

UTJECAJ DISTRIBUIRANIH IZVORA NA PLANIRANJE RAZDJELNE MREŽE

Prof. dr. sc. Davor Škrlec, prof. dr. sc. Slavko Krajačar, Zagreb – Alen Katić, Karlovac

UDK 621.316.1
PREGLEDNI ČLANAK

U članku su opisane najvažnije tehnologije koje se koriste kod distribuiranih izvora kao i njihov utjecaj na planiranje razdjelnih mreža. Otvaranjem tržišta električne energije, distribuirana proizvodnja bilježi sve veći porast u broju instaliranih jedinica. Iako je trenutačno njihov udio na tržištu električne energije zanemarljiv, distribuirani izvori već imaju važnu ulogu u razdjelnim mrežama: u slučajevima gdje se zahtijeva povećanje raspoloživosti mreže, kao pričuvni izvori napajanja ili kao alternativa ulaganja u proširenje razdjelne mreže. Razdjelna mreža zbog toga prestaje biti pasivni element sustava, nego postaje aktivna mreža, pa su razmatrani aspekti koji imaju najveći utjecaj, kao npr. standardi za priključivanje distribuiranih izvora, troškovi priključivanja, tehnički uvjeti i ograničenja, zaštita, predviđanja, vođenje i planiranje razdjelne mreže.

Ključne riječi: aktivna razdjelna mreža, distribuirani izvori, tržište električne energije, planiranje razdjelne mreže.

1. UVOD

U tehnici, jednako kao i u modnom svijetu, određeni trendovi koji su u nekim prošlim vremenima bili „in” to ponovno postaju i danas. Ne radi se tada o preslikavanju prošlosti jer tehnološki razvoj omogućava moderniji, učinkovitiji, jeftiniji i zbog toga pristupačniji proizvod širem tržištu. Upravo se to dogodilo i u proizvodnji električne energije. Sad već tako daleko, u drugoj polovici 19. stoljeća, upravo je T. A. Edison i njegova *Edison Electric Light Company* kao prva kompanija za proizvodnju i distribuciju električne energije istisnula uporabu plina za rasvjetu i grijanje kao „prljave energije”. Električna se energija proizvodila blizu mjesta potrošnje i u nekom je smislu predstavljala primjer distribuirane proizvodnje. Međutim, primijenjeni istosmjerni sustav, stalno povećanje potražnje za električnom energijom, skupi ili tehnološki neostvariv transport primarnog energenta, Edisonovo „bahato” odbacivanje Teslinog izuma višefaznog sustava izmjeničnih struja i pripadajućih strojeva doveo je do odumiranja tog sustava. Kraj devetnaestog i gotovo cijelo dvadeseto stoljeće obilježeno je centraliziranom proizvodnjom električne energije u velikim termoelektranama blizu nalazišta fosilnih goriva i/ili u hidroelektranama na prikladnim mjestima na vodotocima. Blizina nalazišta fosilnog goriva eliminirala je troškove njegovog prijevoza i proizvodnju električne energije učinila ekonomičnom. Iako je prijenos električne energije na velike udaljenosti tehnološki riješen, ipak, kako bi se smanjili gubici u prijenosu, termoelektrane koje rabe naftu ili plin kao pogonsko gorivo kao i nuklearne elektrane, grade se

sve bliže centrima potrošnje električne energije. I baš u trenutku kada su konačno i laici shvatili funkcioniranje elektroenergetskog sustava – kao: „električna se energije proizvodi u velikim elektranama koje se nalaze daleko od gradova koja se onda dalekovodima prenosi do gradova i naselja i transformira na niži napon te se razdjelnim mrežama dovodi do krajnjeg korisnika” – ponovo se pojavljuje distribuirana proizvodnja električne energije, dakle, mogućnost da „bilo tko” može proizvoditi električnu energiju, priključiti se „bilo gdje” na elektroenergetsku mrežu i tu energiju prodavati „bilo kome”. Je li se sustav koji su jedva spoznali dok je bio „jednosmjernan” uvođenjem distribuirane proizvodnje zakomplicirao? Što je uzrokovalo ponovnu pojavu distribuirane proizvodnje? Koji su preduvjeti trebali da se ona pojavi? Koje se tehnologije koriste? Je li distribuirana proizvodnja postala „noćna mora” distribucije? Kakvi su utjecaji distribuirane proizvodnje na razdjelnu mrežu i na njezino planiranje? Koliko i zaostajemo li za razvijenim svijetom? To su samo neka od pitanja na koja će se u ovom radu pokušati naći odgovor.

2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

2.1. Definicija distribuirane proizvodnje

Distribuirana proizvodnja (DP), (eng. *Distributed generation* (DG)) je pojam koji obuhvaća znatno više od svog doslovnog značenja. Definicije koje se pojavljuju u literaturi nisu ujednačene, odnosno pokazuje se da nema neke općeprihvaćene [1, 2, 3, 40, 42, 69].

Tako se npr. u [40] pod distribuiranim izvorima smatraju svi izvori koji se pojedinačno, na lokaciji potrošača, priključuju isključivo na razdjelnu mrežu. Vjetrene se elektrane u nekim slučajevima ne smatraju distribuiranim izvorom. Npr. više samostalnih jedinica tehnički ujedinjenih u “farmu vjetrovne elektrane” odmaknute od lokacije potrošnje, ne priključenih na razdjelnu mrežu, ne spadaju u distribuirane izvore. U [40] smatraju da vjetrene elektrane pripadaju grupi “*dispersed generation*”, kao i ostali distribuirani izvori ako se ne nalaze blizu lokacije potrošnje. Kako u ovom stručnom području još uvijek traje terminološki razvoj, reference [40, 42] se mogu smatrati kao izvor najnovijih definicija i terminologije.

Iako je najčešći, izraz *distributed generation* samo je jedan od naziva za distribuiranu proizvodnju. Tako se na primjer u SAD koristi i izraz *dispersed generation* [3] dok je u Europi i dijelovima Azije popularan izraz *decentralised generation* [74]. U engleskoj i anglosaksonske literaturi koristi se najčešće izraz *embedded generation* [2, 11, 12, 14, 41].

Osim u stručnoj literaturi, problem se pojavljuje i u zakonodavstvu pa u zakonima i preporukama različitih država postoje različite definicije distribuiranih izvora energije.

Distribuirana proizvodnja se u literaturi pokušava definirati pomoću različitih karakteristika proizvodnje električne energije. Najčešće od tih karakteristika su:

- namjena,
- mjesto priključka izvora,
- snaga,
- tehnologija,
- utjecaj na okoliš i
- vlasnička pitanja (vlasništvo).

Sva ova pitanja nisu jednako važna za problem definiranja distribuirane proizvodnje.

Većina autora smatra da je namjena distribuirane proizvodnje osigurati pouzdan izvor radne snage.

Distribuiranu proizvodnju čine izvori priključeni na razdjelnu mrežu, odnosno priključeni na potrošačevom brojilu. Definiranje distribuiranog izvora pomoću mjesta priključka ima i svoje nedostatke. Naime, ako je razdjelna mreža „slaba“, izvor se mora priključiti na prijenosnu mrežu što ga diskvalificira kao distribuirani izvor.

Snaga distribuirane proizvodnje (odnosno distribuiranog izvora) kreće se u različitim granicama, ovisno o autoru. Gornja granica u većini slučajeva iznosi 10 – 50MW. Gotovo nigdje se distribuirani izvor ne definira kao izvor snage iznad 100MW. S obzirom na snagu distribuirani izvori se najčešće klasificiraju na sljedeći način:

- mikro < 5 kW
- mali 5 kW < 1 MW
- srednji 1 MW < 10 MW
- veliki 10 MW < 50 MW

Snaga distribuiranog izvora definira naponsku razinu razdjelne mreže na koju će se izvor priključiti. Više o tim uvjetima nalazi se u poglavlju o tehničkim utjecajima na razdjelnu mrežu.

Pojam distribuirane proizvodnje se vrlo često veže uz određene tehnologije proizvodnje električne energije, posebno uz obnovljive izvore energije. Obnovljivi izvori najčešće jesu distribuirani izvori (ne računajući velike HE), ali DP obuhvaća znatno šire područje. Trenutačno najrašireniji način proizvodnje tipičan za DP je kombinirana proizvodnja električne i toplinske energije (kogeneracija, eng. *CHP*). Na taj način podiže se učinkovitost procesa jer se toplinski gubici proizvodnje električne energije koriste u proizvodnji topline, koja se najčešće lokalno i potroši. Količina energije (električne i toplinske) proizvedene kogeneracijom veća je uz isti utrošak goriva nego kod odvojene proizvodnje toplinske i električne energije (učinkovitost može dostići i do 90%). Problem kod kogeneracije je usklađivanje proizvodnje toplinske, odnosno električne energije. Naime, potražnja za toplinskom energijom najčešće ne odgovara potražnji za električnom, a proizvodnja jedne usko je povezana za proizvodnju druge. Moglo bi se reći da postoje tri osnovne kategorije proizvođača kod DP:

- obnovljivi izvori,
- male proizvodne jedinice i
- kombinirana proizvodnja električne i toplinske energije.

Nijedna od navedenih tehnologija nije vezana isključivo za distribuiranu proizvodnju. Tipičan primjer toga je proizvodnja u hidroelektranama i kogeneracija koja postoji u centraliziranim sustavima i vrlo je popularna.

DP tehnologije se vrlo često opisuju kao prijateljske za okoliš. Emisija CO₂ i SO₂ je bitno niža kod tipičnih DP tehnologija u usporedbi s klasičnom termoelektranom, no ipak postoje neki ekološki problemi. Ornitolozi tvrde da su područja pogodna za vjetrene elektrane vrlo često prolazi kojima se koriste ptice pri svojim seobama. Mnogima vjetroturbine smetaju zbog buke ili zato što vizualno “onečišćuju” okoliš. Iskorištavanje malih vodotokova ima bitan utjecaj na ekologiju mikrolokacije izgradnje zahvata. Itd.

Do nedavno su velike energetske kompanije bile manje ili više nezainteresirane za DP pa se počelo podrazumijevati da je DP uvijek u rukama malih, privatnih, poduzetnika. Ta situacija se mijenja i ne postoji razlog zbog kojeg bi distribuirani izvori bili ograničeni za “velike” (npr. RWE, EDF, E.ON Energie AG, Detroit Edison ili sl.) osim ako zakonima nije drugačije propisano (npr. u Italiji i Velikoj Britaniji distribucijsko poduzeće ne smije biti vlasnik DP, osim ako su mobilnog karaktera za rješavanje interventnih problema u mreži).

Na kraju, dat ćemo definiciju distribuirane proizvodnje, odnosno distribuiranih izvora: **Distribuirana proizvodnja (DP) jest proizvodnja električne energije unutar razdjelne mreže blizu mjesta potrošnje. Sukladno tome jest distribuirani izvor svaki onaj priključen na razdjelnu mrežu.**

2.2. Pregled tehnologija za distribuiranu proizvodnju

Tehnologije koje se koriste u distribuiranoj proizvodnji električne energije su dobro opisane u literaturi. Zbog toga će se u ovom tekstu opisati samo njihove osnovne karakteristike, a težište će biti na njihovoj usporedbi i komercijalnoj uporabi.

2.2.1. Pretvorba Sunčeve energije u električnu energiju

Postoje dvije vrste tehnologija za pretvorbu Sunčeve energije u električnu: toplinske i fotonaponske. Kod toplinskih se tehnologija Sunčevo zračenje najprije pretvara u toplinsku energiju, a zatim u električnu dok fotonaponski moduli vrše izravnu pretvorbu.

2.2.1.1. Toplinska pretvorba Sunčeve energije u električnu energiju

Sunčana elektrana s toplinskom pretvorbom slična je "klasičnoj" termoelektrani. Razlika je jedino što se kao toplinski izvor koristi Sunčeva energija umjesto unutarnje energije fosilnih goriva. Sunčeva energija se koncentrira i pretvara u toplinsku koja pogoni toplinski stroj. U toplinskom stroju se radni medij grije i tijekom ekspanzije pogoni lopatice turbine ili klipove motora. Termodinamički procesi u toplinskim sunčanim elektranama su *Rankineov*, *Stirlingov* i *Braytonov*.

Budući da postoji velika sličnost s običnom termoelektranom postoji i mogućnost dvojnog pogona (hibridizacije). Mogućnost jednostavne hibridizacije s fosilnim gorivima prednost je sunčanih elektrana pred ostalim obnovljivim izvorima energije. Takva elektrana ima iste karakteristike kao i svaka druga termoelektrana. Postoji više izvedbi hibridizacije, ali samo dva osnovna principa. Toplina dobivena od fosilnog goriva se u prvom slučaju miješa s toplinom dobivenom od Sunca i pokreće toplinski stroj. U drugom slučaju se rade dvije odvojene elektrane koje se nadopunjuju. Drugi slučaj omogućava bolje iskorištenje toplinske energije, ali je znatno skuplji.

Vrste toplinskih sunčanih elektrana su:

- sunčana elektrana s centralnim prihvatnikom i poljem heliostata,
- sunčana elektrana s paraboličnim, koritastim kolektorima,
- tanjuraste sunčane elektrane i
- sunčani dimnjak.

Osim elektrane sa sunčanim dimnjakom sve ostale koriste koncentrirano Sunčevo zračenje pa se prema tome može iskoristiti samo izravna komponenta Sunčevog zračenja. Ovaj način korištenja Sunčevog zračenja je naročito interesantan za zemlje u području Mediterana i sjeverne Afrike. Prema [30], stupanj učinkovitosti ovakvih postrojenja danas iznosi 35%, a pretpostavlja se da bi mogao doseći 69% kad bi se instalirala u ko-

generacijskom postrojenju. Interesan je i prijedlog da se elektrana koristi za proizvodnju vodika.

2.2.1.2. Izravna pretvorba Sunčeve energije u električnu energiju

Drugi tip malih elektrana koje iskorištavaju energiju sunca upotrebljavaju poluvodičke ćelije, obično veličine nekoliko kvadratnih centimetara. Ćelija transformira Sunčevu svjetlost u istosmjernu struju. Veći broj ćelija se slaže i zatim spaja u modul tako da zajedno proizvode željenu snagu. Tehnologija izrade fotonaponskih ćelija potrebnih za „fotonaponske“ male elektrane je relativno skupa. Ipak, zadnjih 20-ak godina cijena ove proizvodnje pada zbog napretka tehnologije (od 1 \$/kWh 1980. do 0,20 \$/kWh 1996. da bi danas bila otprilike 0,15 \$/kWh). Postoji više tehnologija proizvodnje fotonaponskih ćelija: s mono-kristalnim silicijem, polikristalnim i semikristalnim silicijem, tankim filmovima (izvedenim od CdTe, GaAs) itd. Struja koja se dobiva iz fotonaponske ćelije je istosmjerna te je, da bi se fotonaponska ćelija mogla priključiti na mrežu, potrebno istosmjernu struju, izmjenjivačem, pretvoriti u struju mrežne frekvencije.

Fotonaponski moduli mogu raditi u otočnom radu kod udaljenih instalacija koje nemaju ili imaju slabu povezanost s elektroenergetskom mrežom. Snaga sustava koji su priključeni na mrežu se posljednjih godina povećala zbog značajnih programa potpore u Japanu, Njemačkoj i SAD. Prema izvješću [77] fotonaponski sustavi, koji su apsolutnim brojkama zanemarivi, doživjeli su najveći globalni porast između svih obnovljivih izvora u razdoblju od 1990. – 2000. uz godišnji prosječni porast od 32% i porastom godišnje proizvodnje od 16 GWh u 1990. god. do 339 GWh u 2001. godini. Prednost fotonaponskih sustava, osim što su gotovo bez održavanja i tihog su rada, jest i u njihovoj skalabilnosti, snage su u rasponu od kW do MW, a učinkovitost sustava je neovisna o veličini instalacije. Fotonaponski sustavi su zato prikladni za primjene kako u malim instalacijama privatnih kuća, tako i u većim industrijskim instalacijama. Cijena instalacije koja je uvjetovana proizvodnom cijenom fotonaponskih modula je još uvijek previsoka da bi bili konkurentni na tržištu energije.

2.2.2. Vjetrene elektrane

Iako transformacija energije vjetra u mehaničku energiju ima dugu tradiciju literatura jasno ukazuje na značajan porast broja instaliranih jedinica, snage i godišnje proizvodnje, nakon naftne krize 70-ih godina prošlog stoljeća. U pojedinim zemljama, kao što je npr. Danska, instalirani kapaciteti vjetrovinih elektrana dosežu vrijednosti baznog opterećenja u elektroenergetskom sustavu [34]. Zbog iznimno povoljnih vjetrova konstatnih brzina određeni broj zemalja smješten uz more ima dobre uvjete za iskorištavanje energije vjetra. Zbog rečenog, ali i "izdašnih" potpora države, Njemačka je dostigla

nevjerojatnih 13500 MW instalirane snage u vjetrorenim elektranama.

S obzirom na brzinu vrtnje rotora današnje vjetrore elektrane se dijele u dvije skupine: prva, elektrane s konstantnom brzinom vrtnje i druga, elektrane s promjenjivom brzinom vrtnje. Vjetrore elektrane s konstantnom brzinom vrtnje izravno su priključene na elektroenergetsku mrežu i sinkronizirane s frekvencijom mreže (tzv. Danski koncept). Brzina vrtnje je predefiniрана i zbog toga je maksimalna učinkovitost tih turbina samo kod projektirane brzine vjetrova. Vjetrore elektrane s promjenjivom brzinom vrtnje za svoj rad zahtijevaju sklopove energetske elektronike. Najčešće su ugrađeni asinkroni generator s mjenjačkom kutijom, a samo rjeđe sinkroni generator. Elektronički pretvarač se koristi za pretvaranje izmjenične struje promjenjive frekvencije u istosmjernu struju i zatim izmjenjivač za pretvaranje u izmjeničnu struju mrežne frekvencije. Detaljniji podaci o konstrukciji i pogonu vjetrorenih elektranama mogu se pronaći u [2, 43, 50, 59, 81].

2.2.3. Male hidroelektrane

Male hidroelektrane se prema tipu postrojenja dijele na:

- pribranske male hidroelektrane, kod kojih se pad ostvaruje branom,
- derivacijske, kod kojih se pad postiže derivacijom i
- mješovite, kod kojih se pad postiže derivacijom i usporavanjem.

Pribranske male hidroelektrane se grade na mjestima gdje je pad moguće ostvariti samo izgradnjom brane. Ovaj slučaj se obično koristi kod nizinskih voda ili u slučajevima kada rijeka prolazi kroz usijek, te je moguće stvoriti akumulaciju. Sama hidroelektrana se tada obično smješta u branu, te je ulazni cjevovod vrlo kratak.

Derivacijske male hidroelektrane imaju daljnju podjelu na one s otvorenim i zatvorenim kanalom. Derivacijske male hidroelektrane s otvorenim derivacijskim kanalom se koriste u slučajevima kada rijeka pravi okuku, te se prokopom derivacijskog kanala dobiva veći pad. Otvoreni derivacijski kanali se obično koriste kod nizinskih voda. U slučajevima kada je derivacijski kanal izveden kao zatvoren obično se radi o malim hidroelektranama s većim padovima. Ovaj slučaj je pogodniji za male elektrane koje se grade na planinskim rijekama. Često se ova dva slučaja međusobno kombiniraju tako da se voda vodi u otvorenom kanalu po vodoravnijem terenu, dok se u zatvorenom vodi po vertikalnijem terenu.

Mješovite male hidroelektrane su s tlačnim cjevovodom. Ovaj se slučaj koristi kada postrojenje nije moguće izgraditi u brani ili uz nju, već se voda dovodi do postrojenja tlačnim cjevovodom, bez promjene geodetske visine.

Sve ove navedene podjele moguće je i kombinirati. Primjerice da se izgradi brana, ali se pad još dodatno poveća zatvorenim derivacijskim kanalom. Za izgrad-

nju malih hidroelektrana potrebno je iskoristavati i postojeća postrojenja koja više nisu u funkciji, ali su nekada služila za dobivanje energije (stari mlinovi i pilane). U tom slučaju već postoji brana ili derivacija, te ju je potrebno samo ponovo osposobiti. Općenito, male hidroelektrane je potrebno graditi tako da se što više poveća pad vode ili protok, te se time dobije i veće iskorištenje zahvata.

Druga podjela kod malih hidroelektrana se pravi na osnovi izvedbe turbine potrebne za pogonjenje generatora. Kod malih hidroelektrana obično se postavlja samo jedan generator. U tom slučaju najbolje iskorištenje raspoloživog protoka moguće je postići pravilnim izborom turbine. Turbine koje se koriste u malim hidroelektranama su sljedećih tipova:

- Francis turbine – područje padova od 16 m do 100 m i protoka od 0,1 do 2 m³/s,
- Banki turbina – upotrebljiva u širokom području, može proizvoditi el.energiju pri manjim protocima od Francis turbine, jednostavna za izradu i održavanje,
- Cijevna turbina – primjerena za korištenje kod malih padova od 3 do 20 m,
- Peltonova turbina – za padove od 50 do 100 m i protoke od 0,2 do 2 m³/s, odlikuje se jednostavnošću konstrukcije i održavanja.

Izbor turbine ovisi isključivo o karakteristikama vodotoka na kojem se mala hidroelektrana nalazi, te o reljefu kuda rijeka prolazi (pitanje pada). Turbina male hidroelektrane mora biti jednostavna pri radu, održavanju i montaži, prilagodljiva promjenjivom dotoku (osobito važno kod vodotoka kod kojih protok puno varira) i brzina vrtnje mora biti prilagođena brzini vrtnje generatora.

Izbor generatora male hidroelektrane ovisi o tome postavljaju li se zahtjevi da elektrana radi u otočnom režimu rada ili ne. Naime, ako se ne predviđa otočni rad, izabire se asinkroni generator zbog jednostavnosti izvedbe i manjih zahtjeva na regulaciju. Ako se za malu hidroelektranu predviđa da radi u otočnom radu, onda se odabire sinkroni generator. Izborom i jednog i drugog generatora dobivaju se određene prednosti i mane. Ugradnjom asinkronog generatora dobivaju se sljedeće prednosti: manje investicije, jednostavnost izvedbe, pogonska sigurnost, manji troškovi održavanja, nije potrebna regulacija napona niti uređaj za regulaciju brzine vrtnje turbine. Nedostaci su pak u tome što nije moguć otočni režim rada i to što asinkroni generator opterećuje mrežu dodatnom jalovom strujom (zbog toga što nema vlastite uzbude). Sinkroni generator ima pak prednost u tome što može raditi u oba režima rada (paralelnom i otočnom) i ima jednostavniju regulaciju jalove snage. Nedostaci su: složenija izvedba, veća cijena generatora, veći troškovi održavanja i to što je potrebna regulacija brzine vrtnje turbine.

2.2.4. Gorive ćelije

Gorive ćelije su u osnovi spremnici akumulirane energije. U osnovi gorivo u gorivim ćelijama čini vodik.

Goriva ćelija se sastoji od dvije elektrode između kojih je postavljen elektrolit. Goriva ćelija funkcionira tako da kisik prolazi oko jedne, a vodik oko druge elektrode i tako proizvodi električnu energiju oslobađajući i toplinu. Točnije, vodik se uvodi u anodu gorive ćelije dok kisik (iz zraka) ulazi u ćeliju kroz katodu. Potaknut katalizatorom, atom vodika se dijeli na proton i elektron koji prema katodi odlaze različitim putevima. Protoni prolaze kroz elektrolit dok elektroni stvaraju drugu struju koja izlazi iz ćelije i prolazi kroz trošila spojena na gorivo ćeliju. U katodi se protoni i elektroni nazad spajaju u atom vodika te se nadalje spajaju s kisikom tvoreći tako molekule vode.

Goriva ćelija koja sadržava reformer (eng. *fuel reformer*) može odijeliti vodik iz svakog goriva koje se sastoji od vodika i ugljika, od prirodnog plina do metanola pa čak i benzina. Budući da princip rada gorive ćelije počiva na kemijskom procesu, a ne sagorijevanju, emisija štetnih plinova puno je niža od emisije iz najčišćih procesa u kojem sagorijeva gorivo.

su ćelije idealne za korištenje kao izvori električne energije. Razloga za ovakvu tvrdnju je više. Kao prvo, gorive ćelije su vrlo pouzdan izvor električne energije te se mogu koristiti i za paralelan rad s mrežom i za otočni rad. Isto tako, mogu se koristiti kao rezervni izvor napajanja u slučaju kada nestane električne energije u javnoj mreži. Nadalje, gorive ćelije u potpunosti zadovoljavaju uvjete rada što se tiče buke zbog toga što su u potpunosti tihe. Osim toga, kao nusprodukt kemijske reakcije u gorivoj ćeliji nastaje čista voda te i time goriva ćelija zadovoljava sve uvjete zaštite okoliša. Osim proizvodnje električne energije, gorive ćelije proizvode i toplinu koja se može iskoristiti za grijanje. Karakteristična cijena gorivih ćelija je 3000 – 4000 \$/kW. Priključak gorive ćelije na elektroenergetsku mrežu mora se izvesti preko izmjenjivača.

2.2.5. Plinske turbine, mikroturbine, CHP

Plinske turbine pokreću plinovi nastali sagorijevanjem. Sagorijevanje zemnog plina, bioplina ili benzina odvija se u posebnoj komori iz koje se plinovi nastali sagorijevanjem vode na turbinu koja pak pokreće generator. Plinske turbine se dijele na energetske, mini i mikro turbine. Tablica 1 prikazuje osnovne karakteristike.

Tablica 1. Usporedba plinskih turbina

Karakteristika	Mikro turbina	Mini turbina	Energetska turbina
snage – kVA	20 - 500	650 - 10000	12500 - 265000
približna veličina	hladnjak	poveći kamion	zgrada
pogonsko gorivo	zemni plin, dizel	zemni plin, dizel	zemni plin, mazut
razina buke kao ...	automobil pri 50 km/h	kamion pri 60 km/h	mlazni avion
brzina okretanja r/min	70000	15000	1500
turbina se okreće na	varijabilnoj brzini	konstantnoj brzini	konstantnoj brzini
najbolja učinkovitost	32 %	30 %	37 %
tipična cijena	700 \$/kW	450 \$/kW	300 \$/kW

Postoji više medija koji se koriste u gorivim ćelijama za elektrokemijsku reakciju. S obzirom na te medije postoji više tipova gorivih ćelija:

1. gorive ćelije s fosfornom kiselinom
2. gorive ćelije s otopljenim ugljikom
3. gorive ćelije s krutim oksidima,
4. gorive ćelije s polimernom membranom,
5. gorive ćelije s metanolom,
6. regenerativne gorive ćelije,
7. gorive ćelije s cinkom,
8. protonska keramička goriva ćelija.

Trenutačno su komercijalno dostupne samo gorive ćelije s fosfornom kiselinom (PAFC) koje imaju učinkovitost 35%-60% i maksimalnu snagu 200kW. Gorive

Tablica 1 pokazuje da se brzina okretanja turbina uvelike razlikuje od tipa do tipa turbine. Razlog je tome obodna brzina lopatica turbine. Sve tri vrste turbina dobivaju pogonsku energiju iz istog goriva, te su time i brzine plinova koji nastaju pri izgaranju iste. Da bi energija koju prihvaća turbina od plinova bila što veća obodna brzina lopatica mora biti odgovarajuća. Kako su kod mikro-turbine lopatice puno manje to se ona mora okretati puno brže, nego npr. energetska turbina.

Kod energetskih turbina, brzina okretanja turbine je 1500 ili 3000 okr/min jer ta brzina upravo odgovara brzini vrtnje četveropolnog odnosno dvopolnog sinkronog generatora. Kod mini turbina, gdje je brzina okretanja osjetno veća koristi se isto sinkroni generator (dvopolni ili četveropolni), ali s mjenjačkom kutijom koja smanjuje brzinu okretanja turbine i prilagođava je genera-

toru. Kod mikro-turbina situacija je u potpunosti drugačija. Budući da je brzina okretanja i do 100 000 okr/min gotovo je nemoguće napraviti takvu mjenjačku kutiju koja bi smanjivala brzinu okretanja na brzinu pogodnu za sinkroni generator (3000 r/min). Zbog toga se kao generator uz mikro turbinu koristi istosmjerni generator. Tada se struja iz generatora vodi izravno na izmjenjivač, koji je pretvara u izmjeničnu struju frekvencije 50 Hz.

Elektrane s ugrađenom energetsom plinskom turbinom se zbog svoje veličine u ovom radu neće posebno obrađivati. Kod plinskih elektrana mini izvedbe (od 650 kVA do 10000 kVA) može se izabrati asinkroni ili sinkroni generator. Asinkroni generator je moguće instalirati samo u slučajevima kada snaga nije veća od 7 MVA, jer su to već granične vrijednosti do kojih se asinkroni generatori proizvode.

Popularnost mikroturbina porasla je i zbog činjenice da je emisija štetnih plinova znatno manje nego kod motora s unutarnjim izgaranjem. Mnogi upravo u mikroturbinama vide učinkovit i čist izvor energije budućnosti. Još jedan razlog za to je korištenje bioplina. Plinske turbine su pogodne za kombinirani proces proizvodnje toplinske i električne energije (CHP). Učinkovitost takvog procesa je visokih 70-90%.

S ekološkog gledišta plinske su turbine znatno povoljnije od motora s unutarnjim izgaranjem iako postoji emisija NOx i SOx. Prema trenutačnim procjenama, cijena instalacije mikroturbine kreće se oko 1000 – 1500 \$/kW.

2.2.6. Motori s unutarnjim izgaranjem

Motori s unutarnjim izgaranjem su vrlo raširena i dobro poznata tehnologija. Motor je spojen s generatorom i oni čine proizvodnu jedinicu. Gledajući prema pogonskom gorivu, postoje dva osnovna tipa motora s unutarnjim izgaranjem:

- dizel motor i
- plinski Otto motor (u ovom slučaju podrazumijeva se pogon na zemni plin).

Prednost se daje pogonu na plin, ali se često konstruiraju tako da mogu koristiti i dizel gorivo. U slučaju motora s dvojnim gorivom (*dual fuel engine*), omjer goriva je 80/20 u korist plina, s tim da takvi motori zadržavaju mogućnost rada na 100% dizel gorivu.

Motori s unutarnjim izgaranjem uobičajeno imaju snagu od 50 do 5000 kW i relativno su lako dobavljivi. Broj prodanih motora s unutarnjim izgaranjem (dizelskih i plinskih zajedno) porastao je šest puta u periodu od 1988. do 1998. Prednosti motora s unutarnjim izgaranjem su:

- niski početni troškovi (oko 200-800 \$/kW, ovisno o veličini),
- jednostavno i brzo pokretanje,
- dokazana pouzdanost,
- relativno visok stupanj učinkovitosti (45-50%) i

- niska emisija štetnih plinova (posebno NOx), ako je pogonsko gorivo plin.

Emisija štetnih plinova bila je kod starijih modela veliki problem, no zahvaljujući boljem dizajnu motora, boljoj kontroli procesa te uporabi katalizatora, taj je problem umanjen. Motori s unutarnjim izgaranjem pogodni su za kombinirani proces proizvodnje topline i električne energije.

Korištenje plina kao goriva postaje sve popularnije, većinom zbog unaprjeđenja plinske verzije motora. Zastupljenost plinskih verzija motora poraslo je od 4% 1990. na 14% 1998. godine.

2.2.7. Iskorištavanje biogoriva

Biogoriva su goriva nastala od organskih tvari. Postoje tri vrste biogoriva: biomasa, bioplina i biodizel.

2.2.7.1. Iskorištavanje biomase

Uporaba biomase za proizvodnju energije poznata je još od 1920-ih. Tada se radilo o drvnom otpadu i poljoprivrednom otpadu (kukuruzovina, slama, koštice voća i sl.). i najčešće se koristilo samo za proizvodnju pare u industriji. Proces nije bio osobito učinkovit.

Tehnologija za uporabu biomase zasniva se na principu parnog kotla. U parni kotao dovodi se pojna voda, gorivo i zrak za izgaranje, a kao rezultat nastaje para. Ako se radi o proizvodnji električne energije tada je proces sličan „klasičnoj“ termoelektrani. Za korištenje biomase, bitna su tri tipa kotlova koja se razlikuju po načinu loženja.

- loženje na rešetki,
- loženje u fluidiziranom sloju i
- loženje injektiranjem.

Prvi su bili kotlovi s loženjem na rešetki. Iako danas rijetko zastupljen kod nekih otpada (npr. pileći otpad) ima posebno dobre karakteristike. Tijekom osamdesetih dominaciju je preuzela tehnologija fluidiziranog sloja zbog veće učinkovitosti i manje emisije štetnih plinova. To je i danas najčešća tehnologija kod iskorištavanja biomase. Za pojedine se otpade koristi i loženje injektiranjem.

Zastupljenost biomase još uvijek je malo u oprabi iz nekoliko razloga. Prvo, ako se radi o industrijskom otpadu dostupnost ovisi o sezoni. Drugo, specifična energetska vrijednost biomase (gustoća energije) nije visoka pa su potrebne velike količine pa je učešće cijene transporta visoko. Iz navedenih razloga se ne rade elektrane u kojima je jedini energent biomasa. Uobičajno se ona miješa s ugljenom ili loživim uljem. Iz istih su razloga elektrane s biomasom tipično malih snaga.

Organski otpad sadrži relativno visoku koncentraciju alkalnih soli i klorida. To uzrokuje pojačano trošenje i koroziju metalnih površina kotla, što predstavlja dodatni problem kod održavanja takvih elektrana. Također dovodi do SOx i NOx spojeva u ispušnim plinovima.

Zbog neujednačenog sastava goriva pojavio se i problem s izradom adekvatnih uređaja za pročišćavanje.

Biomasa ne omogućuje visoku učinkovitost procesa (ispod 20%) jer ne dozvoljava postizanje visoke temperature. Ako se temperatura uspije podići javlja se već spomenuti problem pojačane korozije. To je jedan od razloga za kombiniranu proizvodnju električne i toplinske energije. Tada se učinkovitost procesa podiže do 36%.

2.2.7.2. Iskorištavanje bioplina

Bioplin nastaje prirodnim raspadanjem organske tvari. Najbolji način iskorištavanja otpada u stočarstvu je dobivanje bioplina biološkom pretvorbom. U rijetko naseljenim zemljama stočne farme nisu priključene na elektroenergetsku mrežu. Takve farme koriste bioplin za pogon hladnjaka i zamrzivača, ali i za dobivanje električne energije. Za postizanje velike količine plina najbolji je izmet svinja i goveda dok je za kvalitetu (udio metana) najbolji izmet kokoši i pataka.

Za distribuiranu proizvodnju interesantan je deponijski plin. To je plin koji se razvija raspadanjem gradskog otpada. Sastoji se većinom od metana i CO₂ koji su izraziti staklenični plinovi pa je deponijski plin s ekološkog stajališta vrlo opasan. Zemlje kao što su SAD, Njemačka, Velika Britanija i sl. koriste deponijski plin za proizvodnju električne energije. Odlagalište se može početi iskorištavati već godinu do dvije nakon osnutka (tada već stvara dovoljnu količinu plina). Plin se skuplja u zdencima za otplinjavanje, sabire u plinovode, čisti i tlači u kompresoru i hladnjaku te dovodi do elektrane.

Najčešća primjena bioplina je u plinskim motorima (motori s unutarnjim sagorijevanjem) i plinskim turbinama, ali ima i drugih mogućnosti (npr. gorive ćelije). Energetska vrijednost deponijskog plina je u razini gradskog plina, a za podizanje učinkovitosti cijelog procesa može se koristiti kogeneracija. Svjetska iskustva pokazuju da se ovakve elektrane isplate već nakon nekoliko godina.

2.2.7.3. Iskorištavanje biodizela

Biodizel je komercijalni naziv za motorno gorivo koje se proizvodi iz biljnih ulja, recikliranog otpadnog jestivog ulja ili životinjske masti procesom transesterifikacije, pri čemu kao sporedni proizvod nastaje glicerol. Ima svojstva jednaka onima koja ima klasični dizel dobiven iz mineralnih ulja, a koristi se kao zamjena mineralnog dizela ili u određenoj smjesi s njim. Istraživanja su pokazala da primjena biodizela u motorima s unutarnjim sagorijevanjem znatno smanjuje proizvodnju stakleničkih plinova. Osim što je po energetske karakteristika identičan dizelu iz mineralnih ulja ima bolja mazivna svojstva nego moderna dizelska goriva (Eurodizel) sa smanjenim udjelom sumpora, što utječe na pouzdanost rada motora. Značajna povoljnost biodizela je u tome da je biorazgradiv pa je njegov transport i skladištenje manje opasno po okoliš, a toksičnost za

čovjeka je značajno manja nego neke svakodnevne namirnice koje imaju maksimalno dozvoljene doze konzumacije, npr. kuhinjska sol.

Primjena biodizela je značajno porasla u SAD i Njemačkoj zbog državnih poticaja u njegovoj proizvodnji te porezne i zakonodavne politike u njegovoj primjeni. Mogućnosti biodizela su prepoznate i u Hrvatskoj (Strategija energetskeg razvitka RH, Program-BIOEN) međutim, izostali su državni mehanizmi koji se uspješno primijenjeni u prethodno navedenim zemljama. Više informacija o biodizelu može se pročitati u [83].

3. TEHNIČKI UTJECAJ NA RAZDJELNU MREŽU

3.1. Kriteriji za priključak distribuiranih izvora na razdjelnu mrežu

Liberalizacija tržišta električnom energijom poticaj je pojavi distribuiranih izvora. Naročito su na području EU i SAD politička motiviranost i ekonomske subvencije znatno povećali udjel električne energije proizvedene iz distribuiranih izvora (uključeni su obnovljivi i neobnovljivi izvori energije) s planovima da se taj udjel do 2010. godine poveća na 20% ukupne snage, odnosno 23.5% ukupne proizvodnje električne energije u zemljama EU [55, 56]. Najveći porast proizvodnje po tehnologijama se očekuje od vjetro, solarne energije (fotonaponski moduli i termalne elektrane) i biomase.

Može se reći da tradicionalna razdjelna mreža koja je samo na svojoj najvišoj naponskoj razini 35 kV imala priključene industrijske energane više ne postoji i da se uvodi novi pojam aktivne mreže koja na svim naponskim razinama (0.4 – 35 kV) ima priključene kupce koji svoju potrošnju mogu namiriti vlastitom lokalnom proizvodnjom, a višak prodavati na tržištu, odnosno predavati u mrežu [30]. Aktivna mreža zahtijeva drugačiju organizaciju upravljanja i vođenja. Prema europskoj direktivi 2003/54EC Operator distribucijske mreže – ODM (eng. *DSO-Distribution System Operator ili DNO-Distribution Network Operator*) odgovoran je za vođenje, planiranje, izgradnju i održavanje distribucijske mreže. U Hrvatskoj je uloga ODM-a dodijeljena HEP Distribuciji. Njegove nadležnosti i obveze opisane su u [85] koje će se ovdje samo ukratko navesti:

- jamči pouzdan rad razdjelne mreže i održava parametre kvalitete električne energije;
- osigurava usklađeno djelovanje razdjelne mreže s prienosnom mrežom te priključenim mrežama i postrojenjima korisnika mreže;
- daje informacije o budućim potrebama za električnom energijom operatoru sustava i operatoru tržišta;
- uz prethodnu suglasnost regulatornog tijela donosi plan razvoja i izgradnje razdjelne mreže za razdoblje od tri godine;

Tablica 2. Distribuirana proizvodnja – tehnologije i karakteristike

	Opće karakteristike	Instalirane snage	Učinkovitost električne pretvorbe	Primjena	Pogonsko gorivo	Komentar
Motori s unutarnjim izgaranjem		<ul style="list-style-type: none"> dizel: 20kW_e - 10+MW_e(IEA) Plin: 5kW_e-5+MW_e(IEA) najčešće korištena tehnologija do 1 MW_e 	<ul style="list-style-type: none"> dizel: 36%-43% (IEA) plin: 28%-42% (IEA) 	<ul style="list-style-type: none"> prilučni ili besprekadni izvori napajanja CHP 	<ul style="list-style-type: none"> dizel, teška ulja i biodizel plin, uglavnom zemni, bioplín ili otpadni plin (metan) 	
Plinske turbine		<ul style="list-style-type: none"> 1-20MW_e(IEA) 	<ul style="list-style-type: none"> 21%-40%(IEA) 	<ul style="list-style-type: none"> CHP vršna opterećenja 	<ul style="list-style-type: none"> plin, kerozin 	
Mikro turbine		<ul style="list-style-type: none"> 30kW_e - 200kW_e(IEA) 35kW_e - 1 MW_e(A) Small-scale applications upto <1 kW_e 	<ul style="list-style-type: none"> 25%-30%(IEA) 	<ul style="list-style-type: none"> proizvodnja el. energije uz mogućnost CHP 	<ul style="list-style-type: none"> uglavnom se koristi zemni plin, ali mogu i ostale vrste plina 	
Gorive ćelije	<ul style="list-style-type: none"> Otopljeni ugljik: MCFC S polimerom membranom: PEMFC S krutim oksidom: SOFC S fosforom kiselinom: PAFC S metanolom: DMFC <p>Samo je PAFC komercijalno raspoloživ</p>	<ul style="list-style-type: none"> 50kW_e 1+MW_e(IEA) PAFC: 200kW_e-2MW_e MCFC: 250kW_e-2MW_e(A) PEMFC: 1kW_e-250kW_e(A) SOFC: 1kW_e-5 MW_e(A) 	<ul style="list-style-type: none"> 35%-60%(IEA) MCFC: ± 50-55% (IEA) PAFC: ± 35% (IEA) PEMFC: ± 35% (IEA) SOFC: ± 50-55% (IEA) Električna učinkovitost kod manjih instalacija: ~ 25% 	<ul style="list-style-type: none"> proizvodnja energije CHP, UPS 	<ul style="list-style-type: none"> metanol vodik ili zemni plin koji zahtijeva postupak reformacije 	
Fotonaponski moduli	<ul style="list-style-type: none"> ne proizvodi toplinsku energiju 	<ul style="list-style-type: none"> 1+kW(IEA) 20+kW(A); primjena ovisi samo o broju modula 	<ul style="list-style-type: none"> nije jedinstveno 	<ul style="list-style-type: none"> kućna i manja komercijalna primjena primjena kod izostanka priključka na mrežu manje instalacije 	<ul style="list-style-type: none"> Stunce 	<ul style="list-style-type: none"> proizvodnja se ne može predviđeti
Vjetroelektrane	<ul style="list-style-type: none"> priobalne i na kopnu 	<ul style="list-style-type: none"> 200W-3MW(A) 	<ul style="list-style-type: none"> nije jedinstveno 		<ul style="list-style-type: none"> vjetar 	<ul style="list-style-type: none"> proizvodnja se ne može predviđeti
Ostali obnovljivi izvori	<ul style="list-style-type: none"> uključena toplinska sunčeva, male HE, geotermalna, ocean... 		<ul style="list-style-type: none"> nije jedinstveno 			

Tablica 3. Distribuirana proizvodnja – tehnologije i njihove potencijalne prednosti

	Pričuva	Rezanje vršnih opterećenja	Pouzdanost napajanja	Osigurana kvaliteta energije	Umanjuje potrebu za izgrad. mreže	Podrška mreži (pomoćni izvori)	Mogućnost kogeneracije	"Zelena energija"	Jeftino gorivo
Motori s unutarnjim izgaranjem	Da	Da	Da, uz dispečiranje		Da, uz dispečiranje	Da, uz dispečiranje	Da	Ne-Da ¹⁾	Ne-Da ¹⁾
Plinske turbine	Da	Da	Da, uz dispečiranje		Da, uz dispečiranje	Da, uz dispečiranje	Da	Ne-Da ¹⁾	Ne-Da ¹⁾
Micro turbine	Da	Da	Da, uz dispečiranje		Da, uz dispečiranje	Da, uz dispečiranje	Da	Ne-Da ¹⁾	Ne-Da ¹⁾
Gorive ćelije	Da	Ne	Da, uz dispečiranje		Da, uz dispečiranje	Da, uz dispečiranje	Da	Ne-Da ²⁾	Ne
Fotonaponski moduli	Ne	Ne	Ne	Ne	teško	teško	Ne	Da	Da
Vjetroelektrane	Ne	Ne	Ne	Ne	teško	teško	Ne	Da	Da
Ostali obnovljivi izvori	Ne	Ne	Ne, osim mHE		teško	teško	Ne, osim ako je gorivo biomasa	Da	Da

Da: tehnologija doprinosi ...;

Ne: tehnologija ne doprinosi ...;

teško: zahtjev značajno korištenje dodatnih tehnologija, npr. za pohranu energije

(1): "Zelena energija" je moguća uz korištenje bioplina ili biodizela

(2): "Zelena energija" je moguća uz proizvodnju vodika elektrolizom koristeći el. e. iz solarnih ili vjetroelektrana

Tablica 4. Distribuirana proizvodnja – tehnologije i utjecaji

	Investicije u €/kWe	Povećanje tržišta plinom	Mogućnost doprinosa boljoj ekonomskoj učinkovitosti u otvorenom tržištu	CO ₂ emisija u (g/kWh) bez CHP načina rada	NO _x emisija (g/kWh)	SO ₂ emisija (g/kWh)	Mogućnost daljinskog vođenja (dispečiranje)
Motori s unutarnjim izgaranjem	1500 – 2500	Da	Da, ali ovisi o terminam, učinkovitosti	Dizel: 650 (IEA) Plin: 500-620 (IEA)	Dizel: 10 (IEA) Plin: 0,2-1 (IEA)		Moguće, ali se ne primjenjuje
Plinske turbine	1000 – 1250	Da	Da	580-680 (IEA)	0,3-0,5 (IEA)		Moguće, ali se ne primjenjuje
Micro turbine	1500 – 2000	Da	Da, ali ovisi o terminam, učinkovitosti	720 (IEA)	0,1 (IEA)		Moguće, ali se ne primjenjuje
Gorive ćelije	4500 – 20000 (IEA)	moguće	Da, ali ovisi o terminam, učinkovitosti	0,005-0,01 (IEA)	0,005-0,01 (IEA)		Moguće, ali se ne primjenjuje
Fotonaponski moduli	5000 – 7000 (IEA)	Ne	Ne	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	Ne
Vjetrenelektre	800 – 1000 priobalne 2000 u moru	Ne	Ne	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	0 (IEA) Neizravna emisija: proizvedena el.en. se akumulira/koristi za proizvodnju drugog energenta	Ne
Ostali obnovljivi izvori		Ne	Ne				

Tablica je napravljena iz informacija koje se nalaze u [40, 69]

- osigurava nepristran pristup razdjelnoj mreži za treće osobe, osim ako može dokazati da to nije opravdano zbog tehničkih i/ili pogonskih ograničenja;
- dužan je na svoju mrežu priključiti sve potencijalne korisnike, osim ako za takvo priključenje postoje važni ekonomski i/ili tehnički razlozi koji ne dopuštaju priključenje.

Raznolikost načina proizvodnje električne energije, priključka na mrežu, upravljanja i vođenja zahtijeva reviziju ili pisanje novih kriterija i standarda za priključak distribuiranih izvora. U postojećim Tehničkim uvjetima [84] može se reći da su tehnički kriteriji priključka malih hidroelektrana i kogeneracija sa sinkronim i asinkronim generatorima u skladu sa svjetskim iskustvima i standardima [10, 11, 36, 37, 41] međutim zbog novih definicija i terminologije, novih vrsta distribuiranih izvora te tržišta električnom energijom, koje u to doba nije postojalo, nužno je provesti njihovu reviziju. Kao dobar predložak što sve nova inačica Tehničkih uvjeta treba obuhvaćati kako bi ODM, Distribucija i kupac/proizvođač imali jednoznačnu proceduru, mogu poslužiti [10, 13, 14, 15, 16, 36, 37, 40, 41].

Sa stajališta razdjelne mreže, na koju se priključuju, distribuirane izvore možemo podijeliti u tri osnovne kategorije:

- namijenjeni prvenstveno proizvodnji za pokrivanje vlastitih potreba (cjelokupna potrošnja električne energije je na mjestu proizvodnje),
- namijenjeni za prodaju cjelokupne proizvedene električne energije i
- kombinacija prve dvije varijante.

Priključak distribuiranih izvora (DI) na razdjelnu mrežu može biti na niskonaponskoj (0.4 kV) ili sredjonaponskoj (10 kV, 20 kV, 35 kV) razini, na sabirnicama ili u mreži, ovisno o ukupnoj snazi distribuiranog izvora, okolnostima mreže i drugim faktorima. Pri donošenju konačne prosudbe o mogućnosti i načinu priključka treba voditi računa o sljedećem :

- snaga i planirana godišnja proizvodnja DI,
- vršna snaga i potrošnja na lokaciji DI,
- vrsta i osobine pogona na lokaciji DI i
- snaga kratkog spoja mreže na priključnom mjestu.

Tehnički uvjeti određuju minimalne tehničke zahtjeve za projektiranje DI prema kojima bi postrojenje bilo sposobno za paralelni pogon s distribucijskom mrežom. Sastavni dio suglasnosti za priključak DI na razdjelnu mrežu mora biti analiza utjecaja DI koja sadrži proračun tokova snaga, proračun kratkog spoja, a kod DI većih snaga priključenih na 10, 20 ili 35 kV razini i proračun stabilnosti.

Distribuirani izvori utječu na kvalitetu napajanja, struje kratkog spoja i sustav zaštite. Što se tiče kvalitete napajanja najčešće se tehnički uvjeti oslanjaju na europsku normu EN 50160 čime se postupak priključenja čini znatno jednostavnijim, ali postoje odstupanja u raznim zemljama EU što se tiče restriktivnosti prihvatljivih vrijednosti napona u stacionarnim stanjima. Za analizu

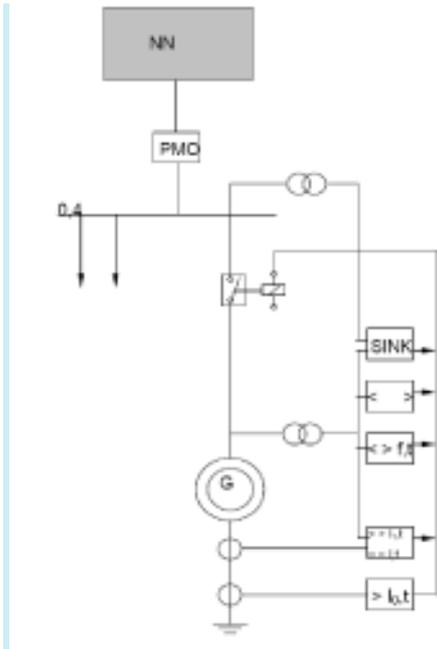
naponskih prilika potrebno je napraviti proračun tokova snaga za normalno pogonsko stanje razdjelne mreže koji uz zadane snage proizvodnje i opterećenja daje napon u svim čvorištima mreže. Ukoliko je DI priključen na kraj radijalnog kraka mreže može doći do promjene tokova snaga i naponskog profila ovisno o opterećenju u čvorištu priključenja. U slučajevima malog opterećenja tokovi snaga su suprotni od onih u tradicionalnoj mreži – izlazna snaga DI teče prema pojnoj točki – transformatoru. Proračun na taj način ukazuje na režim rada DI ili mjesto priključka kompenzacije kako bi se proizvodnjom jalove snage regulirao iznos napona.

Proračun kratkog spoja ovisno o lokacijama kvara kao rezultat daje iznose struje kvara i koristi se za dimenzioniranje elemenata mreže, ali i za udešenje relejne zaštite. Zaštita DI od unutarnjih kvarova ne predstavlja problem niti kod jedne vrste DI. Problem nastaje ako do kvara dođe u mreži. Asinkroni generatori, u pravilu, ne napajaju niti kod jedne vrste kvara mjesto kvara dovoljno dugo i s dovoljnim iznosom struje kvara da bi se na taj način mogla izvršiti selektivnost odvajanja mreže. Sinkroni generatori manjih snaga također zbog problema s uzbuđom ne mogu napajati mjesto kvara s dovoljno velikom strujom kvara. Izmjenjivači pak predstavljaju problem jer ih je zbog nelinearnosti elemenata vrlo teško modelirati klasičnim računalnim programima pa se naj-češće do rezultata dolazi mjerenjima ili posebnim računalnim programima za proračuna prijelaznih stanja. Za izoliranje DI ili dijela mreže gdje se DI nalazi od dijela mreže gdje je nastao kvar, najčešće se prema svjetskim iskustvima koriste pasivne metode za otkrivanje otočnog rada koje se zasnivaju na mjerenju određenih parametara kao što su napon i frekvencija i/ili njihovih karakteristika. To je nad/podnaponska, nad/podfrekvencijska, i promjena frekvencije (*ROCOF – Rate of change of frequency*). DI se ne smiju priključivati u raz-djelne mreže s ugrađenim automatskim ponovnim uklopom.

Prema tehničkim uvjetima za priključak malih elektrana na elektroenergetsku mrežu [84] kod male elektrane ukupne snage do 100 kW sustav zaštite obvezno čine:

- nadstrujna zaštita statorskog namotaja generatora,
- nadstrujna zaštita od zemljospoja,
- zaštita od previsokog napona,
- zaštita od preniskog napona,
- zaštita od porasta frekvencije,
- zaštita od sniženja frekvencije i
- zaštita od izravnog i neizravnog dodira.

Slika 1 prikazuje principijelna shema spajanja zaštite. Uređaj označen s oznakom “*S/NK*” odnosi se na uređaj za sinkronizaciju. Svi ovi zaštitni uređaji prilikom prerade bezuvjetno isključuju DI sa elektroenergetskog sustava. Valja napomenuti da za DI iznad 100 kW do 1000 kW tehnički uvjeti propisuju još i zaštitu od nesimetričnog opterećenja i zaštitu od povratne snage. DI iznad 1000 kW moraju uza svu nabrojenu zaštitu



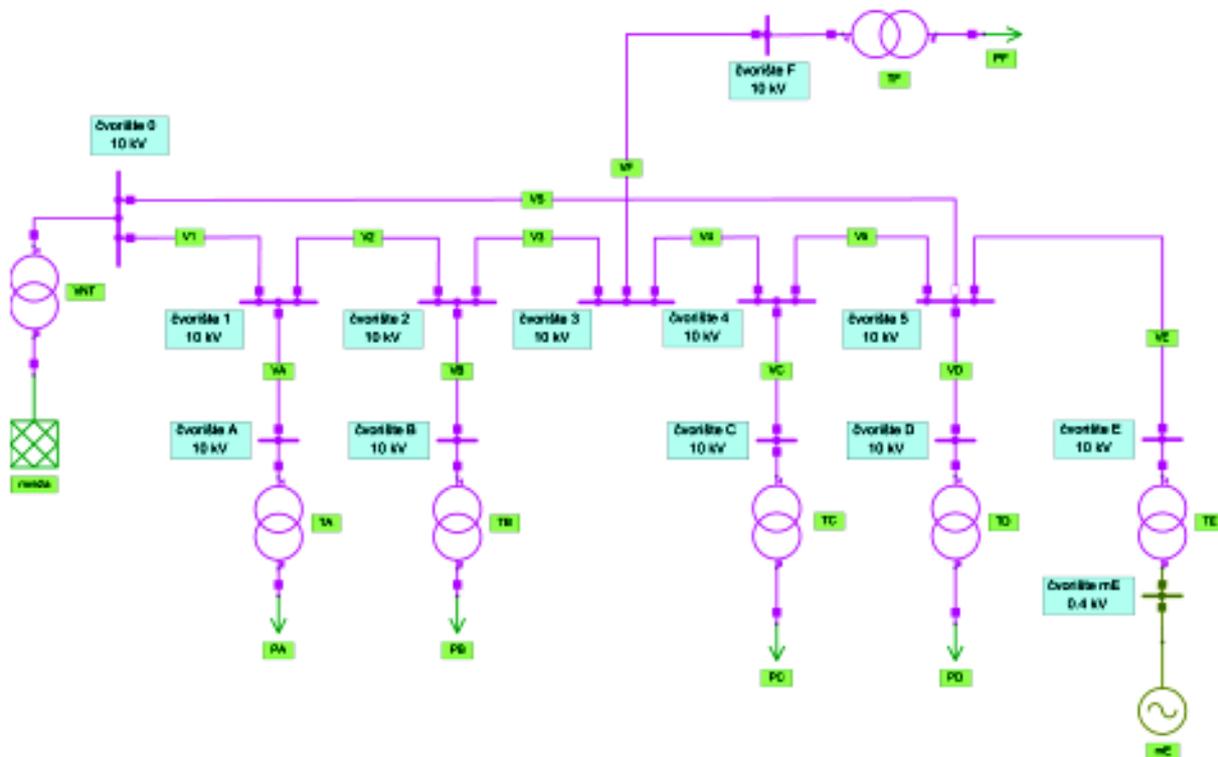
Slika 1. Priključak distribuiranog izvora (mHE) na razdjelnu mrežu 0.4kV prema [84]

sadržavati i diferencijalnu zaštitu. Nabrojena zaštita generatora male elektrane odnosi se na elektrane koje su predviđene samo za paralelni rad s razdjelnom mrežom. Slika 1 prikazuje slučaj DI sa sinkronim generatorom. Zaštita u slučaju sa asinkronim generatorom bitno se ne

razlikuje od prikazane sheme na slici. U tom slučaju nije potreban uređaj za sinkronizaciju jer se asinkroni generator ne sinkronizira prilikom upuštanja. Upuštanje asinkronog generatora rješava se otporima ili zasitljivim prigušnicama spojenim u seriju s generatorom, s time da se upuštači nakon zaleta kratko spoje i više nisu u funkciji. Ovaj slučaj s upuštačima je nužan kod većih jedinica zbog toga što je početna struja generatora pet do šest puta veća od nazivne. Kod asinkronih generatora nije potrebna uzbuda međutim potrebno je spojiti kompenzaciju uz generator tako da se faktor snage održava u dopuštenim granicama.

3.2. Primjer proračuna za DI – malu hidroelektranu

Primjer koji je ovdje obrađen dio je tradicionalne razdjelne mreže koja ugradnjom distribuiranog izvora postaje aktivna mreža pa se trebaju provjeriti svi njegovi mogući utjecaji na razdjelnu mrežu. Razdjelne mreže uvijek imaju radijalno napajanje neovisno o izgrađenoj strukturi mreže, bez obzira radi li se o ruralnoj ili gradskoj mreži. Ako dođe do kvara jednog dijela voda, početno će cijeli vod biti isključen jer je prva zaštita voda obično u pojnoj transformatorskoj stanici. Vrijeme popravka voda ili drugog elementa mreže je zasebni problem. Ako je struktura razdjelne mreže zatvorena tada se dio mreže u kvaru može izolirati i napajanje osigurati iz drugog smjera ili iz druge pojne transformatorske stanice. Složeniji je slučaj ako se u radijalnoj mreži kvar dogodi na otcjepu voda. Ako postoji mogućnost odva-



Slika 2. Primjer razdjelne mreže s priključenim distribuiranim izvorom/alternativnim poveznim vodom VS

janja otcjepa u kvaru tada su jedino kupci električne energije na tom otcjepu bez napajanja. Najlošiji slučaj je naravno kvar na magistralnom vodu. Tada su svi kupci električne energije iza kvara bez napajanja svo vrijeme dok se kvar ne otkloni. U tom slučaju postoji mogućnost da distribuirani izvor bude projektiran i izveden tako da u slučaju kvara na dijelu magistralnog voda preuzme napajanje dijela kupaca. To je jedini slučaj kada distribuirani izvori utječu na povećanje raspoloživosti razdjelne mreže.

3.2.1. Utjecaj na padove napona i tokove snaga

Proračun tokova snaga i padova napona može se izvršiti na više načina. Ovdje je primijenjen iterativni postupak. Ulazni podaci za ovaj postupak su sljedeći:

- iznos napona referentnog čvorišta,
- iznos predviđenog vršnog opterećenja (prividne snage) pojedinih točaka opterećenja u horizontnoj godini perioda planiranja i
- iznos radnih i induktivnih otpora pojedinih grana.

Za napon referentnog čvorišta postavlja se nazivni napon mreže. Iterativnim postupkom dobiva se pravi napon čvorišta.

Iznos predviđenog vršnog opterećenja neke točke u mreži dobiva se na više načina. Prvi i najtočniji rezultat dobiva se mjerenjem opterećenja (najčešće se radi o mjerenju ukupnog opterećenja transformatorske stanice) u određenom vremenskom periodu. Posebno su povoljne transformatorske stanice koje imaju svoje mjerne terminale za registraciju maksimalnih opterećenja. Drugi način je da se na osnovi broja kupaca električne energije procijeni opterećenje transformatorske stanice matematičkim postupkom.

Iznos radnih i induktivnih otpora pojedinih grana se izračunava iz poznate duljine grane i jediničnih vrijednosti otpora voda.

U proračunu se uzimaju vršna opterećenja karakterističnih točaka opterećenja. Razlog tomu je dobivanje tokova snaga i padova napona za “najgori slučaj”, tj. slučaj kada je sustav najopterećeniji.

3.2.2. Utjecaj na struje kratkog spoja

Struje trolnog kratkog spoja se izračunavaju, ovisno o mjestu kvara, izravno iz jednopolne sheme sa slike 3. Za struje dvopolnog i jednopolnog kratkog spoja moraju se koristiti nadomjesne sheme, koje uzimaju u obzir i inverznu i nultu komponentu struje kratkog spoja. U sredjonaponskim razdjelnim mrežama nul-točka napojnog transformatora u transformatorskoj stanici $x/10$, $x/20$ ili $x/35$ kV se uzemljuje preko otpora. Otpor se dimenzionira tako da ograniči struju jednopolnog kratkog spoja na 150, 300, 600 ili 1000 A, te je izrazito radnog karaktera (omski otpor).

Za slučaj priključivanja distribuiranog izvora razmatrani su utjecaji ako se priključuje asinkroni ili sinkroni generator. Asinkroni generator se u početnoj fazi kratkog spoja (nekoliko perioda) ponaša kao aktivni izvor. Međutim, budući da generator nema vlastitu uzbudu, nakon nekoliko perioda, generator gubi svojstva izvora te predstavlja pasivni element mreže (u nadomjesnoj shemi kao otpor). Ovaj slučaj vrijedi samo kod trolnog kratkog spoja. Kod jednopolnog i dvopolnog kratkog spoja asinkroni generator ima uzbudu preko jedne ili dvije faze, a pošto mu je nul-točka uzemljena, struja se može zatvoriti u oba slučaja. Sinkroni se pak generator ponaša kao aktivni element cijelo vrijeme kratkog spoja. Sinkroni ge-

Tablica 5. Iznosi napona u čvorištima za različite slučajeve proračuna

čvorište	bez mE	s mE 200 kVA ind	s mE 200 kVA kap	s mE 400 kVA ind	s mE 400 kVA kap	s mE 600 kVA ind	s mE 600 kVA kap	s mE 800 kVA ind	s mE 800 kVA kap	s poveznim vodom umjesto mE
A	10,14	10,28	10,22	10,42	10,30	10,55	10,37	10,68	10,44	10,27
B	10,03	10,24	10,14	10,45	10,24	10,65	10,35	10,84	10,46	10,21
C	9,92	10,24	10,07	10,54	10,22	10,83	10,37	11,12	10,53	10,18
D	9,89	10,26	10,05	10,61	10,23	10,96	10,41	11,29	10,61	10,18
F	9,90	10,20	10,03	10,48	10,17	10,76	10,32	11,02	10,46	10,13
0	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
1	10,14	10,29	10,22	10,42	10,30	10,56	10,38	10,69	10,45	10,28
2	10,03	10,24	10,14	10,45	10,25	10,65	10,35	10,84	10,46	10,21
3	9,94	10,23	10,08	10,52	10,22	10,79	10,36	11,06	10,51	10,17
4	9,93	10,24	10,07	10,54	10,22	10,84	10,38	11,12	10,54	10,18
5	9,90	10,27	10,06	10,62	10,24	10,96	10,43	11,30	10,62	10,18
E	9,90	10,31	10,07	10,70	10,26	11,08	10,47	11,45	10,69	10,18

Tablica 6. Gubici snage u granama za različite slučajeve proračuna

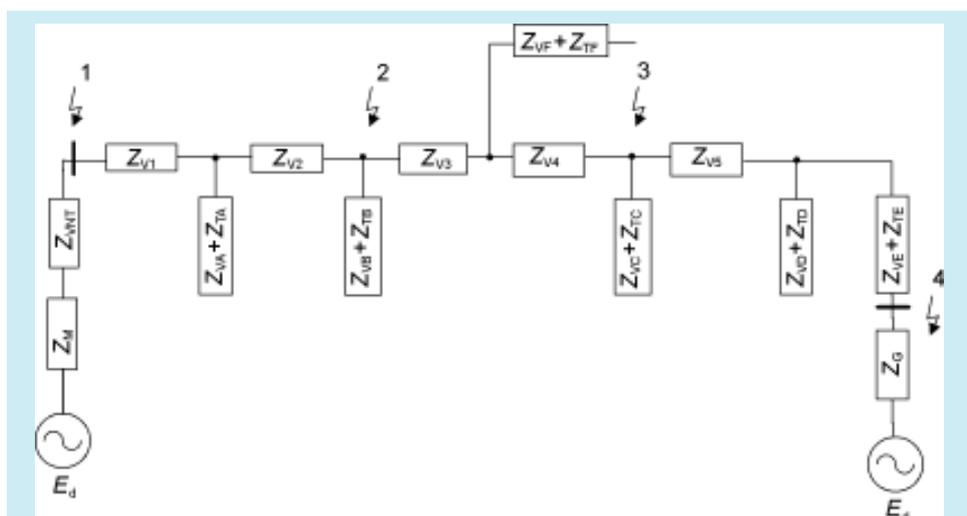
	bez mE	s mE 200 kVA ind	s mE 200 kVA kap	s mE 400 kVA ind	s mE 400 kVA kap	s mE 600 kVA ind	s mE 600 kVA kap	s mE 800 kVA ind	s mE 800 kVA kap	s poveznim vodom umjesto mE
snaga [kW]	88,29	66,04	48,58	58,43	24,65	63,06	14,22	78,09	15,42	31,59

nerator promatra se kroz tri stanja: početno, prijelazno i trajno. Za svaki od tih stanja, sinkroni generator ima drugu vrijednost unutrašnje impedancije.

Proračuni su izvršeni za početne, prijelazne i trajne struje kratkog spoja na svim mjestima označenim na slici 3 (na mjestima 1, 2, i 3 u 10kV mreži, a na mjestu 4 na 0.4 kV sabirnicama). Za svaki promatrani slučaj izvršen je proračun s asinkronim generatorom, sinkronim generatorom i bez priključene male hidroelektrane. Sve vrijednosti struja i impedancija u proračunima su preračunate na vrijednost napona referentnog čvorišta

(10.5kV), tako i struja na sabirnici 4. Zbog pojednostavljenja proračuna vrijednosti reaktancija generatora preuzete su iz [86]. Pretpostavljene nazivne snage generatora za sve proračune kratkog spoja iznosile su 400 kVA.

U svim promatranim slučajevima može se primijetiti da struja kratkog spoja pada kako simuliramo kvar dalje od glavne pojne transformatorske stanice (tablica 7). Tijekom kratkog spoja vidi se stalan doprinos sinkronog generatora struji kratkog spoja. Asinkroni generator daje svoju komponentu struje kratkog spoja samo u početnoj struji kratkog spoja.

**Slika 3. Jednopolna shema mreže na kojoj se vrši proračun kratkog spoja****Tablica 7. Početna⁽¹⁾/prijelazna⁽²⁾/trajna⁽³⁾ struja trolejnog kratkog spoja u ovisnosti o mjestu kvara**

mjesto KS	1	2	3	4
struja bez mE [kA]	⁽¹⁾ 2,60 ∠ -79,7°	1,46 ∠ -55,6°	1,17 ∠ -50,3°	0,34 ∠ -70,8°
	⁽²⁾ 2,60 ∠ -79,7°	1,46 ∠ -55,6°	1,17 ∠ -50,3°	0,34 ∠ -70,8°
	⁽³⁾ 2,60 ∠ -79,7°	1,46 ∠ -55,6°	1,17 ∠ -50,3°	0,34 ∠ -70,8°
struja s asinkronim generatorom [kA]	⁽¹⁾ 2,69 ∠ -79,9°	1,55 ∠ -57,5°	1,25 ∠ -53,1°	0,46 ∠ -76,0°
	⁽²⁾ 2,60 ∠ -79,7°	1,46 ∠ -55,6°	1,17 ∠ -50,3°	0,34 ∠ -70,8°
	⁽³⁾ 2,60 ∠ -79,7°	1,46 ∠ -55,6°	1,17 ∠ -50,3°	0,34 ∠ -70,8°
struja sa sinkronim generatorom [kA]	⁽¹⁾ 2,67 ∠ -79,9°	1,53 ∠ -57,1°	1,23 ∠ -52,4°	0,43 ∠ -74,7°
	⁽²⁾ 2,64 ∠ -80,0°	1,51 ∠ -56,6°	1,21 ∠ -51,8°	0,40 ∠ -73,5°
	⁽³⁾ 2,61 ∠ -79,8°	1,48 ∠ -56,0°	1,19 ∠ -50,8°	0,36 ∠ -71,8°

Tablica 8. Početna⁽¹⁾/prijelazna⁽²⁾/trajna⁽³⁾ struja jednopolnog kratkog spoja u ovisnosti o mjestu kvara

mjesto KS	1	2	3	4
struja bez mE [kA]	⁽¹⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,39 ∠ -75,5°
	⁽²⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,39 ∠ -75,5°
	⁽³⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,39 ∠ -75,5°
struja s asinkronim generatorom [kA]	⁽¹⁾ 0,16 ∠ -2,8°	0,15 ∠ -6,3°	0,15 ∠ -8,0°	0,56 ∠ -84,0°
	⁽²⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,39 ∠ -75,5°
	⁽³⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,39 ∠ -75,5°
struja sa sinkronim generatorom [kA]	⁽¹⁾ 0,16 ∠ -2,8°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,48 ∠ -78,5°
	⁽²⁾ 0,16 ∠ -2,8°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,47 ∠ -77,9°
	⁽³⁾ 0,16 ∠ -2,9°	0,15 ∠ -6,4°	0,15 ∠ -8,0°	0,45 ∠ -77,1°

Kod jednopolnog kratkog spoja može se primijetiti skok struje kratkog spoja pri proračunu na mjestu “4” u odnosu na mjestima “1”, “2” i “3” (tablica 8). Struja jednopolnog kratkog spoja u SN mreži je ograničena otporom od 35 Ω tako da za mjesta “1”, “2” i “3” struja kratkog spoja ne može biti veća od 160 A.

3.2.3. Utjecaj na raspoloživost razdjelne mreže

Kod proračuna raspoloživosti razdjelne mreže bez i s priključenim distribuiranim izvorom razmatrani su slučajevi kada je razdjelna mreža napajana radijalno sa zaštitom u pojnoj transformatorskoj stanici, ako se u mreži ugradi rastavljač za automatsko odvajanje voda u kvaru te povezni vod kao alternativa izgradnji distribuiranog izvora. Mreža na kojoj su izračunati indeksi raspoloživosti, SAIDI i SAIFI, prikazana je na slici 2. Kako bi se mogao uzeti utjecaj DI na povećanje raspoloživosti razdjelne mreže moralo se pretpostaviti da DI može preuzeti na sebe teret P_c i P_d u otočnom radu. Prvi uvjet podrazumijeva instaliranu snagu DI veću od one koju angažiraju kupci električne energije spojeni na transformatorske stanice “e” i “d”. Drugi uvjet podrazumijeva izvedbu DI s agregatom koji u otočnom radu može zadržavati zadovoljavajući napon i frekvenciju. U slučaju povećanja vršne snage kupaca električne energije u “otoku” iznad nazivne snage generatora mora se predvidjeti mogućnost iskapčanja dijela „otoka“ radi zadržavanja propisane frekvencije i napona. Isto tako, prilikom prijelaza DI iz paralelnog režima rada u otočni, potrebno je predvidjeti da generator DI podnese naglu promjenu opterećenja.

U razdjelnoj mreži potrebno je predvidjeti mjesto za prekidač koji će rastavljati napojnu mrežu od dijela koji se napaja u „otoku“.

Povećanje raspoloživosti razdjelne mreže ugradnjom DI ovisi o mjestu ugradnje DI, instaliranoj snazi, te o tome koliko iznose vršne snage kupaca električne energije u promatranoj mreži. Ovaj zadnji uvjet proizlazi iz uvjeta da raspoloživost ovisi o broju kupaca električne energije koji ostaju bez napajanja. DI će moći preuzeti toliko

više kupaca koliko mu je veća instalirana snaga i koliko je vršna snaga svakog pojedinačnog kupca manja.

Za izračunavanje indeksa raspoloživosti za uzeti primjer razdjelne mreže definirane su veličine potrebne za proračun.

Intenzitet kvarova “λ” se izražava kao broj kvarova u godini, a može se računati na više načina. U ovom će se radu koristiti jednostavniji način uzimanjem prosječnog broja kvara po duljini voda (0,15 kvarova po kilometru duljine za nadzemni vod godišnje i 0,1 za kabelski) te da se prema tome računa faktor “λ” [7].

Za prosječno trajanje popravka kvara je u proračunu pretpostavljen period od 9 sati za kabele (1 sat za lociranje kvara i 8 sati za popravak) i 6 sati za nadzemne vodove (1 sat za lociranje kvara i 5 sati za popravak).

Pretpostavljeni broj kupaca spojen na transformatorsku stanicu “a” $N_a = 60$, na “b” $N_b = 40$ i tako dalje analogno $N_c = 20$, $N_d = 150$, $N_e = 70$ i $N_f = 100$.

Duljine dionica i intenzitet kvarova navedene su u tablici 9.

Indeksi pouzdanosti i raspoloživosti mreže SAIFI i SAIDI (tablica 10) najviše su se smanjili u slučaju izgradnje spojnog voda radijalne mreže te razdvajanjem mreže na dva izlaza. Međutim, može se primijetiti da se i ugradnjom DI raspoloživost mreže znatno povećava. Zaključak je da se prstenasta mreža (ovdje izvedena s poveznim vodom) povećava raspoloživost mreže. U slučajevima kada prstenastu mrežu nije moguće izvesti, te kada je potrebno na radijalnom izlazu napajati kupca električne energije izuzetno osjetljivog na prekid napajanja, onda se ugradnja DI sposobnog za otočni rad postavlja kao opcija kojom je moguće zadovoljiti uvjete isporuke električne energije.

4. EKONOMSKI UTJECAJ NA RAZDJELNU MREŽU

Ekonomski utjecaj na razdjelnu mrežu sadrži više gledišta od kojih je jedan od važnijih planiranje razdjelne

Tablica 9. Intenzitet kvarova po dionicama

ime dionice	duljina dionice [km]	intenzitet kvara λ [kvarova godišnje]
V1	2,0	0,30000
V2	1,0	0,15000
V3	1,2	0,18000
V4	0,3	0,04500
V5	0,8	0,12000
VA	0,5	0,07500
VB	0,2	0,03000
VC	1,0	0,15000
VD	1,3	0,19500
VE	2,2	0,33000
VF	4,0	0,60000

Tablica 10. Izračunati indeksi raspoloživosti

	slučaj 1)*	slučaj 2)**	slučaj 3)***	slučaj 4)****
$U_{m,Pa}$	5,805	5,205	5,280	4,860
$U_{m,Pb}$	5,580	4,980	5,055	4,635
$U_{m,Pc}$	6,180	5,580	5,655	2,415
$U_{m,Pd}$	6,405	5,805	2,175	2,640
$U_{m,Pe}$	7,080	6,480	3,150	3,315
$U_{m,Pf}$	8,430	8,430	7,905	7,485
SAIDI	6,806	6,342	4,476	4,322
$\lambda_{m,Pa}$	2,175	1,575	1,650	1,335
$\lambda_{m,Pb}$	2,175	1,575	1,650	1,335
$\lambda_{m,Pc}$	2,175	1,575	1,650	0,840
$\lambda_{m,Pd}$	2,175	1,575	0,525	0,840
$\lambda_{m,Pe}$	2,175	1,575	0,525	0,840
$\lambda_{m,Pf}$	2,175	2,175	1,650	1,335
SAIFI	2,175	1,711	1,088	1,065

* prvi slučaj se odnosi na radialnu mrežu

** drugi slučaj se odnosi na radialnu mrežu s prekidačem za automatsko odvajanje voda u kvaru u otcjepu "f"

*** treći slučaj se odnosi na slučaj s DI koja je sposobna u otočnom radu preuzeti točke opterećenja Pd i Pe

**** četvrti slučaj se odnosi na slučaj s poveznim vodom umjesto DI

mreže. Kako je opisano u [85] obveza je ODM-a planiranje pogona, ali i planiranje razvoja razdjelne mreže uz uvjet da se s tim jamči siguran i pouzdan pogon mreže. Pri tomu se trebaju primjenjivati važeći zakonski i podzakonski akti, odluke regulatornog tijela i gran-ske norme ODM-a. Prema organizacijskoj strukturi HEP Distribucije operativna razina planiranja se spušta na postojeća distribucijska područja, odnosno na regionalna distribucijska područja nakon njihovog formiranja.

Praćenje opterećenja mreže i iskorištenost kapaciteta mreže postaju jedan od nužnih uvjeta za uspješno

planiranje razdjelne mreže kad ona iz tradicionalne konfiguracije prelazi u aktivnu mrežu. Planiranjem opterećenja mreže trebaju se osim dosadašnjih planiranja opterećenja u točkama opterećenja (najčešće transformatorske stanice x/0.4 kV) planirati i moguća mjesta u mreži gdje se mogu pojaviti distribuirani izvori i to na svim naponskim razinama te analizirati njihov utjecaj na razdjelnu mrežu. To je nužan preduvjet za optimalno strukturiranje mreže i kratkoročno planiranje dinamike njezine izgradnje. Optimiranjem investicijskih ulaganja tako se može izbjeći predimenzioniranje elemenata.

Već je kod razmatranja tehničkog utjecaja na razdjelnu mrežu pokazano da određenim slučajevima pogona distribuirani izvori mogu povećati raspoloživost razdjelne mreže, a isto tako da utječu na smanjenje gubitaka snage i energije u razdjelnoj mreži. Trenutačno još ne postoje analize koliki je financijski efekt tih utjecaja, pogotovo kod povećanja raspoloživosti zbog još neodređenih cijena neisporučene električne energije ili nekog drugog „malusa“ neisporučene električne energije. Međutim, priključivanje distribuiranih izvora na razdjelnu mrežu svakako ima ekonomski utjecaj koji se može sagledati kroz nekoliko vrsta troškova.

Prvo, to su inicijalni troškovi priključenja distribuiranog izvora na razdjelnu mrežu koji ne mogu biti identični za svaku naponsku razinu. Inicijalni troškovi se mogu sastojati iz dva dijela tzv. *shallow cost*, odnosno troška izgradnje priključnog voda od distribuiranog izvora do priključnog mjesta u razdjelnoj mreži i tzv. *deep cost*, odnosno troška koji nastaje u razdjelnoj mreži zbog utjecaja distribuiranog izvora na razdjelnu mrežu, a zahtijeva njezinu rekonstrukciju (npr. ugradnju relejne zaštite, ugradnju prekidača veće prekidne moći, izgradnju voda, itd.). Dosadašnja praksa je bila da sve inicijalne troškove snosi distribuirani izvor koji se priključuje na razdjelnu mrežu. Tako su se događale situacije da je prvi distribuirani izvor koji se priključivao na razdjelnu mrežu platio njezinu rekonstrukciju, dok je nekolicina sljedećih priključaka zbog dovoljne zalihosti u rekonstruiranoj mreži bilo oslobođeno tih troškova. Zbog otvorenog tržišta električnom energijom i saznanja da se s jedne strane subvencionira izgradnja distribuiranih izvora (pogotovo obnovljivih), a zatim nestimulativno dodatnim troškovima opterećuje njihovo priključivanje, već se primjenjuju ili se predlažu novi, stimulirajući i tržišno raspodijeljeni troškovi [30, 40]. Ukoliko se npr. analizom pokaže da je zbog priključenja distribuiranog izvora u razdjelnu mrežu nužna njezina rekonstrukcija, troškove rekonstrukcije snosi distribuirani izvor, ali proporcionalno udjelu njegovog utjecaja na tu rekonstrukciju (npr. ugradnje prekidača veće prekidne moći).

Drugo, u praksi se pokazalo da priključivanjem distribuiranih izvora za distribuciju može nastati još jedna vrsta troška, tzv. *stranded cost*, odnosno trošak koji nastaje investicijskim ulaganjem u izgradnju razdjelne mreže koja se zbog naknadne izgradnje distribuiranog

izvora ne može vratiti. Primjer naveden u [30] vrlo dobro opisuje situaciju nastanka takvog troška. Distribucijsko poduzeće investira u izgradnju voda koji napaja industrijsko postrojenje. Naknadno se u industrijskom postrojenju izgradi distribuirani izvor koji uzrokuje smanjenje iznosa kupljene električne energije od distribucijskog poduzeća te izgrađeni vod učini nerentabilnim. U svjetskoj praksi postoje dva načina na koji distribucijsko poduzeće zahtijeva povrat uloženih investicijskih sredstava zbog nerentabilnog voda: jednokratni iznos troška koji se vraća kroz određeni period vremena ili tzv. *standby cost*, odnosno trošak koji distribuirani izvor, odnosno industrijsko postrojenje plaća zbog osiguranja pričuve napajanja električnom energijom iz razdjelne mreže zbog planiranih ili neplaniranih ispada distribuiranog izvora. Svi ovi troškovi utječu na atraktivnost izgradnje distribuiranih izvora tako da moraju biti regulirani i definirani zakonskim aktima kako bi se osiguralo pozitivno tržišno natjecanje.

Nakon što je većina država ukinula subvenciju na cijenu proizvedene električne energije iz distribuiranih izvora (obnovljivi izvori se još uvijek subvencioniraju) trebalo je osigurati njihov tržišni opstanak, a isto tako i dalje učiniti atraktivnim za ulaganje u njihovu izgradnju. Danas su najraširenija dva pristupa. Prvi pristup je da se stimulira proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora u onim periodima dana (vršna opterećenja) kad je cijena električne energije na tržištu dovoljno visoka da distribuirani izvori s cijenom svoje energije budu konkurentni na tržištu. Drugi pristup koji se predlaže je koncept virtualnih elektrana (VE) eng. *Virtual Power Plants (VPP) ili samo Virtual Plants (VP)* [40]. Virtualna elektrana je zapravo udruženje malih proizvođača električne energije, odnosno distribuiranih izvora koji koriste istu ili najčešće različite tehnologije za proizvodnju električne energije. Oni nastupaju prema ODM-u kao jedna elektrana, iako su prostorno dislocirani, odnosno priključeni u raznim dijelovima razdjelne mreže. To zahtijeva od ODM-a vrlo sofisticirani informacijski sustav koji se zove DEMS (*Decentralised Energy Management System*) – Decentralizirani sustav upravljanja energijom. DEMS se sastoji od tri dijela: prognoze, planiranja resursa i *on-line* optimizacije. Prognoza se sastoji od prognoze opterećenja i prognoze proizvodnje pojedinih DI za sljedeći dan. Planiranje resursa uključuje sve ugovore o isporuci, kupovini i transferu energije, proizvodnji i skladištenju energije, uvjeti pogona i planirani ispadi i održavanje. *On-line* optimizacija je potrebna za dispečiranje, odnosno upravljanje i vođenje razdjelne mreže u realnom vremenu te su za nju potrebni podaci o opterećenju i proizvodnji u realnom vremenu te meteorološka situacija kako bi se planirana proizvodnja i potrošnja uskladila sa stvarnom. Tako dobiveni podaci se onda koriste za upravljanje virtualnom elektranom bez obzira radi li se o upravljivim ili neupravljivim distribuiranim izvorima.

5. ZAKLJUČAK

U radu se pokušalo ukazati na utjecaj koji distribuirani izvori imaju na planiranje izgradnje, ali i na planiranje pogona aktivne razdjelne mreže. Hrvatska trenutačno zaostaje u primjeni ovih tehnologija. Kako je Hrvatska ujedno potpisnik *Kyoto* protokola te niza regionalnih ugovora o energetske suradnji i osnivanju regionalnog tržišta energijom [51, 52, 57] može se očekivati da će i prije članstva u EU imati obvezu subvencioniranja i stimuliranja izgradnje i priključivanja distribuiranih izvora, pogotovo obnovljivih izvora. To znači da se vrlo brzo moraju pravila tržišta i mrežnog poslovanja uskladiti i konstantno usklađivati s pravilima EU, moraju se definirati standardi priključenja na razdjelnu mrežu, ODM mora razviti kriterije i metode planiranja izgradnje i pogona aktivnih razdjelnih mreža, nužna je modernizacija upravljanja i vođenja razdjelnih mreža, modernizacija zaštite te uvođenje modernih informacijskih tehnologija (GIS) u poslovanje distribucija. To naravno zahtijeva velika ulaganja, ali je to jedini način uspješne integracije obnovljivih i distribuiranih izvora električne energije u razdjelne mreže pri ispunjavanju EU ciljeva [55, 56, 53]. Uvijek se naravno postavlja pitanje koje od navedenih tehnologija su interesantne i primjenjive u Hrvatskoj. Prema dosadašnjim istraživanjima i stanju tehnologije to su sljedeće tehnologije: male hidro-elektre (cca. 350 prema Studiji energetskeg razvitka Hrvatske), biomasa (bioplin, biodizel), komunalni otpad (spalionice ili proizvodnja metana) i korištenje solarne energije (izravna i termalna pretvorba u električnu energiju). Za korištenje energije vjetra, zbog novih zakonskih uvjeta, nedovoljno jake domaće industrije, nedovoljne istraženosti lokacija ne može se pouzdano procijeniti njihova budućnost. Razmatrajući povećanje energetske učinkovitosti, s porastom standarda može se očekivati pojava kogeneracijskih postrojenja (*micro-CHP*) koji će zamijeniti postojeće kotlovnice ili sustave centralnog grijanja, zatim sustavi s fotonaponskim modulima, koji će sa pojavljivati u niskonaponskoj mreži. Prema [40] sve veća raširenost distribuirane proizvodnje možda predstavlja treću generaciju reforme elektroenergetskog sektora (prva generacija je bila nastanak neovisnih proizvođača, druga je stvaranje otvorenog tržišta). Ta treća generacija reformi bi se sastojala iz tri faze. Prvu čini prilagodba DI tržišnim uvjetima uz centralizirano upravljanje sustavom. Druga je faza decentralizacija koju karakterizira značajan udio DI u proizvodnji i pojava virtualnih elektrana dok je upravljanje i vođenje zadržano samo na razini lokalnih distribucija. Treća je faza obilježena prevladavajućim udjelom DI u proizvodnji električne energije, organiziranim u mikromreže (*mini ili micro-grids*) i energetske parkove koji osiguravaju vlastitu potrošnju, a mrežu koriste samo za razmjenu energije. U tom slučaju ODM postaje više agent-posrednik između zainteresiranih strana nego kontrolor sustava.

U svakom slučaju planiranje, pogon i upravljanje budućim aktivnim razdjelnim mrežama s uključenim distribuiranim izvorima u skoroj budućnosti predstavljat će jedan od najvećih stručnih i znanstvenih izazova od dana kada je uspostavljen prvi elektroenergetski sustav. Ne zaboravimo – to je bilo u Hrvatskoj 28. kolovoza davne 1895. godine.

6. LITERATURA

- [1] A. M. BORBELY, J. F. KREIDER: "Distributed Generation: The Power Paradigm for The New Millenium", CRC Press 2001.
- [2] N. JENKINS, R. ALLAN, P. CROSSLEY, D. KIRSCHEN, G. STRBAC: "Embedded Generation", IEE Power and Energy Series 31, 2000.
- [3] H. L. WILLIS, W. G. SCOTT: "Distributed Power Generation: Planning and Evaluation", Marcel Dekker, Inc., 2000.
- [4] H. L. WILLIS: "Power Distribution Planning Reference Book", Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [5] J. C. DAS: "Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics", Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [6] R. E. BROWN: "Electric Power Distribution Reliability", Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [7] R. BILLINTON, R. N. ALLAN: "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1996.
- [8] G. GRANIĆ, B. JELAVIĆ: "Potrošači energije u uvjetima otvorenog tržišta", 12. Forum: Dan energije u Hrvatskoj, Zbornik radova Zagreb, 28.11.2003.
- [9] K. OTT: "Pridruživanje Hrvatske Europskoj Uniji: Izazovi ekonomske i pravne prilagodbe", Institut za javne financije, Zagreb, 2003.
- [10] 1547-IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System, IEEE, 2003.
- [11] G. STRBAC, J. MUTALE, T. BOPP: "Business Models in a World Characterised by Distributed Generation", interni dokument-UMIST, 2002.
- [12] Powercor: Customer Guidelines for Embedded Generation of Rating Up to 1 MW, Powercor Australia, Ltd., 2002.
- [13] K. JARRET, et al.: "Technical Guide to the Connection of Generation to the Distribution Network", DTI Report 2003.
- [14] P. WILLIAMS, S. ANDREWS: "Embedded Generation Connection Incentives for Distribution Network Operators", DTI Report 2002.
- [15] S. INGRAM, S. PROBERT, K. JACKSON: "The Impact of Small Scale Embedded Generation on the Operating Parameters of Distribution Networks", DTI Report 2003.
- [16] COLLINSON, et al.: "Solutions for the Connection and Operation of Distributed Generation", DTI 2003.
- [17] Distributed Energy Resources in Europe-Destinations 2004, EU dokument 2003.
- [18] R. WISER, et al.: "The Impact of Market Rules on Emerging «Green» Energy Markets", Berkeley National Lab. USA, 1998.
- [19] C. MARNAY, et al.: "Integrated Assesment of Dispersed Energy Resources Deployment", Berkeley National Lab. USA, 2000.
- [20] C. MARNAY, et al.: "Customer Adoption of Small-Scale On-Site Power Generation", Berkeley National Lab. USA, 2001.
- [21] C. MARNAY, et al.: "Evaluation Framework and Tools for Distributed Energy Resources", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [22] C. MARNAY, et al.: "Distributed Generation Capabilities of the National Energy Modelling System", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [23] C. MARNAY, et al.: "Distributed Energy Resources with Combined Heat and Power Applications", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [24] C. MARNAY, et al.: "Distributed Energy Resources in Practice: A Case Study Analysis and Validation of LBNL's Customer Adoption Model", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [25] C. MARNAY, et al.: "A Business Case for On-Site Generation: The BD Biosciences Pharmingen Project", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [26] J. ETO, et al.: "A Framework and Review of Customer Outage Costs: Integration and Analysis of Electric Utility Outage Cost Surveys", Berkeley National Lab. USA, 2003.
- [27] M. BEGOVIĆ, A. PREGELJ, A. ROHATGI, D. NOVOSSEL: "Impact of Renewable Distributed Generation on Power Systems", Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.
- [28] M. BEGOVIĆ, A. PREGELJ, A. ROHATGI, D. NOVOSSEL: "On Optimization of Reliability of Distributed Generation-Enhanced Feeders", Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2003.
- [29] H. OUTHRED, E. SPOONER: "Network Issues Associated with Distributed Generation", Proceedings of Solar 2002 - Australian and New Zealand Solar Energy Society, 2002.
- [30] G. KOEPEL: "Distributed Generation – Literature Review and Outline of the Swiss Situation", ETH-EEH Power Systems Laboratory, Internal Report 2003.
- [31] E. van SAMBEEK: "Distributed Generation in Competitive Electricity Markets", CEEP Working Paper, 2000.
- [32] Competition in Electricity Markets, OECD/IEA, Paris 2001.
- [33] Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Generation in Energy Supply Systems, European Commission- Programme "Energy, Environment and Sustainable Development", 2001.
- [34] Energy Policies of IEA Countries-Denmark 2002, OECD/IEA, Paris 2002.
- [35] Energy Policies of IEA Countries-Austria 2002, OECD/IEA, Paris 2002.
- [36] H. MANSIR: "Distributed Generation Comparison of the American and European Interconnection Standards", IEE 2002.
- [37] Application Guide for Distributed Generation Interconnection: 2003 Update The NRECA Guide to IEEE 1547, National Rural Electric Cooperative Association (NRECA), 2003.
- [38] "Distributed Generation Interconnection Manual-Public Utility Commission of Texas", U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2002.

- [39] "White Paper on Distributed Generation", National Rural Electric Cooperative Association (NRECA), 2002.
- [40] "Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets", OECD/IEA, Paris 2002.
- [41] "Networks for Embedded Generation-Summary Report", Electricity Engineer's Association of NZ, 2002.
- [42] G. PEPERMANS, J. DRIESEN, D. HAESSEL DONCKX, W. D'HAESELEER, R. BELMANS: "Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues", K.U.Leuven Energy Institute, 2003.
- [43] G. GIEBEL: "On the Benefits of Distributed Generation of Wind Energy in Europe", doktorska disertacija, Univerzitet Oldenburg, 2000.
- [44] C. MARNAY, et al.: "Assessment of μ Grid Distributed Energy Resource potential using DER-CAM and GIS", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- [45] C. MARNAY, et al.: "Modeling of Customer Adoption of Distributed Energy Resources", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [46] C. MARNAY, et al.: "White Paper on Integration of Distributed Energy Resources - The CERTS MicroGrid Concept", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- [47] N. J. KELLY, I. BEAUSOLEIL-MORRISON: "Modeling and Simulation of Small Scale Embedded Generation Systems".
- [48] D. W. SALTER, S. A. CASTELAZ: "Distributed Generation – A case study", PowerGen, 1997.
- [49] L. L. GRIGSBY: "The Electric Power Engineering Book", CRC Press, 2001.
- [50] M. R. PATEL: "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, 1999.
- [51] "Energy Policy in South East Europe, European Commission", Directorate General for Energy and Transport
- [52] Memorandum of Understanding on the Regional Energy Market in South East Europe and its Integration into the European Community Internal Energy Market – The Athens Memorandum 2003, 2003.
- [53] Energy: Let us overcome our dependence, European Commission 2002.
- [54] Implementation of the Community Strategy and Action Plan on Renewable Energy Sources (1998 – 2000), European Commission, 2001.
- [55] *Energy for the Future*: "Renewable Sources of Energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan", European Commission, 1997.
- [56] Green Paper – Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply, European Commission
- [57] Strategy Paper on the Regional Electricity Market in South East Europe And Its Integration Into the European Union Internal Electricity Market, European Commission, 2002
- [58] D. DASA, S. K. ADITYAA, D.P. KOTHARIB: "Dynamics of Diesel and Wind Turbine Generators on an Isolated Power System", Electrical Power and Energy Systems 21 (1999)
- [59] V. AKHMATOVA, H. KNUDSENA, A. H. NIELSEN: "Advanced simulation of windmills in the electric power supply", Electrical Power and Energy Systems 22 (2000)
- [60] E. MARTINOT: "Renewable energy investment by the World Bank", Energy Policy 29 (2001)
- [61] B. K. DATTA, G. VELAYUTHAMB, A. PRASAD GOUD: "Fuel cell power source for a cold region", Journal of Power Sources 106 (2002)
- [62] R. PETER, B. RAMASESHAN, C. V. NAYAR: "Conceptual model for marketing solar based technology to developing countries", Renewable Energy 25 (2002)
- [63] E. M. MEYERS, M. G. HU: "Clean Distributed Generation: Policy Options to Promote Clean Air and Reliability, The Electricity Journal", January/February 2001
- [64] R. A. LAURIE: "Distributed Generation: Reaching the Market Just in Time", The Electricity Journal, March 2001
- [65] P. DONDIA, D. BAYOUMIB, C. HAEDERLIC, D. JULIANB, M. SUTER: "Network integration of distributed power generation", Journal of Power Sources 106 (2002)
- [66] N. STRACHAN, H. DOWLATABADI: "Distributed generation and distribution utilities", Energy Policy 30 (2002)
- [67] J. E. ALLISONA, J. LENTS: "Encouraging distributed generation of power that improves air quality: can we have our cake and eat it too?", Energy Policy 30 (2002)
- [68] A. GROSS, J. BOGENSPERGER, D. THYR: "Impacts of Large Scale Photovoltaic Systems on the Low Voltage Network", Solar Energy Vol. 59, 1997.
- [69] T. ACKERMANN, G. ANDERSSON, L. SODER: "Distributed generation: a definition", Electric Power Systems Research 57 (2001)
- [70] N. G. BOULAXIS, S. A. PAPATHANASSIOU, M. P. PAPADOPOULOS: "Wind turbine effect on the voltage profile of distribution networks", Renewable Energy 25 (2002)
- [71] K. RO, S. RAHMAN: "Control of grid-connected fuel cell plants for enhancement of power system stability", Renewable Energy (2002)
- [72] "Technical Guideline For Interconnection of Generators To The Distribution System", EPCOR Distribution Inc, 2002.
- [73] A. D. LITTLE: "Reliability and Distributed Generation- An Arthur D. Little White Paper", Copyright A.D. Little, 2000.
- [74] "Decentralised Generation: Development of EU Policy", Report in the framework of the DECENT Project, 2002.
- [75] D. R. EICHER, D. R. LARSON: "Developing Rates for Distributed Generation", National Rural Electric Cooperative Association, 2001.
- [76] E. M. PETRIE, H. L. WILLIS, M. TAKAHASHI: "Distributed Generation in Developing Countries", World Bank 2002.
- [77] *Renewables Information 2003*, IEA 2003.
- [78] F. MUŽINIĆ, D. ŠKRLEC: "Distribuirana proizvodnja", Zbornik radova - 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 2003.
- [79] D. PEČVARAC: "Distribucijski generatori – proizvodnja električne energije u distribucijskom sustavu: poteškoće, pregled pristupa u svijetu, budućnost", Zbornik radova - 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 2003.
- [80] N. DIZDAREVIĆ, M. MAJSTROVIĆ, S. ŽUTOBRADIĆ: "Distribuirana proizvodnja električne energije", Zbornik radova - 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 2003.
- [81] N. DIZDAREVIĆ, M. MAJSTROVIĆ, S. ŽUTOBRADIĆ: "Pogon vjetroelektrana", Zbornik radova - 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 2003.

- [82] A. KATIĆ, D. ŠKRLEC: “Isplativost priključivanja malih hidroelektrana na mrežu sa stanovišta smanjenja gubitaka i povećanja pouzdanosti i raspoloživosti mreže”, Zbornik radova - 6. savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 2003.
- [83] Projekt-Biodizel, http://www.biodizel.hr_posljednji_pristup_veljača_2004.
- [84] HEP “Bilten br.66: Tehnički uvjeti za priključak malih elektrana na elektroenergetski sustav Hrvatske elektroprivrede i Komentar tehničkih uvjeta za priključak malih elektrana na elektroenergetski sustav Hrvatske elektroprivrede”, Zagreb, 4.veljače 1998.
- [85] S. KRAJCAR et al.: “Oblikovanje korporacijskih odnosa u HEP Grupi”, FER-ZVNE, Zagreb, srpanj 2003.
- [86] H. POŽAR: “Visokonaponska rasklopna postrojenja – 5. izdanje”, Tehnička knjiga Zagreb, 1990.

DISTRIBUTED SOURCES' INFLUENCE ON DISTRIBUTION NETWORK PLANNING

Distributed sources (DS) of electric energy are defined and a review of present day technologies is given, technical criteria for connection to the distribution grid are worked out as well as technical-economic influence on future planning of its development and operation.

EINFLUSS DER ENERGIEERZEUGER IM VERTEILUNGSNETZ AUF DIE NETZPLANUNG

In diesem Artikel wird der Begriff der Energieerzeuger für Verteilungsnetze (kroatische Abkürzung: DI) auseinandergesetzt, die Übersicht der diesbezüglich neuesten bekannten Technologien gegeben und technische Bedingungen für die Koppelung derartiger Energieerzeuger an das Verteilungsnetz sowie der technisch-wirtschaftliche Einfluss auf künftige Planung der Entwicklung und des Betriebes eines solchen besprochen.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Davor Škrlec, dipl. ing.
prof. dr. sc. Slavko Krajcar, dipl. ing.
 Fakultet elektrotehnike i računarstva,
 Unska 3,
 10000 Zagreb, Hrvatska

Alen Katić, dipl. ing.
 Elektra Karlovac
 V. Mačeka 44,
 47000 Karlovac, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
 2004 – 10 – 12.