

# Planiranje pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora

---

**Vucelić, Monika**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:276512>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PLANIRANJE POGONA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA SA  
VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

Rijeka, rujan 2023.

Monika Vucelić

0069080526

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**PLANIRANJE POGONA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA SA  
VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2023.

Monika Vucelić

0069080526

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Tehnika visokog napona**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Monika Vucelić (0069080526)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **PLANIRANJE POGONA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA SA VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

### Opis zadatka:

Struktura distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora. Novi tehnički zahtjevi za vođenje pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora. Razrada tehničkih rješenja za planiranje i vođenje pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora.

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

*Monika Vucelić*

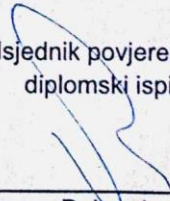
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitimir Komen

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Planiranje pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora“ izradila samostalno uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Vitomira Komena.

Rijeka, rujan 2023.

Monika Vucelić

Monika Vucelić

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojoj obitelji, zaručniku i kolegama na pomoći i podršci tijekom studiranja. Također se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komeni na stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. KLASIČNA KONFIGURACIJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	3
3. DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	6
3.1. Razlozi za uvođenje distribuirane proizvodnje .....	6
3.2. Distribuirani izvori u Republici Hrvatskoj .....	7
3.2.1. Vjetroelektrane.....	8
3.2.2. Sunčane elektrane .....	9
3.2.3. Hidroelektrane.....	10
3.2.4. Distribuirani izvori u distribucijskoj mreži.....	11
3.3. Priključenje distribuiranih izvora na mrežu.....	12
3.3.1. Distribucijska mreža i distribuirani izvori u paralelnom pogonu .....	14
4. USPOREDBA TRADICIONALNE (PASIVNE) I AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE.	16
5. INTEGRACIJA POTRAŽNJE NA STRANI POTROŠAČA .....	20
5.1. Izazovi kod aktivnog upravljanja potražnjom .....	21
5.2. Pohrana električne energije .....	23
5.2.1. Općenito o spremnicima električne energije.....	23
5.2.2. Integracija pohrane električne energije u distribucijski sustav .....	25
5.3. Integracija električnih automobila .....	26
5.3.1. Načini punjenja električnih automobila .....	27
5.3.2. Analiza mreže uz masovnu integraciju električnih automobila .....	27
5.3.3. Utjecaji na kvalitetu električne energije .....	28
5.3.4. Planirane nadogradnje distribucijske mreže .....	29
5.3.5. Planiranje distribucijske mreže uzimajući u obzir integraciju električnih automobila	29
6. STRATEGIJE RADA DISTRIBUCIJSKE MREŽE SA DISTRIBUIRANIM IZVORIMA ...	30
6.1. Upravljanje potražnjom .....	30
6.1.1. Potrebe komunikacije i rješenja za uvođenje upravljanja potražnjom.....	31
6.2. Virtualne elektrane .....	31
6.2.1. Pouzdano funkcioniranje elektroenergetskih sustava integriranih s virtualnim elektranama .....	33
6.3. Mikromreže .....	34
6.3.1. Mikromreže kao sredstvo za integraciju distribuiranih izvora .....	35
6.3.2. Razlike između mikromreža i virtualnih elektrana .....	35
7. UPRAVLJANJE IMOVINOM DISTRIBUCIJSKIH MREŽA SA VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA .....	37

7.1. Pristup upravljanju imovinom .....	37
7.1.1. Tehnička terminologija i definicija .....	37
7.1.2. Strategije održavanja imovine .....	38
7.1.3. Strateško planiranje imovine .....	40
7.1.4. Izazovi za upravitelje imovine .....	41
7.1.5. Povećanje prodiranja distribuiranih izvora energije .....	41
7.2. Ključni pokazatelji strateškog planiranja i rada .....	42
7.2.1. Strategije planiranja i rada .....	42
7.2.2. Regulacijski kontekst za strategije upravljanja imovinom .....	44
7.2.3. Ključni pokazatelji .....	44
7.3. Scenariji za razumijevanje nepredvidive budućnosti .....	45
7.4. Evolucija alata za simulaciju upravljanja imovinom .....	46
8. METODE PLANIRANJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE SA VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA .....	48
8.1. Tradicionalno planiranje i trenutna praksa .....	48
8.1.1. Neadekvatnost tradicionalnog planiranja .....	50
8.2. Od pasivnih do aktivnih distribucijskih mreža .....	52
8.2.1. Evolucija operatora distribucijskih mreža prema operatorima distribucijskih sustava .....	52
8.3. Izazovi kod novog načina planiranja .....	54
8.4. Opći okvir za planiranje aktivnih distribucijskih sustava .....	56
8.5. Modeliranje podataka .....	57
8.6. Probabilistički izračuni .....	59
8.7. Višekriterijski pristup .....	61
8.8. Koraci uvođenja novih alata za planiranje .....	62
8.9. Implementacija aktivne distribucijske mreže .....	64
8.10. Analiza slučaja .....	65
9. ZAKLJUČAK .....	71
LITERATURA .....	72
SAŽETAK .....	74
ABSTRACT .....	75



## 1. UVOD

U ovome radu obrađena je tema planiranja pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora.

U posljednje vrijeme, energetska sektor doživio je velike promjene zbog izazovnih okolišnih ciljeva, sve većim zahtjevima za sigurnost opskrbe i potrebom da električna energija bude dostupnija krajnjim korisnicima na tržištu. Općenito se prepoznaje da je prijetnja od klimatskih promjena stvarna te da globalna prekomjerna ovisnost o fosilnim gorivima više nije niti održiva niti ekonomski isplativa. Povećani udio obnovljivih izvora energije u velikoj mjeri mijenja klasični pristup predviđanja i osiguravanja koji je karakterizirao energetska sektor od njegovog nastanka krajem 19. stoljeća, gdje "proizvodnja slijedi potražnju". Ekonomika i lokacija obnovljivih izvora energije znače da se mnogi od ovih generatora moraju povezati na distribucijskoj razini umjesto na razini prijenosa. Kod tradicionalnog elektroenergetskog sustava ulagalo se u resurse za opskrbu umjesto u fleksibilnost potražnje i energetske učinkovitosti, odnosno ulagalo se u izgradnju elektran, prijenosnih i distribucijskih mreža. Takav način ulaganja mijenja se u modernim energetska sustavima. Kreće se prema osiguravanju energetske sigurnosti i smanjenju ugljičnog otiska industrije integracijom obnovljivih i distribuiranih izvora energije što postavlja značajne izazove za sigurno funkcioniranje i planiranje energetska sustava, posebno zbog potrebe za većom razinom fleksibilnosti i upravljivosti kako bi se prilagodili prekidi i nestabilnosti obnovljivih izvora energije. Razine informacija i kontrola nad stanjem distribucijskih mreža su nedovoljne za buduće sustave opskrbom niskougljičnom električnom energijom što dovodi do nastanka koncepta pametne mreže (SmartGrid). Osim znatno veće upotrebe informacijske i kontrolne tehnologije, pametna mreža će uključivati korisnike opterećenja (potrošače) puno više u radu sustava napajanja. Distribucijska mreža će promijeniti svoj rad od pasivnog na aktivni, a distribuirani izvori će se kontrolirati kako bi podržavali rad sustava napajanja.

Tijekom nekoliko desetljeća razvijeni su modeli, tehnike i alati za centraliziranu proizvodnju s tradicionalnim mrežama prijenosa i distribucije. Međutim, neke vrlo specifične značajke distribuirane proizvodnje, poput toga da se velik broj relativno malih generatora raspoređuje po sustavu, često povezanih u relativno slabe distribucijske mreže, znači da se postojeće tehnike i prakse moraju pregledati i ažurirati. Također, razmatraju se pitanja koja proizlaze iz velikog broja distribuiranih izvora i njihove kontrole u virtualnim elektranama, upravljanja aktivnom mrežom i mikroenergetskih mreža.

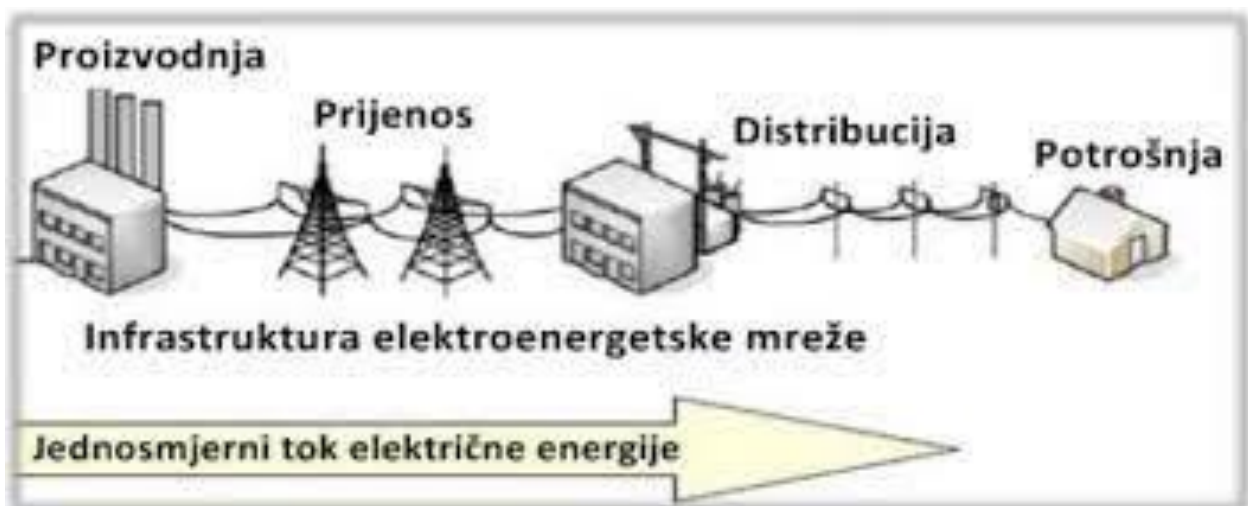
Struktura distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora, novi tehnički zahtjevi kao i tehnička rješenja za planiranje i vođenje pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora razrađeni su u nastavku rada.

## 2. KLASIČNA KONFIGURACIJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Najvažniji dijelovi elektroenergetskog sustava su: elektrane, koje su na lokacijama odabranim na osnovu tehnoloških, ekonomskih, tehničkih i ekoloških uvjeta, dalekovoda, transformatorske stanice, koje transformiraju napon jedne naponske razine na drugu, dalekovodi koji prenose električnu energiju te potrošači koji tu energiju koriste (kućanstva, industrija, javna rasvjeta, transport, itd.).

Za prijenos snage na velike udaljenosti koristi se prijenosni sustav koji je opterećen velikim snagama zbog čega se kod prijenosa stvaraju veliki gubitci. Prijenosni sustav radi na visokim naponima kako bi se smanjile struje, a s time i padovi napona i gubitci. Preko transformatorskih stanica prijenos energije završava u distribucijskom sustavu koji je na srednjem i niskom naponu na kojem su spojeni potrošači.

Takvu konfiguraciju elektroenergetskog sustava karakterizira tok električne energije u jednom smjeru – od elektrane do potrošača, što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1. Klasična konfiguracija elektroenergetskog sustava

Uloga elektroenergetskog sustava je isporuka određene količine električne energije određene kvalitete i sigurnosti isporuke uz prihvatljive ekonomske uvjete opskrbe. Kako bi to bilo uspješno obavljeno treba planirati razvitak i izgradnju elektroenergetskog sustava, a onda u tom sustavu treba dobro planirati i voditi njegovo korištenje. Kod tih procesa potrebno je uzeti u obzir specifičnosti električne energije. Neke od tih specifičnosti su:

- Električna energija se ne može skladištiti pod ekonomski prihvatljivim uvjetima, zbog čega pojedina elektrana ne može kontinuirano opskrbljivati potrošače kvalitetnom električnom

energijom, stoga se elektrane moraju povezati u elektroenergetski sustav. Osim toga, nemogućnost skladištenja električne energije znači da proizvodnja mora biti jednaka potrošnji pa se može povući paralela, prikazana na slici 2.2., između čovjeka i elektroenergetskog sustava.

Čovjek		Elektroenergetski sustav
Čovjekova aktivnost	▶	potrošnja električne energije
Krvotok	▶	električna energija
Srce	▶	elektrane
Arterije i vene	▶	prijenos električne energije
Žile i kapilare	▶	distribucija električne energije
Mozak	▶	koordinacija, upravljanje, vođenje

*Slika 2.2. Paralela između čovjeka i elektroenergetskog sustava [14]*

- Ne može se znati iz koje elektrane pojedini potrošač dobiva energiju, već svi potrošači zajedno dobivaju energiju iz svih elektrana koje su u radu u nekom trenutku.
- Električna energija se vodovima prenosi od elektrana do potrošača, a oni se nalaze pod nadzorom elektroenergetskog sustava, a ne potrošača pa oni ne mogu sudjelovati u prodaji električne energije.
- Planiranje razvoja raspodjele električne energije ovisi o prostornom razmještanju i načinu potrošnje električne energije, pri čemu se uzima u obzir utjecaj potrošača i veći stupanj neizvjesnosti.

Električna energija je proizvod koji ima najširu primjenu te o njoj ovisi društveni i gospodarski razvitak kao i unaprjeđenje životnog standarda ljudi. To dovodi do zaključka da se elektroenergetski sustav pojavljuje i kao preduvjet i kao posljedica društveno-ekonomskog razvitka.

Proizvodnja električne energije se pretežno obavlja u termoelektranama koje koriste ugljen, naftu i plin kao gorivo, u hidroelektranama i nuklearnim elektranama. Manja proizvodnja je u elektranama koje rade s obnovljivim izvorima energije. Danas je općepriznato u svijetu da su klimatske promjene stvarne te da tome pridonosi emisija CO<sub>2</sub> (ugljkovog dioksida), a izgaranjem fosilnih goriva dosta pridonosimo tom negativnom ekološkom utjecaju. Osim toga, zalihe fosilnih goriva su sve manje i manje, a cijene veće. Shodno tome, svijet se okreće obnovljivim izvorima

energije koji su ekološki prihvatljivi te kojih nema u ograničenim količinama, no nije moguće odmah promijeniti čitav elektroenergetski sustav pa vlade donose zakone o zaštiti okoliša smanjenjem emisije ugljikovog dioksida te pokušavaju stabilizirati međunarodne cijene fosilnih goriva. Diljem svijeta se mijenja način na koji se električna energija proizvodi i isporučuje. Očekuje se da će proizvodnja iz obnovljivih izvora tvoriti sve veći postotak proizvodnje električne energije tijekom sljedeća dva desetljeća. Već sada udio obnovljivih izvora energije u nekim zemljama doseže gotovo do 70% ukupnih instaliranih proizvodnih kapaciteta. U 2015. godini obnovljivi izvori činili su gotovo 23% električne energije proizvedene u zemljama članicama organizacije za ekonomsku suradnju i razvoj i gotovo su jednaki udjelu električne energije proizvedene iz plina.

Jedan od glavnih izazova s kojima se elektroenergetski sustavi suočavaju jest očekivanje da će nesinkrona proizvodnja iz obnovljivih izvora energije činiti najveći postotak nove proizvodnje. Takva vrsta energije značajno će promijeniti metode rada prijenosnih i distribucijskih sustava. Većina obnovljivih izvora energije nema mogućnosti skladištenja, stoga proizvodnja električne energije slijedi stvarne uvjete (intenzitet sunčeva zračenja, brzinu vjetra, itd.) . Budući da ovise o godišnjim dobima, meteorološkim ili drugim uvjetima, ne mogu se kontrolirati te će zbog toga biti potrebna veća fleksibilnost sustava za njegovo uravnoteženje.

### **3. DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Distribuirani izvori električne energije (DI) su izvori električne energije koji su locirani blizu potrošača, pa se zato proizvodnja električne energije na lokaciji potrošača zove distribuirana proizvodnja (engl. Distributed generation – DG).

Distribuirani izvori predstavljaju decentraliziranu proizvodnju električne energije zbog čega povećavaju pouzdanost opskrbe potrošača električnom energijom. Prednosti distribuiranih izvora su:

- Manja emisija štetnih plinova u okolinu
- Povećana pouzdanost opskrbe potrošača električnom energijom
- Energija se proizvodi na mjestu potrošnje
- Poboljšanje naponskih prilika i smanjenje gubitaka

#### **3.1. Razlozi za uvođenje distribuirane proizvodnje**

Konvencionalni elektroenergetski sustav omogućava prijenos velikih količina električne energije na izrazito velike udaljenosti s ograničenim gubicima te uz minimiziranje proizvodnih rezervi. Distribucijske su mreže jednostavno projektirane za jednosmjerni tok električne energije i dimenzionirane samo za opskrbu potrošača. Energetika je izvor više od tri četvrtine emisija stakleničkih plinova u Europskoj Uniji, stoga su mnoge vlade, kao što je već gore navedeno, postavile ciljeve za smanjenje emisija stakleničkih plinova te za povećanje korištenja električne energije iz obnovljivih izvora energije. Europski parlament je usvojio Europski propis o klimi kako bi se smanjenje emisija ugljika s prije propisanih 40% podignulo na najmanje 55% do 2030. godine. Tim je propisom postala pravno obavezujuća klimatska neutralnost do 2050. godine. S tim u vezi, potrebno je udio obnovljivih izvora energije u strukturi primarnih izvora energije povećati s trenutnog cilja od 32% na 45% do 2030. godine. Kako bi se ti ciljevi ostvarili Europska Unija je osmislila zakonodavni paket pod nazivom „Spremni za 55%“ koji sadrži pravila o nacionalnim ciljevima za smanjenje emisija, uklanjanju ugljika u sektoru korištenja zemljišta, emisijama iz prometa i trgovanju emisijama. Na primjer, jedna od mjera za smanjenje emisija štetnih plinova je Sustav trgovanja emisijama stakleničkih plinova (eng. Emissions trading system) Europske Unije koji trguje dozvolama za svaku emitiranu tonu CO<sub>2</sub> nekog postrojenja. To je najveće tržište ugljika na svijetu i ono regulira oko 40% ukupnih emisija stakleničkih plinova u Europskoj Uniji i pokriva oko 10 tisuća proizvodnih pogona i elektrana [15].

Obnovljivi izvori energije imaju puno nižu energetska gustoću od fosilnih goriva zbog čega su postrojenja za proizvodnju manja i prostorno šire rasprostranjena. Takva se manja postrojenja snage 50-100 MW spajaju na postojeći distribucijski sustav jer nije ni ekonomično ni ekološki prihvatljivo graditi posebne električne krugove koji bi prikupljali tu energiju. Komercijalna struktura industrije opskrbe električnom energijom ima vrlo važnu ulogu u razvoju distribuirane proizvodnje. Otvoren pristup distribucijskoj mreži i deregulirano okruženje pružit će veće mogućnosti za distribuiranu proizvodnju.

### 3.2. Distribuirani izvori u Republici Hrvatskoj

Distribuirani izvori koji se priključuju na distribucijsku mrežu Republike Hrvatske su:

- Vjetroelektrane
- Sunčane elektrane
- Hidroelektrane
- Geotermalne elektrane
- Elektrane na bioplin
- Elektrane na biomasu
- Ostala postrojenja (postrojenja na deponijski plin, kogeneracijska postrojenja...)

Na distribucijsku mrežu Republike Hrvatske, do kraja 2019. godine, bilo je priključeno ukupno 2093 distribuiranih izvora, od toga 7 vjetroelektrana, 37 hidroelektrana, 1957 sunčanih elektrana, 39 elektrana na bioplin, 3 elektrane na biomasu, 1 geotermalna elektrana te 14 ostalih. Na slici 3.1. je tablica koja prikazuje raspodjelu priključenih distribuiranih izvora po snagama.

Podjela po priključnoj snazi	Broj	P[kW]
P ≤ 10 kW	1.061	9.206,215
10 < P ≤ 50 kW	687	19.254,575
50 < P ≤ 100 kW	56	4.748,53
100 < P ≤ 500 kW	173	43.393,315
500 < P ≤ 5000 kW	102	176.567,00
5000 < P < 10 000 kW	12	104.990,00
P > 10 000 kW	2	35.200,00
<b>UKUPNO</b>	<b>2093</b>	<b>393.359,635</b>

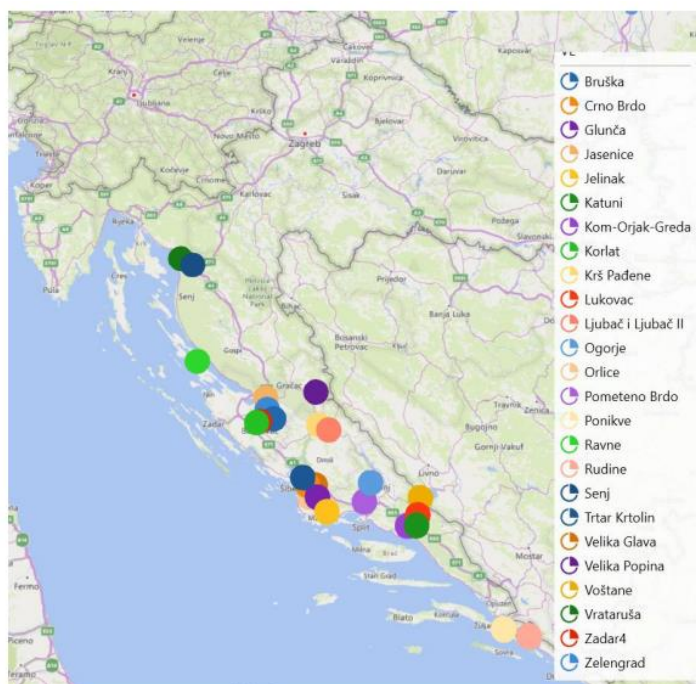
Slika 3.1. Tablica raspodjele priključenih distribuiranih izvora po snagama [2]

Naponske razine tih distribuiranih izvora su: 0,4 kV, 6,3 kV, 10 kV, 20 kV, 30 kV i 35 kV. Broj novih priključenih distribuiranih izvora se mijenja iz tjedna u tjedan.

### 3.2.1. Vjetroelektrane

Vjetroelektrane su energetska postrojenja u kojima se kinetička energija vjetra pretvara u električnu pomoću jedne ili niza vjetrorenih turbina s električnim generatorima. Generatori mogu biti sinkroni i asinkroni te se oni mogu spajati na osovinu direktno ili indirektno preko prijenosnika. Pretvorba kinetičke energije vjetra može biti putem vjetroturbina s horizontalnom osi turbine ili s vertikalnom osi turbine. Teorijski iskoristiv maksimum energije vjetra ovim elektranama je 59%, dok je u stvarnosti iskoristivost 35-45%. Najbolja iskoristivost im je na lokacijama gdje je prosječna brzina vjetra veća od 4,5 m/s sa minimalnom vjerojatnosti naglih olujnih udara vjetra te sa što je moguće stalnijim strujanjem vjetra bez turbulencija jer kada brzina vjetra prekorači dopuštene vrijednosti sustav kočenja se aktivira i rad turbine se obustavlja. Optimalna brzina vrtnje turbine pri kojoj je stupanj iskorištenja maksimalan postoji za svaku određenu vrijednost brzine vjetra  $v$ . Također, da bi vjetroturbina ostvarila maksimalan stupanj iskorištenja pri različitim brzinama vjetra nužno je mijenjati njenu brzinu vrtnje. Snaga vjetroturbine se može regulirati konstrukcijom lopatica, zakretanjem lopatica te konstrukcijom i zakretanjem lopatica.

Broj vjetroelektrana, u Hrvatskoj, koje su priključene na prijenosnu mrežu (220kV i 110 kV) je 17 (16 u normalnom pogonu i 1 u pokusnom radu), a ostale su priključene na srednjenaponsku distribucijsku mrežu (35kV, 30kV i 10kV). Najviše vjetroelektrana smješteno je u Dalmaciji, što se može vidjeti na slici 3.2. koja prikazuje lokacije vjetroelektrana u Hrvatskoj.



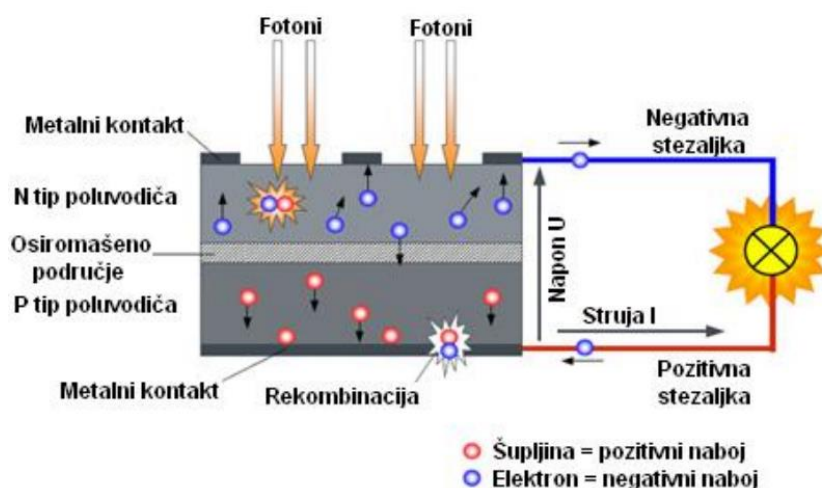
Slika 3.2. Lokacije vjetroelektrana u Hrvatskoj [4]



U prosincu 2022. godine bilo je 25 vjetroelektrana u redovnom pogonu s ukupnom instaliranom snagom od 834,15 MW te odobrenom snagom priključenja od 824,85 MW, dok je ukupna mjesečna proizvodnja iznosila 193209,74 MWh. Pri tome najveća satna proizvodnja ostvarena je 09.12.2022. i iznosila je 843,36 MWh, a najmanja satna proizvodnja ostvarena je 28.12.2022. od svega 0,2 MWh. Faktor iskorištenja snage svih vjetroelektrana u tom mjesecu iznosio je 26,23%. Vjetroelektrane imaju sve veću ulogu u pokrivanju opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske.

### 3.2.2. Sunčane elektrane

Sunčane ili fotonaponske elektrane omogućuju pretvorbu sunčeve energije u električnu energiju. Osnovni elementi kojim se ta pretvorba postiže su sunčane ćelije kojima se način rada zasniva na fotoelektričnom efektu. To je fizikalna pojava kod koje djelovanjem elektromagnetskog zračenja (najčešće svjetlosti) dolazi do izbijanja elektrona iz obasjanog materijala (slika 3.3.).



Slika 3.3. Fotoelektrični efekt [5]

Efikasnost sunčane ćelije definira se kao omjer električne snage koju daje sunčana ćelija i snage upadnog sunčevog zračenja na ćeliju te u realnim uvjetima iznosi od 5% do 18%. Materijali od kojih se izrađuju sunčane ćelije su: monokristalični silicij, polikristalični silicij, amorfni silicij, kadmij telurid, itd. zbog male snage koju proizvodi jedna fotonaponska ćelija, one se povezuju serijski i paralelno, čime se povećava ukupan napon, odnosno struja panela. Takvim se povezivanjem dobivaju fotonaponski moduli (paneli). Osim fotonaponskih modula, osnovne komponente koje tvore sunčanu elektranu su: izmjenjivač (pretvorba DC napona u AC napon), komplet baterija i akumulatora za autonomne sustave te punjač akumulatorskih baterija. Autonomni fotonaponski sustavi nisu priključeni na mrežu te mogu biti sa ili bez pohrane energije,

dok mrežni fotonaponski sustavi rade paralelno s elektrodistribucijskom mrežom, gdje se proizvedena električna energija troši lokalno, a viškovi se isporučuju u elektrodistribucijsku mrežu.

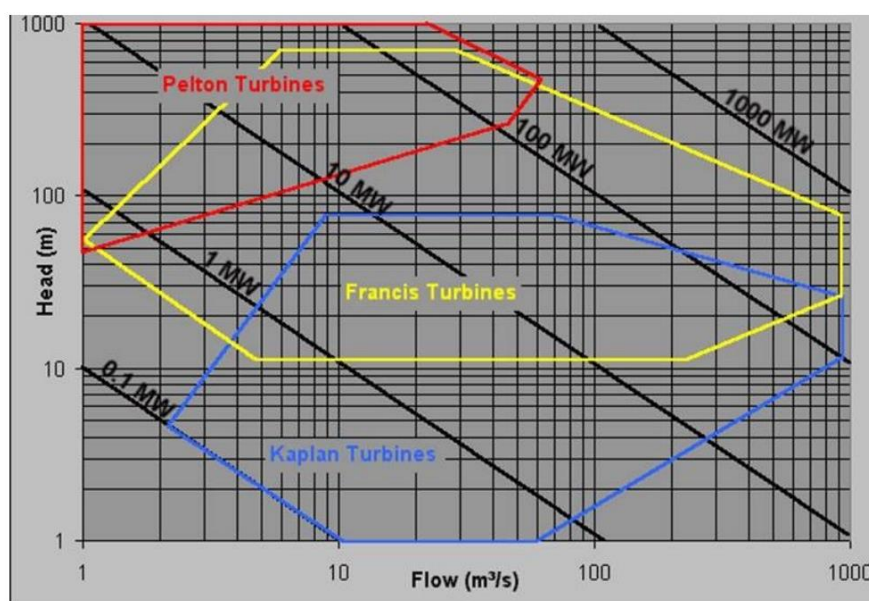
Toplinske sunčane elektrane energiju Sunčevog zračenja koncentriraju i pretvaraju u toplinsku energiju koja je izvor topline za toplinski stroj. U njemu se radni medij komprimira, grije i isparava te ekspandira čime pogoni turbinu koja pokreće generator.

Od 2014. godine u Hrvatskoj pojavljuje se sve više zahtjeva za priključenje sunčanih elektrana na instalacije postojećih kupaca koje uglavnom služe za podmirenje vlastitih potreba kupaca.

Tijekom 2020. godine trend porasta priključenja malih sunčanih elektrana se nastavio pa su ti izvori najzastupljeniji tip izvora na mreži HEP ODS-a. Na niskonaponsku mrežu, do 31.12.2020. godine, bilo je priključeno 2797 sunčanih elektrana s ukupnom priključenom snagom od 72076 kW, a na sredjenaponsku njih 85 ukupne priključene snage od 36445 kW.

### 3.2.3. Hidroelektrane

Hidroelektrane su postrojenja koja potencijalnu energiju vode najprije pretvaraju u kinetičku energiju, zatim pomoću vodnih turbina u mehaničku energiju koja se vratilom prenosi do generatora gdje se pretvara u električnu energiju. Glavni dijelovi hidroelektrana su: sustavi dobave i odvodnje vode, hidroagregati, generatori, sustavi za transformaciju energije prema elektroenergetskom sustavu. Vrste vodnih turbina su: Pelton, Francis i Kaplan, a područje primjene svake od njih prikazano je na slici 3.4.



Slika 3.4. Područje primjene pojedinih turbina [6]

Značenje stranih pojmova sa slike 3.4.:

- Pelton Turbines – Pelton turbine
- Francis Turbines – Francis turbine
- Kaplan Turbines – Kaplan turbine
- Flow – Protok
- Head - Visina

Pelton turbina se koristi kod velikih padova i malih protoka te za male i velike snage. Francis turbina se koristi za srednje protoke i srednje padove, dok se Kaplan turbina koristi za male padove i srednje protoke.

Hidroelektrane spadaju u obnovljive izvore električne energije s kojima se mogu točno predvidjeti buduće proizvodnje što omogućuje dobro planiranje pa tako i optimizaciju proizvodnje električne energije u kombinaciji s drugim izvorima. Prema načinu proizvodnje razlikujemo:

- Derivacijske (strojarnica smještena dalje od brane)
- Pribranske (strojarnica smještena uz ili u brani)
- Crpne (osnovni zadatak im je crpljenje vode za potrebe klasične HE)
- Reverzibilne (mogu proizvoditi energiju, a mogu raditi kao crpke)

U Hrvatskoj 2008. godine nazivna snaga svih hidroelektrana iznosila je 2097 MW, odnosno 55% ukupne snage svih elektrana na području Hrvatske. Iste godine proizvele su 5277 GWh električne energije.

Na kraju 2020. godine broj hidroelektrana u Hrvatskoj bio je 38, 19 hidroelektrana na niskonaponskoj mreži i 19 na srednjenaponskoj mreži. Ukupna priključna snaga iznosila je 75828 kW.

Najveći udio proizvodnje u distribucijskoj mreži, uz ostale tipove elektrana (27%), čini proizvodnja hidroelektrana od 16%.

#### 3.2.4. Distribuirani izvori u distribucijskoj mreži

Sve veća integracija distribuiranih izvora u distribucijsku mrežu rezultirat će smanjenjem opterećenja i smanjenjem gubitaka u distribucijskoj mreži, čime se u nekim slučajevima odgađa potreba za ulaganje u izgradnju distribucijske mreže zbog porasta opterećenja. Sve češće se događa da se distribuirani izvori planiraju izgraditi na užem prostoru pa je zbog njihovog kumulativa snage potrebno stvoriti uvjete u distribucijskoj mreži za preuzimanje ukupne proizvedene električne

energije iz distribuiranih izvora uz očuvanje n-1 kriterija. Znatno povećana snaga proizvodnje u odnosu na postojeće opterećenje na određenom području odražava se povišenjem napona pa su najčešći zahvati na stvaranju uvjeta u mreži povećanje presjeka postojećih vodova, zamjena postojećih transformatora novim transformatorima 110/10(20) kV ili 35(30)/10(20) kV odgovarajuće snage s automatskom regulacijom napona, prelazak dijela mreže na 20 kV naponsku razinu i dr. [12]

### **3.3. Priključenje distribuiranih izvora na mrežu**

Priključenje distribuiranog izvora na distribucijsku mrežu, bez obzira na naponski nivo i snagu elektrane, dovodi do značajnih promjena pogonskih parametara distribucijske mreže. Tu je potrebno istaknuti dva osnovna segmenta:

- Naponske prilike duž radijalnog voda distribucijske mreže na koju je priključen distribuirani izvor
- Utjecaj na gubitke snage i energije u distribucijskoj mreži

Ti segmenti mogu imati pozitivne i negativne utjecaje, što ovisi o tipu i režimu rada distribuiranog izvora i režimu opterećenja te tehničkim karakteristikama distribucijske mreže.

Priključenje distribuiranih izvora električne energije na distribucijsku mrežu propisano je tehničkim pravilima i uvjetima definiranim u dokumentima:

- Mrežna pravila distribucijskog sustava
- Pravila o priključenju na distribucijsku mrežu

Postoje dva postupka kojima se mogu priključiti distribuirani izvori: postupkom jednostavnog priključenja i postupkom složenog priključenja. Kod oba postupka potrebno je definirati tehničko rješenje priključenja, ali je kod složenog postupka priključenja potrebno izraditi elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja (EOTRP). [9]

Svako priključenje građevine na mrežu predstavlja planiranje razvoja mreže koje mora biti usklađeno s Mrežnim pravilima distribucijskog sustava i Metodologijom i kriterijima za planiranje razvoja mreže. [2]

Kriteriji koji se prilikom planiranja razvoja mreže uzimaju u obzir dijele se na ključne i dodatne kriterije [2]. Ključni kriteriji su:

- Pouzdanost napajanja

- Dopušteno odstupanje napona
- Dopušteno opterećenje jedinica mreže

### Pouzdanost napajanja

Operatoru distribucijskog sustava, kao i korisniku mreže, u interesu je da pouzdanost napajanja električnom energijom bude u propisanim granicama te da tehnička rješenja budu uravnotežena radi osiguranja pouzdanosti napajanja i troškova izgradnje, održavanja i gubitaka u mreži. Dopuštene vrijednosti pouzdanosti napajanja prikazane su u tablici na slici 3.5., gdje su opći pokazatelji pouzdanosti napajanja u distribucijskoj mreži SAIFI, SAIDI i CAIDI. SAIFI je prosječni broj dugotrajnih prekida napajanja svakog korisnika mreže, SAIDI je prosječno trajanje dugotrajnih prekida napajanja svakog korisnika mreže, dok je CAIDI prosječno trajanje dugotrajnih prekida napajanja po korisniku mreže. Zadovoljavanje kriterija se provjerava registracijom i analizom broja i trajanja prekida, brojem i kategorijom korisnika mreže zahvaćenih prekidom te količinom neisporučene električne energije. [9]

Opći pokazatelj pouzdanosti napajanja	Opći standard pouzdanosti napajanja	
	Kabelski izvod (*)	Nadzemni izvod
SAIFI	3 dugotrajna prekida napajanja/korisniku	6 dugotrajnih prekida napajanja/korisniku
SAIDI	400 min/korisniku	700 min/korisniku
CAIDI	130 min/prekidu	120 min/prekidu

(\*) - Sredjonaponski izvod smatra se kabelskim ukoliko je najmanje 90% njegove duljine izvedeno kao podzemni ili podmorski kabelski vod

*Slika 3.5. Opći standardi pouzdanosti napajanja [9]*

### Dopušteno odstupanje napona

Na mjestima predaje, odnosno preuzimanja, naponske prilike u mreži moraju biti u granicama koje su propisane normom HRN EN 50160. Dopušteno odstupanje napona za obračunska mjerna mjesta na srednjem i niskom naponu iznosi  $\pm 10\%$  nazivnog napona za sva uklopna stanja u stanju normalnog pogona mreže.

Dopuštena odstupanja napona, u cilju održavanja napona unutar dopuštenih granica na obračunskim mjernim mjestima, osiguranja ujednačene i troškovno opravdane izgrađenosti mreže, smanjenja gubitaka u mreži te omogućavanja priključenja distribuiranih izvora, su [9]:

- $\pm 5\%$  nazivnog napona na vodovima SN od sabirnica SN u transformatorskim stanicama VN/SN do sabirnica 10(20) kV u svim transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV ili rasklopištima 10(20) kV
- $\pm 8\%$  nazivnog napona na vodovima NN

Provjeravanje zadovoljavanja kriterija se provodi mjerenjem napona na sabirnicama u transformatorskim stanicama VN/SN i SN/SN, transformatorskim stanicama SN/NN, rasklopištima SN i na mjestima preuzimanja, odnosno predaje električne energije (obračunskim mjernim mjestima) te proračunima vrijednosti napona kod planiranja razvoja mreže [9].

#### Dopušteno opterećenje jedinica mreže

Elementi mreže ne smiju biti strujno opterećeni iznad nazivne struje opterećenja niti u jednom trenutku, kao ni uklopna stanja u redovnom pogonu mreže i uklopna stanja u svrhu osiguranja opskrbe iz pričuvnog smjera napajanja. Mjerenjem opterećenja u postojećoj mreži te proračunima očekivanog opterećenja kod planiranja razvoja mreže provjerava se zadovoljavanje gore navedenih kriterija.

Dodatni kriteriji su:

- Tehnički gubici u mreži
- Napredna tehnička rješenja korištenja dijelova mreže
- Starenje, starost i važnost postojećih jedinica mreže
- Uvjeti priključenja novih korisnika mreže
- Ekonomska opravdanost ulaganja
- Ekološki standardi

Kod izrade tehničkog rješenja priključenja većinom se uzimaju u obzir samo ključni kriteriji, dok se dodatni kriteriji, od kojih posebno tehnički gubici u mreži, najčešće zanemaruju zbog postizanja optimalnog rješenja priključenja.

#### 3.3.1. Distribucijska mreža i distribuirani izvori u paralelnom pogonu

Povezivanje distribucijske mreže i distribuiranih izvora u distribucijski sustav znači aktivnu ulogu izvora u statičkoj i dinamičkoj potpori kako bi se održala stabilnost napona mreže te njezinu održivost na prolazna stanja kvara. Paralelnim pogonom distribuiranih izvora s mrežom može se ostvariti veća kakvoća opskrbe električnom energijom, u skladu sa zahtjevima operatora mreže (slika 3.6.)



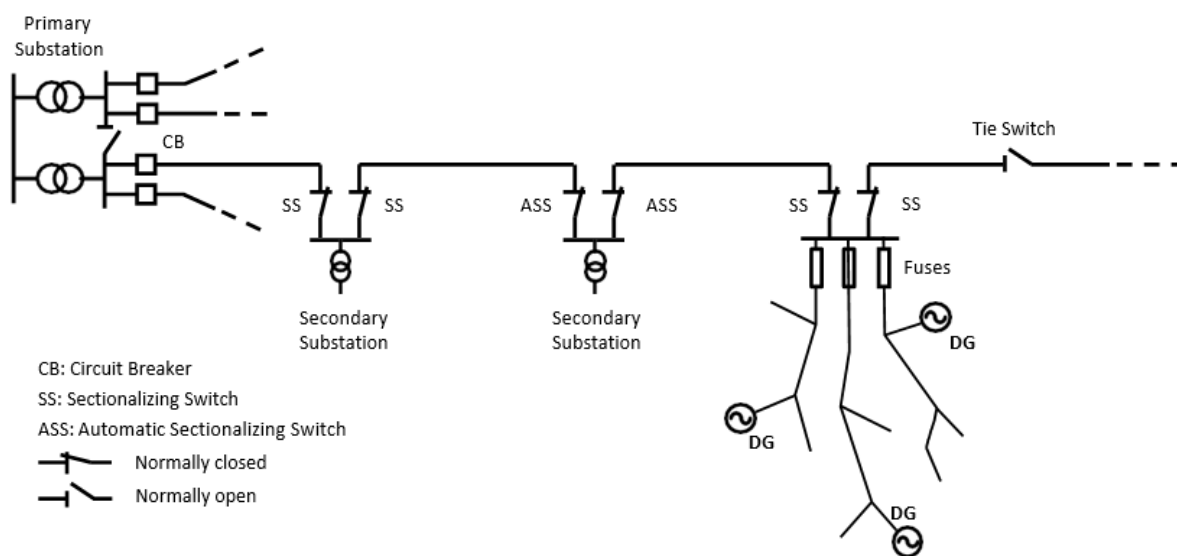
*Slika 3.6. Zahtjevi za paralelan pogon mreže i distribuiranih izvora [10]*

Operator distribucijskog sustava mora propisati električne uvjete paralelnog pogona koji će vrijediti na mjestu spajanja distribuiranih izvora s mrežom kao i odziv elektrane na pojave u mreži. U slučaju nedopuštenih odstupanja od tih uvjeta, mora doći do odvajanja distribuiranog izvora iz paralelnog pogona. Distribuirani izvori moraju ispunjavati određene zahtjeve za priključenje na mrežu, odnosno moraju biti sposobni za [10]:

- Upravljanje djelatnom snagom
- Prihvatljivo povratno djelovanje na mrežu
- Prelazak u otočni pogon s dijelom mreže
- Prilagodbu uzemljenja neutralne točke generatora
- Potporu naponu mreže u normalnom i kvarnom stanju mreže
- Propisano ponašanje kod kratkog spoja u mreži
- Sklad pogona s lokalnom automatikom

## 4. USPOREDBA TRADICIONALNE (PASIVNE) I AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Tradicionalna, odnosno pasivna distribucijska mreža ima radijalnu topologiju u kojoj se svaka grana štiti prekidačem u primarnoj transformatorskoj stanici i prekidačem u sekundarnoj transformatorskoj stanici. Ti prekidači su rijetko automatizirani i daljinsko upravljani, češće su ručno upravljani. Pouzdanost ovakve mreže ovisi o topologiji i zaštitnom sustavu. Primjer jedne pasivne distribucijske mreže prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1. Tradicionalna srednjenaponska distribucijska mreža [16]

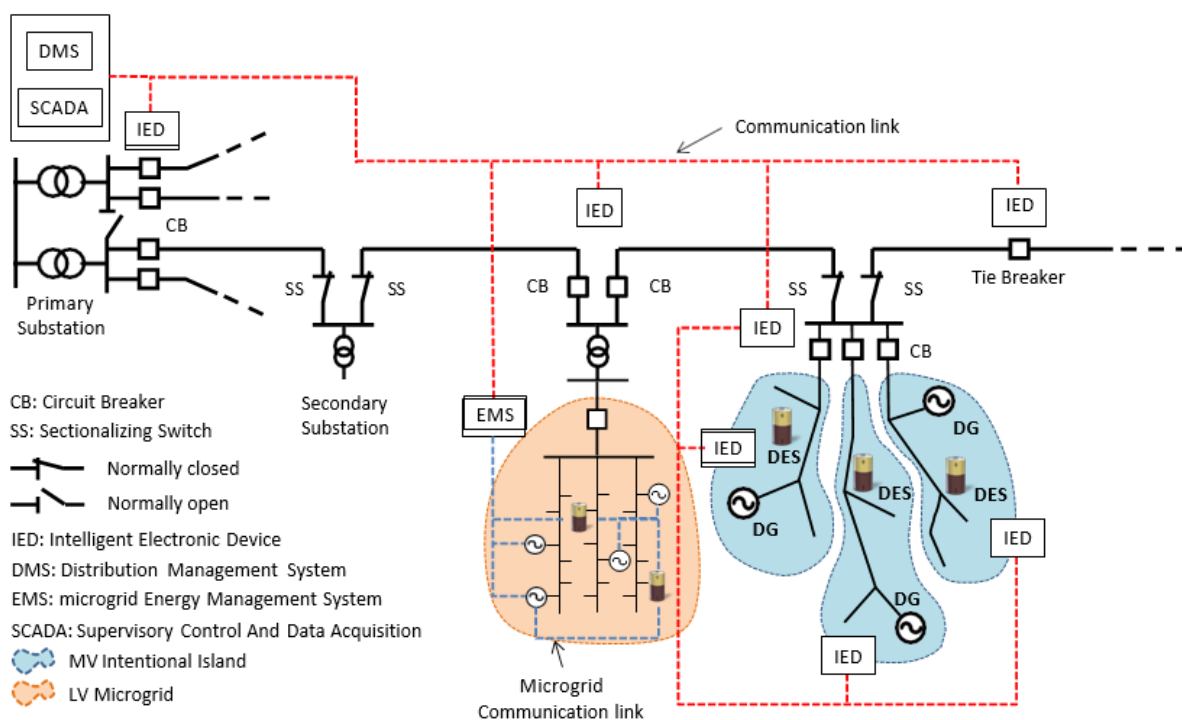
Značenje stranih pojmova sa slike 4.1.:

- Circuit Breaker – Prekidač
- Sectionalizing Switch – Sekcijski prekidač
- Automatic Sectionalizing Switch – Automatski sekcijski prekidač
- Normally closed – Normalno zatvoren
- Normally open – Normalno otvoren
- Tie Switch – Linijski prekidač
- Fuses – Osigurači
- Primary Substation – Primarna podstanica
- Secondary Substation – Sekundarna podstanica



Aktivne distribucijske mreže imaju mnoge potencijalne prednosti u usporedbi s pasivnim mrežama, ali su puno složenije zbog distribuiranih izvora, dodatnih uređaja i veza koji se mogu vidjeti na slici 4.2. Zbog svoje složenosti ovakva mreža može čak i negativno utjecati na pouzdanost sustava, posebno zbog trenutnog nedostatka alata za procjenu. Ipak, s druge strane, ima i pozitivne utjecaje na pouzdanost, a to su:

- Namjerno stavljanje mreže u otočni pogon – služi za opskrbljivanje dijelova distribucijske mreže pomoću generatora i uređaja za pohranu energije u fazi popravka kvara što poboljšava pouzdanost i opskrbu električnom energijom
- Samooparvljajuće i automatski rekonfigurirajuće mreže – omogućava brzo otkrivanje kvarova te automatsko ponovno opskrbljivanje isključenih dijelova što smanjuje broj korisnika koji trpe dugotrajni prekid.
- Koordinirana kontrola napona i reaktivne snage – izravno upravljanje proizvodnjom reaktivne snage iz distribuiranih izvora i uređaja za pohranu energije kombinirajući s upravljanjem odgovarajućim inteligentnim elektroničkim uređajima što omogućava smanjenje ograničavanja ili isključenja neovisnih proizvođača u slučaju nepravilnih radnih uvjeta.



Slika 4.2. Primjer aktivnog distribucijskog sustava [16]

Značenje stranih pojmova sa slike 4.2.:

- Circuit Breaker – Prekidač
- Sectionalizing Switch – Sekcijski prekidač
- Normally closed – Normalno zatvoren
- Normally open – Normalno otvoren
- Primary Substation – Primarna podstanica
- Secondary Substation – Sekundarna podstanica
- Intelligent Electronic Device – Inteligentni elektronički uređaj
- Distribution Management System – Sustav upravljanja distribucijom
- Microgrid Energy Management System – Sustav upravljanja energijom mikromreže
- Supervisory Control And Data Acquisition – Sustav za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka
- LV Microgrid – Niskonaponska mikromreža
- MV International Island – SN otočni dio mreže
- Microgrid Communication link – komunikacijska veza mikromreže
- Communication link – Komunikacijska veza

Uobičajena praksa je da se kršenja tehničkih ograničenja izbjegavaju, odnosno minimiziraju u fazi planiranja, a kod aktivnog upravljanja to će se rješavati tek kad se pojave u radu, odgađajući neka mrežna ulaganja. U idealnim uvjetima aktivni distribucijski sustav poboljšava pouzdanost sustava, međutim pouzdanost aktivnog upravljanja i informacijsko-komunikacijske tehnologije može narušiti ukupne performanse distribucijskog sustava.

Prema prethodno navedenim razmatranjima potrebne su dvije vrste analiza za aktivne distribucijske sustave. Prva bi trebala razmotriti pouzdanost tehnologija koje su potrebne za implementaciju specifičnih aplikacija aktivnih distribucijskih sustava kako bi se procijenio njihov učinak na pouzdanost cijelog sustava. Druga bi trebala biti usredotočena na kvantifikaciju prednosti novih rješenja. Istraživanje se još uvijek nalazi u početnim fazama mnogih aspekata aktivnih distribucijskih sustava jer se i dalje definiraju njihove karakteristike i potrebne tehnologije koje će biti usvojene.

Do danas su nesigurnosti podataka koje proizlaze iz ograničene vidljivosti korištene kao opravdanje za upotrebu približnih metoda analize, međutim u budućnosti će biti potrebni najbolji dostupni modeli za stvarnu procjenu stanja. Moderni stohastički modeli za procjenu pouzdanosti

mreže morat će biti usvojeni. Stoga je ključno definirati nove modele i alate za predstavljanje svih novih značajki i tehnologija aktivnih distribucijskih sustava.

## 5. INTEGRACIJA POTRAŽNJE NA STRANI POTROŠAČA

Integracija potražnje na strani potrošača se odnosi na sve aspekte odnosa između elektroenergetskog sustava, opskrbe električnom energijom i opterećenja krajnjeg korisnika. Mogućnost stvarnog vremenskog praćenja kao i upravljanje koje pruža aktivni distribucijski sustav mogu dovesti do novog načina rada distribucijskih mreža, primjerice optimizacije performansi novih topologija mreže. Operatori distribucijskih sustava imaju priliku za bolju analizu mreže zbog pristupa detaljnijim i preciznijim podacima. Osim svih prethodno navedenih utjecaja na planiranje aktivnih distribucijskih mreža doprinos tome imaju i strategije integracije potražnje na strani potrošača. Za bolju iskoristivost kapaciteta mreže i za postizanje veće pouzdanosti potrebno je uključiti pohranu energije i rješenja integracije potražnje na strani potrošača u fazi planiranja. Potrebno je razmotriti ovo s obzirom na nesigurnosti koje proizlaze iz uključivanja visokih razina intermitentne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije i optimiziranog iskorištavanja pohranjene energije. Kada se koriste za smanjenje vršnih opterećenja ili za izravnavanje opterećenja zbog kompenzacije naglo promjenjive snage koja je uzrokovana proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije, koordinirano upravljanje distribuiranim izvorima i rješenja integracije potražnje na strani potrošača mogu uravnotežiti proizvodnju iz obnovljivih izvora te postati alternativa pojačanjima mreže.

Dodatni problem su neizvjesni podaci o integraciji električnih vozila, punjenjima njihovih baterija te navikama vozača što otežava predviđanje i procjenu njihovih utjecaja na distribucijske mreže. Mora se uzeti u obzir i koncentracija opterećenja električnih vozila na određenim područjima jer neće biti ravnomjerno geografski raspoređeni. Također, nisu poznate lokacije, količina i veličina punionica za njih koje će biti implementirane u budućnosti.

Ciljne funkcije za planiranje i upravljanje aktivnim distribucijskim mrežama su: maksimiziranje proizvodnje iz obnovljivih izvora energije i ispunjavanje zahtjeva potražnje. Proizvodnja iz obnovljivih izvora energije ovisi o vremenskim uvjetima i signalima cijena električne energije, dok potražnja ovisi o potrebama korisnika te se razlikuje tijekom dana, tjedna i sezone. Zbog toga postaje neizbježno koristiti već spomenuti probabilistički pristup planiranju koji treba uzeti u obzir i tržišne i kontrolne faktore kao i ograničenja kapaciteta. Osim ciljnih funkcija, postoje i ograničenja kod planiranja i upravljanja aktivnim distribucijskim mrežama, a to su:

- Uravnoteživanje proizvodnje i potrošnje u svakom vremenskom segmentu
- Ograničenja snage i energije distribuiranih izvora unutar planiranog razdoblja
- Trajanje pohrane između ciklusa punjenja i pražnjenja unutar planiranog razdoblja

- Ograničenja snage i energije pohrane između ciklusa punjenja i pražnjenja unutar planiranog razdoblja
- Ograničenja mreže, poput granica opterećenja svakog čvora i grane, parametara kvalitete napona i granica opterećenja između područja koja se opskrbljuju

### **5.1. Izazovi kod aktivnog upravljanja potražnjom**

Planiranje aktivne distribucijske mreže ne može se provesti bez rješenja za upravljanje mrežom. Za rješenja integracije na strani potražnje kod planiranja se moraju uzeti u obzir sljedeći aspekti:

#### Smanjenje troškova

To je glavni pokretač integracije sa strane potražnje što je posebno značajno za vrijeme vršnih opterećenja kada cijene porastu. Kod takvih razdoblja čak i ograničeno smanjenje potražnje električne energije može dovesti do znatnog smanjenja troškova. Upravljanje potražnjom može neizravno utjecati na uštedu novca svim korisnicima smanjenjem cijena na veletržištu te ublažavanjem oscilacija cijena.

#### Učinkovitost tržišta

Uporaba električne energije se više usklađuje s troškovima kada korisnici primaju signale cijena i poticaje za smanjenje korištenja električne energije. Učinkovitija upotreba električnog sustava je rezultat smanjenja ili premještanja uporabe električne energije korisnika tijekom vršnih razdoblja.

#### Korisnička usluga

Mnogo korisnika smatra da je mogućnost upravljanja opterećenjem jako dobra stvar zbog uštede na računima za električnu energiju, ali i iz drugih razloga kao na primjer očuvanja okoliša.

#### Ograničavanje tržišne moći

Upravljanje potražnjom također pomaže u ograničavanju tržišne moći, odnosno zlouporabe dominantnog tržišnog položaja starih i novih dobavljača energije. To bi se moglo dogoditi kada upravljanje potražnjom može u stvarnom vremenu djelovati zajedno s ograničenjima opskrbe i/ili prijenosa.

## Upravljanje rizikom

Trgovci energijom riskiraju iz dana u dan i iz sata u sat kupujući energiju na veletržištima gdje cijene mogu drastično varirati. Korištenjem upravljanja potražnjom znatno bi smanjili svoj rizik i rizik svojih korisnika na tržištu.

## Ekološki

Upravljanje potražnjom može odgoditi ili smanjiti razvoj novih postrojenja i poboljšanja kapaciteta prijenosa i distribucije što može biti korisno za uporabu zemljišta u ruralnim područjima. Osim toga, može smanjiti ekološka opterećenja na zemlju, zrak i vodu smanjenjem potrebe za radom postrojenja koja zagađuju okoliš.

## Sigurnost i pouzdanost sustava

Sigurnost i pouzdanost sustava može biti poboljšana upravljanjem potražnjom korisnika tako da pruži smanjenje potrošnje u izvanrednim uvjetima ili da spriječi pogoršanje sustava za vrijeme tih uvjeta. Uporaba prekidivih opterećenja i smanjivih opterećenja postaju jako bitna od strane sigurnosti.

## Prekidiva opterećenja

Mogućnost prekidanja/isključivanja opterećenja koristila se desetljećima kod javnih usluga kako bi se poboljšala pouzdanost mreže. Ako operater sustava, u slučaju potrebe, mora isključiti opterećenje, takva opterećenja plaćaju nižu cijenu energije. Karakteristike prekidivih opterećenja su:

- Obavijesti za izvršenje dolaze u kratko vrijeme (sat vremena ili čak 10 minuta prije)
- Smanjenja opterećenja od minimalno 1 MW koja obično obuhvaćaju cijeli objekt
- Izvršenje isključenja je obavezno, a nedostatak isključenja ima za posljedicu velike kazne
- Popusti na računima za električnu energiju
- Postoji maksimalan broj prekida koji su dopušteni tijekom godine
- Isključenje se može zatražiti u bilo koje doba dana ili u bilo kojem danu u godini

Obično se prekidiva opterećenja odnose na veće industrijske korisnike čiji je osnovni trošak proizvodnje električna energija koja je potrebna za sam proizvodni proces. Ti korisnici su u mogućnosti privremeno prekinuti svoje operacije na nekoliko sati ili tijekom smjene. Očito je da

takvi korisnici traže načine za smanjenje troškova energije te su stoga spremni prihvatiti mogućnost privremenog isključenja kako bi mogli plaćati manje za potrošenu električnu energiju.

### Smanjiva opterećenja

Ovakav postupak je blaži od postupka isključenja opterećenja te su zahtjevi za sudionike manje strogi. Karakteristike za smanjiva opterećenja su:

- Manji je broj zahtjeva za smanjenjem, nego za prekidanjem opterećenja
- Smanjenje opterećenja se zahtjeva samo u određene sate i dane, primjerice radnim danima između 11 i 19 sati
- Manja smanjenja opterećenja se očekuju, na primjer najmanje 100 do 200 kW, ali mogu se tražiti i smanjenja od 500 ili 1000 kW
- Manje kazne u slučaju da se ne dosegne traženo smanjenje opterećenja
- Sudjelovanje je obavezno nakon dogovora

## **5.2. Pohrana električne energije**

U ovome kontekstu se sve više razmatra kombinacija pohrane energije i obnovljive energije, a cilj je kompenzirati varijabilnu proizvodnju obnovljivih izvora energije te postići izjednačavanje opterećenja.

### 5.2.1. Općenito o spremnicima električne energije

Spremnici električne energije mogu biti baterije i brojna tehnička rješenja koja omogućuju pohranu električne energije transformacijom u drugi oblik. Svaki spremnik električne energije ima svoje osnovne veličine koje ga opisuju, a to su:

- Nazivna snaga – najviša izlazna snaga sustava za pohranu energije
- Gustoća energije – količina energije koju je moguće pohraniti u kilogramu ili kubnom metru spremnika, a bitna je za dimenzioniranje prostora za smještaj spremnika
- Samopražnjenje – gubitak energije koja je pohranjena, a nije povezan uz cikluse punjenja i pražnjenja
- Vrijeme pražnjenja – vrijeme koje je potrebno da se skladištena energija isprazni
- Učinkovitost – omjer između električne energije koja je predana sustavu za vrijeme pohrane energije i električne energije koja je predana mreži za vrijeme pražnjenja sustava izražen u postotku

- Vrijeme odziva – interval od trenutka kad se naredi pražnjenje sustava do dostizanja nazivne snage pražnjenja

U tablici na slici 5.1. prikazane su neke od tehnologija pohrane električne energije koje bi se mogle primijeniti u distribucijskoj mreži te njihove osnovne značajke.

Tehnologija	Snaga [MW]	Gustoća energije [Wh/dm <sup>3</sup> ]	Vrijeme pražnjenja	Vrijeme odziva	Samopražnjenje	Učinkovitost [%]
Crpno – akumulacijske hidroelektrane	100 - 3.000	0,2 - 2	1-24 h+	minute	malo	70 - 85
Sustavi pohrane energije komprimiranim zrakom	do 300	2 - 6	1-24 h+	minute	malo	40 – 70
Pohrana energije pomoću zamašnjaka	0,1 - 20	20 - 80	1 s – 15 min	sekunde	veliko	85 – 95
Baterijski sustavi za pohranu električne energije	0 - 50	20 - 400	1 min– 24h+	ms	malo - umjereno	60 – 80
Proizvodnja i skladištenje vodika (gorivni članci)	do 60	600	1 min- 24h+	sekunde	malo	30 – 40
Superkondenzator	0 – 0,3	10 - 20	1 ms – 1 min	ms	veliko	84 - 97
Toplinski sustavi za pohranu energije	0,1 - 250	80 - 250	1 h – 10 h	minute	veliko-umjereno	30 – 60

*Slika 5.1. Pregled spremnika električne energije i njihovih osnovnih značajki [20]*

Spremnici za pohranu električne energije obavljaju širok spektar funkcija. S jedne strane moraju biti sposobni za vrlo brzu reakciju kako bi mogli pratiti trenutne promjene opterećenja u mreži, dok s druge strane, ukoliko prate promjene proizvodnje, vrijeme odziva može biti dulje. Za ostvarenje željenog načina rada treba odabrati tehnologiju koja ima odgovarajuće karakteristično vrijeme odziva i vrijeme pražnjenja.

Spremnici električne energije imaju tehnike pražnjenja pohranjene energije koje mogu uključivati, ali nisu ograničene na sljedeće operacije:

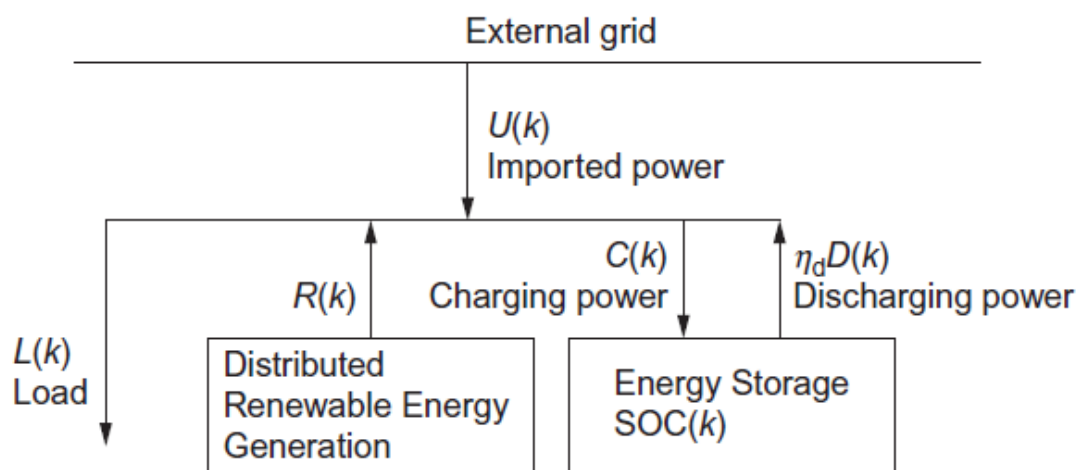
1. Smanjenje vršne potrošnje – Upravljanjem se nastoji isprazniti pohrana kako bi snaga na nadziranom elementu ostala ispod maksimalne vrijednosti u kilovatima.
2. Praćenje opterećenja – Opterećenje se prati tako da se upravljanje aktivira svaki dan u određeno vrijeme i ako potrošnja koja se nadgleda u kilovatima premašuje minimalni prag, uređaji se aktiviraju kako bi potrošnju spustili ispod određene minimalne razine.
3. Operacije bazirane na rasporedu – postupno povećanje, ravnomjerno trajanje i postupno smanjenje koriste se za određivanje profila pražnjenja koji su prisutni svaki dan počevši od određenog vremena početka.



Pri planiranju mreže utjecaj pohrane energije treba promatrati zajedno s modeliranjem potrošnje i modeliranjem distribuirane proizvodnje za procjenu potencijalnog utjecaja na potražnju u mreži.

### 5.2.2. Integracija pohrane električne energije u distribucijski sustav

U dereguliranim tržištima električne energije, korisnici koji su smješteni u distribucijski sustav obično ne sudjeluju izravno u kupovini potrebne energije na veletržištu, već za njih to radi agregator. Uobičajeno je opterećenje u određenom trenutku određeno zahtjevima korisnika te se smatra neelastičnim na cijenu, ako se izuzme upravljanje potražnjom. U ovome se primjeru pretpostavlja da je opterećenje određeno od strane korisnika bez mogućnosti upravljanja potražnjom. Cilj agregatora je minimizirati troškove na veletržištu električne energije uz pouzdanu isporuku energije. Integracijom spremnika za pohranu energije agregator ima veću mogućnost fleksibilnosti u isporuci energije i upravljanju transakcijama što može dovesti do većih ušteda i bolje pouzdanosti. Primjer distribucijske mreže sa integriranom pohranom električne energije i distribuiranim obnovljivim izvorom energije prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Primjer integracije spremnika energije u aktivnu distribucijsku mrežu [19]

Značenje stranih pojmova sa slike 5.2.:

- External grid – Vanjska mreža
- Imported power – Uvezena snaga
- Load – Opterećenje
- Charging power – Punjenje snage
- Discharging power – Pražnjenje snage
- Distributed Renewable Energy Generation – Distribuirana proizvodnja iz obnovljivih izvora

## - Energy Storage – Spremnik energije

Radi jednostavnosti svi uređaji za pohranu energije, potrošači i distribuirani obnovljivi izvori energije su sistematizirani unutar ovog distribucijskog sustava. Kao što je već prethodno navedeno, opterećenje u svakom vremenskom razdoblju  $k$ ,  $L(k)$ , je neelastično. Ovaj primjer uzima u obzir samo aktivnu snagu, a ne uzima u obzir gubitke snage te se pretpostavlja da su naponske razine pravilno regulirane. Te su pretpostavke obično prihvatljive za analizu pouzdanosti.

Spremnici za pohranu energije mogu se puniti snagom koja je kupljena na tržištu električne energije, ali i isporučenom iz vanjske mreže te se mogu prazniti kako bi podržali opterećenje  $L(k)$ . Agregator kontrolira punjenje snage  $C(k)$  kao i pražnjenje snage  $D(k)$  spremnika energije. Snagu distribucijskom sustavu pruža distribuirana proizvodnja iz obnovljivih izvora  $R(k)$ .  $U(k)$  je uvezena snaga koja je kupljena na tržištu električne energije i koja je isporučena od strane vanjske mreže u svakom vremenskom razdoblju  $k$ . Uvezena snaga može biti i negativna ukoliko se energija vraća u vanjsku mrežu, odnosno ako se prodaje mreži. To se može dogoditi u slučaju viška proizvedene energije iz distribuirane proizvodnje koja je integrirana u distribucijski sustav. U svakom trenutku proizvodnja je uravnotežena s potrošnjom, odnosno opterećenjem proizvodnjom iz distribuiranog obnovljivog izvora energije, snagom punjenja/pražnjenja spremnika energije i uvezenom energijom. Agregator upravlja proizvodnjom distribuiranog obnovljivog izvora smanjenjem izlaza obnovljive energije, a spremnicima energije upravlja određivanjem punjenja i pražnjenja.

### **5.3. Integracija električnih automobila**

Automobilska je industrija sve više usmjerena na proizvodnju električnih automobila, a političari sve više ističu njihov potencijal u ostvarivanju ekonomskih i ekoloških koristi. Paralelno s tim, energetska sektor procjenjuje očekivane implikacije na svoju infrastrukturu kako bi mogao zadovoljiti dodatno električno opterećenje, pri čemu se radi o posebnim karakteristikama u usporedbi s uobičajenima. Kada se električna vozila integriraju u mrežu, oni se mogu smatrati kao veliki pametni sustavi za pohranu energije, odnosno može ih se koristiti za smanjenje veličina potrebe spremnika energije za obnovljive izvore energije. Također se mogu koristiti kao brzoreagirajući izvor energije u slučaju prekidanja proizvodnje iz obnovljivih izvora. S druge strane, povećanje broja električnih vozila rezultirati će povećanjem opterećenja distribucijske mreže zbog njihovog punjenja, što će dosta utjecati i na planiranje same mreže. Stoga, kako bi se maksimalno iskoristile njihove prednosti, važno je optimalno upravljati potražnjom, proizvodnjom obnovljivih izvora energije te njihovim punjenjem i pražnjenjem.

### 5.3.1. Načini punjenja električnih automobila

Razmatraju se četiri načina punjenja električnih automobila, koja su opisana u nastavku:

1. Nekontrolirano punjenje tijekom vršnih sati – Punjenje električnih vozila iste vrste u isto vrijeme, tijekom vršnih sati.
2. Višetarifna politika usmjerena na punjenje tijekom ostalih sati – Punjenje električnih vozila istog tipa u isto vrijeme tijekom sati izvan najvećeg opterećenja. Takav se način punjenja koristi za simuliranje ciljeva višetarifne politike. To je moguće postići novim višetarifnim shemama poticaja, ali i novim tehnološkim rješenjima, primjerice, vremenskih uređaja u automobilima i pametnim brojilima.
3. Pametno punjenje – Punjenje automobila se vrši odabirom početnog sata punjenja kako bi se „popunila dolina“ u karakteristici opterećenja, uzimajući u obzir distribuiranu proizvodnju i potražnju. Kod dizajniranja ove vrste punjenja nisu uzeti u obzir lokalni problemi pa ona samo podiže opterećenje kad je ono najmanje. Ovakav će način punjenja morati imati sustave kontrole i komunikacije.
4. Pametno punjenje/praznjenje pomoću V2G (vozilo prema mreži) – Punjenje/praznjenje električnih automobila je ovisno o stvarnom opterećenju sustava i uvjetima proizvodnje energije u mreži djelujući kao kontrolirano opterećenje ili kontrolirani proizvođač, ali i kao spremnik energije u elektroenergetskim sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora energije. Takvim se načinom električni automobili koriste za minimiziranje vršne potrošnje i za podizanje opterećenja u satima jako niske potrošnje.

### 5.3.2. Analiza mreže uz masovnu integraciju električnih automobila

Integracijom jako velikog broja električnih automobila biti će potrebne značajne promjene u praksama i postupcima rada elektroenergetskog sustava. Za razmatranje budućih scenarija s velikim brojem integriranih električnih automobila u distribucijske sustave, operatori će morati procijeniti utjecaje koji će proizlaziti iz njihovog povezivanja na niskonaponske mreže. Neki od glavnih utjecaja na mrežu mogu biti: preopterećenje linija i kabela, povećanje gubitaka snage, neravnoteža napona i opterećenja. Koliko će veliki ti utjecaji biti na mrežu određuju ovi čimbenici: ponašanje vlasnika električnih automobila, razina integracije, profil opterećenja i tehničke karakteristike mreže, uzorci kretanja, načini punjenja te broj i lokacije stanica za brzo punjenje električnih automobila.

Među gore navedenim i opisanim načinima punjenja, najbolje je pametno punjenje koje ima bolje rezultate od ostalih u svim istraživanim slučajevima jer je omogućilo postizanje većeg broja

automobila koji se mogu integrirati bez kršenja tehničkih ograničenja mreže. To znači da se investicije u nadogradnju mrežne infrastrukture mogu odgoditi. Druga najbolja strategija punjenja je dvostruka tarifa jer je postigla bolje rezultate od nekontroliranog punjenja.

### 5.3.3. Utjecaji na kvalitetu električne energije

Masovna integracija električnih automobila u mrežu može stvoriti probleme koji bi utjecali na kvalitetu električne energije. Pojavljuju se tri glavna problema koja se razmatraju i analiziraju, a to su: pad napona, distorzija napona uslijed harmonika i neravnoteža napona.

#### Pad napona

Rezultati provedenih simulacija pokazuju da pretjerani pad napona i preopterećenja pojedinih elemenata sustava mogu ograničiti dopuštenu količinu za dodatno opterećenje punjenja električnih automobila. Ti ograničavajući elementi uključuju glavne niskonaponske vodove kraj SN/NN transformatora i SN/NN transformator. Međutim, u ruralnim distribucijskim sustavima, nadzemni vodovi ili kabeli su obično duži u usporedbi sa urbanim distribucijskim sustavima pa se pad napona ispod dopuštenih granica događa prije preopterećenja SN/NN transformatora ili nadzemnih vodova.

#### Distorzija napona uslijed harmonika

U provedenim simulacijama pretpostavlja se da harmonijski spektar punjača za električne automobile ima ukupnu distorziju struje od otprilike 5,6%. Pretpostavka je da su ostala opterećenja sustava linearna i uzimaju se da su električni automobili jedini izvori harmonijske distorzije u sustavu. Rezultati pokazuju da harmonijski naponi koji su uzrokovani punjačima s razmatranom distorzijom struje ostaju u dopuštenim granicama čak i kod velikog broja integriranih električnih automobila. Međutim, promjena rezultata je moguća ukoliko se uzmu u obzir punjači s većim razinama ukupne distorzije struje ili prisutnosti drugih izvora harmonika.

#### Neravnoteža napona

Prema rezultatima napravljenih simulacija jednofazno punjenje električnih automobila ne bi trebalo uzrokovati probleme neravnoteže napona osim u slučaju vrlo visoke integracije električnih automobila i značajne neravnoteže u mreži uzrokovano jednofaznim punjenjem. Iako, povećanjem broja električnih automobila u sustavu, za očekivati je da će se ona ravnomjerno raspodijeliti među tri faze.

#### 5.3.4. Planirane nadogradnje distribucijske mreže

Do 2030. godine predviđaju se velika pojačanja mreže, posebno ako se automobili pune tijekom vršnih sati, odnosno ako se ne usvoje strategije punjenja. Stoga bi se trebalo usmjeriti na pojačanja koja su potrebna za 2030. godinu, a regulacija bi trebala usmjeravati prema boljim načinima punjenja. U ruralnim područjima bi se trebala izvršiti pojačanja u dovodima energije kako bi se osigurao rad sustava unutar dozvoljenih granica napona. U urbanim područjima se očekuju pojačanja u SN/NN transformatorima, više nego u dovodima energije, zbog problema kapaciteta. Shodno tome, očekuju se problemi s kapacitetom u urbanim, a problemi napona u ruralnim područjima.

Najskuplje rješenje koje zahtijeva visoka pojačanja je nekontrolirano punjenje tijekom vršnih sati. Strategija koja značajno smanjuje troškove pojačanja mreže je višetarifna politika koja je usmjerena na punjenje u satima u kojima nema vršnog opterećenja. Tom se strategijom može čak i eliminirati potreba za pojačanjima. Pametnim se punjenjem mogu dodatno smanjiti troškovi pojačanja mreže.

#### 5.3.5. Planiranje distribucijske mreže uzimajući u obzir integraciju električnih automobila

Električni automobili koji imaju mogućnost V2G (vozilo prema mreži) mogu se smatrati vrstom distribuiranog izvora sa stohastičkom izlaznom snagom. Planiranje distribucijskih mreža sa električnim automobilima već je tema nekoliko istraživačkih radova, iako su oni još uvijek u vrlo ranoj fazi ispitivanja u elektroenergetskim mrežama. Zbog toga postoji puno neodgovorenih pitanja vezanih za njihove karakteristike. Metode i ideje planiranja mreže sa distribuiranim izvorima mogu se primijeniti i u planiranju distribucijskih mreža s velikom integracijom električnih automobila.

## **6. STRATEGIJE RADA DISTRIBUCIJSKE MREŽE SA DISTRIBUIRANIM IZVORIMA**

Nova paradigma elektroenergetskog sustava, osim novih metoda planiranja, zahtijeva i nove strategije rada sustava. Implementacija distribuiranih izvora mijenja distribucijsku mrežu tako da ju zapravo dijeli na podsustave – mikromreže i virtualne elektrane.

### **6.1. Upravljanje potražnjom**

Definicija upravljanja potražnjom, prema Direktivi 2019/944 (EU), glasi da je to „promjena potrošnje električne energije krajnjih potrošača u odnosu na njihove normalne ili uobičajene obrasce potrošnje u odgovoru na tržišne signale, uključujući odgovor na varijabilne cijene električne energije ili poticajne uplate, ili u odgovoru na prihvaćanje ponude krajnjeg potrošača za prodaju smanjenja ili povećanja potražnje po cijeni na organiziranom tržištu.”

Drugim riječima, aktivni potrošači zahvaljujući razmjeni informacija u stvarnom vremenu mogu planirati upotrebu svojih aparata. [17]

Prvi korak prema mogućnosti upravljanja potražnjom je uvođenje pametnih brojlara. Ona omogućuju korisnicima da se više uključe u programe upravljanja potražnjom. Tehnologija omogućena automatskom kontrolom opterećenja na razini korisnika još je jedna ključna komponenta za uspješnu provedbu programa upravljanja potražnjom. Još jedan ključni element je uvođenje agregatora koji mogu jamčiti sudjelovanje korisnika u programima upravljanja potražnjom bez troškova jer su spremni platiti opremu i instalaciju te mogu garantirati pouzdanu uslugu upravljanja potražnjom operatorima i uslugama opskrbljivanja energijom. Upravljanje potražnjom često se smatra ključnim za omogućavanje pametnih mreža s niskim udjelom ugljika. Jedan od glavnih izazova za provedbu programa upravljanja potražnjom je potreba pronalaska investicijskih i poslovnih modela koji će biti konkurentni u odnosu na tradicionalni model ulaganja u opskrbu energijom.

Potencijal upravljanjem potražnje za učinkovitim radom i planiranjem pametnih distribucijskih mreža za električnu energiju zahtijeva nove koncepte i algoritme koji u potpunosti iskorištavaju najnoviji napredak informacijsko-komunikacijske tehnologije. Očekuje se da će prodaja električne energije u kućanstvima kontinuirano rasti u sljedećim desetljećima. Štoviše, dobro procijenjena istraživanja o potrošnji u kućanstvima navode da je barem 10% ukupne potrošnje u kućanstvima fleksibilno, u smislu da se može premjestiti u drugo vrijeme. Agregacijski koncept može se iskoristiti za dizajn novog sudionika na tržištu, nazvanog agregator, koji je posrednik između

potrošača i tržišta. Glavni cilj agregatora je procijeniti fleksibilnost potrošnje pojedinačnih potrošača. On ima skupinu pretplatnika (krajnjih korisnika) i može utjecati na njihov uzorak potrošnje tako da ponudi novčanu nagradu ako potrošnja energije, tijekom određenih sati u danu, bude ispod/iznad određenih granica. Agregator prikuplja određenu količinu energije u određenim vremenskim intervalima koja se može koristiti u različite svrhe. Primjerice, ako operator distribucijskog sustava predviđa preopterećenje može od agregatora zatražiti smanjenje potrošnje energije u određenom području opterećenja u određenom vremenskom razdoblju, kako bi se spriječilo moguće neuravnoteženje mreže. Još jedan razlog za sakupljanje energije od strane agregatora je prodaja opcija na tržištu vezanih uz promjenu profila potrošnje u određenim područjima distribucijskog sustava. Kako bi predvidjeli potražnju i analizirali fleksibilnost potrošnje, agregator mora pravilno upravljati svojim portfeljem. Konkretno, agregator klasificira potrošače u različite grupe, nazvane prototipima ili skupovima, prema njihovoj potrošnji, njihovom ponašanju i drugim identificiranim karakteristikama kućanstva.

#### 6.1.1. Potrebe komunikacije i rješenja za uvođenje upravljanja potražnjom

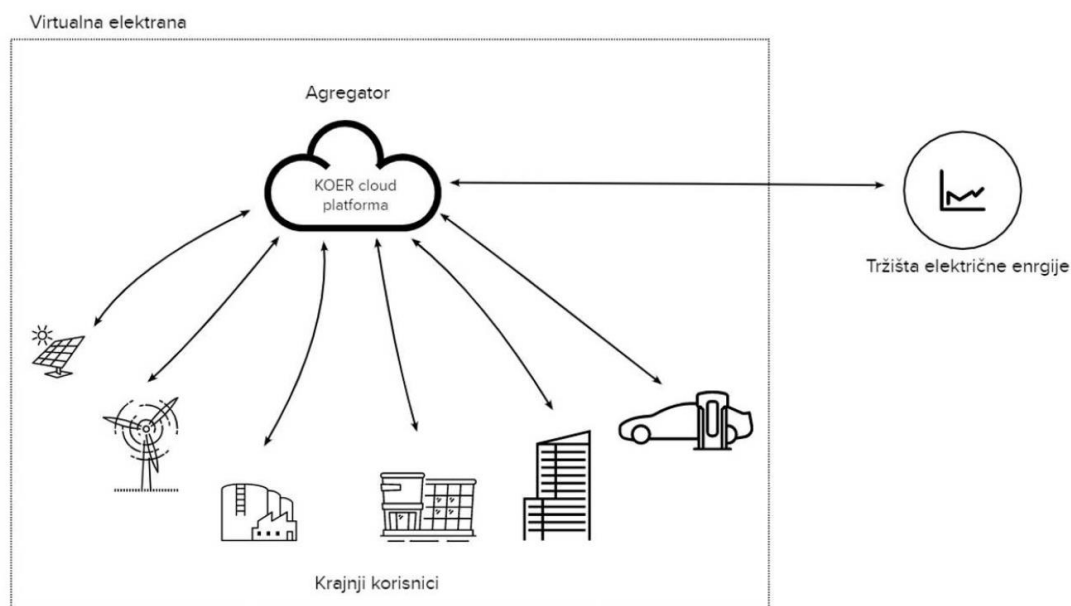
Važan čimbenik za provedbu upravljanja potražnjom (DR) je optimalna komunikacijska infrastruktura. Kako bi se to postiglo potrebno je zadovoljiti zahtjeve sustava, tehničke i ekonomske zahtjeve. Za implementaciju DR-a treba prvo razmotriti iskorištavanje postojeće infrastrukture. Operatori javnih telekomunikacijskih mreža mogu pružiti rješenja za komunikaciju. Infrastruktura za mobilnu i bežičnu komunikaciju pokriva većinu relevantnih područja. Alternativno, komunalno poduzeće može imati sustave za komunikaciju koji se mogu ponovno upotrijebiti ili u koje se mogu integrirati komunikacije DR-a. Na primjer, ODS-ovi mogu razviti velike sustave komunikacija za daljinsko očitavanje i upravljanje potrošnjom električne energije na niskonaponskoj mreži.

## 6.2. Virtualne elektrane

Jedna od osnovnih karakteristika naprednih elektroenergetskih mreža budućnosti je integracija i grupiranje distribuiranih i obnovljivih izvora energije, upravljivih tereta te sustave pohrane energije u virtualne elektrane. One su potrebne kako bi se spriječio disbalans, odnosno promjena frekvencije struje integracijom distribuiranih izvora energije. Razlog nastanka virtualnih elektrana je sve veća integracija distribuiranih izvora energije u zgrade i otvaranje malih privatnih elektrana.

Virtualna elektrana je novi sudionik tržišta električne energije koji kroz svoju tehnološku platformu objedinjuje izvore, trošila i spremnike energije te krajnjim korisnicima nudi priliku za sudjelovanje na tržištu električne energije. Osim toga ima fleksibilnost i upravljivost kao i

konvencionalna elektrana. Virtualna elektrana se sastoji od agregatora koji njome upravlja te krajnjih korisnika koji stavljaju na raspolaganje dio svog kapaciteta proizvodnje i potrošnje električne energije. Dijelovi virtualne elektrane su prikazani na slici ispod (slika 6.1.)



*Slika 6.1. Virtualna elektrana [13]*

Novi sudionici koji objedinjuju različite izvore energije na tržištu u virtualnu elektranu postaju agregatori, odnosno operatori virtualnih elektrana. Agregatori služe kao posrednici koji omogućuju vlasnicima izvora sudjelovanje na tržištu, zbog malih individualnih snaga i nemogućnosti malih potrošača da se sami zastupaju na tržištu. Oni, u direktnoj komunikaciji s operaterom prijenosnog sustava, održavaju balans paljenjem ili gašenjem trošila i izvora te omogućuju direktno trgovanje strujom iz priključenih izvora. Prvu virtualnu elektranu u Hrvatskoj izgradila je tvrtka KOER.

U nazivu se dodaje prefiks „virtualna“ kako bi se razlikovala od klasične elektrane koja je na jednoj lokaciji u odnosu na virtualnu koja nema postrojenje na jednoj lokaciji, već sadrži veći broj izvora ili trošila krajnjih potrošača na teritoriju Republike Hrvatske. Što znači da se ne grade novi kapaciteti za proizvodnju energije, nego se upravlja potrošnjom krajnjih kupaca. Uravnoteženje sustava postiže se smanjenjem potrošnje krajnjih kupaca (potrošača) koji su dio virtualne elektrane, a na zahtjev operatora, što je u elektroenergetskom sustavu isto kao aktivacija klasične elektrane koja nadomješta nedostatak električne energije. U Hrvatskoj je trenutno dostupna samo usluga smanjenja potrošnje krajnjih potrošača, ali se radi na tome da se uvede i usluga povećanja potrošnje jer probleme elektroenergetskom sustavu stvaraju i manjak i višak energije.



6.2.1. Pouzdano funkcioniranje elektroenergetskih sustava integriranih s virtualnim elektranama

Smanjenjem i pomicanjem opterećenja virtualne elektrane pružaju operativne rezerve s fleksibilnom potražnjom za pomoć u radu elektroenergetskom sustavu. Međutim, to bi moglo utjecati na pouzdanost sustava. Nadalje, slučajni kvarovi informacijsko-komunikacijskog sustava, angažman korisnika i neke druge komplikacije koje su uzrokovane različitošću vrsta opterećenja mogu neizravno utjecati na rad sustava. Za analizu pouzdanosti elektroenergetskog sustava primijenjena je kombinacija tehnike ekvivalenta pouzdanosti mreže i tehnike vremenski sekvencijalne simulacije. Tehnika ekvivalenta pouzdanosti mreže istražuje rezervne kapacitete koje se pružaju od strane virtualne elektrane zajedno sa kronološkim karakteristikama i nesigurnostima. Tehnika vremenski sekvencijalne simulacije procjenjuje pouzdanost elektroenergetskog sustava.

Rezerve za rad sustava podijeljene su u tri grupe: primarne, sekundarne i tercijarne rezerve, ako se uzima u obzir vrijeme aktiviranja nakon poremećaja u sustavu. Primarno upravljanje djeluje unutar nekoliko sekundi od pojave smetnje s ciljem održavanja frekvencije sustava unutar određenog raspona pomoću regulatora. Takvo se upravljanje aktivira u slučaju manjih promjena u opterećenju ili neočekivanog gubitka proizvodnje u sustavu. Sekundarno upravljanje djeluje unutar nekoliko minuta i povezano je s normalnim praćenjem opterećenja. Cilj ovog upravljanja je vraćanje frekvencije na nominalnu vrijednost i upravljanje opterećenjem prijenosnih postrojenja. Tercijarna rezerva služi za uvođenje nove proizvodne jedinice nakon nepredviđenih situacija s nultom pogreškom kontrole područja, koja također mora biti u skladu sa propisanim ograničenjima prijenosnih tokova. Relativno stabilne operativne rezerve su proizvodne jedinice, ali su pouzdanost i dostupnost elektroenergetskih sustava i dalje negativno pogođene promjenama opterećenja i izvanrednim situacijama u sustavu. Druge mogućnosti operativnih rezervi su fleksibilna opterećenja potrošača koja se mogu upravljati, na primjer električni automobili i klima uređaji. Oni mogu predstavljati tercijarne rezerve putem smanjenja i pomicanja opterećenja. Smanjenjem opterećenja privremeno se obustavlja neko opterećenje tijekom ili u uvjetima izvanrednih situacija. Pomicanjem opterećenja potrošači električne energije smanjuju svoju potrošnju za vrijeme vršnog opterećenja, a povećavaju potrošnju u razdoblju manje potrošnje, kako bi dobili odgovarajuću kompenzaciju upravljanjem potražnjom. Nesigurna narav potrošnje električne energije kod potrošača na fleksibilnom opterećenju također ima direktan utjecaj na obujam grupiranja opterećenja, odnosno na količinu operativnih rezervi. Agrupiranje opterećenja i provođenje smanjenja ili pomicanja opterećenja mogu uzrokovati neočekivane situacije u informacijsko-komunikacijskom sustavu, što može dovesti do prekidanja procesa i smanjenja sposobnosti

rezervi. Za elektroenergetske sustave koji uključuju virtualne elektrane, razvijen je optimalni model distribucije energije koji obuhvaća ekvivalente za proizvodnju u više stanja, slučajne kvarove u prijenosnoj mreži te kapacitete rezervi koje virtualne elektrane pružaju.

### 6.3. Mikromreže

Evolucija elektroenergetskih mreža dovodi do pametnih mreža. Definicija pametne mreže Europske tehnološke platforme je: „pametna mreža je električna mreža koja može inteligentno integrirati radnje svih korisnika povezanih s njom - proizvođača, potrošača i onih koji preuzimaju obje te uloge - kako bi učinkovito isporučila održivo, ekonomično i sigurno napajanje električnom energijom. Pametna mreža koristi inovativne proizvode i usluge zajedno s inteligentnim tehnologijama za praćenje, upravljanje, komunikaciju i samooporavak.“ [18]

Elektroenergetski su sustavi oduvijek bili pametni, pogotovo na razini prijenosa, no od distribucijske razine se sada zahtijeva više kako bi se:

- olakšala implementacija distribuirane proizvodnje s visokim udjelom obnovljivih izvora energije
- omogućilo lokalno upravljanje potražnjom električne energije komunikacijom s krajnjim korisnicima pomoću pametnih sustava za mjerenje
- koristile tehnologije koje su već primijenjene u prijenosnim mrežama, primjerice dinamičke tehnike kontrole, kako bi se ponudila viša razina kvalitete, sigurnosti i pouzdanosti

Kako bi se realizirale aktivne distribucijske mreže potrebna je implementacija potpuno novih koncepata sustava. Jedan od novih koncepata su mikromreže, koje su karakterizirane kao blokovi koji grade pametne mreže. Njihova se organizacija temelji na sposobnostima za kontrolu rada mreže sa sve većim instalacijama distribuiranih izvora, uključujući mikrogeneratore, poput mikroturbina, gorivih članaka, i fotonaponskih sustava, zajedno s uređajima za pohranu energije (npr. zamašnjaci, baterije) te fleksibilnih, odnosno upravljivih opterećenja, poput električnih automobila, na razini distribucije. Takve sposobnosti kontrole omogućavaju distribucijskim mrežama izolirani rad, odnosno otočni rad, u slučaju kvarova, vanjskih smetnji ili katastrofa što dovodi do povećanja kvalitete opskrbe. Razlika između distribucijske mreže sa distribuiranim izvorima i mikromreže je upravo ta implementacija kontrole.

Sa gledišta potrošača, mikromreže zadovoljavaju električne i termičke potrebe te poboljšavaju lokalnu pouzdanost. Dodatno, smanjuju emisije, potencijalno smanjuju troškove opskrbe

energijom i poboljšavaju kvalitetu napajanja tako da podržavaju napon i smanjuju naponske udare. Sa gledišta operatora mreže, mikromreža se smatra kontroliranom jedinicom u energetsom sustavu koju se može upravljati kao pojedinačno agregirano opterećenje i, uz naknadu, kao mali izvor energije ili izvor pomoćnih usluga distribucijskoj mreži. Na temelju povezanosti lokalne mikrogeneratorske proizvodnje i lokalnog opterećenja, mikromreža sudionicima pruža razne ekonomske, ekološke, tehničke i društvene koristi. Također, nudi maksimalnu fleksibilnost u vlasničkoj strukturi, može omogućiti globalnu optimizaciju učinkovitosti energetske sustava i smatra se najboljim rješenjem za poticanje krajnjih korisnika putem zajedničke interesne platforme. Sa gledišta javnih usluga, primjenom mikroizvora može se smanjiti potreba za prijenosnim i distribucijskim infrastrukturnim objektima. Nadalje, mikromreže mogu pružiti potporu distribucijskoj mreži oslobađanjem zagušenja i pomaganjem u obnovi nakon kvarova.

Krucijalni ekonomski potencijal instalacije mikroproizvodnje na lokacijama potrošača krije se u mogućnosti lokalnog iskorištavanja otpadne topline iz pretvorbe primarnog goriva u električnu energiju. To se može postići mikro-kogeneracijskim postrojenjima i fotonaponskim sustavima. Njihova primjena, osim ekonomskih, donosi i značajne ekološke koristi smanjenja emisija ugljika, što je iznimno važno s obzirom na trenutnu borbu protiv klimatskih promjena.

#### 6.3.1. Mikromreže kao sredstvo za integraciju distribuiranih izvora

Različite tehnologije mikroproizvodnje (npr. gorivi članci, vjetroagregati, mikroturbine, fotonaponski sustavi) izravno se mogu priključiti na niskonaponske mreže. Takve jedinice, koje su obično smještene na lokacijama potrošača, obećavajuća su opcija za zadovoljavanje rastućih potreba za električnom energijom. Njihov utjecaj na ravnotežu snage i frekvenciju mreže može postati značajniji tijekom godina. Shodno tome, potrebna je arhitektura za kontrolu i upravljanje koja bi omogućila potpunu integraciju mikroproizvodnje i aktivnog upravljanja opterećenjem u distribucijsku mrežu. Za očekivati je da će sustav za kontrolu i upravljanje donijeti potencijalne koristi na svim naponskim razinama u distribucijskoj mreži. Prema tome, za postizanje tog cilja, trebaju se usvojiti hijerarhijske strategije kontrole na svim razinama mreže. Primjerice, kod koncepta višestrukih mikromreža, hijerarhijska struktura kontrole zahtijeva srednju razinu kontrole koja optimizira rad takvog sustava.

#### 6.3.2. Razlike između mikromreža i virtualnih elektrana

Virtualna elektrana obuhvaća skup distribuiranih izvora kojima se zajednički upravlja putem centralne kontrolne jedinice. Ona može zamijeniti konvencionalnu elektranu sa većom

učinkovitosti i većom fleksibilnosti. Iako mikromreže i virtualne elektrane izgledaju skoro isto, postoji nekoliko bitnih razlika:

- Veličina – Instalirana snaga u mikromrežama je relativno mala i iznosi od nekoliko kW do nekoliko MW, dok je raspon snage kod virtualnih elektrana puno veći.
- Lokalitet – Distribuirani izvori su u mikromreži smješteni unutar iste lokalne distribucijske mreže te im je prvotni cilj zadovoljiti lokalnu potražnju. Kod virtualnih elektrana distribuirani izvori nisu nužno smješteni u istoj lokalnoj mreži te se koordiniraju preko šireg geografskog prostora. Osim toga, proizvodnja u virtualnim elektranama sudjeluje u trgovini na tržištu električne energije.
- Interes potrošača – cilj mikromreže je zadovoljiti lokalnu potrošnju, dok je virtualnim elektranama potrošnja samo fleksibilni resurs koji sudjeluje na tržištu energije putem naknade za integraciju potražnje na strani potrošača.

Virtualne elektrane kao virtualni proizvođači uglavnom zanemaruju lokalnu potrošnju, osim u slučaju integracije potražnje na strani potrošača. Za razliku od njih, mikromreže prepoznaju lokalnu potrošnju električne energije te krajnjim korisnicima daju mogućnost izbora kupnje lokalne proizvodnje ili proizvodnje na tržištu električne energije. To dovodi do istovremene optimizacije i resursa opskrbe i potražnje mikromreže, što omogućava veću profitabilnost mikroproizvodnje.

## **7. UPRAVLJANJE IMOVINOM DISTRIBUCIJSKIH MREŽA SA VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA**

### **7.1. Pristup upravljanju imovinom**

Kao i u svim industrijama, upravljanje imovinom je ključni dio uspješnog poslovanja i u elektroenergetskoj industriji. Razlog tome su visoka kapitalna ulaganja u imovine te veliki ekonomski gubici u slučaju propadanja imovina. Upravljanje imovinom energetske resursa postaje sve složenije i zahtjevnije zbog raznih čimbenika poput: okolišnih čimbenika, inspekcija, održavanja imovina na udaljenim mjestima, zakonskih zahtjeva i deregulacije, duljeg životnog vijeka imovine i konkurencije na otvorenom tržištu. Zbog energetske tranzicije, operatori distribucijskih mreža i upravitelji imovinom imaju nove izazove jer moraju uzeti u obzir velik broj priključenja distribuiranih izvora na svim razinama napona bez znanja kada i gdje će biti instalirani takvi novi izvori. Od operatera se očekuje da udovolje rastućim zahtjevima za poboljšanjem kvalitete usluge opskrbe energijom, ekonomskom optimizacijom i energetske učinkovitosti, ali i zahtjevima vezanim uz električne automobile. Stoga je potrebna učinkovita implementacija programa za upravljanje imovinom mreže kako bi ispunili navedene zahtjeve i kako bi se nosili s novim izazovima koje donosi implementacija distribuiranih izvora energije i pametnih mreža.

Upravljanje imovinom mreže obuhvaća planiranje mreže, tehnologiju rada i održavanja, sigurnost i pouzdanost distribucijskih mreža i opreme, primjenu internetskog praćenja i tehnika dijagnostike kvarova te upravljanje životnog ciklusa imovine. Sve navedeno utječe na upravljanje, rad i profitabilnost tvrtki za električnu energiju, posebno u reguliranim energetske tržištima.

#### **7.1.1. Tehnička terminologija i definicija**

Prema definiciji iz standarda PAS 55, Upravljanje imovinom definira se kao: "sustavne i koordinirane aktivnosti i prakse putem kojih organizacija optimalno upravlja svojom fizičkom imovinom i njihovim povezanim performansama, rizicima i troškovima tijekom njihovog životnog vijeka s ciljem ostvarivanja organizacijskog strateškog plana."

ISO 55000 definira Upravljanje imovinom kao "aktivnost ostvarivanja vrijednosti iz imovine".

Objedinjujući definicije upravljanje imovinom se može shvatiti kao strukturirani pristup usklađivanju smjera poslovanja (koji definira što 'vrijednost' predstavlja) s najboljom kombinacijom korištenja, održavanja, životnog ciklusa nabave i obnavljanja imovine kako bi se postigla ta vrijednost.

Često se programi upravljanja imovinom usredotočuju na informacijske sustave imovine i na nekoliko skupova usko definiranih procesa upravljanja radom koji su povezani s tim sustavima. To se naziva održavanje imovine ili upravljanje informacijama o imovini. Upravljanje imovinom nije samo softverski alat već sustav za upravljanje imovinom koji obuhvaća način rada, upravljanja, kontrole, mehanizme koordinacije i stvaranje vrijednosti povezane s imovinom. Dobre prakse upravljanja imovinom obuhvaćaju:

- uspostavljanje dobrih procesa za elemente životnog ciklusa imovine, a to su: planiranje, dizajn, kupovina, izgradnja, rad, održavanje, obnova, zbrinjavanje itd.
- poboljšavanje praksi upravljanja i mogućnosti za navedene resurse što će postati sve važnije u budućnosti jer će komunalna poduzeća morati koristiti svoju imovinu što učinkovitije.

Za ostvarivanje koristi od upravljanja imovinom, sustavi i procesi koji se koriste za upravljanje imovinom moraju biti bolje usklađeni i poboljšani kako bi se pronašla optimalna kombinacija rizika, troškova i performansi tijekom cijelog životnog vijeka imovine.

#### 7.1.2. Strategije održavanja imovine

Postoji nekoliko strategija za održavanje imovina koje su opisane u nastavku.

##### Korektivno održavanje

Korektivno održavanje je jedna od najčešćih metoda održavanja imovine u distribucijskim mrežama. Takva se strategija još naziva i „Vozi do kvara“. Kod ovakvog održavanja zamjena ili obnova imovine se vrši nakon kvara koji može, ali i ne mora dovesti do prekida opskrbe električnom energijom. Ova strategija se najčešće koristi u mrežama nižeg napona u kojima pojedinačni kvar nema veliki utjecaj na korisnike i poslovanje i gdje su rezervni dijelovi lako dostupni. Korektivno održavanje je smisljeno ako su kapitalna ulaganja i troškovi kvara niski, a napor za procjenu stanja visok. U takvim situacijama, korektivna strategija održavanja dovodi do smanjenja ukupnih troškova održavanja jer se troškovi pojavljuju samo kada se dogodi kvar. Također je pogodno za imovinu kod koje se stanje ne može procijeniti bez visokog stupnja napora, zbog čega se imovina koristi do svog maksimalnog vijeka trajanja.

##### Vremensko održavanje

Vremensko održavanje pomaže u otkrivanju poremećaja te može rezultirati i smanjenjem poremećaja zbog ranog otkrivanja neispravnosti. Ovakvo se održavanje temelji na stručnim

procjenama, informacijama od proizvođača i iskustvu. Statistika pruža alate za analizu i uključuje iskustva i testiranja napreznja od proizvođača. Efikasni regresijski model može pomoći u razvijanju učinkovitog alata za praćenje uvjeta predviđanja čime se smanjuje greška predviđanja. Ovo održavanje pomaže u rješavanju temeljnih pitanja koja se odnose na sljedeće radnje održavanja:

- Uklanjanje imovine
- Zamjenjivanje
- Popravljanje
- Ostavljanje kakvo je
- Odgađanje održavanja do idućeg datuma inspekcije

Rezultati takvih istraživanja mogu donijeti koristi u smanjenju truda i vremena koje je potrebno za održavanje imovine čime se poboljšava pouzdanost mreža koja je rezultat učinkovitijeg režima održavanja.

#### Održavanje temeljeno na stanju

Ova metodologija kombinira informacije o imovini, inženjersko znanje i praktično iskustvo s imovinom za definiranje i kvantificiranje trenutnog i budućeg stanja, rizika i performansi imovine. Na temelju stanja imovine provode se intervali inspekcije, potrebe za reinvesticijama i potrebe za održavanjem, a stanje imovine određuje se na temelju nefatalnih ispitivanja, opažачkih podataka, praćenja u stvarnom vremenu, analize uzoraka, itd. Ovakvo održavanje može biti temelj za učinkovite programe upravljanja imovinom koji se bave pitanjima pouzdanosti i obnove mreže u sve strožim regulatornim okruženjima s kojima se mnoge električne kompanije suočavaju. S napretkom elektroničkih uređaja i informacijske tehnologije razvijene su tehnologije za praćenje stanja opreme pa su se i metode upravljanja imovinom, koje su temeljene na praćenju stanja imovine i na procjeni rizika sustava, razvile s napretkom tehnologije.

#### Održavanje usmjereno na pouzdanost

Ovakvo održavanje koristi informacije o performansama i kvarovima kako bi se podržale odluke o potrebnim intervencijama te se usredotočuje na namjeni imovine. Važnost imovine se može odrediti na temelju količine neisporučene energije koja služi kao osnova za inspekciju i zamjenu, neovisno o tehničkom stanju koje se analizira korištenjem vjerojatnosti kvara. Drugim se pristupom razmatraju stanje i važnost postrojenja, ali samo kombiniranom procjenom ta dva faktora se dolazi do optimalne raspodjele budžeta za održavanje. Održavanje usmjereno na

pouzdanost je dokazana tehnologija za optimizaciju procesa održavanja kao i logičan korak prema poboljšanju ukupne pouzdanosti i performanse postrojenja uz istovremeno smanjenje ukupnih troškova.

#### Održavanje usmjereno na rizik

Održavanje usmjereno na rizik se temelji na održavanju usmjerenom na pouzdanost te je i proširenje takvog održavanja, uz razmatranje posljedica poremećaja i rizika. Za ovu metodu održavanja potrebno je odabrati odgovarajuće faktore procjenjivanja za posljedice, dok se rizik treba računati kao umnožak stope kvara i utjecaja kvara.

#### Kombinacija strategija održavanja

Značajan udio proračuna za održavanje distribucijske mreže je povezan s upravljanjem vegetacijom, dok se gore navedene metode primjenjuju kod čvrstih imovina. Upravljanje vegetacijom se postiže kombinacijom održavanja usmjerenog na pouzdanost, održavanja usmjerenog na stanju i korektivnog održavanja.

#### 7.1.3. Strateško planiranje imovine

Upravitelj imovine ima zadatak, osim upravljanja i održavanja postojeće imovine, razmotriti budući razvoj i utjecaj na distribucijski sustav, kao i definirati strategije. Za to su mu potrebne prognoze za socioekonomske, tehničke i regulatorne parametre. Kako se povećava razina neizvjesnosti sve vrijednije su tehnike koje se temelje na scenarijima koji pomažu u boljem razumijevanju budućnosti vezane za potrebe mreže (opterećenje, proizvodnja, fleksibilnost krajnjih korisnika, skladištenje, itd.). uz sve gore navedeno, upravitelji imovine podržavaju procjene koje su vezane za promjenjivo propadanje imovine i za buduće potrebe za ponovnim ulaganjem.

Za planiranje scenarija potrebno je uzeti u obzir sljedeće parametre:

- Tehnološke
- Ekonomske
- Političke
- Društvene
- Institucionalne
- Okolišne



Zatim je potrebno utvrditi kriterije planiranja i dizajniranja. Ti kriteriji uključuju aspekte sigurnosti, kvalitete, normi, zaštite, ekonomske učinkovitosti, topologije i regulatornog aspekta. Tradicionalni kriteriji planiranja se moraju dalje razvijati kako bi obuhvatili nove mogućnosti kontrole i automatizacije te nove tržišne propise koji omogućuju bolje sudjelovanje malih proizvođača električne energije, a sve to zbog povećanog udjela distribuirane proizvodnje i novih opterećenja (npr. električnih vozila). Planiranje i rad aktivnih distribucijskih mreža moraju se razmatrati zajedno, a ne odvojeno kao do sada.

#### 7.1.4. Izazovi za upravitelje imovine

Operatori distribucijske mreže ne mogu zamijeniti imovinu samo na temelju stanja ili starosti, već moraju razumjeti načine kvarova kao i njihove posljedice kako bi uspješno napravili potrebnu intervenciju. Potrebno je uzeti u obzir sljedeće opcije:

- Ništa ne poduzimati, popraviti samo ako je potrebno
- Modernizirati
- Obnoviti

Razumijevanjem kvarova i njihovih posljedica upravitelji imovine smanjuju potencijalne ekološke ili sigurnosne rizike koji su povezani s tim kvarovima. Zatim osiguravanjem zamjenskih dijelova smanjuju vrijeme popravka u slučaju kvara, a nadzorom ili čestim inspekcijskim pregledima produljuju životni vijek imovine.

Još jedan izazov je upravljanje životnog ciklusa imovine. U procesu donošenja odluka o ulaganjima moraju se uzeti u obzir početni troškovi ulaganja, operativni troškovi i troškovi uklanjanja imovine. Pri analizi troškova životnog ciklusa uključuju se troškovi proizvodnje, održavanja, demontaže, troškovi gubitaka energije i vrijednosti očekivanih gubitaka opterećenja. Ovakva analiza se radi kod razmatranja ulaganja u nove resurse i kod razmatranja ulaganja u popravak/zamjenu/obnovu u sredini ili pri kraju životnog ciklusa imovine.

#### 7.1.5. Povećanje prodiranja distribuiranih izvora energije

Mnoge europske zemlje daju poticaje za proizvodnju iz obnovljivih izvora energije kako bi se postigli ciljevi Europske Unije vezano uz emisije ugljičnog dioksida u sektoru energije, zbog čega se povećava broj instaliranih distribuiranih izvora. Većina jedinica za proizvodnju iz obnovljivih izvora spojena je na distribucijsku mrežu, dok su fotonaponske jedinice spojene na srednjenaponske ili niskonaponske mreže. Na srednji i visoki napon spajaju se velike hidroelektrane i vjetroagregati. Međutim, sve više distribucijskih mreža doseže svoje prihvatne

kapacitete jer nisu dizajnirane za integraciju distribuirane proizvodnje. To rezultira kršenjem tehničkih ograničenja, kao na primjer prekoračenje naponskih granica ili prekoračenje maksimalnih termičkih granica transformatora i vodova. Osim toga, količina i lokacija buduće proizvodnje koju će trebati integrirati je nesigurna pa je dugoročno planiranje teško, što rezultira visokim stupnjem neizvjesnosti koje bi se trebale riješiti strateškim planom koji koristi tehnike temeljene na scenarijima. Kako bi se smanjilo gore navedeno kršenje tehničkih ograničenja i kako bi se povećali kapaciteti prihvata distribucijskih mreža razvijaju se nova tehnička rješenja što dovodi do novih izazova i mogućnosti za strategije upravljanja imovinom u budućnosti.

## **7.2. Ključni pokazatelji strateškog planiranja i rada**

U ovom će poglavlju biti obrađeni ključni pokazatelji koji su relevantni za upravljanje imovinom, strateško planiranje i rad.

### **7.2.1. Strategije planiranja i rada**

Zbog nestabilnosti proizvodnje iz distribuirane proizvodnje koja se temelji na obnovljivim izvorima energije dolazi do problema ravnoteže sustava te povećane potrebe za fleksibilnošću elektroenergetskih sustava. Nadalje, moguće je podijeliti probleme koji se javljaju u distribucijskim mrežama zbog integracije distribuiranih izvora u četiri kategorije:

- Problem prekoračenja toplinske nosivosti vodova i transformatora u slučaju da integrirani proizvodni kapacitet prekorači određenu vrijednost. To se može dogoditi jer je mreža projektirana za određeno maksimalno opterećenje.
- Problemi utjecaja na napon što može rezultirati kršenjem tehničkih ograničenja na niskonaponskoj i srednjenaponskoj razini. Na niskonaponskoj razini napon može premašiti gornju granicu napona, ukoliko nema regulatora napona ili promjenjivača opterećenja. Na srednjenaponskoj razini problem može nastati kod nehomogene raspodjele proizvodnih jedinica u različitim granama koje su povezane s jednim transformatorom visokog/srednjeg napona.
- Problem povećanih struja kvara. Integracija distribuiranih izvora može zahtijevati nadogradnju opreme jer je maksimalna razina struje kvara ograničena karakteristikama razine kvara opreme.
- Postoji još nekoliko problema, a to su: niža kvaliteta opskrbe uzrokovana harmonicima koji proizlaze iz pretvarača, problemi kod otočnog rada, zasljepljivanje i lažno prekidanje uzrokovano protokom obrnute snage što proizlazi iz instaliranih distribuiranih kapaciteta koji premašuju maksimalna opterećenja.

Rješenja problema koji nastaju zbog integracije distribuiranih izvora su povećanje kapaciteta mreže i konfiguracija mreže, međutim to zahtijeva velike troškove pa su posljednjih godina analizirane i testirane nove tehnologije. One bi olakšale kršenje gore navedenih tehničkih ograničenja i povećale kapacitete mreže uz manje troškova.

Upravljanje potražnjom može riješiti problem s kršenjem granica napona i termičkih ograničenja tako da se prilagodi profil opterećenja. Operatori distribucijskih mreža vide potencijal upravljanja potražnjom kod pametnih kuća, rješenja za pretvorbu energije u toplinsku energiju i električne mobilnosti. Ako se uz distribuirane izvore izgradi pohrana energije, može se povećati kapacitet mreže za integraciju distribuiranih izvora energije. Postoji još jedna mogućnost za povećanjem kapaciteta mreže, a to je upravljanje proizvodnjom. Obnovljivi izvori energije imaju veliku proizvodnju ograničeni broj sati tijekom godine koji su ključni operatorima mreže, no za povećanje kapaciteta mreže ti peak-ovi u proizvodnji bi se trebali smanjiti.

Kod sredjenaponskih i niskonaponskih mreža kršenje naponskih granica često se rješava upravljanjem reaktivnom snagom. Proizvodnim jedinicama koje su na mrežu spojene preko pretvarača pa se njihova reaktivna snaga može upravljati neovisno o aktivnoj snazi putem različitih mehanizama kontrole. Te mehanizme kontrole operatori mreže mogu definirati u svojim zahtjevima za spajanje na mrežu, a to su:  $Q(U)$ -kontrola,  $Q(P)$ -kontrola i fiksni faktor snage. Još jedna mogućnost za rješavanje problema napona je korištenje regulatora napona na vodovima za smanjenje ili povećanje napona na dovodu. Osim regulatora napona za istu namjenu mogu se koristiti distribucijski transformatori s regulacijskom sklopkom pod opterećenjem koji ne mogu puno doprinijeti ako je prostorna raspodjela DER-a na različitim niskonaponskim dovodima nehomogena kao i ako problemi s naponom proizlaze iz pojedinačne proizvodne jedinice na kraju dovoda.

Svaka tehnologija zahtijeva različitu razinu komunikacijske vidljivosti i softvera za nadzor, od pojedinačnih mjerenja do potpuno vidljive distribucijske mreže. Ta dodatna mjerenja mogu se koristiti za povećanje sposobnosti mreže za smještaj distribuiranih izvora kao i za smanjenje vremena prekida i poboljšanje kvalitete usluge. Danas su već dostupne tehnologije kontrole i automatizacije te softver za upravljanje imovinom za distribucijske mreže i distribuiranu proizvodnju. Budućnost za mjerenje u distribucijskim mrežama su pametna brojila koja su već uvedena u pojedine zemlje Europe. Podaci pametnih brojila mogu poboljšati upravljanje imovinom, međutim komunikacijska struktura, obrada podataka i sami podaci mjerenja pametnih brojila moraju biti ispravno osmišljeni.

### 7.2.2. Regulacijski kontekst za strategije upravljanja imovinom

Promjene u regulatornom okviru dovode do glavnih ekonomskih utjecaja na prihode vezane za strategije upravljanja imovinom. Teži se povećanju učinkovitosti što može utjecati na strategiju upravljanja imovinom. Na primjer, u Njemačkoj se pruža poticaj operatorima distribucijske mreže za poboljšanje kvalitete isporuke investiranjem u daljinsku kontrolu i nadzor kako bi se smanjilo vrijeme za obnovu mreže. Osim upravljanja imovinom, upravljanje proizvodnjom također ovisi o regulatornom okviru.

### 7.2.3. Ključni pokazatelji

Za identifikaciju ključnih pokazatelja glavnih tehno-ekonomskih utjecaja na upravljanje sredstvima distribucijskih mreža s visokom integracijom distribuiranih izvora energije potreban je osnovni pokazatelj prodora distribuiranih izvora energije. U tablici 7.1. su prikazani neki od ključnih pokazatelja koji utječu na upravljanje imovinom.

*Tablica 7.1. Pokazatelji koji utječu na upravljanje imovinom [15]*

Integracija distribuirane proizvodnje	Tehnički i ekonomski pokazatelji
<ul style="list-style-type: none"><li>- Udio distribuiranih izvora energije u ukupnom instaliranom kapacitetu mreže</li><li>- Omjer instaliranih kapaciteta distribuiranih izvora energije i opterećenja</li><li>- Broj distribuiranih izvora</li><li>- Prostorna raspodjela distribuiranih izvora u mreži</li><li>- Vrsta distribuiranih izvora</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Regulacijski režim</li><li>- Daljinsko upravljanje distribuiranim izvorima</li><li>- Kodovi mreže</li><li>- Struktura mreže</li><li>- Tehnologije koje priznaje regulator osim konvencionalnog proširenja mreže</li><li>- Daljinska vidljivost mreže</li><li>- Ograničenje dopuštene količine energije koja se dobiva iz distribuiranih izvora</li></ul>

Kod prodora distribuiranih izvora energije potrebno je razmotriti dva ključna pokazatelja:

1. Omjer instaliranih kapaciteta distribuiranih izvora energije i opterećenja
2. Udio distribuiranih izvora energije u ukupnom instaliranom kapacitetu mreže

Kako se povećava omjer između kapaciteta distribuiranih izvora energije i opterećenja tako se smanjuje kapacitet za integraciju distribuiranih izvora energije. Kod ruralnih mreža koje imaju malo opterećenje, a velike udjele distribuiranih izvora, biti će suočene s kršenjem tehničkih ograničenja i s potrebom za proširenje mreže ili za uvođenje napredne automatizacije i kontrole. To može ovisiti i o prostornoj raspodjeli distribuiranih izvora, jer primjerice, kršenje granica napona kod velikih jedinica distribuiranih izvora na kraju grana je kritičnije nego kod jedinica koje su blizu podstanice. Gradske mreže kod kojih je manje instaliranih distribuiranih izvora imati će male promjene u strategijskom planiranju i radu mreže. U slučaju da se suoče sa velikom integracijom distribuiranih izvora, operator mreže će imati na raspolaganju različite tehnologije za povećanje kapaciteta mreže bez skupog proširenja mreže. Za to je ključan režim regulacije koji bi trebao rezultirati promjenama u praksi upravljanja imovinom. Za uspješno upravljanje električnim sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora energije ključni su daljinsko praćenje i kontrola distribuirane proizvodnje te tradicionalnih objekata. Također, informacijske i komunikacijske tehnologije moraju se smatrati bitnim dijelom strategija za upravljanje imovinom.

### **7.3. Scenariji za razumijevanje nepredvidive budućnosti**

Ovo se potpoglavlje fokusira na upotrebu scenarija za dugoročno planiranje mreža. Skup scenarija može prikazati raspon mogućih događaja s obzirom na današnju neizvjesnost. Današnje odluke i rješenja možda neće biti dovoljno dobra sutra. Pojedini scenariji mogu sadržavati različite pretpostavke o razvitku trendova, o odvijanju kritičnih neizvjesnosti te o pojavi novih čimbenika. Postoji mogućnost da niti jedan scenarij ne bude točan, ali oni zajedno mogu pružiti znanje o vjerojatnom rasponu budućih ishoda. Koraci za razvoj scenarija su:

#### Prvi korak – uspostavljanje konteksta

Za početak razvoja scenarija potrebno je definirati kontekste kojima bi se trebalo usredotočiti na nesigurne i najvažnije čimbenike koji neizravno utječu na završetak scenarija. Konteksti se trebaju razlikovati kako bi njihov skup pokrio potpunu neizvjesnost čimbenika koji oblikuju kontekst. Za primjer su prikazana tri konteksta relevantna za opterećenje podstanica:

1. Uobičajeno poslovanje. Iako se pojavljuju nove tehnologije, postoji konstantna evolucija više nego revolucija. Fokus je na klimatskim promjenama, ali sa malom učinkovitošću provedbe.
2. Klima i inovacije. Pojava tehnoloških inovacija koje su u skladu s izmjenama zbog klimatskih promjena.
3. Nestabilnost i usporavanje napretka. Smanjenje fokusa na klimatske promjene.

Za isti primjer postoji još jedan važan faktor, a to su troškovi životnog vijeka komponenata. Klimatske promjene mogu utjecati na promjene u opterećenjima koje mogu onda utjecati na trošenje komponenata. Povećanja mogu utjecati na razne troškove poput troškova prekida rada te troškova održavanje, ali i na trajnost komponenata. Zato su i za taj faktor dana tri konteksta:

1. Uobičajeno poslovanje koje uobičajeno utječe na trošenje komponenata.
2. Utjecaj manje ozbiljnih klimatskih promjena na trošenje komponenata.
3. Utjecaj ozbiljnih klimatskih promjena na trošenje komponenata.

#### Drugi korak – stvaranje scenarija

Jedan od postupaka za stvaranje scenarija može biti sljedeći:

- Identifikacija važnih čimbenika koji su relevantni za promjene koje utječu na cilj scenarija
- Analiza utjecaja (nizak/srednji/visok) i nesigurnosti (niska/srednja/visoka) tih važnih čimbenika
- Procjena utjecaja i nesigurnosti pojedinog čimbenika te utvrđivanje mini-scenarija koji se temelje na kontekstima

Oni čimbenici koji imaju veliku količinu nesigurnosti moraju se predstaviti različitim mini-scenarijima, dok čimbenici koji nemaju veliku nesigurnost mogu se predstaviti jednim mini-scenarijem koji vrijedi za sve kontekste.

- Uspostavljanje scenarija za odabrani cilj

To se može ostvariti kombiniranjem mini-scenarija po unaprijed definiranim kontekstima, ali tako da mini-scenariji koji se kombiniraju budu kompatibilni s istim kontekstom. Dobri scenariji moraju biti upotrebljivi, relevantni te vjerojatni.

Drugi pristup za stvaranje scenarija drugačije koristi mini-scenarije te je bolji za kvantitativne scenarije. U ovakvom pristupu ključni čimbenik može imati jedan ili više scenarija koji mogu opisati različite promjene u odnosu na sadašnje stanje.

#### **7.4. Evolucija alata za simulaciju upravljanja imovinom**

Distribucijske mreže u mnogim zemljama suočavaju se s novim izazovima jer su podvrgnute regulaciji cijena, prihoda ili mjernom tipu regulacije. Također moraju smanjiti svoje troškove da bi povećale profit dok istovremeno osiguravaju visoku razinu pouzdanosti i kvalitete isporuke.

Zbog svega toga upravljanje imovinom ključno je za operatore distribucijskih mreža. Kako bi se opravdala specifikacija opreme, potrebno je razmotriti karakteristike opreme ili cijele mreže za razvoj metodologije koja bi upravljala budućim izgradnjama i/ili rekonstrukcijama te operativnim troškovima. Za ispunjenje tih zahtjeva trebaju se uspostaviti modeli životnog ciklusa kako bi se prikazali relevantni ekonomski i tehnički aspekti za dugoročna razmatranja. Osim toga, potrebno je uzeti u obzir i razviti strategije održavanja opreme u metodologiji. Zbog velikog broja imovine kojom je potrebno upravljati i koju je potrebno održavati, razvijeno je nekoliko alata za upravljanje imovinom koji ispunjavaju potrebne zahtjeve distribucijskih operatera. Za izvršavanje simulacije nužni su ubrzani modeli starenja. Simulacije se mogu izvesti prema normalnoj ili Weibullovoj distribuciji te korištenjem Markovljevog lanca, koji svakoj imovini dodjeljuje stanje. Za oba pristupa, prije simulacije, potrebna je procjena stanja. Ona pruža ulazne informacije za modele starenja, a to su:

- Vrsta imovine
- Starost imovine
- Stručnost osoblja
- Povijest opterećenja
- Dostupnost rezervnih dijelova
- Povijest održavanja

Potrebni su i dodatni ulazni parametri za modele starenja, a to su: trajanje i troškovi svake operacije održavanja, ciklusi inspekcije i obnove, stope kvarova po stanju opreme za veće i manje kvarove te posljedični troškovi popravka. Zatim treba izračunati količinu neisporučene energije pri svakom kvaru opreme i troškove neisporučene energije te gubitke prihoda. Time se može napraviti individualna strategija održavanja za svaku grupu opreme. Procjena stanja i važnost svakog resursa potrebni su za optimalnu procjenu resursa te za razvoj optimalne strategije održavanja. Po završetku procjene stanja, gore navedene informacije prenose se u model starenja. Rezultati simulacije pružaju informacije o tehničkom stanju imovine koje pružaju upravitelju imovine strukturu za donošenje odluka.

## 8. METODE PLANIRANJA DISTRIBUCIJSKE MREŽE SA VELIKIM UDJELOM DISTRIBUIRANIH IZVORA

### 8.1. Tradicionalno planiranje i trenutna praksa

U tablici 8.1. su prikazana razmatranja planiranja u različitim paradigmama te se u njoj ističe razvoj planiranja distribucijske mreže od sustava u kojem je planiranje usmjereno oko vršnog opterećenja do višestruko složenijeg problema. To je posljedica novih tehnologija kao i novih aplikacija u mreži što zahtijeva razmatranje brojnih scenarija i radnih točaka. Zatim, distribuirana proizvodnja modificirati će dinamiku sustava, najviše ponašanje mreže kod kratkog spoja, što zahtijeva razmatranje svih mogućih kombinacija kod analize zaštite.

Tablica 8.1. Izazovi integracije distribuirane proizvodnje sa sadašnjim i budućim rješenjima [16]

Izazov	Trenutno rješenje	Buduće alternative
Povećanje napona	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faktor snage 0.95 s kašnjenjem</li> <li>- Kontrola napona i reaktivne snage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontrola napona i reaktivne snage</li> <li>- Upravljanje potražnjom</li> <li>- Skladištenje energije</li> </ul>
Kapacitet mreže	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pojačanje mreže</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nesiguran pristup</li> <li>- Skladištenje energije</li> <li>- Upravljanje potražnjom</li> </ul>
Faktor snage mreže	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ograničenja kod potražnje i proizvodnje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Način rada konstantnog napona</li> <li>- Proizvodnja s jediničnim faktorom snage</li> </ul>
Izvori reaktivne snage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prijenosna mreža</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skladištenje energije</li> <li>- SVC (Statički kompenzatori reaktivne snage)</li> <li>- Vjetroelektrane</li> </ul>
Životni vijek mrežne opreme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stroge izvedbe spojeva i specifikacije mrežne opreme temeljene na tehničkim i ekonomskim analizama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Način rada konstantnog napona</li> <li>- Dinamičke, koordinirane postavke zaštite</li> <li>- Praćenje stanja opreme</li> </ul>



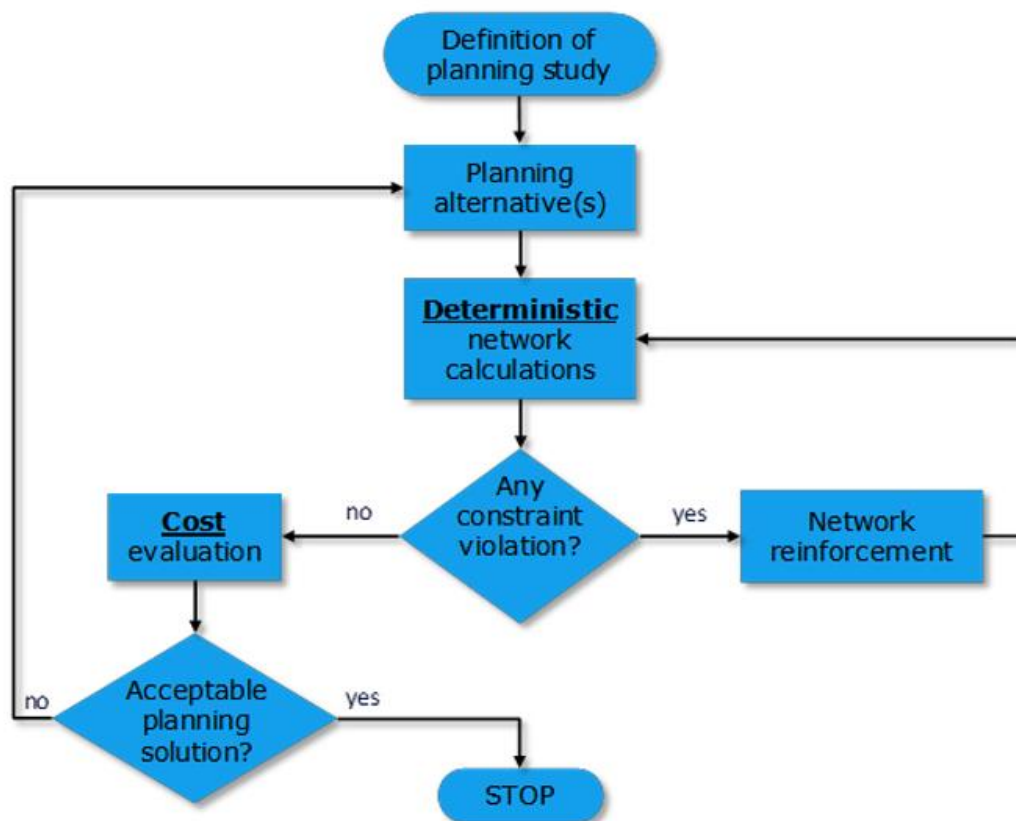
Iz tablice se može zaključiti da su upravljanje potražnjom i skladištenje energije najčešće buduće alternative, odnosno da su najčešći odgovor na izazove. U idućoj tablici (8.2.) prikazana su razmatranja i usporedbe rješenja između konvencionalnih mreža i aktivnih distribucijskih mreža.

*Tablica 8.2. Opća razmatranja za konvencionalne mreže i za novu paradigmu aktivnih distribucijskih mreža [16]*

Razmatranje	Konvencionalna mreža	Aktivna distribucijska mreža
Stupanj automatizacije	- Vrlo mali ili nikakav	- Sveprisutan
Filozofija upravljanja	- Lokalno upravljanje	- Integrirano
Mogućnosti planiranja	- Dodavanje novih kapaciteta - Balansiranje faza	- Dodavanje novih kapaciteta - Balansiranje faza - Mjere upravljanja vršnim opterećenjem - Dodavanje skladištenja energije
Modeliranje distribuiranih izvora energije	- Model sinkronog stroja	- Više vrsta distribuirane proizvodnje - Točan model kratkog spoja - Prognoze za energiju - Različiti načini upravljanja
Pouzdanost	- Pravila prema iskustvu	- Brojne potencijalne točke kvara (i opreme mreže i distribuiranih izvora) - Potreba za detaljnim modelima, integriranim s drugim analizama
Modeliranje komunikacijskih mreža	- Nije primjenjivo	- Potrebna analiza za procjenu ovisnosti različitih primjena o performansama telekomunikacija
Napredne aplikacije distribucijskih sustava	- Nije primjenjivo	- Kvantificirati koristi i izraditi poslovne slučajeve - Sposobnost analize mnogih aplikacija paralelno

### 8.1.1. Neadekvatnost tradicionalnog planiranja

Distribucijske mreže dimenzioniraju se tako da se mogu nositi s najgorim mogućim scenarijem (u smislu opterećenja, sigurnosnih ograničenja i padova napona) za određenu procjenu opterećenja uz minimalnu ili nikakvu potrebnu intervenciju. Ovakav se pristup, poznat i kao „postavi i zaboravi“, provodi deterministički, odnosno bez da se razmotre nesigurnosti. Slika 8.1. prikazuje opći dijagram takvog pristupa.



Slika 8.1. Opći okvir planiranja pasivnih mreža [16]

Značenje stranih riječi sa slike 8.1.:

- Definition of planning study - Definicija planske studije
- Planning alternatives – Planiranje alternativa
- Deterministic network calculations – Deterministički proračuni mreže
- Any constraint violation – Kršenje bilo kojih ograničenja
- Cost evaluation – Procjena troškova
- Network reinforcement – Pojačanje mreže
- Acceptable planning solution – Prihvatljivo planirano rješenje
- Yes – Da

Nakon što se definira studija planiranja, razmatraju se različite alternative koje se tehnički procjenjuju uzimajući u obzir uvjete opterećenja. U slučaju da planirana alternativa nije tehnički izvediva, upotrebljavaju se pojačanja mreže, poput novih transformatora, veličina vodova, itd. Zatim se procjenjuju odgovarajući troškovi. Uglavnom se usvaja planirana alternativa koja je najisplativija.

Pristup „postavi i zaboravi“ koristi se i za povezivanje distribuirane proizvodnje sa distribucijskom mrežom. Tim se pristupom najviše analiziraju scenariji maksimalne proizvodnje i minimalne potražnje koji se, u slučaju obnovljivih izvora energije, ne događaju često. U manjoj se mjeri analiziraju drugi relevantni tehnički aspekti, kao što su porast napona, zagušenje i obrnuti tokovi energije. Iako je ovaj pasivni pristup planiranju i upravljanju distribucijskim mrežama bio ekonomičan u prethodnim desetljećima, mogao bi predstavljati izazov za daljnje povećanje distribuirane proizvodnje i neuobičajenih opterećenja u budućnosti.

Operateri distribucijskih mreža pružiti će mogućnost proizvodnje do određenog kapaciteta u bilo kojem trenutku uz unaprijed definirani faktor snage, pod uvjetom da nema utjecaja na mrežu ili da je utjecaj minimalan. U suprotnom će biti potrebna plaćanja pojačanja mreže prema nacionalnim pravilima. To bi značilo da će svakim naknadnim priključenjem, kapacitet mreže za prihvatanje distribuirane proizvodnje biti manji te će doseći svoj limit vrlo brzo. Neki su operateri prihvatili neosigurane priključke gdje se proizvodnja automatski isključuje ako se prekrše ograničenja mreže i to po principu zadnji koji se priključio, prvi se isključuje. Iako ovakav način povećava kapacitet distribucijskih mreža za prihvatanje distribuiranih izvora, vrlo brzo može dosegnuti svoje granice ili zbog tehničkih ili zbog ekonomskih ograničenja.

S druge strane, priključenje kućnih distribuiranih elektrana, poput fotonaponskih panela ili mikrokogeneracijskih elektrana, regulira se prema drugačijim pravilima. Takvi izvori moraju udovoljavati minimalnim standardima i registrirati se za priključak kao dio, na primjer, programa za poticaj proizvodnje električne energije. Sukladno tome, operatori distribucijske mreže imaju malo ili uopće nemaju kontrole nad integracijom ovakvih vrsta priključaka. Zbog toga, njihovom masovnom integracijom, može doći do tehničkih problema na niskonaponskoj mreži.

Neki operateri distribucijske mreže ne mogu ulagati u postrojenja distribuirane proizvodnje srednjeg napona te moraju osigurati vlasnicima distribuirane proizvodnje ekonomska sredstva za priključak neovisno o tehnologiji i geografskom položaju. Kućni distribuirani izvori i nova opterećenja ne moraju tražiti priključak, već su samo obavezna pridržavati se propisanih standarda.

Kao posljedica navedenog, javljaju se nesigurnosti u odobrenjima za planiranje i financijske podrške za investicije u srednjenaponske distribuirane izvore, ali i nesigurnosti usvajanja kućnih distribuiranih izvora. Također, postavljaju se novi izazovi u pojačavanju sustava pred operatore sve sa ciljem olakšavanja prijelaza na niskougličnu proizvodnju. Sve navedeno rezultira planiranje priključenja distribuirane proizvodnje na način „postavi i zaboravi“.

## **8.2. Od pasivnih do aktivnih distribucijskih mreža**

Promjena pristupa projektiranju, planiranju i upravljanju kod distribucijskih mreža posljedica je povećane integracije distribuirane proizvodnje, rasta opterećenja, napretka tehnologije pohrane energije te povećanja očekivanja potrošača. Tim se problemima suočavaju distribucijske tvrtke, regulatorna tijela, proizvođači opreme, istraživačke institucije i konzultantske tvrtke za elektroinženjering. Koordinaciju tih resursa omogućio je razvoj informacijsko-komunikacijskih tehnologija.

Evoluciju distribucijskih mreža od pasivnih do aktivnih potiču tehnološki razvoj malih proizvodnih sustava, novi zahtjevi za sigurnost, kvalitetu i učinkovitost opskrbe električnom energijom i liberalizacija tržišta električne energije. Operateri distribucijskog sustava dobivaju mogućnost za kontrolu, upravljanje i integriranje distribuiranih izvora energije pod njihovom odgovornošću.

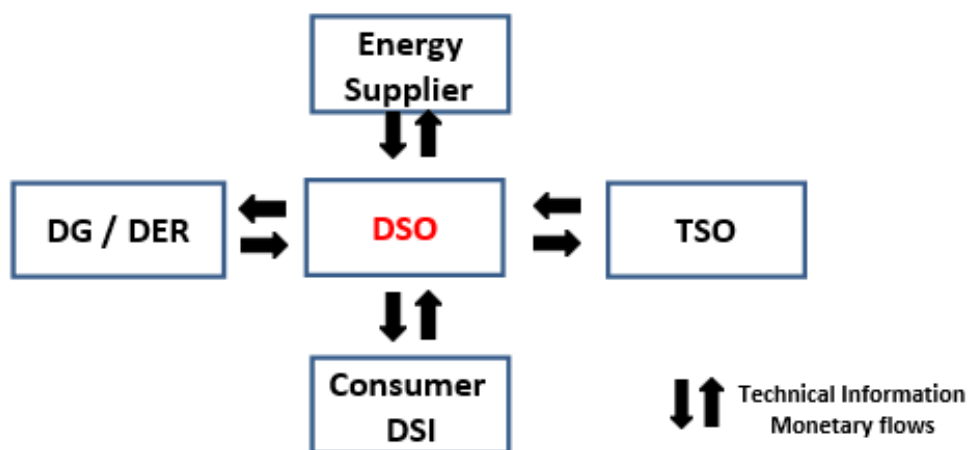
U dokumentu CIGRE WG C6.11 razvijena je zajednička globalna definicija aktivnih distribucijskih mreža koja glasi: "Aktivne distribucijske mreže imaju uspostavljene sustave za upravljanje kombinacijom distribuiranih izvora energije, koji se definiraju kao generatori, opterećenja i pohrane. Operateri distribucijskog sustava imaju mogućnost upravljanja protokom električne energije koristeći fleksibilnu topologiju mreže. Distribuirani izvori energije preuzimaju neku mjeru odgovornosti za podršku sustavu, što će ovisiti o prikladnom regulatornom okruženju i sporazumu o povezivanju." [16]

Distribucijske mreže postaju aktivni distribucijski sustavi uspostavljanjem sustava za upravljanje kombinacijom distribuiranih izvora.

### **8.2.1. Evolucija operatora distribucijskih mreža prema operatorima distribucijskih sustava**

Za sigurnu i kvalitetnu opskrbu električnom energijom brinu se operatori distribucijskih mreža te olakšavaju pristup novim potrošačima i sudionicima. Upravljanje distribucijskim mrežama do sad je bila ograničena na mrežne elemente, poput kondenzatorskih jedinica, regulatora napona, itd., međutim aktivne distribucijske mreže zahtijevaju i upravljanje sudionicima u mreži

(proizvođačima i potrošačima). S tim u vezi, potpuno uvođenje aktivnih distribucijskih mreža, koje su bolje promatrane i kontrolirane, dovodi do budućnosti u kojoj će operatori distribucijskih mreža upravljati mrežama na sličan način kao i operatori prijenosnih mreža te će postati operatori distribucijskih sustava. To može dovesti do razmjene informacija i financijskih tokova sa operatorima prijenosnog sustava, dobavljačima energije te potrošačima, što ilustrira slika 8.2.



Slika 8.2. Tehnički i financijski tokovi vezani uz operatora distribucijskog sustava [16]

Značenje stranih riječi sa slike 8.2.:

- Energy Supplier – Opskrbljivač energije
- DG/DER (Distributed Generation/Distributed Energy Resource) – Distribuirana proizvodnja/Distribuirani izvor energije
- DSO (Distribution System Operator) – Operator distribucijskog sustava
- TSO (Transmission System Operator) – Operator prijenosnog sustava
- Consumer - Kupac
- DSI (Demand Side Integration) – Integracija potražnje sa strane potrošača
- Technical Information – Tehničke informacije
- Monetary flows – Novčani tokovi

Zbog tih tokova informacija može doći do konkurentnosti električne energije kao i do promicanja uloge niskougličnih tehnologija uz istovremeno osiguravanje pouzdanog i sigurnog rada mreže. S razvijenijom upravljivom infrastrukturom, operatori distribucijskih sustava omogućiti će široku primjenu novih usluga, kao što su one koje pružaju agregatori potrošnje i proizvodnje, kako bi pomogli u upravljanju ne samo distribucijskim, već i prijenosnim mrežama te uravnoteženju

potrošnje i proizvodnje. Kako se razvijaju nove poslovne aktivnosti, proširuje se poslovni model te kako se transformira upravljanje mrežama od pasivnog prema aktivnom, operatori distribucijskih sustava mogu prevladati izazove koji proizlaze iz sve veće integracije distribuiranih izvora energije, poticajne regulacije, odvajanja poslovanja i reguliranih naknada za spajanje. No, regulacija bi trebala potaknuti konkurencijsko tržišno okruženje koje bi im omogućilo pristup raznolikom rasponu opcija i poticaja kako bi odabrali najefikasnije načine vođenja svojih poslovanja.

### **8.3. Izazovi kod novog načina planiranja**

Za planiranje aktivnih distribucijskih sustava i pametnih mreža općenito potrebno je razviti nove alate, međutim u razvoju se pojavljuje puno izazova koje treba riješiti. Za postavljanje općeg okvira koji je potreban modernim alatima odgovoreno je na sljedećih šest pitanja:

1. U kojoj mjeri trebaju biti modelirani operativni aspekti u planiranju?

Detaljni operativni aspekti se pokazuju nepotrebni za srednjoročne i dugoročne planove te mogu dovesti do vremenski zahtjevnih procesa. S druge strane, pojednostavljene analize ne donose koristi operativnih strategija u planirane studije. Zbog toga je potrebno provesti specifična istraživanja kojima bi se identificirale prednosti koje donosi detaljan model te njegovi učinci na metodologiju planiranja.

2. U kojoj su mjeri potrebni sofisticirani alati?

Paradigma pametne mreže, osim što razmatra integraciju više raspršenih izvora energije na distribucijskoj razini, omogućit će sudjelovanje potrošača u radu sustava. To zahtjeva aktivno upravljanje velikim brojem energetske resursa i elemenata mreže, što trenutni sustavi koje koriste operatori prijenosnih mreža ne mogu ponuditi. Biti će potrebno razviti metode planiranja koje će moći rješavati stvarne slučajeve velikih razmjera, ali je ipak ključno istražiti ulogu pojednostavljenih pristupa koji bi pružili prihvatljivija rješenja.

3. Kako se nositi sa nesigurnostima?

Budućnost nosi sve više nesigurnosti koje su posljedica promjena potražnje, proizvodnje, cijena, politike, itd., stoga determinističke modele na kojima se oslanjalo planiranje treba zamijeniti probabilističkim metodama za adekvatno razmatranje distribuiranih izvora energije kao i drugih izvora nesigurnosti. Probabilistički pristup povećava složenost zbog čega se moraju postaviti određeni preduvjeti da bi bio izvodljiv kod planiranja. Osim toga, nesigurnosti nisu povezane samo sa tehničkom stranom, već mogu nastati zbog potencijalnih političkih promjena i međuovisnosti s drugom infrastrukturom (npr. plinskom ili toplinskom). Donošenje odluka u uvjetima nesigurnosti donosi rizike koje je

potrebno eksplicitno obraditi alatima za planiranje omogućavajući objektivnost i transparentnost.

4. Kako se može informacijsko-komunikacijska tehnologija dugoročno planirati na ekonomičan način?

Integracija pametnih mreža zahtjeva dvosmjernu komunikacijsku infrastrukturu koja je puno zahtjevnija i fleksibilnija od sadašnje. Operateri distribucijskih sustava smatraju nedostatak iskustva, povećanje složenosti i upotrebu novih komunikacijskih sustava kao slabosti aktivnog distribucijskog sustava. Kako komunikacijska infrastruktura neće biti dodatak distribucijskoj mreži nego njezin bitan dio morati će se provoditi istovremeno analize i električnih i komunikacijskih sustava.

5. Kako postupati s velikom količinom podataka u aktivnim distribucijskim mrežama/pametnim mrežama?

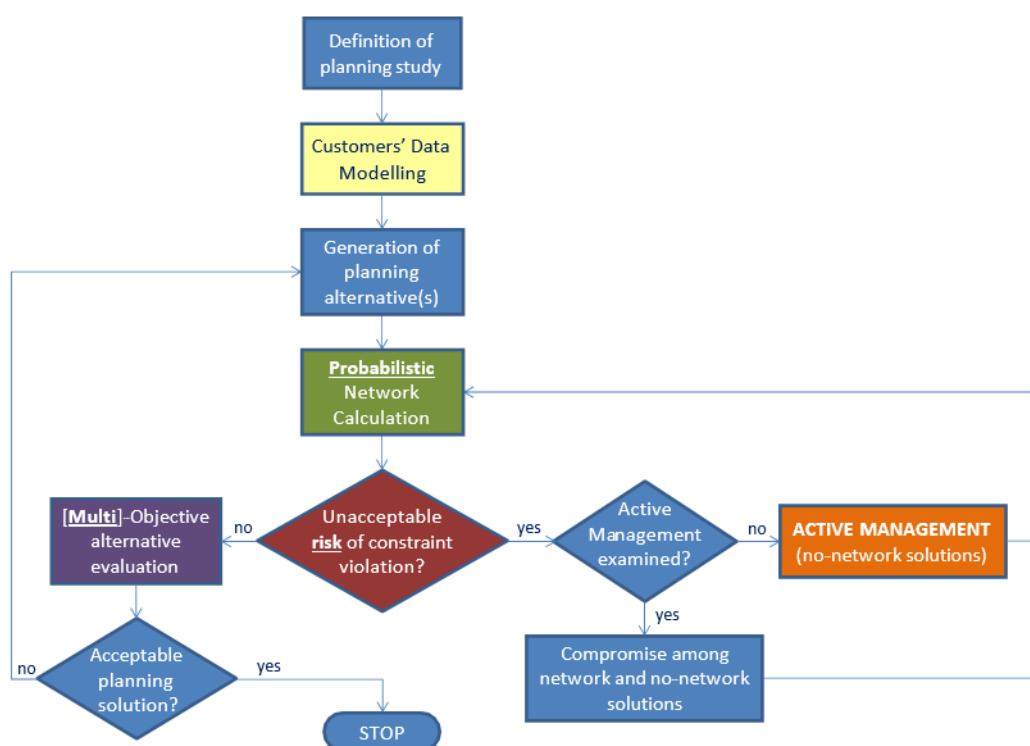
Za postizanje vizije pametne upravljive mreže, sustav mora biti vidljiv. Mjerni se uređaji mogu nazvati očima mreže koje neprestano prate stanje distribucijske mreže. Mjerni uređaji mogu djelovati kao sučelja između krajnjih korisnika i operatora distribucijskih sustava ili mogu slati informacije upravljivim uređajima pomoću kojih upravljaju mrežom. U slučaju rasta broja nadziranih točaka i parametara može doći do suočavanja s velikom količinom podataka predstavljajući izazov. To dovodi do potrebe za fleksibilnim i učinkovitim arhitekturama kontrole koje bi omogućavale ograničavanje toka informacija prema sustavu upravljanja distribucijom. To bi se napravilo modulima za agregiranje podataka za prikupljanje podataka s uređaja za nadzor, sortiralo bi se prema prioritetnim kriterijima, kombinirali bi se manje važni podaci i slali bi se bežičnim vezama do obližnjeg regionalnog podatkovnog centra. Agregator podataka također ima sposobnost primanja specifičnih kontrolnih signala od sustava upravljanja distribucijom za upravljanje dostupnim DER-ovima ili elementima mreže.

6. Kako ispravno procijeniti poslovni slučaj za aktivnu distribucijsku mrežu?

Pronalazak najekonomičnijeg rješenja je jedan od glavnih alata za planiranje. Budući aktivni distribucijski sustav ima nekoliko nepoznanica u pogledu troškova, a ova dva čimbenika su odgovorna za to: nedostatak jasnog regulatornog okruženja i nove razvijene tehnologije koje će se primijeniti. Trebalo bi razmotriti višestupanjske optimizacije za određivanje vremena za pojačanja mreže.

## 8.4. Opći okvir za planiranje aktivnih distribucijskih sustava

U ovom će poglavlju biti predstavljen opći okvir koji može poslužiti kao referentna shema za planiranje aktivnih distribucijskih sustava. Cilj tehnika i algoritama za optimizaciju distribucije je provoditi inteligentna i adekvatna istraživanja raspona rješenja kako bi se održala prihvatljiva računalna opterećenja bez narušavanja kvalitete rezultata. Međutim, za adekvatno zadovoljavanje alternativa aktivnih distribucijskih mreža trebaju se razmotriti probabilistički pristupi kako bi se uhvatilo nesigurno ponašanje proizvodnje i potrošnje. Usporedba, odnosno procjena alternativa bi se trebala temeljiti na jednom ili više ciljeva. Na slici 8.3. je prikazan opći okvir za planiranje predložen od strane brojnih autora i prihvaćen od strane međunarodnih organizacija, ali ga još operatori distribucijskih mreža nisu potpuno iskoristili.



Slika 8.3. Opća shema za planiranje aktivnih distribucijskih sustava [16]

Značenje stranih riječi sa slike 8.3.:

- Definition of planning study – Definicija planske studije
- Customers` Dana Modelling – Modeliranje podataka o kupcima
- Generation of planning alternatives – Generiranje planiranih alternativa
- Probabilistic Network Calculation – Probabilistički proračun mreže
- Unacceptable risk of constraint violation – Neprihvatljiv rizik od kršenja ograničenja
- (Multi)-Objective alternative evaluation – Višekriterijska alternativna procjena



- Acceptable planning solution – Prihvatljivo rješenje planiranja
- Active Management examined – Ispitano aktivno upravljanje
- Active Management (no-network solutions) – Aktivno upravljanje (rješenja bez mreže)
- Compromise among network and no-network solutions – Kompromis između rješenja s mrežom i bez mreže

Kod za planiranje distribucijske mreže temelji se na sljedećim koracima:

- a) Ulazni podaci (ekonomski, tehnički, financijski...)
- b) Priprema podataka distribucijskih mreža o potrošačima (generatori i opterećenja) kako bi se vidjele vremenski ovisne karakteristike
- c) Stvaranje niza mogućih alternativa za proširenje, razvoj i izgradnju
- d) Svaka alternativa mora biti tehnički valjana
- e) Procjena pojedine alternative prema specifičnom problemu s višekriterijskim pristupom
- f) Izbor najbolje alternative ili skupa najboljih opcija

### **8.5. Modeliranje podataka**

Među svim faktorima koji utječu na planiranje mreža temeljeno na potražnji i vremenu glavnih pojačanja, najosjetljivija je prognoza opterećenja jer pogrešne procjene mogu imati ozbiljne negativne posljedice. U slučaju pretjerane procjene može doći do preuranjenih investicija te do predimenzioniranja opreme, dok kod nedovoljne procjene može doći do smanjenja kvalitetne usluge zbog nepravodobnih nadogradnji. Adekvatno poznavanje profila opterećenja ključno je kod dva segmenta planiranja:

- Za identifikaciju uvjeta maksimalnog naprežanja – svako pojačanje mreže treba planirati tako da daljnje pojačanje ne bude potrebno unutar određenog broja godina
- Za određivanje gubitaka energije – na dimenzioniranje opreme mreže utječu gubici vršne snage, a godišnji gubici energije utječu na povećanje operativnih troškova operatora distribucijskih mreža

Opterećenje sustava može biti statistički izračunato ili se mogu uzimati u obzir postojeća opterećenja ili prognozirane vrijednosti jer nije točno poznat obrazac potražnje električne energije svakog korisnika.

Povećanjem decentralizirane proizvodnje operatori distribucijskih sustava moraju uzimati u obzir sve vrste povezane proizvodnje, čak i obnovljive izvore, zbog utjecaja na mrežu. Još je u planiranju prisutan deterministički pristup u kojem operatori uzimaju u obzir dva najgora scenarija: vršnu

potražnju uz odsustvo proizvodnje i minimalnu potražnju energije uz maksimalnu proizvodnju. Glavni nedostatak ovakvog pristupa je taj što je distribucijska mreža dizajnirana pretpostavljajući da će se ti najgori slučajevi sigurno dogoditi, iako za to postoji mala vjerojatnost.

U nastavku je prikazano modeliranje podataka za planiranje tradicionalne, trenutne i buduće distribucijske mreže.

#### Tradicionalna distribucijska mreža

- Dnevne krivulje opterećenja prikupljale su se radi klasifikacije različitih kategorija opterećenja i koristile za identifikaciju najgorih uvjeta – maksimalnu potražnju
- Konstantna/predvidljiva proizvodnja razmatrana je kao negativno opterećenje
- Nepredvidiva proizvodnja (OIE) uzimala se u obzir samo za procjenu tehničkih gubitaka

#### Trenutna distribucijska mreža

- Zbog veće integracije distribuiranih izvora, uzimaju se u obzir sve proizvodne tehnologije, ali se nesigurnosti obnovljivih izvora energije ne prikazuju.
- Definiraju se dva najnepovoljnija uvjeta:
  - Maksimalno opterećenje - bez proizvodnje
  - Minimalno opterećenje - maksimalna proizvodnja
- Gore navedeni uvjeti se smatraju sigurnim čak i ako su šanse za njihovo pojavljivanje jako male (posebno kod OIE)

#### Buduća distribucijska mreža

- Dnevne krivulje proizvodnje i dnevne krivulje opterećenja moraju biti jasno modelirane
- Prepoznavanje tipičnih uvjeta rada zajedno s njihovim relativnim vjerojatnostima pojavljivanja
- Važnost kronološkog predstavljanja

Za planiranje budućih aktivnih distribucijskih mreža ove pojednostavljene reprezentacije nisu prikladne. Za obuhvaćanje operativnih komponenti koje mogu utjecati na fazu planiranja, u proračunima moraju biti jasno prikazane vremenska varijabilnost proizvodnje i potražnje. Operaterima distribucijskih mreža pomoći će pametni mjerni uređaji u prikupljanju stvarnih profila opterećenja sa svakog čvora. Postavlja se pitanje koliki treba biti vremenski period za

prikupljanje podataka. Odgovor se temelji na svojstvima kontrolne strategije koja se analizira i kako ona utječe na rezultate planiranih studija.

Primjerice, kontrolni ciklus kojeg neki distribuirani izvori energije mogu dati sustavu obično zahtijeva vremenski raspon od nekoliko sekundi što ima zanemarive učinke u fazi planiranja. Analiza automatskih releja za kontrolu napona te drugih uređaja za regulaciju napona za cijelu distribucijsku mrežu može se provesti u različitim vremenskim rasponima. Što je veći vremenski raspon, to je mogućnost za hvatanjem nekih ekstremnih operativnih uvjeta veća. Zbog navedenih razloga, za prikaz profila opterećenja i proizvodnje te za analizu utjecaja operativnih strategija kod planiranja, koristi se vremenski korak od jednog sata.

## **8.6. Probabilistički izračuni**

Kao što je već spomenuto, brojne neizvjesnosti trenutnog i budućeg distribucijskog sustava ukazuju na potrebu upotrebljavanja probabilističkih modela za prikazivanje tipičnih podataka o planiranju i uvođenje koncepta rizika. Izračun mreže može se provesti pomoću specifičnih algoritama za probabilistički raspored opterećenja ili općeg pristupa Monte Carlo simulacije, ovisno o pretpostavljenim stohastičkim distribucijama. Ukoliko probabilistički podaci nisu poznati, scenariji se mogu izraditi na temelju znanja i iskustva. Rezultati izračuna su stohastička reprezentacija varijabli struja grana i varijabli napona čvorova. Tim se varijablama mogu provjeriti tehnička ograničenja s određenom sigurnošću. Primjerice, može se definirati prihvatljiva vrijednost preopterećenja  $i$ , pomoću probabilističke distribucije struje grane, može odrediti vrijednost struje koja ima vjerojatnost da će biti premašena. U slučaju da je ta vrijednost veća od termalnog ograničenja, potrebno je nadograditi odgovarajuću granu. Ako se pri planiranju uzme rizičnija opcija, nadogradnja se može izbjeći.

Probabilistički izračuni su ponekad kompleksni i zahtjevni, ali često nije ni jednostavno pravilno modelirati distribucijske sustave, posebno kada su prisutne jake povezanosti između stohastičkih varijabli i vanjskih povezanosti koje nameću operativni kontrolni centri ili tržište. Također, dodatna poteškoća za rješavanje problema probabilističkog opterećenja dolazi od nelinearnosti jednadžbi rasporeda opterećenja. Primjena metode Monte Carlo simulacije, uz korištenje mogućnosti paralelnog računanja, rješava problem s različitim funkcijama gustoće, složenim povezanostima i nelinearnim kombinacijama stohastičkih varijabli. Ipak, čak i uz paralelno računanje, ovaj detaljni pristup rezultira značajnim povećanjem vremena potrebnog za izračune, posebno u kontekstu planiranja gdje se izračunavanja moraju ponavljati više puta unutar procesa optimizacije (kako bi se oblikovala mreža ili dodijelili distribuirani izvori energije). Kako bi ovaj

problem bio upravljiv mogu se sugerirati neka pojednostavljena. Za početak može se prevladati nelinearnost jednadžbi protoka opterećenja odgovarajućom linearizacijom oko očekivane radne točke. Osim toga, u srednjenaponskim i niskonaponskim distribucijskim mrežama mogu se koristiti konstantne struje umjesto konstantne snage za prikaz opterećenja i proizvodnje. To je moguće zbog relativno kratkih vodova i malih padova napona. Takvim se načinom jednadžbe protoka opterećenja mogu napisati kao jednostavan skup jednadžbi i naponi čvorova mogu biti izračunati kao linearna kombinacija slučajnih varijabli. Druga vrsta aproksimacije pretpostavlja linearne povezanosti, ako postoje, između stohastičkih varijabli (opterećenja i proizvodnje). Takva je pretpostavka prihvatljiva kod opterećenja iste vrste i obnovljive proizvodnje jer su udaljenosti između postrojenja ograničene unutar iste distribucijske mreže, a atmosferski uvjeti slični. Čak i u slučajevima izostanka savršene povezanosti, i dalje je moguće modelirati ovim načinom sa dodavanjem druge nezavisne slučajne varijable s nultom srednjom vrijednosti te odgovarajućom standardnom devijacijom. Važna napomena je nemogućnost zanemarivanja ove povezanosti jer to može dovesti do pogrešnih rezultata kao i stvaranja funkcije gustoće izlaznih parametara koja je ili uža ili šira od originalne funkcije gustoće. Uz ova pojednostavljena problem i dalje ostaje složen jer različite funkcije gustoće vjerojatnosti zahtijevaju korištenje numeričkih tehnika konvolucije za dobivanje napona čvorova. Posljednje pojednostavljenje za prevladavanje ovih poteškoća je pretpostavka da su sve slučajne varijable normalno distribuirane, što bi značilo da su i naponi čvorova i struje grana normalno distribuirani te se njihove očekivane vrijednosti kao i standardne devijacije mogu lako izračunati jednostavnim analitičkim izrazima. Takvo je pojednostavljenje prihvatljivo za srednji napon jer potrošnja snage svake srednjenaponske i niskonaponske podstanice nastaje priključenjem više korisnika. Stoga se opterećenja u srednjenaponskom distribucijskom sustavu smatraju normalno distribuiranim. Taj se zaključak može primijeniti i na obnovljive izvore energije, a posebno na fotonaponske elektrane. Naime, oblaci često uzrokuju brze promjene izlaza fotonaponskih elektrana, no ove promjene su slabo međusobno povezane: električne veze kombiniraju različite izlaze pojedinih fotonaponskih panela unutar istih ili između različitih fotonaponskih elektrana, što rezultira značajnim smanjenjem varijabilnosti. Na vjetroelektrane mogu se primijeniti slična razmatranja, iako broj vjetroagregata koji čine vjetroelektranu na srednjem naponu nije velik. Zaključno, za srednjenaponski distribucijski sustav prihvatljiva hipoteza je da su sve slučajne varijable normalno distribuirane, za kratkoročno planiranje. Međutim, valjanost ove hipoteze za niskonaponske distribucijske sustave i za dugoročno planiranje treba biti dodatno istražena.

## 8.7. Višekriterijski pristup

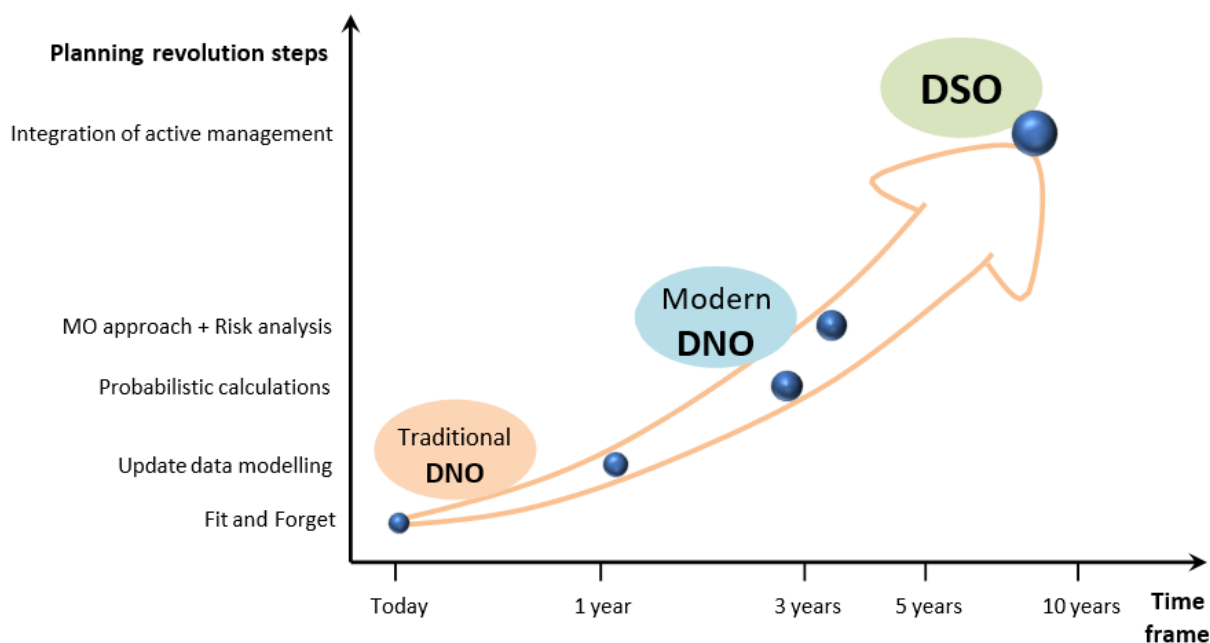
Za operatore distribucijskih sustava višekriterijski pristup je korisniji od tradicionalne jednostruke ciljne funkcije kojom se minimizirao ukupni trošak mreže. Utjecaj novih tehnologija i arhitektura kontrole koje zahtijeva aktivni distribucijski sustav ne može se opisati samo u smislu troškova, kao i zbog nedostatka jasnih pravila za aktivno upravljanje. Iz tih je razloga učinkovitije i lakše razdvojiti različite i nehomogene ciljne funkcije tako da se usporede poznati troškovi sa prednostima koje imaju rješenja aktivnih distribucijskih sustava. Nadalje, liberalizacija tržišta električne energije u potpunosti je promijenila tržište. Prekinut je monopol i omogućeno je trgovanje električnom energijom novim sudionicima kao što su regulator, koji zastupa interese društva i potiče integraciju obnovljivih izvora energije po razumnim troškovima, agregatori te vlasnici generatora koji žele povećati dobit od svojih investicija. Pronalazak kompromisnih rješenja za suprotne ciljeve ovih sudionika sustava i poteškoće u definiranju jedinstvene ciljne funkcije također zahtijeva višekriterijski pristup. Cilj rješavanja problema višekriterijske optimizacije je pronalaženje Pareto optimalnih rješenja te pronalaženje kompromisa kako bi se zadovoljili različiti ciljevi. Rješenje se smatra dijelom Pareto skupa ako nije moguće postići poboljšanje u jednom cilju bez negativnog utjecaja na druge ciljeve.

Postoje dvije glavne skupine metode višekriterijske optimizacije. Prva skupina koristi se tehnikom jednog cilja i a priori informacije. Identifikacija nekoliko rješenja Pareto skupa vrši se promjenom glavne ciljne funkcije. Takav postupak poznat je kao „klasični pristup“ i od korisnika zahtijeva da donese a priori odluku dodjeljivanjem preferencija razmatranim ciljevima. Ovaj pristup najčešće koristi metode  $\epsilon$ -ograničenja i ponderirane sume koje daju jedno rješenje minimalnog troška. Jedan cilj se optimizira, a ostali se smatraju ograničenjima. Drugim načinom se svi ciljevi objedinjuju u jednu ciljnu funkciju koja se optimizira. Za definiranje odgovarajućih glavnih ciljeva, razina ograničenja ili metoda objedinjavanja i ponderiranja potrebno je jako dobro poznavanje problema. Nedostatak klasičnog pristupa je potreba za donošenjem a priori odluka jer su u nekim slučajevima previše ovisne o gledištu onoga tko ih donosi. Druga skupina se temelji na evolucijskim algoritmima koji istovremeno upravljaju nizom mogućih rješenja te omogućavaju pronalaženje nekoliko rješenja iz Pareto skupa odjednom.

Jedna od prednosti višekriterijskog programiranja je ujedno i njegova slabost, a to je pružanje više od jednog rješenja što može dovesti do subjektivne interpretacije rješenja onoga tko je zadužen za planiranje. Zbog toga se ovaj pristup mora kombinirati sa alatima za analizu rizika.

## 8.8. Koraci uvođenja novih alata za planiranje

Transformaciju postupka planiranja distribucijskih mreža potrebno je provesti postepeno, uvodeći jednu po jednu promjenu, kako bi se olakšala prihvaćenost i usvajanje drastičnih promjena, što je prikazano na slici 8.4. Također, svaka nova ideja u procesu planiranja trebala bi biti potkrijepljena posebnim poslovnim argumentima koji dokazuju njene prednosti u odnosu na tradicionalni pristup.



Slika 8.4. Planiranje postupne revolucije alata za planiranje distribucijskih mreža [16]

Značenje stranih riječi sa slike 8.4.:

- Planning revolution steps – Koraci revolucije planiranja
- Time frame – Vremenski okvir
- Integration of active management – Integracija aktivnog upravljanja
- MO approach + Risk analysis – Višekriterijski pristup + analiza rizika
- Probabilistic calculation – Probabilistički izračuni
- Update data modelling – Ažuriranje modeliranja podataka
- Fit and forget – Postavi i zaboravi
- Today – Danas
- 1 year – 1 godina
- 3, 5, 10 years – 3, 5, 10 godina
- Traditional DNO (Distribution Network Operator) – Tradicionalni operator distribucijske mreže
- Modern DNO (Distribution Network Operator) – Moderni operator distribucijske mreže

- DSO (Distribution System Operator) – Operator distribucijskog sustava

Koraci koji bi trebali biti poduzeti za prikazanu revoluciju u planiranju su sljedeći:

1. Ažuriranje modeliranja podataka – Za početak bi se trebala provesti kritička analiza i ažuriranje modela opterećenja koje koriste komunalni servisi, a koji se temelje na mjerenjima od prije nekoliko desetljeća. Uzimajući u obzir stvarna mjerenja korisnika i klasificirajući različite uvjete rada, postoji mogućnost izravnog primjenjivanja tradicionalnih alata planiranja na te uvjete. Opisano je moguće provesti čim mjerenja postanu dostupna ili u roku od jedne do dvije godine.
2. Probabilistički izračuni – Drugi korak je složeniji od prethodnog jer je potrebno suočavanje s nesigurnostima proizvodnje iz obnovljivih izvora energije i ponašanja novih opterećenja, poput električnih automobila. Komunalni servisi trebaju pristupiti problemu planiranja sa probabilističkim izračunima mreže, umjesto dosad korištenih determinističkih izračuna te moraju uzeti u obzir rizike od kršenja ograničenja. Čak i u slučaju razmatranja samo rješenja pojačanja mreže, ovakvim pristupom omogućiti će se gledanje obnovljivih izvora energije kao resurs, a ne kao problem. Ovaj se korak može provesti u roku od najmanje tri godine.
3. Višekriterijska optimizacija i analiza rizika – Ovaj korak nije ovisan o prethodnom koraku jer nije povezan sa načinom izračuna mreže pa se može primijeniti i prije drugog koraka. U ovoj su fazi i dalje važne nesigurnosti distribuirane proizvodnje. Nadalje, zbog potrebe operatora distribucijske mreže da izabere jednu alternativu planiranja iz skupa optimalnih rješenja (Pareto seta), višekriterijski pristup se uvijek kombinira s metodama analize rizika.
4. Integracija aktivnog upravljanja – Istovremeno s koracima navedenima ranije, bit će provedena istraživanja i pilot projekti usmjereni na implementaciju aktivnih distribucijskih sustava, s očekivanjem da će potvrditi prednosti takvog razvoja distribucijskog sustava. U međuvremenu nacionalne vlasti će imati vremena za definiranje odgovarajućeg regulatornog okruženja za učinkovitu implementaciju aktivnog distribucijskog sustava. Sukladno tome, za pet do deset godina operatori distribucijskih mreža dobiti će novi status operatora distribucijskih sustava.

Navedeni vremenski okvir ovisi o uvjetima svakog komunalnog servisa. Dok su neki komunalni servisi već implementirali ili planiraju uskoro implementirati pametne mjerne sustave i već se suočavaju s operativnim problemima koje donose obnovljivi izvori energije, nekim komunalnim servisima će trebati duži vremenski period zbog niskog udjela distribuiranih izvora i odsutnošću naprednih sustava mjerenja.

## 8.9. Implementacija aktivne distribucijske mreže

Elektroenergetski sustav se upravlja dvama postupcima: kontinuiranim radnjama koje se primjenjuju tijekom redovnog rada mreže kako bi se očuvala unaprijed definirana kvaliteta usluge i poboljšala učinkovitost sustava te radnjama koje se povremeno izvršavaju za zadovoljenje ograničenja kod normalnih i n-1 nepredviđenih situacija. Glavne strategije upravljanja aktivnom mrežom razvrstane prema navedenim radnjama:

### Kontinuirane radnje

1. Upravljanje frekvencijom
2. Upravljanje naponom (za ograničavanje odstupanja napona)
3. Upravljanje protokom snage radi smanjenja gubitaka energije (prilagodba mreže u stvarnom vremenu, niveliranje opterećenja...)
4. Reaktivna podrška za visokonaponsku mrežu

Točka 2 minimalno utječe na planiranje aktivnih distribucijskih sustava, dok točka 3 utječe na OPEX (troškovi za svakodnevno vođenje sustava). Na dimenzioniranje i lokaciju distribuiranih izvora utjecaj ima 4. točka.

### Povremene preventivne radnje

1. Ograničenje proizvodnje
2. Koordinirano aktivno i reaktivno slanje distribuiranih izvora
3. Upravljanje potražnjom
4. Dinamično ocjenjivanje vodiča
5. Rekonfiguracija mreže u stvarnom vremenu
6. Namjerno prebacivanje u otočni rad
7. Inovativna i koordinirana zaštita sustava

Prvih pet točaka kod planiranja ima utjecaj na CAPEX (kapitalne troškove) za nadogradnju zbog izravne kontrole proizvodnje i/ili potrošnje energije ili privremenog oslobađanja tehničkih ograničenja. Većina investicija za nadogradnju proizlaze iz sigurnosnog n-1 kriterija. Zadnje dvije točke imaju utjecaj na pouzdanost mreže.

Kod integracije operacija u planiranje aktivnih distribucijskih mreža za početak treba identificirati opcije koje imaju stvarni utjecaj na analize planiranja. Upravljanja naponom i frekvencijom imaju malu vremensku konstantu, stoga zahtijevaju malo vrijeme za prikaz opterećenja i proizvodnje i



često imaju jako malu, gotovo nikakvu, potrošnju energije pa ne utječu na promjene očekivanih vrijednosti napona u čvorovima i struja u granama. S druge strane, upravljanje protokom snage jako utječe na učinkovitost mreže, zbog gubitaka, što ga čini osnovnim dijelom operativnih troškova distribucijske mreže. Važna usluga aktivnih distribucijskih mreža prema prijenosnim mrežama biti će njihova reaktivna podrška jer tako distribucijski sustavi prelaze iz čistih potrošača energije u sudionike.

Dvije opcije koje se trebaju razmatrati odvojeno od proračuna mreže tijekom analize pouzdanosti rješenja planiranja su namjerno prebacivanje u otočni rad i implementacija inovativnih zaštitnih sustava. To je zato što imaju veliki utjecaj na OPEX svojim sposobnostima za poboljšanje kontinuiteta opskrbe i indeksa pouzdanosti korisnika.

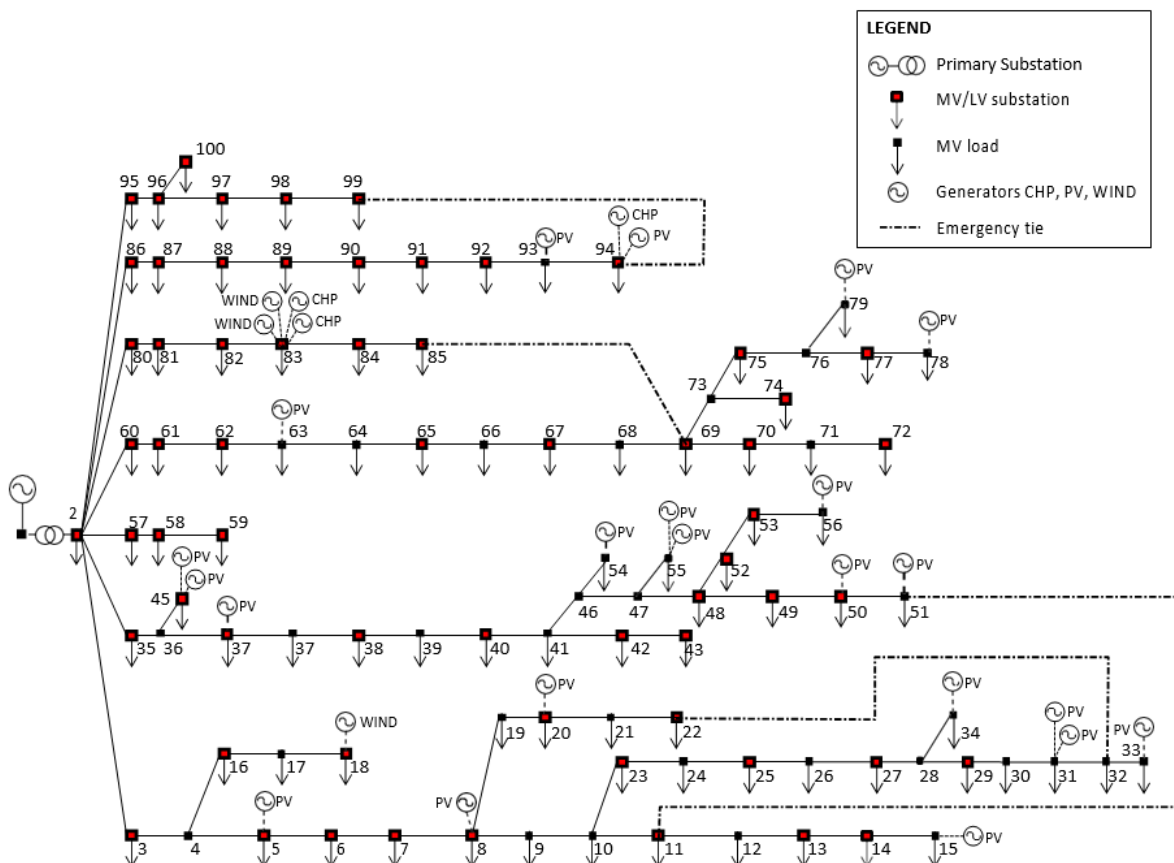
Izrađivanje dijagrama tijekom tehničke procjene svakog rješenja planiranja moguće je koristeći prikaz podataka putem dnevnih profila u kombinaciji sa gore navedenim razmatranjima. Rješenje planiranja mreže predviđa predodređene veličine tako da se koriste postojeći ili minimalno dopušteni poprečni presjeci. Nakon toga, za svaki vremenski interval i konfiguraciju mreže, identificiraju se sve struje u čvorovima iz ulaznih podataka. U slučaju razmatranja operativnih radnji za aktivno upravljanje tokovima struje moraju se integrirati u ovom trenutku za izmjenu poznatih varijabli probabilističkog toka opterećenja. Očekivane vrijednosti i standardne devijacije napona čvorova i graničnih tokova struje trebaju biti identificirane stohastičkim izračunima mreže jer te vrijednosti služe za provjeru rizika od kršenja ograničenja. Ako se pojave nepredviđene situacije, postupak pokušava riješiti početno operativnim opcijama ili nadogradnjom mreže. Kontrola energetske resursa, koju zahtijeva aktivno upravljanje mrežom, klasičan je problem optimalnog upravljanja energijom. Taj problem je pojednostavljen i riješen tehnikama linearnog programiranja kako bi se smanjilo računalno opterećenje. Izlazi opisanog postupka, koji će se koristiti za procjenjivanje pogodnih planiranih rješenja, su:

- Poboljšanja mreže koja određuju kapitalne troškove
- Očekivane vrijednosti strujnih grana koje se koriste za procjenu gubitaka energije
- Statistike intervencija aktivnog upravljanja koje su potrebne za procjenu operativnih troškova aktivnih distribucijskih mreža

## **8.10. Analiza slučaja**

Za kraj je prikazan jedan slučaj planiranja distribucijskog sustava usmjeren na usporedbu različitih alternativa koje uključuju tradicionalno pojačavanje mreže i novo aktivno upravljanje sustavom. Alat koji je korišten za analizu razvijen je na Sveučilištu u Cagliari i uključuje sve korake koji su

prethodno opisani u potpoglavlju 8.8. Razmatrana distribucijska mreža preuzeta je iz baze podataka talijanskog projekta ATLANTIDE čiji akronim predstavlja „digitalni arhiv nacionalnih referentnih električnih distribucijskih mreža“. Mreža, prikazana na slici 8.5., izvedena je iz stvarnih talijanskih distribucijskih sustava i predstavlja talijansko industrijsko okruženje.



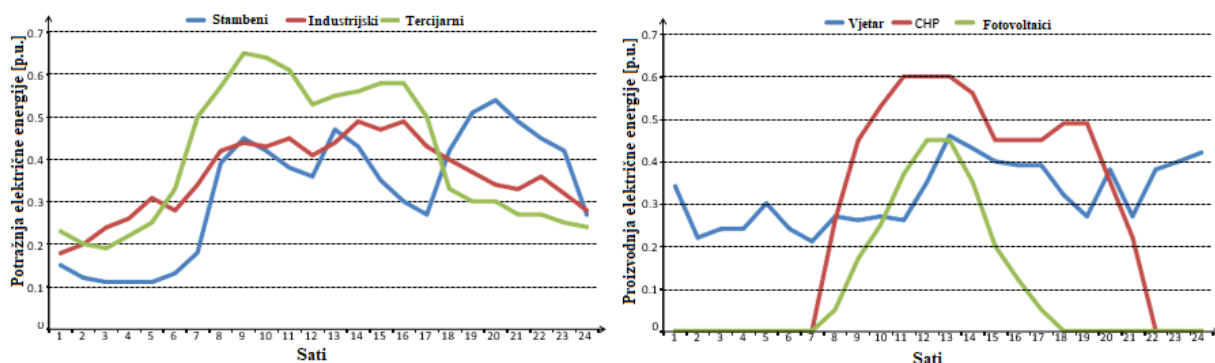
Slika 8.5. Distribucijska mreža u industrijskom okruženju iz projekta ATLANTIDE [16]

Značenje stranih pojmova sa slike 8.5.:

- Primary substation – Primarna podstanica
- MV/LV Substation – SN/NN podstanica
- MV Load – opterećenje na srednjem naponu
- Generators CHP, PV, WIND – Proizvodnja kogeneracije, fotonaponskog sustava, vjetra
- Emergency tie – rezervna grana za hitne slučajeve prekida napajanja

Distribucijska mreža sa slike 8.5. sastoji se od 7 glavnih vodova koji povezuju 99 sekundarnih podstanica koje su opskrbljene energijom iz jedne glavne VN/SN podstanice. Ukupna potražnja potrošača koji su podijeljeni u 3 kategorije (stambeni, industrijski i tercijarni) je 29,7 MW. Glavni vodovi su uglavnom podzemni kabeli umjerene duljine sa srednjim presjecima. U mrežu su

implementirani distribuirani izvori, konkretno 3 vjetroelektrane, 22 fotonaponske elektrane i 3 kogeneracijska postrojenja, ukupne instalirane snage od 33,8 MW. Dnevni profili opterećenja i proizvodnje takve distribucijske mreže prikazani su na grafovima na slici 8.6.



Slika 8.6. Dnevni profili potrošača (opterećenje i proizvodnja) [16]

Izazvani ovim profilima, postojeći generatori mogu proizvoditi više električne energije nego što je potrebno tijekom glavnog dijela dana, što rezultira situacijama obrnutog toka u glavnoj podstanici s preopterećenjem i prenaponima u raznim dijelovima mreže.

Analiza slučaja sastoji se od dugoročnog planiranja za pronalaženje optimalnog proširenja sustava u idućih 20 godina. Tijekom analize uzimao se u obzir prirodni rast opterećenja i integracija nekoliko novih distribuiranih izvora. Planirani scenariji, koji je u projektu Atlantide nazvan kao Business-As-Usual (BAU), odnosno uobičajeno poslovanje, temeljen je na sljedećim pretpostavkama:

- Nema značajnih promjena u trenutnim političkim mjerama, primjerice nema promjena kod poticaja za obnovljive izvore energije
- Trend proizvodnje i potražnje se nastavlja bez prekida

U tablici 8.3. prikazane su godišnje stope rasta koje su korištene u analizi, kao i svi glavni parametri promatranog slučaja. U analizi se uzima u obzir povećanje potražnje potrošača iz godine u godinu, dok generatori ne mijenjaju svoju nominalnu snagu tijekom svog životnog vijeka. Zbog toga su godišnje stope rasta koje su dodijeljene generatorima pretvorene u pojave novih postrojenja u određenim čvorovima mreže i u određenim godinama tijekom planiranog razdoblja. Pretpostavlja se povezivanje 17 novih generatora, od kojih su 4 vjetroelektrane, 10 fotonaponskih elektrana i 3 kogeneracijska postrojenja, u prvih 10 godina s ukupnom nominalnom snagom od 37,8 MW. Do kraja planiranog razdoblja pretpostavlja se još povezivanje 14 dodatnih generatora i to 8 fotonaponskih, 3 kogeneracijska postrojenja i 3 vjetroelektrane ukupne snage 29,2 MW.

Tablica 8.3. Glavni parametri korišteni u izračunima [16]

Parametri			Vrijednosti
Planirani period			20 godina
Godišnje stope rasta	Opterećenja	Stambena	1.2 %
		Industrijska	0.7 %
		Tercijarna	2.0 %
	Proizvodnja	Vjetar	3.9 %
		Kogeneracija	2.2 %
		Fotovoltaici	10.0 %
Jedinični trošak	Gubici energije		0.2 €/kWh
	Neisporučena energija		5.0 €/kWh
Financijske stope	Interes		8.0 %
	Inflacija		1.0 %
Operativne granice	Napon	Normalni radni uvjeti	±5 %
		Poremećeni radni uvjeti	±10 %
	Preopterećenje	Normalni radni uvjeti	0 %
		Poremećeni radni uvjeti	+10 %
Prihvatljivi rizici kršenja operativnih ograničenja	Napon	Normalni radni uvjeti	5 %
		Poremećeni radni uvjeti	5 %
	Preopterećenje	Normalni radni uvjeti	/
		Poremećeni radni uvjeti	10 %

Rješenja bez mreže odnose se samo na upravljanje aktivnom snagom generatora jer ovakve vrste mreža nemaju značajne probleme s naponom, a regulacija napona i reaktivne snage nije dovoljno učinkovita za rješavanje problema preopterećenja. Za kogeneracijska postrojenja, u obzir su uzeti toplinsko opterećenje industrijskih potrošača za ispravno modeliranje proizvodnje električne

energije, mogućnost postojanja toplinskog skladištenja u industrijskim instalacijama te utjecaj instalacije skladištenja električne energije kao rješenja planiranja.

Prema mogućim rješenjima, strategije planiranja koje su analizirane su sljedeće:

1. Tradicionalno planiranje – pasivno upravljanje te rad u radijalnoj konfiguraciji mreže
2. Aktivno upravljanje koje je ograničeno smanjenjem proizvodnje distribuiranih izvora, isključujući kogeneracijska postrojenja
3. Aktivno upravljanje koje je ograničeno na smanjenje proizvodnje svih distribuiranih izvora, uključujući kogeneracijska postrojenja
4. Aktivno upravljanje sa skladištenjem električne energije bez kontrole distribuiranih izvora
5. Mrežni rad bez kontrole distribuiranih izvora

Alternative planiranja su uspoređene na temelju ukupnih troškova mreže, koji se sastoje od tri faktora: kapitalnih troškova (CAPEX) nadogradnje postojećih komponenata mreže (transformatora, vodova, prekidača, itd.) ili instalacije novih, gubitaka energije i neisporučene energije unutar unaprijed postavljenih granica kontinuiteta isporuke. Korišteni alat može obraditi ova tri faktora odvojeno, ali radi jednostavnosti analize posljednja dva faktora su spojena s unaprijed određenim koeficijentima troškova. Izračun CAPEX-a napravljen je pomoću jednadžbe 8.1.

$$C_{inv} = \sum_{j=1}^{Nel} C_{0j} = \sum_{j=1}^{Nel} (B_{0j} + M_{0j} - R_{0j}) \quad (8.1)$$

gdje je:

$C_{inv}$  kapitalni troškovi

$Nel$  broj nove ili nadograđene opreme u mreži

$C_{0j}$  neto sadašnja vrijednost troška j-te komponente

$B_{0j}$  trošak izgradnje

$M_{0j}$  trošak održavanja

$R_{0j}$  preostala vrijednost aktualizirana na početku planiranog razdoblja odgovarajućim financijskim jednadžbama ovisnim o kamatnim stopama i stopama inflacije

U izračunu su, zbog jednostavnosti, pretpostavljene konstantne stope kroz cijelo planirano razdoblje. Nakon provedenog izračuna CAPEX tradicionalnog planiranja i aktivnog upravljanja bez kogeneracijskih postrojenja iznosi 10,3 M€, a ukupni troškovi mreže 14 M€. CAPEX aktivnog upravljanja uključujući kogeneracijska postrojenja je 8,3 M€, a ukupni troškovi mreže su 11,9 M€.

Četvrta strategija ima CAPEX od 7,5 M€, dok ukupni troškovi mreže iznose 11,1 M€. Zadnja strategija ima najmanji CAPEX od 5 M€ te također najmanje ukupne troškove mreže od 8,5 M€.

Tradicionalnim alternativama planiranja potrebno je izgraditi 25 kilometara novih podzemnih kabela poprečnog presjeka 240 mm<sup>2</sup> zbog visokih preopterećenja koja su uzrokovana velikom proizvodnjom. Neki od tih vodova bili bi korišteni za povezivanje generatora s glavnom podstanicom, a drugi bi prekinuli postojeće vodove i smanjili njihovu duljinu. Bila bi potrebna i obnova nekoliko postojećih vodova koristeći najveći dostupni poprečni presjek za podzemne kabele 240 mm<sup>2</sup>, a za nadzemne vodove 150 mm<sup>2</sup>.

Primjena smanjenja proizvodnje na vjetroelektrane i fotonaponske elektrane, bez kogeneracije, nije dovoljna za ograničavanje investicija u mrežu jer proizvodnja iz kogeneracije i dalje uzrokuje preopterećenja. Isključivo primjenom termalnog skladištenja, koje oslobađa električnu proizvodnju od ovisnosti o termalnim potrebama, omogućuje prilagodbu aktivne snage proizvodnje iz kogeneracije i smanjenje investicija u mrežu s ukupnom uštedom od 19% u odnosu na tradicionalno planiranje. Temeljita analiza statistike aktivnog upravljanja pokazuje da je kontrola generatora potrebna rijetko i samo tijekom dnevnih sati, u slučaju planiranog održavanja ili popravka kvara.

Implementacija skladištenja električne energije može dovesti do dodatnih smanjenja investicija s ukupnom uštedom od 27%. To je omogućeno pametnim oblikovanjem opterećenja kojim se ograničavaju negativni učinci intenzivne proizvodnje tijekom dana.

Najuspješniji rezultat postignut je primjenom mrežnog načina rada mreže, pri čemu je bilo potrebno izgraditi samo nekoliko novih vodova, a nije bilo potrebe za nadogradnjom postojećih vodova. Trebalo je u ovom scenariju, također, uzeti u obzir investiciju za preuređenje sustava zaštite, što već stoji u planovima mnogih distribucijskih poduzeća u budućnosti.

## 9. ZAKLJUČAK

Prijelaz proizvodnje električne energije sa fosilnih goriva na obnovljive izvore energije donosi mnoge probleme i pitanja, i u planiranju i u radu, na koja se još uvijek traže optimalni odgovori i rješenja. Cilj prijelaza je očuvanje okoliša, očuvanje zdravlja ljudi i bolja kvaliteta života, ali i energetska efikasnost. Distribuirani izvori ne moraju nužno biti obnovljivi izvori energije, ali uglavnom jesu. Stoga, nepredvidivost napajanja iz distribuirane proizvodnje temeljene na obnovljivim izvorima energije može rezultirati problemima balansiranja i povećanom potrebom za fleksibilnošću u elektroenergetskim sustavima. Distribuirana proizvodnja koja je smještena blizu opterećenja može smanjiti protok energije u prijenosnim i distribucijskim mrežama čime se mogu smanjiti gubici i potencijalno zamijeniti ugradnju novih resursa mreža. Također, proizvodnja blizu potražnje može povećati kvalitetu usluge krajnjim korisnicima. Pojačanje mreže i njezina moguća ponovna konfiguracija mogu riješiti mnoge izazove koji proizlaze iz integracije distribuiranih izvora energije, a to je neizbježno povezano s višim troškovima ulaganja. Posljednjih godina analizirane su i testirane nove tehnologije kako bi se olakšalo odstupanje od tehničkih ograničenja zbog integracije obnovljivih izvora energije. Upravljanje potražnjom nudi mogućnost rješavanja odstupanja od naponskih i toplinskih granica, koje proizlaze iz integracije obnovljivih izvora energije, prilagođavanjem opterećenja, u suradnji s kupcima na mreži. Prednosti upravljanja potražnjom ovise o odnosu između kapaciteta distribuiranih izvora energije i opterećenja, te karakteristika opterećenja i zahtjeva korisnika na mreži.

Distribucijske mreže prelaze iz pasivnih u aktivne tako da se kontrola distribuira, a protok energije je dvosmjernan. Takvim se tipom mreže olakšava integracija distribuiranih izvora, obnovljivih izvora energije, integracija potražnje na strani potrošača i tehnologija za pohranu energije. Stvaraju se prilike za nove vrste usluga i opreme, koje moraju biti usklađene sa zajedničkim standardima i protokolima. Osnovna funkcija aktivnih distribucijskih mreža je učinkovito povezati proizvodnju energije s potražnjom krajnjih korisnika tako da se omogući objema stranama odlučivanje o najboljem djelovanju u stvarnom vremenu. Za procjenu protoka energije, kontrolu napona i zaštitu zahtijevaju se tehnologije koje imaju konkurentne cijene i nove komunikacijske sustave s informacijsko-komunikacijskom tehnologijom koja ima sve veću ulogu u elektroenergetskom sektoru.

## LITERATURA

- [1] Working group: „Coping with Limits for Very High Penetrations of Renewable Energy“, veljača, 2013.
- [2] Komen Vitomir, Radošević Vedran: „Utjecaj distribuirane proizvodnje na gubitke u distribucijskoj mreži“, Šibenik, lipanj 2021.
- [3] Franković Dubravko: „Korištenje obnovljivih izvora energije: Vjetroelektrane“, predavanje, 2022.
- [4] HOPS, Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o. : “Izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana“, <https://www.hops.hr/page-file/suCWGUjtl6Xxgyzm3zTVB/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20-%20Mjese%C4%8Dni%20izvje%C5%A1taj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%20Prosinac%20%202022.pdf>, preuzeto s Interneta 28.01.2023.
- [5] Franković Dubravko: „Korištenje obnovljivih izvora energije: Fotonaponske elektrane“, predavanje, 2022.
- [6] Franković Dubravko: „Hidroelektrane“, predavanje, 2022.
- [7] HEP, Hrvatska elektroprivreda: <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/1528>, preuzeto s Interneta 29.01.2023.
- [8] S Interneta: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana>, pristup stranici 29.01.2023.
- [9] Mrežna pravila distribucijskog sustava, Narodne novine 68/18
- [10] Karavidović Damir: „Distribucijska mreža i distribuirani izvori zajedno u paralelnom i otočnom pogonu“, Umag, svibanj 2010.
- [11] Working group: „Asset management for distribution networks with high penetration of distributed energy resources“, svibanj, 2018.
- [12] HEP, Hrvatska elektroprivreda: „Desetogodišnji (2022.-2031.) plan razvoja distribucijske mreže HEP ODS-a“, Zagreb, rujan 2021.
- [13] S Interneta: <https://www.koer.com/blog/sto-je-virtualna-elektrana>, pristup stranici 31.01.2023.



- [14] Udovičić Božo: „Elektroenergetski sustav“, Zagreb, 2005.
- [15] S Interneta:  
<https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20180305STO99003/smanjenje-emisija-ugljicnih-plinova-ciljevi-i-mjere-eu-a>, pristup stranici 25.05.2023.
- [15] Working group: „Asset management for distribution networks with high penetration of distributed energy resources“, svibanj 2018.
- [16] Working group: „Planning and Optimization Methods for Active Distribution Systems“, kolovoz 2014.
- [17] Losi Arturo, Mancarella Pierluigi, Vicino Antonio: „Integration of Demand Response into the Electricity Chain“, Velika Britanija, 2015.
- [18] Hatziargyriou Nikos: „Microgrids: Architectures and control“, 2014.
- [19] Du Pengwei, Lu Ning: „Energy Storage for Smart Grids: Planning and Operation for Renewable and Variable Energy Resources (VERs)“, 2015.
- [20] Đurić Igor, Škare Javor, Marijanić Tanja: „Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži“, Opatija, svibanj 2018.

## SAŽETAK

U radu je obrađena problematika planiranja pogona distribucijskih mreža sa velikim udjelom distribuiranih izvora. Prikazani su i opisani distribuirani izvori prisutni u Hrvatskoj, razlozi za uvođenje distribuirane proizvodnje te tehnički zahtjevi za njihovo priključenje na mrežu. Prikazan je prijelaz iz pasivne u aktivnu distribucijsku mrežu, integracija aktivne distribucijske mreže i usporedba pasivnih i aktivnih distribucijskih mreža. Opisane su strategije upravljanja imovinom i održavanja imovine te izazovi za upravitelja imovine. Dan je pregled spremnika električne energije, pregled načina punjenja električnih automobila, način njihove integracije u mrežu, kao i njihov utjecaj na kvalitetu električne energije. Navedene su i obrađene strategije rada distribucijske mreže sa integriranim distribuiranim izvorima koje uključuju upravljanje potražnjom, mikromreže i virtualne elektrane te metode planiranja takvih mreža. Analizirane su prednosti upravljanja potražnjom, mikromreže i virtualne elektrane u kontekstu aktivne distribucijske mreže. U zadnjem poglavlju rada opisano je tradicionalno planiranje te su prikazani razlozi neadekvatnosti istog, prikazan je opći okvir za planiranje aktivnih distribucijskih sustava te koraci za njegovo uvođenje. Za kraj je dana analiza jednog slučaja novog načina planiranja.

**KLJUČNE RIJEČI:** distribuirani izvori, distribuirana proizvodnja, obnovljivi izvori energije, aktivna distribucijska mreža, planiranje, upravljanje imovinom, operator distribucijske mreže, pohrana električne energije, upravljanje potražnjom, mikromreže, virtualne elektrane

## **ABSTRACT**

This paper deals with the problem of planning operations in distribution networks with a high penetration of distributed energy sources. It presents and describes the distributed energy sources present in Croatia, the reasons for introducing distributed generation, and the technical requirements for their connection to the grid. The transition from passive to active distribution networks is illustrated, along with the integration of active distribution networks and a comparison between passive and active distribution networks. Asset management and asset maintenance strategies are described, along with the challenges faced by asset managers. An overview of energy storage systems is provided, as well as a review of electric vehicle charging methods, their integration into the grid, and their impact on power quality. Strategies for operating distribution networks with integrated distributed sources, including demand response, microgrids, and virtual power plants, are discussed and analyzed. The advantages of demand response, microgrids, and virtual power plants in the context of active distribution networks are examined. The final section of the paper describes traditional planning and highlights the reasons for its inadequacy, presents a general framework for planning active distribution systems, and outlines the steps for its implementation. Finally, a case study of a new planning approach is presented.

**KEY WORDS:** distributed energy sources, distributed generation, renewable energy sources, active distribution network, planning, asset management, distributed network operator, energy storage, demand response, microgrids, virtual power plants