

Krešimir Vlahov  
HEP-ODS d.o.o.  
[kresimir.vlahov@hep.hr](mailto:kresimir.vlahov@hep.hr)

Marijo Brkić  
HEP-ODS d.o.o.  
[marijo.brkic@hep.hr](mailto:marijo.brkic@hep.hr)

Ante Višić  
HEP-ODS d.o.o.  
[ante.visic@hep.hr](mailto:ante.visic@hep.hr)

Renato Ćučić  
HEP-ODS d.o.o.  
[renato.cucic@hep.hr](mailto:renato.cucic@hep.hr)

## ANALIZA ISKUSTAVA S PRIMJENOM MIKROMREŽA UNUTAR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA

### SAŽETAK

Mikromreže su definirane kao lokalizirani skupovi trošila, distribuirane proizvodnje i spremnika energije koji su obično sinkronom vezom povezani s ostatkom mreže, ali mogu funkcionirati i neovisno o njoj. Ovakav pristup izgradnji mreže omogućava lakšu integraciju distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav te je zbog relativne jednostavnosti i modularnosti posebno značajan za elektrifikaciju izoliranih područja i objekata gdje je velik broj potrošača smješten na malom području (stambene zgrade, proizvodna postrojenja i sveučilišta).

Ovaj referat daje pregled iskustava stečenih primjenom koncepta mikromreže u izoliranim sredinama i na sveučilišnim kampusima. Pri tome se opisuje njihov ustroj, razlozi njihove izgradnje, njihov utjecaj na distribucijski sustav i kvalitetu električne energije te postignuti rezultati. Također su razmotrene mogućnosti razvoja i šire primjene unutar distribucijskog sustava.

**Ključne riječi:** mikromreže, obnovljivi izvori energije, kvaliteta električne energije,

## ANALYSIS OF EXPERIENCES WITH THE APPLICATION OF MICROGRIDS WITHIN THE DISTRIBUTION SYSTEM

### SUMMARY

Microgrids are defined as localized sets of consumers, distributed generation, and energy storage, which are usually synchronously connected to the rest of the network but can function independently. This approach to network construction makes it easier to integrate distributed sources into the power grid, and because of its relative simplicity and modularity, is particularly important for the electrification of isolated areas and facilities where a large number of consumers are located in a small area (residential buildings, manufacturing facilities and universities).

This paper provides an overview of the experience gained from the application of the concept of microgrid in isolated environments and on university campuses. This describes their organization, the reasons for their construction, their impact on the distribution system and the quality of electricity, and the results achieved. Possibilities for development and wider application within the distribution system are also considered.

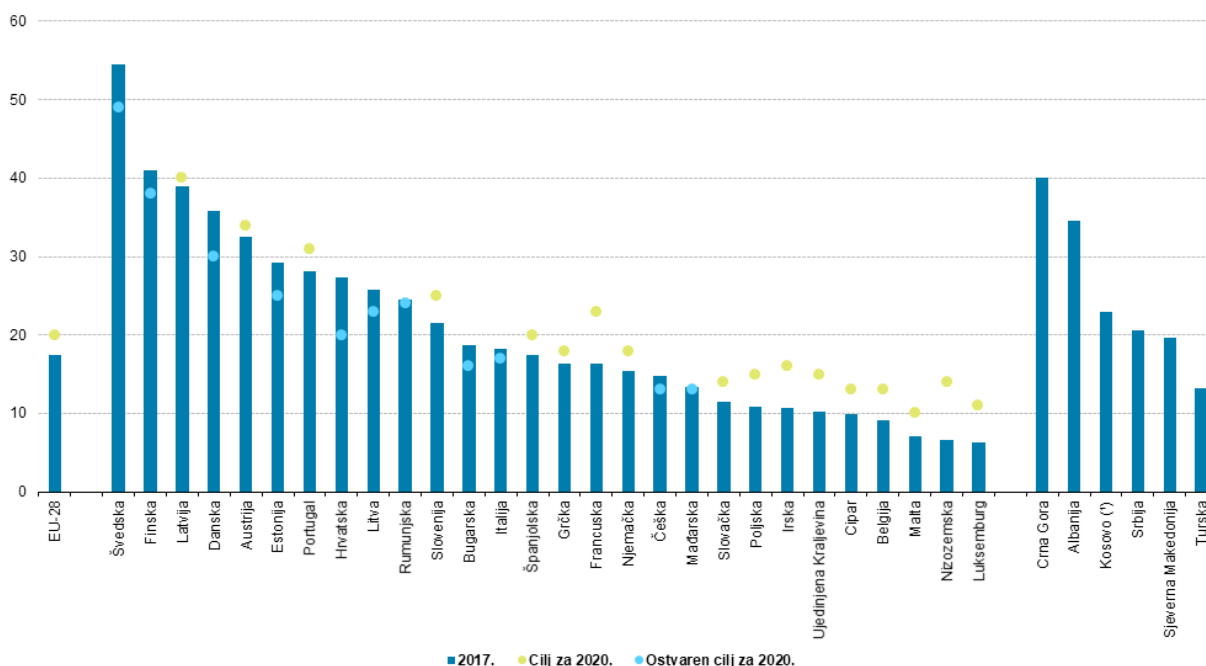
**Key words:** microgrids, renewable energy sources, power quality

## 1. UVOD

### 1.1. Obnovljivi izvori električne energije u elektroenergetskom sustavu

Zbog potrebe za smanjenjem emisija stakleničkih plinova na globalnoj razini sve više se potiče primjena obnovljivih izvora električne energije. Iako je cilj njihovog uvođenja smanjenje štetnog utjecaja proizvodnje električne energije na okoliš, s povećanjem njihovog udjela u prijenosnoj i distribucijskoj mreži i zbog varijabilnosti njihove proizvodnje sve izraženiji postaje negativan utjecaj na stabilnost elektroenergetskog sustava. Za ublažavanje ovog problema potrebne su znatne investicije i nova tehnička rješenja. Jedan od pristupa, koji omogućava smanjenje troškova ulaganja u infrastrukturu, olakšava vođenje elektroenergetskog sustava te je pogotovo značajan za distribucijski sustav, je primjena mikromreža i naprednih mreža za integraciju obnovljivih izvora.

Udio energije iz obnovljivih izvora, 2017.  
(% bruto konačne potrošnje energije)

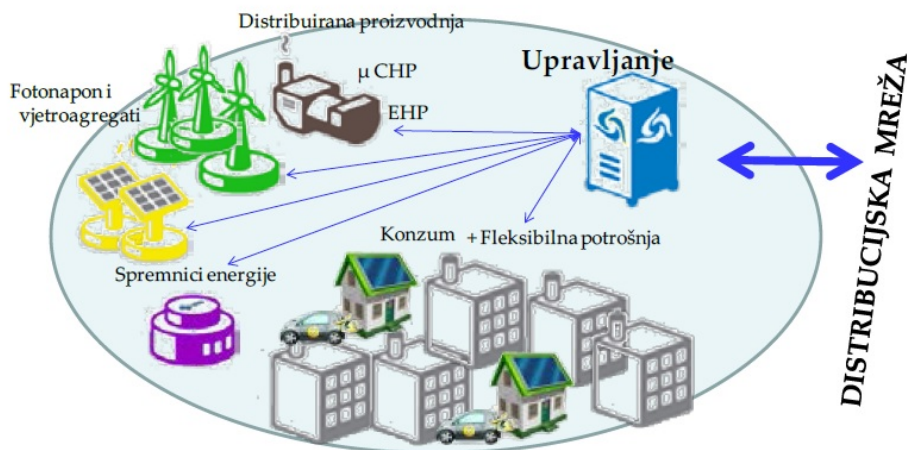


Slika 1 Udio obnovljivih izvora u proizvodnji el. energije u Europi [1]

Napredne mreže (engl. *Smart Grids*) obuhvaćaju široku primjenu komunikacijskih uređaja radi ostvarivanja veće učinkovitosti i osiguravanja veće pouzdanosti elemenata mreže, dok je kod mikromreža riječ o samodostatnim manjim mrežama u kojima se električna energija troši i skladišti na mjestu proizvodnje.

### 1.2. Mikromreže

Sam pojam mikromreže nije vezan isključivo za veličinu mreže, već se ona može definirati kao skup trošila, distribuirane proizvodnje i spremnika energije upravljanih na koordiniran način s ciljem pouzdane razmjene energije s ostatkom sustava preko jednog susretnog mjesta priključka (engl. *Point of Common Coupling* (PCC)) [2]. Iz ove definicije vidljivo je da je pojam mikromreže usko vezan za obnovljive, odnosno distribuirane izvore energije. Mikromreže mogu raditi paralelno s elektroenergetskim sustavom ili u otočnom pogonu te mogu biti izmjenične, istosmjerne ili mješovite.



Slika 2 Elementi mikromreže [2]

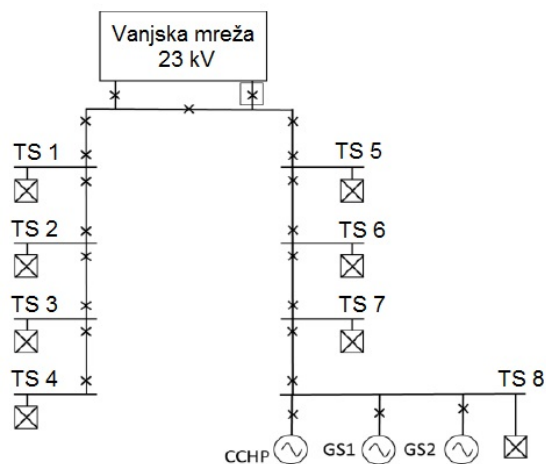
Koncept mikromreže kao takav nije potpuno nov, što pokazuju primjeri industrijskih mikromreža u Republici Hrvatskoj kao što su INA-Rafinerija nafte u Rijeci, Petrokemija Kutina i Tvornica papira i ambalaže u Belišću [3].

Problematika mikromreža nalazi svoje mjesto i u Mrežnim pravilima distribucijskog sustava, što je vidljivo iz činjenice da su u njima definirani pojmovi otočnog pogona, skladištenja energije i zaštite za odvajanje korisnika mreže. Mrežnim pravilima se također dozvoljava otočni pogon elektrane s dijelom mreže sukladno ugovoru koji su sklopili operator distribucijskog sustava i korisnik mreže te se mogućnost isporuke električne energije u otočnom pogonu predviđa kao pomoćna usluga. Povrh toga dozvoljena je primjena dodatnih funkcija zaštite u slučaju dopuštenog otočnog pogona i definirana je uloga zaštite za odvajanje korisnika, tj. isključivanje proizvodnog postrojenja s mreže u slučaju nedozvoljenog otočnog pogona [4], [5].

## 2. PRIMJERI MIKROMREŽA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

### 2.1. Kampus Leonardo u sklopu Sveučilišta u Milanu (Politecnica di Milano)

Mikromreža se sastoji od kogeneracijskog postrojenja snage  $2 \text{ MW}_{el}$ , 2 pričuva generatora ukupne snage  $1,6 \text{ MW}_{el}$ , manje fotonaponske elektrane i baterijskih spremnika energije. Unutarnja SN mreža kampusa ima u svom sastavu 8 transformatorskih stanica. Kampus je spojen na  $23 \text{ kV}$  mrežu i s operatorom distribucijskog sustava ima ugovorenu snagu od  $3,5 \text{ MW}$  [6]. Za potrebe upravljanja mikromrežom uspostavljena je upravljačka struktura koja se sastoji od jedne centralne upravljačke jedinice i osam lokalnih (u transformatorskim stanicama).



Slika 3 Shema mikromreže na kampusu Leonardo [6]

Pri normalnom pogonu potrošnja električne energije se pokriva iz kogeneracijskog postrojenja, a ostatak se preuzima iz mreže. Ciljevi uspostave mikromreže su smanjenje broja prekida napajanja (mikroprekidi i dugotrajni prekidi) i mogućnost pružanja pomoćnih usluga prema vanjskoj mreži.

Dugotrajni prekidi su definirani kao oni koji traju dulje od 3 min. Prije uspostave mikromreže kogeneracijsko postrojenje i pričuvni generatori nisu bili usklađeni pa su u slučaju prekida u napajanju samo zgrade s pričuvnim generatorima i baterijskim spremnicima imale opskrbu električnom energijom, dok se u takvim situacijama kogeneracijsko postrojenje automatski gasilo. Nakon uspostave mikromreže, u slučaju prekida napajanja sa strane vanjske mreže kogeneracijsko postrojenje se ne gasi već nastavlja s radom, a ako ono ne može zadovoljiti energetske potrebe kampusa, aktiviraju se pričuvni generatori.

Mikroprekidi uključuju kratkotrajne prekide ( $< 1$  s) i propade napona. U slučaju kratkotrajnog prekida ili propada napona može doći do prorade zaštite kogeneracijskog postrojenja i njegovog odspajanja s mikromreže, pri čemu se naglo poveća količina energije koja se preuzima iz distribucijske mreže. Kako dio računa za električnu energiju ovisi o vršnoj vrijednosti snage preuzete energije, ovakve pojave mogu dovesti do značajnog povećanja troškova, a zbog češće prorade zaštite također može doći do oštećenja na dijelovima postrojenja. Mikromreža omogućava kogeneracijskom postrojenju da izdrži mikroprekide u otopnom pogonu čime se izbjegavaju nepotrebna preuzimanja energije iz vanjske mreže, a u slučaju neuspješnog prijelaza u otopni pogon potrošnju mogu pokriti pričuvni generatori

U sklopu reforme tržišta pomoćnih usluga u Italiji korisnicima je moguće isplatiti novčanu naknadu za smanjenje el. energije koju preuzimaju iz mreže pa je i to uzeto u obzir kao prednost prilikom uspostave mikromreže.

Uštede ostvarene zbog smanjenog broja i trajanja prekida su procijenjene na otprilike oko 13.500 € godišnje. Na temelju dostupnih podataka izrađen je simulacijski model tržišta kako bi se utvrdile moguće uštede ostvarene pružanjem pomoćnih usluga te je pokazano da one iznose između 20.000 i 40.000 € godišnje. Smanjenjem iznosa maksimalne snage ostvarena je procijenjena ušteda od 42.000 € godišnje [6].

## **2.2. Kampus Sveučilišta Chonnam (J. Koreja)**

Na sveučilištu Chonnam više manjih mikromreža različitih tipova spojeno je u jednu veću s ciljem poboljšanja učinkovitosti i smanjenja troškova električne energije. Pojedinačne mikromreže stvorene su grupiranjem potrošača sličnog profila potrošnje pa su tako potrošači podijeljeni u mikromrežu ureda, mikromrežu obrazovnih prostora i mikromrežu stambenih prostora. Povrh toga proizvodne jedinice (fotonaponski paneli) su grupirane u zasebnu mikromrežu proizvođača.

Mikromreža ureda obuhvaća centralnu zgradu sveučilišta. Razdoblje povećane potrošnje počinje u 9:00 i traje do 18:00, za vrijeme pauze za ručak potrošnja je smanjena. Ovaj profil potrošnje vrijedi za radne dane, dok je tijekom vikenda potrošnja znatno manja. Mikromreža je opskrbljena baterijskim spremnicima snage 500 kW i fotonaponskim panelima snage 50 kW. Maksimalna snaga potrošnje iznosi 300 kW.

Mikromreža obrazovnih prostora obuhvaća predavaonice i laboratorije te bilježi veliku potrošnju između jutra i večeri, uz maksimum potrošnje između 15:00 i 17:00. U sastavu mikromreže su baterijski spremnici od 250 kW, punionica električnih vozila 2x7,7 kW i fotonaponski paneli snage 50 kW. Maksimalna snaga potrošnje iznosi 450 kW.

Mikromreža stambenog tipa obuhvaća spavaonice za studente i bilježi najveću potrošnju ujutro i navečer, pri čemu postoji mala razlika u potrošnji između radnih dana i vikenda. Velik udio u potrošnji električne energije čine motori. U sklopu mikromreže nema nikakve proizvodnje, no postoje baterijski spremnici snage 250 kW. Maksimalna snaga potrošnje je 400 kW

Mikromreža proizvođača sastoji se isključivo od fotonaponskih panela ukupne snage 675 kW [7].

Za potrebe upravljanja sustavom sastavljenim od više mikromreža razvijena je programska podrška koja ujedno omogućava razmjenu električnom energijom među mikromrežama s ciljem minimizacije troškova potrošnje električne energije. Programska podrška sastoji se od sustava za predviđanje proizvodnje električne energije, potrošnje električne energije, sustava za upravljanje baterijskim spremnicima i sustava za upravljanje u slučaju kvarova.

Pokusnim radom sustava u trajanju od dva tjedna demonstrirano je ispravno funkcioniranje programske podrške za upravljanje u normalnim uvjetima i u slučaju kvara te su zabilježene uštede u iznosu od malo preko 1000 \$ [7].

### 2.3. SPORE mikromreža u okolici Singapura

U blizini Singapura, u sklopu projekta SPORE (engl. *Sustainable Powering of Off-grid Regions*) izgrađena je mikromreža u kojoj se električna energija proizvodi iz više fluida. Sustav mikromreže sastoji se od sljedećih komponenata:

- vjetroturbina snage 100 kW
- dva dizelska generatora od 50 kVA i jedan od 100 kVA
- fotonaponska elektrana
- spremnici električne energije koji se prema mreži ponašaju kao jedinstveni virtualni sinkroni generator
- sustav za proizvodnju električne energije iz vodika koji se sastoji uređaja za proizvodnju i skladištenje plina te gorivih ćelija i punionice za vozilo koje koristi vodik kao gorivo
- simulirani sustav (na temelju jednog dizelskog generatora) koji proizvodi energiju iz bioplina [8]

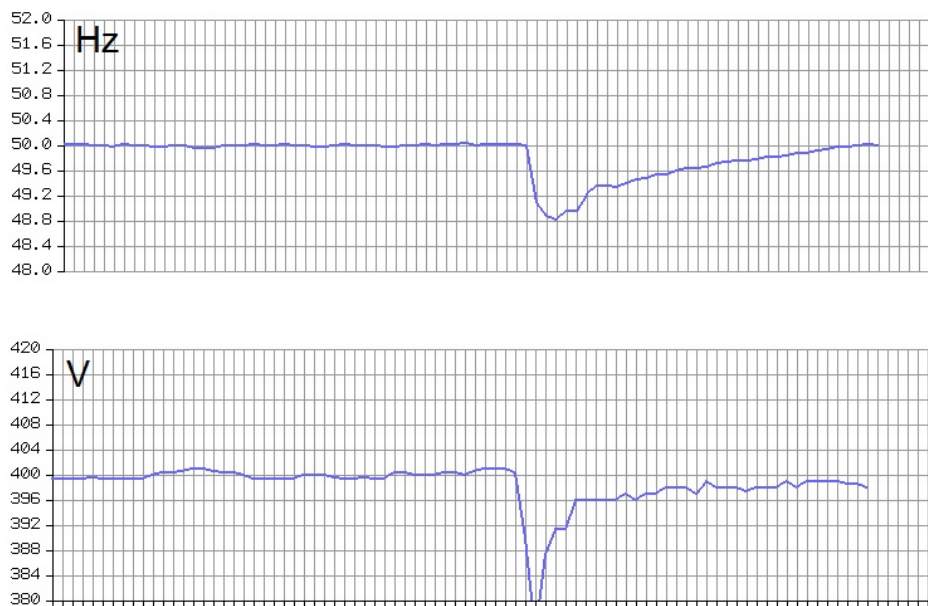
Upravljanje ovom mikromrežom vrši se preko tri sustava:

- $\mu$ EMS
  - cilj mu je optimizirati upotrebu dostupnih resursa s ciljem osiguravanja kontinuirane opskrbe električnom energijom po što nižoj cijeni uz minimalni utjecaj na okoliš
  - sastoji se od dva upravljačka sloja, pri čemu se jedan bavi optimizacijom rada i predviđanjima unutar jednog dana, dok drugi obavlja iste funkcije, ali na vremenskoj razini od dana do mjeseca
  - unutar dana određuje točke rada svih upravljivih uređaja i šalje ih u  $\mu$ PMS
  - u rasponu do mjeseca težište je na osiguravanju što duljeg radnog vijeka opreme i planiranju održavanja i opskrbe odgovarajućim gorivom
  - također obuhvaća algoritme za predviđanje proizvodnje iz obnovljivih izvora i potrošnje
- $\mu$ PMS
  - ovaj modul upravlja distribuiranim izvorima energije i cilj mu je osigurati odgovarajuću količinu rezerve za stabilno funkcioniranje mikromreže
  - funkcije:
    - regulacija djelatne i jalove snage
    - osiguravanje što veće iskoristivosti obnovljivih izvora energije, uz uvjet da generatori ne rade u području s lošom učinkovitošću
    - osiguravanje stabilnosti sustava
    - osiguravanje rada unutar tehničkih granica proizvodnih jedinica
- SCADA
  - praćenje parametara sustava:
    - frekvencija
    - napon
    - kvaliteta el. energije (harmonici, nesimetrije itd.)
    - udio obnovljivih izvora

Unutar pilot projekta bit će ispitano sljedeće:

- mogućnost crnog starta, odnosno ponovnog uspostavljanja proizvodnje bez oslanjanja na vanjsku mrežu. primjenom dizelskih generatora ili virtualnih sinkronih generatora
- mogućnost sinkronizacije svih distribuiranih izvora unutar mikromreže s distribucijskim sustavom te mogućnost sinkronizacije s drugim mikromrežama
- odziv na iznenadnu promjenu opterećenja
  - ispitivanje odziva na snage potrošnje do 400 kW, uz praćenje frekvencije i napona
- N-1 situacije, tj. provjera normalnog rada mikromreže nakon ispada jedne proizvodne jedinice ili drugog elementa
- promjena iznosa proizvedene električne energije
  - praćenje stabilnosti mikromreže tijekom fluktuacija u proizvodnji el. energije
- mogućnost spajanja na SN/NN transformator radi povezivanja s drugim mikromrežama
- djelovanje zaštite
- kvaliteta električne energije s obzirom na specifične karakteristike mikromreža
- optimizacija
  - ispitivanje rada  $\mu$ EMS
  - autonoman rad mreže u trajanju od nekoliko tjedana

Do sada su obavljena ispitivanja ponašanja mikromreže u slučaju iznenadne promjene opterećenja. U mikromrežu je iznenadno uvedeno radno, jalovo ili kombinirano opterećenje te su pritom praćene promjene u frekvenciji i naponu mreže. Primjer takvog ispitivanja prikazan je na Slici 4. U promatranom slučaju bilo je riječ o kombinaciji od 40 kW radne snage i 30 kVAr jalove snage induktivnog karaktera. Iz slike je vidljivo da je mikromreža nakon određenog vremenskog perioda uspjela vratiti frekvenciju i napon na vrijednosti koje su blizu početnima.



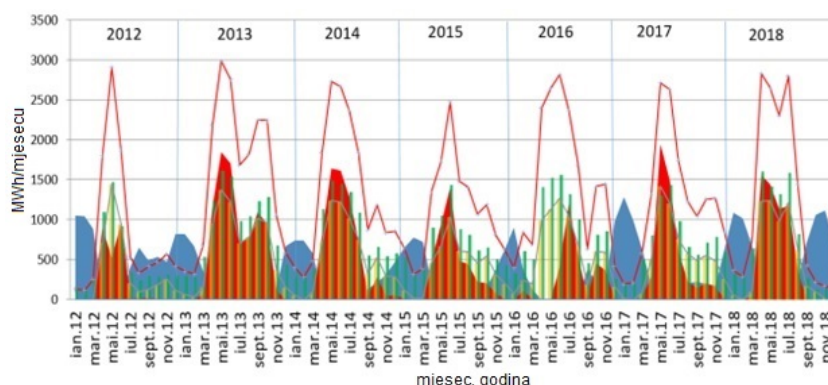
Slika 4 Promjena frekvencije i napona u mikromreži nakon iznenadne promjene opterećenja (40 kW i 30 kVAr ind.) [8]

Ovaj pilot projekt je dio većeg programa kojem je krajnji cilj ispitati mogućnost spajanja više mikromreža preko distribucijskog sustava. Iskustva stečena radom tako spojenih mikromreža bit će primijenjena za preciznije upravljanje mikromrežama te za razvoj novog pristupa elektrifikaciji koji bi obuhvaćao izgradnju decentraliziranih mreža i njihovo postupno spajanje.

## 2.4. Moguća mikromreža u Rumunjskoj

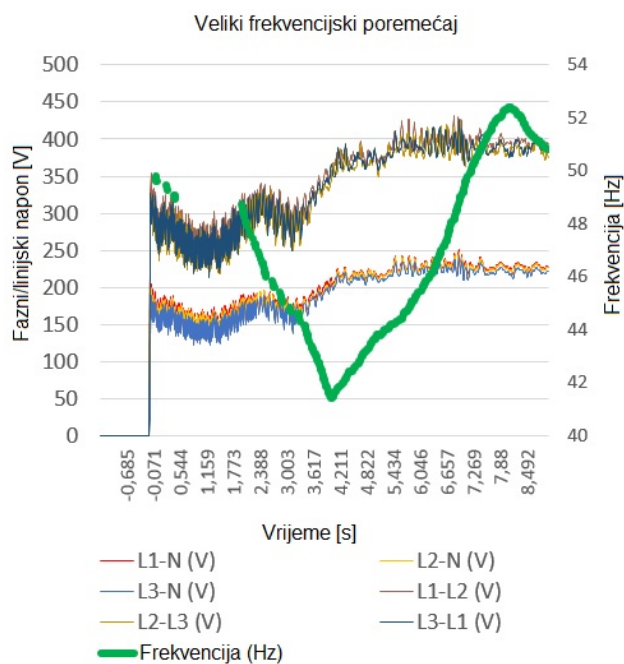
U sklopu studije koja se provodi u Rumunjskoj razmotrena su dva primjera malih izoliranih elektrana (tri male hidroelektrane ukupne instalirane snage 5000 kW i fotonaponska elektrana u kombinaciji s vjetroturbinama) i njihova moguća primjena unutar odgovarajućih mikromreža, odnosno njihova mogućnost rada u otočnom pogonu [9].

Slika 5 prikazuje proizvodnju i potrošnju električne energije na promatranoj lokaciji. Energija preuzeta iz mreže prikazana je površinom plave, a energija predana u mrežu površinom crvene boje. Proizvodnja hidroelektrana prikazana je stupcima žute, odnosno zelene boje, a ukupna količina energije iz distribuiranih izvora krivuljom crvene boje. Vidljivo je da je energija distribuirane proizvodnje i više nego dovoljna za zadovoljenje potrošnje tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci. Za operatora distribucijskog sustava značajna su pitanja na koji način obrnuti tokovi električne energije utječu na gubitke u mreži te je li moguće opskrbiti lokalne potrošače električnom energijom u slučaju vremenskih nepogoda ili dugotrajnih radova.



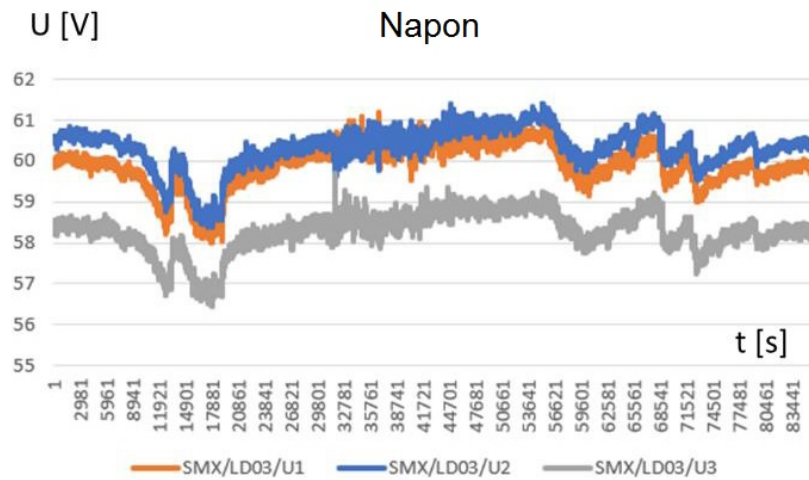
Slika 5 Preuzeta i predana električna energija od 2012. do 2019. [9]

Sustav korišten za praćenje rada sastoji se od  $\mu$ PMU sustava, proširenja naprednih brojila (SMX) i PQ analizatora. Glavni dio  $\mu$ PMU sustava čini PMU (engl. *Phasor Measurement Unit*) koji bilježi vremenski sinkronizirane podatke o amplitudi i faznom kutu fazora napona i struje na širem području. U ovoj studiji korišten je za bilježenje napona i frekvencije te za detekciju prijelaza u otočni pogon. Na Slici 6 prikazan je primjer podataka o frekvenciji i naponu tijekom prelaska u otočni pogon zabilježenih pomoću PMU uređaja



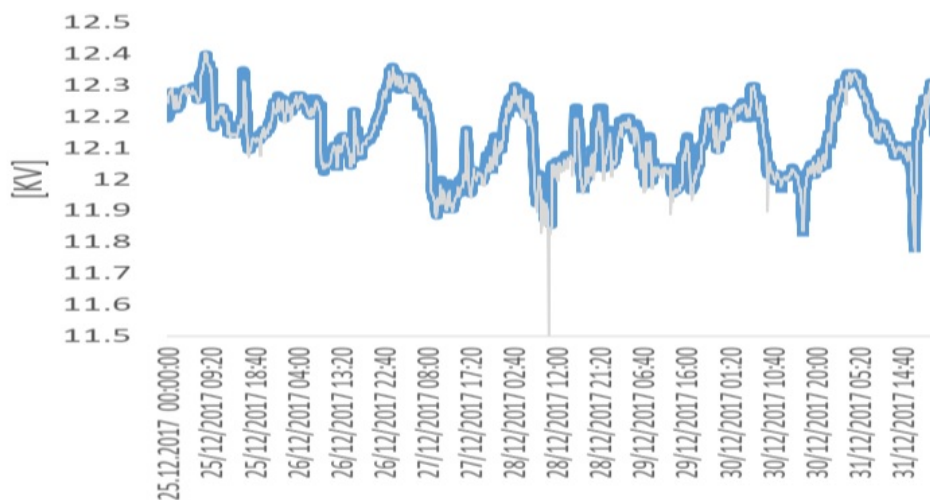
Slika 6 Mjerni podaci s PMU uređaja [9]

Sljedeća komponenta je proširenje naprednog brojila, tzv. SMX (engl. *Smart Meter Extension*) uređaj. Riječ je o Raspberry Pi 2 računalu koje očitava podatke s naprednog brojila u stvarnom vremenu i pohranjuje ih na memorijsku karticu. Ova komponenta također je korištena za bilježenje vrijednosti napona i frekvencije. Podaci o naponu po fazama unutar jednog dana u fotonaponskoj elektrani koje je zabilježio SMX uređaj prikazani su na Slici 7



Slika 7 Mjerni podaci sa SMX uređaja [9]

Zadnja komponenta je PQ analizator koji je postavljen kako bi se usporedila točnost podataka iz PMU i SMX uređaja. Na Slici 8 paralelno su prikazani podaci zabilježeni pomoću SMX uređaja i PQ analizatora unutar jednog tjedna. Siva krivulja predstavlja podatke iz SMX uređaja, a plava one iz PQ analizatora. Zabilježeno je podudaranje podatka iz SMX uređaja s onima iz PQ analizatora.



Slika 8 Usporedba podataka s SMX uređaja i PQ analizatora [9]

Studija je još uvijek u inicijalnoj fazi pa stoga još nema konačnih zaključaka. Istaknuta je važnost pouzdanosti komunikacijskog sustava pri uspostavljanju mikromreža u izoliranim područjima te potreba za sustavom za pohranu električne energije kako bi se osiguralo napajanje u situacijama u kojima distribuirani izvori ne mogu zadovoljiti energetske potrebe lokalnih potrošača u oštrom pogonu. U daljnjem tijeku studije ispitat će se mogućnost rada izoliranih sustava neovisno od mreže tijekom kraćih vremenskih perioda i bilježit će se utjecaj na SAIDI i SAIFI. Također će biti utvrđeno mogu li napredna brojila pružiti dovoljno točne podatke za potrebe upravljačkih algoritama, koje prilagodbe će biti potrebno izvršiti u sustavu zaštite i koja je potrebna količina spremnika energije za siguran rad mikromreže. Na temelju iskustava stečenih provedbom ove studije pristupit će se razvoju mogućih modela suradnje operatora distribucijskog sustava, potrošača i proizvođača te određivanju stupnja uključenosti operatora u projekt razvoja i vođenja mikromreža [7].



#### 4. ZAKLJUČAK

Mikromreže su razmjerno nov oblik integracije obnovljivih, odnosno distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav. Osim toga donose prednosti kao što su odgađanje investicija, poboljšanje kvalitete električne energije te mogućnost pružanja pomoćnih usluga na lokalnoj razini. Međutim, pri njihovoj izgradnji, održavanju i vođenju treba uzeti u obzir da je riječ o mrežama koje su ustrojene na drugačiji način od tradicionalnih te je zbog toga potrebno razviti odgovarajuće matematičke modele i steći iskustva iz pilot projekata kako bi se problemi koji se javljaju zbog rada u otočnom pogonu, promjenjivog smjera proizvodnje i potrošnje i veće osjetljivosti na poremećaje u frekvenciji mogli ublažiti i kako bi se krajnjim korisnicima mogla osigurati neprekinuta opskrba električnom energijom zadovoljavajuće kvalitete.

#### 5. LITERATURA

- [1] Statistički podatci o obnovljivoj energiji, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics/hr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/hr)
- [2] N. Holjevac, „Analiza fleksibilnosti elektroenergetske mikromreže“, Kvalifikacijski doktorski ispit, FER, Zagreb, siječanj 2015.
- [3] I. Kuzle, „Mikromreže i fleksibilna trošila“, Mipro 2015
- [4] Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/2018, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_08\\_74\\_1539.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html)
- [5] Izmjene i dopune Mrežnih pravila distribucijskog sustava, NN 52/2020, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_04\\_52\\_1053.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_52_1053.html)
- [6] M. Delfanti, A. Blaco, F. Bovera, M. Pozzi, G. Invernizzi, G. Vielmini, „Designing A Microgrid To Improve Continuity Of Service And Flexibility The Case Of Politecnico Di Milano Leonardo Campus“, CIRED Madrid 2019, 3.-6. lipnja 2019., rad br. 2321
- [7] B. C. Kim, H. Y. Jeong, S. Y. Kwon, „Implementation and Optimal Operation of Campus MicroGrid-EMS System Considering Multi-MG Power Trading“, CIRED Madrid 2019, 3.-6. lipnja 2019., rad br. 0663
- [8] J. Wild, X. Peng, A. Ballereau, A. Quentin, L. Paziienza, S. Wibisono, T. Menon, „SPORE Multifluid Microgrid Tests and Results in the Tropics“, CIRED Madrid 2019, 3.-6. lipnja 2019., rad br. 334
- [9] E. Constantinescu, D. Stanescu, M. Sanduleac, „Microgrids – Case Studies“, CIRED Madrid 2019, 3.-6. lipnja 2019., rad br. 2043