

POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Španjol, Ella

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:471367>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Rijeka, rujan 2024.

Ella Španjol

0069080888

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2024.

Ella Španjol

0069080888

IZJAVA

Sukladno Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradila ovaj diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 20.03.2024. godine.

Rijeka, 03. rujna 2024.

Handwritten signature of Ella Španjol in black ink, written over a horizontal line.

Ella Španjol

0069080888

Ovom prilikom željela bih se zahvaliti mojim roditeljima, obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška svih ovih godina studiranja. Posebno se želim zahvaliti profesoru i mentoru Vitomiru Komenu koji mi je svojim znanjem, strpljivošću, nesebičnim pomaganjem i savjetima pomogao u pisanju diplomskog rada. Veliko hvala mojoj obitelji na neizmjerne podršci i ljubavi, a najveće hvala mami i tati. Uvijek ste vjerovali u mene i bili moj najveći oslonac, bez vaše podrške i vjere ne bih postigla ovo što jesam. Tata, nadam se da vidiš i da si ponosan!

SADRŽAJ

1. UVOD	4
2. NAPREDNI DISTRIBUCIJSKI SUSTAV	5
2.1. Elementi distribucijskog sustava s distribuiranim obnovljivim izvorima energije.....	5
2.2. Tehnička infrastruktura	5
2.3. Struktura distribucijske mreže	5
2.4. Upravljanje i kontrola	6
2.5. Regulacija i politika	7
2.6. Izazovi i rješenja	7
3. VOĐENJE DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA.....	9
3.1. Vođenje pogona distribucijskog sustava	9
3.1.1. Održavanje frekvencije.....	10
3.1.2. Održavanje napona, preuzimanje i predaja jalove snage.....	10
3.1.3. Ponovna uspostava opskrbe	11
3.2. Pomoćne usluge od strane korisnika mreže	11
4. POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU	13
4.1. Općenito o pomoćnim uslugama	13
4.2. Vrste nefrekvencijskih pomoćnih usluga	14
4.3. Potrebe za pomoćnim uslugama	15
4.4. Obračun pomoćnih usluga.....	16
4.5. Objavljivanje i razmjena podataka.....	16
5. POSTOJEĆE POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU.....	18
5.1. Upravljanje frekvencijom.....	18
5.1.1. Primarna regulacija	19
5.1.2. Sekundarna regulacija frekvencije i snaga razmjene	19
5.1.3. Tercijarna regulacija frekvencije i snaga razmjene.....	19

5.2.	Upravljanje naponom i jalovom snagom	19
5.3.	Mogućnost crnog starta/obnove mreže	20
5.4.	Otočni pogon	21
6.	NOVE POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU	22
6.1.	Inercijski odziv	22
6.2.	Zaglađivanje aktivne snage (ograničenje brzine rampe).....	27
7.	TEHNIČKI UVJETI ZA PRUŽANJE POMOĆNIH USLUGA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU	31
7.1.	Tehnički uvjeti za pružanje pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu	31
7.1.1.	Tehnički uvjeti u mreži	31
7.1.2.	Tehnički uvjeti koje mora ispuniti postrojenje pružatelja usluge	31
7.1.3.	Tehnički uvjeti za komunikaciju	32
7.2.	Komunikacija između postrojenja pružatelja usluge i mreže	32
7.3.	Komunikacija između mreže i SCADA sustava operatora distribucijskog sustava	33
7.4.	Sinkronizacija vremena	33
7.5.	Načini pružanja usluge u distribucijskom sustavu.....	33
7.6.	Vozni red.....	33
7.7.	Regulacijska krivulja.....	34
7.7.1.	Regulacijska krivulja pomoćne usluge regulacije napona jalovom snagom	34
7.7.2.	Regulacijska krivulja pomoćne usluge regulacije napona radnom snagom	36
7.7.3.	Regulacijska krivulja usluge regulacije opterećenja radnom snagom pri upravljanju zagušenjem redispečiranjem	38
7.7.4.	Princip pružanja usluge po regulacijskoj krivulji	41
7.7.5.	Pružanje usluge po aktivacijskom nalogu za pogon u zadanoj radnoj točki	43
8.	MODEL SUSTAVA ZA REGISTRACIJU I NABAVU POMOĆNIH USLUGA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU	46
8.1.	Ugrađeni sustavi	46
8.1.1.	Sustav za rasterećenje mreže	46
8.1.2.	Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama.....	46

8.2.	Tijek od registracije pomoćnih usluga do obračuna usluge	47
8.2.1.	Registracija pomoćnih usluga	47
8.2.2.	Prijava na poziv za pomoćne usluge	47
8.2.3.	Javna dražba.....	48
8.2.4.	Aktivacije.....	50
8.2.5.	Obračun pomoćne usluge i metodologija izračuna prilagođene energije.....	51
8.3.	Obavještanje o ograničenjima u mreži (sustav semafora)	52
9.	PRIMJER: SUSTAV ZA RASTEREĆENJE DISTRIBUCIJSKE MREŽE	54
9.1.	Primjer implementacije sustava za rasterećenje distribucijske mreže	54
9.2.	Prikupljanje korisnika s pomoćnim uslugama.....	55
9.3.	Aktivacija pomoćnih usluga za potrebe distribucijske mreže	56
9.4.	Obavještanje o ograničenjima u mreži (sustav semafora)	56
10.	ZAKLJUČAK.....	58
	LITERATURA	60
	Sažetak i ključne riječi.....	61
	Summary and keywords.....	62

1. UVOD

S razvojem tržišta električne energije, ključno je osigurati adekvatnu propusnost prijenosnog sustava, što znači sposobnost prijenosa električne energije na velike udaljenosti od proizvođača do potrošača kroz visokonaponsku mrežu. Propusnost prijenosnog sustava često je ograničena tehničkim faktorima kao što su svojstva prijenosnih vodova, transformatora i cijelog elektroenergetskog sustava (EES). Pojmovi poput mrežnog zagušenja, prijenosne moći i prekogranične prijenosne moći postaju sve prisutniji u diskusijama. Operator prijenosnog sustava (OPS) odgovoran je za očuvanje stabilnosti EES-a i sigurnost prijenosa električne energije. Da bi osigurao kvalitetnu i sigurnu opskrbu električnom energijom te normalan rad EES-a, OPS koristi različite pomoćne usluge. Te usluge uključuju primarnu i sekundarnu regulaciju djelatne snage i frekvencije, regulaciju napona i jalove snage, te druge sposobnosti poput starta iz beznaponskog stanja ili izoliranog rada. Ove usluge omogućuju Operatoru distribucijskog sustava (ODS) i OPS-u održavanje elektroenergetskog sustava unutar sigurnosnih granica. Pomoćne usluge mogu dolaziti od trećih strana (kao što su snaga za kontrolu frekvencije, reaktivna snaga za kontrolu napona, skladišta energije, mogućnost crnog starta) ili se mogu pružati unutar OPS-a i ODS-a (kroz promjene u topologiji mreže i integrirane mrežne komponente). Kako raste udio obnovljivih izvora energije, poput vjetra i sunca, elektroenergetski sustavi postaju sve kompleksniji i teže ih je predvidjeti. Ti izvori energije prirodno variraju i ovise o vremenskim uvjetima, što može dovesti do velikih oscilacija u proizvodnji energije. Zbog toga su pomoćne usluge ključne za održavanje stabilnosti elektroenergetske mreže. Pomoćne usluge su ključne za osiguranje stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava, osobito s rastućim udjelom obnovljivih izvora energije. Kako se nove tehnologije razvijaju i postojeće prakse prilagođavaju, važnost pomoćnih usluga će nastaviti rasti, čineći ih ključnim dijelom prijelaza prema održivom i otpornom energetsom sustavu. U prvom poglavlju ovog diplomskog rada obrađuje se napredni distribucijski sustav, zatim vođenje pogona distribucijskog sustava. U četvrtom poglavlju govori se o pomoćnim uslugama u distribucijskom sustavu što je i tema ovog rada. U sljedeća dva poglavlja razrađuje se podjela pomoćnih usluga na postojeće i nove. U sedmom poglavlju objašnjeni su tehnički uvjeti koji su potrebni za pružanje pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu te je na kraju na primjeru Slovenije objašnjen model sustava za registraciju i nabavu pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu (primjer implementacije sustava za rasterećenje distribucijske mreže).

2. NAPREDNI DISTRIBUCIJSKI SUSTAV

U današnjem energetski dinamičnom svijetu, distribucijski sustavi s velikim udjelom distribuiranih izvora energije (DOIE) predstavljaju ključnu komponentu modernih elektroenergetskih mreža. Integracija DOIE, uključujući obnovljive izvore i male generatore, u tradicionalne sustave distribucije električne energije zahtijeva kompleksnu prilagodbu infrastrukture, tehnologije i regulativnih okvira.

2.1. Elementi distribucijskog sustava s distribuiranim obnovljivim izvorima energije

Distribuirani izvori energije čine srž modernih distribucijskih sustava. Ovi izvori uključuju obnovljive tehnologije kao što su solarni paneli, vjetroturbine i male hidroelektrane, koji pružaju čistiju i održiviju alternativu tradicionalnim fosilnim gorivima. Osim toga, kombinirane toplinske i električne postaje, koje proizvode električnu energiju i toplinu, te baterijski sustavi za pohranu energije, postaju sve važniji u upravljanju proizvodnjom i potrošnjom energije. Ovi izvori omogućuju decentraliziranu proizvodnju, što smanjuje potrebu za dugim prijenosnim linijama i doprinosi energetskoj neovisnosti na lokalnoj razini.

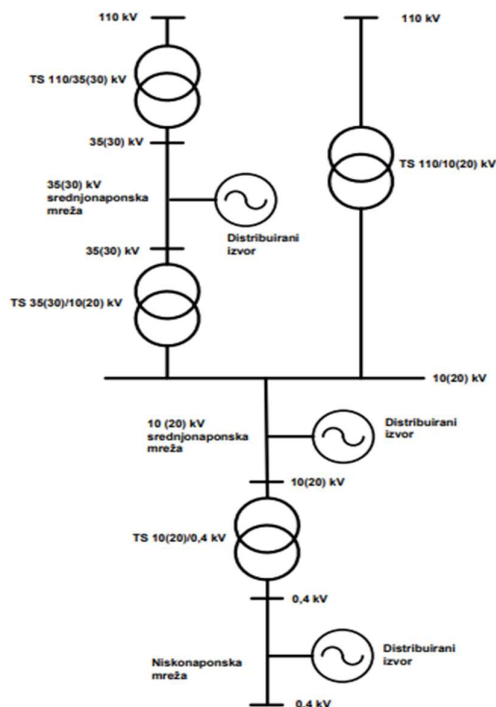
2.2. Tehnička infrastruktura

S obzirom na rastući broj DOIE, pametan distribucijski sustav (Smart Grid) postaje nužnost. Pametne mreže omogućuju dvosmjernu komunikaciju između operatora mreže i krajnjih korisnika, što omogućuje automatsko upravljanje i optimizaciju mreže. Ova tehnologija omogućuje učinkovitije praćenje i kontrolu potrošnje i proizvodnje energije, te pravovremeno otkrivanje i rješavanje problema. Pametna brojila igraju ključnu ulogu u ovom sustavu, jer omogućuju bilježenje potrošnje i proizvodnje u stvarnom vremenu, čime se poboljšava transparentnost i efikasnost. Uz to, sustavi za upravljanje energijom koriste napredne algoritme za koordinaciju i optimizaciju rada DOIE, što doprinosi stabilnosti mreže i smanjenju troškova.

2.3. Struktura distribucijske mreže

Distribucijske mreže, koje uključuju mreže niskog i srednjeg napona, prijenosne mreže i transformatorske stanice, ključne su za prijenos električne energije od visokih naponskih razina do

krajnjih korisnika. U strukturi distribucijskog sustava, važno je održavati ravnotežu između energetske proizvodnje i potrošnje. Mrežni segmenti i čvorišta omogućuju fleksibilnost u upravljanju energijom i integraciju DOIE, dok uređaji za zaštitu i regulaciju osiguravaju stabilnost i sigurnost mreže.



Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz distribucijske mreže [5]

2.4. Upravljanje i kontrola

Sustavi za upravljanje distribucijom predstavljaju ključne alate za nadzor i optimizaciju distribucijske mreže. Ovi sustavi omogućuju praćenje rada mreže, predviđanje potreba za energijom i brzu reakciju na eventualne probleme. Automatski sustavi za isključivanje i uključivanje pomažu u održavanju stabilnosti mreže automatskim otkrivanjem i rješavanjem kvarova, čime se minimiziraju prekidi u opskrbi. Analitika podataka koristi velike podatke za optimizaciju rada mreže, identifikaciju obrazaca potrošnje i predviđanje potreba, što doprinosi učinkovitijem upravljanju resursima.

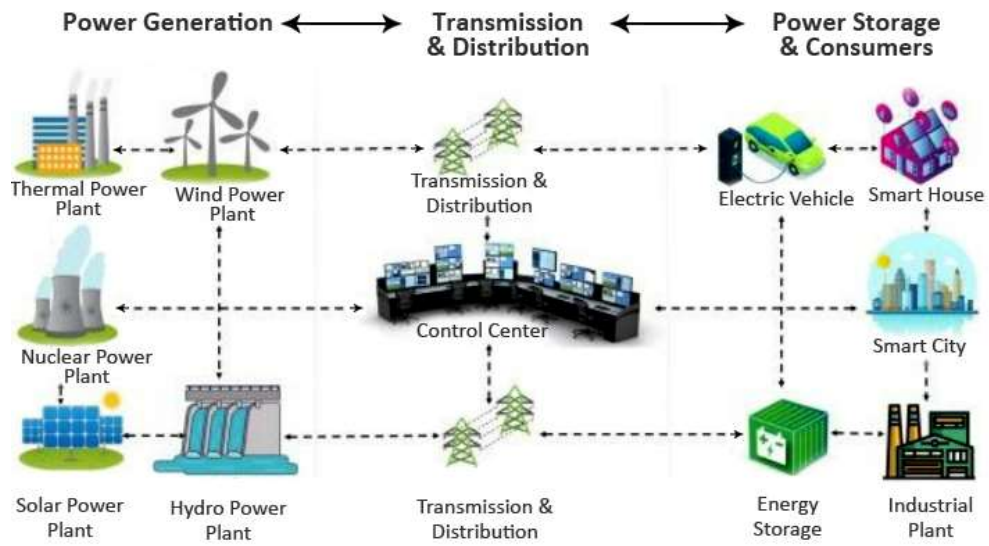
2.5. Regulacija i politika

Regulativni okviri, poput mrežnih pravila i zakona o energiji, oblikuju način na koji DOIE integriraju u distribucijski sustav. Politike koje promiču upotrebu obnovljivih izvora energije, uključujući subvencije i porezne olakšice, igraju ključnu ulogu u poticanju razvoja DOIE. Regulativni standardi osiguravaju da svi dijelovi sustava, uključujući DOIE i tradicionalne izvore energije, djeluju usklađeno i učinkovito.

2.6. Izazovi i rješenja

Integracija DOIE donosi brojne izazove, uključujući upravljanje volatilnošću i sigurnost mreže. Proizvodnja iz obnovljivih izvora može biti nepredvidiva, što zahtijeva razvoj tehnologija za pohranu energije i sustava za fleksibilnost kako bi se osigurala stabilnost opskrbe. Sigurnost mreže postaje sve važnija s obzirom na potencijalne cyber prijetnje i fizičke prijetnje, što zahtijeva implementaciju robusnih sigurnosnih mjera.

Distribucijski sustavi s velikim udjelom distribuiranih izvora energije predstavljaju napredne i prilagodljive mreže koje omogućuju bolju integraciju obnovljivih izvora i povećavaju učinkovitost elektroenergetskih sustava. Struktura takvih sustava, uključujući pametnu infrastrukturu, napredne tehnologije za upravljanje i regulaciju, te prilagodbu regulativnih okvira, osigurava učinkovito i stabilno upravljanje energijom. Suočavanje s izazovima kao što su volatilnost proizvodnje i sigurnost mreže zahtijeva inovativna rješenja i kontinuirano prilagođavanje tehnologije i politika. Na taj način, distribucijski sustavi mogu bolje zadovoljiti sve zahtjeve moderne energetske mreže i doprinijeti održivom razvoju.



Slika 2.2. Smart grid [6]

3. VOĐENJE DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA

3.1. Vođenje pogona distribucijskog sustava

Vođenje distribucijskog sustava je kontinuirana aktivnost koju provodi operator distribucijskog sustava kako bi osigurao siguran i pouzdan rad distribucijske mreže, omogućujući nesmetano korištenje mreže svim korisnicima. Operator distribucijskog sustava odgovoran je za upravljanje mrežom, od spoja s prijenosnom mrežom do spoja s postrojenjima i instalacijama korisnika.

Vođenje distribucijskog sustava uključuje sljedeće funkcije:

- upravljanje i nadzor distribucijskog sustava u stvarnom vremenu,
- planiranje pogona distribucijskog sustava,
- korištenje usluga korisnika distribucijske mreže,
- upravljanje i nadzor distribucijskog sustava u stvarnom vremenu,
- planiranje pogona distribucijskog sustava,
- korištenje usluga korisnika distribucijske mreže,
- koordinacija vođenja sustava s operatorom prijenosnog sustava,
- analiza pogona distribucijskog sustava.

Usluge sustava su ključne za funkcioniranje prijenosnog i distribucijskog elektroenergetskog sustava. One uključuju vođenje sustava, održavanje stabilne frekvencije i napona, te ponovnu uspostavu napajanja. Ove usluge pružaju operatori prijenosnog i distribucijskog sustava. Operator distribucijskog sustava osigurava usluge distribucijskog sustava, samostalno ili uz pomoć korisnika distribucijske mreže koji su s njim sklopili ugovor o pružanju tih usluga.

Usluge distribucijskog sustava obuhvaćaju:

- vođenje distribucijskog sustava,
- održavanje napona,
- ponovnu uspostavu distribucijskog sustava,
- održavanje frekvencije u slučaju otočnog pogona unutar distribucijskog sustava.

Operator distribucijskog sustava neprekidno planira rad distribucijskog sustava koristeći sve dostupne informacije i procjenjuje ograničenja u korištenju mreže. Vođenjem pogona distribucijskog sustava osigurava se stabilan i optimalan rad distribucijske mreže, sprječava

poremećaj normalnog rada, smanjuje rizik od kvarova, skraćuje trajanje izvanrednog pogona te se provodi ponovna uspostava distribucijskog sustava nakon prekida i sudjeluje u ponovnoj uspostavi cijelog sustava.

Vođenje pogona distribucijskog sustava obuhvaća:

- izvođenje sklopnih operacija za potrebe pogona,
- upravljanje i nadzor rada jedinica mreže,
- praćenje okolnosti u mreži,
- regulaciju napona,
- planiranje potreba i angažiranje pomoćnih usluga i usluga za upravljanje zagušenjima,
- upravljanje tokovima snage,
- koordinacija i praćenje fleksibilnog ponašanja korisnika mreže,
- ispitivanje, nadzor i analizu djelovanja uređaja zaštite,
- koordinaciju radova održavanja jedinica mreže,
- obavješćivanje korisnika mreže, korisnika mjernih podataka i javnosti o prekidima napajanja,
- osiguravanje propisane kvalitete opskrbe električnom energijom,
- održavanje sustava daljinskog vođenja,
- poduzimanje drugih radnji u cilju osiguranja normalnog pogona distribucijskog sustava.

3.1.1. Održavanje frekvencije

Operator prijenosnog sustava odgovoran je za održavanje frekvencije unutar propisanih granica u elektroenergetskom sustavu, u skladu s Mrežnim pravilima prijenosnog sustava. Operator distribucijskog sustava surađuje s operatorom prijenosnog sustava u održavanju frekvencije, ali pritom mora paziti da svojim radom ne izazove poremećaje u radu distribucijskog sustava.

3.1.2. Održavanje napona, preuzimanje i predaja jalove snage

Održavanje napona unutar propisanih granica u distribucijskoj mreži, kao jedna od usluga distribucijskog sustava, odgovornost je operatora distribucijskog sustava u skladu s važećim propisima. Regulacija napona osigurava kvalitetnu i sigurnu opskrbu električnom energijom. U tom procesu sudjeluju operatori distribucijskog i prijenosnog sustava, kao i korisnici mreže.

Operator distribucijskog sustava regulira napon u distribucijskom sustavu:

- promjenom prijenosnog omjera energetske transformatora,
- djelovanjem kompenzacijskih uređaja,
- promjenom uklopnog stanja u mreži,
- aktiviranjem propisanih obveznih fleksibilnosti korisnika mreže,
- ograničavanjem korištenja priključne snage korisnika s fleksibilnim priključkom,
- korištenjem pomoćnih usluga korisnika distribucijske mreže.

Regulacija napona pomaže u održavanju ravnoteže napona tijekom opskrbe električnom energijom iz distribucijskog sustava. Ova usluga je dostupna svim korisnicima sustava i nije specifična za pojedinca. Distribucijski operater osigurava potrebnu količinu jalove snage kako bi se naponski nivoi održali unutar propisanih granica. Kako bi se održala stabilnost napona i smanjili gubici, korisnici sustava mogu preuzimati ili predavati prividnu snagu s jalovom komponentom u granicama $\pm 0,32868$ dok su priključeni na elektrodistribucijski sustav.

3.1.3. Ponovna uspostava opskrbe

Distribucijski operater osigurava ponovnu uspostavu opskrbe nakon prekida kroz planiranje i provedbu sljedećih aktivnosti:

- organizaciju radnog procesa,
- postupke za isključivanje oštećenih dijelova u SN (srednjenaponskoj) mreži,
- upravljanje distribucijskim sustavom u izvanrednim situacijama,
- rad dežurnih službi za obavljanje potrebnih manipulacija i otklanjanje kvarova na distribucijskom sustavu.

Ponovna uspostava opskrbe odvija se prema Uputama za rad elektroenergetskih objekata i uređaja, koje detaljno definiraju postupke za isključenje oštećenih sektora u SN mreži te upravljanje distribucijskim sustavom u izvanrednim uvjetima. Ove upute se redovito izrađuju, usklađuju s razvojem sustava i ažuriraju kad god dođe do promjena u osnovnoj konfiguraciji sustava.

3.2. Pomoćne usluge od strane korisnika mreže

Pomoćne usluge koje korisnici mreže pružaju operatoru distribucijskog sustava su:

- regulacija napona jalovom snagom,

- regulacija napona djelatnom snagom,
- crni start postrojenja korisnika mreže,
- otočni pogon dijela distribucijske mreže.

Kako bi povećao sigurnost napajanja i smanjio preopterećenja u distribucijskoj mreži, operator distribucijskog sustava koristi redispečiranje, što uključuje upravljanje potrošnjom i/ili proizvodnjom u postrojenjima korisnika mreže.

4. POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

4.1. Općenito o pomoćnim uslugama

Pomoćne usluge odnose se na mogućnost korisnika sustava da prilagodi svoju potrošnju ili proizvodnju električne energije kao odgovor na vanjski signal. To uključuje upravljanje potrošnjom, proizvodnjom i skladištenjem energije. Pomoćne usluge obuhvaćaju sustavne usluge unutar distribucijskog elektroenergetskog sustava (DEES) te rješavanje zagušenja u mreži. Operator distribucijskog sustava, radi održavanja sigurnog i pouzdanog rada mreže, može transparentno naručivati i koristiti ove usluge koje pružaju korisnici sustava ili treće strane, uključujući:

- regulaciju napona na lokalnom dijelu DEES-a,
- upravljanje preopterećenjima u lokalnom dijelu DEES-a,
- upravljanje kapacitetima lokalnog dijela DEES-a,
- upravljanje lokalnim otočnim radom u slučaju kvara u lokalnom dijelu DEES-a.

Te usluge korisnici sustava ili treće strane pružaju operatoru distribucijskog sustava kroz:

- kontrolirano povećanje ili smanjenje potrošnje aktivne i jalove energije krajnjeg potrošača,
- kontrolirano vremensko pomicanje opterećenja (snage) krajnjeg potrošača,
- kontrolirano povećanje ili smanjenje proizvodnje aktivne i jalove energije u postrojenjima,
- prilagodbe proizvodne snage u postrojenjima,
- kontrolirano punjenje i pražnjenje uređaja za skladištenje električne energije,
- kontrolirano punjenje i pražnjenje električnih vozila na punionicama.

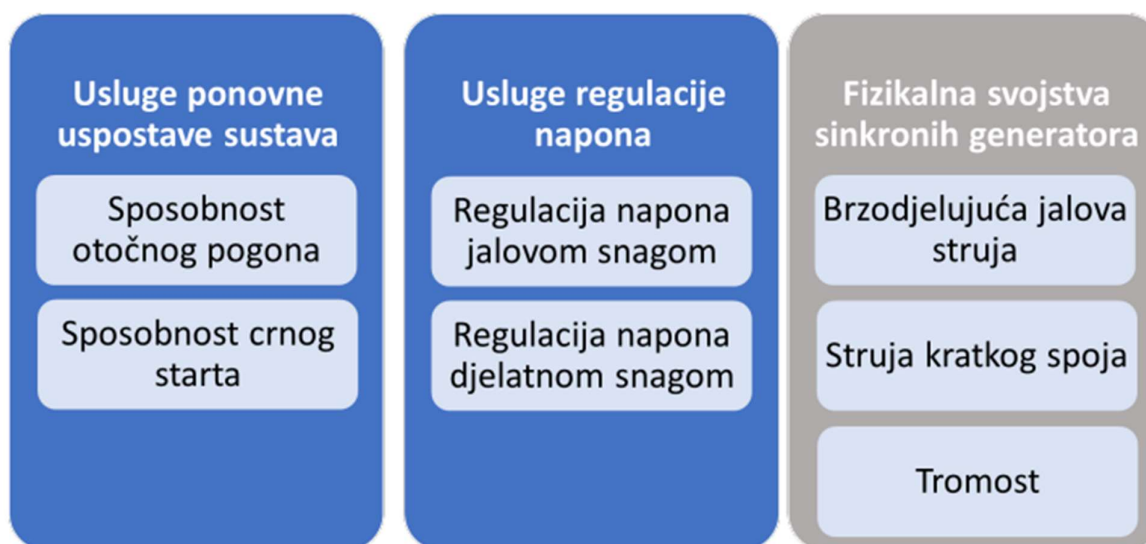
Pružanje i prodaja pomoćnih usluga u distribucijskom elektroenergetskom sustavu moraju biti dostupni svim korisnicima bez potrebe za specijaliziranom informatičko-komunikacijskom opremom. Komunikacija između distribucijskog operatora i pružatelja usluga pomoćnih usluga može se obavljati putem različitih kanala poput aplikacija, mobilnih telefona, SMS/MMS poruka, e-pošte i/ili specijaliziranih tehnologija, uključujući nove generacije pametnih brojila, u skladu s potrebama pomoćnih usluga. Distribucijski operator može prenijeti određene funkcije naručivanja pomoćnih usluga na treće strane, pod uvjetom da se dokaže ekonomska korist. Također, operator postavlja detaljne tehničke zahtjeve za pružanje tih usluga i provodi provjeru sposobnosti pružatelja usluga.

4.2. Vrste nefrekvencijskih pomoćnih usluga

Nefrekvencijska pomoćna usluga odnosi se na uslugu koju koristi operator prijenosnog ili distribucijskog sustava za regulaciju napona u stabilnom stanju, injektiranje brzo reagirajuće jalove struje, osiguravanje stabilnosti lokalne mreže kroz tromost, osiguravanje struje kratkog spoja, kao i omogućavanje crnog starta i otočnog pogona.

Vrste nefrekvencijskih pomoćnih usluga su:

- usluge ponovne uspostave sustava,
- usluge regulacije napona,
- fizikalna svojstva sinkronih generatora.



Slika 4.1. Vrste nefrekvencijskih pomoćnih usluga [4]

Usluge ponovne uspostave sustava obuhvaćaju nefrekvencijske pomoćne usluge poput otočnog pogona i crnog starta, koje se koriste za obnavljanje napajanja nakon ispada koji su uzrokovali beznaponsko stanje u dijelu mreže, čime se poboljšava pouzdanost napajanja u distribucijskoj mreži. Nefrekvencijske pomoćne usluge regulacije napona pomažu u poboljšanju kvalitete napona u distribucijskoj mreži podešavanjem radne točke postrojenja korisnika mreže. Zbog niskog omjera reaktancije i otpora vodova u distribucijskoj mreži, na napon utječu i djelatna i jalova snaga. Uz standardnu regulaciju napona jalovom snagom, koja se primjenjuje u prijenosnoj mreži, sada je omogućena i regulacija napona djelatnom snagom kao nefrekvencijska pomoćna usluga. Treća skupina usluga uključuje brzodjelujuću jalovu struju, struju kratkog spoja i tromost. Ove

usluge su povezane sa specifičnim svojstvima sinkronih generatora, koja proizlaze iz njihovih fizikalnih karakteristika, ali nisu prisutna kod proizvodnje koja je priključena preko izmjenjivača. Ove usluge se odnose na oponašanje svojstava sinkronih generatora od strane proizvodnje priključene preko izmjenjivača.

4.3. Potrebe za pomoćnim uslugama

Distribucijski operator jednom godišnje objavljuje dugoročne, ali okvirno planirane procjene svojih potreba za pomoćnim uslugama u distribucijskom elektroenergetskom sustavu za sljedećih 10 godina. Ova objava uključuje informacije o mjestu i načinu na koji će se provoditi natječaji za specifične pomoćne usluge, kao i tehničke uvjete za sudjelovanje u tim natjecajima. Također, navode se minimalni uvjeti koje pružatelji pomoćnih usluga moraju ispuniti, kao što su lokacija, minimalna snaga, vrsta snage (aktivna ili jalova) i zahtijevana dinamika odziva. Objava također sadrži okvirno planiranu procjenu maksimalne prihvatljive cijene. Pomoćne usluge koje distribucijski operator naručuje oblikuju se prema potrebama distribucijskog elektroenergetskog sustava. Svaki proizvod mora imati minimalni set atributa koji je obavezan za svaki zahtjev. Distribucijski operator ima mogućnost razvijanja različitih proizvoda pomoćnih usluga prema potrebama i ponudi, pod uvjetom da se ti proizvodi mogu jasno opisati s općim zahtjevima pomoćnih usluga.

Prije nego što se pomoćne usluge mogu pružati na određenom mjestu, taj potencijal treba registrirati na jedinstvenoj ulaznoj točki nacionalnog podatkovnog čvorišta. Ako nacionalno podatkovno čvorište još nije uspostavljeno, registracija se vrši kod distribucijskog operatora ili vlasnika distribucijskog sustava. Distribucijski operator provodi registraciju na zahtjev vlasnika mjesta. Nakon registracije, vlasnik mjesta može ovlastiti nekog predstavnika, poput agregatora, da upravlja svim aktivnostima vezanim uz pružanje pomoćnih usluga. Distribucijski operator može postaviti određene minimalne uvjete za registraciju, poput brzine odziva i raspoložive snage pomoćnih usluga na mjestu.

Kako bi osigurao pouzdano pružanje pomoćnih usluga, distribucijski operator provodi postupak kvalifikacije pružatelja usluga. Ako nije potreban poseban kvalifikacijski postupak, dovoljna je registracija s potrebnim atributima proizvoda. Kvalifikacijski postupak rezultira upisom pružatelja usluga u registar pomoćnih usluga, a upis je valjan do 5 godina, ovisno o vrsti pomoćnih usluga. Nakon toga, potrebno je obnoviti kvalifikaciju. Distribucijski operator naručuje pomoćne usluge preko organiziranih tržišta prema pravilima tih tržišta, ali može koristiti i svoje vlastite,

transparentne i nediskriminatorne postupke ako na organiziranim tržištima ne dobije odgovarajuće ponude ili ako mu je to povoljnije. Kada traži pomoćne usluge izvan organiziranog tržišta, objavljuje zahtjev ili natječaj. Ova objava mora biti dostupna javnosti, barem na web stranici distribucijskog operatora i na nacionalnom podatkovnom čvorištu. Također, zahtjev se može poslati potencijalnim ponuditeljima u elektroničkom obliku. U natječaju se navode detalji o proizvodu i uvjetima pružanja pomoćnih usluga. Distribucijski operator određuje kako će se usluga aktivirati, a to može biti ručno ili automatski. Ručna aktivacija podrazumijeva da osoba na terenu aktivira uslugu na temelju signala od distribucijskog operatora, dok automatska aktivacija koristi strojnu komunikaciju i standardizirane CIM XML poruke. Preferira se automatska aktivacija, dok se elektronička aktivacija potiče kod ručne aktivacije.

4.4. Obračun pomoćnih usluga

Distribucijski operator sklapa ugovore s ponuditeljima koji nude najnižu cijenu za traženi obujam usluga, pod uvjetom da su ponude u traženom opsegu i po cijeni koja je jednaka ili manja od najviših prihvatljivih cijena. Pružatelj koji ima ugovor za proizvod snage također mora ponuditi proizvod energije. Ako distribucijski operator ne dobije zadovoljavajuće ponude, može izravno sklopiti ugovor s pružateljem pomoćnih usluga uz odobrenje regulatorne agencije, prema odredbama zakona o tržištu energije.

Distribucijski operator provodi obračun usluga na temelju očitavanja potrošnje električne energije na mjestu gdje se usluga pruža, koristeći podatke s 15-minutnim intervalima. Obračun se obavlja svaki mjesec. Troškovi usluga računaju se prema osnovici opterećenja i stvarnom izmjerenom opterećenju za svaku lokaciju posebno. Metodologija za izračun osnovice mora biti definirana u natječaju i usklađena s metodologijom koju odobri regulatorna agencija. Obračun se priprema u elektroničkom formatu, dok se za ponuditelje bez odgovarajuće informatičko-komunikacijske opreme javno objavljuje.

4.5. Objavljivanje i razmjena podataka

Distribucijski operator godišnje objavljuje anonimne podatke o korištenju pomoćnih usluga kako bi potaknuo njihovu primjenu. Ovi podaci uključuju informacije o različitim proizvodima i njihovim lokacijama. Izvještaji moraju biti dostupni u PDF formatu na nacionalnom podatkovnom čvorištu i na web stranici distribucijskog operatora.

Distribucijski operator vodi evidenciju izvora pomoćnih usluga i pružatelja usluga, te osigurava podatke za registar pomoćnih usluga. Ovaj registar pomaže sistemskim i distribucijskim operatorima da prepoznaju dostupne izvore pomoćnih usluga i omogućuje bolju koordinaciju i upravljanje.

Distribucijski operator razmjenjuje podatke s registrom pomoćnih usluga i drugim sudionicima na tržištu prema važećim propisima. To uključuje:

- upis kvalificiranih izvora pomoćnih usluga u registar,
- slanje mjernih podataka o pomoćnim uslugama do kraja obračunskog razdoblja,
- pristup informacijama o izvorima pomoćnih usluga za upravljanje sustavom semafora, provjeru dostupnosti rezerviranih kapaciteta i izbjegavanje dvostrukih aktivacija.

Također, distribucijski operator pruža podatke o privremenim ograničenjima u distribucijskom sustavu za pružanje pomoćnih usluga na specifičnim lokacijama, a informacije se ažuriraju svakih 15 minuta.

5. POSTOJEĆE POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

U postojeće pomoćne usluge ubrajaju se:

- upravljanje frekvencijom,
- upravljanje naponom i jalovom snagom,
- mogućnost crnog starta/obnove mreže,
- otočni pogon.

5.1. Upravljanje frekvencijom

Upravljanje frekvencijom pomoćna je usluga koja je zadužena za povratak frekvencije u nazivnim radnim razinama 50 Hz ili 60 Hz nakon pojave bilo kakvog odstupanja zbog fizikalne ravnoteže između proizvodnje i potražnje. Usluga postaje izvediva podešavanjem rezerve aktivne snage sustava kroz automatske i brze reakcije. OPS – ovi trebaju planirati uslugu unaprijed kako bi osigurali dostupnost točnih iznosa rezervi aktivne snage u stvarnom vremenu, a ako dođe do nedostatka, OPS-ovi moraju poduzeti korektivne radnje. Pod rezerve aktivne snage ubrajamo proizvodne jedinice, skladištenje energije, i u nekim slučajevima odgovor potražnje. Za oporavak frekvencije na raspolaganju imamo sljedeće glavne pomoćne usluge:

- rezerve zadržavanja frekvencije (eng. Frequency Containment Reserves – FCRs)/Primarno upravljanje frekvencijom: FCR je prva upravljačka akcija koja treba biti aktivirana, obično unutar 30 s, decentralizirano na sinkronom području,
- rezerve za obnavljanje frekvencije (eng. Frequency Restoration Reserves – FRRs)/Sekundarno upravljanje frekvencijom: FRR je centralizirano automatsko upravljanje, aktivira ga OPS u vremenskom intervalu između 30 sekundi i 15 minuta od pojave neravnoteže. FRR može razlikovati rezerve sa automatskom aktivacijom (eng. automatic Frequency Restoration Reserves – aFRR) i rezerve sa ručnom aktivacijom (eng. manual Frequency Restoration Reserves – mFRR),
- rezerve zamjene (eng. Replacement Reserves – RRs)/Tercijarno upravljanje frekvencijom: RR je ručno upravljanje. Uobičajeno vrijeme aktivacije za RRs je od 15 min od pojave neravnoteže (u kontinentalnoj Europi) do nekoliko sati kasnije.

5.1.1. Primarna regulacija

Primarna regulacija odnosi se na automatsko djelovanje sustava koje pomaže u održavanju stabilne frekvencije u elektroenergetskom sustavu. Kada dođe do promjena u frekvenciji koje se razlikuju od zadane ili nazivne vrijednosti, primarna regulacija automatski prilagođava proizvodnju i potrošnju energije. Ovo se postiže preko sustava za regulaciju brzine vrtnje turbina i regulatora frekvencije, koji smanjuju razliku između proizvodnje i potrošnje energije. Svaka veća proizvodna jedinica mora biti sposobna provoditi primarnu regulaciju frekvencije u skladu s pravilima prijenosnog sustava, uzimajući u obzir njihove tehničke karakteristike i nazivnu snagu.

5.1.2. Sekundarna regulacija frekvencije i snaga razmjene

Sekundarna regulacija frekvencije i snage razmjene odnosi se na održavanje stabilne frekvencije i planirane snage između povezane elektroenergetske mreže i u izoliranim dijelovima sustava. Ova regulacija djeluje s brzinom odziva u minutama i upravlja frekvencijom kroz regulatorne sustave koji kontroliraju brzinu vrtnje generatora i, ako su prisutni, grupne regulatore snage u elektranama s više generatora. Sekundarna regulacija preuzima funkciju od primarne regulacije, čime se oslobađa kapacitet primarne regulacije za buduće potrebe. Proizvodne jedinice moraju biti sposobne prilagoditi svoju snagu unutar dogovorenog opsega s minimalnom brzinom promjene od 2% nazivnog kapaciteta u minuti.

5.1.3. Tercijarna regulacija frekvencije i snaga razmjene

Tercijarna regulacija frekvencije i snage razmjene odnosi se na upravljanje djelatnom snagom u elektroenergetskom sustavu kako bi se prilagodili rad proizvodnih jedinica prema zahtjevima dispečera operatora prijenosnog sustava. Ova regulacija osigurava da rezerva sekundarne regulacije bude dostupna i aktivirana u punom opsegu, unutar 15 minuta od zahtjeva dispečera. U hrvatskom elektroenergetskom sustavu, tercijarna regulacija podijeljena je na dvije vrste: regulaciju za uravnoteženje sustava i regulaciju za sigurnost sustava.

5.2. Upravljanje naponom i jalovom snagom

Operator prijenosnog sustava (OPS) mora održavati ravnotežu napona u sustavu kako bi osigurao stabilnost i spriječio moguće oštećenje priključene opreme ili isključenja proizvodnih jedinica. Mrežna pravila definiraju specifične obaveze OPS-a vezane uz ograničenja napona za visoki i vrlo

visoki napon. Da bi se postigao željeni profil napona, potrebno je na određenim mjestima u mreži ubrizgati reaktivnu snagu, bilo induktivnog ili kapacitivnog karaktera, pomoću upravljivih uređaja kao što su proizvodne jedinice opremljene automatskim regulatorima napona (AVR) i statičkim VAR kompenzatorima (SVC). Ove akcije trebaju biti provedene blizu točke neravnoteže napona kako bi se osigurala potrebna lokalna jalova snaga.

Kontrola napona u europskim elektroenergetskim sustavima obično se provodi kroz tri razine hijerarhije, ovisno o vremenu aktivacije:

1. Primarna kontrola napona – lokalno automatsko upravljanje koje se aktivira unutar milisekundi i traje do jedne minute,
2. Sekundarna kontrola napona – centralizirano automatsko upravljanje koje se aktivira jednu minutu nakon neravnoteže i traje nekoliko minuta,
3. Tercijarna kontrola napona – aktivira se 10 do 30 minuta nakon neravnoteže, s ciljem optimizacije gubitaka mreže uzimajući u obzir rezerve reaktivne snage.

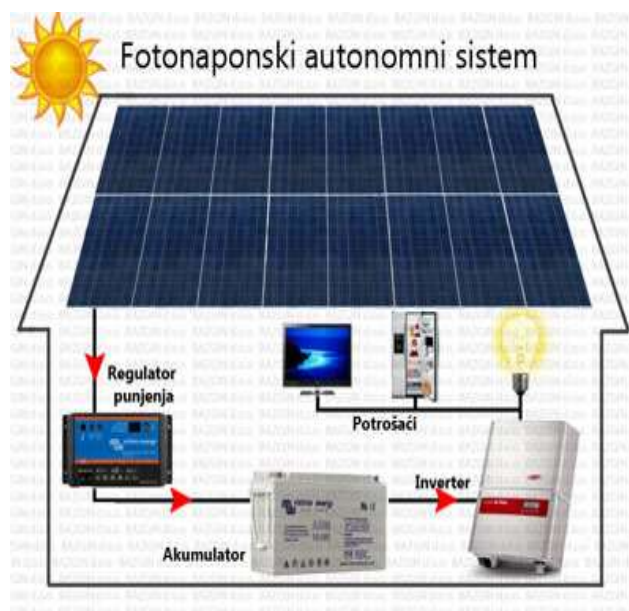
Kao primjer upravljanja naponom i jalovom snagom može se navesti rad RHE Velebit u kompenzacijskom režimu. U ovom režimu, jedna ili obje proizvodne jedinice RHE Velebit rade isključivo radi regulacije napona u 400 kV mreži. Tijekom kompenzatorskog rada, potrošnja jalove energije na tim jedinicama značajno. Ovo pomaže u smanjenju često previsokih napona u južnom dijelu 400 kV mreže Hrvatske. Operativni nalog za uključivanje jedne ili obje jedinice RHE Velebit u kompenzatorski rad izdaje dispečer HOPS-a.

5.3. Mogućnost crnog starta/obnove mreže

Pokretanje proizvodne jedinice iz stanja mirovanja bez korištenja mrežnog napona, do stanja u kojem je spremna za sinkronizaciju i preuzimanje opterećenja, naziva se crni start. Njegova funkcija je obnova napajanja korisnika mreže nakon što dođe do kolapsa dijela elektroenergetskog sustava ili potpunog prekida rada sustava. Crni start je pomoćna usluga koju pružaju proizvodne jedinice koje su sposobne isporučiti energiju u sustav bez oslanjanja na vanjsko napajanje nakon velikog ili djelomičnog prekida. Kada te jedinice unesu energiju u sustav, omogućuju pokretanje drugih proizvodnih jedinica kako bi se što brže vratila stabilnost i normalan rad sustava. Ove jedinice moraju imati sposobnost upravljanja naponom kroz potrošnju i proizvodnju jalove snage. S obzirom da mnoge elektrane ne mogu pokrenuti rad bez vanjske energije, mogućnost određenih jedinica za crni start od ključne je važnosti za obnovu napajanja.

5.4. Otočni pogon

Otočni pogon služi za vraćanje opskrbe električnom energijom tijekom velikih i dugotrajnih problema u sustavu, poput kvarova na mreži, požara ili hitnih radova na održavanju. Ova metoda pomaže u smanjenju prekida u opskrbi električnom energijom korisnicima. Otočni pogon se koristi kada se elektroenergetski sustav raspadne, a dispečeri koordiniraju spajanje više otočnih pogona kako bi se ponovno uspostavio funkcionalan sustav. Ponekad se koristi usluga redispečinga elektrana za rješavanje nepredviđenih promjena u stanju prijenosne mreže ili problema s naponom izvan dozvoljenih granica. U ovoj usluzi HEP-ove elektrane angažiraju se kako bi riješile zagušenja u mreži, prilagodile tokove snage za rasterećenje mreže ili poboljšale napone. Na zahtjev dispečera prijenosnog sustava, smjenski djelatnici HEP Proizvodnje upravljaju pokretanjem, zaustavljanjem, povećanjem ili smanjenjem proizvodnje kako bi udovoljili potrebama operatora prijenosne mreže.



Slika 5.1. Autonomni - otočni fotonaponski - solarni sistemi [7]

6. NOVE POMOĆNE USLUGE U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Distribuirani obnovljivi izvori energije (DOIE) mogu pružati mnoge korisne usluge koje podržavaju distribucijski ili prijenosni sustav, pod uvjetom da su agregirani. Međutim, da bi ove usluge bile prepoznate kao pomoćne usluge, a ne samo kao podrška sustavu, potrebno ih je točno izmjeriti i kvantificirati pomoću jedinstvene i zajednički dogovorene metodologije. Također je važno identificirati troškove pružanja usluga i financijske koristi kako bi se razvili održivi poslovni modeli.

Kada se radi o pomoćnim uslugama koje se nude prijenosnom sustavu putem agregacije iz individualnih DOIE unutar distribucijskog sustava, metode za mjerenje i kvantifikaciju trebaju biti uspostavljene za svaki čvor na koji je povezana usluga. Ovo je ključno za pravilnu naknadu svakog DOIE u skladu s njihovim pojedinačnim doprinosom, uzimajući u obzir tehnička ograničenja distribucijske mreže.

Nove pomoćne usluge u elektroenergetskom distribucijskom sustavu uključuju:

1. inercijski sustav,
2. primarni frekvencijski odziv,
3. zaglađivanje aktivne snage (ograničavanje brzine rampe),
4. razmjenu jalove snage za regulaciju napona,
5. prolazak kroz kvar i doprinos uklanjanju kvara,
6. ublažavanje harmonika napona.

U nastavku će detaljnije biti opisane pomoćne usluge Inercijski odziv i Zaglađivanje aktivne snage (ograničenje brzine rampe).

6.1. Inercijski odziv

Inercija je prirodna osobina sinkronih generatora (SG) zbog njihovih rotirajućih masa, koje sprječavaju nagle promjene frekvencije u prvih nekoliko ciklusa nakon neravnoteže snage. Inercijski odziv znači da sinkroni generator može odmah dodati dodatnu snagu mreži, proporcionalno brzini promjene frekvencije (eng. Rate of change of frequency - ROCOF) koja se mjeri u čvorištima mreže. Ova dodatna snaga dolazi iz kinetičke energije pohranjene u rotirajućim

masama, što uzrokuje njihovo usporavanje u slučaju pada frekvencije. U slučaju porasta frekvencije, događa se suprotno – akumulira se dodatna kinetička energija, što dovodi do ubrzanja rotora. Kod pojedinačnog sinkronog generatora, inercija se najčešće izražava kroz inercijsku vremensku konstantu:

$$H = \frac{E_{kin}}{S_N} = \frac{\frac{1}{2}J\omega^2}{S_N} \quad (6.1)$$

Gdje je:

- H (u sekundama) – inercijska vremenska konstanta,
- E_{kin} – pohranjena kinetička energija rotirajućim masama,
- J (u kgm^2)
- S_N – nazivna prividna snaga sinkronog generatora.

Na isti način, ekvivalentna H velikih EES-ova može biti definirana. Korištenjem jednadžbe sinkronog generatora može se izvesti sljedeći izraz u p.u.:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e \quad (6.2)$$

Gdje je:

- p_m – mehanička snaga izražena u p.u.,
- p_e – električna snaga izražena u p.u..

Iz prethodne jednadžbe vidljivo je da ROCOF ovisi o neravnoteži snage i inercijskoj konstanti. Kako bi se spriječilo povećanje ROCOF-a uslijed zamjene konvencionalnih sinkronih generatora (SG) bezinercijskim distribuiranim obnovljivim izvorima energije (DOIE), ENTSO-E predlaže da DOIE trebaju pružati sintetičku inerciju. Također, različiti operatori prijenosnih sustava (OPS) trebali bi procijeniti minimalne potrebne razine ekvivalentne inercije u svojim područjima kako bi se osigurala stabilnost frekvencije njihovih sustava.

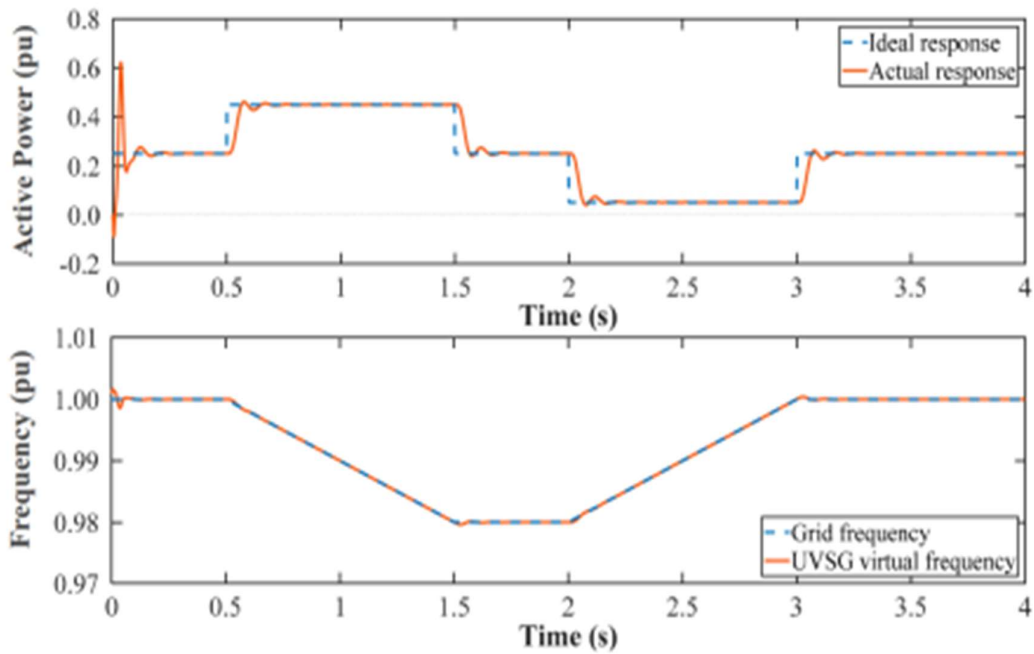
Osiguravanje sintetičke inercije za distribuirane obnovljive izvore energije (DOIE) s inverterskim sučeljima zahtijeva sustave za pohranu energije (ESS) u kojima bi se pohranjivala ekvivalentna "kinetička energija". Takvi sustavi za pohranu energije donose dodatne troškove u vezi s instalacijom, radom i održavanjem, što treba nadoknaditi. Stoga bi sintetičku inerciju trebalo

smatrati novom pomoćnom uslugom koja bi trebala biti plaćena, za razliku od trenutne prakse, gdje se smatra inherentnom funkcijom podrške sustavu.

Iako postoje različite metode za omogućavanje upravljivog inercijskog odziva za distribuirane obnovljive izvore energije (DOIE) s inverterskim sučeljima, ne postoje načini za precizno mjerenje i kvantifikaciju tog umjetno stvorenog inercijskog odziva. U većini slučajeva, inverteri se upravljaju kao naponski izvori, oponašajući rad konvencionalnih sinkronih generatora. Ove metode su također predložene za sustave za pretvaranje energije vjetra (WECS), gdje bi se koristila njihova kinetička energija za pružanje virtualne inercije. Neki od ovih sustava već su implementirani i komercijalno dostupni.

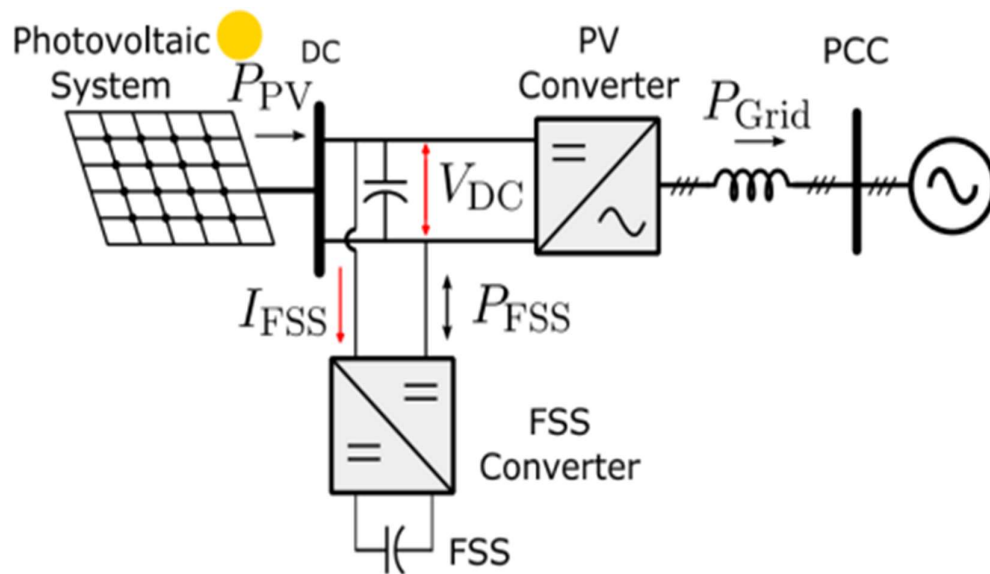
Međutim, ovaj pristup je energetski neutralan, što znači da se energija osigurana tijekom inercijskog odziva kasnije vraća iz mreže, što može negativno utjecati na ukupni frekvencijski odziv sustava. Također, inercijski odziv ovih sustava ovisi o radnim uvjetima WECS-a, pa je pružena inercija nestabilna, teško prilagodljiva i može povećati opterećenje na mehaničke dijelove sustava. Zbog toga je fokus na inercijskom odzivu koji se temelji na naponski upravljanim inverterima uz dodatne sustave za pohranu energije koji osiguravaju potrebnu energiju. Na taj način, inercija može biti stalno dostupna, čak i kada primarni izvori energije, poput sunca ili vjetra, nisu dostupni. Ova značajka omogućit će operatorima prijenosnih sustava (OPS) da nabave ovu uslugu na predvidljiv način, što pokazuje put prema uvođenju nove pomoćne usluge.

Uz pretpostavku da DOIE mogu omogućiti inercijski odziv koji odgovara inercijskoj vremenskoj konstanti H , onda se jednačba (6.2) može koristiti za procjenu odziva $p_H = p_m - p_e$ za zadani ROCOF, df/dt . Ovakav odziv je prikazan na *Slika 6.1.* za FNE koji u svojem DC dijelu ima superkondenzator koji može osigurati inerciju s $H = 5$ sekundi.



Slika 6.1. Simulacija inercijskog odgovora FNE sustava s $H=5s$, $ROCOF=0,02$ p.u. (1 Hz/s) [3]

Fizikalna konfiguracija sustava koji se razmatra je prikazana na Slika 6.2..



Slika 6.2. DOIE i FSS zasnovani na superkondenzatoru za inercijski odgovor, FRT i ograničenju aktivne snage u FNE [3]

FNE sustav je direktno povezan s uzlaznom mrežom, koja je modelirana kao idealni naponski izvor u seriji s impedancijom. U početku, FNE sustav injektira 0,25 p.u. u mrežu dok frekvencija ostaje stabilna. Zatim se, kako bi se proučila reakcija FNE sustava na promjene u frekvenciji,

mijenja frekvencija mreže podešavanjem frekvencije idealnog naponskog izvora. Tijekom tri perioda analiziraju se promjene s negativnim, nultim i pozitivnim ROCOF-om, pri čemu su pozitivni i negativni ROCOF jednaki 0,02 p.u./s (što odgovara 1 Hz/s), kao što je prikazano na *Slika 6.1.*.

Za ove simulacije usvojen je novi model konverterskih sučelja s mrežom FNE sustava, razvijen u okviru EASY-RES projekta i nazvan Unificirani virtualni sinkroni generator (UVSG). Cilj UVSG modela je integrirati niz funkcionalnosti koje će omogućiti širu primjenu obnovljivih izvora energije u distribucijskim i prijenosnim sustavima. Jedna od ključnih karakteristika UVSG modela je pružanje inercijskog odziva, što značajno doprinosi stabilnosti frekvencije u mreži.

U slučajevima s visokim ROCOF-om, mjerenje i procjena inercijskog odziva može se izvršiti praćenjem naglog pada ili porasta električne snage DOIE tijekom trajanja ROCOF-a. Problem je što frekvencija većinu vremena varira uz vrlo mali ROCOF. Predlaže se da se inercijski odziv DOIE kvantificira na sljedeći način: jasno je iz izraza (6.2) da inercijski odziv ovisi samo o parametru H i ROCOF-u. Vrijednost ovog parametra treba se potvrditi u certificiranom laboratoriju putem testiranja invertera DOIE, kao što je prikazano na *Slika 6.1.* ROCOF se može procijeniti u diskretnim vremenskim koracima mjerenjem frekvencije i vremena u trajanju od 100 ms, kako predlaže IEEE 1547-2018 standard. Na temelju toga, inercijski doprinos E_i , izražen u terminima energije kroz određeni vremenski period T (sat, dan, itd.), može se izračunati na sljedeći način:

$$E_i = \left[2 \cdot H \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\Delta f_i}{\Delta t} \right] \cdot S_n = \left[\frac{2 \cdot H}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta f_i \right] \cdot S_n \quad (6.3)$$

gdje je

$$\Delta f_i = f(t_i) - f(t_i - \Delta t) \quad (6.4)$$

$$N \cdot \Delta t = T \quad (6.5)$$

Gdje su:

- $f(t_i)$ – mjerena frekvencija na susretnom mjestu priključka DOIE s vremenskom konstantom t_i ,
- S_n – nazivna snaga DOIE invertera,
- Δt – 100 ms.

Procjena inercijskog odziva koji ODS prikazuje na mjestu spajanja s prijenosnim sustavom predstavlja vrlo složen zadatak. To je zbog potrošnje unutar distribucijskog sustava, čija frekvencijska osjetljivost ovisi o karakteristikama potrošača, a sastav različitih vrsta potrošača se neprestano mijenja. U takvim okolnostima, minimalna ekvivalentna inercijska konstanta distribucijske mreže H_{dg} može se procijeniti na temelju pohranjene energije u različitim DOIE sustavima opremljenim superkondenzatorima:

$$H_{dg} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{dg}} H_i \cdot S_{iN}}{\sum_{i=1}^{N_{dg}} S_{iN}} \quad (6.6)$$

Gdje su:

- H_i – inercijska konstanta,
- S_{iN} – nazivna snaga i -tog DOIE,
- N_{dg} – broj povezanih DOIE opremljenih superkondenzatorima.

U slučaju pametne distribucijske mreže, agregator ili ODS ima mogućnost prilagoditi vrijednosti H_{dg} upravljajući vrijednostima H_i i -tog DOIE mijenjajući kapacitet superkondenzatora od nule do maksimalne vrijednosti. Zbog toga se između OPS-a i agregatora/ODS-a može uspostaviti dogovor kojim se poštuje traženi minimalni H_{dg} . Kako bi se izgradilo međusobno povjerenje između OPS-a i ODS-a/agregatora, inercijska svojstva svakog DOIE sustava unutar distribucijske mreže, kao i način na koji su povezani, trebaju biti stalno dostupni i vidljivi putem registra DOIE sustava koji mora biti transparentan svim sudionicima. Izraz (6.6) može se potvrditi samo u slučajevima značajnih frekvencijskih događaja, kada se visoki ROCOF koristi za procjenu značajnog pada aktivne snage pomoću izraza (6.2), a zatim se taj pad uspoređuje s izmjerenim podacima unutar prve sekunde nakon frekvencijskog događaja.

6.2. Zaglađivanje aktivne snage (ograničenje brzine rampe)

U posljednjih nekoliko godina, povećani udio DOIE sustava s pretvaračima promjenjive izlazne snage doveo je do značajnih varijacija u neto opterećenju, mijenjajući postojeći obrazac opterećenja na razini cijelog sustava. Ove varijacije, koje se uglavnom događaju u vremenskim okvirima od nekoliko minuta do nekoliko sati, više ne mogu biti zanemarene od strane OPS-ova. Potrebno ih je pravilno kompenzirati kako bi se održalo ravnotežu snage u prijenosnom sustavu, što zahtijeva povećanje rezervi za održavanje frekvencije (FCR) i rezervi za obnovu frekvencije

(FRR). Kako bi se ove varijacije ublažile, sve veći broj Mrežnih pravila u posljednje vrijeme uvodi specifična ograničenja za izbjegavanje ekstremnih brzina promjena aktivne snage, posebno u slabijim mrežama. Primjerice, OPS-ovi u Irskoj i Portoriku postavili su posebna ograničenja brzine promjene snage za fotonaponske i vjetroelektrane. Na primjer, Puerto Rico Electric Power Authority (PREPA) zahtijeva da fluktuacije snage iz obnovljivih izvora budu manje od 10% nominalne snage u minuti. U drugim zemljama, poput Meksika, propisi uvode još stroža ograničenja, od 1% do 5% u minuti. Treba napomenuti da se ova pravila odnose na DOIE sustave s značajnim promjenama izlazne snage koji su povezani na prijenosnu mrežu. Kako bi se riješio problem velikih promjena snage koje proizlaze iz DOIE sustava povezanih na distribucijsku mrežu, PREPA predlaže korištenje velikih sustava za skladištenje energije (ESS) na točki međusobnog povezivanja distribucijske i prijenosne mreže. Važno je napomenuti da ovi zahtjevi imaju ulogu podrške sustavu i stoga nisu plaćeni.

DOIE sustavi s promjenjivim izlaznim snagama mogu kontrolirati brzinu promjene električne snage korištenjem odgovarajućih upravljačkih algoritama. Neki vjetroagregati, opremljeni naprednim upravljačkim jedinicama, poput upravljanja inercijom rotora i podešavanja kuta nagiba lopatica, mogu regulirati brzinu promjene snage (također poznato kao zaglađivanje snage) bez potrebe za dodatnim sustavom za skladištenje energije (ESS). Međutim, u tom slučaju dolazi do većeg opterećenja mehaničkog sustava. S druge strane, korištenjem dodatnog brzog sustava za skladištenje energije (FSS), i vjetroagregati i fotonaponski sustavi mogu postići zaglađivanje snage bez smanjenja izlazne snage ili povećanog mehaničkog opterećenja. Upotreba FSS-a, poput superkondenzatora, omogućuje zaglađivanje snage u vremenskim razdobljima od nekoliko milisekundi do nekoliko sekundi. Sporiji ESS sustavi, kao što su baterijski sustavi za skladištenje energije, prikladni su za zaglađivanje snage u vremenskim okvirima od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Stupanj zaglađivanja snage ovisi o primijenjenom algoritmu i veličini ESS-a.

Brzina promjene aktivne snage na mjestu zajedničkog priključka (PCC) DOIE sustava definira se na sljedeći način:

$$ramp = \frac{\Delta P_{el}(t)}{\Delta t} \quad (6.7)$$

gdje je

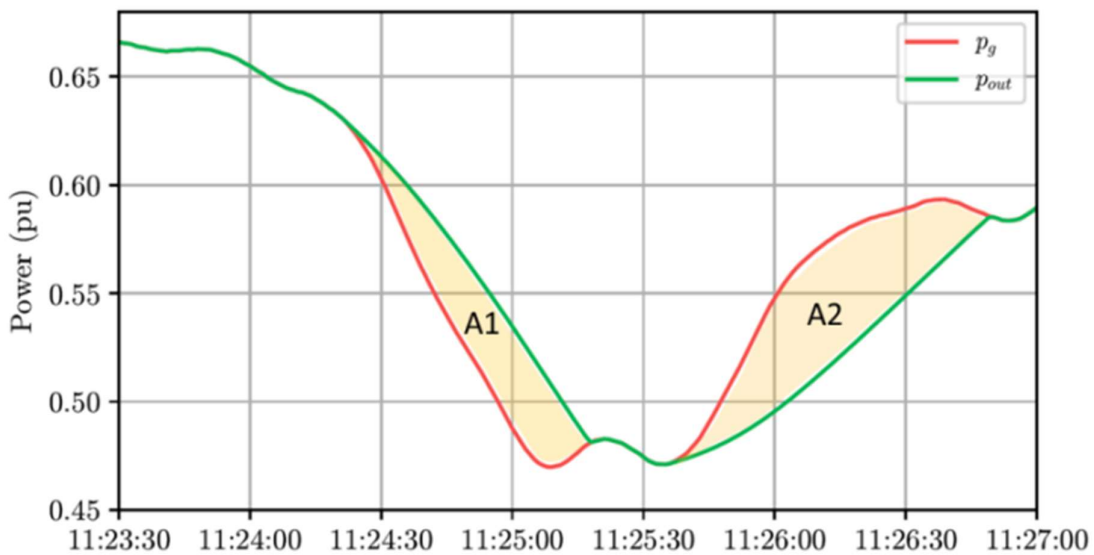
$$\Delta P_{el}(t) = \frac{P_{el}(t) - P_{el}(t - \Delta t)}{P_{N,DOIE}} \quad (6.8)$$

- $\Delta P_{el}(t)$ per-unit (p.u.) – varijacija električne aktivne snage,
- $P_{N,DOIE}$ – nazivna snaga DOIE.

Ograničenje brzine rampe (eng. Ramp rate limitation - RRL) može se kvantificirati kao razlika između stvarne električne snage $P_{el}(t)$ koju sustav proizvodi i aktivne snage generirane izvorom $P_g(t)$:

$$RRL = \int_{t_1}^{t_2} |P_{el}(t) - P_g(t)| dt \quad (6.9)$$

s vremenskim intervalom $t_2 - t_1$ definiranim kao razdoblje unutar kojeg iznos RRL treba biti kvantificiran, npr. jedan sat ili jedan dan. Rezultirajuća vrijednost RRL može se prikazati kao suma zasjenjenih područja A1 i A2 prikazanih na *Slika 6.3.*.



Slika 6.3. Stvarna (crvena) i zaglađena (zelena) el. snaga FNE 239 kWp tijekom kratkog vremenskog intervala [3]

Važno je da upravljački algoritam redovito, npr. svakih nekoliko sekundi, vraća stanje napunjenosti FSS-a u početno stanje kako bi DOIE mogao održavati zadano ograničenje brzine rampe. Ovaj preduvjet na kraju rezultira sljedećim izrazom:

$$\int_{t_1}^{t_2} (P_{el}(t) - P_g(t)) dt = 0 \quad (6.10)$$

Ako su gubici u FSS-u, pripadajućem DC/DC konverteru i DC/AC konverteru zanemareni. Ako se gubici uzmu u obzir, tada integral u izrazu (6.10) treba biti jednak ukupnim gubicima kroz vremenski period $t_2 - t_1$.

7. TEHNIČKI UVJETI ZA PRUŽANJE POMOĆNIH USLUGA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

7.1. Tehnički uvjeti za pružanje pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu

Kako bi pružatelj mogao nuditi uslugu distribucijskom sustavu, moraju biti ispunjeni uvjeti kako unutar postrojenja korisnika mreže koji pruža uslugu, tako i unutar same distribucijske mreže.

7.1.1. Tehnički uvjeti u mreži

Tehnički uvjeti koje treba ispuniti u distribucijskoj mreži kako bi se usluge mogle pružati distribucijskom sustavu uključuju:

- postrojenje koje pruža uslugu mora biti povezano na SN mrežu,
- obračunsko mjerno mjesto (OMM) mora biti opremljeno naprednim brojilom električne energije koje omogućuje daljinsko očitavanje,
- kritična točka mora biti vidljiva u SCADA sustavu distribucijskog operatora,
- treba biti uspostavljena komunikacija između SCADA sustava i postrojenja pružatelja usluge.

7.1.2. Tehnički uvjeti koje mora ispuniti postrojenje pružatelja usluge

Tehnički uvjeti koje mora ispuniti postrojenje pružatelja usluge za pružanje usluga distribucijskom sustavu su:

- ostvareno je izravno procesno – komunikacijsko povezivanje postrojenja pružatelja usluge sa SCADA sustavom i razmjena svih propisanih informacija i signala, nezavisno pruža li se usluga samostalno ili posredstvom agregatora,
- kod usluge odzivom radne ili jalove snage minimalna ponuđena usluga (raspon snage unutar kojeg se pružatelj obvezuje pružati uslugu) iznosi 1 MW odnosno 1MVar, u što se ne računa raspon obvezne potpore naponu jalovom snagom,
- postrojenje pružatelja usluge je osposobljeno za kontinuirano pružanje usluge u trajanju od minimalno dva sata (osim za crni start),
- postrojenje pružatelja usluge je osposobljeno za automatski odziv pružanjem usluge na aktivacijski nalog operatora distribucijskog sustava,

- postrojenje pružatelja postiže aktivirani odziv u punom iznosu u vremenu ne duljem od propisanog vremena aktivacije T_a ,
- postrojenje pružatelja usluge je opremljeno za primanje aktivacijskog naloga od operatora distribucijskog sustava za pružanje usluge i za prenošenje potrebnih informacija. Operator distribucijskog sustava javno će objaviti na svojim mrežnim stranicama potrebne tehničke specifikacije kojima se omogućuje prijenos informacija,
- oprema pružatelja usluge ima IP sučelje koje podržava protokol IEC 60870-5-104 (server i klijent).

7.1.3. Tehnički uvjeti za komunikaciju

Da bi pružatelj usluga mogao uspješno pružati usluge distribucijskom sustavu, potrebno je osigurati odgovarajuću razinu automatizacije i komunikacijske povezanosti između postrojenja pružatelja i distribucijskog sustava. Za uspostavljanje komunikacijske veze mogu se koristiti različita tehnička rješenja, uključujući UTP kabel, optička, UHF radio u licenciranom području, licencirani mikrovalni radio link, podatkovne usluge javnih operatera, Wi-Fi, ili GPRS M2M.

7.2. Komunikacija između postrojenja pružatelja usluge i mreže

Komunikacijska veza koja povezuje postrojenje pružatelja usluge i točku razmjene podataka s operatorom distribucijskog sustava, uključujući kablove i krajnje uređaje, u potpunosti je pod vlasništvom i odgovornošću pružatelja usluge. Ta točka razmjene podataka može biti fizička infrastruktura ili komunikacijski koncentrator koji se nalazi na lokaciji operatora distribucijskog sustava, putem kojeg se osigurava sigurna povezanost sa SCADA sustavom.

Obavezno je korištenje komunikacijskog protokola IEC 60870-5-104 za povezivanje s operatorom distribucijskog sustava. Oprema u susretnom postrojenju i komunikacijski koncentrator su vlasništvo i odgovornost operatora distribucijskog sustava. Preporučena minimalna brzina komunikacijske veze između postrojenja pružatelja usluge i susretnog postrojenja ili koncentratora operatora je 64 kbit/s.

Operator distribucijskog sustava redovito ažurira i objavljuje na svojoj web stranici "Načelni popis signala koji se u stvarnom vremenu razmjenjuju između postrojenja pružatelja usluge i operatora distribucijskog sustava". Ovaj popis signala može se razlikovati ovisno o specifičnostima

pojednog postrojenja, njegovim tehničkim mogućnostima ili odluci operatora. Signali označeni kao "Opcionalno" ovise o tehničkoj opremljenosti postrojenja i dogovoru između pružatelja usluge i operatora distribucijskog sustava.

7.3. Komunikacija između mreže i SCADA sustava operatora distribucijskog sustava

Komunikacijska veza, uključujući kablove i krajnje uređaje, koja povezuje postrojenje ili komunikacijski koncentrator sa SCADA sustavom, u potpunosti je pod vlasništvom i odgovornošću operatora distribucijskog sustava. Za komunikaciju je obavezno korištenje protokola IEC 60870-5-104. Preporučena minimalna brzina te veze između postrojenja ili koncentratora i SCADA sustava operatora je 64 kbit/s.

7.4. Sinkronizacija vremena

Sinkronizacija sata realnog vremena procesne opreme kod pružatelja usluge je u nadležnosti pružatelja usluge ili se ostvaruje kroz poruke IEC60870-5-104 protokola.

7.5. Načini pružanja usluge u distribucijskom sustavu

Usluge koje pružatelji pružaju distribucijskom sustavu odzivom snage su:

- pomoćna usluga regulacije napona jalovom snagom $Q = f(U)$,
- pomoćna usluga regulacije napona radnom snagom $P = f(U)$,
- usluga regulacije opterećenja radnom snagom $P = f(I)$ - usluga koja se pruža za upravljanje zagušenjem u distribucijskom sustavu redišpečiranjem.

Načini pružanja usluga distribucijskom sustavu odzivom snage su:

- po voznom redu po regulacijskoj krivulji ili u zadanoj radnoj točki,
- po aktivacijskom nalogu za pogon u zadanoj radnoj točki.

7.6. Vozni red

Vozni red predstavlja raspored pružanja usluga za svaku kritičnu točku, prema potrebama distribucijskog sustava, i uspostavlja se za svakog pružatelja usluga s kojim je sklopljen ugovor.

Riječ je o rasporedu smjena za pružatelje usluga. Pružatelj usluga mora stalno pružati usluge u skladu s ugovorenim uvjetima, po regulacijskoj krivulji ili na zadanoj radnoj točki, tijekom cijelog trajanja svoje smjene. Svaka smjena mora trajati najmanje 2 sata. Operator distribucijskog sustava određuje vozni red za svakog pružatelja usluga. Ako je pružatelj usluga agregator, on će definirati vlastiti „pod“vozni red, koji određuje kako će korisnici mreže koje agregira pružati uslugu kako bi se osigurao agregirani odziv u skladu s ugovorenim uvjetima i voznim redom. Bez obzira na to je li usluga agregirana ili ne, operator distribucijskog sustava kontinuirano dostavlja postrojenju pružatelja usluga informacije o izmjerenoj kritičnoj veličini. Ove informacije služe kao aktivacijski nalog za pružanje usluga u skladu s regulacijskom krivuljom tijekom smjene, bilo samostalno ili prema „pod“voznom redu ako je usluga agregirana. Operator distribucijskog sustava mora pružatelju usluga obavijestiti o promjenama voznog reda najmanje tjedan dana unaprijed, osim ako je drugačiji rok ugovoren. Ako obavijest o promjeni voznog reda stigne kasnije od ugovorenog roka, pružanje usluge prema tom novom voznom redu smatra se nenajavljenim.

7.7. Regulacijska krivulja

Regulacijska krivulja određuje koliko usluge treba pružiti na temelju kapaciteta koje nudi pružatelj usluga i trenutnih potreba mreže u kritičnoj točki. Ova krivulja prilagođava količinu usluge prema izmjerenim uvjetima u kritičnoj točki, koji se određuju kao 15-minutni prosjek mjerenja napona ili struje. Ako se pojave okolnosti u mreži koje onemogućuju postrojenju pružatelja usluga da utječe na kritičnu veličinu u toj točki, operator distribucijskog sustava je dužan blokirati pružanje usluge. Ove okolnosti nastaju zbog promjena u konfiguraciji mreže, odnosno promjena u njenom uklopnom stanju.

7.7.1. Regulacijska krivulja pomoćne usluge regulacije napona jalovom snagom

Pomoćna usluga regulacije napona jalovom snagom po regulacijskoj krivulji definirana je odzivom:

$$Q = f(U) \quad (7.1)$$

gdje su:

- Q - jalova snaga na OMM pružatelja usluge,
- U - napon u kritičnoj točki mreže.

pri čemu *Slika 7.1.* raspon pružanja usluge jalovom snagom (iznosi $Q1$ i $Q4$) ovise o mogućnostima postrojenja pružatelja usluge (njih nudi ponuditelj) i o obveznoj potpori naponu (iznosi $Q2$ i $Q3$), dok granični iznosi napona ($U1$ do $U4$) ovise o naponskim okolnostima u kritičnoj točki. Granične napone definira operator distribucijskog sustava.

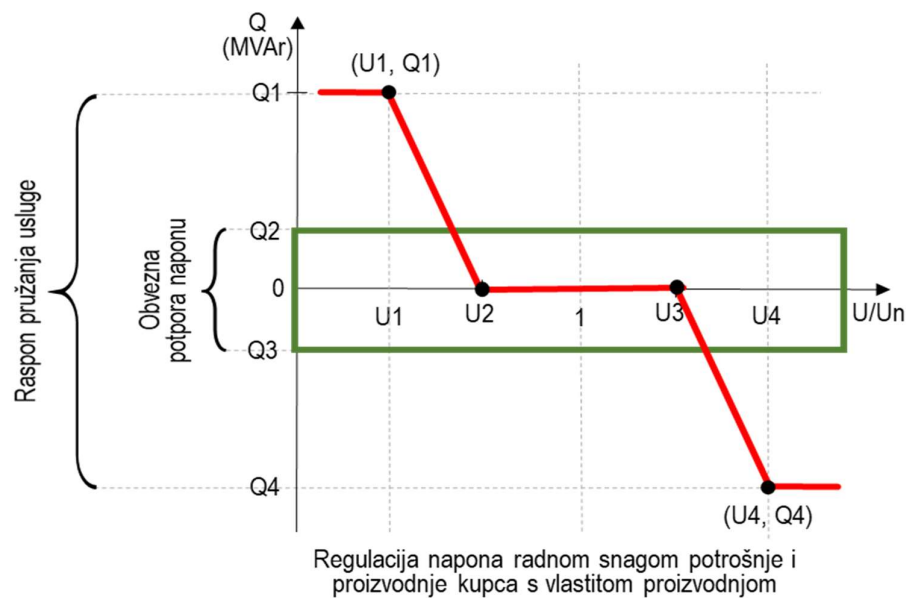
Ugovoreni raspon pružanja usluge iznosi:

$$\Delta Q_{ug} = Q1 + IQ4I - (Q2 + IQ3I) \quad (7.2)$$

gdje su:

- ΔQ_{ug} , - ugovoreni raspon jalove snage,
- $Q1$ i $Q4$ - određuju raspon ponuđene usluge,
- $Q2$ i $Q3$ - određuju raspon obvezne potpore naponu.

Ugovoreni raspon za pružanje pomoćne usluge regulacije napona jalovom snagom definiran je kao razlika između ponuđenog raspona usluge i raspona obvezne potpore naponu. Taj ugovoreni raspon snage ΔQ_{ug} koristi se za obračunavanje pružene pomoćne usluge prema regulacijskoj krivulji. Regulacijska krivulja za ovu pomoćnu uslugu prikazana je na *Slika 7.1.*. Odziv prema krivulji unutar raspona obvezne potpore naponu obavezan je za pružatelja usluge, ali se taj dio ne računa kao pomoćna usluga.



Slika 7.1. Regulacijska krivulja $Q = f(U)$ regulacije napona jalovom snagom [8]

7.7.2. Regulacijska krivulja pomoćne usluge regulacije napona radnom snagom

Pomoćna usluga regulacije napona radnom snagom po regulacijskoj krivulji definirana je odzivom:

$$P = f(U), P \leq P_{pr} \quad (7.3)$$

gdje su:

- P - radna snaga na OMM pružatelja usluge,
- U - napon u kritičnoj točki mreže,
- P_{pr} - priključna snaga.

Raspon pružanja usluge radnom snagom (vrijednosti $P1$ i $P2$) ovisi o mogućnostima postrojenja pružatelja usluge, koje definira ponuditelj. S druge strane, granične vrijednosti napona ($U1$ do $U2$) ovise o naponskim uvjetima u kritičnoj točki, a te granične napone određuje operator distribucijskog sustava.

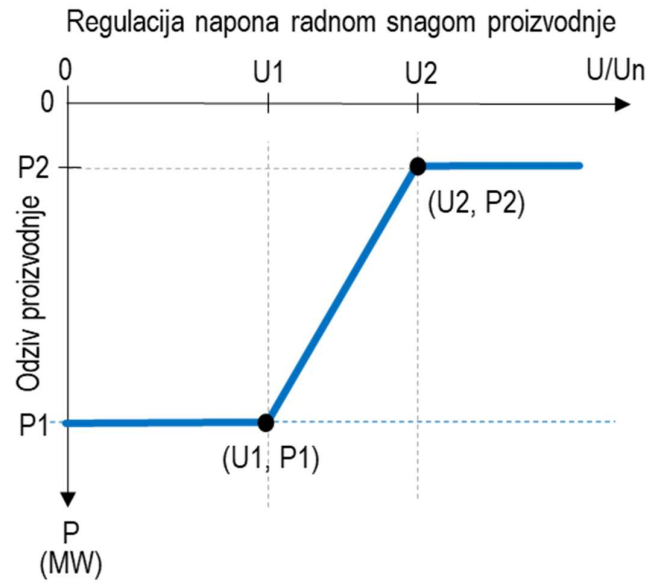
Ugovoreni raspon pružanja usluge za regulaciju napona radnom snagom iznosi:

$$\Delta P_{ug} = P1 - P2 \quad (7.4.)$$

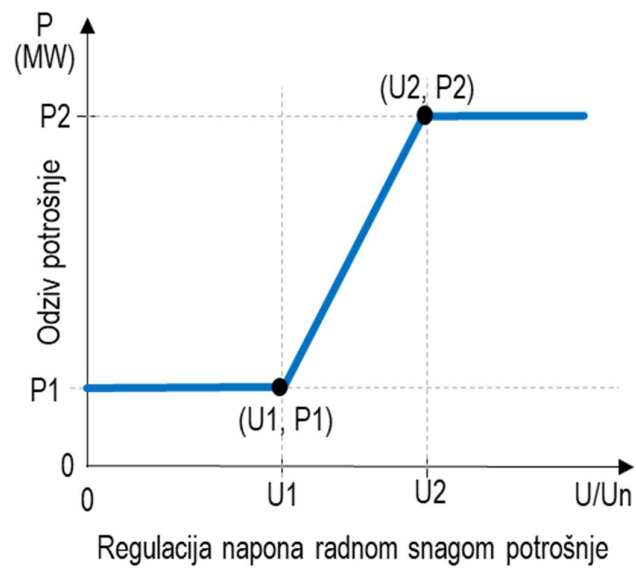
gdje:

- ΔP_{ug} - ugovoreni raspon radne snage,
- $P1$ i $P2$ - određuju raspon ponuđene usluge.

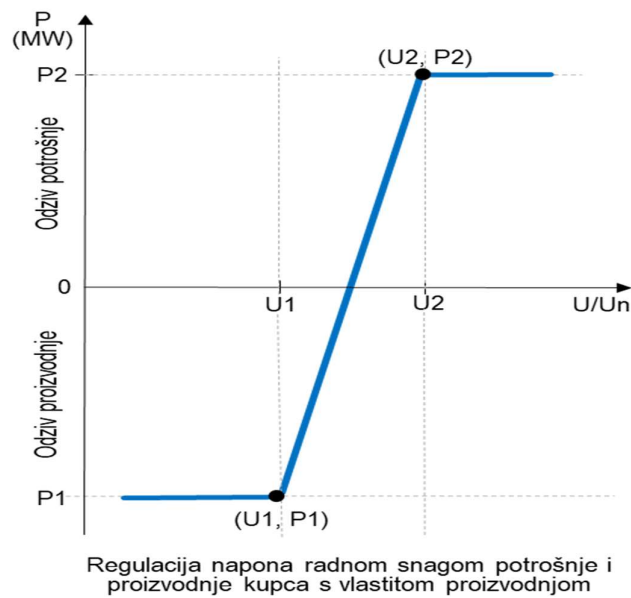
Ugovoreni raspon za pružanje pomoćne usluge regulacije napona radnom snagom mora odgovarati rasponu ponuđene usluge i biti unutar granica odobrene priključne snage. Taj ugovoreni raspon snage, označen kao ΔP_{ug} , koristi se za obračunavanje pomoćne usluge prema regulacijskoj krivulji. Raspon ponuđene usluge regulacije napona radnom snagom može se razlikovati ovisno o vrsti korisnika mreže, što je prikazano na *Slika 7.2.*, *Slika 7.3.* i *Slika 7.4.*.



Slika 7.2. Regulacijska krivulja $P = f(U)$ regulacije napona radnom snagom proizvodnje [8]



Slika 7.3. Regulacijska krivulja $P = f(U)$ regulacije napona radnom snagom potrošnje kupca [8]



Slika 7.4. Regulacijska krivulja $P = f(U)$ regulacije napona radnom snagom proizvodnje i potrošnje kupca s vlastitom proizvodnjom [8]

7.7.3. Regulacijska krivulja usluge regulacije opterećenja radnom snagom pri upravljanju zagušenjem redispečiranjem

Usluga regulacije opterećenja radnom snagom po regulacijskoj krivulji definirana je odzivom:

$$P = f(I), P \leq P_{pr} \quad (7.5)$$

gdje su:

- P - radna snaga na OMM pružatelja usluge [MW],
- I - struja u kritičnoj točki mreže,
- P_{pr} - priključna snaga .

Raspon pružanja usluge radnom snagom ovisi o mogućnostima postrojenja koje pružatelj usluge može ponuditi. Granični iznos opterećenja (II), koji predstavlja preopterećenje, određuje se prema nazivnoj struji u kritičnoj točki, dok smjer struje pri tom graničnom opterećenju ovisi o smjeru toka snage u toj kritičnoj točki. Operator distribucijskog sustava definira granično opterećenje i kritični smjer u toj kritičnoj točki.

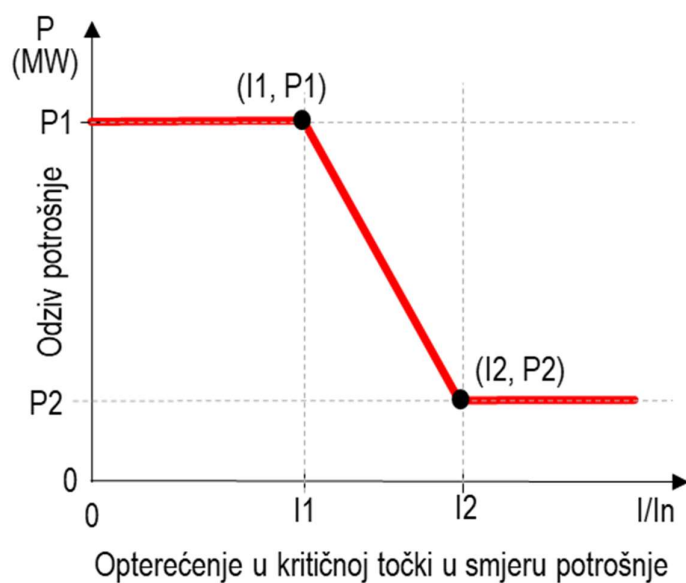
Ugovoreni raspon pružanja usluge za regulaciju opterećenja radnom snagom proizvodnje iznosi:

$$\Delta P_{ug} = P1 - P2 \quad (7.6.)$$

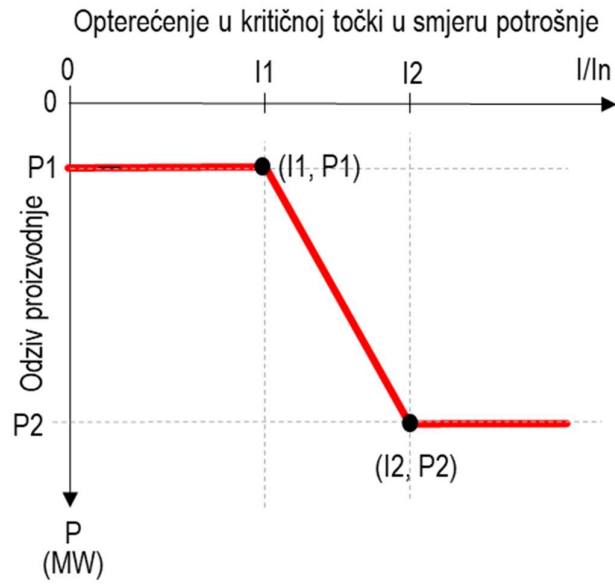
gdje:

- $P1$ i $P2$ određuju raspon ugovorene usluge [MW].

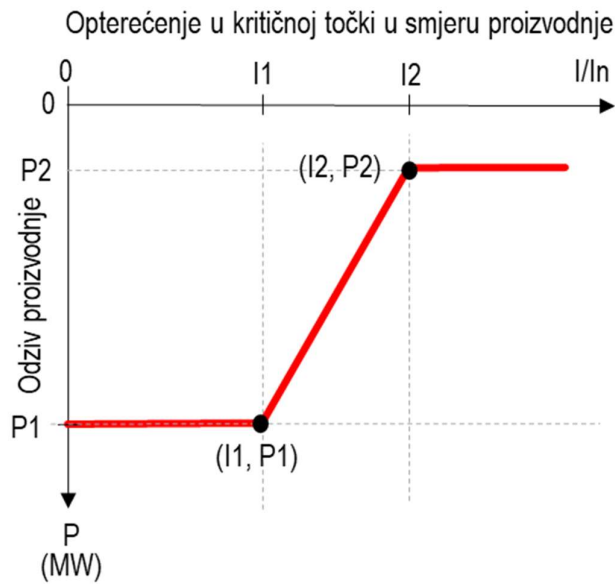
Ugovoreni raspon za pružanje pomoćne usluge regulacije opterećenja radnom snagom mora odgovarati rasponu ponuđene usluge i biti unutar granica odobrene priključne snage. U slučaju zagušenja u smjeru potrošnje, pruža se usluga smanjenja potrošnje (*Slika 7.5.*) i povećanja proizvodnje (*Slika 7.6.*). Ako se zagušenje dogodi u smjeru proizvodnje, pruža se usluga smanjenja proizvodnje (*Slika 7.7.*) i povećanja potrošnje (*Slika 7.8.*).



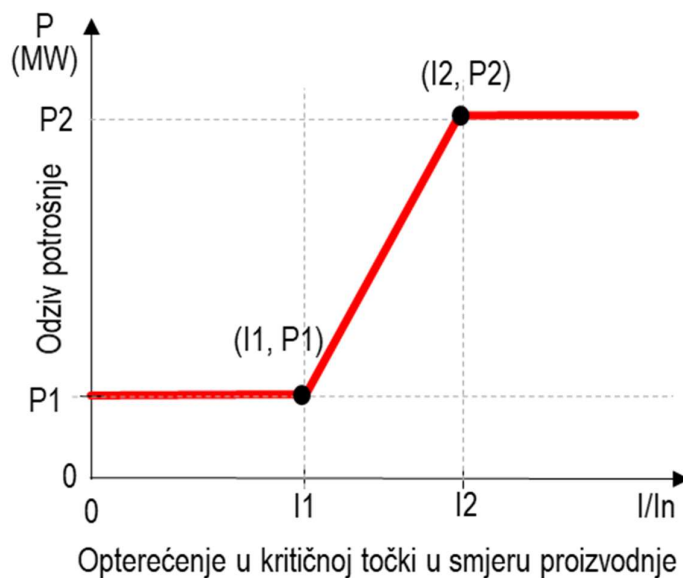
Slika 7.5. Regulacijska krivulja $P = f(I)$ regulacije opterećenja smanjenjem radne snage potrošnje pri povećanju opterećenja u smjeru potrošnje [8]



Slika 7.6. Regulacijska krivulja $P = f(I)$ regulacije opterećenja povećanjem radne snage proizvodnje pri povećanju opterećenja u smjeru potrošnje [8]



Slika 7.7. Regulacijska krivulja $P = f(I)$ regulacije opterećenja smanjenjem radne snage proizvodnje pri povećanju opterećenja u uzlaznom smjeru [8]



Slika 7.8. Regulacijska krivulja $P = f(I)$ regulacije opterećenja povećanjem radne snage potrošnje pri povećanju opterećenja u uzlaznom smjeru [8]

Slika 7.5. i *Slika 7.7.* prikazuju regulacijsku krivulju karakterističnu za pružatelja usluge ako zagušenje u kritičnoj točki nastaje u smjeru u kojem pružatelj doprinosi opterećenju.

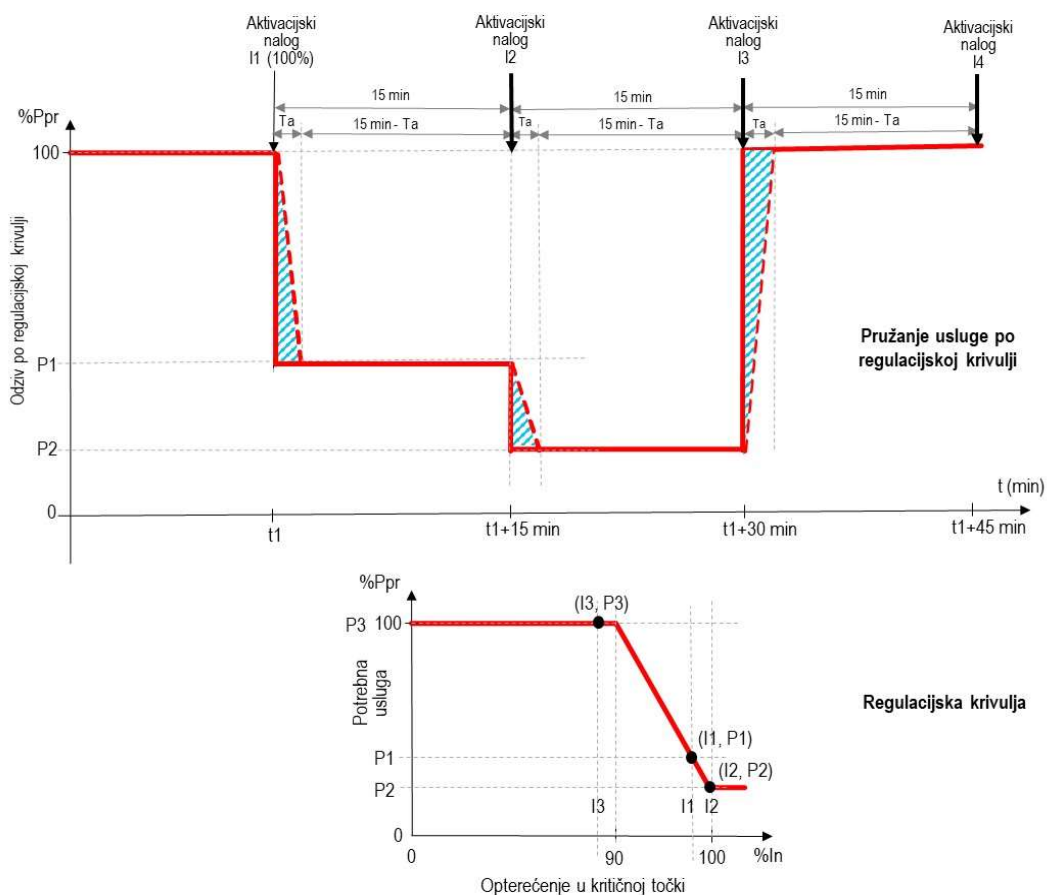
Slika 7.6. i *Slika 7.8.* prikazuju regulacijsku krivulju karakterističnu za pružatelja usluge ako zagušenje u kritičnoj točki nastaje u smjeru suprotnom od smjera u kojem pružatelj doprinosi opterećenju.

7.7.4. Princip pružanja usluge po regulacijskoj krivulji

Operator distribucijskog sustava sklapa dugoročni ugovor s pružateljem usluge, obično na godinu dana, za pružanje određene usluge. Tijekom trajanja ugovora, postrojenje pružatelja kontinuirano prima podatke iz SCADA sustava o izmjerenoj kritičnoj veličini, poput napona ili struje, u kritičnoj točki. Ovi podaci predstavljaju 15-minutni prosjek i dostavljaju se pružatelju u realnom vremenu, svakih 15 minuta. Svaki primljeni podatak o izmjerenoj kritičnoj veličini smatra se nalogom za aktivaciju prema regulacijskoj krivulji, pri čemu se prilagođavaju snaga P ili Q u skladu s izmjerenim vrijednostima. Dakle, pružatelj prima novi aktivacijski nalog svakih 15 minuta.

Period u kojem pružatelj pruža uslugu prema regulacijskoj krivulji definiran je voznim redom. U tom periodu pružatelj mora reagirati na svaki primljeni aktivacijski nalog unutar ugovorenog raspona. Izvan tog perioda, pružatelj može zanemariti sve aktivacijske naloge.

Za svaki aktivacijski nalog tijekom pružanja usluge, postrojenje mora dosegnuti novu radnu točku unutar propisanog ili ugovorenog vremena aktivacije T_a , koje traje najviše 2 minute. Primjer pružanja usluge upravljanja opterećenjem u smjeru proizvodnje putem smanjenja radne snage prema voznom redu i regulacijskoj krivulji prikazan je na *Slika 7.9.*



Slika 7.9. Prikaz pružanja usluge tijekom 45 minuta regulacije opterećenja radnom snagom (gornja slika) po priloženoj regulacijskoj krivulji (donja slika) [8]

Opis *Slika 7.9.*:

Kada se izmjeri vrijednost struje u kritičnoj točki u trenutku $t1$ i iznosi $I1$, pružatelj usluge mora u roku od najviše 2 minute nakon primitka tog podatka prilagoditi svoju radnu točku na $P1$ prema zadanoj regulacijskoj krivulji. To znači da mora smanjiti svoju radnu snagu $s Ppr$ na $P1$ i zadržati se na toj točki dok ne primi novu izmjerenu vrijednost struje $I2$, što će se dogoditi 15 minuta kasnije, odnosno u trenutku $t = t1 + 15$ minuta.

Ako I_2 pokazuje povećanje opterećenja ($I_2 > I_1$), to služi kao aktivacijski nalog za prelazak na radnu točku P_2 , pa pružatelj dodatno smanjuje proizvodnju i prelazi s P_1 na P_2 unutar maksimalno 2 minute. Pružatelj ostaje na toj točki P_2 sve dok ne primi novu izmjerenu vrijednost I_3 u trenutku $t = t_1 + 30$ minuta.

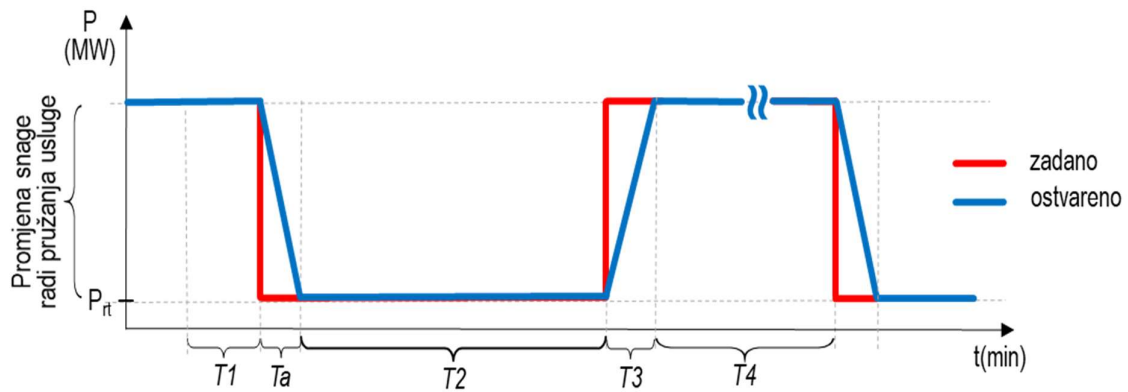
Ako I_3 pokazuje značajno smanjenje opterećenja u odnosu na I_2 , nova radna točka koju pružatelj treba doseći je P_3 . Budući da P_3 predstavlja priključnu snagu, pružatelj može raditi bez ograničenja i slobodno odabrati radnu točku unutar te snage, sve dok ne stigne novi aktivacijski nalog I_4 u trenutku $t = t_1 + 45$ minuta.

Ovisno o vrijednosti I_4 , pružatelj će morati prilagoditi radnu točku na P_4 , i tako će nastaviti postupati prema aktivacijskim nalogima svakih 15 minuta, sve do kraja svoje smjene koja traje najmanje 2 sata. Tijekom ta dva sata pružatelj mora reagirati na osam uzastopnih aktivacijskih naloga. Nakon završetka smjene, pružatelj će i dalje primati podatke o izmjerenim vrijednostima struje, ali budući da mu je smjena završila, te naloge će ignorirati do početka svoje sljedeće smjene.

7.7.5. Pružanje usluge po aktivacijskom nalogu za pogon u zadanoj radnoj točki

Pružatelj usluge može pružati uslugu na temelju aktivacijskog naloga koji izda operator distribucijskog sustava za rad u određenoj radnoj točki. Ova opcija se primjenjuje kada je potrebno regulirati kritičnu veličinu u kritičnoj točki koja nije obuhvaćena postojećim ugovorom, prema unaprijed dogovorenom ili nenajavljenom voznom redu. Aktivacija na ovaj način dopuštena je samo ako je odziv prethodno testiran tijekom kvalifikacijskog ispitivanja i ako je radna točka definirana u Ugovoru o pružanju usluge. Pružanje usluge prema aktivacijskom nalogu za rad u određenoj radnoj točki podliježe dogovoru i ugovoru između operatora sustava i pružatelja usluge, uzimajući u obzir tehničke mogućnosti postrojenja i potrebe sustava.

Parametri koji definiraju ovu vrstu pružanja usluge prikazani su na *Slika 7.10.* i regulirani su ugovorom o pružanju usluge distribucijskom sustavu.



Slika 7.10. Definiranje usluge pogonom u zadanoj radnoj točki [8]

Na Slika 7.10. simboli imaju slijedeće značenje:

- $T1$ - trajanje pripreme za pružanje usluge,
- Ta - trajanje aktivacije usluge,
- $T2$ - trajanje pružanja usluge,
- $T3$ - trajanje deaktivacije usluge,
- $T4$ - minimalno vrijeme odmora između dva pružanja usluge,
- P_{rt} - usluga - ugovorena radna snaga u radnoj točki.

Ugovoreni raspon pružanja usluge pogonom u zadanoj radnoj točki može varirati od jedne ugovorene radne točke (s konstantnim ugovorenim iznosom P_{rt}) do više radnih točaka, ovisno o tehničkim mogućnostima postrojenja pružatelja usluge i potrebama distribucijskog sustava.

Vrijeme aktivacije, označeno kao Ta , predstavlja vrijeme potrebno od trenutka zaprimanja aktivacijskog naloga do dostizanja punog iznosa aktivirane usluge. Ta ne smije biti duže od 2 minute.

Minimalno trajanje pružanja usluge ($T2$) pogonom u zadanoj radnoj točki iznosi 2 sata. Usluga pogonom u zadanoj radnoj točki definirana je odzivom:

$$P = f(t), t \in [t_0, t_0 + T2] [MW] P_{rt} \quad (7.7.)$$

$$f(t) = P_{rt} [MW] \quad (7.8.)$$

$$T2 < 2 \text{ sata}$$

gdje su:

- P - radna snaga na OMM pružatelja usluge, pri čemu je $P \leq P_{pr}$,
- P_{pr} - priključna snaga,
- P_{rt} - radna snaga u radnoj točki - konstantna tijekom $T2$ - trajanja pružanja usluge,
- t - trajanje pružanja usluge.

Usluga se definira iznosom odziva, odnosno radnom točkom, i trajanjem tijekom kojeg pružatelj usluge mora kontinuirano održavati svoj pogon na zadanoj radnoj točki. Raspon snage unutar kojeg se pogon mora održavati ključan je za obračun usluge prema toj zadanoj radnoj točki:

$$\Delta P_{ug} = P_{pr} - P_{rt} \quad (7.9.)$$

gdje su:

- P_{pr} - priključna snaga,
- P_{rt} - ugovorena radna snaga u radnoj točki – iznos usluge - konstantna tijekom trajanja pružanja usluge (tijekom $T2$).

Ova usluga može se koristiti za regulaciju napona radnom snagom ili za upravljanje zagušenjem putem redispečiranja.

Operator distribucijskog sustava mora dostaviti najavu aktivacije usluge pogona u zadanoj radnoj točki barem tjedan dana unaprijed, osim ako ugovorom nije definiran drugačiji rok. Ako se aktivacijski nalog za pogon u zadanoj radnoj točki dostavi kasnije od propisanog ili ugovorenog roka za najavu, pružanje usluge smatra se nenajavljenim.

8. MODEL SUSTAVA ZA REGISTRACIJU I NABAVU POMOĆNIH USLUGA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

U nastavku će na primjeru Slovenije biti prikazan model sustava za registraciju i nabavu pomoćnih usluga.

8.1. Ugrađeni sustavi

U proces naručivanja pomoćnih usluga uključeno je više različitih sustava. Ključni među njima su sustavi za nabavu i upravljanje pomoćnih usluga. Ovi sustavi međusobno razmjenjuju poruke koristeći protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) preko posredničkog sustava koji omogućava pretvorbu između MQTT-a i Apache Kafke. Pretvorene poruke se zatim šalju na Kafka server Informatike. Neke poruke namijenjene agregatorima i ELES-u potrebno je konvertirati u MQTT format, jer sustavi na strani agregatora podržavaju samo taj format.

8.1.1. Sustav za rasterećenje mreže

Sustav za rasterećenje mreže (SRO) koristi se za registraciju pomoćnih usluga, unos novih zahtjeva za pomoćne usluge, prikupljanje ponuda od korisnika mreže ili agregatora, organiziranje dražbi i sklapanje ugovora, te na kraju za izračun aktivacija i izvještavanje obračunskih podataka. SMS obavijesti o novim zahtjevima i rezultatima aukcija šalju se putem web usluge (WS) na sustavu AONI, koji je zadužen za automatsko obavještavanje o ispadima. Za izračun prilagođene energije i troškova usluga koristi se REST API povezan s platformom za upravljanje velikim podacima, odakle dolaze 15-minutna mjerenja. Komunikacija sa sustavom za upravljanje fleksibilnošću i Informatikom odvija se putem MQTT poruka, koje se prenose preko sustava za posredovanje redova poruka.

8.1.2. Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama

Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama djeluje kao proširenje SCADA sustava. Budući da SCADA ne može primiti minutna mjerenja s brojila električne energije putem MQTT protokola, razvijen je ovaj sustav za upravljanje pomoćnim uslugama. On gotovo u stvarnom vremenu prima ta mjerenja preko sustava za posredovanje poruka i koristi ih za izračun aktivacija. Iz SCADA sustava dobiva podatke o statusima prekidača u mreži, dok od Enterprise Service Bus-a (ESB)

prima vremenske prognoze, koje su potrebne za izračunavanje toplinske snage transformatora u transformatorskoj stanici (TP). Za slanje SMS obavijesti o aktivacijama koristi web uslugu povezanu sa sustavom AONI. Uspostavljena je i veza s mjernim centrom za slanje naredbi za prebacivanje izlaza na brojlama električne energije. Ovaj sustav također prima informacije iz SRO-a o potpisanim ugovorima i ograničenjima aktivacija. Njegova glavna funkcija je aktiviranje sustava u slučaju preopterećenja gotovo u stvarnom vremenu. Nakon završetka aktivacije, sustav šalje podatke o aktivaciji sustavu za rasterećenje mreže.

8.2. Tijek od registracije pomoćnih usluga do obračuna usluge

U nastavku je prikazan cijeli proces, koji obuhvaća registraciju pomoćnih usluga na mjernom mjestu, prijavu na poziv za pomoćnim uslugama, samu aktivaciju te završni obračun usluge.

8.2.1. Registracija pomoćnih usluga

Korisnik koji želi nuditi pomoćne usluge mora se prvo registrirati na portalu Moj elektro. Nakon što se uspješno prijavi, odabire mjerno mjesto za pružanje pomoćnih usluga i u odjeljku za registraciju unosi planiranu snagu pomoćnih usluga te kontakt podatke za primanje obavijesti o novim pozivima. Obavijesti se mogu slati putem e-maila ili SMS-a. Minimalna snaga pomoćnih usluga koju se može ponuditi je 1 kW, dok maksimalna snaga može biti do polovice priključne snage. Ako korisnik želi koristiti agregator za pružanje usluge, treba označiti opciju za agregatora i odabrati odgovarajućeg agregatora s kojim je ranije dogovorio suradnju. U tom slučaju, korisnik daje ovlast agregatoru da u njegovo ime prijavljuje ponude i sklapa ugovor s Elektrom Ljubljana. Ako korisnik koristi agregatora, obavijesti o novim pozivima bit će dostavljene samo agregatoru. Uneseni podaci šalju se u sustav za rasterećenje mreže putem MQ poruka označenih kao "Registracija". Osim tih podataka, prenose se i informacije o točki priključenja, uključujući podatke iz RTP-a i SN izvod.

8.2.2. Prijava na poziv za pomoćne usluge

Elektro Ljubljana analizira povijesne podatke o opterećenju mreže i planove kako bi identificirao područja koja bi mogla koristiti pomoćne usluge za rješavanje preopterećenja. Za ta područja objavljuje poziv za pružatelje pomoćnih usluga. Svi relevantni dokumenti i uvjeti poziva dostupni su na web stranici. Parametri poziva, poput područja mreže, razdoblja korištenja pomoćnih usluga, ukupne raspisane snage, minimalne ponuđene snage, roka za predaju ponuda, vremena provedbe

usluge, vremena reakcije, maksimalnog trajanja aktivacija, broja dnevnih aktivacija i maksimalne cijene, unose se u SRO sustav i šalju putem MQ poruka (Tender) na Informatiku za prikaz na portalima Moj elektro i CEEPS.

Korisnici mreže koji su registrirani za pomoćne usluge i nalaze se u području za koje je objavljen poziv, primaju obavijesti putem e-maila i/ili SMS-a. Oni korisnici koji su povezani s dijelom mreže na kojem je objavljen poziv, ali još nisu registrirani kao pružatelji pomoćnih usluga, moraju se najprije registrirati kako bi mogli sudjelovati u pozivu. Prijave i ponuđene cijene unose se na portalu Moj elektro u odjeljku za prijavu na poziv. Samo oni korisnici koji su u području za koje je poziv objavljen mogu unijeti cijenu bez poreza za aktiviranu energiju.

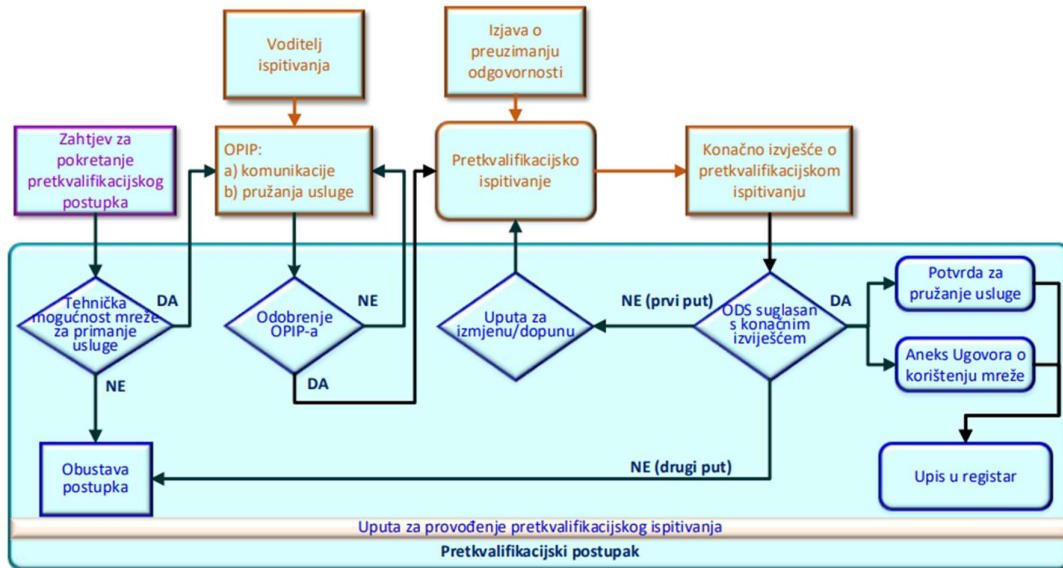
Ako je korisnik ovlastio agregatora da pruža pomoćnu uslugu u njegovo ime, samo će agregator moći prijaviti ponude i unijeti cijene za njegovo mjerno mjesto. Agregator će unositi cijene ponuda za odobrena mjernim mjestima putem portala CEEPS.

Sve unesene informacije koje korisnici ili agregatori unesu prenose se putem MQ poruka (Application) u SRO.

8.2.3. Javna dražba

Tijekom otvorenog poziva, SRO sustav svakodnevno uspoređuje sve pristigle ponude i obavještava one ponuditelje čije ponude nisu odabrane, temeljem cijene aktivirane energije i raspisane snage. Obavijesti se šalju putem e-maila i/ili SMS-a, a ponuditeljima se omogućuje da tijekom trajanja poziva smanje ponuđenu cijenu.

Nakon završetka roka za prijavu, održava se finalna javna dražba. Svaki korisnik ili agregator koji je podnio ponudu bit će obaviješten o ishodu – hoće li njegova ponuda biti prihvaćena ili odbijena. Oni koji uspješno prođu javnu dražbu dobit će fizički ugovor na potpisivanje. Nakon potpisa ugovora, oni postaju pružatelji pomoćnih usluga. Prije nego što ugovor stupi na snagu, provjerava se može li brojilo omogućiti daljinsko očitavanje i registraciju potrošnje svakih 15 minuta, što je potrebno za obračun prilagođene energije. Za napredne korisnike, aktivacijski signal može se poslati putem relejnog kontakta na brojilu (npr. za isključivanje potrošača kao što je toplinska pumpa). Potpisani ugovori evidentiraju se u SRO sustavu, koji potom šalje podatke o ugovorima u sustav za rasterećenje mreže i u Informatiku.



Slika 8.1. Pretkvalifikacijski postupak za pružanje usluga ODS-u [4]

Sposobnost postrojenja za pružanje usluga potvrđuje se putem pretkvalifikacijskog postupka. Ovaj postupak bi trebao biti sličan postupku provjere sposobnosti postrojenja pri povezivanju na mrežu. Plan i program ispitivanja operativnosti, uključujući ispitivanje sposobnosti za pružanje pomoćnih usluga, definiraju metode ispitivanja i parametre koji se provjeravaju, te se na temelju tih informacija provodi ispitivanje tijekom probnog rada. Dio sposobnosti može se potvrditi i odgovarajućim certifikatima opreme, ako operator to odluči. Nakon uspješno završenog pretkvalifikacijskog postupka, mjerno mjesto se upisuje u registar fleksibilnih korisnika mreže, a odnosi na sučelju definiraju se u uputama za vođenje pogona, koje su dio Ugovora o korištenju mreže. Cjelokupni pretkvalifikacijski postupak treba biti dodatno razrađen dokumentom koji opisuje upute za provođenje pretkvalifikacije, a koji bi trebao definirati načela i obrasce za sve dokumente u ovom postupku. Struktura pretkvalifikacijskog postupka prikazana je na Slika 8.1..

Ugovor za pružanje određenih pomoćnih usluga trebao bi sadržavati nekoliko ključnih informacija. To uključuje podatke o stranama koje potpisuju ugovor, trajanje ugovora, osnovne karakteristike usluge, upute za pružanje usluge, način obračuna i plaćanja, uvjete i visinu kazni za neispunjavanje obveza, način rješavanja prigovora i sporova te informacije o raskidu ugovora. Pružatelj usluga može koristiti samo ona postrojenja za koja ima ovlaštenje za upravljanje. Budući da je ugovor o korištenju mreže vezan uz vlasništvo, pružatelj može koristiti samo postrojenja na obračunskim mjernim mjestima za koja je sklopljen ugovor o korištenju mreže. Agregator, kao tržišni sudionik, može pružati usluge s postrojenjima korisnika mreže s kojima ima ugovor o

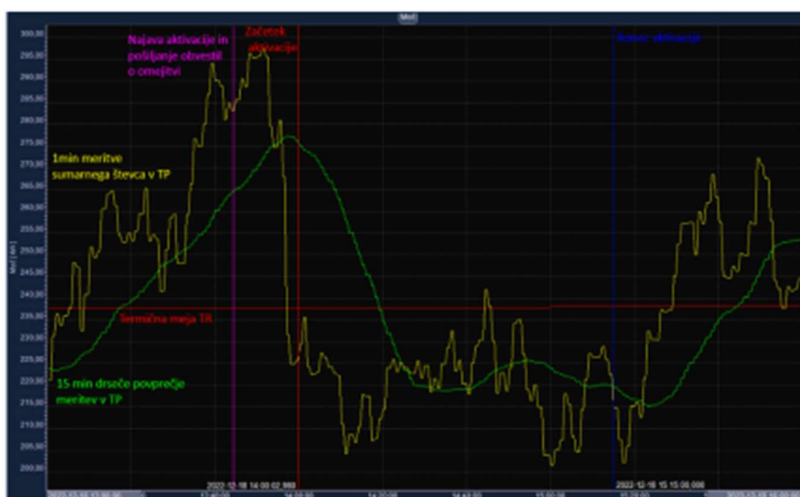
agregaciji za određeno mjerno mjesto. Također, pružatelj usluge može koristiti postrojenja na mjernim mjestima za koja je prenio prava i obveze iz ugovora o korištenju mreže.

Prema pravilima, nabava usluga često se vrši izravnim dogovorom zbog lokalne prirode pomoćnih usluga, što može smanjiti učinkovitost tržišne nabave. Cijene se obično definiraju ugovorom. Ako se usluga nabavlja putem tržišta, ugovor je nužan za sudjelovanje u javnom pozivu za nabavu usluge.

8.2.4. Aktivacije

Na *Slika 8.2.* prikazano je kako se snaga na niskonaponskoj strani transformatora mijenja tijekom aktivacije. Žutom linijom prikazane su minutne mjere radne snage koje šalje glavno brojilo u transformator. Zbog varijabilnosti minutnih mjerenja, koristi se 15-minutni prosjek, prikazan zelenom linijom. Crvena linija označava termičku granicu transformatora, koja ovisi o temperaturi. Kada 15-minutni prosjek prekorači ovu granicu više od 15 minuta, sustav šalje obavijest o aktivaciji i ograničenja mreži. Korisnicima koji nude pomoćne usluge sustav šalje e-mail i/ili SMS obavijesti, dok se agregatori aktiviraju putem MQ poruka i moraju poslati potvrdu. Aktivacija počinje 15 minuta nakon obavijesti. Za napredne korisnike, sustav može uključiti relejni izlaz na brojilu da isključi uređaje. Tijekom aktivacije, sustav prati mjerenja u stvarnom vremenu i po potrebi prilagođava snagu.

Slika 8.2. također prikazuje primjer gdje agregator upravlja 17 toplinskih pumpi koje su povezane na transformator s 160 korisnika. Nakon završetka aktivacije, toplinske pumpe se ponovno uključuju, što uzrokuje značajan porast snage nakon aktivacije.



Slika 8.2. Primjer aktivacije [9]

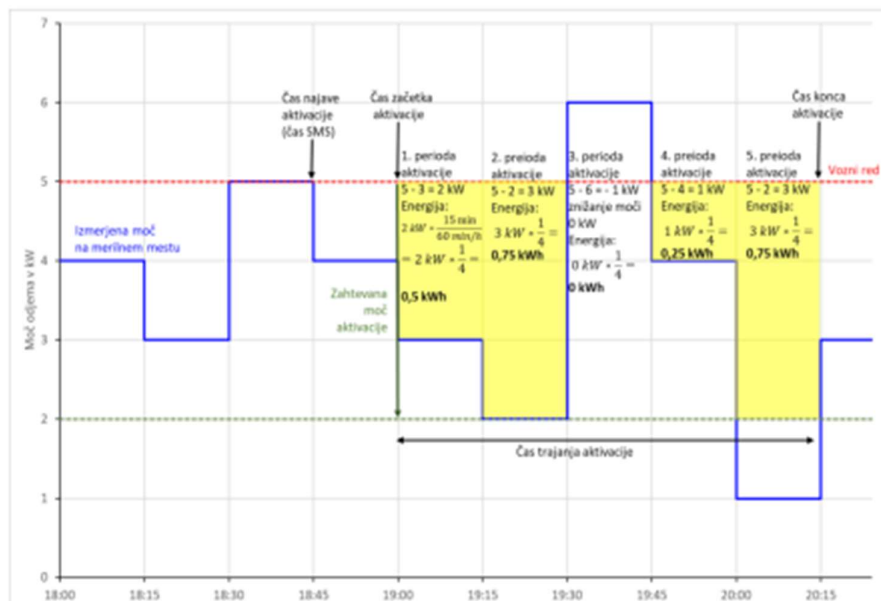
Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama dostavlja SRO-u informacije o aktiviranom ugovoru, uključujući vrijeme kada je aktivacija započela i završila, kao i potrebnu snagu.

8.2.5. Obračun pomoćne usluge i metodologija izračuna prilagođene energije

SRO sustav izračunava aktiviranu energiju koristeći podatke iz sustava za upravljanje pomoćnim uslugama i 15-minutne mjere sa aktiviranih mjernih mjesta. Za dobivanje tih mjerenja šalje zahtjev putem REST API-ja s ID-jem mjernog mjesta i datumom, a API vraća 96 mjerenja potrošnje energije. Izračun aktivirane energije koristi 15-minutne mjere na obračunskim mjernim mjestima korisnika koji pruža pomoćnu uslugu, bilo samostalno ili preko agregatora. Metodologija je pojednostavljena kako bi se olakšao brzi izračun. Aktivirana energija u svakom 15-minutnom razdoblju tijekom aktivacije dobiva se kao razlika između predviđene i stvarno izmjerene snage, pri čemu se ta razlika dijeli s 4 kako bi se pretvorila iz snage u energiju za 15-minutni period. Predviđena snaga je snaga u posljednjem 15-minutnom razdoblju prije aktivacije i vrijedi za cijelo trajanje aktivacije. Ako je razlika između izmjerene i predviđene snage veća od zahtijevane snage, u obračun se uzima samo razlika do zahtijevane snage. Ako je izmjerena snaga veća od predviđene snage, ta negativna razlika se ne uračunava u ukupnu aktiviranu energiju.

Na Slika 8.3. prikazan je primjer gdje pružatelj pomoćne usluge nudi 3 kW snage. Plavom linijom prikazana je izmjerena snaga na mjernom mjestu, crvenom isprekidanom linijom predviđena snaga prije aktivacije, a zelenom isprekidanom linijom očekivana snaga smanjena za ponuđenu pomoćnu uslugu. Žuta površina prikazuje aktiviranu energiju smanjene potrošnje. Ako nedostaju mjerenja

tijekom aktivacije, pretpostavlja se da je smanjenje snage u svakom 15-minutnom razdoblju jednako ponuđenoj snazi (ili zahtijevanoj snazi u slučaju agregatora).



Slika 8.3. Obračun aktivirane energije [9]

Pružatelj pomoćnih usluga ima pravo na nagradu za pružanje ove usluge. Iznos nagrade računa se kao aktivirana energija u kWh pomnožena s cijenom po kWh navedena u ugovoru. Ako je pružatelj fizička osoba, tvrtka Elektro Ljubljana isplatit će nagradu za aktivacije svakih tri mjeseca na bankovni račun koji je naveden u ugovoru. Pružatelj će moći vidjeti podatke o aktiviranoj energiji i iznos nagrade na portalu Moj elektro. Ako je pružatelj pravna osoba, nagrada će biti isplaćena na temelju računa koji izda, za energiju aktiviranu u prethodna tri mjeseca. Ti podaci bit će vidljivi na portalu Moj elektro. Ako je pružatelj agregator, on će izdati račun za energiju aktiviranu u prošlom mjesecu, a ti podaci bit će vidljivi na portalu CEEPS. Korisnici koji pružaju pomoćnu uslugu preko agregatora neće imati uvid u aktiviranu energiju i iznose nagrade na portalu Moj elektro, jer agregator nije obavezan obavijestiti koja su konkretna mjerna mjesta aktivirana.

8.3. Obavješćavanje o ograničenjima u mreži (sustav semafora)

Svaki korisnik mreže priključen na distribucijsku mrežu može svoju pomoćnu uslugu ponuditi i operateru prijenosne mreže ELES-u za upravljanje frekvencijom. Da bi se uskladila koordinacija između prijenosne i distribucijske mreže, uveden je sustav obavješćavanja o ograničenjima na distribucijskoj mreži, poznat kao sustav semafora.

Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama prati opterećenje mreže gotovo u stvarnom vremenu. Kada dođe do preopterećenja, šalje obavijesti putem MQ poruka svim agregatorima i ELES-u. Te poruke uključuju informacije kao što su ID upravitelja distribucijskog sustava, ID preopterećene transformatorske stanice te popis mjernih mjesta i njihov status. Ako sustav za upravljanje pomoćnim uslugama ne može precizno odrediti koji korisnik nudi pomoćnu uslugu operateru prijenosne mreže ili agregatoru, šalje popis svih mjernih mjesta povezanih s preopterećenim dijelom mreže.

Ako dođe do preopterećenja, poruka označava *decrease=true* i *increase=false*, što znači da pružatelji pomoćnih usluga koji nude svoje usluge ELES-u ili agregatoru ne smiju povećavati potrošnju, ali mogu smanjiti opterećenje ili povećati proizvodnju. Kada se opterećenje smanji, sustav šalje poruku sa *decrease=true* i *increase=true*, što omogućuje pružateljima pomoćnih usluga i agregatorima da koriste pomoćnu uslugu bez ograničenja. Ako se napetost poveća zbog solarnih elektrana, poruka će sadržavati *decrease=false* i *increase=true*, što znači da pružatelji pomoćnih usluga mogu dodatno povećati potrošnju, ali ne smiju povećati proizvodnju. Ove informacije pomažu ELES-u da razumije ako agregator ne može ispuniti zahtjev zbog ograničenja na distribucijskoj mreži.

9. PRIMJER: SUSTAV ZA RASTEREĆENJE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

U nastavku je prikazan primjer sustava za rasterećenje distribucijske mreže u Sloveniji koji, u suradnji sa sustavom za jedinstveni pristup mjernim podacima, omogućava prikupljanje pomoćnih usluga unutar cijelog područja distribucijske mreže. Sustav odabire najpovoljnije ponude, a nakon što se potpišu ugovori, upravlja aktivacijom korisnika i na kraju obračunava uslugu.

Korisnici priključeni na distribucijsku mrežu mogu također nuditi svoju pomoćnu uslugu operateru prijenosne mreže, koji se bavi upravljanjem frekvencijom. Ako je distribucijska mreža već opterećena, elektrooperater će obavijestiti relevantne strane (ELES i agregatore) da ne bi trebali dodatno pogoršati stanje u mreži aktiviranjem pomoćnih usluga. Da bi se izbjegle ovakve situacije, elektrooperater koristi sustav semafora za obavještanje o ograničenjima u mreži.

9.1. Primjer implementacije sustava za rasterećenje distribucijske mreže

Zbog sve veće upotrebe električne energije za grijanje i punjenje električnih vozila, mreža se suočava s preopterećenjima koja bi se mogla ublažiti pomoću pomoćnih usluga korisnika. Pomoćna usluga u ovom kontekstu znači privremeno smanjenje potrošnje električne energije na određenom mjestu. Da bismo omogućili ovu vrstu pomoćne usluge, unaprijedili smo Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama (Flexibility server) integrirajući ga s Sustavom za rasterećenje mreže. Ovaj sustav, koji surađuje sa Sustavom za jedinstven pristup mjerilnim podacima, omogućuje prikupljanje pomoćnih usluga od korisnika u distribucijskoj mreži. Cilj je pružiti dobar primjer i drugim elektrooperaterima. Sustav će omogućiti korisnicima da sudjeluju na tržištu pomoćnih usluga, a proces prikupljanja ponuda bit će transparentan i temeljen na javnoj dražbi. Sve će biti integrirano u planiranje razvoja mreže.

Većina komunikacije odvija se putem MQ poruka preko MQ poslužitelja. SRO razmjenjuje podatke sa Sustavom za upravljanje pomoćnim uslugama i SEDMp koristeći MQ poruke.

Flexibility server prima mjerne podatke s brojila putem MQ poruka i razmjenjuje ih s SRO-om. Također šalje poruke za upravljanje semaforima i aktivira agregatore tijekom aktivacija. Ova shema može se koristiti i za druge elektrooperatere, a funkcionalnost Sustava za upravljanje pomoćnim uslugama i SRO-a može biti osigurana iz SCADA sustava ili iz zasebnog sustava.

Funkcionalnosti sustava mogu se ukratko podijeliti u tri glavne kategorije:

1. Objava aukcija i prikupljanje ponuda – ovo uključuje proces organiziranja aukcija i prikupljanje ponuda od zainteresiranih strana,
2. Aktiviranje i obračun usluge – ovaj dio pokriva stvarnu aktivaciju usluga i kasnije obračunavanje na temelju pruženih usluga,
3. Obavješćavanje o ograničenjima na distribucijskoj mreži – ovdje se radi o informiranju o svim ograničenjima ili problemima na mreži.

9.2. Prikupljanje korisnika s pomoćnim uslugama

Prikupljanje pomoćnih usluga odvija se prema sljedećim koracima:

1. Priprema poziva: proces započinje u odjelu za planiranje i razvoj mreže, koji priprema poziv za pružanje pomoćnih usluga. Poziv je dostupan u PDF formatu na web stranici tvrtke i na fleksibilen.si. Korisnici koji su zainteresirani mogu se informirati o detaljima.
2. Registracija i prijava: ako korisnik želi ponuditi svoju pomoćnu uslugu elektrooperateru, mora se registrirati na platformi Moj elektro (SEDMp). Tamo označava koje su opcije prilagodbe dostupne na njegovim mjernim mjestima, koliko pomoćnih usluga može ponuditi i kako će komunikacija u vezi s pomoćnim uslugama teći. Ovi podaci se šalju SRO-u putem MQ (message queue) sustava.
3. Analiza i objava: kada poziv za pružanje pomoćnih usluga istekne, odjel za planiranje analizira sve pristigle ponude i na temelju trenutnih opterećenja i planiranih poboljšanja mreže identificira dijelove mreže gdje je potrebna pomoćna usluga. Priprema tehničke i komercijalne uvjete poziva i objavljuje ih na fleksibilen.si, uključujući vremenske intervale, trajanje usluge i metodologiju za izračun prilagođene energije.
4. Prikupljanje ponuda: odabrani dijelovi mreže se unose u SRO, koji obavještava korisnike priključene na te dijelove da mogu unijeti svoje ponude. Korisnicima koji su se prijavili za SMS obavijesti šalju se poruke putem AONI sustava. Oni zatim pregledavaju uvjete i unose svoje ponude za prilagođenu energiju. Ako ponude premaše konkurentne cijene, obavještavaju se da su njihove ponude neprihvatljive. Ako korisnik ne može samostalno ponuditi pomoćnu uslugu, može to učiniti preko agregatora.
5. Odabir i ugovaranje: kada istekne rok za prijavu ponuda, SRO odabire najpovoljnije ponude i priprema ugovore za korisnike/agregatore. Nakon što korisnici potpišu ugovore, oni se evidentiraju u SRO-u. Te informacije se potom šalju na Moj elektro. Proces odabira pomoćnih usluga završava prijenosom podataka u Flexibility server, koji upravlja aktiviranjem korisnika, dok SRO nije odgovoran za samu aktivaciju.

9.3. Aktivacija pomoćnih usluga za potrebe distribucijske mreže

Pomoćne usluge koriste se za rješavanje problema preopterećenja transformatora u trafostanici (TP). Na trafostanici su instalirana zbirna brojila koja prikupljaju podatke o snazi i naponu s lokacija gdje korisnici nude pomoćne usluge. Ove podatke sustav koristi za praćenje opterećenja transformatora. Kada sustav detektira preopterećenje, aktivira korisnike povezane s tim TP-om.

Korisnici se mogu aktivirati putem SMS poruke ili e-maila, ovisno o njihovom odabiru. U nekim slučajevima, sustav može automatski isključiti uređaje poput grijača vode ili toplinskih pumpi. Ako pomoćnu uslugu nudi agregator, sustav šalje poruku agregatoru kako bi ga aktivirao. Tijekom aktivacije, sustav prati samo ukupnu potrošnju u trafostanici, a ne individualne korisnike.

Nakon što se aktivacija završi, sustav obavještava SRO koji su korisnici ili agregatori bili aktivirani, s kojom snagom i u kojem vremenskom razdoblju. SRO zatim traži 15-minutna mjerenja s brojila putem Platforme za obradu velikih podataka (POVP). POVP šalje natrag mjerenja za ta brojila. Ako je brojilo PLC, mjerenja se prenose sljedeći dan. SRO koristi primljena mjerenja za izračunavanje prilagođene energije i objavljuje rezultate na portalu Moj elektro, gdje korisnici mogu provjeriti uspješnost svoje pomoćne usluge. Na kraju mjeseca, SRO priprema izvješće i šalje podatke na Obračun, koji izdaje kredit korisnicima ako su uspješno aktivirali pomoćnu uslugu. Plaća se samo prilagođena energija, a ne fiksni iznos za pripravnost.

9.4. Obavještavanje o ograničenjima u mreži (sustav semafora)

Svaki korisnik priključen na distribucijsku mrežu može svoju pomoćnu uslugu ponuditi i operatoru prijenosne mreže, koji upravlja sistemskim uslugama poput reguliranja frekvencije. Stoga je važno koordinirati rad između prijenosne i distribucijske mreže, posebno zato što sistemske usluge mogu uzrokovati povećanje potrošnje ili smanjenje proizvodnje kod raspršenih izvora.

Da bi se spriječili problemi, uveden je sustav obavještavanja o ograničenjima poznat kao sustav semafora. Ako bi povećanje potrošnje od strane korisnika zbog sistemskih usluga dovelo do preopterećenja distribucijske mreže, odgovorni elektrooperater će poslati crveno svjetlo za korištenje pomoćne usluge u pozitivnom smjeru za područje mreže na kojem je korisnik priključen. Sustav za upravljanje pomoćnim uslugama koristi sažete podatke o opterećenju i

položajima prekidača kako bi obavijestio agregatore i sistemskog operatora prijenosne mreže (ELES) o preopterećenju. Ako se uvede registar pomoćnih usluga, informacije će se slati u registar, a zatim distribuirati sudionicima na tržištu pomoćnih usluga. U budućnosti, svaki elektrooperater će imati vlastiti sustav semafora, a obavijesti će se slati putem SEDMp sustava i MQ poruka.

10. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu obrađene su pomoćne usluge u elektroenergetskom distribucijskom sustavu. Pomoćne usluge podrazumijevaju sposobnost korisnika elektroenergetskog sustava da prilagode svoju potrošnju ili proizvodnju električne energije u skladu s vanjskim signalima. Ove usluge uključuju upravljanje energijom kroz prilagođavanje potrošnje, proizvodnje i skladištenja energije. Pomoćne usluge obuhvaćaju različite funkcije unutar distribucijskog elektroenergetskog sustava, kao i rješavanje problema zagušenja u mreži. Operator distribucijskog sustava može koristiti ove usluge, koje nude korisnici sustava ili treće strane, kako bi osigurao siguran i pouzdan rad mreže.

Vrste nefrekvencijskih pomoćnih usluga su: usluge ponovne uspostave sustava (sposobnost otočnog pogona, sposobnost crnog starta), usluge regulacije napona (regulacija napona jalovom snagom, regulacija napona djelatnom snagom) i fizikalna svojstva sinkronih generatora (brzodjelujuća jalova struja, struja kratkog spoja, tromost).

U frekvencijske pomoćne usluge ubrajamo: primarnu, sekundarnu i tercijarnu regulaciju frekvencije, brzu frekvencijsku rezervu, regulacijsku rezervu i sustavne usluge za održavanje frekvencije.

Sljedeća podjela pomoćnih usluga je na postojeće i nove pomoćne usluge. U postojeće pomoćne usluge ubrajaju se: upravljanje frekvencijom, upravljanje naponom i jalovom snagom, mogućnost crnog starta/obnove mreže i otočni pogon. Nove pomoćne usluge u elektroenergetskom distribucijskom sustavu uključuju inercijski sustav, primarni frekvencijski odziv, zaglađivanje aktivne snage (ograničavanje brzine rampe), razmjenu jalove snage za regulaciju napona, prolazak kroz kvar i doprinos uklanjanju kvara i ublažavanje harmonika napona.

Kako bi pružatelj mogao nuditi uslugu distribucijskom sustavu, moraju biti ispunjeni uvjeti kako unutar postrojenja korisnika mreže koji pruža uslugu, tako i unutar same distribucijske mreže. Da bi se usluge mogle pružati distribucijskom sustavu, postrojenje mora ispuniti određene tehničke uvjete unutar distribucijske mreže. Konkretno, postrojenje koje pruža uslugu treba biti spojeno na sredjenaponsku (SN) mrežu, a obračunsko mjerno mjesto (OMM) mora biti opremljeno naprednim električnim brojilom koje omogućava daljinsko očitavanje. Kritična točka mora biti vidljiva u SCADA sustavu operatora distribucije, uz uspostavljenu komunikaciju između SCADA sustava i postrojenja pružatelja usluge. Za postrojenje pružatelja usluge, tehnički uvjeti uključuju izravnu procesno-komunikacijsku povezanost sa SCADA sustavom i razmjenu svih propisanih informacija i signala, bilo da se usluga pruža samostalno ili putem agregatora. U slučaju usluge

regulacije radne ili jalove snage, minimalna ponuđena usluga iznosi 1 MW ili 1 MVar, ne uključujući obveznu potporu naponu jalovom snagom. Postrojenje mora biti sposobno kontinuirano pružati uslugu najmanje dva sata (osim za crni start), kao i automatski reagirati na aktivacijski nalog operatora. Postrojenje mora postići puni odziv unutar propisanog vremena aktivacije i biti opremljeno za primanje i prijenos aktivacijskih naloga i potrebnih informacija od operatora. Operator distribucijskog sustava će javno objaviti tehničke specifikacije potrebne za prijenos informacija, a oprema pružatelja usluge mora imati IP sučelje koje podržava protokol IEC 60870-5-104 (server i klijent). Kako bi pružatelj usluga mogao uspješno pružati usluge distribucijskom sustavu, potrebno je osigurati odgovarajuću razinu automatizacije i komunikacijske povezanosti između postrojenja pružatelja i distribucijskog sustava. Dan je pregled regulacijskih krivulja za pomoćne usluge regulacije napona jalovom snagom, regulacije napona radnom snagom, regulacije opterećenja radnom snagom pri upravljanju zagušenjem redispečiranjem te je dano objašnjenje principa pružanja usluge po regulacijskoj krivulji.

U radu je objašnjen model sustava za registraciju i nabavu pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu. Sustav za rasterećenje mreže (SRO) koristi se za registraciju pomoćnih usluga, unos novih zahtjeva za pomoćne usluge, prikupljanje ponuda od korisnika mreže ili agregatora, organiziranje dražbi i sklapanje ugovora, te na kraju za izračun aktivacija i izvještavanje obračunskih podataka. Na primjeru Slovenije objašnjena je implementacija sustava za rasterećenje distribucijske mreže koji, u suradnji sa sustavom za jedinstveni pristup mjernim podacima, omogućava prikupljanje pomoćnih usluga unutar cijelog područja distribucijske mreže. Sustav odabire najpovoljnije ponude, a nakon što se potpišu ugovori, upravlja aktivacijom korisnika i na kraju obračunava uslugu. Korisnici priključeni na distribucijsku mrežu mogu također nuditi svoju pomoćnu uslugu operateru prijenosne mreže, koji se bavi upravljanjem frekvencijom. Ako je distribucijska mreža već opterećena, elektrooperater će obavijestiti relevantne strane (ELES i agregatore) da ne bi trebali dodatno pogoršati stanje u mreži aktiviranjem pomoćnih usluga. Da bi se izbjegle ovakve situacije, elektrooperater koristi sustav semafora za obavještavanje o ograničenjima u mreži.

Ovaj rad pridonosi razumijevanju uloge pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu, njihov pregled te mogućnosti njihove primjene.

LITERATURA

- [1] "Mrežna pravila distribucijskog sustava", HEP–OPERATOR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA d.o.o, 2024.
- [2] "Sistemska obratovalna navodila za distribucijski sistem električne energije", Sistemski operater distribucijskega omrežja električne energije d.o.o, Maribor, 2022.
- [3] Međugorac, M. i dr.: "Pomoćne usluge u elektroenergetskom distribucijskom sustavu ", HRO CIGRE, Šibenik, 2021.
- [4] Dimnjaković, R. i dr.: "Nefrekvencijske pomoćne usluge u distribucijskom sustavu ", HRO CIGRE, Šibenik 2023.
- [5] "Metodologija i kriteriji planiranja razvoja distribucijske mreže", HEP–OPERATOR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA d.o.o, s Interneta, https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Planovi_razvoja/Kriteriji_metodologija_planiranja.pdf, listopad 2013.
- [6] Bhowmick, S.: "Smart Grid: The Electrical Grid of the Future", s Interneta, <https://circuitdigest.com/article/smart-grid-the-electrical-grid-of-the-future>, 10.siječanj 2022.
- [7] "Princip rada jednostavnog autonomnog fotonaponskog sistema", s Interneta, https://www.bazgin.hr/autonomni_otocni_fotonaponski_solarni_sistemi.html
- [8] "Tehnički uvjeti za pružanje usluga distribucijskom sustavu", HEP–OPERATOR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA d.o.o.
- [9] Turha, B.: "Sistem za registraciju in nabavo prožnosti", CIGRE Slovenija, Bled 2023.
- [10] Turha, B.: "Razvoj sistema za razbremenjevanje omrežja in fleksibilen.si", CIGRE Slovenija, Laško 2021.

Sažetak i ključne riječi

Tema ovog rada su pomoćne usluge u distribucijskom sustavu. Pomoćne usluge odnose se na mogućnost korisnika sustava da prilagodi svoju potrošnju ili proizvodnju električne energije kao odgovor na vanjski signal. To uključuje upravljanje potrošnjom, proizvodnjom i skladištenjem energije. Pomoćne usluge obuhvaćaju sustavne usluge unutar distribucijskog elektroenergetskog sustava te rješavanje zagušenja u mreži. U ovom radu objašnjen je princip vođenja pogona distribucijskom sustava te su definirane postojeće i nove pomoćne usluge u distribucijskom sustavu. Definirani su i tehnički uvjeti za pružanje pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu. Distribuirani izvori energije mogu podržavati elektroenergetski distribucijski ili prijenosni sustav ako se njihove usluge koordiniraju putem agregatora. Da bi se ove usluge smatrale pomoćnim uslugama, potrebno ih je mjeriti i procijeniti prema opće prihvaćenoj metodologiji. Također, treba utvrditi troškove i financijske koristi povezane s pružanjem ovih usluga kako bi se razvili održivi poslovni modeli. Na primjeru Slovenije objašnjen je model sustava za registraciju i nabavu pomoćnih usluga u distribucijskom sustavu.

Ključne riječi: pomoćne usluge, elektroenergetski distribucijski sustav, nefrekvencijske pomoćne usluge, postojeće pomoćne usluge, nove pomoćne usluge, distribuirani obnovljivi izvori energije, agregator, tehnički uvjeti za pružanje pomoćnih usluga, distribucijski sustav, model sustava za registraciju i nabavu pomoćnih usluga

Summary and keywords

The topic of this paper is ancillary services in the distribution system. Ancillary services refer to the ability of system users to adjust their electricity consumption or production in response to an external signal. This includes the management of consumption, production, and energy storage. Ancillary services encompass system services within the distribution electrical network and the resolution of grid congestion. This paper explains the principle of operating the distribution system and defines both existing and new ancillary services in the distribution network. The technical conditions for providing ancillary services in the distribution system are also defined. Distributed energy resources can support the electrical distribution or transmission system if their services are coordinated through an aggregator. For these services to be considered ancillary services, they must be measured and evaluated according to a generally accepted methodology. Additionally, the costs and financial benefits associated with providing these services need to be determined in order to develop sustainable business models. The example of Slovenia is used to explain the model of a system for the registration and procurement of ancillary services in the distribution network

Keywords: ancillary services, electrical distribution system, non-frequency ancillary services, existing ancillary services, new ancillary services, distributed renewable energy sources, aggregator, technical conditions for providing ancillary services, distribution system, model for the registration and procurement of ancillary services.