

# VIRTUALNE ELEKTRANE - BUDUĆNOST PROIZVODNJE I DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

---

Calcich, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:905410>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**VIRTUALNE ELEKTRANE – BUDUĆNOST PROIZVODNJE I  
DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Rijeka, rujan 2023.

Luka Calcich

0069081469

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**VIRTUALNE ELEKTRANE – BUDUĆNOST PROIZVODNJE I  
DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Mentor: prof. dr. sc. Alfredo Višković

Rijeka, rujan 2023.

Luka Calcich

0069081469

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE**

Rijeka, 20. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Elektroenergetski sustavi**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Luka Calcich (0069081469)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Virtualne elektrane - budućnost proizvodnje i distribucije električne energije  
/ Virtual power plants - the future of electricity production and distribution**

### Opis zadatka:

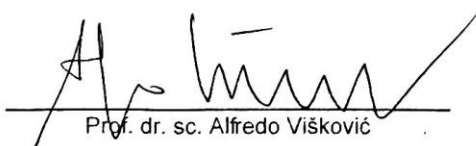
U radu je potrebno definirati pojam virtualnih elektrana i objasniti princip njihovog rada, objasniti razliku između virtualnih elektrana i tradicionalnih načina proizvodnje električne energije. Također, potrebno je izraditi analizu mogućnosti i primjene virtualnih elektrana u elektroenergetskom sustavu. Svrha analize je predložiti koncept rješenja energetske održive virtualne elektrane korištenjem poznatih tehnologija obnovljivih izvora energije i u skladu s direktivama EU. Na kraju, potrebno je pružiti sažetak istraživanja i dati zaključak o važnosti razvoja virtualnih elektrana u budućnosti proizvodnje i distribucije električne energije.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



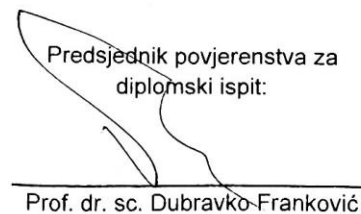
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno s člankom 8. stavak 1) Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020.godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Virtualne elektrane-budućnost proizvodnje i distribucije električne energije“ prema zadatku od 20.03.2023. godine, uz konzultacije s mentorom prof.dr.sc. Alfredom Viškovićem.

Rijeka, rujan 2023.

---

Luka Calcich

0069081469

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

### ZAHVALA

Želim izraziti svoju iskrenu zahvalnost svima koji su doprinijeli uspješnom završetku ovog diplomskog studija.

Prije svega, želim se zahvaliti svom mentoru, prof.dr.sc Alfredo Višković, na dragocjenim savjetima, strpljenju i vodstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također, posebno bih se želio zahvaliti svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci koju su mi pružili tijekom ovog akademskog puta. Njihova podrška i ohrabrenje značili su mi više nego što mogu izraziti riječima.

Rijeka, rujan 2023.

Luka Calcich

0069081469

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ELEKTRIČNA ENERGIJA I TRADICIONALNI NAČINI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	2
2.1. Hidroelektrana.....	2
2.2. Nuklearne elektrane.....	4
2.3 Termoelektrane.....	5
2.4 Obnovljivi izvori energije .....	6
2.4.1 Biomasa.....	6
2.4.2 Vjetroelektrane.....	7
2.4.3 Solari .....	7
2.4.4 Geotermalna energija .....	8
3. VIRTUALNE ELEKTRANE-KONCEPT I NAČIN RADA.....	9
3.1. Arhitektura .....	10
3.2. VPP i hijerarhijske kontrolne metode .....	16
3.3. Hijerarhija.....	17
3.4. DEMS Software .....	19
3.4.1 DEMS Funkcije.....	21
4.PRIMJENA TEHNOLOGIJE VEHICLE-TO-GRID (V2G) KROZ VIRTUALNE ELEKTRANE.....	26
4.1 V2G.....	27
4.2 Bidirekcijski pretvarači za V2G sustave (AC-DC).....	28
4.3 DC-DC pretvarači .....	29
4.4 Primjer optimizacije punjenja električnih automobila korištenjem obnovljivih izvora energije i virtualne elektrane.....	30
5. PARTICIPACIJA VPP-ova NA TRŽIŠTIMA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	35
5.1. Futures i forward market.....	35

5.2. Bilateralni ugovori.....	36
5.3. VPP na tržištu dan unaprijed.....	36
5.4. VPP na tržištu pomoćnih usluga .....	37
5.5. VPP na tržištu rezervi.....	37
5.6. VPP in Real-Time Market.....	38
5.7. Intraday Market .....	39
6. IZAZOVI VIRTUALNIH ELEKTRANA.....	40
6.1. Izazovi kontrolnog i operativnog sustava.....	40
6.2. Izazovi komunikacija i informacija virtualnih elektrana.....	40
6.3. Sigurnost podataka .....	41
6.3.1. Blockchain tehnologija .....	42
6.4. Troškovi virtualnih elektrana u usporedbi sa drugim izvorima energije .....	44
7. RAZLIKA VPP-a KOJI TRGUJE ENERGIJOM I VPP-a KOJI I UPRAVLJA ELEKTRIČNIM SUSTAVOM NA PRIMJERU NEXT KRAFTWERKE .....	45
7.1 Power Trading .....	45
7.2 Energy Balancing .....	46
7.3 NEMOCS .....	46
7.4 Simulacija NEMCOS .....	47
7.5 SWOT analiza .....	48
8. PRIMJENA TEHNOLOGIJE POWER TO GAS KROZ PROJEKT DANUP2GAS.....	50
8.1 DanuP2Gas projekt .....	50
8.2 P2G tehnologija.....	50
8.3 Model Virtualne elektrane s P2G tehnologijom.....	52
8.4 Sudjelovanje Virtualne elektrane s P2G tehnologijom na dvostrukom energetsom tržištu.....	54
8.5 Case Study.....	54
8.5.1 Rezultati simulacije.....	61
9. ZAKLJUČAK.....	66
10. POPIS SLIKA.....	67



11.LITERATURA .....	68
12. SAŽETAK .....	70

## 1. UVOD

U ovom diplomskom radu obrađuje se tema virtualnih elektrana i njihova važnost u budućnosti proizvodnje i distribucije električne energije. Tradicionalni načini proizvodnje električne energije, kao što su termoelektrane, hidroelektrane i nuklearne elektrane, imaju svoje prednosti i nedostatke. S druge strane, virtualne elektrane predstavljaju novi koncept proizvodnje električne energije koji se sve više razvija i primjenjuje u praksi. U ovom radu će se objasniti kako virtualne elektrane funkcioniraju, razlike između njih i tradicionalnih načina proizvodnje, kao i vrste virtualnih elektrana s primjerima iz prakse. Također, bit će riječi o tehnologiji koja stoji iza virtualnih elektrana, njihovim prednostima i izazovima te ekonomskim aspektima njihove primjene. U zadnjem poglavlju bit će opisan projekt Virtualne elektrane s P2G tehnologijom koristeći optimizacijski paket izrađen u sklopu projekta koji je financiran od strane europske unije DanuP-2-Gas. Cilj ovog diplomskog rada je istražiti mogućnosti koje virtualne elektrane pružaju u budućnosti proizvodnje i distribucije električne energije te ukazati na prednosti i izazove ove tehnologije.

## **2. ELEKTRIČNA ENERGIJA I TRADICIONALNI NAČINI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

### **2.1. Hidroelektrana**

Hidroelektrana je jedan od najstarijih izvora mehaničke snage i najveći izvor obnovljive električne energije koji se koristi. Globalni kapacitet iznosi oko 1000-1500 GW. Svaki projekt hidroelektrane je jedinstven jer je ovisan o lokaciji. Hidroelektrane se klasificiraju prema veličini u mikro, mini, male i velike hidroelektrane. Velike hidroelektrane su najvažnije u pogledu proizvodnje kapaciteta. Mogu biti postrojenja s branom i rezervoarom ili s tekućom vodom. Ove druge su najjednostavnije za izgradnju i najmanje disruptivne, ali prva vrsta skladišti energiju i stoga je mnogo fleksibilnija u načinu korištenja. Energija se uzima iz hidroelektrana kroz turbine, a postoji nekoliko dizajna poput Pelton, Francis i Propeler turbina koji iskorištavaju različite visine vode. Većina hidroelektrana ima ekološke učinke koji se moraju uzeti u obzir prije gradnje.

Prema izvješću Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) Global Status Report for 2013, ukupni svjetski kapacitet hidroelektrana na kraju 2012. godine bio je 990 GW, ne uključujući kapacitet hidroelektrana za pohranu energije. To je povećanje od 115 GW u odnosu na procjenu svjetskog kapaciteta Svjetskog energetskeg vijeća za kraj 2008. godine od 875 GW.

Hidroelektrana pretvara energiju vode u električnu energiju koja je prisutna u vodi zbog njene nadmorske visine. Kada voda teče nizbrdo, ta energija se oslobađa, obično se rasipa u raznim oblicima duž vodenog toka. Hidroturbina može iskoristiti ponešto od te energije i pretvoriti ju u električnu energiju. Vodeni tok stvara se u konačnici kišom, a vodena para u oblacima koja je izvor kiše diže se u atmosferu zbog djelovanja sunčeve topline na svjetske mora i druge vodene površine. Solarna energija generira toplinu koja isparava vodu i diže ju u visoku atmosferu, generirajući potencijalnu energiju koja se kasnije oslobađa. Stoga, hidroenergija je u konačnici oblik solarne energije. Kada se procjenjuje koliko bi potencijalne električne energije moglo biti dostupno iz hidroenergetskih izvora, koristi se nekoliko mjera. Jedna je bruto teorijski hidroenergetski potencijal. Bruto teorijski hidroenergetski potencijal regije je ukupna količina energije koja bi se oslobodila svake godine ako bi se sav sadržaj energije u kiši koja pada na regiju iskoristio do razine mora na granicama regije. Izračunavanje do razine mora maksimizira dostupnu energiju.

Hidroelektrane se tradicionalno dijele u kategorije ovisno o njihovoj veličini. Uobičajena kategorizacija prikazana je u Tablici 2.1.1. Najmanje hidroelektrane, s kapacitetom između 1 kW i 100 kW, nazivaju se mikro hidroelektranama. Između 100 kW i 1 MW nazivaju se mini-hidroelektranama. Male hidroelektrane obično imaju kapacitete između 1 MW i 10 MW, ali ta gornja granica može varirati od zemlje do zemlje i u nekim se slučajevima može popeti i do 30 MW. Elektrane s kapacitetima većim od 10 MW (ili do 30 MW) klasificiraju se kao velike hidroelektrane. Ponekad se također uvodi srednja kategorija za srednje hidroelektrane između malih i velikih. Ako se koristi, to je obično za elektrane između 5 MW i 50 MW; one iznad su velike, a one ispod su male. S globalne perspektive, velike hidroelektrane su najvažnija kategorija i čine većinu hidroenergetskih kapaciteta koji su danas u pogonu. Tehnički, velike hidroelektrane su najsofisticiranije i općenito su individualno projektirane za svaku lokaciju koristeći turbine koje su također izrađene specifično za hidroelektranu. Male hidroelektrane slične su velikim hidroelektranama, ali neke koriste "spojne" turbine i druge komponente umjesto pojedinačno izrađenih. Mini i mikrohidroelektrane obično koriste standardne turbine i mnoge uključuju novotarije, često ekonomične, dizajne koji se ne koriste u većim hidroelektranama.

*Tablica 2.1.1 Kategorije hidroelektrana*

Mikro	1-100 kW
Mini	100 kW- 1 MW
Male	1 MW- 30 MW
Velike	Iznad 10-30 MW

Iako se hidroelektrična energija općenito smatra čistim izvorom energije, nije potpuno oslobođena emisija stakleničkih plinova, a često može imati značajne negativne socioekonomske utjecaje. Postoje argumenti da velike brane zapravo ne smanjuju ukupne emisije stakleničkih u usporedbi s termoelektranama koje koriste fosilna goriva. Za izgradnju brane potrebne su značajne količine zemlje koje se često poplavljaju u gusto naseljenim ruralnim područjima, što uključuje veliko iseljavanje obično siromašnih domorodačkih naroda. Umanjivanje takvih društvenih utjecaja predstavlja značajan trošak za projekt, koji ako se uopće uzme u obzir, što nije činjeno u prošlosti, može učiniti projekt ekonomski i društveno neodrživim. [1]

## 2.2. Nuklearne elektrane

Nuklearna energija je najkontroverzniji oblik proizvodnje električne energije. Procjena njezine važnosti uključuje vaganje političkih, strateških, okolišnih, ekonomskih i emocionalnih čimbenika koji privlače stranačke poglede mnogo oštrije od bilo kojeg drugog načina proizvodnje električne energije.

Postoje dvije vrste proizvodnje energije na temelju nuklearnih reakcija: nuklearna fisija i nuklearna fuzija, ali samo prva je trenutno komercijalno dostupna. Nuklearni reaktor koji koristi nuklearnu fisiju koristi lančanu reakciju koja uključuje uran-238. Postoji nekoliko različitih vrsta nuklearnih reaktora, uključujući reaktore s ključalom vodom, reaktore s tlačnom vodom i plinom hlađene reaktore. Međutim, nuklearna energija ostaje kontroverzni izvor električne energije zbog potencijalne opasnosti u slučaju nesretnog otpuštanja radioaktivnog materijala. Osim toga, ne postoji općeprihvaćeni način za odlaganje nuklearnog otpada, što je sve veći problem u cijelom svijetu. Sve nuklearne elektrane koje rade danas proizvode električnu energiju iskorištavanjem energije koja se oslobađa kada se jezgre velikih atoma, poput urana, podijele na manje komponente, što se naziva nuklearna fisija. Količina energije koja se oslobađa ovim procesom je ogromna. Teoretski, jedan kilogram prirodnog urana može osloboditi oko 140 GWh energije. (140 GWh predstavlja izlaznu snagu 1000 MW termoelektrane koja radi punom snagom gotovo šest dana.) Postoji još jedan izvor nuklearne energije, nuklearna fuzija, koja uključuje obrnut proces nuklearne fisije. U ovom se slučaju male atome potiče da se spajaju pri izuzetno visokim temperaturama kako bi formirali veće atome. Poput nuklearne fisije, fuzija oslobađa ogromne količine energije. Međutim, ona se može dogoditi samo pod ekstremnim uvjetima. Fuzija atoma vodika glavni je izvor energije unutar Sunca.

Europa ima najveći kapacitet s 195 jedinica i 168 GW. Sjeverna Amerika ima 124 jedinice s ukupnim kapacitetom od 115 GW, a Azija ima 112 jedinica. Jedini kontinenti koji nemaju nuklearne elektrane su Australija i Antarktika. Što se tiče pojedinačnih zemalja, Francuska proizvodi oko 75% svoje električne energije iz nuklearnih elektrana. Litva generira 76% iz nuklearnih izvora, a Belgija 52%. U Aziji, Južna Koreja proizvodi 35% svoje energije iz nuklearnih elektrana, dok je Japan prije nesreća u Fukushimi oslanjao se na nuklearnu energiju za

29% svoje električne energije. Ukupno 15 zemalja oslanja se na nuklearne elektrane za 25% ili više svoje električne energije. [1]

## 2.3 Termoelektrane

Termoelektrane su postrojenja koja pretvaraju toplinu u mehaničku energiju, a zatim u električnu energiju. Ova toplina može biti dobivena izgaranjem fosilnih goriva, geotermalnih izvora ili nuklearne fisije. Postoje različite vrste termoelektrana koje se mogu podijeliti prema vrsti pogonskih strojeva, načinu korištenja pare, upotrijebljenom gorivu i načinu hlađenja kondenzatora.

Prema vrsti upotrijebljenih pogonskih strojeva, postoje parne termoelektrane u kojima se koristi parna turbina kao pogonski stroj. Ovisno o načinu predaje topline mediju, parne termoelektrane se dijele na konvencionalne i nekonvencionalne termoelektrane, nuklearne termoelektrane, geotermalne termoelektrane i sunčane termoelektrane. Također postoje termoelektrane s plinskim turbinama, s plinskim motorom i dizelske termoelektrane.

Prema načinu korištenja pare, termoelektrane s parnim turbinama se dijele na kondenzacijske termoelektrane za proizvodnju samo električne energije i kogeneracijske termoelektrane za kombiniranu proizvodnju električne energije i pare koja se koristi za tehnološke procese i grijanje. Kombinirana proizvodnja električne energije i pare također se može ostvariti i s plinskim turbinama. Postoje različite vrste termoelektrana, a jedan od načina njihove podjele je prema vrsti goriva koje se koristi za proizvodnju električne energije. Konkretno, mogu se razlikovati na sljedeći način:

Parnim termoelektranama mogu se koristiti čvrsta goriva poput ugljena i biomase, tekuća goriva kao što su nafta i biogoriva, te plinovita goriva poput prirodnog plina i bioplina. U termoelektranama s plinskim turbinama koriste se tekuća goriva i plinovita goriva. Dizelske termoelektrane koriste samo tekuća goriva, poput dizela i biodizela. Ovaj način podjele koristan je za razumijevanje različitih goriva koja se koriste u termoelektranama, te kako se različiti tipovi goriva mogu primijeniti u različitim vrstama termoelektrana.[2]

## 2.4 Obnovljivi izvori energije

Tradicionalni izvori energije, poput nafte, ugljena i prirodnog plina, do sada su bili učinkoviti u poticanju gospodarskog razvoja, ali istovremeno štetni za okoliš i ljudsko zdravlje. Tradicionalni izvori energije sve više su pod pritiskom na mnogim okolišnim frontovima, a možda je najozbiljniji izazov za buduću upotrebu ugljena postizanje ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova iz Kyotskog protokola. Potencijal obnovljivih izvora energije je ogroman jer u teoriji mogu ispuniti višestruko svjetsku potražnju za energijom. Obnovljivi izvori energije poput biomase, vjetra, sunca, hidroelektrana i geotermalne energije mogu pružiti održive energetske usluge, temeljene na upotrebi rutinski dostupnih i domaćih resursa. Prijelaz na obnovljivu energiju izgleda sve izglednijim jer su cijene solarnih elektrana i vjetroelektrana značajno pale u posljednjih 30 godina i nastavljaju padati, dok cijene nafte i plina i dalje variraju. Također, cijene fosilnih goriva i obnovljivih izvora energije, kao i društveni i okolišni troškovi, kreću se u suprotnim smjerovima. Osim toga, ekonomski i politički mehanizmi potrebni za podršku širokom rasprostranjenju i održivim tržištima za obnovljive energetske sustave također su se brzo razvijali. Postaje jasno da je budući rast u sektoru energije uglavnom u novom režimu obnovljivih i donekle plinskim sustavima, a ne u konvencionalnim izvorima nafte i ugljena. Financijska tržišta se bude na budući rast potencijala obnovljivih i drugih novih energetske tehnologije, a to je vjerojatni nagovještaj ekonomske stvarnosti uistinu konkurentnih obnovljivih energetske sustava.[3]

### 2.4.1 Biomasa

Biomasa je termin koji se koristi za sav organski materijal koji potječe od biljaka (uključujući alge), drveća i usjeva, a u osnovi predstavlja prikupljanje i pohranu sunčeve energije putem fotosinteze. Bioenergija predstavlja pretvaranje biomase u korisne oblike energije poput topline, električne energije i tekućih goriva.

Biomasa za bioenergiju dolazi ili izravno sa zemlje, kao usjevi namijenjeni za energiju, ili iz ostataka koji se generiraju u obradi usjeva za hranu ili druge proizvode poput celuloze i papira iz drvne industrije. Još jedan važan doprinos dolazi iz tokova ostataka nakon potrošnje, poput drveta koje se koristi u gradnji i rušenju zgrada, paleta koje se koriste u transportu i čistog dijela komunalnog otpada. Sustav biomase za bioenergiju može se smatrati upravljanjem protokom solarno generiranih materijala, hrane i vlakana u našem društvu. [3]

## 2.4.2 Vjetroelektrane

Vjetroelektrane su također vrlo važan obnovljivi izvor energije u virtualnim elektranama. One koriste snagu vjetra za pokretanje rotora koji se pretvara u električnu energiju. Vjetroelektrane su također vrlo fleksibilne, što ih čini prikladnima za korištenje u virtualnim elektranama. Mogu se postaviti na kopnu ili na moru ,a kako se tehnologija poboljšava, postaju sve učinkovitije i isplativije. Vjetar ima značajan potencijal kao globalni izvor čiste energije jer je široko dostupan te ne proizvodi onečišćenje tijekom proizvodnje energije. Energija vjetra je jedan od glavnih izvora energije koji se koristi za prijevoz robe, mljevenje žitarica i crpljenje vode već nekoliko tisućljeća. [3]

## 2.4.3 Solari

Solarne elektrane su jedan od najčešćih obnovljivih izvora energije koji se koriste u virtualnim elektranama. One se sastoje od solarnih panela koji pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. Ove elektrane mogu biti velike ili male, a proizvode električnu energiju koja se može koristiti za napajanje kućanstava, tvrtki i javnih objekata. Prednost solarne energije je da je ona dostupna gotovo svugdje, a troškovi njezine proizvodnje su sve manji.

Postoje dvije osnovne kategorije tehnologija koje pretvaraju sunčevu energiju u korisne oblike energije, osim sustava koji se temelje na biomasi i koriste fotosintezu biljaka kao međukorak. Prvo, solarni fotonaponski (PV) moduli pretvaraju sunčevu svjetlost izravno u električnu energiju. Drugo, solarni termalni sustavi koriste fokusiranu sunčevu radijaciju za proizvodnju pare, koja se zatim koristi za okretanje turbine i proizvodnju električne energije. Solarni PV moduli su poluvodički uređaji bez pokretnih dijelova koji pretvaraju sunčevu svjetlost u istosmjernu električnu energiju. Osnovni princip rada PV modula datira više od 150 godina, ali značajan razvoj počeo je nakon što je Bell Labs 1954. godine izumio silicijsku solarnu ćeliju. Prva velika primjena PV tehnologije bila je napajanje satelita krajem 1950-ih, a to je bila primjena u kojoj su bili od velike važnosti jednostavnost i pouzdanost, dok je cijena bila manje važna. Od tada su ostvareni ogromni napredci u performansama i smanjenju troškova PV tehnologije.[3]

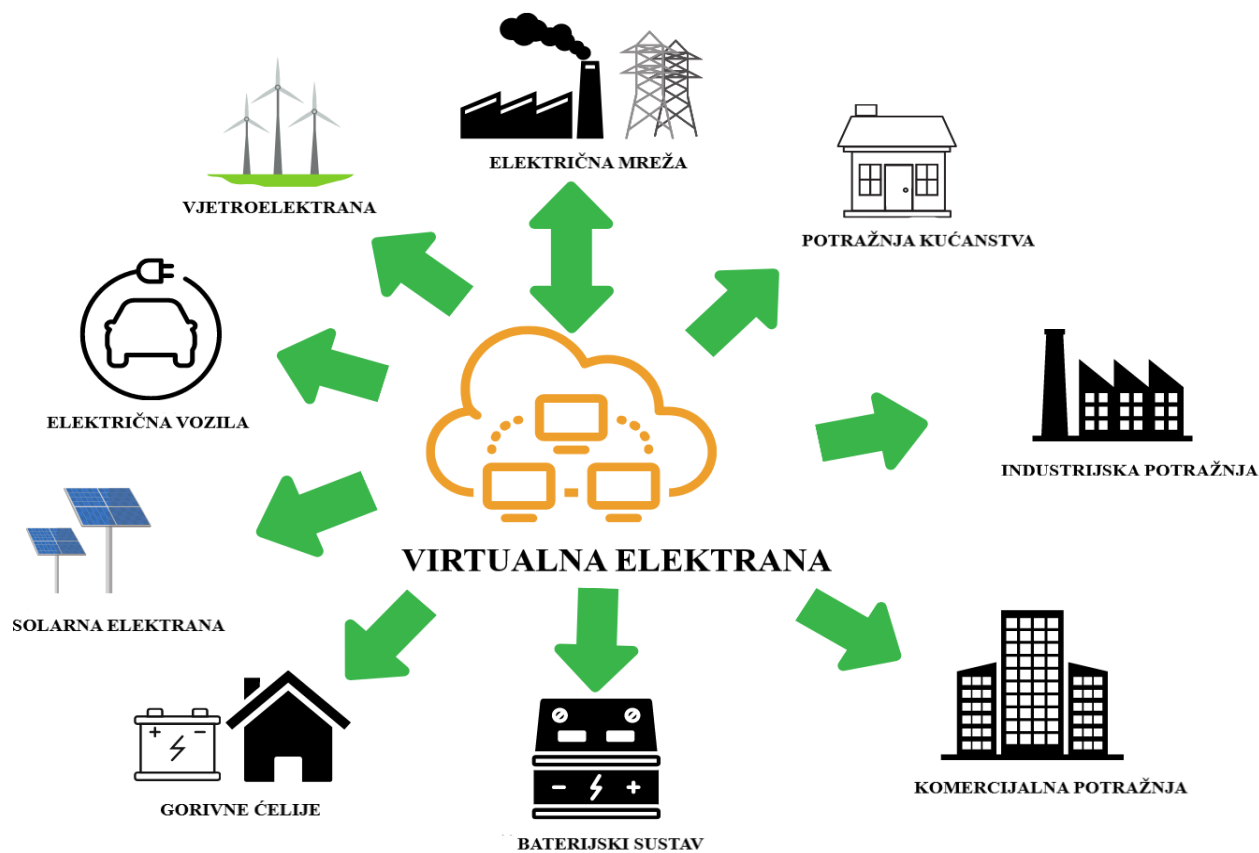


#### 2.4.4 Geotermalna energija

Geotermalna energija je toplina koja se nalazi unutar zemlje i potiče od drevne topline koja se zadržala u jezgri Zemlje, od trenja gdje se kontinentalne ploče kreću jedna ispod druge i od raspadanja radioaktivnih elemenata koji se prirodno javljaju u malim količinama u svim stijinama. Tijekom tisuća godina ljudi su koristili vruće izvore i pare, koristeći ih za kupanje, kuhanje i grijanje. Tijekom ovog stoljeća, tehnološki napredak omogućio je i ekonomično pronalaženje i bušenje hidrotermalnih rezervoara, cijevi s parom ili vrućom vodom do površine i uporabu topline izravno (za grijanje prostora, akvakulture i industrijskih procesa) ili pretvorbu topline u električnu energiju. Količina geotermalne energije je ogromna. Znanstvenici procjenjuju da samo 1 posto topline sadržane u najgornjih 10 kilometara zemljine kore odgovara 500 puta više energije od sve zemljine nafte i plina. Ipak, unatoč činjenici da se ta toplina nalazi u praktički neiscrpnim količinama, neravnomjerno je raspoređena, rijetko koncentrirana i često na dubinama koje su prevelike da bi se industrijski i ekonomski iskoristile. Geotermalna energija komercijalno se proizvodi već 70 godina za proizvodnju električne energije i izravnu upotrebu. Njezina upotreba naglo je porasla tijekom posljednja tri desetljeća, a stopa rasta proizvodnje električne energije u svijetu od 1975. do 1995. bila je oko 9 posto godišnje, a za izravnu upotrebu geotermalne energije bila je oko 6 posto godišnje. Geotermalne tekućine sadrže različite koncentracije plinova, uglavnom dušika i ugljičnog dioksida, s nešto vodikovog sulfida i manjim količinama amonijaka, žive, radona i bora. Većina ovih kemikalija koncentrirana je u otpadnoj vodi koja se obično ponovo ubrizgava u bušotine kako bi se minimalizirao utjecaj na okoliš. Koncentracije plinova obično su dovoljno niske da ne predstavljaju opasnost, ili se toksični plinovi mogu kontrolirati suvremenim tehnologijama. S obzirom na suvremene tehnologije koje omogućuju kontrolu utjecaja na okoliš, geotermalna energija se smatra relativno bezopasnim izvorom energije.[3]

### 3. VIRTUALNE ELEKTRANE-KONCEPT I NAČIN RADA

Virtualna elektrana je inovativni model koji povezuje različite izvore energije, uključujući solarne panele, vjetroelektrane i gorivne ćelije, kako bi se stvorila kontrolirana i učinkovita jedinica. Ovaj koncept omogućava lokalnu proizvodnju energije bez potrebe za prijenosom na velike udaljenosti i podupire se računalnim sustavom kojim upravlja operator distribucijskog sustava. Sudionici koji su uključeni u ovaj sustav imaju aktivnu ulogu u energetske sustavu, što omogućuje njihovo čvrsto sudjelovanje. VPP-i (eng.Virtual Power Plant) su se pokazali kao fleksibilni elementi u energetske sustavu i postoje projekti diljem svijeta koji ih uspješno koriste. Upotreba obnovljivih izvora energije je sve veća u svijetu, a VPP-i igraju ključnu ulogu u optimizaciji performansi različitih izvora i rješavanju izazova s kojima se suočavaju operatori mreža. Slika 1. detaljno prikazuje različite jedinice koje se mogu uključiti u virtualnu elektranu. Izvori koje obuhvaća VPP mogu imati mikro-CHP, male vjetroelektrane (WT), solarnu fotonaponsku (PV) energiju, male hidroelektrane (SHP), male hidroelektrane bez akumulacijskog jezera, postrojenja na biomasu, dizelske generator ili sustave za pohranu energije u baterijama (BESS).



Slika 1 Agregirane jedinice unutar Virtualne elektrane[4]

DER (eng. Distributed Energy Resource) je pojam koji uključuje "Distribuiranu proizvodnju" ili proizvodnju energije iz različitih izvora, "Pohranu Energije" i čak "Električna Vozila". Ako Distribuirani izvori energije (DER) mogu riješiti vršna opterećenja električne energije, mogu se koristiti kako bi se generirala dodatna energija tijekom razdoblja manje potražnje za energijom. Ta se energija može prodati na tržištu električne energije. DER-ovi se mogu grupirati i upravljati s jedinstvene centralne jedinice, čime postaju vidljivi na tržištu električne energije. Ovaj pristup je otvoren za sve vrste tehnologija proizvodnje energije. Glavni fokusi unutar istraživanja VPP-a su:

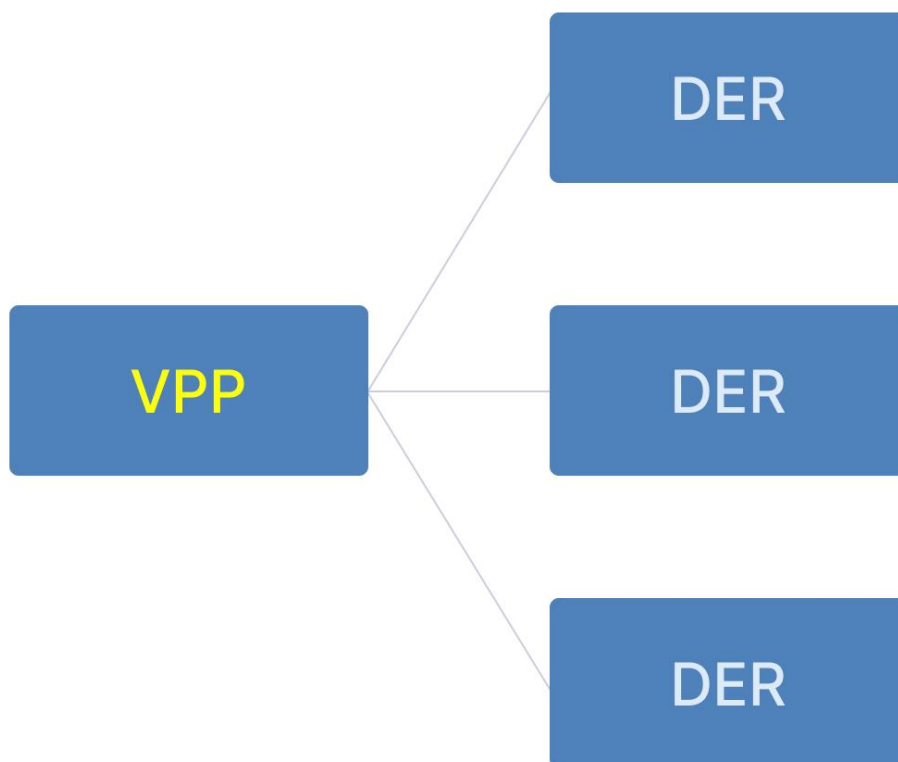
- izvedivost sudjelovanja DER-a na tržištu;
- optimizacija kontrole i koordinacije VPP-a;
- dizajn VPP-a i elektroenergetskog sustava.

Uz distribuirane izvore energije, virtualna elektrana također se sastoji od senzora i mjernih uređaja, koji omogućuju prikupljanje podataka o proizvodnji i potrošnji energije. Ti podaci se zatim obrađuju i analiziraju kako bi se omogućilo optimalno upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije u virtualnoj elektrani. Upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije u samoj virtualnoj elektrani može se provesti na nekoliko različitih načina, ovisno o arhitekturi same virtualne elektrane i ciljevima upravljanja. Primjerice, u centraliziranom pristupu, upravljački sustav može upravljati proizvodnjom i potrošnjom svakog distribuiranog izvora energije pojedinačno, kako bi se postigao optimalni balans u mreži. U distribuiranom pristupu, svaki DER također može upravljati svojom proizvodnjom i potrošnjom, a koordinacija između DER-ova u mreži može se postići putem međusobne komunikacije i suradnje.[4]

### **3.1. Arhitektura**

Arhitektura virtualne elektrane (VPP) je osmišljena tako da integrira različite distribuirane izvore energije (DER) u jedan koherentni sustav, koji se može upravljati centralizirano ili distribuirano. U ovom odjeljku, opisana je organizacija virtualne elektrane i kako se upravlja proizvodnjom i potrošnjom njenih članova. VPP, skraćeno od "Virtual Power Plant" ili "Virtualne elektrane", doživljava mnoge promjene u zadnje vrijeme, prvenstveno zbog financijske vrijednosti koja mu se pridružuje. Osim financijskih koristi, virtualna elektrana također doprinosi sigurnosti i pouzdanosti u operacijama električnog sustava. Postoji nekoliko načina klasificiranja virtualnih elektrana, a jedan od njih je prema načinu kontrole kojom se upravljaju:

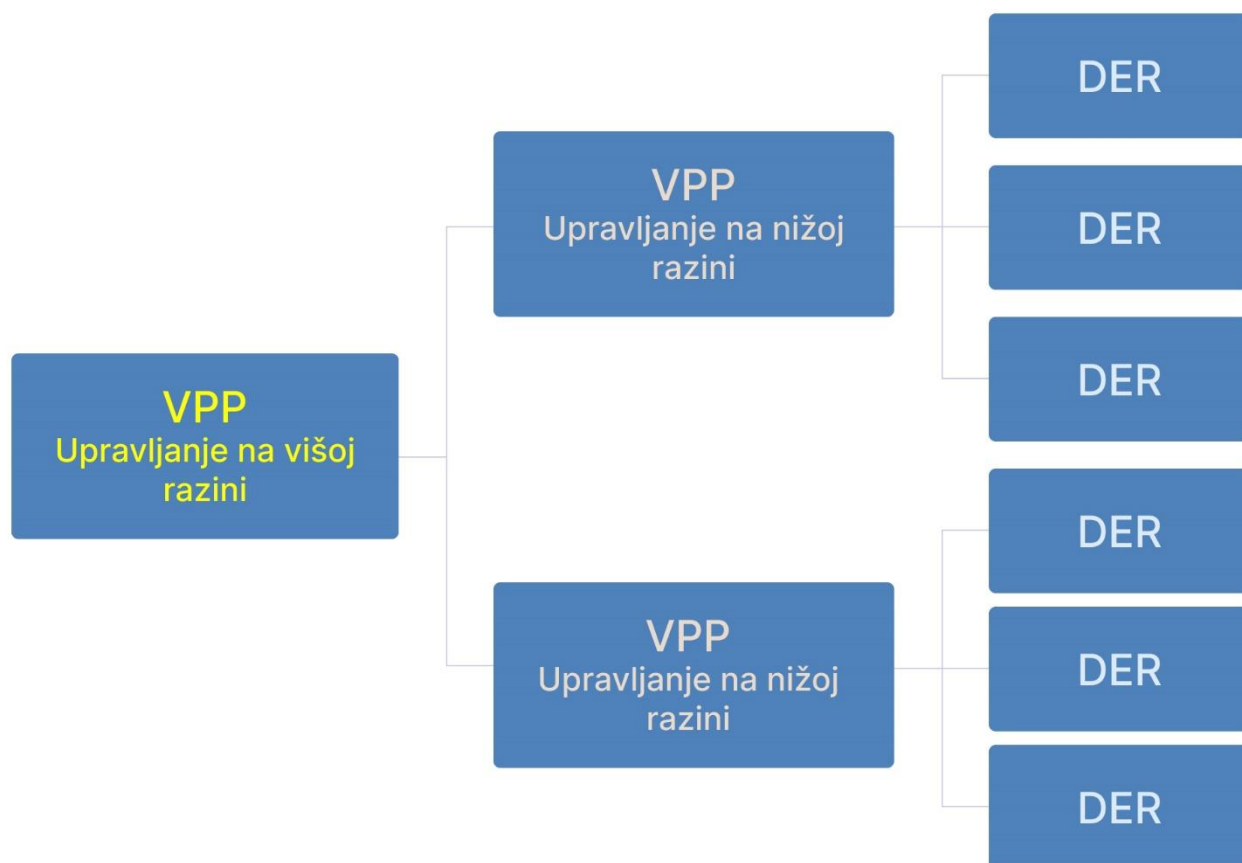
1. Centralizirani upravljani VPP (eng. Centralized Controlled VPP) je vrsta virtualne elektrane koja se upravlja putem jedne centralne upravljačke jedinice. Ova jedinica koordinira aktivnosti svih pojedinačnih proizvodnih uređaja (kao što su solarni paneli, vjetroelektrane, baterije za pohranu energije itd.) kako bi se osiguralo optimalno funkcioniranje VPP-a u skladu s potrebama elektroenergetskog sustava. Na primjer, ako je potražnja za električnom energijom visoka, a proizvodnja iz solarnih panela nije dovoljna, sustav bi automatski mogao uključiti druge distribuirane izvore energije kako bi se povećala ukupna proizvodnja električne energije. Isto tako, ako je proizvodnja iz distribuiranih izvora energije prevelika u odnosu na potražnju, sustav bi mogao uskladištiti višak energije u baterijama kako bi se iskoristila u kasnijem periodu. Ovaj sustav omogućuje fleksibilnost u proizvodnji i potrošnji električne energije, te također doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova, povećanju učinkovitosti elektroenergetske mreže, te smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima.



*Slika 2 Centralizirani upravljani VPP[4]*

2. Distribuirani upravljani VPP (VPP s distribuiranom kontrolom) koristi distribuiranu logiku kontrole koja se temelji na suradnji i koordinaciji između DER-ova unutar grupe. U ovom slučaju, distribuirani izvori energije dijele informacije i donose odluke zajedno, što omogućuje bolju

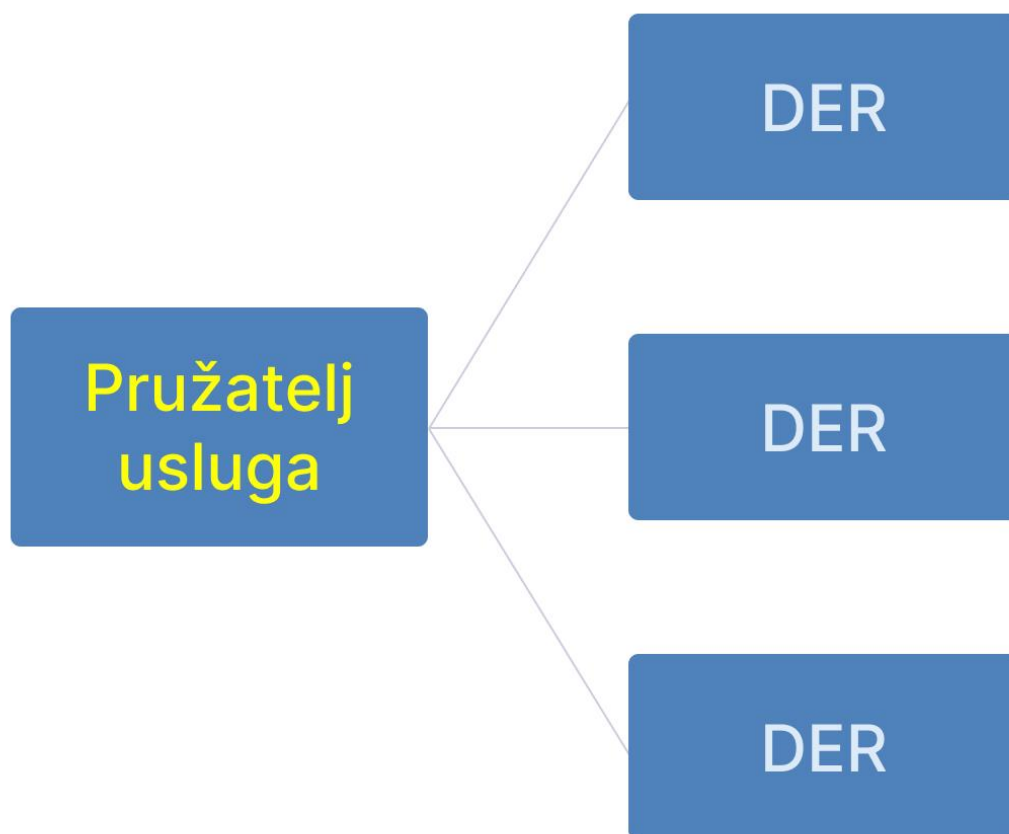
optimizaciju proizvodnje i upravljanja opterećenjem u skladu s trenutnom potražnjom. Ovakav VPP omogućava veću fleksibilnost i prilagodljivost te bolje iskorištavanje raspoloživih resursa. Primjeri distribuiranih virtualnih elektrana su solarne elektrane na krovu privatnih kućanstava, vjetroelektrane na poljima ili hidroelektrane na rijekama, koje se mogu međusobno povezati i koordinirati preko sustava upravljanja energijom kako bi se osigurala stabilna i održiva opskrba energijom.



Slika 3 Distribuirani upravljani VPP[4]

3. Potpuno distribuirani VPP podrazumijeva da su odluke o upravljanju sustavom i koordinaciji proizvodnje energije distribuirane među DER-ovima. To znači da se svaki DER u virtualnoj elektrani ponaša kao samostalan akter i ima određenu autonomiju u odlučivanju o svojoj proizvodnji. No, kako bi se postigla koordinacija, DER-ovi međusobno komuniciraju i razmjenjuju informacije o svojim kapacitetima i potrebama. Primjer potpuno distribuiranog VPP-a su pametne kuće koje koriste solarnu energiju za proizvodnju električne energije i skladištenje viška energije

u kućnom baterijskom sustavu. Ti baterijski sustavi mogu biti povezani putem softvera i komunikacijskih tehnologija kako bi se stvorio potpuno distribuirani VPP. Svaka kuća ima svoj vlastiti sustav za proizvodnju i skladištenje energije, ali kada postoji prekomjerna proizvodnja u jednoj kući, ta se energija može dijeliti s drugim kućama koje imaju potrebu za energijom, čime se smanjuje ukupna potrošnja energije s mreže.



*Slika 4 Potpuno distribuirani VPP[4]*

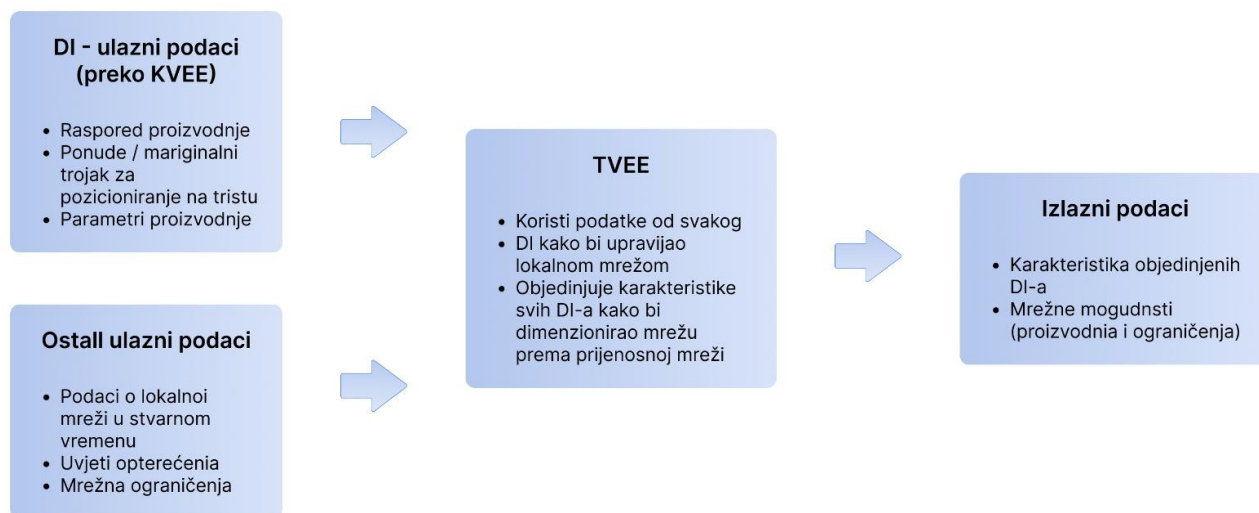
## 2) Ciljevi upravljanja

Još jedna klasifikacija VPP-ova uključuje dvije kategorije: tehnički VPP (eng. Technical Virtual Power Plant - TVPP) i komercijalni VPP (eng. Commercial Virtual Power Plant – CVPP) . Tehnička virtualna elektrana ima distribuirane izvore energije koji su prisutni unutar određenog geografskog područja te surađuje u upravljanju lokalnim elektroenergetskim sustavima za operatora distribucijske mreže. Također pruža uravnoteženje sustava, kao i pomoćne usluge, za operatora prijenosnog sustava. TVPP je odgovoran i za olakšavanje upravljanja ograničenjima lokalnih mreža. Operator distribucijske mreže, u kombinaciji s tehničkom virtualnom elektranom,

predstavlja aktivnu distribucijsku mrežu (ADN). Zatim, poboljšava i pouzdanost omogućavajući distribuiranim izvorima energije da rade u različitim uvjetima. Neke od definiranih funkcija TVPP-a su:

- vidljivost DER-a prema operatoru sustava
- doprinos DER-a u upravljanju sustavom
- optimalno korištenje DER-a

TVPP prikuplja podatke i modelira karakteristike energetskog sustava koji uključuje distribuirane izvore, upravljive terete i mreže unutar određene regije. On predstavlja jedinstveno tijelo koje obuhvaća cijelu lokalnu mrežu. Tehničke karakteristike TVPP-a usklađene su s onima koje operator prijenosnog sustava primjenjuje na klasične elektrane povezane s prijenosnom mrežom. Njegova uloga je upravljanje lokalnom mrežom i izrada karakteristike lokalne distribucijske mreže. Kroz suradnju s različitim komercijalnom virtualnom elektranom, tehnička VPP dobiva informacije o svim distribuiranim izvorima u mreži te se informacije koriste zajedno s detaljnim podacima o samoj mreži, kao što su topologija i ograničenja, kako bi se procijenio doprinos distribucijske mreže u prijenosnoj mreži.



Slika 5 TVPP[4]

Komercijalna virtualna elektrana se uglavnom bavi troškovima i karakteristikama rada svojih distribuiranih jedinica energije. CVPP aktivno sudjeluje na tržištima energije, bilo kroz trgovanje ili pružanje usluga te omogućuje pristup tržištu manjim izvorima energije. Glavni cilj CVPP-a je agregacija entiteta radi komercijalnih koristi, a ne radi stabilnosti sustava. Za razliku od tehničke

virtualne elektrane, komercijalna može imati sudionike iz šire geografske regije. Važna karakteristika CVPP je i da pomaže u optimiziranju rasporeda proizvodnje na temelju predviđene potražnje i raspoložive proizvodne kapacitete. Neke od osnovnih funkcija su:

- Upravljanje karakteristikama DER-a;
- Predviđanje proizvodnje i potrošnje, zajedno s optimiziranom raspodjelom proizvodnje;
- Pomoć pojedinačnim DER jedinicama u sudjelovanju na tržištima energije putem ponuda i prodaje;
- Predviđanje proizvodnje i potražnje.

Zaključno, komercijalna virtualna elektrana agregira distribuirane izvore energije kako bi stvorila portfelj za sudjelovanje na energetske tržištima.



Slika 6 CVPP[4]

### 3) Tržišni segment

U ovoj klasifikaciji, korištena je jedinstvena metodologija za razlikovanje vrsta VPP-a koji trenutno postoje u svijetu. Klasifikacije su: VPP temeljen na upravljanju potražnjom, VPP temeljen na opskrboj strani, mješoviti VPP te VPP putem veleprodajnih aukcija. VPP temeljen na upravljanju potražnjom vidljiv je u SAD-u s dugogodišnjim tržištem upravljanja potražnjom. VPP temeljen na opskrboj strani su karakteristični za Njemačku, a većina ih je istraživačko-



razvojnih projekata. VPP temeljen na opskrbenj strani je koncept koji koristi fleksibilnost u proizvodnji energije iz različitih izvora na lokalnoj razini. Ideja je da se, ako lokalna zajednica ili tvornica koriste više izvora energije, VPP može automatski odabrati najpovoljniji izvor energije za upotrebu u stvarnom vremenu. Ovaj postupak se ostvaruje pomoću sofisticiranog softvera koji upravlja proizvodnjom energije i koordinira njezinu distribuciju prema potrošačima. Na taj način, VPP temeljen na opskrbenj strani može smanjiti ukupne troškove energije i poboljšati pouzdanost opskrbe električnom energijom. Mješoviti VPP može se kombinirati distribuirani i centralizirani VPP kako bi se iskoristila fleksibilnost lokalne proizvodnje energije uz istodobno upravljanje s više točaka radi veće sigurnosti i pouzdanosti opskrbe. Također se može kombinirati VPP temeljen na opskrbenj strani s drugim VPP-ovima kako bi se osiguralo optimalno korištenje različitih izvora energije, kao što su solarna, vjetroelektrana ili hidroelektrana. Mješoviti VPP omogućuje prilagodljivost i skalabilnost u proizvodnji i distribuciji energije te učinkovitije korištenje resursa, što dovodi do smanjenja troškova i povećanja održivosti. Na kraju, VPP putem veleprodajnih aukcija trenutno su prisutni u Europi i uključuju velike elektrane koje opskrbljuju bazna opterećenja. Ovaj pristup koristi aukcijski sustav za prodaju viška energije proizvedene od velikih elektrana koje se prodaje kupcima koji žele kupiti energiju po najboljoj cijeni. VPP putem veleprodajnih aukcija omogućuje velikim elektranama da optimiziraju svoju proizvodnju i prodaju višak energije, dok istovremeno pruža kupcima pristup jeftinoj energiji. Ova vrsta VPP-a pruža korisne prednosti za stabilnost mreže i integraciju obnovljivih izvora energije, smanjujući potrebu za backup izvorima energije.[4]

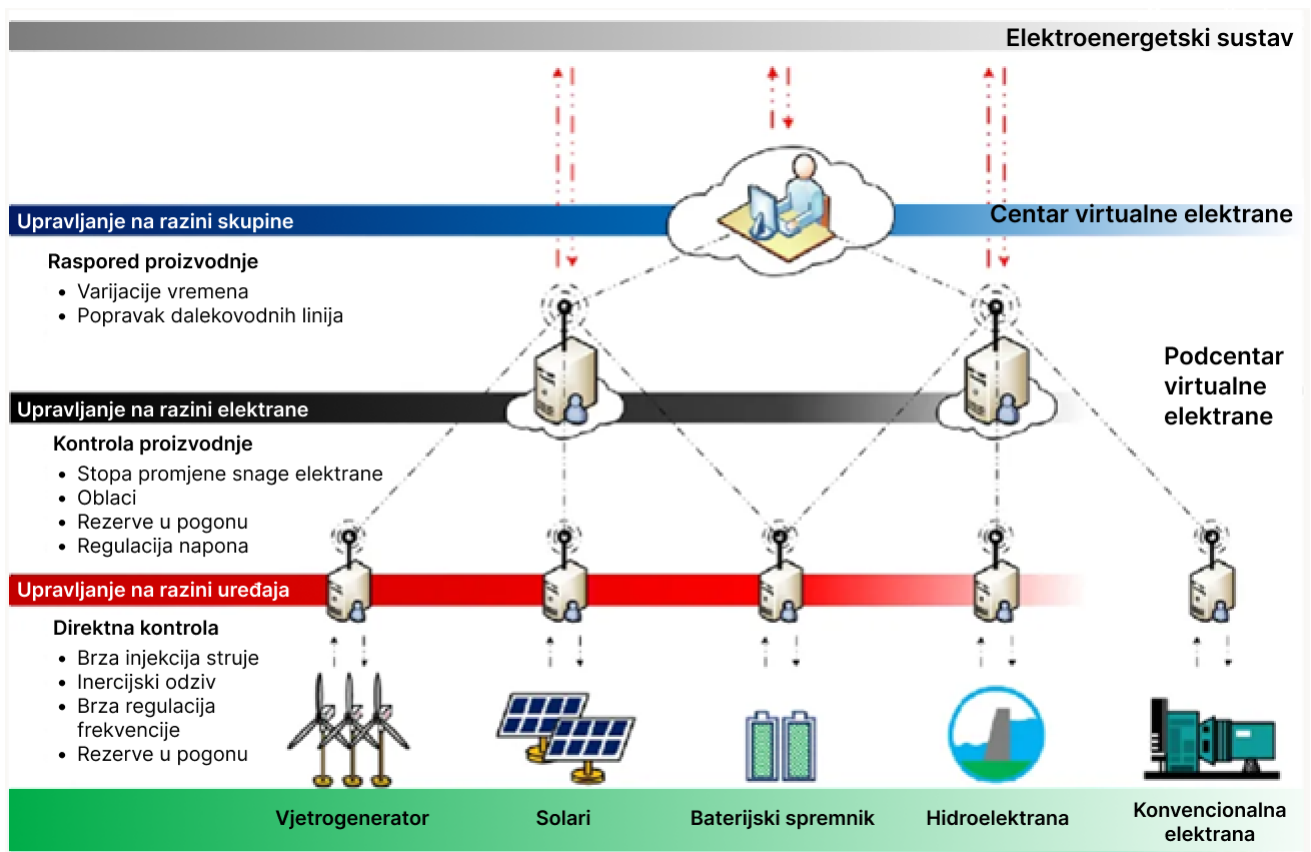
### **3.2. VPP i hijerarhijske kontrolne metode**

Ovo poglavlje predstavlja koncept i princip hijerarhijskih kontrolnih metoda za virtualnu elektranu (VPP) koja se sastoji od različitih distribuiranih izvora energije (DER-ova), uključujući sustave za pohranu energije. Hijerarhijske kontrolne metode omogućuju virtualnoj elektrani da iskoristi različite sposobnosti svojih izvora energije dijeljenjem podataka između viših i nižih razina kontrole, čime se povećava fleksibilnost VPP-a u pružanju električnih usluga u elektroenergetskom sustavu. Stoga bi razvoj hijerarhijskih kontrolnih metoda mogao biti ključan za sazrijevanje tehnologije virtualnih elektrana u elektroenergetskim sustavima budućnosti.

Virtualna elektrana je kao što smo rekli skup heterogenih distribuiranih izvora energije koji uključuju sustave za pohranu energije, a mogu pružati širok raspon pomoćnih usluga za elektroenergetske sustave. Za njihovu primjenu, potrebne su informacijske i komunikacijske tehnologije za suočavanje s kompleksnošću povećanja distribuiranih izvora energije na distribucijskim razinama i smanjenje geografskih ograničenja pri formiranju kontrolabilnog entiteta kao što je virtualna elektrana. Uz odgovarajuće komunikacijske protokole, VPP je sposobna upravljati jedinicama koji su fizički udaljeni putem hijerarhijske kontrolne strategije koja može virtualno agregirati kapacitete i fleksibilnosti različitih DER-a unutar VPP-a radi poboljšanja rada elektroenergetskog sustava. Tako se skupina DER-ova može ponašati kao VPP koji se ponaša kao konvencionalna centralizirana elektrana putem hijerarhijske kontrolne strategije. Hijerarhijska kontrolna strategija je koncept koji omogućuje elektrani da pruži pomoćne usluge kao centralizirana kontrolirana elektrana. Hijerarhijska kontrolna strategija pruža mogućnosti za doprinos VPP-ova primarnim i sekundarnim kontrolama, baveći se drugim stabilnostima i operativnim aspektima elektroenergetskog sustava, poput kontrole napona, kontrole frekvencije, obnove frekvencije, razmjene energije i dodjele resursa. Ove usluge prvenstveno imaju za cilj održavanje trenutne ravnoteže elektroenergetske ponude i potražnje. Za organizaciju složenosti različitih izvora energije unutar same virtualne elektrane, hijerarhijska kontrolna strategija može se sastojati od kontrolora na više razina temeljenih na različitim vremenskim skali pomoćnih usluga i primjena distribuiranih izvora energije s komunikacijskim protokolima.

### **3.3. Hijerarhija**

Slika 7. prikazuje primjer hijerarhijskog upravljanja za mrežne resurse (DER-ove) u kontrolnom području. Ti resursi se mogu upravljati i koordinirati s više razina upravljanja: upravljanje na razini uređaja (DLC), upravljanje na razini elektrane (PLC) i upravljanje na razini skupine (CLC). Različite razine upravljanja razlikuju se po vremenskoj skali usluga koje pružaju.



Slika 7 Hijerarhijska kontrolna struktura za mrežne aktivnosti u kontrolnom području[2]

Na razini upravljanja uređajima (DLC), pojedinačni resursi u mreži, kao što su distribuirani izvori energije i pohrane energije, imaju vlastite kontrole koje im omogućuju brz odgovor na naglu promjenu električnih varijabli koje se mjere na lokalnoj razini. Kako se povećava penetracija obnovljivih izvora energije, potrebno je da i distribucijski izvori energije doprinose primarnim uslugama za stabilnost sustava. Ove usluge trebaju biti automatizirane ili čak trenutno reaktivne, kao što su brzo ubrizgavanje reaktivne struje, emulirani inercijski odgovor, brzo upravljanje frekvencijom, zaglađivanje vjetrovitog napajanja, rotacijska rezerva i dr.

Na razini upravljanja postrojenjima (PLC), grupa mrežnih resursa može tvoriti virtualnu elektranu i biti povezana putem komunikacijskog protokola. Tada se mrežni resursi mogu koordinirati za kontrolu proizvodnje VPP-a i pružanje usluga u zajedničkoj točki spajanja (PCC), koja je udaljena od odgovarajućih resursa. Zajednička točka spajanja (PCC) je točka u elektroenergetskom sustavu na kojoj se mjeri izlazna snaga VPP-a. To je ujedno i točka na kojoj se elektrana povezuje na elektroenergetski sustav i gdje se obično nalaze uređaji za mjerenje, nadzor i kontrolu, poput senzora za mjerenje napona i struje, sklopki i regulatora napona. PCC je ključna točka za praćenje

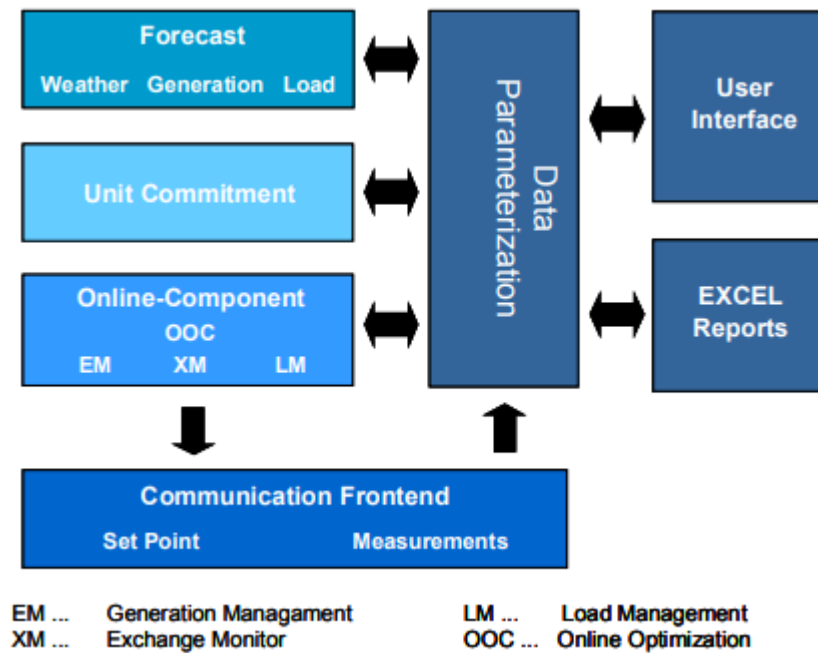
i upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije u VPP-u te osigurava da se VPP pridržava odgovarajućih standarda kvalitete napajanja i sigurnosnih zahtjeva elektroenergetskog sustava. Uslugama koje pruža PLC može se proširiti spektar usluga koje su možda potrebne od DER-a unutar VPP-a. PLC će biti zadužen za pružanje usluga koje imaju relativno sporije i dulje odgovore u usporedbi s DLC-om. Usluge se mogu realizirati komunikacijom PLC-a s DLC-ima unutar istog VPP-a i dodjeljivanjem kontrolnih signala kako bi se postigla određena pomoćna usluga. PLC može pružiti kontrolu brzine rasta pod varijacijama vjetrovitog ili PV napajanja, rotacijsku rezervu, regulaciju napona, itd. Na ovoj razini, virtualna elektrana može izravno komunicirati s elektroenergetskim sustavom kako bi udovoljio bilo kakvim zahtjevima od operatora sustava. Ili, se može tretirati kao pod-VPP - kao jedinica ispod VPP-a na višoj razini - koju naručuje glavni VPP centralno na razini upravljanja skupine (CLC).

Na razini upravljanja skupina (CLC) se tvori glavni VPP koji upravlja ili raspoređuje kolektivnu proizvodnju svih pod-VPP-ova za dugoročne odgovore. To znači da se na ovoj razini upravljanja VPP-ovi organiziraju u hijerarhijski sustav. Upravljanje na razini skupine ima zadatak koordinirati aktivnosti pod-VPP-ova koji mu se nalaze podređeni, pri čemu se uzima u obzir dugoročne potrebe i planove mreže. To može uključivati zaglađivanje dugoročne proizvodnje, planiranje održavanja prijenosnih linija, itd. Hijerarhijski upravljani sustav zahtijeva odgovarajuće komunikacijske protokole unutar kontrolnog područja koje se sastoji od različitih mrežnih sredstava. Osim toga, karakteristike i primjene mrežnih sredstava u području treba analizirati kako bi se mogla pravilno koristiti. Na primjer, ako u području postoje obnovljivi izvori energije poput vjetroelektrana i solarnih elektrana, upravljanje na razini skupine će se brinuti da se optimalno iskoriste i da se osigura stabilnost elektroenergetske mreže. To se može postići putem odgovarajućeg upravljanja proizvodnjom energije, usklađivanja s potražnjom i planiranjem održavanja. [2]

### **3.4. DEMS Software**

Na temelju zahtjeva definiranih u prethodnom odjeljku, razvijen je softverski paket za decentralizirano upravljanje energijom nazvan DEMS. DEMS sustav nije zamjena za automatizacijsku opremu koja je potrebna za upravljanje komponentama virtualne elektrane. Moraju biti dostupni barem lokalni automatizacijski uređaji kako bi se osiguralo osnovno funkcioniranje decentraliziranih energetske jedinice te osigurala sigurnost za komponente i osoblje u odsutnosti DEMS sustava. Središnja točka rada virtualne elektrane je sustav upravljanja

energijom, poznat kao decentralizirani sustav upravljanja energijom. Ključna komponenta DEMS-a je povezanost s sustavom za upravljanje distribucijskim mrežama i sustavom za upravljanje prijenosnim mrežama. Ova povezanost omogućava razmjenu važnih informacija o stanju mreže i mogućnostima virtualne elektrane. DEMS djeluje kao most koji spaja VPP s distribucijskom i prijenosnom mrežom, osiguravajući transparentnost i sinkronizaciju podataka. Ove informacije o stanju mreže omogućuju optimalno upravljanje i iskorištavanje potencijala virtualne elektrane u skladu s zahtjevima energetskeg sustava. Komponente i topologija energetskeg toka VPP-a modeliraju se u DEMS-u pomoću različitih klasa modelnih elemenata, kao što su pretvaračke jedinice, ugovori, spremišne jedinice, obnovljive jedinice i fleksibilna opterećenja. DEMS planerske aplikacije uzimaju u obzir sve troškove, prihode i ograničenja relevantnih energetskeg i medijskeg tokova, poput električne energije, tople vode, pare, hlađenja, emisija, vodika itd.. DEMS kontrolne aplikacije pružaju kontrolu i nadzorne mogućnosti svih generacijskeg jedinica, spremišne jedinica i fleksibilne potraživanja, kao i kontrolne mogućnosti za održavanje dogovorene g profila energetske razmjene. Kao što je prikazano na slici 8., funkcije DEMS-a se mogu podijeliti na planerske funkcije i kontrolne funkcije. Odgovarajuće planerske funkcije su prognoza vremena, prognoza opterećenja, prognoza generacije i posvećenost jedinice. Kontrolne funkcije uključuju upravljanje generacijom i opterećenjem, nadzor razmjene te online optimizaciju i koordinaciju. Planerske funkcije uzimaju u obzir vremensko razdoblje od jednog do sedam dana s vremenskom rezolucijom ovisno o razdobljima obračuna za prodaju i kupnju energije, npr. 15, 30 ili 60 minuta. Planerske funkcije pokreću se ciklički (jednom dnevno ili češće), po potrazi i spontano.



Slika 8 DEMS funkcije[5]

### 3.4.1 DEMS Funkcije

DEMS funkcija za prognozu vremena omogućuje uvoz i izračunavanje prognoziranih meteoroloških podataka koji se koriste kao ulazni podaci za ostale modulne funkcije DEMS-a. Funkcija za prognozu vremena ima sposobnost uvoza prognoziranih meteoroloških podataka koje pružaju vanjski izvori, poput usluga prognoziranja vremena. U slučaju da se u virtualnoj elektrani nalazi lokalna oprema za mjerenje meteoroloških podataka, vanjska uvezena prognoza vremena prilagođava se lokalnim mjerenjima na lokaciji pomoću algoritma za korekciju pokretnog prosjeka koji minimizira razliku odstupanja između vanjske prognoze i lokalno izmjerene meteorološke podatke oko stvarnog koraka vremena. Rezultirajuća interna prognoza vremena pruža se kao ulaz u druge DEMS-ove planerske funkcije.

DEMS Load Forecast predviđanje opterećenja u okviru sustava za upravljanje distribucijom energije je funkcija koja se koristi za procjenu buduće potrošnje električne energije za različite kategorije opterećenja. Funkcija za ispravan rad koristi povijesne podatke o stvarnoj potrošnji energije, prikupljene u vremenskim intervalima koji se koriste za planiranje, kako bi predvidjela kako će se potražnja ponašati u budućnosti. Uzima u obzir utjecajne varijable kao što su tip dana (radni dan, vikend, praznik), meteorološki uvjeti i raspored industrijske proizvodnje, jer te

varijable mogu značajno utjecati na potrošnju energije. Korištenjem polinomnog modela s segmentima koji se izračunavaju za svaki od 96 vremenskih koraka dana (na primjer, za 15-minutnu vremensku rezoluciju), funkcija DEMS Load Forecast procjenjuje potrošnju energije za različite kategorije potrošnje. Ovi koeficijenti jednadžbe modela procjenjuju se ciklički svaki dan nakon dostupnosti novih mjerenja. Za svaki vremenski korak dana provodi se zasebna analiza koeficijenata. Podaci koji se koriste za analizu počinju od jučer za parametrizirani vremenski raspon u prošlosti (od 0 do 84 dana). Matematička metoda za izračunavanje koeficijenata modela je Kalmanov filter. Korištenjem Kalmanovog filtera omogućuje se definiranje potpuno dinamičnih, djelomično statičkih i potpuno statičkih modela predviđanja. Uz to, funkcija DEMS Load Forecast omogućuje i predviđanje buduće potrošnje, što je važno za planiranje i upravljanje distribucijom energije u virtualnoj elektrani. Ovi se podaci koriste kao ulazni podaci za druge planerske funkcije DEMS-a, kao što su upravljanje generacijom i opterećenjem i optimizacija razmjene energije.

DEMS Generation predviđanje proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE) odnosi se na funkciju unutar sustava za upravljanje distribucijom energije. Ova funkcija ima zadatak procijeniti koliku energiju će proizvesti obnovljivi izvori energije, poput vjetroelektrana i solarnih panela, na temelju predviđenih vremenskih uvjeta. Algoritam predviđanja je polinomna transformacija dvije meteorološke varijable u očekivani izlaz snage prema zadanoj matrici transformacije (npr. brzina i smjer vjetra za vjetroelektrane, intenzitet svjetlosti i temperatura okoline za solarne sustave). Matrica transformacije može se parametrizirati prema tehničkim specifikacijama jedinice ili procjenjivati na temelju povijesnih mjerenja snage i meteoroloških podataka primjenom algoritama neuronskih mreža (u fazi offline analize).

DEMS funkcija "Unit Commitment" optimizacija angažiranja jedinica ima za zadatak izračunati najbolji raspored i angažiranje različitih fleksibilnih energetske jedinice unutar virtualne elektrane. To znači da jedinice mogu uključivati različite vrste resursa kao što su proizvodne jedinice, skladišta energije i fleksibilnu potražnju. Cilj "Unit Commitment" funkcije je postizanje najvećeg mogućeg profita uzimajući u obzir prihode i troškove. Prilikom toga se uzima u obzir složena ravnoteža između proizvodnje, potražnje i skladištenja energije. Funkcija uzima u obzir tehničke parametre svake jedinice, njihove financijske informacije, okolišne čimbenike i sve ugovorne obveze koje se odnose na njihovu proizvodnju ili potrošnju energije.

DEMS funkcija "Generation Management" (upravljanje proizvodnjom) je ključni dio sustava za upravljanje distribucijom energije koja omogućuje stvarni nadzor i upravljanje svim resursima za proizvodnju energije i skladištenje unutar virtualne elektrane. Ova funkcija radi u stvarnom vremenu i osigurava da svi energetske resursi djeluju na najučinkovitiji način kako bi zadovoljili trenutnu potražnju za energijom.

DEMS funkcija "Load Management" je odgovorna za kontrolu i nadzor svih fleksibilnih opterećenja unutar virtualne elektrane. Fleksibilna klasa opterećenja obuhvaća različite skupine opterećenja kojima je zajedničko to da se mogu prilagoditi i uključiti ili isključiti prema potrebama elektroenergetskog sustava. Ova funkcija omogućuje aktivno upravljanje potrošnjom električne energije kako bi se postigla bolja ravnoteža između proizvodnje i potrošnje.

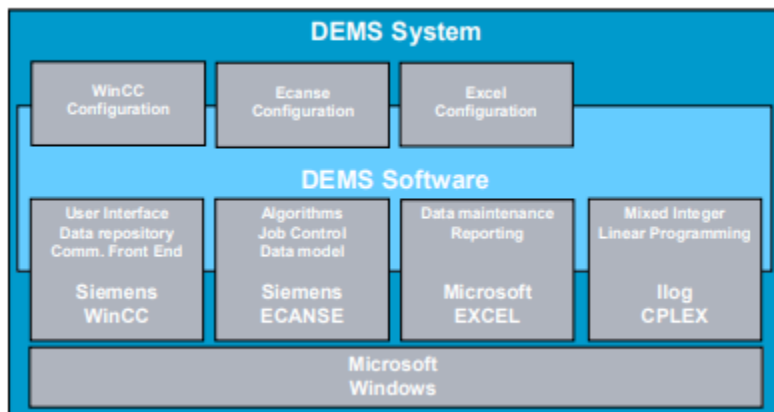
Fleksibilna klasa opterećenja može se sastojati od različitih grupa opterećenja istog prioriteta. To znači da više opterećenja može biti povezano i kontrolirano zajedno, s mogućnošću istodobnog uključivanja ili isključivanja. Ovisno o postavljenom načinu kontrole za tu klasu opterećenja (neovisno djelovanje, prema rasporedu ili kontrolirano upravljanje), te uzimajući u obzir trenutno stanje svakog opterećenja, kontrolno stanje, trenutnu potrošnju energije i dozvoljeno vremensko kašnjenje za kontrolu.

DEMS funkcija "Exchange Monitor" ima ulogu u praćenju i upravljanju električnom izmjenom energije između virtualne elektrane i drugih entiteta (npr. drugih električnih mreža ili korisnika). Glavni cilj ove funkcije je osigurati da se dogovorena izmjena električne energije održava u okvirima predviđenih rasporeda i da se bilo kakve odstupanja od planirane izmjene energije minimiziraju. U osnovi, DEMS Exchange Monitor funkcija osigurava da se električna izmjena energije održava u skladu s planiranim rasporedima i da se bilo kakve potrebne korekcije snage pravovremeno izračunavaju i primjenjuju kako bi se održala ravnoteža između proizvodnje i razmjene energije. Ovo je važno za stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava.

DEMS funkcija za online optimizaciju i koordinaciju raspoređuje ukupnu vrijednost korekcije snage svim pojedinačnim generacijskim jedinicama, jedinicama za pohranu energije i fleksibilnim klasama opterećenja koje rade u kontrolnom načinu. Algoritam distribucije radi prema sljedećim pravilima: Prvo, moraju se uzeti u obzir stvarne ograničenja jedinica (npr. minimalna i maksimalna snaga, sadržaj pohrane, ograničenja nagiba snage...). Drugo, ukupna vrijednost korekcije snage treba se postići što je brže moguće. I treće, trebaju se preferirati najjeftinije jedinice za kontrolne



radnje. "Najjeftinije" u ovom kontekstu znači da se inkrementalni troškovi kontrole snage jedinica oko njihovih planiranih radnih točaka uzimaju kao referenca. Inkrementalni troškovi kontrole snage pojedinačnih jedinica izračunavaju se funkcijom Unit Commitment zajedno s odgovarajućim rasporedima raspodjele. Korekcijske vrijednosti snage pojedinačnih jedinica prenose se funkcijama Upravljanja generacijom i Upravljanja opterećenjem za izvršenje.



*Slika 9 DEMS softverska arhitektura[5]*

DEMS se temelji na široko rasprostranjenim softverskim komponentama koje se pokreću na računalu temeljenom na Microsoft Windowsu s standardiziranim sučeljima i protokolima. To osigurava investiciju vlasnika u virtualnu elektranu jer je lako proširiti je novim modulima. Kao osnovni SCADA motor koristi se Siemens WinCC (Windows Control Center). Primjene algoritama realizirane su pomoću Siemens ECANSE-a (Okruženje za računalno pomoćno inženjerstvo neuronskih softvera). Postoji sučelje Microsoft Excel za unos i izlaz podataka u vremenskim serijama. Vremenske serije podataka pohranjuju se u procesnoj bazi podataka WinCC-a (koristeći komercijalni relacijski sustav baza podataka). DEMS koristi CPLEX za rješavanje problema mješovitog cjelobrojnog programiranja. Konfiguriranjem datoteka WinCC-a, ECANSE-a i Excel-a konfigurira se konkretan sustav DEMS aplikacija prema specifičnoj strukturi Virtualne elektrane.

Korisničko sučelje igra važnu ulogu za prihvaćanje operatora. Moralo bi biti korisniku prijateljsko kako bi se smanjio trening i izbjegle pogrešne operacije. Stoga je korisničko sučelje DEMS-a realizirano na temelju graditelja korisničkog sučelja WinCC-a. Dodatno, za složenije i fleksibilnije grafičke analize informacija o vremenskim serijama, mogu se koristiti Excel datoteke s izvješćima za prikaz rezultata. Uz upotrebu alata za udaljeni rad na radnoj površini ili opcije WinCC Web

Navigator, moguć je udaljeni pristup DEMS sustavu putem ISDN-a ili weba. Slika 9. prikazuje primjere korisničkog sučelja.

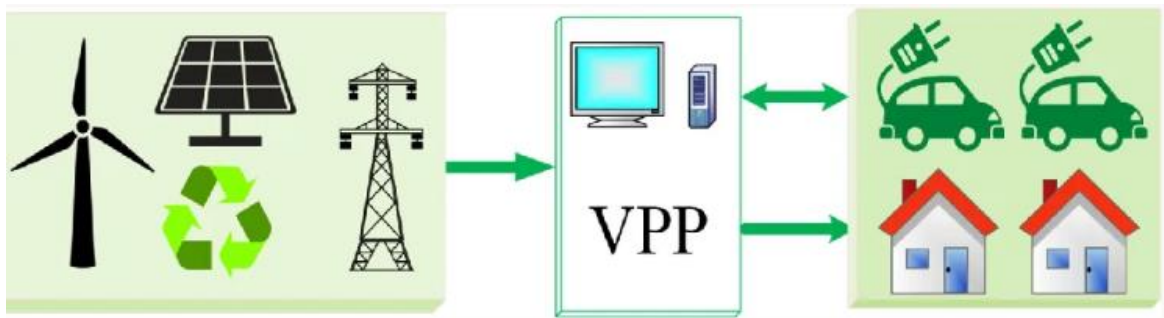
Kao što je već spomenuto, sučelje i protokoli komunikacijskog sustava su ključni za uspjeh sustava upravljanja energijom u virtualnoj elektrani. Stoga, DEMS pruža nekoliko sučelja i protokola za procesne podatke:

- OPC (OLE za procesnu kontrolu)
- Modbus protokolski skup, Modbus serijski
- Profibus DP, Profibus FMS
- SIMATIC S5, S7, TI
- Windows DDE
- Protokoli PLC-a

Uz to, DEMS ima SOAP temeljeno XML Web sučelje koje omogućuje razmjenu podataka o vrijednostima procesa i vremenskim serijama podataka između DEMS-a i DEMS-a ili DEMS-a i web aplikacija. Nadalje, DEMS omogućuje uvoz ili izvoz vrijednosti procesa i vremenskih serija podataka iz ili u ODBC izvore podataka, Excel i ASCII datoteke.[5]

## **4.PRIMJENA TEHNOLOGIJE VEHICLE-TO-GRID (V2G) KROZ VIRTUALNE ELEKTRANE**

Električna vozila (EV) su distribuirani izvori energije u budućim pametnim mrežama. Glavna razlika između EV-a i drugih distribuiranih jedinica je mobilnost. EV-ovi se mogu povezati s različitim dijelovima mreže i još uvijek koristiti istu kvalitetu usluge. Integracija električnih vozila i drugih jedinica DER-a u energetske sustave pod principom "prikladnost i zabava" nije učinkovita za siguran i pouzdan rad energetskih mreža. Različiti dobavljači električne energije i DER-a mogu se okupiti kako bi zadovoljili potrebno opterećenje. Virtualna odgovorna je za upravljanje opterećenjem i planiranje resursa. Dobiva energiju iz distribuiranih izvora energije i sklapa ugovore s potrošačima za napajanje električnih vozila i njihovih kućnih opterećenja. U tu svrhu stvara uštede na razini mjera na potpuno nov način. Virtualne elektrane minimiziraju ukupni trošak, osiguravajući učinkovitu upotrebu energije koju proizvode distribuirani izvori energije. Nemaju zahtjeve za veliku i kompleksnu infrastrukturu i mogu komunicirati s najmanjim DER-ima s većom učinkovitošću i fleksibilnošću. Ova nova tehnologija uobičajeno se naziva "energetski internet". Izrazi "VPP" i "mikromreža" obično se koriste zamjenjivo, osim što se mikromreža može "otokovati" od mreže, dok se virtualna elektrana mora povezati s mrežom. Agregator centralno upravlja distribucijom energije za skup potrošača s TE (vremenski elastičnim) i TIE (vremenski inelastičnim) opterećenjima. Potonji, poput hlađenja ili grijanja, moraju se zadovoljiti čim se zatraže, dok se prvi, poput EV-a, mogu programirati proizvoljno tijekom vremena povezivanja. Na primjer, vlasnik EV-a nakon povratka s posla noću priključuje vozilo na struju i treba potpuno napunjenu bateriju do jutra. Ako je potrebno, agregator može ispuštati energiju iz EV-a bilo koje vrijeme tijekom noći, pod uvjetom da baterija dosegne potrebnu razinu do jutra. Slika 10. prikazuje proces planiranja energije VPP-a. U kontekstu ovog dobavljači električne energije i distribuirani izvori energije nazivaju se EP-ovima (energetski dobavljači).



*Slika 10 Virtualne elektrane-proces planiranja energije[6]*

Da bi omogućili funkciju V2G (eng. vehicle-to-grid), potrebni su niz pretvarača snage koji povezuju baterijski paket električnih vozila s mrežom. Ti pretvarači moraju imati kontrolu nad oba smjera prijenosa snage kako bi se omogućila dvosmjerna razmjena aktivne snage između AC mreže i DC baterije električnog vozila.

#### 4.1 V2G

Razvoj obnovljivih izvora energije i racionalno korištenje energije mijenjaju ulogu električne mreže, posebno distribucijske mreže. Distribucijska mreža trenutno je glavno sučelje za obnovljive izvore energije. To temeljito mijenja zadaću ovog sustava, koja sve više odgovara za rad međupovezivanja sustava distribuirane proizvodnje i krajnjeg korisnika. Brzi rast distribuirane proizvodnje i promjene u vremenu i prostoru proizvodnje i potrošnje energije previše su komplicirane za upravljanje modelima koji se danas koriste. To će natjerati na implementaciju novog modela upravljanja energijom. Jedna od takvih mreža je pametna mreža, koja se definira kao moderna mreža koja koristi napredne tehnologije komunikacije i kontrole za generiranje i distribuciju električne energije na učinkovitiji, ekonomičniji i sigurniji način. Ove strukture predstavljaju kralježnicu virtualnih elektrana i zahtijevaju široko prisustvo sustava pohrane električne energije. Električna vozila, posebno njihova oprema za pohranu energije, jedno su od najzanimljivijih tehničkih rješenja za implementaciju pohrane i korištenja ovih modela.

Postoji nekoliko modela koji opisuju budući utjecaj električnih vozila na performanse i ekonomiku elektroenergetskih mreža. Jedan od njih predlaže tehnologiju "vozilo-na-mrežu" (V2G) kao moguće rješenje za utjecaj na stabilnost mreže razvijene distribuirane generacije. U takvom modelu, električna vozila se smatraju i sredstvom prijevoza i sustavom za pohranu energije.

Električna vozila mogu se koristiti za višestruke usluge mreže kako bi se stabilizirala mreža i podržala iskorištenost obnovljivih izvora energije. Ta se razmatranja temelje na analizi broja automobila po stanovniku, distribuciji prostora i vremena korištenja automobila, prosječnom koeficijentu korištenja i korelaciji vremena i mjesta između električne energije i korištenja automobila. Naime, vozila su obično parkirana 90% vremena i predstavljaju neiskorišteni elektrokemijski izvor koji može apsorbirati energiju prema ili od mreže kada su spojeni. To je osnovni koncept tako zvane tehnologije "vozilo-na-mrežu", u kojoj električna vozila moraju imati tri ili više elemenata kako bi pružila takve usluge. Prije svega, moraju imati dvosmjerno sučelje za napajanje ili apsorpciju energije. Drugi bitni element je sustav za upravljanje energijom (EMS). Takav element mora upravljati i mjeriti tokove energije između baterijskog paketa i mreže. Konačno, potreban je protokol komunikacije između operatera mreže i vlasnika električnog vozila kako bi se prenijele sve korisne informacije EMS-u i procijenio trošak i prihod usluge. [6]

#### **4.2 Bidirekcijski pretvarači za V2G sustave (AC-DC)**

Važno je znati kako se koriste dvosmjerni pretvarači u sustavima za priključivanje električnih vozila na mrežu (Vehicle-to-Grid). Dvosmjerne pretvarače čine dva dijela: prvi dio pretvara izmjeničnu struju (AC) u istosmjernu struju (DC) kada se vozilo priključuje na mrežu (G2V način), a drugi dio pretvara istosmjernu struju iz baterije u izmjeničnu struju koja se može vratiti u mrežu (V2G način). Prvi dio se naziva dvosmjernim AC-DC pretvaračem (BADC), koji mora ispraviti faktor snage (PFC) i smanjiti iskrenje u mrežu u skladu sa standardima kao što je IEEE Std. 519-2014. Drugi dio se naziva dvosmjernim DC-DC pretvaračem (BDC) i mora omogućiti podudaranje napona između baterije EV-a i DC autobusa.

Korištenje dvaju pretvarača (jedan AC-DC i jedan DC-DC) se smatra najboljom praksom za V2G sustave. Kontrola struje se može provesti na dva načina - neizravnom i izravnom metodom. Izravna metoda ima bolju preciznost i poboljšava statičke i dinamičke performanse sustava. Potrebno je paziti na precizno detektiranje nula-naponske mreže u G2V načinu, jer pogrešna detekcija može dovesti do kratkog spoja i iskrivljenja ulaznih napona i struja. Detekcija nula naponske mreže (engl. zero voltage grid detection) u G2V (punjač vozila u mrežu) načinu rada odnosi se na postupak kojim se nadzire naponska mreža (mreža na koju je punjač priključen) kako bi se odredilo kada je faza naponske mreže u blizini nule (tj. kada je naponska vrijednost vrlo mala ili nula). Ovaj

postupak je važan jer, ako se ne detektira pravilno, može doći do kratkog spoja između faze i nula točke kroz glavni pretvarač, što može dovesti do oštećenja pretvarača ili mreže.

U slučaju BADC (bidirekcijskog AC-DC pretvarača) u G2V načinu rada, precizna detekcija nule je ključna za ispravno djelovanje pretvarača. Naime, BADC djeluje kao ispravljač koji pretvara izmjeničnu struju (AC) u istosmjernu struju (DC) i, kada se ne detektira nula točka, može doći do pojave viših harmonika u izmjeničnoj struji i oštećenja pretvarača i mreže. Zato je bitno da BADC točno detektira nula točku kako bi se spriječila pojava ovih problema i kako bi se ispunili standardi kao što su IEEE Std. 519-2014. Također, važno je da se napajanje u V2G načinu podudara s naponom i frekvencijom mreže te da ukupno harmoničko izobličenje (THD) izlazne struje u V2G načinu bude manja od 5%.

Budući da se u većini V2G sustava koriste dva odvojena pretvarača, performanse svakog pretvarača su jasno utjecane na povezani pretvarač. Dakle, izravna usporedba performansi BADC-a bez uzimanja u obzir utjecaja povezanog BDC-a nije logična. No, kako bi se precizno uspoređivale različite vrste BADC-a, svaki od njih mora se testirati s određenom BDC topologijom, što nije uvijek izvedivo.[6]

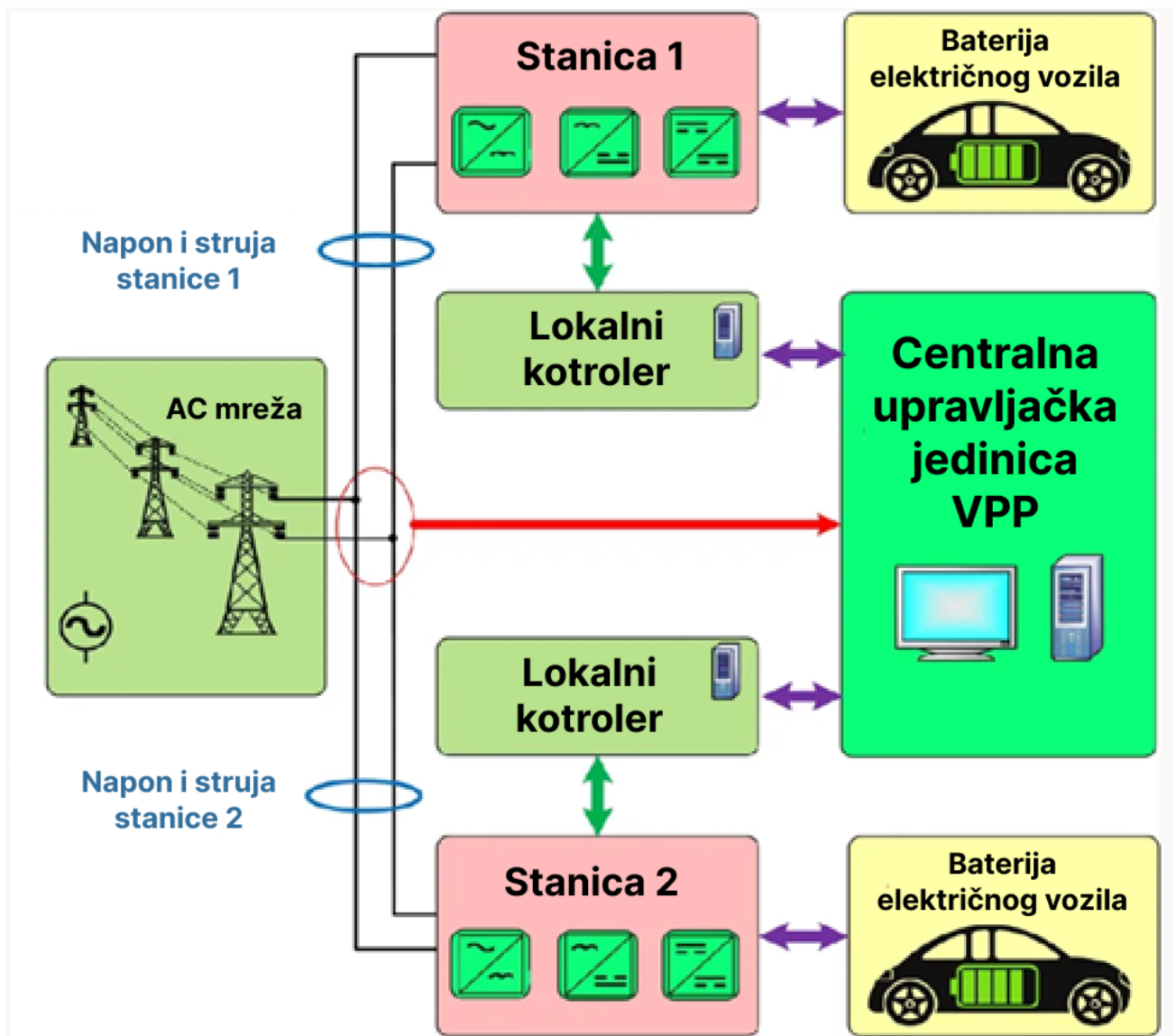
### **4.3 DC-DC pretvarači**

Bidirekcijski DC-DC pretvarači su elektronički pretvarači koji omogućuju bidirekcijsku pretvorbu DC napona između dviju različitih razina napona, uz mogućnost promjene smjera struje putem odgovarajuće kontrolne naredbe. Jedna od dviju razina napona ima višu vrijednost u usporedbi s drugom. U sustavu povezivanja vozila na mrežu, dva najvažnija funkcijska sklopa BDC-a su pretvorba napona baterije električnog vozila u napon DC autobusa i punjenje baterije električnog vozila nakon dvije faze punjenja - faze konstantne struje i faze konstantnog napona. Napon DC autobusa je naziv za električni napon koji se koristi za napajanje električnih vozila. To je obično istosmjerni napon iz baterija ili drugih izvora energije, a može biti različitih vrijednosti ovisno o tipu vozila i njegovim zahtjevima za energijom. Također se može koristiti za punjenje baterija vozila kada se vozilo priključi na punjač. Napon DC autobusa je važan jer utječe na performanse vozila i može utjecati na brzinu punjenja baterija. BDC-ovi uvijek rade na visokim frekvencijama prebacivanja kako bi se povećala njihova sposobnost snage, ali to također stvara visokofrekvencijski šum (HF) zbog brzog uključivanja i isključivanja uređaja, što uzrokuje

elektromagnetsku interferenciju u mreži i narušava performanse drugih opreme povezane na mrežu. Postoje različite topologije BDC-ova koje se koriste u sustavima V2G, a najčešće korištena neizolirana topologija je Buck-boost pretvarač, dok je najčešća izolirana topologija punog mosta. Neizolirane topologije imaju manju površinu, nižu težinu, nižu cijenu i jednostavniju kontrolu zbog nedostatka transformatora za izolaciju, ali ograničavaju sposobnost gustoće snage zbog pretjeranog gubitka provođenja od visoke struje kroz prekidače i druge pasivne komponente, što rezultira niskom učinkovitošću tih pretvarača. Zato se za brzo punjenje ili pražnjenje baterija preferira razdjeljivanje u BDC-ovima.[6]

#### **4.4 Primjer optimizacije punjenja električnih automobila korištenjem obnovljivih izvora energije i virtualne elektrane**

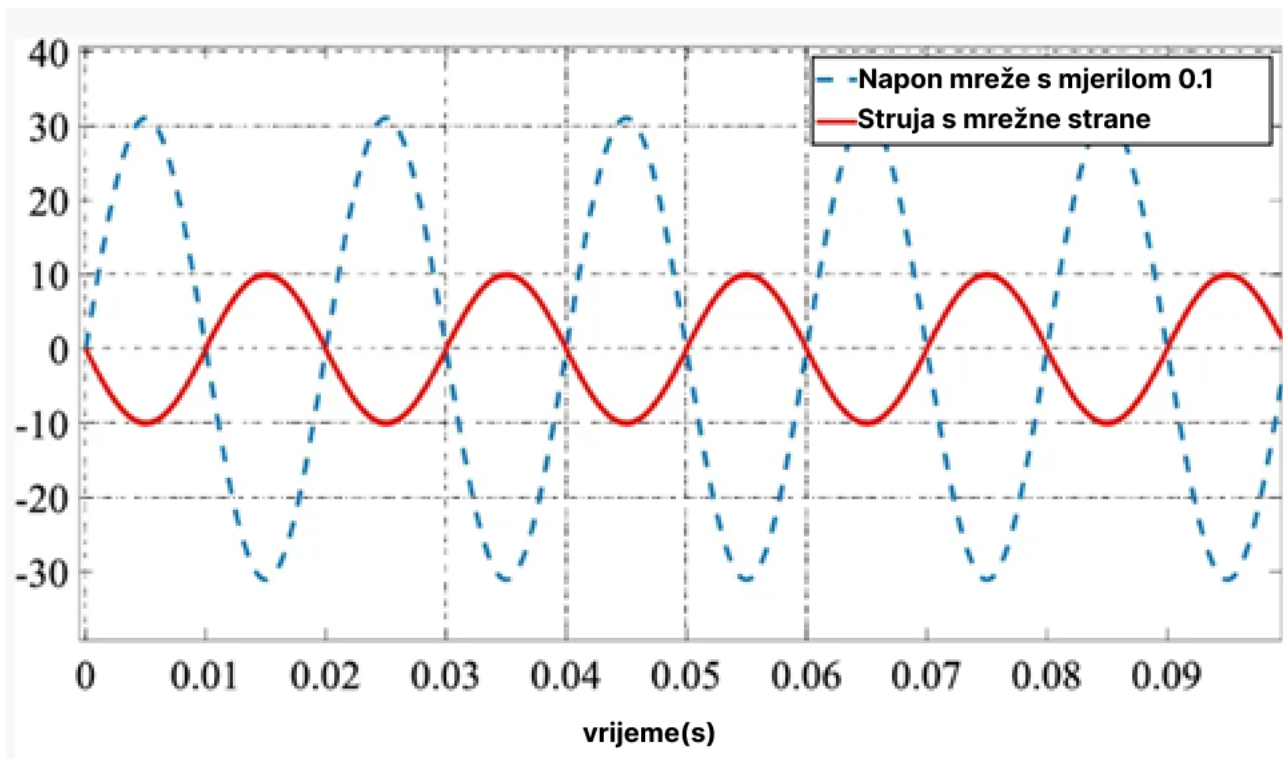
Zamislimo situaciju u kojoj imamo dva električna automobila koji se pune na dvije različite stanice za punjenje. Jedan od njih se već neko vrijeme puni i baterija mu je skoro puna, dok drugi tek dolazi na punjenje i treba mu brzo napuniti bateriju kako bi nastavio dalje. Kako bi se iskoristilo što više obnovljivih izvora energije, virtualna elektrana odlučuje iskoristiti preostalu energiju sa stanice 1 kako bi brže napunila bateriju drugog automobila koji se tek priključio na stanicu 2. Na taj način, stanica 1 otpušta dio energije koju ima na raspolaganju, dok druga stanica koristi tu dodatnu energiju kako bi ubrzala punjenje baterije drugog električnog automobila.



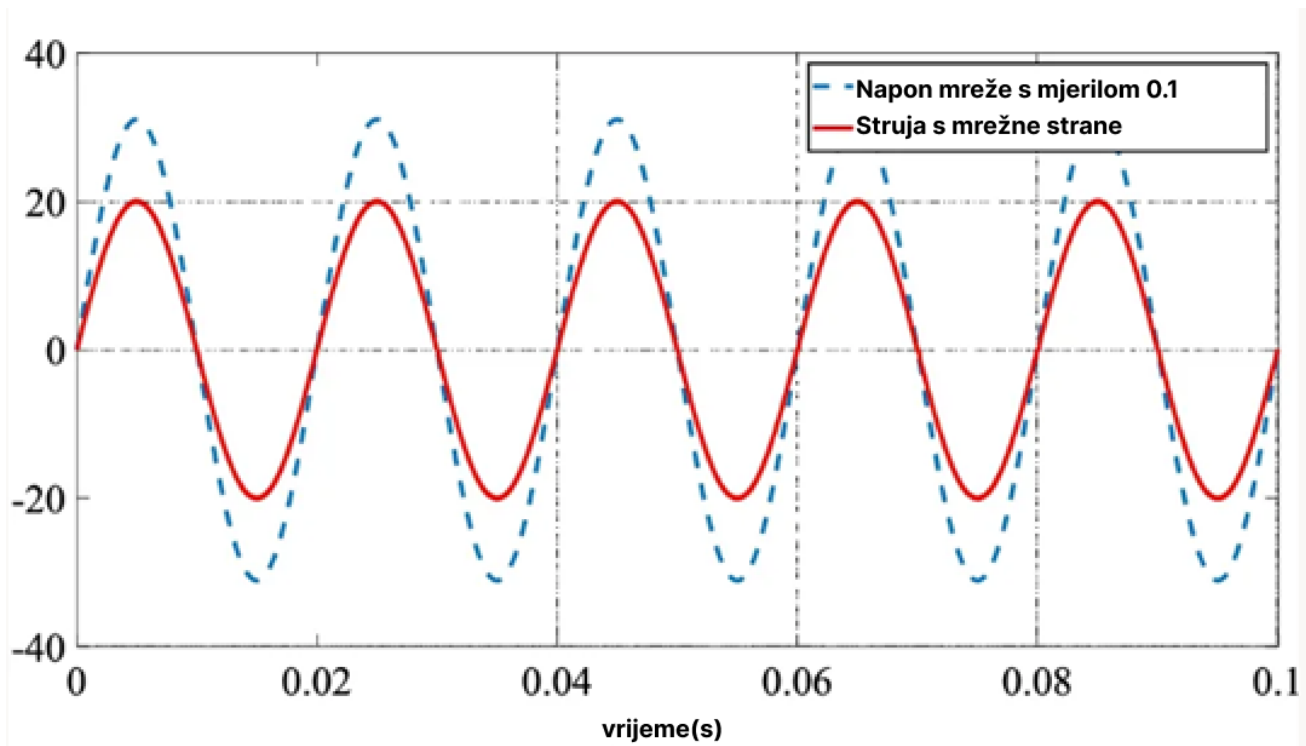
*Slika 11 Primjer optimizacije punjenja električnih automobila korištenjem obnovljivih izvora energije i virtualne elektrane[6]*

Na slici 12 i 13 prikazani su grafovi koji pokazuju oblike valova napona i struje koji prolaze kroz stanice za punjenje 1 i 2. Ove karakteristike su važne jer omogućuju virtualnoj elektrani da rasporedi opterećenje s različitim izvorima obnovljive energije i na taj način poboljša stabilnost i pouzdanost cijelog električnog sustava.



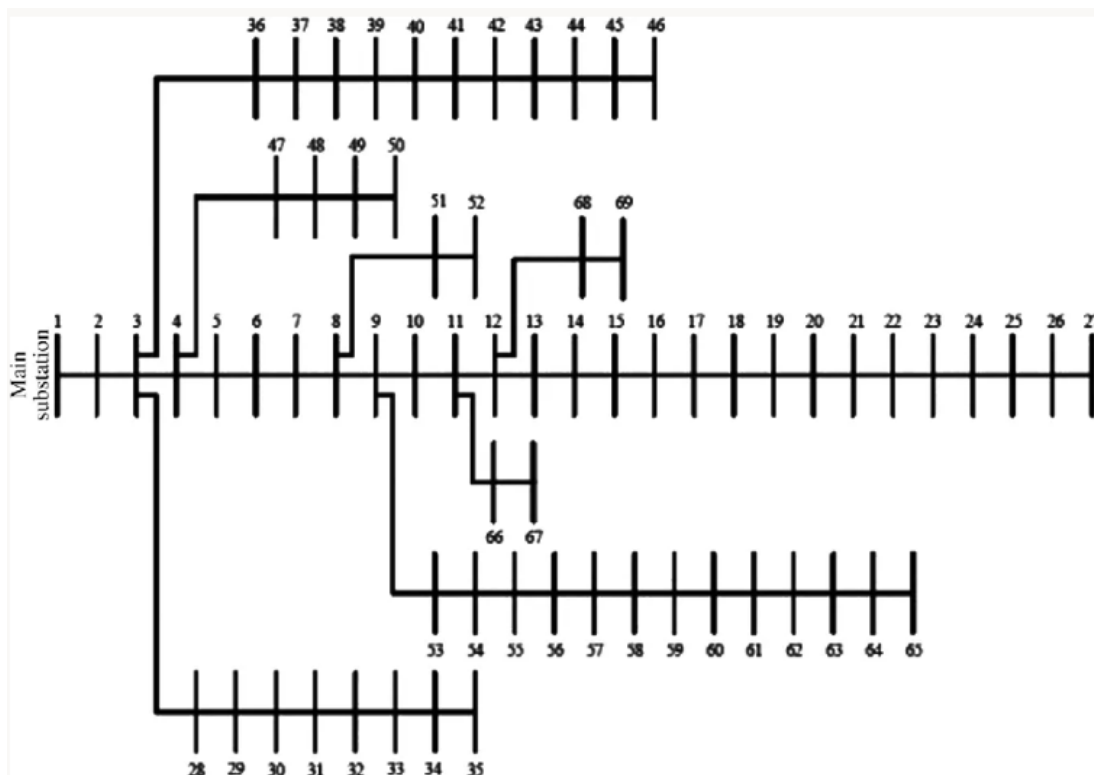


Slika 12 Napon i struja stanice punjenja 1[6]

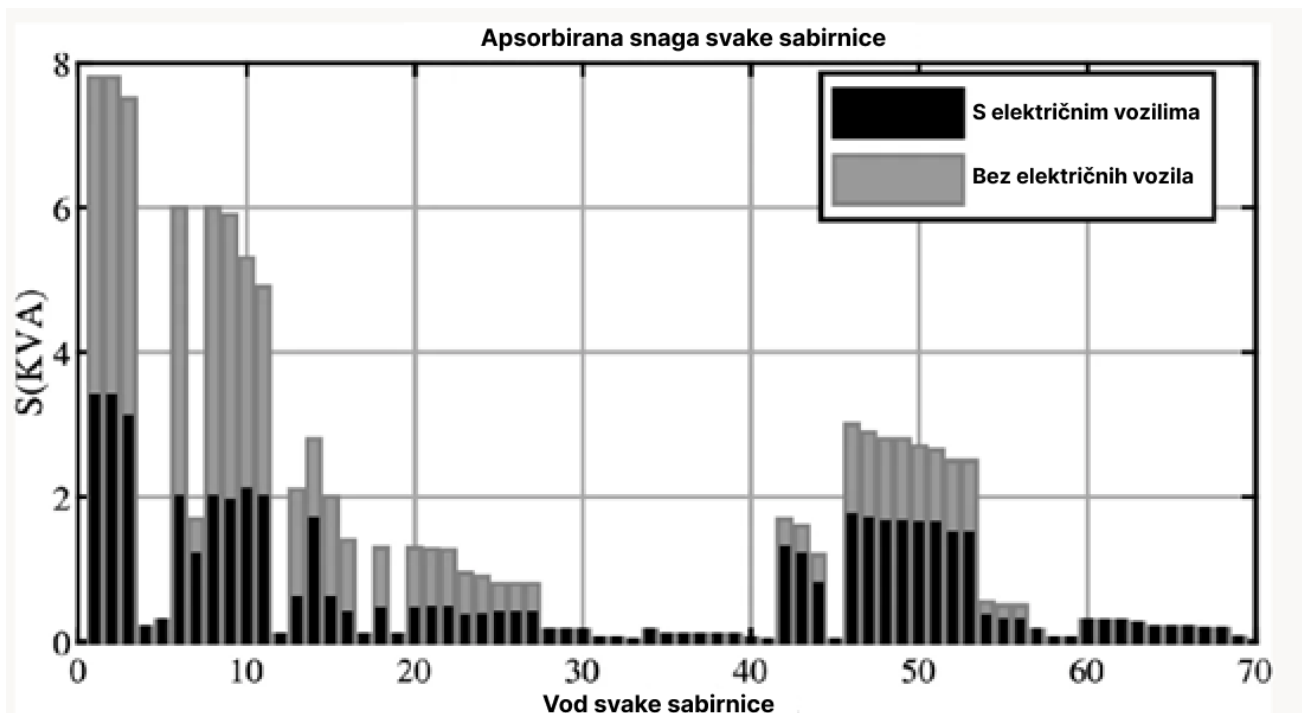


Slika 13 Napon i struja stanice punjenja 2[6]

Za istraživanje utjecaja električnih vozila na upravljanje električnom energijom u distribucijskom sustavu korišten je IEEE 69-busni sustav prikazan na slici 14. U tom sustavu, neki vodovi imaju snagu koju koriste potrošači. Na slici 15. prikazani su dijagrami koji pokazuju kolika snaga se prenosi između pojedinih vodova i potrošača u slučaju kada se ne koriste električna vozila. Ta snaga se opskrbljuje putem opskrbnog voda. Ovaj sustav se koristi za istraživanje na koji način se električna vozila mogu iskoristiti za poboljšanje upravljanja energijom u distribucijskom sustavu.



*Slika 14 IEEE bus 69[16]*



Slika 15 Apsorbirana snaga s svake sabirnice u 69-busnom IEEE sustavu[6]

Pretpostavimo da su električna vozila spojena na vodove visoke snage. Izračunava se koliko električne energije prolazi kroz vodove koji spajaju različite vodove i potrošače, što se prikazuje crnim dijagramima. Ti dijagrami prikazuju količinu električne energije koju su isti vodovi apsorbirali tijekom spajanja i punjenja električnih vozila. U ovom slučaju, količina električne energije koju je svaki vod apsorbirao značajno se smanjila, što znači da su električni automobili mogli pružiti višak električne energije u sustavu, a da ne ugroze stabilnost mreže.

Zaključak je da virtualna elektrana, koja upravlja distribucijskim sustavom, može iskoristiti preostalu energiju s jedne stanice za punjenje kako bi brže napunila bateriju drugog električnog automobila koji tek dolazi na drugu stanicu za punjenje. Na taj način se smanjuje potrošnja konvencionalne energije, a povećava se korištenje obnovljivih izvora energije. Karakteristike valova napona i struje kroz stanice za punjenje pomažu u boljem raspoređivanju opterećenja s različitih izvora obnovljive energije, što poboljšava stabilnost i pouzdanost cijelog sustava. Korištenjem električnih vozila u distribucijskom sustavu, koji su spojeni na vodove visoke snage, može se smanjiti potrošnja konvencionalne energije te povećati korištenje obnovljivih izvora energije bez ugrožavanja stabilnosti mreže.[6]

## **5. PARTICIPACIJA VPP-ova NA TRŽIŠTIMA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Trenutno većina zemalja već je implementirala procese liberalizacije i otvorenosti za konkurenciju na svojim električnim tržištima. Jedan od razloga za promicanje liberalizacije jest poboljšanje ekonomske učinkovitosti djelovanja elektroenergetskih tvrtki, financiranje novih investicija u elektroenergetsku infrastrukturu i posebno smanjenje konačnih cijena električne energije. Ova promjena u sektoru električne energije dovela je do transformacije iz vertikalne strukture, u kojoj su sve aktivnosti bile integrirane, u drugi tip organizacije u kojoj prijenos, distribucija i trgovina električnom energijom djeluju neovisno. Na početku liberalizacije prema kraju 20. stoljeća, većina električnih tržišta bila je organizirana oko kratkoročnog veletržišta. To je uključivalo velik broj kupaca i prodavača koji su sudjelovali u aukcijama za kupnju i prodaju električne energije. Trenutno, električna tržišta imaju i tržišta day-ahead te tržišta forward i futures, što omogućuje raznovrsnost u upravljanju rizikom cijena pri kupnji i prodaji energije na električnim tržištima. Osim toga, trenutni energetska kontekst karakterizira masovno uvođenje obnovljive energije u elektroenergetski sustav, što za sobom povlači veću uporabu mehanizama sustava zbog odstupanja od planirane proizvodnje iz obnovljivih izvora. Važna prednost virtualnih elektrana je ta da prodaju energiju u ime vlasnika distribuiranih energetska resursa kada pristupaju veletržištima električne energije, čime povećavaju njihov zajednički profit.

### **5.1. Futures i forward market**

Futures tržište se sastoji od ugovora za kupnju i prodaju energije u određenom vremenskom razdoblju po fiksnoj cijeni. Na ovom tržištu se može steći određena količina energije na određeni datum u budućnosti, koji može biti unutar tjedna ili čak godina. Futures ugovori se obično trguju na standardiziranoj burzi, dok se forward ugovori sklapaju izvan burze i sami se reguliraju. Razne studije predlažu modele za virtualne elektrane koji omogućuju obavljanje transakcija kupnje i prodaje energije putem futures tržišta. Sudjelovanje na ovom tržištu omogućuje izbjegavanje rizika koji proizlaze iz visoke nesigurnosti cijena na tržištu električne energije dan unaprijed. VPP-ovi iskorištavaju mogućnosti arbitraže između tržišta električne energije dan unaprijed i futures tržišta kako bi povećali svoj operativni profit. Drugim riječima, one koriste prednosti futures tržišta

kako bi unaprijed kupovali ili prodavali energiju po fiksnim cijenama. To im omogućuje da izbjegnu fluktuacije cijena na kratkoročnom tržištu električne energije i ostvare veći profit optimizirajući svoje transakcije između ta dva tržišta.

## **5.2. Bilateralni ugovori**

Bilateralni ugovori predstavljaju direktan dogovor o prodaji električne energije između proizvođača električne energije i kupca. U tim ugovorima obje strane se slažu oko različitih parametara, kao što su cijena, volumen isporuke energije i trajanje ugovora, te minimalna količina energije koja će se isporučiti ili potrošiti. Ovaj tip ugovora je postao sve popularniji zbog sve većeg udjela obnovljivih izvora energije, jer omogućuje izbjegavanje nesigurnosti u cijenama i osiguranje stabilnosti dugoročnih cijena. To je važno kako za investitore u izgradnju postrojenja za proizvodnju energije, tako i za kupce koji žele osigurati profitabilnost svog proizvodnog procesa. Predlaže se model virtualne elektrane koja putem bilateralnog ugovora mora zadovoljiti dio ili čak cijelu potražnju za električnom energijom u vremenskom razdoblju od jednog tjedna. Ovaj bilateralni ugovor pruža značajnu mogućnost za osiguranje prihoda VPP-a zbog volatilnosti cijena na tržištu i mogućih ograničenja u prijenosnom sustavu. Drugim riječima, kroz ovaj ugovor, virtualna elektrana ima stabilan izvor prihoda unatoč fluktuacijama cijena na tržištu i mogućim tehničkim ograničenjima u prijenosu električne energije. [7]

## **5.3. VPP na tržištu dan unaprijed**

Day-ahead market, tržište dan unaprijed je osmišljeno za provođenje transakcija električnom energijom za svaki sat sljedećeg dana putem prikazivanja ponuda za prodaju i kupnju od strane sudionika na tržištu. Virtualne elektrane omogućavaju izravan pristup proizvođačima električne energije na tržišta radi prodaje njihove proizvodnje, kao i potrošačima da sami proizvode energiju i prodaju višak energije iz postrojenja koje ne mogu sami potrošiti. Na višoj tržišnoj cijeni, općeniti trend postrojenja za proizvodnju je maksimizirati raspoloživu proizvodnju kako bi se povećao operativni profit virtualne elektrane putem prodaje viška proizvedene energije. Stoga istraživački

radovi uključuju ovu sposobnost sudjelovanja u tržištu električne energije dan unaprijed u svoje modele VPP-a kako bi maksimizirali operativni profit. Osim toga, postiže se fleksibilni električni sustav koji potiče samopotrošnju i smanjuje ekološki utjecaj. Dok virtualne elektrane obično djeluju kao pasivni sudionik na tržištu, u nekim slučajevima mogu djelovati kao aktivni sudionik koji utječe na cijene, što mu pruža veću kontrolu nad svojim profitom. Ova mogućnost da VPP djeluje kao "price-maker" pruža im konkurentne prednosti i veću financijsku stabilnost. Kroz aktivno sudjelovanje na tržištu dan unaprijed, VPP može optimizirati svoje poslovanje, osigurati stabilan prihod i minimizirati rizik povezan s fluktuacijama cijena električne energije. To čini tržište dan unaprijed važnim dijelom strategije VPP-a za postizanje maksimalne učinkovitosti i uspješnosti na tržištu električne energije. [7]

#### **5.4. VPP na tržištu pomoćnih usluga**

Tržište pomoćnih usluga (engl. Ancillary Services Market) ima za cilj osigurati sigurnost i pouzdanost sustava za proizvodnju i prijenos električne energije. Pomoćne usluge imaju ulogu osigurati sustavu kapacitet za održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne energije u svakom trenutku. S poboljšanjem likvidnosti tržišta pomoćnih usluga, očekuje se značajan porast sudjelovanja VPP-ova, što može poboljšati njihovu ekonomsku održivost. S tehničkog gledišta, sve veći udio obnovljivih izvora energije u trenutačnim elektroenergetskim sustavima može ih oslabiti jer loše upravljanje može dovesti do kolapsa mreže i ugrožavanja pouzdanosti opskrbe električnom energijom. Stoga su u nekoliko istraživanja uključeni modeli VPP-ova koji mogu sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga kako bi omogućili kontrolu frekvencije i snage koja jamči kvalitetu i sigurnost opskrbe električnom energijom. Ti modeli VPP-ova također uključuju sustave za pohranu koji su ključni elementi za prevladavanje problema stabilnosti elektroenergetske mreže koji mogu nastati zbog odstupanja obnovljivih izvora energije. [7]

#### **5.5. VPP na tržištu rezervi**

Tržište rezervi je mehanizam koji se koristi kako bi se osigurala dodatna generacijska rezerva radi pokrivanja potražnje i osiguranja sigurnosti opskrbe električnom energijom. Obično, generatori koji sudjeluju na ovom tržištu dobivaju naknadu prema marginalnoj cijeni. Zbog sve većeg udjela

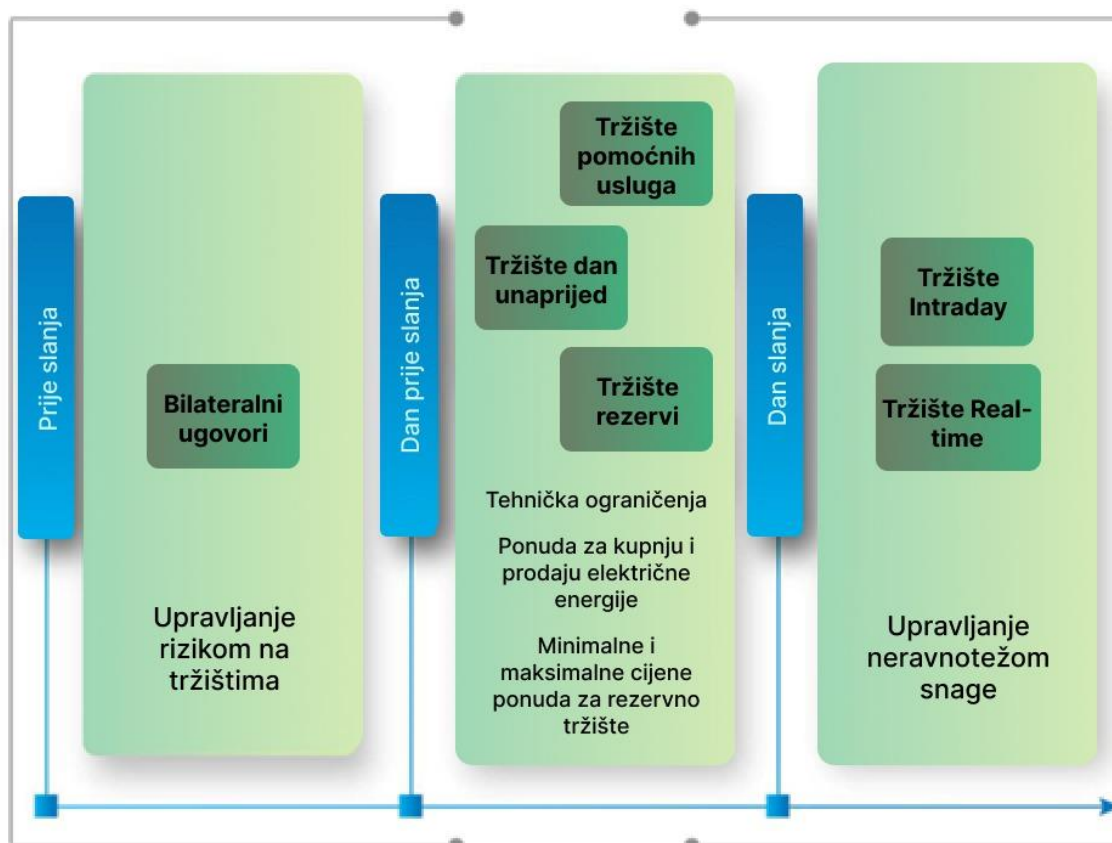
neupravljive obnovljive energije (posebno vjetroelektrana i fotonaponskih sustava) u elektroenergetskim sustavima, smanjuje se dostupnost konvencionalnih rezervi snage. Kako bi se suočili s tim izazovom, različite metode su predložene kako bi virtualna elektrana donosila optimalne odluke na tržištima električne energije dan unaprijed i tržištu rezervi, s ciljem maksimiziranja ekonomskog profita i osiguravanja adekvatne sigurnosti i pouzdanosti. Rezultati istraživanja ukazuju da je tržište rezervi posebno važno tijekom razdoblja visoke potražnje, jer se moguća kriza u opskrbi električnom energijom može imati veći utjecaj. Međutim, kada su dostupne veće količine obnovljive energije, VPP-ovi mogu pronaći veću isplativost u prodaji energije na tržištu dan unaprijed ili punjenjem sustava za pohranu nego sudjelovanjem na tržištu rezervi. Stoga, profit VPP-a povezan s tržištem rezervi nije nužno povećan. Važno je napomenuti da postoje razlike u organizaciji tržišta električne energije, gdje se na nekim tržištima raspored energije i rezervi provodi odvojeno, dok se na drugima provodi zajedno, ovisno o propisima i praksi pojedinih regija, kao što je slučaj na Iberskom tržištu električne energije u Španjolskoj i tržištu koje operira Kalifornijski neovisni sustav operatora u SAD-u. [7]

## **5.6. VPP in Real-Time Market**

Tržište ravnoteže u stvarnom vremenu predstavlja posljednju mogućnost za ravnotežu proizvodnje i potrošnje električne energije. "Zatvaranje" vrata na ovom tržištu obično se događa između pet i 30 minuta prije stvarne isporuke energije. Iako tržišta unutar dana omogućuju virtualnim elektroenergetskim zajednicama da prilagode zakazanu energiju nakon tržišta za dan unaprijed, moguća je i dalje neravnoteža u razmjeni energije kako se vrijeme isporuke približava. Stoga, kako bi izbjegli kazne, VPP-ovi mogu sudjelovati na tržištima ravnoteže u stvarnom vremenu. Cilj je minimizirati pogrešku u ravnoteži i povezane troškove. Drugim riječima, radi se o razlici između stvarne električne izlazne snage i predviđene izlazne snage, koju pokrivaju ili VPP ili električna energija s tržišta ravnoteže. Zbog prekidačke prirode obnovljivih izvora energije, pristup VPP-ova ovim tržištima je ključan za ravnotežu proizvodnje i potrošnje. [7]

## 5.7. Intraday Market

Intraday tržišta su dizajnirana s ciljem da se energija trguje s većom preciznošću u odnosu na tržište za dan unaprijed, jer se u toj sesiji raspolože s više informacija. Na tim tržištima se trguje manjim obimom energije u usporedbi s tržištem za dan unaprijed. Tržišta unutar dana postaju sve važnija zbog sve većeg udjela obnovljive energije i njenog nepredvidivog karaktera, što zahtijeva ispravke ponuda i prilagodbe neravnoteža u očekivanoj dostupnosti proizvodnje. Ovo tržište također može biti iznimno korisno za sudionike koji u njemu sudjeluju. Na primjer, u slučaju kvara na grupi generatora, sudionici mogu ponovno kupiti energiju koju su prodali na tržištu za dan unaprijed putem sesije unutar dana. Studije uključuju komercijalizaciju energije VPP-ova na tržištima unutar dana kako bi se povećali profiti. [7]



Slika 16 Faze različitih energetskih tržišta[7]



## **6. IZAZOVI VIRTUALNIH ELEKTRANA**

### **6.1. Izazovi kontrolnog i operativnog sustava**

Nakon što se postave virtualne elektrane i uključe distribuirani izvori energije, potrebno je izvršiti upravljanje energijom kako bi se osigurala stabilnost mreže i maksimizirala proizvodnja energije. Međutim, upravljanje energijom virtualnih elektrana predstavlja niz izazova. Jedan od glavnih izazova je različitost karakteristika i mogućnosti pojedinih DER-ova, što može dovesti do problema u kontroliranju njihovog rada i postizanja očekivanih rezultata. To se može riješiti korištenjem različitih algoritama i metoda za kontroliranje svakog DER-a u VPP-u. Međutim, korištenje različitih algoritama za kontrolu svakog elementa u VPP-u može negativno utjecati na druge resurse, što može dovesti do neželjenih rezultata. Kako bi se prevladali ovi izazovi, potrebno je osigurati da kontrolni sustav uključuje različite elemente i sposobnosti DER-a te da omogućuje interakciju s elektroenergetskom mrežom. Također je važno osigurati da sustav kontrole ima različite mogućnosti za upravljanje energijom u različitim vremenskim okvirima, kao i za pružanje različitih usluga u podršci glavnom sustavu.[8]

### **6.2. Izazovi komunikacija i informacija virtualnih elektrana**

Temeljem modernih tehnologija kao što su pametne tehnologije, bežične mreže 4G/5G i druge tehnologije poput kompresije informacija, komunikacijskih tehnologija, inteligentnog računalstva, mjerenja i tehnologija kontrole, mogu se razviti naprednije platforme koje podržavaju VPP. Općenito, za razmjenu komunikacijskih i telekomunikacijskih informacija, u VPP se može uključiti četiri sigurnosna i komunikacijska sloja. Komunikacijski sloj je temeljna infrastruktura za integraciju DER-a u VPP. Tehnologije komunikacije i hardverski izlazi osiguravaju pristup resursima sustava napajanja VPP-u. Sloj performansi u VPP-u je modul koji razmatra sve osnovne funkcije i komponente, uključujući predviđanje opterećenja, praćenje informacija, procjenu rizika itd. Još jedan sloj VPP-a je sloj usluge. Ovaj se sloj razvija na temelju sloja performansi i odluka koje su donesene u tom sloju. Nadopunjuje funkcije VPP skupa koordinirajući elemente sloja funkcije. Ova usluga može uključivati pomoćne usluge poput smanjenja vršnog opterećenja, arbitraže energijom, trgovine na tržištu itd. Sloj usluge modificira ove stvari i ne može ih

ograničiti. Još jedan važan sloj u inteligentnoj komunikaciji s VPP-om je poslovni sloj. Poslovni sloj može pružati razne poslovne programe za potrošače u VPP-u, poput upravljanja proizvodnjom energije, upravljanja sigurnošću proizvodnje, transakcija na tržištu električne energije, optimalne uporabe energije, optimalne usluge integracije energetske resursa i drugo. Osim toga, pruža pametnu web stranicu i mobilnu aplikaciju za korisnike VPP-a.

Također tu je i koncept IoT-a u VPP-u. Glavni cilj pružanja IoT-a u VPP-u je inteligentna kontrola prijenosa energije na visokonaponskim vodovima po niskoj cijeni. Iako su pametni uređaji već korišteni u telekomunikacijskoj i komunikacijskoj strukturi VPP-a, glavna stvar pri korištenju ovih uređaja su provjere sigurnosti. Stoga je potrebno koristiti najnovije tehnologije kako bi se poboljšala sigurnost VPP. [8]

### **6.3. Sigurnost podataka**

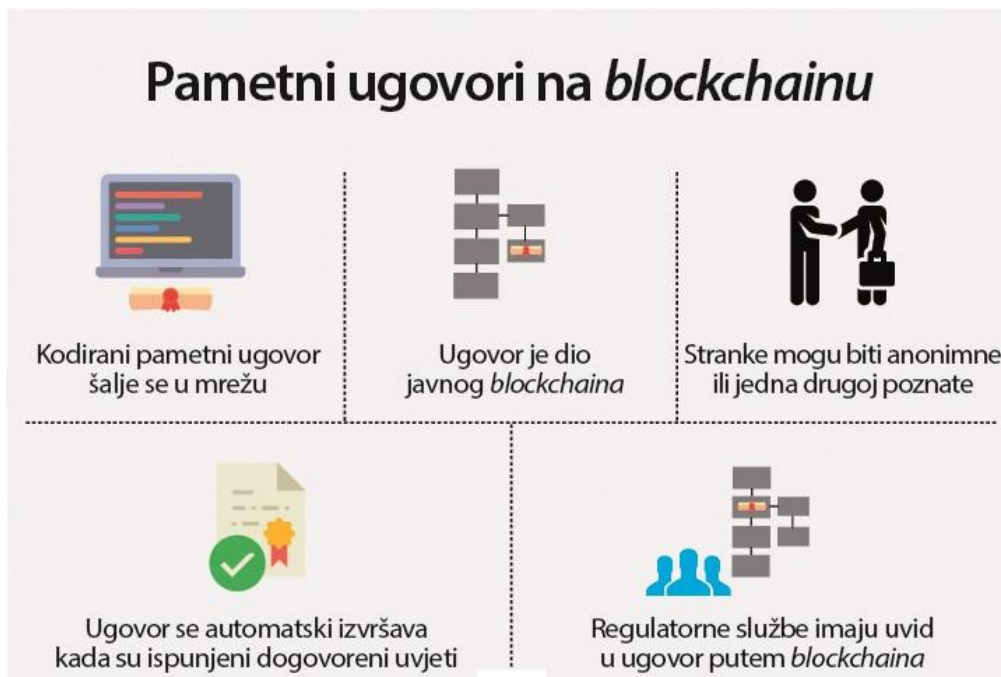
Sigurnost podataka je jedan od najvećih izazova kod virtualnih elektrana, budući da se velike količine podataka razmjenjuju između različitih uređaja i platformi te se oslanjaju na povezanost interneta. Ovdje su neki od ključnih izazova vezanih za sigurnost podataka kod virtualnih elektrana:

- **Povećana ranjivost:** Velika količina podataka koja se razmjenjuje između različitih uređaja i platformi povećava ranjivost na razne sigurnosne prijetnje, poput hakiranja, napada zlonamjernim softverom ili neovlaštenog pristupa podacima.
- **Dostupnost:** Sigurnost podataka može biti ugrožena ako infrastruktura ili sustav nisu dostupni, što može dovesti do gubitka podataka ili prekida u opskrbi energijom.
- **Integracija:** Integracija različitih uređaja i platformi u virtualnoj elektrani može biti izazovna, posebice ako se koriste različite vrste tehnologija i protokola koji ne komuniciraju dobro jedni s drugima.
- **Privatnost podataka:** Sigurnost podataka također se odnosi na privatnost podataka. Virtualne elektrane koriste podatke o potrošnji energije i drugim podacima koji se prikupljaju od različitih izvora, što može predstavljati rizik za privatnost podataka.

- Upravljanje: Upravljanje sigurnosti podataka u virtualnim elektranama može biti izazovno zbog složenosti sustava, različitih tehnologija i protokola, te činjenice da se podaci prikupljaju i obrađuju u stvarnom vremenu.

### 6.3.1. Blokchain tehnologija

Potreba za električnom energijom neprestano raste kako industrijsko doba napreduje. Da bi se osigurala učinkovita distribucija energije, minimalni gubici i visoka kvaliteta, kao i sigurnost napajanja, potrebno je osigurati koncept pametne mreže. Nedostatak ovog koncepta je što bi otežao način na koji proizvođači i potrošači trenutno izvršavaju, ovjeravaju i evidentiraju transakcije u našem postojećem sustavu. Mreža djeluje kao verifikator transakcija koristeći pametne ugovore za izvršavanje transakcija. Zahvaljujući nepromjenjivosti koju pruža blockchain, zajamčeno je da će svaka transakcija između proizvođača i potrošača biti uspješna. Osim toga, pruža nepromjenjivost povijesti transakcija koja se može koristiti u revizijama ili rješavanju sporova. Ljudi se mogu međusobno pouzdati jer im blockchain tehnologija to omogućava. Pojam "blockchain" odnosi se i na distribuiranu mrežu i na nepromjenjivu bazu podataka. Satoshi Nakamoto je 2008. godine stvorio kriptovalutu bitcoin uz pomoć blockchain tehnologije. Određene kriptovalute koriste postojeće platforme blockchaine, dok druge imaju vlastite. Jedna se naziva kovanicom (coin), dok se druga naziva tokenom. Nasuprot tome, blockchain nije ograničen na kriptovalute. Automatizirano rješavanje transakcija važan je koncept implementacije blockchaine u financijskom sektoru, osim praćenja, kako je prikazano na slici 17.



*Slika 17 Blockchain energy trading[9]*

Blockchain, poznat i kao tehnologija distribuirane knjige, privukao je pozornost tvrtki u energetskej industriji. Tvrtke u energetskej sektoru i programerske tvrtke udružuju se s vladama i sveučilištima kako bi koristili blockchain tehnologiju za pohranjivanje energije. Spajanje blockchaina i energetike nedvojbeno je jedan od najuzbudljivijih tehnoloških razvoja u nedavnoj povijesti. U energetskej industriji dvije su uobičajene primjene blockchaina trgovanje i ocjenjivanje. Zainteresirane strane koriste blockchain tehnologiju za stvaranje virtualne mreže koja olakšava energetske transakcije na distribucijskej ili veleprodajnoj osnovi. Potrošači mogu razmjenjivati robe i usluge među vlastitim uređajima i resursima, kao i s susjedima i mrežom. Cijeli postupak može se automatizirati pomoću pametnih ugovora. Jedan od najzanimljivijih primjera blockchaina u energetici je korištenje blockchaina u P2P trgovini energijom. Tok trgovine energijom temeljen na blockchainu uključuje različite elemente, uključujući financiranje, otpornost zajednice i rast obnovljive energije. Vlasnici obnovljivih energetskej resursa (npr. pojedinci ili organizacije sa solarnim panelima) mogu razmjenjivati višak energije s susjedima ako djeluju unutar usko povezane geografske skupine ili zajednice.

Jedan od primjera uspješnih blockchain-based P2P sustava trgovine energijom je:

Brooklyn Microgrid: L03 Energy-jeva Brooklyn Microgrid je blockchain-based energetska inicijativa koja omogućuje pojedincima da izravno razmjenjuju energiju s susjedima, izbjegavajući velike energetske korporacije. Na općoj razini, vlasnici kuća s solarnim panelima koriste aplikaciju na pametnom telefonu za prodaju svojih ekoloških kredita susjedima bez solarnih panela. Cijene električne energije mogu se dogovarati izravno između kupaca i prodavatelja, bez potrebe za posrednicima. Blockchain za distribuiranu generaciju omogućuje cijelom postavkom da pametni brojlara međusobno konzistentno komuniciraju. [9]

#### **6.4. Troškovi virtualnih elektrana u usporedbi sa drugim izvorima energije**

Cijena proizvodnje energije iz virtualnih elektrana ovisi o mnogim čimbenicima, poput vrste korištene tehnologije, veličine i lokacije virtualne elektrane te trenutne cijene energije na tržištu. Unatoč tome, virtualne elektrane postaju sve konkurentnije u usporedbi s drugim izvorima energije. Prema nekim istraživanjima, cijena proizvodnje energije iz virtualnih elektrana općenito je niža u odnosu na cijenu energije proizvedene iz konvencionalnih elektrana. Navodi se da je virtualna elektrana na bazi obnovljivih izvora energije u Hrvatskoj ekonomski isplativa, s nižim troškovima proizvodnje energije u usporedbi s konvencionalnim elektranama na fosilna goriva. Međutim, troškovi izgradnje virtualnih elektrana i njihove integracije u elektroenergetske sustave mogu biti visoki, što također utječe na konačnu cijenu energije proizvedene iz virtualnih elektrana. Ipak, uz tehnološki napredak i razvoj tržišta energije, očekuje se da će troškovi proizvodnje energije iz virtualnih elektrana nastaviti padati i postati još konkurentniji u usporedbi s drugim izvorima energije.[8]

## **7.RAZLIKA VPP-a KOJI TRGUJE ENERGIJOM I VPP-a KOJI I UPRAVLJA ELEKTRIČNIM SUSTAVOM NA PRIMJERU NEXT KRAFTWERKE**

Next Kraftwerke je jedan od najvećih trgovaca obnovljive energije u Europi i djeluje u Njemačkoj pružajući razne usluge virtualnih elektrana. Započeli su s radom 2009. godine u Njemačkoj i uspjeli su proširiti svoje poslovanje na Belgiju, Austriju, Francusku i Nizozemsku. Do 2021. godine, Next Kraftwerke je upravljao s preko 9 GW kapaciteta s više od 12.000 agregiranih jedinica diljem Europe. Prihodi Next Kraftwerkea su rastući, a 2020. godine tvrtka je prijavila prihod od 595 milijuna eura. Prosječna jedinica u njihovom portfelju ima kapacitet od 800 kW, stoga im je fokus na malim ili srednjim elektranama povezanim na mrežu.

Next Kraftwerke integrira različite izvore energije, uključujući vjetar, solarnu energiju, hidroelektranu i kombiniranu proizvodnju topline i struje, te pruža pristup europskim energetske burzama poput EPEX SPOT-a i EXAA-e svojim korisnicima, gdje trguje na tržištima dan unaprijed i intraday. Njihov sustav koristi povijesne i trenutne podatke o povezanim izvorima energije, meteorološke podatke o vjetru i solarnim izvorima energije, te podatke o energetske tržištima kako bi prilagodio svoje prognoze i optimizirao raspodjelu energije za najbolje cijene. Next Kraftwerke cilja male i srednje komercijalne i industrijske proizvođače s pojedinačnim vrstama izvora energije ili kombiniranim postrojenjima radi maksimalne fleksibilnosti. VPP Next Kraftwerkea nudi tri vrste usluga: trgovanje električnom energijom, raspored električne energije i uravnoteženje energije.

### **7.1 Power Trading**

Osim uobičajenih usluga trgovine virtualne elektrane, Next Kraftwerke pruža više oblika upravljanja portfeljem za skupinu aktivnosti kojima upravlja isti korisnički račun. Klijent koji upravlja s više malih proizvodnih i potrošačkih aktivnosti može upravljati svojim portfeljem putem Next Kraftwerke platforme za trgovanje ili ravnotežu snage između svojih aktivnosti, ili mogu delegirati NK-u da upravlja njihovim portfeljem umjesto njih. Također koristi svoje optimizacijske algoritme za trgovanje izvan energetske burzi (OTC) - bilateralne sporazume izvan energetske burzi - kako bi riješio energetske neravnoteže s drugim subjektima u trgovini energijom i riješio neravnoteže unutar operatora prijenosnog sustava. To znači da Next Kraftwerke ne samo da pruža usluge trgovanja električnom energijom putem virtualne elektrane, već također omogućuje

klijentima upravljanje njihovim portfeljem energijskih aktivnosti. Klijenti mogu samostalno upravljati svojim portfeljem ili delegirati Next Kraftwerkeu da to učini umjesto njih. Osim toga, Next Kraftwerke koristi svoje algoritme za optimizaciju za rješavanje neravnoteža u trgovini energijom s drugim sudionicima putem bilateralnih sporazuma i za rješavanje neravnoteža unutar operatora prijenosnog sustava. Ovo omogućuje bolje upravljanje portfeljem i optimizaciju isporuke energije za najbolje rezultate.

## **7.2 Energy Balancing**

Virtualna elektrana pruža i usluge ravnoteže energije za elektroenergetsku mrežu u obliku pomoćnih usluga, ovisno o zahtjevima operatora prijenosnog sustava. Usluga se pruža u oba smjera putem kontrole proizvodnje ili potrošnje aktivnih sredstava putem odgovora na potražnju, pod uvjetom da aktivna sredstva kontinuirano proizvode ili troše energiju. Ako klijent odabere ovu uslugu, njihova aktivna sredstva su povezana s NEXTPOOL-om, mrežom aktivnih sredstava virtualne elektrane, i kvalificirana i registrirana kod operatora prijenosnog sustava pod kojim se nalaze. Ova usluga ravnoteže energije omogućuje pružanje potpornih usluga elektroenergetskoj mreži prema zahtjevima operatora prijenosnog sustava. Putem virtualne elektrane, kontrolira se proizvodnja ili potrošnja aktivnih sredstava kako bi se održala ravnoteža u elektroenergetskoj mreži. Ako aktivna sredstva neprekidno proizvode ili troše energiju, mogu se koristiti za ravnotežu energije na mreži. Klijenti koji koriste ovu uslugu povezuju svoja aktivna sredstva s mrežom Next Kraftwerke i registriraju ih kod odgovarajućeg operatora prijenosnog sustava kako bi bili kvalificirani za pružanje ove usluge ravnoteže energije. Ovo omogućuje klijentima da sudjeluju u ravnoteži energije u elektroenergetskoj mreži i pruže podršku stabilnosti i pouzdanosti mreže.

## **7.3 NEMOCS**

NEMOCS je softversko rješenje koje omogućuje stvaranje virtualne elektrane i upravljanje različitim aktivnostima povezanim s proizvodnjom i potrošnjom električne energije. Primjeri njegove praktične primjene uključuju pružanje rezervi za stabilizaciju mreže i ravnotežu fluktuacija u električnoj mreži. Za fleksibilne izvore energije, NEMOCS može generirati rasporede rada temeljene na cijenama električne energije na energetske burzama. Sustav prikazuje i bilježi informacije u stvarnom vremenu o trenutnoj proizvodnji, razinama rezervi i statusu aktivnih sredstava. Cijene električne energije s burzi i signali iz mreže obrađuju se brzo i koriste se za optimalno upravljanje povezanim aktivnim sredstvima. NEMOCS se prilagođava

potrebama svakog pojedinog klijenta, uz analizu zahtjeva, željenu primjenu i povezivanje aktivnih sredstava. Klijenti mogu odabrati upravljati vlastitim portfeljem aktivnih sredstava putem NEMOCS platforme za trgovanje i ravnotežu energije ili mogu povjeriti Next Kraftwerke-u da upravlja njihovim portfeljem. NEMOCS također koristi optimizacijske algoritme za trgovanje izvan energetske burze kako bi riješio neravnoteže energije s drugim trgovačkim entitetima. Next Kraftwerke, operater Next Pool virtualne elektrane, upravlja s više od 5.000 povezanih aktivnih sredstava, uključujući proizvođače energije i industrijske potrošače. Njihov cilj je pomoći klijentima diljem Europe i svijeta u upravljanju fleksibilnošću, proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije i predviđanjem proizvodnje.

#### **7.4 Simulacija NEMCOS**

Simulacija omogućuje korisnicima da virtualno upravljaju različitim izvorima energije, kao što su solarni paneli, vjetroelektrane i hidroelektrane, te da prilagođavaju parametre kao što su cijene energije, potrošnja i proizvodnja. Kroz NEMOCS simulaciju, korisnici mogu dobiti uvid u način funkcioniranja virtualne elektrane, razumjeti kako optimizirati upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije te kako postići bolje rezultate u pogledu smanjenja troškova i optimizacije prihoda. Također, simulacija omogućuje korisnicima da testiraju različite scenarije i strategije upravljanja, kako bi dobili bolji uvid u performanse virtualne elektrane u različitim uvjetima. Kroz NEMOCS simulaciju, korisnici mogu dobiti vrijedne informacije o tome kako virtualna elektrana može pridonijeti stabilnosti mreže, povećati iskoristivost obnovljivih izvora energije i optimizirati trgovinu električnom energijom. Simulacija je koristan alat za planiranje i donošenje informiranih odluka prije implementacije stvarne virtualne elektrane. Na temelju rezultata simulacije, korisnici mogu bolje razumjeti prednosti i potencijalne izazove u upravljanju virtualnom elektranom te donijeti informirane odluke o daljnjim koracima i investicijama u obnovljivu energiju.





Slika 18 Korisničko sučelje simulacije[10]

## 7.5 SWOT analiza

SWOT analiza je alat koji se koristi za procjenu stanja organizacije ili projekta.

Snage:

- Next Kraftwerke nudi snažan skup značajki koje odgovaraju različitim vrstama korisnika i sudjeluju u pružanju dodatnih usluga i trgovini energijom.
- Kao pionir, Next Kraftwerke prošao je intenzivan proces učenja i uspješno prilagodio svoj poslovni model promjenjivom tržišnom okruženju, ostvario rast i ekspanziju.
- Njihova ponuda virtualne elektrane kao usluge temelji se na modularnom okviru koji ima koristi od standardiziranog razvoja i ne zahtijeva previše prilagodbi.
- Next Kraftwerke je certificiran prema standardima ISO 27001 i ISO 27019 i zadovoljava njemačke kriterije IT sigurnosti.
- Sučelje Next Kraftwerkea s uređajima, nazvano Next Box, kompatibilno je s velikim brojem kontrolera različitih pružatelja, što im pruža fleksibilnost u novim projektima.

#### Slabosti:

- Do sada je Next Kraftwerke djelovao samo na EU tržištu, nedavno su eksperimentirali s projektima u Južnoj Koreji ili Japanu. Proširenje izvan EU može biti složenije nego što se očekuje.
- Baza korisnika Next Kraftwerkea usredotočena je na male ili srednje proizvođače ili poslovne subjekte, potpuno ignorirajući stambene korisnike, što otvara to tržište za konkurenciju.

#### Mogućnosti:

- Tržište virtualnih elektrana još je mlado, a Next Kraftwerke se može proširiti na mnoge europske zemlje.
- Akvizicija Next Kraftwerkea od strane Shell-a daje im pristup moćnim resursima, vezama, povijesti i iskustvu.

#### Prijetnje:

- Europsko tržište je relativno zrelo, ali politike se neprestano mijenjaju, a neke buduće promjene mogu utjecati na profitabilnost Next Kraftwerkea.
- Tržište virtualnih elektrana trenutno ima samo nekoliko glavnih igrača, ali konkurencija raste jer ovo područje poslovanja pokazuje velik potencijal.
- Akvizicija od strane Shell-a je dvostrani mač. Kao uspostavljeno poduzeće koje ima ograničeno iskustvo s digitalizacijom, nova uprava i postupci rada mogu negativno utjecati na performanse Next Kraftwerkea. [10]

## **8.PRIMJENA TEHNOLOGIJE POWER TO GAS KROZ PROJEKT DANUP2GAS**

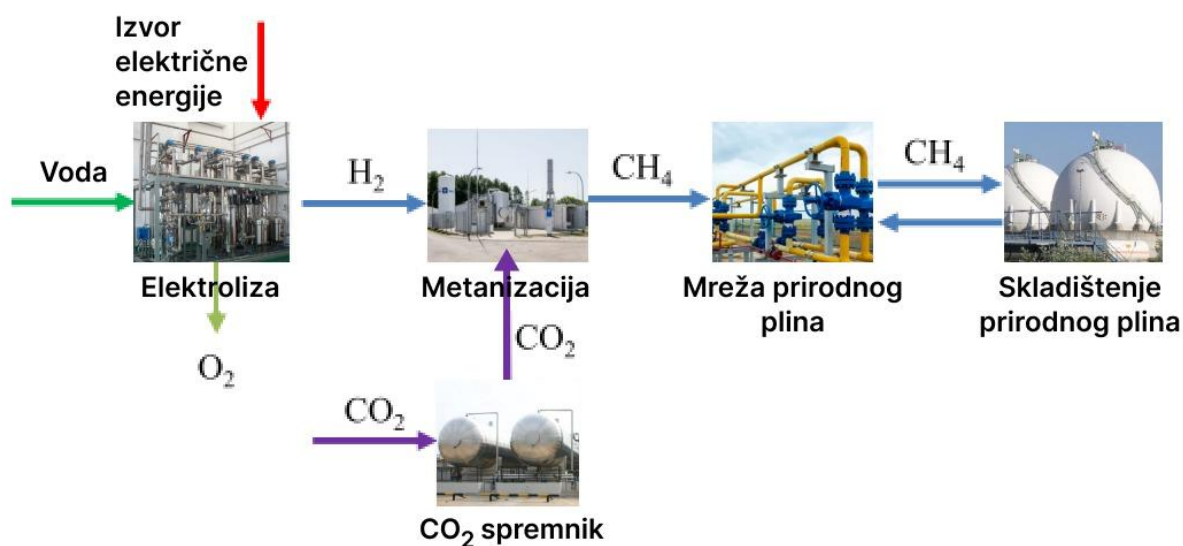
### **8.1 DanuP2Gas projekt**

Područje Dunava ima ogroman potencijal za održivo stvaranje i pohranu obnovljive energije. No, do danas, ovo područje jako ovisi o uvozu energije, a energetska učinkovitost, raznolikost i udio obnovljivih izvora su vrlo niski. U skladu s ciljevima EU za klimu do 2030. i ciljevima Europske strategije za područje Dunava (EUSDR PA2), projekt DanuP-2-Gas unaprijedio je međunarodno energetske planiranje promovirajući strategije za stvaranje i pohranu obnovljive energije povezivanjem plinskog sektora sa sektorom električne energije. DanuP-2-Gas, financiran fondovima Europske Unije povezo je energetske agencije, poslovne subjekte, javne vlasti i istraživačke institucije. Projekt DanuP-2-Gas temelji se na razvijenoj platformi iz projekta DTP ENERGY BARGE. Ova platforma uključuje prethodno razvijene alate i Atlas koji identificira dosad neistražene dostupne resurse biomase infrastrukturu ključnu za izgradnju elektro-plinskih čvorišta. Kroz preliminarnu studiju izvodljivosti koristi se alat za optimizaciju kako bi se pokazala ekonomska isplativost povezivanja dvaju sektora te dale smjernice za određivanje lokacija pogodnih za povezivanje sektora. Studija kombinira dva neiskorištena resursa - organski ostaci (poput slame) koji se pretvaraju u bio-ugljen za lakši transport rijekom Dunav te služe kao osnova za sintetski plin. Dodajući vodik proizveden iz viškova proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, sintetski plin nadograđuje se u obnovljivi prirodni plin, biometan. Ovakav pristup omogućuje pohranu viška energije u postojeću plinsku mrežu, čime se povećava energetska sigurnost i učinkovitost. Svi nužni resursi već su na raspolaganju u području Dunavske regije. Glavna transportna ruta je rijeka Dunav koja omogućuje međunarodno dijeljenje tih resursa. Za ovaj projekt također je bilo jako važno sagledati pravne okvire na nacionalnoj razini i izraditi međunarodnu strategiju s nacionalnim planovima kako bi se olakšala njegova implementacija. [11]

### **8.2 P2G tehnologija**

Power to Gas tehnologija uključuje pretvorbu vode u vodik (H<sub>2</sub>) i kisik (O<sub>2</sub>) putem elektrolize koristeći električnu energiju. Kemijskom reakcijom vodika i ugljikovog dioksida dobiva se metan. Ovaj proces se naziva i Sabatierova reakcija. Dobiveni metan se može dalje distribuirati i pohraniti

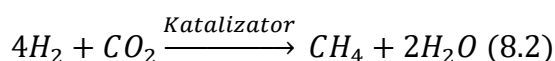
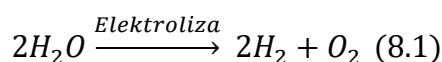
u plinsku mrežu ili spremnike, a za generiranje električne energije moguće ga je koristiti u plinskoj turbini. Kako bi se smanjile emisije u atmosferu odgovaran je sustav za hvatanje i skladištenje ugljika koji uključuje proces odvajanja CO<sub>2</sub> iz zraka ili ispušnih plinova i njihovo skladištenje u spremniku te ponovno korištenje u kemijskom procesu dobivanja metana. Jedan od važnih procesa P2G postrojenja je i anaerobna digestija gdje se razgradnjom biomase dobiva bioplin (kombinacija metana CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub>). Bioplin se zatim može nadograditi u čisti metan za koji tada kažemo da je biometan ako je H<sub>2</sub> iz elektrolize, a CO<sub>2</sub> iz bioplina. Zbog težnje ka dekarbonizaciji primjena P2G tehnologije donosi brojne koristi u slučaju fleksibilnog rada i pružanja pomoćnih usluga u elektroenergetskoj mreži. Slika 19. prikazuje osnovnu strukturu P2G sustava, koji se sastoji od dva dijela.



Slika 19 Koncept P2G tehnologije[12]

Prvi dio ima za cilj elektrolitički dobivanje H<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> putem električne energije. Proces metanizacije se koristi ne samo zbog izazova u pohrani i transportu vodika, već i zbog njegovih neusporedivo širih primjena. Iako postrojenja za proizvodnju vodika postoje u većem broju, metanizacija omogućava lakši transport i distribuciju kroz plinsku mrežu, čime postaje izuzetno korisna opcija za energijsku konverziju. Drugi dio sustava pretvara H<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> u CH<sub>4</sub> i H<sub>2</sub>O također putem metanizacijskog procesa pri visokim temperaturama i tlakovima. Kapacitet P2G sustava kreće se od nekoliko kWs do nekoliko MWs te on također povećava sposobnost apsorpcije promjenjive obnovljive energije. Stoga je za pretpostaviti da će kapacitet P2G sustava rasti s napretkom tehnologije te će imati utjecaj na koordinirano planiranje i rad elektroenergetske i plinske mreže u

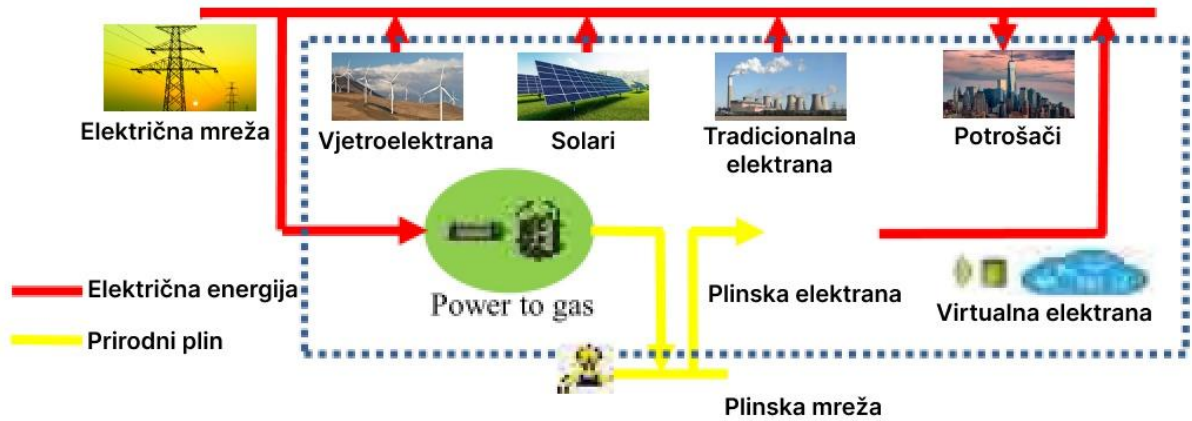
budućnosti. Proces elektrolize se dijeli na 3 osnovne tehnologije koje se danas koriste: alkalnu elektrolizu, visokotemperaturnu elektrolizu i protonsku izmjenu membrana, ovisno o tehnologiji elektrolize koja se primjenjuje. Za poboljšavanje energetske učinkovitosti koristimo stanice za visokotemperaturnu elektrolizu koje su i visoko reverzibilne te omogućuju jednostavno prebacivanje između elektrolitičkog i gorivnoćelijskog načina rada. Kemijska reakcijska jednadžba može se izraziti kao:



Proces pretvaranja u prirodni plin CH<sub>4</sub> naziva se metanizacija i njezina energetska učinkovitost iznosi oko 75% -80%. [12]

### 8.3 Model Virtualne elektrane s P2G tehnologijom

Model Virtualne elektrane s P2G tehnologijom moguće je prikazati kao na slici 20. Na slici obnovljive izvore energije s djelomično upravljanim izlazom predstavljaju fotonaponske elektrane i vjetroelektrane i sve sa ciljem smanjivanja emisije ugljičnog dioksida. Obnovljivi izvori energije ne osiguravaju stabilnu opskrbu električne energije te je upravo nestabilnost i neizvjesnost u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora najveći izazov za rad virtualne elektrane. Klasične elektrane osiguravaju stabilno opskrbljivanje energijom, dok se fleksibilni potrošači energije mogu djelomično prilagoditi potrebama za energijom. Za postizanje uravnoteženja elektroenergetskog sustava i uspostavljanje čvršće veze između elektroenergetske mreže i plinske mreže, koristi se plinska mreža uz tehnologiju Power to Gas. Ova tehnologija omogućava pretvorbu električne energije u plin, a za potpuno povezivanje sektora, CHP sustav igra ključnu ulogu. CHP sustav koristi plin za proizvodnju električne energije putem plinske turbine, omogućujući tako dvostrano povezivanje između sektora. Prednost Virtualne elektrane s P2G tehnologijom je i mogućnost sudjelovanja na tržištu električne energije i plina te se tako mogu ostvariti koristi koje se temelje na razlici u cijenama između energija u istom vremenskom razdoblju na oba tržišta. Kada ukupni troškovi kupnje plina budu manji od prihoda od prodaje električne energije, energija će biti prodavana na tržištu električne energije umjesto na tržištu plina, i obrnuto.



Slika 20 Model Virtualne elektrane s P2G tehnologijom[13]

Višak električne energije se izravno pretvara u CH<sub>4</sub> putem P2G opreme. Veza između ulaza električne energije i izlaza prirodnog plina u Power to Gas sustavu može se prikazati putem formule:

$$V_{gas}(t) = \frac{P_{P2G}(t) * \mu_{P2G}}{H_{gas}} \quad (8.3)$$

gdje  $V_{gas}(t)$  označava izlaz prirodnog plina u P2G sustavu u m<sup>3</sup>,  $\eta_{P2G}$  je učinkovitost P2G sustava,  $H_{gas}$  je kalorična vrijednost prirodnog plina izražena u MJ/Nm<sup>3</sup>, a  $P_{P2G}(t)$  je ulaz električne energije u P2G sustav izražen u MW.

Formula za prirodni plin koji se dobiva pomoću P2G opreme te se pohranjuje u opremi za plinsku mrežu ili koristi za potrošnju opisan je na sljedeći način:

$$V_{gas}(t) = V_s(t) + V_c(t) \quad (8.4)$$

$V_c(t)$  označuje potrošnju prirodnog plina generiranu P2G opremom u m<sup>3</sup>, a  $V_s(t)$  je pohranjeni prirodni plin u plinskoj mreži generiran P2G opremom također izražen u m<sup>3</sup>.

Stoga slijedi da se prirodni plin pohranjen u plinskoj mreži u trenutku  $t$  označen s  $E(t)$  može zapisati kao [13]:

$$E(t) = E(t - 1) - V_c(t) + V_s(t) \quad (8.5)$$

## 8.4 Sudjelovanje Virtualne elektrane s P2G tehnologijom na dvostrukom energetsom tržištu

Virtualna elektrana s P2G tehnologijom i plinskim elektranama ima mogućnost sudjelovanja na dvostrukom - tržištu električne energije i tržištu prirodnog plina. Na temelju razlika u cijenama plina i električne energije u istom vremenskom razdoblju, kada su troškovi kupnje plina u plinskoj elektrani manji od troškova kupnje električne energije, strategija kupnje veće količine plina na tržištu prirodnog plina predstavlja ekonomičniju opciju, i obrnuto. Virtualna elektrana djeluje kao pasivni sudionik na tržištima električne energije i prirodnog plina te joj je cilj odrediti količine energije i plina koje će se ponuditi temeljem predviđenih cijena na tržištu

Ovo su sljedeći uvjeti za Virtualnu elektranu na dvostrukom tržištu:

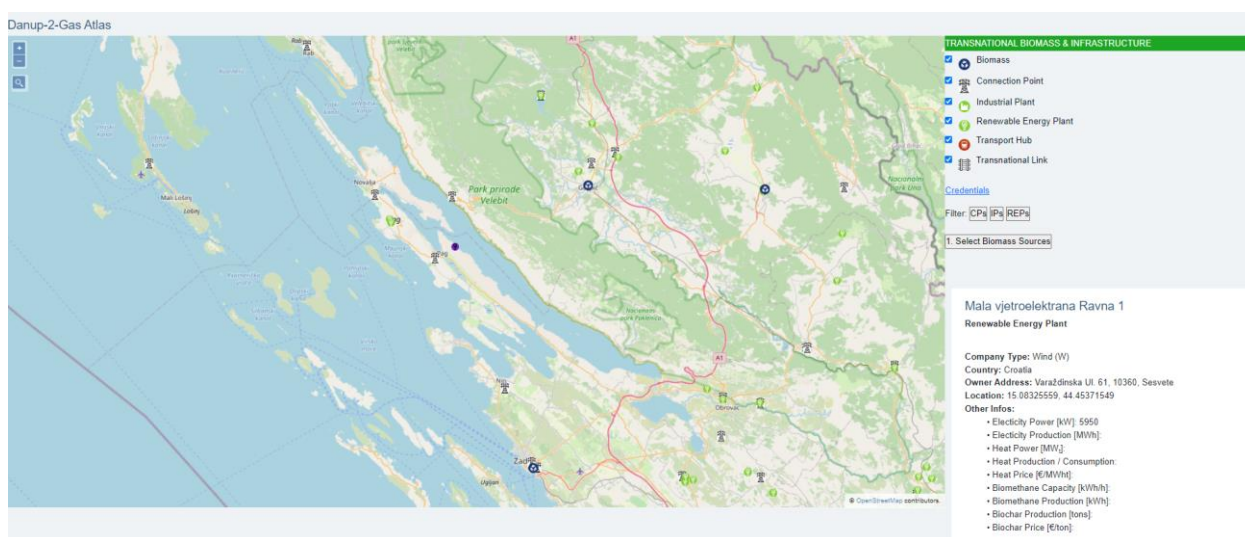
- Virtualna elektrana ima pravo sudjelovati na tržištu unaprijed dogovorenih bilateralnih ugovora i tržištu ravnoteže Real-time marketa.
- Virtualna elektrana koja ima sklopljen bilateralni ugovor s prodavateljem izmiruje se po cijenama iz ugovora unutar dopuštenih odstupanja.
- Na tržištu ravnoteže Real-time marketa, Virtualna elektrana kupuje ili prodaje električnu energiju kako bi se izbalansirala snagu prema modelu razrješenja količine odstupanja prema stvarnom operativnom stanju.
- Tržište prirodnog plina koristi model poravnanja temeljen prema cijenama s fiksnom cijenom.[13]

## 8.5 Case Study

Za slučaj Hrvatske razmatrana je vjetroelektranu Ravne 1 na otoku Pagu za potencijalne investicije u P2G postrojenja. Na ovoj lokaciji postoji mogućnost povezivanja s električnom i plinskom mrežom u blizini. Prva vjetroelektrana u Hrvatskoj, Vjetroelektrana Ravne 1, smještena je iznad paške solane na otoku Pagu te je montirana 19. kolovoza 2004. godine. Sa svojih 5,95 MW nazivne snage, ova vjetroelektrana koristi sedam generatora tipa Vestas V52, svaki snage 850 kW. Projekt je realiziran uz inicijativu HEP-a, a tvrtka Adria Wind Power je izgradila vjetroelektranu kao prvi komercijalni projekt iskorištavanja vjetra za proizvodnju električne energije. Realizacija ovog

projekta trajala je 7 godina, dok je sama gradnja trajala 4 mjeseca, uz ukupnu investiciju od 6,5 milijuna eura.

Započeto je korištenjem Atlas-a obnovljive energije (Renewable Energy Atlas) koji je sofisticirani geografski informacijski sustav (GIS) alat koji igra ključnu ulogu u identifikaciji, analizi i vizualizaciji obnovljivih energetske resursa u sklopu projekta "DanuP-2-Gas", posebno u vezi s konceptom Power-to-Gas (P2G). Ovaj alat omogućava korisnicima da na kartografskom prikazu pregledaju različite izvore obnovljive energije poput vjetroelektrana, solarnih panela, hidroelektrana i drugih. Korištenjem GIS tehnologije, Atlas obnovljive energije prikazuje relevantne podatke kao što su kapaciteti, lokacije, proizvodnja i drugi faktori povezani s obnovljivim izvorima energije. Posebno je značajno što ovaj alat omogućava vizualizaciju i analizu potencijalnih P2G čvorišta. To su lokacije gdje bi se mogla primijeniti Power-to-Gas tehnologija kako bi se višak električne energije iz obnovljivih izvora pretvorio u vodik ili metan, čime se bolje iskorištava obnovljiva energija i pohranjuje je u obliku goriva. Na primjer, ukoliko se odabere lokacija u Hrvatskoj, automatski se dohvaćaju podaci o cijenama struje, plina i priključaka za Hrvatsku. Ova opcija omogućava i proizvoljan odabir lokacije, gdje se pruža mogućnost istražiti isplativost izgradnje postrojenja na različitim mjestima. Također, može se odabrati da se postrojenje za proizvodnju plina iz obnovljivih izvora gradi uz već postojeće industrijsko postrojenje ili obnovljivi izvor energije. Ove lokacije su često pogodne jer omogućavaju direktno korištenje električne energije i/ili plina bez potrebe za priključcima na mrežu, mrežarinom i potencijalno dodatnim troškovima. Za istraživačku studiju razmatranu u nastavku, odabrana je lokacija REP vjetroelektrane Ravna na otoku Pagu.



Slika 21 Odabir lokacije pomoću ATLAS-a[13]



Nakon odabira lokacije pomoću Atlas-a i ispisa u .json obliku sljedeći korak je korištenje DanuP2Gas Optimization Tool paketa. Interakcija se ostvaruje putem Excel sučelja koji u pozadini kreira optimizacijski problem u programskom jeziku Python. Ovaj dokument sastoji se od nekoliko glavnih tablica: Optimization Tool, Plants and sources, P2G segments i Charts. Na tablicama Optimization Tool, Plants and sources te P2G segments, korisnik unosi potrebne podatke za analizu potencijala P2G postrojenja i dobivanje optimalnog rješenja za definiranu lokaciju. Iako su zadane vrijednosti već postavljene, korisnik ima mogućnost unositi nove vrijednosti u polja označena bijelom bojom. Na tablicama Results i Charts prikazani su rezultati optimizacije. No, ti rezultati nisu samo specifikacija P2G elektrane koju dobivamo, već uključuju i vremenske dijagrame potrošene i proizvedene energije te materijala koji su prikazani na listu Charts. Na taj način se ne dobivaju samo optimalne veličine P2G postrojenja nego i optimalni način rada takvog postrojenja u željenom razdoblju.

U "Investicijskim parametrima" unosimo podatke poput maksimalnog razdoblja isplate investicije tj. koliko godina je potrebno da se investicija isplati. Zadana vrijednost za ovu simulaciju je 20 godina. Razdoblja upravljanja i izgradnje nam govore koliko godina je potrebno za izgradnju P2G čvora. Zadana vrijednost iznosi 5 godina. Maksimalne investicije su najviše što planiramo investirati te je maksimalno zadano 1 milijarda eura. Obično će optimalni rezultati uključivati manje investicije i kraće razdoblje isplate od maksimalnih vrijednosti. U vezi investicije, možemo dodati subvenciju na troškove. "Korištenje iste subvencije za sve dijelove P2G čvora?" dopušta nam primijeniti istu subvenciju na sve procese, dok opcija "ne" omogućuje različite subvencije za svaki dio P2G čvora.

Investment parameters		
Parameter	Value	Unit
Maximal investment payoff period	20	years
Administration and building period	5	years
Maximal investment	1,000,000,000	€
Use same subsidy for all parts of the P2G hub?	Yes	
Investment subsidy	0.0	%

Slika 22 Investicijski parametri[14]

U "Parametrima optimizacije" definiramo početni datum simulacije i zadnji datum simulacije koji označavaju razdoblje godine za koje provodimo simulaciju. Bez obzira na duljinu tog razdoblja, OT će rezultate skalirati na godinu dana. Vrijeme uzorkovanja za električni dio određuje korak u vremenu za izračun električne snage. Manji korak donosi preciznije rezultate, ali i veću potrebu za memorijom. Uzorkovanje vremena za druge procese je fiksno na 24 sata. Količina potrebne memorije (cca) ovisi o unesenim vrijednostima i govori koliko RAM memorije je potrebno za pokretanje simulacije. Veća količina memorije produžuje vrijeme traženja optimalnog rješenja.

Optimization parameters		
Parameter	Value	Unit
Starting date of simulation	1/1/2022	Pick date
Last date of simulation	7/1/2022	Pick date
Sampling time for electrical part	4	h
Amount of memory required (cca)	0.64	GB

*Slika 23 Parametri optimizacije[14]*

Vjetroelektrana se smatra obnovljivim izvorom energije i njezina proizvodnja električne energije temelji se na tipičnom profilu proizvodnje karakterističnom za vjetroelektrane. Godišnje, vjetroelektrana proizvodi 10.000 MWh električne energije, što predstavlja značajan doprinos energetske neovisnosti. Ona je povezana s distribucijskom mrežom koja joj omogućuje da prenosi proizvedenu električnu energiju. Kapacitet postojeće električne veze iznosi 5,95 MW, što ukazuje na sposobnost vjetroelektrane da učinkovito prenosi energiju do potrošača.

Sama činjenica da vjetroelektrana koristi generički profil proizvodnje tipičan za vjetroelektrane sugerira da je njezina učinkovitost optimizirana za ovu vrstu obnovljivog izvora energije. No, stvarna upotreba generičkog profila proizvodnje proizlazi iz praktičnih poteškoća u dobivanju preciznih profila za pojedine elektrane. Ovim pristupom korisnicima se pruža mogućnost da koriste aproksimaciju profila, dok bi se unoseći prave vrijednosti proizvodnje iz prošlih godina postiglo znatno preciznije rješenje. To je značajno za osiguravanje stabilnog i pouzdanog opskrbljivanja električnom energijom. Uzimajući sve navedene informacije u obzir,

vjetroelektrana na istraživanoj lokaciji na otoku Pagu predstavlja važan korak prema održivijoj i čistijoj energetskej budućnosti, doprinoseći smanjenju emisija stakleničkih plinova i osiguravajući pouzdan izvor obnovljive električne energije.

Renewable energy plant (REP)		
Type of plant		Wind
Electricity	Electrical energy production profile	Wind (generic)
	File:	../profiles/Wind.csv
	Annual electrical energy production [MWh]	10,000
	Type of existing electrical connection	Distribution
	Existing electrical connection capacity [MW]	5.95
	Biogas production profile	
Gas	File:	
	Annual biogas (gas) production [MWh]	
	Type of existing gas connection	
	Pressure of the gas network [bar]	
	Existing gas connection capacity [MW]	
	Internal gas network pressure [bar]	
Heat	Heat production profile	
	File:	
	Annual heat production [MWh]	

Slika 24 Prikaz parametara odabrane elektrane[14]

Zatim kod procesa povezivanja električne i plinske energije s mrežom na istraživanom području, podaci su razdijeljeni u dvije glavne sekcije, za električnu i plinsku mrežu:

Tip točke povezivanja na elektroenergetsku mrežu odnosi se na distribuciju, odnosno povezivanje na distribucijsku mrežu iako postoji i mogućnost direktnog povezivanja na prienosnu mrežu.. Udaljenost do najbliže točke povezivanja na elektroenergetsku mrežu je 0 km. Ova pretpostavka temelji se na činjenici da REP ili IP već imaju postojeću povezanost s elektroenergetskom mrežom. Međutim, važno je napomenuti da, u slučaju postavljanja Power to Gas (P2G) postrojenja na lokaciju koja nema takvu povezanost, udaljenost bi trebala biti samostalno specificirana. Troškovi

povezivanja na električnu prijenosnu mrežu iznose 4.5 € po svakom kilovatu snage prema kilometru udaljenosti. Povezivanje na električnu distribucijsku mrežu ima trošak od 13.00 € po svakom kilovatu snage prema kilometru udaljenosti. Trošak kapaciteta za povezivanje na prijenosnu mrežu iznosi 220.00 € po kilovatu snage. Važno je napomenuti da su ove vrijednosti procijenjene i imaju svoje osnove u referentnim cijenama, koje su specifične za Hrvatsku. Međutim, konačni troškovi povezivanja mogu značajno varirati ovisno o lokaciji, vrsti izgradnje i drugim faktorima. Za povezivanje na distribucijsku mrežu kapacitet se naplaćuje po cijeni od 193.00 € po kilovatu snage. Izračunati jedinični trošak povezivanja na električnu mrežu ovisi o kombinaciji prethodno navedenih faktora.

Kod plinske mreže imamo vrstu točke povezivanja na plinsku mrežu koja se odnosi na prijenos, što znači povezivanje na prijenosnu plinsku mrežu. Pritisak plinskog sustava iznosi 60.00 bar, označavajući tlak plinske mreže. Udaljenost do najbliže točke povezivanja na plinsku mrežu iznosi 169.81 km. Iako ova udaljenost može zvučati velika, za otoke kao što je Pag takva udaljenost nije nužno nerealna. No, pametnije bi bilo povezati se na distribucijsku plinsku mrežu koja vjerojatno već postoji negdje na otoku. To bi značajno skratilo udaljenost i vjerojatno bi bila unutar 10 km. Troškovi povezivanja na plinsku prijenosnu mrežu iznose 0.46 € po kilovatu snage prema kilometru udaljenosti. Povezivanje na plinsku distribucijsku mrežu ima istu cijenu od 0.46 € po kilovatu snage prema kilometru udaljenosti. Trošak kapaciteta za povezivanje na prijenosnu plinsku mrežu iznosi 385.00 € po kilovatu snage. Za povezivanje na distribucijsku plinsku mrežu, kapacitet se naplaćuje po cijeni od 100.00 € po kilovatu snage. Izračunati jedinični trošak povezivanja na plinsku mrežu iznosi 463.11 € po kilovatu snage.

Ova temeljita analiza troškova povezivanja omogućava razumijevanje ekonomske strane projekta i donošenje informiranih odluka o najoptimalnijem povezivanju na električnu i plinsku mrežu za planirane energetske aktivnosti. Zadane vrijednosti su uzete kao referentne točke na temelju postojećih izgradnji i povezivanja s mrežom u trenutku istraživanja i ažurirane su s krajem 2022. pa postoji potreba za provjerom i ažuriranjem parametara.

Grid investment prices		
Electrical grid	Type of grid connection point	Distribution
	Distance to the nearest electrical grid connection point [km]	0.00
	Unit cost for electrical transmission grid connection [€/(kW km)]	4.50
	Unit cost for electrical distribution grid connection [€/(kW km)]	13.00
	Capacity cost for electrical transmission grid connection [€/kW]	220.00
	Capacity cost for electrical distribution grid connection [€/kW]	193.00
	Calculated unit cost of electrical grid connection [€/kW]	193.00
Gas grid	Type of grid connection point	Transmission
	Pressure of the gas network [bar]	60.00
	Distance to the nearest gas grid connection point [km]	169.81
	Unit cost for gas transmission grid connection [€/(kW km)]	0.46
	Unit cost for gas distribution grid connection [€/(kW km)]	0.46
	Capacity cost for gas transmission grid connection [€/kW]	385.00
	Capacity cost for gas distribution grid connection [€/kW]	100.00
	Calculated unit cost of gas grid connection [€/kW]	463.11

*Slika 25 Cijene investicija u elektroenergetsku mrežu[14]*

Tablica cijena električne energije pruža dublji uvid u različite aspekte cijena električne energije, uzimajući u obzir različite načine povezivanja i vremenska razdoblja. Za svaki tip povezivanja, postavljaju se vremenska ograničenja za tarifiranje tijekom dana, noći i vikenda. Ovi parametri pomažu u preciznom razumijevanju kada se primjenjuju određene tarifne stope. Unutar svakog vremenskog razdoblja tarifiranja, nudi se raspon cijena električne energije, uz razdvajanje na različite komponente. Na primjer, za "DAY TARIFF" postoje tri različite cijene: cijena električne energije bez dodatnih troškova mreže i operatora (uključujući poreze), naknade za prijenos na sustavu prijenosa i distribucijskog sustava (uključujući poreze). Dodatno, cijene se također razdvajaju prema različitim tipovima troškova, kao što su cijene za prijenosni sustav i distribucijski sustav. Ovaj razdvajajući pristup pruža korisnicima jasnoću u strukturi cijena i omogućava dublje razumijevanje kako se troškovi sastoje. Osim toga, tablica sadrži informacije o mjesečnoj cijeni za vršnu snagu, kao i postotak PDV-a koji se primjenjuje na poslovanje s električnom energijom. Cijene za kupovinu i prodaju električne energije za svako razdoblje tarifiranja također su jasno prikazane, omogućujući korisnicima da vide kako se cijene razlikuju tijekom dana, noći i vikenda. U Hrvatskoj nema vikend tarife, no ta mogućnost može biti važna za korisnike u drugim zemljama gdje je prisutna, kao što je primjerice u nekim dijelovima Njemačke. Naposljetku, postoji opcija pod nazivom "Koristiti prilagođeni godišnji profil cijena umjesto toga?" koja korisnicima omogućuje stvaranje vlastitih prilagođenih profila cijena, umjesto da se oslanjaju na unaprijed definirane cijene za tarifna razdoblja. Ova dodatna fleksibilnost ima posebno veliku važnost kod

projekata kao što je P2G, gdje je istraživanje promjena u cijenama tijekom godine ključno za razumijevanje utjecaja na isplativost projekta. To postaje osobito značajno kada se P2G koristi kao virtualna elektrana, gdje se cijene električne energije i plina mogu dinamično mijenjati, a korisnici mogu prilagoditi svoje strategije kako bi optimalno iskoristili te varijacije.

Electricity prices		
Type of connection		Distribution
	Start time of day tariff [hour]	6
	End time of day tariff [hour]	20
	Start time of weekend tariff [hour]	0
	End time of weekend tariff [hour]	0
Day tariff	Electricity price without grid or operator fees, including taxes [€/kWh]	0.23
	Grid/operator fees of the transmission system, including taxes [€/kWh]	0.01
	Grid/operator fees of the distribution system, including taxes [€/kWh]	0.02
Night tariff	Electricity price without grid or operator fees, including taxes [€/kWh]	0.15
	Grid/operator fees of the transmission system, including taxes [€/kWh]	0.00
	Grid/operator fees of the distribution system, including taxes [€/kWh]	0.01
Weekend tariff	Electricity price without grid or operator fees, including taxes [€/kWh]	0.00
	Grid/operator fees of the transmission system, including taxes [€/kWh]	0.00
	Grid/operator fees of the distribution system, including taxes [€/kWh]	0.00
	Monthly peak power price [€/kW]	3.50
	VAT percentage applicable to electricity business [%]	13
	Price for buying electricity at day tariff [€/kWh]	0.25
	Price for selling electricity at day tariff [€/kWh]	0.20
	Price for buying electricity at night tariff [€/kWh]	0.16
	Price for selling electricity at night tariff [€/kWh]	0.13
	Price for buying electricity at weekend tariff [€/kWh]	0.00
	Price for selling electricity at weekend tariff [€/kWh]	0.00
	Use custom yearly profile of prices instead?	No

Slika 26 Cijene električne energije[14]

### 8.5.1 Rezultati simulacije

Nakon pokretanja simulacije dobili smo sveobuhvatan pregled operativnih troškova i prihoda koji se odnose na različite aspekte energetskeg sustava tijekom određenog vremenskog razdoblja. Detaljno su navedene informacije o proizvodnji i potrošnji električne energije, toplini, plinu, vodi te ulaznim materijalima i dodatnoj prodaji, kao i troškovima vezanim uz ostatke.

Što se tiče električne energije, tablica prikazuje proizvodnju električne energije od strane REP (obnovljivi izvori energije) u iznosu od 931,571.63 € za ukupno 5,302.76 MWh. Budući da u ovom

slučaju nema industrijskog postrojenja (IP), nema ni potrošnje električne energije. Ukupna neto potrošnja električne energije bez ulaganja iznosi -931,571.63 € i -5,302.76 MWh, dok P2G proces troši 10,086,913.73 € za ukupno 47,690.62 MWh. Negativan predznak znači da govorimo o proizvodnji bez dodatnih ulaganja. To nam pokazuje koliko procjenjujemo da Ravne zarađuju kroz svoju uobičajenu proizvodnju. U ovom slučaju uspoređujemo njihovu sadašnju dobit s mogućim dodatnim prihodom putem ulaganja. Cilj je maksimalno povećati dobit. Sadašnje stanje pokazuje da tijekom simulacije (od 1.1. do 1.7.), Ravne proizvedu 5302 MWh električne energije. Analiza optimizacijskog alata sugerira da je isplativo koristiti svih 5300 MWh proizvodnje i dodatnih 42387 MWh preuzetih iz mreže za P2G proces. Putem P2G procesa, ukupno se potroši 47690 MWh električne energije kako bi se generiralo 26370 MWh plina, s procijenjenom učinkovitošću P2G procesa od oko 60%. Važno je istaknuti da, uz trenutne cijene električne energije i plina, trošak za 48 GWh električne energije iznosi 10 milijuna eura, dok se prodajom 26 GWh plina ostvaruje prihod od 18 milijuna eura, što rezultira značajnom dobiti. Promjenom cijena plina i struje, moguće je značajno utjecati na isplativost projekta te čak mijenjati smjer proizvodnje iz električne energije u plin i obratno.

U pogledu proizvodnje topline, REP i IP ne proizvode toplinu, no P2G proces generira 9,631.49 MWh topline. Što se tiče plina (metana), P2G proces proizvodi znatne količine plina u iznosu od 18,606,606.35 € za ukupno 26,370.93 MWh.

Tablica 8.5.1 također navodi potrošnju i troškove vode te ulazne materijale. P2G proces troši vodu iz mreže i koristi oborinsku vodu u ukupnoj količini od 373.11 € i 3,135.40 m<sup>3</sup> odnosno 454.91 m<sup>3</sup>. Kupuje se suha i mokra biomasa u ukupnim iznosima od 663,239.67 € i 1,820.00 tona. Što se tiče dodatne prodaje, nema prihoda od prodaje vodika, kisika ili metana. Također, nema troškova za ostatke iz anaerobne digestije ili plinskeifikacije.

Ukupni operativni troškovi bez ulaganja iznose -931,571.63 €, dok s ulaganjem iznose -8,593,697.69 €. To pokazuje značajne uštede koje se postižu uvođenjem P2G procesa, omogućujući bolju financijsku održivost i učinkovitost energetskog sustava.

Tablica 8.5.1 Troškovi za odabrano vrijeme simulacije[16]

Operational costs for selected period				
		Cost		Amount
Electrical energy	Produced by REP	931,571.63	€	5,302.76
	Consumed by IP	0.00	€	0.00
	Net consumption without investment	-931,571.63	€	-5,302.76
	Mean peak power without investment	0.00	€	0.00
	Consumed by P2G	10,086,913.73	€	47,690.62
	<b>Net consumption with investment</b>	<b>8,954,208.29</b>	<b>€</b>	<b>42,387.86</b>
	<b>Mean peak power with investment</b>	<b>395,087.59</b>	<b>€</b>	<b>9.41</b>
Heat	Produced by REP	0.00	€	0.00
	Produced IP	0.00	€	0.00
	Net production without investment	0.00	€	0.00
	Consumed by P2G	0.00	€	-9,631.49
	<b>Net production with investment</b>	<b>0.00</b>	<b>€</b>	<b>9,631.49</b>
Gas (methane) to/from the grid	Produced by REP	0.00	€	0.00
	Consumed by IP	0.00	€	0.00
	Net consumption without investment	0.00	€	0.00
	Produced by P2G	18,606,606.35	€	26,370.93
	<b>Net consumption with investment</b>	<b>-18,606,606.35</b>	<b>€</b>	<b>-26,370.93</b>
Water	Water from the grid consumed by P2G	373.11	€	3,135.40
	Collected precipitation consumed by P2G	n/a	€	454.91
Input materials	Dry biomass bought	635,266.81	€	1,820.00
	Wet biomass bought	27,972.85	€	1,820.00
	Biochar bought	0.00	€	0.00
	<b>Total cost of input materials</b>	<b>663,239.67</b>	<b>€</b>	
Additional sales	Hydrogen sold (in bottles)	0.00	€	0.00
	Oxygen sold (in bottles)	0.00	€	0.00
	Methane sold (in bottles)	0.00	€	0.00
	Biochar sold	0.00	€	0.00
	<b>Total revenue from additional sales</b>	<b>0.00</b>	<b>€</b>	
Residues	Residue from dry anaerobic digester	0.00	€	54.60
	Residue from wet anaerobic digester	0.00	€	273.00
	Tar from gasification + water gas shift plant	0.00	€	21.84
	CO2 emitted	0.00	€	0.00
	<b>Total cost of residues</b>	<b>0.00</b>	<b>€</b>	
<b>Total operational cost without investment</b>		<b>-931,571.63</b>	<b>€</b>	
<b>Total operational cost with investment</b>		<b>-8,593,697.69</b>	<b>€</b>	
<b>Savings with introduction of P2G</b>		<b>7,662,126.06</b>	<b>€</b>	

Za proširenje kapaciteta električne veze planirano je ulaganje od 994,426.76 €. Ovo će rezultirati dodatnih 5.15 MW snage za električnu vezu, omogućavajući efikasniji prijenos električne energije. Procijenjen trošak proširenja plinske veze iznosi 2,836,188.97 €, što će povećati kapacitet za 6.12 MW. Ova investicija doprinosi pouzdanom snabdijevanju plinom. Optimalno rješenje uključuje dodatnu energiju iz mreže kako bi se nadopunila proizvodnja vjetroelektrane, što zahtijeva povećanje kapaciteta električne veze. Također, kako trenutno ne postoji plinski priključak, investicija u izgradnju infrastrukture je nužna. Ovaj nedostatak priključka je glavni razlog za



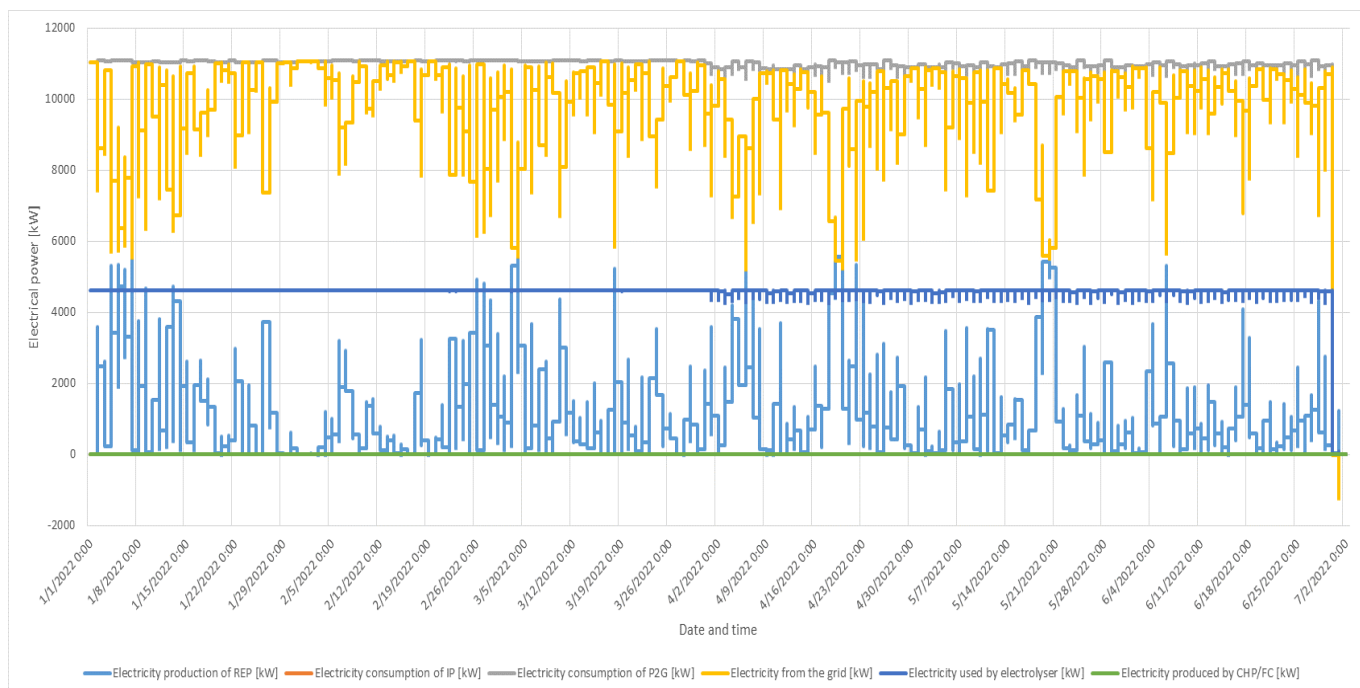
visoku cijenu od 160 km. Ulaganje od 110.20 € bit će usmjereno na proširenje vodovodne veze, povećavajući protok za 0.90 m<sup>3</sup>/h. Ovo je ključno za osiguranje dostatnog dotoka vode.

Ukupno ulaganje: Sveukupno ulaganje potrebno za ostvarenje projekta iznosi 24,347,871.15 €. Ovaj iznos obuhvaća sve troškove povezane s različitim elementima energetske sustava, uključujući električne, plinske i vodovodne veze. Procijenjeno razdoblje povrata investicije iznosi 6.65 godina. Ova vrijednost ukazuje na to koliko će godina biti potrebno da prihodi generirani projektnim aktivnostima nadmaše uložena sredstva.

*Tablica 8.5.2 Payoff period*

Investment specifications					
	Element	Cost		Size	
Connections enlargement	Electrical connection	994,426.76	€	5.15	MW
	Gas connection	2,836,188.97	€	6.12	MW
	Water connection	110.20	€	0.90	m <sup>3</sup> /h
	<b>Total for connections</b>	<b>3,830,725.94</b>	<b>€</b>		
	<b>Total investment</b>	<b>24,347,871.15</b>	<b>€</b>		
	<b>Payoff period</b>	<b>6.65</b>	<b>years</b>		

Graf električne energije je graf koji prikazuje različite aspekte električne energije te nam pruža uvid u načine na koje se električna energija koristi i generira u određenom vremenskom razdoblju.



*Slika 27 Graf električne energije[15]*

Važna komponenta je proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora, u našem slučaju vjetroelektrane, što nam pomaže razumjeti koliko čiste energije doprinosi ukupnom energetsom mješavini. Također, na grafu pratimo i potrošnju električne energije industrijskog postrojenja (IP), što je važno za ocjenu energetske učinkovitosti industrijskih procesa, no u ovoj simulaciji ne postoji industrijsko postrojenje, pa je stoga ta vrijednost nula. Posebno važna je potrošnja električne energije unutar P2G postrojenja. Koristimo električnu energiju kako bi se proizveo vodik putem elektrolize vode. To pomaže nam razumjeti koliko električne energije odlazi na pretvaranje vode u vodik, koji kasnije može poslužiti kao resurs za daljnje procese. Osim toga, graf uključuje količinu električne energije koja se uzima iz elektroenergetske mreže. To je ključno za ocjenu potrebe za vanjskim izvorima energije te za ravnotežu potrošnje i proizvodnje. Graf također prikazuje koliko se električne energije koristi za elektrolizu. Također, proizvodnja električne energije od strane CHP i FC uređaja unutar P2G postrojenja je prikazana. CHP uređaji koriste istodobno proizvodnju električne i toplinske energije, dok FC uređaji koriste kemijske reakcije za generiranje električne energije. U rezultatima se vidi da investicija u CHP uređaj nije preporučena jer je njezina veličina nula. Stoga je vjerojatno da se CHP proizvodnja neće koristiti, obzirom da ulaganje u to nije isplativo. [14][15][16]

## 9. ZAKLJUČAK

Virtualne elektrane predstavljaju novi i inovativan koncept u energetsom sektoru koji omogućuje povezivanje i upravljanje velikim brojem decentraliziranih izvora energije. Njihovom implementacijom, postiže se veća fleksibilnost, efikasnost i održivost u proizvodnji i upravljanju električnom energijom. Prednost virtualnih elektrana je njihova sposobnost da integriraju različite vrste obnovljivih izvora energije poput solarnih panela, vjetroelektrana, biomase itd. Ova integracija omogućuje bolje iskorištavanje raspoloživih resursa, smanjenje emisija stakleničkih plinova i ovisnost o tradicionalnim fosilnim gorivima. Uvođenje virtualnih elektrana ima značajan utjecaj na energetske sustav. Oni doprinose decentralizaciji proizvodnje energije, smanjujući potrebu za velikim centraliziranim elektranama. To rezultira većom sigurnošću i otpornošću energetske sustava, jer se rizik od kvarova ili prekida smanjuje. Također, virtualne elektrane pružaju mogućnost sudjelovanja na tržištu električne energije. Zbog njihove fleksibilnosti, mogu se prilagoditi zahtjevima tržišta i pružiti razne usluge kao što su balansiranje opterećenja, sudjelovanje u rezervama energije i trgovanje električnom energijom. To otvara nove poslovne modele i prilike za integrirane energetske sustave. Ipak, implementacija virtualnih elektrana suočava se s mnogim preprekama i izazovima. Potrebno je uspostaviti odgovarajući regulatorni okvir, pravne uvjete i podršku tržišta kako bi se osigurala njihova dugoročna održivost. Također, potrebno je razviti napredne tehnologije za nadzor, upravljanje i komunikaciju unutar virtualnih elektrana. Zaključno, virtualne elektrane imaju pozitivan utjecaj na energetske sustav pružajući održivu i fleksibilnu alternativu tradicionalnim načinima proizvodnje energije. Njihova implementacija može doprinijeti ostvarenju energetske ciljeva, smanjenju emisija stakleničkih plinova i stvaranju održivijeg energetske sektora.

## 10. POPIS SLIKA

Slika 1 Agregirane jedinice unutar Virtualne elektrane[4].....	9
Slika 2 Centralizirani upravljani VPP[4].....	11
Slika 3 Distribuirani upravljani VPP[4] .....	12
Slika 4 Potpuno distribuirani VPP[4] .....	13
Slika 5 TVPP[4] .....	14
Slika 6 CVPP[4] .....	15
Slika 7 Hijerarhijska kontrolna struktura za mrežne aktivnosti u kontrolnom području[2].....	18
Slika 8 DEMS funkcije[5].....	21
Slika 9 DEMS softverska arhitektura[5] .....	24
Slika 10 Virtualne elektrane-proces planiranja energije[6].....	27
Slika 11 Primjer optimizacije punjenja električnih automobila korištenjem obnovljivih izvora energije i virtualne elektrane[6] .....	31
Slika 12 Napon i struja stanice punjenja 1[6].....	32
Slika 13 Napon i struja stanice punjenja 2[6].....	32
Slika 14 IEEE bus 69[16] .....	33
Slika 15 Apsorbirana snaga s svake sabirnice u 69-busnom IEEE sustavu[6].....	34
Slika 16 Faze različitih energetske tržišta[7] .....	39
Slika 17 Blockchain energy trading[9].....	43
Slika 18 Korisničko sučelje simulacije[10].....	48
Slika 19 Koncept P2G tehnologije[12].....	51
Slika 20 Model Virtualne elektrane s P2G tehnologijom[13] .....	53
Slika 21 Odabir lokacije pomoću ATLAS-a[13] .....	55
Slika 22 Investicijski parametri[14] .....	56
Slika 23 Parametri optimizacije[14].....	57
Slika 24 Prikaz parametara odabrane elektrane[14].....	58
Slika 25 Cijene investicija u elektroenergetsku mrežu[14].....	60
Slika 26 Cijene električne energije[14] .....	61
Slika 27 Graf električne energije[15] .....	65

## 11.LITERATURA

- [1]Breeze P.: „Power Generation Technologies“, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2019.
- [2]Bubić I.: „Tehno-ekonomska analiza novih tehnologija termoelektrana na ugljen“, Diplomski rad.
- [3]Herzog A.,Liman T.,Kammen D.: „Renewable energy sources“, Sjedinjene Američke Države, 2001.
- [4]Nikonowicz L.,Milewski J.: „Virtual Power Plants – general review: structure, application and optimization“, znanstveni članak, Poljska, 2012.
- [5]Werner T.G.,Remberg R.: „Technical, Economical and Regulatory Aspects of Virtual Power Plants“, znanstveni članak, Germany, 2018.
- [6]Zangeneh A.,Moeini-Aghaie M.: „Scheduling and Operation of Virtual Power Plants“, knjiga, 2022.
- [7]Naval N.,Yusta J.M.: „Virtual power plant models and electricity markets-A review“ ,Zaragoza,2021.
- [8]Roobehani M.,Heydarian-Forushani E.,Hasanzadeh S.,Ben Elghali S.: „Virtual Power Plant Operational Strategies: Models, Markets,Optimization, Challenges, and Opportunities“ ,Francuska, 2022.
- [9]Mnatsakanyan A.,Albeshr H.,Al Marzooq A.: „Blockchain-Integrated Virtual Power Plant Demonstration“ ,UAE, 2020.
- [10]ElMaamoun D.: „A market anlysis of virtual power plants and some ideas for potential opportunities“,USA,2021.
- [11]Interreg Danube program:<https://www.interreg-danube.eu/approved-projects/danup-2-gas> , s Interneta,2022.
- [12]X. T. Xing, J. Lin, Y. H. Song, Y. Zhou, S. J. Mu, and Q. Hu, “Modeling and operation of the power-to-gas system for renewables integration: A review” ,2018.
- [13]Zhang T, Hu Z.: "Optimal Scheduling Strategy of Virtual Power Plant With Power-to-Gas in Dual Energy Markets",2022.

- [14]DanuP2Gas Optimization Tool - User Manual: <https://OptimizationToolManual.pdf> , s Interneta,2022.
- [15]Online Manual for the ATLAS Tool: <https://danup2gas.eu/atlasmanual> , s Interneta,2022.
- [16]Pre-feasibility Study (Croatia):[https://Croatia\\_Pre-feasibility-Study\\_HR.pdf](https://Croatia_Pre-feasibility-Study_HR.pdf) , s Interneta, 2022.

## 12. SAŽETAK

U ovom diplomskom radu napravljena je analiza različitih aspektata električne energije i tradicionalnih načina proizvodnje, kao i uloga novonastalih virtualnih elektrana u modernom energetsom sustavu. Opisane su karakteristike hidroelektrana, nuklearnih elektrana, termoelektrana te obnovljivih izvora energije kao što su biomasa, vjetroelektrane, solarna energija i geotermalna energija. Naglasak je stavljen na opisivanje koncepta i načina rada virtualnih elektrana, uključujući njihovu arhitekturu, hijerarhijske kontrolne metode i primjenu tehnologije Vehicle-to-Grid (V2G) kroz virtualne elektrane. Također, razmatrana je i istražena participacija virtualnih elektrana na tržištima električne energije, uključujući futures i forward market, bilateralne ugovore, tržište dan unaprijed, tržište pomoćnih usluga, tržište rezervi te tržište u stvarnom vremenu. Navedeni su izazovi s kojima se suočavaju virtualne elektrane, uključujući izazove kontrolnog i operativnog sustava, komunikacija i informacija, sigurnosti podataka te troškove u usporedbi s drugim izvorima energije. U radu je također opisana realizacija virtualne elektrane s P2G tehnologijom koristeći optimizacijski paket izrađen u sklopu projekta koji je financiran od strane europske unije DanuP-2-Gas. Da zaključimo, virtualne elektrane predstavljaju inovativan pristup u optimizaciji i upravljanju električnom energijom te imaju puni potencijal za pružanje fleksibilnosti, povećanje udjela OIE u mreži i smanjenje emisija stakleničkih plinova. Uz to, iako se suočavaju s određenim izazovima, kontinuirani razvoj tehnologija i regulativa otvara prostor za daljnji napredak i širenje virtualnih elektrana u budućnosti.

Ključne riječi: Virtualna elektrana, Obnovljivi izvori energije, smanjenje emisija stakleničkih plinova, tržište električnom energijom, P2G, DanuP-2-Gas

## SUMMARY

In this master's thesis are explored different aspects of electricity and how it's traditionally produced. It also focuses on the new idea of virtual power plants in today's energy system. It describes different types of power plants like hydroelectric, nuclear, and thermal plants, as well as renewable sources like biomass, wind, solar, and geothermal energy. A main focus is on explaining virtual power plants. Virtual power plants are presented like groups of power sources that work together, and they are describe how they're set up, how they're controlled, and how they use Vehicle-to-Grid (V2G) technology. In this master's thesis also talk about how these virtual power plants can be part of electricity markets. This means they can trade energy in various ways, like making contracts, trading for the next day, helping with extra services, and more. The challenges that these virtual power plants face are also mentioned, like how they're controlled, how they communicate, and how to keep data safe. We also compare their costs with other ways of making energy. The thesis also talks about making a virtual power plant using Power-to-Gas (P2G) technology. This was part of the DanuP-2-Gas project, supported by the European Union.

In conclusion, virtual power plants are a new way to make and manage electricity. They can be flexible, use more renewable energy, and help cut down emission of CO<sub>2</sub>. Even though they have some problems, technology and rules are getting better, so these virtual power plants have a bright future.

Keywords: Virtual Power Plant, Renewable Energy Sources, Reducing emission, Electricity Market, P2G, DanuP-2-Gas