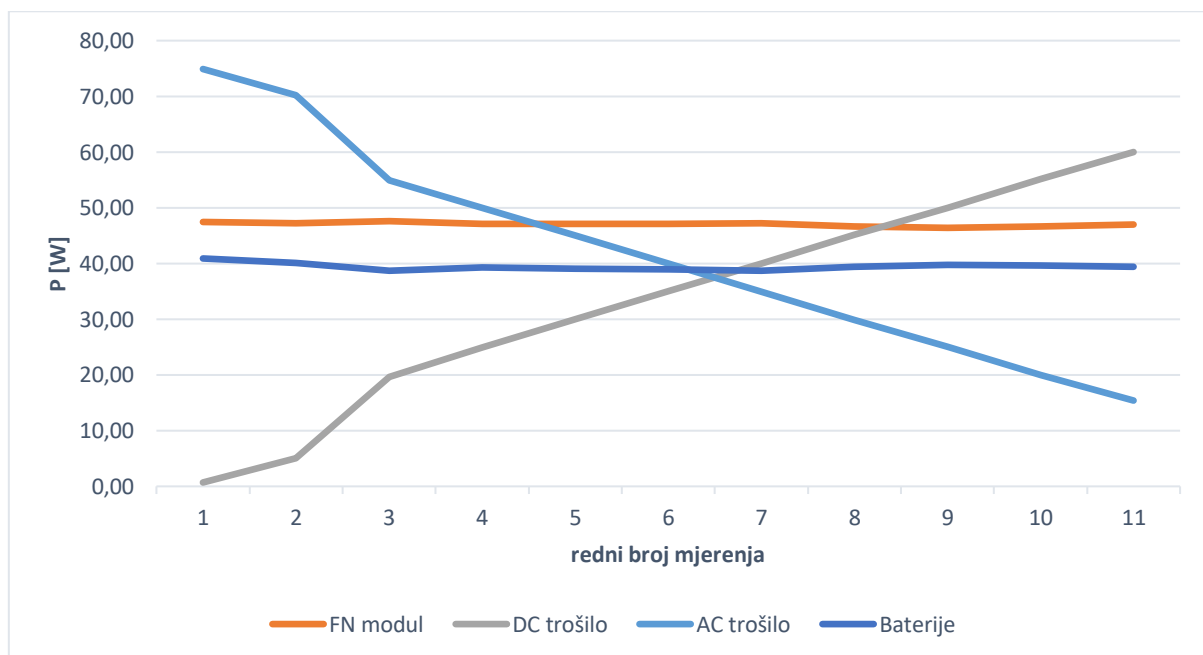
1. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem
2. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža sa samo izmjeničnim (AC) opterećenjem

### 4.3.1. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem

U ovome slučaju provedeno je mjerenje prema shemi spoja na slici 4.11.. Mjerenje je provedeno u jedanaest točaka i to na način da je ukupno opterećenje uvijek iznosilo 75W, a mijenjani su udjeli istosmjernog (DC) odnosno izmjeničnog (AC) opterećenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.2..

Iz grafa 4.3. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno opterećenje, a potrebna razlika nadoknađuje se iz baterija. Budući da su ovom slučaju iznosi proizvodnje iz FN modula (oko 47W) te opterećenja (oko 75W) konstantni onda je i potrebna energija iz baterija konstantna (oko 40 W). Ovisno o udjelu istosmjernog (DC) odnosno izmjeničnog (AC) opterećenja mijenja se opterećenje a samim time i učinkovitost regulatora punjenja odnosno otočnog izmjenjivača.

Prema shemi na slici 4.11. imamo pet karakterističnih točaka mjerenja, dok su na grafu prikazane četiri radi jednostavnijeg razumijevanja. Stoga su zbrojeni ulazni tok električne energije iz smjera regulatora punjenja ka baterijama te izlazni tok električne energije iz smjera baterija ka DC strani izmjenjivača dok su pri računanju učinkovitosti otočnog izmjenjivača korišteni rezultati mjerenja dobiveni na DC strani otočnog izmjenjivača.

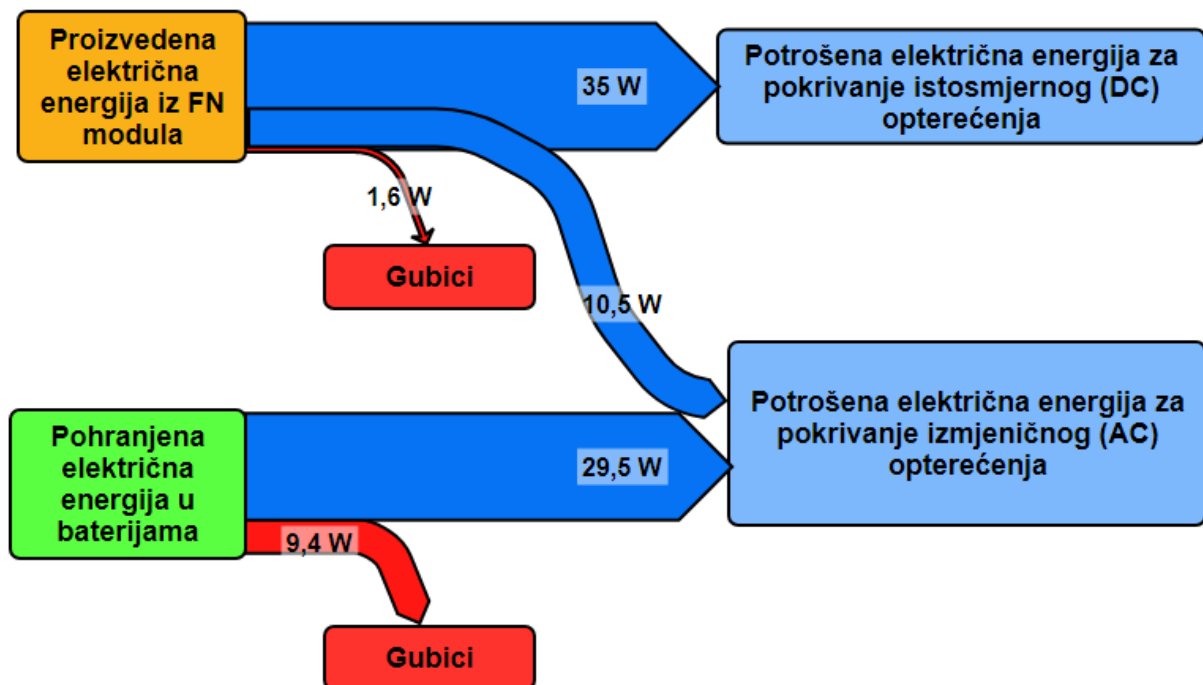


Graf 4.3. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem

Na slici 4.12. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem. Za primjer je uzeta radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.10.

Tablica 4.10. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem

Baterije			FN modul			AC trošilo			DC trošilo		
I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]
1.879	25,6	38,9	1,083	43,5	47,1	0,173	230,9	40,0	1,404	25,0	35,0



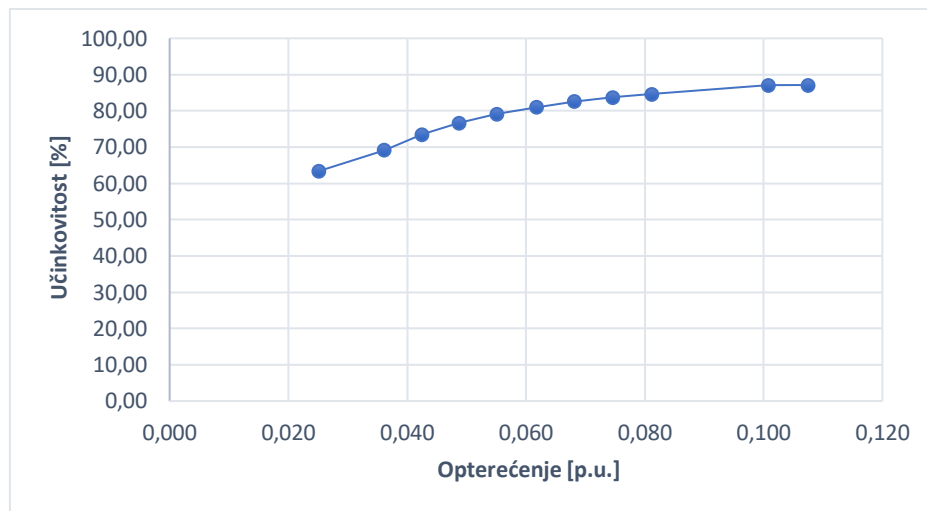
Slika 4.12. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem [14]

Učinkovitost otočnog izmjenjivača dobije se iz omjera dobivene i uložene energije. U ovom slučaju dobivena energija jest ona koja se potroši kako bi se pokrilo izmjenično (AC) opterećenje, a uložena energija je ona koju izmjenjivač izvlači iz baterija. Za primjer je uzeta šesta točka mjerenja iz priloga P2.

$$\eta_{izmjenjivača} = \frac{P_{T,AC}}{P_{DC,izmjenjivača}} \cdot 100 = \frac{40,0}{49,4} \cdot 100 = 80,971\% \quad (4-3)$$



Izračunom učinkovitosti izmjenjivača u preostalim radnim točkama dobiven je graf 4.4. na kojemu je prikazana učinkovitost otočnog izmjenjivača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u per unit (p.u.) vrijednostima.



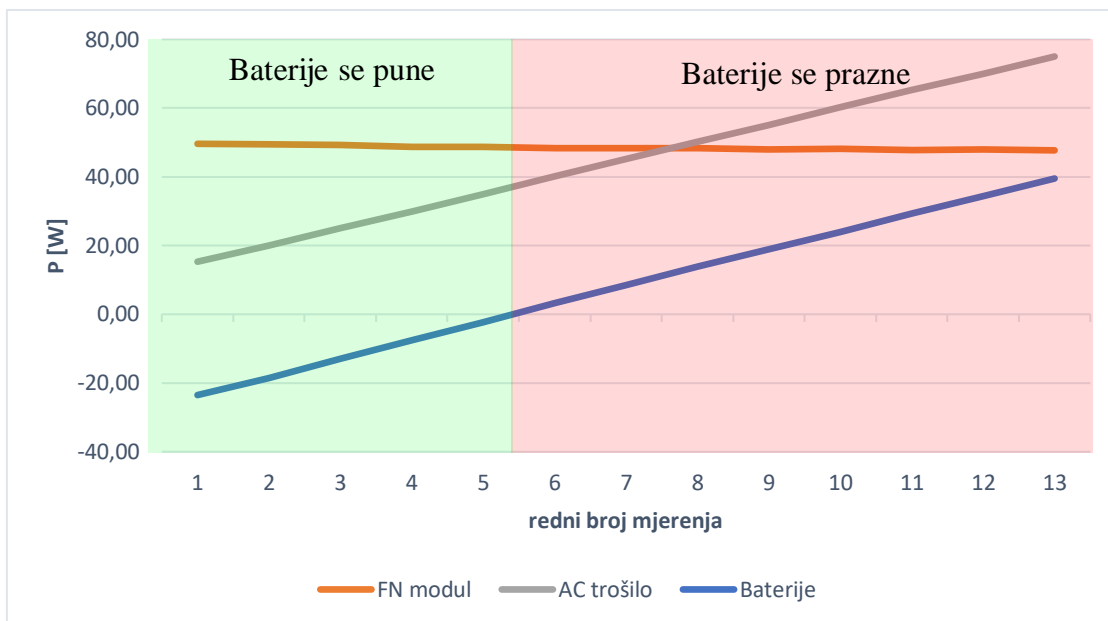
Graf 4.4. Učinkovitost otočnog izmjenjivača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u p.u. vrijednostima.

Iz grafa 4.4. vidi se da s porastom izmjeničnog (AC) opterećenja raste i učinkovitost otočnog izmjenjivača. Također, vidimo da nije dostigao svoju maksimalnu učinkovitost od 93%. Razlog tome je malo opterećenje s obzirom na njegovu nazivnu snagu. U početnoj točki opterećen je sa otprilike 3%, a u krajnjoj sa otprilike 11% nazivne snage.

#### **4.3.2. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromreža sa samo izmjeničnim (AC) opterećenjem**

U ovome slučaju shema spoja sa slike 4.11. vrijedi ukoliko zanemarimo istosmjerno (DC) opterećenje. Mjerenje je provedeno u trinaest točaka od snage izmjeničnog (AC) opterećenja 15W do 75W s porastom od 5W u svakoj točki mjerenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.3..

Iz grafa 4.5. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno izmjenično (AC) opterećenje. U slučaju opterećenja manjeg od proizvodnje iz FN modula višak energije se pohranjuje u baterije, a kada je opterećenje veće od proizvodnje iz FN modula tada se ta razlika nadoknađuje iz baterija. Kao i u prethodnom slučaju i ovdje su zbrojeni ulazni tok električne energije iz smjera regulatora punjenja ka baterijama te izlazni tok električne energije iz smjera baterija ka DC strani izmjenjivača.

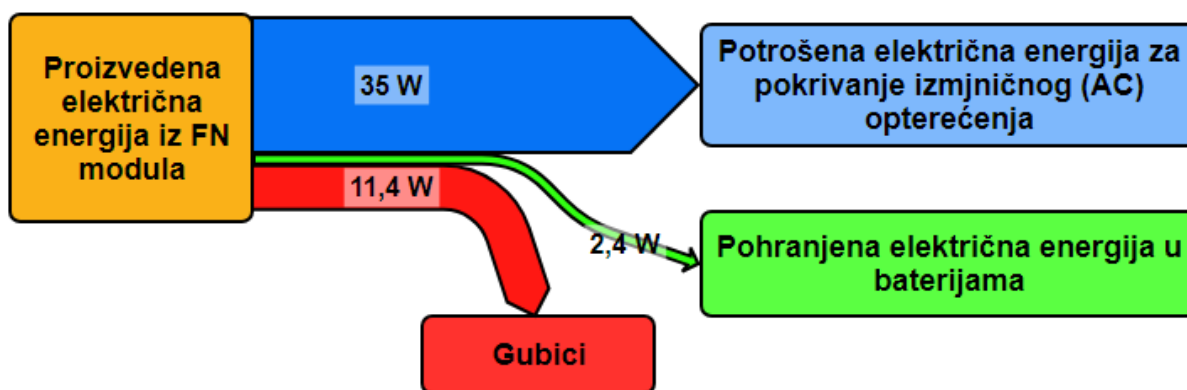


Graf 4.5. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa izmjeničnim (AC) opterećenjem

Na slici 4.13. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa izmjeničnim (AC) opterećenjem. Za primjer je uzeta radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.11..

Tablica 4.11. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa izmjeničnim (AC) opterećenjem

Baterije			FN modul			AC trošilo		
I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]
-0,185	25,6	-2,4	1,095	44,5	48,8	0,152	230,3	35,0

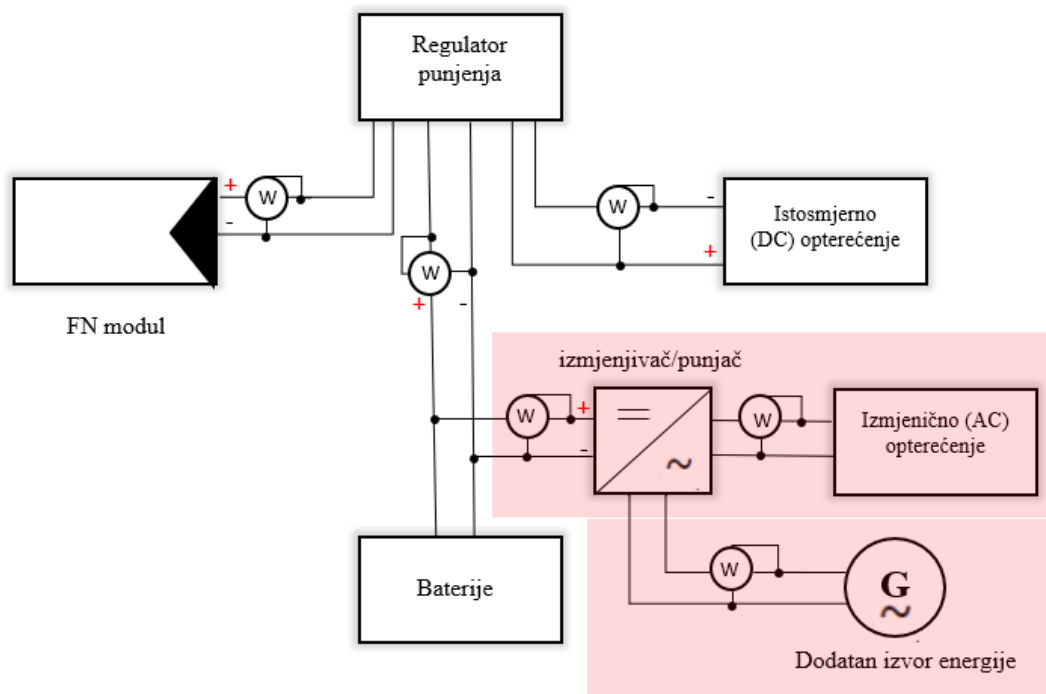


Slika 4.13. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa izmjeničnim (AC) opterećenjem [14]

Učinkovitost otočnog izmjenjivača ovisi samo o izmjeničnom (AC) opterećenju tako da i za ovaj slučaj vrijedi graf 4.4..

#### 4.4. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža

Na slici 4.14. nalazi se shema spoja izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem sa karakterističnim točkama mjerenja električnih veličina napona, struje i snage kako bi se mogli utvrditi tokovi električne energije između pojedinih elemenata mikromreže te opterećenje i učinkovitost izmjenjivača/punjača. Opterećenje i učinkovitost regulatora punjenja je jednaka kao i u istosmjernoj (DC) mikromreži budući da je ona u ovom slučaju samo nadograđena izmjeničnim (AC) dijelom. U našem slučaju dodatan izvor energije je električna energija iz mreže.



■ izmjenični (AC) dio nadograđen na postojeću DC mikromrežu

Slika 4.14. Shema spoja izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem

S obzirom na to da li je izmjenjivač/punjač spojen ili odspojen sa mreže te s obzirom na vrstu opterećenja obrađeni su sljedeći slučajevi:

1. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu i ima samo istosmjerno (DC) opterećenje

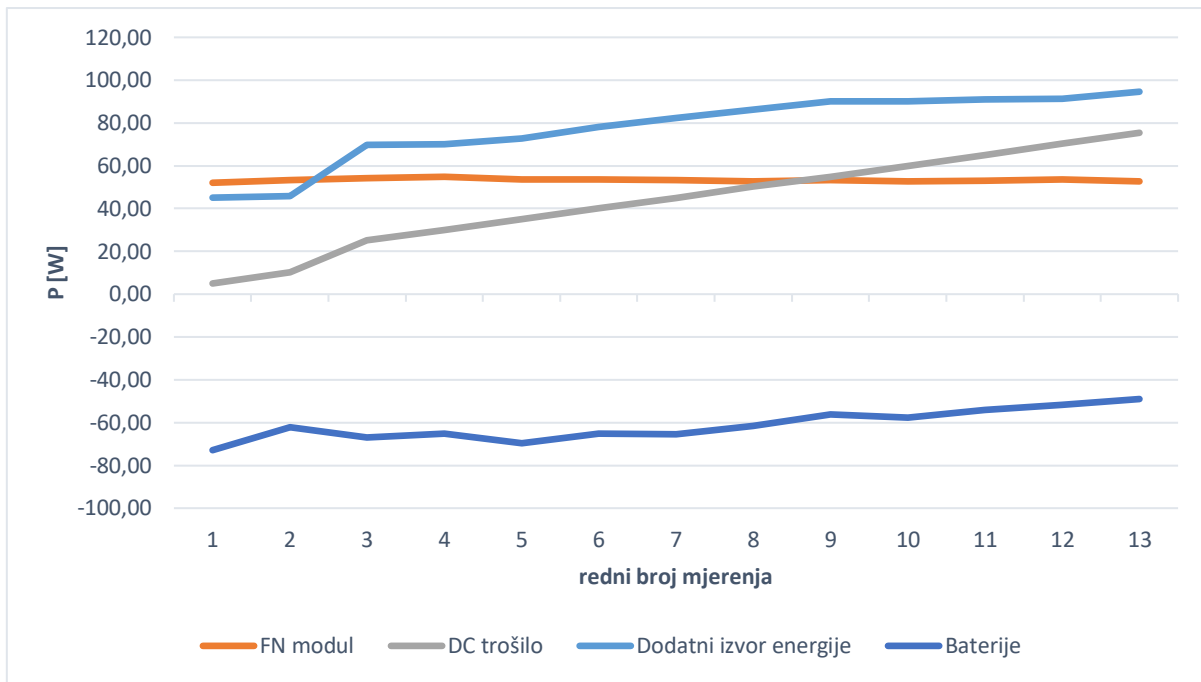
2. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje
3. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje
4. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje
5. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

Izostavljen je slučaj kada imamo samo istosmjerno (DC) opterećenje i kada je izmjenjivač/punjač odspojen s mreže (nemamo dodatan izvor električne energije) jer je to slučaj istosmjerne (DC) mikromreže čija je analiza obrađena u potpoglavlju 4.2.. Jedino što u tome slučaju imamo veće gubitke zbog vlastite potrošnje izmjenjivača/punjača. Za slučajeve kada imamo samo izmjenično (AC) te kada imamo i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje, a izmjenjivač/punjač je također odspojen s mreže (nemamo dodatan izvor električne energije) provedena su mjerenja budući da imamo drugu vrstu pretvarača.

#### **4.4.1. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu i ima samo istosmjerno (DC) opterećenje**

U ovome slučaju shema spoja sa slike 4.14. vrijedi ukoliko izostavimo izmjenično (AC) opterećenje. Tada nam izmjenjivač/punjač radi samo kao punjač. Mjerenje je provedeno u trinaest točaka od istosmjernog (DC) opterećenja snage 5W pa do 75W s porastom od 5W u svakoj točki mjerenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.4..

Iz grafa 4.6. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula, a dodatni izvor energije (mreža) preko izmjenjivača/punjača puni baterije. U slučaju opterećenja manjeg od proizvodnje iz FN modula višak energije se pohranjuje u baterije, a kada je opterećenje veće od proizvodnje iz FN modula tada se razlika nadoknađuje iz baterija. U ovome slučaju su zbrojeni su ulazni tokovi električne energije iz smjera regulatora punjenja te iz smjera dodatnog izvora energije (mreže) ka baterijama.



Graf 4.6. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo istosmjerno (DC) opterećenje

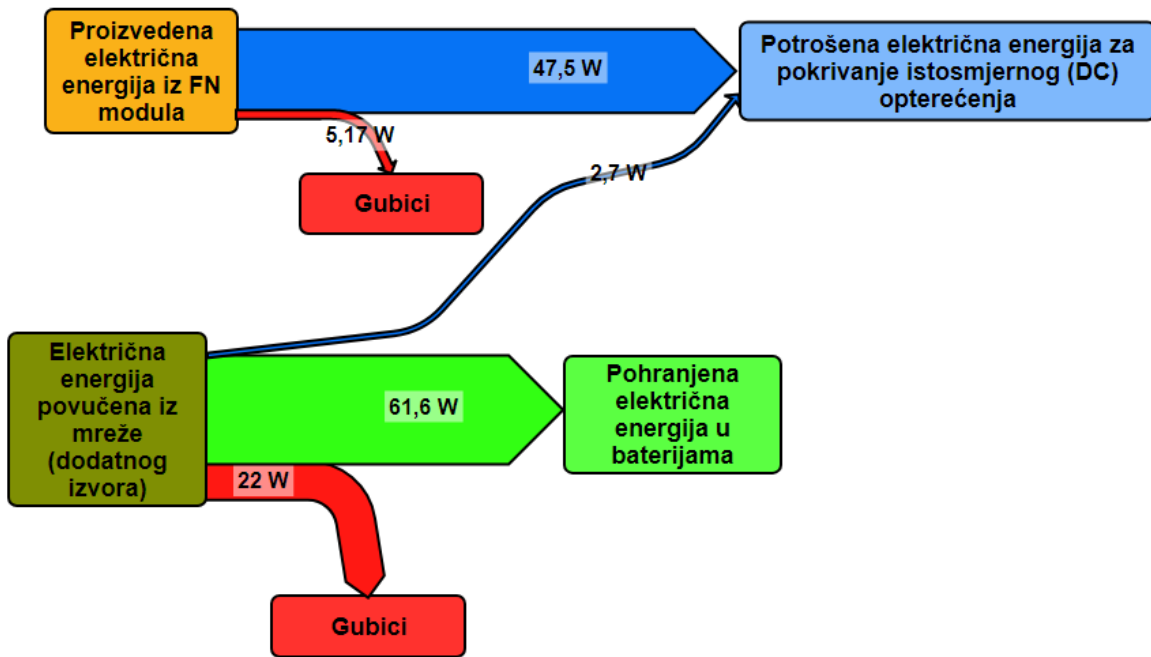
Na slici 4.15. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima samo istosmjerno (DC) opterećenje. Za primjer je uzeta radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.12..

Tablica 4.12. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo istosmjerno (DC) opterećenje

FN modul			DC trošilo			Dodatni izvor energije			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
43,50	1,216	52,67	27,1	1,856	50,2	236,5	0,454	86,3	27,3	-2,306	-61,6

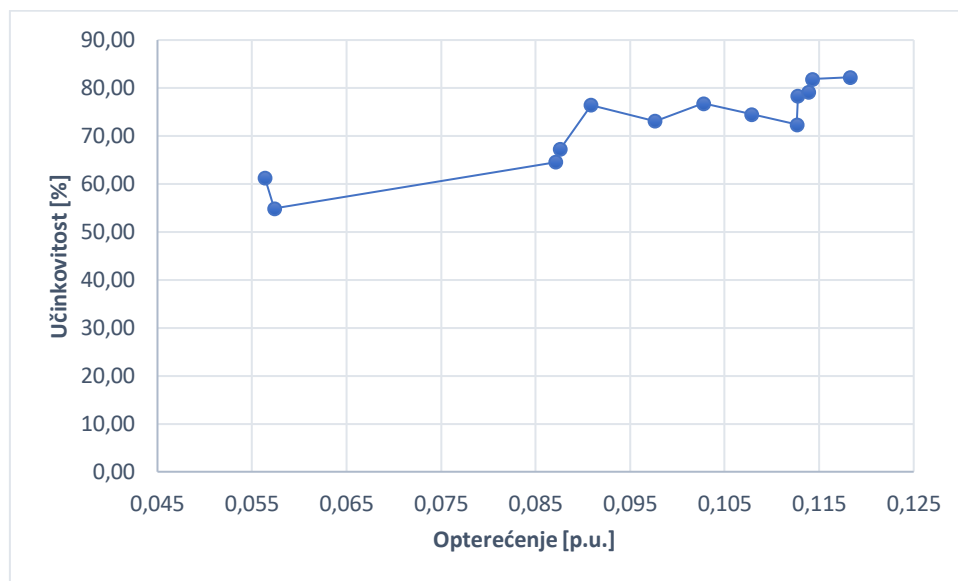
Učinkovitost izmjenjivača/punjača dobije se iz omjera dobivene i uložene energije. U ovome slučaju uložena energija jest ona koju dodatni izvor (mreža) daje izmjenjivaču/punjaču a dobivena energija je ona koju izmjenjivač/punjač predaje baterijama. Za primjer je uzeta osma točka mjerenja iz priloga P4.

$$\eta_{izmjenjivača/punjača} = \frac{P_{DC,izmjenjivač/punjač}}{P_{P,AC}} \cdot 100 = \frac{64,3}{86,3} \cdot 100 = 74,507\% \quad (4-4)$$



Slika 4.15. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima samo istosmjerno (DC) opterećenje [14]

Izračunom učinkovitosti za preostale točke mjerenja dobiven je graf 4.7. na kojem je prikazana učinkovitost izmjenjivača/punjača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u per unit (p.u.) vrijednostima. U ovom slučaju izmjenično (AC) opterećenje jest električna energija koju izmjenjivač/punjač povlači iz mreže (dodatnog izvora).



Graf 4.7. Učinkovitost izmjenjivača/punjača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u p.u. vrijednostima.

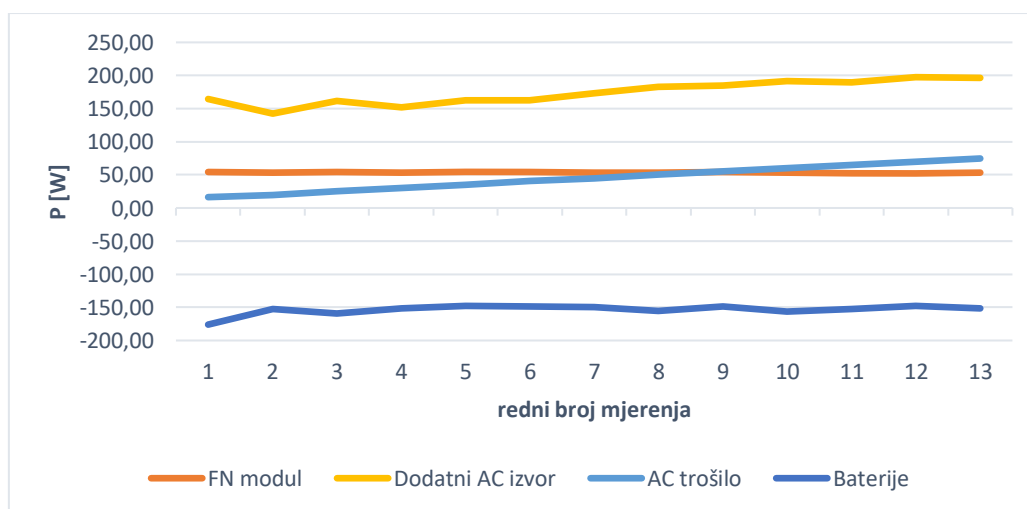
Iz grafa 4.7. vidi se da s porastom izmjeničnog (AC) opterećenja raste i učinkovitost izmjenjivača/punjača. Također, vidimo da nije dostigao svoju maksimalnu učinkovitost od 94%. Razlog tome je malo opterećenje s obzirom na njegovu nazivnu snagu. U početnoj točki opterećen je sa otprilike 5%, a u krajnjoj sa otprilike 11% nazivne snage.

#### 4.4.2. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

U ovome slučaju shema spoja sa slike 4.14. vrijedi ukoliko izostavimo istosmjerno (DC) opterećenje. Mjerenje je provedeno u trinaest točaka od izmjeničnog (AC) opterećenja snage 15W pa do 75W s porastom od 5W u svakoj točki mjerenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.5..

Zbog malog opterećenja koje dodatni izvor (mreža) u potpunosti pokriva nema potrebe za dodatnom energijom pohranjenom u baterijama i u ovom slučaju izmjenjivač/punjač radi samo kao punjač.

Iz grafa 4.8. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula te ju pohranjuje u baterije dok dodatni izvor energije (mreža) pokriva izmjenično (AC) opterećenje, a višak energije se pohranjuje u baterijama. Budući da je nama dodatni izvor bila mreža izmjenjivač/punjač puni baterije konstantnom strujom (snagom), a kako se povećava izmjenično (AC) opterećenje tako povlači više električne energije iz mreže. U ovome slučaju su zbrojeni su ulazni tokovi električne energije iz smjera regulatora punjenja te iz smjera dodatnog izvora energije (mreže) ka baterijama.

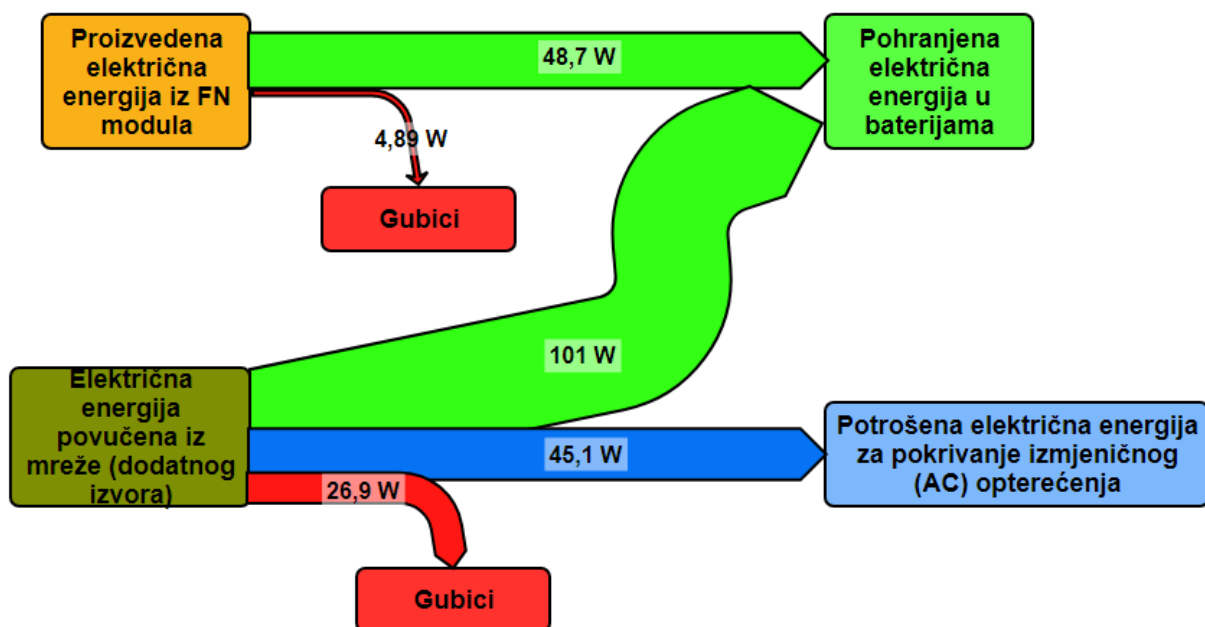


Graf 4.8. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

Na slici 4.16. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima samo izmjenično (AC) opterećenje. Za primjer je uzeta jedna radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.13..

Tablica 4.13. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

FN modul			Dodatni AC izvor			AC trošilo			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
43,97	1,219	53,59	237,2	0,748	173	236,6	0,19	45,1	28,4	-5,549	-149,7



Slika 4.16. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima samo izmjenično (AC) opterećenje [14]

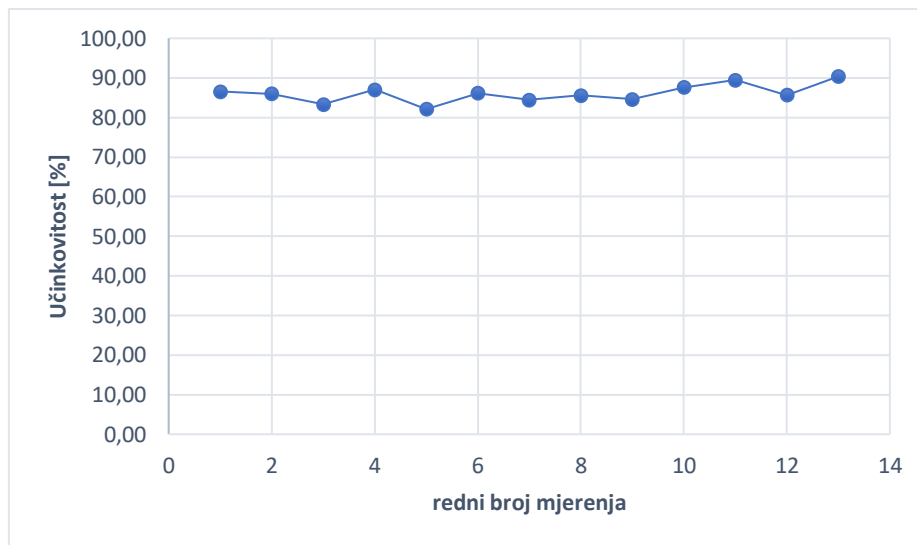
Učinkovitost izmjenjivača/punjača dobije se iz omjera dobivene i uložene energije. U ovome slučaju uložena energija jest ona koju daje mreža (dodatni izvor), a dobivena energija je ona koju izmjenjivač/punjač predaje baterijama i ona koja se troši za pokrivanje izmjeničnog (AC) opterećenja. Za primjer je uzeta sedma točka mjerenja iz priloga P5.

$$\eta_{izmjenjivača/punjača} = \frac{P_{DC,izmjenjivač/punjač} + P_{T,AC}}{P_{P,AC}} \cdot 100 = \frac{101 + 45,1}{173} \cdot 100 = 84,451\% \quad (4-5)$$

Izračunom učinkovitosti za svaku točku mjerenja dobiven je graf 4.9. na kojem je prikazana učinkovitost izmjenjivača/punjača u svakoj točki mjerenja. Nije prikazana u ovisnosti o



opterećenju budući da je ono konstanto jer kako je opisano i u režimu rada ove mikromreže kako se povećava opterećenje tako izmjenjivač/punjač povlači više energije iz mreže (dodatnog izvora), a baterije puni konstantnom strujom (snagom).



Graf 4.9. Učinkovitost izmjenjivača/punjača u različitim radnim točkama izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

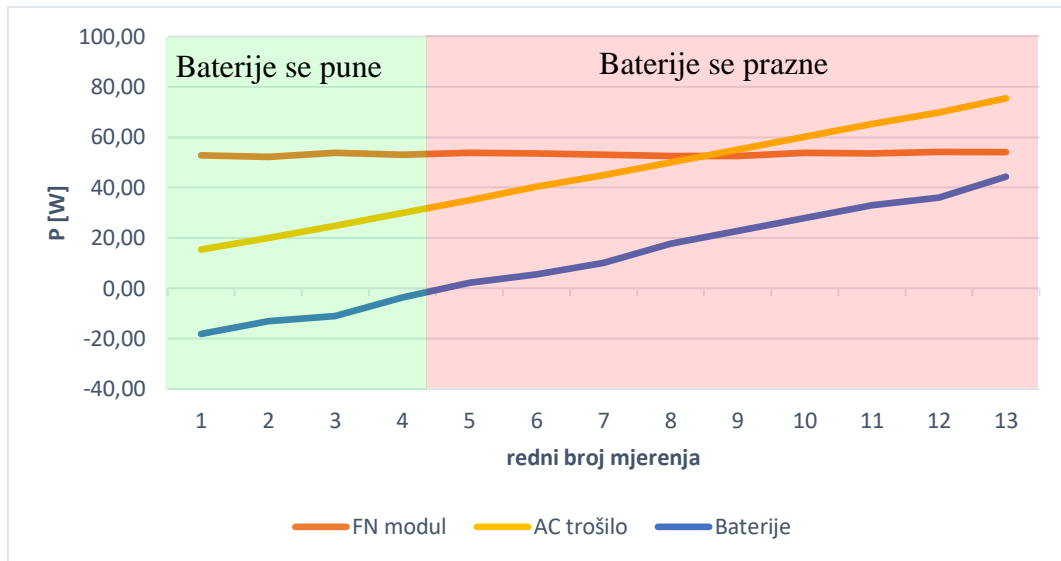
Iz grafa 4.9. vidi se da učinkovitost varira od 82 do 90% što je rezultat pogreške mjerenja jer ona bi trebala biti konstantna budući da je i opterećenje izmjenjivača/punjača konstanto. Prosječna učinkovitost izmjenjivača/punjača u trinaest mjerenja iznosi 86,07%.

#### **4.4.3. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje**

U ovome slučaju shema spoja sa slike 4.14. vrijedi ukoliko izostavimo istosmjerno (DC) opterećenje i dodatni izvor (mrežu). Tada dobivamo slučaj sličan onome obrađenom u potpoglavlju 4.3.2. jedino što umjesto otočnog izmjenjivača u ovome slučaju imamo izmjenjivač/punjač koji radi kao izmjenjivač. Mjerenje je provedeno u trinaest točaka od izmjeničnog (AC) opterećenja snage 15W pa do 75W s porastom od 5W u svakoj točki mjerenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.6..

Iz grafa 4.10. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno izmjenično (AC) opterećenje. U slučaju opterećenja manjeg od proizvodnje iz FN modula višak energije se pohranjuje u baterije, a kada je opterećenje veće od proizvodnje iz FN modula tada

se ta razlika nadoknađuje iz baterija. U ovome slučaju zbrojeni su ulazni tok električne energije iz smjera regulatora punjenja ka baterijama te izlazni tok električne energije iz smjera baterija ka DC strani izmjenjivača/punjača.



Graf 4.10. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

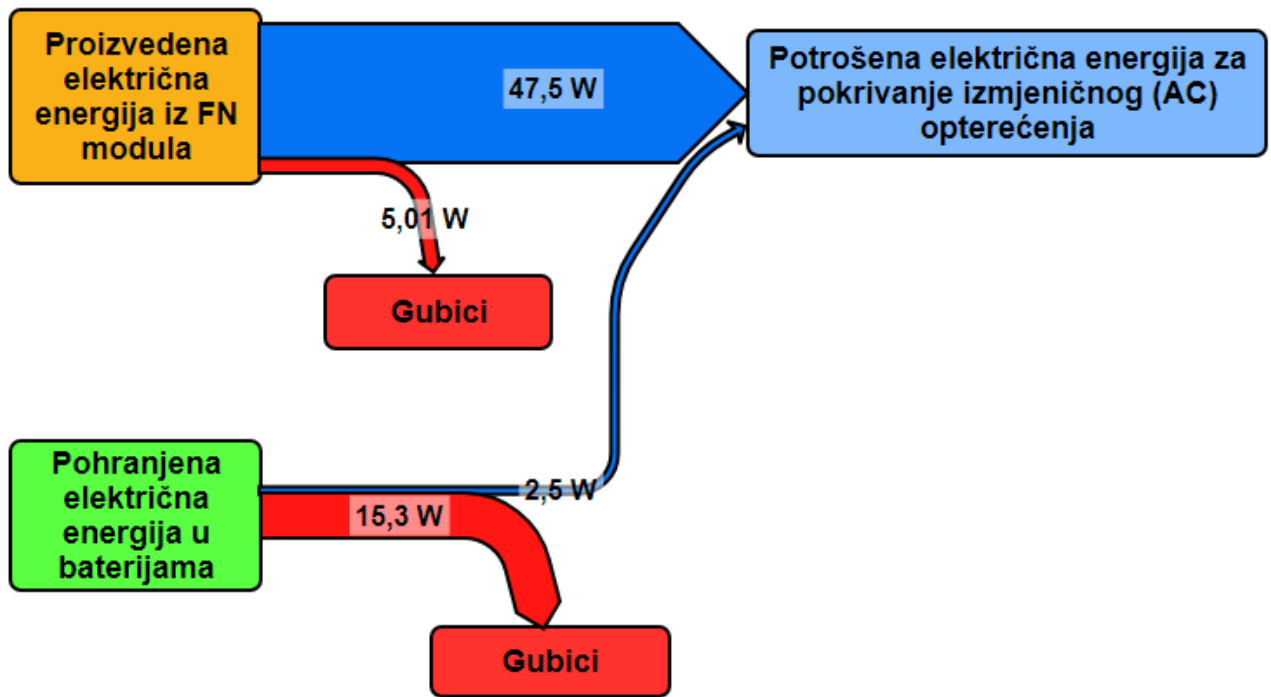
Na slici 4.17. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje. Za primjer je uzeta jedna radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.14..

Tablica 4.13. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje

FN modul			AC trošilo			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
42,4	1,241	52,61	230,3	0,217	50	25,9	1,21	17,8

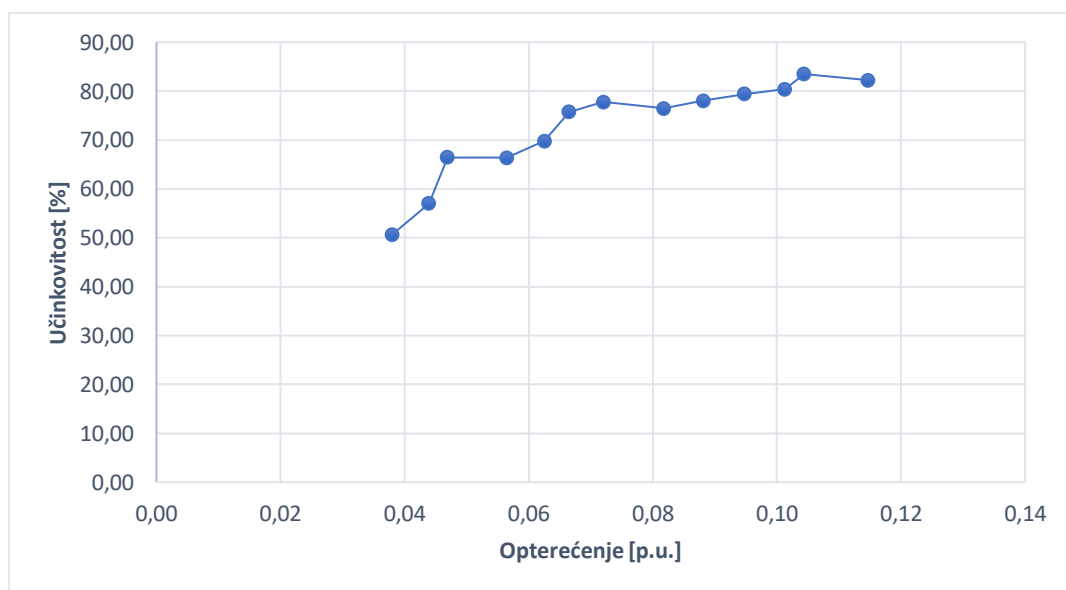
Učinkovitost izmjenjivača/punjača dobije se iz omjera dobivene i uložene energije. U ovome slučaju budući da izmjenjivač/punjač radi samo kao izmjenjivač uložena energija jest ona koju izmjenjivač uzima iz baterija, a dobivena energija je ona koja se troši za pokrivanje izmjeničnog (AC) opterećenja. Za primjer je uzeta sedma točka mjerenja iz priloga P7.

$$\eta_{izmjenjivača/punjača} = \frac{P_{T,AC}}{P_{DC,izmjenjivač/punjač}} \cdot 100 = \frac{44,8}{57,6} \cdot 100 = 77,77\% \quad (4-6)$$



Slika 4.17. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje [14]

Izračunom učinkovitosti za svaku točku mjerenja dobiven je graf 4.11. na kojem je prikazana učinkovitost izmjenjivača/punjača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u per unit (p.u.) vrijednostima.



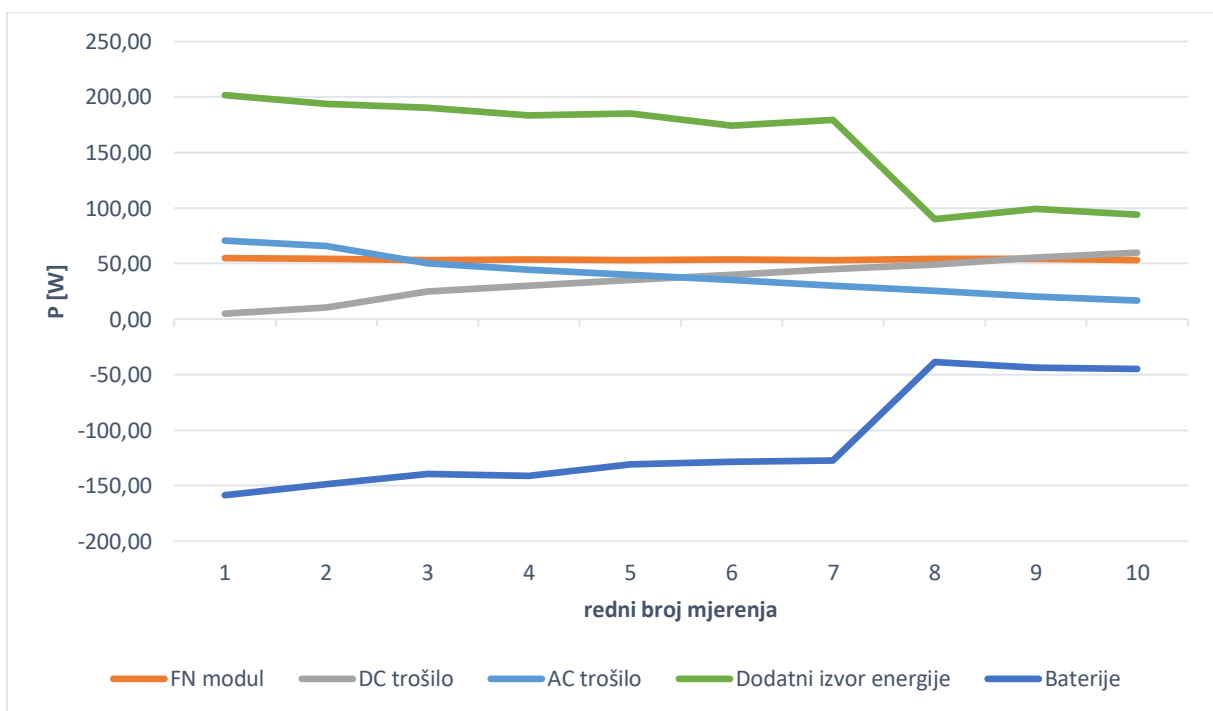
Graf 4.11. Učinkovitost izmjenjivača/punjača u ovisnosti o udjelu izmjeničnog (AC) opterećenja u nazivnoj snazi pretvarača izraženog u p.u.vrijednostima.

Iz grafa 4.11. vidi se da s porastom izmjeničnog (AC) opterećenja raste i učinkovitost izmjenjivača/punjača. Također, vidimo da nije dostigao svoju maksimalnu učinkovitost od 94%. Razlog tome je malo opterećenje s obzirom na njegovu nazivnu snagu. U početnoj točki opterećen je sa otprilike 4%, a u krajnjoj sa otprilike 11% nazivne snage.

#### 4.4.4. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

U ovome slučaju vrijedi shema spoja sa slike 4.14.. Mjerenje je provedeno u deset točaka i to na način da je ukupno opterećenje uvijek iznosilo 75W, a mijenjani su udjeli istosmjernog (DC) odnosno izmjeničnog (AC) opterećenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.7..

Iz grafa 4.12. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno opterećenje kao i energija iz mreže (dodatnog izvora). Budući da je ukupno opterećenje malo u odnosu na proizvedenu odnosno preuzetu snagu iz mreže baterije se konstanto pune. Do pada struje (snage) punjenja baterija (između sedmog i osmog mjerenja) došlo je zato što su baterije ušle u fazu kada su blizu punog kapaciteta pa je došlo do smanjenja struje (snage) punjenja.

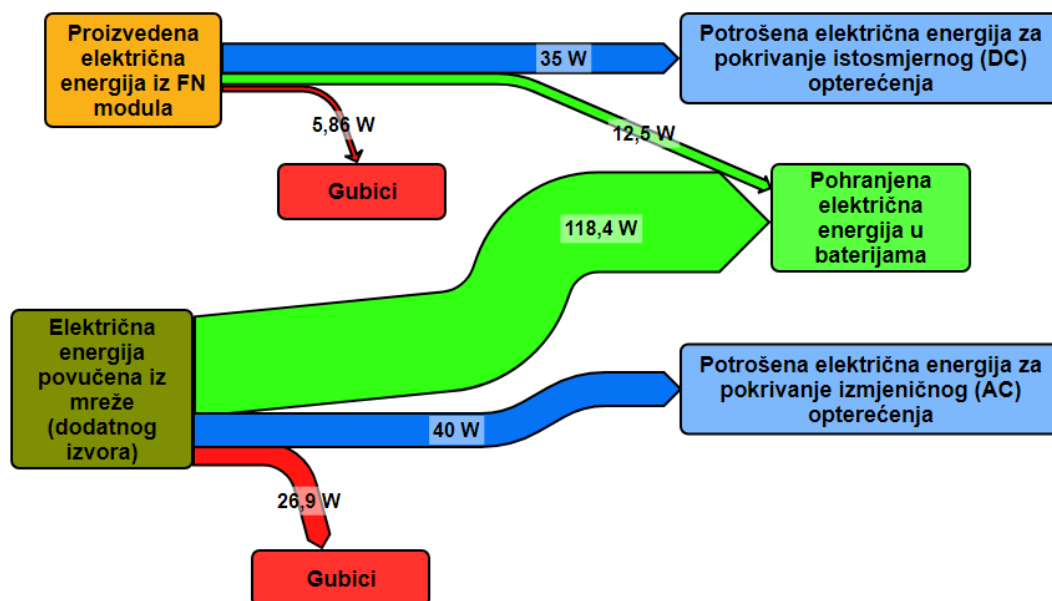


Graf 4.12. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

Na slici 4.18. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje. Za primjer je uzeta jedna radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.15..

Tablica 4.15. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

FN modul			DC trošilo			AC trošilo		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
42,62	1,252	53,36	28,2	1,246	35	237,2	0,169	40
Dodatni izvor energije			Baterije					
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]			
237,9	0,828	185,3	28,6	-5,284	-130,9			

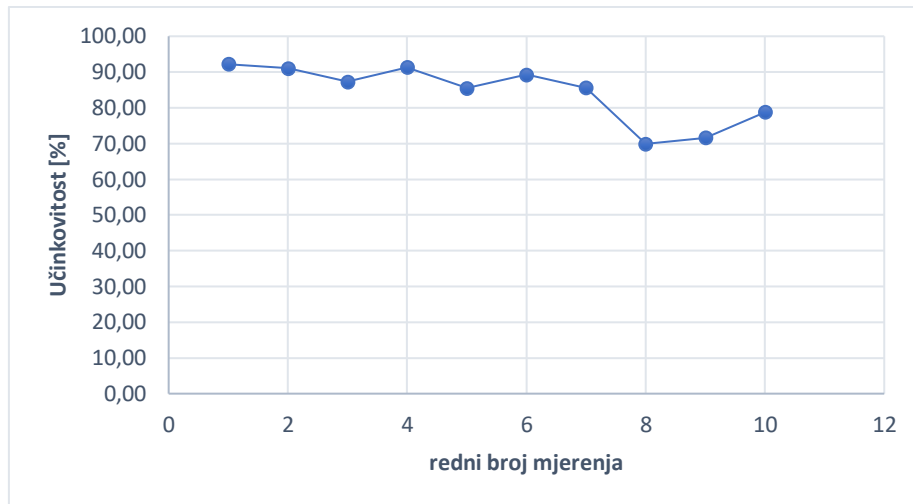


Slika 4.18. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje [14]

Učinkovitost izmjenjivača/punjača dobije se iz omjera dobivene i uložene energije. U ovome slučaju uložena energija jest ona koju daje mreža (dodatni izvor), a dobivena energija je ona koju izmjenjivač/punjač predaje baterijama i ona koja se troši za pokrivanje izmjeničnog (AC) opterećenja. Za primjer je uzeta peta točka mjerenja iz priloga P7.

$$\eta_{izmjenjivača/punjača} = \frac{P_{DC,izmjenjivač/punjač} + P_{T,AC}}{P_{P,AC}} \cdot 100 = \frac{118,4+40}{185,3} \cdot 100 = 85,48\% \quad (4-6)$$

Izračunom učinkovitosti za svaku točku mjerenja dobiven je graf 4.13. na kojem je prikazana učinkovitost izmjenjivača/punjača u svakoj točki mjerenja. Nije prikazana u ovisnosti o opterećenju budući da je ono konstanto jer kako je opisano i u režimu rada ove mikromreže kako se povećava opterećenje tako izmjenjivač/punjač povlači više energije iz mreže (dodatnog izvora), a baterije puni konstantnom strujom (snagom).



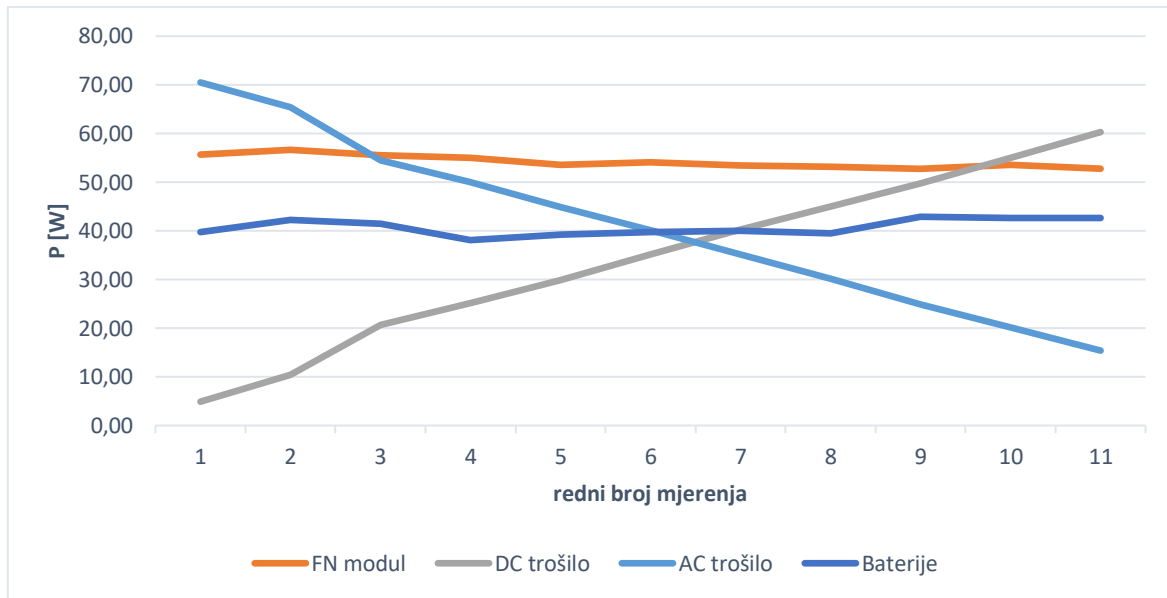
Graf 4.13. Učinkovitost izmjenjivača/punjača u različitim radnim točkama izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

Iz grafa 4.13. vidi se da u prvih sedam radnih točaka izmjenjivač/punjač ima učinkovitost između 85 i 92%, au zadnje tri točke ona pada na približno 70%. Razlog tome je što u je u zadnje tri točke došlo do smanjenja snage punjenja baterija, a samim time i opterećenja izmjenjivača/punjača što je na posljertku rezultiralo smanjenjem njegove učinkovitosti.

#### 4.4.5. Izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

U ovome slučaju shema spoja sa slike 4.14. vrijedi ukoliko izostavimo dodatni izvor (mrežu). Tada dobivamo slučaj jednak onome obrađenom u potpoglavlju 4.3.1. jedino što umjesto otočnog izmjenjivača u ovome slučaju imamo izmjenjivač/punjač koji radi kao izmjenjivač. Mjerenje je provedeno u jedanaest točaka i to na način da je ukupno opterećenje uvijek iznosilo 75W, a mijenjani su udjeli istosmjernog (DC) odnosno izmjeničnog (AC) opterećenja. Rezultati mjerenja nalaze se u prilogu P.4.8..

Iz grafa 4.14. vidi se način rada ove mikromreže. Regulator punjenja pomoću MPPT-a izvlači maksimalnu dostupnu snagu iz FN modula koja se koristi kako bi se pokrilo trenutno opterećenje, a potrebna razlika nadoknađuje se iz baterija. Budući da su u ovom slučaju iznosi proizvodnje iz FN modula (oko 50W) te opterećenja (oko 75W) konstantni onda je i potrebna energija iz baterija konstantna (oko 40 W). Ovisno o udjelu istosmjernog (DC) odnosno izmjeničnog (AC) opterećenja mijenja se opterećenje a samim time i učinkovitost regulatora punjenja odnosno izmjenjivača/punjača.

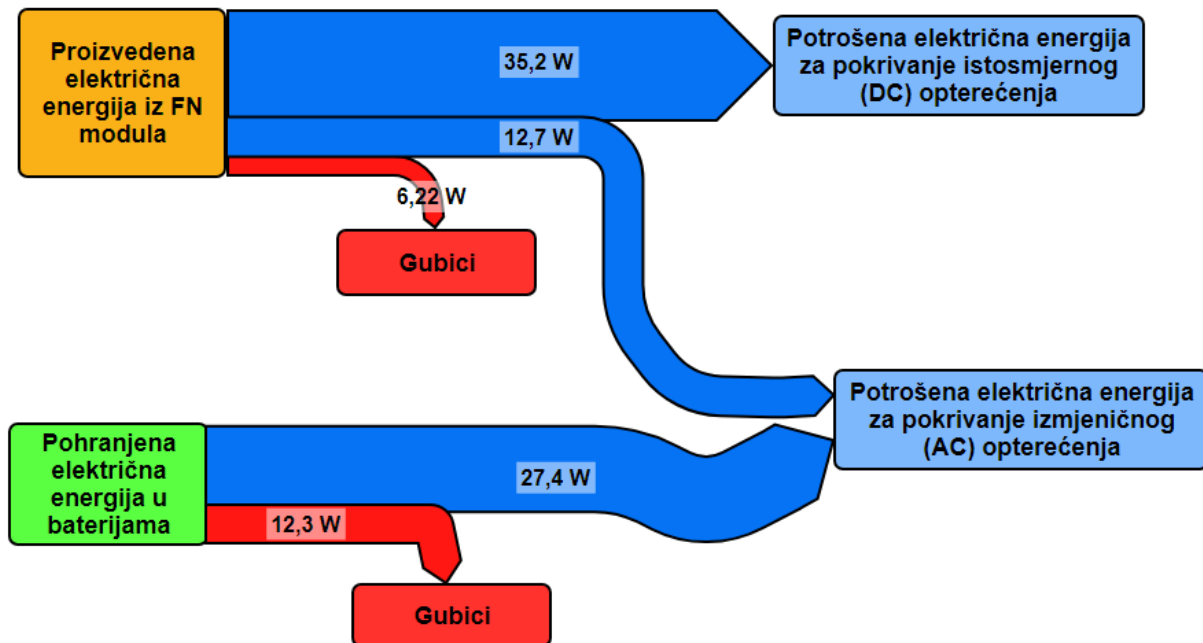


Graf 4.14. Snage pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

Na slici 4.19. nalazi se Sankey dijagram koji prikazuje energetske bilancu izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje. Za primjer je uzeta jedna radna točka čije se izmjerene električne veličine nalaze u tablici 4.16..

Tablica 4.16. Izmjerene električne veličine pojedinih elemenata izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje

FN modul			DC trošilo			AC trošilo			Baterije		
U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
44	1,23	54,12	25,6	1,376	35,2	230,1	0,174	40,1	25,4	2,201	39,7



Slika 4.19. Sankey dijagram energetske bilance izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje [14]

Učinkovitost izmjenjivača/punjača ovisi samo o izmjenično (AC) opterećenju tako da i u ovome slučaju vrijedi graf 4.11. iz potpoglavlja 4.4.3..

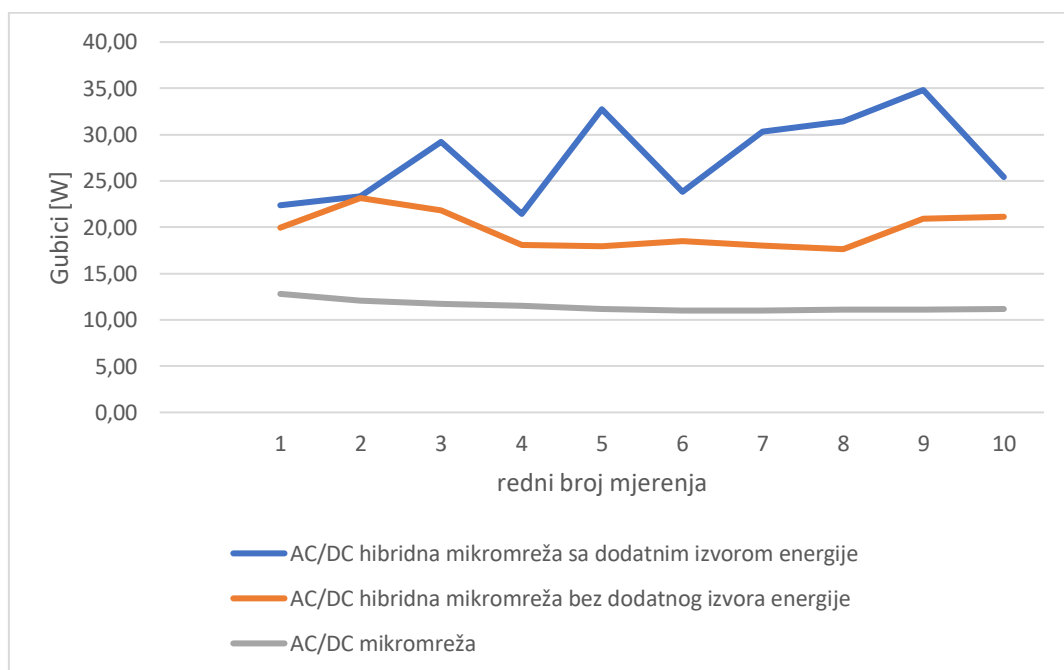
#### 4.5. Analiza rezultata mjerenja

Analizom rezultata mjerenja za sve vrste mikromreža i slučajeve sa različitim opterećenjima možemo vidjeti da do najvećih gubitaka dolazi pri pretvorbi električne energije bilo u neki drugi oblik energije ili iz istosmjerne u izmjeničnu i obratno. Gubici su još više potencirani u ovim slučajevima budući da su korištena relativno mala opterećenja s obzirom na nazivne snage energetske pretvarača, a svaki energetski pretvarač koristi određenu količinu električne energije za pokrivanje vlastite potrošnje.

Najmanji gubitke pri pretvorbi električne energije, odnosno najveću učinkovitost ima istosmjerna (DC) mikromreža budući da imamo samo pretvorbu električne u kemijsku energiju pri pohrani električne energije u baterije. U slučaju izmjenično istosmjerne (AC/DC) u kojoj imamo izmjenično (AC) opterećenje uz gubitke pri pohrani električne energije gubici nastaju i pri pretvorbi istosmjerne u izmjeničnu električnu energiju. U slučaju hibridne izmjenično istosmjerne (AC/DC) mikromreže gubici nastaju pri pohrani električne energije proizvedene iz FN modula te pri pretvorbi izmjenične električne energije iz mreže (dodatnog izvora) u istosmjernu koja se zatim pohranjuje u baterije.

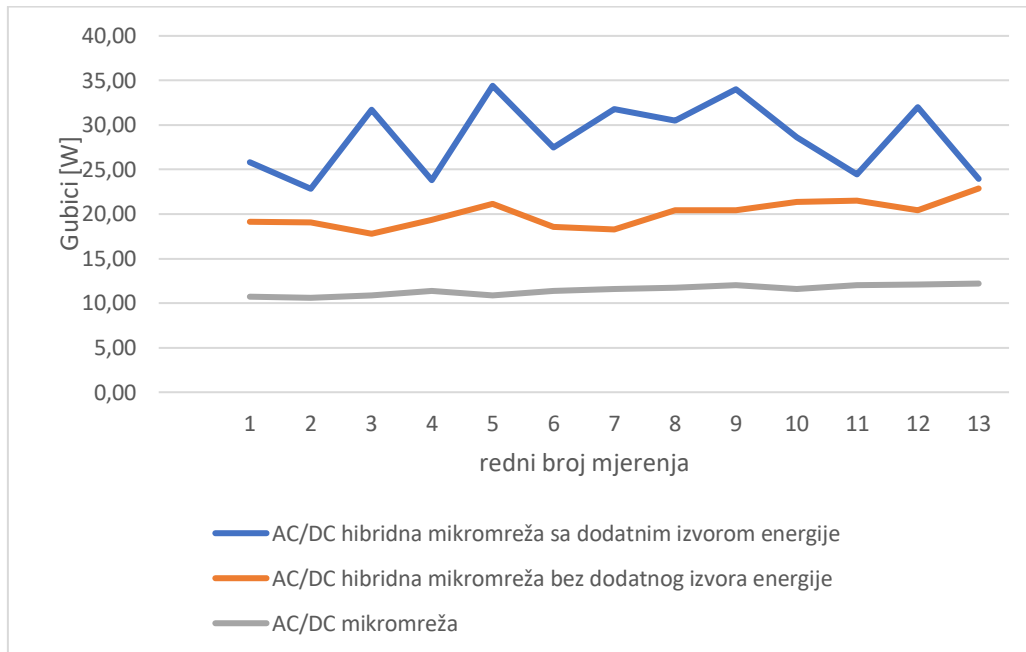


Na slici 4.20. nalazi se graf usporedbe gubitaka izmjenično/istosmjernje (AC/DC) mikromreže, izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže bez dodatno izvora energije i izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže sa dodatnim izvorom energije u slučaju kombinacije istosmjernog (DC) i izmjeničnog (AC) opterećenja. Prema dobivenom grafu vidimo da su pri jednakom opterećenju te proizvodnji iz FN modula gubici najmanji u izmjenično/istosmjernoj (AC/DC) mikromreži. Zatim slijedi izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridna mikromreža bez dodatnog izvora energije koja se od prethodne razlikuje po tome što je umjesto otočnog izmjenjivača korišten izmjenjivač/punjač u modu rada izmjenjivača za kojeg, prema dobivenim rezultatima, vidimo da ima veće gubitke. Energetski najmanje učinkovita mikromreža je izmjenično/istosmjerna (AC/DC) hibridne mikromreža sa dodatnim izvorom energije gdje je također korišten izmjenjivač/punjač, ali u modu rada izmjenjivač/punjač u kojemu prema dobivenim rezultatima mjerenja nastaju veći gubici nego kada radi isključivo u modu izmjenjivača.



Slika 4.20. Usporedba gubitaka izmjenično/istosmjernje (AC/DC) mikromreže, izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže bez dodatnog izvora energije i izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže sa dodatnim izvorom energije u slučaju kombinacije istosmjernog (DC) i izmjeničnog (AC) opterećenja

Na slici 4.21. nalazi se graf usporedbe gubitaka za iste mikromreže kao i u prethodnom slučaju osim što umjesto kombinacije istosmjernog (DC) i izmjeničnog (AC) opterećenja imamo samo izmjenično (AC) opterećenje. Također, vrijede isti zaključci.



Slika 4.21. Usporedba gubitaka izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže, izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže bez dodatno izvora energije i izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže sa dodatnim izvorom energije u slučaju izmjeničnog (AC) opterećenja

## 5. ZAKLJUČAK

S obzirom na rezultate provedenih mjerenja za istosmjernu (DC), izmjenično/istosmjernu (AC/DC) i hibridnu izmjenično/istosmjernu (AC/DC) mikromrežu u praktičnom dijelu rada ističu su dijelovi mikromreže gdje može doći do dodatnog povećanja energetske učinkovitosti. Do gubitaka dolazi svakom novom pretvorbom električne energije u neki drugi oblik i obratno ili pretvorbom iz izmjenične u istosmjernu električnu energiju i obratno. Stoga najučinkovitija je istosmjerna (DC) mikromreža pa onda slijede izmjenično/istosmjerna (AC/DC) i hibridna izmjenično/istosmjerna (AC/DC) mikromrežu. Povećanje energetske učinkovitosti može se postići dodatnim unaprjeđenjem sklopova energetskih pretvarača te sustava za pohranu električne energije kako bi se gubici dodatno smanjili. Zato je u ovakvim slučajevima važna strategija upravljanja mikromrežom odnosno njenom potrošnjom kako bi se proizvedena energija u isto vrijeme i trošila.

Implementacija mikromreža u postojeći EES će sve više rasti kako idemo u budućnost. Kako bude rastao njihov broj tako će se smanjivati broj elektrana na fosilna goriva čime će doći do smanjenja negativnih utjecaja na okoliš, smanjenja gubitaka u prijenosu energije od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje te povećanja pouzdanosti opskrbe električnom energijom. Uvođenje dvosmjerne komunikacije u EES omogućiti će se iskorištavanje energije iz OIE kada je ona dostupna, a ukoliko je proizvodnja višestruko veća od potrošnje ta energija će se uskladištiti.

Mikromreže s obzirom na strategije upravljanja nude brojne mogućnosti koje u različitim stanjima EES-a mogu pridonijeti njegovom lakšem pogonu. Tako u slučajevima nedostatka električne energije umjesto povećanja snage ili paljenja konvencionalnih elektrana potrebna energija može se osigurati kupnjom iz mikromreže. Također mogu se koristiti usluge mikromreže za optimizaciju rada EES-a. Ukoliko nema takvih potreba od strane EES-a mikromrežom se može upravljati tako da se za pokrivanje trenutnog opterećenja koriste izvori energije koji imaju najmanje štetan utjecaj na okoliš.

## LITERATURA

- [1] H. Farhangi, G. Joos, Microgrid Planing and Design: A Concise Guide, John Wiley & Sons Ltd, SAD, 2019.
- [2] N. Hatziargyriou, Micorgirds: Arhitectures and Control, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2014.
- [3] S. Borlase, Smart Grids: Infrastructure, Technology and Solutions, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2013.
- [4] D. Šljivac, D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2018.
- [5] Mrežna pravila distribucijskog sustava, HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., Narodne novine 74/2018, 2018.
- [6] Internetska stranica tvrtke Schrack, link na opis tehnologije korištenih baterija u praktičnom dijelu rada: <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/baterije/> [30.06.2020.]
- [7] Internetska stranica tvrtke Victron Energy, link na priručnik regulatora punjenja korištenog u praktičnom dijelu rada: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-BlueSolar-charge-controller-MPPT-75-10,-75-15,-100-15,-100-20,-100-20-48V-Rev-03-EN-NL-FR-DE-ES-SE.pdf> [05.07.2020.]
- [8] Internetska stranica tvrtke Victron Energy, link na priručnik korištenih baterija u praktičnom dijelu rada: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf> [05.07.2020]
- [9] Internetska stranica Laboratorija za OIE FERITA-a, link na priručnik FN modula korištenog u praktičnom dijelu rada: [http://reslab.ferit.hr/Panasonic\\_240W\\_Hybrid\\_PV\\_Module\\_Black\\_Technical.pdf](http://reslab.ferit.hr/Panasonic_240W_Hybrid_PV_Module_Black_Technical.pdf) [05.07.2020.]

- [10] Internetska stranica tvrtke Victron Energy, link na priručnik otočnog izmjenjivača korištenog u praktičnom dijelu rada:  
<https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-Phoenix-Inverter-800VA-and-1200VA-EN-NL-FR-DE-ES.pdf> [05.07.2020.]
- [11] Internetska stranica tvrtke Victron Energy, link na priručnik izmjenjivača/punjača korištenog u praktičnom dijelu rada:  
<https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-MultiPlus-Compact-800-1200-1600-EN-NL-FR-DE-ES.pdf> [05.07.2020.]
- [12] Link na priručnih mjernih instrumenata korištenih u praktičnom dijelu rada:  
<https://docs.rs-online.com/6a73/0900766b801ee12f.pdf> [05.07.2020.]
- [13] Link na internetsku stranicu tvrtke PeakTech odakle je preuzet priručnik mjernih instrumenata korištenih u praktičnom dijelu rada: <https://peaktech-rce.com/en/digital-multimeters/144-peaktech-3320-digital-multimeter-3-56-digits-5999-20mm-frequency-meter-thermometer-k.html> [05.07.2020.]
- [14] Link na internetsku stranicu Sankey Flow Show na kojoj su u online aplikaciji kreirani Sankey dijagrami: <https://www.sankeyflowshow.com/app/index.html> [26.07.2020.]

## SAŽETAK

U ovome radu definiran je pojam mikromreže te su objašnjene glavne karakteristike i prednosti mikromreža. Predstavljene su moguće strategije upravljanja mikromrežom ovisno o željenom cilju. Provedena je analiza upravljanja mikromrežom s obzirom na dionike koji čine arhitekturu upravljanja te definirana je svrha upravljanja odnosno mogućnosti koje ono pruža pri radu mikromreže. Također, objašnjena su dva osnovna tipa upravljanja s obzirom na mogućnosti komunikacije unutar mikromreže. U praktičnom dijelu uspoređene su performanse istosmjerne (DC), istosmjerno/izmjenične (AC/DC) i hibridne (s dodatnim izvorom) istosmjerno/izmjenične (AC/DC) mikromreže. Unutar svake mikromreže električna energija je proizvedena iz FN modula, a za pohranu električne energije korištene su baterije. Na osnovu rezultata mjerenja električnih veličina napona, struje i snage u karakterističnim točkama svake mikromreže prikazana je energetska bilanca svake mikromreže te učinkovitost korištenih energetskih pretvarača. Također, prepoznati su dijelovi mikromreže čijim se unaprjeđenjem može dodatno povećati energetska učinkovitost te je istaknuta važnost upravljanja mikromrežom s ciljem smanjenja gubitaka odnosno povećanja energetske učinkovitosti.

**Ključne riječi:** energetska učinkovitost, FN modul, mikromreža, pohrana električne energije, upravljanje mikromrežom

## **ABSTRACT**

This thesis defined microgrid as a term and explained main characteristics and advantages of microgrids. Also, this thesis represented possible strategies of microgrid management depending on desired goal. Furthermore, an analysis of microgrid management was performed with regard to the stakeholders that make up the management architecture, and the purpose of management was defined as well as possibilities it provides in the operation of the microgrid. Considering communication capabilities, two main types of microgrid management were presented. Practical part of this thesis compared direct current (DC), direct current alternating current (AC/DC) and hybrid (with additional source) direct current alternating current (AC/DC) microgrid. Within every microgrid electrical energy was produced from PV module and batteries were used for electricity storage. Based on the results of measuring the electrical quantities of voltage, current and power at the characteristic points of each microgrid, the energy balance of each microgrid and the efficiency of the energy converters used are shown. Also, parts of the microgrid which improvement can further increase energy efficiency were identified and the importance of microgrid management with the aim of reducing losses and increasing energy efficiency was emphasized.

**Key words:** energy efficiency, PV module, microgrid, microgrid management, electrical energy storage

## ŽIVOTOPIS

Ivor Ištvanfi

Dore Pejačević 2, 33520 Slatina

Mob: 091/935-0744

email: [ivor\\_istvanfi@hotmail.com](mailto:ivor_istvanfi@hotmail.com)

Ivor Ištvanfi rođen je 25.06.1996. u Osijeku. Završio je Osnovnu školu Josipa Kozarca u Slatini. Zatim je upisao Srednju školu Marka Marulića Slatina, smjer opća gimnazija. Srednju školu završava 2015. godine sa odličnim uspjehom te iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2018. godine kada upisuje i diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, modul održiva energetika.



## PRILOZI

### PRILOG P.4.1. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama istosmjernje DC mikromreže

Mjerenje	Trošilo			FN modul			Baterije		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	26,9	0,100	2,7	44,1	1,116	49,2	27,0	-1,669	-45,0
2	26,9	0,200	5,4	43,9	1,116	49,0	27,0	-1,568	-42,3
3	26,9	0,301	8,1	43,7	1,110	48,6	27,0	-1,449	-39,1
4	26,9	0,400	10,8	43,8	1,116	48,8	27,0	-1,359	-36,7
5	26,8	0,501	13,4	43,5	1,123	48,9	26,9	-1,235	-33,2
6	26,7	0,840	22,4	42,9	1,130	48,5	26,8	-0,916	-24,5
7	26,6	0,899	23,9	42,9	1,119	48,0	26,7	-0,839	-22,4
8	26,6	1,002	26,6	43,3	1,126	48,7	26,7	-0,760	-20,3
9	26,5	1,100	29,2	43,0	1,129	48,6	26,7	-0,656	-17,5
10	26,5	1,201	31,8	43,1	1,137	49,0	26,7	-0,574	-15,3
11	26,4	1,302	34,4	42,8	1,130	48,3	26,6	-0,467	-12,4
12	26,4	1,401	37,0	43,2	1,129	48,8	26,5	-0,370	-9,8
13	26,2	1,499	39,3	42,9	1,129	48,4	26,5	-0,265	-7,0
14	26,2	1,600	41,9	43,2	1,123	48,5	26,4	-0,177	-4,7
15	26,1	1,705	43,1	43,1	1,118	48,2	26,4	-0,060	-1,6
16	26,0	1,807	46,9	42,9	1,131	48,5	26,2	-0,026	-0,6
17	25,9	1,900	49,2	43,1	1,124	48,4	26,2	0,104	2,7
18	25,9	2,020	52,3	43,0	1,132	46,6	26,1	0,239	6,2
19	25,8	2,100	54,0	42,8	1,124	48,1	26,0	0,298	7,7
20	25,6	2,200	56,3	42,7	1,127	48,2	25,9	0,406	10,5
21	25,6	2,300	58,9	43,1	1,133	48,8	25,9	0,488	12,6
22	25,4	2,390	60,8	43,0	1,132	48,6	25,8	0,575	14,9
23	25,4	2,500	63,3	43,2	1,124	48,5	25,7	0,684	17,6
24	25,3	2,600	65,8	42,7	1,138	48,5	25,6	0,771	19,8
25	25,3	2,690	68,1	42,6	1,138	48,5	25,6	0,889	22,8
26	25,1	2,800	70,5	42,5	1,131	48,1	25,6	0,983	25,1
27	25,1	2,910	72,9	42,6	1,136	48,5	25,5	1,074	27,4
28	25,0	3,020	75,3	42,8	1,138	48,7	25,5	1,173	29,9

**PRILOG P.4.2. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjjerne (AC/DC) mikromreže sa istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) opterećenjem**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC trošilo			DC strana izmjenjivača			AC trošilo		
	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]
1	-1,768	25,5	-45,1	1,099	43,2	47,5	0,029	25,5	0,7	3,980	25,2	86,0	0,323	231,5	74,9
2	-1,614	25,1	-40,5	1,087	43,4	47,2	0,201	25,1	5,0	3,790	24,8	80,6	0,303	231,7	70,2
3	-1,045	25,1	-26,2	1,100	43,3	47,6	0,786	25,0	19,7	3,030	24,8	64,9	0,237	231,4	54,9
4	-0,815	25,1	-20,4	1,093	43,1	47,1	0,996	25,0	24,9	2,780	24,9	59,7	0,216	231,3	50,0
5	-0,614	25,1	-15,4	1,092	43,1	47,1	1,201	25,0	30,0	2,540	24,9	54,5	0,195	231,0	45,0
6	-0,421	25,0	-10,5	1,083	43,5	47,1	1,404	25,0	35,0	2,300	24,9	49,4	0,173	230,9	40,0
7	-0,219	25,0	-5,4	1,093	43,2	47,2	1,604	24,9	40,0	2,050	24,9	44,1	0,152	230,4	34,9
8	0,031	25,0	0,4	1,084	43,1	46,7	1,810	24,9	45,1	1,812	24,9	39,0	0,130	230,2	29,9
9	0,231	25,0	5,7	1,078	43,1	46,4	2,010	24,9	50,0	1,581	24,9	34,0	0,109	230,1	25,0
10	0,427	25,0	10,7	1,075	43,4	46,7	2,220	24,8	55,1	1,354	24,9	28,9	0,087	230,0	20,0
11	0,605	25,0	15,1	1,090	43,1	47,0	2,420	24,8	60,0	1,146	25,0	24,3	0,067	230,0	15,4

**PRILOG P.4.3. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjerne (AC/DC) mikromreže sa izmjeničnim (AC) opterećenjem**

Mjerenje	Baterije			FN modul			AC trošilo			DC strana izmjenjivača		
	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]	I [A]	U [V]	P [W]
1	-1,867	25,7	-48,0	1,081	45,9	49,6	0,067	229,6	15,3	1,125	25,6	24,5
2	-1,850	25,9	-47,9	1,088	45,5	49,5	0,087	229,4	20,0	1,329	25,7	29,3
3	-1,832	25,9	-47,4	1,088	45,2	49,2	0,109	229,7	25,0	1,554	25,7	34,5
4	-1,814	25,9	-47,0	1,091	44,8	48,8	0,130	230,1	29,9	1,775	25,7	39,5
5	-1,815	25,9	-46,9	1,095	44,5	48,8	0,152	230,3	35,0	2,010	25,6	44,5
6	-1,811	25,7	-46,5	1,094	44,1	48,3	0,174	230,6	40,2	2,260	25,5	49,8
7	-1,815	25,6	-46,5	1,094	44,2	48,3	0,195	230,7	45,1	2,500	25,4	54,9
8	-1,807	25,5	-46,1	1,097	44,0	48,3	0,217	231,0	50,2	2,760	25,2	60,0
9	-1,825	25,4	-46,3	1,097	43,7	48,0	0,238	231,1	55,0	3,010	25,1	65,1
10	-1,840	25,3	-46,6	1,093	44,1	48,2	0,260	231,3	60,2	3,270	25,0	70,6
11	-1,837	25,2	-46,2	1,099	43,5	47,8	0,281	231,6	65,2	3,530	24,9	75,5
12	-1,834	25,1	-46,1	1,099	43,6	47,9	0,302	231,5	69,9	3,770	24,8	80,4
13	-1,834	25,1	-46,2	1,099	43,4	47,7	0,324	231,8	75,0	4,030	24,8	85,7

**PRILOG P.4.4. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo istosmjerno (DC) opterećenje**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC trošilo			DC strana izmjenjivača/punjača			Dodatni izvor energije		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	27,60	-1,595	-45,30	45,30	1,159	52,05	27,50	0,178	5,00	27,40	-1,157	-27,60	238,60	0,434	45,10
2	27,50	-1,353	-37,10	44,56	1,196	53,23	27,50	0,356	10,10	27,40	-1,051	-25,20	237,80	0,433	45,90
3	27,30	-0,802	-22,00	44,70	1,211	54,13	27,30	0,894	25,20	27,40	-2,030	-45,00	238,30	0,420	69,70
4	27,40	-0,655	-18,10	45,18	1,214	54,84	27,50	1,095	29,90	27,40	-1,423	-47,20	237,40	0,445	70,10
5	27,30	-0,482	-14,10	43,79	1,226	53,68	27,20	1,292	35,10	27,40	-2,200	-55,60	236,80	0,445	72,70
6	27,30	-0,268	-8,00	43,56	1,231	53,62	27,10	1,479	40,10	27,40	-2,090	-57,10	237,70	0,423	78,10
7	27,30	-0,084	-2,40	43,59	1,224	53,35	27,10	1,659	44,80	27,40	-2,720	-63,10	237,20	0,447	82,20
8	27,30	0,114	2,70	43,50	1,216	52,67	27,10	1,856	50,20	27,40	-2,420	-64,30	236,50	0,454	86,30
9	27,20	0,324	8,90	43,58	1,223	53,27	27,00	2,030	54,90	27,40	-2,850	-65,20	235,40	0,452	90,10
10	27,20	0,472	13,10	43,03	1,228	52,84	27,00	2,220	60,00	27,40	-2,820	-70,70	237,30	0,458	90,20
11	27,10	0,673	17,90	43,17	1,225	52,88	27,00	2,410	65,00	27,40	-3,020	-72,10	237,00	0,462	91,10
12	27,10	0,861	23,20	43,27	1,240	53,65	26,90	2,610	70,30	27,40	-3,020	-74,80	237,10	0,484	91,40
13	27,10	1,064	28,80	42,49	1,238	52,60	26,80	2,810	75,40	27,30	-3,320	-77,80	236,80	0,512	94,60

**PRILOG P.4.5. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu i ima samo izmjenično (AC) opterećenje**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC strana izmjenjivača/punjača			Dodatni AC izvor			AC trošilo		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	28,3	-1,772	-50,3	44,86	1,205	54,05	28,6	4,09	125,7	237,5	0,746	164,2	237	0,069	16,4
2	28,4	-1,761	-50,3	43,89	1,217	53,14	28,5	3,86	102,5	237	0,682	142,5	236	0,084	20
3	28,4	-1,752	-49,4	44,45	1,217	54,09	28,5	4,28	109,7	237,2	0,703	161,8	237,4	0,106	25,1
4	28,4	-1,747	-49,7	44,01	1,223	53,82	28,5	3,96	102,3	237,9	0,704	151,8	237,3	0,126	29,8
5	28,4	-1,733	-49,2	44,06	1,237	54,5	28,5	3,97	98,6	238,4	0,737	162,7	237,3	0,148	35
6	28,4	-1,721	-49	43,67	1,236	53,97	28,6	3,81	99,4	237,9	0,751	162,3	237	0,171	40,4
7	28,4	-1,719	-48,7	43,97	1,219	53,59	28,6	3,83	101	237,2	0,748	173	236,6	0,19	45,1
8	28,4	-1,725	-48,9	43,33	1,225	53,07	28,6	3,84	106,2	237,7	0,793	182,5	236,9	0,211	50
9	28,4	-1,706	-48,5	43,72	1,245	54,14	28,6	4,04	100,4	237,5	0,841	184,4	236,9	0,235	55,6
10	28,4	-1,701	-48,4	43,53	1,225	53,32	28,5	3,9	107,8	236,8	0,835	191,5	236,6	0,253	60
11	28,4	-1,698	-48,2	43,3	1,218	52,75	28,5	4,06	104,1	236,9	0,821	189,3	236,4	0,275	65,3
12	28,4	-1,702	-48,5	42,92	1,216	52,19	28,6	3,98	99,3	236,7	0,901	197,5	236	0,295	69,9
13	28,4	-1,701	-48,6	43,33	1,239	53,68	28,5	3,86	102,5	237,7	0,871	196,1	236,8	0,315	74,7

**PRILOG P.4.6. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže i ima samo izmjenično (AC) opterećenje**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC strana izmjenjivača/punjača			AC trošilo		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [ V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	27	-1,801	-48,5	42,29	1,245	52,65	26,8	1,872	30,4	229,9	0,067	15,4
2	27	-1,808	-48,2	42,37	1,231	52,15	26,7	2	35,1	230,6	0,087	20
3	26,4	-1,818	-48,6	42,97	1,252	53,79	26,6	2,09	37,5	229,8	0,108	24,9
4	26,7	-1,834	-48,9	42,97	1,235	53,06	26,4	2,32	45,2	230,1	0,131	30
5	26,5	-1,809	-47,8	42,97	1,253	53,84	26,2	2,51	50	230	0,152	34,9
6	26,5	-1,798	-47,8	42,67	1,255	53,45	26,2	2,7	53,2	230,4	0,175	40,3
7	26,4	-1,815	-47,6	42,44	1,251	53,09	26	2,81	57,6	230	0,195	44,8
8	26,3	-1,81	-47,6	42,4	1,241	52,61	25,9	3,02	65,4	230,3	0,217	50
9	26,2	-1,807	-47,7	42,7	1,233	52,64	25,8	3,32	70,5	230	0,239	55
10	26,2	-1,824	-47,9	42,66	1,258	53,67	25,7	3,53	75,8	230,5	0,261	60,2
11	25,9	-1,831	-48	42,75	1,254	53,61	25,6	3,77	81	230,2	0,283	65,1
12	25,4	-1,85	-47,5	42,73	1,272	54,12	25,5	3,89	83,5	229,8	0,303	69,7
13	25,4	-1,835	-47,4	42,5	1,27	53,97	25,5	4,11	91,7	230,2	0,327	75,4

**PRILOG P.4.7. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjerne (AC/DC) hibridne mikromreže koja je spojena na mrežu te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC trošilo			DC strana izmjenjivača/punjača			AC trošilo			Dodatni izvor energije		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	28,4	-1,551	-43,4	43,27	1,269	54,9	28,4	0,174	4,9	28,6	4,49	115,2	236,6	0,298	70,7	237,3	0,909	201,7
2	28,4	-1,332	-37,9	43,07	1,255	54,05	28,4	0,359	10,2	28,6	4,4	110,6	235,1	0,275	65,7	238,1	0,872	193,7
3	28,4	-0,818	-23,1	42,59	1,25	53,23	28,3	0,89	25,1	28,6	4,41	116,1	236,9	0,212	50	237,5	0,858	190,3
4	28,4	-0,641	-18,2	42,89	1,253	53,74	28,3	1,066	30,1	28,6	4,26	123,1	235,9	0,187	44,2	237,8	0,817	183,3
5	28,4	-0,434	-12,5	42,62	1,252	53,36	28,2	1,246	35	28,6	4,85	118,4	237,2	0,169	40	237,9	0,828	185,3
6	28,3	-0,295	-8,6	42,68	1,255	53,54	28,2	1,41	39,8	28,5	4,7	120,2	237,4	0,149	35,3	238,4	0,804	174,2
7	28,3	-0,125	-3,6	42,36	1,252	53,03	28,1	1,6	45	28,6	4,83	123,5	236,9	0,127	30	237,3	0,814	179,4
8	27,9	-0,054	-1,1	43,18	1,263	54,54	27,5	1,789	49,1	27,5	1,442	37,6	238,9	0,106	25,3	239,6	0,494	90
9	27,3	0,276	7,4	43	1,268	54,52	27,1	2,04	55,3	27,5	2,26	50,9	239,6	0,085	20,3	239,9	0,507	99,4
10	27,3	0,462	12,2	43,11	1,232	53,11	27,1	2,21	59,8	27,5	2,31	57,2	239,4	0,07	16,7	239,7	0,483	93,8

**PRILOG P.4.8. Rezultati mjerenja u karakterističnim točkama izmjenično/istosmjernje (AC/DC) hibridne mikromreže koja je odspojena sa mreže te ima i izmjenično (AC) i istosmjerno (DC) opterećenje**

Mjerenje	Baterije			FN modul			DC trošilo			DC strana izmjenjivača/punjača			AC trošilo		
	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]	U [V]	I [A]	P [W]
1	26,2	-1,701	-44,6	45,26	1,23	55,66	26,1	0,19	4,9	25,7	3,92	84,3	229,8	0,306	70,5
2	25,9	-1,506	-38,7	45,01	1,257	56,65	25,8	0,402	10,4	25,5	3,88	81	230,2	0,284	65,4
3	25,8	-1,099	-28,1	44,3	1,255	55,59	25,7	0,806	20,7	25,4	3,38	69,5	239,6	0,236	54,5
4	25,7	-0,943	-24,6	43,37	1,27	55,07	25,6	0,98	25,1	25,4	3,13	62,7	230,5	0,217	50
5	25,7	-0,701	-18,1	43,39	1,234	53,54	25,6	1,169	29,9	25,4	2,94	57,3	230	0,195	44,9
6	25,6	-0,499	-12,7	44	1,23	54,12	25,6	1,376	35,2	25,4	2,7	52,4	230,1	0,174	40,1
7	25,6	-0,303	-7,3	43,26	1,239	53,39	25,5	1,578	40,3	25,5	2,58	47,3	229,8	0,153	35,1
8	25,6	-0,102	-2,6	43,14	1,234	53,23	25,5	1,765	45	25,5	2,4	42,1	229,9	0,131	30,1
9	25,6	0,167	3,6	43,53	1,212	52,75	25,4	1,972	49,8	25,4	2,23	39,3	229,6	0,109	24,9
10	25,6	0,332	8,4	43,81	1,224	53,63	25,4	2,17	55	25,5	2,14	34,2	230,2	0,088	20,12
11	25,6	0,516	13,4	43,14	1,223	52,76	25,3	2,38	60,3	25,5	1,98	29,3	230,1	0,067	15,4