

Tržište električne energije u sustavu sa mikromrežama

Barišić, Vinko

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:261225>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE U SUSTAVU SA
MIKROMREŽAMA**

Diplomski rad

Vinko Barišić

Osijek, 2020.

1. UVOD

Današnji stil života bio bi nezamisliv da ne postoji električna energija. Zbog takve ovisnosti o električnoj energiji potrebno je konstantno unaprjeđivati elektroenergetski sustav, tj. svaku njegovu komponentu krenuvši od proizvodnje pa do prijenosa i distribucije. Unutar ovoga procesa događa se mnogo koraka koje krajnji potrošač ne može vidjeti, a svi oni utječu na cijenu električne energije. Unutar ovoga diplomskoga rada biti će opisane vrste tržišta električne energije koje su djelovale u prošlosti, kao i one koje djeluju sada [5]. Opisati će se mogućnosti i prilike koje imaju kupci električne energije, a također će se objasniti mogući načini prodaje električne energije iz distribuiranih izvora, kao i problemi klasičnog tržišta električne energije [10]. Objasniti će se koncept mikromreže i njezine prednosti [1], [2], [3], ali i zašto je potrebna implementacija distribuiranih izvora energije. Potrebno je izmijeniti postojeće tržište električne energije kako bi se olakšala implementacija distribuiranih izvora električne energije i omogućilo stvaranje većeg broja mikromreža. Zbog vrste distribuiranih izvora tj. zbog toga što im je izvor energije uglavnom obnovljivi izvor, potiče se njihova upotreba novčanim sredstvima o čemu će također biti govora [11], [12]. Kako se unutar mikromreže nalaze distribuirani izvori električne energije, mikromreža ima mogućnost prodaje električne energije vanjskoj opskrbenj mreži. Za prijenos električne energije unutar ili van mikromreže je potreban određeni sustav koji će se baviti prijenosom i mjerenjem prodane i/ili kupljene količine električne energije na temelju optimizacije sustava [13], [14]. Stoga će ovaj diplomski rad prikazati jednu od mogućih tehnologija koja se još razvija, ali već omogućava takvu vrstu transakcija električne energije [15].

U diplomskome radu potrebno je opisati vrste tržišta električne energije, kao i njihovo trenutno stanje. Potrebno je obrazložiti potrebne promjene kako bi se omogućila lakša implementacija distribuiranih izvora električne energije i nastanak većeg broja mikromreža. Biti će prikazana simulacija koja prikazuje kako je moguće pojedine mikromreže, ali i cijeli sustav povezanih mikromreža sa vanjskom opskrbenom mrežom optimizirati zbog cilja smanjenja cijene električne energije.

2. PROŠLOST MIKROMREŽA UNUTAR TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Povećanjem životnog standarda i modernizacijom društva pojavljuje se sve veća potreba za električnom energijom, a zbog zagađenja okoliša se pokušava što više energije generirati iz obnovljivih izvora energije koji se spajaju na distributivnu mrežu pa se nazivaju distribuirani izvori električne energije. Spajanjem distribuiranih izvora električne energije sa varijabilnim potrošačima u jedan sustav uz mogućnost implementacije spremnika električne energije dobije se mikromreža [1]. Mikromreža može raditi u otočnom pogonu ili biti spojena na vanjsku opskrbnu mrežu kako bi u trenucima kada ne može pokriti vlastitu potrošnju kupila električnu energiju. Pri trenucima kada mikromreža ima višak generirane električne energije, može izvršiti prodaju te energije u vanjsku opskrbnu mrežu [2]. Uz to što daje električnu energiju, ukoliko se unutar mikromreže nalazi generator distribuiranog izvora električne energije sa turbinom koja na svome izlazu daje vruću vodu dostatnu za opskrbljivanje mikromreže toplinskom energijom, takva mikromreža tada postaje CHP (eng. Combined heat and power) sustav [3]. Svaka mikromreža se nalazi unutar neke vrste tržišta električne energije koje određuje kupovne i prodajne cijene. U svijetu postoje 4 modela tržišta električne energije, a najzastupljeniji je model maloprodajne konkurencije (eng. Retail competition) koji se koristi i u Republici Hrvatskoj [5]. Električnom energijom se može trgovati na više načina, jedan način je na burzi električne energije, a drugi je na bilateralnom tržištu koje se još naziva OTC (eng. *Over the counter market*) [9] [10]. Zbog već spomenutog zagađenja okoliša, potiče se proizvodnja iz elektrana na obnovljive izvore energije uz pomoć određenih modela poticaja [11], [12]. Unutar mikromreže je potrebno upravljati tokovima snaga električne energije kako bi se optimizirala proizvodnja i potrošnja, te postigao najveći stupanj korisnosti mikromreže. Za to postoji više metoda ili sustava upravljanja kao što su npr. OPF (eng. *Optimal power flow*) metoda [13], više-agentski sustav upravljanja [14], pametni sustav upravljanja električnom i toplinskom energijom [16]. Kao jedna od mogućnosti koja bi olakšala razmjenu i prodaju/kupnju električne energije, nameće se Blockchain tehnologija. Ova vrsta tehnologije je još u razvoju, ali bi omogućila automatsko spajanje kupca sa proizvođačem, mjerenje prodane ili kupljene količine električne energije, sustav naplate, te izostanak treće stranke kao posrednika u procesu trgovanja električnom energijom [15], [17], [18].

3. MIKROMREŽE

Moderno društvo je vrlo ovisno o sigurnoj i konstantnoj opskrbi električnom energijom. Zbog starenja trenutne infrastrukture prijenosne i distribucijske mreže, raste zabrinutost za daljnju sigurnost i pouzdanost opskrbom kao i kvalitetom električne energije. Buduće elektroenergetske mreže će se morati naučiti nositi sa promjenama u tehnologiji, društvu, okolišu i ekonomiji. Sadašnje elektroenergetske mreže trebaju evoluirati u pametne mreže (eng. *smart grids*) koje će zadovoljiti zahtjeve održivosti, ekonomičnosti te sigurnosti opskrbe električnom energijom. Potrebno je naglasiti da su visokonaponske prijenosne mreže oduvijek bile „pametne“ dok distribucijske tek trebaju postati kako bi se [1]:

- Olakšao pristup distribuiranoj proizvodnji električne energije temeljenoj na obnovljivim izvorima energije koja bi bila distribuirana samostalno ili od strane lokalne distributivne mreže
- Omogućio lokalni energetske menadžment u interakciji sa krajnjim korisnicima putem pametnog sustava mjerenja
- Upotrijebile tehnologije koje se već koriste u prijenosnim mrežama kao što su dinamična tehnika upravljanja, a one bi povećale razinu sigurnosti, kvalitete i pouzdanosti

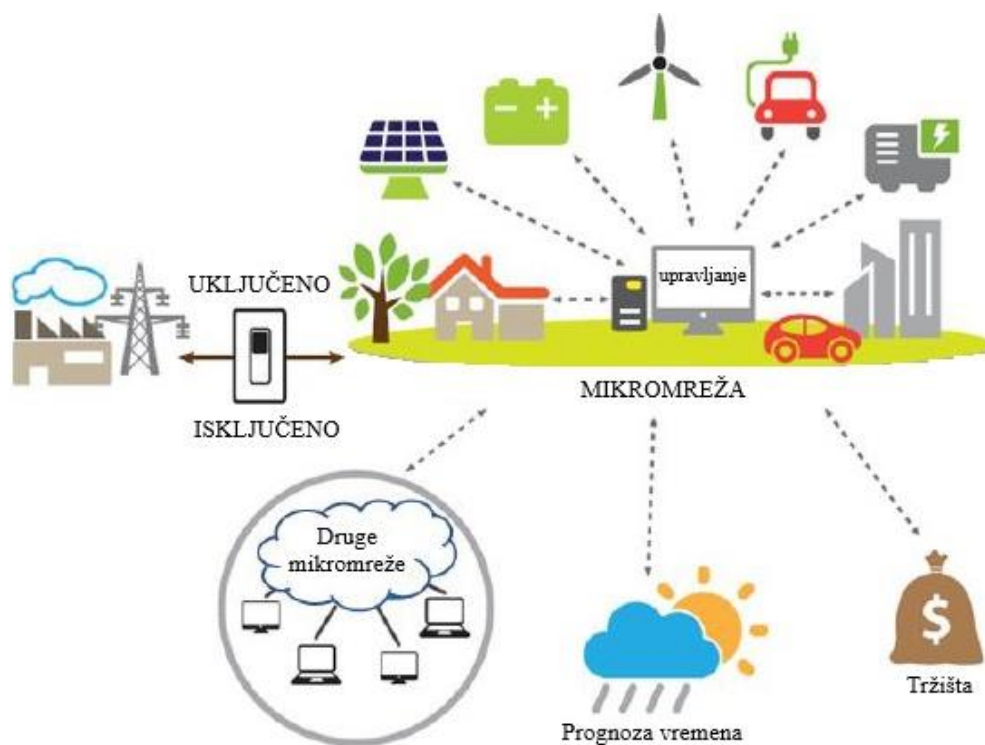
Elektroenergetske mreže su trenutno u stanju pretvorbe iz pasivnih distributivnih mreža s jednim smjerom prijenosa električne energije u stanje aktivnih distributivnih mreža sa dvosmjernim tokom električne energije. Distribucijske mreže bez distribuiranih izvora proizvodnje električne energije (npr. fotonaponskih panela, vjetroelektrana, bioplinskih elektrana...) se nazivaju pasivne mreže zbog toga što je električna energija dovedena do potrošača iz prijenosne mreže. Uvrštavanjem distribuiranih izvora proizvodnje električne energije u pasivnu mrežu, ona postaje aktivna jer se omogućava dvosmjerni prijenos električne energije u mreži. Distribuirani izvori proizvodnje se implementiraju iz više razloga. Prvi od njih je veliki porast opterećenja i smanjenje zaliha fosilnih goriva zbog kojih se ulaže u obnovljive izvore energije. Drugi razlog je smanjenje onečišćenja okoliša i globalno zagrijavanje nastalo upotrebom fosilnih goriva. Iz tih razloga se sve više implementiraju distribuirani izvori energije koji bi trebali smanjiti zagađenje i davati „čišću“ energiju [2].

Prema autoru H. Farhangi [3] može se reći: „mikromreže su međusobno povezani sustavi opterećenja i lokalne proizvodnje koji mogu raditi neovisno o elektroenergetskoj mreži (otočni pogon) ili biti spojeni na istu“ (eng. *'a microgrid is an interconnected system of loads and local generation that can operate independently of the power grid (islanded) or is attached to it (gridtied)'*).

Autor N. Hatzargyriou [1] kaže: „Mikromreže se sastoje od niskonaponskih distribucijskih sustava s distribuiranim izvorima energije (mikro-turbinama, gorivnim ćelijama, fotonaponskim ćelijama itd.), spremnika energije (baterija, superkondenzatora, zamašnjaka) i promjenjivih opterećenja. Takvi sustavi ne moraju biti automatizirani ako su povezani na mrežu, ali ako nisu povezani na mrežu tada moraju biti automatizirani. Rad mikroizvora u mreži može pružiti različite pogodnosti cjelokupnom radu sustava, ali samo ako se njime upravlja i koordinira učinkovito.“ (eng. *'Microgrids comprise LV distribution systems with distributed energy resources (DER) (microturbines, fuel cells, PV, etc.) together with storage devices (flywheels, energy capacitors and batteries) and flexible loads. Such systems can be operated in a non-autonomous way, if interconnected to the grid, or in an autonomous way, if disconnected from the main grid. The operation of microsourses in the network can provide distinct benefits to the overall system performance, if managed and coordinated efficiently'*).

Jedna od tvrdnji autora S. Chowdhury [2] vezana za definiciju mikromreže je: „Mikromreže mogu biti niskonaponske CHP (eng. *Combined Heat and Power*) opskrbe mreže malih razmjera dizajnirane tako da opskrbljuju električnom i toplinskom energijom manje zajednice kao što su stambena naselja, prigradska naselja, akademsku ili javnu zajednicu (sveučilišta ili škole), industrijske lokacije itd. Također može se reći da su aktivne distribucijske mreže jer se sastoje od distribuirane proizvodnje i različitih opterećenja pri distributivnoj naponskoj razini. Generatori ili mikroizvori koji rade unutar mikromreže su obično nekonvencionalni ili pogonjeni obnovljivim izvorima energije“ (eng. *'Microgrids are small-scale, LV CHP supply networks designed to supply electrical and heat loads for a small community, such as a housing estate or a suburban locality, or an academic or public community such as a university or school, a commercial area, an industrial site, a trading estate or a municipal region. Microgrid is essentially an active distribution network because it is the conglomerate of DG systems and different loads at distribution voltage level. The generators or microsourses employed in a Microgrid are usually renewable/non-conventional.'*).

Iz navedenih tvrdnji nekoliko različitih autora može se zaključiti da je mikromreža ustvari sustav koji se sastoji od varijabilnog opterećenja i distribuirane proizvodnje. Unutar takvog sustava se nalaze distribuirani izvori električne energije koji primarno proizvode električnu energiju, ali mogu opskrbljivati potrošače i sa toplinskom energijom. Takva vrsta sustava može raditi sinkronizirana s mrežom, ali može i raditi samostalno odvojena od mreže u tzv. otočnom pogonu. Da bi radila u otočnom pogonu potrebna je implementacija spremnika energije koji su već navedeni. Mikromreža ima mogućnost da opskrbljuje vlastite potrebe za električnom energijom, ako nije u mogućnosti to činiti zbog raznih razloga tada može kupiti električnu energiju iz distributivne mreže ili druge mikromreže. Naravno ako mikromreža proizvodi više električne energije nego što joj je potrebno, taj višak može uskladištiti ili prodati. Sve ove tvrdnje su vidljive na slici 3.1.



Slika 3.1. Primjer funkcionalne mikromreže [4]

3.1. Arhitektura mikromreža

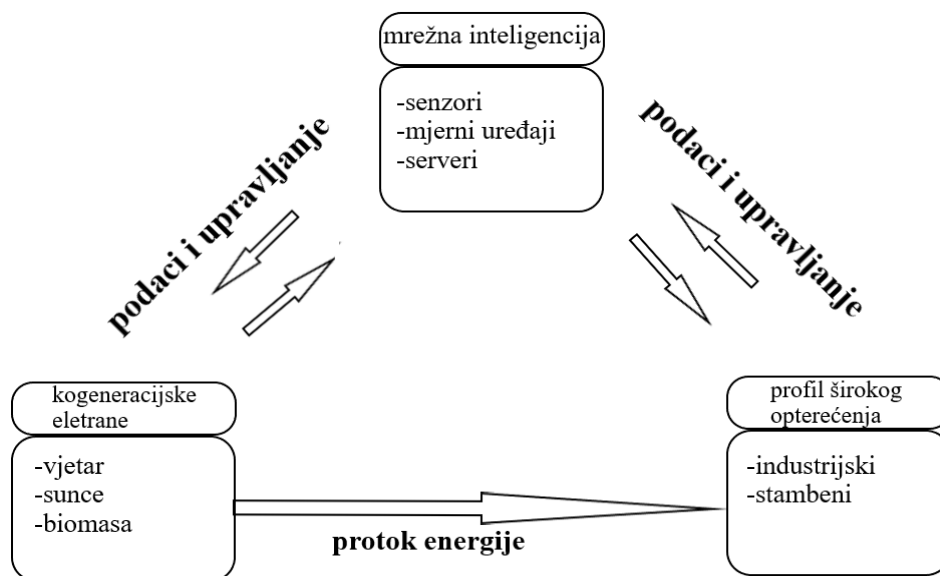
Napomena: Potpoglavlje 3.1. nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature [3], H. Farhangi, Lessons from Campus Microgrid, Taylor & Francis Group, 2017. godine, str. 21.- 23.

Mikromreže omogućavaju potrošaču da komunicira sa sustavima upravljanja energijom kako bi smanjio njihove troškove energije. Mikromreže bi trebale biti samo-zarastajući (eng. *self-healing*)

sustavi koji bi mogli predvidjeti nadolazeće probleme u sustavu i pokušati ih ispraviti. Prema navedenoj literaturi [3] više od 90% uzroka prestanka napajanja dolazi iz distribucijske mreže, stoga je potrebno u izgradnju pametne mreže (eng. *smart grid*) krenuti preko mikromreža tj. distribucijske mreže. Mikromreže trebaju biti „građevni blokovi“ pametne mreže (eng. *smart grid*).

Zbog već prije spomenutog rasta cijena i smanjenja zaliha fosilnih goriva, te uz nemogućnost proširenja kapaciteta proizvodnje i porasta potražnje za električnom energijom, usmjerenost na modernizaciju elektroenergetske mreže prisiljava primjenu tehnologija koje će pomoći pri upravljanju potražnjom.

Deregulacijom elektroprivredne industrije, ubrzanim razvojem distribuiranih izvora energije, zabrinutošću za okoliš i zbog učestale promjenjivosti cijene električne energije dolazi do sve većeg prodiranja distribuiranih izvora energije u sredjenaponske i niskonaponske elektroenergetske sustave. Ova pojava opravdava ulaganja u mikromreže koje se definiraju kao skupina izvora i opterećenja sa mogućnosti nezavisnog rada ili kao dijela većeg sustava.



Slika 3.2. Osnovne komponente mikromreže [3]

Na slici 3.2. se mogu vidjeti osnovni građevni blokovi pametne mikromreže kako je predloženo u literaturi [3]. Svaka mikromreža mora imati više različitih izvora energije, više različitih tipova opterećenja i mrežnu inteligenciju. Mrežna inteligencija uključuje komponente potrebne za upravljanje i kontrolu mikromrežom. Pojednostavljeni blok dijagram pokazuje činjenicu da su osnovne komponente mikromreže integrirane kroz dva nezavisna, a opet međusobno povezana

puta. Jedan je tradicionalni jednosmjerni prijenos električne energije od elektrane do opterećenja unutar mikromreže. Drugi je dvosmjerna staza za prijenos podataka i kontrolu istih koji su dobiveni od strane senzora iz svih dijelova mikromreže i stavljaju se na raspolaganje sustavu za upravljanje energijom [3].

3.2. Vrste mikromreža

Napomena: Potpoglavlje 3.2. nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature [3], H. Farhangi, Lessons from Campus Microgrid, Taylor & Francis Group, 2017. godine, str. 23.- 26.

Svaka mikromreža je optimizirana da daje skup jedinstvenih rezultata i funkcionalnosti za ciljeve zbog kojih je tako dizajnirana. Ne postoji univerzalni dogovor među znanstvenicima oko termina mikromreže. Pojedini ih pokušavaju klasificirati prema veličini, drugi prema povezanosti ili njihovoj ne povezanosti, dok ostali prema njihovoj primjeni. Prema navedenoj literaturi mikromreže [3] se mogu podijeliti na tri vrste: urbana, udaljena i agilna.

Urbana mikromreža sadrži se od više različitih opterećenja i distribuiranih izvora energije, a identificira se kao usko vezana sa distribucijskom mrežom te može raditi u otočnom pogonu ako je potrebno. Takva vrsta povezanosti predstavlja određene zahtjeve i ograničenost. Zbog toga urbana mikromreža mora zadovoljiti standarde i postaviti se tako da njihova veza sa distribucijskom mrežom ne ugrožava integritet i kvalitetu električne energije. Postoje razne primjene urbanih mikromreža u kampusima, zatvorenim zajednicama i velikim trgovačkim centrima.

Udaljene mikromreže rade isključivo odvojene od distribucijskog sustava. Imaju sličnu strukturu kao urbane, ali pošto nisu spojene na distribucijski sustav nisu ograničene zahtjevima tog istog sustava. Manje su zastupljene od urbanih, a dobar primjer njihove primjene bio bi na otocima.

Agilne mikromreže poznatije i kao privremene mikromreže, dizajnirane da se u vrlo kratkom vremenskom razdoblju konfiguriraju i rastave ovisno o potrebama. Primjeri agilne mreže su privremene vojne baze, privremene „vanjske“ bolnice, izvori energije za sezonske događaje itd. Od prijašnjih se razlikuju u brzini i fleksibilnosti svojeg djelovanja [3].

3.3. Povezivost mikromreža

Napomena: Potpoglavlje 3.3. nastalo je prijevodom i obradom materijala iz literature [2] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley, Microgrids and active distribution networks, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom 2009. godine, str. 8

Zbog toga što su mikromreže dizajnirane da generiraju električnu energiju pri distributivnoj razini napona uz mogućnost iskorištavanja otpadne topline, ukoliko iskorištavaju otpadnu toplinu umanjuje im se sposobnost upravljanja električnom energijom. Prema navedenoj literaturi [2] koja kaže da bi prema IEEE preporukama maksimalni proizvodni kapacitet mikromreže trebao biti 10 MVA, moguće je napajati teret većeg opterećenje iz više mikromreža putem zajedničke distribucijske mreže uz uvjet da se opterećenje podijeli u više upravljivih jedinica pri čemu svaku napaja jedna mikromreža. Na ovaj način mikromreže se mogu povezati tako da tvore jednog velikog opskrbljivača električnom energijom. Za povezane mikromreže svaki centralni upravljač mora biti u bliskoj koordinaciji sa susjednim centralnim upravljačem. Dakle, međusobno povezane mikromreže postigle bi veću stabilnost i upravljivost pomoću distribuirane strukture upravljanja [2].

4. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Unutar ovog poglavlja detaljnije će biti objašnjeni modeli organizacije elektroprivrednih djelatnosti kao i klasični model tržišta električne energije. Ukazati će se na problematiku koja se javlja unutar postojećeg tržišta električne energije i prikazati neka od mogućih rješenja za integraciju distributivnih izvora električne energije u lokalno distributivno tržište.

4.1. Modeli organizacije elektroprivrednih djelatnosti

Napomena: Potpoglavlje 4.1. je nastalo prijevodom i obradom materijala iz literature [5] S. Hunt, Making Competition Work in Electricity, vol. 23, no. 2, John Wiley & Sons, 2002. godine, Str. 41-59

Postoje četiri modela organizacije elektroprivrednih djelatnosti koji su ovisni o zadržanosti prirodnih monopola. Svi modeli pretpostavljaju nastavak prirodnog monopola nad prijenosom, distribucijom i upravljanjem sustava, dok se nad ostalim funkcijama smanjuje njegov opseg. Sva četiri modela su operativna u svijetu i imaju svoje vlastite prednosti i nedostatke.

4.1.1. Model vertikalno integriranog monopola (eng. *Vertically integrated monopoly*)

Unutar ovoga modela ne postoje konkurentni proizvođači električne energije jer nitko od njih ne može otkupljivati električnu energiju. Sve funkcije su skupa u jednom paketu i zajedno su regulirane. Ovaj model se koristio više od 100 godina i prisutan je svugdje.

Konkurencija u elektroenergetskoj industriji je moguća samo u proizvodnom sektoru i u komercijalnom dijelu prodaje električne energije jer su te funkcije deregulirane tj. njihove cijene se određuju na konkurentnim tržištima. Transportne funkcije (prijenos i distribucija) ne mogu biti konkurentne jer su prirodni monopoli. Nema smisla graditi više infrastruktura za prijenos i distribuciju (zbog ekonomskih i ekoloških razloga) jer svi koriste istu. Konkurencija na tržištu električne energije može dovesti do:

- Smanjenja cijena (iako je poznata cijena usluga dobavljača)
- Pouzdanije opskrbe
- Relativno predvidljivih računa

Postoji više razloga zbog kojih je uvedena struktura vertikalno integriranih kompanija. Prvi razlog je transakcijski troškovi, a drugi je nastanak prirodnih monopola.

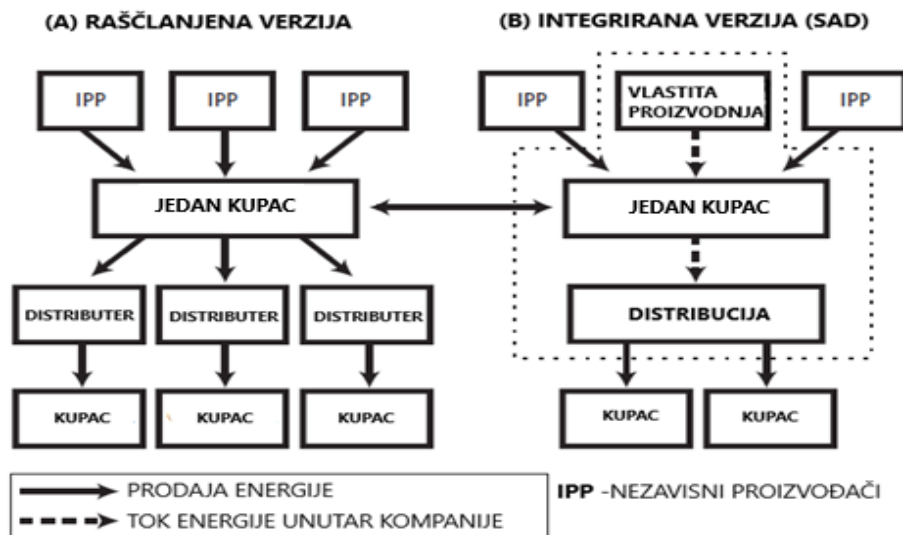
Transakcijski troškovi su troškovi povezani sa ugovorima koji nastaju pri zamjeni zapovjedništva i kontrole nad sustavom. Teoretski je moguće to promijeniti (zamjenom kompanija) uz pomoć ugovornog odnosa između kompanija unutar kojeg se određuju uvjeti i dogovori. Katkad je te ugovore teško odrediti kako bi sve moguće novonastale situacije bile zadovoljene, uz to takvu vrstu ugovora je vrlo teško sklopiti iz financijskih razloga (vrlo skupo), a njihovo rješavanjem sudskim putem nije vrijedno niti pokušavati. Zbog tih razloga sve aktivnosti obavlja jedna kompanija pod vodstvom jednog menadžera.

Prirodni monopoli su nastali iz više razloga. Monopol distribucije je nastao zbog vizualnog i prostornog problema jer na ulicama nema mjesta za više od jedne distributivne infrastrukture. Monopol prijenosa je nastao zbog ekonomskih razloga, ali i zbog toga što je jedna prijenosna infrastruktura sasvim dovoljna da zadovolji potrebe određenog područja. Jedan od najvažnijih razloga nastanka prirodnog monopola unutar elektroenergetskog sustava su tehničke poteškoće uzrokovane koordinacijom proizvodnje sa prijenosom električne energije tj. njihovom integracijom od strane operatora sustava. Zbog razmatranja da je njih nemoguće razdvojiti, smatralo se da je najbolje da to obavlja jedna kompanija. Također jedan od razloga prirodnog monopola unutar elektroenergetskog sustava je dugoročno planiranje proizvodnje i prijenosa.

Danas se smatra da od svih ovih navedenih razloga, samo prijenos i distribucija električne energije mogu biti prirodni monopoli.

4.1.2. Model jednog kupca (eng. *Single buyer*)

Ovaj model je prvi put prihvaćen u SAD-u 1978 godine i njegov cilj je bio otkup električne energije od manjih proizvođača radi poticanja ekološke osviještenosti. To je dovelo do kupovine još nekih drugih usluga od nezavisnih proizvođača električne energije (eng. *Independent Power Producers* (IPPs)). Prema slici 4.1. vidljivo je da unutar ovoga modelu jedino postojećem integriranom monopolu je dozvoljen otkup od nezavisnih proizvođača. Model jednog kupca se koristi u mnogim zemljama svijeta kao prvi korak prema liberalizaciji i ulaganju privatnog kapitala.



Slika 4.1. Primjer modela jedan kupca (eng. *single buyer*) [5]

Cijena otkupa energije se određuje na aukciji održanoj tako da se odredi najniža ponuda koja će pokrivati fiksne troškove, a zatim se potpisuje dugoročni ugovor. Najniža cijena se isplaćuje godišnje uz dodatke za svaku generiranu jedinicu snage. Ovaj model ima ograničenu konkurentnost zbog spomenutih dugoročnih ugovora i nemogućnosti samostalnog određivanja cijena, a ugovori su potrebni kako bi proizvođači osigurali otkup energije te smanjili rizik gubitka uložениh sredstava. Jedina konkurentnost je u tome tko će izgraditi elektranu i upravljati njome. Još jedna važna stvar vezana uz spomenute dugoročne ugovore je ta što oni nisu pod kontrolom operatera sustava. Nezavisni proizvođači se natječu u prodaji energije sa kompanijom u vlasništvu operatera, stoga bi operater sustava trebao biti neutralan. Nažalost to nije moguće unutar ovoga modela već će biti spomenuto u slijedećim opisanim modelima.

4.1.3. Model veleprodajne konkurencije (eng. *Wholesale competition*)

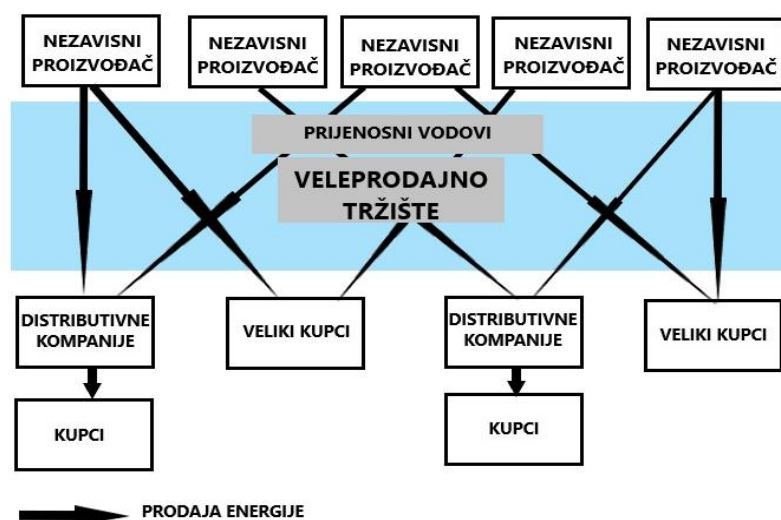
Model veleprodajne konkurencije ima potpuno konkurentan proizvodni sektor. Distribucijske kompanije zvane eng. *Distcos* su veliki kupci koji i dalje imaju monopol nad manjim krajnjim kupcima. Ovaj model je konkurentan u proizvodnom sektoru gdje se može najviše zaraditi, usto dozvoljava mnogo kupaca pa se može ponuditi i niža cijena, a da se izbjegnu problemi pružanja maloprodajnog pristupa za sve manje kupce. Oblik modela veleprodajne konkurencije je slijedeći:

1. Sva proizvodnja električne energije je deregulirana i prodaje se na konkurentnim veleprodajnim tržištima

2. Distribucijske kompanije (eng. *Distcos*) su veliki kupci koji kupuju konkurentno na veleprodajnom tržištu
3. Maloprodajni prodavači, agregatori (eng. *Aggregators*), posrednici (eng. *Brokers*) su dozvoljeni
4. Nema druge opcije za velike kupce nego kupovati po trenutnim tržišnim cijenama
5. Distributivne kompanije pružaju usluge manjim kupcima tako što sklapaju ugovore s proizvođačima, a tarifa po kojoj se naplaćuje je fiksna plus varijabilni dio

Ovaj model tržišta je stvoren da bi se omogućila konkurentna veleprodajna tržišta koja bi donijela prednosti konkurentnosti. Zahtijeva sve značajke od kratkoročnih sporazuma pa do dugoročnih poslovnih modela za prijenos električne energije, također zahtijeva mnogo kupaca i prodavača kao i veliki odziv u ponudi i potražnji. Vrlo napredan model te ne zahtijeva potpuno novu potrošački orijentiranu infrastrukturu za naplatu i informacijsku strukturu potrebnu za pristup maloprodaji.

Iz slike 4.2. je vidljivo da je ovome modelu potrebno mnogo velikih kupaca kao i prodavača električne energije jer premali broj vodio bi do modela jednog kupca i dugoročnih ugovora otkupa kako je objašnjeno u prethodnom pod poglavlju. Postoji mogućnost da se omogući kupovina električne energije samo distributivnim kompanijama gdje bi samo one kupovale na veleprodajnom tržištu i prodavale energiju daljnjim kupcima na svojem geografskom položaju. Nažalost ovakav potez bi doveo do premalog broja distributivnih kupaca. Druga mogućnost je rastavljanje distribucije i uvođenje više distributivnih kompanija, ali dopuštanje prodaje električne energije velikim kupcima na konkurentnom tržištu povećava se broj kupaca dok se uklanja potreba za razdvajanjem distribucije. Naravno potrebno je postaviti granice nakon kojih se kupac može smatrati velikim kupcem.



Slika 4.2. Model veleprodajne konkurencije [5]

Postavlja se pitanje da li su distributivne kompanije dužne ponovo omogućiti svoje usluge velikim kupcima koji su ih napustili zbog jeftinijeg maloprodajnog trgovca električne energije. Postoji nekoliko različitih rješenja, a to su:

1. Ne davati usluge velikim kupcima koji su odlučili kupovati električnu energiju od drugog dobavljača ili omogućiti ponovnu opskrbu, ali po drugačijoj tarifi
2. Dopustiti da veliki kupci odaberu trajnog opskrbljivača bez opcije promjene istoga
3. Omogućiti povratak velikim kupcima, ali uz potpisivanje godišnjih ugovora sa fiksnim cijenama
4. Omogućiti povratak velikim kupcima, ali uz trenutne cijene tržišta i mogućnost da potpišu ugovor sa drugim dobavljačem električne energije

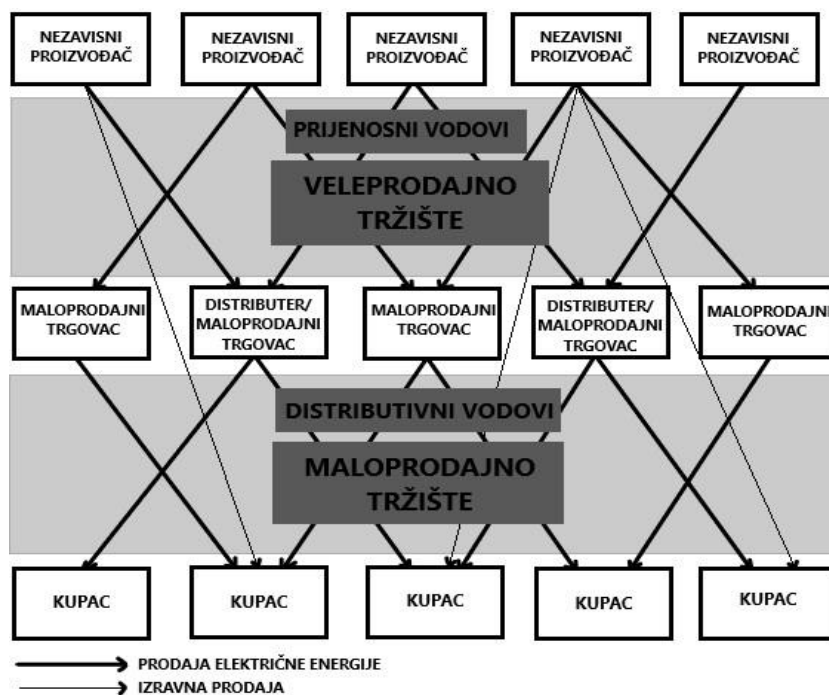
Prema literaturi [5] distributivnim kompanijama bi bilo najisplativije da 80-90% predviđenog opterećenja kupi uz pomoć najisplativijih ugovora sa proizvođačima, dok ostatak prema tržišnim cijenama. Takve ugovore regulator sustava teško može pratiti i procjenjivati jer u njima je potrebno odrediti važne vremenske intervale, duljinu trajanja ugovora i mnoge druge važne stvari. Naravno tu postoji i problem korupcije koji je teško otkriti.

Postoji nekoliko problema sa ovim modelom, a to su: granica uz pomoć koje se određuje tko je veliki kupac, potreba za ugovorima i poteškoće oko sklapanja ugovora. Velika prednost ovoga modela je prijelaz koji omogućava veleprodajne tržišne dogovore koji se pokazuju vrlo dobri.

4.1.4. Model maloprodajne konkurencije (eng. *Retail competition*)

Model maloprodajne konkurencije omogućava svima kupcima da odaberu svoga opskrbljivača električne energije tako da konkurentni proizvođač može prodavati bilo kome, iako krajnji kupci često kupuju od maloprodajnog trgovca što je vidljivo na slici 4.3.

Maloprodajni pristup povlači dobre pogodnosti veleprodajnog tržišta tako što omogućava mnogim maloprodajnim trgovcima električne energije (ne samo distributerima) da stvaraju pritisak na proizvođače u vezi cijena. Također se otvara novo likvidnije tržište za financiranje izgradnje novih elektrana.



Slika 4.3. Model maloprodajne konkurencije [5]

Ovaj model zahtijeva nove veleprodajne trgovačke sporazume i konkurentna veleprodajna tržišta. Glavna razlika od modela veleprodajne konkurencije je u postupku ustaljenja, očitavanja mjernih uređaja, naplaćivanja i edukacije krajnjih kupaca. Postupno uvođenje ovoga modela ostavlja vremenski prostor za njegovo poboljšavanje. Model najbolje funkcionira kada regulatori vjeruju u konkurentno tržište koje će biti najisplativije za kupce, a ne da gube vrijeme pokušavajući zadržati zastarjela regulatorna pravila. Ovo pretpostavlja da su veleprodajna tržišta konkurentna i da rade kako bi se smanjili troškovi i cijene električne energije. Prednost modela maloprodajne konkurencije je u tome što daje kupcima izbor od koga će kupovati električnu energiju.

Problem ovoga modela je instinktivna potreba regulatora za regulacijom cijena kako bi zaštitio kupce što vodi do problema opisanih u modelu veleprodajne konkurencije. Također problematičan je trošak ustaljenja modela sustava i potreba za edukacijom potrošača. Trošak ustaljenja modela sustava ovisi o tome koliko dobro će se sustav modela veleprodajnih cijena ujediniti sa programom potrebnim za uvođenje novog mjernog sustava i sustava naplaćivanja.

Veliki korak u korištenju ovoga modela bio bi kada bi se uspio uvesti mjerni sustav koji bi mjerio potrošnju prema dobu dana i tako se naplaćivala električna energija. Npr. da je najveća cijena u vrijeme vršnog opterećenja, a najmanja u doba dana kada je opterećenje sustava najmanje, ali za to je potrebno dosta vremena.

Maloprodaja električne energije nije previše profitabilan posao jer se ona samo preprodaje. Ako kupac vjeruje da dobiva „bolju“ električnu energiju ili „pouzdaniju“ uslugu, tada je kupac nedovoljno informiran. Električna energija je vrsta robe i svugdje treba biti jednaka i zato je potrebno educirati kupce.

Potpuna maloprodajna konkurentnost je krajnja težnja reformi sustava jer model maloprodajne konkurencije izbjegava potencijalne konflikte i neučinkovitosti modela veleprodajne konkurencije, a također isključuje regulatora iz konkurentnog tržišta. Zahtjev za većom učinkovitosti tržišta dolazi od strane kupaca, a ne od distributera. Mnogo kupaca posebice oni veći zahtijevaju izbor opskrbljivača uglavnom zbog cijene električne energije.

4.2. Klasično tržište električne energije

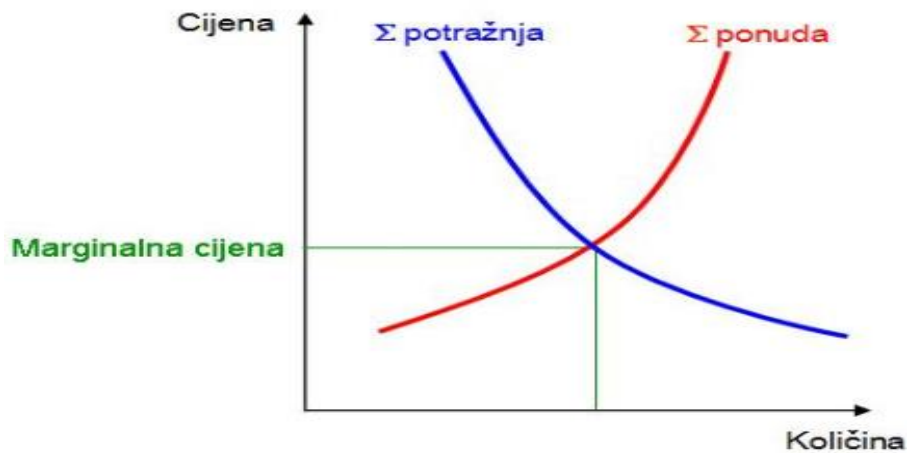
Trgovanje na burzi može biti trenutno (eng. *prompt*) ili terminsko. Pri trenutnom trgovanju isporuka električne energije treba biti trenutna. Kod terminskog trgovanja sklapaju se ugovori unutar kojih se navode svi podaci isporuke, a u takvom postupku sudjeluju špekulanti i financijski investitori. Prednosti burzovnog trgovanja su:

- Novčani iznos ugovora smije biti manji nego na Bilateralnom tržištu
- Ponude se objavljuju javno radi povećavanja konkurencije
- Cijene su jasno naznačene

Najčešće tržišne operacije na burzi su sat unaprijed i dan unaprijed. Kod tržišta dan unaprijed ponuda i potražnja se daje na burzi za dan unaprijed i uz pomoć njih se stvara tržišna cijena tj. MCP (eng. *Marginal Clearing Price*). Također se stvara dnevni red koji ide na provjeru i doradu kod operatora sustava zbog opterećenja i zagušenja mreže. Tržište sat unaprijed radi na sličnom principu kao tržište dan unaprijed uz ograničenja nastala dogovorenima opterećenjima tržišta dan unaprijed. Najpoznatije burze električne energije su: NordPool [6], EPEX SPOT [7], OMIE [8], CROPEX [9].

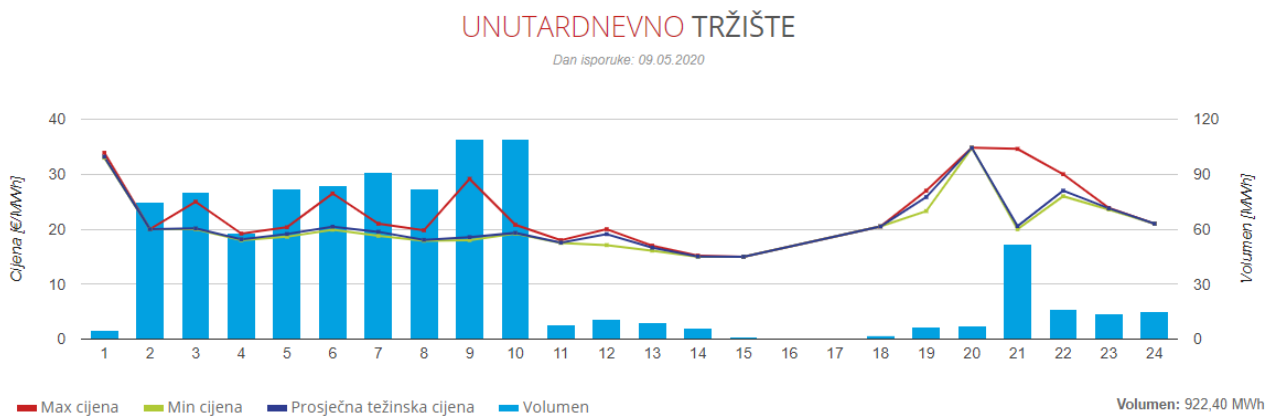
CROPEX je Hrvatska burza električne energije koja je središnje mjesto za sigurnu, anonimnu i organiziranu trgovinu električne energije. CROPEX nosi ulogu središnje ugovorne strane tj. CPP-a (eng. *Central Counter Party*) između kupaca i prodavača električne energije i tako preuzima rizik kupnje i prodaje električne energije nakon zaključavanja transakcija za tržište dan unaprijed i unutardnevno tržište. Na tržištu dan unaprijed dražba se odvija svakodnevno gdje se prikupljaju ponude i formira se za svaki sat sumarna krivulja ponude i potražnje što je vidljivo na slici 4.4., a

njihovo sjecište određuje tržišnu (marginalnu) cijenu. Svi članovi kojima su predani nalozi prihvaćeni, trguju električnom energijom po jednakoj (marginalnoj) cijeni.



Slika 4.4. Krivulja ponude i potražnje za tržište dan unaprijed [9]

Kod unutardnevnog tržišta potrebno je unijeti podudarajuće naloge na platformu unutardnevnog tržišta, a zatim započinjju transakcije koje mogu biti ostvarene najkasnije do 30 minuta prije isporuke. Unutardnevno tržište služi za kontinuirano trgovanje električnom energijom, a primjer istoga je vidljiv na slici 4.5.



Slika 4.5. Vrijednosti na CROPEX unutardnevnom tržištu za dan 09.05.2020. [9]

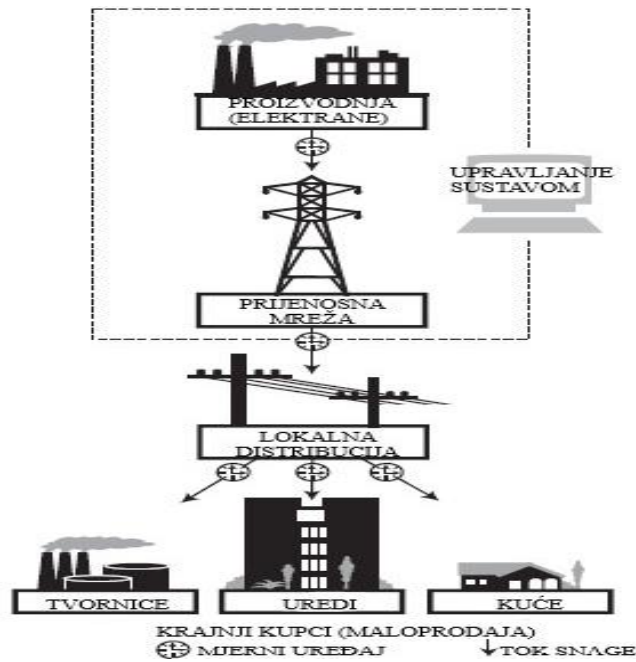
Postoji trgovina električnom energijom izvan burze na tzv. OTC- tržištu (eng. *Over the Counter Market*), a njegovi sudionici se bilateralno dogovaraju oko uvjeta prodaje i kupnje zato se takvo tržište zove Bilateralno tržište. Na ovakvoj vrsti tržišta transakcije se odvijaju neovisno o burzi. Bilateralni ugovori se odnose na stvarnu isporuku električne energije ili na financijske izvedenice koje ne uključuju stvarnu isporuku energije, a u ugovorima se određuje cijena električne energije za navedeno razdoblje. Opcija OTC/Off-exchange omogućuje strankama da se trgovina provodi

direktno bez nadzora što olakšava likvidnost, održava trenutne cijene na tržištu i omogućuje transparentnost. Nedostatak bilateralnog tržišta je taj što je isplativo za veće količine električne energije, a prednosti su:

- Veći broj sudionika u trgovini
- Zaštita od promjene cijena kroz dogovoreno razdoblje
- Različite vrste ugovora

Važno je također spomenuti tržište električne energije uravnoteženja. Zbog činjenice da ponuda električne energije treba biti jednaka potražnji i zbog toga što se ugovori sklapaju za buduće razdoblje, nastaju problemi uravnoteženja ponude i potražnje u sustavu. Operater prijenosnog sustava održava ravnotežu unutar sustava, a dodatno kupljenu energiju naplaćuje sudioniku koji je izazvao neravnotežu [10].

Elektroenergetski sustavi u cijelom svijetu su fizički i operativno vrlo slični. Pod pojmom operativno se naravno podrazumijeva upravljanje sustavom. Pod fizičkim funkcijama elektroenergetskog sustava podrazumijevaju se proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije te upravljanje sustavom što je vidljivo na slici 4.6. Zbog deregulacije tržišta standardna organizacija elektroenergetske industrije je u obliku vertikalno integriranih kompanija koje uključuju prethodno navedene funkcije. Spomenute kompanije grade vlastite proizvodne pogone kojima se upravlja uz planirani prijenos električne energije. U realnom vremenu operator sustava koordinira proizvodnim pogonom govoreći mu kada da proizvodi, a kada da ne proizvodi električnu energiju zbog viška u sustavu [5].



Slika 4.6. Fizikalne funkcije elektroenergetskog sustava [5]

Prema navedenoj literaturi autorice S. Hunt omjer troškova ukupnih usluga u elektroenergetskoj industriji je slijedeći:

- Proizvodnja električne energije 35-50% od ukupne cijene
- Prijenos električne energije 5-15% od ukupne cijene
- Distribucija električne energije 30-50% ukupne cijene

Krajnji korisnik dobiva račun u kojem je su uračunate sve ove navedene usluge u jednu tarifu. Organizacija vertikalno integriranih kompanija može imati monopol nad područjem vlastitog djelovanja stoga država treba regulirati cijenu električne energije [5].

4.3. Problematika postojećeg tržišta električne energije

Unutar prethodnog pod poglavlja opisana su četiri modela tržišta električne energije koja se koriste svugdje u svijetu. Svaki od modela ima svoje prednosti i nedostatke, a iz upotrebe polako izlaze model vertikalno integriranih monopola (eng. *Vertically integrated monopoly*) i model jednog kupca (eng. *Single buyer*). Dok je model veleprodajne konkurencije (eng. *Wholesale competition*) bio najčešće korišten pa tako i u Hrvatskoj, danas je tržište električne energije otvoreno i stupio je na snagu model maloprodajne konkurencije (eng. *Retail competition*) koji omogućava svakome potrošaču izbor vlastitog opskrbljivača električne energije.

„Klasično“ maloprodajno tržište električne energije je organizirano tako da je većina maloprodajnih kupaca spojena na distribucijsku mrežu u kojoj nema distribuirane proizvodnje. Opskrbljivač treba kupiti električnu energiju na veleprodajnom tržištu od tzv. „klasičnih“ proizvođača, a zatim ju preprodati krajnjim potrošačima na maloprodajnom tržištu. Uz ovakvu vrstu transakcije električne energije dolazi do tradicionalnih tokova snage od proizvodnje pa do prijenosa i distribucije, a zatim i do krajnjeg kupca.

Tema ovoga diplomskog rada je prikazati različita rješenja organizacije tržišta električne energije u distributivnim sustavima u kojima je prisutan koncept mikromreža. Postojeći modeli tržišta koji se upotrebljavaju nisu primjenjivi na lokalnoj razini mikromreže što znači da je potrebno osmisliti i implementirati novi model koji bi omogućio učinkovitu trgovinu električnom energijom na lokalnoj razini unutar mikromreže, između više različitih mikromreža, kao i između mikromreže i distribucijske mreže.

Jedan od glavnih izazova je integracija distribuiranih izvora proizvodnje električne energije u lokalno distributivno tržište. Ovisno o vrsti distribuiranog izvora tj. da li je to fotonaponska elektrana, vjetroagregat ili neka druga vrsta distribuiranog izvora ovisnog o izvoru energije, operator sustava treba predvidjeti više različitih situacija. Jedna od mogućih situacija je oblačan i dan bez vjetra što će umanjiti ili čak obustaviti proizvodnju energije, dok je druga situacija jako sunčan i vjetrovit dan koji će omogućiti navedenim distribuiranim izvorima veoma povoljnu proizvodnju električne energije. Tada operator sustava ima veoma važna uloga da izbalansira višak ili manjak električne energije u sustavu. Najveći izazov je nekonzistentnost proizvodnje električne energije distribuiranih izvora što je kod mikromreža moguće umanjiti uporabom spremnika energije.

Kako je prema literaturi [5] autorice S. Hunt opisan model maloprodajne konkurencije (eng. *Retail competition*), unutar njega je moguće implementirati dodatne opcije koje će omogućiti tržište električne energije između nekoliko mikromreža, između mikromreže i distribucijske mreže ili unutar same mikromreže. Postojeći model govori kako je potrebno uvesti mjerni sustav koji će mjeriti protok električne energije. Naravno potrebno je mjeriti predanu električnu energiju iz distribucijske mreže u mikromrežu, ali i suprotno. U slučaju trgovanja električnom energijom između dvije mikromreže potrebno je mjeriti njihov međusoban protok, a u slučaju prodaje električne energije unutar jedne mikromreže također se treba mjeriti količina predane električne energije. Ako distribuirani izvor unutar mikromreže nije u mogućnosti proizvesti potrebnu

količinu električne energije i ne može taj nedostatak nadoknaditi iz spremnika energije, tada je potrebno tu količinu električne energije preuzeti iz distribucijske mreže tj. otkupiti.

Kod tržišta unutar jedne mikromreže postoji još jedan mogućnost, a to je prodaja električne energije i skladištenje iste unutar spremnika energije. Primjeri spremnika energije su baterije, zamašnjaci i superkondenzatori. Spremnici energije unutar mikromreže ublažavaju moguće probleme nekonzistentne proizvodnje distribuiranih izvora kao i problem promjene opterećenja potrošača električne energije.

4.3.1. Sustavi financijskih poticaja proizvodnje električne energije iz distribuiranih izvora

Trenutno postoji više sustava financijskih poticaja za proizvodnju električne energije pomoću distribuiranih izvora:

- Sustav zajamčenih cijena (eng. Feed-in tarife)
- Sustav premija na tržišnu cijenu
- Sustav obvezujućih kvota (zeleni certifikati)
- Sustav natječaja

| Vrsta sustava | Sustav zajamčenih cijena (Feed-in) | Sustav promjenjivih premija (Feed-in premium) | Sustav s fiksnom premijom i gornjom/donjom granicom | Sustav s fiksnom premijom |
|---------------------------------------|---|---|---|---------------------------|
| Zaštićenost od rizika tržišnih cijena | Potpuna | Ograničena (nepotpuna) | Ograničena (nepotpuna) | Nikakva |
| Način prodaje električne energije | Integracija na tržište (pomoću operatora tržišta) | Direktno na tržištu | Direktno na tržištu | Direktno na tržištu |

Tablica 4.1. Usporedba sustava poticaja za proizvodnju električne energije iz OiE

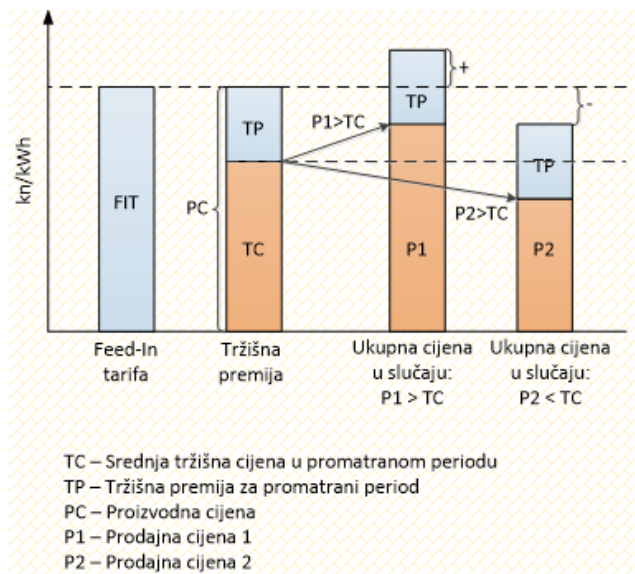
U Hrvatskoj se koristio sustav zajamčenih cijena (eng. *Feed-in tarife*) tzv. sustav zajamčenih tarifa gdje HROTE (*HRVATSKI OPERATOR TRŽIŠTA ENERGIJE*) isplaćivao povlaštenim proizvođačima poticajnu cijenu za isporučenu električnu energiju. Povlašteni proizvođači su oni

proizvođači električne energije (iz distribuiranih izvora) koji imaju pravo na poticajnu cijenu. HOPS (*HRVATSKI OPERATOR PRIJENOSNOG SUSTAVA*) i HEP- Operator distribucijskog sustava su unutar ovakvoga sustava dužni preuzeti ukupnu proizvedenu električnu energiju od povlaštenog proizvođača (proizvođač ima prioritet pri otkupu), a svaki opskrbljivač mora kupiti minimalni udio električne energije proizvedene od strane povlaštenog proizvođača. Može se reći da se sva energija predavala u mrežu, a zatim za nju dobivala cijena određena tarifom. Povlašteni proizvođač je bio zaštićen od promjene cijena na tržištu električne energije i nije imao nikakvu odgovornost u slučaju neuravnoteženosti unutar sustava.

Novi zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji je donesen 2016. godine, a on predviđa da će se sustav zajamčenih tarifa zamijeniti sustavom premija na tržišnu cijenu. Tržišna premija je novčani iznos koji operator tržišta električne energije isplaćuje povlaštenom proizvođaču električne energije za neto isporučenu količinu električne energiju iz distribuiranog izvora. Kao što je zakon iz 2016. godine predvidio uvođenje sustava premija na tržišnu cijenu, to se dogodilo u svibnju 2020. godine. Vlada Republike Hrvatske donijela je potrebnu uredbu o kvotama kojom je omogućila početak primjene ovakvog sustava poticanja. Pravo za dobivanje premije na tržišnu cijenu povlašteni proizvođač može steći na javnom natječaju.

Svaki proizvođač kojem je u cilju dobiti premiju na tržišnu cijenu mora aktivno sudjelovati na tržištu električne energije tako što će prodati ukupnu proizvedenu energiju po cijeni koja može biti manja ili veća od referentne tržišne cijene. Proizvodna cijena se određuje kao i u sustavu poticanja zajamčenih cijena. Tržišnu cijenu određuje operator tržišta na temelju prosječnih tržišnih cijena na referentnom tržištu električne energije unutar razdoblja za koje se obračunava premija, a ona nije ovisna o cijeni po kojoj je proizvođač prodao električnu energiju (da li bilateralno ili putem burze) [11].

Tržišna premija za svako obračunsko razdoblje i računa se prema formuli $TP_i = RV - TC_i$, gdje je RV referentna vrijednost el. energije utvrđena ugovorom o tržišnoj premiji (u kn/kWh), dok je TC_i referentna tržišna cijena el. energije u obračunskom razdoblju (u kn/kWh). Obračunsko razdoblje je jedan mjesec, a ako je izračunata vrijednost tržišne premije negativna, onda se smatra da je jednaka nuli [12]. Ovaj postupak je vidljiv na slici 4.6.



Slika 4.6. Primjer izračuna tržišne premije [11]

Zakon o obnovljivim izvorima energije iz 2016. godine također predviđa da će se dosadašnjom zajamčenom tarifom odsada poticati uglavnom samo solarne elektrane snage do 30 MW. Takvo pravo moraju ostvariti putem natječaja, a uvjet je da imaju status povlaštenog proizvođača.

Operator tržišta električne energije prodaje neto isporučenu električnu energiju povlaštenih proizvođača na tržištu električne energije na pošten i nepristran način. Od ove neto količine električne energije oduzima se minimalni udio koji moraju otkupiti svi opskrbljivači kao što je prije navedeno. Potrebna financijska sredstva uz pomoć kojih se isplaćuju zajamčene tarife ili premije na tržišnu cijenu, dolaze iz naplate naknade za obnovljive izvore energije od krajnjih kupaca prema svakome prodanom kWh. Naplata ovakve vrste naknade je uredu, ali ako su strane kompanije vlasnici većine snažnijih distribuiranih izvora, to znači da većina prikupljenih financijskih sredstava odlazi u ruke stranih investitora. Na taj način se ne pomaže državnoj ekonomiji već stranim investitorima, a novac se prikuplja od strane vlastitih državljana. Kada bi se ovaj proces bolje regulirao i omogućio da vlastiti državljanima imaju prednost nad stranim investitorima, većina novčanih sredstava bi ostala unutar države.

Unutar zakona iz 2016. godine spominje se model koji bi omogućio samoopskrbu kupcima s vlastitom proizvodnjom uz otkup viška električne energije. Takvi kupci trebaju imati status povlaštenog proizvođača, a njihova ukupna priključna snaga svih proizvodnih postrojenja ne smije prelaziti 500 kW. Priključna snaga krajnjeg kupca za samoopskrbu u smjeru isporuke električne energije u mrežu ne smije prelaziti priključnu snagu istoga kupca u smjeru preuzimanja energije iz distribucijske mreže. Isporuka električne energije u mrežu se vrši preko istoga obračunskog

mjesta preko kojega se kupuje električna energija od opskrbljivača. Cijena po kojoj će kupac prodati električnu energiju ovisi o tome koliko je električne energije kupio u određenom periodu (1 mjesec) od opskrbljivača zbog nemogućnosti samoopskrbe. Ukoliko je kupac više električne energije kupio nego prodao, tada se prodajna cijena množi sa koeficijentom količine preuzete i isporučene električne energije [12].

U tome slučaju cijena koju će kupac dobiti za predanu električnu energiju je mnogo manja od slučaja kada bi više energije preuzeo nego prodao. Ovaj model je potencijalno veoma dobar zbog omogućavanja samoopskrbe, ali negativna strana je jako niska otkupna cijena električne energije. Zbog niske otkupne cijene rok isplativosti elektrane doseže 15-20 godina za primjer fotonaponske elektrane.

Važno je spomenuti EKO bilančnu grupu koja je zadužena za regulaciju troškova energije uravnoteženja koja dolazi iz obnovljivih izvora energije unutar poticajnog sustava. EKO bilančnu grupu vodi Operator tržišta koji planira proizvodnju i plaća HOPS-u troškove uravnoteženja za cijelu EKO grupu, a to je u ovom slučaju HROTE. Sredstva za plaćanje troškova uravnoteženja dolaze iz sredstava prikupljenih za isplatu poticaja i od mjesečne naknade koju plaća svaki član grupe po jedinici isporučene energije. Rad EKO bilančne grupe je osnovni uvjet za rad mehanizma uravnoteženja unutar Republike Hrvatske.

5. MODELI ORGANIZACIJE TRGOVINE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM U MIKROMREŽAMA

Unutar poglavlja 5. biti će opisano nekoliko metoda i tehnologija pomoću kojih je moguće upravljati električnom energijom unutar mikromreže. Biti će obrađene metoda optimalnih tokova snaga, više-agentski sustav upravljanja električnom energijom mikromreže, te kao zadnja će biti obrađena Blockchain tehnologija koja se još uvijek razvija.

5.1. Metoda optimalnih tokova snaga u mikromrežama sa skladištenjem električne energije

Potpoglavlje 5.1. je nastalo obradom i prijevodom literature [13] Y. Levron, J. M. Guerrero, and Y. Beck, "Optimal power flow in microgrids with energy storage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3226–3234, 2013. godina

Ciljevi optimizacije ovisni su o tome kako mikromreža radi, tj. da li je u otočnom pogonu ili je spojena na mrežu. U otočnom pogonu glavni cilj upravljanja je stabilizacija sustava u obliku frekvencije i napona, dok kada je mikromreža spojena na distribucijsku mrežu cilj je minimizirati cijenu kupljene električne energije iz opskrbe mreže.

Sustav upravljanja električnom energijom se uobičajeno smatra kao hijerarhijski sustav sa tri razine. Prva razina je automatizirano upravljanje gdje svaki kontroler upravlja energetskom elektronikom, generatorima, spremnicima električne energije i opterećenjima unutar mikromreže. Druga razina upravljanja sadrži komunikaciju slabog protoka kako bi popravila frekvenciju i amplitudu pojedinih jedinica mikromreže, te im vratila nazivnu vrijednost. Treća razina upravljanja se bavi kontrolom toka radne i reaktivne snage. Ona je povezana sa sustavom upravljanja električnom energijom mikromreže, kao i optimizacijom izvora električne energije iste.

Klasične metode rješavanja tokova snaga nisu primjenjive za analiziranje mikromreža zbog nedovoljno definiranog prikaza distribuiranih izvora električne energije, spremnika energije i metoda naplate. Problem je velika kompleksnost u vremenskoj, ali i u domeni električne mreže. Tradicionalne metode rješavanja kao što je npr. Newton-Raphson je vrlo učinkovita u domeni električne mreže, ali je neodgovarajuća za vremensku domenu i ne može biti korištena pri rješavanju problema mikromreže sa spremnicima električne energije. Zbog toga je potrebno upotrijebiti neku drugu metodu kao što je OPF (eng. *optimal power flow*) metoda sa dinamičkim

algoritmom koja će omogućiti analizu optimalnih tokova snaga mikromreže u vremenskoj i domeni električne mreže uz integrirane spremnike električne energije.

5.1.1. Topologija i jednadžbe modela mikromreže

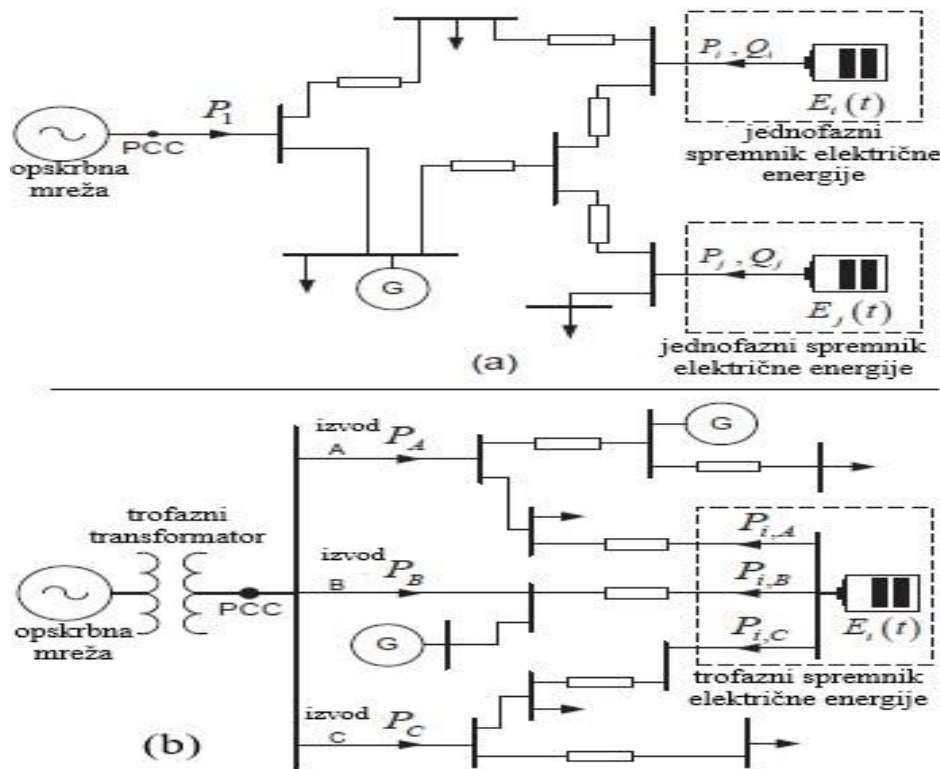
Mikromreža je spojena na vanjsku opskrbnu mrežu uz pomoć točke zajedničkog spoja koja se označava sa PCC (eng. *point of common coupling*). PCC je ustvari „slack“ (referentna) sabirnica koja se opisuje kao $V - \delta$ sabirnica jer su na njoj uvijek poznati iznos i kut napona, te bez nje se ne može provesti analiza tokova snaga.

Spremnici električne energije se modeliraju pomoću unutarnjeg stanja varijable pohranjene energije $E_i(t)$. Definiiraju se općom jednadžbom stanja $f(-)$, za jednofazni spremnik električne energije vrijedi formula (5-1), a za trofazni (5-2).

$$\frac{d}{dt} E_i = f_i(P_i, E_i) \quad (5 - 1)$$

$$\frac{d}{dt} E_i = f_i(P_{i,A}, P_{i,B}, P_{i,C}, E_i) \quad (5 - 2)$$

$P_{i,A}, P_{i,B}, P_{i,C}$ su trofazne snage na PCC (eng. *Point of common coupling*), a primjer sheme mikromreže sa jednofaznim i trofaznim spremnikom električne energije vidljiv je na slici 5.1.



5.1. Shema mikromreže sa jednofaznim (a) i trofaznim (b) spremnikom električne energije [13]

Cilj je minimizirati ukupne troškove električne energije kupljene iz opskrbe mreže preko točke zajedničkog spoja PCC (eng. *point of common coupling*). Za jednofazni sustav cilj je izražen formulom (5-3), a za trofazni sustav formulom (5-4).

$$\int_0^T P_1(t) \times C(t) dt \rightarrow \min \quad (5-3)$$

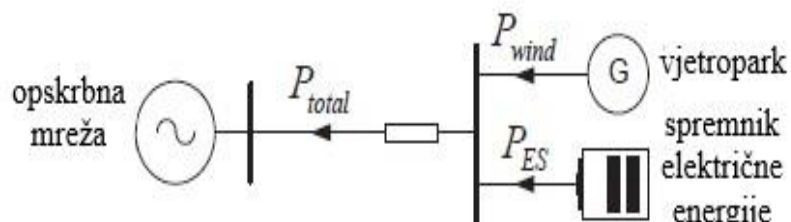
$$\int_0^T (P_A(t) + P_B(t) + P_C(t)) \times C(t) dt \rightarrow \min \quad (5-4)$$

$C(t)$ je cijena električne energije, a izražava se u (n.j./MW) koja je često vremenski ovisna funkcija. Također je moguće da se unutar trofaznog sustava koji nije pravilno izbalansiran, snaga izbalansira između sve tri faze pomoću formule (5-5).

$$\int_0^T (P_A(t) - P_B(t))^2 + (P_B(t) - P_C(t))^2 dt \rightarrow \min \quad (5-5)$$

5.1.2. Primjer mikromreže sa vjetroparkom i spremnikom električne energije

Mikromreža unutra ovoga primjera ima vjetropark kao obnovljivi izvor električne energije uz implementirani spremnik električne energije. Tijekom vjetrovitog razdoblja energija se pohranjuje u spremnik električne energije, a zatim se koristi kada nema vjetra pri smanjenoj proizvodnji kako bi se izgladila ukupna količina snage injektirana u mikromrežu. Shema mikromreže je vidljiva na slici 5.2.



Slika 5.2. Shema mikromreže s vjetroparkom [13]

Jednadžbe (5-6) predstavljaju stanje skladištenja:

$$\frac{d}{dt}SOC = -\frac{\eta \times P_{ES}}{J_{rated}}$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_{out} & P_{ES} > 0 \\ \eta_{in} & P_{ES} < 0 \end{cases}$$

$$-P_{rated} \leq P_{ES} \leq P_{rated}$$

$$0 \leq SOC \leq 1$$

(5 - 6)

gdje je:

SOC – trenutno stanje napunjenosti spremnika električne energije (0-1)

P_{ES} – snaga uskladištene energije (p.u.)

η - korisnost spremnika električne energije (%)

J_{rated} - ukupni kapacitet spremnika električne energije (p.u.)

P_{rated} - snaga spremnika električne energije (p.u.)

Kada je $P_{ES} > 0$ tada se spremnik električne energije prazni, a kada je $P_{ES} < 0$ tada se spremnik električne energije puni.

Postavljeni parametri su:

$$P_{rated} = 0.34$$

$$J_{rated} = 0.4$$

$$\eta_{in} = 0.85$$

$$\eta_{out} = 1.15$$

Nakon što je provedena OPF (eng. *optimal power flow*) metoda sa dinamičkim algoritmom za optimiziranje iskorištenja spremnika električne energije. Pri zadanim parametrima nije moguće procijeniti minimalnu cijenu kao cilj, stoga se odabire optimizacija izlazne snaga sustava kroz smanjenje gubitaka na zajedničkom električnom vodu. Pretpostavlja se otpor $R = 0.01$, a napon sabirnice $V_1 = 1.0$ te izračunava prema formuli (5-7).

$$\int_0^T \left(P_{total} - \frac{R}{V_1^2} \times P_{total}^2 \right) dt \rightarrow \min$$

(5 - 7)

Gdje je:

P_{total} – zbroj radnih snaga vjetroparka i spremnika električne energije (p.u.)

R – otpor električnog voda (p.u.)

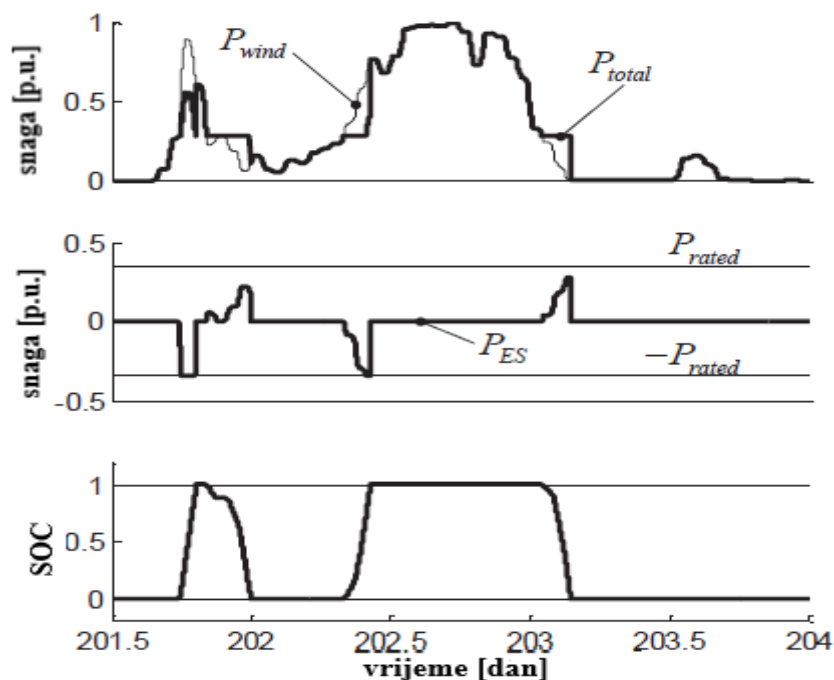
V_1 – napon sabirnice generatora (p.u.)

Zatim se definira funkcija vrijednosti $V(-)$ uz pomoć vremena i trenutnog stanja napunjenosti spremnika električne energije (SOC) prema formuli (5-8) uz početni uvjet $SOC(t) = SOC$.

$$V(t, SOC) = \int_t^T \left(P_{total}(\tau) - \frac{R}{V_1^2} \times P_{total}^2(\tau) \right) dt$$

(5 - 8)

Nakon dovršene analize uz korištene vremenske korake od $dt = 0.1 \text{ hr}$ i $dE = d(SOC) = 0.01$, koristeći povratnu rekurziju procijenjena je funkcija vrijednosti $V(-)$ promatrajući sve moguće puteve SOC-a svaki put. Optimalna funkcija $SOC(t)$ je izrađena pomoću rekurzije, a optimalni tokovi snaga su vidljivi na slici 5.3.

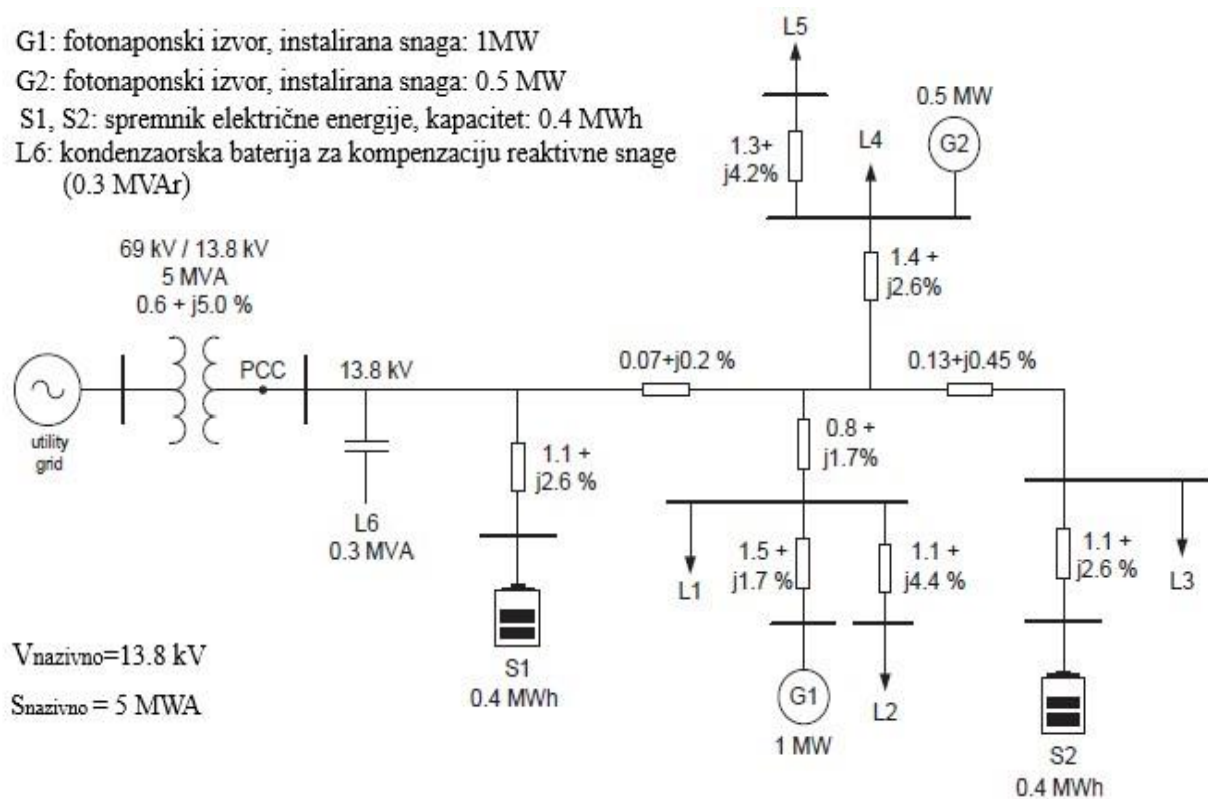


Slika 5.3. Optimalni tokovi snaga nakon upotrebe OPF (eng. *optimal power flow*) metode sa dinamičkim algoritmom [13]

P_{wind} predstavlja izlaznu snagu vjetroparka, a P_{total} označava zbroj izlazne snage vjetroparka i izlazne snage spremnika električne energije. P_{rated} označava snagu spremnika električne energije. Prvi graf na slici predstavlja izlaznu snagu vjetroparka i ukupnu izlaznu snagu mikromreže. Drugi graf predstavlja snagu spremnika električne energije, a treći graf predstavlja stanje napunjenosti spremnika električne energije.

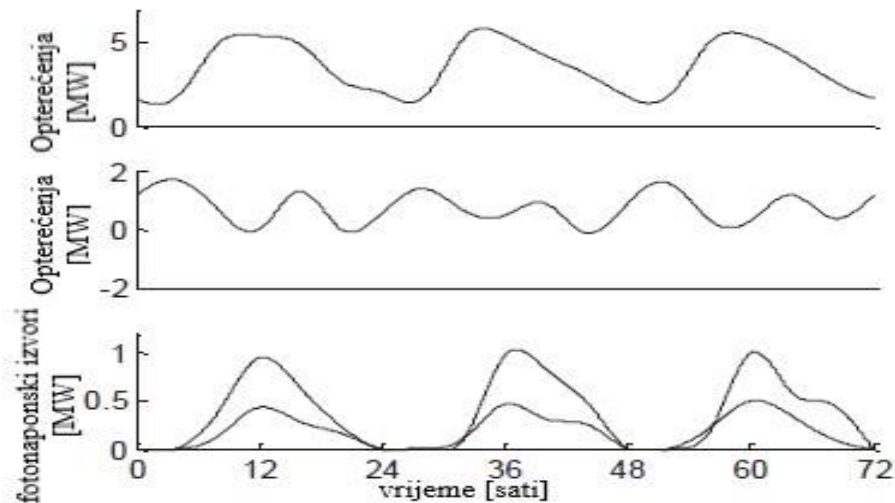
5.1.3. Primjer kompleksnije mikromreže sa spremnicima električne energije

Unutar ovoga primjera promatrati će se kompleksnija mikromreža sa više izvora i spremnika električne energije. Tokovi snaga će biti optimizirani kako bi zadovoljili ograničenja spremnika električne energije, kao i fizikalna ograničenja mikromreže. Cilj je optimizirati ukupnu cijenu električne energije na točki zajedničkog spoja PCC (eng. *poing of common coupling*), a shema mikromreže je vidljiva na slici 5.4. Na slici je vidljiva sredjenaponska mikromreža koja se opskrbljuje putem centralnog transformatora na točki zajedničkog spoja nazivnog napona $V_1(t) = V_{in}(t) = 13.8$ kV, nazivne snage $S_{nom} = 5$ MVA. Impedancije su izražene u per-unit (u postotnim vrijednostima) koristeći istu bazu kao transformator. Radna snaga na PCC (eng. *point of common coupling*) je ograničena transformatorom na $-5 \leq P_1(t) \leq +5$ MW.



Slika 5.4. Shema kompleksne mikromreže sa centralnim transformatorom i spremnicima električne energije [13]

Mikromreža sa slike se sastoji od 2 obnovljiva izvora električne energije, 6 opterećenja (jedno opterećenje je kondenzatorska baterija) i dva spremnika električne energije. Obnovljivi izvori su fotonaponski izvori instalirane snage 1 MW i 0.5 MW. Oni daju isključivo radnu snagu, a promatrana je njihova proizvodnja unutra 72 h koja je vidljiva na slici 5.5. Prvi graf predstavlja zbroj radnih snaga opterećenja, drugi graf predstavlja zbroj reaktivnih snaga opterećenja, a treći graf predstavlja radnu snagu fotonaponskih izvora.



Slika 5.5. Snage opterećenja i fotonaponskih izvora kroz 72 h [13]

Kapacitet svakoga spremnika električne energije je $E_{max} = 0.4$ MWh, a njihove jednadžbe stanja su:

$$\frac{d}{dt} E_i = -\alpha \times E_i - \mu(P_i) \times P_i$$

$$\mu(P_i) = \begin{cases} 1 & P_i \geq 0 \\ \mu_0 & P_i < 0 \end{cases}$$

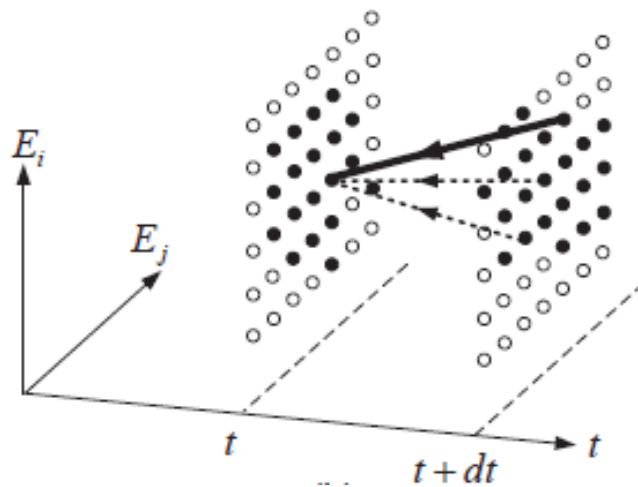
$$0 \leq E_i(t) \leq E_{i,max}$$

(5 – 9)

$E_{i,max}$ predstavlja kapacitet, μ_0 predstavlja korisnost, a α označava brzinu pražnjenja spremnika električne energije. Izabrani parametri su $E_{i,max} = 0.4$ MWh, $\alpha = 0.02$ 1/h, a μ_0 izmjenjuje vrijednosti $\mu_0 = 1.0, 0.6, 0.4, 0.1$.

Tokovi snaga su optimizirani koristeći povratni rekurzivni proces uz Bellmanovu jednadžbu. Vrijednost funkcije u svakoj točki jednaka je minimumu preko svih diferencijalni puteva od t do $t + dt$. Mogući putevi se pojave kao isprekidane linije, a optimalni put je označen podebljanom

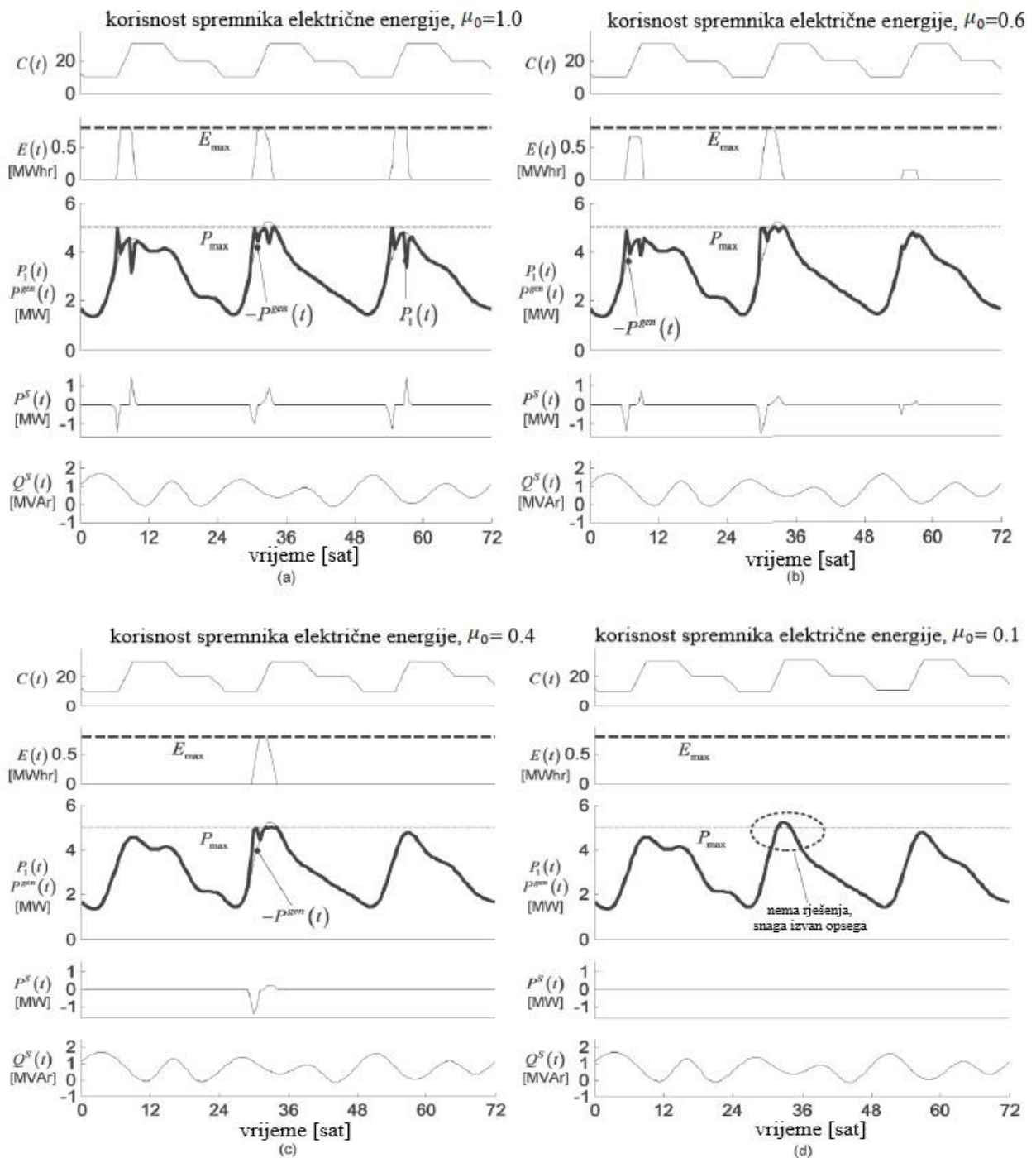
linijom kao što je vidljivo na slici 5.6. Korišteni su koraci od $dt = 0.5$ h i $dE = 0.05$ MWh, a pri svakom su se tokovi snaga mreže analizirali pomoću Gauss-Seidel metode.



Slika 5.6. Shema povratnog rekurzivnog procesa uz Bellmanovu jednadžbu za sustav sa dva spremnika električne energije [13]

Optimalni tokovi snaga su prikazani na slici 5.7. $C(t)$ predstavlja cijenu, $E(t)$ predstavlja pohranjenu električnu energiju, $P_1(t)$ predstavlja snagu isporučenu od strane opskrbnice mreže na točki zajedničkog spoja PCC (eng. *point of common coupling*). $P^{gen}(t)$ predstavlja kombinaciju ukupne radne snage proizvedene na obnovljivim izvorima energije (uzima se negativna) i radne snage preuzete iz opskrbnice mreže. $P^s(t)$ predstavlja kombinaciju radne snage dobivene iz spremnika električne energije, a $Q^s(t)$ predstavlja kombinaciju reaktivne snage dobivene iz spremnika električne energije.

Zbog nemogućnosti klasičnih metoda rješavanja tokova snaga da u vremenskoj domeni djeluju jednako dobro kao i u domeni električne mreže, uvodi se rekurzivno dinamički algoritam uz klasičnu metodu analize tokova snaga. U svakom trenutku funkcija vrijednosti $V(-)$ se procjenjuje uz pomoć njezine prijašnje vrijednosti, a tokovi snaga mreže se također određuju za svaki trenutak. Dinamički algoritam pruža optimalno rješenje zbog toga što uzima u obzir sva moguća rješenja, a može rješavati i jednofazne i trofazne sustave. S povećanjem broja spremnika električne energije povećava se kompleksnost rješavanja problema.



Slika 5.7. Optimalni tokovi snaga za primjer kompleksne mikromreže sa spremnicima električne energije za različite vrijednosti korisnosti spremnika [13]

U ovome primjeru prikazan je primjer metode optimalnih tokova snaga OPF sa dinamičkim algoritmom na mikromreži sa dva obnovljiva izvora električne energije i dva spremnika električne energije. U oba primjera je primijenjena ista analiza. Prvo je definirana funkcija troška $V(-)$, a zatim je procijenjena pomoću povratne rekurzije. Optimalna pohranjena električna energija i tokovi snaga su napravljeni pomoću izravne rekurzije. Na slici 5.7. je vidljivo da je električna

energija pohranjena prema dostupnosti obnovljivog izvora ili kada je električna energija na točki zajedničkog spoja mikromreže i opskrbe mreže bila jeftina. Energija iz spremnika se koristi kada obnovljivi izvori nisu u mogućnosti proizvoditi električnu energiju ili kada je cijena energije iz opskrbe mreže veoma visoka. Uskladištena električna energija pokušava ujednačiti ukupnu snagu kako bi smanjila gubitke što je više moguće. Unutar ovoga primjera uključene su impedancije električnih vodova kao i ograničenje snage pomoću transformatora što utječe na upravljanje uskladištenom električnom energijom. Npr. spremnik energije kompenzira opterećenje kako bi se održao kapacitet transformatora na točki zajedničkog spoja PCC (eng. *point of common coupling*) što je vidljivo na slici 5.7. u slučaju c). Slika 5.7. također pokazuje utjecaj korisnosti spremnika električne energije μ_0 na upravljanje snagom. U slučaju pod a) gdje je $\mu_0 = 1$ spremnik je potpuno napunjen, a u slučaju b) gdje je $\mu_0 = 0.6$ gubici su veći i spremnik električne energije nije potpuno napunjen. U slučaju pod c) gdje je $\mu_0 = 0.4$ spremnik električne energije ima takve gubitke da je beskoristan, dok u slučaju pod d) $\mu_0 = 0.1$ spremnik gubi dominantno svojstvo upravljanja. Spremnik električne energije ne može davati dovoljno električne energije kako bi kompenzirao vršnu vrijednost opterećenja, stoga mikromreža postaje nestabilna.

5.2. Više-agentski sustav upravljanja električnom energijom mikromreža

Potpoglavlje 5.2. je nastalo obradom i prijevodom literature [14] V. H. Bui, A. Hussain, H. M. Kim, *A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response*, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1323–1333, 2018. godine

Sustav upravljanje električnom energijom mikromreže se koristi kako bi se optimizirao raspored korištenja izvora električne energije zajedno sa spremnicima energije u odnosu na zahtjeve opterećenja. Hijerarhijski sustav upravljanja električnom energijom za optimalnu raspodjelu električne energije između više povezanih mikromreža temelji se na više-agentskom sustavu upravljanja. Na taj način svaka komponenta unutar sustava se smatra kao automatizirani agent koji može komunicirati sa drugim agentima sustava prateći modificirane protokole. Jedinstvena karakteristika ovakve arhitekture je ta što se može podijeliti u mnogo manjih razina agenata kako bi zadovoljila vlastite potrebe, a ujedno i olakšava upravljanje sustavom. Također se smanjuje količina komunikacija unutar sustava stvarajući dvije razine menadžmenta sustava (sustav upravljanja električnom energijom mikromreže i sustav upravljanja električnom energijom izvan mikromreže).

Ovakva vrsta sustava upravljanja donosi slijedeće novosti:

1. Uvodi koncept prilagodljive snage (eng. *adjustable power*) koji minimalizira operativne troškove sustava više spojenih mikromreža. Cjelokupni sustav upravljanja električnom energijom zajednice može povećati ili smanjiti proizvodnju električne energije iz distribuiranih izvora da bi smanjio operativne troškove pojedine mikromreže, kao i cijelog sustava mikromreža. To čini da bi izbjegao nepotrebno trgovanje sa vanjskom distribucijskom mrežom.
2. Omogućuje dva različita načina rada (podređeni i automatizirani) centralnog sustava upravljanja spremnicima električne energije. Nakon testiranja oba, predlaže se onaj s boljom učinkovitosti.
3. Implementirani su programi koji omogućuju strategiju prebacivanje vršnog opterećenja .
4. Hijerarhijski sustav upravljanja električnom energijom se koristi kako bi se raspodijelilo računalno opterećenje između centralnog sustava upravljanja električnom energijom i više-agentskog sustava upravljanja. Na taj način se realizira bolja komunikacija između različitih entiteta unutar pojedine mikromreže i sustava više povezanih mikromreža.

5.2.1. Model više-agentskog sustav upravljanja električnom energijom mikromreža

Sustav koji će biti opisan u ovome potpoglavlju se sastoji od tri mikromreže, a unutar svake se nalaze spremnici električne energije, obnovljivi izvor električne energije, upravljivi distribuirani izvor električne energije i opterećenje.

Upravljivi distribuirani izvor električne energije može biti dizelski agregat, bioplinska turbina ili bilo koji oblik upravljivog izvora. Obnovljivi distribuirani izvor električne energije mogu biti vjetroturbina ili fotonaponske ćelije. Spremnici električne energije mogu biti elektrokemijski članci ili teret sačinjen od upravljivih i konstantnih opterećenja.

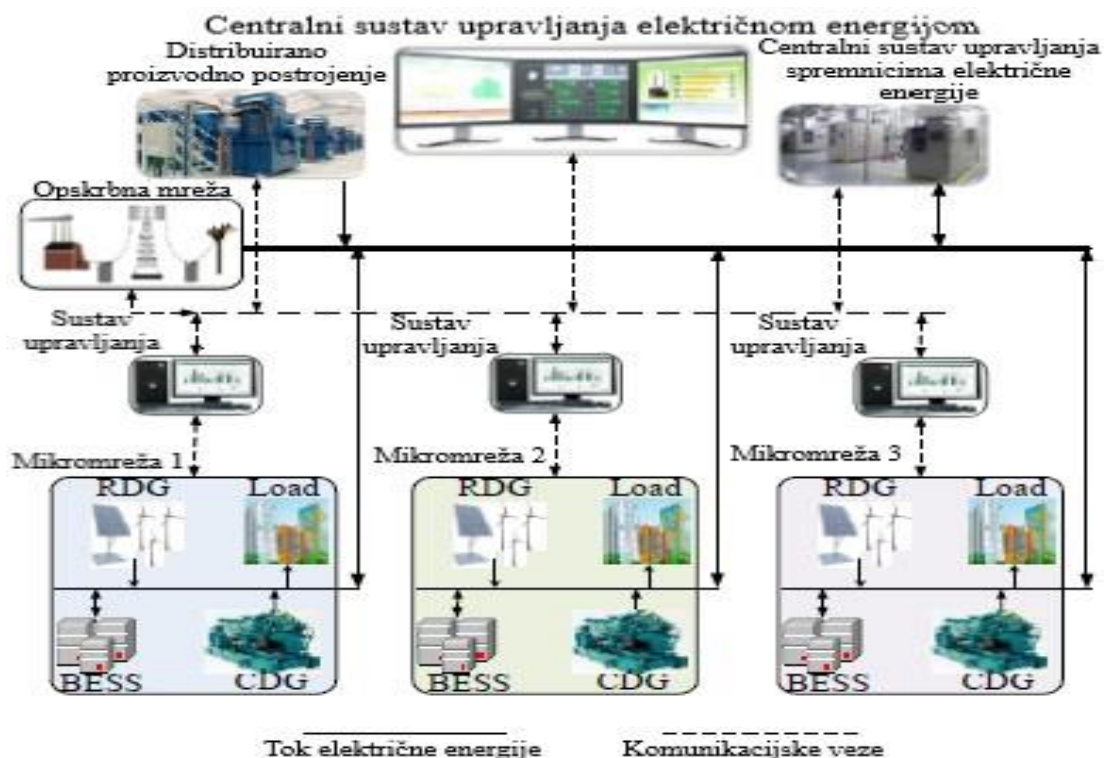
Sustav upravljanja električnom energijom mikromreže je odgovoran za optimiziranje lokalnih komponenti. Nakon optimiziranja viška i nedostatka energije, podaci o prilagodljivoj snazi (eng. *adjustable power*) zajedno sa cijenom šalju se centralnom sustavu upravljanja električnom energijom zajednice za svaki interval vremena.

Centralni sustav upravljanja spremnicima električne energije može raditi u podređenom ili automatiziranom načinu rada. Sustav šalje stanje kapaciteta spremnika centralnom sustavu upravljanja električnom energijom za svaki interval vremena.

Upravljivo distribuirano proizvodno postrojenje električne energije se sastoji od nekoliko distribuiranih izvora električne energije, gdje njegov sustav obavještava centralni sustav upravljanja o trošku proizvodnje za svaki interval vremena.

Centralni sustav upravljanja električnom energijom zajednice zaprima signale svaki put kada se električna energija kupuje ili prodaje u zajednicu ili prema vanjskoj mreži. Cijena je svaki put određena unaprijed.

Centralni sustav upravljanja električnom energijom je zadužen za cjelokupnu optimizaciju sustava. Nakon zaprimanja svih podataka od sustava upravljanja pojedinom mikromrežom, centralnog sustava upravljanja spremnicima električne energije, distribuiranog proizvodnog postrojenja električne energije te cijena na tržištu, tada pokreće optimizaciju kako bi minimalizirao operative troškove sustava više mikromreža. Sve navedene komponente modela se mogu vidjeti na slici 5.8. Unutra pojedine mikromreže se pojavljuje određene oznake. RDG (eng. *renewable distributed generation*) predstavlja obnovljive izvore električne energije, dok Load predstavlja opterećenje. BESS (eng. *battery energy storage system*) predstavlja sustav upravljanja spremnicima električne energije mikromreže, a CDG (eng. *controllable distributed generation*) označava upravljive distribuirane izvore električne energije.

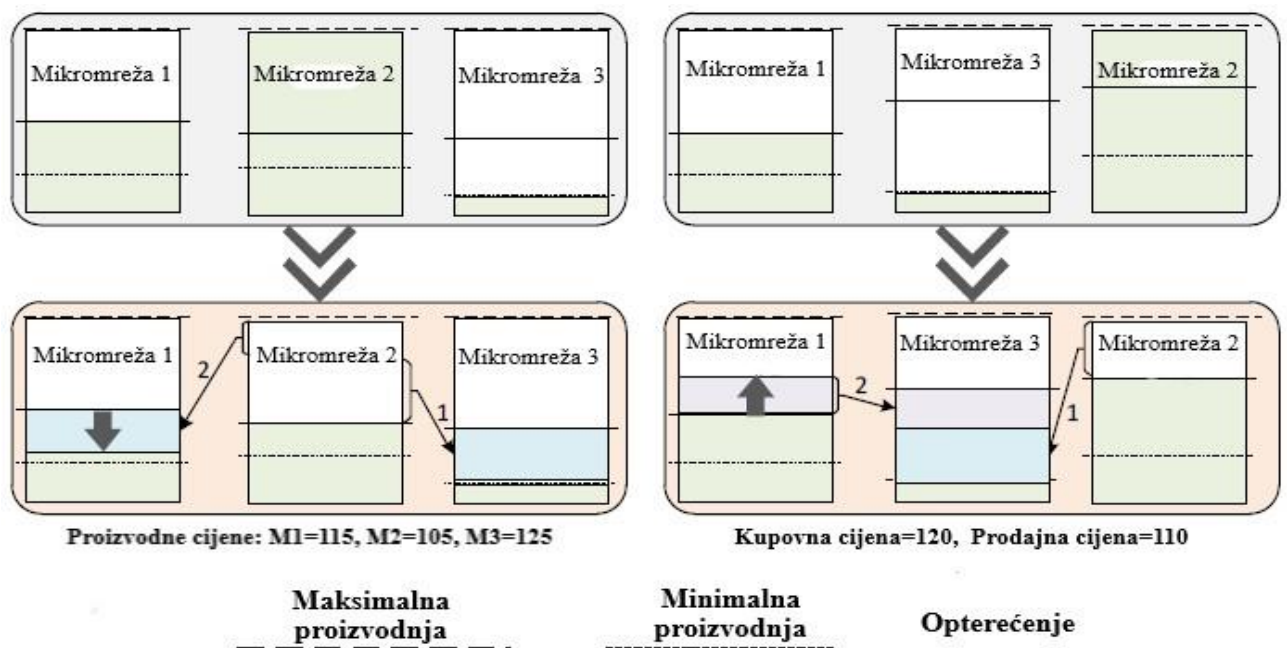


Slika 5.8. Model sustava više povezanih mikromreža [14]

Izlazna snaga svake mikromreže je prikazana na slici 5.9. dok istočkane linije predstavljaju minimalnu proizvodnu snagu, a isprekidane maksimalnu proizvodnju svake mikromreže za zadani interval vremena. Pune linije pokazuju zahtjeve opterećenja pojedine mikromreže, a zelena linija prikazuje količinu električne energije generiranu nakon lokalne optimizacije. Svijetlo plava linija prikazuje količinu električne energije zaprimljene od strane drugih mikromreža, dok ljubičasta linija označava zaprimljenu količinu električne energije od strane svih mikromreža iz sustava nakon globalne optimizacije. Strelice koje pokazuju prema gore ili dolje označavaju količinu primljene ili predane električne energije ovisno o „prilagodljivoj snazi“.

Električna energije generirana od strane upravljivih distribuiranih izvora mikromreže 1 jednaka je opterećenju kao na slici 5.9. (lijevi par). U isto vrijeme mikromreža 2 prodaje električnu energiju u distribucijsku mrežu po nižoj cijeni, dok može poslati višak svoje generirane energije mikromreži 3 kako bi popunila nedostatak električne energije. Ostatak od viška generirane energije mikromreža 2 može također poslati mikromreži 1 da smanji svoju proizvodnju jer su joj troškovi proizvodnje veći od prodajne cijene.

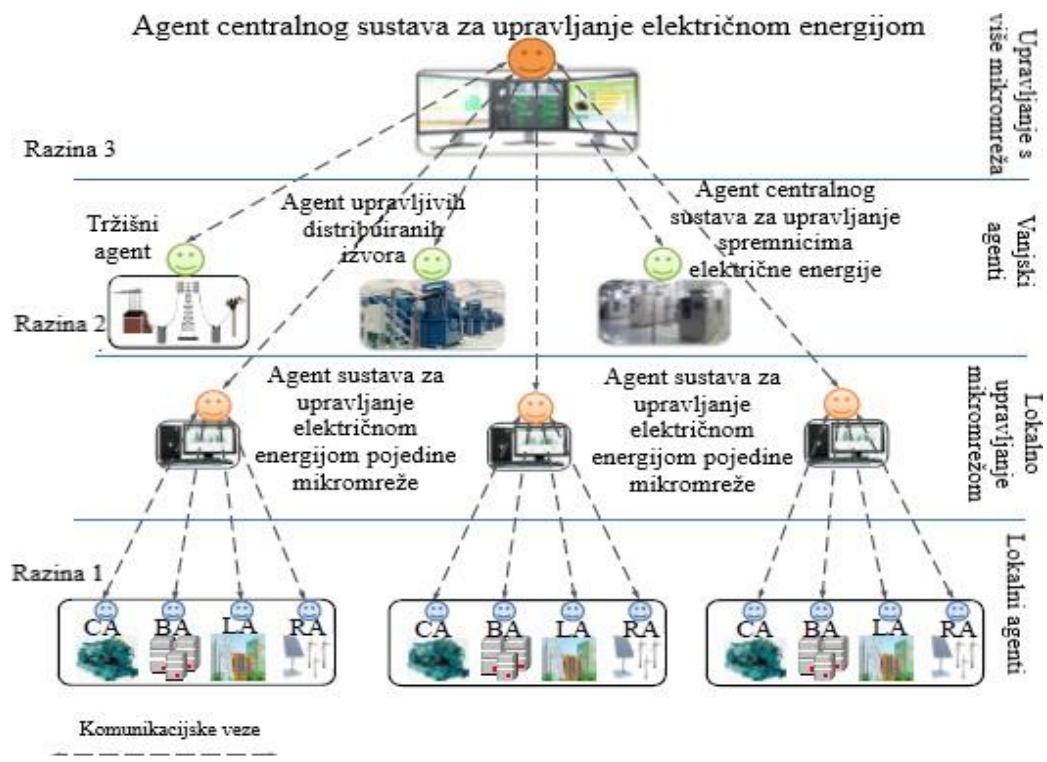
Na desnoj strani slike 5.9. vidljivo je da nedostatak električne energije u mikromreži 3 nije moguće upotpuniti samo viškom od mikromreže 2, već je potrebno kupiti određeni dio iz distribucijske mreže po većoj cijeni. Moguće rješenje je da mikromreža 1 poveća svoju proizvodnju (proizvodna cijena < kupovne cijene) i pošalje potrebnu količinu električne energije mikromreži 3.



Slika 5.9. Koncept „prilagodljive snage“ sustava [14]

Sustav za upravljanje spremnicima električne energije radi u podređenom modu i izvršava naredbe, a odluke o punjenju i pražnjenju spremnika energije donosi centralni sustav za upravljanje električnom energijom. Odluke donosi u ovisnosti o minimalizaciji operativnih troškova sustava više spojenih mikromreža. Ako radi u automatiziranom načinu rada, tada sam odlučuje o punjenju i pražnjenju spremnika električne energije zbog maksimizacije profita vlastite mikromreže.

Model sustava više povezanih mikromreža je vidljiv na slici 5.8. gdje je svaka mikromreža integrirana na sabirnice izmjeničnog napona putem sučelja energetske elektronike. Operativna strategija koristi tri razine za obavljanje procesa optimizacije. Agenti se kategoriziraju u četiri grupe prema prirodi zadatka za koji su zaduženi. Kompletna arhitektura sustava više povezanih mikromreža je vidljiva na slici 5.10.



Slika 5.10. Arhitektura više-agentskog sustava upravljanja više povezanih mikromreža [14]

Na slici 5.10. se kao lokalni agenti pojavljuju CA (eng. *controllable distributed generation agent*) koji predstavlja upravljive distribuirane izvore električne energije, BA (eng. *battery energy storage system agent*) koji predstavlja sustav upravljanja spremnicima električne energije. Također se pojavljuju LA (eng. *Load agent*) koji predstavlja agenta opterećenja i RA (eng. *renewable distributed generation agent*) koji predstavlja agenta obnovljivih distribuiranih izvora električne energije. Oni su agenti najniže razine i zaduženi su za komuniciranje sa agentom lokalnog sustava

upravljanja električnom energijom mikromreže, dok je on zadužen za dojavu nedostatka ili viška električne energije unutar svoje mikromreže centralnom sustavu upravljanja.

Vanjski agenti kao npr. tržišni agenti, agenti kontrolirane distribuirane proizvodnje ili agenti centralnog sustava za upravljanje spremnicima električne energije spadaju u skupinu agenata druge razine. Tržišni i agenti distribuirane proizvodnje električne energije šalju centralnom sustavu upravljanja svoje cijene električne energije, a zatim od njega dobivaju naredbe ovisno o izvršenoj optimizaciji koju on provodi.

Ovaj sustav upravljanja pokazuje kako je moguće nedostatak ili višak električne energije nadoknaditi kroz razmjenu ili prodaju sa drugim mikromrežama, a ne samo prodajom u distribucijsku mrežu. Također se to može izvršiti efikasnije i jeftinije pomoću pravilne optimizacije, a to će umanjiti potrebu za nepotrebnim trgovanjem sa vanjskom distributivnom mrežom. Kako bi optimizacija bila što učinkovitija, potrebno je koristiti podređeni način upravljanja spremnicima električne energije gdje njima upravlja centralni sustav upravljanja električnom energijom više povezanih mikromreža.

5.3. Blockchain tehnologija

Napomena: Potpoglavlje 5.3. je nastalo prijevodom i obradom materijala iz literature [15] F. Hasse, A. von Perfall, T. Hillebrand, E. Smole, L. Lay, M. Charlet, *Blockchain-an opportunity for energy producers and consumers?*, PWC, 2016. godine, dostupno na: www.pwc.com/utilities (pristupljeno 16.6.2020. godine)

Blockchain je posebna vrsta tehnologije za eng. *peer-to-peer* transakcijske platforme koje koriste decentraliziranu vrstu skladištenja kako bi se zabilježili svi transakcijski podaci. Prvi Blockchain je razvijen u financijskom sektoru da služi kao temelj za kriptovalutu „Bitcoin“. Pojavljuje se sve više aplikacija koje integrirajući određene mehanizme omogućavaju da stvarne transakcije budu izvršene na decentraliziranoj bazi, te pojačavaju funkcionalnost jezgre ove tehnologije. Takvi mehanizmi se zovu „pametni ugovori“ (eng. *Smart contracts*) i djeluju na bazi individualno definiranih pravila (npr. Specifikacija količine, kvalitete i cijene) koja omogućuju automatizirano spajanje/poklapanje distribuiranih opskrbljivača i potencijalnih kupaca.

Blockchain tehnologija mijenja način izvođenja transakcija tako da odvaja transakcijski model od centralizirane strukture (banaka, trgovinskih platformi, energetske kompanije) prema decentraliziranom sustavu (krajnjem kupcu, potrošaču energije). Ovim postupkom se isključuje

potreba za trećom strankom kao posrednikom koja je potrebna u većini industrija (barem prema teoriji Blockchain tehnologije), te se omogućuju da transakcije budu inicijalizirane i provedene direktno eng. *peer-to-peer* (koncept gdje su međusobno povezani kupci i proizvođači tj. Računalo svakog korisnika sa svakim putem ethernet). Ovaj proces može smanjiti troškove i ubrzati vrijeme izvođenja procesa. Kao rezultat sustav postaje fleksibilniji jer se radni zadaci obavljaju automatski kroz pametne ugovore.

Blockchain sustav više ne zahtijeva posrednike niti bilo kakvu vrstu autoriteta. Konflikte se rješavaju koristeći „princip roja“ gdje se izražavaju i razmatraju mišljenja svih uključenih sudionika. Takav model je još uvijek teško postaviti u praksu jer postoji mnogo zakona i regulatornih zahtijeva koje Blockchain mora zadovoljiti. Stoga se Blockchain tehnologija još uvijek razvija i nije postigla svoj potpuni potencijal iskoristivosti.

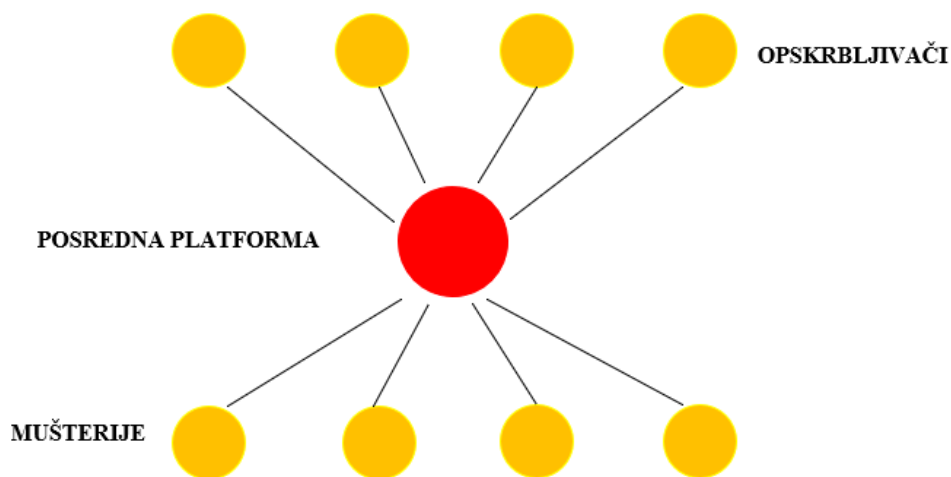
Mnoge industrije su tek u početku razvoja Blockchain tehnologije, a pojedini projekti i izlaze na tržište. U elektroenergetskom sektoru postoji nekoliko pilot projekata koji testiraju ovu tehnologiju. Primjer korištenja je se dogodio u New Yorku 2016. godine kada je električna energija proizvedena iz distribuiranog izvora prodana direktno između susjeda pomoću Blockchain sustava prvi put ikada u svijetu. Cilj je uspostaviti potpuno decentralizirano elektroenergetsko tržište unutar kojeg će ugovori o opskrbi električnom energijom biti provedeni direktno između proizvođača i potrošača (bez uključivanja treće strane kao posrednika), te će biti automatizirani. Blockchain tehnologija pojačava pojedinačnu tržišnu ulogu proizvođača i potrošača, omogućava kućanstvima ne samo da troše električnu energiju, već da ju proizvode, kupuju i prodaju direktno putem automatiziranog sustava. Trenutni zakonski i regulatorni okviri koji se dotiču potrošača/proizvođača su jasno definirani radi zaštite potrošača. U daljnjoj budućnosti ovi okviri će se morati prilagoditi zahtjevima decentraliziranog transakcijskog modela.

Blockchain tehnologija mnogo obećava, ne samo da bi bila upotrebljavana za izvršavanje transakcija prilikom prodaje električne energije, već da bude temelj za mjerenje potrošnje i naplatu prodane električne energije. Ima potencijal da promjeni elektroenergetske sustave kakvi su poznati polazeći s promjenama od pojedinih sektora, do krajnjeg cilja koji bi bio transformacija ukupnog elektroenergetskog sustava.

5.3.1. Općenito o Blockchain tehnologiji

Kako je spomenuto u uvodu Blockchain inovacija je da se više ne koristi tehnika centralnog skladištenja transakcijskih podataka, već da se oni distribuiraju svima računalima korisnika koji su lokalno međusobno povezani. Blockchain omogućava postojanje digitalnih ugovora kojima pojedinac odobrava i plaća transakciju (prodaju električne energije) direktno (eng. *peer to peer*) sa drugom strankom. Navedeni koncept znači da se sve transakcije spremaju na mrežu sastavljenu od računala opskrbljivača i potrošača koji sudjeluju u transakcijama, kao i od računala mnogih drugih sudionika. Posrednici pri prodaji kao što su npr. banke više nisu potrebni unutar ovoga modela jer drugi sudionici sudjeluju kao svjedoci transakcije koja se odvija između opskrbljivača i kupca.

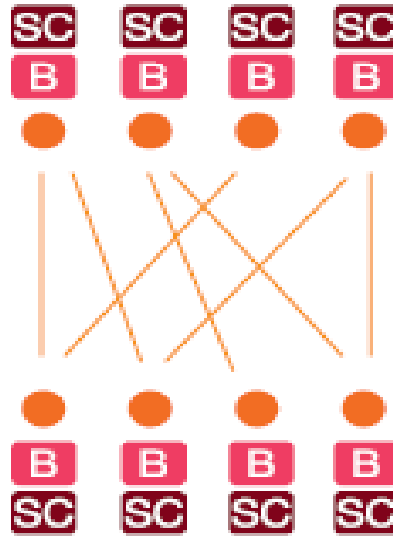
Standardni transakcijski model se sastoji od opskrbljivača (prodavača ili proizvođača električne Energije), posredne platforme (banke, energetske kompanije...) i mušterija (kupci, energetske potrošača). Višestruki standardni transakcijski modeli se oslanjaju na centralni autoritet (posrednu platformu) gdje se također spremaju svi transakcijski podaci, a primjer sheme je vidljiv na slici 5.11.



Slika 5.11. Shema standardnog transakcijskog modela

Unutar Blockchain transakcijskog model transakcije se provode direktno između opskrbljivača i njihovih mušterija. Svi transakcijski podaci se spremaju na distribuirano Blockchain računalo sudionika sa svima relevantnim informacijama. Sve transakcije se izvode na temelju pametnih ugovora koji se baziraju na unaprijed definiranima pravilima koja određuju kvalitetu, cijenu,

količinu itd. Blockchain model je potpuno automatiziran i decentraliziran transakcijski model koji ne zahtijeva posrednike pri izvršavanju operacija. Shemu modela moguće je vidjeti na slici 5.12.



Slika 5.12. Shema Blockchain transakcijskog modela [15]

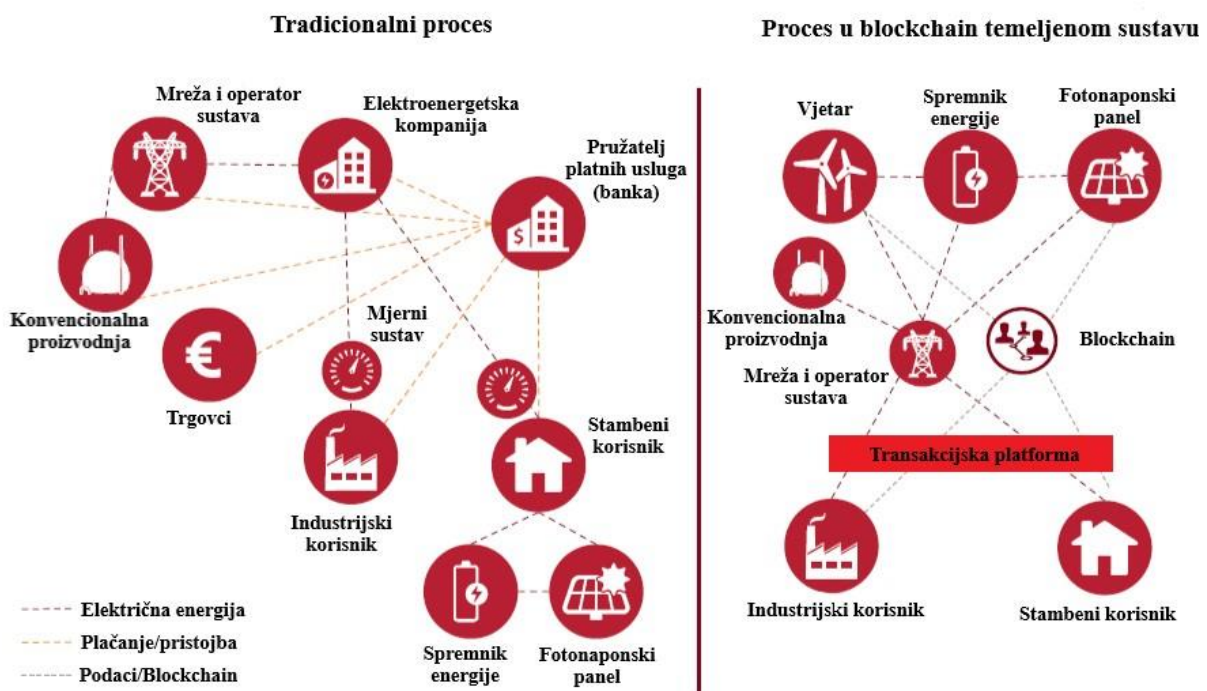
Blockchain radi na takvom principu da kada opskrbljivač i kupac pristanu na transakciju, također trebaju definirati varijable transakcije tako što odrede primatelja, pošiljatelja, veličinu transakcije kao i neke dodatne stvari. Sve definirane informacije povezane sa transakcijom se kombiniraju sa detaljima drugih transakcija nastalih u istome vremenu kako bi se stvorio novi podatkovni blok. Svaka se transakcija kriptira i distribuira svima lokalno povezanim računalima sudionika, a računala sudionika automatski odobravaju transakciju. Podaci unutar podatkovnog bloka se provjeravaju pomoću algoritama koji svakome bloku dodjeljuju jedinstveni kod koji se sastoji od brojeva i slova sastavljenih iz podataka unutar bloka. Svi kodovi se neprestano provjeravaju radi ispravnosti, a zatim se pojedini blokovi kombiniraju i formiraju lanac (eng. *chain*) jedinstvenih blokova podataka u tzv. Blockchain. Zbog takve vrste kombinacije podataka koje tvore podatkovne blokove onemogućeno je izmjenjivanje podataka koji su već spremljeni na Blockchain. Zbog toga unutar ove tehnologije nisu potrebni posrednici pri transakcijama.

5.3.2. Blockchain tehnologija u elektroenergetskom sektoru diljem svijeta

Internacionalne elektroenergetske kompanije rade na Blockchain pilot projektima koji će povezati kupce (koje su ujedno i proizvođači električne energije) i/ili omogućiti direktnu povezanost između opskrbljivača i potrošača električne energije. Takvi projekti će postati temelj za daljnju decentralizaciju elektroenergetskog sustava.

Blockchain ističe svoju funkcionalnost kroz mogućnosti pružanja usluge distribuirane i sigurne pohrane transakcijskih podataka (dokumentacije o vlasništvu, mjerenja i izračuna potrošnje). Ovakva usluga može olakšati potrošačima koji posjeduju distribuirani izvor električne energije da proizvedenu energiju prodaju direktno susjedu. Omogućava da elektroenergetska mreža bude kontrolirana pomoću pametnih ugovora (eng. *Smart contracts*) tj. pametni ugovori bi signalizirali sustavu kada da se započne transakcija. Naravno ovaj postupak bi bio temeljen na unaprijed definiranim pravilima stvorenima da se omogući da su svi tokovi energije automatizirani kako bi zadovoljavali ponudu i potražnju. Npr. kada bi postojao višak generirane energije, pametni ugovori bi automatski omogućili njezin prijenos u spremnike energije iz kojih bi se kasnije mogla koristiti u slučajevima nedovoljne proizvodnje. Na ovaj način Blockchain tehnologija bi direktno mogla kontrolirati tokove energije u mreži i u/iz spremnika energije.

Kombiniranjem individualnih Blockchain primjena moguća je realizacija decentraliziranog prijenosa električne energije i opskrbnog sustava. Energija koja je generirana u distribuiranim izvorima bi mogla biti transportirana do krajnjeg korisnika putem manjih mreža. Pametni mjerni uređaji bi mjerili količinu proizvedene i potrošene električne energije, dok razmjena energije i plaćanje bi bilo kontrolirano putem pametnih ugovora kroz Blockchain. Ovaj princip je vidljiv na slici 5.13.



Slika 5.13. Usporedba tradicionalnog i Blockchain temeljenog elektroenergetskog sustava [15]

Ova vrsta tehnologije bi također mogla biti iskorištena za izradu modela naplate koji bi omogućio široku primjenu električnih vozila. Široka primjena je moguća samo ako vlasnici električnih vozila imaju pristup stanicama za punjenje bez obzira gdje se nalaze. Današnji je problem kako pojednostaviti naplatu na stanicama za punjenje električnih vozila koje se nalaze na javnim lokacijama, kako bi ih svi mogli koristiti. Blockchain tehnologija bi mogla omogućiti naplatu preuzete električne energije od strane električnih vozila.

Jedna od mogućnosti Blockchain tehnologije je ta da korisnik može pratiti vlastitu potrošnju električne ili toplinske energije spajanjem pametnih uređaja na Blockchain sustav. Ukoliko korisnik posumnja da mu je naplaćena količina električne energije koju nije potrošio, tada ima mogućnost to provjeriti unutar Blockchain baze podataka jer kao što je već spomenuto podaci unutar baze se ne mogu promijeniti jednom kada se unesu automatski.

Primjer primjene Blockchain tehnologije u svijetu je Mikromreža u Brooklynu. Cilj projekta je testirati kako Blockchain tehnologija može biti iskorištena pri direktnoj prodaji električne energije nastale iz fotonaponskih panela između susjeda. Započeo je 2016. godine te istražuje kako integrirati stambene zgrade opremljene distribuiranim izvorom energije (fotonaponskim panelima) u decentraliziranu eng. *peer to peer* električnu mrežu. Ukupno pet zgrada sa instaliranim fotonaponskim sustavima opskrbljuju same sebe, a višak električne energije prodaju susjednim zgradama. Sve zgrade su povezane kroz konvencionalnu elektroenergetsku mrežu, a prijenosom se upravlja putem Blockchain tehnologije. Ovakav projekt predstavlja mogući izgled budući distribuiranih električnih mreža upravljanih automatski od strane lokalne zajednice.

Implementacija ovoga projekta zahtjeva pametni mjerni sustav i Blockchain softver sa integriranim pametnim ugovorima. Pametni mjerni sustavi su potrebni za mjerenje količine proizvedene električne energije. Blockchain softver je potreban da bi se postigao učinak prijenosa energije između susjeda, a pametni ugovori su potrebni da bi izvršili i zabilježili transakcije automatski i sigurno. Zasad se transakcije izvršavaju ručno, dok će se u budućnosti one regulirati pomoću pametnih uređaja (npr. prema kojoj cijeni će se moći kupiti električna energija od susjeda) i biti će potpuno automatizirane prema unaprijed zadanim pravilima.

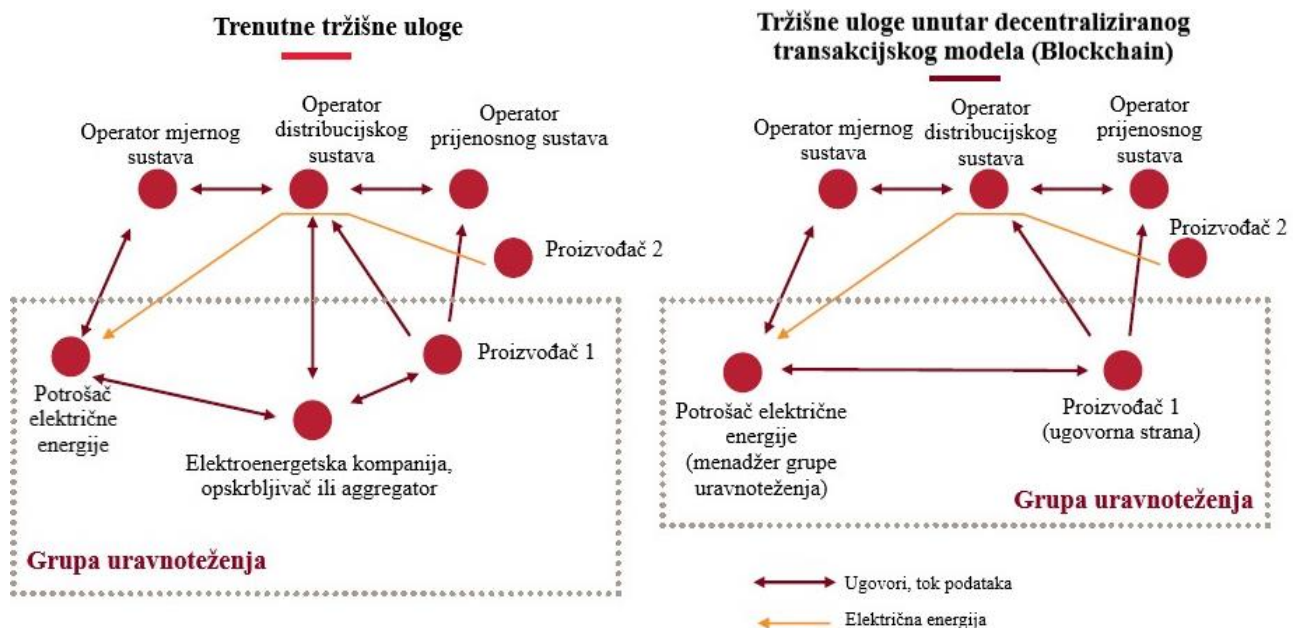
Jedan od ciljeva ovoga projekta je stvoriti lokalno tržište za obnovljive izvore energije gdje će se testirati da li proizvođač/potrošač može prodavati električnu energiju kada hoće i to prema varijabilnoj cijeni umjesto onda kada njemu nije potrebna prema fiksnoj cijeni.

5.3.3. Regulatorni izazovi usmjereni prema Blockchain tehnologiji u elektroenergetskom sektoru

Ukoliko se uspije implementirati decentralizirani transakcijski model temeljen na Blockchain tehnologiji, to bi promijenilo trenutne tržišne uloge što bi utjecalo na regulatorni sustav. Svaki potrošač električne energije bi trebao upravljati vlastitom potrošnjom, te više ne bi bilo potrebe za dosadašnje prikupljanje podataka o potrošnji jer bi sve transakcije bile vidljive unutar Blockchain sustava.

Trenutno kupci imaju slobodu izbora vlastitog opskrbljivača električnom energijom na liberaliziranom tržištu električne energije. Jedna od velikih prednosti Blockchain temeljenog transakcijskog modela je ta što se točno zna koji je potrošač u mreži preuzeo električnu energiju. To znači da sva proizvedena i potrošena električna energija može biti precizno naplaćena prema promjenjivoj cijeni. Uz navedenu tehnologiju moguće je bolje ugoditi mrežne operacije na distribucijskoj i prijenosnoj razini što bi smanjilo potrebu za energijom uravnoteženja koja se naplaćuje sudionicima tržišta.

Na slici 5.14 su prikazane trenutne tržišne uloge i što bi se promijenilo ukoliko bi se implementirala Blockchain tehnologija. Svi potrošači bi postali dio grupe zadužene za troškove uravnoteženja i pristali na zahtjeve ove tržišne uloge. Od njih bi se zahtijevalo da prognoziraju vlastitu potrošnju električne energije i podnose istu operatoru mreže. Operatori distribucijskih sustava bi također imali uvid u informacije o transakcijama kako bi mogli naplatiti troškove prijenosa električne energije kroz vodove krajnjim kupcima unutar Blockchain sustava.



Slika 5.14. Usporedba trenutnih tržišnih uloga sa tržišnim ulogama unutar decentraliziranog transakcijskog modela (Blockchain) [15]

Kada bi se financijske transakcije prenijele iz nadležnosti banaka u nadležnost Blockchain sustava, bilo bi potrebno odabrati operatora platforme koji će biti zadužen za osiguranje ispravnosti izvršenja financijskih transakcija. Shvatljivo je da idealan Blockchain model predviđa potrebu za odgovornim centralnim autoritetom, kao i određenim pravilima pouzdanosti kako bi se osigurao siguran rad ovakve platforme. Pravila bi bila potrebna da upravljaju odgovornošću članova u slučaju kvarova.

Ukoliko se uspije implementirati Blockchain sustav postavlja se nekoliko pitanja. Prvo pitanje je tko izvršava ulogu operator mjernog sustava. Takvu ulogu u ovome slučaju bi trebao preuzeti potrošač. Slijedeće pitanje je tko je odgovoran za podnošenje prognoze potrošnje operatoru prijenosnog sustava. Zbog toga što operatori prijenosnog sustava rade dnevne prognoze potrebne količine energije za dan unaprijed i potreban im je plan potrošnje mreže Blockchain sustava, stoga bi ga menadžer grupe uravnoteženja trebao obavijestiti o sutrašnjoj prognozi potrošnje.

5.3.4. Prednosti i nedostaci Blockchain tehnologije

Ukoliko se uspije implementirati Blockchain model u elektroenergetski sektor, to bi drastično promijenilo odnos između proizvođača, opskrbljivača, operatora sustava i potrošača električne energije. Prednost za kupce bi bila veća fleksibilnost i transparentnost, povećanje broja sudionika na tržištu i potencijalno smanjenje električne energije. Zbog toga što je ova vrsta tehnologije nova i još se razvija, uz navedene prednosti bi donijela i određene rizike.

Blockchain model radi na pretpostavci da svi opskrbljivači direktno vrše transakcije s kupcima. Zbog toga će se smanjiti broj posrednika (banka, transakcijske platforme, elektroenergetske kompanije itd.) pri transakcijama. Takvim transakcijama bi se smanjili:

- Operativni troškovi nastali pri mjerenju i naplaćivanju potrošnje
- Troškovi koje banka naplaćuje prilikom financijskih transakcija
- Troškovi prijenosa električne energije

Navedenim sniženjima bi se smanjila ukupna cijena električne energije bilo direktno ili indirektno. Naravno Blockchain sustav ima svoje operativne troškove koji uključuju transakcijska davanja za svaku transakciju.

Upotrebom ove vrste tehnologije povećala bi se transparentnost prema kupcima tako što bi im se omogućilo praćenje toka energije od izvora do vlastitih trošila. Imali bi mogućnost vidjeti gdje je

proizvedena kupljena električna energija. Tako bi se mogao utvrditi postotak električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora. Podaci o kupnji i prodaji bi bilo javno vidljivi unutar baze podataka Blockchain sustava, ali svaki korisnik bi se koristio kriptiranim imenom.

Također Blockchain tehnologija bi poticala da sve veći broj korisnika postane proizvođač ugradnjom distribuiranog izvora. To bi im omogućilo da zadovoljavaju vlastitu potrošnju električne energije, ali i da prodaju generirani višak svojim susjedima ili u mrežu. Pojednostavljeni putevi prema tržištu električne energije za distribuirane izvore električne energije bi ubrzali porast implementacije obnovljivih izvora energije što bi imalo indirektni utjecaj na ekonomsku strukturu pojedine zajednice.

Kako je napomenuto Blockchain tehnologija je još uvijek u razvoju što znači da dolazi sa razinom nesigurnosti i rizika. Decentralizirani Blockchain sustav bez pretpostavljenog autoriteta mogao bi imati mnogo problema. Jedan od problema se dotiče osobnog pristupa vlastitom profilu upravljanja potrošnje kućanstva. Ukoliko kupac izgubi pristup, a da ne postoji pretpostavljeni autoritet on bi izgubio mogućnost upravljanja vlastitim kućanstvom.

Jedan od rizika koji se javlja je i sigurnosni rizik Blockchain sustava. Pod ovim rizikom se podrazumijevaju napadi hakera s ciljem krađe privatnih podataka i iskorištavanja u svrhu nezakonitih radnji. Također se javlja rizik od tehničkih grešaka tj. greški na sustavu.

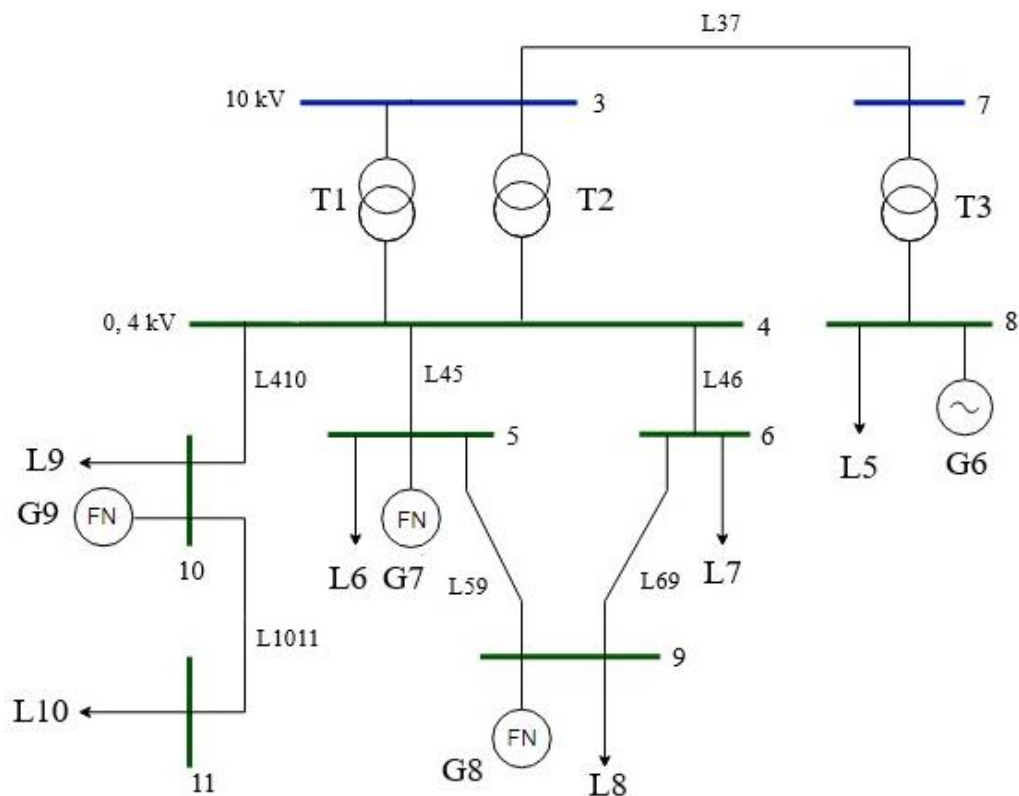
Naravno jedan od osnovnih rizika je neprihvatanje ove tehnologije od strane dijela potrošača. To se može dogoditi iz raznih razloga kao što su npr. Strah od povećanja cijene električne energije, strah od učestalijih prekida opskrbe, nedovoljne informiranosti potrošača itd.

6. PRAKTIČNA SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU

Praktični dio simulacije ovoga diplomskog rada će biti napravljen u računalnom programu *PowerWorld* gdje će biti analizirani optimalni tokovi snaga za svaku pojedinačnu mikromrežu, a zatim za cijeli sustav koji se sastoji od dvije mikromreže sa vlastitima distribuiranim izvorima i vanjskom opskrbnom mrežom.

6.1. Model promatranog sustava

Model sustava sastoji se od dvije mikromreže i vanjske opskrbnne mreže. Jedna mikromreža je industrijska, a druga poljoprivredno-gospodarstvena mikromreža. Poljoprivredno-gospodarstvena mikromreža je preuzeta iz literature [19], a industrijska napravljena za potrebe ovoga diplomskoga rada. Na slici 6.1. se nalazi shema poljoprivredno-gospodarstvene mikromreže.



Slika 6.1. Poljoprivredno-gospodarstvena mikromreža

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

- sabirnica 8: bioplinska elektrana
- sabirnica 3: točka zajedničkog spoja mikromreže sa vanjskom opskrbnom mrežom i drugom mikromrežom
- sabirnica 6: upravna zgrada i pomoćni objekti
- sabirnica 5: štala za muzne krave 1 na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 9: štala za muzne krave 2 na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 10: dvorana za mužnju na kojoj se nalazi FN elektrana
- sabirnica 11: štala za krave u tovu

Bazna snaga sustava je $S_B=100$ MVA i uz pomoć nje su preračunate stvarne vrijednosti u postotne vrijednosti potrebne za izračun simulacije. U sljedećim tablicama se nalaze podaci o poljoprivredno-gospodarstvenoj mikromreži.

Tablica 6.1. Nazivni podaci transformatora T3 [19] i izračunati podaci 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 | |

Tablica 6.2. Nazivni podaci transformatora T1 i T2 [19] i izračunati podaci 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 L37 dani su u tablici 6.3., za kabel L45 u tablici 6.4., za kabel L410 u tablici 6.5., a za sve ostale kabele u tablici 6.6. Duljine kabela dane su u tablici 6.7.

Tablica. 6.3. Nazivni podaci kabela L37[19]

| Mjesto polaganja i vrsta vodiča | | Presjek vodiča [mm ²] | 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 | | | |

Tablica 6.4. Nazivni podaci za kabel L45 [19]

| Mjesto polaganja i vrsta vodiča | | Presjek vodiča [mm ²] | 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 |

Tablica 6.5. Nazivni podaci za kabel L410 [19]

| Mjesto polaganja i vrsta vodiča | | Presjek vodiča [mm ²] | 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 |

Tablica. 6.6. Nazivni podaci za sve ostale kabele [19]

| Mjesto polaganja i vrsta vodiča | | Presjek vodiča [mm ²] | 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 |

Tablica 6.7. Duljine kabela [19]

| Kabel | L37 | L46 | L45 | L410 | L69 | L59 | L1011 |
|-------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|
| Duljina [m] | 200 | 65 | 55 | 70 | 83 | 90 | 68 |

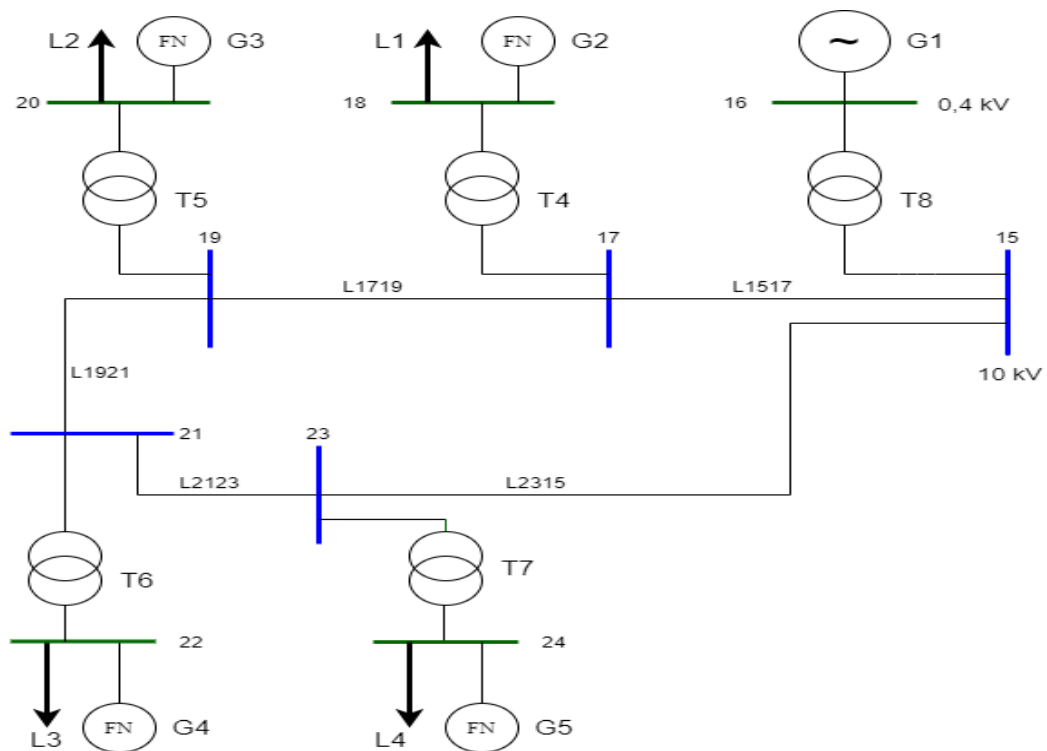
Tablica 6.8. Maksimalna proizvodnja generatora [19]

| Generator | Proizvodnja (max,) |
|-----------|--------------------|
| | P [kW] |
| G6 (BP) | [0,370] |
| G7 (FN) | [0,80] |
| G8 (FN) | [0,70] |
| G9 (FN) | [0,100] |

Tablica 6.9. Maksimalna potrošnja pojedinih trošila [19]

| Trošilo | Potrošnja (max,) |
|---------|------------------|
| | P [kW] |
| L5 | 30 |
| L6 | 150 |
| L7 | 60 |
| L8 | 150 |
| L9 | 100 |
| L10 | 125 |

Na slici 6.2. se nalazi industrijska mikromreža koja je napravljena za potrebe ovoga diplomskog rada.



Slika 6.2. Shema industrijske mikromreže

Model mikromreže je zamišljen kao industrijska mikromreža čije sabirnice predstavljaju sljedeće:

- sabirnica 15: točka zajedničkog spoja mikromreže sa vanjskom opskrbnom mrežom i drugom mikromrežom
- sabirnica 16: sabirnica elektrane na biomasu

Sabirnice 18, 20, 22, 24 predstavljaju niskonaponske izvode sa promjenjivim opterećenjem i fotonaponskim panelima koji će potpomagati elektranu na biomasu unutar ove mikromreže.

Tablica 6.10. Nazivni podaci transformatora T8 i izračunati podaci transformatora [20]

| Nazivna snaga | Napon | | Gubici | | Spoj | u_k |
|---------------|---------------|------|---------------|-------------|---------------------|-------|
| | viši | niži | prazni hod | zbog tereta | | |
| [kVA] | [kV] | [kV] | [W] | [W] | | [%] |
| 6000 | 10 | 6,3 | 9400 | 54000 | YNd5 | 10 |
| Z_T [p. u.] | R_T [p. u.] | | X_T [p. u.] | | \bar{Z}_T [p. u.] | |
| 1,66 | 0,15 | | 1,65 | | 0,15 + j1,65 | |

Tablica 6.11. Nazivni podaci transformatora T6 i izračunati podaci transformatora [20]

| 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 | |

Tablica 6.12. Nazivni podaci transformatora T4, T5, T7 i izračunati podaci transformatora [20]

| Nazivna snaga | Napon | | Gubici | | Spoj | u_k |
|---------------|---------------|------|---------------|-------------|---------------------|-------|
| | viši | niži | prazni hod | zbog tereta | | |
| [kVA] | [kV] | [V] | [W] | [W] | | [%] |
| 630 | 10 | 400 | 1300 | 6500 | Dyn5 | 4 |
| Z_T [p. u.] | R_T [p. u.] | | X_T [p. u.] | | \bar{Z}_T [p. u.] | |
| 6,349 | 1,637 | | 6,134 | | 1,637 + j6,134 | |

Nazivni podaci za kabele su jednaki jer se koristi ista vrsta kabela, ali drugačije duljine. Podaci kabela su preuzeti iz literature [21].

Tablica 6.13. Podaci kabela L1719, L1517, L1921, L2123, L2315

| Mjesto polaganja i vrsta vodiča | | Presjek vodiča [mm^2] | Strujno opterećenje [A] | Nazivni napon kabela [kV] | Istosmjerni otpor na 20 °C [Ω/km] | Kapacitet [$\mu F / km$] | Induktivitet [mH/km] |
|---------------------------------|----------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|----------------------|
| Zemlja | Aluminij | 150 | 360 | 10 | 0,206 | 0,371 | 0,54 |
| Jedinični otpor [Ω/km] | | | | Jedinična reaktancija [Ω/km] | | | |
| 0,206 | | | | 0,169 | | | |

Tablica 6.14. Duljine kabela

| Kabel | L1517 | L1719 | L1921 | L2123 | L2315 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Duljina [m] | 500 | 750 | 350 | 170 | 300 |

Tablica 6.15. Maksimalna proizvodnja generatora

| Generator | Proizvodnja (max.) |
|-----------|--------------------|
| | P [kW] |
| G1 (BM) | [0,1100] |
| G2 (FN) | [0,100] |
| G3 (FN) | [0,100] |
| G4 (FN) | [0,100] |
| G5 (FN) | [0,100] |

Tablica 6.16. Maksimalna potrošnja pojedinih trošila

| Trošilo | Potrošnja (max.) |
|---------|------------------|
| | P [kW] |
| L1 | 270 |
| L2 | 130 |
| L3 | 430 |
| L4 | 270 |

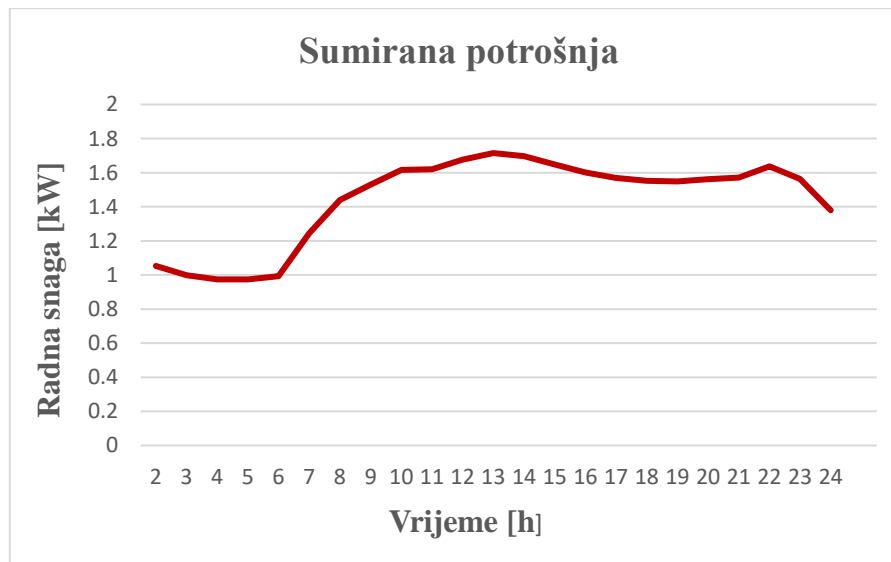
Tablica 6.17. Satna proizvodnja FN-a

| Vrijeme [h] | G2,G3,G4,G5,G9 [kWh] | G7 [kWh] | G8[kWh] |
|-------------|-------------------------|----------|---------|
| 0 | 0,00 | 0 | 0 |
| 1 | 0,00 | 0 | 0 |
| 2 | 0,00 | 0 | 0 |
| 3 | 0,00 | 0 | 0 |
| 4 | 0,00 | 0 | 0 |
| 5 | 0,62 | 0,495 | 0,433 |
| 6 | 8,10 | 6,476 | 5,666 |
| 7 | 28,36 | 22,684 | 19,84 |
| 8 | 52,50 | 42,003 | 36,75 |
| 9 | 72,18 | 57,741 | 50,523 |
| 10 | 86,72 | 69,378 | 60,705 |
| 11 | 96,13 | 76,901 | 67,288 |
| 12 | 100,00 | 80 | 70 |
| 13 | 98,97 | 79,177 | 69,280 |
| 14 | 94,05 | 75,241 | 65,836 |
| 15 | 84,26 | 67,406 | 58,981 |
| 16 | 67,95 | 54,356 | 47,562 |
| 17 | 44,95 | 35,957 | 31,46 |
| 18 | 17,95 | 14,362 | 12,567 |
| 19 | 2,93 | 2,3475 | 2,054 |
| 20 | 0,00 | 0 | 0 |
| 21 | 0,00 | 0 | 0 |
| 22 | 0,00 | 0 | 0 |
| 23 | 0,00 | 0 | 0 |

Tablica 6.18. Satna potrošnja trošila

| Vrijeme [h] | P _{L1} [MWh] | P _{L2} [MWh] | P _{L3} [MWh] | P _{L4} [MWh] | P _{L5} [MWh] | P _{L6} [MWh] | P _{L7} [MWh] | P _{L8} [MWh] | P _{L9} [MWh] | P _{L10} [MWh] |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0,182 | 0,087 | 0,29 | 0,182 | 0,020 | 0,101 | 0,040 | 0,101 | 0,067 | 0,084 |
| 2 | 0,165 | 0,079 | 0,264 | 0,165 | 0,018 | 0,092 | 0,036 | 0,092 | 0,061 | 0,076 |
| 3 | 0,157 | 0,075 | 0,25 | 0,157 | 0,017 | 0,087 | 0,034 | 0,087 | 0,058 | 0,072 |
| 4 | 0,153 | 0,073 | 0,244 | 0,153 | 0,017 | 0,085 | 0,034 | 0,085 | 0,056 | 0,071 |
| 5 | 0,153 | 0,073 | 0,244 | 0,153 | 0,017 | 0,085 | 0,034 | 0,085 | 0,056 | 0,071 |
| 6 | 0,156 | 0,075 | 0,248 | 0,156 | 0,017 | 0,086 | 0,034 | 0,086 | 0,057 | 0,072 |
| 7 | 0,196 | 0,094 | 0,312 | 0,196 | 0,021 | 0,108 | 0,043 | 0,108 | 0,072 | 0,090 |
| 8 | 0,226 | 0,109 | 0,361 | 0,226 | 0,025 | 0,126 | 0,050 | 0,126 | 0,084 | 0,105 |
| 9 | 0,24 | 0,115 | 0,383 | 0,24 | 0,026 | 0,133 | 0,053 | 0,133 | 0,089 | 0,111 |
| 10 | 0,254 | 0,122 | 0,405 | 0,254 | 0,028 | 0,141 | 0,056 | 0,141 | 0,094 | 0,117 |
| 11 | 0,255 | 0,122 | 0,406 | 0,255 | 0,028 | 0,141 | 0,056 | 0,141 | 0,094 | 0,118 |
| 12 | 0,264 | 0,127 | 0,42 | 0,264 | 0,029 | 0,146 | 0,058 | 0,146 | 0,097 | 0,122 |
| 13 | 0,27 | 0,13 | 0,43 | 0,27 | 0,03 | 0,15 | 0,06 | 0,15 | 0,1 | 0,125 |
| 14 | 0,267 | 0,128 | 0,425 | 0,267 | 0,029 | 0,148 | 0,059 | 0,148 | 0,099 | 0,123 |
| 15 | 0,259 | 0,124 | 0,413 | 0,259 | 0,028 | 0,144 | 0,057 | 0,144 | 0,096 | 0,120 |
| 16 | 0,252 | 0,121 | 0,401 | 0,252 | 0,028 | 0,140 | 0,056 | 0,140 | 0,093 | 0,116 |
| 17 | 0,247 | 0,118 | 0,393 | 0,247 | 0,027 | 0,137 | 0,054 | 0,137 | 0,091 | 0,114 |
| 18 | 0,244 | 0,117 | 0,389 | 0,244 | 0,027 | 0,135 | 0,054 | 0,135 | 0,090 | 0,113 |
| 19 | 0,243 | 0,117 | 0,388 | 0,243 | 0,027 | 0,135 | 0,054 | 0,135 | 0,090 | 0,112 |
| 20 | 0,245 | 0,118 | 0,391 | 0,245 | 0,027 | 0,136 | 0,054 | 0,136 | 0,091 | 0,113 |
| 21 | 0,247 | 0,119 | 0,393 | 0,247 | 0,027 | 0,137 | 0,054 | 0,137 | 0,091 | 0,114 |
| 22 | 0,257 | 0,124 | 0,41 | 0,257 | 0,028 | 0,143 | 0,057 | 0,143 | 0,095 | 0,119 |
| 23 | 0,246 | 0,118 | 0,392 | 0,246 | 0,027 | 0,136 | 0,054 | 0,136 | 0,091 | 0,114 |
| 00 | 0,217 | 0,104 | 0,345 | 0,217 | 0,024 | 0,120 | 0,048 | 0,120 | 0,080 | 0,100 |

Na slici 6.3. se nalazi sumirana potrošnja promatranog sustava mikromreža

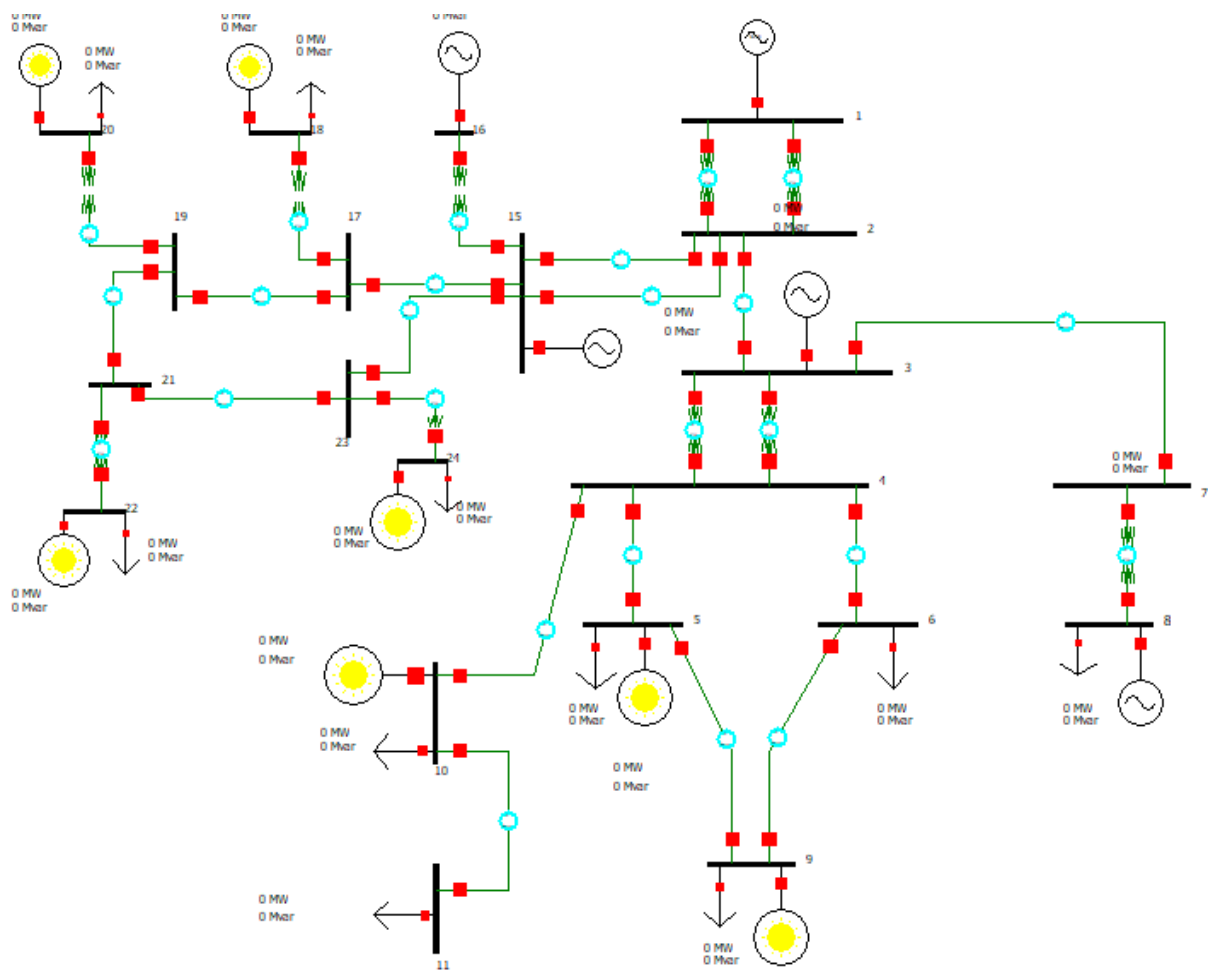


Slika 6.3. Sumirana potrošnja promatranog sustava mikromreža tijekom dana

6.2. Rezultati simulacije

6.2.1. Rezultati simulacije za mrežni način rada sustava mikromreža sa vlastitom regulacijom proizvodnje

Prva simulacija predstavlja takav način rada sustav mikromreža gdje svaka mikromreža upravlja vlastitom proizvodnjom električne energije, a nedostatak energije otkupljuje iz vanjske opskrnbne mreže. Na slici 6.4 je vidljiv sustav promatranih mikromreža izrađen u programu *PowerWorld*.



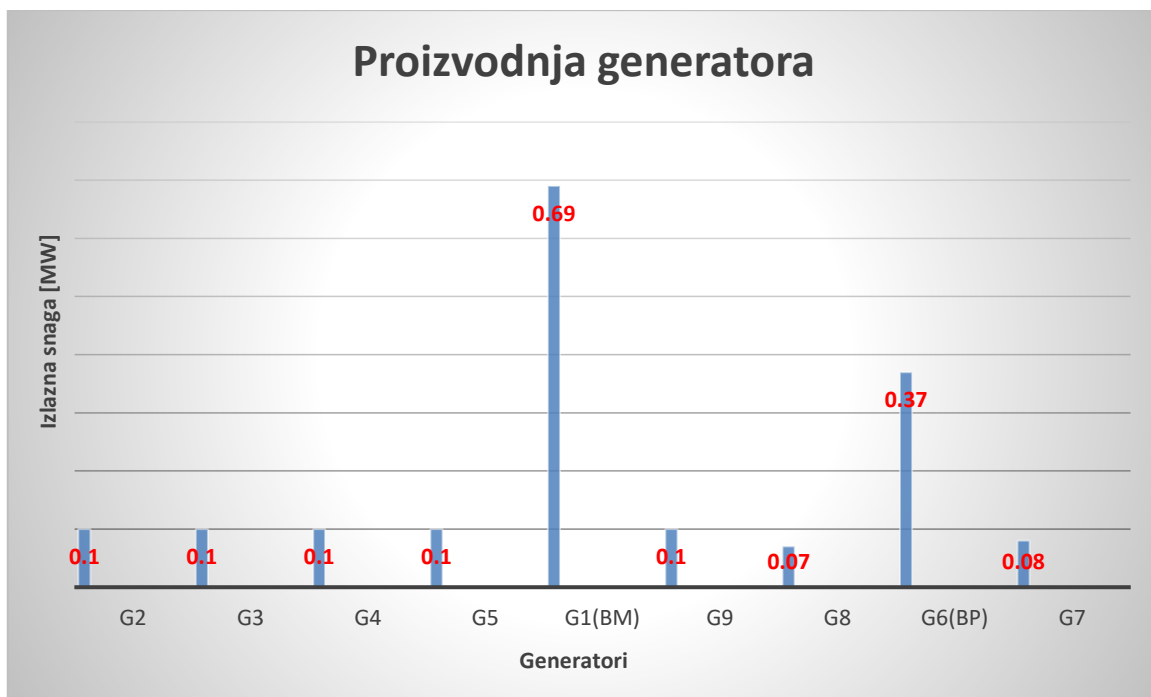
Slika 6.4. Sustav promatranih mikromreža

Za potrebe simulacije u programu su provedeni optimalni tokovi snaga za jedan dan, tj. za 24 sata. Program će pomoću već prije spomenute OPF (eng. *Optimal power flow*) metode odrediti koji generator bude proizvodio električnu energiju i koliko, ali da sva ograničenja budu zadovoljena te uz najmanje troškove. Zbog toga je bilo potrebno unijeti troškove proizvodnje MWh za svaki generator, osim za fotonaponske panele koji su regulirani količinom svjetlosnog zračenja, a njihova satna proizvodnja je vidljiva u tablici 6.17. Cijena proizvodnje 1 MWh elektrane na

biomasu je 450 kn/MWh preuzeta iz literature [22], a cijena 1 MWh bioplinske elektrane iznosi 600 kn/MWh i preuzeta je iz literature [19].

Pri otkupljivanju električne energije iz vanjske opskrbe mreže potrebno je unijeti cijenu, a ona je ovisila o dobu dana. Za ovu simulaciju korištena je cijena od 689,3 kn/MWh za dnevnu tarifu koja vrijedi od 8-22 h po ljetno računanju vremena, a za noćnu tarifu je korištena cijena 393,1 kn/MWh koja vrijedi od 22-8 h po ljetnom računanju vremena. Cijene su preuzete iz literature [23].

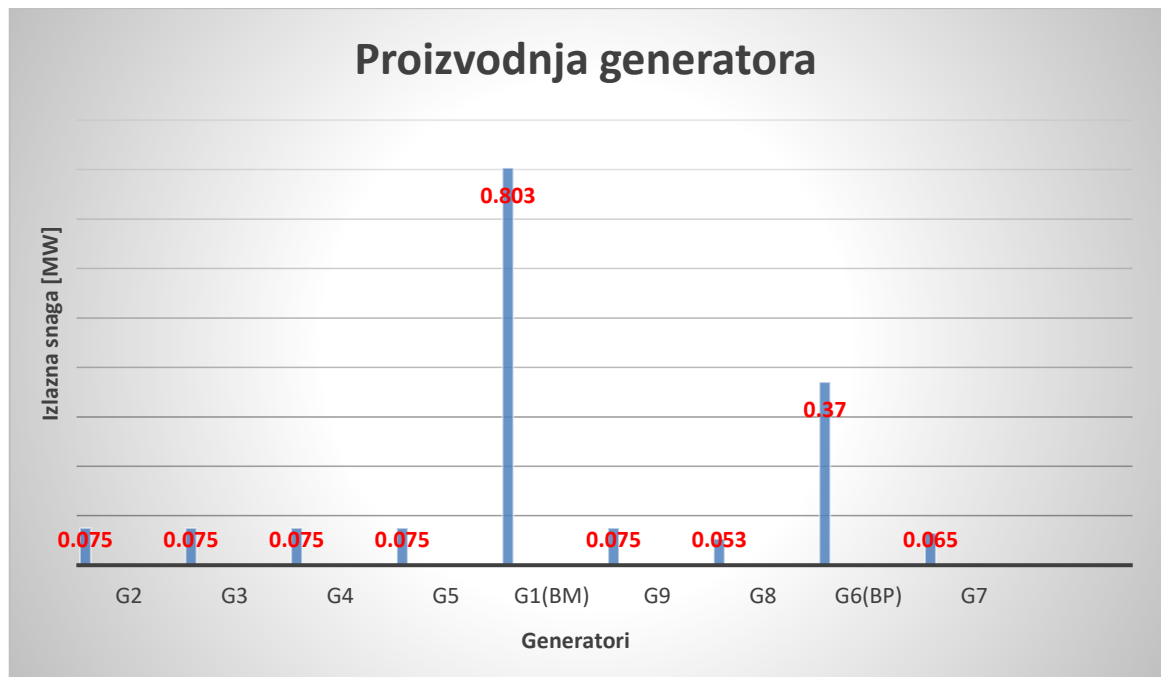
Da bi se pokazala ovisnost fotonaponskih panela o sunčevu zračenju simulacija je napravljena sa istim podacima pri 100%, 75%, 50% sunčeva zračenja u 12:00 h, a također se gledao utjecaj na proizvodnju i otkup električne energije iz vanjske opskrbe mreže. Na slici 6.5. je vidljiva proizvodnja svih izvora u 12:00 h pri 100%, na slici 6.6 pri 75% sunčeva zračenja, dok na slici 6.7 pri 50% sunčeva zračenja. Industrijska mikromreža je označena u simulaciji kao područje 2, a poljoprivredno-gospodarstvena mikromreža je označena kao područje 3. Također će biti prikazane tablice marginalnih troškova na sabirnicama koji pokazuju cijenu svakog dodatno kupljenog MWh. Promjenjiva opterećenja korištena u simulaciji su preuzeta iz tablice 6.18.



Slika 6.5 Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 100% sunčeva zračenja

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 600 |
| 4 | 2 | 600 |
| 5 | 2 | 600 |
| 6 | 2 | 600 |
| 7 | 2 | 600 |
| 8 | 2 | 600 |
| 9 | 2 | 600 |
| 10 | 2 | 600 |
| 11 | 2 | 600 |
| 15 | 3 | 450 |
| 16 | 3 | 450 |
| 17 | 3 | 450 |
| 18 | 3 | 450 |
| 19 | 3 | 450 |
| 20 | 3 | 450 |
| 21 | 3 | 450 |
| 22 | 3 | 450 |
| 23 | 3 | 450 |
| 24 | 3 | 450 |

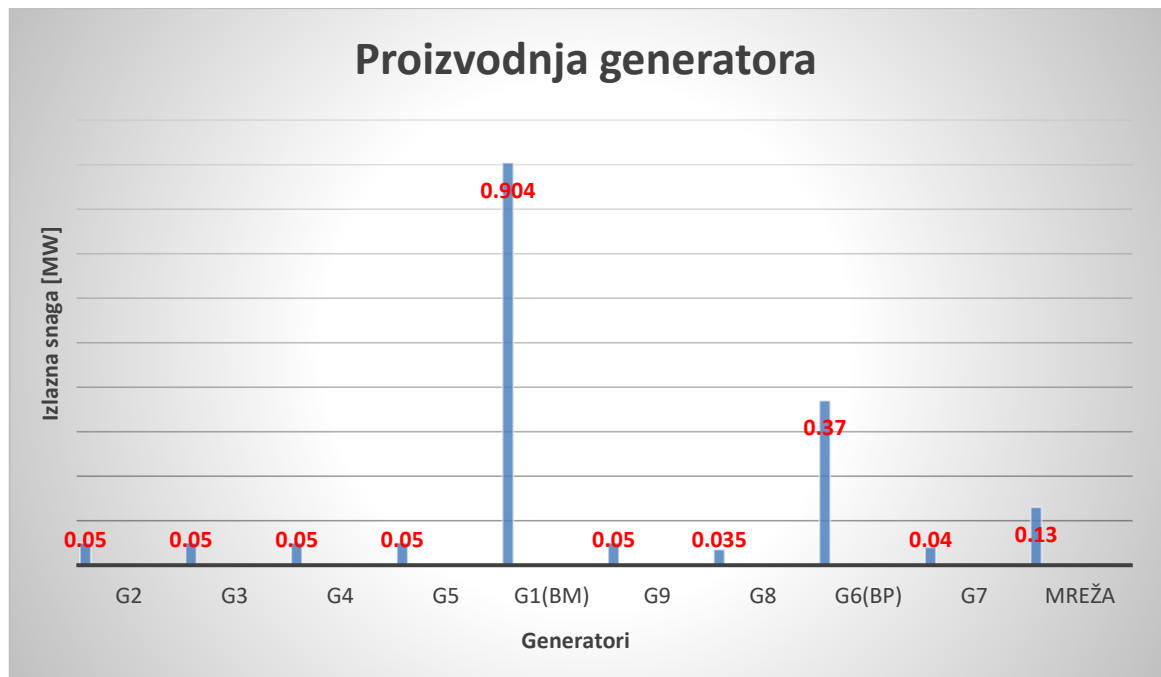
Tablica 6.19. Marginalni troškovi na sabirnicama za 100% sunčeva zračenja



Slika 6.6. Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 75% sunčeva zračenja

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 689,3 |
| 4 | 2 | 689,3 |
| 5 | 2 | 689,3 |
| 6 | 2 | 689,3 |
| 7 | 2 | 689,3 |
| 8 | 2 | 689,3 |
| 9 | 2 | 689,3 |
| 10 | 2 | 689,3 |
| 11 | 2 | 689,3 |
| 15 | 3 | 450 |
| 16 | 3 | 450 |
| 17 | 3 | 450 |
| 18 | 3 | 450 |
| 19 | 3 | 450 |
| 20 | 3 | 450 |
| 21 | 3 | 450 |
| 22 | 3 | 450 |
| 23 | 3 | 450 |
| 24 | 3 | 450 |

Tablica 6.20. Marginalni troškovi na sabirnicama za 75% sunčeva zračenja



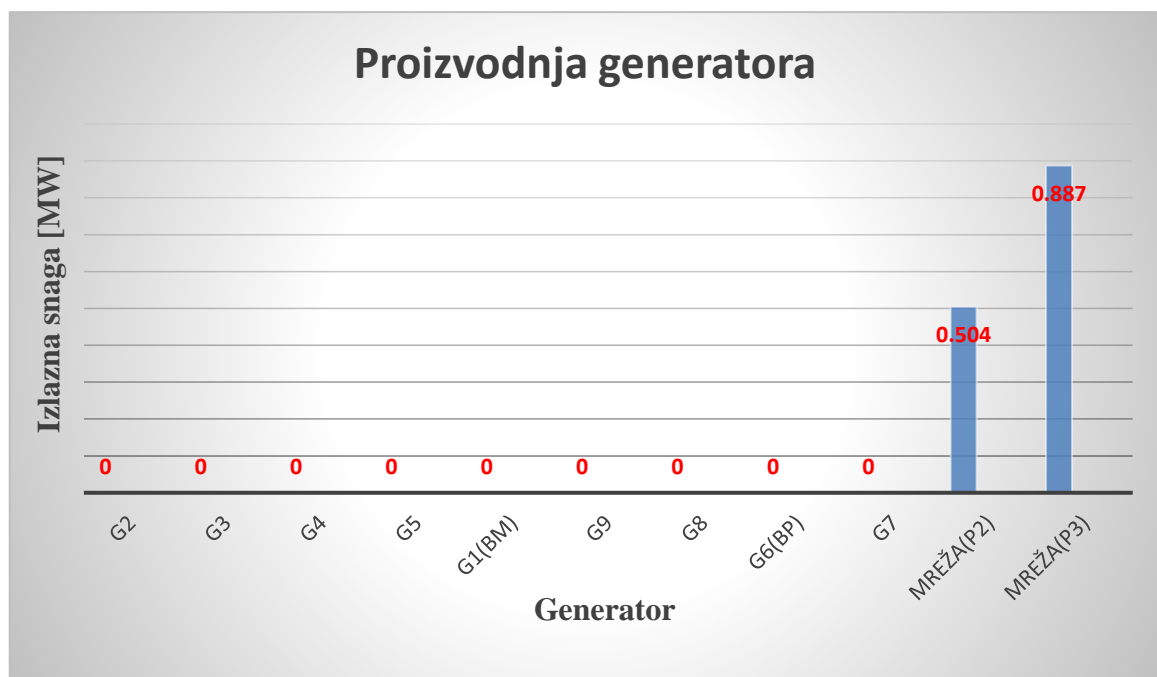
Slika 6.7. Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 50% sunčeva zračenja

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 689,3 |
| 4 | 2 | 689,3 |
| 5 | 2 | 689,3 |
| 6 | 2 | 689,3 |
| 7 | 2 | 689,3 |
| 8 | 2 | 689,3 |
| 9 | 2 | 689,3 |
| 10 | 2 | 689,3 |
| 11 | 2 | 689,3 |
| 15 | 3 | 450 |
| 16 | 3 | 450 |
| 17 | 3 | 450 |
| 18 | 3 | 450 |
| 19 | 3 | 450 |
| 20 | 3 | 450 |
| 21 | 3 | 450 |
| 22 | 3 | 450 |
| 23 | 3 | 450 |
| 24 | 3 | 450 |

Tablica 6.21. Marginalni troškovi na sabirnicama za 50% sunčeva zračenja

Iz prethodnih tablica iz grafova vidljivo je da pri 100% sunčeva zračenja distribuirani izvori imaju dovoljnu snagu da opskrbljuju svoje mikromreže. Kada se sunčevo zračenje smanji na 75% povećava se proizvodnja elektrane na biomasu da nadoknadi gubitak energije, dok u drugoj mikromreži se ne mijenja ništa jer opterećenje nije premašilo proizvodnju. Dodatnim smanjenjem sunčevog zračenja na 50% dodatno se povećava proizvodnja elektrane na biomasu, dok u mikromreži sa bioplinskom elektranom potrošnja premašuje proizvodnju pa je potrebno kupiti razliku električne energije iz vanjske opskrbe mreže po spomenutoj cijeni [23]. Povećanjem proizvodnje električne energije rastu i marginalni troškovi. Pri 100% sunčeva zračenja oni su jednaki trošku 1 MWh elektrane, dok pri povećanoj proizvodnji oni rastu.

Unutar simulacije proveden je i četvrti slučaj u 00:00 h. Tada nema sunčeve svjetlosti pa svo opterećenje pada na distribuirane izvore, ali također vrijedi cijena noćne tarife. Na slici 6.8. je vidljiva proizvodnja svih generatora sustava u 00:00 h.



Slika 6.8. Proizvodnja svih generatora u 00:00 h

Iz slike 6.8 vidljivo je da u 00:00 niti jedna elektrana ne proizvodi električnu energiju. Fotonaponski paneli ne proizvode jer nema sunčevog zračenja, a bioplinska i elektrana na biomasu ne proizvode jer je jeftinija električna energija iz vanjske opskrbe mreže kupljena po noćnoj tarifi [23]. Ova tvrdnja se može uvidjeti i iz tablice marginalnih troškova sabirnica 6.22.

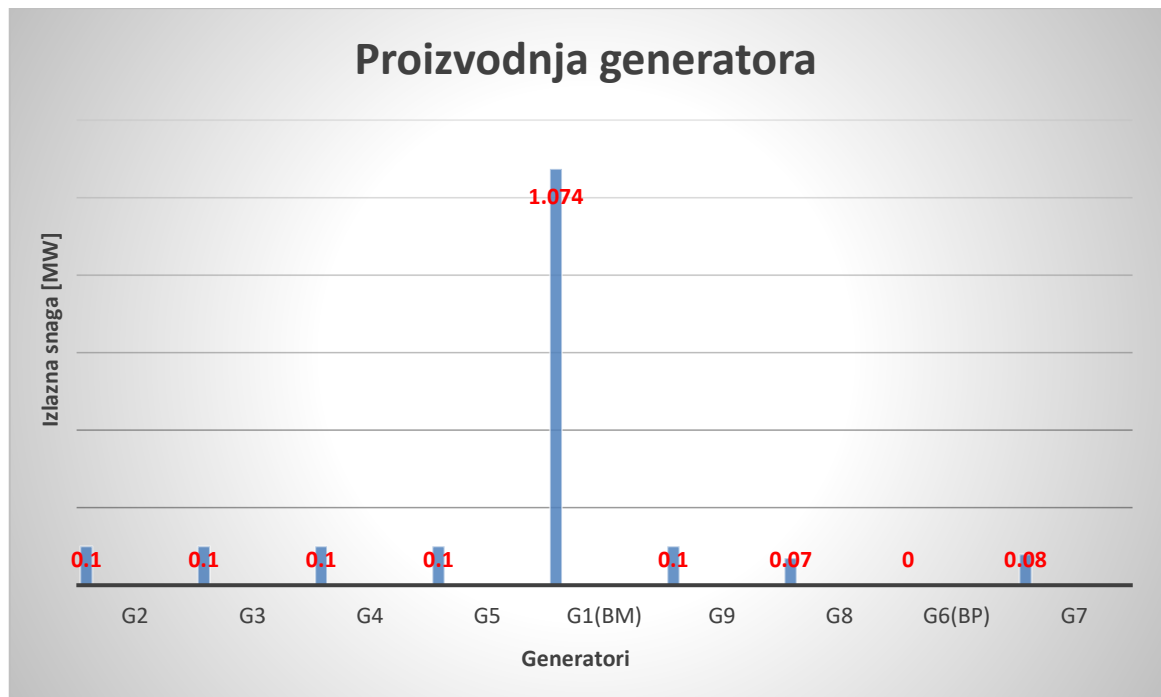
| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 3 | 2 | 393,1 |
| 4 | 2 | 393,1 |
| 5 | 2 | 393,1 |
| 6 | 2 | 393,1 |
| 7 | 2 | 393,1 |
| 8 | 2 | 393,1 |
| 9 | 2 | 393,1 |
| 10 | 2 | 393,1 |
| 11 | 2 | 393,1 |
| 15 | 3 | 393,1 |
| 16 | 3 | 393,1 |
| 17 | 3 | 393,1 |
| 18 | 3 | 393,1 |
| 19 | 3 | 393,1 |
| 20 | 3 | 393,1 |
| 21 | 3 | 393,1 |
| 22 | 3 | 393,1 |
| 23 | 3 | 393,1 |
| 24 | 3 | 393,1 |

Tablica 6.22. Marginalni troškovi na sabirnicama u 00:00 h

6.2.2. Rezultati simulacije za mrežni način rada sustava mikromreža u super području

Nakon što su napravljene simulacije gdje je svaka mikromreža radila zasebno, sada su one udružene u tzv. Super područje (eng. *Super area*) gdje mogu razmjenjivati električnu energiju ukoliko je to potrebno umjesto da kupuju iz vanjske opskrbe mreže. Kao i u prošlim primjerima koristiti će se fotonaponski panel pri 100%, 75%, 50% sunčeva zračenja.

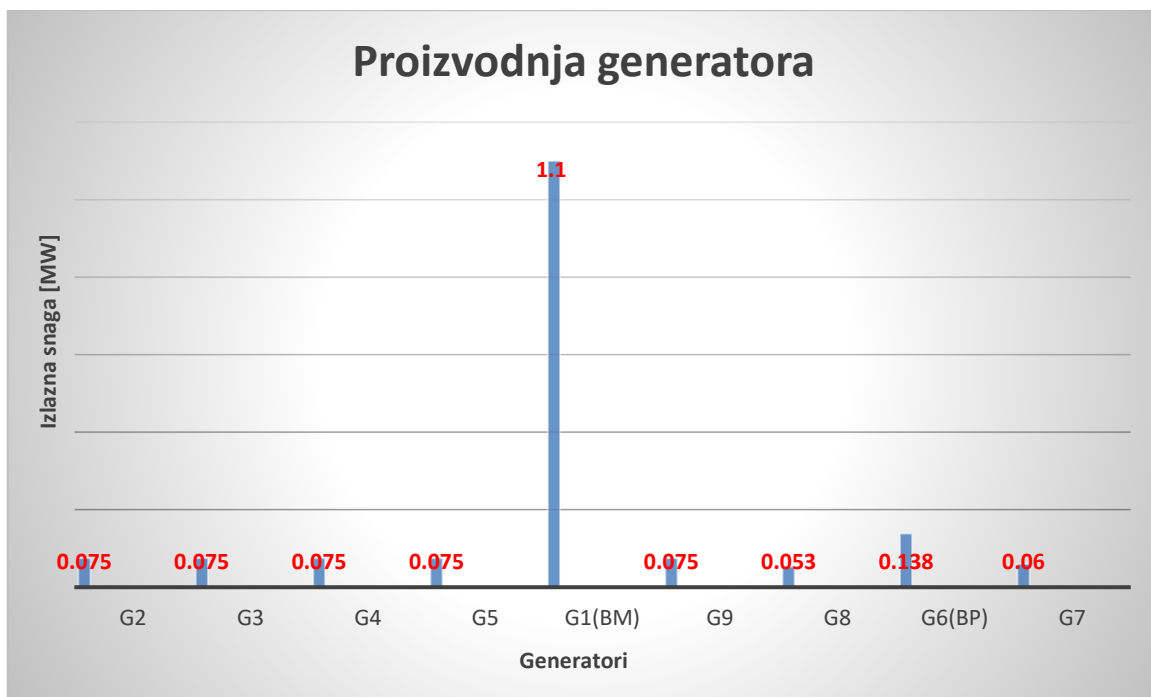
Na slici 6.9. je vidljiva proizvodnja svih generatora u sustavu u 12:00 pri 100% sunčeva zračenja, na slici 6.10. je proizvodnja pri 75% sunčeva zračenja, a na slici 6.11. je vidljiva proizvodnja svih generatora pri 50% sunčeva zračenja.



Slika 6.9. Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 100% sunčeva zračenja u super području načinu rada

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 450 |
| 4 | 2 | 450 |
| 5 | 2 | 450 |
| 6 | 2 | 450 |
| 7 | 2 | 450 |
| 8 | 2 | 450 |
| 9 | 2 | 450 |
| 10 | 2 | 450 |
| 11 | 2 | 450 |
| 15 | 3 | 450 |
| 16 | 3 | 450 |
| 17 | 3 | 450 |
| 18 | 3 | 450 |
| 19 | 3 | 450 |
| 20 | 3 | 450 |
| 21 | 3 | 450 |
| 22 | 3 | 450 |
| 23 | 3 | 450 |
| 24 | 3 | 450 |

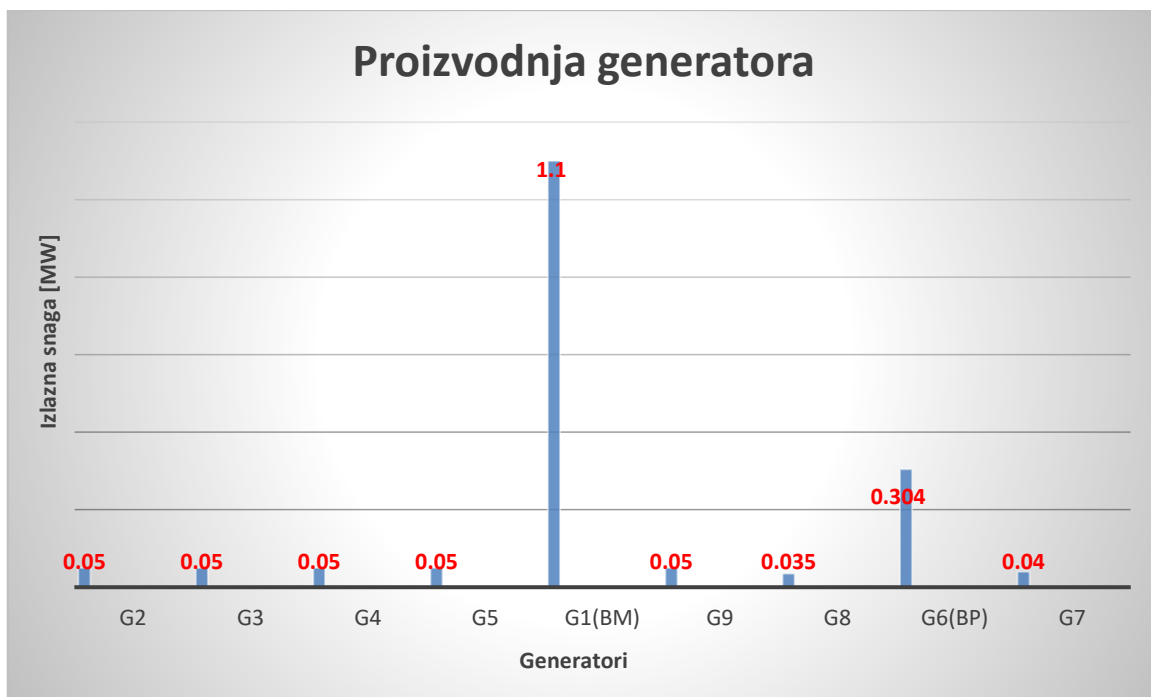
Tablica 6.23. Marginalni troškovi na sabirnicama u 12:00 h pri 100% sunčeva zračenja



Slika 6.10. Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 75% sunčeva zračenja u super području načinu rada

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 600 |
| 4 | 2 | 600 |
| 5 | 2 | 600 |
| 6 | 2 | 600 |
| 7 | 2 | 600 |
| 8 | 2 | 600 |
| 9 | 2 | 600 |
| 10 | 2 | 600 |
| 11 | 2 | 600 |
| 15 | 3 | 600 |
| 16 | 3 | 600 |
| 17 | 3 | 600 |
| 18 | 3 | 600 |
| 19 | 3 | 600 |
| 20 | 3 | 600 |
| 21 | 3 | 600 |
| 22 | 3 | 600 |
| 23 | 3 | 600 |
| 24 | 3 | 600 |

Tablica 6.24. Marginalni troškovi na sabirnicama u 12:00 h pri 75% sunčeva zračenja



Slika 6.11. Proizvodnja svih generatora u 12:00 h pri 50% sunčeva zračenja u super području načinu rada

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 600 |
| 4 | 2 | 600 |
| 5 | 2 | 600 |
| 6 | 2 | 600 |
| 7 | 2 | 600 |
| 8 | 2 | 600 |
| 9 | 2 | 600 |
| 10 | 2 | 600 |
| 11 | 2 | 600 |
| 15 | 3 | 600 |
| 16 | 3 | 600 |
| 17 | 3 | 600 |
| 18 | 3 | 600 |
| 19 | 3 | 600 |
| 20 | 3 | 600 |
| 21 | 3 | 600 |
| 22 | 3 | 600 |
| 23 | 3 | 600 |
| 24 | 3 | 600 |

Tablica 6.25. Marginalni troškovi na sabirnicama u 12:00 h pri 50% sunčeva zračenja

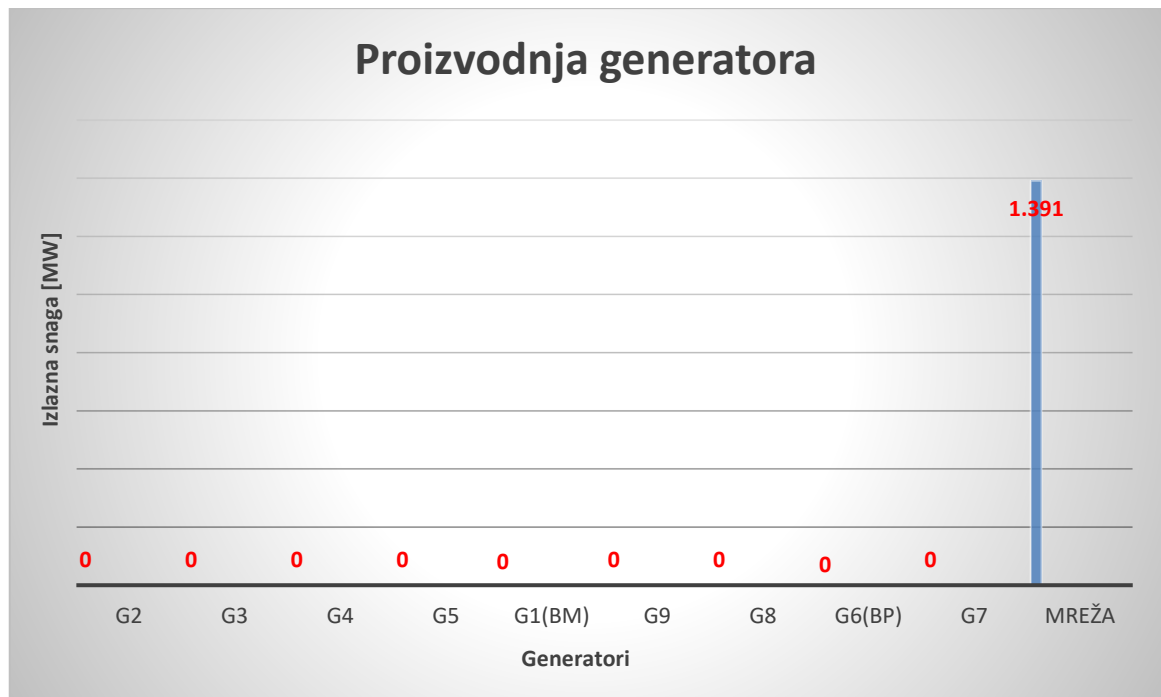
Iz prethodnih slika i tablica vidljivo je da pri 100% sunčeva zračenja i načinu rada u super području bioplinska elektrana uopće ne proizvodi električnu energiju jer je isplativije da energiju proizvodi elektrana na biomasu koja ima jeftiniji MWh električne energije. Uz fotonaponske panele i proizvodnju elektrane na biomasu opterećenje ne premašuje proizvodnju i stoga je bioplinska elektrana ugašena. U ovome slučaju marginalni troškovi sabirnica su jednaki trošku jednog MWh elektrane na biomasu jer je najjeftinija.

U drugome slučaju kada sunčevo zračenje padne na 75% smanji se izlazna snaga fotonaponskih panela, elektrana na biomasu daje svoju vršnu snagu, a potrebno je uključiti i bioplinsku elektranu kako bi pokrila nedostatak električne energije te ne bi bilo potrebno kupovati iz vanjske opskrbe mreže. Zbog toga što je jeftinija električna energija u industrijskoj mikromreži, a poljoprivredno-gospodarstvena ima manjak električne energije, dogodio se prijenos snage u iznosu od 0,289 MW

U trećem slučaju kada sunčevo zračenje padne na 50%, izlazna snaga fotonaponskih panela se dodatno smanji, elektrana na biomasu daje svoju vršnu snagu, a bioplinska elektrana je također morala se dodatno uključiti i dati veću snagu nego u prethodnom slučaju. Zbog nedostatka snage u poljoprivredno-gospodarstvenoj mikromreži, dogodilo se prebacivanje električne energije iz industrijske mikromreže u poljoprivredno-gospodarstvenu. Ukupna potrošnja od 0.615 MW je premašivala proizvodnju od 0.429 MW, stoga je iz industrijske mikromreže napravljen prijenos snage u iznosu od 0.216 MW.

Isto kao i u samostalnom režimu rada, učinjena je simulacija u 00:00 h kada nema sunčevog zračenja. Na slici 6.12. su vidljive izlazne snage generatora, a u tablici 6.26. marginalni troškovi na sabirnicama. Iz ovoga slučaja je ponovo vidljivo da je noćni režim rada najisplativiji te da će se kupovati električna energija iz vanjske opskrbe mreže i da će sve elektrane biti ugašene. Fotonaponski paneli neće raditi jer nema sunčevog zračenja, a elektrane će biti ugašene jer je kupnja iz mreže jeftinija opcija.

Kada se usporedi samostalni način upravljanja mikromrežama i način upravljanja u super području, vidljivo je da će se mikromreže optimizirati tako da se što manje električne energije kupuje iz vanjske opskrbe mreže. Kupovati će jedino tada kada nema drugog izbora jer su svi proizvodni kapaciteti u pogonu. Naravno u noćnom režimu rada će uvijek kupovati iz vanjske opskrbe mreže jer je mnogo jeftinije kupiti električnu energiju nego paliti vlastitu elektranu uz veće troškove po svakome MWh.



Slika 6.12. Proizvodnja svih generatora u 00:00 h

| Br. sabirnice | Područje | Marginalni trošak kn/MWh |
|---------------|----------|--------------------------|
| 3 | 2 | 393,1 |
| 4 | 2 | 393,1 |
| 5 | 2 | 393,1 |
| 6 | 2 | 393,1 |
| 7 | 2 | 393,1 |
| 8 | 2 | 393,1 |
| 9 | 2 | 393,1 |
| 10 | 2 | 393,1 |
| 11 | 2 | 393,1 |
| 15 | 3 | 393,1 |
| 16 | 3 | 393,1 |
| 17 | 3 | 393,1 |
| 18 | 3 | 393,1 |
| 19 | 3 | 393,1 |
| 20 | 3 | 393,1 |
| 21 | 3 | 393,1 |
| 22 | 3 | 393,1 |
| 23 | 3 | 393,1 |
| 24 | 3 | 393,1 |

Tablica 6.26. Marginalni troškovi na sabirnicama u 00:00 h

7. ZAKLJUČAK

Pregledom teorijskog dijela ovoga diplomskoga rada može se zaključiti da zbog sve veće potrebe za električnom energijom nužno je unaprijediti elektroenergetski sustav kako bi bio spreman odgovoriti na svaki zahtjev. Krenuvši od distribucije potrebno je povećati broj implementiranih distribuiranih izvora električne energije koji bi trebali biti obnovljivi izvori energije zbog već velike onečišćenosti okoliša. Veći broj implementiranih distribuiranih izvora će omogućiti stvaranje većeg broja mikromreža koje djeluju kao samostalne jedinice proizvodnje i potrošnje, a mogu raditi samostalno ili biti spojene na vanjsku opskrbnu mrežu. Naravno uvijek je važan faktor cijena električne energije, stoga se vrši optimizacija sustava mikromreža kako bi se uvijek koristila najjeftinija električna energija. Unutar simulacije ovoga diplomskoga rada prikazana je optimizacija sustava pomoću metode optimalnih tokova snaga. Iz rezultata simulacije je vidljivo kako obnovljivi izvori električne energije utječu na proizvodnju unutar mikromreže. Također je vidljivo kako se optimiziraju mikromreže u samostalnom načinu rada, ali i pri načinu rada u super području. Unutar super područja omogućena im je razmjena električne energije međusobno kako bi se dodatno smanjila cijena električne energije. Moguće je da jeftiniji distribuirani izvor jedne mikromreže opskrbljuje dvije mikromreže ukoliko imaju malu potrošnju, a tada distribuirani izvor u drugoj mikromreži neće biti u pogonu što se može uočiti unutar simulacije. Veliki utjecaj na optimizaciju ima cijena pojedinog MWh distribuiranog izvora, kao i vanjske opskrbne mreže. U noćnim satima kada vrijedi noćna tarifa jeftinije je kupovati električnu energiju iz vanjske opskrbne mreže i teško je nadmašiti takvu cijenu jer električna energija iz vanjske opskrbne mreže može na burzi električne energije postići i negativnu cijenu, pa je stoga moguće ju prodavati po tako niskoj cijeni iz više razloga. Mikromreže sa svojom pojavom donose mnogo prednosti, od jeftinije električne energije i pouzdanije opskrbe pa do očuvanja okoliša uporabom obnovljivih izvora električne energije.

LITERATURA

- [1] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, John Wiley & Sons - IEEE 2013. godine
- [2] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom 2009. godine
- [3] H. Farhangi, *Lessons from Campus Microgrid*, Taylor & Francis Group, 2017. godine
- [4] M. Stadler, A. Naslé, *Planning and implementation of bankable microgrids*, *Electric Journal.*, vol. 32, no. 5, pp. 24–29, 2019. godine, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/322804505_Microgrids-Large_Scale_Integration_of_Microgeneration_to_Low_Voltage_Grids/link/5a70cc63aca272e425ed332f/download (pristupljeno 20.06.2020.godine)
- [5] S. Hunt, *Making Competition Work in Electricity*, vol. 23, no. 2, John Wiley & Sons, 2002. godine
- [6] “Nord Pool.”, dostupno na: <https://www.nordpoolgroup.com/> (pristupljeno 12.06.2020. godine)
- [7] “Home | EPEX SPOT.”, dostupno na: <https://www.epexspot.com/en> (pristupljeno 12.06.2020. godine)
- [8] “OMIE.”, dostupno na: <https://www.omie.es/> (pristupljeno 12.06.2020. godine)
- [9] “HRVATSKA BURZA ELEKTRIČNE ENERGIJE - HRVATSKA BURZA ELEKTRIČNE ENERGIJE d.o.o. - cropex.hr.” dostupno na: <https://www.cropex.hr/hr/> (pristupljeno 12.06.2020. godine)
- [10] I.Kuzle, E. Banovac, S. Tešnjak, *Tržište električne energije*. Zagreb: Graphis, 2009. godine
- [11] R. Goić, *Obnovljivi izvori energije u Hrvatskoj – danas i sutra*, na konferenciji: Energy investment forum 2016, 2016. godine
- [12] “Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji - Zakon.hr.”

- dostupno na: <https://www.zakon.hr/z/827/Zakon-o-obnovljivim-izvorima-energije-i-visokoučinkovitoj-kogeneraciji> (pristupljeno 19.6.2020. godine)
- [13] Y. Levron, J. M. Guerrero, Y. Beck, *Optimal power flow in microgrids with energy storage*, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3226–3234, 2013, godina
- [14] V. H. Bui, A. Hussain, H. M. Kim, *A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response*, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1323–1333, 2018. godine
- [15] F. Hasse, A. von Perfall, T. Hillebrand, E. Smole, L. Lay, M. Charlet, *Blockchain-an opportunity for energy producers and consumers?*, PWC, 2016. godine, dostupno na: www.pwc.com/utilities (pristupljeno 16.6.2020. godine)
- [16] C. D. Korkas, S. Baldi, I. Michailidis, E. B. Kosmatopoulos, *Intelligent energy and thermal comfort management in grid-connected microgrids with heterogeneous occupancy schedule*, Elsevier, *Applied Energy* 149, 194-203, 2015. godine
- [17] L. W. Park, S. Lee, H. Chang, *A sustainable Home Energy Prosumer-Chain Methodology with Energy Tags over the Blockchain*, MDPI, *Sustainability*, 2018. godine
- [18] C. Pop, T. Cioara, M. Antal, I. Anghel, I. Salomie, M. Bertoncini, *Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids*, MDPI, *Sensors*, 2018. godine
- [19] B. Horvatić, *Mikromreža vjetroparka*, Diplomski rad, FERIT Osijek 2019. godine, dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2386/datastream/PDF/view> (pristupljeno 08.07.2020. godine)
- [20] Skupina 111 autora, odnosno koautora, Končar - tehnički priručnik peto izdanje, KONČAR Elektroindustrija d.d., Zagreb, 1991. godine
- [21] 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/>, (10.07.2020.)
- [22] Knežević, Goran; Topić, Danijel; Fekete, Krešimir; Žnidarec, Matej; Tehno-ekonomska

analiza različitih tehnologija proizvodnje električne energije iz biomase i bioplina; /
Proceedings of 9th International natural gas, heat and water conference Plin 2018 /
Slavonski Brod: Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2018. str. 79-90,

- [23] HEP-Elektra, Tarifni modeli, Cijene, dostupno na:
<http://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifni-modeli/1577> , (pristupljeno: 08.07.2020.
godine)

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad objasnio je koncept mikromreža kao i njihovu važnost za daljnji razvoj elektroenergetskog sustava. Objasnjena je važnost implementacije obnovljivih izvora električne energije (distribuiranih izvora) unutar već postojećeg elektroenergetskog sustava zbog mogućnosti nastanka i razvoja mikromreža. Također je obrađena problematika tržišta električne energije koje se također mora unaprijediti kako bi se omogućila razmjena i prodaja električne energije ne samo između konvencionalnih proizvođača i kupaca, već i između mikromreža međusobno. Objasnjena je važnost optimizacije sustava mikromreža koja ponajviše utječe na cijenu električne energije. Optimizacija sustava mikromreže utječe na cijenu, ali i na tokove snaga unutar te mikromreže. Ponekad je isplativije kupiti električnu energiju iz vanjske opskrbne mreže, nego proizvoditi na generatorima unutar vlastite mikromreže.

Ključne riječi: mikromreža, optimizacija sustava, tržište električne energije

ABSTRACT

This thesis explained the concept of microgrids as well as their importance for the further development of power system. The importance of the implementation of renewable sources (distributed sources) within the already existing electricity system is explained due the possibility of the emergence and development of microgrids. The issue of the electricity market is also addressed, which must be improved in order to enable the exchange and sale of electricity not only between conventional producers and customers, but also between microgrids among themselves. It is also explained the importance of microgrid system optimization, which has the greatest impact on the price of electricity. The optimization of a microgrid system affects the price , but also the power flows within that microgrid. Sometimes it is more cost effective to buy electricity from an external supply network than to produce it on generators within a microgrid.

Key words: microgrid, system optimization, electricity market

Electricity market in power system with microgrids

ŽIVOTOPIS

Vinko Barišić rođen je 13. studenog 1995. godine u Zagrebu. Završio je osnovnu školu Mate Lovraka u Kutini. Nakon završetka osnovne škole upisuje Tehničku školu Kutina u Kutini, smjer tehničar za električne strojeve s primijenjenim računarstvom. Srednju školu je završio 2014. godine i upisao stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završenog stručnog studija elektrotehnike 2017. godine, upisuje razlikovne obaveze u trajanju od godine dana, a zatim 2018. godine upisuje diplomski sveučilišni studij elektrotehnike na istom fakultetu gdje odabire smjer elektroenergetika, izborni blok elektroenergetski sustavi.