

# Virtualne elektrane, stanje tehnike i budući trendovi

---

**Pavlinović, 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:190:135680>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-01**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**VIRTUALNE ELEKTRANE, STANJE TEHNIKE I BUDUĆI  
TRENDOVI**

Rijeka, rujan 2023.

Luka Pavlinović

0069083603

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**VIRTUALNE ELEKTRANE, STANJE TEHNIKE I BUDUĆI  
TRENDOVI**

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, rujan 2023.

Luka Pavlinović

0069083603

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Elektrane**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

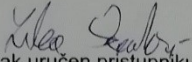
Pristupnik: **Luka Pavlinović (0069083603)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike  
Modul: Elektroenergetika

Zadatak: **Virtualne elektrane, stanje tehnike i budući trendovi / Virtual power plants, state of the art and future trends**

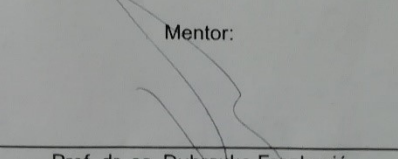
### Opis zadatka:

Virtualne elektrane kao upravljivi skup manjih, decentraliziranih proizvodnih postrojenja, upravljive potrošnje te sustava za pohranu energije, predstavljaju relativno nov entitet u današnjim elektroenergetskim sustavima sa značajnim potencijalom za budući rast. U radu je potrebno dati pregled tehnoloških rješenja prikladnih za agregaciju u sklopu virtualnih elektrana, postojeće projekte u svijetu i RH te moguć utjecaj ovakvih virtualnih postrojenja na elektroenergetske sustave.

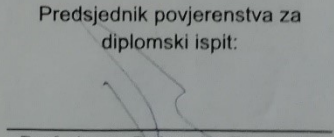
Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

  
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Ja, Luka Pavlinović, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad, koristeći se znanjem usvojenim tijekom studiranja kao i koristeći se potrebnom literaturom.



Rijeka, rujan 2023.

---

Luka Pavlinović

0069083603

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na podršci, strpljenju i stručnim savjetima tijekom pisanja ovog rada, ali i tijekom čitavog studija. Također, želim zahvaliti i ostalim profesorima što su bili spremni nesebično dijeliti saznanja iz struke.

Posebno zahvaljujem profesoru dr. sc. Ivanu Dražiću na pomoći za vrijeme studiranja.

Naposljetku, zahvaljujem svojoj obitelji koja me podupirala kroz cjelokupno školovanje.

## Sadržaj

1. Uvod .....	7
2. Stanje tehnike .....	9
2.1. Kratki povijesni pregled .....	9
2.2. Trenutno ustrojstvo elektroenergetskih mreža .....	11
2.2.1. Regulacija napona i frekvencije .....	11
2.3. Razvojne tendencije .....	13
2.3.1. Mrežni subjekti i njihove nadogradnje .....	15
2.3.2. Koncept upravljive potrošnje .....	18
2.4. Tehnološke barijere .....	21
2.4.1. Specifična snaga i kapacitet .....	21
2.4.2. Odziv frekvencije na poremećaje u mreži .....	26
3. Virtualne elektrane .....	30
3.1. Opće odrednice virtualne elektrane .....	30
3.2. Podjela .....	32
3.3. Koegzistencija s drugim subjektima u mreži .....	33
3.4. Optimizacija .....	34
3.4.1. Monetarni model .....	34
3.4.2. Tehnički model .....	36
3.5. Učešće virtualnih elektrana u regulaciji frekvencije .....	38
3.5.1. Čimbenici .....	39
3.5.2. Regulacija .....	39
3.6. Upravljanje rizikom .....	41
3.6.1. Metode za predviđanje tehničkog aspekta rizika .....	42
3.6.2. Metode za predviđanje financijskog aspekta rizika .....	43
4. Mreža sutrašnjice .....	45
4.1. Smart grid i kriptovalute .....	46
4.2. ESCO model .....	47
5. Integracija električnih vozila u mrežu (V2G) .....	50
5.1. Baterije vozila za pohranu energije .....	51
5.1.1. Izmjenjivači/ispravljači .....	52
5.1.2. Istosmjerni pretvarači .....	53
6. Zaključak .....	54
Sažetak .....	55
Summary .....	56
Literatura .....	57

## 1. Uvod

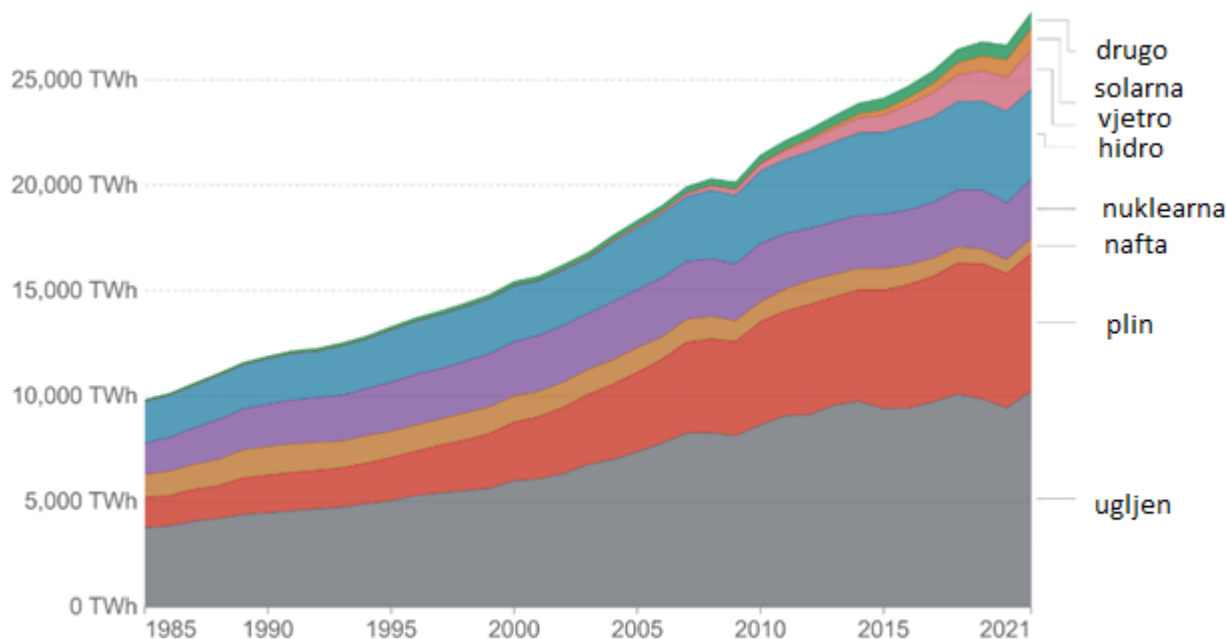
Svuda oko nas je zastupljena električna energija i njezina pretvorba u neki od uporabljivih oblika za odabranu radnju. Bilo da se radi o glačalu, perilici rublja, zamrzivaču ili nečemu drugom. Za većinu svjetskog stanovništva je dostupnost električne energije zadovoljavajućih pokazatelja kvalitete postala svakodnevica pa je, prema javnom mnijenju, uzeta zdravo za gotovo. No, u stvarnosti nije baš tako. Da bi određeni električni uređaj koji priključimo na elektroenergetsku mrežu kroz utičnicu odnosno električnu instalaciju u našem domu pravilno funkcionirao nužno je zadovoljiti više uvjeta kakvoće opskrbe električnom energijom. Jedino tada će uređaj raditi unutar granica projektiranih parametara. Posljedično, opskrba električnom energijom u vidu vođenja elektroenergetskog sustava nosi sa sobom izvjesne izazove zbog sukoba između tri ključna cilja koji često stoje u nesuglasju – sigurnosti opskrbe električnom energijom, njezine pristupačnosti i održivosti ravnoteže elektroenergetskog sustava. Ovi ciljevi sačinjavaju takozvanu trilemu energetske potrošnje gdje svaki autonomni elektroenergetski sustav ili njegov izolirani dio djeluje u području kompromisa među navedenim ciljevima. Izbor se ogleda u sljedećim pitanjima:

- "Kako osigurati opskrbu električnom energijom svakom korisniku?"
- "Koliki su povezani troškovi?"
- "Što je sa sigurnošću neprekinute opskrbe električnom energijom?"

Svi pristupnici mreži, neovisno radi li se o privatnim ili javnim osobama ili pak državnim predstavnicima, svakodnevno se suočavaju s potrebom da naprave kompromise između ovih ciljeva prilikom odabira opreme za proizvodnju i potrošnju električne energije. Štoviše, pod sigurnošću se ne podrazumijeva isključivo sigurnost opskrbe električnom energijom, već i sigurnost u ekološkom pogledu. Suvremeno društvo suočava se s izazovima koji imaju planetarni i esencijalni značaj. Ljudske aktivnosti značajno utječu na globalnu biosferu i klimu, s posljedicama koje se prelijevaju na ljude i životinje. Prognozira se da će negativni utjecaji i promjene postati sve ozbiljniji u većini regija tijekom preostalog dijela stoljeća. Odluke koje budemo donosili tijekom sljedećih godina imat će dugoročne posljedice. Te odluke mogu nas usmjeriti prema postavljenim ciljevima iz međunarodnih sporazuma o održivom razvoju i klimatskim promjenama ili nas, s druge strane, voditi prema daljnjem povećanju temperature s dalekosežnim i nepovratnim posljedicama na ekonomiju i društvo. Postojeći trendovi oblikuju proces energetske tranzicije i daju naslutiti smjer kojim se kreće. Rapidno smanjenje troškova obnovljivih tehnologija čini fosilna goriva manje atraktivnim opcijama za proizvodnju električne energije. Energetska tranzicija koja se temelji na obnovljivim izvorima energije i učinkovitim tehnologijama predstavlja našu najbolju šansu za suočavanje s izazovima globalnog zagrijavanja. Inovacije u energetskom sektoru koriste svim dijelovima društva, stvarajući nove prilike i bogatstvo obnovljivih opcija.

Globalni trendovi zadnjih godina pokazuju kako se sve više koriste obnovljivi izvori energije (*Slika 1.1.*). Razlog tome su razvoj povezanih tehnologija, geopolitička pitanja, smanjenje troškova investicije u elektrane na obnovljive izvore energije kao i sve veća dostupnost materijala "malom" korisniku.





Slika 1.1. Proizvodnja električne energije prema vrsti goriva

Zbog toga se pojavljuje sve veći broj malih i mikro-elektrana pa je primjetan i tok snaga obrnut od ustaljenog, odnosno iz pravca distribucijske mreže u prijenosnu mrežu - od distribuiranih proizvođača do krajnjih korisnika. Distribuirani proizvođači su u prosjeku bliže potrošačima u usporedbi s klasičnim energetske postrojenjima čiju poziciju diktiraju izvori energije. Usto su i manje instalirane snage što znači da ih treba više kako bi pokrili ukupne energetske potrebe na promatranom području pogotovo uzevši u obzir promjenjivost i nepredvidivost obnovljivih izvora energije. [1]

Gledano tehnički, distribuirani proizvođači povećavaju pouzdanost elektroenergetske mreže i smanjuju gubitke u prijenosu i distribuciji jer snaga prevaljuje kratak put do obližnjih korisnika od svakog distribuiranog proizvođača. To povećava kvalitetu isporučene električne energije. Manji gubici u prijenosu indirektno podrazumijevaju i manje emisije stakleničkih plinova kroz proizvodnju. Međutim, pored odabira mjesta izgradnje distribuiranih proizvođača, koje je često uvjetovano drugim faktorima, postoje i određeni izazovi pri upotrebi istih poput padova napona, nestabilnosti mreže i opasnosti od pojave otočnog rada. Značajan je i utjecaj na okolne vodove kako ne bi došlo do preopterećenja istih. Potrebno je upravljati distribuiranim izvorima na način da tokovi snaga budu optimalno topološki usmjereni i vremenski određeni radi dodatnog povećanja iskoristivosti. S tom mišlju se javlja pojam virtualne elektrane. Ovo je novitet na području elektroenergetike te nadzora i upravljanja mrežom. Zapravo se ne radi o elektrani kakvu poznajemo već o imaginarnoj cjelini kao skupu stvarnih umreženih proizvođača i potrošača. U ovisnosti o konkretnoj izvedbi moguće je da većinski ili čak u cijelosti ne postoji niti jedan fizički element koji sačinjava virtualnu elektranu, tzv. virtualna elektrana “u oblaku“.

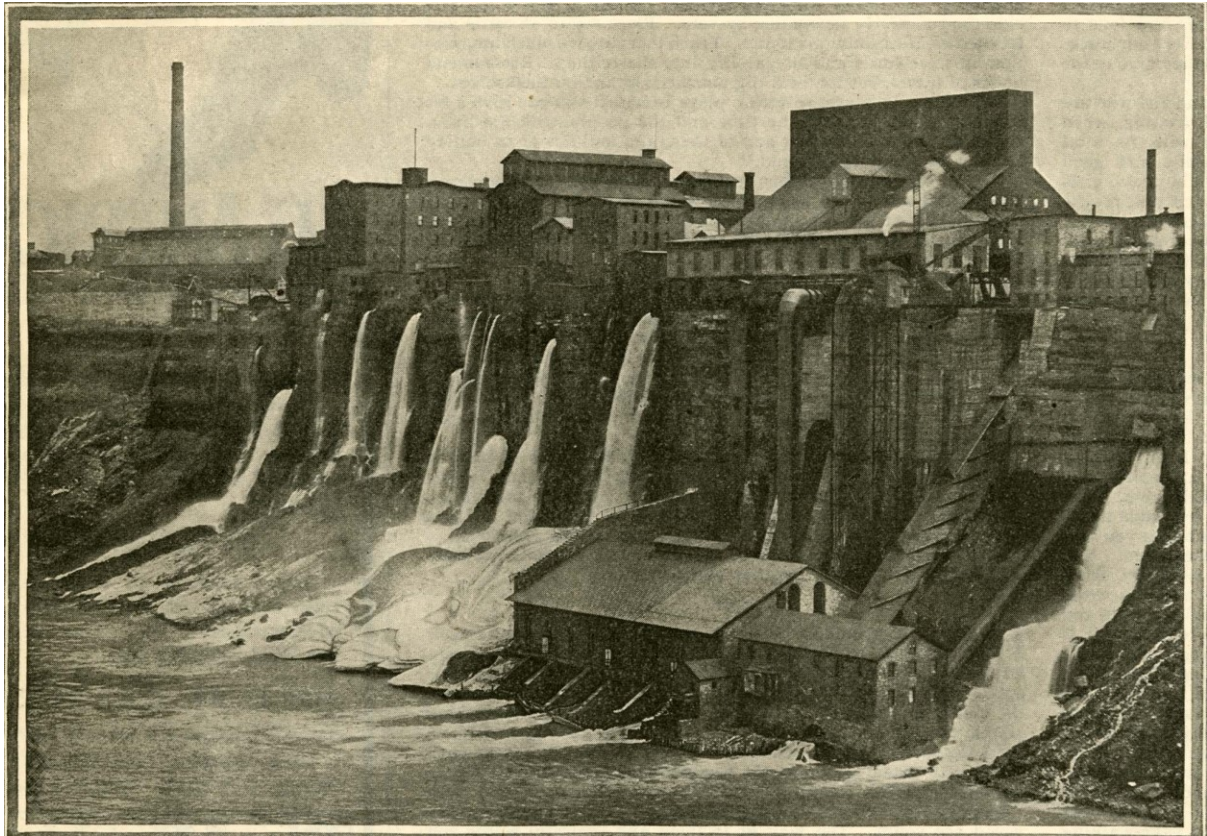
## 2. Stanje tehnike

Svaki veći organizirani sustav ima određenu dozu inherentne tromosti. Isto je i s elektroenergetskim sustavom. Naivno je očekivati da se promjene toliko sveobuhvatne da dotiču svakog čovjeka dogode preko noći. Stoga je prije svega potrebno razmotriti trenutna tehnička dostignuća i stanje tehnike te utvrditi tendencije razvoja elektroenergetskog sustava sukladno tome. U nastavku slijedi kratak pregled aktualnih tehnologija prisutnih u različitim granama elektrotehnike trenutno primijenjenih pri ustroju elektroenergetske mreže. No, prije svega razmotrimo nakratko kako je elektroenergetska mreža došla do stanja u kojem se danas nalazi.

### 2.1. Kratki povijesni pregled

Djelovanje električne struje danas je dobro poznat i općeprihvaćen koncept. Osnovna načela i pravila strujnog kruga uče se već tijekom osnovnog školovanja. Sukladno tome, vrlo je jednostavno doći do potrebnih saznanja i u vezi vođenja elektroenergetskog sustava. Zanimljiva je činjenica da pri početku formiranja električne mreže nije bilo ovog znanja. Zakonitosti prijenosa električne energije postajale su jasnije kroz vrijeme - dugo nakon što je prva Edisonova mreža izgrađena te je katastrofalno zakazala. Unatoč nedostatku znanja o prirodi tokova električne struje, kako je napredak u proizvodnji i prijenosu električne energije usavršavan, postalo je očito da električna energija ima jedinstvenu sposobnost naspram ostalih energenata, a to je sposobnost da može istovremeno opskrbljivati međusobno udaljene proizvođače i potrošače energijom. U usporedbi s drugim izvorima, tj. oblicima energije uporaba električne energije je znatno smanjila, ili bolje rečeno uklonila kašnjenja u opskrbi povezana s transportom energenata. Ova značajka električne struje odjeknula je i u drugim izumima 19. stoljeća - telegraf je od 1830-ih brzo prenosio poruke na lokalnim i globalnim udaljenostima. Telefon je izumljen 1876. te je postigao isto ljudskim glasovima, a radio je 1896. omogućio simultano širenje zvuka. Fonograf, izumljen 1877., je reproducirao zvuk na različitim lokacijama.

Kako je svaka od ovih tehnologija dobivala na značaju, istisnule su manje učinkovite parnjake. Telegraf je učinio da poštanska komunikacija izgleda tromo, telefon je nadmašio telegraf za razgovore na daljinu, a električna energija istisnula je parne strojeve. Sposobnost električne struje da trenutno prijeđe velike udaljenosti je omogućila premještanje bučnih parnih strojeva koji su ispuštali ugljen iz urbanih područja u okolice gradova. Pojava električne energije postupno je oslobodila korisnike ograničenja povezanih s proizvodnjom i potrošnjom energije na istom mjestu. To se proširilo i van granica fenomena preseljenja elektrana. Pokretne mlinove odvojilo se od kotača s lopaticama, tramvaje od konjskih zaprega i rasvjetu od izvora energije temeljenih na vatri. Naime, Pariz je 1878. pokrenuo prvu električnu uličnu rasvjetu na svijetu, a usvajanje električne rasvjete proširilo se kako su gradovi zamjenjivali plinske svjetiljke onima koje sadržavaju žarulju sa žarnom niti. Ulica Mosley u Newcastleu postala je prva koja je osvijetljena žaruljom sa žarnom niti 1879. godine, dok su Nürnberg i Berlin bili pioniri električne javne rasvjete u Njemačkoj nedugo nakon toga. Međutim, konceptu prijenosa energije na daljinu trebalo je oko sedamnaest godina da dobije široko priznanje, što je vidljivo u razlici između 1879. kad se pojavila prva mreža San Francisca i 1896. kada je pokrenuta elektrana Niagara Falls (*Slika 2.1.*) koja je prenosila struju do Buffala. Te su godine obilježile postupno iskorištavanje potencijala električne energije. [2]



*Slika 2.1. Hidroelektrana Niagara Falls*

Za vrijeme tog razdoblja svatko je jasno mogao uvidjeti praktičnost i pristupačnost električne energije u svojstvu energenta za rasvjetna tijela. Kako je vrijeme prolazilo to se svojstvo pretočilo i na druge sfere, načelno opskrbu energijom. Manje poznata, ali značajna bila je primjena električne rasvjete s lokalno postavljenim generatorom i vodenom turbinom u rudnicima zlata u Sierra Nevadi, gdje je prva električna mreža za rasvjetu rudnika bila operativna 1879. Kako je električna energija postajala neophodna za industrijske aktivnosti, mreža se proširivala kako bi udovoljila uvjetima priključenja postrojenja na istu.

Iako se Thomasu Edison često pripisuje zasluga za izum žarulje, njegov doprinos razumijevanju djelovanja strujnih i naponskih prilika u paralelnom strujnom krugu bio je jednako utjecajan. Prijelaz sa serijske na paralelnu prijenosnu mrežu označio je prvu revoluciju mreže. Do tada su potrošači, naročito ulične svjetiljke, bili priključeni serijski što je bilo kobno za sigurnost mreže u slučaju kvara jedne lampe. Rana povijest mreže odražava brz tehnološki napredak te skreće pažnju na definiciju same elektroenergetike kao evolucije greške. Svakom novom inačicom popravljaju se nedostaci stare dok se njezini vlastiti otkrivaju postepeno i čekaju neku novu tehnologiju da ih ukloni. Tako je sve do danas.

Konkurencija je natjerala prve izumitelje da popune praznine na tržištu, što je rezultiralo inovativnim proizvodima. Mnogi od njih su danas sastavni dio elektroenergetskog sustava. Izvedbe električne infrastrukture koje smo možda smatrali zastarjelima ponovo postaju relevantne danas, tijekom reformiranja elektroenergetskog sustava. Unatoč 130-godišnjoj dominaciji izmjenične struje nad istosmjernom, istosmjerna struja doživljava ponovni porast

zastupljenosti s povećanjem broja solarnih panela zbog svoje prikladnosti za male privatne elektroenergetske sustave. Privlačnost privatnog vlasništva i upravljanja ograničenim resursima dobro se slaže s prednostima istosmjerne struje. Dok rekonstruiramo i ponovno definiramo našu mrežu bitno je pratiti razvojni put koji je doveo do mreže kakvu imamo danas.

## 2.2. Trenutno ustrojstvo elektroenergetskih mreža

Odmakom od vertikalno ustrojenog elektroenergetskog sustava dolazi do pojave slobodnog tržišta reguliranog od strane nadležnih tijela, najčešće regulatornih agencija. Moguće je pristupiti mreži u svojstvu kupca, ali i prodavatelja električne energije kao i trgovati energijom bilo na burzi bilo putem kratkoročnih ili dugoročnih bilateralnih ugovora među strankama. Ova promjena sa sobom donosi osjetno unaprijeđenje transparentnosti sustava i omogućuje pristup djelatnostima iz energetske sektora znatno većem broju građana nego li je to slučaj kod vertikalnog, po prirodi monopolističkog modela. No, ove su promjene usko vezane isključivo uz monetarni odnosno pravno-imovinski aspekt uporabe električne mreže. S tehničke strane nema značajnijih izmjena. I dalje je situacija dominantno jednaka kao i u prošlim desetljećima. Sustav se dijeli na proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju. Koriste se visoke naponske razine za prijenos preko većih udaljenosti radi smanjenja gubitaka, a tok snage je načelno jednosmjernan – od strane prijenosa preko distribucije prema krajnjem potrošaču. Takva struktura ne dozvoljava ispunjavanje nužnih uvjeta za prelazak na potpuno distribuiranu proizvodnju električne energije te nepovoljno djeluje na sigurnost i redundantnost opskrbe.

### 2.2.1. Regulacija napona i frekvencije

Održavanje frekvencije je jedna od usluga elektroenergetskog sustava kojom se frekvencija elektroenergetskog sustava održava unutar dozvoljenih granica odstupanja. Održavanje frekvencije postiže se putem pomoćnih usluga elektroenergetskog sustava. Konkretno se radi o *rezervi snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene*, također znanom kao rezerva snage za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom, *rezervi snage za tercijarnu regulaciju za uravnoteženje elektroenergetskog sustava*, poznatoj pod terminom rezerva snage za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnom aktivacijom, te *rezervi snage za tercijarnu regulaciju za sigurnost elektroenergetskog sustava*, nazivanoj i rezerva snage za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnom aktivacijom za sigurnost sustava. Osim navedenih tu je i *rad jedinica pružatelja rezervi za održavanje frekvencije* vezano za primarnu regulaciju.

Deklarirana točnost frekvencije elektroenergetskog sustava zadana je *Uredbom Komisije (EU) 2017/1485 od 2. kolovoza 2017. o uspostavljanju smjernica za pogon elektroenergetskog prijenosnog sustava, Mrežnim pravilima prijenosnog sustava i Uvjetima kvalitete opskrbe električnom energijom*. Operator prijenosnog sustava određuje vrste pomoćnih usluga, opseg dobave pomoćnih usluga kao i pružatelje pomoćnih usluga te razdoblje njihove dobave. Operator prijenosnog sustava ugovara iste s pojedinačnim korisnikom mreže.

Primarna regulacija predstavlja najbržu i najneposredniju reakciju na fluktuacije u frekvenciji uzrokovane razlikama u potrošnji i proizvodnji električne energije, no radi se o bazičnom

upravljačkom mehanizmu. Riječ je o automatskom regulacijskom djelovanju na razini sustava sa odzivom djelatne snage koji ostvaruju sustavi regulacije proizvodnih jedinica i ostalih korisnika prijenosne mreže kod odstupanja pogonske frekvencije od zadane, tj. nazivne vrijednosti frekvencije. Primarnom regulacijom obuhvaćeno je djelovanje turbinskih regulatora brzine vrtnje, odnosno regulatora frekvencije radi postizanja ravnoteže između proizvodnje i potrošnje na razini sustava. Ovisno o tehnološkim različitostima i nazivnoj snazi proizvodnih jedinica svaka veća proizvodna jedinica treba biti osposobljena za primarnu regulaciju frekvencije sukladno zahtjevima iz Mrežnih pravila prijenosnog sustava. To uključuje automatizirane prilagodbe izlazne snage generatora s ciljem usklađivanja frekvencije mreže. Kod međusobno povezanih mreža generatori su konstruirani tako da reagiraju na promjene u frekvenciji. Ukoliko je primijećen porast potrošnje, što dovodi do pada frekvencije, generatori pojačavaju svoj izlaz kako bi ponovno uspostavili nazivnu frekvenciju i obrnuto.

Sekundarna regulacija djeluje na nešto sporijoj, u pravilu minutnoj, vremenskoj skali u usporedbi s primarnom regulacijom. Cilj je postizanje regulacije frekvencije na razini elektroenergetskog sustava radi održavanja frekvencije i planirane snage razmjene između umreženih sustava, odnosno održavanja frekvencije u izoliranom pogonu regulacijskog područja ili dijela elektroenergetskog sustava. Sekundarna regulacija ostvaruje se posredstvom regulatora regulacijskog područja koji automatski djeluje preko sustava regulacije brzine vrtnje proizvodnih jedinica i grupnih regulatora djelatne snage elektrane, pod uvjetom da su instalirani u elektranama s više proizvodnih jedinica. Sekundarna regulacija mora preuzeti djelovanje od primarne regulacije te osloboditi opseg primarne regulacije za buduće djelovanje. Proizvodna jedinica mora biti u stanju mijenjati djelatnu snagu unutar ugovorenog opsega snage minimalnom brzinom od 2% nazivne djelatne snage unutar jedne minute.

Tercijarna regulacija podrazumijeva dugoročnije pomno planirane regulacijske radnje poduzete kako bi se osigurala trajna stabilnost mreže uzevši u obzir ograničenja prijenosnog sustava. Definira se kao regulacijska funkcija djelatne snage na razini elektroenergetskog sustava kojom se temeljem zahtjeva dispečera operatora prijenosnog sustava korigira planirani rad proizvodnih jedinica u tercijarnoj regulaciji oslobađajući potrebne rezerve sekundarne regulacije. Tercijarna regulacija mora biti aktivirana u potpunosti u roku od 15 minuta od izdavanja zahtjeva dispečera operatora prijenosnog sustava. Kao što je vidljivo iz uvida u pomoćne usluge elektroenergetskog sustava, u hrvatskom se elektroenergetskom sustavu tercijarna regulacija dijeli na tercijarnu regulaciju za uravnoteženje sustava i tercijarnu regulaciju za sigurnost sustava.

Sve tri regulacijske razine rade skladno kako bi očuvale ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije, jamčeći pouzdan rad električne mreže unutar dozvoljenog odstupanja od nazivne frekvencije. Važno je istaknuti da se primarna i sekundarna regulacija po svojoj prirodi značajno oslanjaju na fenomen tromosti sinkronih strojeva i pripadnih zamašnih masa o čemu će biti riječi u nastavku. Za razliku od njih tercijarna regulacija nije zahvaćena ovim svojstvima iz razloga što djeluje na široj vremenskoj skali od vremena iščezavanja tranzijentnih pojava.

Kao i održavanje frekvencije, održavanje napona je usluga elektroenergetskog sustava kojom se napon održava u rasponu zadanom istim aktima kao što je to slučaj kod održavanja frekvencije, a koji su navedeni na početku ovog potpoglavlja. Održavanje napona kao i tokova

jalove energije u mreži postiže se regulacijom prijenosnih omjera transformatora, radom proizvodnih jedinica unutar granica propisanog opsega faktora snage, uporabom kompenzacijskih uređaja te pomoćnim uslugama *regulacije napona i jalove snage proizvodnjom ili potrošnjom jalove energije i kompenzacijskim radom za potrebe regulacije napona i jalove snage*.

### 2.3. Razvojne tendencije

Proces decentralizacije odnosi se na pojavu značajnog priljeva novih proizvodnih kapaciteta unutar distribucijskih mreža zbog sve veće zastupljenosti varijabilnih obnovljivih izvora energije. Kako se učešće obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu povećava, niz drugih distribuiranih izvora energije se također priključuje na distribucijske mreže. Ovaj zadatak osiguravanja mrežnih priključaka više nije isključivo odgovornost operatora prijenosnih sustava, već čak i najmanji operatori distribucijskog sustava moraju predvidjeti priključke za takve izvore. Tehnički preduvjeti, navedeni u Mrežnim pravilima, postaju važni čak i na dijelovima mreže koja radi pri najnižim naponskim razinama.

S obzirom na to da se disperzirani proizvodni kapaciteti često priključuju na mrežu na mjestima blizu potrošača, decentralizacija dodatno zamagljuje razliku između priključaka namijenjenih generatorima i onih namijenjenih potrošačima. Mrežna pravila bi trebala biti revidirana u svrhu progresivnog zanemarivanja toga je li pristupnik mreži naznačen kao potrošač ili proizvođač energije. Ovakav pristup nalazi uporište u sve većem prihvaćanju sustava za pohranu energije i implementiranju upravljive potrošnje, gdje više nema jednoznačno određenih uloga subjekata.

Porastom proizvodnih kapaciteta i povećanjem upravljivosti unutar distribucijskih sustava, decentralizacija donosi i nove izazove, ali i dosad neiskorišten potencijal za optimizaciju tokova snaga. Ovi izazovi obuhvaćaju potrebu za nadzorom i upravljanjem stanjem sustava unutar distribucijskih mreža kako bi se spriječilo kršenje operativnih ograničenja. Uz to, učinkovito planiranje i ulaganje su imperativ s obzirom na povećanu varijabilnost i neizvjesnost oko budućih načina korištenja mreže. Nasuprot tome, pojavljuju se prilike u vezi s efektivnijim korištenjem postojećih mrežnih sredstava što odgađa potrebu za opsežnom nadogradnjom sustava. Manja potreba za nadogradnjom nosi manje investicijske troškove. Dodatna mogućnost je pružanje pomoćnih usluga operatoru sustava. Rješavanje spomenutih izazova i iskorištavanje prilike za suradnju s operatorima sustava olakšano je pojavom naprednih digitalnih sustava upravljanja.

Zbog kompaktnosti i brojnosti distribuiranih izvora, vlasnici proizvodnih jedinica praktički ne mogu zaposliti ljudsko osoblje koje bi učinkovito nadziralo svaku pojedinačnu jedinicu. Na sreću, zbog globalnog razvoja digitalne komunikacijske infrastrukture, ta je potreba eliminirana. Suvremene vjetroturbine, solarni fotonaponski paneli, upravljački sustavi baterija i uređaji koji troše električnu energiju unutar samog proizvodnog kapaciteta sačinjavaju skladnu cjelinu i opremljeni su digitalnim komunikacijskim sučeljima, dajući korisnicima mogućnost provjere njihovog statusa i praćenja njihova rada. Ova se sučelja lako povezuju s podatkovnim mrežama daleko od lokacije korisnika, omogućujući daljinski nadzor i ograničene mogućnosti daljinskog održavanja poput ažuriranja upravljačkog programa.

Odvajanje sklopovlja i upravljačkih programa ključni je element digitalizacije. To se ne odnosi samo na telekomunikacijsku opremu već i na sam dio energetske elektronike. Izvori energije koji rade s ispravljačima pokazuju značajno veći stupanj upravljivosti u usporedbi sa sinkronim strojevima. Na primjer, odzivi na smetnje napona ili frekvencije uvelike ovise o programu upravljačkog uređaja i stoga se mogu relativno lako izmijeniti, sve dok ostaju unutar parametara primarnog izvora energije, primjerice fotonaponskog panela. Suprotno tome, sinkroni strojevi u velikoj su mjeri definirani električkim parametrima stroja, što izmjene čini izazovnim.

Kada je energetskom sklopovlju moguće pristupiti putem sučelja za daljinski nadzor i upravljanje, sprječavanje neovlaštenog pristupa komunikacijskom kanalu postaje najvažnije. Mogućnost ažuriranja upravljačkog programa u bilo kojem trenutku za rješavanje novootkrivenih sigurnosnih propusta je ključna, inače programske pogreške i zlonamjerni upadi postaju dodatna prijetnja sigurnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava. Budući da se mehanizam ažuriranja upravljačkog programa može zloupotrijebiti, mora se zaštititi od neovlaštenog uplita treće stranke i na strani pošiljatelja i na strani primatelja zahtjeva. Otkrivanje kompromitiranih komponenti također mora biti izvedivo, zajedno s implementacijom protokola za rješavanje takvih situacija. Kibernetička sigurnost predstavlja glavni izazov u području digitalizacije. Zaštita privatnosti čini gotovo jednako značajan izazov. Instalacije distribuiranih energetskih izvora manjih instaliranih snaga često se nalaze na mjestima gdje je potrošnja električne energije velika, što znači da bi svako neovlašteno praćenje ili nadzor potencijalno mogli otkriti lokalne obrasce potrošnje, omogućujući zaključke o ponašanju samih korisnika. Kako bi se to spriječilo, pristup podacima na razini korisnika mora biti kontroliran, a metode agregacije moraju biti pažljivo osmišljene za suzbijanje takvih rizika. Ovaj se čimbenik mora uzeti u obzir pri projektiranju i uvođenju infrastrukture naprednog mjerenja. U određenim zemljama, poput Njemačke, komunikacijski uređaji naprednih brojila također služe kao komunikacijski čvorovi koji nadziru sigurnu komunikaciju između operatora sustava i lokalnog distribuiranog izvora energije. [3]

Osiguravanje objedinjenog pristupa svim resursima koji mogu biti upravljani s korisničke strane nije samo korisno zbog sigurnosti i privatnosti, već je i sve važnije kako sve veći broj resursa postaje fleksibilne prirode. To uključuje sustave kućne automatizacije, prilagodljive sustave klimatizacije, baterijske sustave za pohranu energije, dizalice topline i mikro-kombinirane parno plinske generatore, a sve to doprinosi skromnoj razini fleksibilnosti sustava prikladnoj za optimizaciju pogonskih parametara. Očekuje se da će integracija električnih vozila donijeti značajno povećanje fleksibilnosti distribucijske mreže, a integracija ovog potencijala u vidu vođenja elektroenergetskog sustava je točka fokusa brojnih istraživanja.

Naime, elektrifikacija sektora krajnjih korisnika poboljšava integraciju varijabilne obnovljive energije u elektroenergetski sustav na dva načina: promiče lokalne instalacije varijabilnih obnovljivih izvora za optimizaciju tokova snaga na licu mjesta i pruža fleksibilnost operatorima sustava, olakšavajući smještaj većeg udjela obnovljivih izvora u potpunom sustavu. Pravila za priključenje na mrežu izrađena su kako bi se definirali zahtjevi koje korisnici moraju ispuniti kako bi ostvarili te ciljeve.

Zbog zamršenih i ponekad proturječnih ciljeva koje Mrežna pravila trebaju rješavati, metodički proces razvoja i revizije, koji uključuje opsežno uključivanje sudionika, ključan je za formiranje Pravila za priključenje na mrežu.

### 2.3.1. Mrežni subjekti i njihove nadogradnje

Većina proizvodnje električne energije na svjetskoj razini se i dalje vrši u centraliziranim elektranama. Padajući troškovi i sve manja složenost uspostave obnovljivih izvora energije i malih energetske izvora potaknuli su entuzijazam i gospodarski zamah oko decentralizirane proizvodnje energije i širenja distribuiranih energetske resursa. Mnogi od ovih resursa već su postojali u različitoj mjeri za određene potrošače električne energije. Na primjer, mali rezervni generatori naširoko se koriste kao sustavi napajanja u hitnim slučajevima za kritične infrastrukture poput bolnica, podatkovnih centara, sigurnosnih sustava za hitne slučajeve u stambenim zgradama, pa čak i termoelektrana i nuklearnih elektrana. Ovi kompaktni generatori igraju ključnu ulogu u održavanju životno važnih sustava operativnim tijekom prekida u opskrbi električnom energijom. Obično koriste benzinske ili dizel motore, a ponekad i motore koji koriste propan ili prirodni plin. Te jedinice variraju u snazi od nekoliko kW za stambene potrebe snage pripravnosti do nekoliko MW za veće komercijalne rezervne sustave. Primjetno je da termoelektrane, kao što su elektrane na ugljen i plin, zahtijevaju električnu energiju za pokretanje, što zahtijeva priključak na mrežu ili alternativni izvor energije. U praksi su ti manji generatori bili manje učinkoviti i skuplji u usporedbi s većim elektranama, stoga je oslanjanje na mrežnu energiju za potrebe pokretanja obično bilo isplativije. Unatoč tome što se određene moderne rezervne jedinice približavaju razinama učinkovitosti namjenskih elektrana, one su obično znatno skuplje od manje učinkovitih analoga i uglavnom se koriste u udaljenim okruženjima poput naftnih i plinskih bušotina ili vojnih baza.

Iako mnoge generatorske jedinice u pripravnosti imaju prihvatljive razine emisije, jedinice koje se koriste isključivo za pomoć u hitnim slučajevima podliježu manje strogim propisima. Uzmimo za primjer slučaj SAD-a, gdje je velik broj takvih generatora, a propise o njihovoj uporabi je postavila Agencija za zaštitu okoliša Sjedinjenih Država (EPA). Ti generatori emitiraju više stakleničkih plinova od namjenskih generatora. EPA također obvezuje pomoćne generatore za hitne slučajeve na ograničenu upotrebu bez hitnih slučajeva do stotinu sati godišnje, što uključuje održavanje i otpremu u slučajevima spriječavanja neizbježnih prekida opskrbe električnom energijom, zajedno s dodatnih pedeset sati godišnje za rad koji nije hitan. Ovo ograničenje rada za svrhe koje nisu u stanju nužde spriječava aranžmane usmjerene na profit i općenito ne doprinosi aspektu pouzdanosti mreže. Ove rezervne jedinice napajanja predstavljaju jedan od najranijih primjera distribuiranih izvora energije i nastaviti će se koristiti u svojoj ulozi podrške kritičnim sustavima.

Međutim, distribuirana proizvodnja koja se oslanja na fosilna goriva pokazala se skupljom alternativom u usporedbi s centraliziranom proizvodnjom u termoelektranama. S druge strane, distribuirani izvori energije koji nisu predviđeni za rad u hitnim slučajevima, kao što su mali obnovljivi izvori, skladišta energije i sredstva za upravljanje potrošnjom, predstavljaju potencijalno niže troškove i veće prednosti od konvencionalnih termoelektrana. Distribuirani obnovljivi izvori energije nude i pouzdanost i financijsku korist. Za stambenu namjenu, instalacije kao što su solarni fotonaponski sustavi, pohrana energije temeljena na baterijama i mikro-hidro ili vjetroelektrane mogu biti ekonomski isplative, iako imaju skromnu instaliranu



snagu. Distribuirani energetske izvori nalaze još veću primjenu u komercijalnom sektoru, budući da komercijalne zgrade imaju tendenciju da troše više energije, imaju jače financijske poticaje i resurse za smanjenje potrošnje energije te mogu uživati u različitim povlasticama povezanim sa smanjenjem emisija ugljikovog dioksida.

Distribuirani izvori energije predstavljaju tri temeljne prednosti zajedničke svim projektima gdje se razmatraju kao rješenje - financijska korist, poboljšanje pouzdanosti i korist za okoliš. Za većinu privatnih korisnika i tvrtki, privlačnost ušteda i poboljšana pouzdanost najprivlačniji su aspekti ulaganja u energetske resurse. Potencijal za smanjenjem troškova čini ulaganja vrlo procjenjivima, a potencijalni poremećaji i značajni troškovi povezani s hipotetskim nestankom struje poznati su većini vlasnika kuća i poslovnih subjekata. U prošlosti, kada su troškovi distribuirane proizvodnje bili puno veći nego danas, dobrobit okoliša bila je primarna pokretačka snaga takvih projekata. Ekološka svijest motivirala je mnoge velike korporativne i komercijalne projekte. Ova je motivacija odigrala ključnu ulogu u stvaranju dovoljne potražnje kako bi se u konačnici troškovi projekta smanjili do točke u kojoj bi sama ekonomska razmatranja pokretala potražnju.

Pretežno ekonomski motivi obilježiti će izgradnju distribuiranih izvora energije tijekom sljedeća tri desetljeća. Razdoblje povrata za većinu takvih investicija općenito se smanjilo zbog pada troškova i trajno visokih cijena električne energije, čineći ove sustave financijski samoodrživijima. Neki komercijalni projekti upravljive potrošnje ili skladištenja energije sada se mogu pohvaliti razdobljima povrata kraćim od osamnaest mjeseci. Čak i skuplja rješenja za pohranu energije u stambenim zgradama postaju dovoljno pristupačna da se korist od pohrane rezervne energije u hitnim slučajevima smatra usputnim dodatkom financijskom povratu.

Za stambene solarne fotonaponske sustave, proizvedena energija kompenzira troškove energije inače preuzete iz mreže. Većina ovih sustava trenutačno ima razdoblje povrata od četiri do deset godina, ovisno o financijskim poticajima, detaljima instalacije, radnim uvjetima i troškovima održavanja sustava. Očekuje se daljnji pad troškova, čineći ova ulaganja još privlačnijima. Međutim, najisplativiji sustavi često koriste izmjenjivače sinkronizirane s mrežom, koji zahtijevaju priključak na elektroenergetsku mrežu za funkcioniranje. Za razliku od samostalnih ili hibridnih pretvarača, mrežom vođeni izmjenjivači sinkroniziraju izlazni napon i frekvenciju s naponom i frekvencijom električne mreže pri čemu fazni naponi mreže služe kao ulazni signali za logičko sklopovlje koje upravlja energetske dijelom izmjenjivača. Samostalni izmjenjivači rade autonomno, odvojeni od mreže, proizvodeći na izlazu napon i frekvenciju koji ne moraju nužno odgovarati onima u elektroenergetskoj mreži. S druge strane, najskuplji sustavi koriste hibridne pretvarače koji mogu poslužiti kao samostalni pretvarači za punjenje baterija ili drugih sustava za pohranu, dok se također sinkroniziraju s mrežom za izvoz viška energije. U dobro osunčanim regijama s visokim cijenama električne energije, ovi hibridni sustavi u kombinaciji s pohranom, koji se nazivaju "solar plus pohrana" (Solar+), sve su privlačniji.

U smislu komercijalnih instalacija, skladištenje energije može biti posebno isplativo za poduzeća koja podliježu naknadama za premašivanje vršnog opterećenja. Te se naknade temelje na zabilježenoj 15-minutnoj vršnoj snazi, a fakturiraju se uz ukupnu potrošnju energije. Smanjenje vršne potrošnje energije izravno se prevodi u niže troškove, često značajno. Aktivnosti koje zahtijevaju velike električne motore ili tešku opremu mogu dovesti do trenutnih

skokova potrošnje energije. Za tvrtke s kratkim razdobljima intenzivne potrošnje energije, koja znatno premašuje njihovu redovitu potrošnju, ulaganje u skladištenje energije za pokrivanje ovih kratkih razdoblja velike vršne potrošnje može rezultirati brzim razdobljima povrata i visokim stopama povrata. Lazardovo izvješće iz 2018. o niveliranim troškovima pohrane ukazuje na globalne prosječne interne stope povrata između 12 % i 20 % za samostalnu komercijalnu pohranu. [4]

Za dovoljno velike komercijalne projekte skladištenja, posebno u regijama s poduzećima koja razmišljaju o budućnosti, dodatni tokovi prihoda mogu se ostvariti nuđenjem pomoćnih usluga lokalnom mrežnom operatoru prijenosnog sustava. U nekim područjima, ti izvori prihoda sami po sebi mogu učiniti projekt skladištenja ekonomski održivim. Takvi projekti također mogu pomoći mrežnim operatorima da smanje ulaganja u prijenosnu infrastrukturu, budući da smanjena vršna potrošnja i povećanje kapaciteta pomoćnih usluga jačaju stabilnost mreže.

Štoviše, distribuirani izvori energije umanjuju potrebu za opsežnom prijenosnom infrastrukturom. Postrojenja koja proizvode energiju zahtijevaju manje vršne tokove snage iz pravca mreže. Ovo smanjenje korištenja dalekovoda je značajno jer omogućuje usmjeravanje ulaganja prema proizvodnji obnovljivih izvora energije i prijenosu na velike udaljenosti, a ne prema lokalnoj infrastrukturi.

*Tablica 2.1. Današnje tehnologije elektroenergetskog sustava i napredni parnjaci*

<b>Trenutna tehnologija</b>	<b>Predstojeća inačica</b>
Regulacija dotoka goriva generatora	Varijabilna obnovljiva proizvodnja
Sinkroni strojevi	Izmjenjivački potpomognute rezerve
Velika energetska postrojenja	Distribuirani izvori
Upravljiva proizvodnja	Upravljiva proizvodnja, potrošnja i pohrana
Procesna automatizacija	Autonomni rad, digitalna napredna mreža
Električna struja i rasvjeta	El. struja, rasvjeta, grijanje i prijevoz
Potrošači (eng. "Consumers")	"Prosumeri"

Tijekom redovnog pogona mreže, rotirajuće rezerve igraju ključnu ulogu brzim odzivom na značajne smetnje unutar 10 sekundi, osiguravajući stabilnost frekvencije. U prvih 10 sekundi, frekvencijski odziv mreže oslanja se na inerciju generatora unutar sustava. Brzina promjene frekvencije nakon poremećaja, kao što je gubitak generatora ili prijenosa, izravno je povezana s kombiniranom inercijom mreže u tom trenutku. Inercija sinkronih generatora trenutno prenosi energiju iz rotirajuće mase generatora u mrežu, ublažavajući neravnotežu i stabilizirajući sustav. Ove situacije zahtijevaju brze reakcije sustava za pohranu energije. Tzv. "brza" pohrana jamči glatkiji prijelaz s brzih promjena frekvencije nakon poremećaja na vraćanje normalne frekvencije mreže. Način rada frekvencijskog odziva sustava za pohranu zahtijeva radnje unutar intervala od par milisekundi do nekoliko sekundi.

Kao što smo vidjeli u *potpoglavlju 2.2.1.*, stabilnost napona unutar mreže održava se injektiranjem ili apsorpcijom jalove snage. Tradicionalno rješenje je da sinkroni generatori obavljaju ovaj zadatak, zajedno sa specijaliziranom opremom kao što su statički sinkroni kompenzatori, koji reguliraju napon dajući ili apsorbirajući reaktivnu snagu iz mreže. Pretvarači jedinica za pohranu energije mogu trenutno ubaciti ili apsorbirati jalovu snagu u/iz mreže kako bi stabilizirali napon.

U mrežama s visokom integracijom obnovljive energije nestabilnost može nastati zbog rada baznih generatora koji moraju raditi tijekom razdoblja visoke potrošnje, što uključuje velik dio proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. U takvim slučajevima, nedostatak dovoljnih rotirajućih rezervi može dovesti do nestabilnosti mreže, jer se promjene u neto opterećenju (opterećenje minus proizvodnja obnovljive energije) ne mogu kompenzirati samo rotirajućim rezervama. Jedinice za pohranu energije mogu riješiti ovaj problem brzim injektiranjem djelatne energije u mrežu, učinkovito zauzimajući ulogu pružatelja rezervnih rotirajućih rezervi.

### 2.3.2. Koncept upravljive potrošnje

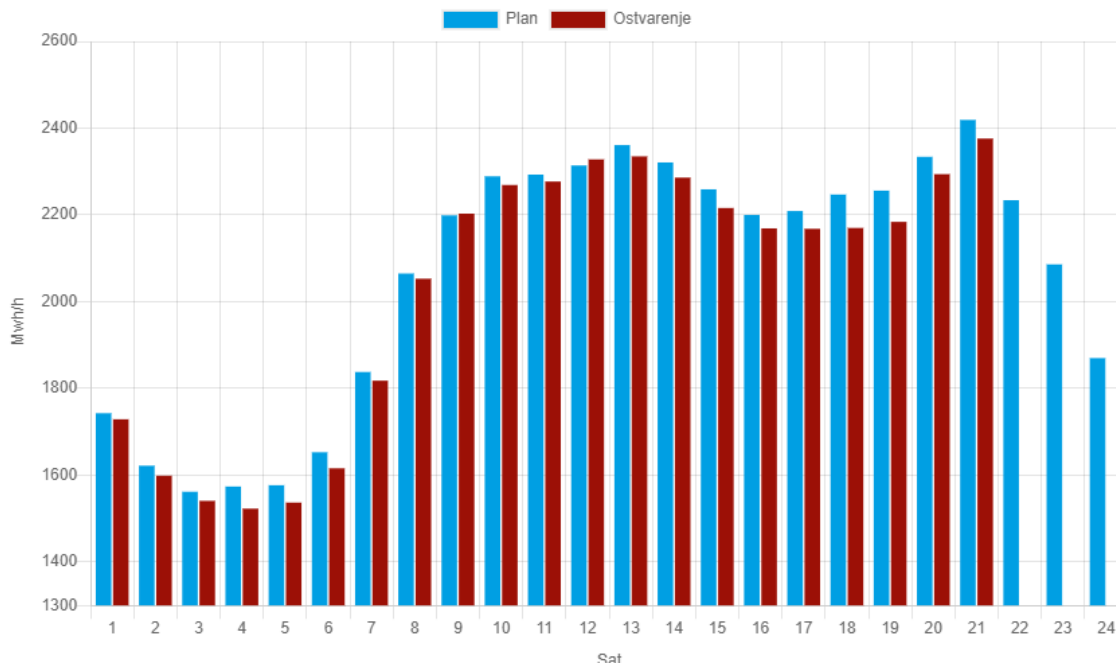
Drugi aspekt prilagodljive i distribuirane električne mreže uključuje učinkovito upravljanje potrošnjom. Tradicionalno se ravnoteža između proizvodnje i potrošnje održava povećanjem proizvodnje i uključivanjem dodatnih generatora. Međutim, što ako umjesto povećanja proizvodnje, operatori prijenosnog sustava mogu smanjiti potrošnju?

Tehnologije upravljive potrošnje omogućuju operatorima prijenosnog i distribucijskog sustava da smanje potrošnju. Ove tehnologije i programi omogućuju potrošačima i tvrtkama da operaterima sustava daju ovlaštenje da upravljaju njihovim uređajima i opremom omogućujući im da smanje ili privremeno obustave njihovu upotrebu. Ako se znatan broj uređaja može uključiti u takve programe upravljive potrošnje kumulativno smanjenje potrošnje može eliminirati potrebu za izgradnjom vršnih elektrana ili provedbom obveznog smanjenja opterećenja. Ova kolektivna predanost upravljivoj potrošnji također može pomoći operatorima prijenosnog i distribucijskog sustava da odgode skupa ulaganja u novu prijenosnu i proizvodnu infrastrukturu.

Brojne tvrtke za opskrbu električnom energijom diljem svijeta implementirale su tarifne sustave usmjerene na smanjenje vršne potrošnje i osiguravanje učinkovitije opskrbe električnom energijom kao i pouzdanosti mreže. To često uključuje određivanje cijena prema dobu dana i naknade za potražnju u korelaciji s vršnom potrošnjom. Međutim, ovakvi tarifni sustavi nisu dovoljno motivirajući za prosječne potrošače. Na primjer, povećanje od samo 5 euro-centi po kWh tijekom vršnih sati obično nije dovoljno značajno da obeshrabri privatne korisnike od korištenja primjerice klima uređaja.

Automatske sheme su učinkovitije u utjecanju na ponašanje potrošača. Klasičan primjer inicijative za upravljivu potrošnju uključuje klimatizaciju. Mnoge tvrtke za opskrbu električnom energijom nude programe u kojima se vlasnici kuća mogu odlučiti za shemu koja tvrtci za opskrbu električnom energijom omogućuje upravljanje njihovim klima uređajima

tijekom ljetnih dana. Takav sustav omogućuje tvrtci za opskrbu električnom energijom da prilagodi snagu ili isključi jedinicu klima uređaja što rezultira smanjenjem opterećenja od oko 3 do 5 kW po tipičnoj jedinici. Uključivanjem tisuća kupaca, kumulativno smanjenje potrošnje može se mjeriti s elektranom “pristojne veličine“. Potrošači koji sudjeluju obično dobivaju kompenzaciju, stvarajući obostranu korist. Korisnici dobivaju ekonomičnu električnu energiju u zamjenu za blago povećanje nelagode tijekom vrućeg vremena, dok tvrtke za opskrbu električnom energijom i posljedično operatori sustava mogu izbjeći uporabu generatora za pokrivanje vršnog opterećenja ili ulaganje u nove prijenosne i proizvodne resurse.



Slika 2.2. Dnevni dijagram potrošnje u Republici Hrvatskoj za dan u kolovozu [5]

U prošlosti je postojala minimalna komunikacija u stvarnom vremenu između proizvodnje i potrošnje električne energije. Elektrane su mjerile proizvodnju generatora na temelju proizvodnje električne energije potrebne za održavanje napona i frekvencije mreže, dok su potrošači imali malo uvida u rad mreže. Međutim, ovaj se scenarij mijenja, a stambeni potrošači, zajedno sa svojim umreženim uređajima, sada mogu pratiti svoju potrošnju energije u stvarnom vremenu, njezin izvor i povezane troškove. Implementacija upravljive potrošnje na stambenoj razini omogućuje tvrtkama za opskrbu električnom energijom da poboljšaju fleksibilnost mreže posljedično smanjujući ukupne troškove sustava i smanjujući troškove električne energije za stambene jedinice.

Veliki industrijski potrošači električne energije često imaju koristi od niskih veleprodajnih cijena električne energije održavajući konstantnu potrošnju električne energije i izbjegavajući vršnu potrošnju. Ti su potrošači motivirani upravljati potrošnjom energije, održavajući je stabilnom, bez osciliranja kroz strukture cijena koje čine korištenje električne energije pri visokim vršnim uvjetima ekonomski neodrživim. Neki industrijski potrošači, osobito oni s energetske intenzivnim procesima, mogu pristati značajno smanjiti potrošnju tijekom propada frekvencije mreže. Na primjer, u Južnoj Australiji, australski operator energetskog tržišta

osigurao je ugovore s industrijskim potrošačima za gotovo 850 MW kapaciteta upravljive potrošnje za hitne slučajeve.

Međutim, mnogi industrijski potrošači kroz povijest su se borili s upravljivom potrošnjom zbog ometajuće prirode naglog isključivanja opreme. S padom troškova skladištenja energije i rezervne proizvodnje, sve veći broj poduzeća ulaže u opremu koja im omogućuje proizvodnju vlastite energije u hitnim slučajevima ili elegantno odvajanje od mreže. Iako su takve radnje prepreka neometanom poslovanju, bolje su od suočavanja s nestankom struje.

Upravljiva potrošnja, pod utjecajem ili potpuno upravljana od strane tvrtki za opskrbu električnom energijom, pokazala se moćnim alatom za osiguranje stabilnosti mreže i minimiziranje ukupnih troškova. Bitno je pojasniti da je, kada se raspravlja o upravljivoj potrošnji, fokus na dobrovoljnom odzivu subjekta na trenutne prilike u mreži. Tvrtke za opskrbu električnom energijom i operatori prijenosnog sustava već posjeduju sposobnost provedbe stalnih prekida napajanja ili isključivanja određenih velikih potrošača kako bi održali pogon sustava. Iako ove mjere mogu poremetiti normalno funkcioniranje, bolje su od potpunog raspada sustava. Odziv potrošnje u obliku smanjenja opterećenja pruža snažno sredstvo za povećanje fleksibilnosti mreže.

Upravljiva potrošnja pruža komunalnim poduzećima moćan alat za smanjenje opterećenja mreže i elektrana. Optimiziranjem potrošnje električne energije mogu se postići poboljšanja u održivosti mreže, pouzdanosti, stabilnosti i isplativosti. Kao što je objašnjeno ranije, učinkovito upravljanje vršnom potrošnjom i upravljanje dnevnim skokovima predstavljaju znatne izazove i troškove.

Konvencionalne termoelektrane ili nuklearne elektrane idealno rade pod stalnim opterećenjima. Dizajnirane su za optimalnu učinkovitost unutar određenog raspona radnih uvjeta. Odstupanje od ovih parametara je prihvatljivo bez ugrožavanja cjelovitosti postrojenja, ali često dovodi do smanjene učinkovitosti. Ovo smanjenje učinkovitosti znači ili smanjeni prihod zbog manje proizvodnje električne energije ili povećane troškove koji proizlaze iz veće potrošnje goriva. U određenim slučajevima, rad generatora pri visokoj izlaznoj snazi može eskalirati potrebe za održavanjem zbog povećanog trošenja pokretnih komponenti. U većini slučajeva, održavanje postrojenja na projektiranoj snazi pokazuje se kao najučinkovitija i najisplativija opcija.

Koncepti i tehnologije upravljive potrošnje postoje već duže vrijeme. Međutim, tek u posljednjem desetljeću troškovi umrežavanja i računalstva su se smanjili do točke u kojoj konfiguracija uređaja postaje skuplja od integriranja računalne podrške - prvi put od samog početka koncepta. Napredak u analizi podataka, olakšan cjenovno pristupačnijim računalima i pohranom podataka, ubrzao se, dok su proizvodni sustavi stekli znatnu moć zahvaljujući algoritamskom napretku i prediktivnim sustavima strojnog učenja. Primarna ograničenja za ugradnju tehnologije upravljive potrošnje u nove uređaje uključuju propise, strukturiranje poticaja, pitanja privatnosti i sigurnosne protokole. Mnogi su uređaji sada sami po sebi napredni, a većina značajki potrebnih za odziv na signale povećanja potrošnje može se integrirati putem ažuriranja upravljačkih programa.

Inicijative za upravljivu potrošnju omogućuju tvrtkama za opskrbu električnom energijom da spoje više malih ušteda energije u značajna smanjenja na razini mreže. Ova agregacija donosi vrijednost koja premašuje zbroj pojedinačnih smanjenja. Imajući znanje o potencijalnom doseg upravljive potrošnje, tvrtke za opskrbu električnom energijom mogu osmisliti poboljšane dugoročne strategije uz neposredne uštede. Čin združivanja manjih energetske resursa pokazao se vrlo vrijednim za takve tvrtke. S obzirom na to, zašto ne pružiti privatnim poduzećima i pojedincima priliku da dobrovoljno daju na raspolaganje vlastite energetske resurse i primaju naknadu za vrijednost koju doprinose?

## 2.4. Tehnološke barijere

Lako je upasti u zamku pretjeranog optimizma glede modernizacije elektroenergetskog sustava. No, kao i sve, moderne tehnologije imaju određene mane te zahtijevaju kompromise koje je nužno prihvatiti ukoliko želimo usvojiti novu energetske paradigmu. Poboljšanjem tehničkih karakteristika sustava i njihovih komponenti moguće je ishoditi veće povlastice uz manje štetne posljedice ili ih pak premjestiti u drugi sektor, najčešće monetarni u svjetlu visine inicijalnog ulaganja. Slijede neke od odrednica ključnih za uspješno vođenje elektroenergetskog sustava i usporedba istih uz fizikalnu podlogu.

### 2.4.1. Specifična snaga i kapacitet

Energija je karakterizirana kao sposobnost obavljanja rada, dok je snaga karakterizirana kao brzina kojom se energija izmjenjuje. Mjerna jedinica za energiju su kilovat-sati (kWh) ili megavat-sati (MWh), dok se snaga kvantificira u kilovatima (kW) ili megawatima (MW). Ovaj se koncept najbolje pragmatično ilustrira kroz primjere.

Uzmimo, na primjer, sustav za pohranu energije sa zamašnjakom s instaliranom snagom od 500 kW, koji može isporučivati energiju u razdoblju od 30 sekundi kada je potpuno "napunjen". Takav se sustav pokazuje vrijednim za opskrbu značajnom energijom u kratkom intervalu, kao što je slučaj tijekom prolaznog poremećaja uzrokovanog gubitkom velikog generatora. Ovo trenutno injektiranje energije iz jedinice za pohranu sprječava pad frekvencije, dopuštajući regulatorima drugih generatora da reagiraju i kompenziraju gubitak. Posljedično, zamašnjak posjeduje skromnu količinu energije od 4,1667 kWh, ali se može pohvaliti značajnom vršnom snagom, tj. karakterizira ga velika snaga u odnosu na sadržaj energije.

Slično tome, baterija koja ima nazivnu snagu od 500 kW te je sposobna za pražnjenje tijekom 2 sata kada je potpuno napunjena, jednaka je energetske kapacitetu od 1.000 kWh, što predstavlja značajan energetske kapacitet u odnosu na izlaznu snagu. Scenariji koji uključuju izjednačavanje vršne potrošnje ili preraspodjelu opterećenja zahtijevaju sustave za pohranu s većim energetske kapacitetima. Na primjer, skladištenje viška energije tijekom razdoblja obilne dostupnosti obnovljivih izvora i niske potrošnje, zatim pražnjenje pohranjene energije tijekom razdoblja visoke potrošnje i minimalne dostupnosti obnovljivih izvora.

Situacije poput dugotrajne preraspodjele opterećenja zahtijevaju značajan kapacitet za pohranu energije, čineći specifičnu cijenu energije mjerenu u eurima po kWh ili megavat-satu ključnim čimbenikom pri odabiru odgovarajuće tehnologije pohrane. Slično tome, primjene kao što su regulacija frekvencije mreže i stabilnosti napona zahtijevaju brzo injektiranje ili apsorpciju energije, naglašavajući značaj cijene instalirane snage u eurima po kW ili MW pri odabiru odgovarajućeg tehničkog rješenja za pohranu.

Skladištenje energije poprima različite oblike koji odražavaju raznolikost vrsta energije. Glavne kategorije pohrane koje se koriste za pohranjivanje obuhvaćaju kemijsku, mehaničku, električnu i toplinsku. Unutar svake klasifikacije, različite tehnologije pokazuju različitu cjenovnu učinkovitost, izlaznu snagu, gustoću snage i faktore rizika. Čak i unutar određenih skupina tehnologija za pohranu, izvedbe se značajno razlikuju ovisno o pojedinostima uporabe.

Trenutačno se koriste tri primarne mehaničke metode pohrane energije za mrežne primjene: spremnici vodenih masa, pohrana energije komprimiranim zrakom i zamašnjaci. Među njima, vodene mase se pojavljuju kao najraširenija i najisplativija tehnologija, a slijede ih skladištenje energije komprimiranim zrakom i naposljetku zamašnjaci. Vrijedno je napomenuti da zamašnjaci daju visoku i vrlo podesivu izlaznu snagu, posebno u usporedbi s komprimiranim zrakom i vodenim masama, što ih čini poželjnijima za zadatke koji zahtijevaju visoke performanse gdje je cijena manja briga. Međutim, skladištenje energije komprimiranim zrakom ima problematiku geografske ovisnosti. Dok je stvaranje spremnika za skladištenje komprimiranog zraka veoma skupo, prenamijenjeni rudnici i naftne bušotine koje se više ne koriste mogu poslužiti kao ekonomična mjesta za skladištenje.

Značajan nedostatak pohrane energije komprimiranim zrakom odnosi se na upravljanje toplinom. Kako se plinovi sabijaju i ekspandiraju, oni se zagrijevaju i hlade, što utječe na učinkovitost. Bez razrađene izolacije i izmjenjivača topline, ta se toplinska energija rasipa. Posljedično, učinkovitost postrojenja može pasti na 15 do 25 %, što ga čini ekonomski neodrživim. Mnoga postrojenja koriste komprimirani zrak za pogon plinskih turbina, povećavajući učinkovitost plinskih turbina i prebacujući potrošnju povezanu s energijom potrebnom za kompresiju zraka u vrijeme izvan najveće potrošnje. Ova konfiguracija povećava učinkovitost sustava tijekom najveće potrošnje korištenjem pohranjene energije.

Skladištenje vodenih masa temelji se na gravitacijskoj pohrani energije, gdje se voda pumpa u spremnik za kasniju upotrebu na turbinama i generatorima za proizvodnju električne energije. Otprilike 95 % američkog sustava skladištenja energije oslanja se na vodne rezerve. Ovi sustavi nude brzo vrijeme odziva slično baterijama, koje daleko premašuje vrijeme odziva plinskih turbina. Upravo ta brzina pomaže stabilnosti mreže, s nekim postrojenjima koja mogu postići punu snagu za manje od deset minuta. Mnoge reverzibilne hidroelektrane kapitaliziraju na fluktuacijama cijena kupujući jeftinu električnu energiju tijekom sati izvan najvećeg opterećenja i puštajući je kada cijene dostignu vrhunac. Proces korištenja vodene mase postiže globalnu stopu učinkovitosti ciklusa od čak 75 do 85 %. [6]

Loša strana skladištenja vodenih masa uključuje geografska ograničenja. Učinkovita implementacija zahtijeva dva velika spremnika sa značajnim visinskim razlikama za proizvodnju potrebnog hidrauličkog tlaka, a kapacitet skladištenja ovisi o ograničenjima

veličine spremnika. Izgradnja brana ili akumulacija uključuje visoke kapitalne troškove. Iako je trošak po pohranjenom MWh često niži od ostalih sustava skladištenja, ukupni troškovi ostaju visoki. Utjecajne su i posljedice na okoliš jer izgradnja novih hidroelektrana može dovesti do poremećaja ekosustava.

Zamašnjaci, s druge strane, pohranjuju energiju kroz rotacijsku kinetičku energiju okretanjem velikih diskova pri brzinama do 100 000 okretaja u minuti. Ističu se u brzom oslobađanju skromnih količina energije pri iznimno visokoj izlaznoj snazi. Ova karakteristika, zajedno s njihovom sposobnošću pretvaranja rotacijske kinetičke energije u električnu energiju, čini zamašnjake vrijednim sredstvom za brzo reagiranje na fluktuacije proizvodnje i potrošnje koje proizlaze iz kvarova generatora ili drugih iznenadnih promjena. Unatoč tome što su obično skuplji od drugih metoda pohrane, zamašnjaci nude vrhunsku kvalitetu i brzu pričuvnu snagu, što ih čini popularnima u podatkovnim centrima i kritičnim infrastrukturnim uporabama.

U scenarijima kao što su izolirane mreže ili rezervni sustavi napajanja, zamašnjaci često pružaju uslugu međunapajanja prije aktiviranja baterijskih sustava u slučaju gubitka napajanja. Omogućuju ublažavanje kratkih prekida i sprječavaju nepotrebno pražnjenje baterije zbog kratkih prekida. Kod duljih nestanaka opskrbe, zamašnjaci mogu opskrbljivati energijom dok se ne utvrdi opseg prekida i dok se baterijski sustavi ne pokrenu. Važno je napomenuti da baterije kao takve nemaju vremensku konstantu. Kašnjenje od nekoliko milisekundi je moguće zbog topologije izmjenjivača. Oslanjanje na zamašnjake za privremenu opskrbu energijom poželjno je iz razloga što baterijski sustavi imaju namjensko vremensko zatezanje koje se postavlja u svrhu očuvanja baterije, a nerijetko se mjeri u minutama.

Zamašnjaci su neprocjenjivi u situacijama u kojima je prioritet kvaliteta energije i brzina odziva. Dok baterije općenito zadovoljavaju slične zahtjeve, ponavljajuća uporaba zamašnjaka ne smanjuje njihov kapacitet, čineći ih u određenim slučajevima isplativijima.

Toplinsko skladištenje se odnosi na očuvanje topline ili hladnoće za buduću upotrebu. Otprilike polovica globalne potrošnje energije “vrti se” oko grijanja i hlađenja, pa se ujednačenje potrošnje toplinske energije kroz ciljani interval, najčešće tijekom dana, pokazalo učinkovitim mjerom protiv rasipanja energije. Mehanizmi za pohranu topline obuhvaćaju zagrijavanje materijala poput vode, unaprijed za kasniju upotrebu, zamjenjujući električnu energiju za grijanje. Slično, rashladna energija može se pohraniti zamrzavanjem vode i korištenjem dobivenog leda za rashladne primjene.

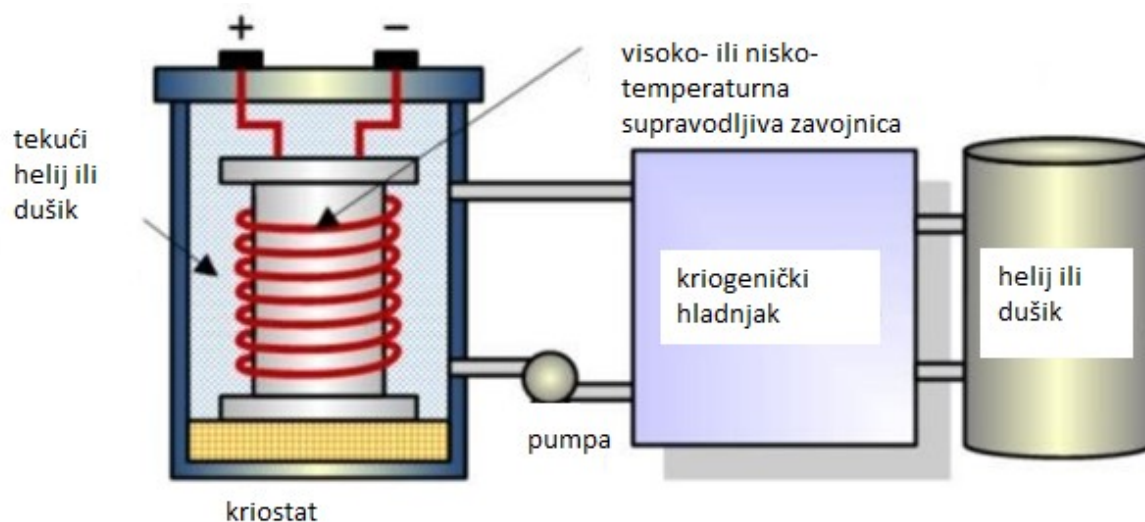
Na razini mreže, koncentrirana solarna energija pojavljuje se kao istaknuti izvor skladištenja toplinske energije. Fokusiranjem sunčeve svjetlosti na vodu ili neki drugi medij za skladištenje topline poput rastaljenog natrija, postrojenja s koncentriranom solarnom energijom mogu akumulirati sunčevu toplinu, pretvarajući je u paru koja pokreće turbine i proizvodi električnu energiju. Povećanje volumena zagrijanog medija koristi za skladištenje energije usmjeravanjem medija u izolirane spremnike povezane cjevovodima. Koncentrirana solarna elektrana Cerro Dominador u Čileu ima za cilj pohraniti rastaljenu sol u količini dovoljnoj za sedamnaest sati neprekinutog napajanja nacionalne mreže. Iako je cijena postrojenja s koncentriranom solarnom energijom veća od cijene solarne fotonaponske elektrane, sposobnost proizvodnje energije nakon zalaska sunca opravdava premiju.



Budući potencijal ugljično neutralnog zelenog vodika ili metana za skladištenje energije vrijedan je spomena. Elektroliza vodika povezana je s plinskim turbinama ili vodikovim gorivim ćelijama koje zvuče obećavajuće za primjenu u mrežnim razmjerima.

Isključivo električno skladištenje električne energije ostaje neuobičajeno za mrežnu implementaciju zbog visokih troškova i ograničene gustoće skladištene energije. Kondenzatori i supravodljiva magnetska pohrana predstavljaju dvije kategorije čisto električne pohrane s koje se razmatraju u svrhu budućeg korištenja na razini mreže. Kondenzatori skupljaju energiju u električnim poljima između vodiča odvojenih dielektričnim izolatorom i karakterizira ih iznimno visoka izlazna snaga u odnosu na količinu pohranjene energije. Iako se koriste za poboljšanje pokazatelja kvalitete električne energije i stabilizaciju proizvodnje obnovljive energije, kondenzatori se najviše koriste u industrijskim okruženjima gdje je prekid napajanja skup ili opasan.

Supravodljiva magnetska pohrana energije koristi supravodljive materijale na ultra-niskim temperaturama za skladištenje energije. Struja teče unutar supravodljive zavojnice bez otpora (ili barem s toliko malenim otporom da je zanemariv), omogućujući skladištenje energije sve dok materijal ne prestane biti supravodljiv. Iako pruža veći kapacitet pohrane energije od kondenzatora i zamašnjaka, ova tehnologija ima veću cijenu. Napredak u visokotemperaturnim supravodičima, trenutno pod aktivnim istraživanjem, ima potencijal za smanjenje troškova i povećanje energetske kapaciteta, potencijalno čineći ovaj pristup pohranjivanju energije isplativim.



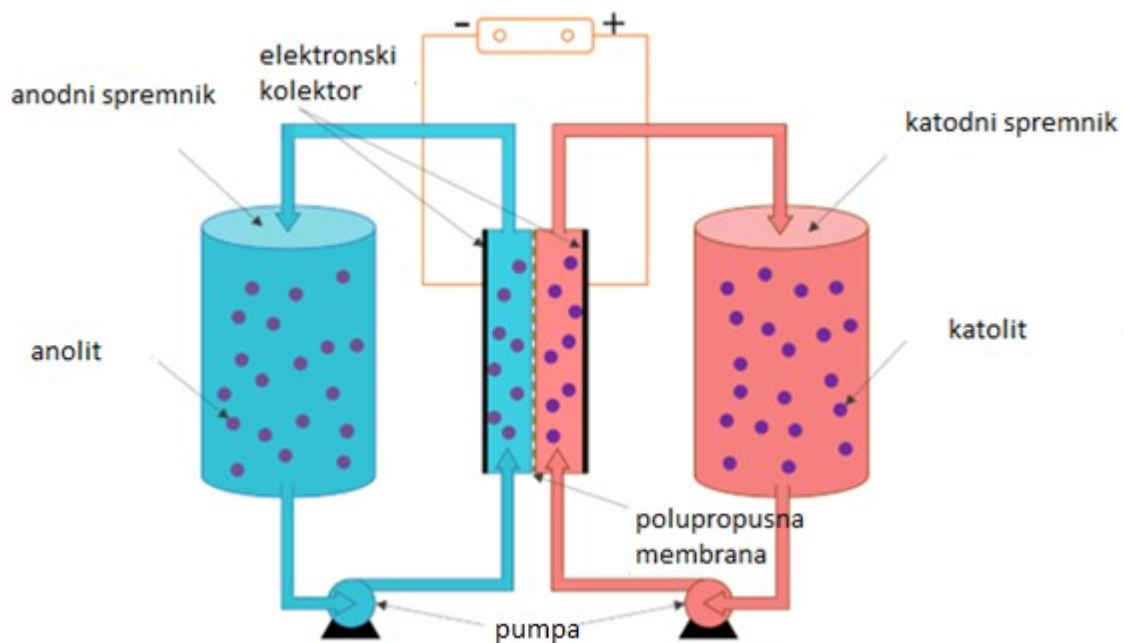
Slika 2.3. Sustav pohrane energije u magnetnom polju supravodiča

Kemijsko skladištenje energije, pretežno putem elektrokemijskih baterija ili sinteze sintetskog goriva, obuhvaća nekoliko tehnologija za skladištenje električne energije. Niz vrsta baterija koristi se za mrežne i manje elektroničke uređaje dok se kemijska sinteza goriva za skladištenje energije trenutno suočava s izazovima u pogledu troškova.

Litij-ionske baterije su istaknute u svim podnebljima svijeta, sačinjavajući većinu instaliranih postrojenja za skladištenje energije. Nude značajnu cjenovnu pristupačnost i lakoću instalacije. Međutim, razne nove kemijske tehnologije baterija obećavaju čak i povoljnija svojstva.

Natrijeve baterije još su jedan način elektrokemijskog skladištenja energije, s rastaljenim natrij-sumpornim baterijama koje pokazuju uspjeh u komercijalnoj uporabi. One učinkovito pohranjuju višak energije putem reverzibilnih reakcija natrij-metal-natrij-sol. Natrijeve baterije preferiraju se za dugotrajne projekte skladištenja, posebno u vrućim klimatskim uvjetima.

Protočne baterije (Slika 2.4.) nude veću sigurnost i izdržljivost, no niži kapacitet u usporedbi s konvencionalnim oblicima baterija. Iako obično imaju manju gustoću energije u usporedbi s drugim vrstama baterija, njihova dostupnost po nižoj cijeni čini ih privlačnima. Funkcioniranje ove baterije je na temelju anolita i katolita sadržanih u otopinama koje cirkuliraju kroz elektronski kolektor s različitih strana polupropusne membrane.



Slika 2.4. Konceptualni prikaz protočne baterije

Nikal-kadmij i olovno-kiselinski akumulatori nalaze primjenu u tradicionalnim sustavima pohrane energije, a svaki ima posebne prednosti. Smanjenje troškova litij-ionskih baterija potiče njihovo širenje, dok se potencijal elektrolize vodika u kombinaciji s gorivim ćelijama ozbiljno odmjerava u odnosu na trenutna ograničenja baterijskih sustava.

Elektrokemijsko skladištenje, uglavnom sačinjeno od baterija, na putanji je rasta kako troškovi padaju, a proizvodnja obnovljivih izvora energije raste. Međutim, elektroliza vodika, unatoč obećanjima, ostaje skupa zbog zahtjeva za katalizatorom i rizika skladištenja.

U biti, dok svaka metoda pohrane ima svoje prednosti i ograničenja, sektor pohrane energije obilježen je stalnim inovacijama i evolucijom. Odabir načina energetske pohrane je dinamičan i ovisan o konkretnoj primjeni.

#### 2.4.2. Odziv frekvencije na poremećaje u mreži

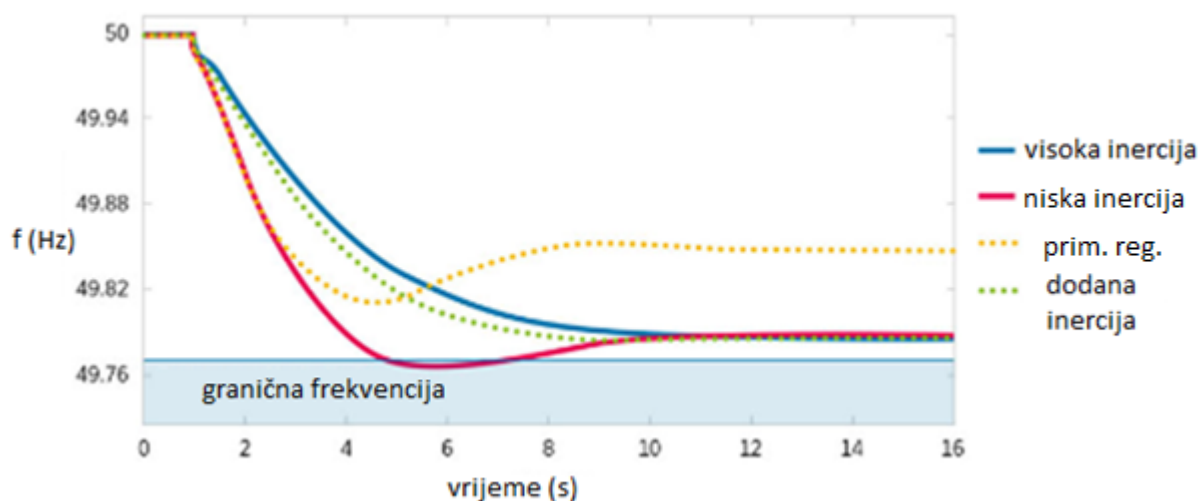
Upravljanje inercijom sustava sve viša dobija na značaju unutar elektroenergetskih sustava s visokom stopom zastupljenosti promjenjive obnovljive energije. Važnost upravljanja inercijom proizlazi iz fenomena opadanja inercije sustava kako raste prodor nesinkrone proizvodnje, kao što je prikazano na *Slici 2.5*. Ova slika daje usporedbu odziva frekvencije mreže na poremećaj frekvencije u dva sustava: jednom s niskom stopom inercije i drugom s visokom stopom inercije. Posljedično, operatori prijenosnog sustava se suočavaju sa zadatkom održavanja određene minimalne razine inercije unutar sustava ili uvođenja alternativnih metoda za ograničavanje odstupanja frekvencije prilikom upravljanja mrežama niske inercije. Primjeri takvih mjera uključuju korištenje pomoćne usluge *rada jedinica pružatelja rezervi za održavanje frekvencije* u svojstvu primarne regulacije ili jednostavno povećanje same inercije sustava bez potrebe za pomoćnim uslugama, kao što je prikazano na *Slici 2.5*. Trenutačno se zahtjevi iz Pravila za priključenje na mrežu ne bave opširno ovim problemom, već se umjesto toga oslanjaju na operativna ograničenja i/ili predviđaju sigurnu uporabu pomoćne usluge.

Zabrinutost u vezi s inercijom bila je tema rasprave od početka uvođenja proizvodnje energije iz obnovljivih izvora uz pomoć ispravljača prije mnogo desetljeća. Početne brige o tome da će elektroenergetski sustavi postati nestabilni čak i pri razinama zastupljenosti obnovljivih izvora koje se sada smatraju relativno niskim prema suvremenim standardima uvelike su nestale nakon uspješne široke primjene varijabilnih obnovljivih izvora. Unatoč postojanosti percipirane "granice stabilnosti" u rasponu od 5% do 30% zastupljenosti nesinkronih izvora u sinkronim sustavima, iskustva iz integracije varijabilnih obnovljivih izvora u regijama kao što su Južna i Zapadna Australija, Irska, Teksas i određeni mali otočni sustavi su pokazala da se stabilnost sustava može održati i pri višim trenutnim razinama zastupljenosti od 50-70%. Značajno je da su neki mali otočni sustavi čak uspjeli postići razine zastupljenosti od 80-90% nesinkronih izvora bez nailaženja na velike poteškoće vezane za stabilnost sustava.

Važno je naglasiti da rješavanje problema nedostatka inercije i ograničenja stope zastupljenosti nesinkronih izvora zahtijeva pristup na razini prijenosnog sustava. Trenutačno je fokus primarno na mrežno-neovisnim sustavima. Na primjer, određene europske zemlje, poput Danske, redovito postižu ili premašuju 100% -tnu zastupljenost nesinkronog opterećenja. Međutim, te su regije povezane s puno većim srednjoeuropskim sinkronim sustavom, gdje je ukupna razina zastupljenosti nesinkronih izvora relativno niska. Kako se prevalencija visoke penetracije mreže varijabilnim obnovljivim izvorima proteže na veća zemljopisna područja, upravljanje inercijom neizbježno će se i tamo pojaviti kao problem. Strategije upravljanja inercijom uspostavljene u mrežno-neovisnim sustavima pružaju dragocjena saznanja o ovim scenarijima.

Irski EirGrid, državni operator prijenosnog sustava, je od 2021. implementirao nekoliko mjera za ublažavanje izazova povezanih s inercijom i povećanje dopuštenih razina nesinkronog prodora:

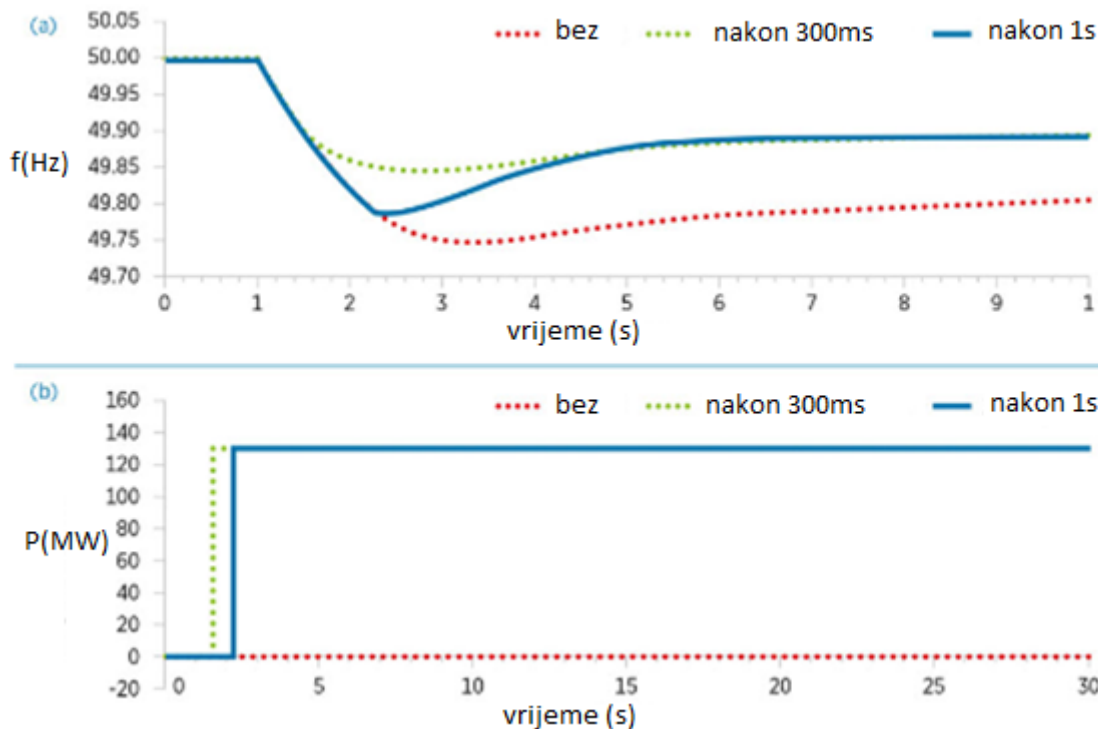
- Kontinuirana procjena i praćenje inercije sustava
- Uvođenje praga tromosti (minimalne granice za tromost sustava), koji je postupno snižen s 25 000 MW-s na 23 000 MW-s tijekom vremena, na temelju praćenja najznačajnije vjerodostojne nepredviđene situacije u stvarnom vremenu
- Pružanje poticaja za sinkrone generatore da smanje svoj tehnički minimum (najniža izlazna aktivna snaga pri kojoj postrojenje može stabilno raditi), čime se omogućuje više varijabilne obnovljive proizvodnje bez potrebe za isključivanjem sinkrone proizvodnje



Slika 2.5. Odziv frekvencije mreže na poremećaj u zavisnosti od stope inercije

Australija, Velika Britanija i Sjedinjene Američke Države implementirale su slične strategije koje dijele manje tehničke razlike. Dok se koncepti minimalnih inercijskih pragova i zahtjeva za minimiziranjem stabilne izlazne snage primarno oslanjaju na sinkrone generatore, nedavno se fokus pomaknuo prema pomoćnim uslugama *rezervi snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene*, tj. *rezervi snage za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom* (eng. “automatic Fast frequency response“ - aFFR). Ovaj pomak je posljedica aFFR-ovog izravnog rješavanja pitanja stope promjene frekvencije (eng. “Rate of change of frequency“ - RoCoF) povezanog s inercijom. *Rezerve snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene* se opskrbljuju energijom iz baterijskih sustava, izvora baziranih na izmjenjivačima i potencijalnim dodatnim energetskim resursima s podfrekventnim relejima. U biti, FFR pruža djelotvornu pomoć pri samoj pojavi poremećaja, koju u pravilu karakterizira velika brzina promjene frekvencije.

Koncept sada poznat kao aFFR bio je tema rasprava među stručnjacima više od desetljeća. U početku nazivani "virtualna inercija", "sintetička inercija" ili "emulirana inercija", ovi pojmovi su u velikoj mjeri smanjili ili evoluirali u značenju uvođenjem aFFR-a u različite sustave na globalnoj razini. Iako ti pojmovi danas često opisuju inercijski odziv izmjenjivača za uspostavu mreže (eng. “grid forming“), još uvijek označavaju odziv jedinica zaduženih za pružanje pomoćne usluge *rezerve snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene*.



Slika 2.6. Utjecaj vremenskog zatezanja sustava umjetne inercije na: a) frekvenciju  
b) rezerve snage sustava nakon poremećaja

Temeljni koncept koji stoji iza ove funkcije uključuje brz odziv aktivne snage iz resursa koji proizvode energiju uz pomoć izmjenjivača (eng. „Inverter based resources“ - IBR) na temelju uočenih odstupanja frekvencije. Iako ovom odzivu nedostaje svojstvena inercija sinkrone proizvodnje, on je brži i nadopunjuje inercijski odziv sinkronih generatora. Ovo pomaže u poboljšanju početne stope promjene frekvencije kao i najniže frekvencije nakon poremećaja u proizvodnji. Omogućavanje ove funkcije postiže se odgovarajućim upravljačkim programima. Ovu funkciju može izvršiti bilo koji IBR s viškom proizvodnog kapaciteta ili skladištene energije, poput baterija ili varijabilne obnovljive energije koji rade unutar ograničenih zadanih vrijednosti snage.

Ovakav odziv također mogu ispoljiti neregulirane vjetro turbine oslanjanjem na stvarnu rotacijsku inerciju rotora koji se obično odvaja od mreže energetskim učinkim pretvaračima. Implementacijom odgovarajućih upravljačkih programa može se pristupiti ovom kapacitetu rotirajuće rezerve, omogućujući odziv unutar 0,5 do 2 sekunde. Za razliku od tradicionalne inercije priključene na mrežu, povećanje izlazne snage može se održati nekoliko sekundi bez obzira na kasniji trend frekvencije. Unatoč tome, ovaj odziv zahtijeva usporavanje rotora s njegove optimalne brzine vrtnje. Posljedično, obnavljanje kinetičke energije ključno je za povratak na izlaznu aktivnu snagu prije kvara. Vjetroelektrane koje rade pri brzinama vjetra manjim od nazivne brzine vjetra imat će smanjenu izlaznu snagu nakon početnog povećanja, što predstavlja odziv "sintetičke inercije". Iznad nazivne brzine vjetra, vjetar daje višak snage, koja se može iskoristiti za vraćanje turbine na optimalnu brzinu bez utjecaja na izlaznu snagu.

Korištenje usluge rezerve snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene temeljene na inerciji iz vjetro turbine pokazalo se vrijednim u energetskim sustavima

s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije. U scenarijima niske stope inercije i posljedično povišene inicijalne stope promjene frekvencije prilikom pojave poremećaja, obično dostupnost rezervi snage nije ono što predstavlja ograničenje, već brzina odziva. Iako aFFR koji se temelji na inerciji iz vjetroturbina može zahtijevati veću rezervu snage kako bi se uzelo u obzir smanjenje proizvodnje nakon poremećaja, njegov odziv ne predstavlja značajno kašnjenje. Gledano zbirno, početnom stopom promjene frekvencije sustava upravljaju *rezerve snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene* koje se temelje na sintetičkoj inerciji iz varijabilnih obnovljivih izvora.

Iako zahtjev da vjetroelektrane posjeduju ovu funkciju nije široko rasprostranjen, kanadski Hydro-Québec je uveo ovaj zahtjev još 2005. Zahtjev za generatore kao dio Mrežnih pravila EU-a također omogućuje operatorima prijenosnog sustava da uvedu ovu odredbu, no bez daljnjih specifikacija. Unatoč tome, niti jedan europski operator prijenosnog sustava još nije usvojio ovaj zahtjev. Kanadsko iskustvo pokazalo je da sintetička inercija iz vjetroelektrana značajno pridonosi stabilnosti sustava, ali je otkrila probleme s padom izlazne snage nakon događaja i ispitivanjem usklađenosti upravljačkog algoritma. Stoga su operatori prijenosnog sustava u Australiji, Velikoj Britaniji i Teksasu odlučili odustati od jedinstvenih zahtjeva u korist nabave aFFR-a temeljenog na inerciji kao plaćene pomoćne usluge. Ovaj pristup je u nekoj literaturi također opisan pojmovima kao što su "brzi frekvencijski odziv", "čvrsti frekvencijski odziv" i "dinamičko zadržavanje".

Nabava pomoćne usluge *rezerve snage za automatsku sekundarnu regulaciju frekvencije i snagu razmjene* je moguća neovisno o konkretnoj vrsti tehnologije energetske pohrane, no upravljivi baterijski sustavi uglavnom pobjeđuju na natjecajima, slijeđeni pokojim vjetroelektranama. Operatori prijenosnog sustava kao što su ERCOT (Teksas, SAD) i AEMO (Australija) nabavljaju uslugu aFFR-a putem tržišta za dan unaprijed (eng. "day-ahead market") ili tržišta u stvarnom vremenu.

### 3. Virtualne elektrane

Tradicionalno se elektranama smatra sklopovlje i pogonski strojevi za pretvorbu određenog oblika energije u električnu energiju. Definicija sama po sebi implicira postojanje fizikalne materije sadržane u nekim geografskim gabaritima. No, što ako to ne mora biti tako? Upravo zahvaljujući razvitku informatičke i telekomunikacijske tehnologije dolazi do revolucionarnog koncepta – virtualne elektrane. Da bi razumjeli srž i funkcioniranje takvog entiteta potrebno je razmotriti što uopće predstavlja termin virtualne elektrane.

#### 3.1. Opće odrednice virtualne elektrane

Da bi se elektroenergetski sustav održavao u ravnoteži potrebne su određene energetske rezerve. Povećanjem broja distribuiranih proizvođača ova se činjenica još više primjećuje budući da su mnogi od njih statični. Uzmimo za primjer fotonaponske solarne elektrane ili elektrane na gorive ćelije. Izlazni istosmjerni napon se može regulirati putem uzlaznog, silaznog ili uzlazno-silaznog pretvarača te pretvoriti u izmjenični napon izmjenjivačem što se u praksi i radi. Naprednijim izmjenjivačima može se manipulirati kutom između struje i napona,  $\cos \varphi$ . To omogućava regulaciju količine jalove snage injektirane u mrežu ili preuzete iz nje baš kao i kod klasičnih elektrana sa sinkronim generatorima. Međutim, nedostaje kut opterećenja  $\delta$ . To znači da će se dio mreže, tzv. mikro-mreža, napajan iz ovakvih obnovljivih izvora ponašati drugačije od konvencionalno napajanih mikro-mreža. Da bi se spriječile tendencije direktnog propada i povišenja frekvencije u mrežu se uvode zasebni spremnici energije. Najčešće su to baterijski spremnici jer izravno pohranjuju i dijele električnu energiju. No, koriste se i druge najčešće mehaničke izvedbe u obliku zamašnih masa, gravitacijske energije te hidraulične i pneumatske rezerve.

Razvojem elektroenergetskog sustava distribuirani proizvođači dobivaju na značaju i postaju sve zastupljeniji. Povećanjem instalirane snage takvih izvora smanjuje se relativni udio ostalih entiteta u ukupnom kapacitetu mreže što omogućava pogon sustava uz pomoć infrastrukture manje prijenosne moći. Pritom je važno imati na umu da se kapacitet mreže odnosi na proizvodnju i potrošnju električne energije, a prijenosna moć čitave mreže ili nekog njenog dijela ovisi o svakom elementu mreže. Uzmimo za primjer hipotetski elektroenergetski sustav neke države. Proizvodni kapacitet tog sustava zadovoljava potrebe potrošnje na državnoj razini. Međutim, neka je određena regija geografski najudaljenija od ostatka mreže. U tom slučaju, prijenosna moć dalekovoda ili kablskih vodova koji spajaju tu regiju s ostatkom zemlje predstavlja “suženje“ te postaje ograničavajući faktor prijenosnog kapaciteta čitave mreže na tom podneblju. Isto je i s distribuiranim izvorima. Oni pridonose proizvodnom kapacitetu mreže sukladno nazivnoj snazi, no ne pridonose prijenosnoj moći sustava. Iz tog razloga pravilno upravljanje distribuiranim proizvođačima postaje vrlo važno jer kapacitet prijenosnog i distribucijskog sustava više nije višestruko veći u odnosu na distribuirane proizvođače, kao ni standardni proizvodni kapaciteti (*Tablica 3.1.*). Potrebno je sveobuhvatno rješenje koje je moguće finije prilagoditi uvjetima na području od interesa.

Tablica 3.1. Udio pojedinih mrežnih entiteta u ukupnom kapacitetu mreže u ovisnosti o razvojnoj fazi

Faza razvoja/entiteti	Proizvodnja	Prijenos	Distribucija	Distribuirani proizvođači
Predrazvojna	60%	20%	17%	3%
Prijelazna	50%	25%	19%	6%
Napredna	38%	20%	17%	25%

Uvođenjem pojma agregatora daljnje se komplicira čitava priča. Agregator je poslovni subjekt odnosno tvrtka zadužena za upravljanje virtualnom elektranom. Očito je da se postavljaju brojna pitanja o nadležnostima i financijama u odnosu agregator – operator distribucijskog sustava odnosno agregator – operator prijenosnog sustava. Primjer agregatora s vlastitom platformom za virtualnu elektranu na domaćem tržištu je tvrtka KOER d.o.o.. [7]

Najveća virtualna elektrana u Europi je trenutno u vlasništvu njemačke tvrtke Statkraft. Na raspolaganju je 10 GW instalirane snage koja se dobiva uz pomoć više od tisuću proizvođača što je usporedivo s desetak prosječnih termoelektrana, dovoljno da napaja veći grad. [8] Na svjetskoj razini najveća virtualna elektrana je Teslina na području Južne Australije s preko 50000 priključenih domaćinstava, načelno uz solarnu energiju kao izvor. [9] Razmjena energije i skladištenje se omogućuje uz pomoć Teslinog Powerwall rješenja (Slika 3.1.). Radi se o litij-ionskom baterijskom sustavu za kućanstva od 13.5 kWh s mogućnošću paralelnog rada do deset primjeraka. [10]



Slika 3.1. Tesla Powerwall baterijski spremnik energije



## 3.2. Podjela

Postoji više kriterija podjele virtualnih elektrana:

### 1. Prema načinu upravljanja:

- Centralizirana virtualna elektrana:
  - upravljački algoritam je u potpunosti u nadležnosti virtualne elektrane
  - tržišni model i distribuirani proizvođači se razmatraju zasebno
  - potrošnja se zadovoljava iz distribuiranih proizvođača
- Distribuirana virtualna elektrana:
  - Kaskadni hijerarhijski model – lokalna virtualna elektrana upravlja samo okolnim distribuiranim proizvođačima dok virtualna elektrana više razine donosi odluke
  - Pojednostavljuje komunikaciju
  - Jasnije određene nadležnosti svake razine
- Potpuno distribuirana virtualna elektrana:
  - Svaki distribuirani proizvođač djeluje neovisno o drugima
  - Lokalizirana upravljačka logika

### 2. Prema svrsi:

- Tehnički orijentirana virtualna elektrana:
  - Primarno u službi operatora prijenosnog (za stabilizaciju mreže) i distribucijskog (za raspored tokova snaga) sustava
  - Kontinuirano praćenje naponskih prilika
  - Optimizacija sustava
  - Na manjem području
- Profitno orijentirana virtualna elektrana:
  - Uključuje distribuirane proizvođače u mrežu kroz burzu
  - Moguća suradnja s operatorima kroz usluge tercijarne regulacije
  - Planiranje proizvodnje i određivanje projicirane potrošnje na dnevnoj bazi
  - Izrada voznog reda
  - Na većem području

### 3. Prema učešću na tržištu:

- Za pokrivanje vršnih opterećenja – uvriježene u SAD-u
- Proizvodno orijentirane – u Njemačkoj, u svrhu razvoja tehnologije
- Mješovitog tipa – optimizacija mreže i pokrivanje opterećenja
- Aukcijske – sudjeluju na burzi za pokrivanje fiksne potrošnje

### 3.3. Koegzistencija s drugim subjektima u mreži

Virtualne elektrane po svojoj definiciji imaju unaprijed zadane zadatke, no često se njihove nadležnosti preklapaju s nadležnostima drugih subjekata u mreži. Osvrnut ćemo se na neke od modernih tehnologija koje su utilitaristički podudarne s konceptom virtualne elektrane i razmotriti sličnosti i razlike među njima kao i njihov međusobni utjecaj.

#### Fizička elektroenergetska postrojenja:

I virtualne elektrane i fizička elektroenergetska postrojenja služe za proizvodnju električne energije i mogu djelovati kao vršne elektrane. Razlika je u odzivu i sustavu regulacije. Dok se fizičke elektrane gotovo isključivo oslanjaju na konstantan pogon uz oscilacije snage shodno varijaciji prirodnih resursa kroz dan, virtualne elektrane imaju mogućnost dobavljanja velikih količina energije u kratkom vremenu pa se smatraju pretežno tržišnim subjektom. Fizičke elektrane su naklonjene stabilnom radu i stoga imaju sporo vrijeme regulacije (u ovisnosti o vrsti elektrane) u usporedbi s virtualnim elektranama. Virtualne su elektrane lako proširive što smanjuje troškove projekta jer se može iznijeti u etapama. Pravni okvir također omogućuje ovakvu uporabu jer agregator sklapa ugovore sa svakim distribuiranim izvorom i/ili kapacitetom za skladištenje energije, a ne radi se o jednom ili malom broju investitora kao kod fizičkih elektrana. U tehničkom smislu ovo donosi veću fleksibilnost i lako povećanje instalirane snage. Nadalje, pošto su fizičke elektrane smještene blizu izvora pogonskog energenta povećavaju se gubici u prijenosu što je ekvivalentno smanjenju efektivne iskoristivosti postrojenja pa se dodatno povećavaju već značajne emisije stakleničkih plinova. Virtualne elektrane izbjegavaju ovaj fenomen jer se pretežito baziraju na obnovljivim izvorima i svi su izvori energije distribuirani i decentralizirani.

#### Mikro-mreže:

Virtualne elektrane i mikro-mreže su najpodudarnije tehnologije. Obje se sastoje od skupa potrošača i manjih izvora energije, no virtualne elektrane nerijetko imaju i baterijske spremnike energije. Razlika je očita kad usporedimo svrhu regulacije obje tehnologije. Mikro-mreža je usmjerena na samoregulaciju dok je virtualna elektrana širi koncept i kao cjelina promatra energiju predanu mreži u svrhu tržišnog modela. Mikro-mreža je geografski ograničena, oslanja se na postojanje mrežne infrastrukture i koristi rastavljače i prekidače za spajanje na mrežu odnosno otočni rad, a virtualna elektrana seže bilo gdje sve dok ima odgovarajuće povezanosti, stalno sudjeluje u mrežnim prilikama i sudjeluje u regulaciji frekvencije kroz tržišni model. [11]

#### Virtualni sinkroni kompenzatori:

Radi se o skupini umreženih proizvođača i potrošača s mogućnošću injektiranja ili oduzimanja reaktivne snage. Slično kao i realni sinkroni kompenzatori služe za ublaživanje oscilacija pri naglim ispadima potrošača ili promjenama topologije mreže. Uz to se koriste i za U/Q regulaciju. Efekti inercije se ne postižu uz pomoć mehaničkih zamašnih masa niti regulacije uzbuđenog kruga nekog sinkronog generatora već regulacijom  $\cos \varphi$  umreženih proizvođača i potrošača slijedeći pritom upravljački algoritam. Kao i naspram ostalih razmotrenih subjekata virtualna elektrana je konceptualno i geografski širi te tržišno orijentiraniji subjekt od virtualnog sinkronog kompenzatora. [12]

### 3.4. Optimizacija

U svrhu lakšeg razumijevanja svih faktora uključenih u funkcioniranje virtualne elektrane potrebno je izraditi odgovarajući matematički model. Pritom je važno imati na umu primarnu funkciju konkretne virtualne elektrane – je li tehnička rezerva ili tržišni subjekt. Postoji mogućnost višestrukog preklapanja ciljeva, pogotovo planirajući proizvodnju za dan unaprijed. Stoga u nastavku prikazimo samo neke osnovne odrednice matematičkih modela.

#### 3.4.1. Monetarni model

Ovaj model virtualne elektrane je karakterističan po tome što predstavlja sva svojstva i troškove sačinjavajućih jedinica. Zanimljivo je utjecaj distribucijske mreže na prilike unutar virtualne elektrane. Dodatne usluge se ograničavaju na trgovanje električnom energijom na burzi i regulaciju putem bilateralnih ugovora između agregatora i operatora distribucijskog sustava. Optimalna burzovna strategija prikazana je sljedećim jednadžbama (Jednadžba 3.1-Jednadžba 3.3), gdje je  $\Omega_{tb}^{DU} \cdot P_{tb}^{DU}$  prihod od snage prodane na burzi električne energije za predstojeći dan i  $\Omega_t^{bal}(\text{donja}_{reg} \cdot P_t^{donja} - \text{gornja}_{reg} \cdot P_t^{gornja})$  prihod ili rashod s obzirom na predviđene vrijednosti obnovljivih izvora energije za taj dan. Ukoliko je dostupnost obnovljivih izvora za čitavu mrežu taj dan manja od predviđene virtualna elektrana profitira od ove domene, a ukoliko je veća na gubitku je zbog iste. Cijene snage se formiraju za dan unaprijed prema statistici mrežnog priključnog čvorišta distribuiranog izvora.

$$\Omega_{uk} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{b=1}^B \Omega_{tb}^{DU} \cdot P_{tb}^{DU} + \Omega_t^{izj} (\text{donja}_{reg} \cdot P_t^{donja} - \text{gornja}_{reg} \cdot P_t^{gornja}) - \text{trošak}_t^{std} \right] \quad (3.1)$$

gdje je:

$\Omega_{uk}$  – ukupni prihod ili rashod virtualne elektrane unutar zadanog perioda

$T$  – vremenski period (najčešće 24h)

$B$  – skup različitih burzi i/ili burzovnih opcija

$\Omega_{tb}^{DU}$  – jedinična cijena zakupljene snage na burzi dan unaprijed

$P_{tb}^{DU}$  – zakupljena snaga na burzi dan unaprijed

$\Omega_t^{izj}$  – jedinična cijena zakupa snage izjednačenja

$\text{donja}_{reg}$  – faktor odstupanja od donje predviđene granice snage OIE

$\text{gornja}_{reg}$  – faktor odstupanja od donje predviđene granice snage OIE

$P_t^{donja}$  – trenutna snaga izjednačenja niže snage proizvodnje OIE

$P_t^{gornja}$  – najviša trenutna snaga izjednačenja više snage proizvodnje OIE

$\text{trošak}_t^{std}$  – trenutni standardizirani trošak vođenja virtualne elektrane.

$$\sum_{b=1}^B P_{tb}^{DU} + P_t^{punjenje} + P_t^{donja} = P_t^{vjetar} + P_t^{solarna} + P_t^{gornja} + P_t^{seg.virt.el.} + P_t^{praznjenje} \quad (3.2)$$

gdje je:

$P_{tb}^{DU}$  – zakupljena snaga na burzi dan unaprijed

$B$  – skup različitih burzi i/ili burzovnih opcija

$P_t^{punjenje}$  – trenutna snaga punjenja energetske rezerve

$P_t^{donja}$  – trenutna snaga izjednačenja niže snage proizvodnje OIE

$P_t^{vjetar}$  – trenutna proizvodnja iz energije vjetra

$P_t^{solarna}$  – trenutna proizvodnja iz solarne energije

$P_t^{gornja}$  – najviša trenutna snaga izjednačenja više snage proizvodnje OIE

$P_t^{seg.virt.el.}$  – trenutna proizvodna snaga segmenta virtualne elektrane

$P_t^{praznjenje}$  – trenutna snaga pražnjenja energetske rezerve.

$$\begin{aligned} trošak_t^{std} = & trošak pokretanja_t^{seg.virt.el.} \cdot v_t^{seg.virt.el.} + trošak zaustavljanja_t^{seg.virt.el.} \\ & \cdot k_t^{seg.virt.el.} + \text{statički trošak} \cdot s_t^{seg.virt.el.} - \sum_{j=1}^J \Omega_j^{virt.el.} \cdot P_{tj}^{seg.virt.el.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

gdje je:

$trošak_t^{std}$  – trenutni standardizirani trošak vođenja virtualne elektrane

$trošak paljenja_t^{seg.virt.el.}$  – trošak paljenja segmenta virtualne elektrane

$trošak gašenja_t^{seg.virt.el.}$  – trošak gašenja segmenta virtualne elektrane

$\text{statički trošak}$  – statička komponenta troška vođenja virtualne elektrane

$v_t^{seg.virt.el.}$  – trenutni koeficijent pokretanja segmenta virtualne elektrane

$k_t^{seg.virt.el.}$  – trenutni koeficijent zaustavljanja segmenta virtualne elektrane

$s_t^{seg.virt.el.}$  – trenutni koeficijent aktivnosti segmenta virtualne elektrane

$J$  – skup segmenata virtualne elektrane

$\Omega_j^{virt.el.}$  – jedinična cijena zakupljene snage virtualne elektrane

$P_{tj}^{seg.virt.el.}$  – trenutna proizvodna snaga segmenta virtualne elektrane.

Ukoliko je u trenutku  $t$  aktivan jedan segment virtualne elektrane koeficijent  $s_t$  je 1, inače je 0. Ukoliko se u trenutku  $t$  jedan segment pokreće koeficijent  $v_t$  je 1, inače je 0. I analogno, ako je u trenutku  $t$  jedan segment u fazi zaustavljanja koeficijent  $k_t$  je 1, inače je 0. Izraz  $\sum_{j=1}^J \Omega_j^{virt.el.} \cdot P_{tj}^{seg.virt.el.}$  prikazuje sumu prihoda svake od  $J$  jedinica.

### 3.4.2. Tehnički model

Tehnički model virtualne elektrane je ograničen na određeno geografsko područje. Kao i monetarni model i ovaj model predstavlja sva svojstva i troškove sačinjavajućih jedinica. Razlika je u tome što se ovaj model pobliže bavi utjecajem mreže na karakteristike virtualne elektrane. Uključuje direktne intervencije agregatora u korist operatora distribucijskog sustava. Da bi bili zadovoljeni tehnički kriteriji potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete (Jednadžbe 3.4 i 3.5).

$$\begin{aligned}
 P_{virt.el.}^t + \sum_{i \in dist.proiz.} P_{dist.proiz.}^{i,t} + \sum_{s \in rezerva} P_{praznjenje}^{s,t} + \sum_{r \in OIE} P_{OIE}^{r,t} \\
 = \sum_{p \in potrosnja} P_{potrosnja}^{p,t} + \sum_{s \in rezerva} P_{punjenje}^{s,t}
 \end{aligned}$$

(3.4)

gdje je:

$P_{virt.el.}^t$  – trenutna proizvodnja virtualne elektrane

$P_{dist.proiz.}^{i,t}$  – trenutna proizvodnja  $i$ -tog distribuiranog proizvođača

$P_{praznjenje}^{s,t}$  – trenutna snaga pražnjenja  $s$ -te energetske rezerve

$P_{OIE}^{r,t}$  – trenutna proizvodnja  $r$ -tog obnovljivog izvora energije

$P_{potrosnja}^{p,t}$  – trenutna potrošnja  $p$ -tog potrošača

$P_{punjenje}^{s,t}$  – trenutna snaga punjenja  $s$ -te energetske rezerve.

$$potrosnja_{ekvivalentna}^t = \sum_{s \in rezerva} p_{punjenje}^{s,t} + \sum_{p \in potrosnja} (P_{fiksna}^{p,t} + P_{promjenjiva}^{p,t} - P_0^{p,t})$$

(3.5)

gdje je:

$p_{potrošnja}^{t_{ekvivalentna}}$  – ekvivalentna trenutna potrošnja elektroenergetskog sustava

$P_{punjenje}^{s,t}$  – trenutna snaga punjenja s-te energetske rezerve

$P_{fiksna}^{p,t}$  – trenutna fiksna potrošnja p-tog potrošača

$P_{promjenjiva}^{p,t}$  – trenutna promjenjiva potrošnja p-tog potrošača

$P_0^{p,t}$  – trenutna snaga potrošača pod prekidom opskrbe.

Prekidi u opskrbi električnom energijom mogu biti tehničke prirode i kao takvi slučajni ili pak intencionalni radi očuvanja frekvencije mreže, što se koristi samo kao krajnja mjera očuvanja sustava. U formuli je ova kategorija snage prikazana s negativnim predznakom jer smanjuje ukupnu potrošnju u danom trenutku. Promatrajući formule tehničkog modela virtualne elektrane lako je primijetiti da je, za razliku od monetarnog, ovaj u potpunosti baziran na tokovima snaga, a financijska konstrukcija se izvodi iz tehničke. Slijede grube aproksimacije monetarnih tokova uzrokovanih djelovanjem tehničkog modela virtualne elektrane (Jednadžba 3.6 - Jednadžba 3.9).

$$\Phi^{virt.el.,t} \leq \sum_{i \in dist.proiz.} P_{dist.proiz.}^{i,t} + \sum_{s \in rezerva} P_{praznjenje}^{s,t} + \sum_{r \in OIE} P_{OIE}^{r,t}$$

(3.6)

gdje je:

$\Phi^{virt.el.,t}$  – snaga proizvodnje predočena na burzi

$P_{dist.proiz.}^{i,t}$  – trenutna proizvodnja i-tog distribuiranog proizvođača

$P_{praznjenje}^{s,t}$  – trenutna snaga pražnjenja s-te energetske rezerve

$P_{OIE}^{r,t}$  – trenutna proizvodnja r-tog obnovljivog izvora energije.

$$\partial^{virt.el.,t} \leq \sum_{s \in rezerva} p_{punjenje}^{s,t} + \sum_{p \in potrošnja} (P_{fiksna}^{p,t} + P_{promjenjiva}^{p,t} - P_0^{p,t})$$

(3.7)

gdje je:

$\partial^{virt.el.,t}$  – snaga potrošnje predočena na burzi

$P_{punjenje}^{s,t}$  – trenutna snaga punjenja s-te energetske rezerve

$P_{fiksna}^{p,t}$  – trenutna fiksna potrošnja p-tog potrošača

$P_{promjenjiva}^{p,t}$  – trenutna promjenjiva potrošnja p-tog potrošača

$P_0^{p,t}$  – trenutna snaga potrošača pod prekidom opskrbe.

$$\sigma_{ul}^t = \Omega_b^{el.en.,t} \cdot \Phi^{virt.el.,t}$$

(3.8)

gdje je:

$\sigma_{ul}^t$  – trenutni prihod od trgovine na burzi

$\Omega_b^{el.en.,t}$  – trenutna cijena električne energije na burzi

$\Phi^{virt.el.,t}$  – snaga proizvodnje predočena na burzi.

$$\sigma_{iz}^t = \Omega_b^{el.en.,t} \cdot \partial^{virt.el.,t}$$

(3.9)

gdje je:

$\sigma_{iz}^t$  – trenutni rashod od trgovine na burzi

$\Omega_b^{el.en.,t}$  – trenutna cijena električne energije na burzi

$\partial^{virt.el.,t}$  – snaga proizvodnje predočena na burzi.

### 3.5. Učešće virtualnih elektrana u regulaciji frekvencije

Održanje frekvencije elektroenergetskog sustava unutar prihvatljivih granica načelna je zadaća operatora prijenosnog sustava. Općenito uzevši, elektroenergetski je sustav u cijelosti podložan oscilacijama frekvencije kao i svi njegovi sačinjavajući dijelovi. Svaka promjena snage proizvodnje i/ili potrošnje u sklopu sustava dovodi do porasta odnosno pada frekvencije. Čak i nepredviđeni ispadi vodova i elemenata ili njihovi česti uklopi i isklopi imaju utjecaj na frekvenciju mreže. Iz tog razloga postoje sustavi primarne, sekundarne i tercijarne regulacije frekvencije.

### 3.5.1. Čimbenici

U pravilu vrijedi da što je veći udio klasičnih sinkronih generatora veća je i ukupna inercija mreže. Matematički model frekvencijskog odziva elektroenergetskog sustava s obzirom na proizvodnju i potrošnju može se definirati pomoću jednadžbe njihanja (Jednadžba 3.10).

$$M \frac{d}{dt} \omega(t) \approx P_{\text{proizvodnja}}(t) - P_{\text{potrošnja}}(t) - P_{\text{gubici}}(t)$$

(3.10)

gdje je:

$M$  – inercija elektroenergetskog sustava

$\frac{d}{dt} \omega(t)$  – stopa promjene frekvencije sustava

$P_{\text{proizvodnja}}(t)$  – trenutna proizvodnja

$P_{\text{potrošnja}}(t)$  – trenutna potrošnja

$P_{\text{gubici}}(t)$  – trenutni gubici.

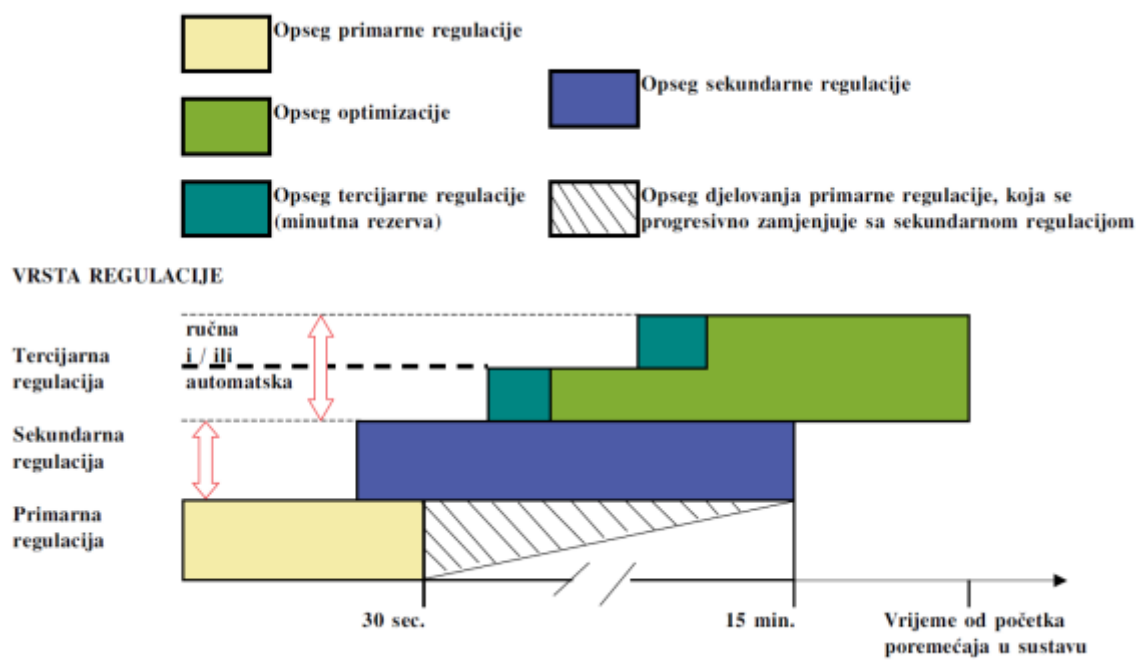
Virtualne elektrane se učestalo oslanjaju na obnovljive izvore energije i kao takve mogu poslužiti u svrhu decentralizacije energetske izvora. No, to donosi i određene izazove. Naime, smanjenjem broja klasičnih sinkronih strojeva smanjuje se moment tromosti. Nastavi li se takav trend na što većem području dolazi do nepovoljnog omjera mjere tromosti sustava naspram tokova snaga. Gubici u prijenosu se mogu aproksimirati kao proporcionalni snazi potrošnje. Radi održavanja frekvencije unutar dozvoljenih granica, porastom snage potrošnje raste i snaga proizvodnje kako bi proizvodnja i potrošnja bile ujednačene. Stoga je ispravno aproksimirati gubitke u prijenosu i kao proporcionalne snazi proizvodnje. Razmatrajući jednadžbu (3.10) jasno je da smanjenjem inercije sustava  $M$  za istu razliku snaga  $P$  raste stopa promjene frekvencije  $\frac{d}{dt} \omega(t)$ .

### 3.5.2. Regulacija

Regulacija frekvencije mreže provodi se hijerarhijski kao što je objašnjeno u *potpoglavlju 2.2.1*. Sada će biti riječi o tehničkim uvjetima i fizikalnoj podlozi samih procesa regulacije. U blažim slučajevima sama inercija generatora preuzima na sebe utjecaj oscilatornih poremećaja. Ukoliko to ne urodi plodom, već se radi o značajnijoj i trajnoj razlici između snaga proizvodnje i potrošnje potrebna je izravna intervencija sustava za regulaciju frekvencije. Prvi takav sustav u lancu je sustav primarne regulacije frekvencije mreže. Radi se o brzom decentraliziranom načinu regulacije. Razlika nominalne i stvarne frekvencije se mjeri i zatim se pomoću proporcionalnog regulatora povećava snaga pogonskih strojeva generatora da bi se povećala snaga proizvodnje i da bi došlo do ustaljenja frekvencije. Tipične veličine rezervi aktivne snage

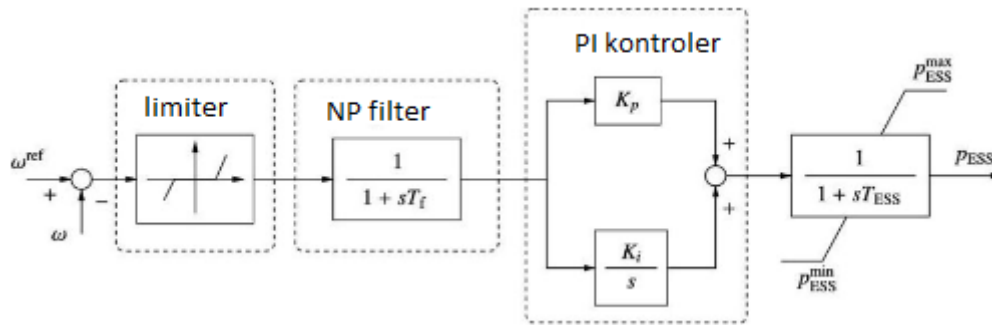


generatora za uspješno sudjelovanje u primarnoj regulaciji su 1.5% za dobro povezane sustave, tj. 10% pri otočnom radu. Primarna regulacija je u vremenskoj domeni u rangu od 30-ak sekundi od nastanka poremećaja. Slijedi sekundarna regulacija vremenski korespondentna periodu od 30 sekundi od nastanka poremećaja do petnaest minuta od istog. Sekundarna regulacija je centralizirano upravljana od strane operatora prijenosnog sustava mada provedba može biti lokalna. Zahtjevi rezervi aktivnih snaga za sudjelovanje u ovoj formi regulacije frekvencije rastu na cca. 6% za termoelektrane i 15% za hidroelektrane, shodno različitim dinamičkim svojstvima. [13] U slučajevima trajnog i nesavladivog otklona frekvencije od standardne, operator prijenosnog sustava pribjegava završnoj formi regulacije. Radi se o tercijarnoj regulaciji frekvencije. Provodi se dijelom automatski dijelom ručno u roku od 15 minuta do nekoliko sati od nastanka poremećaja frekvencije. Moguće je zatražiti od značajnijih potrošača da smanje potrošnju nakratko ili pak od proizvođača da povećaju proizvodnju uz odgovarajuću naknadu. Virtualne elektrane kroz ovaj segment regulacije značajno povećavaju sigurnost sustava radi uvelike poboljšane komunikacije među proizvođačima i potrošačima. Na slici je prikazan vremenski raspored i slijed korištenja različitih sustava frekvencijske regulacije (*Slika 3.2.*).



*Slika 3.2. Vrste regulacije prema vremenskom odmaku od frekvencijskog poremećaja*

Virtualne elektrane idu korak dalje i pripomažu regulaciji frekvencije kroz više faktora istovremeno. Velika su prednost dobro umreženi spremnici energije koji služe kao upravljiva rezerva u svrhu regulacije frekvencije. Primjerice, velika je vjerojatnost da će se u nekom dobro osunčanom području velik broj ljudi odlučiti za dodatak solarnih panela i baterijskog spremnika u svoje kućanstvo u svrhu priključenja virtualnoj elektrani i ostvarenju prihoda i prava na poticaje. Dođe li do promjene frekvencije mnoštvo takvih kućanstava služi kao spremnik energije i sudjeluje u regulacijskom procesu. Na sljedećoj ilustraciji prikazana je blok shema općeg upravljačkog algoritma sustava regulacije za spremnike energije (*Slika 3.3.*).



Slika 3.3. Blok shema sustava primarne regulacije na bazi spremnika energije

Evidentno je da su potrebni neki dodaci klasičnom proporcionalnom regulatoru da bi uspješno upravljao sustavom pohrane energije. Na Slici 3.3. primjećujemo da se referentna vrijednost frekvencije ili njezin ekvivalent kružne frekvencije uspoređuje sa stvarnom. Razlika se filtrira kroz selektor signala jer nije ni moguće da je razlika prevelika. U protivnom bi došlo do raspada sustava prije samog djelovanja regulacije. Takav signal pročišćen od eventualnih slučajnih nadvišenja ima manju osjetljivost te se nadalje filtrira klasičnim niskopropusnim filtrom i nastavlja do PI regulatora. Krajnji član predstavlja skup uređaja za pohranu energije koji imaju svoj kapacitet, ali i vremensku konstantu i ograničenje snage punjenja i pražnjenja pa su stoga dani kao još jedan u nizu niskopropusni filter.

Zanimljivo je da i sekundarna regulacija nameće dodatne zahtjeve na upravljački algoritam virtualne elektrane. Tako primjerice svako odstupanje od linearne karakteristike funkcije oblika rampe koja definira snagu proizvodnje u vremenu donosi gubitke agregatoru virtualne elektrane. Razlog je jednostavan – usluga učesća u sekundarnoj regulaciji se plaća od strane operatora prijenosnog sustava prema dogovorenim parametrima. Za održavanje frekvencije potrebna je određena promjena proizvodnje aktivne snage u danom vremenskom intervalu nakon prorade primarne regulacije. Operator ima pravo naplatiti penale agregatoru virtualne elektrane za negativnu promjenu snage, dok se pozitivnu ne penalizira, ali i ona stvara gubitak radi nenaplativosti.

### 3.6. Upravljanje rizikom

Upravljanje elektroenergetskim sustavom neminovno donosi sa sobom određene rizike. Koliko god su prognostički alati napredni i koliko god sveobuhvatan bio model predviđenih vrijednosti proizvodnje i potrošnje za predstojeće razdoblje uvijek postoji određena doza nesigurnosti glede realnog tijeka događaja. Drugim riječima, rizik povećava sklonost devijacijama od predviđenih planova i njihovu amplitudu. Najveći uzrok rizika su nedvojbeno obnovljivi izvori energije. Napomenuli smo kako nastaje sve veći broj distribuiranih proizvođača električne energije, a većina njih se bazira upravo na obnovljivim izvorima energije. Pojednostavljeno gledano čitav dio elektroenergetskog sustava pod nadzorom agregatora virtualne elektrane se u vremenskoj domeni dijeli na niz trenutaka gdje u svakom trenutku postoji predviđena vrijednost proizvodnje i potrošnje ili jednostavno tok snaga za koji se s dostatnom sigurnošću može jamčiti da je istinit kao i stopa rizika u tom istom trenutku (Jednadžba 3.11).

$$P(t) = \mu(t) + \epsilon(t)$$

(3.11)

gdje je:

$P(t)$  – stvarni trenutni tok snage u mreži

$\mu(t)$  – prognozirana vrijednost trenutnog toka snage

$\epsilon(t)$  – devijacija vrijednosti trenutnog toka snage.

Tokovi snaga prema dnevnom rasporedu potrošnje, tj. voznom redu elektrana ili pak prognostici u slučaju opskrbe iz obnovljivih izvora energije predstavljeni su s  $\mu(t)$ .  $\epsilon(t)$  se uzima za stopu rizika u smislu odstupanja snaga u nekom trenutku  $t$ .

Postoje brojne metode za provedbu optimizacije i u smislu pronalaska tehnički i u smislu pronalaska financijski optimalnog rješenja. U nastavku su razmotrene najpopularnije.

### 3.6.1. Metode za predviđanje tehničkog aspekta rizika

#### 1. Monte Carlo analiza

- Najpopularnija i programski najpodržanija stohastička metoda
- Potrebna samo razdioba vjerojatnosti
- Velik broj iteracija

#### 2. Metoda robusne optimizacije

- Za pronalazak rješenja najimunjih na rizike
- Potrebna samo stopa sigurnost svakog parametra, ne i razdioba
- Brza, efikasna, mali zahtjevi za resursima

#### 3. “Rolling horizon“ metoda

- Računanje optimalnih vrijednosti u realnom vremenu
- Iza svakog vremenskog perioda simulacija se resetira
- Uvelike smanjuje rizik uporabe obnovljivih izvora energije

#### 4. Analiza intervala

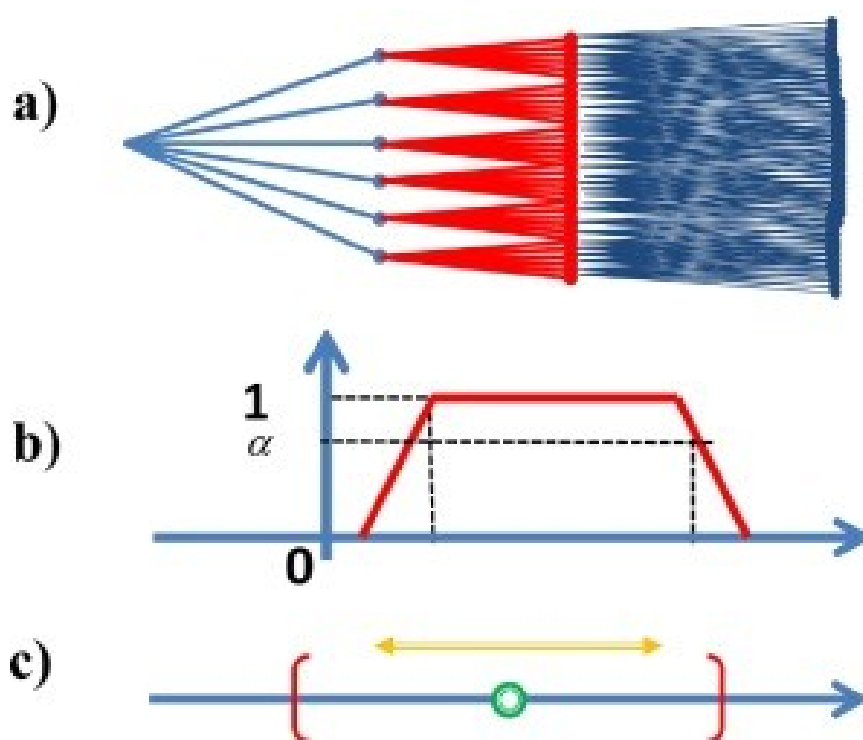
- Svaki element mreže predstavlja dio krivulje
- Dijelovi prikazani intervalima
- Ograničenja u proizvodnji i potrošnji su gornja i donja granica
- Svaki dio krivulje optimiran na svoj način
- Finalno rješenje kompletirana krivulja, tj. put toka snage

5. Metoda estimacije točaka

- Odabire vrijednosti elemenata u nekom trenutku prema statičkom modelu
- Potrebna razdioba vjerojatnosti za ulazne elemente
- Vrlo efikasna i jednostavna metoda za aproksimaciju snage potrošača

6. FCCP – “Fuzzy chance constraint programming“

- Matematička metoda na bazi vjerojatnosti ishoda
- Reverzna utoliko što jamči ishod, a bira parametre na bazi vjerojatnosti ishoda
- Najpogodnija za višenamjenske simulacije, npr. optimizacija profita uz obavezno pridržavanje određene sigurnosti tehničkih parametara [14]



Slika 3.5. Grafički prikaz načelnog oblika funkcioniranja metoda optimizacije:  
a) Monte Carlo analiza b) FCCP metoda c) metoda robusne optimizacije

3.6.2. Metode za predviđanje financijskog aspekta rizika

1. Usporedba stohastičkih pokazatelja

- Kvalitativna metoda
- Brza usporedba i odbacivanje jako pogrešnih parametara
- Moguće i ručno

2. Odabir prema količini informacija

- Nije stohastička metoda već logički proces
- Algoritam na bazi razlike poznatih i nepoznatih vrijednosti nekog elementa
- Pretpostavka da je rješenje s više poznatih informacija optimalno

## 4. Mreža sutrašnjice

Očekuje se da će se do 2030. godine korištenje fosilnih goriva za proizvodnju električne energije drastično smanjiti. Predviđa se postupno povećanje ukupne potrošnje električne energije u svijetu do 2030. godine, pri čemu se znatan dio tog rasta pripisuje zamjeni vozila na pogon motorima s unutarnjim izgaranjem električnim ekvivalentima. Projekcije nalažu da će većina proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva prijeći na prirodni plin, prvenstveno zbog njegove isplativosti.

Za učinkovito ublažavanje globalnog zatopljenja, značajno smanjenje emisija ugljikovog dioksida je imperativ do 2030. Velik broj država ima, bilo nametnute, bilo dragovoljno postavljene ciljeve usmjerene na postizanje smanjenja emisija do 2050. Mnogi od tih ciljeva uključuju smanjenje emisija na razine ispod onih iz 2005. do 2025. ili pak onih iz 1990. do 2030., u ovisnosti o konkretnom sporazumu. Kako bi ispunili ove ciljeve proizvodnje emisija, različiti sektori unutar gospodarstva morat će poboljšati učinkovitost i zamijeniti izvore energije koji emitiraju emisije stakleničkih plinova alternativama manje štetnim za okoliš. Naime, zamjena ugljena i plina energijom vjetra i sunca očita je strategija. Iako plin emitira onečišćenje, doduše manje stakleničkih plinova po jedinici energije od ugljena, očekuje se da će zadržati značajnu prisutnost u energetske sektoru do 2030. godine.

Na pomolu je pad proizvodnje ugljena zbog tržišne dinamike i povlačenja zastarjelih elektrana. Regulatorne mjere, poput provedbe obveznog kupovanja prava na emitiranje stakleničkih plinova ili strožih zakonskih propisa o onečišćenju zraka, mogle bi poslužiti kao posljednji udarac održivosti ugljena. Do 2030. doprinos ugljena proizvodnji električne energije vjerojatno će se smanjiti na ispod 20 posto, a mogao bi čak pasti ispod 10 posto ako cijene plina ostanu niske, a troškovi obnovljive energije nastave padati. Usvajanje nacionalnog poreza na emisije ugljikovog dioksida moglo bi ubrzati ovu promjenu povećanjem troškova povezanih s proizvodnjom električne energije u termoelektranama na ugljen.

Udio solarne energije i energije vjetra nastavit će se povećavati. Ako se sustav poticaja za solarna ulaganja postupno ukine prema planu do kraja 2024., moglo bi doći do skromnog usporavanja stope rasta broja solarnih instalacija tijekom drugog dijela desetljeća. Unatoč tome, očekuje se da će implementacija solarnih elektrana ipak ubrzati i nadmašiti očekivanja kako investicijski troškovi nastave padati. Osim toga, zastupljenost vjetroelektrana nastavit će rasti kako se razvijaju i postavljaju veće turbine i realizira više kompleksnih projekata. U mnogim će regijama prevladavajući izbor za nove izvore električne energije vjerojatno biti vjetar i Sunce zbog njihove pouzdanosti i potencijalno ekonomičnije cijene. Zanemarivanje razvojnih tendencija moglo bi energetske tvrtke učiniti ranjivima na promjene. Više nego ikad prije naglašava se važnost prilagodbe novim trendovima. Očekuje se da će integracija tzv. "solar plus" rješenja za skladištenje također igrati značajnu ulogu u ovoj transformaciji.

## 4.1. Smart grid i kriptovalute

Što je zapravo blockchain i zašto bi trebao zaokupiti našu pozornost? Pojava blockchain tehnologije, jedne od platformi digitalnog umrežavanja i pohranjivanja podataka, izazvala je značajan globalni interes nakon uvođenja kriptovalute Bitcoin 2008. godine, koja je postigla zapanjujuće visoke vrijednosti. Ovaj porast potaknuo je značajan uzlet u istraživanju i razvoju distribuiranih sustava, nudeći značajan potencijal za sigurnije vođenje distribuiranih izvora.

U svojoj jezgri, blockchain predstavlja nepromjenjivu tehnologiju distribuiranog podatkovnog lanca koja omogućava sigurnu pohranu informacija. U standardnom lancu blockchaine, podaci se nalaze u digitalnoj "knjizi" (eng. "ledger") dostupnoj na više računala. Ova digitalna "knjiga" ima oblik tablice koja sadrži retke za svaku promjenu. Naime, ovi su unosi trajni i osiguravaju sveobuhvatnu evidenciju svih transakcija i izmjena. To implicira da svaka prilagodba zahtijeva ažuriranje svake instance blockchaine kako bi odražavala promjenu, održavajući integritet sustava.

Ažuriranje ovih distribuiranih lanaca blokova ovisi o algoritmima konsenzusa. Ovi algoritmi omogućuju dogovor o ažuriranju bloka, bilo putem većinskog dogovora među sudionicima ili onima koji su aktivno uključeni u održavanje točnosti glavne "knjige". Dvije istaknute varijante algoritma konsenzusa poznate su kao "dokaz udjela" i "dokaz rada".

Algoritmi konsenzusa "dokaz udjela" nalaze primjenu u korporativnim blockchain sustavima s ciljem minimiziranja računalnih troškova. Ova metoda dodjeljuje težinu konsenzusa na temelju sudionikovog udjela ili interesa za ishod. Suprotno tome, "dokaz rada" zahtijeva rasipan računalni rad kao zahtjev za glasovanje. Bitcoin, koji radi na temelju "dokaza rada", uspostavlja konsenzus putem računala tražeći određeni nasumični broj koji bi proizveo točan rezultat kriptografske hash funkcije za predloženi blok transakcije.

Međutim, energetska intenzivna priroda "dokaza o radu" izaziva zabrinutost oko troškova i utjecaja na okoliš. Blockchaini mogu usvojiti modele s dopuštenjem ili bez dopuštenja. Prvi, dopušteni modeli blockchaine, ograničavaju glasačka prava na ovlaštene čvorove i sustave. Kritičari tvrde da takvim lancima blokova nedostaje autentičnost jer im nedostaju javne i distribuirane karakteristike. Unatoč tome, unutar korporativnog područja, modeli blockchaine s dopuštenjem, često dizajnirani kao dijeljene "knjige", predstavljaju prednosti u sigurnosti, energetske učinkovitosti i performansama u odnosu na blockchaine orijentirane na kriptovalute.

Razmatrajući prednosti korištenja zakonskog okvira koji se temelji na blockchain tehnologiji za upravljanje skladištenjem energije i fleksibilnim resursima, lako je primijetiti da blockchain omogućuje nove ekonomske modele, posebno tokenomiku, ostvarive decentralizacijom. Ovi sustavi nagrađivanja temeljeni na žetonima mogu potaknuti odgovorno ponašanje u smislu baratanja energijom i kompenzirati suradnike za njihove energetske učinkovite radnje.

Najuspješnija primjena kriptovaluta, odnosno blockchain tehnologije općenito, je ravnopravna trgovina (eng. “peer-to-peer“) između virtualnih elektrana ili pak između virtualne elektrane i privatnih osoba. Nema bojazni od gubitka podataka jer su zapisi unikatne prirode i može im se pristupiti s bilo kojeg računala. Svaki korisnik koji sudjeluje u formiranju novih blokova ima pravo na uvid u kompletan blockchain.

Blockchain tehnologija i brojne kriptovalute koje se na njoj temelje pružaju mogućnost implementacije “pametnih ugovora“. Radi se o samoizvršavajućim nizovima naredbi za čije pokretanje treba zadovoljiti određene uvjete. Takvi ugovori rade poput jednostavnog “ako“ (eng. “if“) uvjeta u učestalim programskim jezicima, no uz značajno poboljšanu sigurnost radi svojstava blockchaina. Čitav kod, naredbeni niz i uvjetni dio, zapisan je unutar “knjige“ i samim tim nepromjenjiv.

Najistaknutija kriptovaluta s podrškom za pametne ugovore je Ethereum. Pametne ugovore izvršava Ethereum Virtual Machine, softverska platforma instalirana na Ethereum čvorovima, stvarajući kopije blockchain transakcija. Postoje EVM-ovi koji omogućuju stvaranje pametnih ugovora u C++, C#, Java, JavaScript, Python, Ruby, Go, Haskell, Rust, Elixir, Erlang i drugim popularnim programskim jezicima.

U smislu interakcije virtualne elektrane i naprednog kućanstva, ovakva izvedba omogućuje automatizaciju izvršenja zahtjeva za sudjelovanjem u upravljivoj potrošnji uz transparentan zapis o svim aktivnostima koji je imun na zlonamjerne promjene. Sustav nagrađivanja je također automatiziran i djeluje trenutno čim se zadovolje potrebni uvjeti.

Međutim, bit blockchain tehnologije ne leži samo u njenim tehnološkim aspektima, već i u razvoju korporativnog načina razmišljanja u vezi s potencijalnom solventnošću distribuiranih sustava. Međusobna komunikacija između naprednih uređaja unutar okvira interneta stvari olakšava optimizaciju tokova snage i upravljanje izvorima.

U kontekstu razvojne tendencije, vrijednost blockchaina nadilazi samu tehnologiju. Iako blockchain kao takav nosi tehnološki napredak, pravi potencijal leži u inovacijama oko blockchaina. To je posebno važno jer korporativni sektor uvelike ulaže u distribuirane sustave i blockchain rješenja. U konačnici, ova ulaganja, a ne sama tehnologija, imaju najveći značaj pri prijelazu na naprednije, decentralizirane i distribuirane električne mreže.

## **4.2. ESCO model**

Model financiranja investicije “Energy Savings Performance Contract“ (ESPC) se koristi za implementaciju energetski učinkovitih tehnologija i poboljšanja u okviru projekta tehnologije napredne mreže. ESPC model uključuje partnerstvo između tvrtke za energetske usluge (ESCO) i klijenta (nerijetko tvrtke za opskrbu električnom energijom, općine ili druge organizacije) kako bi se postigla ušteda energije kroz povećanje učinkovitosti primjenom naprednih tehnologija u kontekstu upravljanja mreže.



Tipičan tijek razvoja ESCO modela sačinjavaju:

1. Uspostava partnerstva:  
Proces počinje tako što ESCO i klijent sklapaju ugovor o partnerstvu. ESCO je odgovoran za projektiranje, implementaciju i financiranje projekta napredne mreže. Klijent, s druge strane, ima koristi od uštede energije i poboljšane učinkovitosti koja proizlazi iz projekta.
2. Energetska revizija i procjena:  
ESCO provodi sveobuhvatnu energetske reviziju i procjenu klijentove postojeće energetske infrastrukture i pametnih mrežnih sustava. Ova procjena pomaže identificirati područja s potencijalom za poboljšanje, rasipanja energije i mogućnosti za primjenu naprednih tehnologija.
3. Odabir i implementacija tehnologije:  
Na temelju nalaza energetske revizije, ESCO radi s klijentom na odabiru odgovarajućih tehnologija napredne mreže i energetski učinkovitih rješenja. Te tehnologije mogu uključivati naprednu mjernu infrastrukturu, automatizaciju distribucije, sustave upravljive potrošnje, skladištenje energije, prediktivnu analitiku i još mnogo toga.
4. Dizajn i implementacija projekta:  
ESCO razrađuje plan projekta, uključujući strategiju implementacije, tehnološku integraciju, proces izvedbe radova i vremenski raspored projekta. Faza implementacije uključuje fizičku instalaciju i integraciju odabranih tehnologija pametnih mreža.
5. Mjerenje i nadzor performansi:  
Nakon što se tehnologije pametne mreže uspostave, ESCO implementira napredne sustave mjerenja i nadzora za kontinuirano mjerenje potrošnje energije, performansi sustava i operativne učinkovitosti. Ovi se podaci koriste za procjenu učinkovitosti primijenjenih tehnologija i praćenje uštede energije.
6. Ušteda energije i smanjenje troškova:  
Kako tehnologije pametne mreže postanu potpuno operativne, klijent počinje osjećati uštedu energije i smanjenje operativnih troškova. Ove uštede su rezultat optimiziranog rasporeda potrošnje energije, smanjenog rasipanja, poboljšanog upravljanja mrežom i pojačanog angažmana korisnika.

Što se tiče ugovornih obveza i pravne strane investicije, valja napomenuti određene značajke. U ESPC-u, ESCO-ova naknada u sklopu modela zajedničke uštede često je vezana za stvarne postignute uštede energije. Financijski aranžman može i ne mora uključivati model zajedničke uštede, gdje se dio uštede troškova energije koju ostvari klijent dodjeljuje ESCO-u. To znači da je prihod ESCO-a izravno povezan s uspjehom projekta u postizanju energetske učinkovitosti. Financijski uvjeti ESPC-a obično uključuju dogovoreno razdoblje povrata. Tijekom tog razdoblja ESCO koristi dio uštedene energije kako bi nadoknadio početno

ulaganje u tehnologije pametne mreže. Nakon završetka razdoblja povrata, klijent počinje uviđati punu financijsku korist projekta.

ESPC je često strukturiran kao dugoročno partnerstvo, dopuštajući klijentu da nastavi imati koristi od tehnologija pametne mreže nakon razdoblja povrata. ESCO može osigurati tekuće održavanje, ažuriranje sustava i podršku kako bi osigurao da tehnologije nastave pružati optimalne performanse. Jedna od prednosti ESPC modela je ta što pomaže u ublažavanju rizika za klijenta. Budući da je ESCO odgovoran za dizajn projekta, implementaciju i praćenje izvedbe, klijent nije izložen početnim troškovima i tehničkim složenostima povezanim s usvajanjem novih tehnologija naprednih mreža.

ESCO model financiranja nudi obostrano koristan dogovor u kojem tvrtka koja je pružatelj usluge osigurava stručnost i resurse za implementaciju tehnologija napredne mreže, a klijent uživa u poboljšanoj energetskej učinkovitosti, uštedi troškova i poboljšanim mogućnostima upravljanja mrežom. Ovaj model usklađuje interese obje strana i ubrzava usvajanje inovativnih tehnologija u području naprednih mreža.

## 5. Integracija električnih vozila u mrežu (V2G)

Električna vozila zauzimaju sve veći udio u tokovima snage koju tvrtke za opskrbu energijom moraju uzeti u obzir u svojim planovima. Široka primjena električnih vozila dovest će do značajnog porasta potrošnje električne energije u kućanstvima, zamjenjujući energiju koja se nekoć dobivala iz goriva energijom iz mreže. Projekcije novina New Energy Finance (Bloomberg grupacija) procjenjuju da će potrošnja električne energije povezana s električnim vozilima u Sjedinjenim Državama eskalirati sa 6 TWh (podatak iz 2018.) na nevjerojatnih 1800 TWh do 2040., što bi potencijalno predstavljalo više od 40 posto ukupne potrošnje električne energije u Sjedinjenim Američkim Državama. Druge razvijene zemlje prate ovaj trend. Tako značajan porast potrošnje zahtijeva ulaganja u infrastrukturu, a istovremeno nudi značajne prednosti.

Iako neke prednosti mogu proizaći iz interakcije vozilo-mreža, gdje električna vozila opremljena dvosmjernim pretvaračima vraćaju energiju u mrežu, zabrinutost zbog degradacije baterije vjerojatno će spriječiti da to postane prevladavajuća prednost. Kao što je prethodno objašnjeno, elektrokemijske baterije u električnim vozilima podvrgavaju se smanjenju kapaciteta sa svakim ciklusom punjenja. S obzirom na zabrinutost potrošača o dometu vožnje, vlasnici vozila bi vjerojatno trebali dobiti pravo na dodatne poticaje kako bi svojim vozilima omogućili vraćanje energije u mrežu. Ipak, ako je korištenje automobila kao prijenosnog skladišta energije nepoželjno, zašto ih ne iskoristiti u svrhu upravljive potrošnje? Ako mreža može fleksibilno upravljati značajnim dijelovima potrošnje povezane s električnim vozilima mogla bi smanjiti ukupne troškove vođenja elektroenergetskog sustava prilagodbom potrošnje u skladu s predviđenom proizvodnjom obnovljive energije i drugim čimbenicima.

U *potpoglavlju 3.4* dan je niz jednadžbi koje modeliraju djelovanje virtualne elektrane. Promotrimo li pažljivije jednadžbu (3.6) vidjet ćemo da pražnjenje energetske rezervi pridonosi ukupnoj snazi proizvodnje na razini virtualne elektrane. Velik broj vozila predstavlja značajnu energetske rezervu i pripadnu snagu pražnjenja. Jednadžba (3.9) prikazuje trenutne prihode od trgovanja električnom energijom na burzi. Ključ eksploatacije “vehicle-to-grid” tehnologije je u činjenici da baterije vozila služe u svojstvu energetske rezerve bez pripadnog investicijskog troška. Najvažniji dio je da agregator virtualne elektrane podesi upravljački algoritam tako da se pražnjenje baterija vrši u vrijeme vršnog opterećenja, kada su cijene električne energije na burzi najviše. Statistički će manji, ali dovoljan udio električnih vozila biti priključeno na mrežu u vrijeme vršnih opterećenja. Na taj način se uz isti tok snage i potrošnju baterije ostvaruje veći profit.

Ako je električni automobil priključen na punjač u 18:00 sati. i neiskorišten do 8:00 ujutro sljedećeg dana punjenje se može dogoditi preko noći u bilo kojem trenutku. Jednostavno posjedovanje informacija o tome kada se vozila pune i povezanim obrascima potrošnje energije ima veliku vrijednost za tvrtke za opskrbu električnom energijom. Na primjer, Fleetcarma ima pilot program s njujorškim uslužnim programom Con Edison, nudeći naknadu do 650 USD korisnicima električnih vozila koji sudjeluju u akciji za dijeljenje svojih podataka o punjenju i prilagodbu ponašanja kako bi se punjenje prebacilo na vrijeme izvan vršne potrošnje. Pristupom dovoljnoj količini podataka o lokalnim električnim vozilima, tvrtke za opskrbu električnom energijom mogu konstruirati modele za predviđanje potrošnje unaprijed, u rasponu

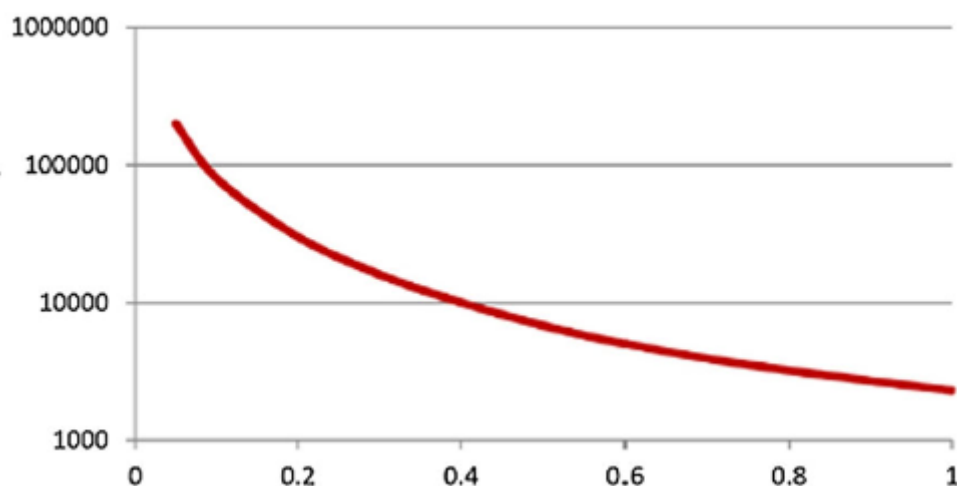
od tri do dvadeset četiri sata. Ako se odobri pristup podacima o lokaciji ili bateriji, opskrbljivač može usporediti trenutnu aktivnost električnih vozila s prošlim obrascima kako bi predvidio kada će se ta vozila puniti i odgovarajuću potrošnju koju će prouzročiti. Ova vrsta uvida u potrošnju dobijati će na značaju daljnjim povećanjem broja električnih vozila na prometnicama, naročito uzmemo li u obzir da će sve više energije potjecati iz obnovljivih izvora energije.

Električna vozila će se pojaviti kao ključni alat upravljive potrošnje u električnoj mreži budućnosti. Međutim, stambene i komercijalne primjene ostat će značajne, osobito u smislu smanjenja vršnih opterećenja i povećanja fleksibilnosti mreže. Izravnavanje krivulje potrošnje, što uključuje premještanje opterećenja iz razdoblja visoke potrošnje u sate izvan vršnog opterećenja, rezultira glađom krivuljom potrošnje. Posljedično, to omogućuje opskrbu uz nižu cijenu u većini scenarija.

Praksa određivanja cijena u stvarnom vremenu već je uspostavljena na veleprodajnim tržištima električne energije. Prijenos dijela ovih informacija unatrag, krajnjim potrošačima, može potaknuti prilagodbe ponašanja i smanjiti vršno opterećenje sustava. U stambenim okruženjima napredna brojlara mogu komunicirati s priključenim uređajima i vozilima, dajući im upute da smanje ili odgode potrošnju.

### 5.1. Baterije vozila za pohranu energije

Kao što je rečeno, baterije vozila mogu poslužiti za skladištenje energije na razini cjelokupnog elektroenergetskog sustava. No, potrebno je napredno upravljanje razinom napunjenosti baterije radi optimizacije životnog vijeka ionako skupe i glomazne baterije. U nastavku je prikazana karakteristika odnosa očekivanog broja ciklusa naspram dubine pražnjenja jedne litijeve baterijske ćelije (*Slika 3.6.*).



*Slika 3.6. Životni vijek (broj ciklusa) litijeve baterijske ćelije u ovisnosti o dubini pražnjenja*

Za stanje baterijskog sustava može se pobrinuti upravljački modul nadzora same baterije u vozilu što je i učestala praksa. Dodatne informacije dobivaju se putem interneta, “IoT“ (“Internet of things“) izvedbom. Valja napomenuti kako je zbog održanja baterija u određenom naponskom rasponu ukupni kapacitet smanjen pa to treba uzeti u obzir tijekom izračuna rezerve. Da bi se dvosmjerna razmjena energije uspješno realizirala potrebna je infrastruktura u smislu toka energije u pravcu vozilo-mreža. Nisu svi modeli električnih vozila prilagođeni za takav rad već od proizvodne linije. Jedan takav model je Ford F-150 Lightning. Zanimljivo je da je ovaj kamionet predviđen kao redundantni sustav za kućanstva s mogućnošću cjelokupne opskrbe kućanstva električnom energijom u trajanju od tri dana pri potrošnji od 30 kWh po danu. Ukoliko je prosječna potrošnja manja od predviđene, baterija vozila može poslužiti čak i duže. [15] Praktično i modularno rješenje je uporaba kaskadne strukture, odnosno dvosmjernog istosmjernog pretvarača napona u seriji s izmjenjivačem/ispravljačem, zavisno od smjera gledanja. Kroz sljedeća potpoglavlja razmatraju se neke vrste takvih uređaja.

### 5.1.1. Izmjenjivači/ispravljači

Općepoznato je da su baterije istosmjerni izvori energije neovisno o pozadinskom kemijskom procesu. Da bi se izvršila razmjena energije između baterije vozila i elektroenergetske mreže potrebno je istosmjerni napon pretvoriti u izmjenični ili pak u slučaju klasičnog punjenja izmjenični napon mreže ispraviti. Ova pretvorba predstavlja prvi od dva koraka u energetskej razmjeni. Moguće je postići ovaj učinak koristeći više različitih topologija izmjenjivačkih odnosno ispravljačkih sklopova. U nastavku su razmotreni neki od najpopularnijih (*Tablica 5.1.*) uz osvrt na tehničke uvjete i električne parametre istih.

*Tablica 5.1. Ispravljačko-izmjenjivački spojevi (V2G tehnologija)*

Ime spoja	Naponska razina	Nazivna snaga	Pretvarački elementi	Filtriranje napona	Faktor snage	Harmoničko izobličenje	Svojstva
Punovalni ispravljač	60 - 120 V	500 W	4 MOSFET tranzistora	LC filter, mrežna strana	0.991	4.3 %	Kompaktno rješenje
Punovlani ispravljač	120 V	400 W	4 IGBT tranzistora	LC filter, mrežna strana	Promjenjiv	6.15 %	Kompenzacija jalove snage
Rezonantni pretvarač	280 – 430 V	3.3 kW	8 MOSFET tranzistora	2 LC filtra, mrežna i baterijska strana	0.985	cca. 5%	Učinkovitost 97.8%
Matrični pretvarač	24 - 72 V	10 kW	12 IGBT tranzistora	4 LC filtra, 3 mrežna i 1 bat. strana	1	Teško utvrdivo	Isplativost, brza dinamika, kompleksan
Ciklopretvarač	600 V	33.3 kW	8 IGBT tranzistora	Zavojnica, mrežna strana	Nepoznat	Teško utvrdivo	Meko uklapanje, učinkovitost 97%

### 5.1.2. Istosmjerni pretvarači

Drugi korak energetske pretvorbe čine istosmjerni pretvarači. Postoje brojne inačice istosmjernih pretvarača – s istosmjernim međukrugom ili direktni, sa skladištenjem energije ili bez skladištenja i slično. Kao i kod izmjeničnih pretvarača svrha optimizacije topologije je što manji gubitak na parazitske veličine, smanjena površina i volumen pretvarača i povećanje prijenosne moći uz kriterij razumne mogućnosti nabave komponenti. U nastavku slijede neke od verzija (Tablica 5.2.).

Tablica 5.2. Istosmjerni pretvarački spojevi (V2G tehnologija)

Ime spoja	Naponska razina	Nazivna snaga	Pretvarački elementi	Filtriranje napona	Učinkovitost	Svojstva
Silazno-uzlazni pretvarač (vanjska logika upravljanja)	60 – 120 V	500 W	2 IGBT tranzistora	Kondenzator	83 %	Velika valovitost struje, niska učinkovitost
Silazno-uzlazni pretvarač	270 – 360 V	3.5 kW	2 IGBT tranzistora	LC filter	90 %	Pojednostavljenje
Isprepleteni pretvarač	177 – 201 V	30 kW	4 IGBT tranzistora	Kondenzator	Teško određiva	Povoljni oblici, velika snaga, kompaktna izvedba
Kaskadni pretvarač	350 V	9 kW	4 IGBT tranzistora	LC filter	91.61 %	Za dinamičke pojave, modularan dizajn
Dvostruki punovalni pretvarač	360 V	30 kW	8 IGBT tranzistora	Kondenzator	Teško određiva	Kompenzacija jalove snage
Punovalni rezonantni pretvarač	250 – 415 V	6.6 kW	8 MOSFET tranzistora	LC filter	97.7 % mreža – vozilo, 97.3 % obrnuto	Visoka gustoća snage, visoka učinkovitost, spora dinamička svojstva

## 6. Zaključak

Kroz ovaj rad razmotreni su aktualni trendovi u elektroenergetskom sustavu kao i osnovne funkcije i zadaće virtualne elektrane. Dan je kratki pregled strukturiranja čitavog sustava i njegova pravna podloga. Postoji još mnogo faktora koji određuju tijek osnivanja i vođenja virtualne elektrane kao i integracije varijabilnih obnovljivih izvora energije u postojeću mrežu. Postoje pozitivni trendovi prihvaćanja naprednih autonomnih tehnologija za upravljanje elektroenergetskom mrežom. Predviđa se porast broja nezavisnih agregatora virtualnih elektrana kao i njihovo masovno uključenje u regulaciju elektroenergetskog sustava, načelno tercijsnu. Sam koncept virtualnih elektrana je inovativan, učinkovit i u isto vrijeme začuđujuće jednostavan s obzirom na višestruke koristi koje izvlače svi sudionici. Kako se uvodi trend električne mobilnosti najveću pažnju zasigurno plijeni "vehicle-to-grid" tehnologija. Ukoliko bi se ova tehnologija uspješno implementirala u elektroenergetski sustav došlo bi do rješavanja mnogih problema današnjice i omogućenja sigurnijeg pristupa električnoj energiji širokim masama po pristupačnijim cijenama uz manje zagađenje okoliša. Razvoj i istraživanje u smjeru kriptovaluta čine solidan temelj početima pametne tehnologije dajući korisnicima autonomnost, privatnost i ažuriranost. Potrebno je uložiti još puno truda u decentralizaciju i digitalizaciju mreže da bi ona postala sasvim distribuirana i potpuno samoregulirajuća. Svaki je uloženi trud korak prema tom cilju. Važno je krenuti od lokalne zajednice nadalje.

## Sažetak

Virtualna elektrana je skup agregiranih distribuiranih izvora električne energije, najčešće obnovljivih koji su umreženi po načelu ostvarivanja profita i/ili pružanja tehničke podrške u vidu tercijarnih usluga operatoru prijenosnog sustava. Agregator je subjekt odgovoran za funkcionalnost čitavog takvog mrežnog entiteta, ali i onaj koji ima mogućnost najveće zarade. Moguće je optimirati virtualnu elektranu prema više kriterija.

Modernizacija mreže donosi pojavu obnovljivih izvora energije bez ili sa drastično smanjenim svojstvima inercije. U tome može pomoći uporaba injektirane inercije ili pak dodavanje fizikalne inercije kroz sinkrone kompenzatore i sl.

Nova energetska paradigma uključuje mogućnost trošenja energije kada i koliko treba korisniku te su stoga tehnologije skladištenja energije od presudne važnosti za provedbu planova u vezi smanjenja zagađenja i autonomizacije mreže.

Kriptovalute kao sigurno i anonimno sredstvo razmjene idu ruku pod ruku s konceptom naprednih mreža te omogućavaju korisnicima neometano korištenje mrežnih usluga uz simultano ostvarenje potencijalnih profita uključivanjem u modele upravljive potrošnje. Naravno, i razvoj računalne i telekomunikacijske tehnologije čine važan evolucijski korak čitavog sustava kroz unaprijeđenje brzina komunikacije popraćeno smanjenjem troškova inicijalne investicije.

**Ključne riječi: virtualne elektrane, distribuirani izvori, decentralizacija, električna vozila, blockchain, kriptovalute, automatizacija, autonomija elektroenergetskog sustava, napredna mreža**



## Summary

Virtual power plant is aggregation of distributed renewable energy sources joined by a common key – profit and/or supplying tertiary services to TSO. Agregator is indeed held responsible for coherent operation of all the systems and subsystems of such “facility“, although he has wide profit margin. It is possible to optimize virtual power plant parameters according to multiple key goals.

Modernised grid has high rate of penetration of renewable energy sources which lack inertia commonly found in synchronous machines. Therefore, it is necessary to provide adequate amount of inertia either by adding physical elements in form of synchronous condensers and such or by simulating system inertia using grid scale reactive power injection methods.

New energy paradigm expects free energy use whenever and wherever. In order to meet stringent emissions and automation targets the assistance of energy storage technologies is crucial.

Cryptovalues present themselves as safe and sound form of anonymous exchange medium. That is exactly on par with smart grid goals, enabling end-users peace of mind while using the grid as well as business opportunity by enrolling in demand response schemes. All of that is made possible by ever-growing IT sector and telecommunications technology development. Bandwidths increase while costs decrease at a steady rate as time goes by.

**Keywords: virtual power plant, distributed energy sources, decentralisation, EV, blockchain, crypto, automation, autonomous grid operation, smart grid**

## Literatura

- [1] J.M. Morales, A.J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, M. Zugno, Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems (svezak 205). Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Gretchen Bakke, The Grid: The Fraying Wires Between Americans and Our Energy Future, Bloomsbury USA, 2016.
- [3] IRENA International Renewable Energy Agency, Grid Codes for Renewable Powered Systems, IRENA, 2022.
- [4] S interneta, Lazard, 2018, Levelized Cost of Storage Version 4.0, Lazard, <https://www.lazard.com/media/450774/lazards-levelized-cost-of-storage-version-vfinal.pdf>
- [5] S interneta, HOPS, <https://www.hops.hr/dijagram-opterecenja-dnevni>
- [6] William Angel, Virtual Power: The Future of Energy Flexibility, New Degree Press, 2020.
- [7] S interneta, Udruženje Obnovljivi izvori energije Hrvatske - <https://oie.hr/koer-prva-hrvatska-virtualna-elektrana-novi-clan-oieh/>
- [8] S interneta, Statkraft - <https://www.statkraft.com/what-we-offer/energy-flexibility-management/virtual-power-plants/>
- [9] S interneta, AGL - <https://www.agl.com.au/residential/energy/solar-and-batteries/solar-batteries/virtual-power-plant>
- [10] S interneta, Tesla - <https://www.tesla.com/powerwall>
- [11] X. Wang, Z. Liu, H. Zhang, Y. Zhao, J. Shi, H. Ding, A review on virtual power plant concept, application and challenges, svibanj 2019
- [12] O. Mo, S. D'Arco, J.A. Suul, Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016
- [13] F. Arrigo, C. Mosca, E. Bompard, P. Cuccia, Frequency models and control in normal operation: the Sardinia case study, 2020
- [14] Chapra, SC. Canale, RP, Numerical Methods for Engineers, McGraw-Hill Education, 7th Edition, 2014
- [15] S interneta, Ford – <https://www.ford.com/trucks/f150/f150-lightning/2022/features/intelligent-backup-power/?intcmp=vhp-cta-backup-f-150-lightning>