

# Utjecaj mikromreže na kvalitetu električne energije

---

**Kaučić, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:919653>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**SVEUČILIŠNI STUDIJ**

**UTJECAJ MIKROMREŽE NA KVALITETU  
ELEKTRIČNE ENERGIJE**

**Diplomski rad**

**Mihael Kaučić**

**Osijek, 2017.**

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 21.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Mihael Kaučić
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D 910, 12.10.2015.
<b>OIB studenta:</b>	86073595731
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Danijel Topić
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Utjecaj mikromreže na kvalitetu električne energije
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	
<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: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	21.09.2017.
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, 27.09.2017.

**Ime i prezime studenta:**

Mihael Kaučić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D 910, 12.10.2015.

**Ephorus podudaranje [%]:**

3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj mikromreže na kvalitetu električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić

i sumentora

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> .....	1
<b>2. MIKROMREŽA</b> .....	2
2.1. Uređenje mikromreže .....	2
2.2. Što je a što nije mikromreža? .....	4
2.2.1. Razlika između mikromreže i virtualne elektrane .....	6
2.3. Upravljanje i načini djelovanja mikromreže.....	8
2.3.1. Upravljivi elementi mikromreže .....	8
2.3.2. Obnovljivi izvori energije s isprekidanim pogonom .....	8
2.4. Strategije upravljanja mikromrežom .....	10
2.5. Tržišni modeli mikromreže.....	11
2.5.1. Modeli unutarnjeg tržišta mikromreže.....	12
2.5.1.1. Model s monopolom operatora distribucijskog sustava .....	12
2.5.1.2. Liberalizirani model.....	13
2.5.2. Utjecaj vanjskog tržišta na mikromreže.....	14
2.5.2.1. Zadovoljenje lokalne potrošnje.....	15
2.5.2.2. Prepoznavanje vrijednosti lokaliteta .....	15
2.5.2.3. Vremenske tarife za lokalnu energiju .....	16
2.6. Problemi pri upravljanju mikromrežom .....	16
2.6.1. Upravljačke funkcije.....	17
2.6.2. Uloga informacijske i komunikacijske tehnologije .....	18
2.7. Hijerarhijske razine upravljanja mikromrežom .....	19
2.7.1. Centralizirano i decentralizirano upravljanje.....	22
<b>3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE</b> .....	23
3.1. Analiza kvalitete električne energije .....	24
3.1.1. Naponski propadi .....	26
3.1.2. Prenaponi i previsoki naponi .....	28
3.1.3. Harmonička izobličenja .....	30
3.1.4. Treperenje napona.....	32
3.1.5. Nesimetrija.....	33
<b>4. UTJECAJ RAZLIČITIH VRSTA MIKROMREŽA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE</b> .....	35
4.1. Sustav s dizelskim generatorom u pripravnosti .....	37

4.2. Sekundarni sustav distribuirane proizvodnje.....	37
4.3. Sustav s primarnim distribucijskim izvorom.....	38
4.4. Distribuirani izvor meko spojen na mrežu.....	39
4.5. Fotonaponski distribuirani izvor s isprekidanim pogonom .....	40
4.6. Distribuirani izvor (vjetroelektrana) s isprekidanim pogonom .....	40
4.7. Sustav s dvostrukom istosmjernom sabirnicom .....	41
<b>5. ANALIZA MOGUĆIH UTJECAJA MIKROMREŽE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>43</b>
5.1. Analiza kvalitete električne energije s postojećom fotonaponskom elektranom.....	43
5.1.1. Naponska razina i propadi .....	45
5.1.2. Treperenje napona.....	48
5.1.3. Harmoničko izobličenje.....	49
5.1.4. Nesimetrija.....	50
5.2. Mogući utjecaj modelirane mikromreže na kvalitetu električne energije .....	50
5.2.1. Naponska razina i propadi .....	54
5.2.2. Treperenje napona.....	55
5.2.3. Harmoničko izobličenje.....	55
5.2.4. Nesimetrija.....	55
5.2.5. Frekvencija.....	56
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>59</b>

# 1. UVOD

Korištenjem neobnovljivih izvora energije, koji su za sada primarni energent, dovodi i dovoditi će čovječanstvo pred izazove i promjene koje će utjecati na svakog stanovnika planeta Zemlje. Problemi koje donose neobnovljivi izvori energije moraju se riješiti u protivnom će možda doći do nepopravljivih posljedica na planet Zemlju i sva bića koja na njemu žive. Zbog toga što u sadašnjosti ne postoji jeftina i čista energija i ne može se očekivati da će se potrošnja energije smanjiti, a energija je potrebna svima, mora se razmotriti slučaj u kojem će elektroenergetski sustav preuzeti dio energije koju čovječanstvo troši, npr. prijelaz na električna vozila, te će morati povećati proizvodnju, učinkovitost, držati kvalitetu po zakonskim normama i uz to smanjiti emisije štetnih plinova. Jedno od rješenja je pametna mreža koja u svom sastavu sadrži mikromreže na distribucijskoj razini.

Da bi se potencijal mikromreža iskoristio u potpunosti potrebna im je infrastrukturna podrška jer sadašnja mreža nije izgrađena da bi podržala koncept mikromreža. Uz već postojeće probleme koji dolaze zbog povećanja broja nelinearnih trošila i korištenja osjetljivih uređaja kojima je potrebna kvalitetna električna energija dolazi pitanje na koji način će mikromreže u elektroenergetskoj mreži utjecati na kvalitetu električne energije?

Diplomski rad za cilj ima razmotriti moguće utjecaje mikromreže na kvalitetu električne energije pomoću realnog primjera i izvedenih mjerenja.

## **2. MIKROMREŽA**

Distribucijska mreža postepeno se transformira iz pasivne u aktivnu mrežu. Zbog takve promjene distribucijska mreža mora dobiti mogućnost upravljanja i dvosmjernog toka energije. Takva mreža omogućiti će lakšu integraciju distribuiranih izvora i tehnologije pohrane energije te ujedno stvoriti mogućnost ugradnje novih tehnologija i pojave novih tipova usluga koje moraju odgovarati općim standardima i protokolima.

Aktivne distribucijske mreže učinkovito povezuju proizvodnju energije s potrošnjom, dozvoljavajući objema stranama da odluče optimalan način rada u realnom vremenu. Procjena toka energije, upravljanje naponskim prilikama i zaštita zahtijevaju troškovno konkurentne tehnologije i nove sustave komunikacije koji će imati ključnu ulogu. Realizacija aktivne distribucijske mreže zahtjeva implementaciju radikalno novog koncepta sustava. Mikromreže, karakterizirane kao građevni blokovi pametnih mreža su tehnologije koje najviše obećavaju.

Mikromreža je u suštini aktivna distribucijska mreža izgrađena kako bi opskrbljivala električnom i toplinskom energijom male kućanske zajednice, fakultete, škole, trgovačke centre itd. [1]. Sastoji se od distribuiranih izvora koji su obnovljivi (nekonvencionalni) i različitih opterećenja (trošila) te se nalaze u distribucijskoj mreži i to u blizini korisnika. Relativno su male snage naspram konvencionalnih elektrana.

### **2.1. Uređenje mikromreže**

Uređenje mikromreže je temeljeno na mogućnosti upravljanja koje je omogućeno uplivom distribuiranih izvora kao što su mikroturbine, gorivne ćelije i fotonaponski paneli zajedno sa uređajima za pohranu energije kao što su zamašnjaci, energetske kondenzatori, baterije i upravljivim teretima kao što su električna vozila. Takvo upravljanje daje mogućnost dijelovima distribucijske mreže da rade u otočnom pogonu u slučaju kvara ili ostalih poremećaja povećavajući tako kvalitetu opskrbe potrošača. Primjena upravljanja je ključni faktor koji razlikuje mikromrežu od distribucijske mreže s distribuiranom proizvodnjom.

S gledišta potrošača, mikromreže zadovoljavaju potrebe za toplinskom i električnom energijom i uz to lokalno povećavaju pouzdanost, smanjuju emisiju štetnih plinova, popravljaju kvalitetu električne energije tako što pomažu u održavanju napona u dozvoljenim granicama i potencijalno snižavaju cijenu električne energije.



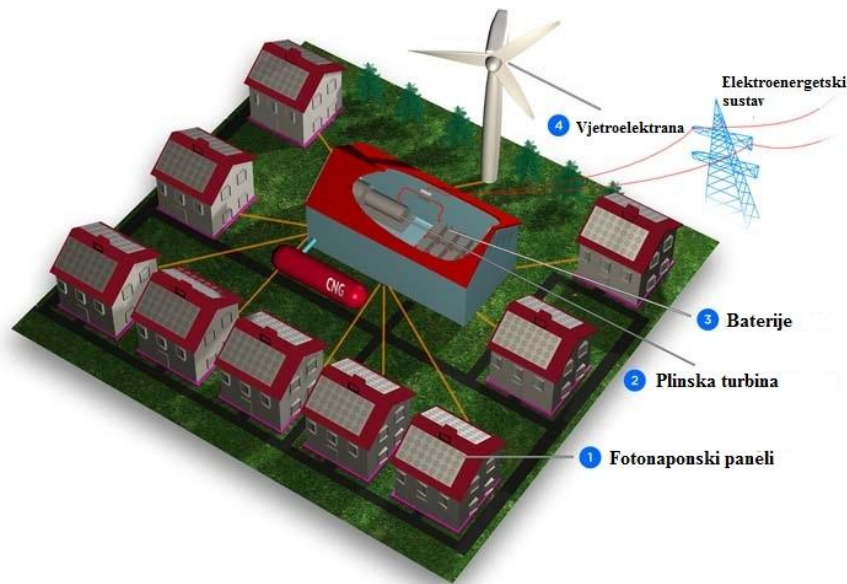
S gledišta mrežnog operatera, mikromreža se smatra kao upravljivo postrojenje unutar sustava koje se može smatrati kao generator ili teret s jednim agregatom a uz privlačnu novčanu naknadu može služiti kao mali izvor energije za pomoćne usluge mreži. Sinergijom lokalnih tereta i lokalnih mikroizvora, mikromreže mogu donijeti različite ekonomske, tehničke, ekološke, i socijalne koristi dionicima. Ključan potencijal za instaliranje mikroizvora na prostoru potrošača je da se iskoristi otpadna toplina iz procesa pretvorbe primarnog goriva u električnu energiju [1].

Postoji značajan napredak u razvoju uređaja malih snaga koji iskorištavaju otpadnu toplinu i proizvode električnu energiju. Takvi sustavi igraju bitnu ulogu u mikromrežama koje su smještene u zemljama s hladnijom klimom. Fotonaponski sustav ima najveći potencijal u zemljama s puno sunčanih dana. Primjena uređaja koji iskorištavaju otpadnu toplinu i proizvode električnu energiju i fotonaponskih sustava potencijalno povećava sveukupnu učinkovitost procesa pretvorbe primarnog goriva i posljedično daju značajne ekološke dobiti u smislu smanjenja emisija ugljika, što je još jedna važna prednost u borbi s klimatskim promjenama.

S gledišta mreže, primjena mikromreža smanjuje potrebu za distribucijskim i prijenosnim postrojenjima. Proizvodnja smještena blizu potrošača smanjuje tok energije u prijenosnim i distribucijskim krugovima što za posljedicu ima dva efekta. Prvi je smanjenje gubitaka a drugi je potencijalna zamjena uloga s nekim dijelovima mreže (npr. preuzimanje uloge održavanja napona u dozvoljenim granicama). Još jedna od prednosti proizvodnje blizu potrošača je da se povećava kvaliteta usluge krajnjem kupcu. Mikromreža može podržati mrežu u trenutcima potrošnje energije koja graniči s mogućnostima mreže i može dati potporu pri ponovnoj uspostavi mreže poslije kvarova.

Distribuirani izvori priključeni su u jednoj točki na mrežu, većinom je to mreža srednjeg napona i visokonaponska mreža. Mikroizvori kao što su fotonapon, gorivne ćelije, mikroturbine osim vjetrogeneratora sa snagom do 100 kW mogu biti direktno spojeni na mrežu niskog napona. Takva postrojenja koja su tipično smještena kod potrošača su potencijalne opcije koje će udovoljiti povećanju potrošnje električne energije uz težnju prema povećanju pouzdanosti i kvaliteti električne energije osiguravajući različite tehničke, ekološke i ekonomske koristi. Za ostvarivanje optimalne integracije potrebna je promjena filozofije spajanja mikroizvora. Najvažnija spoznaja je da uz povećanje broja mikroizvora, distributivna mreža više ne može biti smatrana kao pasivna mreža od strane prijenosne mreže. Ukoliko se ne bude obratilo pažnju na promjenu distributivne mreže doći će do značajnih promjena u proizvodnji i potrošnji energije i frekvenciji mreže što može imati katastrofalne posljedice.

Da bi se izbjegli takvi scenariji potrebno je donijeti sustav upravljanja i menadžmenta za olakšanje potpune integracije mikroizvora i dinamičkog upravljanja opterećenjima [1]. Potencijalu tehnologije mikroizvora može se pristupiti sustavno i to tako da se mikroizvor s pripadajućim potrošačima smatra podsustav ili mikromreža kao što je prikazano na slici 2.1.



Sl. 2.1. *Primjer mikromreže* [2].

## 2.2. Što je a što nije mikromreža?

Mikromreža je integracijska platforma za mikroizvore, uređaje za skladištenje energije i upravljive terete smještene u lokalnu distributivnu mrežu. Koncept mikromreže fokusira se na zadovoljenje potreba obližnjih potrošača za električnom energijom, stoga modeli koji zanemaruju fizičku udaljenost izvora i potrošača nisu mikromreža. Mikromreža je tipično smještena na niskonaponskoj razini mreže s ukupnom instaliranom snagom mikroizvora manjom od jednog MW, no svejedno može biti iznimki pa tako neki dijelovi srednjenaponske mreže mogu pripadati mikromreži u svrhu interkonekcije.

Mikromreža bi trebala biti sposobna raditi u normalnom stanju (spojena s mrežom) i u izvanrednom stanju (otočni pogon). Većina mikromreža će raditi većinu vremena spojena na mrežu osim onih mikromreža koje su izgrađene na fizičkim otocima. Najveće prednosti mikromreže dobiti će se spojem na mrežu. Da bi se ostvario dugoročni otočni pogon, mikromreža mora imati dovoljno uređaja za skladištenje električne energije da bi omogućila stalnu opskrbu.

Razlika između mikromreže i pasivne mreže u kojoj postoje mikroizvori je uglavnom u mogućnosti upravljanja i koordinaciji dostupnih resursa [1].

U nastavku biti će objašnjena pogrešna shvaćanja mikromreže prema [1] :

- Klijenti koji posjeduju mikroizvore izgrađuju mikromrežu.
  - Povećan broj mikroizvora je uistinu posebno svojstvo mikromreže, ali mikromreža znači više od postavljanja i puštanja u pogon. Ona zahtjeva aktivnu kontrolu, nadzor i optimizaciju.
- Mikromreže su isključivo izolirani sustav.
  - Mikromreže imaju sposobnost da rade u otočnom pogonu u izvanrednim situacijama, te time povećavaju pouzdanost cijelog sustava. Ali zapravo najviše vremena su u radu na mreži.
- Mikromreža je sastavljena od promjenjivih obnovljivih izvora energije, te je time nepouzdana i podložna kvarovima i potpunim zastojećima.
  - Mikromreža može neutralizirati fluktuacije koje imaju obnovljivi izvori energije s vlastitim uređajima za skladištenje energije (otočni pogon) ili vanjske proizvodne rezerve (rad s mrežom). Uostalom sama mogućnost prelaska iz mrežnog u otočni pogon povećava sigurnost opskrbe.
- Mikromreže su skupe za izgradnju pa je njezin koncept primjenjiv na mjestima udaljenim od elektroenergetske mreže ili pri istraživačkom radu.
  - Broj distribucijskih izvora se povećava na svjetskoj razini. Financijske potpore za obnovljive izvore energije i kombinirane procese proizvodnje električne i toplinske energije su osigurale osnovnu profitabilnost takvih izvora. Smanjenje cijene u budućnosti mikroizvora i uređaja za pohranu energije mogu učiniti mikromreže komercijalno konkurentne na tržištu. U svakom slučaju, dodatni trošak za promjenu distribucijskog sustava s distribucijskom proizvodnjom u mikromrežu zahtjeva samo trošak ugradnje najbitnijih upravljanja i komunikacijskog sustava. Takav trošak se kompenzira s ekonomskim prednostima upravljivih distribucijskih izvora.
- Koncept mikromreže je samo još jedan marketinški trik prodavača kako bi povećali vlastiti profit.

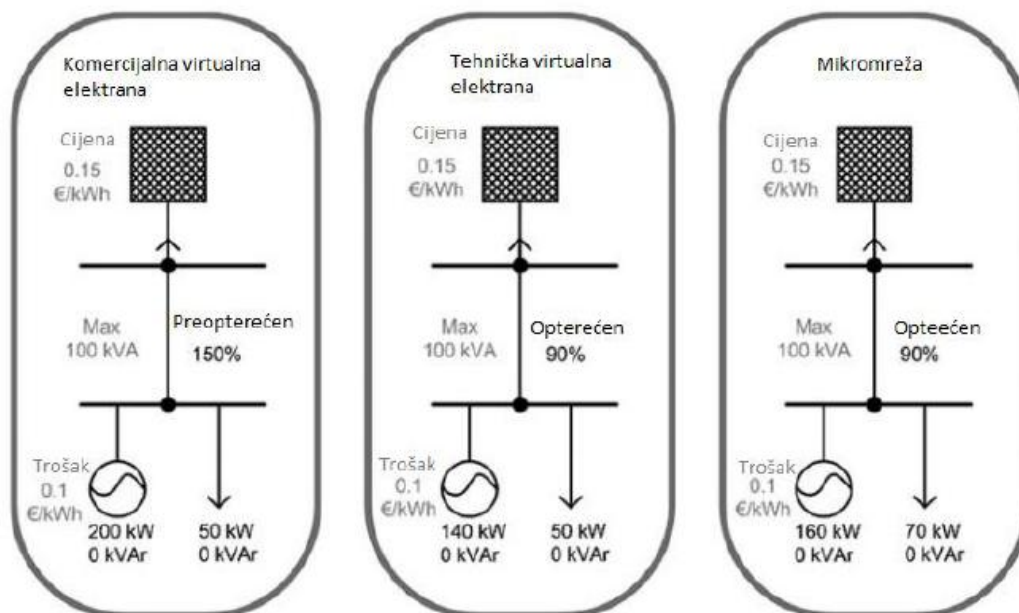
- Ako se krajnji kupac ne želi ugradnju fotonaponskog sustava i ne želi imati udio vlasništva u zajedničkom uređaju za proizvodnju električne energije i toplinske on može imati koristi tako što postoji veći izbor opskrbljivača energijom te tako sudjelovati u smanjenju cijene same energije zbog smanjenja emisije štetnih plinova u okoliš.
- Upravljanje mikromrežom će prisiliti potrošače da promjene svoje potrebe za energijom na temelju dostupnosti obnovljivih izvora energije, npr. uključenje perilice rublja samo kada ima energije sunca i/ili vjetra.
  - Program integracije potrošača u normalnim komercijalnim i kućanskim primjenama treba raditi tako da opterećenje prati generiranu energiju. U takvom režimu rada upravljanje je moguće samo sa uređajima kao što su hladnjak ili klima uređaj ili vremenski neosjetljivi uređaji kao što su bojleri.
- Mikromreža je totalno nova ideja koja zahtjeva izgradnju potpuno nove mreže.
  - Uz ugradnju novih mjerenja, komunikacije i uređaja za upravljanje pretvorba pasivne mreže u mikromrežu ne zahtjeva velike troškove infrastrukture sa strane mrežnog operatera. Mikromreža može zapravo smanjiti troškove investicije u nove uređaje koji moraju zamijeniti postojeće.
- Potrošači spojeni na mikromrežu neće nikada imati prekid opskrbe.
  - Gladak prijelaz na otočni rad moguć je samo uz veliku zalihosnost spremnika energije ili generatora mikromreže. Mikromreža u otočnom pogonu će vjerojatno morati ugaziti nekritična opterećenja i to ovisno o količini dostupnih resursa koji postoje u trenutku tranzicije.

### **2.2.1. Razlika između mikromreže i virtualne elektrane**

Virtualna elektrana je skup distribucijskih izvora energije koju upravlja centralna upravljačka jedinica. Virtualna elektrana može zamijeniti konvencionalnu elektranu pružajući uz to veću učinkovitost i prilagodljivost. Mikromreža i virtualna elektrana imaju kako se čini sličan koncept ali postoje brojne razlike kao što su [1]:

- Lokalitet – U mikromreži, distribuirani izvori energije smješteni su u blizini potrošača na lokalnoj distributivnoj mreži i nastoje primarno zadovoljiti njihove potrebe za energijom. U virtualnoj elektrani distribuirani izvori nisu nužno priključeni na lokalnu distributivnu mrežu nego su upravljani preko šireg geografskog područja. Virtualne elektrane sudjeluju u normalnom tržištu energije.

- Veličina – Instalirani kapacitet mikromreže je relativno malen (od nekoliko kW do nekoliko MW), dok instalirani kapacitet virtualne elektrane može biti puno veći.
- Interes potrošača – Mikromreža se fokusira na zadovoljenje lokalne potrošnje, dok virtualna elektrana kao promjenjivi izvor sudjeluje u zadovoljenju potrošnje skupine koja trguje samo putem programa integracije potrošača.



**Sl. 2.2.** Prednosti mikromreže naspram komercijalne i tehničke virtualne elektrane [1].

Prateći definiciju virtualne elektrane, kao komercijalne tvorevine, predložena je tehnička virtualna elektrana koja vodi računa o ograničenjima lokalne mreže. U svako slučaju virtualne elektrane ignoriraju svu lokalnu potrošnju osim one upravljane programom integracije potrošača dok mikromreže znaju lokalnu potrošnju i daju potrošaču izbor kupnje energije od lokalnih izvora ili konvencionalnih izvora. To vodi do bolje upravljivosti mikromreže, gdje se opskrba i potražnja mogu optimizirati dobivajući tako veću učinkovitost a time i profitabilnost distribucijskih izvora što je prikazano na slici 2.2.

## 2.3. Upravljanje i načini djelovanja mikromreže

### 2.3.1. Upravljivi elementi mikromreže

Mikromreže, osim osnovnih uređaja potrošnje i načina opskrbe mogu sadržavati postrojenjima za balansiranje energije kao što su raspodjeljiva opterećenja (npr. električna vozila) i uređaja za pohranu energije [1]. Raspodjeljiva opterećenja su opterećenja koja se mogu uključiti ili isključiti po potrebi [3]. Postrojenja za balansiranje energije doprinose minimizaciji razmjene energije ili maksimizaciji profita. Elementi mikromreže prikazani su na slici 2.3..



Sl. 2.3. *Dionici mikromreže* [1].

### 2.3.2. Obnovljivi izvori energije s isprekidanim pogonom

Upravljivost obnovljivih izvora energije s isprekidanim pogonom je ograničena fizikalnom prirodom primarnog izvora energije koji može biti sunce, vjetar itd.. Ograničavanje proizvodnje energije iz takvih izvora nije poželjno zbog visokih troškova investicije, niskog troška rada i nepostojeće emisije štetnih plinova osim u slučajevima kada oni izazivaju preopterećenje vodova ili prenapone. Strategija upravljanja se postavlja tako da se obnovljivi izvori energije s isprekidanim pogonom smatraju kao povlašteni proizvođači, što znači da nemaju obvezu poštovati vozni red ili raspored rada sve dok ne uzrokuju probleme u mreži. Postrojenja s mogućnošću proizvodnje reaktivne energije mogu se uključiti u regulaciji mreže.

### **2.3.2.1. Raspodjeljivi i kogeneracijski mikroizvor**

Upravljanje uređajima koji proizvode električnu i toplinsku energiju varira prema lokalnoj potražnji za toplinom. Većina takvih kogeneracijskih mikroizvora temelje se na rotacijskim strojevima, njihova reaktivna energija biti će ograničena veličinom djelatne i jalove snage.

Da bi se poboljšala upravljivost raspodjeljivih mikroizvora, mikromreža s više mikroizvora mora riješiti tradicionalni problem angažiranja jedinica no na mnogo umanjenoj skali. Operator mikromreže mora se nositi sa mnogo većim promjenama opterećenja. U isto vrijeme djeluje i optimizacijski program što dodaje još veću kompleksnost u cijelo upravljanje.

### **2.3.2.2. Uređaji za skladištenje energije**

Tehnički, funkcija uređaja za skladištenje energijom mogli bi biti održavanje ravnoteže sustava ili maksimizacija zarade od uskladištene energije. U isto vrijeme oni mogu biti rezerva energije za ravnotežu sustava od kratkotrajnih (milisekunda, minuta) do dugoročnih (sati, dani) primjena. Za uređaje bazirane na tehnologiji istosmjerne struje (baterije, kondenzatori itd.) adekvatno opremljeno elektroničko sučelje može pridonijeti ravnoteži reaktivne energije sustava bez dodatnih troškova [1].

### **2.3.2.3. Program integracije potrošača**

Program integracije potrošača ili odgovor potrošača temelji se na konceptu da kupac može odabrati način integracije koji najbolje odgovara njegovim potrebama. Inovativni paket proizvoda i usluga koji daje opskrbljivač sadrži uklanjanje tarifnog modela cijena, što je snažna poruka kupcima o važnosti promjene načina potrošnje električne energije.

Primjer takve ponude uključuje [1]:

- Vrijeme potrošnje: Veća potrošnja na vršnim cijenama tijekom dana i manja potrošnja tijekom noćnih sati i vikendima
- Dinamična cijena (uključujući cijene u realnom vremenu): cijene se mijenjaju tijekom vremena te se reflektiraju na veleprodajnu cijenu
- Kritične vršne cijene: iste postavke kao i ponuda za vrijeme uporabe, no s mnogo većim cijenama kada je veleprodajna cijena električne energije visoka ili kada je ugrožena pouzdanost sustava.

Kupci mogu upravljati uređajima automatski i to uključivanjem ili isključivanjem uređaja na temelju naprednih automatiziranih uređaja koji se mogu aktivirati signalom koji se generira tijekom niskih cijena i ručno gdje je kupac informiran o cijenama, npr. na monitoru, te odlučuje o radu uređaja ili trošila, moguće i preko mobilne aplikacije.

Mjerenja programa integracije potrošača u mikromreži temelje se na prognozi opterećenja i energije iz obnovljivih izvora te će vrlo vjerojatno varirati od dana do dana. Uspješna integracija mjerenja u mikromreži maksimizirati će prednosti potencijalnih pametnih kuća, pametnih uredi, pametnih farmi unutar mikromreže.

## 2.4. Strategije upravljanja mikromrežom

Tehnologije distribuirane proizvodnje daju različite opcije generiranja djelatne i jalove energije. Konačna konfiguracija i način upravljanja mikromreže ovisi o potencijalnom sukobu interesa između dionika umiješanih u opskrbu električnom energijom kao što su vlasnici distribuiranih izvora, isporučitelj energije, operator distribucijskog sustava, potrošači i regulatornih tijela. Mikromreža može imati ekonomske, tehničke i ekološke ciljeve, prikazanih na slici 2.4., ukoliko se uspostavi optimalno planiranje rada [1].



Sl. 2.4. Strategije upravljanja mikromrežom [1].

U ovisnosti o umiješanost dionika u procesu planiranja i djelovanja mogu se definirati četiri strategije upravljanja. To su tehnička strategija, ekonomska strategija, ekološka strategija i kombinacija strategija.



Tehnička strategija optimizira rad mreže (minimizira gubitke, kolebanje napona i opterećenje potrošača), bez obzira na trošak proizvodnje i profit. Mrežni operater preferira takvu opciju.

Ekološka strategija daje prednost distribuiranoj proizvodnji koja ima nisku emisiju stakleničkih plinova, bez obzira na ekonomske i tehničke aspekte. Takvo upravljanje preferira se od regulatornih tijela i to zbog ispunjavanja ekoloških ciljeva, tj. ispunjavanja kvote o emisiji stakleničkih plinova. Postoje samo fizikalna ograničenja distribuirane proizvodnje.

U ekonomskoj strategiji ciljevi su minimizacija ukupnog troška bez obzira na utjecaj koji takav rad ima na mrežu. Tu opciju operatori i vlasnici distribuiranih izvora daju na razmatranje. Vlasnici distribuiranih izvora nemaju brigu o mreži i emisiji stakleničkih plinova. Postoje samo fizikalna ograničenja distribuirane proizvodnje.

Kombinacija strategija uzima u obzir više ciljeva za optimalnu proizvodnju, uzimajući u obzir tehničke, ekonomske, i ekološke faktore. Takav pristup važan je za vlasnike koji ne žele samo sudjelovati u tržištu energije nego žele sudjelovati u potencijalnim tržištima usluga mreži i emisijskim certifikatima.

## **2.5. Tržišni modeli mikromreže**

Od mikromreža se očekuje da sudjeluju u tržištu energije. Trenutni modeli tržišta funkcioniraju na različitim razinama kompleksnosti krećući od potpuno reguliranih do potpuno liberaliziranih modela. Ne postoji opći model tržišta energije. Razlikuju se dva tržišta, veleprodajno i maloprodajno tržište. Ova dva različita tržišta međusobno djeluju preko različitih transakcija. Tradicionalno obavezan i otvoren pristup generatorima i uvoznicima energije prema prijenosu stvorilo je konkurentnija veleprodajna tržišta. U maloprodaji osnovana je konkurencija u mnogim zemljama što je dalo kupcima izbor između više isporučitelja i cijena energije. Zbog svojih malih kapaciteta mikromreža ne može sudjelovati direktno na veleprodajnom tržištu ili maloprodajnom tržištu nego oni mogu ući u tržište kao dio portfelja<sup>1</sup> maloprodajnog opskrbljivača ili tvrtke koja daje uslugu mreži.

---

<sup>1</sup> Portfelj predstavlja skup finansijskih sredstava koje neki pojedinac ili poduzeće posjeduje. [4]

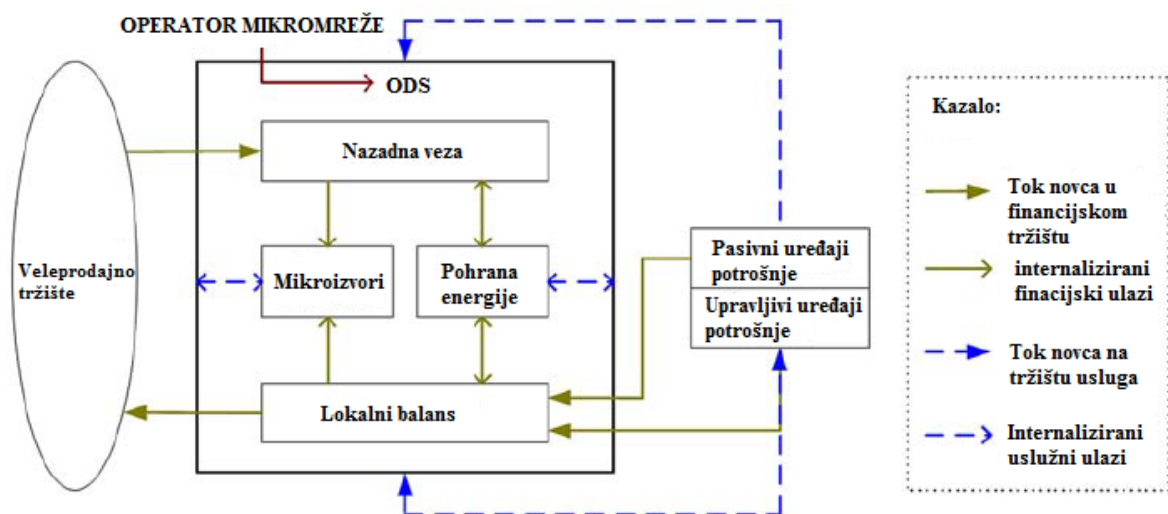
### 2.5.1. Modeli unutarnjeg tržišta mikromreže

Modeli unutarnjeg tržišta mikromreže odnose se na dogovoru oko vlasništva i poslovnog modela između dionika uključenih u funkcioniranje mikromreže kao što su potrošači, mikroizvori, operator distribucijskog sustava (ODS) i isporučitelja energije. Unutarnje tržište većinom određuje količinu i smjer toka novca unutar mikromreže i tko će biti dio vanjskog tržišta energije.

#### 2.5.1.1. Model s monopolom operatora distribucijskog sustava

Operator distribucijskog sustava (ODS) je dio vertikalno integriranog sustava, time posjeduje i upravlja distribucijskom mrežom te prodaje električnu energiju po maloprodajnoj cijeni.

U takvom modelu, integraciju i upravljanje mikromrežom preuzima ODS što ostavlja gotovo sve tehničke i financijske prednosti mikromreže na odgovornost ODS-a kako je prikazano na slici 2.5.



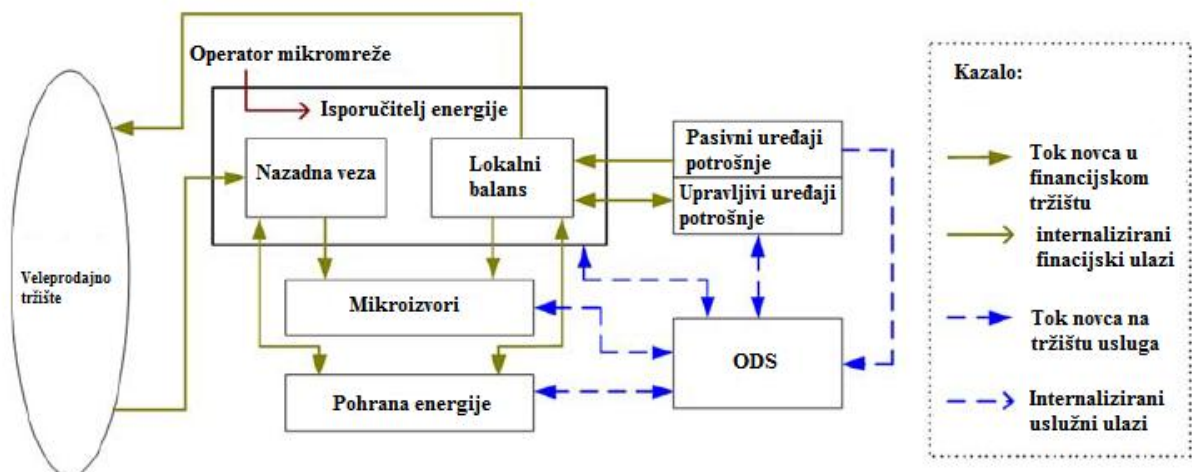
Sl. 2.5. Model pri monopolu ODS – a [1].

Pri monopolu ODS na mikromreži, mikroizvori teže biti što veće snage i uređaji pohrane energije moraju biti postavljeni u centralnu stanicu. ODS ima ulogu fizičkog i financijskog mosta između nadležne mreže i krajnjih potrošača. Odluke vezane za upravljanje mikroizvorima rade se u okviru mogućnosti ODS – a. Nije moguće za lokalno tržište uslugama osim za tarifni model koji postavlja program za integraciju potrošača. Mikromreža s monopolom ODS – a najvjerojatnije će se graditi na mjestima gdje je postojeća distributivna mreža zastarjela ili ima skupo održavanje ili ne može isporučiti kvalitetnu električnu energiju.

Investiranje u mikroizvore od strane ODS – a (ako je dozvoljeno od strane regulatornih tijela) može se protumačiti kao alternativa skupljim konvencionalnim rješenjima obnove mreže kao što je nadogradnja postojećih vodova.

### 2.5.1.2. Liberalizirani model

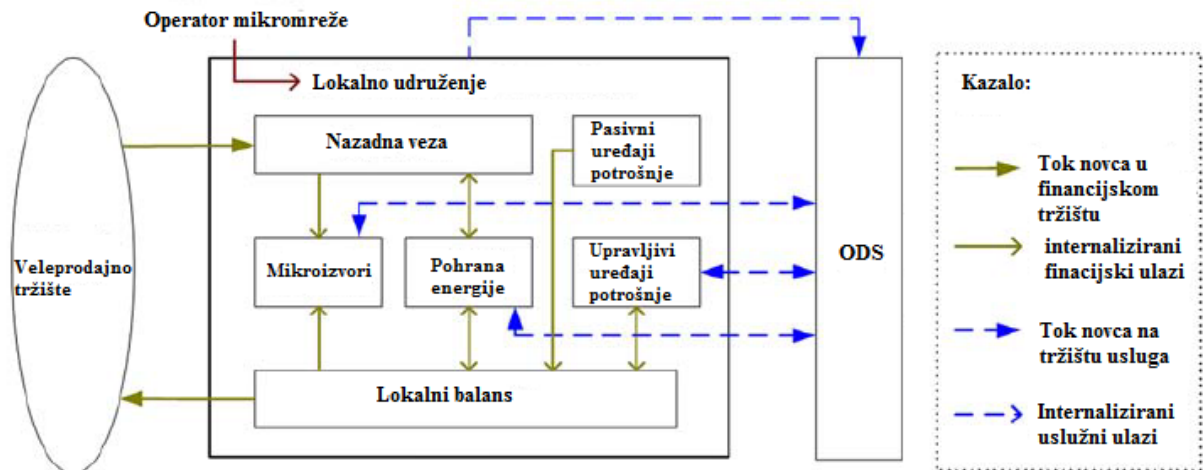
U liberaliziranom tržištu, mikromreža (slika 2.6.) može biti vođena različitim motivima (ekonomski, tehnički, ekološki itd.) različitih dionika (ODS-a, potrošači). Isporučitelji energije su najbolji sudionici koji maksimiziraju vrijednost udjela proizvodnje iz distribucijski izvora u lokalnom liberaliziranom tržištu energije. U tom slučaju operator mikromreže odgovoran je za lokalni balans mikromreže, upravljanje uvozom i izvozom energije, tehničkim učinkom, održavanjem i nadzor emisija. U liberaliziranom modelu, distribucijski izvori mogu biti različite forme, veličine i mogu biti smještene na različitim lokacijama.



Sl. 2.6. Liberalizirani model mikromreže [1].

### 2.5.1.3. Model udruženih članova mikromreže

Model s udruženim članovima mikromreže (Slika 2.7.) najvjerojatnije će biti na područjima s visokom maloprodajnom cijenom električne energije ili s velikom financijskom potporom za izgradnju.



Sl. 2.7. Model udruženih članova mikromreže [1].

U ovom slučaju, jedan ili više potrošača posjeduju i upravljaju mikroizvorima da minimiziraju račun električne energije ili maksimiziraju profit prodajom energije mreži. Ovakav tip mikromreže teži po prirodi da minimizira upotrebu distributivne mreže te može zanemariti mrežna ograničenja.

ODS može pasivno utjecati na rad udruženih članova mikromreže tako što postavlja zahtjeve i naknade vlasnicima mikroizvora no ipak ne mogu iskoristiti prednosti od lokalnog tržišta. U takvom modelu mikroizvori su većinom manjih snaga a spremišta energije raspodijeljiva (električna vozila).

### 2.5.2. Utjecaj vanjskog tržišta na mikromreže

Jedan od faktora razine tehničke i finansijske fleksibilnosti mikromreža je funkcioniranje vanjskog tržišta i pravila koja ono postavlja. Kako se investicijske odluke temelje na očekivanoj profitabilnosti, vanjska okolina mikromreže ima značajan utjecaj u odlučivanju dali će mikromreža biti realizirana. Politička podrška u promoviranju napretka tehnologije za mikromreže će isto tako biti ključna. Postoje dva glavna tipa vanjskih tržišta koja utječu na mikromrežu a to su: tržište energije i tržište pomoćnim uslugama. Tržište pomoćnim uslugama može biti idealno za mikromreže s obzirom na njihovu upravljivost. Tri glavna faktora kojima vanjsko tržište energije utječe na mikromrežu su zadovoljenje lokalne potrošnje, prepoznavanje vrijednosti lokaliteta i vremenske tarife za lokalnu energiju.

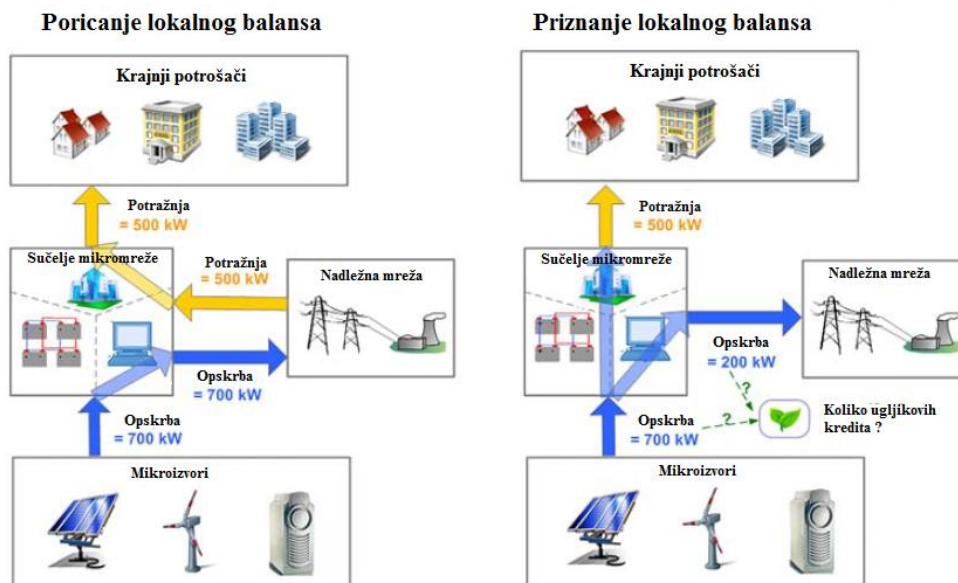
### 2.5.2.1. Zadovoljenje lokalne potrošnje

Zadovoljenje lokalne potrošnje podrazumijeva da se energija proizvedena mikroizvorima iskoristi za djelomičnu ili cjelovitu opskrbu neposrednih potrošača. U takvom slučaju ne postoji potreba za odvojenim mjerenjem proizvodnje mikroizvora. U slučaju kada mikroizvor predaje svu energiju u mrežu potrebni su mjerni uređaji koji mjere proizvodnju mikroizvora i potrošnju. U tom slučaju lokalna potrošnja može biti prilika koja će se od svih dionika previdjeti (Slika 2.8.) [1].

Glavne prednosti koje donosi zadovoljenje potrošnje unutar mikromreže [1]:

1. Krajnji kupci imaju više izbora između maloprodajnih opskrbljivača
2. Upravljanje mikroizvorom može minimizirati naknade za prijenos mrežom.

Lokalno maloprodajno tržište je direktno vezano za lokalnu potrošnju što može biti zaštitni alat za smanjenje tržišnog rizika. Potrošači mogu koristiti lokalno tržište kao zaštitu od previsokih cijena a mikroizvori mogu koristiti lokalno tržište kao zaštitu od preniskih cijena.

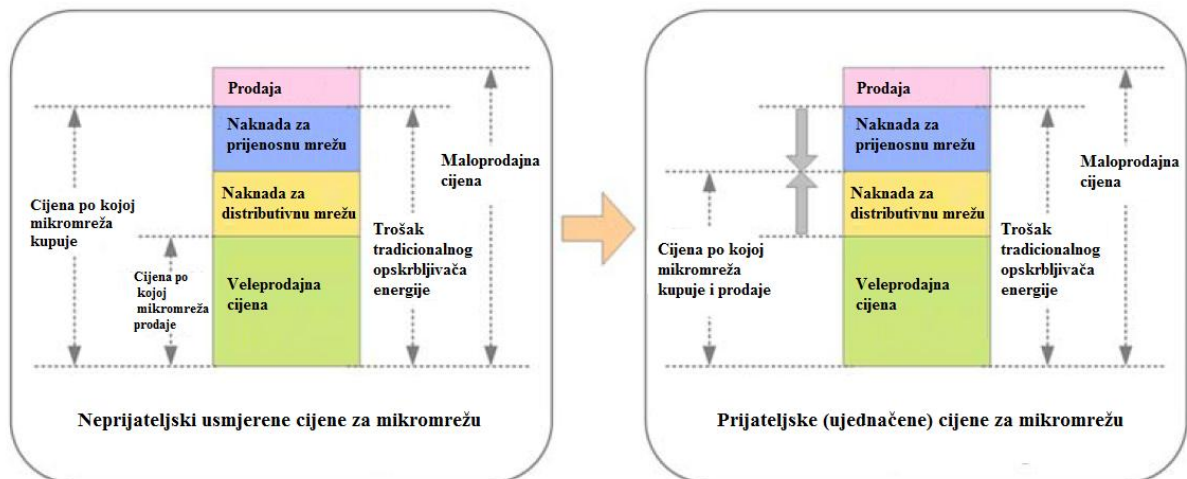


Sl. 2.8. Lokalno balansiranje [1].

### 2.5.2.2. Prepoznavanje vrijednosti lokaliteta

Razlika između kupovne i prodajne cijene energije događa se zbog naknada za korištenje mreže. Mikroizvori nemaju potrebu za prijenosom energije preko mreže jer su smješteni blizu potrošača. Vrijednost lokacije može biti prepoznata dozvoljavanjem cjelovite ili djelomične iznimke u naplati naknada za korištenje mreže što može povećati profitabilnost mikroizvora.

Neplaćanje naknada može se prelomiti preko kompenzacije za povećanje pouzdanosti opskrbe koju ODS plaća mikroizvoru zbog izbjegavanja ili odgode ulaganja u skupe nadogradnje mreže. U ovisnosti o političkoj i društvenoj podršci, ODS može smanjiti naknadu za korištenje mreže ako dolazi do razmjene energije između više mikromreža [1].



Sl. 2.9. Prodajne i kupovne cijene za mikromrežu [1].

### 2.5.2.3. Vremenske tarife za lokalnu energiju

Naplaćivanje električne energije može biti fiksno tj. mikromreža ima fiksnu prodajnu cijenu i fiksnu kupovnu cijenu. Ona dobiva satnu ili intervalnu cijenu u danu za prodaju i kupovinu. Prihvaćanje da se cijena mijenja s vremenom nudi veću fleksibilnost i favorizira mikromreže.

## 2.6. Problemi pri upravljanju mikromrežom

Najvažnije svojstvo mikromreže je upravljivost. Razlika između distributivnog sustava s distribuiranim izvorima energije i mikromreže je upravo u mogućnosti upravljanja, stoga nadležna mreža smatra mikromrežu upravljivim i koordiniranim postrojenjem [1]. Upravljanje efektivnom energijom unutar mikromreže ključno je za ostvarivanje bitne učinkovitosti optimizacijom proizvodnje i potrošnje topline, goriva i električne energije. Važno je znati da mikromreža radi unutar tržišta energije i vjerojatno je upravljana od strane operatora distribucijskog sustava koji će ih predstavljati kao skup združenih distribuiranih izvora i nekoliko mikromreža. Koordinirano upravljanje velikog broja distribuiranih izvora može biti ostvareno različitim tehnologijama, počevši od bazičnog centraliziranog pristupa upravljanju do potpuno decentraliziranog upravljanja.

Način upravljanja ovisi o raspodjeli odgovornosti između centralnog upravljača, lokalnih upravljača i upravljivih opterećenja. Povećanjem količine distribuiranih izvora povećava se i kompleksnost te postoji veća mogućnost konfliktnih situacija između vlasnika. Ovo poglavlje prezentira tehnička rješenja odnosno implementaciju upravljanja.

### 2.6.1. Upravljačke funkcije

Na slici 2.10. prikazane su glavne upravljačke funkcije u mikromreži. Funkcije se mogu razlučiti u tri grupe. Niža razina je usko povezana sa zasebnim komponentama i lokalnim upravljanjem (mirkoizvori, spremnici, opterećenja i elektronička sučelja), srednja razina koja je vezana za upravljanje cjelokupnom mikromrežom te viša razina koja je sučelje s nadležnom mrežom.



**Sl. 2.10.** Upravljačke funkcije cjelokupnog sustava [1].

Temeljna interakcija s nadležnom mrežom vezana je s sudjelovanjem u tržištu energije tj. uvoz i izvoz energije mikromreže prema odluci operatora. Posjedovanje relativno malog dijela mikromreže operator može upravljati velikim brojem mikromreža u svrhu maksmizacije profita i pružanju pomoćnih usluga nadležnoj mreži. Upravljanje mikromrežom (srednja razina) uključuje sve funkcije unutar mikromreže potrebne za suradnju dvaju ili više sudionika.

Funkcije unutar mikromreže su [1]:

- Predviđanje opterećenja i energije obnovljivih izvora
- Upravljanje opterećenjima
- Angažiranje jedinica
- Sekundarno upravljanje naponom i frekvencijom
- sekundarno upravljanje djelatnom i reaktivnom energijom
- nadzor zaštite
- crni start

Niža razina podrazumijeva sve funkcije koje su lokalne i koje radi jedan distribuirani izvor, spremnik energije ili upravljivo opterećenje. To su [1]:

- Zaštitne funkcije
- primarno upravljanje naponom i frekvencijom
- primarno upravljanje djelatnom i reaktivnom energijom
- upravljanje baterijama

Sve prethodne upravljačke funkcije bitne su za normalno stanje rada no u izvanrednim stanjima moguće su promjene. Normalno stanje pokriva otočni radi i mrežni rad no ne pokriva prijelazno razdoblje između istih. Za najbitnije upravljačke funkcije ključna će biti informacijska i komunikacijska tehnologija.

### **2.6.2. Uloga informacijske i komunikacijske tehnologije**

Informacijska i komunikacijska tehnologija (ICT) ključna su komponenta buduće energetske mreže. Buduća energetska mreža, uključujući i mikromreže, mora biti opremljena naprednim informacijskim i komunikacijskim sustavom koji omogućuje kvalitetan i pouzdan rad. Postoji nekoliko tehnologija koje su ispitane i korištene te se u budućnosti očekuje masivnija upotreba istih. Glavna tehnološka područja su [1]:

- Mikroprocesori – koriste se u velikoj mjeri u mikromrežama pružajući mogućnost razvijanja sofisticiranih izmjenjivača i razvijanja kontrolora upravljanja opterećenjem ili drugih aktivnih komponenata unutar mikromreže. Zanimljiva karakteristika novijih verzija



mikroprocesora je da oni pružaju adekvatnu snagu procesora, sposobnosti komunikacije i napredni posrednički softver po niskoj cijeni.

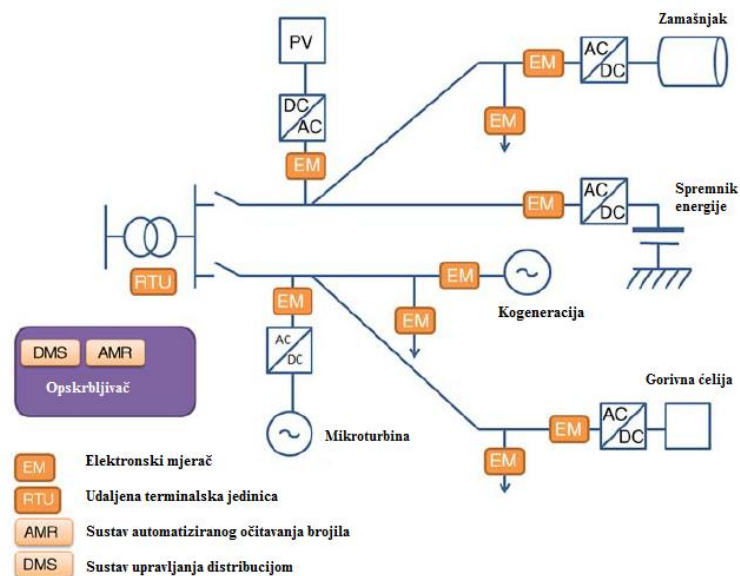
- Komunikacija – prošlo desetljeće označili su napredak u komunikacijskim mrežama i sustavima. Komunikacijske mreže pružaju dovoljnu dostupnost i nude nekoliko usluga korisniku. Očito je da će aktivno upravljanje mikromrežom biti temeljeno na postojećoj komunikacijskoj infrastrukturi, u svrhu smanjivanja troška.
- Softver – Arhitektura orijentirana ka uslugama je moderni trend u izgradnji informacijskog sustava. Baza pristupa leži u internetskim uslugama.
- Internet energija – je korištenje tehnologija razvijenih za internet. Omogućuju izbjegavanje troškova instalacije i održavanja uređaja potrebnih za upravljanje distribuiranim izvorima i trošilima. Pretpostavlja se da će sljedeća generacija kućanskih uređaja biti opremljena sučeljima koji omogućuju bežično upravljanje preko kućne internetske mreže. Bitni dijelovi takve tehnologije već postoje.

## **2.7. Hijerarhijske razine upravljanja mikromrežom**

Ne postoji opći oblik upravljačke arhitekture mikromreže, budući da konfiguracija ovisi o tipu postojeće infrastrukture i mikromreže. Današnji distribucijski sustav slika 2.11. prikazuje većinu upravljačke infrastrukture tipičnog distribucijskog sustava s povećanim brojem distribuirane proizvodnje.

Možemo razlučiti distribucijski sustav upravljanja (DMS) i sustav automatskog očitavanja brojlara (AMR). DMS je uglavnom odgovoran za praćenje glavnih visokonaponskih i srednjenaponskih i nekih kritičnih srednjenaponskih i niskonaponskih trafostanica. Hardverski sustav sastoji se od nekoliko udaljenih terminalskih jedinica (RTU) ili inteligentnih elektroničkih uređaja proširenih diljem distribucijskog sustava i glavnog servera. Uobičajeno je da DMS ne upravlja ni opterećenjima ni distribuiranom proizvodnjom (osim postrojenja velike snage u neki slučajevima).

Tipične upravljačke radnje su preustroj mreže uklapanjem i isklapanjem glavnih vodova, regulacija napona uklapanjem i isklapanjem kondenzatorskih stanica ili promjena preklopke transformatora (uglavnom ručno). AMR koristi se u svrhu naplate i odgovoran je za prikupljanje podataka o potrošnji i proizvodnji.



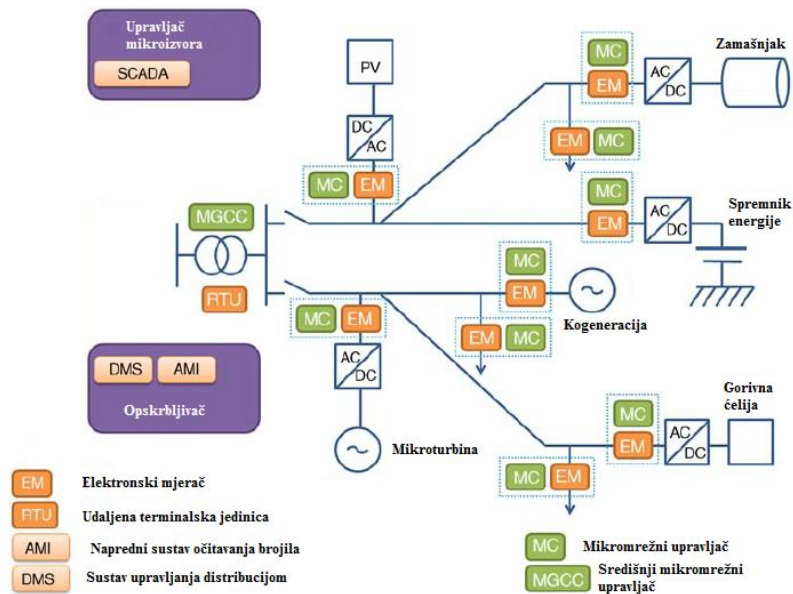
Sl. 2.10. Tipična struktura distribucijskog sustava [1].

Struktura prikazana na slici 2.10. pruža ograničene kapacitete upravljanja, posebno u tržišnom okruženju i nije dovoljna za upravljanje mikromrežom.

Za uspostavu nove razine upravljanja opterećenjem i distribuiranim izvorima na lokalnoj razini koja bi ispunila sljedeće ciljeve potrebno je [1]:

- omogućavanje svim mjerodavnim čimbenicima sudjelovanje na tržištu
- kako bi se omogućila integracija velikog broja korisnika potrebna je prilagodljivost
- dozvola integracije komponenti različitih proizvođača
- jednostavnost ugradnje novih komponenti
- jednostavnost integracije novih funkcionalnosti i poslovnih razloga

Korištenjem lokalne razine upravljanja, kompleksnija hijerarhijska arhitektura prikazana je na slici 2.12.



Sl. 2.11. Tipična struktura mikromreže [1].

Struktura obuhvaća slijedeće [1]:

Središnji mikromrežni upravljač (MGCC) je glavno sučelje između mikromreže i ostalih sudionika, kao što su isporučitelj električne energije ili operator distribucijskog sustava. Neke od uloga koje može imati su odgovornost za maksimizaciju vrijednosti mikromreže do koordinacije lokalnih mikromrežnih upravljača tako što može pratiti i nadzirati rad te osigurati zadane vrijednosti upravljača mikroizvora. MGCC je smješten u srednjenaponskom ili niskonaponskom sustavu i obuhvaća čitav niz softverskih funkcionalnosti.

Upravljač mikroizvora (MC) koji je odgovoran za upravljanje i praćenje distribuiranih izvora energije kao što su mikroturbine, spremnici energije i opterećenja uključujući električna vozila. MC može biti odvojeni uređaj ili dio nekog postojećeg uređaja kao što su elektronički mjerači, uređaji energetske elektronike distribuiranog izvora ili bilo kojeg uređaja s dovoljnom snagom procesora.

Napredni sustav automatiziranog očitavanja (AMI) uz sve funkcije AMR- a AMI ima mogućnost upravljanja lokalnim opterećenjima, direktno preko mjerača ili preko kućne internetske mreže gdje elektronički mjerač služi kao sučelje.

### **2.7.1. Centralizirano i decentralizirano upravljanje**

Struktura mikromreže prikazan na slici 2.11. može biti upravljana na centraliziran ili decentraliziran način. U centraliziranom načinu upravljanja glavnu odgovornost za maksimizaciju vrijednosti mikromreže ima središnji mikromrežnoi upravljač (MGCC). MGCC koristi tržišne cijene električne energije i plina te potom određuje količinu električne energije koju mikromreža treba iz distribucijskog sustava više naponske razine optimizirajući pri tome lokalnu proizvodnju i kapacitete potrošača. To se ostvaruje upravljanjem mikroizvorima i upravljivim opterećenjima unutar mikromreže šaljući upravljačke signale. U takvom sustavu ne kritični potrošači mogu biti ugašeni ukoliko je to profitabilno. Nadalje, nužno je praćenje trenutne djelatne i reaktivne energije.

U potpuno decentraliziranom pristupu glavnu odgovornost ima MC koji optimizira svoju proizvodnju da bi opskrbio potražnju i ustupio maksimalnu moguću energiju za izvoz u mrežu vodeći računa o trenutnim tržišnim cijenama. Takav pristup primjeren je u slučaju različitih vlasnika distribuiranih izvora. Izbor između centraliziranog i decentraliziranog pristupa upravljanja mikromrežom između ostalog ovisi i o dostupnosti energenata, ljudskih resursa i uređaja [1].

### 3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kvaliteta opskrbe električnom energijom povezana je uglavnom s karakteristikom napona (razina napona, flikeri, neravnoteža, harmonici, propadi itd.) i elektromagnetskom kompatibilnošću. Elektromagnetska kompatibilnost je mogućnost naprave, uređaja ili sustava da djeluje zadovoljavajuće u svojem elektromagnetskom okruženju te ne uzrokuje štetne elektromagnetske smetnje drugoj opremi ili sustavima u tom okruženju. Elektromagnetska kompatibilnost brine se o mogućem smanjenju performansi električne i elektroničke opreme zbog pojave poremećaja u elektromagnetskoj okolini gdje se i sami uređaji nalaze. Postoje dva osnovna zahtjeva za elektromagnetsku kompatibilnost [5] :

- Emisija poremećaja u elektromagnetsku okolinu mora biti ispod razine koja bi uzrokovala smanjenje performansi uređaja koji u toj okolini funkcioniraju
- Svi uređaji koji funkcioniraju u elektromagnetskoj okolini moraju biti imuni na sve poremećaje u svojoj razini.

U prijevodu to znači da emisija poremećaja na sve karakteristike opskrbnog napona mora biti ispod razine koja uzrokuje nepravilan rad uređaja. Svi uređaji koji su spojeni na napon moraju imati dovoljan imunitet na sve poremećaje koji se događaju u razini na kojoj djeluju. Odgovornost za opskrbu dijele proizvođači opreme, kupci i mrežni operatori.

Kupci imaju značajnu ulogu. Kupac dobije i koristi proizvod (električnu energiju) kao kupac ili proizvodi i šalje proizvod. Kupac može definirati okvire u kojoj proizvod mora funkcionirati.

Proizvođač opskrbljuje kupca s proizvodom koja zadovoljava tražene okvire, nadalje kupac potpisuje ugovor s mrežnim operatorom, definirajući tako vrstu spoja i okvire.

Mrežni operator ispunjava zahtjeve kupaca i osigurava kvalitetnu električnu energiju. U slučaju nedovoljne kvalitete priključnog napona dolazi do žalbi te se kvaliteta mora popraviti.

Većina kupaca često nije svjesna pojma kvaliteta električne energije i koja prava imaju. Nužno je mjeriti pokazatelje kvalitete u mreži. Mjerenjem operator mreže zna više o kvaliteti električne energije te time može dobiti optimalan rad mreže. Uređaji za mjerenje sve se više ugrađuju u sustav i to u trafostanice ili u područjima s visokim udjelom proizvodnje distribuiranih izvora.

### 3.1. Analiza kvalitete električne energije

Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona [6]:

- naponski propadi i prekidi,
- naponska kolebanja,
- harmonici i međuharmonici,
- prijelazni prenaponi,
- valovitost,
- tranzijentni prenaponi,
- naponska nesimetrija,
- promjene osnovne frekvencije mreže,
- prisutnost istosmjerne komponente u izmjeničnoj komponenti,
- prisutnost signalnih napona.

Općenito nije neophodno mjerenje svih tipova poremećaja. Tipovi poremećaja mogu se podijeliti u četiri kategorije: prema amplitudi, valnom obliku, frekvenciji i simetričnosti napona.

Europska norma za kvalitetu napona na mjestu predaje potrošaču u javnim distributivnim niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima je EN 50160. Nazivna frekvencija opskrbnog napona je 50 Hz.

Pri normalnim pogonskim uvjetima 10 sekundna srednja vrijednost osnovne frekvencije u nekoj razdjelnoj mreži mora biti u sljedećim opsezima [6]:

- kod mreža povezanih s elektroenergetskim sustavom: 50 Hz +1% (od 49.5 Hz do 50.5 Hz), tijekom 95% tjedna, odnosno: 50 Hz +4% / -6% (od 47 Hz, do 52 Hz ) tijekom 100% tjedna
- Normirani nazivni napon ( $U_n$ ) za niskonaponske javne mreže je:
  - za trofazne mreže s četiri vodiča:  $U_n = 230$  V između faznih vodiča i neutralnog vodiča a
  - za trofazne mreže s tri vodiča:  $U_n = 400$  V između faznih vodiča.

Pri normalnim pogonskim uvjetima, bez uzimanja u obzir prekida opskrbe, 95% 10 - minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona svakog tjednog intervala (bilo kojeg) mora biti u opsegu od:

- $U_n \pm 10 \% U_n$  (od 107 V do 253 V)

Preostalih 5% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona svakog tjednog intervala (bilo kojeg) mora biti u opsegu:

- $U_n + 10\% U_n / -15\% U_n$  (od 199.5 do 253 V).

Brze promjene napona uglavnom su izazvane promjenama tereta u postrojenjima potrošača ili sklapanjima u mreži.

Pri normalnim pogonskim uvjetima brza promjena u pravilu ne prelazi 5%  $U_n$ .

Međutim, pod određenim okolnostima mogu se više puta dnevno pojaviti kratkotrajne brze promjene napona do 10%  $U_n$ .

Promjena napona koja dovodi do opskrbnog napona manjeg od 1%  $U_n$ , smatra se prekidom napona, tj. napajanja.

Očekivani godišnji broj propada napona može pri normalnim pogonskim uvjetima biti između nekoliko desetaka, do tisuću. Većina propada napona je kraća od jedne sekunde, i dubine propada manje od 60%  $U_n$ . Međutim, pojedini propadi mogu biti dužeg trajanja i veće dubine propada. U nekim se mrežama vrlo često, zbog sklapanja tereta u postrojenjima potrošača mogu se pojavljivati propadi napona dubine između 10%  $U_n$  i 15%  $U_n$ .

Pri normalnim pogonskim uvjetima kratki prekidi opskrbnog napona pojavljuju se s učestalošću u opsegu od nekoliko desetaka, do više stotina godišnje. Trajanje oko 70% kratkih prekida opskrbe mora biti kraće od jedne sekunde.

Pri normalnim pogonskim uvjetima dugotrajna jakost treperenja (flicker) zbog promjena napona ne smije tijekom bilo kojeg tjedna prelaziti vrijednost  $P_{lt} = 1$ .

Pri normalnim pogonskim uvjetima 10 - minutna srednja vrijednost efektivne vrijednosti inverzne komponente napona ne smije kod 95% srednjih vrijednosti svakog tjednog intervala prelaziti 2% odgovarajuće izravne komponente. U nekim mrežama s postrojenjima potrošača, koja su djelomično priključena jednofazno ili dvofazno, pojavljuju se na trofaznim mjestima predaje nesimetrije do oko 3%. Ova norma sadrži samo vrijednosti za inverznu komponentu, jer je samo ona od značenja za moguće smetnje aparatima priključenima na mrežu.

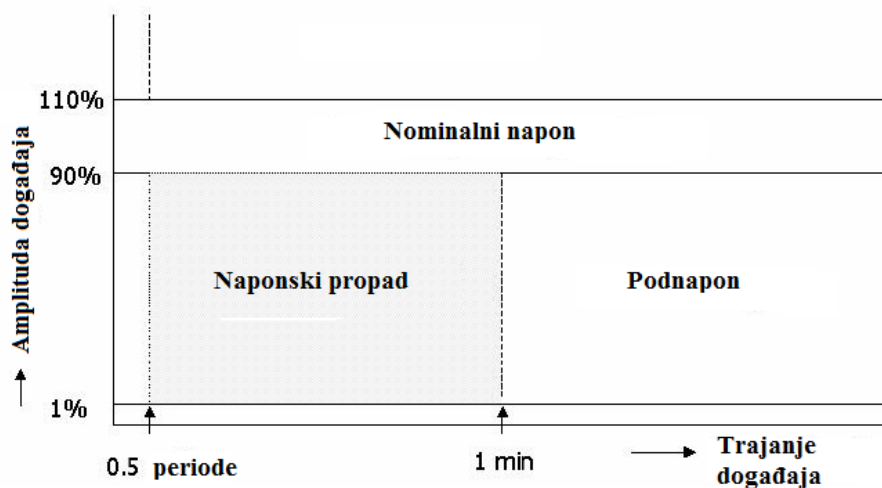
Prijelazni (tranzijentni) prenaponi uobičajeno ne prelaze tjemenu vrijednost 6 kV. Međutim, povremeno se pojavljuju i više vrijednosti. Vremena porasta su u širokom opsegu manjem od mikrosekunda do milisekunda [6].

**Tablica 3.1. Pokazatelji kvalitete električne energije prema EN 50160 [7].**

Norma 50160			
Pokazatelji	Mjerna jedinica	Obilježja niskog napona	Obilježja srednjeg napona
Promjene napona	V	$\pm 10\% U_n$ za 95 % tjedna	$\pm 10\% U_n$ za 95% tjedna
		$\pm 10\% / -15\% U_n$ za 5 % tjedna	
Kratki prekidi	Broj	< 3 minute, od nekoliko desetaka do stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	$\geq 3$ minute, 10 do 50 godišnje	
Propadi	Broj	nekoliko desetaka do tisuću godišnje	
THD napona	% $U_n$	< 8 % $U_n$	
Treperenje	$P_{It}$	$P_{It} \leq 1$ , za 95 % tjedna	
Nesimetrija	% $U_n$	< 2 % $U_n$	
Frekvencija	Hz	$\pm 1\% U_n$ za 99,5 % tjedna	
		+ 4 % / - 6 % $U_n$ za 100% tjedna	

### 3.1.1. Naponski propadi

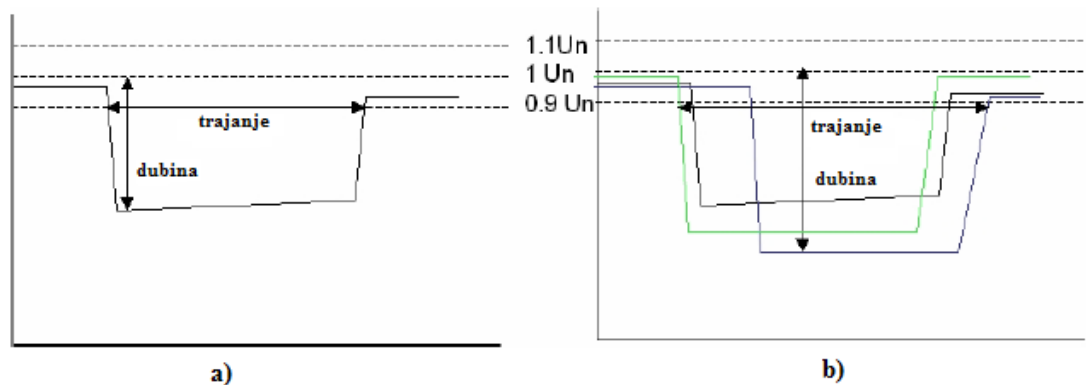
Naponski propad je napon između 1% i 90% nominalnog napona tijekom razdoblja od pola periode do jedne minute. Propad napona opskrbe prikazan je na slici 3.1. (EN 50160).



**Sl. 3.1. Područje naponskog propada prema (EN 50160) [5].**



Područje označeno sivom bojom označuje naponske propade različitih karakteristika koji dolaze iz različitih uzroka. Ukoliko trajanje propada premaši jednu minutu on se više ne može smatrati propad nego se smatra kao podnapon. Postoji velika razlika između propada od 88% nominalnog napona tijekom jedne periode i propada od 5% nominalnog napona tijekom 50 sekundi. Propad, dubina i trajanje propada definirani su normom EN 50160 kako je prikazano na slici 3.2.



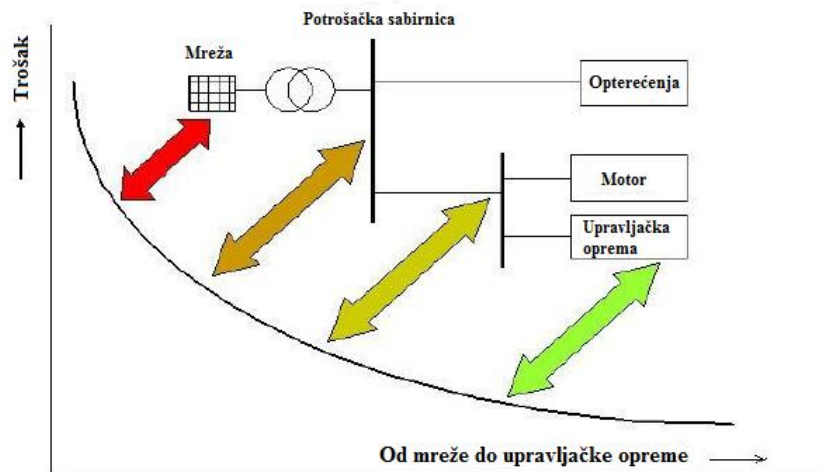
**Sl. 3.2.** Definicija naponskog propada za a) jednofazni i b) trofazni napon prema EN 50160 [5].

Dubina propada je definirana kao razlika između najnižeg efektivnog i nominalnog napona određenog za pojedine naponske razine. Trajanje propada je vrijeme između prvog trenutka propada faze napona ispod 90% nominalnog napona i trenutka kada se napon faze vraća na razinu jednaku ili veću od 90% nominalnog napona.

Glavni uzroci naponskih propada su [5] :

- Kratki spoj u mreži na niskonaponskim, sredjenaponskim i visokonaponskim mrežama
- Uklapanje i isklapanje električne opreme velikih snaga
- Struja uklapanja transformatora velike snage

Smanjenje naponskih propada moguće je na različitim mjestima u mreži. Slika 3.3. prikazuje kako lokacija na kojoj se smanjuju propadi utječe na trošak istog.



Sl. 3.3. Mjesta za smanjenje propada u ovisnosti o trošku [5].

Ugrađivanje neprekidnog napajanja (UPS) najlakši je način za zaštitu osjetljivih procesa protiv propada različitih vrsta no zbog svoje cijene i potrebama održavanja ugrađuje se samo u mjestima gdje je postoji mogućnost visoke štete kao npr. bolnice, banke itd.. Neka od ostali rješenja su [5] :

- Ugradnja zamašnjaka i agregata gdje kratkotrajne propade ublažava zamašnjak a veće i duže propade agregat
- Ugradnja uređaja za dinamičku obnovu napona koji se spaja serijski s opterećenjem. Nadomješta napon koji fali iz baterija
- Ugradnja statičkog kompenzatora koji reaktivnom energijom smanjuje naponske propade
- Ugradnja sinkronog stroja, slično kao statički kompenzator ali nema sklopove energetske elektronike.

### 3.1.2. Prenaponi i previsoki naponi

Kada se gornja granična vrijednost nazivnog napona ( $U_n + 10\% U_n$ , prema normi EN 50160) prekorači, događaj se bilježe kao previsoki napon. Najveća veličina previsokog napona (prenapona) nije posebno utvrđena. Naziv “prenapon” primjenjiv je samo za prijelazne pojave, kakve su atmosferska pražnjenja (izvanjski prenaponi) te prenaponi kod uklapanja, isklapanja i kratkih spojeva u elektroenergetskoj mreži (unutrašnji prenaponi). Ostale pojave kada napon u mreži prelazi dopuštene granice treba zvati “previsokim naponom” [7].

Previsoki naponi u EN 50160, povremeni previsoki napon se u pravilu pojavljuje pri kvaru u javnoj mreži ili u nekom postrojenju potrošača. On nestaje kad se smetnja otkloni ili isključi.

Pri normalnim pogonskim uvjetima ti prenaponi mogu, zbog pomaka zvjezdišta trofaznog sustava, dosegnuti vrijednost linijskog napona. Orijentacijske vrijednosti: pod određenim okolnostima kratki spoj na visokonaponskoj strani transformatora mreže može na niskonaponskoj strani izazvati prenapone za vrijeme dok teče struja kratkog spoja. Ti prenaponi u pravilu ne prelaze efektivnu vrijednost od 1.5 kV.

Previsoki naponi, ovisno o uzrocima nastajanja, dijele se prema [7] na tri vrste:

- prolazni,
- sklopni
- atmosferski.

Uzroci prolaznih previsokih napona mogu biti [7]:

- proboj izolacije između faze i zemlje – fazni napon ispravne faze može dostići vrijednost linijskog napona,
- prekid neutralnog vodiča – raste napon na uređajima koji su priključeni na fazu s najmanjim opterećenjem,
- kvarovi na regulaciji generatora ili na regulaciji napona transformatora,
- prevelika kompenzacija jalove snage – kondenzatorske baterije uzrokuju porast napona, što je izraženo tijekom niskog opterećenja.

Sklopni previsoki naponi posljedica su brzih promjena u strukturi mreže (prorada zaštitnih uređaja itd.). Razlikuju se [7]:

- sklopni prenaponi pri normalnom opterećenju,
- previsoki naponi nastali uklapanjem i isklapanjem niskih induktivnih struja te
- previsoki naponi nastali sklapanjem kapacitivnih krugova (neopterećeni vodovi ili kabeli te kondenzatorske baterije)

Munja je prirodna pojava, a javlja se za olujnog vremena. Razlikuju se izravan udar munje (na vod ili dio mreže) i neizravne posljedice munje (inducirani prenaponi i porast potencijala Zemlje).

### 3.1.3. Harmonička izobličenja

Razine harmoničkih poremećaja ubrzano rastu zadnjih godina zbog rasta široke uporabe nelinearnih poluvodičkih uređaja koji uzrokuju većinu harmoničkih poremećaja. Sklopna napajanja su u zadnjih dvadeset godina u elektroničkoj opremi ubrzano zamijenila napajanja s transformatorom i ispravljačem što za posljedicu ima pojavu petog harmonika čija razina ovisi o nazivnoj snazi opreme. Posljedice su [7]:

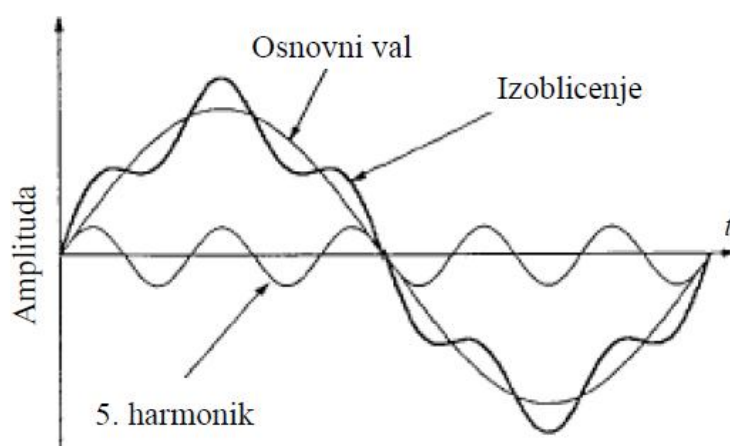
- stalni porast razine harmoničkih poremećaja napona u europskom elektroenergetskom sustavu i to u svim naponskim razinama
- porast problema uzrokovani ubrzanim starenjem opreme i preopterećenjem neutralnih vodiča.

Harmonici su sinusni naponi ili struje s frekvencijama koje su višekratnici nazivne frekvencije (frekvencije na kojoj radi sustav napajanja). Sve periodičke funkcije frekvencije  $f$  mogu se rastaviti na zbroj sinusnih valnih oblika frekvencije [7].

$$h \times f \quad (3-1)$$

gdje je :

- $f$  – komponenta prvog reda tj. nazivna frekvencija mreže je osnovna i najveća komponenta harmoničkog spektra,
- $h$  – red harmonika, cijeli je broj i veći je od 1



Sl. 3.4. Primjer harmonijskog izobličenja [8].

Proračun totalnog harmonijskog izobličenja računa se pomoću formule [5]:

$$THD_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100 [\%] \quad (3-2)$$

gdje je:

- $THD_u$  – totalno harmonijsko izobličenje
- $U_2$  – drugi harmonik
- $U_3$  – treći harmonik
- $U_n$  – n-ti harmonik

Pri normalnim pogonskim uvjetima 95% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika  $U_h$  ne smije u nijednom tjednom intervalu prelaziti vrijednost iz tablice 2.. Ukupni sadržaj viših harmonika (THD) opskrbnog napona, koji se izračunava uz uzimanje u obzir svih viših harmonika do 40. višeg harmonika, ne smije prelaziti vrijednost 8 %  $U_n$  [6].

**Tablica 3.2.** *Dopuštena vrijednost pojedinih viših harmonika napona [7].*

Neparni viši harmonici				Parni viši harmonici	
Koji nisu višekratin od 3		Koji su višekratnik od 3			
Redni broj harmonika	$U_h$ u % $U_n$	Redni broj harmonika	$U_h$ u % $U_n$	Redni broj harmonika	$U_h$ u % $U_n$
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

U budućnosti mora postojati povećana razina analize harmoničkih izobličenja zbog toga što uzrokuju pregrijavanje i skraćivanje životnog vijeka opreme.

Informacije koje su potrebne za predviđanje harmonika su [5]:

- Postojeći proračuni harmonika
- Mrežna impedancija u domeni frekvencije
- Harmonijski spektar spojenih uređaja i instalacija

Dodatna ugradnja energetske elektronike za posljedicu ima povećanje harmonijskog izobličenja, što se događa ugradnjom izmjenjivača prilikom priključka distribucijskog izvora. Utjecaj izmjenjivača može se izbjeći stvaranjem odgovarajućih standarda kako bi proizvođači izmjenjivača mogli, bez komercijalnih okvira, razviti izmjenjivače visokih kvaliteta koji ograničavaju struje harmonika. Važno je pripaziti na mogućnost rezonancije u mreži, tako što se regulira količina induktiviteta i kapaciteta bez obzira što u mreži raste broj nelinearnih poluvodičkih uređaja. Problem harmonika se događa uglavnom zbog rezonancije [5].

Vrijednost faktora ukupnoga harmonijskog izobličenja (THD) napona uzrokovanog priključenjem proizvođača i/ili kupca na mjestu preuzimanja i/ili predaje može iznositi najviše [9]:

- na razini napona 0.4 kV: 2.5%,
- na razini napona 10 i 20 kV: 2.0%,
- na razini napona 30 i 35 kV: 1.5%.

Navedene vrijednosti odnose se na 95% 10-minutnih prosjeka efektivnih vrijednosti napona za razdoblje od tjedan dana.

#### **3.1.4. Treperenje napona**

Treperenje napona (engl. *Flicker*) [5] je problem koji je teško kvantificirati i riješiti. Da bi treperenje napona bilo problem potrebna je kombinacija sljedećih faktora : neka vrsta devijacije napona u strujnim krugovima rasvjete i osoba koja zapaža promjenu u intenzitetu rasvjete zbog promjene napona. Devijacije napona su mnogo manje od pragova osjetljivosti električne opreme tako da se problemi s opremom rijetko događaju. Ljudski faktor značajno komplicira problem, koji je djelomično riješen uređajem za mjerenje treperenja napona te utvrđivanjem uvjeta za treperenje napona kao  $P_{st}$  i  $P_{lt}$ . Uređaj za mjerenje treperenja napona ima slijedeće funkcije [5]:

- Snimanje promjena napona.
- Pretvara naponske promjene u procjenu promjene intenziteta svjetlosti žarulje sa žarnom niti.

- Određuje važnost procjene promjene intenziteta svjetlosti prema broju ponavljanja uzimajući u obzir ljudsku percepciju.
- Određuje trenutnu primjetnost treperenja napona ( $P_{inst}$ ).
- Izvodi vrijednost kratkotrajnog treperenja ( $P_{st}$ ) tijekom desetominutnog razdoblja.
- Izvodi vrijednost dugotrajnog treperenja ( $P_{lt}$ ) tijekom dvosatnog razdoblja.

Kratkotrajno treperenje  $P_{st}$  (engl. short time) mjeri se unutar intervala od 10 minuta i osnovni je parametar mjerenog treperenja.

Dugotrajno treperenje  $P_{lt}$  (engl. long time) računa se na temelju dvanaest uzastopnih vrijednosti  $P_{sti}$  jednadžbom [5]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3-3)$$

gdje je :

$P_{sti}$  – uzastopne vrijednosti kratkotrajnog treperenja

Prema normi EN50160, granična vrijednost treperenja je jedan. Vrijednosti veće od jedan nisu prihvatljive za ljude i uređaje.

Vrijednosti indeksa jačine treperenja uzrokovanih priključenjem proizvođača i/ili kupca na mjestu preuzimanja i/ili predaje mogu iznositi najviše [9]:

- za kratkotrajne: 0.7
- za dugotrajne: 0.5

### 3.1.5. Nesimetrija

Naponska nesimetrija je stanje u višefaznom sustavu u kojem efektivne vrijednosti linijskih napona ili faznih kutova između slijednih linijskih napona nisu jednaki. Stupanj nesimetrije se obično izražava kao omjer inverzne komponente (ili nulte) i direktne komponente. Naponi inverzne (ili nulte) komponente većinom su posljedica struja inverzne (ili nulte) komponente koje nastaju zbog nesimetričnih opterećenja u mreži [7].

Norma EN50160 sadrži samo vrijednosti za inverznu komponentu, jer je samo ona važna za analizu moguće smetnje aparatima priključenima na mrežu. Analiziraju se istodobno amplitude faza i fazni kutovi.

Izvori nesimetrije su jednofazna i dvofazna opterećenja kao što su [7]:

- vlakovi, lučne peći na mrežama srednjeg i visokog napona, indukcijske peći,
- različito distribuirana opterećenja potrošača na jednofaznom niskonaponskom sustavu.

Prevladavajući uzrok nesimetrije su nesimetrično raspoređena jednofazna opterećenja. U niskonaponskim mrežama jednofazni tereti su skoro isključivo spojeni na fazu i nulu, ali se distribuiraju više ili manje podjednako na sve tri faze. Na srednjenaponskim i visokonaponskim mrežama jednofazni tereti se mogu spajati i na dvije faze i na fazu i nulu. U važne jednofazne terete ubrajaju se izmjenična napajanja željeznice i jednofazne peći.

Širenjem s nižih na više naponske razine, naponi inverzne komponente se u velikoj mjeri ublažavaju. Ublažavanje u smjeru s viših na niže naponske razine ovisi o prisutnosti trofaznih rotirajućih strojeva koji imaju svojstvo uravnoteženja.



## 4. UTJECAJ RAZLIČITIH VRSTA MIKROMREŽA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Moderni distribucijski sustavi električne energije su kompleksan skup brojnih opskrbnih točaka i nekoliko komponenata. Mijenjaju karakteristiku električne energije koja se predaje potrošaču. Promjene karakteristike manifestiraju se kao kratki ili duži periodi prekida napajanja ili nedozvoljene promjene karakteristike napona i frekvencije. Kvaliteta električne energije ovisi o karakteristikama napona i frekvencije dok pouzdanost ovisi o učestalosti prekida napajanja. Zbog uvođenja i rasprostranjenog korištenja industrijskih i komercijalnih osjetljivih elektroničkih uređaja došlo je do potrebe za kvalitetnom i pouzdanom električnom energijom. Da bi se sustavi s takvim uređajima zaštitili, kupci investiraju u osobne sustave proizvodnje energije i sustave neprekidnog napajanja da bi održali potrebnu kvalitetu električne energije. Distribuirana proizvodnja i mikromreže mogu se upotrijebiti za značajno povećanje kvalitete i pouzdanosti energije potrebne potrošačima. Potencijalne usluge koje mogu dati distribuirani izvori i mikromreže su [8]:

- Primjena uređaja s kombiniranom proizvodnjom topline i električne energije pomaže u povećanju ukupne učinkovitosti sustava. Uz to kombinirana proizvodnja topline i električne energije može biti ekonomičnija opcija za potrošače nego odvojena kupovina el. energije i sirovine ili goriva za toplinske potrebe.
- Proizvodnja energije u blizini potrošnje iz obnovljivih ili nekonvencionalnih izvora kao što su bioplina, biomasa, biogoriva, fotonaponski ili solarni kolektori postaju jeftiniji kupcima koji su udaljeni od mreže.
- Distribuirani generatori mogu biti iskorišteni za smanjenje vršne potrošnje tako da rade samo u periodu vršnih opterećenja. Takva primjena uglađuje krivulju potrošnje te smanjuje ukupnu cijenu energije potrošača a uz to omogućuje mrežnom operatoru opskrbljivanje većeg broja potrošača.
- Distribuirani generatori koji imaju mogućnosti mrežnog rada i otočnog pogona mogu tijekom kvara mreže napajati prioritetne potrošače. Prijelaz iz mrežnog u otočni pogon izvodi se neprimjetno uz pomoć inteligentnih upravljačkih sustava tako da su smetnje za osjetljive uređaje minimalne.

- Distribuirani generatori sposobni su proizvesti el. energiju visoke kvalitete preko njihovog elektroničkog sučelja. To ih čini pogodnima za opskrbu potrošača s osjetljivim uređajima eliminirajući tako potrebu za osobnim sustavima proizvodnje el. energije i sustavima neprekidnog napajanja.

Mikromreže imaju izravno djelovanje na poboljšanje kvalitete i pouzdanosti u aktivnoj distribucijskoj mreži. Za poboljšanje kvalitete i pouzdanosti električne energije potrebne su slijedeće značajke mikromreže [8]:

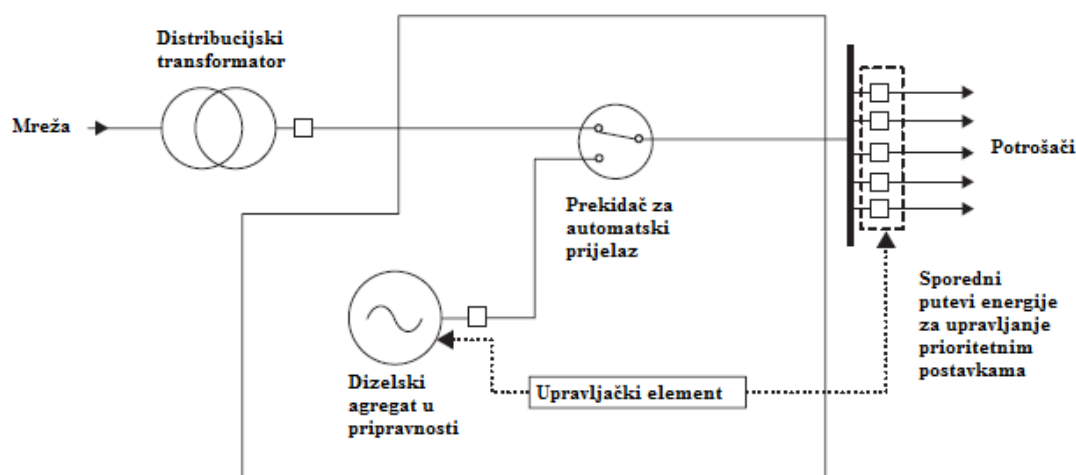
- Brzi odziv – Potrošač treba brz odziv sustava spremnika energije da bi se zaštitio od trenutne promjene napona.
- Čista energija – Energija iz spremnika energija mora se pretvoriti u čistu energiju.
- Sinkroniziranost – Lako upravljanje mora biti moguće u sinkronizaciji i paraleli.
- Meki prijenos – Alternativni izvor mora imati sposobnost neprimjetnog prijenosa energije.
- Izolacija – Mikromreža trebala bi biti dovoljno učinkovita u brzom izoliranju od mreže u slučaju nepredviđenih situacija.
- Dovoljno spremnika – Količina pohranjene energije mora biti dovoljna tijekom bilo kojeg prekida sve dok se ne uspostavi primarna ili sekundarna energija.
- Opskrba prioritetnih potrošača – Mikromreža mora biti sposobna isporučiti visoko kvalitetnu energiju prioritetnim potrošačima u sustavu.
- Mogućnost angažiranja – Mikromreža treba biti sposobna opskrbljivati energijom promjenjive lokalne potrošače.
- Učinkovitost – Mikromreža treba raditi s visokom učinkovitošću.
- Emisije – Mikromreža treba drastično smanjiti emisiju štetnih plinova distribuiranih izvora da bi se minimizirao utjecaj na okoliš.

U nastavku slijede shematski prikazani primjeri integracije distribuirane proizvodnje.

## 4.1. Sustav s dizelskim generatorom u pripravnosti

Generator u stanju pripravnosti štiti potrošače od dugih prekida, kako je prikazano na slici 4.1. , priključen je na potrošače preko prekidača za automatski prijelaz. Upravljački element automatski osjeti prekid i uključuje generator. Tipičnom dizelskom generatoru treba 10 sekundi za pokretanje. Opterećenja su podijeljena te se napajaju prvo prioritetni potrošači da bi se održao kontinuitet bez preopterećenja generatora.

Štiti opterećenja od dugotrajnih prekida no nema mogućnost zaštite od kratkotrajnih promjena napona. Stoga, sustav prikazan na slici 4.1. nije primjeren za opterećenja koja su osjetljiva na kratkotrajne smetnje u napajanju. Uporaba dizelskog generatora bez mogućnosti upravljanja ograničena je utjecajem na emisiju u okoliš i upravljanjem uklapanja. No uz korištenje alternativnih goriva i naprednim uklapanjem može se koristiti u širokoj uporabi [8].

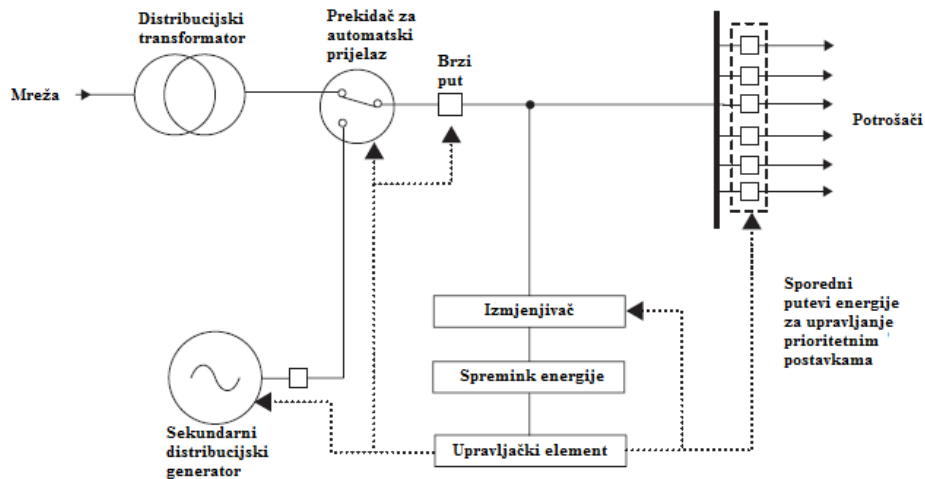


Sl. 4.1. Sustav s dizelskim agregatom u pripravnosti [8].

## 4.2. Sekundarni sustav distribuirane proizvodnje

Tipični sekundarni distribucijski izvor s podrškom na kvalitetu električne energije koristi spremnike energije za zaštitu protiv dugotrajnih prekida. Uz to pruža i zaštitu od kratkotrajnih i trenutnih promjena napona naprednim upravljačkim elementom. Spremnici energije na mjestu potrošnje daju energiju tokom bilo kojeg kvara mreže sve dok generator ne proradi. Napredni statički prekidači i upravljački elementi sprječavaju da potrošači uoče bilo kakve promjene pri uklapanju i isklapanju sekundarnog distribucijskog izvora.

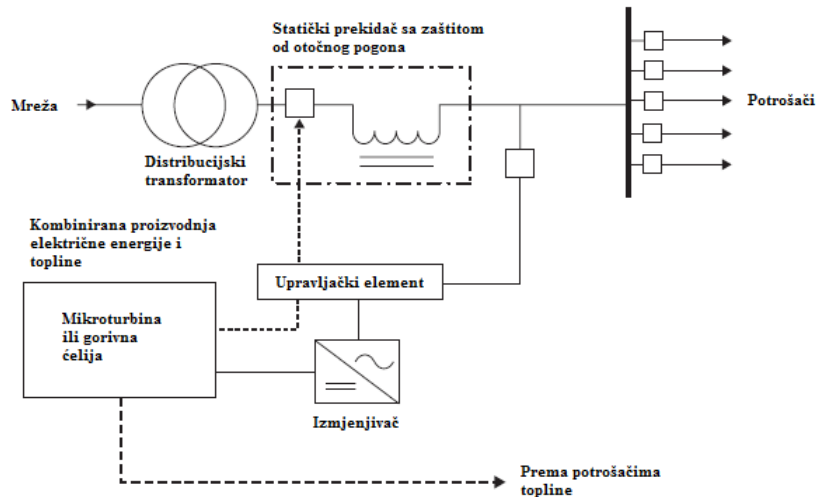
Sustav prikazan na slici 4.2. koristi se za opskrbljivanje osjetljivih potrošača koja korištenjem sustava neprekidnog napajanja s baterijom i generatorom u stanju pripravnosti. Ovakav sustav ako koristi generatore koji su ekološki odobreni, imaju visoku pouzdanost i kvalitetu, može se koristiti zbog ekonomskih razloga, ne samo u izvanrednom stanju. Korištenje sustava pogodno je za smanjenje vršnog opterećenja pravilnim upravljanjem između mreže i mikromreže [8].



Sl. 4.2. Sekundarni sustav distribuirane proizvodnje [8].

### 4.3. Sustav s primarnim distribucijskim izvorom

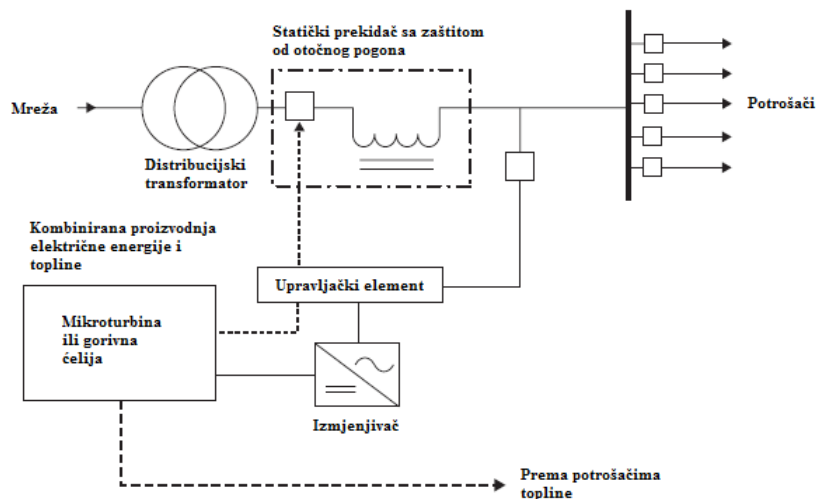
Shema na slici 4.3. je alternativna konfiguracija za sustave s kombiniranom proizvodnjom el. i toplinske energije. Kombinirani sustav radi paralelno s mrežom u svrhu niske cijene električne i toplinske energije. Tip generatora, sklopne opreme, upravljačkih elemenata mora biti specijalno dizajnirani za uspješni rad bez mreže, da bi se zaštitili prioritetni potrošači.



Sl. 4.3. Sustav s primarnim distribucijskim izvorom koji sudjeluje u održavanju kvalitete [8].

#### 4.4. Distribuirani izvor meko spojen na mrežu

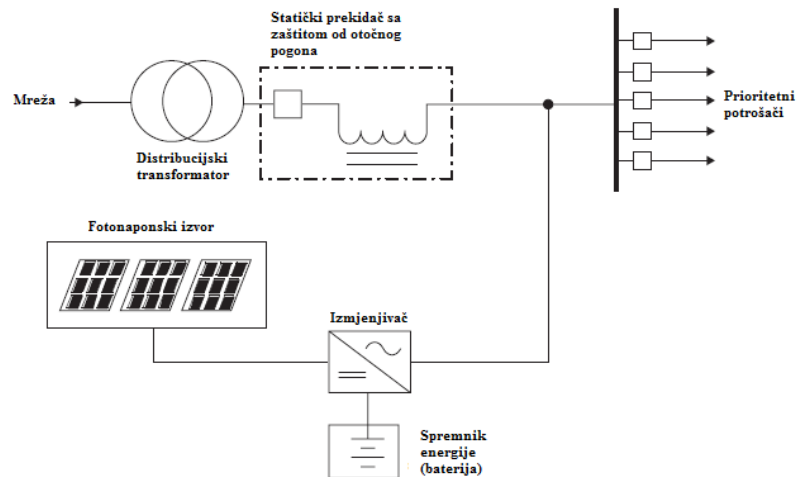
Sustav koji je prikazan na slici 4.4. sposoban je za rad neovisan o mreži s zaštitom od otočnog rada. Sustav može pružiti rad kao s generatorom u stanju pripravnosti. Uz to sustav može proizvoditi energiju za prioritetne potrošače s dodatnim neprestanim sustavom napajanja i spremnicima energije.



Sl. 4.4. Distribuirani izvor meko spojen na mrežu koji sudjeluje u održavanju kvalitete za prioritetna opterećenja [8].

## 4.5. Fotonaponski distribuirani izvor s isprekidanim pogonom

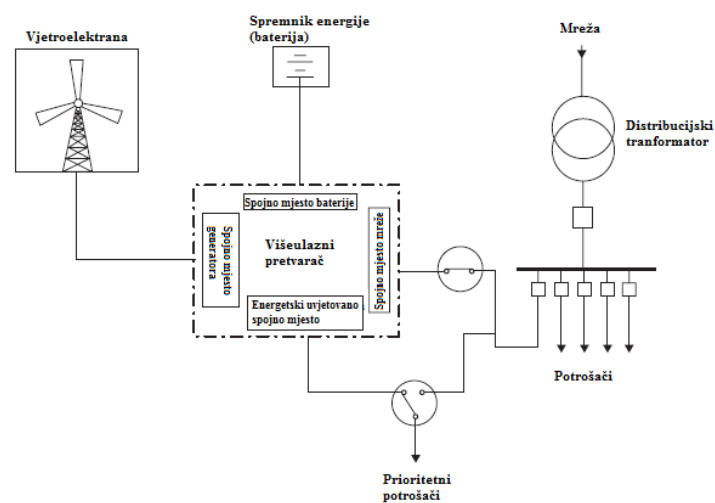
Slika 4.5. prikazuje konfiguraciju fotonaponskog distribuiranog izvora s isprekidanim pogonom. Takav sustav daje energiju u mrežu svrhu nadopune količine energije i koji sudjeluje u održavanju kvalitete električne energije.



Sl. 4.5. Fotonaponski distribuirani izvor s isprekidanim pogonom koji sudjeluje u održavanju kvalitete [8].

## 4.6. Distribuirani izvor (vjetroelektrana) s isprekidanim pogonom

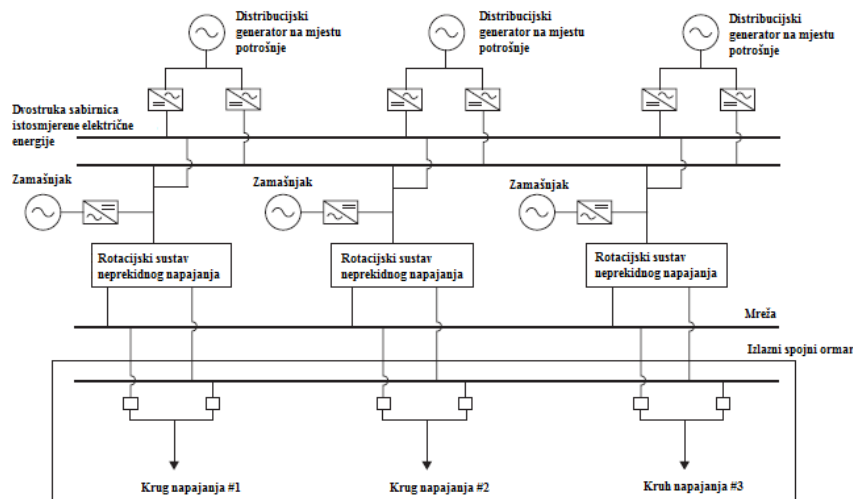
Slika 4.6. prikazuje konfiguraciju spoja vjetroelektrane koja sudjeluje u održavanju kvalitete i daje energiju u mrežu.



Sl. 4.6. Shema spoja vjetroelektrane s isprekidanim pogonom [8].

## 4.7. Sustav s dvostrukom istosmjernom sabirnicom

Slika 4.7. prikazuje tipični visoko pouzdani sustav s dvostrukom sabirnicom istosmjerne struje. Sustav radi neovisan o mrežnom napajanju i mogu ga koristiti potrošači koji zahtijevaju visoku pouzdanost. Objedinjuje proizvodnju na mjestu potrošnje, sustave neprekidnog napajanja, zamašnjake spojenih na dvostruku sabirnicu istosmjerne struje s više nego dovoljnim zalihama energije za očuvanje kontinuirane kvalitete električne energije. U ovakvoj shemi distribuirana proizvodnja je glavni izvor energije dok je mreža pomoćni sustav napajanja. U normalnom pogonu sustav nije spojen na mrežu. Zamašnjaci štite od prekida ili kvara u distribuiranim generatorima te štite od naglih promjena opterećenja. Toplina iz distribuiranih izvora koristi se za grijanje.



Sl. 4.7. Sustav s dvostrukom istosmjernom sabirnicom [8].

Ovakav sustav ima slijedeće prednosti [8]:

- Naponske pogreške glavnih izvora ne utječu na ostale izvore tj. ne uzimaju energiju iz ostalih izvora
- Kvarovi kod prioritetnih potrošača izolirani su sustavom neprekidnog napajanja jer je otklanjanje kvara glavna funkcija sustava neprekidnog napajanja.
- Ne postoji mogućnost kvara u sustavu jer postoji upravljanje kvarovima unutar sustava
- Generatori rade neovisno jedan o drugom
- Ne postoji uzlazni tok energije
- Sinkronizacijski ili kaskadni kvarovi su udaljeni

Prilikom integracije distribuiranih izvora s sustavima neprekidnog napajanja i ostalim uređajima potrebnim za uspostavu napredne mreže treba usmjeriti pažnju na slijedeće probleme za ispravan rad [8]:

- Uređaji za skladištenje energije moraju imati dovoljno energije za napajanje potrošača tijekom pokretanja generatora. Dizelski generator starta za otprilike 10 sekundi dok mikroturbini treba i do 90 sekundi. Zamašnjaci mogu nadoknaditi nedostatak energije u periodima manjim od 30 sekundi, stoga se koristi kao pričuvna energija za dizelski generator no ne i za mikroturbinu koja proizvodi električnu i toplinsku energiju.
- Količina energije iz distribuiranih izvora mora biti dovoljna za opskrbu prioritetnih potrošača koji mogu imati elektromotore ili neke druge uređaje kojima je potrebna struja pokretanja da bi se izbjegao pad napona te time i nemogućnost upravljanja naponom. Postoji mogućnost da distribuirani izvori s gorivnim ćelijama i mikroturbinama ne mogu podržati radi elektromotornih pogona i sličnih uređaja.
- Mikromreža i distribuirani izvori koji radi paralelno s mrežom moraju imati spoj na mrežu zbog nužne zaštite i regulacije kvara.
- Mikromreža i distribuirani izvori s neprekidnim sustavom napajanja ili pričuvnim generatorima moraju voditi računa o problemima sinkronizacije s sustavom potrošnje topline zbog mogućih štetnih promjena toplinskog opterećenja.
- Mikromreža i distribuirani izvori s neprekidnim sustavom napajanja koji koriste statički filter moraju voditi računa o višku jalove energije tijekom niske energije opterećenja, u protivnom može doći do gubitka upravljanja naponom tj. prenapon.
- Mikromreža i distribuirani izvori bi trebali osigurati dovoljnu zalihost za opskrbu uređaja od kojih se očekuje visoka pouzdanost.
- Mikromreža i distribuirani izvori moraju biti odvojeni jedni od drugih s vatrootpornim zidovima da bi se zaštitio sustav tijekom požara.
- Pričuvni distribuirani izvori moraju imati dvostruke sustave pokretanja, posebne filtere goriva itd.
- Mikromreža i distribuirani izvori moraju ispuniti sve aspekte kvalitete električne energije i pouzdanosti.

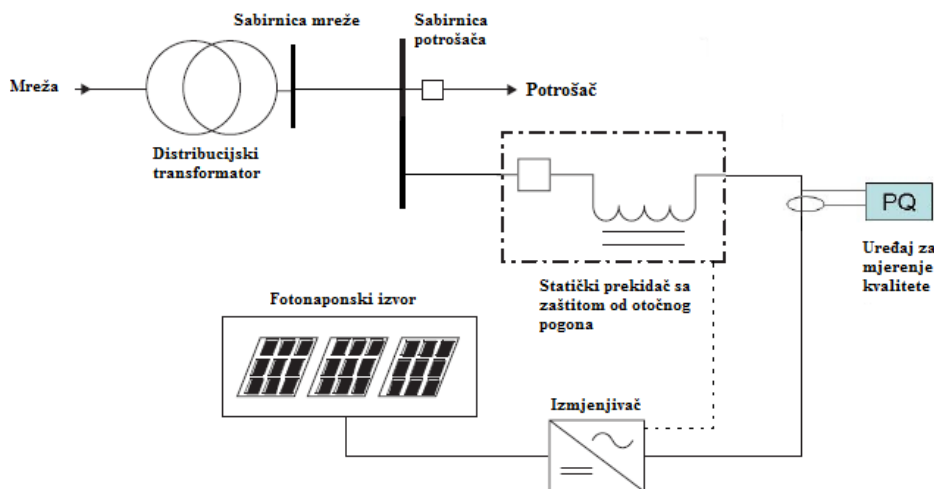


## 5. ANALIZA MOGUĆIH UTJECAJA MIKROMREŽE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju se analizira utjecaj postojeće fotonaponske elektrane, koja je spojena na distribucijsku mrežu, na kvalitetu električne energije. Potom će se analizirati mogući utjecaj projektirane mikromreže s postojećom fotonaponskom elektranom, na kvalitetu električne energije.

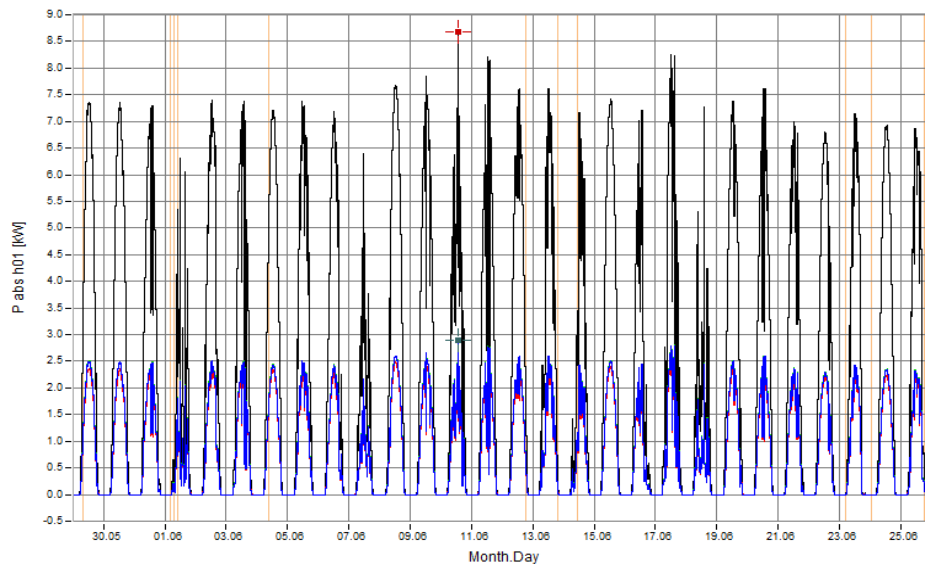
### 5.1. Analiza kvalitete električne energije s postojećom fotonaponskom elektranom

Fotonaponska elektrana nalazi se u Osijeku na zgradi Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Izgrađena je za proizvodnju električne energije i istraživačke svrhe u sklopu Laboratorija za obnovljive izvore energije. Proizvedenu električnu energiju predaje mreži preko izmjenjivača kako je prikazano na slici 5.1. Instalirana snaga elektrane iznosi 10 kW.



Sl. 5.1. Principijelna shema fotonaponske elektrane.

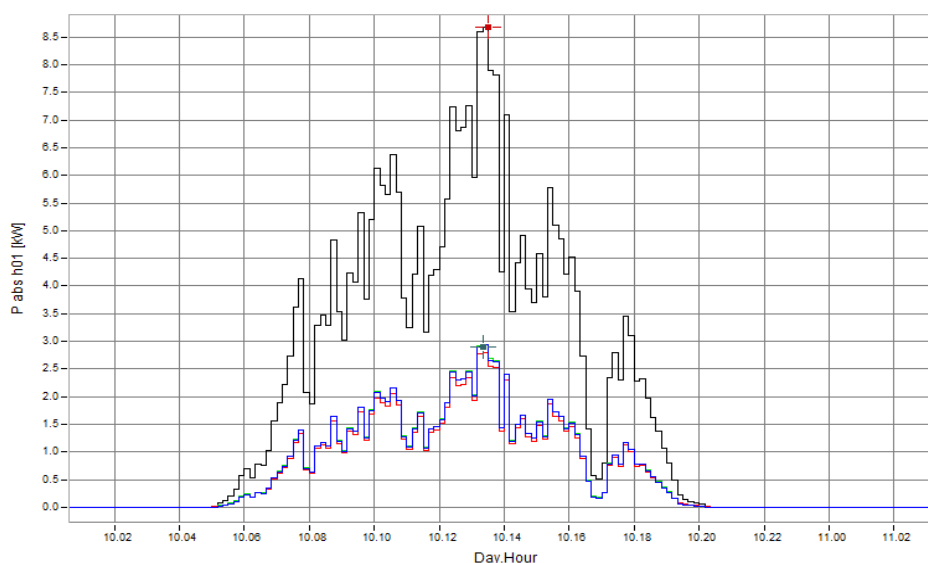
Mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je u razdoblju od 29. svibnja do 26. lipnja 2017. godine. Promatraju se svi relevantni pokazatelji kvalitete električne energije. Mjerenje se izvodi pomoću uređaja proizvođača „Fluke“ a analiza u softveru istog proizvođača naziva „PQ Analyze“. Na slici 5.2. prikazana je djelatna energija predana mreži u mjerenom razdoblju kroz koju se može zaključiti vrijeme tijekom kojeg elektrana daje energiju u mrežu te koja je veličina predane djelatne snage u mrežu.



**Sl. 5.2.** *Djelatna snaga fotonaponske elektrane.*

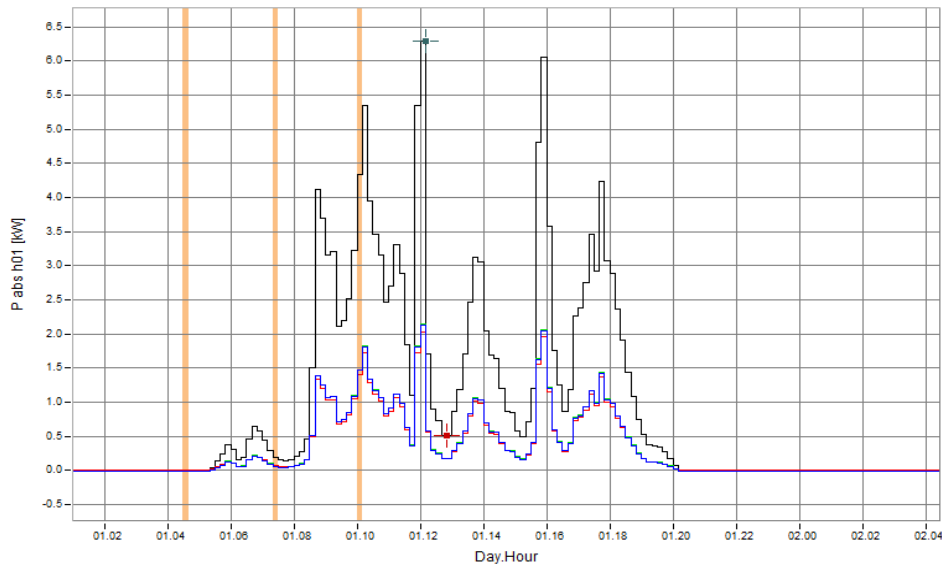
Izmjenjivač predaje trofaznu električnu energiju u mrežu. Svaka faza daje maksimalno dva do tri kilovata djelatne snaga u mrežu. Os apscisa prikazuje vrijeme mjerenja u obliku dana u mjesecu i mjesec a os ordinata prikazuje proizvedenu djelatnu energiju. Crnom bojom na slici 5.2. prikazana je suma djelatnih energija pojedinih faza. Plavom, crvenom, i zelenom bojom prikazane su snage pojedinih faza. Tijekom mjenog razdoblja vršna djelatna snaga proizvodnje nije dosegla instaliranu snagu te je iznosila oko 8,7 kW.

Slika 5.3. prikazuje predanu djelatnu energije tijekom 10.6.2017. godine u kojem je došlo do maksimalne predane djelatne snage tijekom mjenog razdoblja. Crnom bojom prikazan je suma djelatnih snaga faza a ostalim bojama djelatna snaga po pojedinim fazama.



**Sl. 5.3.** *Djelatna snaga fotonaponske elektrane u jednom danu.*

Os apscisa prikazuje vrijeme u obliku dana i sata mjerenja a os ordinata prikazuje proizvedenu djelatnu energiju. Jasno se zaključuje da vrijeme rada elektrane kreće od otprilike šest sati ujutro i završava u 20 sati. Taj podatak je promjenjiv tokom godine pošto je poznato da dan ne traje isto u svako doba godine.



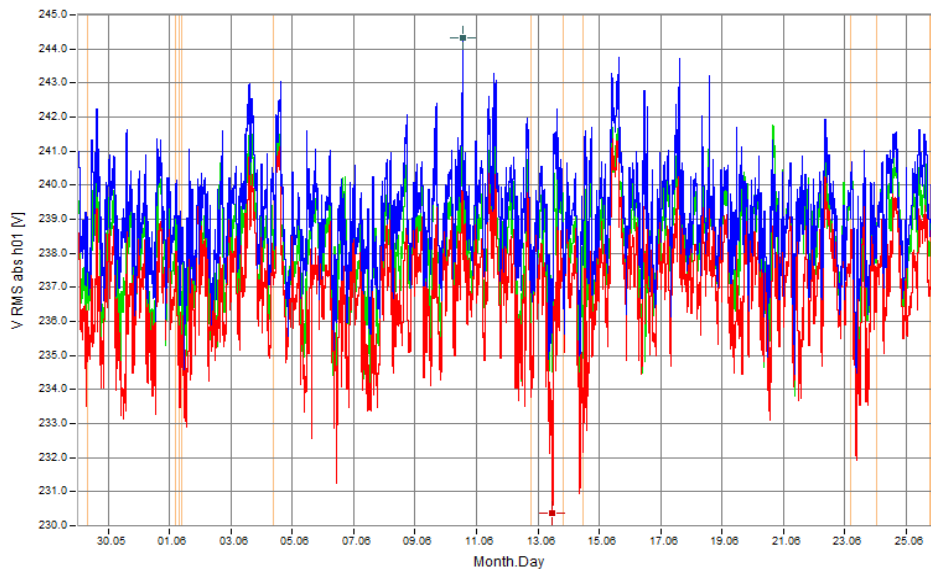
**Sl. 5.3.** *Djelatna snaga fotonaponske elektrane tijekom oblačnog dana.*

Graf sa slike 5.3. dobiven je 1.6.2017. godine te prikazuje predanu djelatnu snagu tijekom oblačnog dana. Predana djelatna snaga doseže vrijednost od 6,25 kW no unutar jednog sata pada na vrijednost od oko 500 W što bi u slučaju veće instalirane snage elektrane imalo velik utjecaj na kvalitetu električne energije.

U nastavku analizira se kvaliteta električne energije iz fotonaponske elektrane.

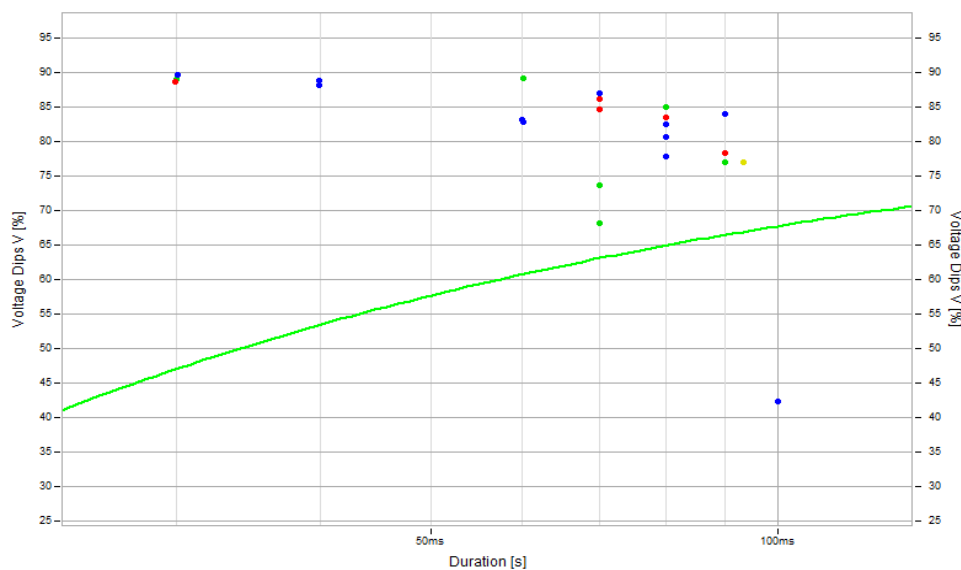
### 5.1.1. Naponska razina i propadi

Slika 5.4. prikazuje naponske razine tijekom mjerenog razdoblja. Nazivni napon mreže je 230 V. Do promjene napona dolazi zbog promjene u tokovima energije napojnog voda no moguće je i da promjene napona u srednjenaponskoj razini utječu na naponske razine u niskonaponskoj mreži. Tijekom mjerenog razdoblja nije bilo prenapona, kratkotrajnih i dugotrajnih prekida napajanja no bilo je 40 propada napona. Tijekom mjerenog razdoblja napon je imao vrijednosti iznad nazivnog napona od 230 V.



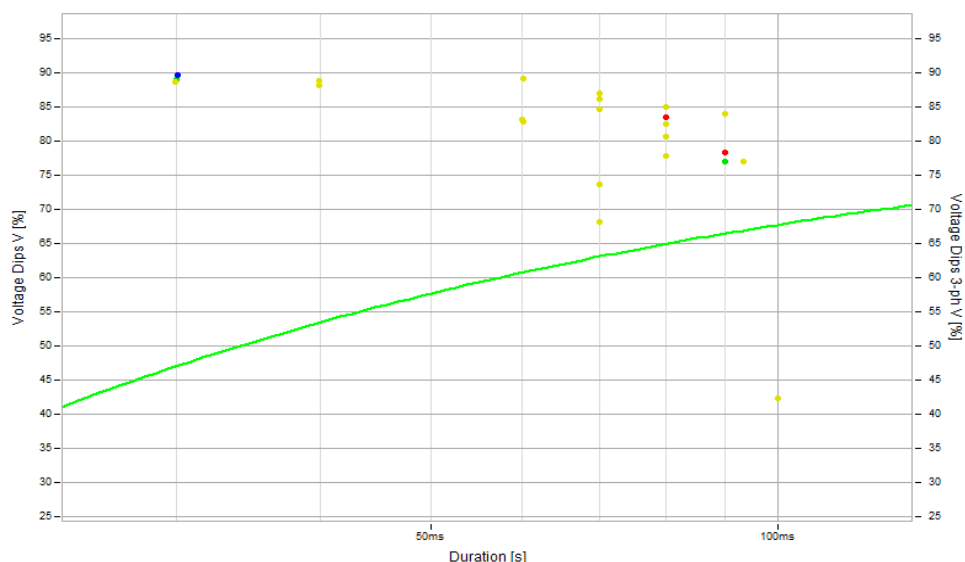
**Sl. 5.4.** *Naponske razine tijekom mjerenog razdoblja.*

Na grafu sa slike 5.4. crvenom, zelenom i plavom bojom označeni su fazni naponi. Na osi apscisa nalazi se vrijeme mjerenja u obliku dana i mjeseca mjerenja a na os ordinata iznos napona. Najveća vrijednost napona tijekom mjerenog razdoblja je 244,3 V a najniža vrijednost iznosila je 230,5 V što je u dopuštenim granicama.



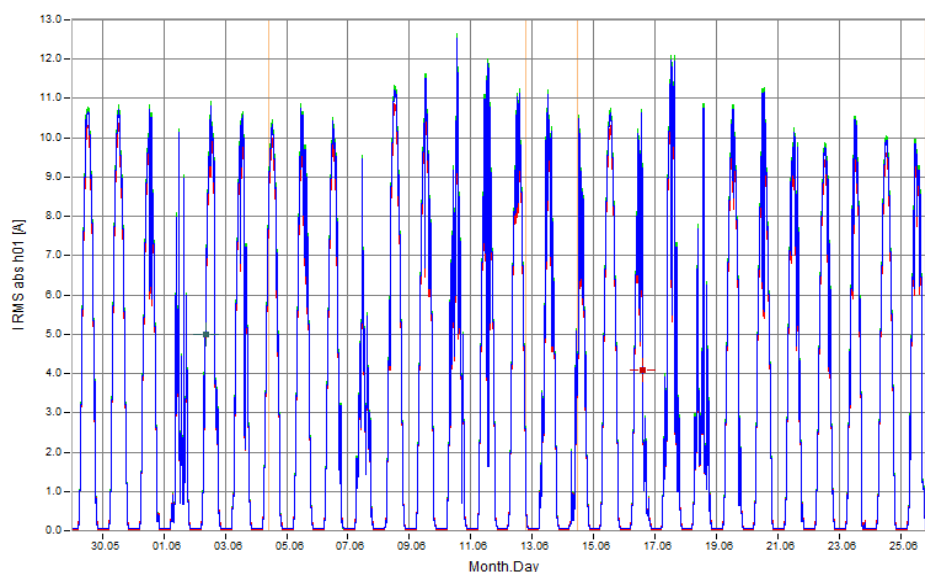
**Sl. 5.5.** *Propadi napona po fazama.*

Na slici 5.5. plavom bojom označeni su propadi u fazi jedan, crvenom bojom u fazi tri a zelenom u fazi dva . U fazi jedan dogodilo se 11 propada što je 27,5 % ukupnih propada, u fazi dva dogodilo se 5 propada što je 12,5 % a u fazi 3 dogodilo se 6 propada što je 15 % ukupnih propada. Propada u sve tri faze bilo je 18 što je 45 % ukupnih propada.



**Sl. 5.6.** *Trofazni propadi napona.*

Dva propada nalaze se ispod ITIC krivulje koja prikazuje tipičnu toleranciju računalne opreme prema naponskim propadima, prekidima i prenaponima. Propad napona uočljiv je i na slici 5.1. kao vertikalna narančasta linija. Propad napona ispod ITIC krivulje dogodio se 12.6.2017. godine između 18:50 i 19:00 sati.

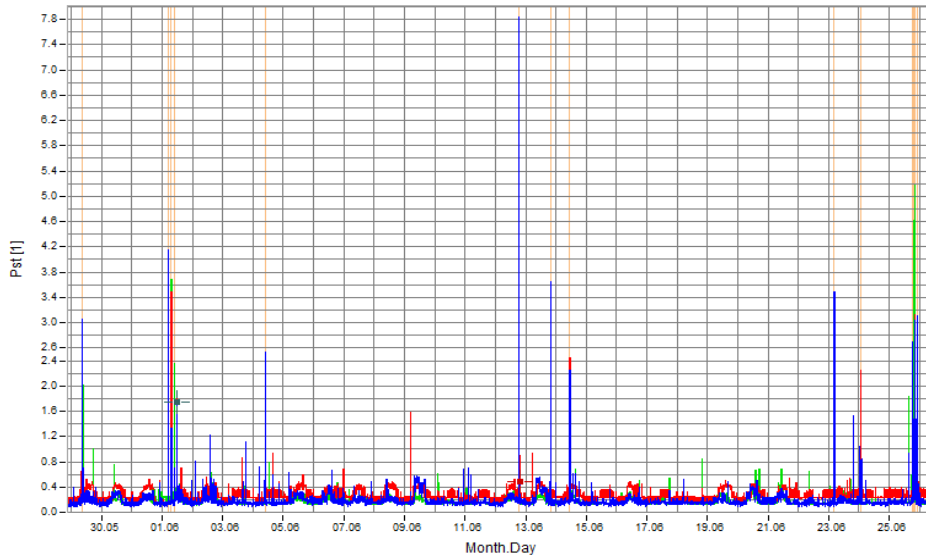


**Sl. 5.7.** *Jakost struje tijekom mjerelog perioda.*

Na grafu sa slike 5.7. crvenom, zelenom i plavom bojom označene su karakteristike struja tijekom mjerelog perioda.

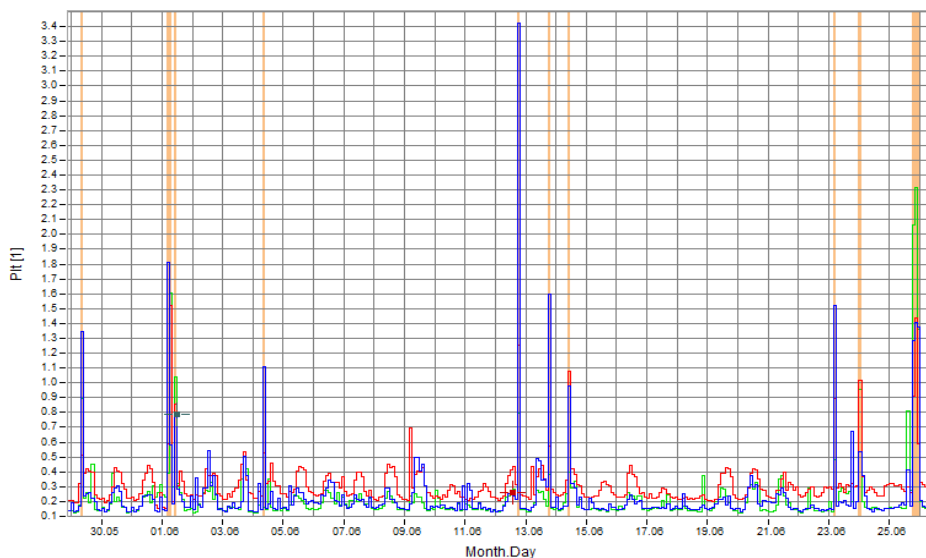
### 5.1.2. Treperenje napona

Vrijednosti indeksa jačine treperenja napona  $P_{st}$  i  $P_{lt}$  imaju dopuštene vrijednosti u periodima od 5.6.2017. do 12.6.2017. i 15.6.2017. do 22.6.2017. . U svim ostalim periodima indeksi premašuju vrijednosti od 1 što je prikazano na slikama 5.8. i 5.9.



Sl. 5.8. Vrijednost indeksa jačine treperenja napona  $P_{st}$ .

Na slici 5.8. plavom bojom označena je karakteristika indeksa jačine treperenja napona  $P_{st}$  faze jedan, crvenom bojom označena je faza dva a zelenom bojom faza tri. Na osi apscisa nalazi se vrijeme u obliku dana i mjeseca a na osi ordinata nalaze se vrijednosti indeksa jačine treperenja napona.



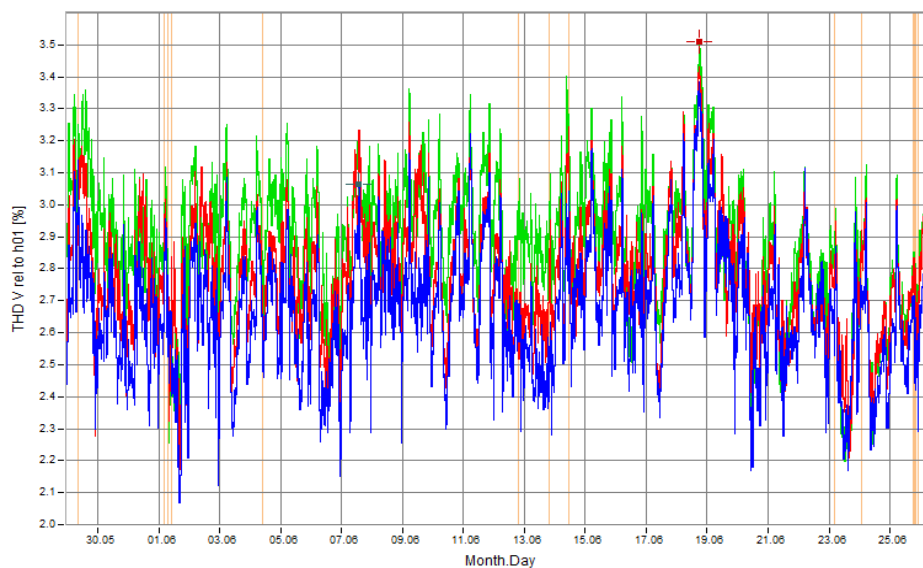
Sl. 5.9. Vrijednost indeksa jačine treperenja napona  $P_{lt}$ .

Na slici 5.9. plavom bojom označena je karakteristika indeksa jačine treperenja napona  $P_{st}$  faze jedan, crvenom bojom označena je faza dva a zelenom bojom faza tri. Na osi apscisa nalazi se vrijeme u obliku dana i mjeseca a na osi ordinata nalaze se vrijednosti indeksa jačine treperenja napona.

Najveće vrijednosti indeksa jačine treperenja napona  $P_{st}$  i  $P_{It}$  događaju se 12.6.2017. u trenutku propada napona ispod ITIC krivulje. Iz mjerenih rezultata nije moguće odrediti uzrok pojave flikera no može se zaključiti da fotonaponska elektrana može utjecati na pojavu povećanja flikera jer izmjenjivač može prilikom značajne promjene snage isključiti ili priključiti elektranu na mrežu. Ukoliko se do učestalo događa, moguća je pojava treperenja napona. Ostali mogući uzroci pojave propada napona i flikera opisani su u poglavlju 3.1.1. .

### 5.1.3. Harmoničko izobličenje

Razina harmoničkog izobličenja u mjenom periodu ispod je granične vrijednosti od 8 % što dokazuje slika 5.10.

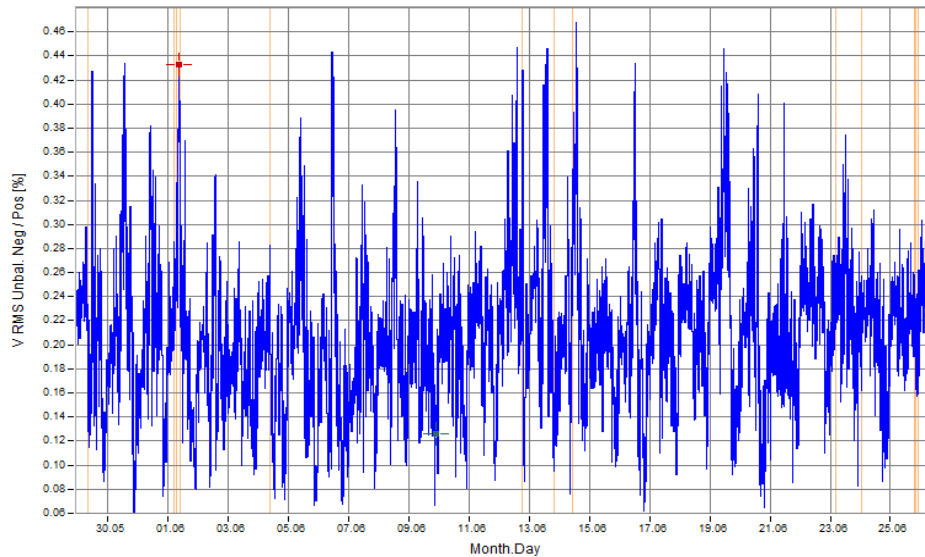


**Sl. 5.10.** Vrijednosti harmoničkog izobličenja tijekom mjenog perioda.

Na grafu sa slike 5.10. zelenom bojom označena je karakteristika harmonijskog izobličenja faze tri, crvenom bojom faze dva i plavom bojom faze jedan. Najveća vrijednost harmoničkog izobličenja iznosi 3,5 % što je ispod granične vrijednosti.

#### 5.1.4. Nesimetrija

Mjereni iznosi naponske nesimetrije su ispod granične vrijednosti od 2% u cijelom periodu mjerenja što je prikazano na grafu sa slike 5.11.



Sl. 5.11. Nesimetrija napona tijekom mjerenog perioda.

Najveća vrijednost nesimetrije iznosi 0,47 % što je u dozvoljenim granicama naponske nesimetrije.

#### 5.2. Mogući utjecaj modelirane mikromreže na kvalitetu električne energije

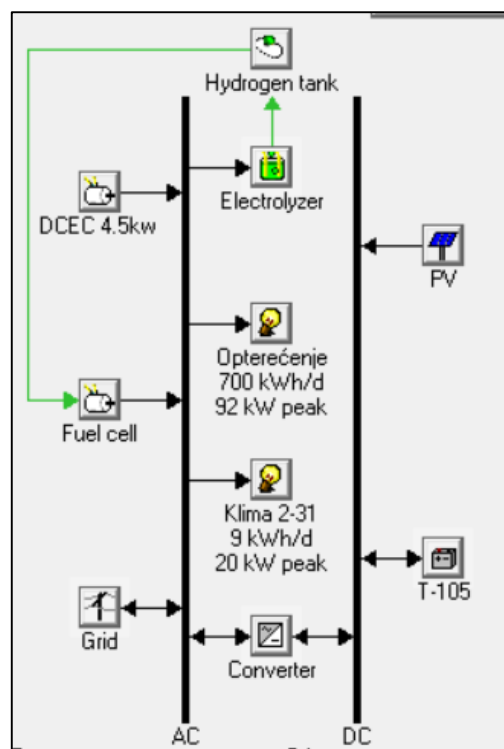
U ovom poglavlju razmatra se mogućnost izgradnje mikromreže koja bi, osim novih komponenata i sudionika sadržavala i spomenutu postojeću fotonaponsku elektranu. Za izgradnju mikromreže potrebno je slijedeće:

- Ugradnja baterijskog sustava i ostali spremnika energije
- Ugradnja dodatnih fotonaponskih modula i izmjenjivača, mikroizvora, gorivnih ćelija
- Ugradnja centralnog upravljanja
- Izmjena topologije
- Parametriranje zaštite
- Ugradnja upravljivih opterećenja (trošila)



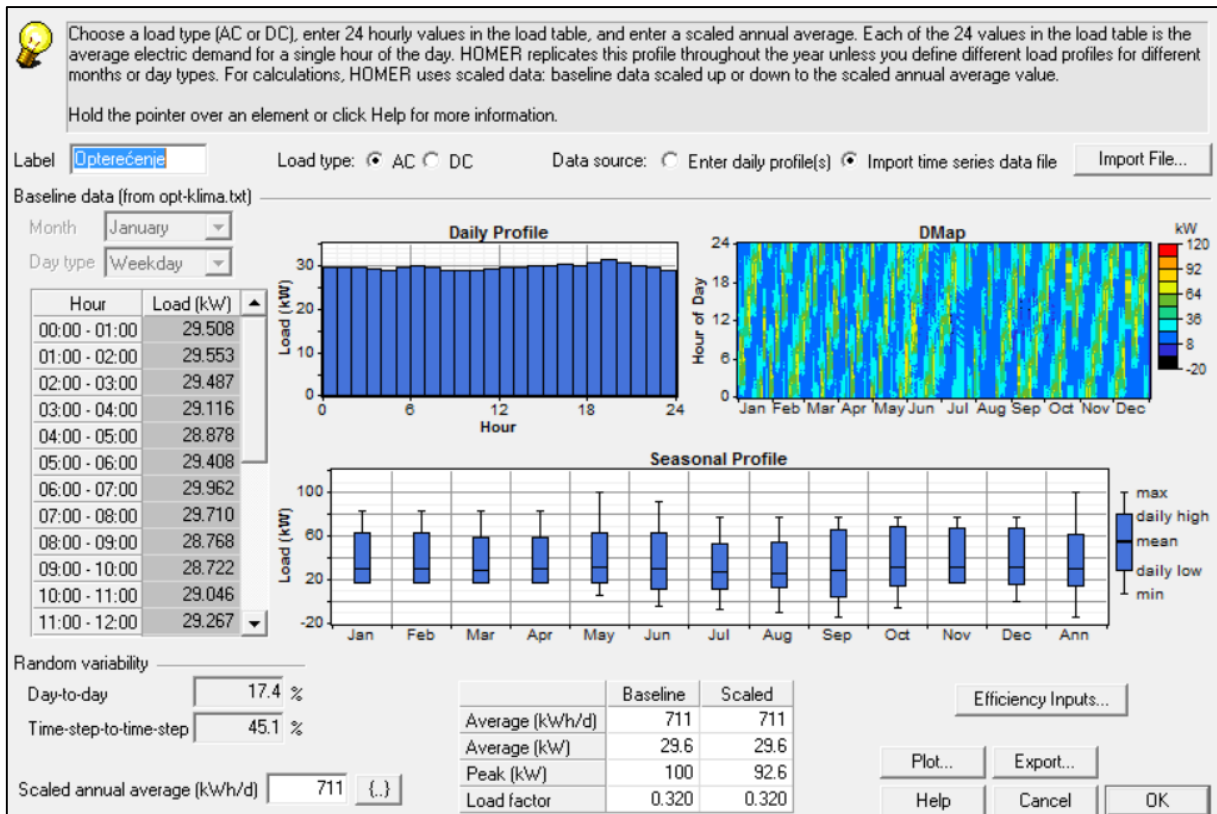
Korišten je model mikromreže [13], koji predstavlja optimalan sustav napajanja potrošača. Model je razvijen u programskom paketu Homer koji je razvijen od strane NREL-a (National Renewable Energy Laboratory ).

Homer predstavlja optimizacijski računalni model za distribuiranu proizvodnju električne energije. Prednost programa je u mogućnosti izračunavanja isplativosti samostalnih ili mrežnih modeliranih hibridnih sustava. Homer omogućava definiranje modela s ulaznim podacima koji opisuju raspoloživost resursa, cijene komponenata i ulazne podatke za svaku komponentu. Sve unesene podatke Homer obrađuje na način da ih iskorištava za simulaciju konfiguracije sustava i generira rezultate koje su vidljivi kao lista ostvarivih konfiguracija sortiranih po cijeni. U modelu, prikazanom na slici 5.12., nalaze se fotonaponski paneli, gorivne ćelije, dizelski agregat i baterija kao distribuirani izvori energije. Izmjenjivač upravlja energijom baterije i fotonaponskih panela.



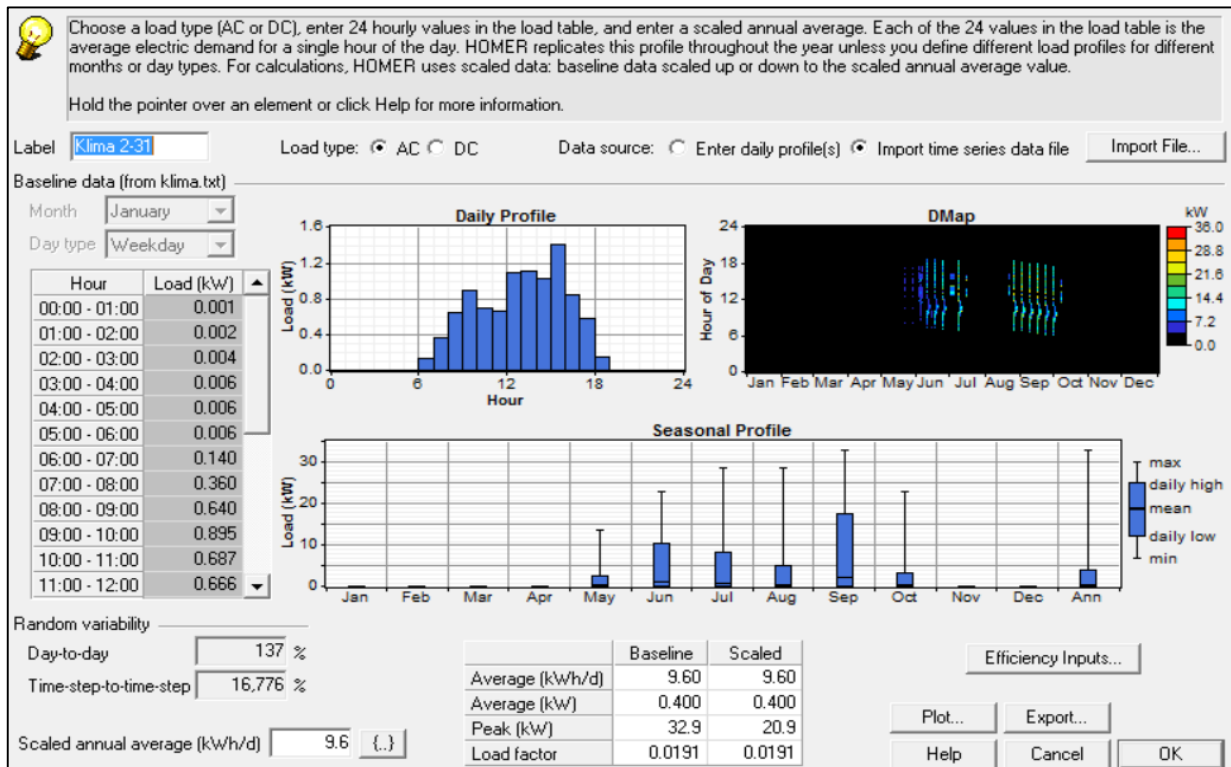
Sl. 5.12. Model mikromreže [13].

Model sadrži podatke o veličini distribuiranih izvora i kapaciteta spremnika energije s kojima se ostvaruje optimalan rad. Kao potrošači definirani su posebno klimatizacijski sustav i ukupno opterećenje fakulteta. Sa slike 5.13. može se očitati da je vršna potrošnja fakulteta bez klima uređaja 92 kW.



Sl. 5.13. Prikaz godišnjeg opterećenja fakulteta [13].

Vršna potrošnja klimatizacijskog sustava očitana je na slici 5.14. i iznosi 20,9 kW.



Sl. 5.14. Prikaz godišnjeg opterećenja klimatizacijskog sustava [13].

Spremnici energije koje se ugrađuju moraju moći prikupiti svu energiju koja je višak u vremenu kada distribuirani izvori proizvode više nego je potrebno. Kada su spremnici energije potpuno puni distribuirani izvori moraju se isključiti.

U slučaju kada je proizvodnja manja od potrošnje, razliku u energiji moraju nadomjestiti spremnici energije ukoliko je to optimalno.

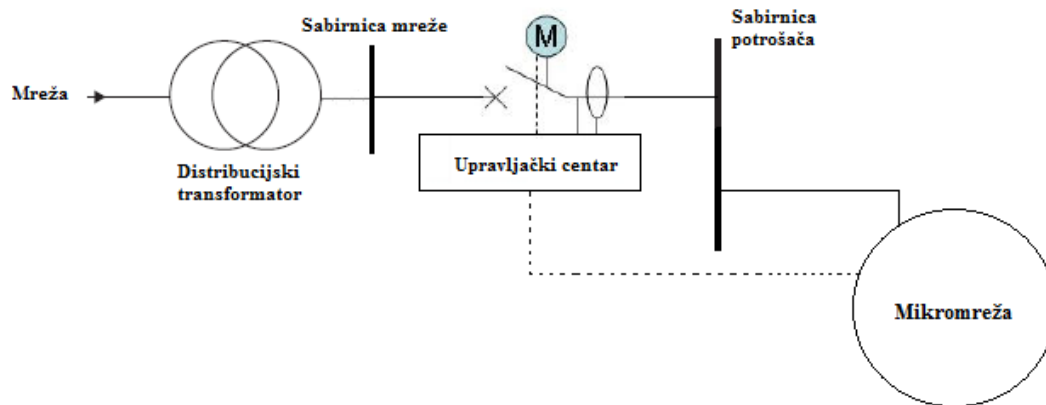
Spremljenu energiju moguće je koristiti na više načina:

- Maksimizacija profita
- Minimizacija gubitaka
- Održavanje balansa energije u mikromreži
- Održavanje kvalitete energije itd.

U većini slučajeva koristi se maksimizacija profita, uz definirana ograničenja, jer cilj je što prije vratiti investiciju.

Uloga upravljačkog centra je da isključuje mikromrežu od distribucijske mreže u slučaju pojave kvara u distribucijskoj mreži. Postavlja se nadstrujna zaštita s prepoznavanjem smjera struje koja ne smije reagirati u slučaju kvara u mikromreži. Kvarovi unutar mikromreže moraju se selektivno detektirati pomoću osigurača. Zbog učestale potrebe za priključenje na mrežu i isključenje s mreže potreban je sustav za sinkronizaciju koji ima bitnu ulogu za kvalitetu električne energije. Za sinkronizaciju potrebna je minimalna razlika napona, frekvencije i kuteva generatora i mreže. Isto vrijedi i za izmjenjivač.

Pri prekidu napajanja iz distribucijske mreže mikromreža se mora isključiti iz distribucijske mreže. Upravljački centar mora prepoznati takvo stanje. Na slici 5.15. prikazana je shema sustava.



**Sl. 5.15.** Principijelna shema Mikromreže.

Predloženom pretvorbom postojeće fotonaponske elektrane u mikromrežu doći će do utjecaja na kvalitetu električne energije. Postojat će razlika u otočnom pogonu i pogonu sa spojem na mrežu. Česta uklapanja i isklapanja mogu imati posljedice na kvalitetu električne energije.

### 5.2.1. Naponska razina i propadi

U slučaju kada je distribucijska mreža spojena s mikromrežom mogući su problemi s previsokim naponima. Pošto su razine napona s fotonaponskom elektranom bile iznad nazivne vrijednosti napona od 230 V što je prikazano na slici 5.4. moguće je da će biti potrebna regulacija napona. Ako je mikromreža spojena na distribucijsku mrežu, baterijski sustav i izmjenjivači mogu pridonijeti smanjenju propada tako što brzim isključenjem iz mreže preuzmu održavanje napona. Kada se napon mreže stabilizira, mikromreža se ponovno priključi na distribucijsku mrežu.

U otočnom pogonu distribuirani izvori i izmjenjivač drže napon konstantnim te u tom slučaju nije potrebna regulacija napona. Pojedini izmjenjivači ili distribuirani izvori trebali bi imati mogućnost isključenja u slučajevima kada su spremnici energije puni i kada naponska razina bude previsoka. U otočnom pogonu broj propada biti će ograničen s brojem kvarova unutar mikromreže. U slučaju uključenja distribuirane proizvodnje, koja nije sinkronizirana, može doći do propada napona.

Najvažnije je omogućiti regulaciju jalove energije svim distribuiranim izvora zajedno s izmjenjivačima kako bi se održao napon pri mrežnom pogonu ili otočnom pogonu.

### **5.2.2. Treperenje napona**

Moguće je ograničiti pojavu flikera korištenjem izmjenjivača i baterijskog sustava (superkondenzatori) ili bilo kojeg mikroizvora koji imaju brzi energetska odziv tj. u kratkom vremenu oni mogu kompenzirati treperenje napona. U otočnom pogonu promjene snage moguće su pri pojavi naoblake koja mijenja snagu proizvodnje fotonaponskih izvora, trajanje takvih promjena je otprilike nekoliko sekundi. U tom vremenu izvori s brzim odzivom moraju moći održati napon u dopuštenim granicama. Povećan broj treperenja napona najvjerojatnije nije moguć.

### **5.2.3. Harmoničko izobličenje**

Kada je mikromreža spojena na distribucijsku mrežu izmjenjivači mogu prigušiti harmoničko izobličenje koje dolazi iz distribucijske mreže čineći mikromrežu manje osjetljivom na harmonička izobličenja. Najbitnija je uloga izmjenjivača koji moraju imati ugrađene funkcije kojima se prigušuju harmonijsko izobličenje. Potpuna kompenzacija nije moguća.

U otočnom pogonu mikromreže izmjenjivači proizvode sinusni valni oblik što ograničuje pojavu harmonijskog izobličenja. Povećanje harmonika očekuje se s povećanjem broja fotonaponskih elektrana, izmjenjivača i povećanjem broja nelinearnih opterećenja.

U otočnom pogonu nestaju harmonijska izobličenja koja dolaze iz distribucijske mreže no može doći do problema rezonantnih frekvencija ugradnjom dodatnih izmjenjivača i baterijskih sustava.

### **5.2.4. Nesimetrija**

Pojava povećane nesimetrije moguća je ukoliko se jednofazna trošila neravnomjerno raspodijele po fazama. Ukoliko se budu ugrađivali fotonaponski paneli s jednofaznim izmjenjivačem mora se obratiti pozornost da svaka faza ima na sebi približno jednaku snagu fotonaponskih panela. Nesimetrija može uzrokovati visoku vrijednost struje u neutralnom vodiču, povećane potrošnje jalove energije, iznenadnu proradu zaštite, povećane gubitke. Kako bi se riješio problem potrebno je ponovno spojiti sustav tako da se dobije simetrična proizvodnja i potrošnja po fazama.

### 5.2.5. Frekvencija

Zbog isprekidanog pogona obnovljivih izvora tj. fotonaponskih izvora, kojemu je uzrok pojava naoblačenja, može doći do drastične promjene u proizvodnji djelatne snage. Na primjeru iz poglavlja 5.1. fotonaponske elektrane od 10 kW kojoj proizvodnja može u sat vremena varirati od 500W do 6,25 kW, što bi u slučaju fotonaponskih izvora veće snage još više variralo, očekivana je promjena frekvencije koja bi bila izraženija pri otočnom pogonu. Da bi se očuvala frekvencija, baterije ili bilo koja vrsta spremnika s izmjenjivačima i distribuiranim izvorima moraju moći izvršiti regulaciju djelatne snage tj. ne dozvoliti tako drastične promjene u djelatnoj snazi što bi značilo da bi mikromreže s velikom snagom instaliranih fotonaponskih izvora trebale imati dovoljnu količinu spremnika energije.

Bilo da je mikromreža u mrežnom pogonu ili otočnom pogonu, distribuirani izvori i izmjenjivači moraju imati mogućnost regulacije djelatne snage kako bi proizvodnja bila jednaka potrošnji. Prilikom prijelaza na otočni rad, bitno je imati izvore energije s brzim odzivom jer smanjena inercija sustava i mikroizvori sa sporim odzivom na potražnju djelatne energije ne mogu održati frekvenciju u dozvoljenim granicama.

## 6. ZAKLJUČAK

Kako se povećava svjesnost o utjecaju čovječanstva na okoliš povećava se i potražnja za nekonvencionalnim izvorima energije, stoga relativno nepoznat pojam mikromreže objašnjen je u diplomskom radu. Prije izgradnje mikromreže nužno je analizirati koje kako će mikromreža utjecati na sustav. U radu opisani su mogući utjecaji na kvalitetu električne energije.

Utjecaj na naponsku razinu može se očekivati, i to tako da bi napon mogao preći dozvoljene granice u periodima niske potrošnje električne energije. Najvažnije je omogućiti regulaciju jalove energije svim distribuiranim izvorima, zajedno s izmjenjivačima, kako bi se održao napon pri mrežnom pogonu ili otočnom pogonu.

Naponski propadi pri radu na mreži mogu se izbjeći pravilnim upravljanjem između upravljačkog centra i distribuiranih izvora s brzim odzivom, ukoliko je energija dostupna. Otočni pogon donosi propade u slučaju kvara unutar mikromreže. U slučaju uključanja distribuirane proizvodnje, koja nije sinkronizirana, može doći do propada napona.

Treperenje napona pri radu na mreži i otočnom radu moguće je regulirati izmjenjivačem i baterijskim sustavom.

Harmonička izobličenja pri spoju na mreži moguće je prigušiti, ukoliko izmjenjivač ima ugrađene takve funkcije. U otočnom radu nestaju harmonici iz mreže no može doći do rezonantnih frekvencija između uređaja.

Pojava naponske nesimetrije moguća je ukoliko dođe do disbalansa između proizvodnje i potrošnje po fazama.

Promjena frekvencije moguća je pri radu s mrežom no izraženija je u otočnom pogonu. Bilo da je mikromreža u mrežnom pogonu ili otočnom pogonu, distribuirani izvori i izmjenjivači moraju imati mogućnost regulacije djelatne snage kako bi proizvodnja bila jednaka potrošnji. Prilikom prijelaza na otočni rad, bitno je imati izvore energije s brzim odzivom jer smanjena inercija sustava i mikroizvori sa sporim odzivom na potražnju djelatne energije ne mogu održati frekvenciju u dozvoljenim granicama.

Mikromreža ima različite druge utjecaje na sustav koji se trebaju analizirati kako bi mikromreža bila sigurna za okolinu i kako bi mogla ostvariti svoj puni potencijal. Posebno je problematičan otočni pogon jer dolazi do promjene inercije, impedancije mreže a time i promjena struje kratkog spoja.

Brze promjene djelatne snage fotonaponskih izvora velike snage predstavlja najveći problem. Za potpuni potencijal mikromreže ključan će biti razvoj baterije ili bilo kojeg drugog spremnika električne energije s brzim odzivom kako bi mikromreža kompenzirala smanjenu inercije prilikom otočnog rada. Ukupno gledajući može doći do povećanja kvalitete električne energije zbog decentralizirane proizvodnje, boljeg balansa između proizvodnje i potrošnje i smanjenje utjecaja prekida mrežnog napajanja.



## LITERATURA

- [1] N. Hatziargyriou, Microgrid : architectures and control, John Wiley and Sons Ltd, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2014.
- [2] American Clean Skies Foundation<sup>1</sup>, 2010.-2015., dostupno na:  
<http://www.cleanskies.org/infographics/microgrid/> , [20.6.2017.]
- [3] B. Harack, How can renewables deliver dispatchable power on demand?, VisionofEarth, 2010., dostupno na : <https://www.visionofearth.org/industry/renewable-energy/renewable-energy-review/how-can-renewables-deliver-dispatchable-power-on-demand/> , [28.6.2017.]
- [4] Hrvatska enciklopedija, leksikografski zavod Miroslav Krleža, Portfelj, od 1999., dostupno na : <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49584>, pristup ostvaren ,[22.6.2017.]
- [5] J. F. Gerardus Cobben, Power Quality : Implications at the Point of Connection, doktorski rad, DeltaHage, Den Haag, The Netherlands, 2007.
- [6] Z. Klaić, S. Nikolovski, Kvaliteta električne energije – mjerenja prema normi en 50160, Šesto savjetovanje Cavtat, 2003. dostupno na: <https://bib.irb.hr/datoteka/142611.C4-14.pdf> [20.6.2017.]
- [7] Z. Klaić, mjerenje i analiza kvalitete električne energije u distribucijskoj mreži prema europskoj normi en 50160, magistarski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayer u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.
- [8] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, Microgrids and Active Distribution Networks, The Institution of Engineering and Technology, London, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2009.
- [9] Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, Zakona o tržištu električne energije (»Narodne novine«, broj 177/04), 2006. dostupno na :  
[http://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006\\_03\\_36\\_907.html](http://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_03_36_907.html) [21.6.2017.]
- [10] H. Markiewicz , A. Klajn, Standard EN 50160 -Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Wroclaw University of Technology, 2004.

- [11] A. Vinayagam, A. Astma, KSV Swarna, S. Khoo, A. Stojcevski, Power Quality Impacts in a Typical Microgrid, Faculty of Science, Engineering and Built Environment, Deakin University, Geelong-Australia, 2015.
- [12] A. Vinayagam, A. Astma, KSV Swarna, S. Khoo, A. Stojcevski, Power Quality Analysis in Microgrid: An Experimental Approach, Faculty of Science, Engineering and Built Environment, Deakin University, Geelong, Australia, 2016.
- [13] I. Jovanovac, Mikromreže, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2016.

## **SAŽETAK**

Utjecaj mikromreže na kvalitetu električne energije

Ovaj diplomski rad opisuje moguće utjecaje mikromreže na kvalitetu električne energije. Kao primjer uzeta je fotonaponska elektrana snage 10 kW koja se zamjenjuje mikromrežom. Analizom pokazatelja kvalitete električne energije fotonaponske elektrane, koja radi u pogonu s mrežom, mogu se naslutiti promjene koje će se dogoditi s mikromrežom. Mikromreža, da bi iskoristila svoj puni potencijal mora moći raditi u pogonu s mrežom i otočnom pogonu. Analiza obuhvaća utjecaj na razinu napona, naponske propade, treperenje napona, harmonička izobličenja, naponsku nesimetriju i frekvenciju. Mikromreža može utjecati na sve navedene pokazatelje kvalitete električne energije. Posebno je osjetljiv otočni pogon mikromreže zbog smanjene inercije.

Za mikromreže, ključan će biti razvoj baterije ili bilo kojeg drugog spremnika električne energije s brzim odzivom koji će moći kompenzirati brze promjene djelatne snage radi očuvanja frekvencije.

Ključne riječi: mikromreža, kvaliteta električne energije, fotonaponski sustav, mrežni pogon, otočni pogon

## **ABSTRACT**

Impact of Microgrid on Power Quality

This paper describes possible impacts of Microgrids on Power Quality. As an example, photovoltaic system with nominal power of 10 kW is substitute with microgrid. Analyzing electric power quality of photovoltaic system, which operates grid tied, some changes that will happen with the microgrid can be assumed. Microgrid, in order to make full potential, must be able to operate on grid and islanding. Analysis includes impact on voltage level, voltage dips, flickers, harmonic distortion, voltage asymmetry and frequency. Microgrid can have impact on all above mentioned power quality indicators. Microgrid, during Islanding, is very sensitive because of low inertia.

For microgrid concept, it will be crucial to develop a battery or any other energy storage technologies, with fast response capabilities, that can compensate high changes in active power, in order to preserve frequency.

Ključne riječi: microgrid, power quality, photovoltaic system, grid tied, islanding

## ŽIVOTOPIS

Ime: Mihael  
Prezime: Kaučić  
Telefon: 033-771-121  
Mobitel: 0977964438  
E-mail: mihaelkaucic@gmail.com

Mihael Kaučić rođen je 8. rujna 1992. godine u Virovitici, Republika Hrvatska. Pohađao je Osnovnu školu Suhopolje.

Nakon osnovne škole upisuje se u srednju Tehničku školu Virovitica, smjer elektrotehnika. Tijekom školovanja u Tehničkoj školi sudjeluje u ekipnom natjecanju iz matematike u Virovitici gdje zajedno s članovima ekipe osvaja prvo mjesto. Nakon toga slijedi sudjelovanje na Festivalu matematike u Puli 2011. godine, ekipno natjecanje. Srednjoškolska stručna praksa sadržavala je terenski rad u HEP –u operatoru distribucijskog sustava Virovitica tijekom kojeg stječe osnovna znanja o postavljanju podzemne niskonaponske mreže, obnovi mreže, priključku novih potrošača, remontima i termovizijskim ispitivanjima.

Elektrotehnički fakultet u Osijeku upisuje 2011. godine. Stručni studij, smjer elektroenergetike položio je 2014. godine. Potom upisuje razlikovnu godinu koju je uredno položio 2015. godine nakon čega iste godine upisuje diplomski studij, smjer elektroenergetika na istom fakultetu. Tijekom fakultetske stručne prakse radi u HEP –u operatoru distribucijskog sustava Virovitica u odjelu za investicije, odjelu za održavanje i dispečerskom centru. Posjeduje znanje Engleskog i Njemačkog jezika.

Izvanfakultetske aktivnosti su honorarno postavljanje kućnih električnih instalacija, sudjelovanje u radu Kulturno umjetničke udruge Suhopolje, sviranje tambure.

Vlastoručni potpis: \_\_\_\_\_