

KORIŠĆENJE NAPREDNE MJERNE INFRASTRUKTURE ZA EFIKASNIJI MONITORING TOKOVA SNAGA U RADIJALNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

APPLICATION OF ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE FOR EFFICIENT POWER FLOW MONITORING IN RADIAL DISTRIBUTION GRIDS

Lazar ŠČEKIĆ, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Crna Gora
Zoran MILJANIĆ, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Crna Gora

KRATAK SADRŽAJ

Monitoring tokova snaga je najefektniji način za praćenje naponskih prilika i raspodjele gubitaka po elementima elektrodistributivne mreže. Poznavanje tokova snaga i naponskih prilika po elementima mreže omogućava jednostavnu analizu pogonskih prilika u mreži tj. kvaliteta njene eksploatacije. Osnovni preduslovi za kvalitetan monitoring tokova snaga su pouzdani podaci o mreži i mjerenjima, kao i efikasna metoda za proračun tokova snaga. Pouzdanost informacija o mreži (konfiguracija i parametri mrežnih elemenata) se obično smatra visokom, jer se uglavnom radi o statičkim podacima. Iako bi bilo najjednostavnije, praćenje tokova snaga isključivo putem mjerenja nije ekonomski prihvatljivo usljed brojnosti elemenata elektrodistributivne mreže koje je potrebno obuhvatiti potrebnim mjerenjima. Dakle, veoma je važno odabrati efikasnu metodu za proračun tokova snaga kako bi čitav postupak imao željene performanse. U literaturi je na raspolaganju veći broj metoda za proračun tokova snaga, i uglavnom se iterativne metode izdvajaju po primjenljivosti. Kada je primjena u elektrodistributivnim mrežama u pitanju, od interesa su samo metode sa pouzdanom konvergencijom i malim zahtjevima za procesorskom snagom i memorijom računskog sredstva. U ovom radu je posebna pažnja posvećena primjenljivosti *DistFlow* metoda za proračun tokova snaga sa isticanjem njegovih prednosti i ograničenja. Ovaj metod zbog svoje jednostavnosti i niskog zahtjeva za mjernim podacima ima široku primjenu i u brojnim optimizacionim analizama elektrodistributivnih mreža. Takođe, u cilju unaprjeđenja efikasnosti proračuna tokova snaga korišćenjem pomenute metode, a time i određivanja naponskih prilika i alokacije gubitaka u radijalnoj distributivnoj mreži, u radu su analizirane mogućnosti korišćenja strateškog raspoređivanja minimalnog broja dodatnih mjernih uređaja u složenoj elektrodistributivnoj mreži. Primjena metode i njenih unaprjeđenja je demonstrirana na tipskim i praktičnim konfiguracijama elektrodistributivnih mreža. Ovako formulisana metoda predstavlja efektan alat za savremene sisteme za monitoring rada elektrodistributivne mreže bilo kao osnovna opcija u slučaju nedostatka potrebnih mjerenja, bilo kao alat za procjenu nedostajućih/nedostupnih mjernih podataka.

Ključne riječi: tokovi snaga, *DistFlow*, mjerna infrastruktura

ABSTRACT

Power flow monitoring is the most effective way to monitor voltage levels and power losses across the distribution grid. Known data on power flows and voltage levels across the distribution grid makes it easy to analyze the quality of its operation. The key prerequisites for effective power flow monitoring are reliable grid and measurement data, and above all an effective method for power flow calculation. The configuration and parameters of grid components mostly represent static data, so they are assumed to be well defined. On the other hand, although the simplest, power flow monitoring solely through measurements is not economically acceptable due to abundance of elements in the distribution grid which should be covered by the necessary measurements. Therefore, having limited measurement data, it is necessary to choose an effective method for power flow calculation in order for the whole process to meet the desired performances. While a number of methods for power flow calculation are available in literature, most widespread methods are iterative methods. When it comes down to distribution grids, only methods with reliable convergence and low memory and processing power requirements are of interest. In this paper, particular attention is given to the applicability of *DistFlow* method for power flow calculation, highlighting its advantages and limitations. Due to its simplicity and low metering requirements, this method is widely used in numerous optimization problems concerning the distribution grid. The application of the method and its improvements is demonstrated on typical and practical configurations of power distribution grids. This method is proven to be an effective monitoring tool for modern

power systems, either as a basic option in case of lack of required measurements, or as a tool for estimation of missing/unavailable metrics.

Key words: power flow, DistFlow, metering infrastructure

Kontakt informacije o autorima-Lazar Šćekić(slazar394@gmail.com), Zoran Miljanić(zormi@ucg.ac.me)

UVOD

Na samom početku razvoja elektroenergetskih sistema koji se vezuje za osamdesete godine 19. vijeka, zbog njihove jednostavnosti i malih dimenzija, svi proračuni koji su neophodni za kvalitetnu analizu elektroenergetskog sistema, samim tim i proračun tokova snaga, su se mogli sprovoditi ručno [1]. Već u godinama nakon Drugog svjetskog rata, u svrhe analize elektroenergetskog sistema, razvijeni su kombinovani fizičko-analogni mrežni modeli koji se nazivaju *mrežni analizatori*. William Stevenson navodi u [2] da je u Sjedinjenim Američkim Državama šezdesetih godina prošlog vijeka bilo oko 50 mrežnih analizatora koji su se koristili u redovnoj eksploataciji elektroenergetskog sistema. Daljim razvojem elektroenergetskih sistema, a posebno zbog formiranja interkonekcija između nacionalnih elektroenergetskih sistema, primjena mrežnih analizatora za potrebe analize je postala praktično nemoguća. Tada, usljed ubrzanog razvoja digitalnih računara, fizički i analogni modeli za analizu sistema bivaju prevaziđeni i zamjenjeni matematičkim modelima i proračunskim metodama koje se mogu jednostavno implementirati na računaru, čime je konačno omogućena numerička analiza sistema uz mnogo manje pretpostavki, zanemarenja i ograničenja.

Problem tokova snaga sastoji se u određivanju fazora napona u čvorovima sistema i tokova aktivnih i reaktivnih snaga po elementima mreže, sa unaprijed poznatim snagama potrošača, aktivnim snagama i modulima napona generatora u sistemu. Nakon početka primjene računara za analizu sistema, razvijen je veliki broj numeričkih algoritama za proračun tokova snaga. Jedan od najstarijih postupaka za proračun tokova snaga je *Gauss-Seidelov* iterativni postupak, koji predstavlja najrobusniji metod za proračun tokova snaga po pitanju numeričke nestabilnosti. Međutim, ovaj metod je zbog svoje spore konvergencije za proračune realnih sistema zamjenjen *Newton-Raphsonovim* iterativnim postupkom, koji je implementiran u svim savremenim softverima za analizu elektroenergetskih sistema. *Newton-Raphsonov* iterativni postupak karakteriše složeniji matematički model koji zahtjeva formiranje i inverziju matrice Jakobijana, pa se pri analizi radijalnih mreža kao što je distributivna mreža mogu javiti problemi usljed numeričke nestabilnosti. Iz tog razloga su, za potrebu proračuna tokova snaga u radijalnim mrežama razvijene posebne metode kao što je *Backward-Forward sweep* [3] i *DistFlow* [4].

U ovom radu je izložen matematički model *DistFlow* postupka i razmotrene su mogućnosti za njegovo pojednostavljenje. Takođe, kako bi se pokazale sve prednosti ovog postupka u odnosu na tradicionalne metode za proračun tokova snaga, pomenute metode su testirane na tipskoj elektrodistributivnoj mreži. Iako se pokazao superiornim u odnosu na tradicionalne metode za proračun tokova snaga, na samom kraju su predložene mogućnosti dodatno ubrzanje *DistFlow* postupka.

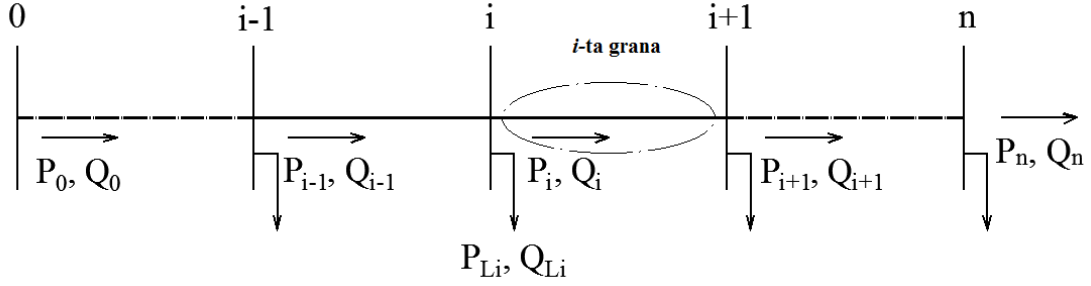
FORMULACIJA PROBLEMA

Osnovne pretpostavke za analizu

Za potrebe analize, zbog jednostavnosti i jasnoće, posmatra se uravnotežen simetričan trofazni sistem, pa se u proračunima primjenjuje monofazna interpretacija i sistem jediničnih vrijednosti, iako je *DistFlow* postupak razvijen i za neuravnotežene sisteme [5]. Konfiguracija mreže i parametri sistema, kao i podaci o potrošačima su ulazni podaci za analizu, pri čemu su svi elementi mreže modelovani *I*-zamjenskom šemom, a potrošači su predstavljeni modelom konstantne snage.

Matematički model *DistFlow* postupka

DistFlow postupak za proračun tokova snaga razvijen je, kao što je već ranije rečeno, za primjenu u radijalnim mrežama, i zasnovan je na jednačinama koje se dobijaju polazeći od osnovne jednačine za pad napona na kratkom vodu. Matematički model *DistFlow* postupka je u ovom radu izveden polazeći od radijalne mreže prikazane na Slici 1.



SLIKA 1. JEDNOPOLNA ŠEMA RADIJALNE MREŽE

Neka je poduzna impedansa vodova $\underline{Z}_l = R_l + jX_l$ i neka su prividne snage potrošača $\underline{S}_L = P_L + jQ_L$. Uz poznat napon u i -tom čvoru, napon u $(i+1)$ -om čvoru može se izraziti kao:

$$\underline{V}_{i+1} = \underline{V}_i - \underline{Z}_i \underline{I}_i \quad (1)$$

Ako se usvoji da je napon u i -tom čvoru po faznoj osi, odnosno $\underline{V}_i = V_i \angle 0^\circ$, uz poznatu impedansu i -te grane $\underline{Z}_i = R_i + jX_i$ i struju \underline{I}_i izraženu u funkciji snage i napona na napojnom kraju i -te grane slijedi:

$$\underline{V}_{i+1} = V_i - \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{V_i} - j \frac{P_i X_i - Q_i R_i}{V_i} \quad (2)$$

pa je kvadrat modula napona u $(i+1)$ -om čvoru, nakon sređivanja:

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) + (R_i^2 + X_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (3)$$

Aktivna i reaktivna snaga na napojnom kraju $(i+1)$ -e grane mogu se izračunati pomoću jednačina:

$$P_{i+1} = P_i - R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{L_{i+1}} \quad (4)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - X_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{L_{i+1}} \quad (5)$$

Jednačine (3-5) zajedno čine set relacija koji se naziva *forward branch equations*. Očigledno, uz poznat napon, aktivnu i reaktivnu snagu u napojnom čvoru mreže (čvoru 0), primjenom ovih jednačina mogu se odrediti naponi i snage u svim preostalim čvorovima i ova procedura naziva se *forward update*. Ovaj set relacija je očigledno dovoljan za proračun tokova snaga u slučaju radijalnih feeder-a kao na Slici 1. Međutim, u slučaju razgranatih mreža kakve su realne mreže, ovaj sistem jednačina je potrebno dopuniti. Ovo je posljedica činjenice da, usljed postojanja gubitaka u mreži, pri nailasku na čvor koji predstavlja polazni čvor za više grana, nijesu unaprijed poznate snage po posmatranim granama.

Na analogan način, uz poznate terminalne uslove na prijemnom kraju i -te grane, moguće je odrediti uslove na napojnom kraju grane pomoću jednačina:

$$V_i^2 = V_{i+1}^2 + 2(P'_{i+1} R_i + Q'_{i+1} X_i) + (R_i^2 + X_i^2) \frac{P_{i+1}'^2 + Q_{i+1}'^2}{V_{i+1}^2} \quad (6)$$

$$P_i = P_{i+1} + R_i \frac{P_{i+1}'^2 + Q_{i+1}'^2}{V_{i+1}^2} + P_{L_{i+1}} \quad (7)$$

$$Q_i = Q_{i+1} + X_i \frac{P_{i+1}'^2 + Q_{i+1}'^2}{V_{i+1}^2} + Q_{L_{i+1}} \quad (8)$$

gdje su $P'_{i+1} = P_{i+1} + P_{L_{i+1}}$ i $Q'_{i+1} = Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}$ aktivna i reaktivna snaga na prijemnom kraju i -te grane, respektivno. Jednačine (6-8) zajedno čine set relacija koji se naziva *backward branch equations*. Slično kao u prethodnom slučaju, uz poznate uslove u n -tom čvoru mreže, mogu se odrediti vrijednosti napona, aktivnih i reaktivnih snaga po svim preostalim čvorovima mreže i ova procedura naziva se *backward update*.

Sukcesivnom primjenom *forward* i *backward update*-a određuju se vrijednosti napona po čvorovima mreže i raspodjela aktivnih i reaktivnih snaga po njenim elementima, čime se omogućava i jednostavan proračun gubitaka aktivne i reaktivne snage u mreži. Iterativni postupak se sprovodi dok god je apsolutna vrijednost odstupanja modula napona u napojnom (nultom) čvoru mreže iz dvije uzastopne iteracije veća od unaprijed propisane tačnosti ε , odnosno dok god važi:

$$|V_0^{(k)} - V_0^{(k-1)}| > \varepsilon \quad (9)$$

Pojednostavljenje matematičkog modela

Ovaj postupak se, iako sam po sebi jednostavan, može dodatno uprostiti [4], čime se ubrzava proračun za potrebe optimizacionih problema koje je potrebno sprovoditi u realnom vremenu.

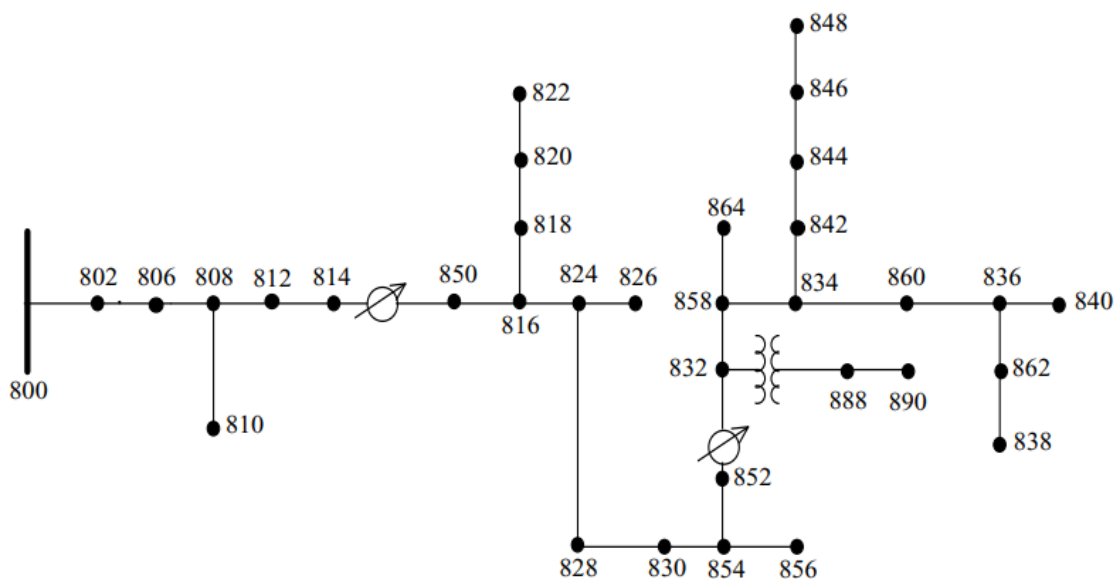
Naime, ako se posmatra set relacija (3-5), uočava se da se kvadratni članovi odnose na gubitke, pa su samim tim neuporedivo manji od aktivne i reaktivne snage po granama mreže. Zanemarivanjem ovih članova, za radijalnu mrežu kao na Slici 1., dobija se set relacija koji definiše metod koji se naziva *Simplified DistFlow*:

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(P_i R_i + Q_i X_i) \quad (10)$$

$$P_{i+1} = P_i - P_{L_{i+1}} = \sum_{k=i+2}^n P_{L_k} \quad (11)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{L_{i+1}} = \sum_{k=i+2}^n Q_{L_k} \quad (12)$$

Kako bi se pokazalo da se kod brzih procjena stanja elektrodistributivne mreže, kao i za potrebe njene optimizacije, ovim postupkom ne pravi pretjerana greška, izvršeno je poređenje ove metode s aspekta vrijednosti modula napona u čvorovima sa egzaktnim *DistFlow* postupkom. Obje metode su implementirane u MATLAB-u, a za proračun tokova snaga korišćena je testna distributivna mreža od 34 čvora propisana od strane IEEE [6], prikazana na Slici 2.

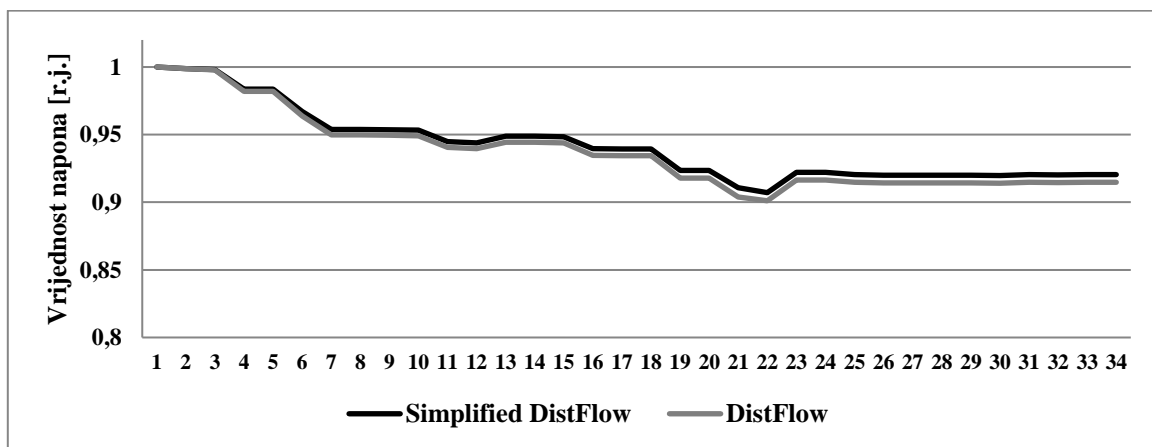


SLIKA 2. TESTNA ELEKTRODISTRIBUTIVNA MREŽA OD 34 ČVORA

Posmatrana elektrodistributivna mreža predstavlja dio elektrodistributivnog sistema u Arizoni [7], pa se nameće kao optimalan izbor mreže jer se dobijeni rezultati mogu primjeniti na realne sisteme. Mreža se napaja jednostrano preko transformatora priključenog u čvoru 800, koji je za definisane vrijednosti snaga potrošača opterećen sa približno 40% nominalne snage. Mreža je velike dužine vodova, sa priključenim kondenzatorskim baterijama u čvorovima 844 i 848, a u čvoru 832 je priključen transformator koji napaja lokalno opterećenje.

Vrijednosti napona u čvorovima mreže dobijene proračunom pomoću izloženih postupaka date su na Slici 3. Očigledno, proračunom pomoću *Simplified DistFlow* postupka dobijaju se više vrijednosti napona u čvorovima, što je posljedica činjenice da se ovim postupkom zanemaruje postojanje gubitaka aktivne i reaktivne snage u mreži. Takođe, uočava se da je odstupanje vrijednosti napona dobijenih pomoću pojednostavljenog postupka od vrijednosti napona dobijenih pomoću egzaktnog postupka u ovom slučaju zanemarljivo (maksimalno procentualno odstupanje je niže od 1%).

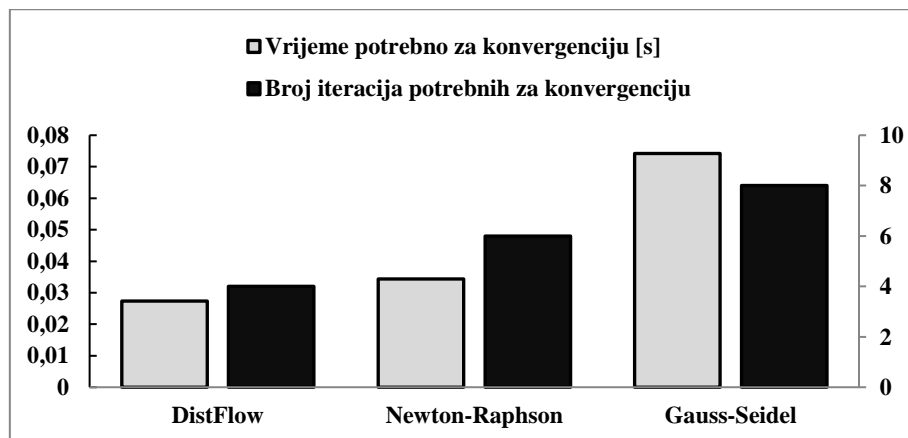
Greška koju unosi pojednostavljeni postupak strogo zavisi od karakteristika posmatrane mreže (odnosa R/X). Povećavanjem ovog odnosa, gubici u mreži su sve više izraženi, pa je samim tim i odstupanje vrijednosti napona dobijenih pomoću *Simplified DistFlow* postupka od stvarnih vrijednosti napona veće. Kako odnos R/X posmatrane mreže iznosi približno 1,3 i relativno je visok u odnosu na tipičnu vrijednost 1 koja važi za mreže sličnog naponskog nivoa, ovim je dodatno naglašen kvalitet rezultata dobijenih pomoću pojednostavljenog postupka.



SLIKA 3. REZULTATI PRORAČUNA POMOĆU EGZAKTNOG I UPROŠĆENOG POSTUPKA

Poređenje *DistFlow* postupka sa tradicionalnim metodama za proračun tokova snaga

Kako bi se pokazale sve prednosti *DistFlow* postupka za proračun tokova snaga, sam proračun je sproveden na tipskoj distributivnoj mreži sa Slike 2. pomoću *Gauss-Seidelovog* i *Newton-Raphsonovog* metoda za proračun tokova snaga. Zbog jednostavnosti matematičkog modela, *DistFlow* postupak je pokazao značajno bržu konvergenciju od tradicionalnih metoda za proračun tokova snaga, a rezultati proračuna dati su na Slici 4.



SLIKA 4. BROJ ITERACIJA I VRIJEME POTREBNO ZA KONVERGENCIJU ZA RAZLIČITE METODE ZA PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Prednost ovog postupka ne leži isključivo u brzini konvergencije. Kao što je ranije rečeno, *Gauss-Seidelov* i *Newton-Raphsonov* metod zahtjevaju formiranje matrice admitansi čvorova, pri čemu *Newton-Raphsonov* metod dodatno zahtjeva formiranje i inverziju matrice Jakobijana. Sa druge strane, uočava se da *DistFlow* postupak u potpunosti izbjegava formiranje matrice admitansi čvorova i postupak inverzije matrice, što je takođe njegova velika prednost zbog smanjenih zahtjeva za memorijom i smanjenim rizikom od numeričke nestabilnosti. Međutim, velika mana *DistFlow* postupka je što je njegova primjena ograničena isključivo na radijalne mreže, dok se preostale dvije metode mogu koristiti za mreže proizvoljne konfiguracije.

Mogućnosti za ubrzanje *DistFlow* metoda

Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, *DistFlow* postupak ima veliku prednost u odnosu na tradicionalne metode za proračun tokova snaga s aspekta brzine i pouzdanosti konvergencije. Međutim, ovaj postupak se može dodatno ubrzati strateškim raspoređivanjem minimalnog broja dodatnih mjerenja po elektrodistributivnoj mreži, pri čemu će u ovom radu biti analiziran samo uticaj mjerenja napona na brzinu konvergencije. Cilj optimizacije u ovom radu je određivanje minimalnog broja mjernih uređaja i optimalnih lokacija za njihovo postavljanje, kako bi proračun tokova snaga imao željene performanse. Stoga, optimizacioni problem se može definisati na sljedeći način:

$$\min_x f(x) = \alpha B(x) + \beta I(x) \quad (12)$$

gdje je:

x – vektor dimenzija broja čvorova posmatrane mreže čiji članovi uzimaju vrijednosti 1, ako je taj čvor izabran za postavljanje mjernog uređaja, odnosno 0, ako taj čvor ne predstavlja lokaciju za postavljanje mjernog uređaja, $B(x)$ – broj mjernih uređaja potrebnih za željene performanse proračuna tokova snaga, kojim se uzima u obzir ekonomska komponenta rješenja,

$I(x)$ – broj iteracija potrebnih za konvergenciju proračuna tokova snaga u tom slučaju,

α, β – odgovarajući težinski koeficijenti.

Svaki od čvorova je kandidat za postavljanje mjernih uređaja i ne postoji ograničenje po pitanju broja čvorova koji predstavljaju lokacije za njihovo postavljanje. Takođe, postavlja se uslov da mjerenje napona postoji u napojnom čvoru mreže, zbog primjene *forward update*-a.

Kako je funkcija koja opisuje broj iteracija potrebnih za konvergenciju u zavisnosti od lokacije mjernih uređaja u sistemu izrazito nelinearna, optimizacioni problem zalazi u domen binarnog nelinearnog programiranja. Iz tog razloga, u ovom radu je za rješavanje optimizacionog problema korišćen genetski algoritam, sa usvojenom veličinom populacije u jednoj generaciji od 500 jedinki, vjerovatnoćom ukrštanja od 0,8 i vjerovatnoćom mutacije od 0,05. Kako bi se odredile optimalne vrijednosti parametara genetskog algoritma, optimizacioni postupak je sproveden i za veće populacije, međutim dalje povećavanje populacije nije rezultiralo boljim rješenjima. Takođe, povećavanjem vjerovatnoće mutacije postiže se suprotan efekat, odnosno dolazi do narušavanja kvaliteta rješenja. Predloženi optimizacioni postupak je sproveden na testnoj distributivnoj mreži od 34 čvora koja je već korišćena za upoređivanje *DistFlow* postupka sa tradicionalnim metodama za proračun tokova snaga.

ANALIZA OSTVARENIH REZULTATA

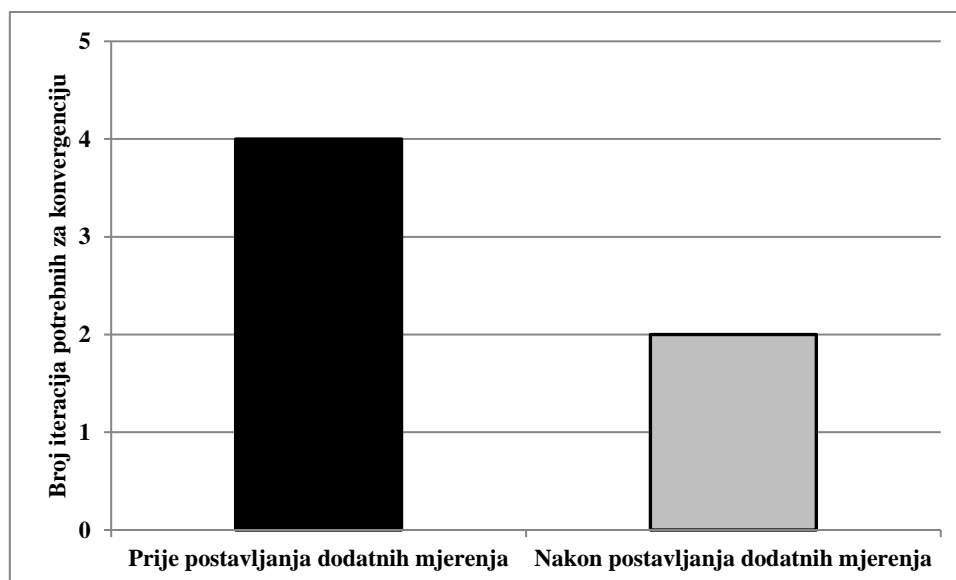
Za testiranje predloženog optimizacionog postupka, usvojene su vrijednosti težinskih koeficijenata $\alpha = 1$, $\beta = 100$. Dodatnim povećavanjem reda veličine koeficijenta β , dobija se tehnički optimalno rješenje, međutim, tada su potrebna i veća finansijska sredstva kako bi se ono realizovalo.

Kako je genetski algoritam po prirodi stohastički optimizacioni algoritam, pri istim usvojenim vrijednostima parametara, uzastopne optimizacije ne moraju nužno rezultirati istim rješenjima. Kako bi se stekla stvarna slika ostvarenih rezultata, optimizacioni postupak je sproveden 100 puta i u svim slučajevima su se za postizanje željenih tehničkih performansi proračuna tokova snaga dovoljnim pokazala dva dodatna mjerenja. Međutim, uzastopni optimizacioni postupci su rezultirali različitim kombinacijama čvorova koji predstavljaju lokacije za postavljanje mjernih uređaja. Ovo je i opravdano, uzimajući u obzir činjenicu da je cijena postavljanja mjernih uređaja u svim čvorovima jednaka, jer se radi o mreži jednakog naponskog nivoa, kao i da je broj iteracija potrebnih za konvergenciju proračuna tokova snaga jednak za veći broj različitih lokacija mjernih uređaja. U cilju određivanja optimalne kombinacije čvorova koji predstavljaju lokacije za postavljanje mjernih uređaja, statistički podaci dobijeni iz 100 uzastopnih optimizacionih postupaka prikazani su u Tabeli 1.

TABELA 1 - STATISTIČKI REZULTATI 100 UZASTOPNIH OPTIMIZACIONIH POSTUPAKA

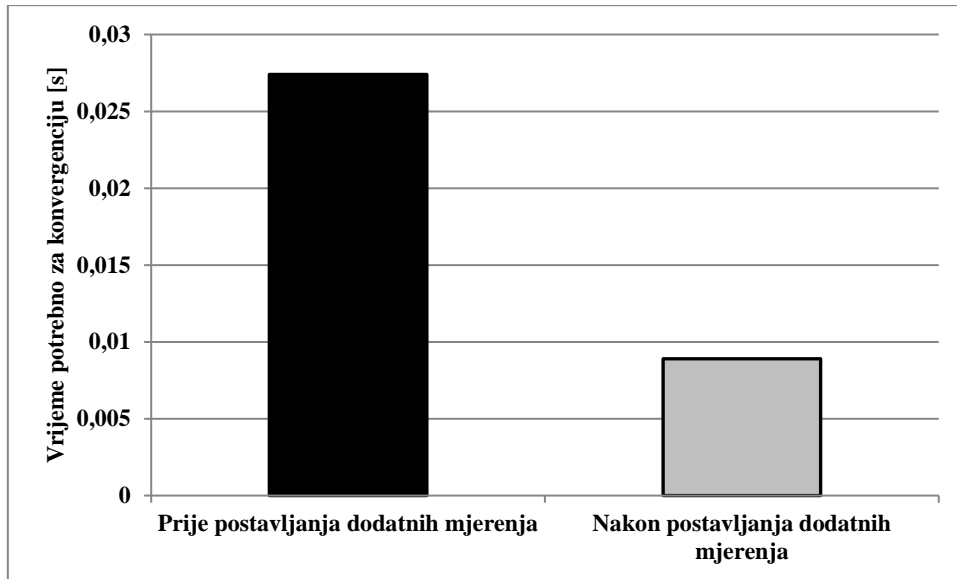
Čvor	4	5
7	20	0
8	44	10
9	5	2
16	6	0
17	13	0

Kao što je rečeno, proračun tokova snaga je u svim optimizacijama postigao željene tehničke performanse postavljanjem dva dodatna mjerenja, pri čemu je određeno 7 različitih kombinacija čvorova koji predstavljaju lokacije za postavljanje mjernih uređaja. Posmatranjem ostvarenih rezultata, uočava se da je u 44 slučaja za postavljanje uređaja za mjerenje napona izabrana kombinacija četvrtog i osmog čvora (čvorovi 808 i 850 na stvarnoj šemi, respektivno). Sa druge strane, u 20 slučajeva su se kao lokacije za postavljanje mjernih uređaja pokazali četvrti i sedmi čvor (čvor 814 na stvarnoj šemi), dok su ostale kombinacije čvorova zastupljene u znatno manjoj mjeri, a neki čvorovi se uopšte nijesu pokazali kao kandidati za postavljanje mjernih uređaja. Kako je kombinacija četvrtog i osmog čvora dominantno zastupljena u sprovedenih 100 proračuna, to je ova kombinacija čvorova usvojena kao optimalna za postavljanje uređaja za mjerenje napona. Kako bi se demonstrirali efekti postavljanja uređaja za mjerenje napona na izabranim lokacijama na brzinu konvergencije, proračun tokova snaga pomoću *DistFlow* postupka je sproveden na testnoj distributivnoj mreži. Na Slici 5. prikazan je broj iteracija potrebnih za konvergenciju proračuna tokova snaga prije i nakon postavljanja dodatnih mjerenja.



SLIKA 5. BROJ ITERACIJA POTREBNIH ZA KONVERGENCIJU PRIJE I NAKON POSTAVLJANJA DODATNIH MJERENJA

Uočava se da je broj iteracija potrebnih za konvergenciju proračuna tokova snaga pomoću *DistFlow* postupka postavljanjem samo dva dodatna mjerenja na strateški određenim lokacijama smanjen dva puta. Kako je vrijeme potrebno za konvergenciju proračuna tokova snaga direktno proporcionalno broju iteracija, strateškim postavljanjem dodatnih mjerenja utiče se i na vrijeme potrebno za konvergenciju. Na Slici 6. prikazano je vrijeme potrebno za konvergenciju prije i nakon postavljanja dodatnih mjerenja. Uočava se da je postavljanjem dodatnih mjerenja vrijeme potrebno za konvergenciju proračuna tokova snaga smanjeno približno tri puta. Ovako formulisan metod za proračun tokova snaga, uz strateško raspoređivanje mjernih uređaja, zbog brzine konvergencije, malih zahtjeva za memorijom i procesorskom snagom predstavlja izvrstan resurs za monitoring tokova snaga u svakodnevnoj eksploataciji elektrodistributivne mreže.



SLIKA 6. VRIJEME POTREBNO ZA KONVERGENCIJU PRIJE I NAKON POSTAVLJANJA DODATNIH MJERENJA

ZAKLJUČAK

Proračun tokova snaga predstavlja jedan od najznačajnijih alata u eksploataciji elektrodistributivne mreže pod raznim uslovima koje diktiraju potrošači i distribuirani izvori energije koji imaju sve veći upliv u savremenim elektrodistributivnim mrežama, a zauzima i centralno mjesto u planovima razvoja elektrodistributivne mreže kako bi se buduće potrebe potrošača zadovoljile uz pretpostavljene standarde sigurnosti, pouzdanosti i kvaliteta električne energije. Prema tome, efikasan i pouzdan metod za proračun tokova snaga predstavlja ključni preduslov za kvalitetnu eksploataciju i planiranje elektrodistributivne mreže.

Kao što je pokazano, za primjenu u elektrodistributivnoj mreži, *DistFlow* metod ima značajnu prednost u odnosu na tradicionalne metode za proračun tokova snaga. Primjenom izloženog optimizacionog postupka, moguće je za proizvoljnu elektrodistributivnu mrežu odrediti minimalan broj mjerenja kako bi proračun tokova snaga imao željenu brzinu. Kao što je pokazano, u slučaju testne elektrodistributivne mreže od 34 čvora, za postizanje željenih tehničkih performansi su pored mjerenja napona u napojnom čvoru mreže potrebna još dva dodatna mjerenja, odnosno zahtjeva se da nešto ispod 10% čvorova u mreži bude pokriveno mjerenjem napona. Kod elektrodistributivnih mreža sa većim brojem čvorova, vrijeme potrebno za konvergenciju proračuna tokova snaga se očekivano povećava, pa su benefiti postavljanja dodatnih mjerenja s aspekta tehničkih performansi proračuna tokova snaga izraženiji. Postavljanjem dodatnih mjerenja se istovremeno povoljno utiče i na opservabilnost elektrodistributivne mreže i otvaraju se mogućnosti za estimaciju nedostupnih mjernih podataka i filtriranje eventualnih nepouzdatih mjerenja.

Buduće istraživanje u ovoj oblasti koristiće ovako definisan metod za proračun tokova snaga za optimizaciju naponsko-reaktivnih prilika, minimizaciju gubitaka snage i energije i uopšteno optimizaciju pogona elektrodistributivne mreže.

LISTA REFERENCI

- [1] W.D.Stevenson, "*Elements of Power System Analysis*, McGraw-Hill Book Co. New York, St.Louis", 1975.
- [2] I.Vujošević, "*Analiza Elektroenergetskih Sistema*", Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 2006.
- [3] G. W. Chang, S. Y. Chu and H. L. Wang, "*An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems*", in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 2, pp. 882-884, May 2007.

- [4] M. E. Baran and F. F. Wu, "*Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing*", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [5] Michael D. Sankur, Roel Dobbe, Emma Stewart, Duncan S. Callaway, and Daniel B. Arnold, "*A Linearized Power Flow Model for Optimization in Unbalanced Distribution Systems*", arXiv:1606.04492v1 [math.OC] 14 Jun 2016
- [6] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group, 1992 Test Feeder Cases, IEEE 34-bus Feeder [online] Available: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>
- [7] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2001, pp. 908-912 vol.2.