

Alen Tatalović, mag.ing.el.
HEP ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
alen.tatalovic@hep.hr

dr.sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
vitomir.komen@hep.hr

Nikola Bogunović, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
nikola.bogunovic@hep.hr

MOGUĆNOST PRIHVATA DISTRIBUIRANIH IZVORA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA

SAŽETAK

Određivanje mogućnosti niskonaponske mreže za prihvata distribuiranih izvora daje podatak o maksimalnoj snazi proizvodnje koju je moguće priključiti u distribucijsku mrežu. Za proračune i simulacije promjenjive proizvodnje iz obnovljivih izvora koriste se stohastičke metode. Monte Carlo je stohastička metoda u kojoj svaka iteracija predstavlja jedinstven scenarij proizvodnje koji se može dogoditi u mreži. Za svaku iteraciju algoritam postupno dodaje proizvodnju i računa tokove snaga sve dok se ne naruši jedan od unaprijed postavljenih ograničenja. Izvršenjem svih zadanih iteracija dobije se podatak o maksimalnom udjelu distribuirane proizvodnje u distribucijskim mrežama i kriterij prema kojem je obustavljen izračun.

Ključne riječi:

Distribuirana mreža, Distribuirani izvor, Maksimalni prihvata distribuirane proizvodnje, Monte Carlo metoda

HOSTING CAPACITY OF DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

Hosting Capacity provides information on the maximum power generation that can be installed to the distribution network. Stochastic methods are used for calculations and simulations of variable production from renewable sources. Monte Carlo is a stochastic method in which each iteration represents a unique generation scenario that can occur in a network. For each iteration, the algorithm gradually adds power unit and calculates power flows until one of the constraints is violated. By performing all the given iterations, the data on the Hosting Capacity in the distribution networks and the criterion according to which the calculation is suspended are obtained.

Key words:

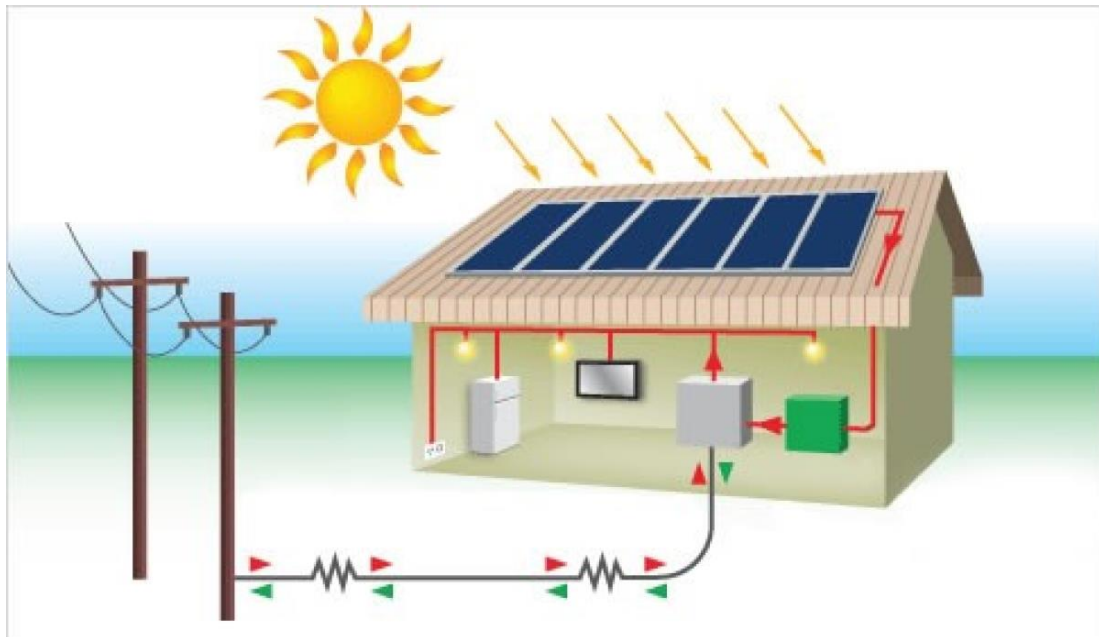
Distributed network, Distributed source, Hosting Capacity, Monte Carlo method

1. UVOD

Distribucijske mreže su elektroenergetske mreže koje povezuju prijenos električne energije i krajnje potrošače. Godinama su distribucijske mreže bile isključivo pasivnog karaktera na način da su pružale pouzdan, kvalitetan i siguran način opskrbe za sve priključene potrošače. U posljednjih nekoliko desetljeća kada se nakon opsežnih istraživanja došlo do zaključka da konvencionalni proizvođači električne energije štetno djeluju na okoliš počeo je razvoj i iskorištenje obnovljivih izvora energije. Današnji trend razvoja je takav da se nastoji proizvodnju s visokim emisijama štetnih plinova u potpunosti zamijeniti proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije. Takav trend praćen povoljnim subvencijama dovodi do povećanja instaliranih snaga distribuiranih izvora u distribucijskim mrežama. Dodavanjem distribuiranih izvora dolazi do dvosmjernih tokova snaga što ima pozitivne i negativne utjecaje na električne veličine u distribucijskoj mreži. Utjecaj distribuiranih izvora je značajan i može uzrokovati niz problema stoga je potrebno ograničiti instalirane snage proizvodnje u mjeri da se iskoriste pozitivni utjecaji distribuiranih izvora, a spriječe negativni utjecaji koji mogu biti štetni za mrežu. Primjena distribuiranih izvora stvara promjene u postojećim distribucijskim mrežama i predstavlja sve veći zahtjev za distributere električne energije stoga je potrebno na što točniji način predvidjeti i kontrolirati proizvodnju. Upravo iz tog razloga promjenjive proizvodnje i potrošnje razvijena je tehnika proračuna maksimalne optimizacije čvora mreže koja se u stranoj literaturi pronalazi pod pojmom *Hosting Capacity*. Tehnika se sastoji od različitih metoda koje imaju za cilj maksimalnu optimizaciju mreža, a s priključenjem distribuiranih izvora izdvaja se strategija aktivne mreže. U sklopu ovakvih strategija izlazi se iz sfere determinističkih izračuna jer je potrebno na temelju stohastičkih matematičkih metoda predvidjeti promjenjivu proizvodnju iz obnovljivih izvora energije. Glavna stohastička metoda koja se danas koristi je metoda Monte Carlo. Na realnom primjeru distribucijske mreže cilj je prikazati do kakvih promjena dolazi s priključenjem distribuiranih izvora u odnosu na pasivnu mrežu. Također u sklopu analize prikazati će se paralelni pregled mogućnosti rada mreže u režimu razmjene električne energije kada je omogućen povrat električne energije u mrežu i u otopnom režimu kada je onemogućen povrat električne energije natrag u mrežu.

2. OPTIMIZACIJA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

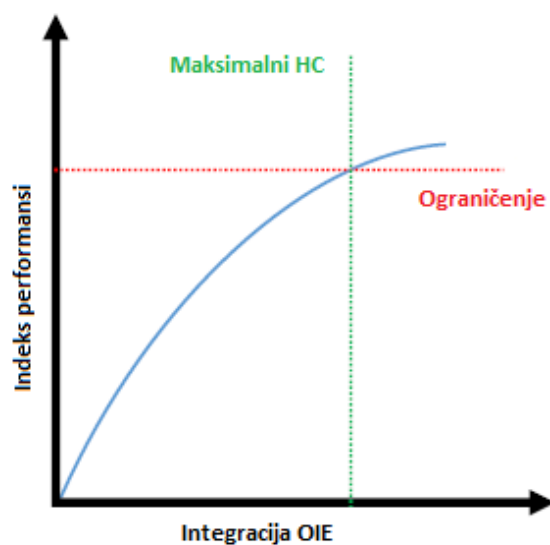
Distribucijske mreže danas i prije nekoliko desetljeća unatrag se značajno razlikuju. Kako se broj potrošača i uređaja koji troše električnu energiju značajno povećao to je na razne načine utjecalo na razvoj starih distribucijskih mreža. U današnje vrijeme sa sve većim prirastom različitih profila potrošnje potrebno je razvijati i unaprijediti distribucijske mreže. Također s povećanim trendom ugradnje proizvodnje iz distribuiranih izvora kao što su sunčane elektrane i vjetroelektrane to utječe na postojeće mreže. Potrošači električne energije [1] ugrađuju sve više solarnih panela kako bi smanjili potrošnju električne energije, a neki se čak odlučuju na prodaju proizvedene električne energije. Ono što je sigurno je da se tokovi električne energije izmjenjuju i mreža više nema klasični pasivni karakter. Upravo iz tog razloga postoji strategija primjene aktivne mreže u cilju određivanja maksimalne iskoristivosti čvora mreže što se u stranoj literaturi se pronalazi pod pojmom *Hosting Capacity*.



Slika 1. Primjer potrošača s vlastitom proizvodnjom

Na donjoj slici 2. [2] je prikazan koncept upravljanja elektroenergetskim mrežama *Hosting Capacity*. Osnovna ideja je maksimalna integracija modernih tehnologija i distribuiranih izvora na način da se postigne najveća moguća optimizacija i učinkovitost svih sudionika u distribuciji.

S integracijom obnovljivih izvora u distribucijske mreže danas je uvelike otežano upravljanje i planiranje proizvodnje i potrošnje. Pored svih prednosti i mana koje nude distribuirani proizvođači to dovodi do raznih strategija i metoda prema kojima se može odrediti maksimalno iskorištenje čvora mreže odnosno *Hosting Capacity*. U cilju optimizacije mreže pomoću distribuiranih izvora izdvaja se primjena strategije aktivne mreže.



Slika 2. Maksimalna optimizacija čvora mreže (Hosting Capacity)

3. PRIMJENA STRATEGIJE AKTIVNE MREŽE

Strategija aktivne mreže se temelji na primjeni distribuirane proizvodnje u svrhu aktivne razmjene električne energije. Princip rada je da obrađuje različite scenarije priključenja distribuiranih izvora u distribucijsku mrežu i daje podatak o maksimalnoj proizvodnji električne energije za taj scenarij u mreži. U cilju određivanja maksimalnog udjela integracije distribuiranih izvora za bilo koji čvor u mreži potrebno je zadovoljiti neke od prethodno postavljenih kriterija. Kriteriji se postavljaju u skladu s naponskim i strujnim opterećenjima opreme koja je ugrađena u distribucijsku mrežu. Kako je riječ o složenom procesu kreiranja mnogo različitih scenarija izlazi se iz sfere determinističkih izračuna i ulazi se u područje složenijih matematičkih metoda za koje je potrebno računalo kao matematički alat. Iz tog razloga u svrhu kreiranja različitih scenarija koristi se Monte Carlo metoda.

3.1. Monte Carlo metoda

Metoda Monte Carlo je razvijena početkom 20. stoljeća kao numerička iteracijska metoda koja služi za proračune čiji su ulazni podaci u proračun nepredvidivi ili promjenjivi. Za takve proračune gdje postoje takvi ulazni podaci jedino rješenje je primjena stohastičke matematike gdje se prema krivuljama vjerojatnosti aproksimiraju vrijednosti koje ulaze u proračun. S razvojem i primjenom distribuiranih izvora stvorili su se problemi u računanju tokova snaga zbog promjenjive prirode proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. Upravo iz tog razloga metoda Monte Carlo omogućuje da se simulira više različitih scenarija proizvodnje u mreži odakle se može stvoriti neki uzorak s konkretnim rezultatom. Metoda se provodi na uzastopnim ponavljanjem algoritma koji ima postavljena tehnička ograničenja.

Monte Carlo metoda za izračun maksimalnog udjela distribuirane proizvodnje se provodi prema tri osnovna ograničenja [3] koja osiguravaju stabilnost sustava, a to su:

- Termička ograničenja vodova (ograničenja struja odnosno snaga u svakoj grani)
- Iznos napajanja napona u svakom čvoru mreže
- Brzina promjene napona proizvođača

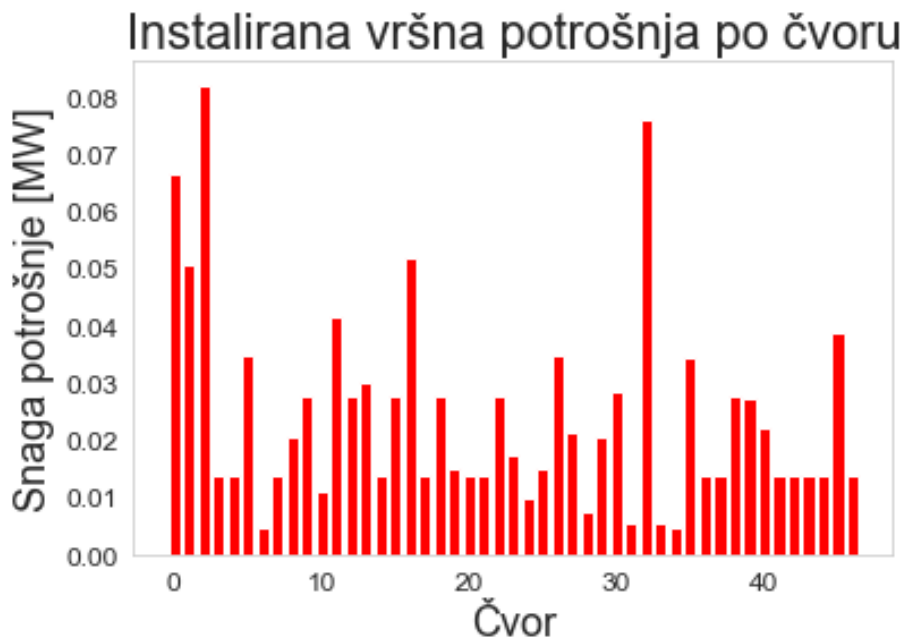
3.2. Primjer realne mreže

Na slici 3. prikazana je distribucijska mreža na kojoj je izvršen proračun maksimalnog udjela proizvođača koje je moguće priključiti za primjer realne mreže. Ukratko mreža je po svojoj strukturi kao i većina niskonaponskih mreža 0,4 kV radijalna i predstavlja realan prikaz transformatorske stanice 20/0,4 kV nazivne snage 400 kVA. Na slici se vidi da se mreža sastoji od pet različitih izvoda na kojima su priključeni mješoviti potrošači odnosno kućanstva i poduzetništva. Svaki izvod je radijalno razgranat prema potrošačima i ima različite duljine vodova. Vodovi koji se koriste u mreži su nadzemnog i podzemnog tipa. Za nadzemne vodove koriste se samonosivi kabelski snopovi X00/0-A 3x70+71,5, X00-A 4x35 i X00-A 4x16 u ovisnosti o opterećenju i položaju u mreži. Pored nadzemnih vodova mreža se sastoji od podzemnih kabela različitih presjeka PP41-A 4x150 i PP41-A 4x25. Iz slike se vidi na nekim izvodima da su gusto razgranati odnosno imaju veliku količinu potrošača koji u potpunosti opterećuju transformatorsku stanicu što će se u nastavku vidjeti iz proračuna. Potrošači su uglavnom jednofazni potrošači priključnih snaga do 11,5 kW i trofazni potrošači priključnih snaga do 29 kW. Uzemljenje potrošača je za starija kućanstva izvedeno u TN-C sustavima, a za novija kućanstva i za poduzetništva pomoću TN-C/S sustava.

Mreža koja je prikazana slikom je korištena u proračunu iz razloga što je ona danas pasivna mreža koja sadrži samo potrošače. Upravo iz razloga što je maksimalno opterećena na njoj se mogu realno vidjeti koje se promjene događaju kada se na nju priključe proizvodne jedinice, te koje su prednosti i mane nakon njihovog priključenja.

3.3. Podaci o potrošnji

Prije početka izračuna maksimalne priključne snage distribuiranih izvora potrebno je dati podatke o potrošnji distribucijske mreže koja sadrži potrošače različite potrošnje. Za mrežu vrijedi instalirana vršna snaga potrošnje 378 kW, dok je stvarna potrošnja uvažavajući faktor istovremenosti u mreži oko 216 kW.



Slika 4. Instalirana vršna potrošnja po čvoru



Slika 5. Stvarna potrošnja po čvoru

4. PRORAČUN NA PRIMJERU REALNE MREŽE

4.1. Opis rada algoritma

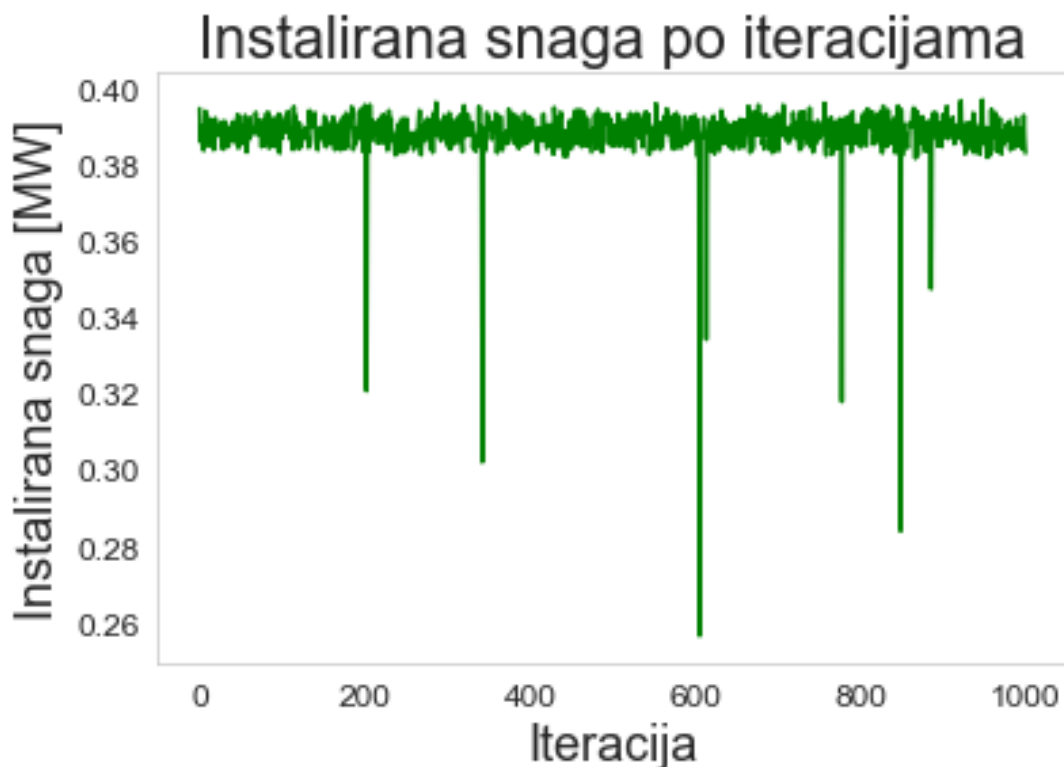
Princip rada algoritma je takav da se za svaku iteraciju koja predstavlja jedan specifičan slučaj mora definirati jedna vrijednost proizvodne jedinice ispod krivulje normalne razdiobe. Računalo proizvoljno uzima jednu fiksnu vrijednost radne snage za proizvodnu jedinicu koja konkretno u ovom slučaju iznosi 10 kW s odstupanjem od 1 kW i uzastopno povećava za taj iznos sve dok se u proračunu tokova snaga neki od prethodno postavljenih kriterija Monte Carlo metode ne naruši. Uzastopnim dodavanjem proizvodnih jedinica svaki put se provjeravaju postavljeni kriteriji koje proračun tokova snaga mora zadovoljiti. Kada proračun ne zadovolji neki od kriterija tada se za konkretan slučaj definira maksimalna instalirana snaga proizvodnje i ide se u iduću simulaciju. Algoritam se izvršava sve dok ne prođe zadani broj iteracija.

4.2. Rezultati proračuna za distribucijsku mrežu

Nakon postavljanja parametara mreže proveden je algoritam Monte Carlo metode za 1000 različitih scenarija proizvodnje električne energije iz distribuiranih izvora što predstavlja jedinstven slučaj u mreži.

Svako pokretanje algoritma može stvoriti drugačiji uzorak proizvodnje i drugačiji iznos proizvodnje. Ono što je svojstveno je to da ta vrijednost za većinu slučajeva ne može puno odstupati već varira oko određene vrijednosti. Uzorak od 1000 izvedenih iteracija može dati relevantan podatak o proizvodnji. Također valja naglasiti da sa većim brojem iteracija omogućava se veća točnost izračuna.

Za realnu mrežu je izvršen proračun od 1000 iteracija odnosno 1000 različitih scenarija priključenja distribuiranih jedinica proizvodnje. Rezultati proračuna za realnu mrežu su prikazani za oba slučaja kad je onemogućen povrat energije u mrežu (Slika 6.) i kad je omogućen povrat u mrežu (Slika 7.).



Slika 6. Instalirana snaga za slučaj onemogućenog povrata u mrežu



Slika 7. Instalirana snaga za slučaj omogućenog povrata u mrežu

Prethodni grafički dijagrami prikazuju i vrijednosti maksimalne proizvodnje, ali ne omogućavaju precizno očitavanje podataka o proizvodnji.

Upravo zato su u tablici I. za oba slučaja prikazani točni podaci o minimalnoj, maksimalnoj i srednjoj vrijednosti prema podacima očitanim iz programa. Rezultati maksimalnog priključenja distribuiranih izvora su sljedeći:

Tablica I. Instalirana snaga distribuirane proizvodnje

	Onemogućen povrat u mrežu	Omogućen povrat u mrežu
Maksimalna proizvodnja [kW]	396.8771	811.0926
Minimalna proizvodnja [kW]	256.3019	202.6389
Srednja vrijednost proizvodnje [kW]	387.8779	622.7649

Iz konačnih rezultata koji su očitani iz programa može se zaključiti da je za istu mrežu razlika prilično velika. Rezultati priključenja proizvodnje za slučaj kada je onemogućen povrat u mrežu za sve iteracije je ispod vrijednosti ukupne potrošnje koja je u mreži. To je sasvim logično rješenje jer distribuirani izvori proizvode točno onoliko koliko je potrebno za pokrivanje potražnje potrošača u mreži. Rezultati za drugi slučaj kada je omogućen povrat u mrežu je drugačiji i iznos maksimalnog udjela distribuirane proizvodnje je gotovo dvostruko veći što ima smisla jer se sav višak proizvodnje može vraćati u distribucijsku mrežu. Također kriteriji koji su tada narušeni su odgovarajući prema promjenama napona i struja uslijed utjecaja

priključenja distribuiranih izvora u čvorove potrošnje. Ono što je karakteristično za slučaj s povratom u mrežu je to da su oscilacije puno veće što se tiče implementirane proizvodnje, a razlog je u tome što distribuirani izvor pored ispravne veličine proizvodne jedinice mora imati i optimalnu lokaciju priključka. Potrebno je posebno obratiti pažnju na mjesto priključka jer za neke slučajeve gdje su kritična čvorišta mreže nije moguće ili je moguće minimalno priključenje proizvodnih jedinica. Konkretno za ovu mrežu nije stvoren nijedan scenarij kada je nemoguće priključiti proizvodnju, ali slučajevi s niskim vrijednostima proizvodnje predstavljaju najgore moguće scenarije koji se mogu dogoditi u stvarnosti. Maksimalne vrijednosti predstavljaju idealne slučajeve, ali neki realan podatak o maksimalno mogućoj integraciji distribuiranih izvora je upravo srednja vrijednost. Srednja vrijednost vrlo malo varira za pokretanje na tisuće i tisuće iteracija odnosno scenarija koji se mogu dogoditi. Srednja vrijednost je prema tome sigurna vrijednost koja daje realne rezultate. Konkretno u primjeni ove verzije Monte Carlo metode na ovom primjeru realne mreže rezultati koji su dobiveni su realni i predstavljaju grube podatke o maksimalnom udjelu distribuirane proizvodnje. Konkretno bolji i još točniji podaci bi se dobili da je obrađeno još veći broj scenarija ili da su korišteni podaci o mjerenjima potrošnje i proizvodnje kroz određeni vremenski period. Na taj način bi se dobili ujedno i ujednačeniji rezultati s manjim odstupanjima i preciznijom srednjom vrijednosti. Također je potrebno naglasiti da svi scenariji koji se ovdje obrađuju su stohastičke prirode i predstavljaju aproksimaciju, što znači da ne postoji obrada svih mogućih scenarija u sklopu iteracija jer je kombinatorika svih parametara beskonačna i nijedan slučaj ne mora biti isti. To je problem distribuiranih izvora, kao i same potrošnje koja varira iz dana u dan i ne može se upravljati ni planirati proizvodnju bez regulacije i praćenja u realnom vremenu. Ipak metoda Monte Carlo omogućuje da postoji predodžba o tokovima snaga i količini proizvodnje što u svakom slučaju omogućuje lakše planiranje, upravljanje i regulaciju distribuiranih mreža.

5. ZAKLJUČAK

Distribucijske mreže su se u posljednjih nekoliko desetljeća značajno izmijenile primjenom novih tehnologija. U cilju optimizacije rada novih distribucijskih mreža razvijena je tehnika Hosting Capacity-a. Primjena distribuiranih izvora je također novost koja utječe na promjenu distribucijskih mreža. Kako bi se na ispravan način iskoristile sve pozitivne i spriječile negativne strane implementacije distribuiranih izvora u ovom radu obrađena je strategija aktivne mreže u sklopu tehnike upravljanja mrežama Hosting Capacity-a. U radu je opisan rad metode Monte Carlo koja omogućava da se na temelju stohastičke matematike prikažu različiti scenariji promjenjive proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. Također u radu su prikazani rezultati proračuna na realnom primjeru mreže.

Realna distribucijska mreža može za većinu scenarija implementirati vrijednost proizvodnje koja pokriva približnu potrošnju u samoj mreži. Također određena je mogućnost prihvata distribuiranih izvora za dva slučaja kada je onemogućen povrat i kada je omogućen povrat odnosno razmjena energije.

Za slučaj onemogućenog povrata električne energije u mrežu prihvata distribuiranih izvora je maksimalno limitiran potrošnjom u mreži, dok je realna vrijednost iz proračuna svega par posto manja od ukupne potrošnje za tu distribucijsku mrežu.

S druge strane za slučaj kada je omogućen povrat električne energije u mrežu maksimalni iznos distribuirane proizvodnje iznosi skoro dvostruko više od potrošnje, ali za jako mali broj scenarija koji bi se morali poklopiti, uključujući i optimalnu lokaciju u mreži. Konačno prema rezultatima proračuna za najveći broj scenarija moguće je implementirati oko 150% od ukupne potrošnje.

Distribuirane mreže kakve su danas u pasivnom režimu potrošnje, polako se mijenjaju sa sve većim brojem distribuiranih izvora koji se priključuju na njih. Pozitivne strane olakšavaju upravljanje s takvim mrežama, ali negativne strane takve proizvodnje utječu na niz problema u normalnom pogonu. Iz tog razloga je potrebno distribuirane izvore iskoristiti na način da se u skladu s optimizacijskim metodama priključe u maksimalnom broju i time poboljšaju sigurnost i kvalitetu napajanja električnom energijom.

6. LITERATURA

[1] Internet: "Sunčane elektrane", s Interneta, <https://www.zadarska-zupanija.hr/gospodarstvo-i-turizam/item/3897-javni-poziv-za-sufinanciranje-izgradnje-sun%C4%8Dane-elektrane-za-proizvodnju-elektri%C4%8Dne-energije-u-ku%C4%87anstvima,-za-vlastitu-potro%C5%A1nju-na-podru%C4%8Dju-zadarske-%C5%BEupanije-za-2023-godinu>, ožujak 2023.

[2] Abideen M. i dr.: „A Review of the Tools and Methods for Distribution Networks' Hosting Capacity Calculation“, s Interneta, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2758> , travanj 2021.

[3] Zio E., Delfanti M., Olivieri V., Sansavini G.: „Monte Carlo Simulation-Based Probabilistic Assessment of DG Penetration in Medium Voltage Distribution Networks“ ,International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, 2015.