



Koncept optimalnog vođenja i planiranja EES-a u uvjetima male tromosti i visoke penetracije OIE



Zagreb, 2020.

Projekt: Integracija vjetroelektrana u elektroenergetski sustava sa smanjenom tromosti

WIND energy integration in Low Inertia Power System - WINDLIPS

Dokument: Koncept optimalnog vođenja i planiranja EES-a u uvjetima male tromosti i visoke penetracije OIE

Isporuka: I19.2.

Partneri:



Autori:

Josip Đaković, mag. ing, FER
Tomislav Baškarad, mag. ing, FER
Matej Krpan, mag.ing., FER
Igor Kuzle, prof. dr. sc. FER
Perica Ilak, dr.sc., FER
Igor Ivanković, dr.sc., HOPS
Nikolina Zovko, mag. ing, HOPS
Antun Andrić, mag. ing, HOPS
Marko Špoljarić, mag. ing, HEP

Sadržaj

1	Uvod	7
2	Vođenje EES-a s visokim udjelom OIE	8
2.1	Klasični pristup vođenju EES-a	8
2.2	Karakteristike vođenja budućih EES-a	9
2.2.1	Skalabilnost	9
2.2.2	Prilagodljivo upravljanje i topologije	10
2.2.3	Fleksibilnost	10
2.2.4	Napredne komunikacijske platforme	11
2.2.5	Robusnost – otpornost na operativnu nesigurnost	12
2.3	Napredna regulacija frekvencije i napona	13
3	Zaključak	15
4	Literatura	16

Popis slika

Slika 1 Hijerarhijska regulacija frekvencije EES-a.....	9
Slika 2 Koncept prilagodljivog upravljanja	10
Slika 3 Koncept hijerarhijske kontrole modernog EES-a	11
Slika 4 Koncept IoT u EES-u.....	12
Slika 5 Scenariji i pristupi vođenja EES-a s visokim udjelom proizvodnje povezane pretvaračima	14

Popis tablica

Tablica 1 Usporedba primarne, sekundarne i tercijarne regulacije	8
--	---

Popis kratica

AGKKR	Asinkroni generator s klizno-kolutnim rotorom
AGKR	Asinkroni generator s kaveznim rotorom
CHE	Crpna hidroelektrana
CPS	Crpna stanica
DFIG	<i>Doubly-Fed Induction Generator</i> ; Dvostruko- napajani asinkroni generator
DP	Distribuirana proizvodnja
EES	Elektroenergetski sustav
ELTO	Elektrana-toplana
ENTSO-E (CE)	<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity (Continental Europe)</i>
EU	Europska unija
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
FN	Fotonaponski
FN	Fotonaponske elektrane
FRC	<i>Frequency Restoration Control</i>
GE	General Electric
HE	Hidroelektrana
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i> ; Visoki istosmjerni napon
IEC/WECC	<i>International Electrotechnical Commission/Western Electricity Coordinating Council</i>
KTE	Kombinirana termoelektrana
LFSM-O	<i>Limited Frequency Sensitive Mode – Overfrequency</i>
LFSM-U	<i>Limited Frequency Sensitive Mode – Underfrequency</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NE	Nuklearna elektrana
NP	Niskopropusni
OIE	Obnovljivi izvori energije
PPM	<i>Power Park Modules</i>
PSS	<i>Power System Stabilizer</i> ; Stabilizator elektroenergetskog sustava

PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> ; Pulsno-širinska modulacija
RH	Republika Hrvatska
RHE	Reverzibilna hidroelektrana
ROCOF	<i>Rate-of-change-of-frequency</i> , brzina promjene frekvencije
SG	Sinkroni generator
SGPM	Sinkroni generator s permanentnim magnetima
TE	Termoelektrana
TETO	Termoelektrana-toplana
TS	Transformatorska stanica
TSO	Transmission System Operator; Operator prijenosnog sustava
VA	Vjetroagregat/i
VE	Vjetroelektrana/e
VP	Visokopropusni

1 Uvod

Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS) obavlja djelatnosti planiranja, nadziranja, upravljanja i analiziranja rada hrvatskog EES-a. Vođenje hrvatskog EES-a se hijerarhijski provodi na tri razine [1]:

- na najvišoj razini je Nacionalni dispečerski centar (NDC), smješten u Zagrebu,
- na drugoj razini su četiri mrežna centra upravljanja (MC) smještena u Rijeci, Splitu i Osijeku, a četvrti u Zagrebu, koji postoji i organizacijski i fizički u prostoru TS Žerjavinec
- na trećoj razini su elektroenergetski objekti i postrojenja (transformatorske stanice, elektrane), centri daljinskog upravljanja (CDU), centri vođenja lanca elektrana i centri vođenja elektrana na slivovima.

Pretpostavka učinkovitog vođenja hrvatskog EES-a temelji se na vođenju sustava kao cjeline (proizvodnja, prijenos, distribucija i potrošnja električne energije na području Republike Hrvatske) te usklađivanje rada hrvatskog EES-a sa sustavima susjednih država i ostatkom sinkronog područja ENTSO-E regije kontinentalne Europe.

Planiranje rada EES-a se dijeli na kratkoročno, srednjoročno i dugoročno planiranje:

- **Kratkoročno planiranje:**
 - pripremu tehničkih podloga za operativno vođenje EES-a za sljedeći dan,
 - izdavanje suglasnosti o tehničkoj izvodljivosti Tržišnog plana i sklopnih operacija u mreži,
 - izradu Plana rada sustava.
- **Srednjoročno planiranje:**
 - koordinaciju izrade plana održavanja prijenosnih postrojenja i davanje suglasnosti na plan održavanja proizvodnih postrojenja,
 - izradu plana podfrekvencijskog rasterećenja EES-a,
 - izradu plana ograničenja potrošnje električne energije kod velikih poremećaja u EES-u ili nedostatne dobave električne energije,
 - izradu plana ponovne uspostave EES-a.
- **Dugoročno planiranje:**
 - izradu dugoročnih predviđanja potrošnje električne energije u funkciji planiranja razvoja prijenosne mreže,
 - prepoznavanje i istraživanje mogućih slabih točaka u EES-u i odabir tehničkih rješenja za njihovo otklanjanje.

2 Vođenje EES-a s visokim udjelom OIE

Trenutno stanje modernih elektroenergetskih sustava implicira da postoji sve veći broj instaliranih kapaciteta OIE u formi distribuirane proizvodnje (DP), realiziranih od strane investitora izvan elektroprivredne strukture. Navedena karakteristika EES-a ima za posljedicu povećani broj kontrolnih točaka, raspršeni po velikim geografskim područjima, nadgledanih i kontroliranih od strane različitih tijela, koji čak mogu imati i konkurentne interese [2]. U tom smislu, ono poznato i prihvaćeno kao „klasični pristup vođenju EES-a“ mora se revidirati, redizajnirati i iznova formalizirati, uzimajući u obzir sve izazove koje donosi masovna integracija OIE.

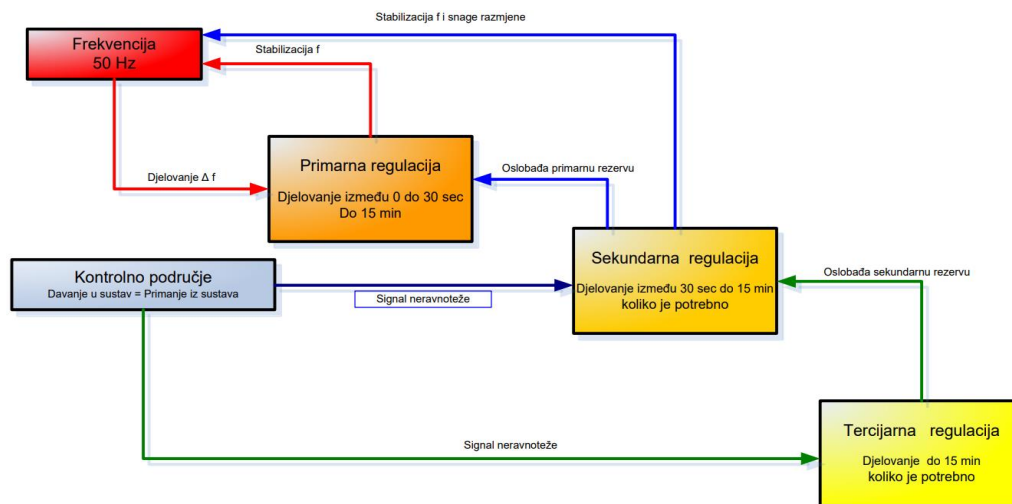
2.1 Klasični pristup vođenju EES-a

Kako bi se bolje razumjeli izazovi u vođenje modernih EES-a, potrebno je razumijeti dosadašnje i trenutne zahtjeve i funkcije vođenja EES-a.

Regulacija frekvencije i napona u bilo kojoj točki radnog područja i u svakom su trenutku su dvije najbitnije aktivnosti u očuvanju stabilnost i vođenju EES-a. Električna frekvencija sustava izražava kutnu brzinu električnih struja u svim električnim strojevima koja mora ostati blizu nominalne vrijednosti (50 ili 60 Hz) zbog višestrukih razloga očuvanja integriteta i zaštite sustava. Naponsku razinu, također, treba držati što bliže svojim nazivnim vrijednostima kako bi se osigurala učinkovitost opreme krajnjih korisnika i izbjegao raspad bilo kojeg dijela sustava. Obje navedene kontrolne funkcionalnosti moraju se učinkovito nadzirati prema standardiziranim mrežnim kodovima, uzimajući u obzir njihove specifične značajke. Zbog navedenih razloga, operatori elektroenergetskih sustava tradicionalno kontroliraju frekvenciju i napon pomoću hijerarhijskih shema, koja se primjenjuju za postizanje različitih ciljeva kontrole u različitim prostorno-vremenskim skalama. Drugim riječima, hijerarhija kontrolne može se odnositi na vremensku skalu (npr. unutar milisekundi ili do nekoliko minuta) ili područja (npr. djelovanje bliže centrima s visokim opterećenjem). Uobičajeno, hijerarhijska arhitektura upravljanja sastoji se od tri glavne razine: primarne, sekundarne i tercijarne. Djelovanje i vremenski intervali pojedine razine prikazani su u tablici 1, a koncept regulacije frekvencije prikazuje slika 1.

Tablica 1 Usporedba primarne, sekundarne i tercijarne regulacije

Primarna regulacija	Sekundarna regulacija	Tercijarna regulacija
Ograničava odstupanje sustavne varijable pri poremećaju	Obnavlja sustavnu varijablu na nazivnu vrijednost	Obnavlja rezervu primarne i sekundarne regulacije
Ostvaruje se unutar minute	Ostvaruje se unutar sata	Ostvaruje se u duljem vremenskom periodu
Automatska proporcionalna	Automatska integralna	Manualna od strane operatera
Lokalno djelovanje	Regionalno djelovanje	Regionalno i područno djelovanje



Slika 1 Hijerarhijska regulacija frekvencije EES-a

Sve veća složenost i razmjeri EES-a stvaraju potrebu za novim algoritmima koji će omogućiti učinkovitiji rad i upravljanje EES-a. To, međutim, predstavlja izazovan zadatak zbog različitih izvora nesigurnosti (npr. proizvodnja iz OIE), fizičkih ograničenja mreže i novih tehnologija koje se javljaju s uvođenjem „Smart Grid“ tehnologija (npr. OIE, upravljivi potrošači, virtualne elektrane, mikromreže). Na primjer, teško predvidljiva točna proizvodnja iz OIE (npr. vjetroelektrane, solarne elektrane), osim povećanja nesigurnosti rada, unosi harmonike u sustav, koji mogu dovesti do nestabilnosti i neočekivanih odstupanja napona. Nakon deregulacije elektroenergetskih sustava, mogućnost nejednakosti između proizvodnje i potrošnje predstavlja opasnost za stabilnost sustava. Nadalje, deregulacija tržišta električne energije, dopunjena sa spomenutim *smart grid* paradigmama, utječe na konstantan porast broja sudionika na obje strane sustava; proizvodnje i potrošnje. Navedene implikacije vode do višestrukih optimizacijskih varijabli, dodatnih ograničenja te posljedično složenijih optimizacijskih problema za operatore sustava.

2.2 Karakteristike vođenja budućih EES-a

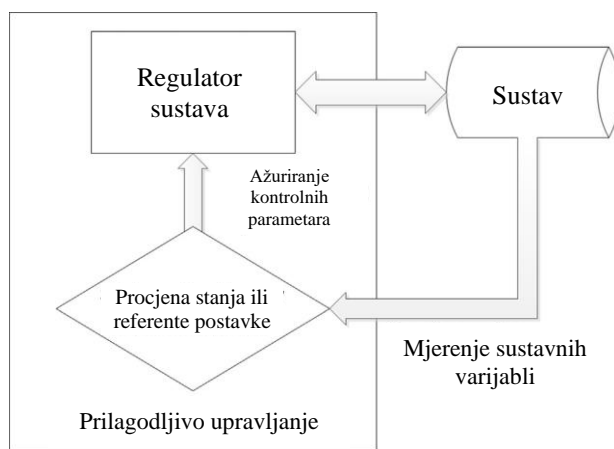
2.2.1 Skalabilnost

Potreba za optimiziranim upravljanjem velikim brojem jedinica u EES-u je sve izraženija, kao posljedica visoke penetracije distribuirane proizvodnje te dvosmjernih tokova energije, posebno na distribucijskoj razini, gdje se tradicionalno nisu primjenjivale metode direktnog upravljanja [2]. Kao odgovor na navedene izazove i zahtjeve za skalabilnosti vođenja, javljaju se metode decentralizirane/distribuirane kontrole. Navedene metode uključuju tri glavne klase: i) distribuirana optimizacija s agentima koji komuniciraju samo sa susjednim agentima, bez potrebe za centraliziranim upravljanjem; ii) hijerarhijski pristup sa agentima koji komuniciraju sa agentima

na višim razinama pri svakoj iteraciji; iii) decentralizirane metode s agentima koji optimiziraju rad na lokalnoj razini i zahtijevaju centraliziranu koordinaciju pri svakoj iteraciji.

2.2.2 Prilagodljivo upravljanje i topologije

Tradicionalno, regulator je prilagodljiv ako može ažurirati svoje parametre kao odgovor na promjene koje se događaju u kontroliranom sustavu/opremi (slika 2). Iako metode prilagodljive kontrole nisu novost, elektroenergetski sustav i tržišta električne energije postali su skloniji pokazivanju promjena ponašanja, zbog sudjelovanja više tržišnih sudionika, radu brojnih DG jedinica u cijelom sustavu te interakcije među njima.



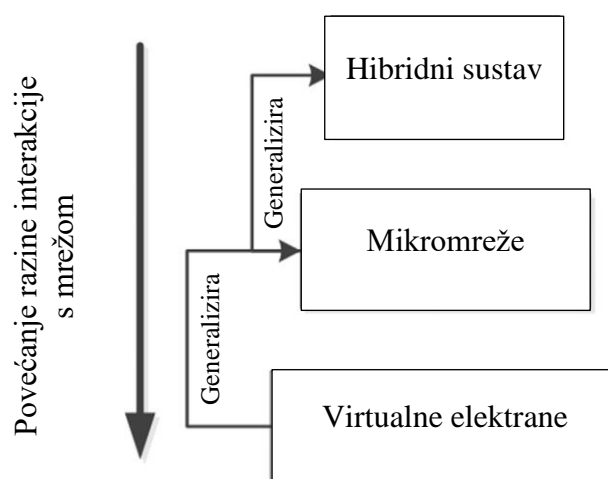
Slika 2 Koncept prilagodljivog upravljanja

S rastućom zabrinutošću zbog problema kibernetičke sigurnosti, prilagodljiva kontrola bit će stavljena u središte pozornosti kao jedina održiva protumjera napadima te vrste. U tom smislu, prilagodbu bi trebalo učiniti mogućom ne samo kontrolnim parametrima već i odgovarajućim topologijama mreže. Praktično, topologija je prilagodljiva ako nadležna kontrolna metoda može biti uspješno izvršena na preostalom dijelu mreže, nakon poremećaja ili napada. Navedeni koncepti mogu se okarakterizirati kao metode povećanja otpornosti sustava.

2.2.3 Fleksibilnost

Fleksibilnost je upravljačko svojstvo koje ima presudnu ulogu u prijelazu iz tradicionalnih EES-a, od kojih se mnogi temelje na fosilnim gorivima, prema sustavima koji mogu učinkovito prihvatiti visok udio varijabilnih distribuiranih izvora energije. Fleksibilnost se odnosi na vođenje koje može rješavati probleme u nekoliko vremenskih intervala, regija ili strukturiranih organizacijskih blokova koji imaju minimalan međusobni utjecaj. Potreba za fleksibilnošću upravljanja se posebno odnosi na veliki broj jedinica distribuirane proizvodnje temeljenih na OIE koje se razlikuju od konvencionalnih zbog isprekidane i teško predvidive proizvodnje. Kako je već navedeno, hijerarhijska kontrola nije novi koncept, ali je potrebno prilagoditi ga modernim karakteristikama EES-a. Primjer toga je kontrola hibridnih sustava distribuirane proizvodnje i spremnika energije,

odnosno kombinacija stohastičkih i determinističkih izvora energije u mikromrežama ili virtualnim elektranama. Bilo koji događaji i pojave koji se događaju na najmanjoj skali (jedna jedinica ili skup jedinica iza točke zajedničkog spajanja/upravljanja) može se rukovati hibridnim sustavima izvora energije koji osiguravaju dosljedno ponašanje s obzirom na standarde kvalitete električne energije. Na sljedećoj razini, mikromreže su paradigme koje mogu ponuditi usluge mreži i upravljati sadržanim resursima na hijerarhijski način. Na najvišoj razini, virtualne elektrane mogu izvršavati radnje upravljanja i odgovarati na zahtjeve operatera, uzimajući u obzir raznolikost resursa koji ih čine, osiguravajući učinkovito vođenje pri različitim okolnostima (slika 3).

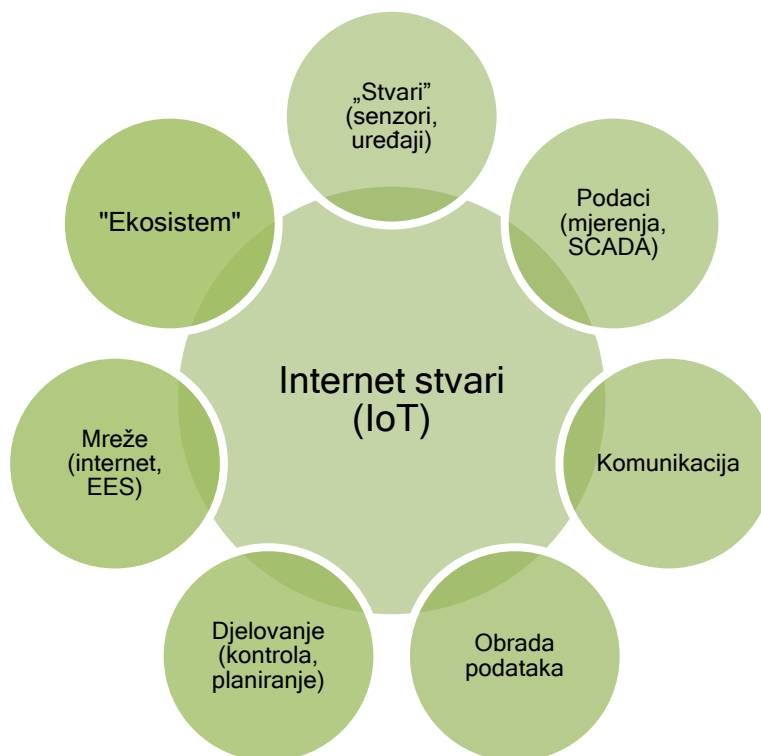


Slika 3 Koncept hijerarhijske kontrole modernog EES-a

2.2.4 Napredne komunikacijske platforme

Sa sve većim brojem i raznolikošću sudionika elektroenergetskog sustava, klasično centralizirano vođenje morat će se prilagoditi prihvatiti enormne količine podataka ili se prilagoditi karakteristikama novih paradigmi. Primjer navedenog je primjena koncepta „Internet stvari“ (eng. Internet of Things-IoT), koji se u posljednje vrijeme primjenjuje u EES-u s pojavom pametnih mjernih uređaja kod krajnjih korisnika (slika 4). Velika količina podataka koja će biti generirana putem IoT sustava te njihova obrada u stvarnom vremenu (ili približno stvarnom), predstavlja veliki izazov za upravitelje sustava u smislu planiranja i izvođenja upravljačkih operacija. Moguće rješenje navedenog problema je implementacija višeagentnih sustava – autonomnih platformi za nadzor, upravljanje i planiranje – koji će rasteretiti centralne kontrolne sustave. Procesorska moć takvih agenata neće biti od presudnog značenja već mogućnost sigurne i pouzdane razmjene podataka s drugim agentima u EES-u. Za ostvarenje masovne komunikacije između kontrolnih platformi bitno je ostvariti standardizaciju navedene opreme, koja će sadržavati senzore za prikupljanje informacija, regulatore za proizvodne jedinice i softvere za upravljanje navedene opreme. Implementiranje pomoćnih usluga sustavu od strane distribuirane proizvodnje će dodatno

povećati kompleksnost upravljačkih platformi, ali i samih proizvodnih jedinica, koje će se morati prilagoditi novim zahtjevima za pouzdan rad EES-a.



Slika 4 Koncept IoT u EES-u

2.2.5 Robusnost – otpornost na operativnu nesigurnost

Prodor proizvodnih jedinica baziranih na OIE unosi značajnu razinu nesigurnosti u sustav, zbog teško predvidive točne proizvodnje u bliskoj budućnosti. S druge strane, prognoziranje potrošnje i gubitaka, također, predstavlja sve veći izazov u modernim sustavima. Obično, vođenje EES-a ima za cilj optimizirati funkciju cilja (troška), na primjer, ukupni trošak sustava podložan nizu ograničenja, poput ravnoteže snage, vremena pokretanja, mogućnosti rampiranja postrojenja itd. Ako su ograničenja vremenski povezana, potrebno je intertemporalno modeliranje problema upravljanja. Prediktivna kontrola (MPC), također poznata kao kontrola „opadajućeg horizonta“ ili „planiranje kotrljajućeg horizonta“, moćan je pristup rješavanju intertemporalnih odluka s nesigurnošću, kao približni oblik dinamičkog programiranja. MPC tipično određuje diskretne kontrolne korake za sljedećih n vremenskih koraka s obzirom na prognozu budućih stanja i ishoda. Na ovaj način omogućuje se korištenje najnovijih prognostičkih podataka pri vođenju sustava. Nesigurnost je bila i ostat će jedan od glavnih izazova u upravljanju elektroenergetskim sustavom, dok se krećemo prema energetsom sektoru s niskim udjelom ugljika. Bez ispunjavanja zahtjeva robusnosti sustava, stabilnost, ekonomičnost i otpornost EES-a bit će ugroženi.

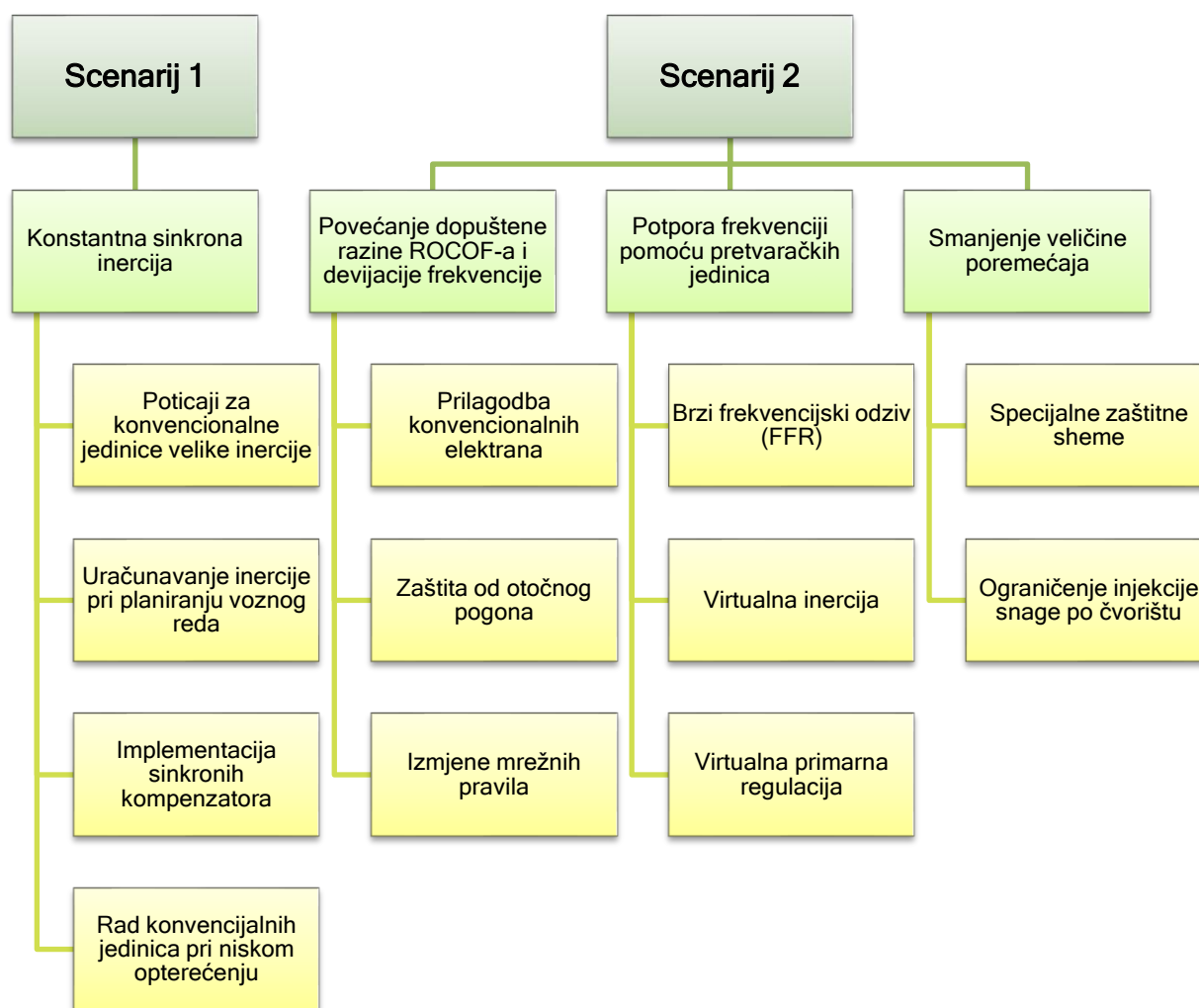
2.3 Napredna regulacija frekvencije i napona

Frekvencija i napon modernih/budućih elektroenergetskih sustava, regulirat će se pomoću više različitih sudionika EES-a, kao što su upravljivi potrošači, spremnici energije, električna vozila i proizvodne jedinice bazirane na OIE. Obnovljivi izvori, međutim, značajno ovise o vremenskim prilikama i okolnim terenima, čineći tako proizvodnju isprekidanu i stohastičku. Značajnu ulogu u integraciji modernih izvora u pružanju usluga sustavu predstavljat će napredne metode prognoziranja sustavnih parametara, kao što su proizvodnja iz OIE, inercija sustava, gubitci energije, raspoloživost itd. Regulacija napona postala je značajan izazov u posljednjih nekoliko godina, posebno na razini distribucije, iz dva razloga. Prvo, pojačanje mreže za prevladavanje padova napona zbog povećanja opterećenja može se odgoditi zahvaljujući integraciji distribuirane proizvodnje, ali to se ne može postići automatski; jedinice DG-a trebaju se međusobno koordinirati ili dodatno djelovanjem lokalnih operatora. Drugo, u periodima niskih opterećenja, povećana proizvodnja distribuiranih jedinica može dovesti do lokalno previsokih napona. Navedeni razlozi potvrđuju zahtjev za fleksibilnošću lokalne regulacije napona. Regulacija napona i frekvencije pomoću elektroničkih pretvarača snage, mogućnost prolaska kroz niskonaponsko stanje u mreži, pružanje potpore u održavanju frekvencije pri velikim poremećajima (npr. koncept virtualne inercije), automatsko ponovno povezivanje s mrežom i interakcija s mikro-mrežama, neki su od kriterija koji će zahtijevati da upravljački sustavi opsežno nadgledaju mrežu i osiguravaju da kontrolirane jedinice rade u skladu sa relevantnim mrežnim pravilima.

Prema [3], moguća su dva scenarija upravljanja sustavom sa povećanim udjelom proizvodnje spojene preko učinkovitih pretvarača te posljedično niske inercije. U prvom scenariju povećava se udio proizvodnje povezane preko pretvarača, dok je inercija iz konvencionalnih elektrana tek malo spuštена ili čak održavana konstantnom. To se može postići snižavanjem minimalne razine proizvodnje konvencionalnih jedinica, također neizravno pružajući povećanu marginu za regulaciju frekvencije. Učinkovitost takvog rada bi bila smanjena, dok bi turbina predstavljala ograničavajući faktor pri manjim opterećenjima. Održavanjem rada konvencionalnih postrojenja na nižim razinama proizvodnje umjesto prekida rada, inercija EES-a bi se održala do određenog udjela proizvodnje preko pretvarača. Uz to, inercija sustava mogla bi se održati konstantnom instaliranjem više sinkronih kompenzatora, koji se obično koriste za regulaciju jalove snage, podržavajući napon mreže. U drugom scenariju, konvencionalne elektrane postupno se izbacuju iz pogona, a pripadajuća sinkrona inercija sustava se smanjuje. Pretpostavlja se da će primarnu regulacijsku rezervu uglavnom osiguravati jedinice povezane preko pretvarača (VE, PV, spremnici energije, ...), te prema tome će većina preostalih sinkronih jedinica raditi na maksimalnoj snazi. Nekoliko različitih pristupa je moguće u slučaju drugog scenarija.

Prvi pristup uglavnom se fokusira na prilagodbu trenutne opreme elektroenergetskog sustava, mrežnih kodova i zaštite za suočavanje s većim razinama ROCOF-a i većim odstupanjima frekvencije. Daljnja ispitivanja su, međutim, potrebna kako bi se otkrilo koje razine ROCOF-a i frekvencije su moguće bez ugrožavanja stabilnosti elektroenergetskog sustava ili oštećenja turbina i pomoćne opreme u konvencionalnim elektranama, dok pretvarački sustavi ne bi trebali biti

značajno ugroženi. Drugi pristup nastojat će prilagoditi proizvodnju povezanu preko pretvarača za isporuku virtualne inercije i regulacije frekvencije. Moguće su različite mogućnosti, od oponašanja rada konvencionalnih elektrana do isporuke fiksne injekcije radne snage nakon što frekvencija padne ispod određenog praga. Optimalna kontrola koja će se široko primijeniti u elektroenergetskom sustavu još uvijek nije poznata, ali je područje aktivnog istraživanja. Konačno, treći pristup, koji se često zanemaruje, odnosi se na ograničavanje veličine (i vjerojatnosti) nepredviđenih poremećaja, ograničavanjem snage koja se injektira u pojedinim mrežnim čvorištima ili primjenom posebnih zaštitnih shema kako bi se spriječio razdvjanje sustava i kaskadni raspad.



Slika 5 Scenariji i pristupi vođenja EES-a s visokim udjelom proizvodnje povezane pretvaračima

3 Zaključak

Sve veća složenost elektroenergetskih sustava posljedica su integracije tehnologija pametnih mreža (npr. OIE, upravljiva potrošnja, distribuirani izvori energije itd.), ograničenja koja nameće fizička infrastruktura mreže i rasta potrošnje električne energije. Ti resursi i tehnologije, s jedne strane, mogu potencijalno poboljšati pouzdanost elektroenergetskih sustava smanjenjem ovisnosti o konvencionalnim jedinicama, korištenjem više distribuiranih i ekološki prihvatljivijih alternativa i omogućavanjem inteligentnog upravljanja na strani potrošnje. S druge strane, oni uvode veću nesigurnost koja vođenje i rad elektroenergetskih sustava čini izazovnim zadatkom. Te nesigurnosti također mogu dovesti do neočekivanih poteškoća u radu, poput odstupanja napona/frekvencije uzrokovanih neusklađenošću proizvodnje i potrošnje. Nadalje, deregulacija elektroenergetskih sustava povećala je broj dionika i entiteta, što rezultira neizvjesnošću u pogledu skalabilnosti postojećih pristupa vođenja EES-a. Nakon pregleda konvencionalnih metoda upravljanja frekvencijom i naponom, prikazane su karakteristike vođenja EES-a koje će omogućiti prihvat novih tehnologija i paradigmi: skalabilnost, prilagodljivo vođenje, fleksibilnost, napredne upravljačke platforme i robusnost. Budući napori u vođenju modernih elektroenergetskih sustava temeljit će se na poboljšanje ovih pet karakteristika pomoću integriranog dizajna učinkovitih algoritama i softvera, kao što su distribuirani algoritmi i paralelne računalne platforme, kao i primjenom modernih hardverskih tehnologija.

Na razvoj upravljačkih metoda utjecat će suočavanje sa smanjenom sinkronom inercijom sustava, koja je posljedica integracije sve većeg udjela obnovljivih izvora povezanih pomoću pretvarača. Osim smanjene inercije, povećani udio proizvodnje povezane s pretvaračem utječe na rad i upravljanje modernim elektroenergetskim sustavima na mnoge druge načine, od kojih su neki: stabilnost i nadzor napona, doprinos kvaru (poremećaju), zaštiti sustava, osiguranju regulacijske rezerve itd. Optimalno tehno-ekonomsko rješenje, odnosno pristup za suočavanje s navedenim izazovima i adekvatno vođenje EES-a s visokim udjelom nesinkrone proizvodnje, ne samo da će značajno ovisiti o karakteristikama sustava, već će se sastojati od kombinacije postojećih i budućih tehnologija, implementiranih unutar širokog raspona mrežnih zahtjeva i ograničenja.

Literatura

- [1] HOPS, »Vođenje EES-a,« [Mrežno]. Available: <https://www.hops.hr/vodenje-ees-a>. [Pokušaj pristupa 2020.].
- [2] A. Taşıkaraoğlu and O. Erdiñç, "A Survey of Recent Developments and Requirements for Modern Power System Control," in *Pathways to a Smarter Power System*, Elsevier Ltd, 2019, p. 442.
- [3] P. Tielens, *Operation and control of power systems with low synchronous inertia*, KU Leuven – Faculty of Engineering Science, 2017.
- [4] I. Kuzle, *Identifikacija dinamičkih parametara srednjerazvijenog elektroenergetskog sustava s obzirom na promjene frekvencije*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2002.
- [5] M. Krpan and I. Kuzle, "Inertial And Primary Frequency Response Model Of Variable-Speed Wind Turbines," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, pp. 844-848, 1 2017.
- [6] J. Đaković, P. Ilak, T. Baškarad, M. Krpan i K. Igor, »Effectiveness of Wind Turbine Fast Frequency Response Control on Electrically Distanced Active Power Disturbance Mitigation,« u *11th Mediterranean conference on power generation, transmission, distribution and energy conversion (MEDPOWER2018)*, Dubrovnik (Cavtat), 2018.
- [7] HOPS, *Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2018.-2027., s detaljnom razradom za početno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje*, 2017.
- [8] National Renewable Energy Laboratory; University of Colorado; Electric Power Research Institute , "Active Power Controls from Wind Power: Bridging the Gaps," January 2014 .
- [9] MathWorks Documentation, "Wind Farm Using Doubly-Fed Induction Generators," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/wind-farm-using-doubly-fed-induction-generators.html>. [Accessed 2019].
- [10] MIGRATE report, »Lessons learned from monitoring & forecasting KPIs on impact of PE penetration,« MIGRATE consortium, 2018.
- [11] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education, 1994.