

# Mikromreža vjetroparka

---

**Horvatović, Božidar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:200:029053>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**MIKROMREŽA VJETROPARKA**

**Diplomski rad**

**Božidar Horvatić**

**Osijek, 2019.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
2. VJETROELEKTRANE .....	2
2.1. Karakteristike i tipovi vjetroturbina .....	2
2.1.1. Vjetroturbine sa konstantnom brzinom vrtnje (Tip 1) .....	3
2.1.2. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje u određenom rasponu (Tip 2).....	5
2.1.3. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz djelomičnu elektroničku pretvorbu (Tip 3).....	6
2.1.4. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz potpunu elektroničku pretvorbu (Tip 4).....	7
2.1.5. Tip 5 vjetroturbine.....	8
3. RAZVOJ ELEKTROENERGETSKIH MREŽA.....	10
3.1. Tradicionalna elektroenergetska mreža.....	10
3.2. Aktivna mreža .....	11
3.3. Pametna mreža .....	14
3.4. Mikromreža .....	17
3.4.1. Koncept mikromreža .....	19
3.4.2. Motivacije i izazovi mikromreže.....	20
3.4.3. Rad i upravljanje mikromrežama .....	21
4. PRIMJER OPTIMIZACIJE MIKROMREŽE .....	23
4.1. Model sustava.....	26
4.1.1. Distribucijska mreža.....	26
4.1.2. Mikromreža .....	26
4.1.3. Modeliranje nesigurnosti.....	27
4.2. Formulacija problema .....	28
4.2.1. Funkcija cilja .....	29
4.2.2. Fotonaponski (PV) model.....	31

4.2.3. Model vjetroturbine ( <i>WT</i> ).....	32
4.2.4. Model električnog grijača vode ( <i>EWH</i> ) .....	32
4.2.5. Model zgrade.....	33
4.2.6. Dizel generator ( <i>DG</i> ).....	35
4.2.7. Model sustava za pohranu energije u baterije ( <i>BESS</i> ).....	35
4.2.8. Razmjena snage s distribucijskom mrežom .....	36
4.2.9. Ravnoteža snage .....	36
4.2.10. Vjerojatnost gubitka opterećenja ( <i>LOLP</i> ) .....	37
4.2.11. Blok dijagram modela .....	38
4.3. Simulacija primjera optimizacije mikromreže .....	39
4.3.1 Rezultati simulacije .....	42
5. PRAKTIČNA SIMULACIJA .....	48
5.1. Model mikromreže .....	48
5.2. Podaci o mikromreži .....	49
5.3. Rezultati simulacije .....	53
5.3.1. Rezultati za mrežni način rada mikromreže.....	53
5.3.2. Rezultati za otočni način rada kada bioplinska elektrana regulira napon .....	56
5.3.2. Rezultati za otočni način rada kada bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon .....	58
6. ZAKLJUČAK .....	61
LITERATURA.....	62
SAŽETAK.....	65
ABSTRACT .....	66
ŽIVOTOPIS .....	67

# 1. UVOD

Zbog sve većeg rasta i razvoja društva potražnja za električnom energijom je sve veća što uzrokuje i veće zagađenje okoliša, odnosno porast emisija stakleničkih plinova. Stoga, dosadašnja proizvodnja električne energije koja se uglavnom zasniva na proizvodnji energije iz fosilnih goriva i koja stvara velike emisije ugljičnog dioksida nije dugoročno održiva. Prema tome, potrebno je ulagati u noviju tehnologiju proizvodnje električne energije koja bi smanjila utjecaj na klimatske promjene te koja bi pridonijela razvoju društva i omogućila širi i pouzdaniji pristup energiji. Kao jedno od rješenja za navedene probleme navodi se koncept mikromreže. Mikromreža predstavlja prijelaz između tradicionalnih mreža prema pametnim mrežama. Ona integrira više distribuiranih obnovljivih izvora energije u distribucijsku mrežu te koristi uređaje za pohranu energije. Uglavnom radi spojena sa glavnom mrežom, ali može u slučaju kvara i prekida isporuke iz glavne mreže raditi samostalno čime se povećava pouzdanost opskrbe. Ovaj rad se bavi problematikom mikromreže u kombinaciji s vjetroparkom i to u sljedećoj formi: u drugom poglavlju objašnjeno je od čega se sastoje moderne vjetroelektrane te su koje su karakteristike i tipovi vjetroturbina. Treće poglavlje prikazuje razvoj elektroenergetskih mreža, odnosno u tom su poglavlju opisane tradicionalne mreže, pametne mreže i mikromreže. U četvrtom poglavlju prikazan je primjer optimizacije mikromreže i u petom poglavlju je prikazana praktična simulacija rada mikromreže u kojoj se promatraju tri slučaja: mrežni način rada, otočni pogon mikromreže kada bioplinska elektrana regulira napon i otočni pogon mikromreže kada bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu je potrebno opisati načine izvedbe vjetroparkova i formulirati mikromrežu koja obuhvaća jedan vjetropark. Cilj mikromreže je da u prijenosnu mrežu isporučuje količinu električne energije koja je prodana na dan-unaprijed tržištu. U tu svrhu predložiti i moguću pohranu energije u mikromreži.

## 2. VJETROELEKTRANE

Napomena: Poglavlje 2, kao i potpoglavlja i članci unutar tog poglavlja, nastali su prijevodom i obradom materijala iz literature: IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants [1], str. 1 - 3.

Moderne vjetroelektrane (VE) sastoje se od velikog broja vjetroagregata, kolektorskog sustava, kolektora i/ili interkonekcijske transformatorske stanice koja koristi strojeve dizajnirane za optimizaciju proizvodnje energije koristeći energiju vjetra. Vjetroagregati su se razvili od malih strojeva s izlaznom snagom reda nekoliko kilovata do strojeva izlazne snage reda nekoliko megavata, te od strojeva s ograničenom kontrolom brzine i drugih mogućnosti do strojeva s mogućnošću upravljanja promjenjivom brzinom širokog raspona i sofisticiranom mogućnosti upravljanja koristeći pri tome modernu energetska elektroniku.

Primjena vjetroagregata u modernim vjetroelektranama zahtijeva razumijevanje niza različitih aspekata vezanih za dizajn i sposobnosti primijenjenih strojeva. Ovo poglavlje je namijenjeno da pruži uvid u različite tipove vjetroagregata, s obzirom na klasifikaciju prema tipu stroja i mogućnosti kontrole brzine, kao i u njihove pogonske karakteristike.

Načelo rada vjetroagregata temelji se na dva dobro poznata procesa. Prvi uključuje pretvorbu kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju. To se postiže pomoću aerodinamičnih lopatica rotora i pomoću raznih metodologija za upravljanje mehaničkom snagom. Drugi proces je elektromehanička pretvorba. Mehanička energija dobivena na osovini se u generatoru pretvara u električnu energiju koja se tada prenosi u električnu mrežu.

### 2.1. Karakteristike i tipovi vjetroturbina

Vjetroturbine (engl. *Wind Turbine* - *WT*) se mogu klasificirati s obzirom na mogućnost upravljanja mehaničkom snagom, te se dalje mogu podijeliti s obzirom na upravljanje brzinom. Sve lopatice turbine pretvaraju gibanje zraka u zakretni moment, te se zatim taj moment regulira kako bi se pokušalo „uhvatiti“ što je moguće više energije, ali se pri tome pazi da se spriječi moguća šteta.

Na najvišoj razini turbine se mogu klasificirati ili kao turbine s posebno dizajniranim lopaticama turbine (engl. *stall regulated*) ili kao turbine s regulacijom kuta zakretanja lopatica turbine (engl. *pitch regulated*).

*Stall* regulacija se postiže oblikovanjem lopatica turbine tako da aeroprofil generira manje aerodinamične sile pri velikoj brzini vjetra, čime se smanjuje zakretni moment turbine. Ovaj način regulacije je jednostavan, jeftin i mehanički robustan.

S druge strane *pitch* regulacija se postiže uporabom uređaja za promjenu nagiba lopatica. Kako se brzina vjetra mijenja, lopatica se brzo zakreće na optimalni kut. Na taj način se kontrolira moment kako bi se maksimalno iskoristila energija vjetra ili kako bi se lopatice turbine zaštitile od prejakoga vjetra, ako je potrebno. Neke turbine sada imaju mogućnost zakretanja svake lopatice neovisno kako bi se postigli uravnoteženiji momenti na rotorskoj osovini.

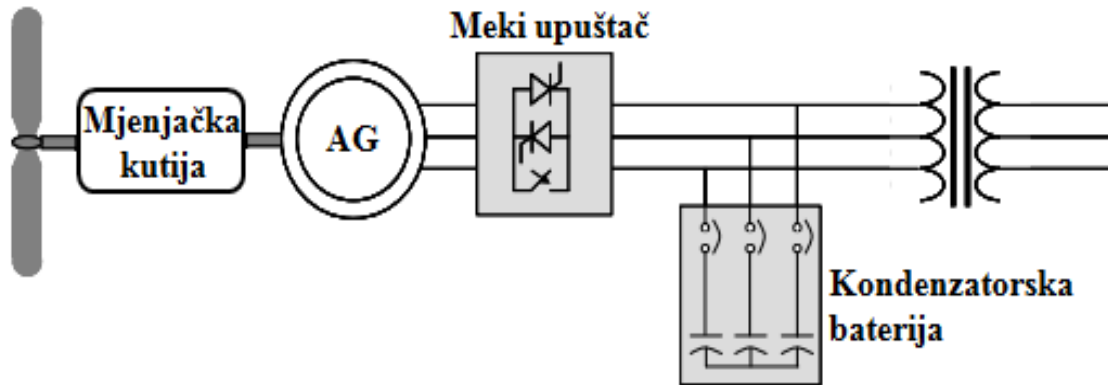
Osim po načinu regulacije mehaničke snage, vjetroturbine se dalje dijele na:

- Vjetroturbine sa konstantnom brzinom vrtnje (Tip 1)
- Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje u određenom rasponu (Tip 2)
- Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz djelomičnu elektroničku pretvorbu (Tip 3)
- Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz potpunu elektroničku pretvorbu (Tip 4)

Različiti tipovi regulacije brzine vrtnje su implementirani putem različitih rotirajućih AC strojeva i uporabom energetske elektronike. Postoji još jedan tip vjetroturbine (Tip 5) kod kojeg mehanički pretvarač momenta, smješten između rotorske spore osovine i generatorske brze osovine, kontrolira brzinu generatora prema električnoj sinkronoj brzini. Stoga ovaj tip vjetroturbine koristi sinkroni stroj koji je direktno spojen na srednje naponsku mrežu.

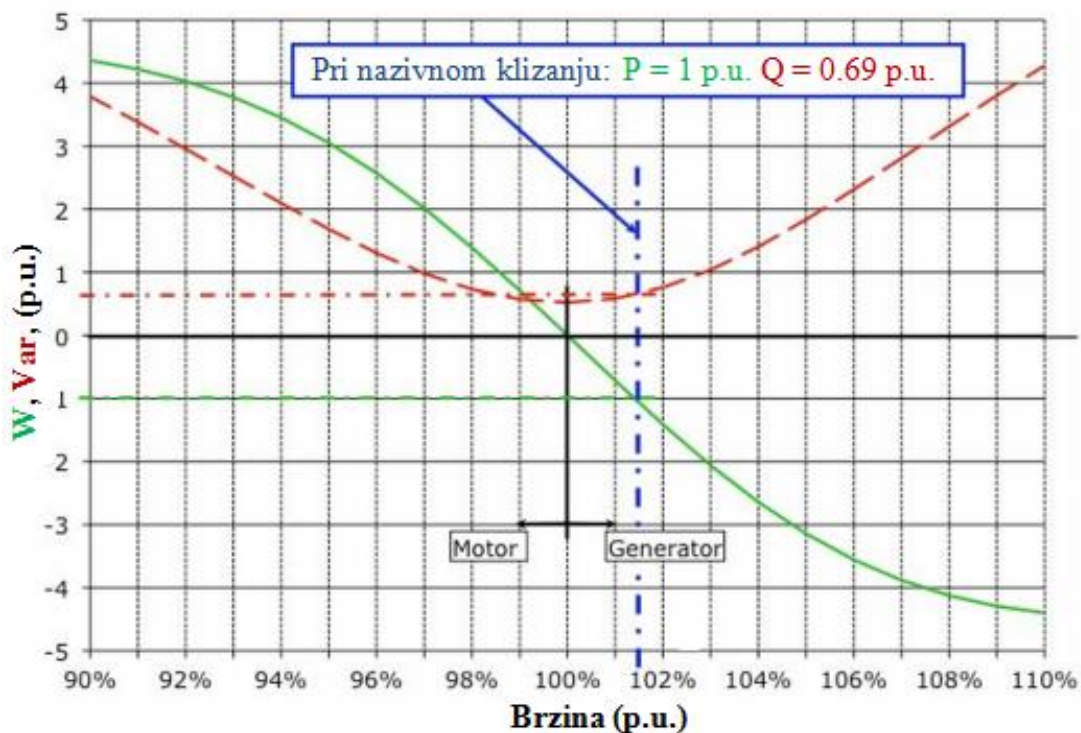
### **2.1.1. Vjetroturbine sa konstantnom brzinom vrtnje (Tip 1)**

Prvi tip vjetroturbine je implementiran sa kaveznim asinkronim generatorom (engl. *SCIG – Squirrel Cage Induction Generator*) i direktno je povezan sa blok transformatorom kao što je prikazano na slici 2.1.



Sl. 2.1. Tipična konfiguracija vjetroturbine tipa 1 [1]

Brzina turbine je konstantna (ili gotovo konstantna) s obzirom na frekvenciju električne mreže, i proizvodi radnu snagu ( $P$ ) kada se osovina turbine vrti brže nego što je frekvencija električne mreže stvarajući negativno klizanje. Slika 2.2. prikazuje tok snage na stezaljkama kaveznog asinkronog generatora.



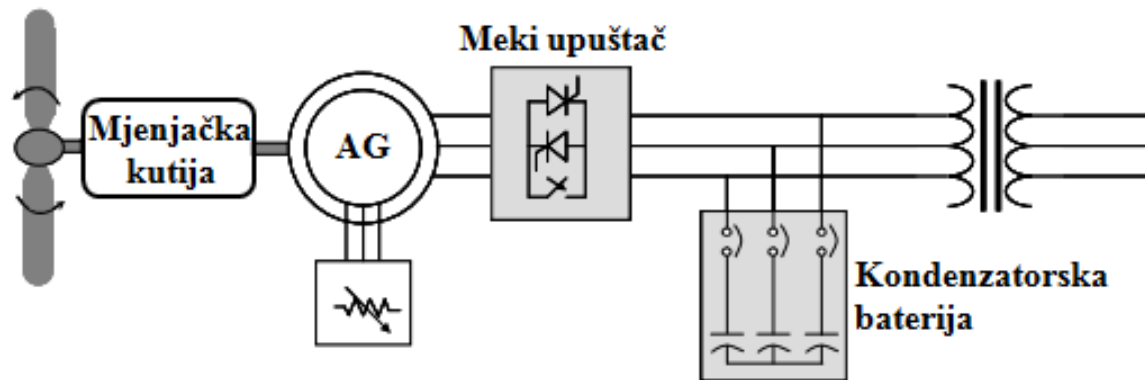
Sl. 2.2. Promjena radne i reaktivne snage kod kaveznog asinkronog generatora [1]

Iako postoje male promjene izlazne snage zbog klizanja stroja, turbine prvog tipa tipično rade pri nazivnoj brzini ili pri brzinama koje su blizu nazivne. Glavni nedostatak asinkronog stroja je reaktivna snaga koju on troši za svoje uzбудno polje i velike struje koje povlači prilikom pokretanja. Kako bi se smanjio utjecaj ovih pojava obično se koristi meki upuštač (engl. *soft starter*) i kondenzatorske baterije unutar turbine.



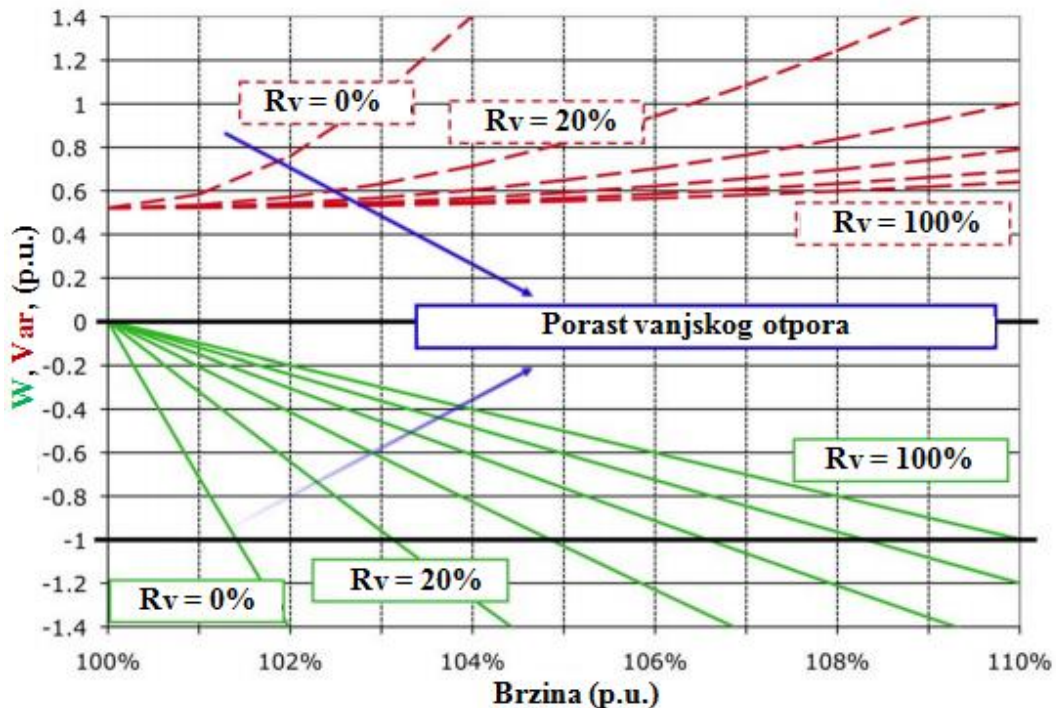
### 2.1.2. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje u određenom rasponu (Tip 2)

Kod vjetroturbina drugog tipa koriste se kliznokolutni asinkroni generatori koji se spajaju direktno na blok transformator vjetroagregata na sličan način kao kod turbina prvog tipa s obzirom na statorski krug strojeva. S obzirom na rotorski krug, ove dvije izvedbe se razlikuju u tome što turbine drugog tipa imaju promjenjive otpornike u rotorskom krugu kao što je prikazano na slici 2.3.



Sl. 2.3. Tipična konfiguracija vjetroturbine tipa 2 [1]

To se može postići pomoću seta otpornika i energetske elektronike koji se nalaze izvan rotora tako da se struja između otpornika i rotora prenosi preko kliznih koluta. Alternativno, otpornici i elektronika se mogu smjestiti na sam rotor čime se eliminira potreba za kliznim kolutima. Takva se izvedba naziva *Weier*-ova izvedba. Promjenjivi otpornici spojeni na rotorski krug mogu prilično brzo regulirati struje rotora. Takva regulacija se koristi kako bi se održala konstanta snaga proizvodnje čak i pri jakim udarima vjetra. Osim toga ti otpornici mogu utjecati na dinamički odziv generatora tijekom poremećaja u mreži. Dodavanjem otpora rotorskom krugu, krivulja radne snage, koja je prikazana na slici 2.2., može se „rastegnuti“ prema većem klizanju i većim brzinama kao što je prikazano na slici 2.4.

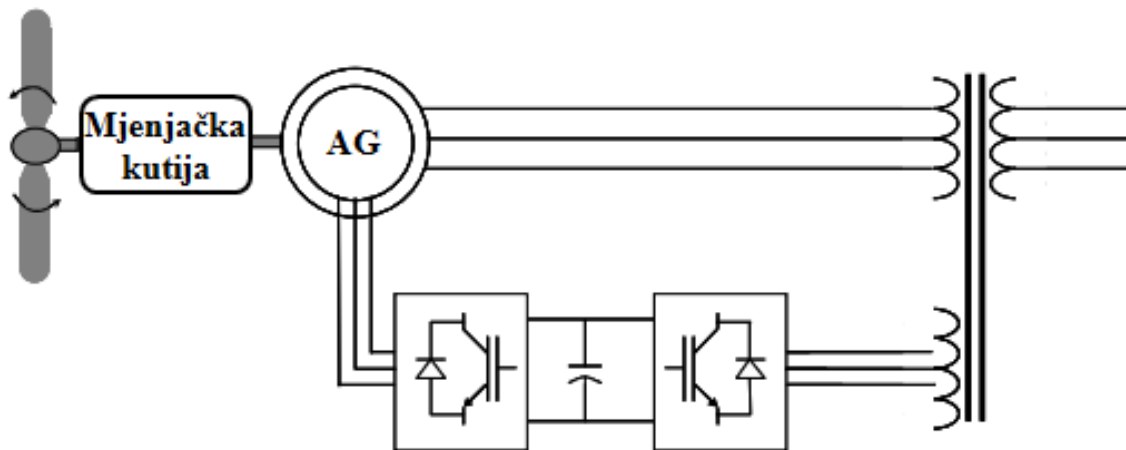


Sl. 2.4. Promjena radne i reaktivne snage pri promjeni vanjskog otpora rotorskog kruga kod vjetroturbine drugog tipa [1]

To znači da bi se turbina morala okretati brže kako bi proizvela istu izlaznu snagu, za dodatni otpor u rotorskom krugu. Na taj način se omogućuje određena sposobnost kontrole brzine koja zajedno s mehanizmom zakretanja lopatica turbine omogućuje da se energija vjetra što bolje iskoristi. Tipično je da su moguće promjene brzine do 10%, ostavljajući određeni stupanj slobode pri iskorištavanju energije vjetra i samozaštitnoj kontroli zakretnog momenta.

### 2.1.3. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz djelomičnu elektroničku pretvorbu (Tip 3)

Vjetroturbina trećeg tipa, poznata kao dvostruko napajani asinkroni generator (engl. *DFIG* – *Doubly Fed Induction Generator*), podiže dizajn turbine drugog tipa na sljedeću razinu dodavanjem promjenjive frekvencije AC uzbuđivanja (umjesto jednostavnog otpora) u rotorski krug. Dodatna uzbuđivanja rotora se dovodi preko kliznih koluta pomoću pretvarača, koji može podesiti iznos i kut struje rotora gotovo trenutno. Pretvarač na rotorskoj strani je spojen s pretvaračem na strani mreže spojem „leđa-o-leđa“ (engl. *back-to-back*), koji izmjenjuje snagu direktno s mrežom kao što je prikazano na slici 2.5.

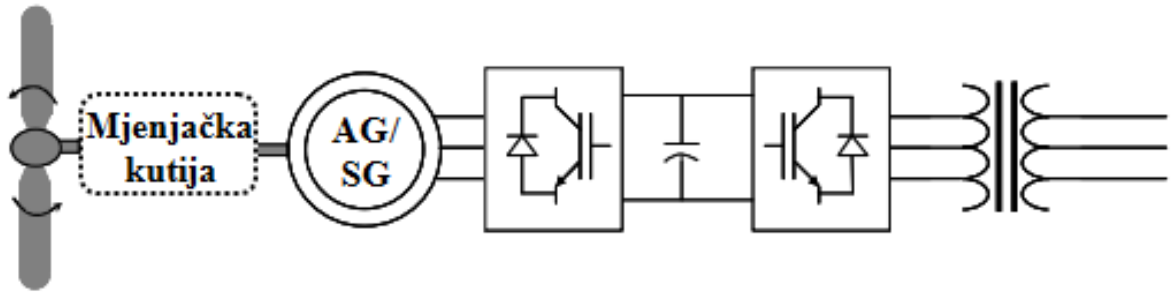


Sl. 2.5. Tipična konfiguracija vjetroturbine tipa 3 [1]

Malom količinom snage injektiranom u rotorski krug može se upravljati velikom količinom snage u statorskom krugu. To je velika prednost dvostruko napajanog asinkronog generatora. Mnogo načina upravljanja izlaznom snagom je dostupno uz skup pretvarača čija snaga iznosi samo 30% nazivne snage generatora. Osim snage koja se prenosi u mrežu sa statora generatora, snaga se prenosi u mrežu i preko pretvarača spojenog na mrežu kada se generator vrti brže od sinkrone brzine. Kada se generator vrti sporije od sinkrone brzine snaga teče iz mreže kroz oba pretvarača i sa rotora prema statoru. Ova dva načina rada, omogućena radom oba pretvarača i njihovim četverokvadrantnim karakteristikama, omogućuju mnogo širi raspon brzina (i iznad i ispod sinkrone brzine do 50%), iako su uži rasponi češći. Najveća prednost dvostrano napajanog asinkronog generatora je mogućnost odvojenog upravljanja radnom i reaktivnom snagom, slično kao i kod tradicionalnih sinkronih generatora, ali pri asinkronom načinu rada. Područje industrijskih pogona proizvelo je i razvilo koncept vektorskog upravljanja asinkronim strojevima. Koristeći takav način upravljanja komponente koje proizvode moment rotorskog toka mogu reagirati dovoljno brzo tako da stroj ostane pod relativnom kontrolom, čak i tijekom značajnih poremećaja u mreži. Iako je treći tip puno skuplji od prvog i drugog tipa, on postaje sve popularniji zbog svojih prednosti.

#### 2.1.4. Vjetroturbine sa promjenjivom brzinom vrtnje uz potpunu elektroničku pretvorbu (Tip 4)

Vjetroturbina četvrtog tipa, prikazana na slici 2.6., nudi mnogo fleksibilnosti u dizajnu i radu jer se izlazna snaga generatora prenosi u mrežu preko frekvencijskog pretvarača spojenog „leđa-oleđa“.

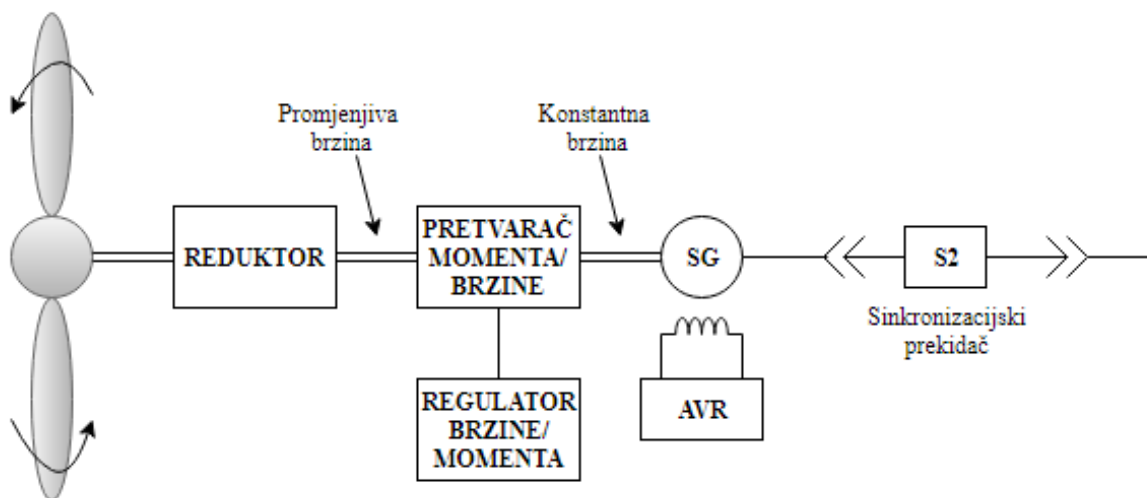


Sl. 2.6. Tipična konfiguracija vjetroturbine tipa 4 [1]

Turbina se može rotirati pri optimalnoj brzini, što rezultira varijabilnom izlaznom snagom generatora. Osim toga, mjenjačka kutija se može ukloniti tako da se stroj vrti pri maloj brzini turbine i proizvodi električnu frekvenciju koja je znatno niža od frekvencije mreže. To nije problem za turbine ovog tipa, jer pretvarači nude mogućnost opskrbe mreže reaktivnom snagom, slično kao STATCOM. Rotirajući strojevi ovoga tipa konstruirani su slično kao konvencionalni generatori koji se nalaze u hidroelektranama s upravljanjem struje uzbude i velikim brojem magnetskih polova, kao sinkroni strojevi s permanentnim magnetima, ili kao kavezni asinkroni strojevi. Međutim, zbog sposobnosti pretvarača da upravlja radnom i reaktivnom snagom može se koristiti bilo koji tip stroja. Napredak uređaja energetske elektronike i upravljanja u zadnjem desetljeću je doveo do toga da su pretvarači danas jako učinkoviti i pouzdani.

### 2.1.5. Tip 5 vjetroturbine

Turbine petog tipa (Sl. 2.7.) sastoje se od tipičnog vjetroagregata s promjenjivom brzinom spojenog na pretvarač momenta/brzine koji je dalje spojen sa sinkronim generatorom.



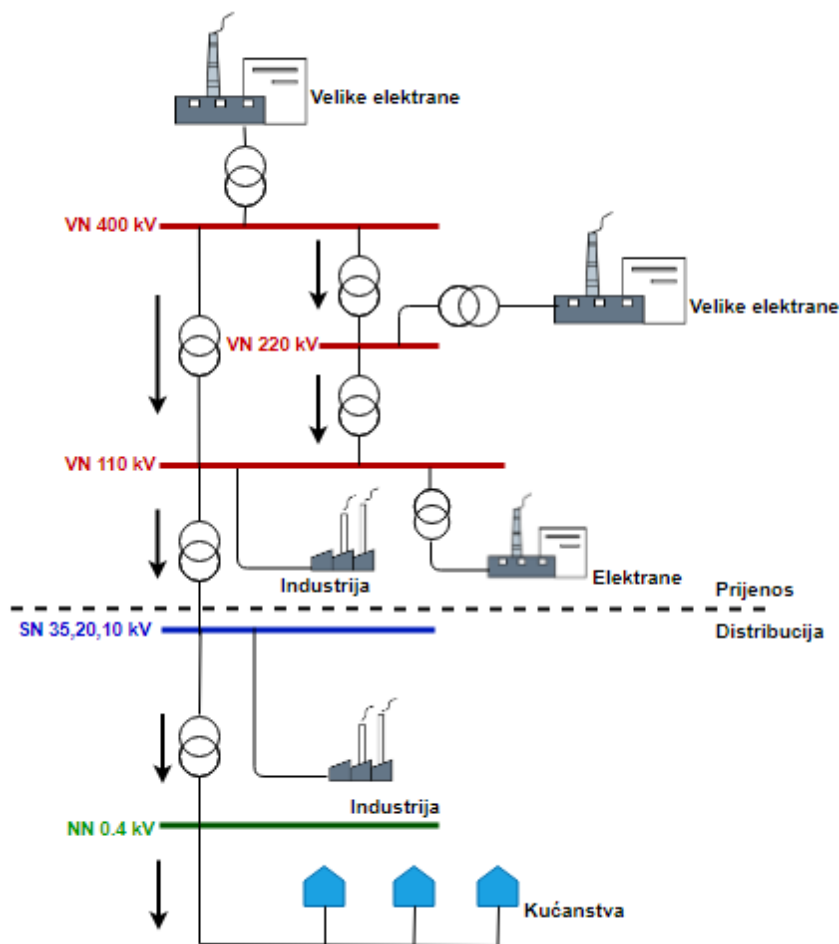
Sl. 2.7. Tipična konfiguracija vjetroturbine tipa 5 [1]

Pretvarač momenta/brzine pretvara promjenjivu brzinu rotorske osovine u konstantnu izlaznu brzinu. Usklađeni sinkroni generator koji se vrti konstantnom brzinom (u skladu s frekvencijom mreže), može biti direktno spojen na mrežu preko sinkronizacijskog prekidača. Sinkroni generator može se prikladno dizajnirati za bilo koju željnu brzinu (tipično su to generatori s 4 ili 6 polova) i napone (obično je to srednji napon za veće kapacitete). Ovakav pristup zahtijeva kontrolu brzine i momenta od pretvarača momenta/brzine zajedno s automatskim regulatorom napona (engl. *AVR-Automatic Voltage Regulator*), sinkronizacijski sustav i sustav zaštite.

### 3. RAZVOJ ELEKTROENERGETSKIH MREŽA

#### 3.1. Tradicionalna elektroenergetska mreža

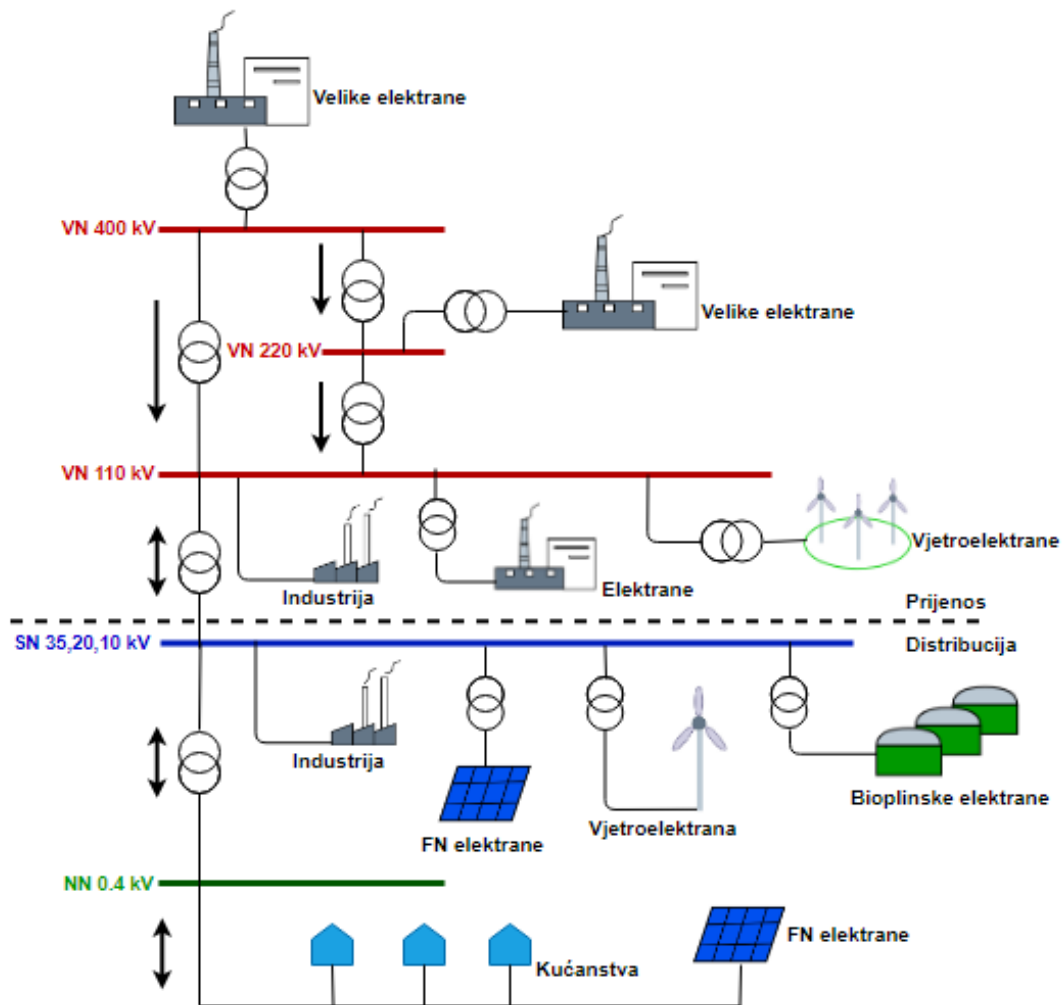
Današnje električne mreže zasnivaju se na tehnologiji koja je bila suvremena prije više od jednog stoljeća. Ove tradicionalne mreže tipično se sastoje od centraliziranih elektrana, prijenosnih i distributivnih vodova. Proizvodnja električne energije kod ovakvih mreža obično je udaljena od potrošačkog područja te se stoga električna energija prenosi pomoću dugačkih prijenosnih vodova. Takve mreže temelje se na proizvodnji iz fosilnih goriva i karakterizira ih prijenos energije u jednom smjeru, odnosno one prenose energiju s prijenosne razine na distribucijsku razinu sa koje se onda energija distribuira prema krajnjim korisnicima. Osim jednosmjernog prijenosa energije ovakve mreže imaju i jednosmjernu komunikaciju između operatora zaduženog za opskrbu električne energije i krajnjih korisnika, odnosno postoji jednosmjerni protok informacija od kupaca do mreže putem električnih brojila. Na slici 3.1. je prikazan primjer tradicionalne elektroenergetske mreže.



Sl. 3.1. Primjer tradicionalne elektroenergetske mreže

## 3.2. Aktivna mreža

Aktivna mreža nastaje kada se u distribucijskom dijelu tradicionalne mreže ugrade proizvodni objekti koji se tada nazivaju distribuirani izvori električne energije. Za razliku od tradicionalne mreže, aktivnu mrežu karakterizira dvosmjerni tok električne energije. Primjer takve mreže je prikazan na slici 3.2.



Sl. 3.2. Primjer aktivne električne mreže

Prema literaturi [2]: „Aktivna distribucijska mreža treba udovoljiti zahtjevima onih potrošača koji svoju potrošnju mogu namiriti vlastitom lokalnom proizvodnjom te višak plasirati u mrežu. U posljednjih nekoliko godina pojavilo se više utjecaja čije je kombiniranje dovelo do povećanog zanimanja za distribuiranu proizvodnju električne energije (DPEE). Utjecaj na okoliš jedan je od značajnih faktora u razmatranju priključenja novih proizvodnih objekata na mrežu. Uz zabrinutost o emisiji štetnih plinova iz elektrana na fosilna goriva, obnovljivi izvori energije (OIE) dobivaju svoju priliku. Na temelju Kyoto protokola mnoge zemlje trebaju smanjiti emisiju

CO<sub>2</sub> kako bi se smanjio utjecaj na klimatske promjene. Stvaraju se programi iskorištavanja obnovljivih izvora koji uključuju vjetroelektrane, male hidroelektrane, fotonaponske izvore, zemni plin, energiju iz otpada te iz biomase. Obnovljivi izvori imaju znatno manju energetska vrijednost u usporedbi s fosilnim gorivima zbog čega su njihove elektrane manje veličine te geografski široko raspodijeljene. Na primjer, vjetroelektrane treba smjestiti u vjetrovitim područjima, dok su elektrane na biomasu obično skromnog kapaciteta zbog troškova transporta goriva relativno male energetske vrijednosti. Te male elektrane priključuju se uglavnom na distribucijsku mrežu.“

Posebne prednosti DPEE su sljedeće [3]:

- a) Postrojenja za DPEE imaju znatno niže investicijske troškove u usporedbi s velikim centraliziranim proizvodnim objektima. Također tehnologije DPEE su danas poznate što omogućuju daljnje snižavanje investicijskih troškova u postrojenje. Troškovi održavanje postrojenja su također znatno niži od održavanja centraliziranih proizvodnih objekata s trendom daljnjeg smanjenja.
- b) Lokacije za instalaciju postrojenja za DPEE u odnosu na velike centralizirane proizvodne sustave lakše je pronaći.
- c) Sve češće subvencije i potpore, osobito u zemljama Europske unije, za ove čiste tehnologije koje su prihvatljive za očuvanje okoliša su značajne kod odluke za investiranje u postrojenje za DPEE.
- d) Prihvaćene državne obveze (primjerice Kyoto protokol) s ciljem smanjenja emisije CO<sub>2</sub> i drugih štetnih plinova daju prednost uporabi čistih tehnologija, to jest obnovljivih izvora energije.
- e) Financijske institucije u razvijenim zemljama ulaze u projekte izgradnje distribuiranih izvora zbog realne isplativosti.
- f) Smještaj postrojenja za DPEE je obično neposredno uz mjesto potrošnje što omogućava pored neznatnih transportnih gubitaka i jednostavno korištenje otpadne topline (za grijanje ili hlađenje).



- g) Visoka učinkovitost koja se postiže u kogeneracijskim postrojenjima smanjuje pogonske troškove.
- h) Sve češća blok izvedba postrojenja za DPEE omogućava brzu instalaciju i puštanje u pogon. Također je znatno kraće vrijeme potrebno za ishođenje potrebnih dozvola.

Osim prednosti, DPEE ima i određene nedostatke [2]:

- a) Trenutno se na distribuirane izvore gleda gotovo isključivo kao na proizvođače energije (kWh) koji ne doprinose ostalim funkcijama elektroenergetskog sustava (regulacija napona, pouzdanost mreže, snaga pričuve...). Iako je to djelomično posljedica tehničkih svojstava distribuiranih izvora, ograničena uloga DPEE najvećim je dijelom stvorena na temelju administrativnih i komercijalnih uvjeta pod kojima su trenutno u pogonu.
- b) Distribuirani izvori, koji za početak nisu dovoljno kompetitivni obzirom na njihove visoke proizvodne troškove, imaju prigodu za probitak samo ukoliko su subvencionirani.
- c) Priključenje vjetroelektrana na distribucijsku mrežu može zahtijevati izvođenje dodatnih pojačanja u dijelovima iste mreže čime se povećavaju investicijski troškovi.
- d) Općenito, povećani udjel distribuiranih izvora uzrokuje pojavu brojnih tehničkih posljedica koje su uočene u različitim zemljama. Posljedice ovise o veličini izgradnje distribuiranih izvora te vrsti korištenih generatora, ali i o strukturi sustava. Na primjer, subvencije za proizvodnju električne energije iz vjetroelektrana u nekim su zemljama uzrokovale povećanje broja instaliranih vjetrotrubina te time i pojavu specijalnih problema u standardnim elektroenergetskim sustavima.
- e) Priključenje distribuiranih izvora koji imaju izravno spojene sinkrone ili asinkrone generatore može doprinijeti povišenju snage kratkog spoja iznad sposobnosti mrežne opreme. Sukladno tome, u slučaju integriranja distribuiranih izvora potrebno je provjeriti snagu kratkog spoja za svaki pojedinačni slučaj priključenja te ukoliko se pokaže neophodnim i zadržati njezin iznos unutar dozvoljenog raspona korištenjem odgovarajućih mjera unutar elektrane ili primjenom ograničivača struje kratkog spoja.

### 3.3. Pametna mreža

Pametna mreža je elektroenergetska mreža koja može inteligentno integrirati akcije svih korisnika povezanih s njom (kao što su generatori, potrošači te oni koji rade oboje) kako bi se učinkovito ostvarili održivi, ekonomični i sigurni izvori električne energije [4].

Pametna mreža koristi inovativne proizvode i usluge zajedno s inteligentnim tehnologijama praćenja, kontrole, komunikacije i samo-oporavka kako bi [4]:

- omogućila mreži da integrira korisnike s novim zahtjevima
- olakšala bolje povezivanje i rad generatora svih veličina i tehnologija
- povećala učinkovitost u radu mreže
- omogućila potrošačima električne energije da sudjeluju u optimizaciji rada sustava
- pružila potrošačima više informacija i izbora na način da osiguraju opskrbu električnom energijom
- poboljšala funkcioniranje tržišta i potrošačke usluge
- značajno smanjila utjecaj ukupnog sustava opskrbe električnom energijom na okoliš
- pružila poboljšane razine pouzdanosti, kvalitete i sigurnosti opskrbe

Prema literaturi [5]: „Pametne mreže su „pametnije“ u odnosu na tradicionalne na dva načina. Prvo, takve mreže omogućuju dvosmjerni protok informacija (putem raznih sučelja) i energije (kroz distribuiranu proizvodnju i pohranu). To se postiže tehnologijama pametnog mjerenja i senzorima koji su instalirani u prijenosnim i distribucijskim mrežama, a povezani su s integriranim komunikacijskim mrežama za prikupljanje i objedinjavanje podataka. Ova sposobnost dvosmjerne komunikacije je temelj funkcioniranja pametnih mreža. Na primjer, kupci mogu proaktivno pratiti i upravljati svojom potrošnjom električne energiju, a mogu čak i prodati višak električne energije proizvedene kod kuće iz obnovljivih izvora. Pametne mreže su također „pametnije“ u smislu da su sposobne integrirati širok raspon izvora energije i usluga za kupce energije (koje se sada zasebno upravljaju u tradicionalnim elektroenergetskim sustavima) u visoko međusobno povezanim elektroenergetskim sustavima. Pametne mreže također integriraju različita sučelja, uključujući sustave kućnog upravljanja energijom (engl. *Home Energy Management Systems - HEMS*), sustave upravljanja energijom u zgradama (engl. *Building Energy Management Systems - BEMS*), i naprednu infrastrukturu mjerenja (engl. *Advanced Metering Infrastructure - AMI*). Pametne mreže mogu koordinirati potrebe i

mogućnosti različitih generatora, operatora mreže, krajnjih korisnika i dionika tržišta električne energije da učinkovito upravljaju svim dijelovima sustava. Sve ove komponente zahtijevaju integraciju pametnih mreža kako bi se postigle razmjerne prednosti i ekonomičnosti.“

Nova pametna mreža biti će sposobna za [6]:

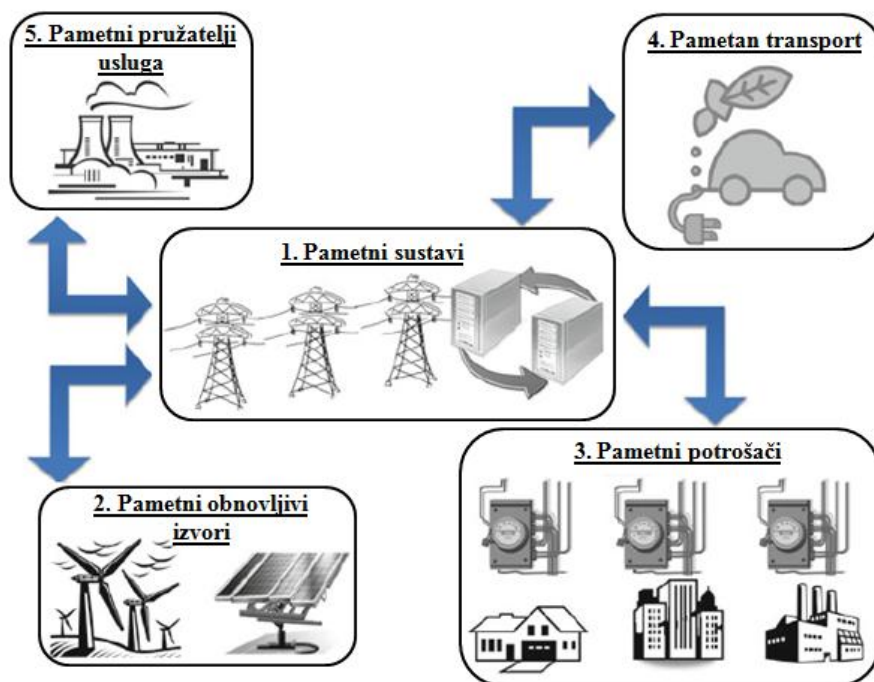
- Rješavanje neizvjesnosti u rasporedu i prijenosu snage po regijama
- Primjenjivanje obnovljivih izvora energije
- Optimiziranje mogućnosti prijenosa prijenosne i distribucijske mreže i zadovoljavanje potražnje za većom kvalitetom i pouzdanošću opskrbe
- Agresivnije upravljanje i rješavanje nepredvidivih događaja i neizvjesnosti u poslovanju i planiranju.

Pametne mreže su složeni sustavi koji mogu pružiti pet glavnih primjena, a to su [5]:

1. Pametni sustavi: pametne mreže mogu poboljšati otpornost na poremećaje, napade i prirodne katastrofe. To se može postići naprednim senzorima i računalnim daljinskim upravljačima. Te sofisticirane komunikacijske tehnologije i automatizacija mogu pomoći u sprečavanju poremećaja, a ne samo reagirati na njih, te stoga ograničiti ispade i gubitke u mreži. Pametne mreže također mogu brže identificirati i riješiti probleme.
2. Pametni obnovljivi izvori energije: pametne mreže mogu imati proizvodnju električne energije iz različitih izvora, uključujući obnovljive izvore energije poput vjetra i fotonaponske solarne energije, kao i druge oblike distribuirane proizvodnje, kao što je kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije u malim razmjerima i skladištenje energije. Smatra se da su pametne mreže od ključne važnosti za uvođenje obnovljivih izvora energije jer se pomoću najsuvremenijih alata za modeliranje i potporu odlučivanju, na primjer, mogu poboljšati prognoze vjetra i analize nepredviđenih događaja, a to može poboljšati integraciju takvih izvora u elektroenergetski sustav.
3. Pametni potrošači: u sustavima pametnih mreža potrošači više nisu pasivni kupci. Pametne mreže mogu informirati i osnažiti potrošače da proaktivno upravljaju svojom potrošnjom. Potrošačima se mogu osigurati uređaji i informacije za upravljanje potrošnjom i smanjenje potražnje kao odgovor na vršno opterećenje. To se može postići

putem pametnih brojila i pametnih uređaja koji su povezani sa senzorima za prikupljanje podataka o potrošnji električne energije, a koji su ključni za dinamičko određivanje cijena i sudjelovanje potrošača u upravljanju potražnjom.

4. Pametni transport: električno vozilo i hibridno električno vozilo mogu imati glavnu ulogu u smanjenju emisija. Pametne mreže mogu bolje upravljati punjenjem vozila, tako da se umjesto povećanja vršnih opterećenja, punjenje može provesti strateški, kada je, na primjer potražnja za električnom energijom niska ili kada je proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora visoka. Dugoročno, pametne mreže mogu koristiti električna vozila kao baterije za pohranu obnovljivih i drugih izvora električne energije za kasniju uporabu.
5. Pametni pružatelji elektroenergetskih usluga: poduzeća za opskrbu neće biti jedini značajni igrači u pametnim mrežama. Pametne mreže stvaraju nova tržišta budući da te tehnologije pogoduju novim proizvodima i energetske uslugama, kao i novim igračima na tržištu. Energetska učinkovitost i inteligentni uređaji, pametna brojila, nove osjetilne i komunikacijske mogućnosti te putnička vozila neki su od primjera tih novih proizvoda. Pametne mreže, stoga, imaju tendenciju da donesu velike promjene na tržištu - one se oslanjaju na brojne treće strane, uključujući pružatelje energetske usluga i posrednike za pružanje temeljnih i dodatnih usluga.



Sl. 3.3. Pet glavnih primjena pametnih mreža [5]

### 3.4. Mikromreža

Mikromreža (engl. *Microgrid* - *MG*) je lokalizirana skupina međusobno povezanih trošila i izvora električne energije koja obično radi spojena i sinkronizirana s tradicionalnom, centraliziranom mrežom, ali se može odvojiti i funkcionirati samostalno, kako joj fizički i/ili ekonomski uvjeti diktiraju [8].

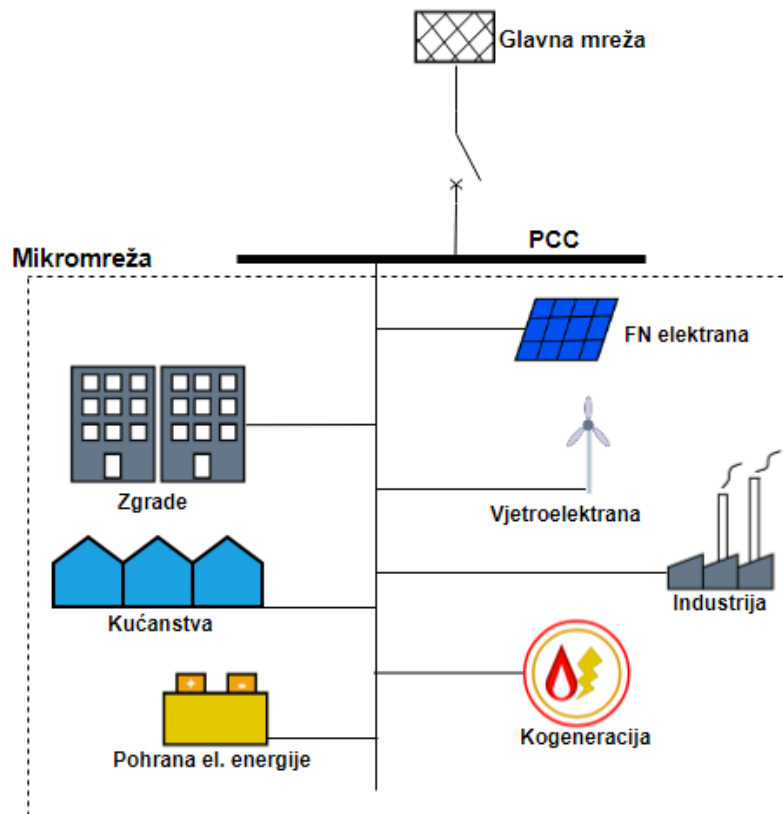
Prema Američkom Odjelu za Energiju definicija mikromreže je sljedeća [8]:

Mikromreža je skupina međusobno povezanih opterećenja i distribuiranih energetske izvora unutar jasno definiranih električnih granica koja djeluje kao jedinstveni upravljivi izvor u odnosu na mrežu. Mikromreža se može spojiti i odvojiti s mreže kako bi se omogućilo da radi u mrežnom ili samostalnom načinu rada.

Prema literaturi [7]: „Mikromreže su možda najperspektivnija, nova mrežna struktura. Organizacija mikromreža temelji se na sposobnostima upravljanja radom mreže u koju se sve više uključuju distribuirani generatori (uključujući mikrogeneratore), kao što su: mikroturbine, gorivne ćelije i fotonaponski izvori, zajedno s uređajima za pohranu, kao što su: zamašnjaci, energetske kondenzatori, baterije i upravljiva trošila (npr. električna vozila), na distribucijskoj razini. Ove mogućnosti upravljanja omogućuju distribucijskim mrežama da rade i kada su izolirane od glavne mreže, u slučaju kvarova ili drugih vanjskih poremećaja ili katastrofa, čime se povećava kvaliteta opskrbe. Sveukupno gledano, provedba upravljanja je ključna značajka koja razlikuje mikromreže od distribucijskih mreže s distribuiranom proizvodnjom.“

Prema literaturi [5]: „Mikromreža se pojavljuje s razvojem distribuirane proizvodnje električne energije i s razvojem distribuiranih obnovljivih izvora energije. Obično se nalazi u niskonaponskim mrežama i spojena je na električnu mrežu preko prekidača. U udaljenim ili izoliranim područjima, mikromreža je alternativni način napajanja koji se može koristiti umjesto instaliranja skupih dalekovoda za velike udaljenosti. Mikromreža kombinira distribuiranu proizvodnju, potrošnju, distribuiranu pohranu energije i kogeneracijska postrojenja kako bi formirala mali elektroenergetski sustav. Taj sustav može raditi spojen na mrežu ili može raditi otočno. Autonoman rad je jedna od značajki mikromreže. Distribuirani obnovljivi izvori energije i male jedinice za proizvodnju čiste energije su glavni izvori proizvodnje energije u mikromrežama. Razvoj mikromreža i distribuirane proizvodnje čiste energije biti će jedno od

rješenja za smanjenje emisija ugljičnog dioksida i globalnog zatopljenja. Mikromreža je prijelazni korak od tradicionalnih elektroenergetskih sustava do pametnih mreža. Upravljanje potrošnjom i upravljanje proizvodnjom u mikromreži moglo bi značajno poboljšati energetske učinkovitost i rad sustava.“



Sl. 3.4. Primjer mikromreže

Prema literaturi [5]: „Mikromreže su obično povezane s glavnom elektroenergetskom mrežom. Imaju dva načina rada: mrežni način rada i otočni način rada. Kada je mikromreža spojena na mrežu, postoji izmjena snage između mikromreže i glavne mreže. Tijekom izvanrednih situacija ili drugih uvjeta, mikromreža je odvojena od glavne mreže i radi samostalno kao otočni pogon. U udaljenom/neovisnom području, mikromreža je obećavajuća praksa za opskrbu kupaca električnom energijom i može najbolje iskoristiti raspršenu obnovljivu energiju. Tipične mikromreže obično povezuju opterećenja i generatore u udaljenom ili neovisnom području kao na primjer: u selu, sveučilišnom kampusu i u stambenim područjima. Kogeneracijska proizvodnja je obećavajuća tehnologija u mikromreži. Ukupna električna učinkovitost i toplinska učinkovitost kogeneracije je vrlo visoka, jer ona može iskoristiti otpadnu toplinu koja nastaje pri proizvodnji električne energije za grijanje kućanstva. Distribuirani uređaji za pohranu energije, kao što su baterije, ultra kondenzatori i zamašnjaci, također su vrlo važne komponente mikromreža. Uređaji za skladištenje energije mogu se koordinirati s obnovljivim izvorima

energije kao što su vjetroturbine i fotonaponski paneli. Takvi uređaji mogu skladištiti energiju kada je potražnja za električnom energijom niska, odnosno kada ima dosta vjetra ili sunca, a mogu i davati energiju kada je potražnja visoka, odnosno kada nema dovoljno vjetra ili sunca. Budućnost mikromreža jest da služe kao upravljive komponente u distribucijskom sustavu. Kontroliranjem skladištenja distribuirane energije, kogeneracijskih postrojenja i malih plinskih turbina, mikromreža bi trebala biti u mogućnosti optimizirati potrošnju energije i poboljšati učinkovitost korištenja obnovljive energije, te time smanjiti emisije ugljika. U pametnoj mreži, mikromreža će imati važnu ulogu u odgovoru na potražnju i mogla bi značajno oblikovati vrhunac potražnje te smanjiti potrebne kapacitete vršnih generatora čija se proizvodnja obično zasniva na bazi fosilnih goriva.“

### **3.4.1. Koncept mikromreža**

Napomena: članak 3.4.1. diplomskog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, Smart Grid Applications and Developments [5], str. 78 - 79.

Koncept mikromreže je grupirati distribuirane izvore energije i potrošače tako da oni mogu djelovati kao jedan generator priključen na električnu mrežu preko priključne točke. Strategije upravljanja i tehnika razvijene su za mikromrežu na način da ona ima što manji utjecaj na postojeću infrastrukturu i na trenutne načine rada sustava.

Mikromreža može biti povezana s glavnom elektroenergetskom mrežom ili može raditi kao otočni sustav.

Otočna mikromreža je definirana kao ona mreža koja nema priključnih točaka s glavnom mrežom. Takva vrsta mikromreže obično se nalazi u udaljenim ruralnim područjima ili na otocima. Ta se područja mogu opskrbljivati značajnom proizvodnjom čiste energije uz dobru strategiju upravljanja potrošnjom. S tog aspekta, mikromreža je nova metoda napajanja udaljenih područja, čime se eliminira potreba instaliranja prijenosnih dalekovoda do tih područja jer takvi dalekovodi nisu ekonomični ako je potražnja za električnom energijom mala i ako je broj korisnika mali.

Mikromreža spojena na glavnu mrežu predstavlja prijelaz sa tradicionalnog elektroenergetskog sustava na pametnu mrežu prilagođujući se tako rastućoj distribuiranoj proizvodnji. Ova vrsta mikromreža grupira niz AC generatora, proizvodnje iz obnovljivih izvora i potrošača. Ako je ukupna proizvodnja energije iz generatora veća od ukupnog opterećenja u mikromreži, višak snage se može vratiti u električnu mrežu kroz točku zajedničkog povezivanja (engl. *Point Of Common Coupling - PCC*). S druge strane, ako proizvodnja u mikromreži nije dovoljna za opskrbu potrošača, tada će mikromreža povući električnu energiju iz glavne mreže putem PCC-a.

Strategije upravljanja su ključne tehnike za mikromrežu da upravlja potrošnjom, punjenjem i pražnjenjem baterija i preklapanjem između rada s mrežom i otočnog načina rada. Sustav upravljanja energijom mikromreže treba optimizirati i kontrolirati punjenje i pražnjenje baterije na temelju stanja punjenja kako bi se nadoknadila promjenjiva proizvodnja iz obnovljivih izvora. Još jedna važna funkcija mikromreža je dinamička kontrola opterećenja, koja je ujedno i ključna tehnologija za odgovor na potražnju i za primjene pametnih brojila u pametnoj mreži. Glavna značajka mikromreže spojene s glavnom mrežom je njezina sposobnost odvajanja sustava od glavne mreže za vrijeme izvanrednih događaja i njezina sposobnost ponovnog spajanja na glavnu mrežu autonomno. Prebacivanje između otočnog rada i rada povezanog na glavnu mrežu obično se postiže pomoću dvosmjernog releja na PCC-u.

### **3.4.2. Motivacije i izazovi mikromreže**

Napomena: članak 3.4.2. diplomskog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, *Smart Grid Applications and Developments* [5], str. 80.

Prednosti mikromreža procjenjuju se iz različitih aspekata. Usvajanjem distribuirane obnovljive energije za opskrbu električnom energijom, mikromreže imaju značajan učinak na smanjenje emisija stakleničkih plinova i na druga pitanja vezana za zaštitu okoliša. Međutim, postoje značajni izazovi u postavljanju mikro energetskih sustava u postojećoj električnoj mreži. Izazovi su posljedica integracije novih tehnologija, nove regulacije te usklađenosti s međunarodnim standardima. Unatoč tim izazovima, mikromreže su postavljene diljem svijeta. Emisije i zaštita okoliša nisu jedini poticaj za razvoj mikromreža. Druge motivacije su da operatori opskrbe mogu odgoditi instalaciju novih proizvodnih kapaciteta i nadogradnju prijenosnih kapaciteta spajanjem distribuiranih energetskih resursa. Neki vlasnici mikromreža imaju slične financijske poticaje za



razvoj mikromreža umjesto instaliranja novih linijskih kapaciteta u glavnu mrežu. U području mikromreža, teme o kojima se najviše raspravljaju uključuju: strategije upravljanja, pitanja pouzdanosti i kvalitete energije, otočni rad, dizajn mikromreže i odgovor na potražnju.

### **3.4.3. Rad i upravljanje mikromrežama**

Napomena: članak 3.4.3. diplomskog rada nastao je prijevodom i obradom materijala iz literature: D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, Smart Grid Applications and Developments [5], str. 80 - 81.

Mikromreže se mogu podijeliti u dvije kategorije:

1. Izolirane mikromreže, koje djeluju neovisno i obično nisu povezane s glavnom mrežom
2. Mrežne mikromreže, koje su obično povezane s glavnom mrežom te imaju razmjenu snage s njom.

Mikromreže prve kategorije obično se nalaze u izoliranim, udaljenim područjima. Sustav je sam po sebi poput neovisno upravljanog elektroenergetskog sustava. Tehnički zahtjevi su isti. Međutim, takve mikromreže imaju više povremenih obnovljivih izvora energije. Regulacija frekvencije i regulacija napona važni su za pouzdan rad mikromreža. Izolirane mikromreže obično su opremljene s uređajima za skladištenje energije koji kompenziraju promjene u proizvodnji i poremećaje u sustavu.

Za mikromreže druge kategorije, glavna mreža zapravo predstavlja glavno napajanje. Iz perspektive operatora sustava električne mreže, mikromreža radi kao predvidljivo opterećenje (proizvodnja niža od potražnje) ili kao upravljivi generator (proizvodnja veća od potražnje). Mikromreža druge kategorije obično ima veću pouzdanost od izolirane mikromreže zbog njezine povezanosti s glavnom elektroenergetskom mrežom, koja može uvoziti ili izvoziti energiju iz ili u mikromrežu. Lokalni kupci mrežne mikromreže mogu se opskrbljivati od strane distribuiranih izvora smještenih u mikromreži, ako se napajanje iz glavne mreže izgubi ili ako postoji neki kvar.

Mrežne mikromreže imaju dva osnovna načina rada:

- Mrežni način rada
- Otočni način rada

U mrežnom načinu rada, prekidač na mjestu spajanja je zatvoren. Mikromreža je spojena i ponaša se kao dio glavne mreže. Zbog distribuirane proizvodnje postoji protok snage od mikromreže prema glavnoj mreži. U mrežnom načinu rada, potrebne su sljedeće informacije o radu sustava: izlazne snage generatora, potrošnja, naponi i stanja zaštitnih releja. Te informacije služe kao kontrolni parametri za planiranje prijelaza na otočni način rada. U otočnom načinu rada, neka se opterećenja mogu isključiti kako bi se osiguralo napajanje za važna trošila. Da bi se balansiralo opterećenje s ograničenim izvorima proizvodnje, potrebno je rasterećenje i upravljanje opterećenjem. Za ponovno spajanje mikromreže sa glavnom mrežom, frekvencija, naponi i fazni kutovi moraju biti unutra granica i sinkronizirani s mrežom.

U mikromreži je važno da se proizvođački izvor može fleksibilno dodati, ukloniti ili prilagoditi. Upravljanje mikromrežom bi trebalo biti fleksibilno. Za vrijeme kvara u glavnoj mreži, očekuje se da će mikromreža biti odvojena od sustava. Kada se otkrije kvar, komponente mikromreže trebaju biti koordinirane kako bi se poduzele mjere. U ovom trenutku, sve upravljačke sheme moraju biti u mogućnosti podržavati različite načine rada, a neka se opterećenja isključuju kako bi potrošnja odgovarala postojećem kapacitetu napajanja. Nakon što se kvar u glavnoj mreži ukloni, mikromreža bi trebala moći povratiti svoju vezu s glavnom mrežom i vratiti se u normalan mrežni način rada.

Rad i upravljanje mikromrežom može se razlikovati od tradicionalnog elektroenergetskog sustava. Sa strane kupca, to je prijelazno stanje s konvencionalnog sustava na pametnu mrežu. Odgovor na potražnju i upravljanje potražnjom prva su faza pametne mreže. Uz ekonomske poticaje i odgovarajuće strategije upravljanja, mikromreže bi mogle sudjelovati kao komponenta pametne mreže kako bi prilagodile svoje performanse te kako bi poboljšale energetske i ekonomsku učinkovitost.

## 4. PRIMJER OPTIMIZACIJE MIKROMREŽE

Napomena: poglavlje 4. diplomskog rada nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature: A. A. Bashir, M. Pourakbari-Kasmaei, J. Contreras, M. Lehtonen, A novel energy scheduling framework for reliable and economic operation of islanded and grid-connected microgrids, Electric Power Systems Research [9], str. 85 - 96.

U radu iz prethodno navedene literature predlaže se novi okvir za upravljanje energijom kombinirajući proaktivne i reaktivne pristupe za učinkovito rješavanje neizvjesnosti povezanih s proizvodnjom i potražnjom u otočnom i međusobno povezanom radu mikromreža. Mikromreža razmatra OIE, dizel generator (engl. *Diesel Generator - DG*) i uređaj za pohranu s mogućnošću razmjene snage s mrežom. Predložena formulacija je izrađena kao stohastički model mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *Mixed Integer Linear Programming - MILP*) s metodom „ponavljajućeg horizonta“ (engl. *Rolling Horizon - RH*) od 24 sata, koja se periodička simulira ažuriranjem ulaznih podataka i napredovanjem na satnoj osnovi za razdoblje od jedne godine. Cilj je smanjiti ukupne troškove mikromreže uz očuvanje prioriteta komfora pojedinih kućanstava. Energetska ravnoteža je omogućena pomoću pametnog središnjeg sustava upravljanja grijanjem, ventilacijom, klimatizacijom i električnim grijačima vode u kombinaciji s iskorištavanjem toplinske inercije zgrada koje su dobro izolirane. Prikazani su opsežni numerički rezultati kako bi se otkrile koristi dobivene koordinacijom upravljanja potrošnjom (engl. *Demand Response - DR*) i izvora opskrbe za praktični slučaj Helsinki, Finska. Naposljetku, istražuje se utjecaj različitih parametara sustava na optimalne očekivane troškove mikromreže te su istraženi indikatori rizika.

Stalno rastuća zabrinutost o štetnim utjecajima proizvodnje električne energije na bazi fosilnih goriva, nepredvidljivost i neizvjesnosti cijena električne energije, kao i kontinuirani rast potražnje, rezultirali su povećanim interesom i korištenjem visokih razina OIE širom svijeta [10].

Stoga, skladišni objekti i konvencionalni izvori kao rezerva igraju značajnu ulogu u podržavanju rada sustava [11]. Integracija i kontrola takvih komponenti zajedno s kontroliranim i fiksnim opterećenjima na razini niskog napona čine mrežu, mikromrežu, koja se može upravljati ili u otočnom ili mrežnom načinu rada [11].

Koncept mikromreže je prirodno skrojen tako da ujedinjuje OIE koji kompenziraju troškove konvencionalne proizvodnje. Međutim, integracija OIE u elektroenergetski sustav predstavlja izazov zbog promjenjive prirode i nestabilnosti takvih izvora energije. Pogreške predviđanja povezane s proizvodnjom i potražnjom električne energije dodatno stvaraju poteškoće operateru distribucijskog sustava pri upravljanju u stvarnom vremenu. Situacija postaje još gora u slučaju otočnog rada kada je vrijednost izgubljenog opterećenja (engl. *Value of Lost Load - VLL*) visoka, uglavnom zbog nedostatka razmatranja nesigurnosti. Stoga, da bi se dobila pouzdana mikromreža, potrebna je fleksibilna strana potražnje koja se može aktivirati opcijama *DR*-a.

*DR* ima tendenciju da upotpuni promjenjivu proizvodnju iz OIE. Smatra se da je to svestrani alat koji, ovisno o profilu sustava, djeluje tako da popuni praznine u opskrbi potražnjom [12]. Potrošači *DR*-a uglavnom uključuju električne grijače vode (engl. *Electric Water Heater - EWH*), grijanje, ventilaciju i klimatizaciju (engl. *Heating, Ventilation and Air-Conditioning - HVAC*), sušilice, električna vozila te električne i toplinske uređaje za pohranu energije.

U ovom radu se proučava fleksibilnost koju nude *HVAC* i *EWH* trošila dok se iskorištavaju toplinske mase zgrada, kako bi se uskladilo opterećenje s promjenjivim profilom OIE i kako bi se riješile nesigurnosti u postavkama mikromreža. Temeljni razlog za odabir tih trošila je njihov najveći doprinos u godišnjem profilu potrošnje energije zemalja nordijske regije, na primjer u Finskoj zbog dugih zima udio trošila za grijanja prostora iznosi oko 70% godišnje potražnje kućanstava [13].

Ideja koja stoji iza *HVAC* odgovora je da korisnici obično toleriraju malo odstupanje od željene unutarnje temperature. Zbog visoke termičke vremenske konstante dobro izoliranih zgrada u nordijskoj regiji, *HVAC* opterećenja mogu se planirati za prethodno grijanje ili prethodno hlađenje zgrada kako bi se nosili s promjenjivom prirodom obnovljivih izvora ili kako bi se zaštitili od naglih promjena cijena uz poštivanje komfora krajnjeg korisnika. Na taj način, zgrade djeluju kao mali spremnik za pohranu, zahvaljujući toplinskoj inerciji zgrade. Slično tomu, *EWH* je još jedan potencijalni kandidat za *DR* i predstavlja se kao neophodan element za uporabu tople vode u kućanstvu (engl. *Domestic Hot Water - DHW*). To je druga najveća potrošnja energije uz *HVAC*. *DHW* odražava veću fleksibilnost, na primjer prema finskom građevinskom propisu, maksimalna temperaturna granica je 65 °C, odnosno minimalna 55 °C.

Štoviše, istodobno generiranje i planiranje potražnje u mikromreži nedavno je privuklo veliku pozornost istraživanja, jer bi to pružilo dodatni stupanj slobode mrežnom operateru. Razvijeno je

nekoliko modela kako bi se operativni troškovi sveli na najmanju moguću mjeru ili kako bi se maksimizirao prihod mikromreža uzimajući u obzir *DR* i sudjelovanje na tržištima električne energije kao proizvođač i kao potrošač (engl. *prosumer*). Bitnu ulogu pri predviđanju ima *RH* metoda koja predstavlja reaktivni pristup modeliranja nesigurnosti, odnosno to je iterativna metoda koja pretpostavlja da su informacije unutar određenog vremenskog okvira točne. Ulazni parametri se periodički ažuriraju putem povratnih informacija za optimizaciju. Varijable odluke donose se samo za horizont kontrole koji je kraći od horizonta predviđanja.

Glavni doprinosi ovog primjera su sljedeći:

- Predlaže se opsežan okvir za raspoređivanje energije pri otočnom i mrežnom radu mikromreža koje temelje svoju proizvodnju na OIE koji uključuje dvosmjernu razmjenu snage sa mrežnim subjektom prema cijenama na dan unaprijed tržištu, što je česta praksa u nordijskim zemljama. Predložena metoda je nova u tome što se nesigurnosti rješavaju u okviru istovremenih proaktivnih i reaktivnih pristupa, dok se zajednički ispituje fleksibilnost *HVAC* jedinica, *EWH* jedinica, toplinske mase zgrada i sustava za pohranu energije u baterije (*Battery Energy Storage System - BESS*) kroz centralni sustav upravljanja energijom (*Energy Management System - EMS*).
- Predloženi model formuliran je kao stohastički mješoviti cjelobrojni linearni program (*MILP*) s ciljem minimiziranja operativnih troškova mikromreže uz očuvanje razine komfora kućanstava. Model se iterativno simulira za svaki 24-satni *RH* tijekom jednogodišnjeg razdoblja. Stoga ovaj model uzima u obzir sve simulacijske uvjete uključujući i one najekstremnije. Izračunavaju se indeksi rizika kako bi se usporedili rezultati simulacija različitih slučajeva te odredila korist od međusobnog povezivanja mreže. Provodi se i opsežna analiza osjetljivosti kako bi se odredio snažan učinak različitih parametara dizajna na varijable odluke.
- Aspekti pouzdanosti razmatraju se u *RH* na takav način da se status dostupnosti povezan samo s prvim satom otkriva agregatoru na početku svakog *RH*. Status različitih komponenti za preostali horizont (sat 2–24) ostaje isti kao u prvom satu. Statusi se zatim periodički ažuriraju u skladu s *Monte Carlo (MC)* simulacijom u svakom horizontu, čime se špekulira praktični slučaj.

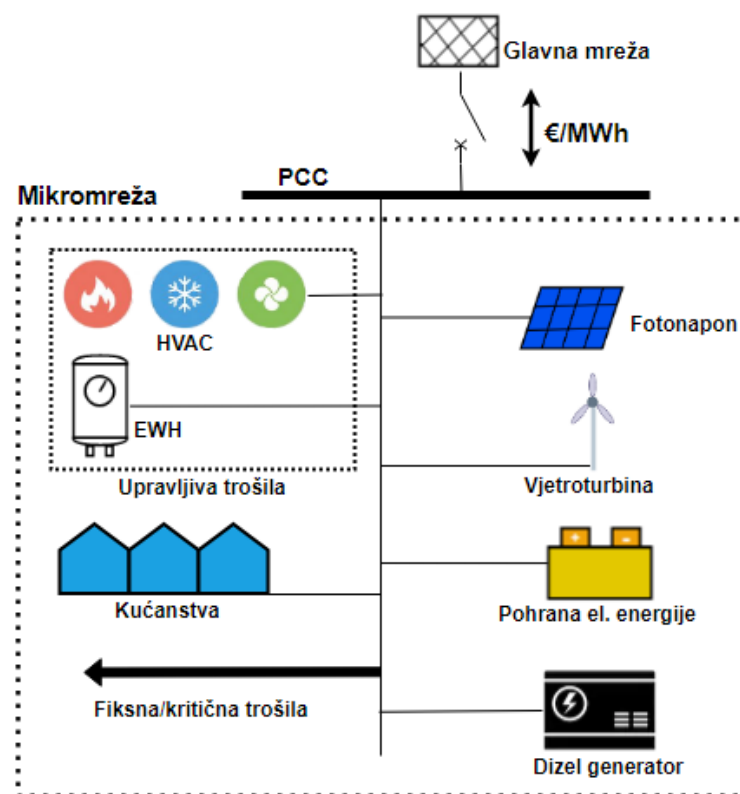
## 4.1. Model sustava

### 4.1.1. Distribucijska mreža

U gradskom području Helsinkija postoje trgovci električnom energijom koji nude bilateralne ugovore za dvosmjernu razmjenu električne energije. Nadalje, postoje različite opcije za tarife/ugovore o električnoj energiji, a kupac može slobodno birati između njih. U ovom radu razmatra se bilateralni ugovor trenutnih cijena (engl. *spot price*), koji se temelji na trenutnim cijenama na tržištu električne energije *Nord Pool*-a. *Nord Pool* javno objavljuje cijene po satu svaki dan u podne, a te cijene vrijede do sljedećeg dana. Prema ovom ugovoru, *prosumer* će platiti svoju potrošnju energije prema trenutnoj, *spot* cijeni, dok će ona podlijevati porezu na dodanu vrijednost (PDV) od 24%. Štoviše, postoji fiksna premija za uvoženje električne energije. Isto tako, malotrgovci osiguravaju naknadu za višak električne energije koju proizvodi *prosumer*. Trgovac na malo kupuje višak energije po *spot* cijeni, ali odbija malu proviziju.

### 4.1.2. Mikromreža

Ovaj rad modelira mikromrežu kao što je prikazano na slici 4.1.

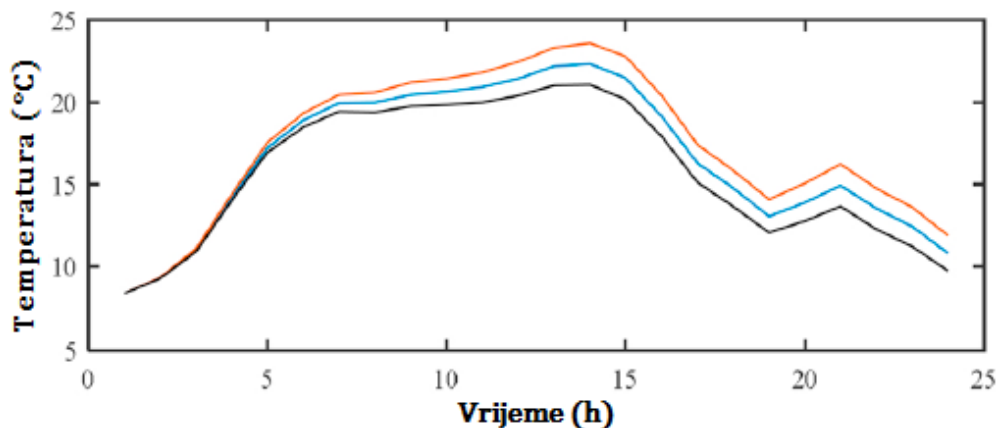


Sl. 4.1. Model mikromreže

Mikromreža se sastoji od fotonaponskog (engl. *Photo Voltaic - PV*) sustava, vjetroturbine (engl. *Wind Turbine - WT*), rezervnog *DG*-a, *BESS*-a i raznih kućanstava opremljenih pojedinačnim *HVAC* i *EWH* sustavima. Sva ostala opterećenja osim *HVAC* i *EWH* smatraju se kritičnim. Operativni ciklus kućanskih fleksibilnih trošila kontrolira agregator putem centraliziranog sustava upravljanja energijom koji je spojen s pojedinačnim kućanstvima putem kućnog *EMS*-a. Stoga agregator poznaje preferencije komfora pojedinih kućanstava. Agregator posjeduje i planira pohranu i sve izvore opskrbe u mikromreži koja je povezana s distribucijskom mrežom i sposobna za razmjenu snage. U otočnom načinu rada, agregator mikromreže upravlja radom sustava optimiziranjem rada distribuirane proizvodnje i *BESS*-a, dok u mrežnom načinu rada mikromreža radi kao proizvođač i kao potrošač, odnosno kao *prosumer*.

#### 4.1.3. Modeliranje nesigurnosti

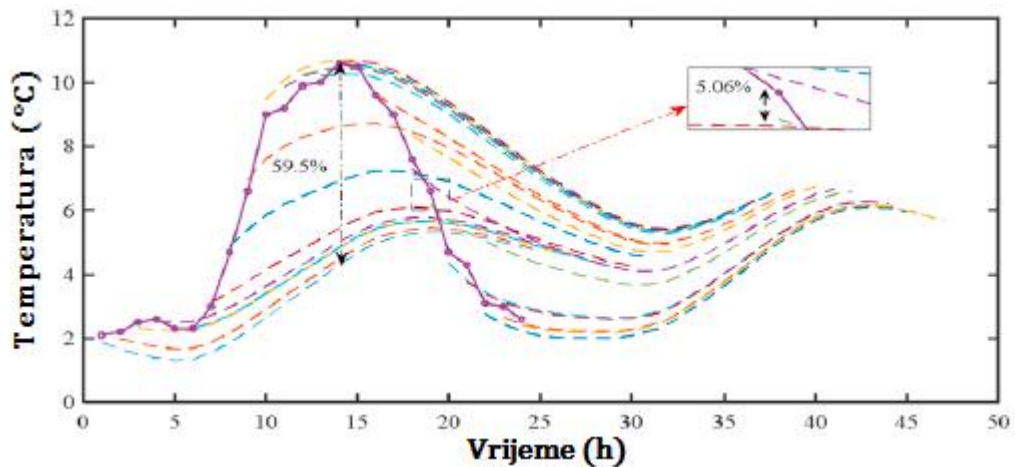
Glavni izvori nesigurnosti u mikromreži su ulazni parametri, a to su brzina vjetra, solarna iradijacija i vanjska temperatura. Ovi parametri direktno utječu na proizvodnju OIE i na rad *HVAC* trošila koji ovisi o vanjskoj temperaturi. Kako bi se modelirala nesigurnost, diskretni scenariji (proaktivni pristup) i *RH* (reaktivni pristup) razmatraju se u optimizacijskom problemu. Generiraju se tri jednako vjerojatna scenarija za svaki ulazni parametar kako bi se obuhvatila nesigurnost proaktivnog pristupa. Scenariji su konstruirani tako da se odstupanja među pojedinačnim scenarijima linearno povećavaju pri predviđanju od 24 h, a na kraju se postavlja odstupanje od 10%, kao što je prikazano na slici 4.2.



Sl. 4.2. Primjer scenarija temperature po satima u optimizacijskom horizontu [14]

Nadalje, koristi se *RH* metoda koja objašnjava akumulaciju pogreške u horizontu predviđanja. Općenito, pogreška predviđanja eksponencijalno raste kroz horizont predviđanja. Prema tome,

prognoza koja odgovara kasnijim satima unutar horizonta temelji se na netočnim informacijama. Na slici 4.3. prikazano je kako učinkovitost prognoze  $RH$  smanjuje pogrešku.



Sl. 4.3.  $RH$  prognoza temperature za proljetni dan [9]

Radi ilustracije, razmatra se period od 48 sati. Na slici, kontinuirana crta pokazuje stvarne vrijednosti temperature, dok isprekidane linije predstavljaju prognoze dobivene u svakom satu za sljedeća 24 sata. U slučaju klasične prognoze, kada se prognoza za sljedeća 24 sata obavlja od prvog sata, pogreška se može drastično povećati kako vrijeme prođe. U tom slučaju javlja se maksimalna pogreška u 14-om satu s odstupanjem od stvarne vrijednosti od 59.5%. S druge strane, najveća greška u prognoziranju korištenjem  $RH$  metode iznosi 5 % i pojavljuje se u 19-om satu, što je zanemarivo u usporedbi s klasičnim pristupom prognoziranja. Također je vidljivo da pri korištenju  $RH$  metode, prognoza koja odgovara prvim satima najtočnija te u nekim slučajevima odgovara stvarnoj vrijednosti što potvrđuje učinkovitost ove metodologije.

## 4.2. Formulacija problema

Predložena formulacija oslanja se na istodobno planiranje proizvodnje i potrošnje mikromreže uz razmatranje povratnih informacija metode  $RH$ , stohastičnosti i slučajnih ispada. Pristup također podrazumijeva  $DR$  za kontinuirano djelovanje fleksibilnih opterećenja i skladištenja električne energije, uz mogućnost razmjene snage s distribucijskom mrežom. Ulazni podaci uključuju vremenske prognoze, termalne preferencije krajnjih korisnika, dan unaprijed cijene, početno stanje napunjenosti baterije (engl. *State Of Charge* -  $SOC$ ) i početni status obveze jedinice distribuirane proizvodnje zajedno sa statusom dostupnosti komponenti. Optimalne varijable odlučivanja uključuju očekivane razine snage  $HVAC$  i  $EWH$  jedinica, sobne temperature u zatvorenom prostoru, temperature mase zgrade, temperature  $DHW$ -a, snage punjenja / pražnjenja



*BESS*-a, smanjene energije, izlaznu snagu iz *DG*-a i razmjenu snage s distribucijskom mrežom u svakom satu i za svaki scenarij.

#### 4.2.1. Funkcija cilja

Cilj agregatora mikromreže je minimiziranje ukupnih operativnih troškova u svakom 24-satnom horizontu u svim scenarijima uz zadovoljenje ograničenja potražnje i ponude. Prikazuje se kako slijedi:

$$\begin{aligned} \min \sum_{s \in S} \rho_s \left[ \sum_{h \in H} \left\{ (SU_{s,h} + SD_{s,h} + C(P_{s,h}^g)) + D^{bess} \cdot \left( \eta_c P_{s,h}^{b,ch} + \frac{P_{s,h}^{b,dch}}{\eta_d} \right) \right. \right. \\ + V^{LG} \cdot LG_{s,h} + V^{LL} \cdot LL_{s,h} + \sum_n \theta_h^n (|T_{s,h}^{a,n} - T_{set}^{hvac}|) + \sum_n \phi_h^n (|T_{s,h}^{dhw,n} - T_{set}^{dhw}|) \\ \left. \left. + \left( (1 + \delta) \lambda_h^{DA} + \psi \right) \cdot P_{s,h}^{import} - \left( \lambda_h^{DA} - \omega \right) \cdot P_{s,h}^{export} \right\} \right] \end{aligned} \quad (4-1)$$

gdje je:

$S$  - skup scenarija  $\{1, 2, \dots, 27\}$

$s$  - scenarij  $s \in S$

$H$  - skup sati  $\{1, 2, \dots, 24\}$

$h$  - sat optimizacije horizonta;  $h \in H$

$N$  - skup kućanstava  $\{1, 2, \dots, 50\}$

$n$  - kućanstvo  $n \in N$

$\rho_s$  - vjerojatnost scenarija  $s$

$SU_{s,h}, SD_{s,h}$  - troškovi pokretanja/isključivanja *DG*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$  (€)

$C(P_{s,h}^g)$  - troškovi rada *DG*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$  (€)

$D^{bess}$  - trošak degradacije *BESS*-a (€/kWh)

$\eta_c, \eta_d$  - učinkovitost punjenja/pražnjenja *BESS*-a

$P_{s,h}^{b,ch}, P_{s,h}^{b,dch}$  - snaga punjenja/pražnjenja *BESS*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$  (W)

$V^{LG}, V^{LL}$  - vrijednost izgubljene(og) proizvodnje/opterećenja (€/kWh)

$LG_{s,h}, LL_{s,h}$  - ukupna(o) izgubljena(o) proizvodnja/opterećenje u satu  $h$  i scenariju  $s$  (kWh)

$\theta_h^n$  - penalizacijski faktor toplinske nelagode kućanstava  $n$  u satu  $h$  (€/°C/h)

$\phi_h^n$  - penalizacijski faktor nelagode tople vode kućanstava n u satu h (€/°C/h)

$T_{s,h}^{a,n}$  - unutarnja temperatura kućanstava n u satu h i scenariju s (°C)

$T_{set}^{hvac}, T_{set}^{dhw}$  - zadana vrijednost temperature HVAC/ DHW sustava (°C)

$T_{s,h}^{dhw,n}$  - temperatura tople vode kućanstava n u satu h i scenariju s (°C)

$\delta$  - PDV na dan unaprijed cijenu izražen u postotku dan unaprijed cijene

$\lambda_h^{DA}$  - dan unaprijed cijena električne energije u satu h (€/kWh)

$\psi$  - fiksna distribucijska tarifa za uvoz električne energije u mikromrežu (€/kWh)

$P_{s,h}^{import}, P_{s,h}^{export}$  - snaga kupljena iz/prodana distribucijske mreže (W)

$\omega$  - fiksna provizija koju naplaćuje operator distribucijskog sustava

Jednadžba operativnih troškova (4-1) sastoji se od 8 izraza. Prvi izraz  $(SU_{s,h} + SD_{s,h} + C(P_{s,h}^g))$ ,

odnosi se na troškove DG-a. Troškovi DG-a nadalje obuhvaćaju fiksno pokretanje, gašenje i promjenjive troškove proizvodnje u vremenskom razmaku h i scenariju s. Izraz

$D^{bess} \cdot \left( \eta_c P_{s,h}^{b, ch} + \frac{P_{s,h}^{b, dch}}{\eta_d} \right)$  bilježi troškove degradacije BESS-a zbog ciklusa punjenja i pražnjenja.

Treći izraz,  $V^{LG} \cdot LG_{s,h}$ , odnosi se na penalizaciju zbog ograničene proizvodnje (engl. *curtailment*), dok se četvrti izraz,  $V^{LL} \cdot LL_{s,h}$ , odnosi na penalizaciju zbog ukupnih ograničenja opterećenja u mikromreži. Izraz  $\sum_n \theta_h^n (|T_{s,h}^{a,n} - T_{set}^{hvac}|)$  predstavlja ukupni trošak toplinske nelagode nametnute od strane kućanstava zbog odstupanja od zadane temperature HVAC uređaja u vremenskom koraku h i scenariju s. Agregator mikromreže će platiti svakom kućanstvu proporcionalno odstupanju unutarnje temperature okoline od odgovarajuće postavljene temperature. Parametar  $\theta_h^n$  izražava spremnost n kućanstava da mijenja svoj toplinski komfor za uštedu troškova u vremenskom koraku h. Uski temperaturni komforni opseg i visoka vrijednost faktora penalizacije  $\theta_h^n$  predstavljaju kućanstva sa strogim zahtjevom za komforom, čime se agregatoru nudi manja fleksibilnost. Isto tako, sljedeći izraz,  $\sum_n \phi_h^n (|T_{s,h}^{dhw,n} - T_{set}^{dhw}|)$ , opisuje ukupni trošak nelagode zbog odstupanja od prioriteta DHW-a u vremenskom koraku h i scenariju s. Kućanstva imaju slobodu ugađanja individualnog temperaturnog raspona i faktora penalizacije za sudjelovanje u programu DR-a. Sedmi izraz,  $((1 + \delta) \lambda_h^{DA} + \psi) \cdot P_{s,h}^{import}$ , određuje trošak

energije kupljene iz distribucijske mreže. Ovaj trošak ima dvije komponente kao što su cijena po satu na dan unaprijed tržištu uzimajući u obzir PDV i fiksna distribucijska tarifa. Zadnji izraz,  $(\lambda_h^{DA} - \omega) \cdot P_{s,h}^{export}$ , predstavlja prihod od viška električne energije prodane mreži po tarifi jednakoj trenutnoj cijeni umanjenoj za proviziju  $\omega$ . Ovaj posljednji pojam je jedina dobit koju zarađuje agregator. Kako bi se prepoznale povezane koristi OIE, pretpostavlja se nulti operativni trošak za OIE, međutim, mali trošak se dodjeljuje za rasipanje OIE, stoga, agregator prvo pokušava zadovoljiti potražnju s OIE, dok ostatak potražnje može biti uravnotežen s drugim izvorima. Za izgubljeno opterećenje (engl. *Lost Load - LL*), maksimalno ograničenje nije postavljeno, međutim, postavlja se vrlo visoka penalizacija (*VLL*) u postavljenom cilju. Štoviše, realna *VLL*-a je preuzeta iz literature [15], koja se temelji na makroekonomskom konceptu.

#### 4.2.2. Fotonaponski (PV) model

Koristi se model koji uključuje iradijaciju i temperaturu kao ulazne parametre. Osnovni parametri mogu se pronaći u podatkovnom listu proizvođača. Model je prikazan u jednadžbama (4-2) i (4-3).

$$P_{s,h}^{PV} = \frac{PV_{\max} \cdot G_{s,h}}{G_{ref}} \cdot \frac{\ln(I_{sc})}{\ln\left(\frac{I_{sc}}{G_{s,h}}\right)} \cdot \frac{T_{jref}}{T_j} \quad (4-2)$$

$$T_j = T_{s,h}^{ext} + \frac{NOCT - 20}{80} \cdot S_I \quad (4-3)$$

gdje je:

$P_{s,h}^{PV}$  - razina proizvodnje PV sustava u satu h i scenariju s (W)

$PV_{\max}$  - nazivni maksimalni prinos PV sustava (W)

$G_{s,h}$  - solarna iradijacija u satu h i scenariju s ( $W/m^2$ )

$G_{ref}$  - solarna konstanta, 1000 ( $W/m^2$ )

$I_{sc}$  - struja kratkog spoja solarne ćelije

$T_{jref}, T_j$  - referentna temperatura/temperatura solarne ćelije ( $^{\circ}C$ )

$T_{s,h}^{ext}$  - vanjska temperatura u satu h i scenariju s ( $^{\circ}C$ )

$NOCT$  - normalna radna temperatura ćelije ( $^{\circ}C$ )

$S_I$  - solarna insolacija ( $W/m^2$ )

### 4.2.3. Model vjetroturbine (WT)

Praktični model koji se koristi u ovome radu aproksimira krivulju proizvodnje na dvije ravne linije kako je dano u jednadžbi (4-4) [16].

$$P_{s,h}^{WT} = \begin{cases} \frac{P_r}{w_r - w_c} \cdot (w_{s,h}^w - w_c), & w_c < w_w \quad \& \quad w_r > w_w \\ P_r, & w_{s,h}^w \geq w_r \\ 0, & w_{s,h}^w \leq w_c \end{cases} \quad (4-4)$$

gdje je:

$P_{s,h}^{WT}$  - razina proizvodnje vjetroturbine u satu h i scenariju s (W)

$P_r$  - nazivna izlazna snaga vjetrogeneratora (W)

$w_w$  - brzina vjetra (m/s)

$w_r$  - nazivna brzina vjetra za vjetroturbinu (m/s)

$w_c$  - brzina uklapanja za vjetroturbinu (m/s)

$w_{s,h}^w$  - brzina vjetra u satu h i scenariju s (m/s)

### 4.2.4. Model električnog grijača vode (EWH)

U ovom radu se slijedi fizički model predložen u literaturi [17]. Temperatura *DHW*-a u satu h unutar spremnika može se izračunati prema jednadžbi (4-5). Radi jednostavnosti, toplinski gubici se zanemaruju. Uporaba tople vode aktivira rad *EWH*-a kako bi se održala temperatura vode unutar spremnika. Međutim, korisnici mogu dopustiti malo odstupanje od zadane točke za sudjelovanje u programu *DR*-a koji nudi agregator. Temperatura tople vode mora ostati u specificiranim granicama udobnosti kao u jednadžbi (4-6). Radi jednostavnosti, pretpostavlja se da *EWH* može djelovati na bilo kojoj kontinuiranoj razini ograničenoj maksimalnom snagom kao što je prikazano u jednadžbi (4-7).

$$T_{s,h}^{dhw,n} = \frac{T_{s,h-1}^{dhw,n} (V_{\text{tank}}^n - V_{\text{use},h}^n \Delta h)}{V_{\text{tank}}^n} + \frac{T_{\text{in}} V_{\text{use},h}^n}{V_{\text{tank}}^n} \Delta h + \frac{P_{s,h}^{ewh,n}}{c_w V_{\text{tank}}^n} \cdot \frac{\Delta h}{60 \frac{\text{min}}{h}}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-5)$$

$$T_{s,h}^{dhw\text{min},n} \leq T_{s,h}^{dhw,n} \leq T_{s,h}^{dhw\text{max},n}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-6)$$

$$0 \leq P_{s,h}^{ewh,n} \leq P^{ewhmax,n}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-7)$$

gdje je:

$T_{s,h}^{dhw,n}$  - temperatura tople vode kućanstva n u satu h i scenariju s (°C)

$V_{tank}^n$  - volumen spremnika tople vode kućanstva n (l)

$V_{use,h}^n$  - volumen tople vode koju koristi kućanstvo n u satu h (l)

$\Delta h$  - razlika između dva uzastopna koraka vremena, to jest jedan sat

$T_{in}$  - temperatura ulazne hladne vode u spremniku tople vode (°C)

$P_{s,h}^{ewh,n}$  - potrošnja električne energije grijača vode kućanstva n u satu h i scenariju s (W)

$c_w$  - specifični toplinski kapacitet vode (J/kg/K)

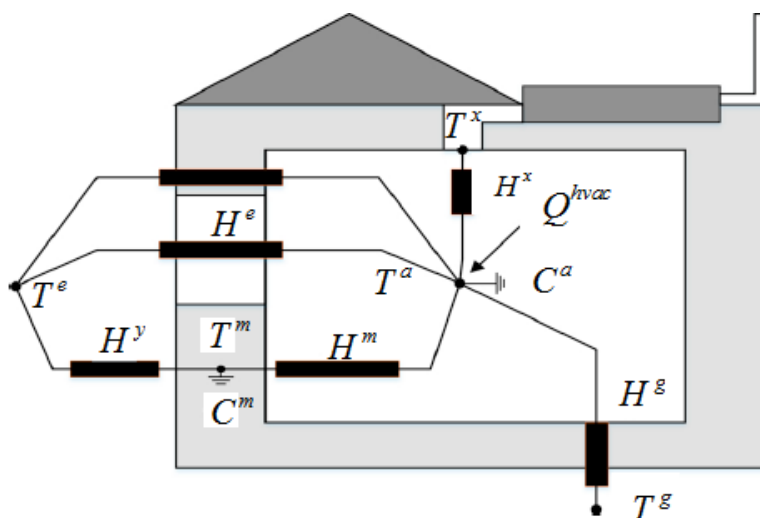
$T_{s,h}^{dhwmin,n}$  - minimalna temperatura tople vode kućanstva n u satu h i scenariju s (°C)

$T_{s,h}^{dhwmax,n}$  - maksimalna temperatura tople vode kućanstva n u satu h i scenariju s (°C)

$P^{ewhmax,n}$  - nazivna maksimalna snaga EWH jedinice kućanstva n (W)

#### 4.2.5. Model zgrade

U ovom radu koristi se vrlo učinkovit model zgrade s dva toplinska kapaciteta za procjenu zahtjeva grijanja ili hlađenja koji analizira varijacije unutarnje temperature s obzirom na vanjsku temperaturu [13, 14, 18]. Kao što se vidi na slici 4.4., ovaj model koristi dva toplinska kapaciteta. Jedan kapacitet se dodjeljuje građevinskoj masi,  $C^m$ , a drugi unutarnjem zraku  $C^a$ . Ovaj model ima dvije nepoznate temperature,  $T^a$  i  $T^m$ .



Sl. 4.4. Model zgrade [9]

Energetska bilanca ovog modela predstavljena je pojednostavljenim diskretnim oblikom kako slijedi:

$$T_{s,h}^{a,n} = \frac{T_{s,h-1}^{a,n} + \frac{\Delta h}{C^a} (H^m T_{s,h-1}^{m,n} + H^e T_{s,h}^e + H^g T^g + H^x T^x + Q_{s,h}^{hvac,n})}{1 + \frac{\Delta h}{C^a} (H^m + H^e + H^g + H^x)}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-8)$$

$$T_{s,h}^{m,n} = \frac{T_{s,h-1}^{m,n} + \frac{\Delta h}{C^m} (H^m T_{s,h-1}^{a,n} + H^y T_{s,h}^e)}{1 + \frac{\Delta h}{C^m} (H^m + H^y)}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-9)$$

gdje je:

$T_{s,h}^{a,n}, T_{s,h-1}^{a,n}$  - Unutarnja temperatura kućanstva n u satu h/h-1 i scenariju s (°C)

$T_{s,h}^{m,n}, T_{s,h-1}^{m,n}$  - temperatura građevinske mase kućanstva n u satu h/h-1 i scenariju s (°C)

$T_{s,h}^e$  - Vanjska temperatura u satu h i scenariju s (°C)

$T^g$  - temperatura čvora u tlu (°C)

$T^x$  - temperatura zraka pri HVAC ventilaciji (°C)

$T^a, T^e$  - unutarnja/vanjska temperatura (°C)

$T^m$  - temperatura građevinske mase (°C)

$\Delta h$  - razlika između dva uzastopna koraka vremena, to jest jedan sat

$C^a, C^m$  - toplinski kapacitet unutarnje zraka/građevinske mase (J/°C)

$H^m$  - toplinska vodljivost između točaka čvora unutarnjeg zraka i građevinske mase (W/°C)

$H^e$  - toplinska vodljivost između točaka čvora vanjskog i unutarnjeg zraka (W/°C)

$H^g$  - toplinska vodljivost između točaka čvora unutarnjeg zraka i tla (W/°C)

$H^x$  - toplinska vodljivost između točaka čvora HVAC zraka i unutarnjeg zraka (W/°C)

$H^y$  - toplinska vodljivost između točaka čvora vanjskog zraka i građevinske mase (W/°C)

$Q_{s,h}^{hvac,n}$  - Potrošnja energije HVAC jedinice kućanstva n u satu h i scenariju s (W)

Ograničenje (4-10) ograničava unutarnju temperaturu u unaprijed definiranoj mrtvoj zoni podesivoj od strane posjednika. HVAC jedinica može potrošiti bilo koju razinu snage između 0 i maksimalne razine, kao što je izraženo u jednadžbi (4-11).

$$T_{s,h}^{set,n} - \frac{\sigma^n}{2} \leq T_{s,h}^{a,n} \leq T_{s,h}^{set,n} + \frac{\sigma^n}{2}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-10)$$

$$0 \leq |Q_{s,h}^{hvac,n}| \leq Q^{\max,n}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H, \forall n \in N \quad (4-11)$$

gdje je:

$T_{s,h}^{set,n}$  - podešena temperatura kućanstva  $n$  u satu  $h$  i scenariju  $s$  (°C)

$\sigma^n$  - temperatura unutarnjeg zraka unutar mrtve zone kućanstva  $n$  (°C)

$Q^{\max,n}$  - nazivna najveća snaga *HVAC* jedinice kućanstva  $n$  (W)

#### 4.2.6. Dizel generator (DG)

Operativni trošak dizelskog generatora modeliran je na sljedeći način:

$$C(P_{s,h}^g) = a \cdot I_{s,h} + \sum_m \alpha^m P_{s,h}^m, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-12)$$

$$0 \leq P_{s,h}^m \leq P^{m,\max}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-13)$$

$$P_{s,h}^g = P^{g,\min} I_{s,h} + \sum_m P_{s,h}^m, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-14)$$

$$P^{g,\min} I_{s,h} \leq P_{s,h}^g \leq P^{g,\max} I_{s,h}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-15)$$

gdje je:

$C(P_{s,h}^g)$  - radni troškovi *DG*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$  (€)

$a$  - fiksni trošak rada *DG*-a pri minimalnoj snazi

$I_{s,h}$  - binarni status opredjeljenja *DG*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$

$M$  - skup troškovnih segmenata *DG*-a  $\{1, 2, \dots, 9\}$

$m$  - segment *DG*-a  $m \in M$

$P_{s,h}^m$  - razina proizvodnje *DG*-a u segmentu  $m$ , satu  $h$  i scenariju  $s$  (W)

$P^{m,\max}$  - maksimalna razina proizvodnje *DG*-a u segmentu  $m$  (W)

$P_{s,h}^g$  - ukupna proizvodnja *DG*-a u satu  $h$  i scenariju  $s$  (W)

$P^{g,\min}, P^{g,\max}$  - minimalna/maksimalna snaga koju *DG* može proizvoditi (W)

#### 4.2.7. Model sustava za pohranu energije u baterije (BESS)

Snaga punjenja i pražnjenja *BESS*-a ograničena je u jednadžbama (4-16) i (4-17), a za sprječavanje istovremenog punjenja i pražnjenja, binarne varijable odluke ograničene su kao u jednadžbi (4-18).

$$0 \leq P_{s,h}^{b,ch} \leq b_{s,h}^{ch} \cdot P^{ch,max}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-16)$$

$$0 \leq P_{s,h}^{b,dch} \leq b_{s,h}^{dch} \cdot P^{dch,max}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-17)$$

$$b_{s,h}^{ch} + b_{s,h}^{dch} \leq 1, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-18)$$

gdje je:

$P_{s,h}^{b,ch}, P_{s,h}^{b,dch}$  - snaga punjenja/pražnjenja *BESS*-a u satu h i scenariju s (W)

$b_{s,h}^{ch}, b_{s,h}^{dch}$  - binarna odluka o punjenju/pražnjenju *BESS*-a u satu h i scenariju s

$P^{ch,max}, P^{dch,max}$  - maksimalna snaga punjenja/pražnjenja (W)

Stanje napunjenosti *BESS*-a u bilo kojem vremenskom koraku h može se odrediti ograničenjem (4-19), dok jednadžba (4-20) ograničava stanje napunjenosti u svrhu povećanja životnog ciklusa.

$$SOC_{s,h} = SOC_{s,h-1} + \eta_c P_{s,h}^{b,ch} - \frac{P_{s,h}^{b,dch}}{\eta_d}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-19)$$

$$SOC^{min} \leq SOC_{s,h} \leq SOC^{max}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-20)$$

gdje je:

$SOC_{s,h}, SOC_{s,h-1}$  - stanje napunjenosti *BESS*-a u satu h/h-1 i scenariju s

$\eta_c, \eta_d$  - učinkovitost punjenja/pražnjenja *BESS*-a

$SOC^{min}, SOC^{max}$  - minimalno/maksimalno stanje napunjenosti *BESS*-a

#### 4.2.8. Razmjena snage s distribucijskom mrežom

Razmjena električne energije ograničena je ili ugovorenim iznosom prema trenutnim cijenama ili termičkim granicama vodiča. Granice uvezene i izvezene snage mogu biti različite, međutim, u ovom radu pretpostavljaju se ista ograničenja.

$$P_{s,h}^{export} \leq P^{grid,max}, \quad P_{s,h}^{import} \leq P^{grid,max}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-21)$$

gdje je:

$P^{grid,max}$  - maksimalna snaga koja se može provesti kroz mrežu (W)

#### 4.2.9. Ravnoteža snage

$$P_{s,h}^g + P_{s,h}^{PV} + P_{s,h}^{WT} + P_{s,h}^{b,dch} + P_{s,h}^{import} + \sum_n (LL_{s,h}^n) =$$



$$\sum_n \left( |Q_{s,h}^{hvac,n}| + P_{s,h}^{ewh,n} + F_h^n \right) + P_{s,h}^{b,ch} + P_{s,h}^{export} + LG_{s,h}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-22)$$

Izgubljena proizvodnja je uvijek manja od zbroja raspoložive izlazne snage iz OIE i dizel generatora.

$$LG_{s,h} \leq P_{s,h}^{PV} + P_{s,h}^{WT} + I_{s,h} \cdot P^{g,\min}, \quad \forall s \in S, \forall h \in H \quad (4-23)$$

gdje je:

$F_h^n$  - Fiksno ili kritično opterećenje kućanstva n u satu h (W)

#### 4.2.10. Vjerojatnost gubitka opterećenja (*LOLP*)

Ovaj indeks mreže određuje vjerojatnost da će potražnja premašiti ponudu u određenom vremenskom razdoblju. Izračunava se za svih 27 scenarija kao u jednadžbi (4-24).

$$LOLP = \sum_s \delta_s T_s^{LL}, \quad \forall s \in S \quad (4-24)$$

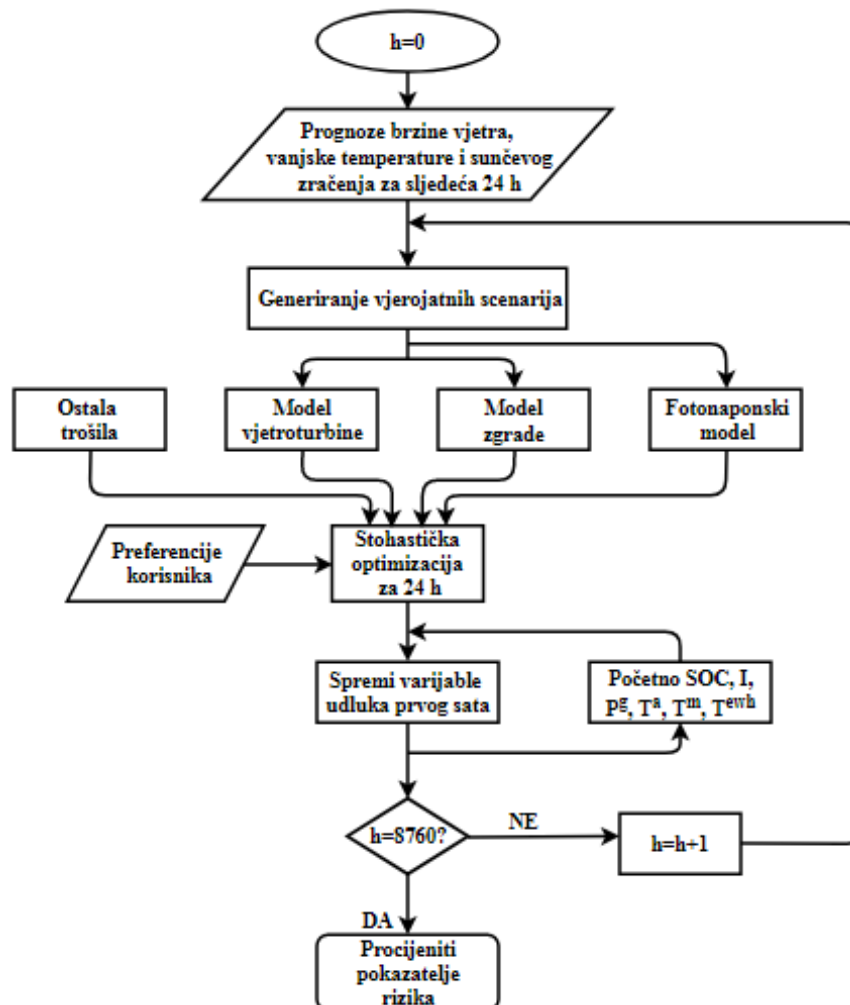
gdje je:

$\delta_s$  - PDV na dan unaprijed cijenu izražen u postotku dan unaprijed cijene u scenariju s

$T_s^{LL}$  - postotak vremena kada je potražnja veća od raspoložive ponude u scenariju s

#### 4.2.11. Blok dijagram modela

Predložena metodologija skicirana je na slici 4.5. koristeći dijagram toka.



Sl. 4.5. Blok dijagram modela [9]

Simulacijsko razdoblje sadrži 8760 h. Predloženi model počinje u satu  $h = 0$ . Predviđeni su ulazni parametri za sljedeća 24 sata i generirana su tri vjerojatna scenarija za svaki parametar (kao što je prikazano na slici 4.2.) koji se unose u modele koji su objašnjeni u ovom poglavlju. Ulazni scenariji, kritična opterećenja, početni parametri, statusi dostupnosti i preferencije kućanstava učitani su u *GAMS* za stohastičku optimizaciju. Dobivene su putanje odluka za 24 h, ali se zadržavaju samo odluke prvog sata. Predviđeni parametri za sljedeća 24 sata ažuriraju se na temelju najnovijih dostupnih informacija (kao što je prikazano na slici 4.3.), a cijeli se postupak ponavlja do kraja godine.

### 4.3. Simulacija primjera optimizacije mikromreže

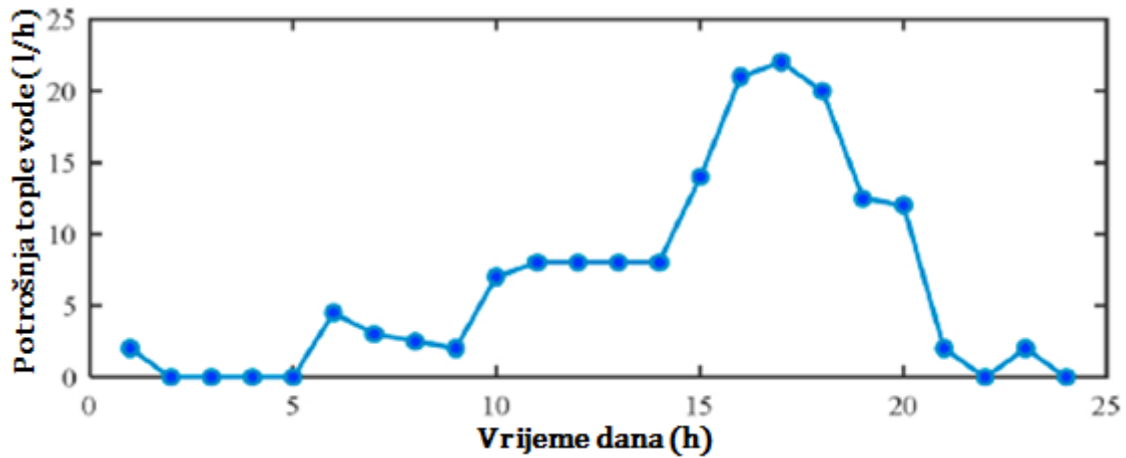
Ovaj rad razmatra mikromrežu koja se sastoji od 50 heterogenih domaćinstava koje opslužuje agregator. Svako se kućanstvo sastoji od jedne obitelji, koja se nalazi u samostojećoj kući na 2 kata i opremljena je *HVAC* jedinicom, *EWH* jedinicom i kritičnim opterećenjem. Agregator je svjestan pojedinačnih parametara opterećenja i prioriteta udobnosti putem *EMS*-a. Varijacije među kućanstvima obuhvaćaju se ravnomjernom raspodjelom parametara opterećenja i granicama komfora kako je detaljno prikazano u tablici 4.1. Fiksno opterećenje se predviđa na temelju podataka automatskog očitavanja brojila kućanstava u Helsinkiju.

**Tab. 4.1.** *Ulazni parametri mikromreže* [9]

Parametar	Simbol	Mjerna jedinica	Kućanstva (n)	Numerička distribucija
Površina kuće	$A^n$	m <sup>2</sup>	1:50	[175, 225]
Snaga HVAC-a	$Q^{\max,n}$	kW	1:50	[6,7]
Granice unutarnje temperatura	$T_{set}^{hvac} - \frac{\sigma^n}{2}, T_{set}^{hvac} + \frac{\sigma^n}{2}$	°C	1:15	[20.5, 21.5]
			16:35	[20, 22]
			36:50	[19.5, 22.5]
Snaga EWH-a	$P^{ewh,\max,n}$	kW	1:50	[1.5, 2]
Volumen spremnika tople vode	$V_{\tan k}^n$	dm <sup>3</sup>	1:50	[175, 225]
Granice temperature tople vode	$T_{s,h}^{dhw\min,n}, T_{s,h}^{dhw\max,n}$	°C	1:15	[58.5, 61.5]
			16:35	[57, 63]
			36:50	[55.5, 64.5]

Pretpostavlja se da se dnevni *DHW* profil kućanstva ne mijenja tijekom cijele godine. To je dobra pretpostavka budući da je mjesečni faktor varijacije potrošnje tople vode u Finskoj između 0,9 i 1,1 [19]. Postavljena temperatura *HVAC* sustava za sva kućanstva je 21 °C, a *DHW*-a 60 °C. Za analizu najgoreg slučaja, smatra se da su kućanstva kontinuirano zauzeta tijekom razdoblja istraživanja. Penalizacija nelagode unutar zone udobnosti je postavljena na  $\theta_h^n = \phi_h^n = 0.02 \text{ €/°C/h } \forall n \ \& \ \forall h$ . Potrošnja *DHW*-a, prikazana na slici 4.6., ravnomjerno je raspodijeljena oko srednje vrijednosti kako bi se stvorila raznolikost među kućanstvima.

Postavljena je visoka vrijednost izgubljenog opterećenja  $V^{LL} = 4.11$  €/kWh, dok vrijednost izgubljene proizvodnje iznosi  $V^{LG} = 0.01$  €/kWh.



Sl. 4.6. Dnevni profil potrošnje tople vode u kućanstvima u Finskoj [13]

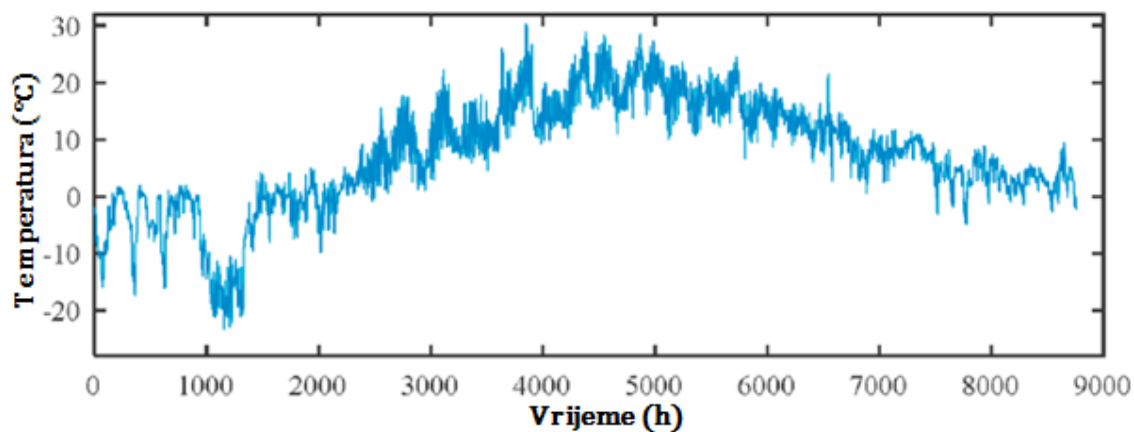
Portfelj proizvodnje mikromreže sastoji se od sljedećih tehnologija:

- PV sustav:  $PV_{\max} = 400$  kW, pri čemu je  $NOCT = 45$  °C i učinkovitost = 21%.
- WT:  $P_r = 400$  kW,  $w_c = 3$  m/s i  $w_r = 14$  m/s.
- DG: jedan rezervni DG s  $P^{g,\max} = 150$  kW i  $P^{g,\min} = 15$  kW,  $a = 6$  €/h. Razmatra se kvadratna funkcija troškova s 9 segmenata, gdje je svaki segment 15 kW.
- BESS: kapacitet je 200 kWh s  $P^{ch,\max}, P^{dch,\max} = 60$  kW. Početni SOC je na 50% i može se kretati u rasponu 10 - 90% kapaciteta,  $D^{bess} = 0.002$  €/kWh i  $\eta_c = \eta_d = 0.9$ .
- Distribucijska mreža: ograničenje uvoza i izvoza je 100 kW. Fiksna distribucijska naknada iznosi 0.0361 €/kWh s PDV-om od 24%, dok provizija maloprodavača iznosi 0.0024 €/kWh.

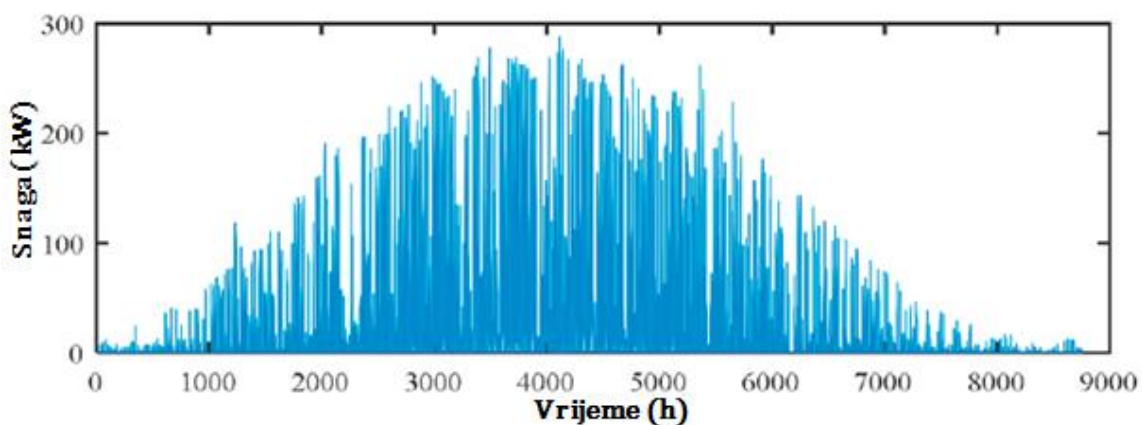
Vanjska temperatura i solarna iradijacija predviđaju se koristeći prošle vremenske podatke za Helsinki [20]. Brzina vjetra je predviđena na 40 m visine [21]. Tablica 4.2. prikazuje događaje prekida rada komponenti mikromreže simulirane putem *Monte Carlo* metode, gdje drugi red opisuje početne i završne sate slučajnog ispada. Za pravednu usporedbu, isti se događaji razmatraju za sve studije slučaja. Ulazni podaci koji odgovaraju prvom satu svake RH iteracije prikazani su na slikama 4.7. - 4.9. Koriste se dan unaprijed cijene iz 2017. godine [22] prikazane na slici 4.10.

**Tab. 4.2.** Statistika ispada komponenti mikromreže pomoću Monte Carlo simulacije [9]

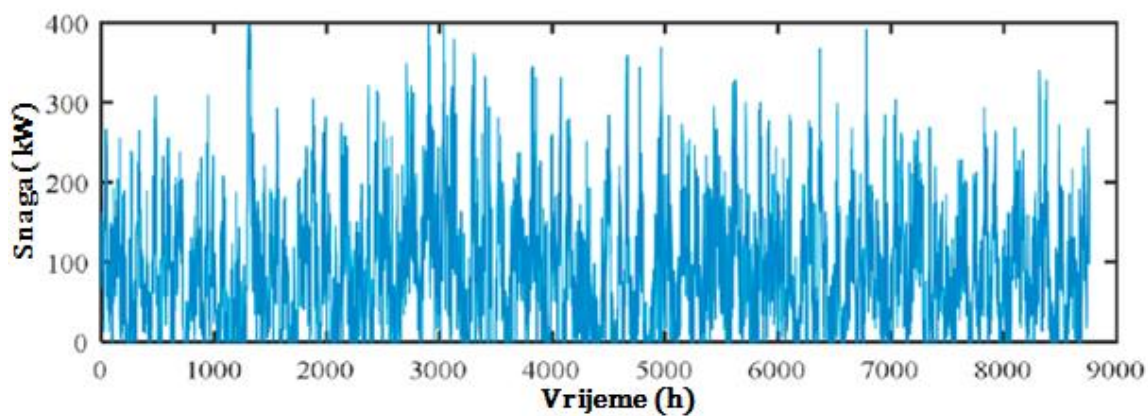
Komponenta	Fotonapon	Vjetroturbina	Dizel generator	BESS	Prijenosni vod
Početak i kraj kvara (h)	980-1017, 6156-6191	3409-3437, 7306-7331	1213-1244, 4413-4448, 7958-7980	4013-4021	8277-8282



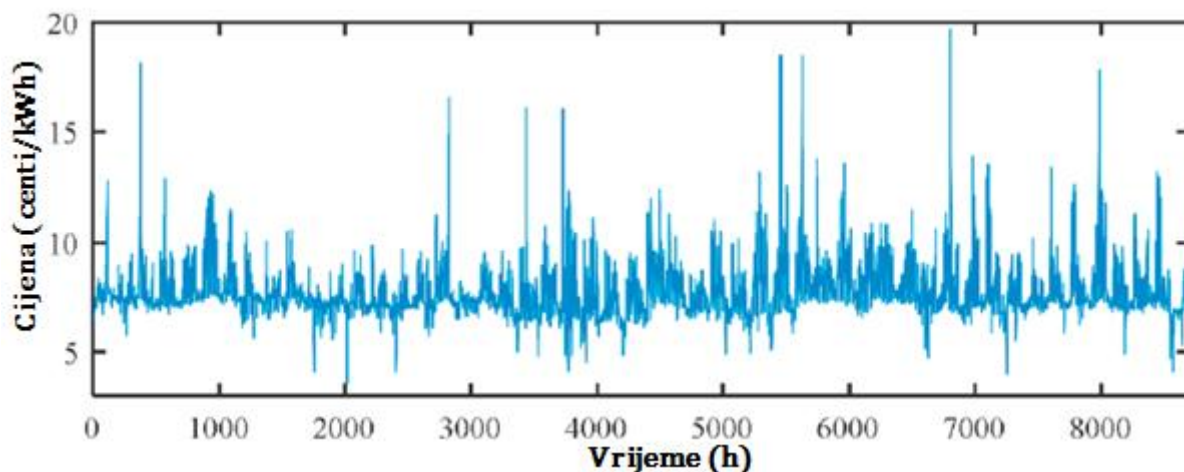
**Sl. 4.7.** Prognoza temperature po satima [9]



**Sl. 4.8.** Izlazna snaga fotonapona po satima [9]



**Sl. 4.9.** Izlazna snaga vjetroturbine po satima [9]



Sl. 4.10. Trenutna cijena po satu za 2017. godinu [9]

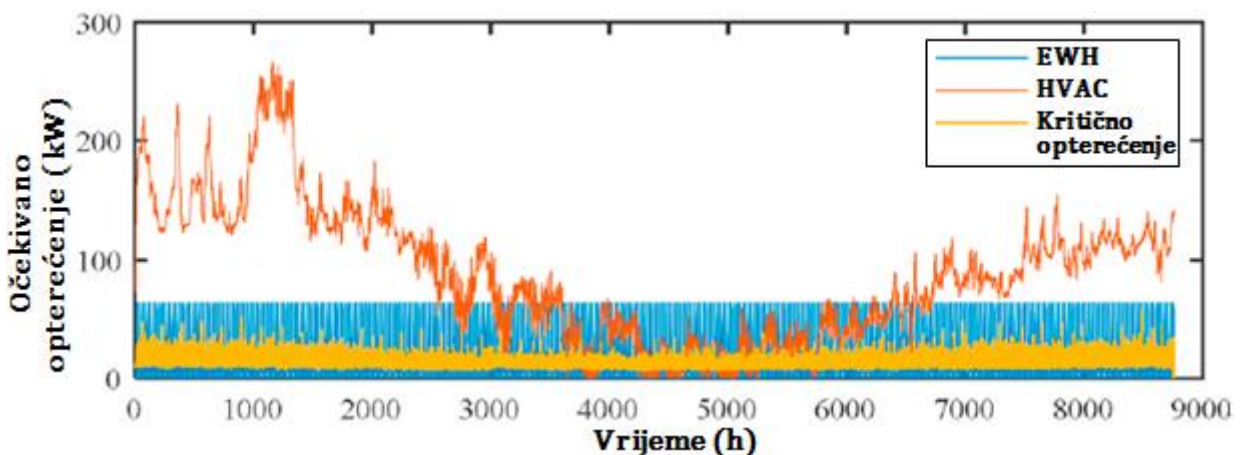
Period simulacije počinje 01. siječnja, a završava 31. prosinca. Optimizacija se provodi 24 sata unaprijed za svih 27 jednako vjerojatnih scenarija (vjerojatnost svakog scenarija je  $1/27$ ) uz razmatranje 50 kućanstava s vremenskom rezolucijom od jednog sata. Stoga se *MILP* problem sastoji od 234.576 kontinuiranih varijabli i 66.744 binarnih varijabli za svaki 24-satni horizont. Model je simuliran na *GAMS MATLAB* okruženju i riješen pomoću *CPLEX*-a.

#### 4.3.1 Rezultati simulacije

Kako bi se pokazala učinkovitost predloženog modela, simulirane su otočne i mrežne operacije sa i bez DR koordinacije kako je opisano u nastavku:

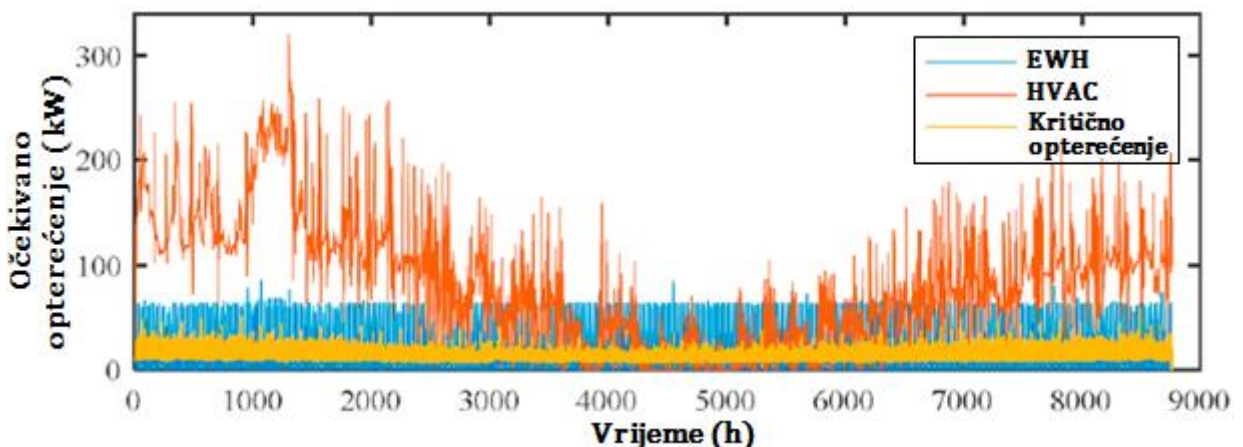
- Prvi slučaj: otočni način rada mikromreže optimiziran je bez *DR* upravljanja, to jest ograničenja (4-6), (4-10) i (4-21) se zanemaruju, što znači da nije dopušteno ni odstupanje od zadane točke temperature niti izmjena snage s mrežom. Funkcija cilja u jednadžbi (4-1) ne uključuje 4 zadnja termina.
- Drugi slučaj: predložena shema *DR*-a primjenjuje se na otočni način rada mikromreže. U ovom slučaju uzimaju se u obzir ograničenja (4-6) i (4-10), odnosno razmatraju se *HVAC* i *EWH*, dok se ne uzimaju u obzir posljednja dva termina u jednadžbi (4-1) i ograničenje (4-21).
- Treći slučaj: Ovaj je slučaj sličan prvome, osim što su posljednja dva termina u jednadžbi (4-1) i ograničenje (4-21) uzeti u obzir pri mrežnom načinu rada bez *DR*-a.
- Četvrti slučaj: ovaj slučaj uzima u obzir cjeloviti model, to jest obuhvaća jednadžbe (4-1) - (4-24), za mrežni način rada mikromreže.

Navedeni slučajevi su simulirani i rezultati su opisani u nastavku. Slika 4.11. prikazuje simulirani profil opterećenja za prvi slučaj. Maksimalno i prosječno satno opterećenje mikromreže iznosi 328.5 kW odnosno 124.2 kW. Agregator smanjuje troškove koordiniranjem rada samo *BESS*-a i *DG*-a. Ukupni *LL* iznosi oko 4,02% ukupne potražnje, a operativni trošak je 300,360 €. Slika 4.11. potvrđuje da *HVAC* opterećenje izravno slijedi varijaciju vanjske temperature prikazane na slici 4.7., a također je očito iz činjenice da se najveće opterećenje događa pri najnižoj temperaturi. Nasuprot tome, opterećenje *EWH*-a slijedi isti obrazac tijekom cijele godine budući da se dnevni profil *DHW*-a za svako kućanstvo pretpostavlja konstantnim. Fiksno opterećenje, uglavnom osvjjetljenje i uređaji, pokazuje određeno sezonsko ponašanje.



Sl. 4.11. Opterećenje po satima svih kućanstava (prvi slučaj) [9]

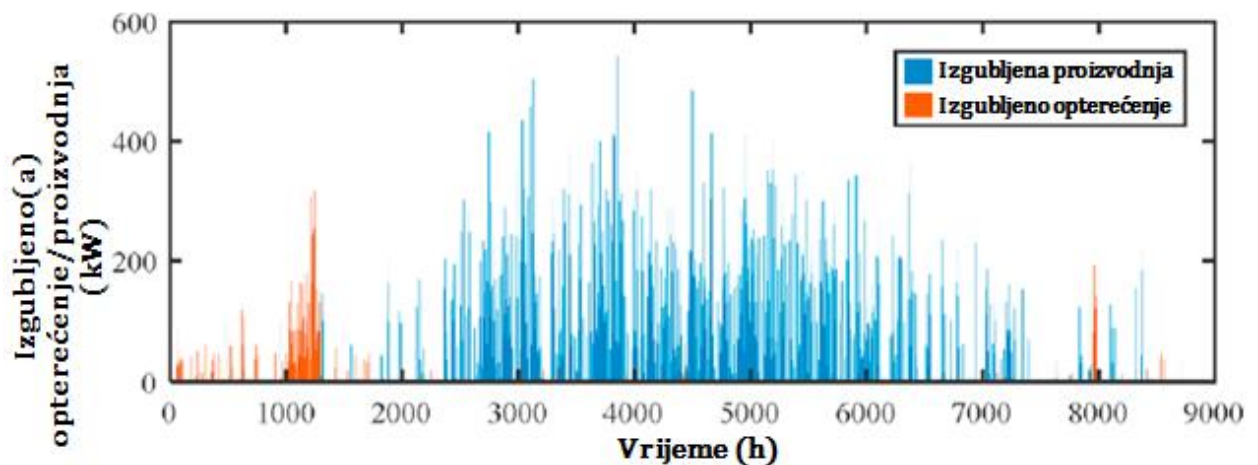
Slika 4.12. prikazuje profil opterećenja za drugi slučaj kada je predložena mikromreža simulirana s *DR* upravljanjem u otočnom načinu rada.



Sl. 4.12. Optimalna očekivana opterećenja po satima za otočni način rada s *DR* upravljanjem (drugi slučaj) [9]

Simulacijski rezultati za drugi slučaj dokazuju da su *HVAC* opterećenja fleksibilnija u odnosu na *EWH* opterećenja. Glavni razlog ovog fenomena je ograničeno korištenje *DHW*-a (vidi sliku

4.6.), što je u suprotnosti s opterećenjem HVAC-a zbog održavanja temperature okoline cijelo vrijeme. Visoki korak rampe HVAC opterećenja u kombinaciji s toplinskom inercijom zgrade omogućuje učinkovito suočavanje s promjenjivom proizvodnjom iz OIE. Ovaj korak rampe je proporcionalan opsegu toplinskog komfora pojedinog kućanstva. Što je opseg širi, to su veći energetske prijelazi u HVAC profilu. Kako bi se održao toplinski komfor, termičke mase zgrade oslobađaju energiju kada HVAC opterećenja smanjuju potrošnju zbog niske proizvodnje OIE. Ne iznenađuje što se na slici 4.12. povećala maksimalna potražnja s 328.45 kW na 374.18 kW, što je opravdano kako slijedi. Proizvodnja vjetrotrubine je na nazivnoj razini i proizvodnja fotonapona je također velika u tom satu, ali proizvodnja OIE značajno opada u narednim satima. Kako bi se poštovali termalni prioriteti uz optimiziranje troškova, HVAC jedinice rade blizu gornjih granica komfora tijekom razdoblja u kojima je proizvodnja OIE visoka i nadoknađuju potrošnju energije u kasnijim satima, to jest toplinske mase zgrada skladište energiju. Slika 4.13. prikazuje optimalna ograničenja energije za ovu shemu. Ukupno izgubljeno opterećenje smanjeno je na 2,89% godišnje potražnje, a godišnji troškovi smanjeni su na 229,160 €.



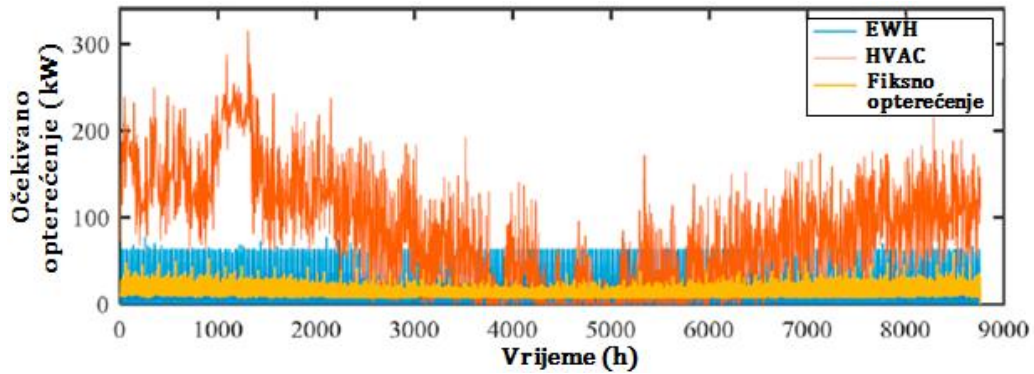
Sl. 4.13. Optimalno očekivano izgubljeno opterećenje i proizvodnja za otočni način rada s DR upravljanjem (drugi slučaj) [9]

Zatim se simulira mikromreža s mogućnošću razmjene snage putem bilateralnog ugovora o trenutnim cijenama, ali bez razmatranja DR-a, to jest simulira se treći slučaj. Pretpostavlja se da agregator mikromreže uvijek poznaje cijene za sljedeća 24 sata. Treba imati na umu da bez DR upravljanja profil opterećenja ostaje isti kao u prvom slučaju, ali se trošak iznimno smanjuje zbog pogodnosti ugovora o trenutnim cijenama koji je dvostruk:

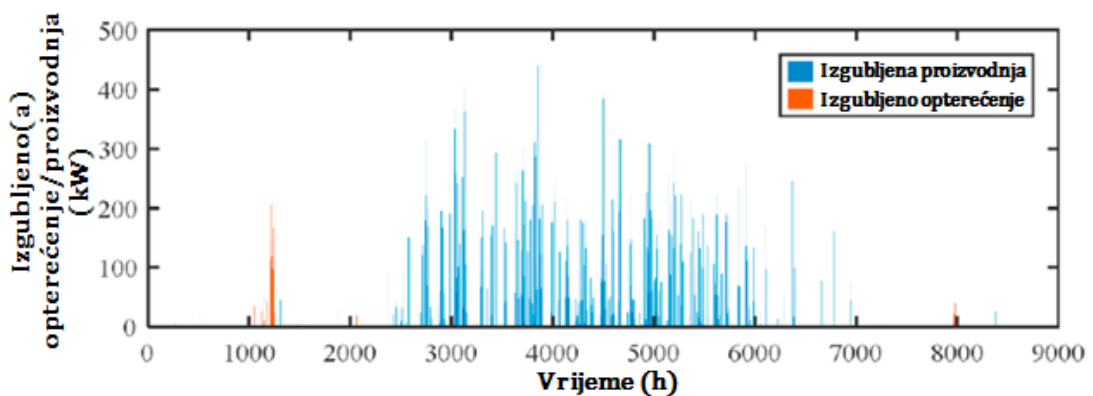
1. donosi više fleksibilnosti agregatoru jer nema operativnih ograničenja povezanih s snagom razmjene osim  $P^{grid,max}$  i
2. višak proizvodnje iz OIE može se izvoziti po pogodnoj cijeni.



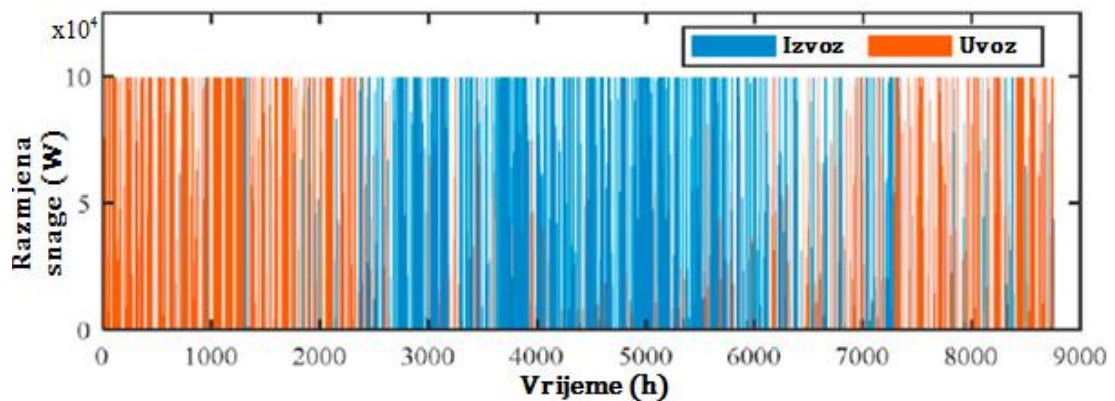
Zbog razmjene električne energije u trećem slučaju, trošak je smanjen na 73,728 €. Koordinacija DR-a s ugovorom o trenutnim cijenama, to jest četvrti slučaj, donijela je još bolje rezultate. To je rezultiralo povećanim iskorištavanjem toplinskih masa zgrade, što je potvrđeno usporedbom HVAC potrošnje na slikama 4.12 i 4.14. Izmjene električne energije koje je smanjio DR dovode do značajnih ušteda u obliku smanjenja ograničenja koja su prikazana na slikama 4.15. i 4.16.



Sl. 4.14. Optimalna očekivana opterećenja po satima za mrežni način rada mikromreže s DR upravljanjem (četvrti slučaj) [9]



Sl. 4.15. Izgubljeno opterećenje i proizvodnja za mrežni način rada mikromreže s DR upravljanjem (četvrti slučaj) [9]



Sl. 4.16. Razmjena snage za mrežni način rada mikromreže s DR upravljanjem (četvrti slučaj) [9]

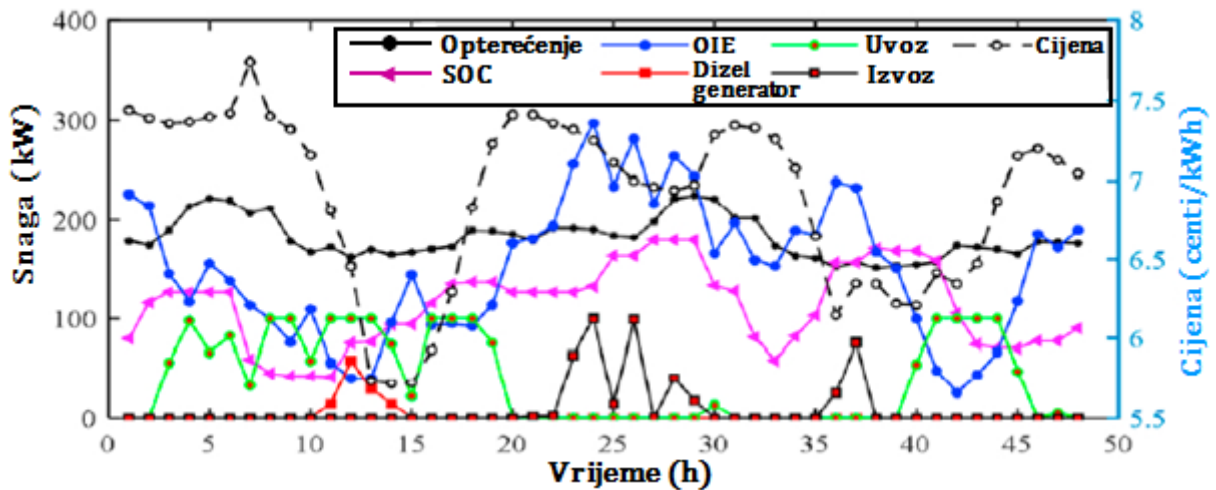
Može se primijetiti da izgubljeno opterećenje i izgubljena proizvodnja još uvijek prevladavaju u zimskim i ljetnim sezonama, odnosno nakon upotrebe potpunog kapaciteta razmjene. Godišnje uštede su 24,12% u odnosu na treći slučaj. Brojčani rezultati dobiveni za različite studije slučaja sažeti su u tablici 4.3.

**Tab. 4.3.** Usporedba rezultata za različite načine rada [9]

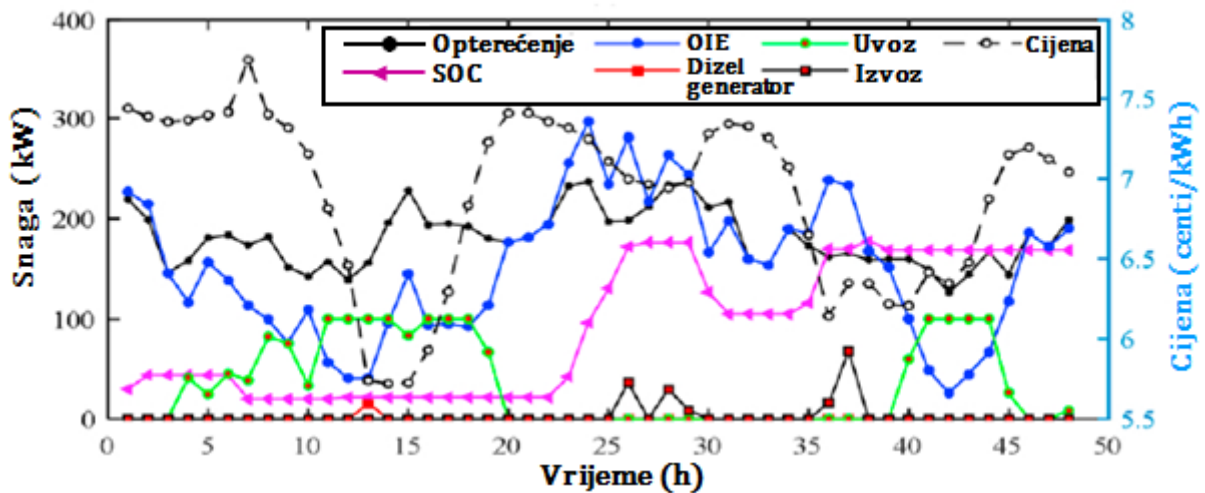
Očekivana varijabla odluke	Prvi slučaj Otočni način rada bez DR	Drugi slučaj Otočni način rada s DR	Treći slučaj Mrežni način rada bez DR	Četvrti slučaj Mrežni način rada s DR
Troškovi mikromreže (€)	300.360	229.160	73.728	55.877
LOLP (%)	9.84	5.97	1.74	1.01
Potrošnja (MWh)	1087.9	1032.2	1087.9	1045.7
Izgubljena potrošnja (MWh)	43.06	29.92	6.02	3.984
Izgubljena proizvodnja (MWh)	387.42	354.9	124.86	100.61
Proizvodnja dizel generatora (MWh)	388.25	313.49	93.68	61.73
Punjenje BESS-a (MWh)	34.79	36.84	50.58	43.26
Pražnjenje BESS-a (MWh)	28.1	29.69	40.89	35.02
Izvoz (MWh)	-	-	261.2	260.25
Uvoz (MWh)	-	-	332.95	298.01

Profil OIE isti je za sve slučajeve. Vrijednost ili ekonomska prednost mrežnog povezivanja može se vidjeti u ovoj tablici. Za agregatora, treći slučaj donosi 75.45% uštede troškova u usporedbi sa prvim slučajem i 68.72% uštede s obzirom na drugi slučaj. Slično, četvrti slučaj postiže 81.4%, 75.6% i 24.12% uštede u usporedbi sam prvim, drugim i trećim slučajem. Osim toga, napredak u *LOLP*-u je 89,7%, 83% i 42% u odnosu na prvi, drugi i treći slučaj. Ovaj napredak u *LOLP*-u pozitivno utječe na kvalitetu opskrbe električnom energijom i na komfor kućanstava. Također se može primijetiti da *DR* neznatno smanjuje potrošnju energije u drugom i četvrtom slučaju uz neke troškove koje snosi agregator.

Kako bi se pokazala učinkovitost predloženog okvira, mogući scenarij mrežnog načina rada (treći i četvrti slučaj) za dva uzastopna zimska dana prikazan je na slikama 4.17. i 4.18.



Sl. 4.17. Scenarij mrežnog rada mikromreže za treći slučaj [9]



Sl. 4.18. Scenarij mrežnog rada mikromreže za četvrti slučaj [9]

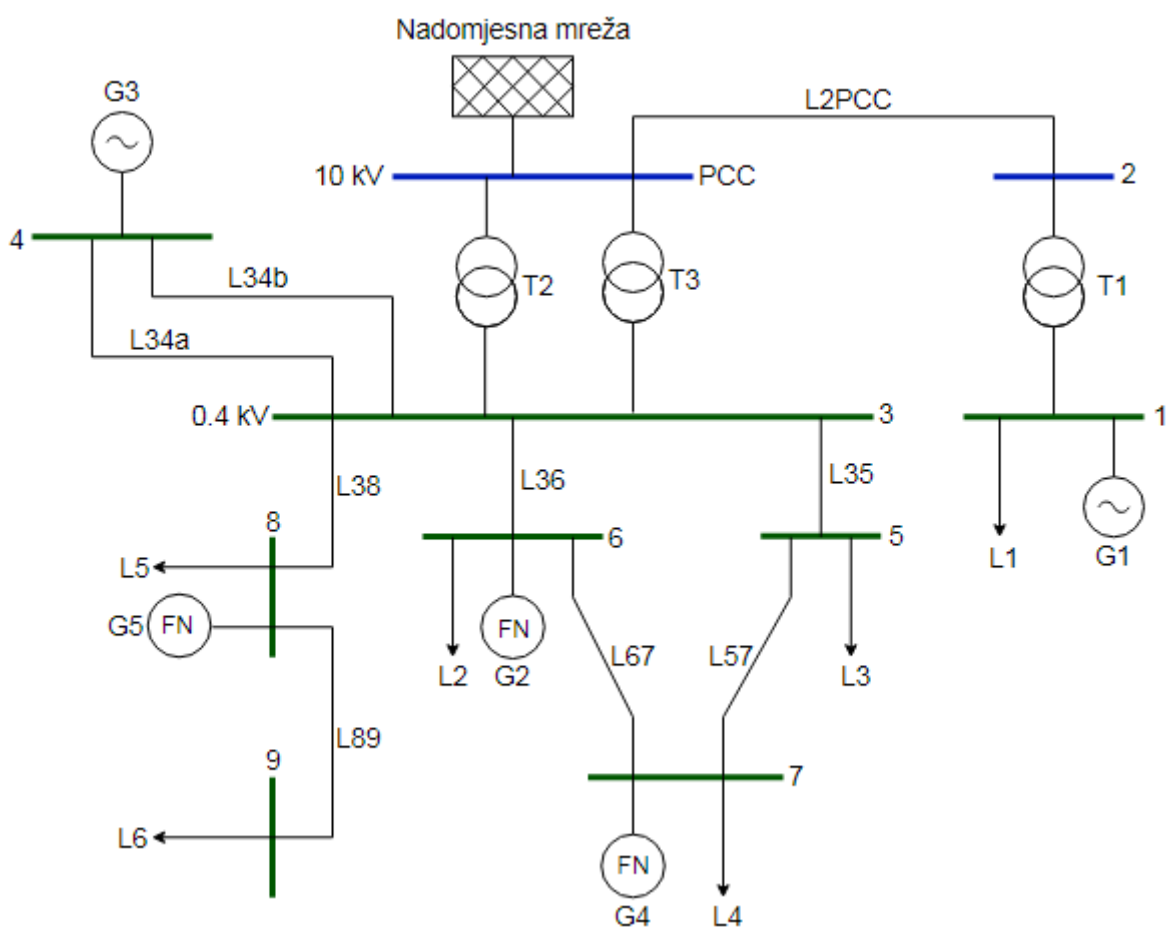
Predstavljene odluke odgovaraju prvom satu u svakom *RH*. Iz slike 4.18. vidljivo je da *DR* nastoji uskladiti profil OIE tako da popuni praznine između optimizirane potražnje i OIE. Vidi se da su praznine u tom slučaju puno manje nego u slučaju bez *DR*-a koji je prikazan na slici 4.17. *DR* ne samo da sprječava upotrebu *DG*-a (na slici 4.18.), nego nastoji smanjiti uvoz energije u satima 3-6 kada je cijena relativno visoka. Višak proizvodnje iz OIE se izvozi ili se koristi za punjenje *BESS*-a, ali na slici 4.17. u 12-om satu, *BESS* se puni iz prekomjerne proizvodnje *DG*-a. To je zbog nesavršene informacije o ovom satu koja se ažurira kasnije pomoću povratne informaciji od *RH*, a 24-satna prognoza nije mogla procijeniti dostupnost viška proizvodnje iz OIE. Ovo je primjer kako agregator snosi troškove zbog nesavršenih informacija u radu mikromreže i kako *RH* povratne informacije nastoje minimizirati te troškove.

## 5. PRAKTIČNA SIMULACIJA

Praktični dio diplomskog rada napravljen u programu *Power World* koji je namijenjen za provođenje analize elektroenergetskog sustava. U njemu su napravljene simulacije za tri različita slučaja rada mikromreže o čemu je više napisano u nastavku.

### 5.1. Model mikromreže

Shema mikromreže koja je analizirana u programu prikazana je na slici 5.1.



Sl. 5.1. Shema mikromreže

Model mikromreže je zamišljen kao poljoprivredno gospodarstvo čije sabirnice predstavljaju sljedeće:

- sabirnica 1: bioplinska elektrana
- sabirnica PCC: točka zajedničkog spoja mikromreže sa glavnom mrežom
- sabirnica 4: vjetroelektrana

- sabirnica 5: upravna zgrada i pomoćni objekti
- sabirnica 6: štala za muzne krave 1 na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 7: štala za muzne krave 2 na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 8: dvorana za mužnju na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 9: štala za krave u tovu

## 5.2. Podaci o mikromreži

Nazivni podaci transformatora T1 [23] i izračunati parametri transformatora prema metodi relativnih vrijednosti za baznu snagu  $S_B = 100 \text{ MVA}$  dani su u tablici 5.1.

**Tab 5.1.** Nazivni podaci transformatora T1 [23] i izračunati parametri transformatora

Nazivna snaga	Napon		Gubici		Spoj	$u_k$
	viši	niži	prazni hod	zbog tereta		
[kVA]	[kV]	[V]	[W]	[W]		[%]
1600	10	400	2550	19800	Dyn5	6
$Z_T$ [p. u.]	$R_T$ [p. u.]		$X_T$ [p. u.]		$\bar{Z}_T$ [p. u.]	
3,75	0,7734		3,67		0,7734 + j3,67	

Nazivni podaci transformatora T2 i T3 [23] i izračunati parametri transformatora prema metodi relativnih vrijednosti za baznu snagu  $S_B = 100 \text{ MVA}$  dani su u tablici 5.2.

**Tab. 5.2.** Nazivni podaci transformatora T2 i T3 [23] i izračunati parametri transformatora

Nazivna snaga	Napon		Gubici		Spoj	$u_k$
	viši	niži	prazni hod	zbog tereta		
[kVA]	[kV]	[V]	[W]	[W]		[%]
1000	10	400	1750	13500	Dyn5	6
$Z_T$ [p. u.]	$R_T$ [p. u.]		$X_T$ [p. u.]		$\bar{Z}_T$ [p. u.]	
6	1,35		5,85		1,35 + j5,85	

Nazivni podaci za kabel L2PCC [24] dani su u tablici 5.3., za kabel L36 [25] u tablici 5.4., za kabel L38 [25] u tablici 5.5., a za sve ostale kabele [25] u tablici 5.6. Duljine kabela dane su u tablici 5.7.

**Tab. 5.3.** Nazivni podaci kabela L2PCC [24]

Mjesto polaganja i vrsta vodiča		Presjek vodiča [mm <sup>2</sup> ]	Strujno opterećenje [A]	Nazivni napon kabela [kV]	Istosmjerni otpor na 20 °C [Ω/km]	Kapacitet [μF / km]	Induktivitet [mH/km]
Zemlja	Aluminij	35	165	6/10	0,868	0,236	0,63
Jedinična susceptacija [μS/km]				Jedinična reaktancija [Ω/km]			
74,14				0,1979			

**Tab. 5.4.** Nazivni podaci za kabel L36 [25]

Mjesto polaganja i vrsta vodiča		Presjek vodiča [mm <sup>2</sup> ]	Strujno opterećenje [A]	Nazivni napon kabela [kV]	Istosmjerni otpor na 20 °C [Ω/km]	Induktivitet [mH/km]	Jedinična reaktancija [Ω/km]
Zemlja	Aluminij	150	300	0,6/1	0,206	0,232	0,073

**Tab. 5.5.** Nazivni podaci za kabel L38 [25]

Mjesto polaganja i vrsta vodiča		Presjek vodiča [mm <sup>2</sup> ]	Strujno opterećenje [A]	Nazivni napon kabela [kV]	Istosmjerni otpor na 20 °C [Ω/km]	Induktivitet [mH/km]	Jedinična reaktancija [Ω/km]
Zemlja	Aluminij	185	342	0,6/1	0,164	0,229	0,072

**Tab. 5.6.** Nazivni podaci za sve ostale kabele [25]

Mjesto polaganja i vrsta vodiča		Presjek vodiča [mm <sup>2</sup> ]	Strujno opterećenje [A]	Nazivni napon kabela [kV]	Istosmjerni otpor na 20 °C [Ω/km]	Induktivitet [mH/km]	Jedinična reaktancija [Ω/km]
Zemlja	Aluminij	120	245	0,6/1	0,253	0,255	0,080

**Tab. 5.7.** Duljine kabela

Kabel	L2PCC	L34a	L34b	L35	L36	L38	L57	L67	L89
Duljina [m]	200	150	150	65	55	70	83	90	68

Podaci o maksimalnoj proizvodnji pojedinih generatora mikromreže dani su u tablici 5.8., a podaci o maksimalnoj potrošnji pojedinih trošila dani su u tablici 5.9. Satna proizvodnja FN-a dana je u tablici 5.10., a satna potrošnja trošila dana je u tablici 5.11.

**Tab. 5.8.** *Maksimalna proizvodnja pojedinih generatora*

Generator	Proizvodnja (max,)	
	P [kW]	Q [kvar]
G1 (BP)	[0,300]	[-150,150]
G2 (FN)	[0,80]	-
G3 (VE)	[0,250]	[-225,225]
G4 (FN)	[0,70]	-
G5 (FN)	[0,100]	-

**Tab. 5.9.** *Maksimalna potrošnja pojedinih trošila*

Trošilo	Potrošnja (max,)	
	P [kW]	Q [kvar]
L1	30	6,09
L2	150	30,30
L3	60	2,23
L4	150	30,30
L5	100	30,30
L6	125	30,30

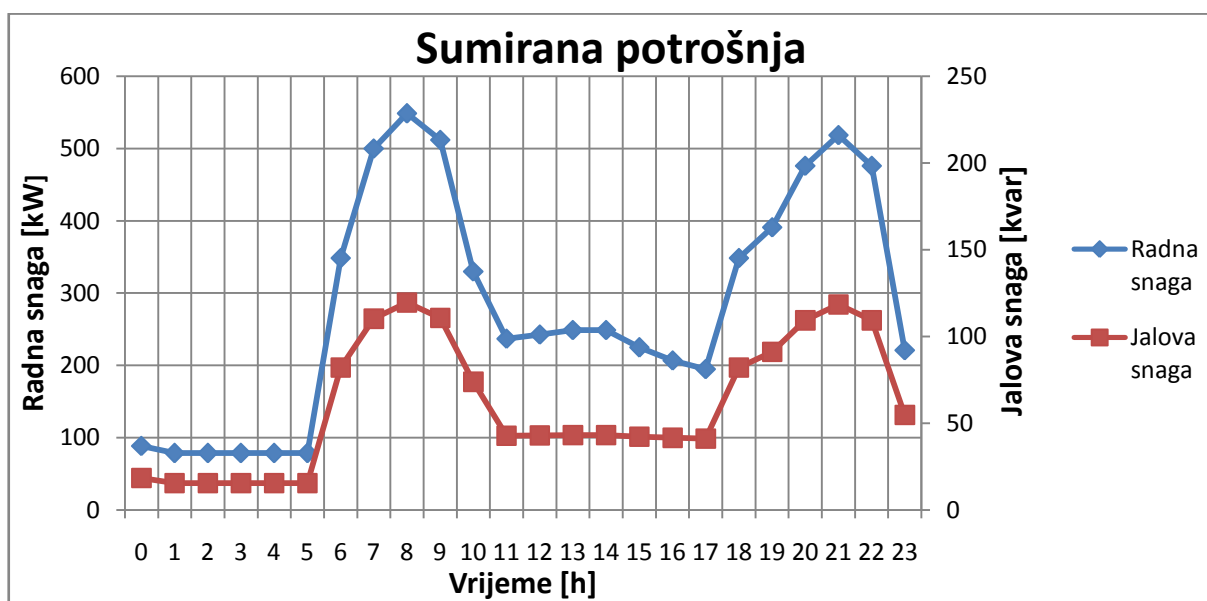
**Tab. 5.10.** *Satna proizvodnja FN-a*

Vrijeme [h]	PG5 [kW]	PG2 [kW]	PG4[kW]
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0,74	0,59	0,52
6	8,75	7	6,12
7	25,55	20,44	17,88
8	42,22	33,78	29,55
9	56,31	45,04	39,41
10	66,62	53,29	46,64
11	73,29	58,63	51,31
12	76,91	61,53	53,84
13	76,84	61,47	53,79
14	73,1	58,46	51,15
15	64,44	51,55	45,11
16	53,12	42,49	37,18
17	38,38	30,71	26,87
18	18,54	14,835	12,98
19	2,8	2,24	1,96
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0

**Tab. 5.11.** Satna potrošnja trošila

Vrijeme [h]	$P_{L2}$ [kW]	$Q_{L2}$ [kvar]	$P_{L3}$ [kW]	$Q_{L3}$ [kvar]	$P_{L4}$ [kW]	$Q_{L4}$ [kvar]	$P_{L5}$ [kW]	$Q_{L5}$ [kvar]	$P_{L6}$ [kW]	$Q_{L6}$ [kvar]
0	15	3,03	6	0,223	15	3,03	10	3,03	12,5	3,03
1	15	3,03	6	0,223	15	3,03	0	0	12,5	3,03
2	15	3,03	6	0,223	15	3,03	0	0	12,5	3,03
3	15	3,03	6	0,223	15	3,03	0	0	12,5	3,03
4	15	3,03	6	0,223	15	3,03	0	0	12,5	3,03
5	15	3,03	6	0,223	15	3,03	0	0	12,5	3,03
6	75	15,15	6	0,223	75	15,15	100	30,3	62,5	15,15
7	120	24,24	30	1,115	120	24,24	100	30,3	100	24,24
8	135	27,27	36	1,338	135	27,27	100	30,3	112,5	27,27
9	120	24,24	42	1,561	120	24,24	100	30,3	100	24,24
10	60	12,12	30	1,115	60	12,12	100	30,3	50	12,12
11	52,5	10,605	48	1,784	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
12	52,5	10,605	54	2,007	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
13	52,5	10,605	60	2,23	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
14	52,5	10,605	60	2,007	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
15	52,5	10,605	36	1,338	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
16	52,5	10,605	18	0,669	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
17	52,5	10,605	6	0,223	52,5	10,605	10	3,03	43,75	10,605
18	75	15,15	6	0,223	75	15,15	100	30,3	62,5	15,15
19	90	18,18	6	0,223	90	18,18	100	30,3	75	18,18
20	120	24,24	6	0,223	120	24,24	100	30,3	100	24,24
21	135	27,27	6	0,223	135	27,27	100	30,3	112,5	27,27
22	120	24,24	6	0,223	120	24,24	100	30,3	100	24,24
23	30	6,06	6	0,223	30	6,06	100	30,3	25	6,06

Na slici 5.2. prikazana je sumirana satna potrošnja svih trošila, to jest dnevni dijagram opterećenja mikromreže (L1 ima maksimalnu potrošnju za sva 24 sata).



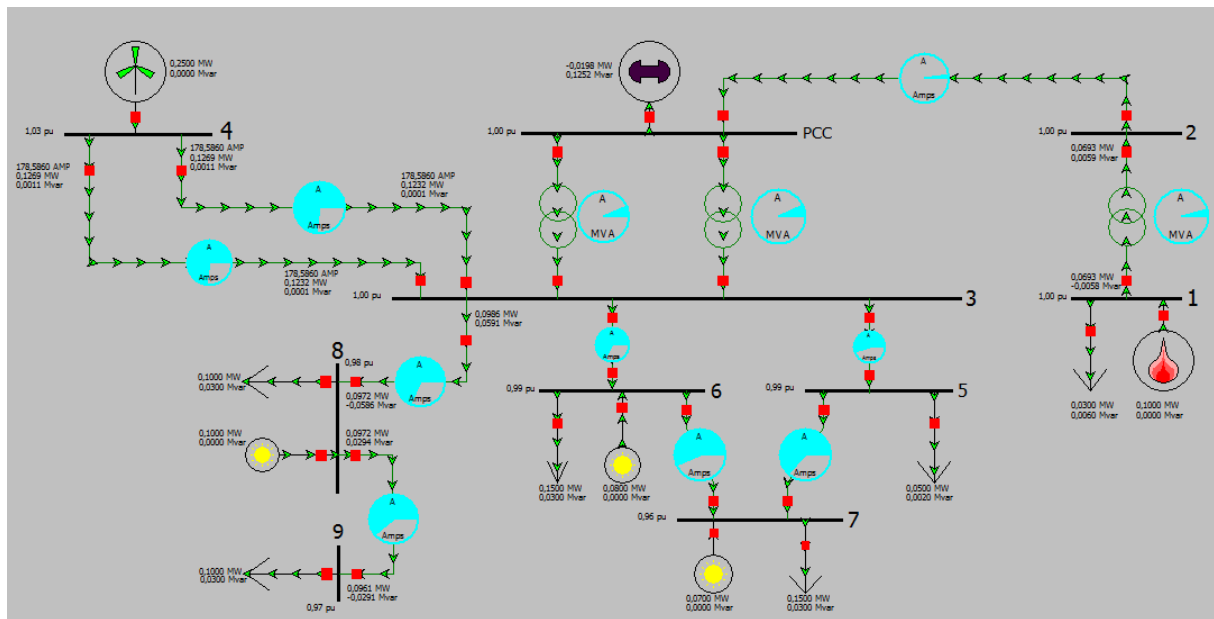
**Sl. 5.2.** Sumirana satna potrošnja svih trošila



## 5.3. Rezultati simulacije

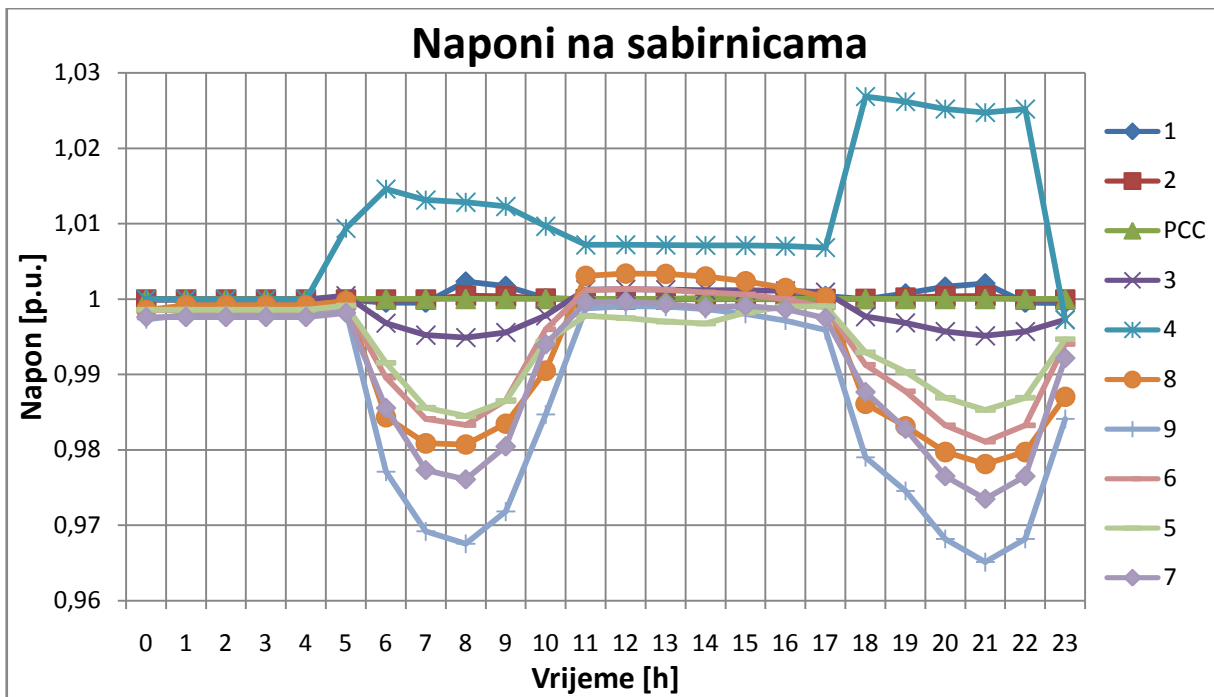
### 5.3.1. Rezultati za mrežni način rada mikromreže

Prva simulacija predstavlja rad mikromreže kada je ona povezana sa glavnom mrežom. Model takve simulacije u programu *Power World* prikazan je na slici 5.3.

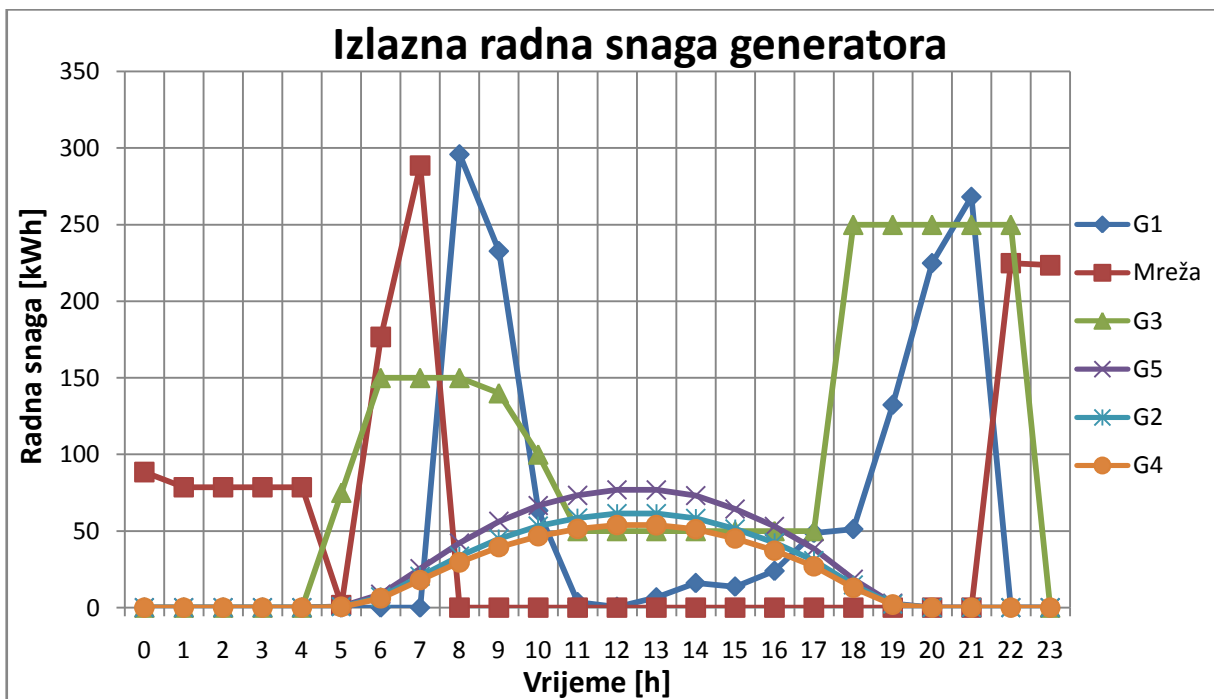


Sl. 5.3. Model mikromreže u programu *Power World*

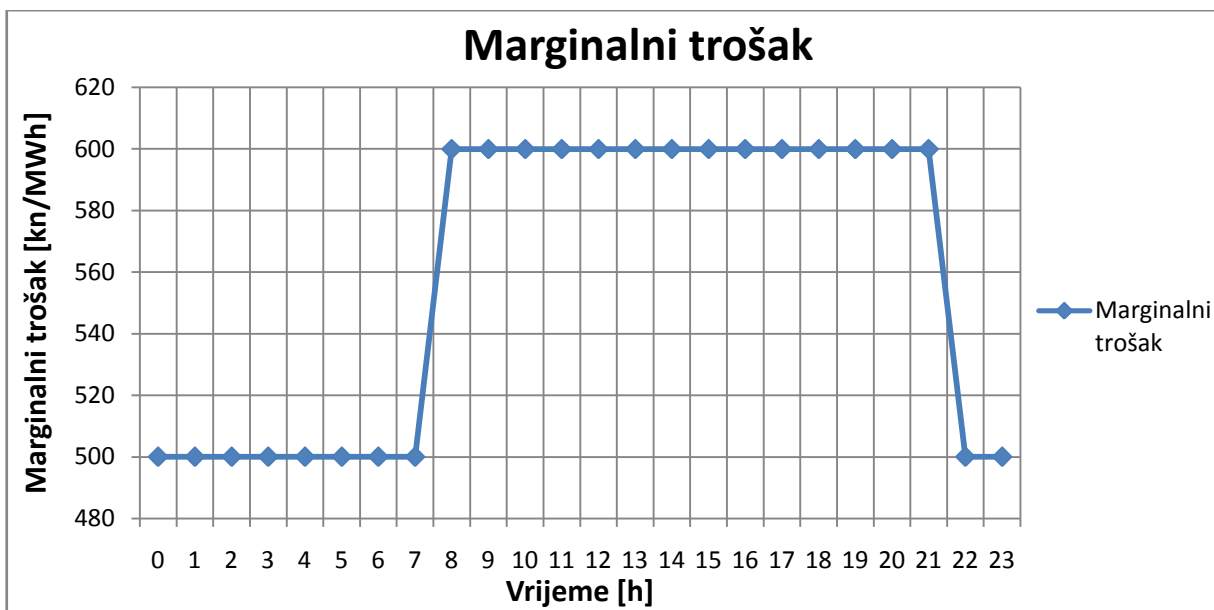
Za potrebe ove simulacije u programu su provedeni optimalni tokovi snaga za jedan dan, to jest za 24 sata. To znači da će program odrediti koji će generator i koliko proizvoditi na način da budu zadovoljena sva ograničenja u tehničkom pogledu, ali uz najmanje troškove. Da bi to program mogao napraviti potrebno je unijeti troškove proizvodnje pojedinih generatora. Ti troškovi su uglavnom troškovi goriva pa se oni kod VE i FN-a zanemaruju. Dakle preostaju još bioplinska elektrana i glavna mreža. Troškovi proizvodnje bioplinske elektrane prema literaturi [26] iznose 0,6 kn/kWh odnosno 600 kn/MWh. Kod glavne mreže uzeta je približna cijena po kojoj distribucijski operater prodaje električnu energiju poduzetnicima i ona otprilike iznosi 0,5 kn/kWh za nižu tarifu odnosno 1 kn/kWh za višu tarifu. Za ljetno računanje vremena niža tarifa traje od 22-og do 8-og sata, a viša tarifa od 8-og do 22-og sata. Osim unesene cijene/troškova unesena je i proizvodnja i potrošnja za svaki sat te su dobiveni sljedeći rezultati: naponi na sabirnicama prikazani na slici 5.4., proizvedena radna snaga generatora i radna snaga iz glavne mreže prikazane na slici 5.5, marginalni trošak prikazan na slici 5.6. i djelatni gubici prikazani na slici 5.7.



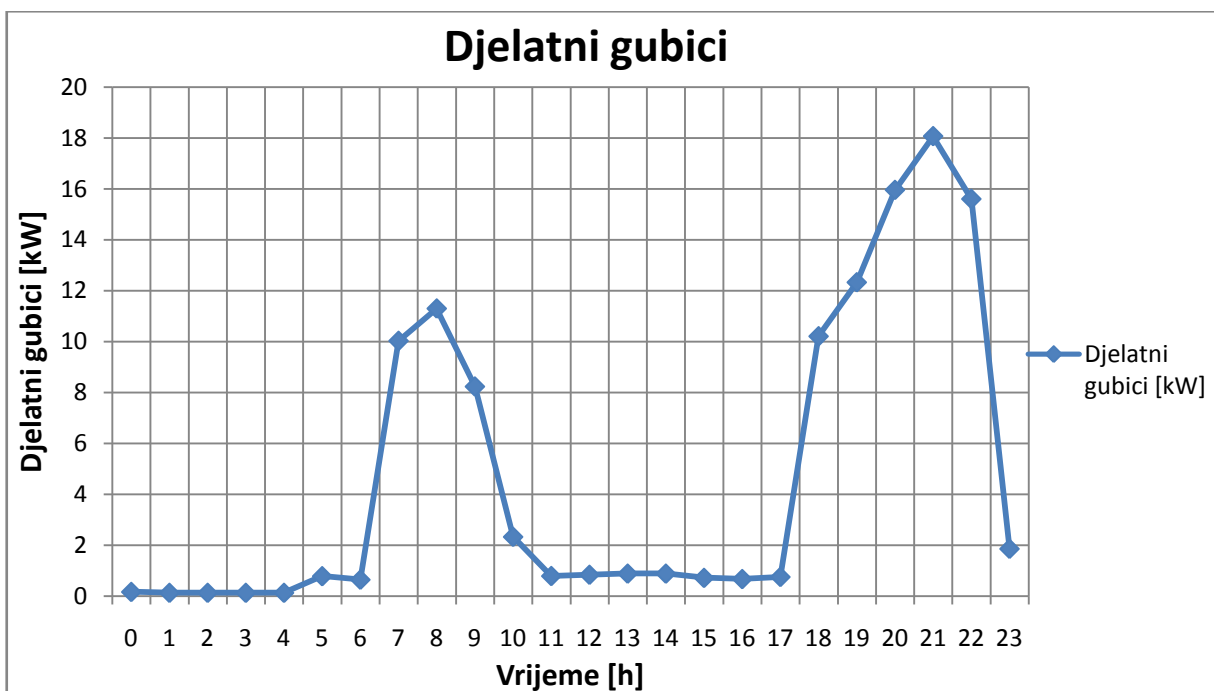
Sl. 5.4. Naponi na sabirnicama za mrežni način rada



Sl. 5.5. Izlazna radna snaga generatora i snaga iz mreže za mrežni način rada



Sl. 5.6. Marginalni trošak za mrežni način rada



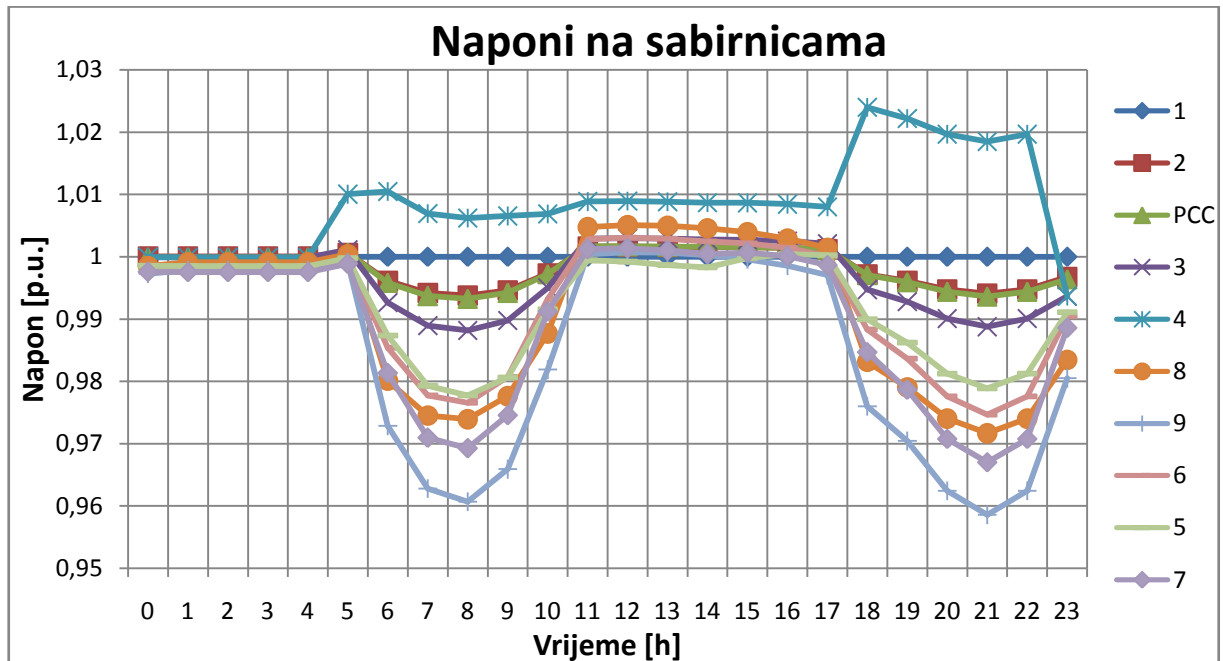
Sl. 5.7. Djelatni gubici za mrežni način rada

Iz rezultata se vidi da su naponi na sabirnicama najmanji između 5-og i 11-og te između 17-og i 23-eg sata. Razlog tomu je što je u to vrijeme najveće opterećenje u mikromreži pa su i padovi napona na vodovima tada najveći. Nadalje, vidi se da se snaga iz mreže uzima od 22-og do 8-og sata, a između 8-og i 22-og sata uzima se iz bioplinske elektrane. Razlog tomu je što je od 22-og do 8-og sata jeftinije uzimati energiju iz mreže, a između 8-og i 22-og sata jeftinije iz

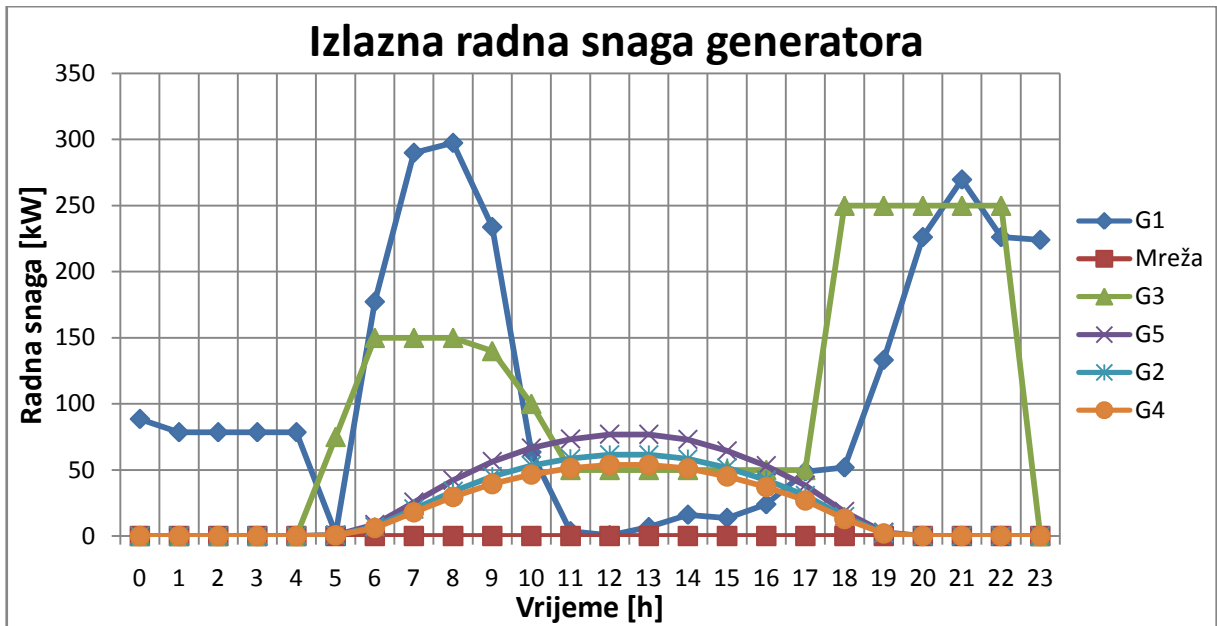
bioplinske elektrane što se vidi na slici 5.6. Djelatni gubici su najveći za vrijeme najvećih opterećenja mikromreže jer su tada struje kroz vodove najveće.

### 5.3.2. Rezultati za otočni način rada kada bioplinska elektrana regulira napon

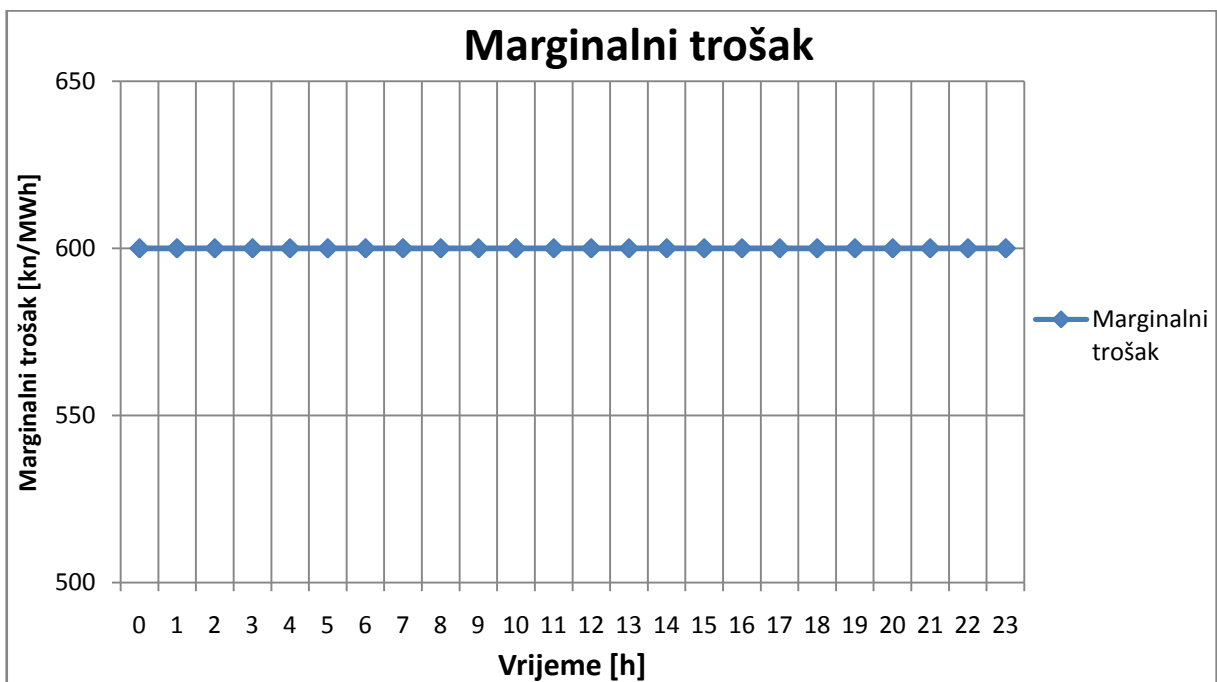
Druga simulacija prikazuje pogon mikromreže pri kojemu je ona odvojena od glavne mreže odnosno prikazuje otočni pogon. Model ove simulacije izgleda isto kao i onaj na slici 5.3. samo što je isključen prekidač glavne mreže. Dobiveni su sljedeći rezultati: naponi na sabirnicama prikazani na slici 5.8., proizvedena radna snaga generatora prikazana na slici 5.9, marginalni trošak prikazan na slici 5.10. i djelatni gubici prikazani na slici 5.11.



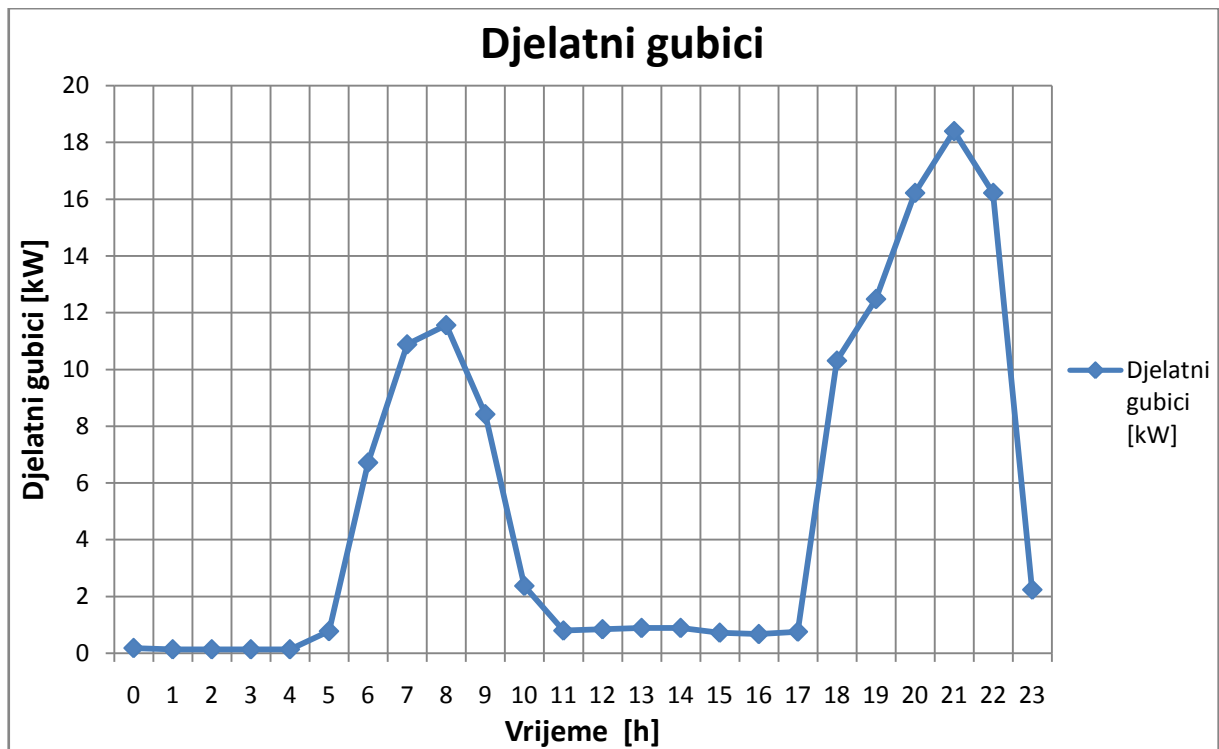
Sl. 5.8. Naponi na sabirnicama za otočni pogon kada bioplinska elektrana regulira napon



**Sl. 5.9.** Izlazna radna snaga generatora za otočni pogon kada bioplinska elektrana regulira napon



**Sl. 5.10.** Marginalni trošak za otočni pogon kada bioplinska elektrana regulira napon

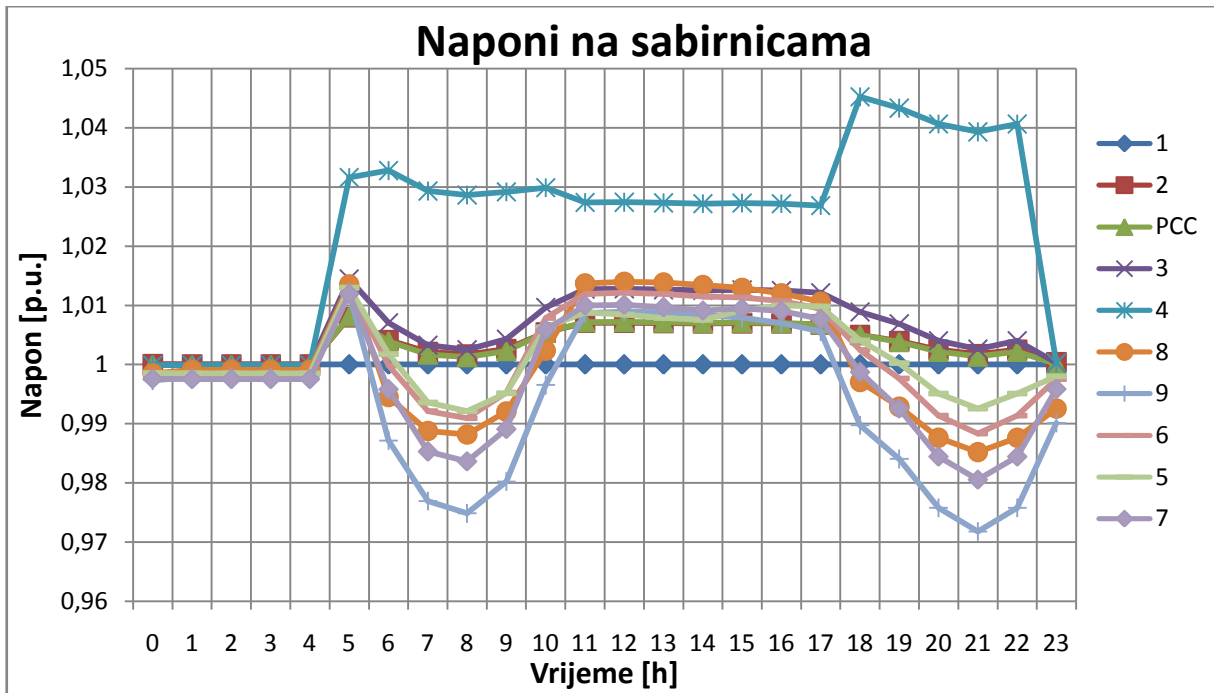


**Sl. 5.11.** Djelatni gubici za otočni pogon kada bioplinska elektrana regulira napon

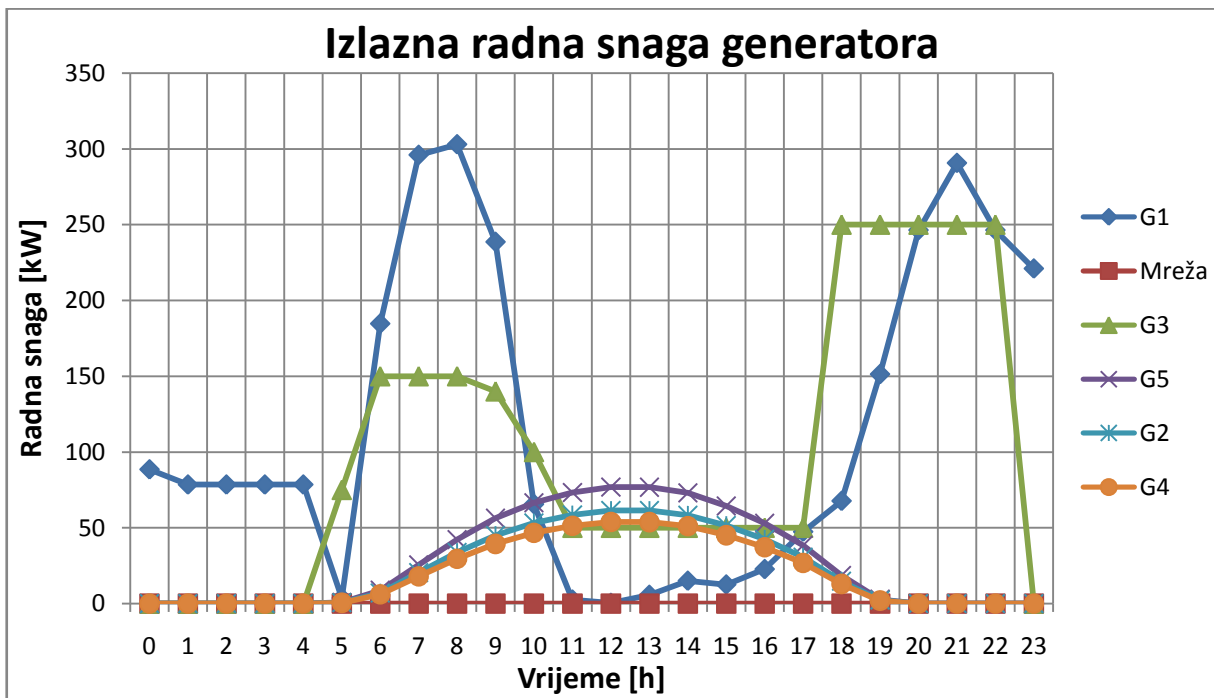
Kada se usporede rezultati ove simulacije i prošle vidi se da su naponi bolji u prvom slučaju u odnosu na drugi tj. manji su padovi napona. Iz slike 5.9. vidi se da se radi o otočnom pogonu jer je snaga glavne mreže jednaka nuli, a bioplinska elektrana pokriva proizvodnju koja fali iz ostalih OIE za zadovoljavanje potrošnje i gubitaka. Marginalni trošak je sada za sva 24 sata jednak i iznosi 600 kn/MWh pošto je glavna mreža odvojena od mikromreže. Djelatni gubici su zanemarivo veći u ovom slučaju u odnosu na prvi.

### 5.3.2. Rezultati za otočni način rada kada bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon

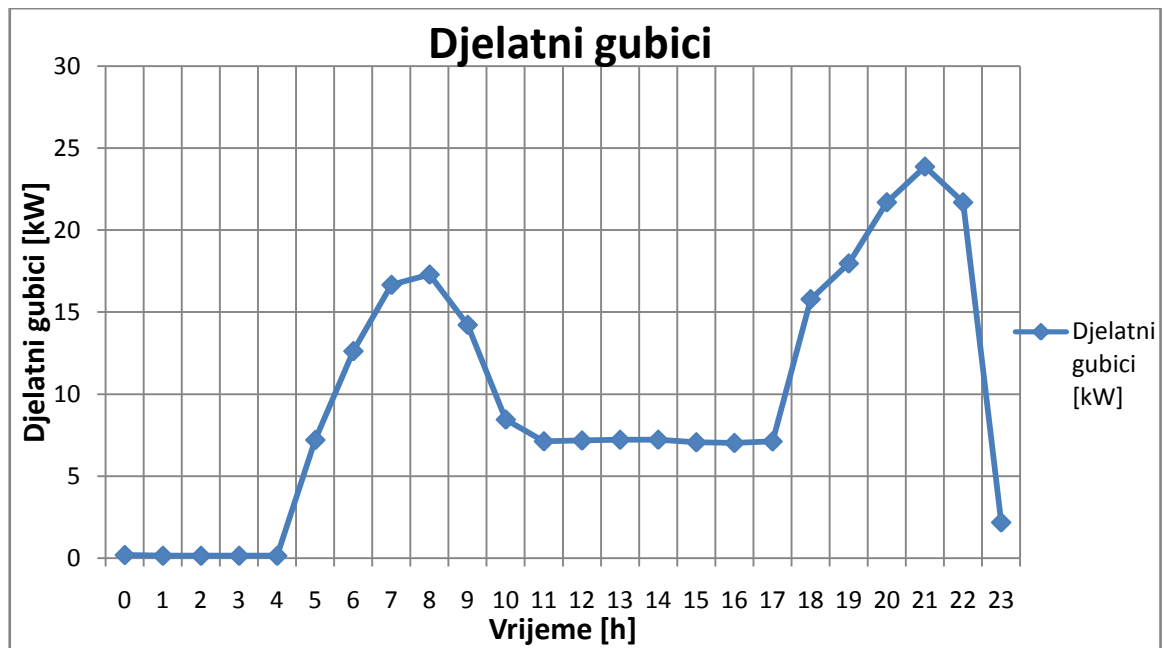
Treća simulacija predstavlja otočni pogon mikromreže u kojem bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon. Na sabirnici vjetroelektrane je podešeno da ona održava napon na 1,05 p.u. Za ovu simulaciju dobiveni su sljedeći rezultati: naponi na sabirnicama prikazani na slici 5.12., proizvedena radna snaga generatora prikazana na slici 5.13 i djelatni gubici prikazani na slici 5.14.



Sl. 5.12. Naponi na sabirnicama za otočni pogon kada bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon



Sl. 5.13. Proizvedena radna snaga generatora za otočni pogon kada bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon



**Sl. 5.14.** Djelatni gubici za otočni pogon kada bioplinaska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon

Kada se usporedi ovaj slučaj sa prva dva vidi se da su naponi ovdje najbolji. Razlog tomu je dodatna regulacija napona koju pruža VE proizvođači uz radnu i jalovu snagu. U ovom slučaju nije prikazana slika marginalnog troška jer je on isti kao i u prethodnom slučaju pošto se radi o otočnom pogonu te se uzima u obzir samo trošak bioplinaska elektrane. Može se primijetiti da su gubici u sustavu veći nego u prva dva slučaja. Razlog toga je što VE daje maksimalnu jalovu snagu u mrežu za sve sate kada proizvodi i djelatnu snagu te ta jalova snaga uzrokuje povećane djelatne gubitke. Također se vidi da sabirnica VE ne može postići podešenu vrijednost napona od 1.05 p.u. iako proizvodi svoj maksimum jalove snage. Prema tome, u ovom slučaju se regulacija napona pomoću VE ne isplati jer nije postignuto značajno poboljšanje napona i stvaraju se veći gubici, a i sama proizvodnja jalove snage znači manju proizvodnju djelatne snage. Još je bitno napomenuti da su ova dva slučaja otočnog pogona napravljena za idealan dan kada se potrošnja može pokriti sa proizvodnjom iz OIE, no ako uvjeti ne bi bili idealni (npr. ako bude oblačan dan ili nedostatak vjetra) nastao bi nedostatak proizvedene snage i takav sustav ne bi bio održiv. U tu svrhu bi u mikromrežu trebalo ugraditi pohranu energije u baterije. Na taj način bi mikromreža mogla spremati energiju u baterije kada ima višak proizvedene energije, odnosno mogla bi koristiti energiju iz baterija kada bi imala manjak proizvedene energije. Također, onda bi mogla kupiti energiju kada je cijena povoljna za kupnju i uskladištiti je ili pak prodavati uskladištenu energiju ako je cijena povoljna za prodaju.



## 6. ZAKLJUČAK

Iz teorijskog dijela može se zaključiti da su današnje vjetroelektrane značajno napredovale i da nude mogućnost rada pri širokom rasponu brzina i mogućnost odvojenog upravljanja radnom i jalovom snagom što olakšava njihovu integraciju u moderni elektroenergetski sustav. Tradicionalna mreža je zastarjela te značajno utječe na zagađenje okoliša. Zbog centralizirane proizvodnje takve mreže energija se prenosi na velike udaljenosti što uzrokuje gubitke u sustavu. Pametne mreže su zanimljiv koncept koji nastoji povezati OIE na distribucijskoj razini s komunikacijskim sustavom upravljanja potrošnjom. Biti će potrebno neko vrijeme da takav koncept „zaživi“ u značajnoj mjeri. Dosada najbolju alternativu ili uvod ka pametnim mrežama pružaju mikromreže koje uglavnom rade spojene s glavnom mrežom, ali mogu i raditi samostalno pomoću OIE i pohrane energije u baterije. Iz praktičnog dijela može se zaključiti da je najbolji slučaj kada mikromreža radi spojena sa glavnom mrežom. U tom slučaju su naponi bolji nego u drugom, a i marginalni trošak je najmanji jer se može kombinirati da li je jeftinije kupiti energiju iz mreže ili je jeftinije tu energiju proizvesti. Pokazalo se je da je u noćnim satima dok traje niža tarifa povoljnije energiju uzimati iz mreže, a za vrijeme više tarife da je povoljnije energiju proizvoditi iz bioplinske elektrane. U drugom slučaju je pokazano da mikromreža može raditi otočno. Tada su naponi nešto lošiji nego u prvom slučaju, a i marginalni trošak je veći. No, takav način rada povećava pouzdanost i omogućuje rad mikromreže u slučaju kvara glavne mreže. U trećem slučaju su naponi najpovoljniji, ali zbog regulacije napona od strane vjetroelektrane nastaju veći djelatni gubici. Bitno je za zaključiti da mikromreža ne može funkcionirati bez pohrane energije pri otočnom pogonu, jer u slučaju nepovoljnog vremena može se dogoditi da proizvodnja naglo padne i u otočnom pogonu takva situacija ne bih bila održiva jer se manjak energije ne bi mogao nadoknaditi. Sa pohranom energije mikromreža može skladištiti energiju kada ima viška proizvedene energije te ju iskoristiti onda kada ima manjak energije.

## LITERATURA

- [1] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants, 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, str. 1 - 3, Calgary, Kanada, 2009. godine.
- [2] N. Dizdarević, M. Majstorović, S. Žutobradić, Distribuirana proizvodnja električne energije, Energija, br./5, godina 52 (2003), str. 321 - 327, Zagreb, listopad 2003. godine, dostupno na: <http://www.hep.hr/UserDocsImages/dokumenti/Energija/0305.pdf>, (11.06.2019.)
- [3] Lj. Majdandžić, N. Vištica, Distribuirana proizvodnja električne energije fotonaponskim sustavom, Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 1. savjetovanje, str. 2 - 3, Šibenik, 2008. godine, dostupno na: <http://www.ho-cired.hr/referati/SO4-11.pdf>, (11.06.2019.)
- [4] B. M. Buchholz, Z. Styczynski, Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer-Verlag, 2014. godine
- [5] D. Mah, P. Hills, V. O. K. Li, R. Balme, Smart Grid Applications and Developments, Springer-Verlag, 2014. godine
- [6] J. Momoh, Smart Grid – Fundamentals of Design and Analysis, John Wiley & Sons, 2012. godine
- [7] N. Hatziargyriou, Microgrids – Architectures and Control, John Wiley & Sons – IEE, 2014. godine
- [8] L. Berkeley Nacionalni Laboratorij u SAD-u, Microgrids at Berkeley Lab: About Microgrids, 2019. godine, dostupno na: <https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids>, (15.06.2019.)
- [9] A. A. Bashir, M. Pourakbari-Kasmaei, J. Contreras, M. Lehtonen, A novel energy scheduling framework for reliable and economic operation of islanded and grid-connected microgrids, Electric Power Systems Research, Vol. 171, str. 85 – 96, Elsevier Publishing, Amsterdam, Nizozemska, 2019. godine
- [10] O.D. Melgar Dominguez, M. Pourakbari-Kasmaei, J.R.S. Mantovani, Adaptive robust short-term planning of electrical distribution systems considering siting and sizing of renewable energy-based DG units, IEEE Trans. Sustain. Energy 10, str. 158 - 169, 2019. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2828778>, (01.07.2019.)
- [11] M.F. Zia, E. Elbouchikhi, M. Benbouzid, Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects, Appl. Energy 222, str. 1033 – 1055, 2018. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>, (01.07.2019.)

- [12] T. Müller, D. Möst, Demand response potential: available when needed?, Energy Policy 115, str. 181 – 198, 2018. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.025>, (01.07.2019.)
- [13] M. Ali, A. Safdarian, M. Lehtonen, Demand response potential of residential HVAC loads considering users preferences, IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur., str. 1 – 6, 2014. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2014.7028883>, (01.07.2019.)
- [14] M. Ali, J. Jokisalo, K. Siren, A. Safdarian, M. Lehtonen, A user-centric demand response framework for residential heating, ventilation, and air-conditioning load management, Electr. Power Compon. Syst. 44, str. 99 – 109, 2016. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1101726>, (03.07.2019)
- [15] S. Küfeoğlu, M. Lehtonen, Comparison of different models for estimating the residential sector customer interruption costs, Electr. Power Syst. Res. 122, str. 50 – 55, 2015. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.026>, (03.07.2019)
- [16] M. Ali, M. Humayun, M. Degefa, A. Alahäivälä, M. Lehtonen, A. Safdarian, A framework for activating residential HVAC demand response for wind generation balancing, 2015 IEEE Innov. Smart Grid Technol. – Asia (ISGT ASIA), str. 1 – 6, 2015. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2015.7387046>, (03.07.2019)
- [17] S. Shao, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, Development of physical-based demand response-enabled residential load models, IEEE Trans. Power Syst. 28, str. 607 – 614, 2013. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2208232>, (03.07.2019)
- [18] M. Ali, M.Z. Degefa, M. Humayun, A. Safdarian, M. Lehtonen, Increased utilization of wind generation by coordinating the demand response and real-time thermal rating, IEEE Trans. Power Syst. 31, str. 3737 – 3749, 2016. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2498899>, (05.07.2019)
- [19] K. Ahmed, P. Pylsy, J. Kurnitski, Hourly Consumption Profiles of Domestic Hot Water for Finnish Apartment Buildings (2016), 2016. godine, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/307906707\\_Hourly\\_Consumption\\_Profiles\\_of\\_Domestic\\_Hot\\_Water\\_for\\_Finnish\\_Apartment\\_Buildings](https://www.researchgate.net/publication/307906707_Hourly_Consumption_Profiles_of_Domestic_Hot_Water_for_Finnish_Apartment_Buildings), (05.07.2019)
- [20] Finski meteorološki institut, dostupno na: <http://en.ilmatieteenlaitos.fi/>, (05.07.2019)
- [21] J. Ekström, M. Koivisto, I. Mellin, R.J. Millar, M. Lehtonen, A statistical model for hourly large-scale wind and photovoltaic generation in new locations, IEEE Trans. Sustain. Energy 8, str. 1383 – 1393, 2017. godine, dostupno na: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2682338>, (05.07.2019)
- [22] Nord Pool, dostupno na: [www.nordpoolspot.com](http://www.nordpoolspot.com), (05.07.2019)

- [23] Skupina 111 autora, odnosno koautora, Končar - tehnički priručnik peto izdanje, KONČAR Elektroindustrija d.d., Zagreb, 1991. godine
- [24] ELKA katalog, Energetski srednjenaponski kabeli s XLPE izolacijom za napone do 36 kV, Elka kabeli d.o.o., dostupno na: <https://elka.hr/category/proizvodi/energetski-srednjenaponski-kabeli-za-napone-do-36-kv/>, (02.09.2019.)
- [25] ELKA katalog, Energetski i signalni kabeli za napone do 1 kV, Elka kabeli d.o.o., dostupno na: <https://elka.hr/category/proizvodi/energetski-i-signalni-kabeli-do-1-kv/>, (02.09.2019.)
- [26] G. Knežević, D. Topić, K. Fekete, M. Žnidarec, Tehno-ekonomska analiza različitih tehnologija proizvodnje električne energije iz biomase i bioplina, 16. skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, 9. međunarodni skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, 10. str., Osijek, 2018. godine

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu objašnjeno je što su to vjetroelektrane kao i koje su karakteristike i tipovi vjetroturbina. Prikazan je razvoj elektroenergetskih mreža gdje su objašnjene tradicionalne (klasične) mreže, aktivne mreže, pametne mreže i mikromreže. Obraden je primjer optimizacije mikromreže koja ima mogućnost razmjene snage s mrežom te koja se sastoji od OIE, dizel generatora i uređaja za pohranu energije. Dobiveni rezultati pokazuju kako je najpovoljniji slučaj kada mikromreža radi spojena s mrežom uz primjenu odgovora na potražnju jer su tada dobiveni najmanji troškovi, najmanja vjerojatnost izgubljenog opterećenja, najmanja potrošnja te najmanja izgubljena proizvodnja i potrošnja. Provedena je praktična simulacija rada mikromreže gdje su promatrana tri slučaja: mrežni način rada, otočni način rada kada bioplinska elektrana regulira napon i otočni način rada kad bioplinska elektrana i vjetroelektrana reguliraju napon. Dobiveni rezultati dovode do zaključka da je najpovoljniji slučaj mrežni način rada s obzirom na omjer napona na sabirnicama, gubitaka u sustavu i troškova.

Ključne riječi: vjetroelektrana, mikromreža

## **ABSTRACT**

This thesis explains what wind farms are and what are the characteristics and types of wind turbines. The development of power grids is shown where traditional (classic) networks, active networks, smart grids and microgrids are explained. An example of microgrid optimization that has the ability to exchange power with the network and consisting of RES, diesel generator and energy storage device is discussed. The results obtained show that the most favorable case is when the microgrid works connected to the grid with the application of demand response since then the lowest costs, the least lost of load probability, the lowest consumption and the least lost production and consumption are obtained. A practical simulation of the operation of the microgrid was performed, where three cases were observed: grid-connected mode, islanded mode when the biogas power plant regulates voltage and islanded mode when the biogas power plant and wind farm regulate voltage. The obtained results lead to the conclusion that the most favorable case is the grid-connected mode with regard to the ratio of voltage on the buses, system losses and costs.

Key words: wind farm, microgrid

## **ŽIVOTOPIS**

Božidar Horvatović rođen je 28. studenog 1995. godine u Sisku. Završio je osnovnu školu Stjepana Kefelje u Kutini. Nakon završene osnovne škole upisao je Tehničku školu Kutina, smjer tehničar za električne strojeve s primijenjenim računarstvom. Srednju školu završio je 2014. godine i upisao preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na kojemu odabire smjer elektroenergetika. Nakon završenog preddiplomskog sveučilišnog studija upisuje 2017. godine diplomski sveučilišni studij elektrotehnike na istom fakultetu na kojemu odabire smjer elektroenergetika te izborni blok elektroenergetski sustav.