

# DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Dr. sc. Nijaz Dizdarević – dr. sc. Mislav Majstrovic – dr. sc. Srđan Žutobradić, Zagreb

UDK 621.316.1.003  
PREGLEDNI ČLANAK

U ovom su radu na općeniti način razmotrena glavna obilježja distribuirane proizvodnje električne energije. Najprije su opisani tehnički utjecaji distribuiranih izvora na sustave proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije. Zatim su predložena neka rješenja tehničkih utjecaja te otvorena pitanja. Proizvodnja električne energije iz malih vjetroelektrana smještena je u kontekst distribuirane proizvodnje. Opisane su vrste proračuna u distribucijskoj mreži koje se koriste u studijskoj analizi priključenja malih disperziranih izvora na distribucijsku mrežu.

**Ključne riječi:** distribuirana proizvodnja, disperzirani izvori, vjetroelektrane, distribucijska mreža.

## 1. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Suvremeni elektroenergetski sustavi uglavnom su razvijeni tijekom posljednjih 50 godina. Razvoj je slijedio ideju vodilju prema kojoj su veliki središnji generatori preko transformatora injektirali električnu snagu u visokonaponsku prijenosnu mrežu. Zatim je prijenosni sustav korišten za transport snage, često i na velikim udaljenostima. Na kraju, snaga je iz prijenosnog sustava preko serije distribucijskih transformatora usmjeravana kroz sredjonaponsku i niskonaponsku distribucijsku mrežu prema potrošačima na nižem naponu. Međutim, odnedavno se ponovno pojavilo značajno zanimanje za priključenjem proizvodnih objekata na distribucijsku mrežu. Ova je namjera poznata kao distribuirana proizvodnja električne energije (*engl. distributed or dispersed generation*) [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8].

Konvencionalni ustroj suvremenih elektroenergetskih sustava nudi veliki broj prednosti. Veće proizvodne jedinice mogu biti učinkovitije te su u pogonu s relativno manjim brojem pogonskog osoblja. Povezane visokonaponske prijenosne mreže omogućuju minimaliziranje zahtjeva za snagom pričuve generatora. Omogućen je ulazak u pogon najučinkovitijeg proizvodnog objekta u bilo kojem trenutku. Veliki iznosi snage mogu biti prenijeti na velikim udaljenostima uz ograničene gubitke. Distribucijske mreže mogu se u tom slučaju projektirati za jednosmjerne tokove snaga i dimenzionirati samo za potrebe potrošačkih opterećenja. Međutim, u posljednjih nekoliko godina pojavilo se više utjecaja čije je kombiniranje dovelo do povećanog zanimanja za distribuiranu proizvodnju (smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, programi energetske učinkovitosti ili racionalnog korištenja energije, deregulacija i natjecanje, diverzifikacija energetske izvora, zahtjevi za samoodrživosti nacionalnih energetske sustava...).

Utjecaj na okoliš jedan je od značajnih faktora u razmatranju priključenja novih proizvodnih objekata na mrežu. Uz zabrinutost o emisiji štetnih plinova iz elektrana na fosilna goriva, obnovljivi izvori dobivaju svoju priliku. Na temelju Kyoto Protokola mnoge zemlje trebaju smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> kako bi se smanjio utjecaj na klimatske promjene. Stvaraju se programi iskorištavanja obnovljivih izvora koji uključuju vjetroelektrane, male hidroelektrane, fotonaponske izvore, zemni plin, energiju iz otpada te iz biomase. Kogeneracijske CHP sheme koriste otpadnu toplinu termalnih proizvodnih objekata bilo za industrijske procese ili grijanje te su vrlo dobar način povećanja ukupne energetske učinkovitosti. Obnovljivi izvori imaju znatno manju energetsku vrijednost u usporedbi s fosilnim gorivima zbog čega su njihove elektrane manje veličine te geografski široko raspodijeljene. Na primjer, vjetroelektrane treba smjestiti u vjetrovitim područjima, dok su elektrane na biomasu obično skromnog kapaciteta zbog troškova transporta goriva relativno male energetske vrijednosti. Te male elektrane priključuju se uglavnom na distribucijsku mrežu.

Međutim, od tada je distribuirana proizvodnja električne energije postala čestim predmetom polariziranih tehničkih diskusija. S jedne se strane nalaze inženjeri motivirani iskustvenim spoznajama o složenosti pogona ees-a koji iskazuju zabrinutost u pogledu elementarne ostvarivosti masovnog uvođenja nereguliranih i neupravljivih generatora u distribucijsku mrežu. S druge se pak strane nalaze entuzijastični zagovarači izvora obnovljive energije poput vjetroelektrana i kombi-elektrana (*eng. combined heat and power, CHP*) koji vjeruju da takve proizvodne jedinice nužno treba uvoditi u pogon kako bi se ispunili domaći i međunarodni zahtjevi za smanjenjem emisije CO<sub>2</sub>. Štoviše, obnovljivi izvori povećavaju sa-

moodrživost ees-a u slučajevima eventualne energetske krize u proizvodnji električne energije koja je danas ovisna o isporuci ugljena, plina i nafte.

U svjetlu novih organizacijskih smjernica unutar elektroenergetskog sektora, nije zanemariv ni utjecaj privatnih investitora. Utjecaj je posebice izražen u dijelu ukupne proizvodnje električne energije koji je nazvan distribuiranom proizvodnjom [2]. Inicijative potencijalnih investitora koji dolaze s liberalizacijom tržišta električnom energijom dodatno utječu na potrebu razmatranja tehničkih aspekata priključenja obnovljivih izvora distribuirane naravi osobito na distribucijsku mrežu.

Obzirom na današnje stanje razvoja, distribuirana proizvodnja električne energije obilježena je sljedećim odrednicama:

- postupak planiranja distribuiranih izvora nije centraliziran;
- raspored proizvodnje distribuiranih izvora nije centraliziran;
- distribuirani izvori uobičajeno su priključeni na distribucijsku mrežu;
- veličina izgradnje distribuiranih izvora manja je od 50-100 MW.

Izostanak centraliziranosti pri planiranju i stvaranju rasporeda proizvodnje odnosi se na nemogućnost dispečerskog upravljanja iz hijerarhijski najvišeg središta nad temeljnim vladanjem distribuiranih izvora unutar ees-a. Značajke pogona ees-a određuje postupak uvrštenja proizvodnih jedinica u raspored proizvodnje ili potreba za usklađenom proizvodnjom jalove snage u sustavu. Na taj se način utječe na dvije temeljne varijable ees-a: frekvenciju (globalni pokazatelj) i napon (lokalni pokazatelj). Na osnovi dugotrajnih i kratkotrajnih odziva temeljnih varijabli izvode se procjene kvalitete isporučene električne energije. Trenutno se na distribuirane izvore gleda gotovo isključivo kao na proizvođače energije (kWh) koji ne doprinose ostalim funkcijama elektroenergetskog sustava (regulacija napona, pouzdanost mreže, snaga pričuve...). Iako je to djelomično posljedica tehničkih svojstava distribuiranih izvora, ograničena uloga distribuirane proizvodnje najvećim je dijelom stvorena na temelju administrativnih i komercijalnih uvjeta pod kojima su trenutno u pogonu.

Postoji više razloga koji utječu na povećanje udjela distribuiranih izvora u proizvodnji električne energije. Neki od osnovnih razloga definirani su sljedećim aspektima:

- Distribuirani izvori u današnje su doba dostigli tehnološki zrelu razinu razvoja koja je raspoloživa za veličinu izgradnje između 100 kW i 150 MW.
- Lokacije za manje izvore lakše je pronaći.
- Politički motivirana pravila koja se temelje na sredstvima poput subvencija ili naknada za tehnologije koje su prihvatljive za očuvanje okoliša, te poput

javni obveza preuzetih s ciljem smanjenja emisije CO<sub>2</sub>, vode prema uvjetima ekonomske favorizacije.

- U nekim se tržišno organiziranim sustavima distribuirani izvori natječu sa cijenom energije u koju nije uključeno pružanje dodatnih usluga u ees-u. Time se stvara prednost na strani distribuiranih izvora u usporedbi s velikim proizvodnim objektima. Za slučaj da je u cijenu energije uključena naknada za prijenos i distribuciju, navedena prednost ovisi o naponskoj razini priključenja i može biti vrlo visoka (mikro-izvori).
- Financijske institucije ulaze u projekte izgradnje distribuiranih izvora zbog solidne isplativosti.
- Deregulirani i tržišno ustrojeni sustavi sa znatnom razinom natjecateljstva stvaraju dodatne prilike industriji i igračima na tržištu za pokretanje poslova proizvodnje električne energije.
- Zahtjevi potrošača za dobavom električne energije iz obnovljivih izvora u stalnom su porastu.
- Proizvodne izvore (poput CHP) smješta se blizu potrošača radi smanjenja troškova prijenosa.
- Za slučaj primjene lokalnih sustava napajanih malim CHP jedinicama smanjuju se zahtjevi za velikim i skupim sustavima opskrbe potrošača toplinskom energijom.
- Korištenje prirodnog plina kao najčešćeg goriva distribuiranih izvora, temelji se na očekivanoj raspoloživosti u većini potrošačkih centara te na očekivanim stabilnim cijenama dobave.
- Plinske jedinice imaju niske kapitalne troškove u usporedbi s velikim proizvodnim objektima.
- Visoka učinkovitost postiže se u konfiguracijama s kogeneracijom te kombiniranim ciklusom što utječe na smanjenje pogonskih troškova.

U zemljama s vrlo izraženim porastom izgradnje distribuiranih izvora često dolazi do grupiranja nekoliko navedenih razloga u jedan zajednički ili do vrlo izražene nadmoći jednog od razloga. Takav se slučaj primjerice javlja u Njemačkoj gdje vrlo visoke naknade uzrokuju snažan porast izgradnje vjetroelektrana. Pregled troškova (tablica 1) ukazuje na razinu natjecateljstva koja se javlja među različitim vrstama distribuiranih izvora [4]. Nužno je naglasiti da su vrijednosti grubo procijenjene. U stvarnosti troškovi mogu odstupati od navedenih vrijednosti u ovisnosti o pojedinačnim uvjetima primjene. Uvjeti primjene odnose se na naponsku razinu priključenja, troškove priključenja, broj sati pogona, učinkovitost, vlastitu potrošnju... Obzirom na prethodne razloge, pored vjetroelektrana vrlo izraženo mjesto u distribuiranoj proizvodnji električne energije zauzimaju kombi-elektrane (CHP izvori).

U današnje doba postoji više scenarija prema kojima se širom svijeta izvodi razdvajanje različitih sektora elektroenergetskog sustava. Scenariji se nalaze u širokom spektru od vertikalno integriranih struktura do verti-

kalno i horizontalno razdvojenih struktura. Može se reći da u većini zemalja ipak prevladava trend razdvajanja. Istodobno se u većini zemalja uočava snažan porast izgradnje distribuiranih izvora. U nekim se slučajevima razdvajanje unutar strukture ees-a doživljava kao uzrok porasta izgradnje distribuiranih izvora. Porast se prvenstveno javlja obzirom da na taj način nezavisni proizvođači imaju otvoren i slobodan pristup tržištu. S druge pak strane, postoje zemlje poput Norveške gdje nakon otvaranja tržišta udjel distribuiranih izvora nije značajno povećan. Naime, u Norveškoj su ti izvori rijetko kada ekonomičniji od postojećih izvora utemeljenih na jeftinoj energiji iz vodnih resursa.

**Tablica 1. Kapitalni troškovi i troškovi energije za različite distribuirane izvore**

Tehnologija	Veličina izgradnje	Kapitalni troškovi €/kW	Ukupni troškovi €/kWh
Vjetroelektrane (na kopnu)	15 MW	900–1300	0.04–0.09
Vjetroelektrane (na površini mora)	100 MW	1500–2000	0.05–0.12
Kombi-elektrane CHP	40 MW	550–850	0.04–0.057
Hidroelektrane (mali pad)	5 MW	900–1000	0.02–0.03
Kogeneracija (turbinski pogon)	5 MW	800–850	0.053–0.057
Kogeneracija (recipročni pogon)	5 MW	500–750	0.03–0.045
Fotonaponski sustavi	5 MW	6000–10000	0.75–1
Gorive stanice	5 MW	1100–1600	0.08–0.1
Mikro-izvori (recipročni pogon)	50 kW	600–1500	0.07–0.15
Mikro-izvori (turbinski pogon)	50 kW	≈300	0.03–0.05
Mikro-izvori (gorive stanice)	50 kW	≈900	0.09–0.15

Uloga distribuiranih izvora u sustavu uvelike ovisi o strukturi tržišta i elektroprivrede, pravilima priključenja na mrežu te subvencijama. Na temelju navedenih odrednica ocjenjuje se mogućnost priključenja distribuiranih izvora na sustav u iole značajnijoj mjeri te mogućnost njihovog uključenja u proces planiranja pogona ees-a.

U većini se zemalja tradicionalna struktura sustava zasniva na velikim vertikalno integriranim elektroprivredama. Takvi sustavi uglavnom već imaju izvjesna iskustva s nezavisnim proizvođačima električne energije (IPP) i industrijskim elektranama. Ovi proizvođači često nisu pod utjecajem dispečera iz hijerarhijski najvišeg upravljačkog centra. Posebice je to slučaj ukoliko su priključeni na distribucijsku mrežu. U mnogim su slučajevima takvi proizvođači uključeni u postupak planiranja sustava na temelju zajedničkih ulaganja ili

nekim drugih oblika suradnje s vertikalno integriranom elektroprivredom. Nadalje, ne postoji potreba za definiranjem tarifa za priključenje na sustav, za prijenos i za dodatne usluge. Vertikalno integrirana elektroprivreda odgovorna je za sigurnost opskrbe.

Distributivni izvori, koji za početak nisu dovoljno kompetitivni obzirom na njihove visoke proizvodne troškove, imaju prigodu za probitak samo ukoliko su subvencionirani (primjer obnovljivih izvora). Prema primjeru iz Velike Britanije, subvencije se dodjeljuju samo određenom dijelu proizvodnih kapaciteta. U drugom primjeru (Njemačka), subvencije su definirane u obliku naknadnih tarifa nad izbjegnutim troškovima elektroprivrede na čiju su mrežu izvori priključeni. Posebice za slučaj priključenja vjetroelektrane u području sa slabom mrežom, pravila priključenja na mrežu koja rezultiraju s većim ili manjim investicijskim troškovima imaju značajnu ulogu u odlučivanju o profitabilnosti cijelog projekta.

U slučaju potpuno razdvojene strukture elektroprivrede, vertikalna integracija više ne postoji na način na koji se javljala u prethodnom primjeru. Uočen je trend prema formiranju nezavisnog operatora sustava koji upravlja prijenosom. Prijašnji se sektor proizvodnje sada natječe s nezavisnim proizvođačima iz industrije ili s drugim igračima (operatorima) na tržištu te s distribuiranim izvorima. Eventualnim smanjenjem troškova na strani proizvodnje nakon otvaranja tržišta dodatno se umanjuju izgledi distribuiranih izvora.

S druge strane, postoji mogućnost stvaranja novih tržišta poput 'zelenog' za obnovljive izvore čime se ipak mogu povećati izgledi za njihovu primjenu. Subvencije za posebne vrste distribuiranih izvora ostvarive su također i u okvirima tržišta s otvorenim pristupom. U slučaju da distribuirani izvori nisu upravljani iz hijerarhijski najvišeg centra te da ne sudjeluju u pružanju dodatnih usluga, ali da zbog toga ostvaruju profit, dolazi do neravnoteže na tržištu koja ovisi o njegovoj strukturi.

Nadalje, distribuirani izvori (osim vjetroelektrana) najčešće su priključeni u blizini potrošača u distribucijskoj mreži što u principu pomaže u smanjivanju gubitaka u prijenosnom sustavu. Međutim, gubici u distribucijskoj mreži mogu biti ograničavajući faktor izgradnje vjetroelektrana ukoliko su uz veliku penetraciju locirane u ruralnim područjima niske gustoće opterećenja. Naime, priključenje vjetroelektrana na distribucijsku mrežu može zahtijevati izvođenje dodatnih pojačanja u dijelovima iste mreže čime se povećavaju investicijski troškovi. Tada se javljaju zahtjevi za definiranjem tarifa u prijenosu (i distribuciji).

Zbog promjenjivih uvjeta primjene, različiti su udjeli proizvodnje iz obnovljivih izvora u ukupnoj bilanci (tablica 2) [4]. Prosječni udjel distribuiranih izvora je u analiziranim EU zemljama između 5% i 9%. U Nizozemskoj i Danskoj udjel je dosegao iznos od 40% i zahtjeva protumjere u obliku odgovarajućih tarifa, za-

jedničkih ulaganja i rekonstrukcije 150 kV/132 kV mreže. Dugoročno se očekuje znatniji porast udjela, posebice u Španjolskoj čiji je potencijal 9000 MW u vjetroelektranama i 16000 MW u CHP jedinicama. Njemačka, Kanada i Danska očekuju povećanje udjela. EU zemlje imaju vrlo prodoran i ambiciozan plan ohrabriranja uvođenja novih obnovljivih izvora. Cilj koji je unutar EU postavljen temeljem smanjenja CO<sub>2</sub> iznosi 18% proizvodnje iz obnovljivih izvora do 2010. godine uz prepoznati teorijski potencijal u iznosu od 40%.

Tablica 2. Stupanj penetracije distribuiranih izvora

Zemlja	2000.	Potencijal
Australija	3% (2000 MW)	9% (9000 MW)
Belgija	10%	Do 20%
Kanada	10% (2900 MW)	75% (22000 MW)
Danska	37% (900 MW vjetar i 1600 MW CHP)	5000 MW vjetar i 2000 MW CHP
Francuska	manje od 5%	EU pravilo: više od 8 MW
Njemačka	2400 MW vjetar, 1260 MW male CHP, 6000 MW CHP	više od 3600 MW vjetar i CHP do 35%
Nizozemska	40%	?
Norveška	1% (hidro, niska cijena)	?
Španjolska	300 MW	9000 MW vjetar i 16000 MW CHP
EU cilj	9%	18% do 2010, teorijski 40%

Različite su brzine razvoja različitih oblika distribuirane proizvodnje. Trenutno najveći porast među obnovljivim izvorima imaju vjetroelektrane. Značajan dio očekivanog porasta među vjetroelektranama pripada izgradnji na površini mora [3]. Razlozi koji dovedu do povećanja udjela distribuiranih izvora nisu izravno ovisni o strukturi tržišta. U svim zemljama koje nemaju izrazito niske troškove proizvodnje poput Norveške, distribuirani izvori imaju značajnu ulogu u budućim planovima. Uvjeti otvorenog tržišta podržavaju ovakav trend, ali ne čine nužan preduvjet. Ekonomska favoriziranost i politički motivirane subvencije za primjenu tehnologija koje su prijateljske prema okolišu uzrokuju pojavu takvog trenda i unutar tradicionalno ustrojenih, odnosno vertikalno integriranih elektroprivreda. Općenito, povećani udjel distribuiranih izvora uzrokuje pojavu brojnih tehničkih posljedica koje su uočene u različitim zemljama. Posljedice ovise o veličini izgradnje distribuiranih izvora te vrsti korištenih generatora, ali i o strukturi sustava. Na primjer, subvencije za proizvodnju električne energije iz vjetroelektrana u nekim su zemljama uzrokovale povećanje broja instaliranih vjetroturbina te time i pojavu specijalnih problema u standardnim elektroenergetskim sustavima.

Dakle, vrlo značajno mjesto u distribuiranoj proizvodnji električne energije pripada vjetroelektranama. Ekonomska opravdanost projekta izgradnje vjetroelektrane zahtijeva njezin smještaj u području s visokom iskoristivosti vjetra. Područja visoke iskoristivosti vjetra često se nalaze unutar naponski relativno slabih dijelova mreže koji su locirani u ruralnim predjelima. Time se znatnije otežava njihovo učinkovito priključenje na distribucijsku mrežu. U slučaju većeg iznosa veličine izgradnje, priključenje vjetroelektrane izvodi se i na prijenosnu mrežu.

Prema dosadašnjem standardnom promišljanju, uloga distribucijske mreže pasivne je naravi i svodi se na distribuiranje električne energije industrijskim potrošačima i domaćinstvima. U svjetlu novih tendencija koje idu za primjenom distribuirane proizvodnje, javlja se potreba za distribucijskom mrežom aktivne naravi. Aktivna distribucijska mreža treba udovoljiti zahtjevima onih potrošača koji svoju potrošnju mogu namiriti vlastitom lokalnom proizvodnjom te višak plasirati u mrežu. Obzirom da se priključenje vjetroelektrane znatno češće izvodi na distribucijsku mrežu, elektroenergetski sustav se dovodi u izmijenjenu situaciju u odnosu na prvobitno zamišljenu. Pasivnu ulogu distribucijske mreže potrebno je zamijeniti aktivnom. Zamjena uloga često uzrokuje potrebu za primjenom većih investicijskih zahvata u mreži koji bi omogućili veću učinkovitost proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana.

## 2. TEHNIČKI UTJECAJI DISTRIBUIRANIH IZVORA NA SUSTAVE PROIZVODNJE I PRIJENOSA

Operator sustava odgovoran je za planiranje proširenja mreže, pogon mreže uključujući upravljanje naponom i jalovom snagom, mjerenje i naplatu, planiranje proširenja proizvodnih kapaciteta i energetska planiranje (ukoliko je operator sustava ujedno i vlasnik proizvodnih objekata), održavanje sustava pričuve, trgovanje električnom energijom, raspored proizvodnje jedinica i regulaciju frekvencije [4]. Povećana izgradnja distribuiranih izvora utječe na svaku od navedenih zadaća operatora sustava.

Utjecaj na *planiranje proširenja mreže* javlja se ukoliko veliki broj distribuiranih izvora može biti priključen samo izravno na prijenosni sustav. U osnovi se radi o suprotnosti s pretpostavkom o maksimalnoj veličini izgradnje od 50 MW do 100 MW. U slučaju da se iskoristava energija vjetra, instalirani kapacitet u vjetroelektranama može relativno brzo dosegnuti vrlo visoke iznose proizvodnje električne energije. U nekim slučajevima (vjetroelektrane na površini mora, Danska), neophodno je vjetroelektrane priključiti izravno na prijenosnu mrežu čime se mijenja topologija sustava. U sustavima s izrazito povećanim brojem neupravljivih i do izvjesne razine nepredvidivih izvora,

slabost prijenosne mreže predstavlja prepreku integraciji većeg broja distribuiranih izvora. Snažna i prilagodljiva prijenosna mreža omogućuje međunarodno trgovanje snagom za regulacije (pomoćne usluge u ees-u). Štoviše, operator sustava treba vrednovati rizik i posljedice ispada velikog broja distribuiranih izvora koji su priključeni na visokonaponsku i srednjenaponsku mrežu. Ispadi vodova i transformatora zbog preopterećenja mogu se javiti kao posljedica velikog povećanja opterećenja. Stoga je neophodno pažljivo razmotriti dinamička svojstva sustava u slučaju da se lokalna podrška distribuiranih izvora koristi kao sredstvo povećanja prijenosne moći. Dinamičko vladanje sustava je također ugroženo i ukoliko kvarovi u mreži mogu uzrokovati ispad velikog broja generatora time bi se pojavio izraziti nedostatak snage proizvodnje. To se osobito javlja u primjeni frekvencijskih releja. Previsoko udešenje u podfrekvencijskoj zaštiti čini ionako ozbiljno stanje nakon ispada snage proizvodnje još težim. Frekvencijski releji isključuju distribuirane izvore i na taj način povećavaju nedostatak snage proizvodnje.

U *pogonu mreže* upravljanje naponom jedna je od osnovnih zadaća. Problemi se javljaju ako je veliki dio opterećenja napajan iz distribuiranih izvora na nižim naponskim razinama. U tim stanjima preostali generatori koji su priključeni na prijenosnu mrežu često nisu u mogućnosti upravljati naponom uz dostatnu razinu točnosti. Stoga se može javiti potreba za preispitivanjem prijenosnih omjera transformatora, uključivanjem poprečnih prigušnica ili promjenom topologije mreže putem isključenja vodova. Zbog istih razloga operator sustava treba posvetiti pozornost razini struja kratkog spoja koja može biti značajno izmijenjena u situacijama s malom proizvodnjom na prijenosnom naponu. Ispravnost prorade releja u sustavu tada može postati vrlo upitnom. Eventualni nedostatak poznavanja instaliranog kapaciteta i lokacije distribuiranih izvora izravno utječe na planove ponovnog uspostavljanja stanja nakon ozbiljnih incidenata u sustavu. Stoga se javlja potreba za primjenom komunikacijskih kanala u cilju omogućavanja nadzora operatoru sustava nad najznačajnijim distribuiranim izvorima.

*Planiranje proširenja proizvodnje i energetske planiranje* pod utjecajem su distribuiranih izvora zbog neupravljivosti njihove izlazne snage koja je pored toga u brojnim slučajevima još i teško predvidiva. U pogledu dugoročne pričuve u svrhu regulacije glavnih varijabli ees-a, distribuirani izvori neće zamijeniti konvencionalne izvore iste veličine izgradnje zbog njihovih stohastičkih značajki. Zahtjevi obzirom na sastav sustava proizvodnje promjenjivi su u ovisnosti o razlikama u godišnjim i dnevnim krivuljama opterećenja nakon angažiranja distribuiranih izvora i/ili povećanja zahtjeva za sekundarnom pričuvom. U Nizozemskoj je, na primjer, do sada približno 40% ukupno proizvedene električne energije dolazilo iz kogeneracijskih izvora

od kojih je 3000 MW bilo centralizirano, a 4000 MW decentralizirano. U kombinaciji sa snažnim jutarnjim povećanjem potražnje za električnom energijom dolazi do problema budući da je brzina promjene opterećenja termoenergetskih izvora ograničena. Pri energetskom planiranju (do 5 godina unaprijed) ponekad je potrebno razmotriti i smanjenje očekivane proizvodnje. Distribuirani izvori zasigurno utječu na godišnju krivulju opterećenja te time i na proizvodnju i trgovanje električnom energijom iz ostalih izvora. Ovaj je utjecaj stohastičke naravi te u slučaju vjetroelektrana i s vrlo velikim neizvjesnostima u predviđanju. Stoga je pored predviđanja potrošnje potrebno provoditi i predviđanje proizvodnje iz distribuiranih izvora.

*Održavanje snage pričuve, trgovanje električnom energijom, raspored proizvodnje i regulacija frekvencije* također su pod utjecajem distribuiranih izvora uslijed njihove stohastičke naravi. U velikim povezanim sustavima poput UCTE-ovog, primarna pričuva vjerojatno nije upitna obzirom da su čak i velike fluktuacije izlazne snage koje su očekivane kod vjetroelektrana ipak manjeg iznosa od fluktuacija opterećenja. U manjim (otočnim) sustavima taj je aspekt od posebnog značenja. Zahtjevi za sekundarnom pričuvom mogu biti povećani obzirom da se izlazna snaga distribuiranih izvora predviđa samo uz ograničenu točnost. Stoga je fluktuaciju izlazne snage distribuiranih izvora potrebno izbalansirati putem snage razmjene s povezanima partnerima ili unutar nekog od vlastitih podstava. Zahtjevi za sekundarnom pričuvom mogu doći pod utjecaj rizika od ispada velikog broja distribuiranih izvora priključenih na visokonaponsku i srednjenaponsku mrežu u uvjetima kvarova u mreži. Vjerojatnost u odnosu na druge incidente vrlo je specifična obzirom na zahtjeve sekundarne pričuve i ovisna o sustavu tako da se njezina analiza rijetko provodi. Raspored proizvodnje velikih proizvodnih objekata zasigurno će biti suočen s novim ograničenjima. Deterministički pristup pri optimiranju rasporeda angažiranja proizvodnih jedinica potrebno je preispitati ukoliko bi nakon angažmana distribuiranih izvora preostao vrlo mali iznos tereta i to uz fluktuacije kako tereta tako i distribuiranih izvora. Trgovanje električnom energijom pod sličnim je utjecajem, ali ponekad može predstavljati jedino rješenje. Posebice je to slučaj kada proizvodnja iz distribuiranih izvora nadvisuje iznos koji može biti korišten u ees-u nakon provedenog razmatranja svih ograničenja poput zahtjeva za snagom pričuve i zahtjeva za stabilnim pogonom.

### 3. TEHNIČKI UTJECAJI DISTRIBUIRANIH IZVORA NA DISTRIBUCIJSKI SUSTAV

Distribuirani izvori utječu na kvalitetu napajanja i tehničke aspekte poput snage kratkog spoja ili sustava zaštita [4]. U pogledu kvalitete napajanja najčešće se razmatra jedino kvaliteta napona. Pouzdanost opskrbe uglavnom se ne mijenja zbog integriranja distribuiranih

nih izvora koji se nalaze izvan sustava upravljanja iz hijerarhijski najvišeg središta obzirom da izostaje izraženija korelacija s opterećenjem. Neki su utjecaji lokalne naravi i mogu se razriješiti korištenjem lokalnih mjerenja. Ostali aspekti većinom ovise o strukturi mreže, pa se stoga razmatraju u okviru dugoročnog planiranja.

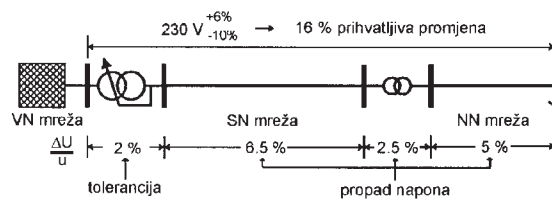
Ovisnost između distribuiranih izvora i pogona mreže razmatra se unutar okvira dvaju aspekata:

- **Mrežna moć.** Ograničena je problemom stabilnosti napona i problemom strujne opteretivosti opreme. Povećanje mrežne moći izvedivo je u određenom rasponu vrijednosti optimiranjem postojećih stupnjeva slobode u pogonu mreže ili investiranjem u novu primarnu opremu.
- **Priključni kriteriji.** Mogu doći pod utjecaj tehnologije distribuiranih izvora i ostalih lokalnih mjera. To se osobito primjenjuje na flikere, najveća odstupanja napona, struje kratkog spoja i selektivnost sustava zaštite.

U visokonaponskim mrežama priključni kriteriji uglavnom predstavljaju manji problem od strujne opteretivosti u normalnom pogonu te pri (n-1) kriteriju. Priklučenje distribuiranih izvora na visokonaponsku mrežu u današnje doba ulazi u okvire standardiziranih postupaka planiranja. U srednjenaponskim i niskonaponskim mrežama potrebno je pažljivije razmatrati napone u stacionarnim i prijelaznim stanjima. Osnovno obilježje neupravljivih distribuiranih izvora odnosi se na fluktuaciju izlazne snage koja nije u izravnoj vezi s električnim teretom. Rezultirajuća fluktuacija napona u mreži superponira se na već postojeću fluktuaciju uzrokovanu promjenama električnih tereta. Superponiranje fluktuacija može dovesti do potrebe za proširenjem raspona napona u normalnom pogonu. Eventualnim proširenjem raspona napona troši se pričuva u mreži i povećava neraspoloživost mreže za dodatne potrošače.

Za sve potrošače koji su priključeni na niskonaponsku mrežu ograničenje napona uzima se u rasponu 230 V +6%/-10%. Za potrošače priključene na srednjenaponsku mrežu ograničenje se uzima prema  $U_n \pm 10\%$ . Iz primjera predočenog na slici 1 uočava se da nakon oduzimanja najvećeg očekivanog propada napona u niskonaponskoj mreži ( $\approx 5\%$ ) i na transformatorima lokalne mreže ( $\approx 2.5\%$ ) te uključivanjem tolerancije regulatora napona transformatora između visokonaponske (VN) i srednjenaponske (SN) mreže ( $\approx 2\%$ ), ograničenost raspona napona u srednjenaponskoj mreži može poprimiti iznos  $\approx 6.5\%$ . Manji propad napona u niskonaponskoj mreži povećava moć srednjenaponske mreže i obrnuto. Dodatne komponente namijenjene regulaciji napona koje su instalirane na disperziranim lokacijama u takvim mrežama mogu povećati prijenosnu moć.

Potrebu za proširenjem raspona napona zbog injektiranja snage iz distribuiranih izvora moguće je ublažiti



Slika 1. Primjer proračuna prihvatljivog propada napona u srednjenaponskoj mreži

kompenzacijom jalove snage distribuiranih izvora. Na taj bi se način podržala optimizacija tokova jalove snage na višim naponskim razinama. Stoga faktor snage distribuiranih izvora nije nužno postaviti na konstantnu vrijednost (često 1) već dozvoliti određeni stupanj slobode u svrhu zadovoljavanja lokalnih zahtjeva. Ukoliko već nije ograničeno prihvatljivim rasponom napona, priključenje distribuiranih izvora bilo bi ograničeno sa strujnom opteretivosti opreme koja je određena termičkim naprezanjem. U današnje se doba uobičajeno pretpostavlja da termičko ograničenje struje može biti kratkotrajno narušeno, na primjer u uvjetima brzog ponovnog uspostavljanja napajanja nakon kvara.

Vjetroelektrane su posebice podložne stvaranju fluktuacija snage uzrokujući time nagle promjene napona i flikere. Poremećaji koji se na taj način uzrokuju izražavaju se pomoću faktora flikerske poremećenosti. U Njemačkoj, na primjer, u srednjenaponskim mrežama faktor dugotrajne flikerske poremećenosti ne smije prijeći granicu  $P_{fl} = 0.67$ . Zbog stohastičke neovisnosti signala poremećaja iz različitih potrošača te prigušenja uvedenog mrežnom impedancijom među potrošačima koji su razmješteni na većim udaljenostima, pretpostavlja se da je navedeno gornje ograničenje flikera osigurano ukoliko faktor ne prelazi  $P_{fl} = 0.37$  za pojedinačne potrošače i  $P_{fl} = 0.46$  za pojedinačne distribuirane izvore. U svrhu ograničavanja utjecaja flikera, brze promjene djelatne i jalove snage potrebno je odgovarajuće umanjiti. Prikladnim izborom tehnologije i veličine izgradnje elektrane moguće je osigurati stanje ees-a u kojem flikeri ne bi postali ograničavajućim faktorom. Najveća dozvoljena amplituda brzih jednokratnih promjena napona u njemačkim je srednjenaponskim mrežama ograničena na 4%. Takve promjene se javljaju samo u primjeni vjetroelektrana te su kao i flikeri ovisne o vrsti generatora.

Priključenje distribuiranih izvora koji imaju izravno spojene sinkrone ili asinkrone generatore može pridonijeti povišenju snage kratkog spoja iznad sposobnosti mrežne opreme. Snaga kratkog spoja je uobičajeno najvećeg iznosa u čvorištu VN/SN transformatora. U ovisnosti o konfiguraciji mreže, snaga kratkog spoja u tom čvorištu može doći na gornju granicu čak i kada u srednjenaponskoj mreži nema dodatnog izvora snage. Sukladno tome, u slučaju integriranja distribuiranih izvora potrebno je provjeriti snagu kratkog

spoja za svaki pojedinačni slučaj priključenja te ukoliko se pokaže neophodnim i zadržati njezin iznos unutar dozvoljenog raspona korištenjem odgovarajućih mjera unutar elektrane (na primjer, konverterskim odvajanjem) ili primjenom ograničivača struje kratkog spoja.

Zaštita proizvodnih jedinica kod distribuiranih izvora ne stvara posebne poteškoće i izvodi se pomoću standardne relejne opreme. Glavni se izazov pronalazi u projektiranju sučelja prema shemi zaštite te njegovoj koordinaciji prema mrežnim reljima i pogonskim uvjetima. Sustavi zaštite u sredjenaponskim mrežama u današnje su doba pretežito zasnovani na radikalnosti pogona. Selektivnost prorade postiže se korištenjem nezavisnih nadstrujnih releja s vremenskim zatezanjem koji su razmješteni bez razmatranja usmjeravanja. U slučaju pojave kvara isključuje se samo relevantna grana tako da preostali dio mreže nastavlja s normalnim pogonom. Ukoliko postoji više disperziranih točaka napajanja, sve grane s priključenim proizvodnim objektima napajaju mjesto kvara. To zapravo znači da ako sustav zaštite ne uspije izolirati distribuirani izvor od mreže dovoljno brzo po otkrivanju podnaponskog stanja, nezavisni nadstrujni releji s vremenskim zatezanjem mogu neselektivno isključivati grane u mreži koje nisu pogođene kvarom. Selektivnost se u okvirima određenih ograničenja u takvim slučajevima postiže povećanjem vremenskog zatezanja nadstrujnih releja, različitim udešavanjem vremenskih zatezanja ili povećanjem zone nedjelovanja sustava podnaponske zaštite. Za povećanje zone nedjelovanja ili odgađanje vremena prorade nezavisnih nadstrujnih releja nije u potpunosti moguće reći da ne stvaraju probleme, posebice obzirom na poželjnost brzog isključenja, izbjegavanje oštećenja opreme i sigurnost pogonskog osoblja. Osim toga, neophodno je omogućiti provođenje pouzdanog otkrivanja kvarova s malim strujama kvara. Posebice ukoliko sustavi imaju veći broj grana, postoji mogućnost nastanka problema vezanih uz koncept sustava zaštita tako da je ponekad potrebno poduzeti i radikalnije mjere (npr. instaliranje jednosmjernih nezavisnih nadstrujnih releja s vremenskim zatezanjem).

U osnovi, pouzdanost napajanja obično ne biva povećana integracijom distribuiranih izvora koji su izvan sustava upravljanja vođenog iz hijerarhijski najvišeg središta. Dapače, pri projektiranju je nužno preventivno djelovati kako distribuirani izvori ne bi utjecali na pouzdanost napajanja. Do toga može doći ukoliko selektivnost sustava zaštita postane ugrožena, učinkovitost automatskog ponovnog uključenja nije više zajamčena ili se javi opasnost preopterećenja kabela nakon privremene promjene konfiguracije mreže. Nadalje, naponi u stacionarnim stanjima ne smiju prijeći prihvatljiva ograničenja pri iznimnim uvjetima napajanja. U takvim slučajevima može biti neophodno izolirati distribuirani izvor od mreže ili opremiti distribuirani izvor automatskim ograničivačima napona.

Promjene tokova snaga praćene su promjenama gubitaka u mreži. Uz mala napajanje, gubici u mreži se smanjuju kako se period korištenja opreme (a time i faktor gubitaka) smanjuje. Gubici u mreži se povećavaju kada distribuirana proizvodnja uvelike premašuje iznos opterećenja. Također, gubici se povećavaju kada je faktor snage u distribuiranoj pojnoj točki potrebno udesiti s izrazitim induktivnim karakterom kako bi se osiguralo postojanje prihvatljivih pogonskih uvjeta u mreži (posebice dozvoljeni raspon napona). U principu, gubici u mreži nisu predmetom pogonskih ograničenja. Ipak, zbog ekonomičnosti potrebno ih je minimizirati.

Neupravljivi distribuirani izvori koji su priključeni na sredjenaponsku ili niskonaponsku mrežu povećavaju neophodne investicije u mreži. Njihova primjena uzrokuje potrebu za proširenjem očekivanih raspona napona čime se smanjuje mrežna moć koja je potrebna za napajanje dodatnih potrošača.

#### 4. RJEŠENJA TEHNIČKIH UTJECAJA I OTVORENA PITANJA

U današnje doba postoje dva osnovna pristupa planiranju priključenja distribuiranih izvora na mrežu 4. Oba pristupa imaju istu pozadinu koja se odnosi na ograničenost kvalitete napajanja potrošača prema europskoj normi EN 50160. Sljedeća dva primjera objašnjavaju različitost u pristupima:

- Samo su zahtjevi potrošača značajni u odlučivanju o mogućnosti priključenja distribuiranih izvora te o tome kako treba izgledati projekt. Operator mreže provjerava mogućnost nastanka interferencije u svakom pojedinačnom slučaju. Ovaj se postupak primjenjuje u Velikoj Britaniji, gdje su pripadni standardi kvalitete definirani na temelju inženjerskih preporuka.
- Kako bi se olakšalo razmatranje priključenja velikog broja distribuiranih izvora, donose se posebna pravila o priključenju čime se cijeli postupak čini praktičnijim. U Njemačkoj su pravila o priključenju izvedena iz odgovarajućih standarda o pogonu mreže i zahtjevima potrošača. Pri tome je pretpostavljeno postojanje tipične sredjenaponske mreže s prosječnim opterećenjima te tipičnim vrstama i duljinama vodova.

Općenito se u drugom pristupu ne jamči kvaliteta napajanja u situacijama s velikom gustoćom distribuiranih izvora. Ipak, česte su situacije u kojima se distribuirani izvori priključuju obzirom na zahtjeve potrošača kada to pojednostavljena pravila o priključenju na mrežu ne dozvoljavaju. U Njemačkoj, Danskoj, Španjolskoj i Nizozemskoj su prihvatljive vrijednosti promjene napona u stacionarnom stanju znatno restriktivnije u usporedbi s vrijednostima definiranim u EN50160 (10%). Restriktivnost je motivirana pretpostavkom prema kojoj ukupni prihvatljivi raspon sa

stajališta potrošača ne smije biti predviđen samo za jedan distribuirani izvor već treba biti raspodijeljen između potrošača i distribuiranog izvora. U Njemačkoj se isti princip primjenjuje u definiranju kvalitete napona.

Potrošnja jalove snage kao sredstvo smanjenja povišenih iznosa napona u stacionarnom stanju u nekim je zemljama prihvatljiva u određenoj mjeri. U Nizozemskoj se injektiranje jalove snage ne smatra korisnim, dok se u drugim zemljama primjenjuje samo u posebnim slučajevima. Niti u jednoj zemlji nema naplate za potrošnju jalove snage ukoliko je  $\cos \varphi > 0.9$ . Ukoliko je  $\cos \varphi < 0.9$ , uvode se tarife za naplatu koje se kreću između 0 i 0.015 €/kVAh u Njemačkoj te između 0 i 4% od cijene kWh u Španjolskoj. U Nizozemskoj se primjenjuju različiti dogovori. Samo se u Španjolskoj primjenjuju tarife također i za isporuku jalove snage iz distribuiranih izvora. Tehnički aspekti sinkronizacije i zaštite trebaju ispuniti zahtjeve postavljene tehničkim standardima, a ovisni su o specifičnostima sustava zaštite.

U razmatranju distribuiranih izvora pri planiranju i pogonu elektroenergetskog sustava neophodno je uspostaviti i koristiti nove matematičke modele analize [5]. Zbog stohastičke ovisnosti izlazne snage distribuiranih izvora neophodno je uvesti dodatne elemente vezane uz različite neizvjesnosti. Slijedeći su aspekti neizvjesnosti od posebnog značenja obzirom na primjenu distribuiranih izvora:

- **Predviđanje opterećenja/proizvodnje.** Uvrštenje proizvodnih jedinica u raspored proizvodnje provodi se na temelju prethodno izvedenog predviđanja opterećenja koje u tradicionalnim sustavima sadrži neizvjesnost u rasponu od 3 %. Ova se neizvjesnost neutralizira provođenjem ekonomskog dispečinga u realnom vremenu. Povećanje udjela neupravljivih jedinica koje su obilježene stohastičkim ponašanjem povećava neizvjesnost u skupnim predviđanjima opterećenja i proizvodnje. Stoga je neophodno razviti nove modele za predviđanje proizvodnje i to u ovisnosti o tehnologiji distribuiranih izvora i pridruženoj razini slučajnosti. Prikupljanje i pohranjivanje podataka predstavljaju temeljni aspekt. U Danskoj su sve konvencionalne jedinice iznad 2 MW te gotovo sve veće vjetroelektrane opremljene uređajima za mjerenje u realnom vremenu. Za manje jedinice rješenje je predviđeno u obliku snimača (*eng. recorder*). Za slučaj primjene većeg broja mikro-proizvodnih jedinica, ovom je aspektu nužno posvetiti veliku pozornost. Potrebno je poduzeti istraživačke aktivnosti koje se odnose na utjecaj koji povećana neizvjesnost ima na uvrštenje proizvodnih jedinica u raspored proizvodnje te na ekonomski dispečing.
- **Prilagodba zahtjeva obzirom na snagu pričuve i instalirani kapacitet.** U današnje su doba zahtjevi obzirom na snagu pričuve (primarnu i sekundarnu) zasnovani na pretpostavkama koje su postavljene za

vertikalno integriranu strukturu tradicionalnih elektroenergetskih sustava. Struktura se odnosi na veliki broj klasičnih proizvodnih objekata i manji broj neupravljivih jedinica. Proizvodne jedinice s velikim stohastičkim vladanjem doprinose fluktuacijama proizvodnje. Kvarovi u mreži ponekad uzrokuju ispad većeg broja distribuiranih izvora (Danska). Zbog toga je neophodno provoditi analizu vjerojatnosti ispada određenog iznosa snage proizvodnje. Fluktuacije i ispadi proizvodnih jedinica utječu na neophodni iznos snage pričuve (primarne i sekundarne). Nadalje, ukupni iznos instaliranog kapaciteta potrebno je preispitati obzirom na pouzdanost budući da distribuirani izvori zamjenjuju samo jedan njegov dio. Navedene zahtjeve pričuve potrebno je prilagoditi ovisno o broju i vrsti distribuiranih izvora koji su instalirani u sustavu.

- **Planiranje prijenosne mreže (VN).** Distribuirani izvori mogu imati veliki utjecaj na planiranje visokonaponske prijenosne mreže. U nekim se situacijama mogu javiti kao potencijalno alternativna rješenja standardnom razvoju mreže. U angažmanu IPP jedinica moguće je izbjeći mrežna ograničenja ukoliko jedinice imaju garantirani postotak raspoloživosti (na primjer, 95 % tijekom zimske sezone u standardnim ugovorima za kogeneraciju u Francuskoj). Raspoloživost može biti vremenski ovisna i vezana uz trenutno stanje opterećenja, što je čini predmetom planiranja. Za preostala ograničenja, operator mreže poduzima rješenja u domeni generatora i okolne lokalne mreže (na primjer, za slučaj neraspodijeljenosti voda) koja predstavljaju alternativu izvedbi pojačanja u mreži. Za EdF je odnedavno uvedena obveza razmatranja takvih rješenja uslijed zahtjeva vezanih uz zaštitu okoliša. Za bilo koji problem razvoja potrebno je razmotriti različita rješenja koja su zasnovana ili na distribuiranim izvorima ili na pojačanjima u mreži. Uz distribuiranu proizvodnju, postotak neraspodijeljenosti kod distribuiranih jedinica znatno je veći nego kod vodova ( $5 \cdot 10^{-2}$  prema  $5 \cdot 10^{-4}$ ). Stoga (n-1) pravilo nije dovoljno, pa treba razmotriti i ostale situacije poput (n-2) ili čak i (n-3).
- **Planiranje distribucijske mreže (SN i NN).** Neizvjesnosti u razvoju instaliranog kapaciteta distribuiranih izvora te njihovim lokacijama utječu također i na planiranje distribucijske SN/NN mreže. U novim okolnostima, postojeće mreže je potrebno koristiti znatno učinkovitije i to uz uporabu novih modela u koje su uključeni distribuirani izvori. Potrebno je točnije proračunati njihov utjecaj na tokove snaga u distribucijskim mrežama. Obzirom na iskustva iz Nizozemske i Njemačke, uporabom novih modela moguće je odgoditi ili izbjeći investicije u mreži i na taj način povećati ukupnu ekonomičnost.

Posebna pravila koja su postavljena unutar sustava usluga različita su među različitim zemljama i ovisna o strukturi elektroenergetskog sustava i vrsti deregula-



cije. Usluge je potrebno pružiti korisnicima kako bi se zajamčio dostatan pogon ukupnog ees-a. Usluge pruža operator sustava koji ih dobiva iz proizvodnih objekata i mreže. Konceptijski se ideja zasniva na sudjelovanju svih generatora (uključujući i distribuirane izvore) u svim vrstama usluga. U protivnom bi generatori koji u tome ne sudjeluju usluge trebali kupiti. Prema drugom konceptu, kupci su obvezni kupiti usluge od bilo kojeg dobavljača (NERC pravila). U nastavku su predložena rješenja u sustavu usluga prema različitim zemljama. U onim zemljama gdje su proizvodnja i distribucija potpuno razdvojene (Velika Britanija i skandinavske zemlje) usluge osigurava prijenosna kompanija. Neke usluge mogu biti natjecateljski ustrojene (rotirajuća pričuva) za što je neophodno uspostaviti tržišni mehanizam. Ostale usluge nisu u sustavu natjecanja (dispečiranje i raspoređivanje jedinica). Usluge se dijele prema slijedećim općim skupinama:

- **Dispečiranje.** Distribuirani izvori obično nisu uključeni u sustav upravljanja iz hijerarhijski najvišeg središta koji izvodi operator sustava. Iskustva iz Nizozemske i Danske pokazuju da pogon s velikim brojem distribuiranih izvora može dovesti do situacija u kojima velike središnje proizvodne jedinice ne mogu slijediti promjene opterećenja. Stoga je uspostavljena vremenski promjenjiva cijena električne energije isporučene iz distribuiranih izvora kako bi se promovirala veća proizvodnja tijekom perioda većeg opterećenja i motivirali distribuirani izvori da slijede krivulju opterećenja. Veće cijene električne energije javljaju se tijekom dnevnih perioda s visokom potrošnjom, a niže cijene tijekom noći.
- **Pričuva.** U svrhu zadovoljavajućeg ispunjavanja zahtjeva obzirom na primarnu pričuvu, statičnost regulatora brzine vrtnje/snage postavlja se između 2 % i 6 % na svim jedinicama koje su u pogonu. U dereguliranim sustavima definiraju se obveze generatora i/ili uspostavlja tržište pomoću kojeg se motivira generatore da doprinose primarnoj pričuvi. U Velikoj Britaniji su generatori plaćeni prema MW/Hz vrijednosti koja je proporcionalna njihovom instaliranom kapacitetu i godišnjem prosjeku (iznad 5 godina) vremena provedenog u pogonu. Plaća se iznos definiran temeljem umnoška  $((\text{MW/h}) \times \text{ugovorena cijena})$  za sve generatore. Višak primarne pričuve prodaje se na odvojenom tržištu. Proizvođači iskazuju cijenu i veličinu raspoložive primarne pričuve koja nadvisuje obveznu vrijednost, a generatori koji nemaju odgovarajuću vrijednost obvezni su kupiti potrebnu pričuvu od drugih generatora. U takav je sustav moguće uključiti i distribuirane izvore na način sličan onome koji vrijedi za sve ostale generatore. Naravno, samo ukoliko su registrirani kod operatora sustava. U sustavima s prevladavajućom proizvodnjom iz hidroelektrana, sekundarna pričuva je raspoloživa u dostatnom iznosu. Problemi se eventualno mogu javiti u sustavima s pretežnom proizvodnjom iz termoelektrana (slučaj Nizozemske). U

slučaju već uspostavljenog tržišta regulacijske snage, moguće su kratkoročne i dugoročne kupoprodaje kapaciteta za sekundarnu pričuvu. Distribuirani izvori mogu sudjelovati u aktivnostima na tom tržištu. U slučaju da u sustavu nema dovoljno raspoložive pričuve (u uvjetima privremenog ili trajnog nedostatka velikih generatora ili ograničene prijenosne moći), izdavanje obveznih naloga može postati neophodnom mjerom osiguravanja normalnog pogona.

- **Regulacija napona.** Kvaliteta napona usko je vezana uz snagu kratkog spoja. Zajamčena je pravilnim projektiranjem sustava te sigurnim dispečiranjem. U svrhu regulacije napona u visokonaponskom prijenosnom sustavu, operator sustava instruirao proizvođače kako bi proizvodili jalovu snagu u iznosu dovoljnom za stabilan pogon mreže i minimalne gubitke. Distribuirani izvori općenito ne sudjeluju u regulaciji napona. Međutim, u slučaju da su generatori koji su pod nadzorom operatora sustava obvezni sudjelovati u regulaciji napona bez nadoknade, potrebno je uvesti ekvivalentnu naknadu za distribuirane izvore.
- **Pogon sustava.** Pogon sustava, uklapanje vodova, raspored proizvodnje, planirano održavanje vodova i postrojenja, očitavanje brojila i naplatu izvodi operator sustava. Također, sve tehničke ili organizacijske mjere koje se poduzimaju u svrhu lociranja ispada te prevencije ispada i raspada u nadležnosti su operatora sustava. Generatori trebaju sudjelovati u mjerama ponovnog uspostavljanja stanja nakon eventualnog raspada (sposobnost 'crnog' pokretanja). U tim aktivnostima trebaju sudjelovati i distribuirani izvori.

Razvoj odgovarajućih cijena za sustav usluga u mnogim je zemljama još uvijek u nastajanju. Neke od usluga mogu se naći u uvjetima tržišnog natjecateljstva (rotirajuća pričuva) uz potrebu uspostavljanja tržišnog mehanizma. U tom slučaju distribuirani izvori kao i svi ostali mogu sudjelovati u tržišnom nadmetanju. U slučaju postojanja obveznih odnosa bez odgovarajućeg načina plaćanja, potrebno je uspostaviti ekvivalentnu naknadu za distribuirane izvore kako bi se izbjegla diskriminacija.

Distribuirani izvori se u elektroprivredama doživljavaju kao novo područje aktivnosti. Na primjeru CHP-a već je nekoliko zemalja dokazalo uspješnost u zadovoljavanju potreba onih potrošača kojima se istodobno isporučuje električna energija i toplina. Središnja poslovna orijentacija takvih potrošača uglavnom je različita od dobave energije. Stoga oni u distribuirane izvore investiraju samo ukoliko procijene da postoje uvjeti za ostvarenje značajne ekonomske koristi od takve aktivnosti. Na taj se način otvara niz mogućnosti za zajedničkom suradnjom. Iskustva iz svijeta ukazuju na brzi porast distribuirane proizvodnje koja je promovirana bilo političkim utjecajima (poput subvencije) ili temeljem povećanog natjecateljstva unutar otvorenog tržišta.

Među raspoloživim tehnologijama istaknuto mjesto pripada vjetroelektranama. Uz njih se još razmatraju i kogeneracijske jedinice, male hidro jedinice, fotona-ponski sustavi, gorive stanice te mikro-izvori (diesel ili plinski motori, mikro turbine). Plinske turbine zauzimaju sve veći udjel na industrijskom tržištu (iznad 50 MW) te kod IPP proizvođača. Razlog je svakako u njihovim modularnim svojstvima koja značajno skraćuju vrijeme instalacije te time i vrijeme povrata investicije. Zbog velike potražnje, njihova cijena po kW značajno je smanjena. Štoviše, niske cijene plina, subvencije te otvaranje tržišta u gotovo svim zemljama promoviraju instaliranje turbina na lokacijama potrošača. Nedavni razvoj u području mikro-proizvodnje ukazuje na mogućnost da vrlo male turbine s električnom snagom manjom od 50 kW mogu biti korištene za proizvodnju električne energije na lokacijama privatnih potrošača.

Vrsta tržišta, monopolistička ili otvorena struktura, te štoviše razine cijena snage i energije utječu na udjel distribuiranih izvora i brzinu promjene tog udjela. U Njemačkoj je zakonskim rješenjem zajamčena visoka cijena obnovljivim izvorima što je uzrokovalo brzi porast izgradnje vjetroelektrana od približno 0 MW u 1990. godini do više od 2000 MW krajem 1997. godine. Sličan razvoj javlja se u mnogim zemljama. Otvaranje i mijenjanje strukture tržišta vodi prema brzim promjenama strukture proizvodnje. U nekoliko je zemalja uočena tendencija prema zamjeni konvencionalne proizvodnje ukoliko postoji značajan poticaj natjecateljstva ili razlike u cijeni. S druge strane, u zemljama s niskim cijenama energije poput Norveške s velikim hidro kapacitetom, očekivani porast distribuirane proizvodnje vrlo je nizak.

Izgradnja distribuiranih izvora u većem broju zasigurno utječe na gotovo sve dijelove sustava opskrbe električnom energijom. Osnovne karakteristike obilježava neizvjesnost pridružena njihovoj izlaznoj snazi te ponekad čak i nedostatan poznavanje njihovog instaliranog kapaciteta. Stoga se gotovo uvijek javlja zahtjev za izgradnjom snažnih i prilagodljivih mreža u blizini distribuiranih izvora. Ponekad se zahtjevi postavljaju sve do visokonaponske razine ukoliko je povećana potreba za trgovanjem snagom i pričuvom u sustavu. Zamjena električne energije isporučene iz velikih konvencionalnih proizvodnih objekata s energijom iz distribuiranih izvora utječe na pogon mreže, zahtjeve za pričuvom, regulaciju frekvencije, vozni red... U distribucijskim mrežama, izgradnja distribuiranih izvora može povećati potrebu za mrežnom moći i stvoriti dodatne troškove pri planiranju. Ukoliko su uključeni u sustav središnjeg upravljanja, distribuirani izvori mogu imati pozitivan utjecaj na sustav u obliku povećanja pouzdanosti.

Razvoj skupa pravila za priključenje distribuiranih izvora na mrežu pomaže u razmatranju tehničkih aspekata u okolnoj mreži. Dva su osnovna pristupa. Prema prvom se pristupu za svaki pojedinačni slučaj traži suglasnost sa zahtjevima potrošača bilo na temelju

analize tehničkih ograničenja ili postavljenog skupa više ili manje pojednostavljenih pravila priključenja na temelju kojih se ocjenjuje mogućnost priključka. Nedostatak ovog pristupa nalazi se u podcijenjenoj mrežnoj moći u nekim slučajevima, a prednost u obliku značajnog smanjenja troškova planiranja. Prema drugom se pristupu razvijaju modeli u svrhu razmatranja distribuiranih izvora u fazama planiranja i pogona. Potreba za novim razvojem prepoznata je u zajedničkom predviđanju opterećenja potrošača i proizvodnje iz distribuiranih izvora, planiranju snage pričuve, planiranju VN mreže te planiranju i pogonu SN/NN mreže. Osim uključivanja u različite faze planiranja, poželjno je uspostaviti natjecateljske uvjete između klasičnih proizvodnih jedinica i distribuiranih izvora na nediskriminirajućoj osnovi. Na taj se način upućuju distribuirani izvori na pružanje usluga u sustavu poput svih ostalih generatora. Nasuprot tome nalazi se samo uspostavljanje ekvivalentnih naknada. Posljednju strategiju predstavlja suradnja s operatorima distribuiranih izvora nuđenjem usluga u okviru planiranja i raspodjele. Time se operatorima sustava olakšava preglednost nad instaliranim kapacitetom distribuiranih izvora. Iako se opisane zadaće možda doimaju kao prepreke kojima se nastoji smanjiti penetraciju, osnovni im je cilj integracija distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav na najbolji mogući način i to bez diskriminiranja bilo kojeg od igrača na tržištu.

Mnoga su pitanja još uvijek otvorena. Pravila priključenja na mrežu u mnogim su sustavima još uvijek u fazi razvoja. Modeli za planiranje i pogon koji uključuju distribuirane izvore djelomično postoje, ali ih je daljnjim razvojem potrebno poboljšati i proširiti. Na poslijetku, u mnogim je sustavima strukturu tržišta potrebno prilagoditi rastućem broju distribuiranih izvora. Posebice je to potrebno obzirom na odgovarajuće sudjelovanje u pružanju usluga koje se zahtijevaju od svih generatora u cjelini.

## 5. OPĆI PROBLEMI U PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ VJETROELEKTRANA

U svrhu balansiranja polariziranih stavova o izgradnji vjetroelektrana potrebno je razmotriti ekonomske i tehničke aspekte koji su povezani s uvjetima njihovog priključenja na mrežu. Ekonomski se aspekti razmatraju tek odnedavno i čini se da će postati očitima samo u dereguliranim sustavima gdje postoji jasna razlika između proizvodnje kWh i pružanja mrežnih usluga. S promjenom tokova djelatne i jalove snage nakon priključenja vjetroelektrane dolazi do izmjene naravi distribucijske mreže. Mreža poprima aktivnu narav uslijed čega se javljaju značajni tehnički aspekti koje je potrebno razmotriti na odgovarajući način. U većini se zemalja pozornost usmjerava prema stvaranju propisa i pravila pomoću kojih se osigurava kvaliteta napajanja potrošača. Povećano uvođenje obnovljivih izvora elek-

trične energije poput vjetroelektrana stvara komponentu neupravljivosti u ees-u. Na temelju vremenske prognoze moguće je predvidjeti srednju brzinu vjetra u kratkoročnom periodu, ali ne i dinamičke promjene, manje ili veće, koje se događaju oko srednje brzine. Dinamičke promjene brzine vjetra uzrokuju promjenjivost iznosa injektirane snage u mrežu. Time se nadalje uzrokuju poteškoće u regulaciji napona i frekvencije, odnosno u kvaliteti isporučene električne energije.

Tehnički aspekti priključenja vjetroelektrana vezani su uz slijedeće probleme [4, 6, 7, 8]:

- **Regulacija napona i kompenzacija jalove snage.** U svakom distribucijskom sustavu jasno je iskazana obveza napajanja potrošača uz održavanje napona u određenim granicama. Ovaj zahtjev često određuje troškove koji su pridruženi projektiranju i izvedbi distribucijske mreže. Priključenje vjetroelektrane uzrokuje promjenu tokova snaga i naponskog profila u ovisnosti o stanju opterećenja u mreži. Osim distribucijskog transformatora s regulacijom pod opterećenjem, često je potrebno primijeniti i sredstva za kompenzaciju jalove snage kako bi se regulirao napon u čvorištima distribucijske mreže.
- **Regulacija frekvencije i upravljanje snagom.** Problem s frekvencijom javlja se u otopnom režimu rada distribucijske mreže na koji je priključena vjetroelektrana. Ukoliko u mreži nema drugih lokalnih proizvodnih jedinica reguliranog tipa, frekvenciju nije moguće održati obzirom da vjetroelektrana u najčešćoj izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom nije u reguliranom pogonu. Do otopnog pogona distribucijske mreže može doći ispadom transformatora koji je lociran u pojnoj točki prema visokonaponskoj mreži.
- **Stabilnost napona i kuta.** Ukoliko se na generatore distribuirane proizvodnje gleda samo kao na proizvođače kWh, razmatranje stabilnosti ne poprima veće značenje. Naime, u slučaju kvara u mreži i ispada distribuiranih generatora, izgubljen je jedino kratki period lokalne proizvodnje koja će nakon toga biti ubrzo ponovno uspostavljena. Nasuprot tome, ukoliko su distribuirani generatori značajni u podršci pogona cijelog elektroenergetskog sustava, prijelazne pojave u problemu stabilnosti poprimaju veliko značenje. U nestabilnom stanju, asinkroni generatori u vjetroelektranama ubrzavaju se i povlače vrlo veliku jalovu snagu iz mreže čime se naponi u mreži nadalje snižavaju.
- **Kvaliteta isporučene električne energije.** Kvaliteta napajanja procjenjuje se obzirom na prijelazne promjene napona te harmoničku izobličenosn mreže i vjetroelektrane nakon priključenja može doći do narušavanja kvalitete napona kod ostalih korisnika (potrošački tereti) u distribucijskoj mreži. Promjenjivost brzine vjetra uvelike se preslikava na snagu

koju vjetroelektrana injektira u mrežu. Brzina i intenzitet tih promjena uvelike utječu na kvalitetu.

- **Zaštita.** Zaštita pasivne distribucijske mreže udešena je obzirom na smjer struje koja dolazi samo iz jednog izvora. Kvar se neutralizira proradom samo jednog zaštitnog uređaja (serijski nadstrujni uređaji). Ukoliko su na distribucijsku mrežu priključene vjetroelektrane, moguće je stvaranje uvjeta pri kojima ne dolazi do prorade zaštitnih uređaja udešenih obzirom na samo jedan smjer napajanja mjesta kvara. Shema automatskog ponovnog uključenja voda pogođenog kvarom od velikog je značenja za neprekidnost opskrbe potrošača električnom energijom. Međutim, ukoliko se takva shema primjenjuje na vodu koji je u bliskom spoju s vjetroelektranom, moguća je pojava znatnih oštećenja zbog loše sinkronizacije.
- **Pouzdanost i raspoloživost.** Pouzdanost povrata investicije predstavlja osnovni motiv investiranja u distribuiranu proizvodnju električne energije. Distribuirani generatori imaju znatno veći utjecaj na pouzdanost opskrbe krajnjeg potrošača nego na pouzdanost elektroprivrede. Međutim, ponekad i elektroprivreda ima koristi od distribuirane proizvodnje. Osobito ukoliko zbog njezine primjene dolazi do odgode investicija u mreži te do ublažavanja vrlo visokih cijena električne energije.

Navedeni općeniti problemi odnose se na tehničke prepreke koje je potrebno premostiti kako bi se povećali izgledi za izgradnju vjetroelektrana. Neke od tehničkih prepreka koje se mogu lokalno javiti unutar navedenih općih problema su: neodgovarajuće termičko dimenzioniranje opreme, previsoka razina struja kratkog spoja, nestabilnost generatora, neodgovarajuće postavke transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom, interakcija s regulacijom napona zasnovanom na kompenzaciji pada napona uzduž voda, izloženost potrošača povećanom iznosu napona u stacionarnom stanju, povećanje gubitaka, narušavanje kvalitete isporučene električne energije, narušavanje reda u sustavu zaštita...

S obzirom na razdjelnu ulogu distribucijskih mreža, značajno je provjeriti tehničke uvjete napajanja ostalih potrošača nakon priključenja predmetnih vjetroelektrana. U većini slučajeva distribucijska mreža nije projektirana za smještaj generatora. Štoviše, distribucijska mreža je mogla biti u pogonu i napajati potrošače tijekom većeg broja godina prije samog priključenja. Ukoliko veličina izgradnje vjetroelektrane predstavlja značajan dio mrežne moći, njezino priključenje ima značajan utjecaj na karakteristike mreže. Mreža može ozbiljno ograničiti evakuaciju snage iz vjetroelektrane. Vjetroelektranu je stoga potrebno analizirati kao komponentu sustava. Neophodno je provesti studijsku analizu kako bi se procijenila potreba za eventualnim izvođenjem pojačanja u mreži nakon priključenja vjetroelektrane. U nekim slučajevima studijske analize mogu ukazati i na to da, obzirom na ukupne troškove,

ograničenje pogona vjetroelektrane predstavlja bolje rješenje u usporedbi s izvođenjem pojačanja u mreži. Projektiranje distribucijskih mreža slijedi dvije temeljne ideje: isporuka električne energije potrošačima uz prihvatljivu kvalitetu napajanja u normalnim uvjetima pogona te zaštita integriteta sustava u slučaju da je dio mreže u stanju kvara. Studijska analiza oslanja se na proračun tokova snaga, proračun kratkog spoja i proračun stabilnosti. Navedeni proračuni izvode se korištenjem stvarnih parametara ugrađene opreme u vjetroelektranama, te relevantnih elemenata distribucijskih mreža.

Dijelovi električnih naprava koje potrošači priključuju na mrežu (posebice elektronički uređaji) namijenjeni su pogonu unutar relativno uskih granica napona oko nazivne vrijednosti. Stoga napon u svim čvorištima distribucijske mreže treba održavati unutar dozvoljenog raspona u svim očekivanim stanjima opterećenja. Proračun tokova snaga koristi se u svrhu provjere normalnih pogonskih stanja elektroenergetske mreže. Uz zadane snage proizvodnje i opterećenja u sustavu, proračun tokova snaga rezultira s naponima u svim čvorištima sustava. Uz poznate napone po iznosu i kutu, računaju se tokovi snaga kroz sve elemente mreže. Proračun tokova snaga zapravo se koristi u svrhu određivanja stanja u mreži pri različitim iznosima snage opterećenja te različitim angažmanima proizvodnih jedinica. Prikupljanje parametara mreže često je vremenski vrlo zahtjevna zadaća. Impedancije vodova i kabela potrebno je preračunati u matematički iskoristiv oblik na osnovi podataka proizvođača.

Brojni faktori mogu utjecati na pojavu oštećenja u distribucijskoj mreži. Vodiči u distribucijskoj mreži odvojeni su od zemlje te međusobno razmaknuti korištenjem različitih izolacijskih materijala (zrak, papir ili polimer). Ponekad može doći do nepredvidivih puknuća unutar izolacije i stvaranja kratkog spoja između vodiča ili između vodiča i zemlje. Ova se nenormalna putanja vođenja struje naziva kvarom. Kvarovi u obliku kratkih spojeva ne ugrožavaju samo sigurnost pogonskog osoblja već mogu značajno oštetiti opremu ukoliko se pojave visoki iznosi struje na mjestu kratkog spoja. Također, moguće je da struja poprimi iznos veći od iznosa nazivnog dimenzioniranja prekidača koji je upravo namijenjen njezinom prekidanju. Proračun kratkog spoja koristi se u svrhu prepoznavanja iznosa struje kvara pri različitim konfiguracijama mreže i mjestima kvara. Rezultati se ne koriste samo u svrhu provjere razine struje kvara te dostatne dimenzioniranosti komponenti mreže kroz koje struja prolazi. Potrebno je štoviše potvrditi da je struja kvara dovoljno velikog iznosa kako bi sustav zaštite uopće mogao prepoznati da se radi o stanju kvara. Projektirati sustav zaštite na način da je moguće prepoznati i izdvojiti stanja sustava s velikim strujama opterećenja u normalnom pogonu te stanja sustava s malim strujama u uvjetima kvara u mreži vrlo je teška zadaća. Obzirom da pogreške pri otkrivanju kvara čine neprihvatljiv si-

gurnosni rizik, distribucijski sustav potrebno je projektirati tako da je struja kvara dovoljno velikog iznosa te da može biti prepoznata u svim uvjetima pogona. Potrebno je učiniti razliku između simetričnih i nesimetričnih kratkih spojeva. Simetrični kratki spojevi obuhvaćaju sve tri faze na sličan način tako da u njima ne dolazi do izmjene simetrije između napona i struja. U proračunu tih kvarova dovoljno je koristiti jednofazni model mreže. Nesimetrični kratki spojevi uzrokuju nesimetričnost u mreži i zahtijevaju znatno složeniju analizu.

Tokovi snaga i struje kvarova proračunavaju se uz pretpostavku da se sustav prethodno nalazio u točki ravnoteže stacionarnog stanja. U točki ravnoteže, napon po iznosu i kutu u svim je čvorištima takav da snaga teče od čvorišta s viškom proizvodnje nad potrošnjom do čvorišta s potrošnjom većom od proizvodnje. U svakom čvorištu postoji ravnoteža između snage proizvodnje, snage potrošnje i snage prijenosa prema drugim čvorištima. Ravnoteža se primjenjuje i na proizvodne jedinice. Mehanička snaga pogonskog stroja jednaka je električnoj snazi koju proizvodi generator uz zanezarene gubitke. U mehaničkom pogledu, moment ubrzanja na osnovi pogonskog stroja jednak je momentu usporenja uzrokovanog proizvodnjom električne snage iz generatora. Obzirom da je ukupni moment jednak nuli, osovina se vrti konstantnom brzinom. Kutna pozicija rotora mjeri se u odnosu na referentni sustav koji rotira sinkronom brzinom i naziva kutem rotora. U točki ravnoteže, kut rotora čini mjeru iznosa snaga koju generator injektira u mrežu. Kvarovi uzrokuju promjenu ravnotežnog stanja zbog čega pretpostavka o stacionarnom stanju sustava više nije upotrebljiva. Elektroenergetski sustav je tada potrebno tretirati kao dinamički sustav. Proračun stabilnosti dinamičkog sustava oslanja se na diferencijalne jednadžbe, a ne samo na algebarske kao u stacionarnom stanju. Diferencijalne se jednadžbe koriste u svrhu provjere sinkronosti pogona rotirajućih strojeva nakon poremećaja. Ukoliko je sinkronizam održan, sustav se smatra stabilnim. U protivnom, sustav je nestabilan. Svrha proračuna stabilnosti nalazi se u procjeni sposobnosti sustava da izdrži najteže poremećaje. Koristi se i pri određivanju ograničenja pogona ees-a.

Ako je potrebno analizirati brze prijelazne pojave te vladanje naprava zasnovanih na energetskej elektronici, prethodne tri vrste proračuna mogu se pokazati neodgovarajućima. Naime, ti su proračuni zasnovani na pretpostavci da su valni oblici napona i struje sinusoidalni zbog čega se ukupni sustav modelira korištenjem fazora u domeni elektromehaničkih prijelaznih pojava. U slučaju da ta pretpostavka više nije prihvatljiva, sustav je potrebno analizirati unutar znatno kraće vremenske skale korištenjem elektromagnetskih prijelaznih modela. U tim modelima nema pretpostavke o sinusoidalnosti valnih oblika. Valni oblici proračunavaju se korak-po-korak korištenjem detaljnog sustava diferencijalnih jednadžbi koji obuhvaća sve kompo-

nente sustava. Ovakvim se pristupom vladanje sustava obuhvaća na vrlo precizan i detaljan način.

Navedene vrste proračuna koriste se za procjenu ozbiljnosti tehničkih problema koji se mogu javiti nakon priključenja vjetroelektrane na mrežu. U nastavu su opisani problemi promjenjivosti napona u mreži, povećanja razine struja kratkog spoja, kvalitete isporučene električne energije, zaštite, stabilnosti, pogona mreže i ekonomičnosti.

**Promjenjivost napona u mreži.** U svakom distribucijskom sustavu jasno je iskazana obveza napajanja potrošača uz održavanje napona unutar dozvoljenih granica. Ovaj zahtjev često određuje troškove i način projektiranja distribucijske mreže. Tijekom dugog niza godina razvijana je metodologija maksimalnog iskorištenja elemenata distribucijske mreže kako bi potrošači bili napajani uz zadovoljavajući napon. Razine distribucijskog napona različito su definirane u različitim zemljama, ali se u osnovi vode principom pogona radijalnog napajanja. Prijenosni omjer distribucijskog transformatora promjenjiv je u skladu s postavljenim kriterijem regulacije napona. Na taj se način u stanju maksimalnog opterećenja osigurava napajanje i najudaljenijih potrošača uz prihvatljiv napon. U stanju minimalnog opterećenja, napon kod svih potrošača nalazi se naposljedno ispod najviše dozvoljene vrijednosti. Ukoliko se na kraj radijalnog kraka priključi generator dolazi do promjene tokova snaga i naponskog profila. Najteža situacija uglavnom se javlja kada je snaga opterećenja najmanja, a izlazna snaga lokalnog generatora teče unatrag prema pojnoj točki distribucijskog sustava. Aproximativni izraz za povišenje iznosa napona u slabo opterećenoj mreži zbog priključenja generatora glasi (u per unit vrijednostima)

$$V (PR XQ)/V, \quad (1)$$

pri čemu  $P$  i  $Q$  označavaju izlaznu djelatnu i jalovu snagu generatora,  $R$  i  $X$  djelatni otpor i induktivnu reaktanciju spojnog elementa te  $V$  nazivni napon voda. U nekim slučajevima povišenje napona moguće je ograničiti reverziranjem toka jalove snage ( $Q$ ) bilo korištenjem asinkronog generatora ili poduzbuđenog sinkronog generatora u kapacitivnom pogonu. Asinkroni generator najčešći je izbor u vjetroelektranama. Njegovo korištenje može biti učinkovit način ograničavanja povišenja napona u sredjenaponskim mrežama koje uglavnom imaju viši  $X/R$  omjer. Kod kabela u niskonaponskoj distribucijskoj mreži dominira utjecaj djelatne snage ( $P$ ) i djelatnog otpora ( $R$ ) tako da se općenito uzevši samo vrlo mali generatori priključuju na niskonaponsku mrežu. Točka priključenja većih generatora treba biti bilo na NN sabirnicama SN/NN transformatora ili za veće elektrane izravno u SN ili VN mreži. U nekim se zemljama koriste vrlo jednostavna pravila predviđanja maksimalne veličine izgradnje generatora koji mogu biti priključeni na različitim mjestima u distribucijskom sustavu. Alternativni pristup određivanju mogućnosti

priključenja generatora koristi snagu kratkog spoja. Zahtijeva se da razina trofaznog kratkog spoja (razina kvara) u točki priključenja generatora poprими minimalni iznos množitelja nazivne dimenzioniranosti generatora. Za vjetroelektrane množitelji mogu iznositi i do 20–25, ali i nadalje predstavljaju vrlo pojednostavljeno pravilo. Velike vjetroelektrane uspješno su u pogonu distribucijske mreže i uz niže omjere (6) razine kvara i nazivne dimenzioniranosti i to bez bilo kakvih poteškoća. Ukoliko se studijske analize poduzimaju u cilju istraživanja utjecaja lokalnog generatora na napon u distribucijskoj mreži, tada se u osnovi razmatra bilo napon u čvorištu krajnjeg potrošača ili napon na nekoj srednjoj sekciji distribucijske mreže. Razmatranje utjecaja generatora na napon srednje sekcije distribucijske mreže relativno je jednostavnije provesti, ali pruža nešto restriktivnije rezultate. U nekim se distribucijskim sustavima koriste transformatori s regulacijom prijenosnog omjera pod opterećenjem.

Prijenosni omjer se mijenja u svrhu održavanja napona unutar predviđenih granica. Često se povratna veza formira u kompaundiranom obliku napona i struje opterećenja izlaznog voda. Kompenzacija pada napona na izlaznomvodu jedna je od tehnika kompaundacije koja je zasnovana na pretpostavljenom faktoru snage tereta. Stoga priključenje lokalnog generatora i posljedica promjena faktora snage može dovesti do nekorektnog pogona ukoliko je generator znatno veći u usporedbi s teretom potrošača.

**Povećanje razine kvara u mreži.** U vjetroelektranama se za proizvodnju električne energije koriste rotirajući strojevi koji doprinose razini kvara u mreži. Asinkroni i sinkroni generatori povećavaju razinu kvara u distribucijskom sustavu iako je tijekom kvara njihovo vladanje međusobno različito. U urbanim područjima gdje se postojeća razina kvara približava nazivnoj dimenzioniranosti rasklopne opreme, povećanje razine kvara može ugroziti priključenje novih generatora. Povećanje nazivne dimenzioniranosti rasklopne opreme može se pokazati vrlo skupim rješenjem, a ponegdje kao u Velikoj Britaniji očekuje se da novi proizvodni objekti snose nove troškove. Doprinos novog generatora razini kvara smanjuje se uvođenjem impedancije između generatora i mreže. Impedanciju čini transformator ili prigušnica, ali se njihovim instaliranjem stvara trošak zbog povećanih gubitaka. Također, povećavaju se i promjene napona generatora. Koriste se osigurači za ograničavanje doprinosa generatora razini kvara.

**Kvaliteta napajanja.** Dva aspekta kvalitete napajanja smatraju se značajnima pri isporuci električne energije: prijelazne promjene napona i harmonička izobličienost mrežnog napona. U ovisnosti o određenim okolnostima, vjetroelektrana može smanjiti kvalitetu napona kod ostalih korisnika distribucijske mreže. Vjetroelektrana uzrokuje prijelazne promjene napona u mreži tijekom normalnog pogona te ukoliko dođe do pojave relativno velikih promjena iznosa struje

prilikom uklapanja i isklapanja. Iznos struje u prijelaznim stanjima ograničava se pažljivim projektiranjem vjetroelektrane. Ukoliko se na slabu mrežu priključuje samo jedan generator, umjesto povišenja napona u stacionarnom stanju ograničavajućim faktorom postaju prijelazne promjene napona. Sinkroni generatori mogu se uključiti u pogon uz zanemarivo remećenje okolne mreže ako se sinkronizacija izvodi korektno. Tiristorski upuštavači u antiparalelnom spoju za meki start proizvodnih jedinica koriste se za ograničavanje početne struje magnetiziranja asinkronih generatora na vrijednosti koje su manje čak i od nazivne struje. Međutim, isključenje nazivno opterećenog generatora iz pogona može dovesti do značajnih propada napona. Kod vjetroelektrana u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje javljaju se cikličke promjene izlazne struje generatora koje stvaraju flikere ako generatori nisu odgovarajuće regulirani. Nasuprot tome, uvođenjem lokalne proizvodnje nekog drugog oblika podiže se razina kvara u mreži. Nakon što su generatori priključeni na mrežu poremećaji koje stvaraju potrošači ili udaljeni kvarovi stvaraju manje promjene napona i na taj način poboljšavaju kvalitetu napajanja. Jedan od konvencionalnih pristupa poboljšanju kvalitete napajanja osjetljivih industrijskih potrošača visoke vrijednosti upravo se sastoji u instaliranju lokalne proizvodnje. Nekvalitetnim projektiranjem elektroničkog sučelja vjetroelektrane prema mreži dolazi do injektiranja harmoničkih struja koje mogu uzrokovati neprihvatljivu izobličenosť napona u mreži. Izravno priključeni generatori mogu sniziti harmoničku impedanciju distribucijske mreže te time smanjiti harmonički napon na račun povećanja harmoničke struje u elektranu. Na taj se način smanjuje mogućnost nastanka problema vezanih uz harmoničku rezonanciju. To je posebice značajno ako se poprečne kondenzatorske baterije koriste za popravljavanje faktora snage i kompenzaciju jalove snage asinkronog generatora u vjetroelektranu. Sličan utjecaj javlja se pri simetriranju napona u ruralnim srednjenaponskim sustavima koje se izvodi korištenjem asinkronog generatora. Ti su naponi često nesimetrični uslijed priključenja jednofaznih tereta. Asinkroni generator ima vrlo nisku impedanciju obzirom na nesimetrične napone i nastoji povući iz mreže velike nesimetrične struje. Time se simetriraju naponi u mreži na račun povećanih struja u generatoru uz posljednju povećanog zagrijavanja.

**Zaštita.** Postoji više aspekata zaštite generatora priključenog na distribucijsku mrežu:

- Zaštita opreme od unutarnjih kvarova.
- Zaštita distribucijske mreže koja je u kvaru od struje kvara koja dolazi iz generatora.
- Zaštita od gubitka pojne točke, odnosno od otočnog pogona.
- Utjecaj generatora na postojeću zaštitu u distribucijskom sustavu.

Zaštita generatora od unutarnjih kvarova dobro je poznata. Struja kvara koja teče iz distribucijske mreže koristi se za otkrivanje kvara. Metodologija koja se koristi u zaštiti bilo kojeg velikog motora prihvatljiva je i u ovom slučaju. U ruralnim područjima, opći problem predstavlja osiguranje dovoljnog iznosa struje kvara iz mreže koji je potreban za brzu proradu releja ili osigurača. Zaštita distribucijske mreže koja je u stanju kvara od struje kvara koja dolazi iz generatora često predstavlja znatno težu zadaću. Asinkroni generatori ne mogu napajati mjesto trofaznog kratkog spoja održivom strujom kvara. Njihov održivi doprinos nesimetričnim kvarovima je ograničen. Mali sinkroni generatori zahtijevaju sofisticirane uzbudne sustave s mogućnošću forsiranja stropnim naponom tijekom kvara ukoliko se od njih očekuje napajanje mjesta kvara održivom strujom kvara koja je znatno veća od struje pri punom opterećenju. Stoga je ponekad neophodno osloniti se na distribucijsku zaštitu pri otklanjanju kvara na elementima distribucijske mreže i izolirati elektranu. U elektranu tada dolazi do prorade nadnaponske ili podnaponske zaštite, nadfrekvenzijske ili podfrekvenzijske zaštite ili zaštite od gubitka pojne točke/otočnog pogona. Ova tehnika sekvencijalne prorade nije uobičajena, ali je neophodna ako generatori nisu u mogućnosti osigurati odgovarajuću struju kvara za primjenu neke od konvencionalnih zaštita. Zaštita od gubitka pojne točke ili otočnog pogona često se primjenjuje u sustavima gdje se koristi automatsko ponovno uključivanje elemenata distribucijske mreže. Zbog niza tehničkih i administrativnih razloga, otočni pogon vjetroelektrane u dijelu distribucijskog sustava odvojenog od glavnog sustava općenito se smatra neprihvatljivim. Zato se po otkrivanju uvjeta otočnog pogona generatora i okolne mreže inicira isključenje generatora. Prorada tog releja treba se dogoditi unutar mrtvog vremena APU-a distribucijskog elementa ukoliko se želi izbjeći protufazno ponovno uključivanje. Iako se koristi veći broj suvremenih tehnika poput ROCOF frekvencijskih releja (*eng. rate of change of frequency*) i pomaka vektora napona, ova je zaštita podložna krivoj proradi. Do krive prorade posebice dolazi ukoliko su postavne vrijednosti udešene vrlo osjetljivo kako bi se što ranije otkrili uvjeti otočnog pogona. Uzemljenje zvjezdišta generatora predstavlja aspekt koji je povezan s pogonom distribucijskog sustava. U nekim se zemljama smatra neprihvatljivim voditi pogon neuzemljenog sustava. Stoga je potrebna posebna pozornost u slučajevima kada je zvjezdište postignuto i uzemljeno. Konačno, generator može utjecati na pogon postojeće distribucijske mreže uzrokujući tokove struje kvara koji nisu očekivani u vrijeme izvornog projektiranja zaštite. Doprinos generatora u periodu kvara može podržati napon u mreži i dovesti do izostanka prorade releja.

**Stabilnost.** Ukoliko se od obnovljivih izvora očekuje samo proizvodnja kWh tada razmatranja stabilnosti generatora nisu od velikog značenja. Ukoliko se kvar

pojavi negdje u distribucijskoj mreži i uzrokuje propad napona zbog kojeg dođe do isključenja generatora, tada sve što je izgubljeno jest samo kratki period proizvodnje. Generator se ubrzava i biva isključen proradom unutarnje zaštite. Sustav nadzora pogona generatora nakon toga čeka ponovno uspostavljanje normalnih uvjeta u mreži i automatski ponovno pokreće generator. Ako je tromost generatora niska, a vrijeme prorade zaštite u distribucijskoj mreži veliko, osiguranje stabilnog pogona postaje otežano za sve kvarove u mreži. Nasuprot tome, ako je generator značajan u pružanju podrške sustavu tada stabilnost poprima povećano značenje. Stabilnost napona i kuta može biti značajan problem u okviru određenih okolnosti. Osobiti problem u nekim zemljama predstavlja prorada ROCOF releja koji su vrlo osjetljivo udešeni za otkrivanje uvjeta otočnog pogona. U slučaju velikih poremećaja u sustavu (gubitak velikog središnjeg generatora) moguća je njihova kriva prorada i isključenje većeg broja lokalnih generatora. Time se naravno frekvencija u sustavu dodatno snižava. Ponovno uspostavljanje stanja nakon ispada u sekciji distribucijske mreže s većim brojem generatora također zahtijeva dodatnu pozornost. Naime, nakon ponovnog uključenja elementa mreže, moguć je nastanak situacije u kojoj tereti zahtijevaju napajanje prije nego što su generatori ponovno uključeni. S tim se problemom najviše suočavaju operatori sustava proizvodnje i prijenosa, a u sustavu distribucije do sada nije bio uobičajen. Tijekom prijelazne nestabilnosti dolazi do klizanja polova kod sinkronih generatora. Kod asinkronih generatora dolazi do ubrzavanja uz povlačenje velikog iznosa jalove struje čime se nadalje snižava napon u mreži i kreće prema nestabilnosti napona. Granica stabilnosti asinkronog generatora u stacionarnom stanju također može postati ograničavajući faktor njegove primjene u vrlo slabim distribucijskim mrežama. Naime, vrlo velika impedancija izvora ili niska razina kvara u mreži može smanjiti vršni moment asinkronog generatora na tako nisku vrijednost da nije moguće ostvariti nazivni pogon.

**Pogon mreže.** Značajna posljedica pogona generatora unutar distribucijske mreže jest da su elementi mreže sada napajani iz većeg broja točaka. Javlja se potreba za sigurnosnim izoliranjem i uzemljivanjem prije poduzimanja bilo kakvih djelatnosti na opremi. Također, moguća je pojava poteškoća prilikom pribavljanja odobrenja za isključenje elemenata mreže u svrhu redovitog održavanja. Time se smanjuje prilagodljivost pri izvođenju radova u distribucijskoj mreži na koju je priključen generator.

**Ekonomičnost.** Aspekti tehničkog utjecaja lokalnih generatora na distribucijski sustav dobro su poznati, a proračuni i tehnike projektiranja kvalitetno postavljeni. Jedini novi aspekt koji se pri tome javlja vezan je uz ukupni stupanj penetracije te priključenje velikih vjetroelektrana na vrlo slabu mrežu. Nasuprot,

ekonomski utjecaj generatora na distribucijsku mrežu tek se odnedavno ozbiljnije razmatra. Generator stvara promjenu tokova snaga u distribucijskoj mreži te time uzrokuje promjenu gubitaka u mreži. Ukoliko je mali generator smješten u blizini velikog tereta tada će gubici u mreži biti smanjeni obzirom da teret može biti napajan djelatnom i jalovom snagom iz obližnjeg generatora. Ukoliko je veliki generator smješten daleko od tereta tada je vjerojatnija pojava povećanja gubitaka u distribucijskoj mreži. Daljnje komplikacije javljaju se zbog promjene iznosa električne energije s povećanjem opterećenja u mreži. Općenito, postoji povezanost između velikog opterećenja u distribucijskoj mreži i korištenja skupih proizvodnih izvora. Stoga bilo koji lokalni generator koji može biti u pogonu tijekom tog perioda i smanjiti gubitke u distribucijskoj mreži značajno utječe na troškove pogona. U današnje doba, distribuirana proizvodnja ne sudjeluje u regulaciji napona u distribucijskoj mreži. Na primjer, u Velikoj Britaniji lokalni generatori uglavnom su u pogonu uz jedinični faktor snage. Time minimiziraju vlastite električne gubitke i izbjegavaju naplatu zbog utroška jalove snage neovisno o potrebama distribucijske mreže. U Danskoj je postignut napredak u korištenju lokalnih generatora (većinom vrijedi za CHP izvore) pri tri različite vrijednosti faktora snage u ovisnosti o dobi dana. Tijekom vršnih opterećenja jalova se snaga injektira u mrežu dok su u periodu slabog opterećenja generatori u pogonu s jediničnim faktorom snage. Distribuirana proizvodnja može također biti korištena kao nadomjestak za izgrađenost distribucijske mreže. Pri tome treba imati na umu da generatori ne mogu nadomjestiti radijalne pojne vodove, da otočni pogon općenito nije prihvatljiv, te da proširenje mreže može biti zahtijevano ukoliko je potrebno prikupiti snagu iz izoliranih obnovljivih izvora. Ipak, većina je distribucijskih elemenata već udvostručena ili uzamčena pa distribuirana proizvodnja ponekad može umanjiti zahtjeve za planiranom izgradnjom. Trenutačno, koncept prema kojem distribuirana proizvodnja može nadomjestiti izgrađenost distribucijske mreže ipak nije široko prihvaćen u distribucijskim sustavima.

## 6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada ukazano je na metode i tehnike povećanja sigurnosti i stabilnosti pogona distribucijskog sustava s uključenim obnovljivim izvorima. Rezultati su korisni sa stajališta prepoznavanja, smanjivanja ili uklanjanja prepreka koje mogu ograničiti veće uključivanje obnovljivih izvora u distribucijski sustav. Nastavak rada u ovom području bio bi zanimljiv i obzirom na smjernice energetskog planiranja u zemljama Europske unije koje se zasnivaju na Kyoto protokolu. Smjernice se odnose na smanjenje emisije štetnih stakleničkih plinova te na sigurnost i diverzifikaciju izvora energije. Posebice se istraživanje

u području izvora energije usmjerava prema obnovljivim izvorima za koje se u dugoročnom periodu očekuje značajno povećanje udjela. U zemljama Europske unije, do 2010. godine potrebno je povećati udjel obnovljivih izvora u dobavi ukupne energije sa sadašnjih 6% na 12%. Stoga je u buduće potrebno uskladiti osnovne smjerice stručnog i istraživačkog rada s tim planom kako bi se uklonile prepreke poput visokih troškova koje stoje na putu uvođenju obnovljivih izvora te proširile mogućnosti primjene rješavanjem posljedica intermitentne naravi mnogih obnovljivih izvora.

Od nedavno je jasno uočljiv trend prema decentraliziranoj proizvodnji i dobavi energije. Povećanje decentralizirane proizvodnje energije dovest će do stanja u kojem će veći broj malih i srednjih proizvođača biti priključen na elektroenergetske mreže koje su izvorno projektirane za monopolistička tržišta. Stoga će se zasigurno pojaviti i mnogi novi problemi vezani uz upravljanje i pogon u sektorima prijenosa i distribucije električne energije u mrežama u kojima je potrebno učinkovito razmjestiti obnovljive izvore. Ovaj članak predstavlja jedan od ranijih radova u Republici Hrvatskoj na temu priključenja obnovljivih izvora na elektroenergetsku mrežu. U skladu je s općim EU smjernicama koje idu za uspostavljanjem unutarnjeg tržišta električnom energijom, proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora te s ostalim akcijama i mjerama koje se poduzimaju u liberalizaciji tržišta energijom.

U nekim zemljama i regijama (Danska, sjeverni dio Njemačke, neke regije Španjolske), energija vjetra već doseže razinu penetracije na kojoj se javljaju ozbiljni pogonski problemi. Penetracija energije vjetra u iznosu od 30–40% već postoji u Danskoj i sjevernom dijelu Njemačke. U Velikoj Britaniji, operatori distribucijske mreže očekuju znatno umanjene mogućnosti prihvata distribuirane proizvodnje u odnosu na nedavna predviđanja. Razlozi leže u nepostojanju sustava komercijalnih tržišnih usluga te u neraspoloživosti ekonomski poticajnih mjera koje bi se primijenile u rješavanju mnogih izazova. Regulacija napona, stabilnost napona, regulacija frekvencije i stabilnost kuta smo su neki od izazova koje postavlja distribuirana proizvodnja. U EU zemljama tek sada je jasno da navedeni problemi koji se javljaju pri povišenoj penetraciji obnovljivih izvora mogu postati preprekom za buduće korištenje energije vjetra od koje se očekuje značajan doprinos u proizvodnji električne energije. To će zasigurno uzrokovati veliki pritisak pri ispunjavanju zacrtanog EU cilja o 12% energije iz obnovljivih izvora do 2010. godine.

Regulacija, planiranje, pogon i upravljanje budućim distribucijskim sustavima s uključenim distribuiranim izvorima električne energije, a napose obnovljivima, predstavljat će jedan od najvećih izazova stručnoj i istraživačkoj javnosti. Odgovor na pitanje kako uključiti značajan broj obnovljivih izvora u postojeći sustav do-

bave energije imat će jedno od središnjih mjesta. Uspješna integracija obnovljivih i distribuiranih izvora električne energije u postojeće mreže na različitim naponskim razinama ključni je aspekt pri ispunjavanju EU cilja o povećanju udjela obnovljivih izvora.

U današnje je doba u većini EU zemalja očito da postoji jasan nedostatak u slijedećim aspektima:

- Pravila tržišta i pravila mrežnog poslovanja.
- Standardi priključenja.
- Kriteriji planiranja i pogona te poslovni postupci operatora distribucijskih sustava.
- Sredstva vođenja, mjerni uređaji te sustavi upravljanja i zaštite.

Navedeni aspekti uvelike određuju stajališta koja se formiraju unutar nacionalnih tržišta električnom energijom i distribucijskih sustava od kojih se očekuje omogućavanje integracije obnovljivih izvora kao distribuirane proizvodnje obzirom na uvjete njihovog priključenja, vođenje njihovog pogona te njihovo tržišno poslovanje. Razvidno je da na razini zemalja Europske unije postoji nedostatak harmonizacije pravila i smjernica koje imaju za cilj dozvoljavanje i promicanje većeg pristupa distribuirane proizvodnje prijenosnim i distribucijskim mrežama. U zemljama Europske unije već se radi na udruživanju i koordiniranju napora koji se ulažu u prikupljanje relevantnih iskustava kako bi se na europskoj razini stvorile preporuke za slijedeće elemente organizacijske naravi:

- Harmonizacija tržišnih pravila i pravila vođenja pogona sustava.
- Širenje pozitivnih iskustava integracije distribuirane proizvodnje.
- Standardizacija sučelja prema mreži i ostale opreme u obnovljivim izvorima sa svrhom podrške industrijskim proizvođačima.

Unutar navedenih organizacijskih elemenata potrebno je usmjeriti stručnu i istraživačku javnost prema slijedećim aspektima koji su od značenja za rad na široj integraciji distribuirane proizvodnje:

- Regulacija distribucijskih sustava i tržišta električnom energijom obzirom na integraciju distribuirane proizvodnje (uključujući i obnovljive izvore).
  - Zakonodavni okvir distribucijskih sustava: prihodi i tarife.
  - Zakonodavni okvir obnovljivih i/ili distribuiranih izvora: pristup mreži, uvjeti priključenja, naplata pristupanja i korištenja sustava, utjecaj na prihod distribucije.
  - Regulatorni tretman proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u okviru tržišta električnom energijom: dnevna tržišta, ugovori, tržište snagom regulacije, pomoćne usluge, doprinosi sigurnosti sustava ili naplata kapaciteta.
  - Dodatna tržišna vrijednost stvorena uskladištenjem energije u svrhu pružanja usluga na tržištu. Određivanje cijena i povrat investicije.



- Kriteriji planiranja i određivanja pouzdanosti pogona te upravljanje kvalitetom isporučene električne energije. Mrežna pravila za distribuciju.
- Definiranje funkcija i odgovornosti operatora distribucijskih sustava obzirom na distribuiranu proizvodnju i tržišne usluge.
- Integrirano planiranje distribucijskih mreža s vrlo visokom razinom penetracije distribuirane proizvodnje te cjenovni odziv na upravljanje potražnjom.
  - Tehnike predviđanja opterećenja i proizvodnje uz razmatranje lokalnih razlika u penetraciji obnovljivih izvora i cjenovnom odzivu na upravljanje potražnjom.
  - Kriteriji planiranja: novi kriteriji uz razmatranje neizvjesnosti obzirom na lokaciju i veličinu izgradnje distribuiranih izvora te odziva potražnje. Korištenje GIS-a i višekriterijskih tehnika odlučivanja (investicije, troškovi pogona, pouzdanost i utjecaj na okoliš).
- Upravljanje distribucijskim sustavom s visokom razinom sigurnosti dobave energije i lokalne autonomije omogućene priključenjem distribuirane proizvodnje.
  - Sigurnost dobave energije unutar elektroenergetskih sustava s visokom razinom integriranosti distribuirane proizvodnje.
  - Kriteriji pogona koji omogućavaju upravljanje sustavom s visokom razinom distribuirane proizvodnje i upravljanja potražnjom.
  - Novi postupci upravljanja mrežom i potražnjom energije obzirom na ulogu operatora.
  - Upravljanje tokovima snage i iznosima napona u čvorištima.
  - Procjena utjecaja distribuirane proizvodnje na gubitke u mreži, odgoda investicija u infrastrukturu mreže, pokazatelji pouzdanosti i kvaliteta napona.
- Kvaliteta isporučene električne energije, brojila, sustavi upravljanja i zaštite u distribucijskim sustavima s visokom razinom integriranosti distribuirane proizvodnje.
  - Zahtjevi na sustave upravljanja/zaštite u točkama priključenja distribuiranih izvora.
  - Harmonizacija standarda priključenja na razini zemalja Europske unije.
  - Brojila i standardiziranost.
  - Inteligentni sustavi zaštite zasnovani na pristupima samostalnih agenata.
  - Uključenje zaštite unutar distribuirane proizvodnje u svrhu postizanja visokog stupnja lokalne autonomije i sigurnosti napajanja.

Intenzivan rad unutar prethodnih aspekata doprinijet će boljem razumijevanju potencijalnih problema i razvoju rješenja sa strane distribuirane proizvodnje u postojećim elektroenergetskim sustavima. Također, daljnja istraživanja doprinijet će izvođenju budućih projekata u skladu s inovativnim tehničkim pristupima u integraciji distribuirane proizvodnje električne ener-

gije na različitim naponskim razinama uz programe upravljanja potražnjom (unutar tržišta električnom energijom veliki i srednji potrošači imat će osjetljivi cjenovni odziv), tehnike upravljanja lokalnim energetskim potrebama te koordiniranost u stvaranju održivog energetskog sustava s velikim stupnjem lokalne autonomije i sigurnosti dobave. Također, pridonijet će postizanju inovativnih socio-ekonomskih pristupa integralnom energetskom planiranju koji idu za lokalnim smjernicama, pravilima i regulacijama.

U skladu s općim EU smjernicama, potrebno je i nadalje istraživati temeljne tehničke aspekte:

- Razvoj naprednih metoda regulacije frekvencije i napona u budućim distribucijskim sustavima s distribuiranom proizvodnjom uključujući obnovljive izvore. Problemi regulacije bit će vrlo vjerojatno kratkoročne prepreke većoj penetraciji obnovljivih izvora u mrežama.
- Razvoj naprednih metoda upravljanja vezanih uz stabilnost napona i kuta u budućim distribucijskim sustavima s distribuiranom proizvodnjom. Problemi stabilnosti vjerojatno su dugoročne prepreke većoj penetraciji obnovljivih izvora u mrežama.
- Pronalaženje inovativnih rješenja problema kvalitete isporučene električne energije i poboljšanje pouzdanosti distribucijskih sustava korištenjem transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom pod opterećenjem, multifunkcijskih upravljačkih naprava zasnovanih na energetskoj elektronici i novih upravljačkih metoda. Rješenja su od velikog značenja u dugoročnom osiguranju kvalitete napajanja.
- Planiranje dugoročnih investicija u distribucijama uz neizvjesnosti potražnje i proizvodnje.
- Uloga operatora distribucijskog sustava i stvaranje okvira za tržišni pogon i upravljanje sustavom uz određenu prilagodljivost korištenjem resursa poput transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom pod opterećenjem, multifunkcijskih upravljačkih naprava zasnovanih na energetskoj elektronici, uređaja za uskladištenje energije...

Nastavak ovih istraživanja u skladu je sa suvremenim izazovima. Rezultati istraživanja bit će od velikog značenja u poboljšanju prihvatljivosti obnovljivih izvora, povećanju kompetitivnosti i omogućavanju prilagodljivosti u pristupanju različitim razinama distribucijskog sustava.

Ovaj članak daje samo djelomičan osvrt na ključne aspekte distribuirane proizvodnje kao 'novog rastućeg tržišta'. Među njima središnje mjesto zauzimaju regulacija napona i kompenzacija jalove snage, regulacija frekvencije i stabilnost. U tradicionalnim distribucijskim sustavima ne javljaju se problemi koji su vezani uz regulaciju frekvencije i stabilnost. S uključivanjem distribuirane proizvodnje u distribucijske sustave navedeni će se aspekti, koji tradicionalno pripadaju prijenosnim sustavima, u novim okolnostima pojaviti i u

distribucijskim sustavima. Međutim, njihovo pojavljivanje u distribucijskim sustavima bit će različito od pojavljivanja u prijenosnim sustavima u nekoliko bitnih elemenata:

- U distribucijske sustave bit će uključeni resursi distribuirane proizvodnje koji imaju značajno različite statičke i dinamičke karakteristike. Matematičko modeliranje i analiza takvih distribuiranih resursa do sada je imala vrlo ograničeni karakter, posebice u usporedbi sa centraliziranom proizvodnjom priključenom na prijenosne sustave.
- Pogon i upravljanje distribuiranim izvorima različiti su od onih kod centralizirane proizvodnje. Za centraliziranu proizvodnju u komercijalnom su obliku već razvijene sofisticirane metode upravljanja koje su i praktično primijenjene. Pričuvna djelatna snaga i regulacija frekvencije te regulacija napona i kompenzacija jalove snage samo su neki od tih primjera primjene.
- Sustav telekomunikacija između operatora prijenosnog sustava i proizvodnih objekata vrlo je dobro razvijen i služi upravljanju i vođenju pogona centraliziranih proizvodnih objekata. Međutim, u distribucijskim sustavima postoji relativno ograničeni sustav komunikacijskih veza između operatora distribucijskog sustava i distribuiranih proizvodnih objekata.
- Prethodni elementi čine pogon i upravljanje distribucijskim sustavom značajno različitim od onih kod prijenosnih sustava. Upravljanje i pogon distribucijskih sustava s većim brojem distribuiranih izvora činit će znatno složeniju zadaću u usporedbi s prijenosnim sustavima.

Modeliranje, analiza, vođenje pogona, upravljanje, planiranje i komercijalne usluge u takvim će sustavima i nadalje zahtijevati pozornost kako bi kratkoročni i dugoročni interesi društva bili zadovoljeni. U ovom su radu ukratko predložene poteškoće koje se mogu javiti kao prepreke uključivanju obnovljivih izvora u distribucijske sustave. I nadalje je potrebno pronaći rješenja za poboljšanje kvalitete isporučene energije, povećanje pouzdanosti i uvođenje prilagodljivosti u buduće distribucijske sustave. Štoviše, potrebno je otvoriti i nova područja istraživanja poput nadzora, vođenja pogona, upravljanja i telekomunikacijskih tehnika. Također, metode određivanja cijena u budućim distribucijskim sustavima doprinose njihovom komercijalnom razvoju u tržišnim okvirima. Takve će aktivnosti biti od značenja i pri ostvarivanju zacrtanih EU ciljeva koji su vezani uz obnovljive izvore.

Pored tehničkih aspekata, neophodno je razmotriti ekonomske i regulatorne aspekte koji su također značajni za sigurnost i stabilnost budućih distribucijskih sustava. Budući distribucijski sustavi bit će znatno složeniji nego što se danas smatra. Oni će biti znatno teži za pogon, upravljanje i planiranje u usporedbi s prijenosnim sustavima i tradicionalnim

distribucijskim sustavima. Štoviše, buduće distribucijske sustave s uključenim obnovljivim izvorima potrebno je razviti na temelju ekonomičnosti i tržišnih principa. Time će se zasigurno pojaviti i nova područja istraživanja u energetske sektoru u svim zemljama koje žele pratiti smjernice Europske unije. Aspekti pomoćnih usluga činit će novo područje koje će biti od praktičnog interesa distribucijskim kompanijama i distribuiranim generatorima.

## LITERATURA

- [1] T. ACKERMANN, et al.: "Distributed generation: a definition", *Electric Power Systems Research*, vol. 57, 2001, pp. 195-204
- [2] T. ACKERMANN, et al.: "Distributed power generation in a deregulated market environment – A Working Paper", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003
- [3] P. CHRISTIANSEN, et al.: "Grid connection and remote control for the Horns Rev 150 MW offshore wind farm in Denmark", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Stockholm, Sweden, March 29-30, 2001
- [4] CIGRE: "Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system", WG 37.23, Feb. 1999
- [5] CIGRE: "Modelling new forms of generation and storage", WG 38.01, Nov. 2000
- [6] N. HATZIARGYRIOU, et al.: "Distributed energy sources: Technical challenges", *IEEE paper*, No. 0-7803-7322-7, 2002
- [7] N. JENKINS, et al.: *Embedded generation*, IEE Power and Energy Series 31, ISBN 0 85296 774 8, London, UK, 2000
- [8] J. LOPES, et al.: "Integration of dispersed generation on distribution networks – Impact studies", *IEEE paper*, No. 0-7803-7322-7, 2002

## DISTRIBUTED GENERATION OF ELECTRIC ENERGY

The paper discusses in a general way the main characteristics of distributed electric energy generation. First, technical influence of distributed resources on production, transmission and distribution systems of electric energy are given. Some technical solutions and open questions are quoted. Electric energy generation from small wind power plants is given as a distributed generation. Calculation methods applied in distribution network are described, which are used in the study analysis of resource connection to the distribution grid.

## VERSTREUTE ENERGIEERZEUGUNG

In dieser Arbeit sind Hauptmerkmale distribuirter (=verstreuter) Stromerzeugung allgemein betrachtet. Vorerst sind technische Einflüsse der verstreuten Stromerzeugung

auf die Erzeugungs-, Übertragung- und Verteilungssysteme beschrieben. Danach sind gewisse Auswirkungen technischer Lösungen, sowie noch offene Fragen dargestellt. Die Stromerzeugung kleiner Windkraftwerke ist als verstreute Erzeugung betrachtet. Beschrieben sind jene Berechnungsarten der Verteilungsnetze, welche in wissenschaftlicher Betrachtung des Anschliessens von Stromquellen an das Verteilungsnetz benutzt werden.

Naslov pisaca:

**Dr. sc. Nijaz Dizdarević, dipl. ing.**  
**prof. dr. sc. Mislav Majstrović, dipl. ing.**  
**dr. sc. Srđan Žutobradić, dipl. ing.**  
**Energetski institut "Hrvoje Požar"**  
**Savska 163, 10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
2003-03-6.