

METODE ZA PRORAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Dr D.Tasić*, Elektronski fakultet, Niš, Srbija
Mr M. Stojanović, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu su analizirane različite metode za proračun gubitaka električne energije sa aspekta zahtevanih ulaznih podataka i verodostojnosti dobijenih rezultata. Na osnovu sprovedene analize izvršena je klasifikacije ovih metoda i ukazano na mogućnost njihove primene. Testiranje razmatranih metoda vršeno je na realnoj distributivnoj mreži.

UVOD

Gubici snage, odnosno energije, neizbežna su posledica prenosa i transformacije električne energije sa jednog naponskog nivoa na drugi. Nivo gubitaka električne snage i energije u mrežama elektroenergetskog sistema određen je tehničkim stanjem mreže i samog elektroenergetskog sistema, načinom njegove eksploatacije i konstantno se menja sa razvojem mreže i promenom uslova eksploatacije. Gubici nastaju usled: zagrevanja provodnika vodova i namotaja transformatora, histerezisa i vrtložnih struja i struja odvoda (korona i dielektrički gubici). Prema elementima mreže u kojima nastaju gubici se mogu podeliti na:

- gubitke snage u vodovima (nadzemnim ili kablovskim), i
- gubitke snage u transformatorima.

Zavisno od režima rada mreže moguće je izvršiti podelu na:

- stalne gubitke, i
- promenljive gubitke.

Stalni gubici su oni koji praktično ne zavise od veličine opterećenja priključenog u potrošačkim čvorovima mreže. Oni čine između 20 i 25% ukupnih gubitaka u mrežama svih naponskih nivoa u jednom elektroenergetskom sistemu [1-3]. Promenljivi gubici osim od intenziteta struja uspostavljenih u elementima mreže zavise i od parametara ovih elemenata tako da indirektno zavise i od meteoroloških faktora (temperature vazduha, intenziteta sunčevog zračenja, pravca i brzine vetra).

Pored toga moguća je i podela gubitaka energije na: tehničke, komercijalne i obračunske. Tehnički gubici nastaju kao posledica eksploatacije i predstavljaju gubitke u elementima mreže. Komercijalni gubici su posledica grešaka mernih uređaja, nejednovremenog očitavanja brojila električne energije, subjektivnih grešaka lica koja očitavaju brojila i dr. U ovu vrstu gubitaka svrstava se i neregistrovana

* *Dr Dragan Tasić, dipl.inž.el, elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 15, 18000 Niš*
tel. +381(0)18/529-110, +381(0)63/690-609, E-mail: dtasic@elfak.ni.ac.yu

potrošnja. Obračunski gubici predstavljaju sumu tehničkih i komercijalnih gubitaka, t.j. razliku između registrovane električne energije, koja se iz sistema predaje mreži i registrovane energije koja se predaje iz mreže potrošačima. Obračunski gubici energije osnovni su energetski podatak u okviru elektroenergetskog bilansa posmatranog područja i mogu služiti kao pokazatelj ekonomičnosti rada sistema. Međutim, određivanje gubitaka na ovaj način, odnosno merenjem energije na ulazu i izlazu posmatranog sistema, nije dovoljno za preduzimanje mera u cilju njihovog smanjenja.

Na osnovu prethodne podele jasno je da se proračunom mogu obuhvatiti samo tehnički gubici, dok se komercijalni mogu procenjivati. Zbog toga, sve metode koje se na dalje izlažu za proračun gubitaka električne energije odnose se na tehničke gubitke, što se neće posebno naglašavati.

Kako su veličine gubitaka različite po naponskim nivoima i elementima mreže, potrebno je razdvajanjem ukupnih gubitaka po elementima i delovima mreže odrediti žarišta i uzroke nastajanja, čime bi se stvorili uslovi za preduzimanje mera za njihovo smanjenje. Međutim, za razdvajanje gubitaka potrebno je sprovesti i određena merenja na različitim naponskim nivoima i elementima mreže, kako bi se dobile ulazne informacije o režimima rada potrebne za proračun. Zavisno od količine i tačnosti ulaznih informacija u praksi se za proračun gubitaka električne energije upotrebljava veliki broj metoda. Egzistencija velikog broja metoda za proračun gubitaka električne energije nameće potrebu njihove klasifikacije i sagledavanja mogućnosti primene svake od njih. Zbog toga je u radu učinjen pokušaj klasifikacije, imajući u vidu metode koje su do sada najčešće korišćene. Pored toga, ukazano je na prednosti i nedostatke navedenih metoda i na osnovu toga na mogućnosti njihove primene.

KLASIFIKACIJA METODA ZA PRORAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Nemogućnost poznavanja dijagrama opterećenja svakog elementa mreže uslovlila je pojavu velikog broja metoda za proračun gubitaka, koje garantuju različite stepene tačnosti izlaznih rezultata. Postojanje grešaka pri primeni ovih metoda je neminovno, i one se mogu svrstati u dve kategorije: informacione i metodološke. Informacione greške su posledica nekorektnosti ulaznih podataka, odnosno netačnosti ulaznih informacija o parametrima elemenata mreže i pokazateljima režima. Metodološka greška zavisi od složenosti metode kojom se vrši proračun. Složenije metode čine manje metodološka greška manja, ali one zahtevaju poznavanje većeg broja ulaznih informacija i duže vreme potrebno za njihovu obradu kako bi se formirao ulazni skup podataka za proračun gubitaka.

Da bi se izvršila klasifikacija i sagledali načini proračuna gubitaka energije u distributivnim mrežama najpre će se razmotriti izračunavanje gubitaka energije u jednom elementu mreže [1, 3 - 5]. Neka se kao element od interesa uzme vod koji spaja i -ti i j -ti čvor aktivne otpornosti R_{ij} . Gubici snage u posmatranom vodu ΔP_{ij} uz pretpostavku $U \approx const$ i $\cos \varphi \approx const$ izračunavaju se prema relaciji:

$$\Delta P_{ij} = R_{ij} \frac{P_{ij}^2}{(\cos \varphi_{ij})^2 U_i^2} = c_{ij} P_{ij}^2, \quad (1)$$

gde je U_i napon čvora i , P_{ij} aktivna snaga koja se prenosi vodom a c_{ij} konstanta koja daje vezu gubitaka aktivne snage i kvadrata aktivne snage koja se predaje vodu. Gubici energije za period vremena T podeljen na n intervala dužine Δt_k u toku kojih je opterećenje elementa konstantno su:

$$\Delta W_{ij} \approx c_{ij} \sum_{k=1}^n P_{ij}^2(\Delta t_k) \Delta t_k = c_{ij} T \sum_{k=1}^n P_{ij}^2(\Delta t_k) p(\Delta t_k), \quad (2)$$

gde je $p(\Delta t_k)$ verovatnoća pojavljivanja intervala Δt_k a $P(\Delta t_k)$ opterećenje elementa za vreme intervala Δt_k . Pokazuje se da se relacija (2) svodi na sledeći oblik:

$$\Delta W_{ij} = c_{ij} T (m^2[P_{ij}] + \sigma^2[P_{ij}]). \quad (3)$$

gde je:

$$m[P_{ij}] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n P_{ij}(\Delta t_k) \Delta t_k - \text{matematičko očekivanje, odnosno srednja vrednost snage opterećenja,}$$

$$\sigma^2[P_{ij}] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n (\Delta P_{ij,k})^2 \Delta t_k - \text{dispersija, tj. srednjekvadratno odstupanje,}$$

$$\Delta P_{ij,k} = P_{ij}(\Delta t_k) - m[P_{ij}] - \text{odstupanje trenutne od srednje vrednosti snage.}$$

Relacija (3) ima veliki praktični značaj pošto omogućava određivanje gubitaka energije u toku vremenskog perioda T ako su poznate vrednosti matematičkog očekivanja (srednje vrednosti) i dispersije opterećenja u toku posmatranog perioda vremena.

Kod proračuna gubitaka električne energije u distributivnim mrežama najčešće su od interesa godišnji

gubici električne energije pa će se u daljem izlaganju (osim ako drugačije ne bude naznačeno) analizirati upravo vremenski period od jedne godine.

Na osnovu prethodnog razmatranja može se zaključiti da određivanje gubitaka električne energije za određeni vremenski period predstavlja dosta složen zadatak čak i u slučaju jednog elementa. Pri tome, treba imati u vidu da podaci koji su potrebni za proračun mogu biti strogo determinisani, da podležu nekom od zakona raspodele slučajne promenljive ili da su iskustveno poznate granice u kojima se nalaze njihove vrednosti. Imajući u vidu načine formiranja matematičkog modela, metodi za izračunavanje gubitaka električne energije mogu se svrstati u sledeće kategorije [1]:

- determinističke,
- statističko probablističke,
- metode bazirane na fuzzy proračunima.

Izbor metode je uslovljen zadatkom koji se rešava, raspoloživom bazom podataka o mreži i režimima rada, kao i željenim stepenom tačnosti a s obzirom na zahtevane rezultate analiza i proračuna.

OSNOVNA OBELEŽJA METODA ZA PRORAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Determinističke metode

Kod determinističkih metoda polazi se od određenog režima opterećenja i njemu odgovarajuće konfiguracije mreže. Postoji veliki broj ovih metoda, što je posledica davanja prednosti nekoj od uticajnih veličina. Determinističke metode koje nalaze široku primenu su:

- metod zasnovan na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage (τ metod),
- metod ekvivalentne otpornosti,
- metod srednje kvadratne struje,
- metod srednjih opterećenja, odnosno srednje struje,
- metod zasnovan na tehnici klasterovanja.

Metod zasnovan na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage, koji se često naziva i τ metod je najčešće korišćeni metod za procenu gubitaka električne energije [1,4,5]. Za njegovu primenu nije potrebno poznavati dijagram opterećenja već samo osnovne pokazatelje dijagrama opterećenja. S obzirom na to da dijagrami opterećenja svih elemenata mreže nisu poznati, razvijen je veliki broj formula za procenu vrednosti ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka. Raznovrsnost formula uslovljena je različitim pretpostavljenim oblicima dijagrama trajanja opterećenja, različitim analitičkim funkcijama kojima se rezultati interpoliraju, kao i različitim matematičkim metodama kojima se vrši interpolacija. Kao parametar u većini formula pojavljuje se faktor opterećenja, koji predstavlja odnos srednje P_{sr} i maksimalne snage P_{max} .

Najmanji gubici imaju se kada su svi elementi mreže opterećeni srednjom snagom ($P_{sr} = m P_{max}$) u razmatranom vremenskom periodu. Tada je ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka srazmerno kvadratu faktora opterećenja ($\tau = m^2 T$). Najveći gubici su ako je element za vreme T_{max} bio opterećen maksimalnom snagom, a ostatak vremena bio neopterećen. Tada je ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka linearno srazmerno faktoru opterećenja ($\tau = m T$). U ostalim slučajevima opterećenja gubici, kao i vreme τ nalaze se između ova dva granična slučaja. Kada je određeno ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka snage za razmatrani vremenski period, gubici energije dobijaju se množenjem ovog vremena sa vrednošću maksimalne snage gubitaka.

Određivanje gubitaka električne energije korišćenjem pristupa baziranih na ekvivalentnom vremenu trajanja maksimalnih gubitaka snage prilično je jednostavno. Jednostavnost se ogleda i u činjenici da je potrebno poznavati samo dva pokazatelja dijagrama opterećenja (m i P_{max}). Međutim, to je ujedno i slabost ovog pristupa, pošto različiti dijagrami opterećenja mogu imati iste vrednosti maksimalne snage i faktora opterećenja. Pored toga, kao slabost se može istaći i činjenica da različite relacije $\tau = f(m)$ daju različite vrednosti vremena τ za iste vrednosti faktora opterećenja m .

Metod ekvivalentne otpornosti [1,9] često se koristi za proračun gubitaka energije u razgranatim sredjenaponskim mrežama, kako zbog brzine proračuna tako i zbog minimalnog broja potrebnih ulaznih informacija. Ideja je da se realna mreža zameni ekvivalentnom, koja ima jednake gubitke. Nakon određivanja vrednosti ekvivalentnih otpornosti (impedansi) moguća je analiza gubitaka energije u distributivnoj mreži koja je zamenjena ekvivalentnom otpornošću. Svaka od metoda za proračun gubitaka energije u jednom elementu može se sada upotrebiti za proračun gubitaka energije u distributivnoj mreži, a izbor metoda koji će se koristiti zavisi od informacione baze koja je raspoloživa. Iako ova metoda daje dovoljno dobru procenu gubitaka električne energije u distributivnoj mreži, ona ima značajan nedostatak jer ne omogućava određivanje gubitaka po elementima mreže.

Metod srednje kvadratne struje [1] je jedan od prvih metoda prema vremenu nastanka. Metod proizilazi iz fizičke prirode gubitaka snage, koji su u elementima mreže proporcionalni kvadratu opterećenja. Metod srednje kvadratne struje za proračun gubitaka električne energije u jednom elementu može se proširiti na proračune gubitaka energije u srednjenaponskoj distributivnoj mreži kada je poznata struja napojne deonice. Ideja je da se odrede takva opterećenja u čvorovima mreže sa kojima je potrebno izvršiti samo jedan proračun tokova snaga, a na osnovu gubitaka snage ovakvog režima, određuju se gubici energije za posmatrani period vremena. Mogu se formirati dve različite modifikacije ovog metoda.

Kod prva modifikacija najpre se odredi srednje kvadratna struja napojne deonice. Srednje kvadratna struja dobijena na ovaj način raspodeljuje se po čvorovima mreže srazmerno koeficijentima učešća pojedinih čvorova. Ovo odgovara stanju kada su koeficijenti učešća konstantni u toku posmatranog vremena T , odnosno proračunu sa ekvivalentnom otpornošću, ali za razliku od metoda ekvivalentne otpornosti, u ovom slučaju je moguć proračun gubitaka energije u svakom pojedinačnom elementu.

Kod druge modifikacija se za svaki režim rada mreže izvrši estimacija dijagrama opterećenja po pojedinim čvorovima. Nakon određivanja dijagrama opterećenja, u svakom pojedinačnom čvoru mreže, odredi se srednje kvadratna struja svakog čvora i izvrši proračun gubitaka snage za ovakav režim rada mreže. Gubici snage u svakom elementu mreže i mreži u celini određeni na ovakav način daju, nakon množenja dužinom posmatranog intervala T gubitke energije u elementima mreže i mreži u celini za analizirani period vremena.

Metod srednjih opterećenja, odnosno srednje struje [1] omogućava određivanje gubitaka tako što se realni režimi zamenjuju režimom pri srednjem opterećenju. Naime, jedan od puteva daljeg razvoja metode srednje kvadratne struje je proračun srednje kvadratne struje ne na osnovu dijagrama struja, već na osnovu karakteristika dijagrama opterećenja koje mogu biti vrlo jednostavno određene, odnosno na osnovu srednje vrednosti struje.

Metod zasnovan na tehnici klasterovanja koristi činjenicu da je klasterovanje jedan od postupaka za analizu i obradu obimnih i nedovoljno dobro poznatih skupova podataka. Pod ovim terminom se podrazumeva postupak razvrstavanja skupa podataka u podskupove, klasterne na osnovu definisane mere sličnosti [10,11].

U postupku pripreme podataka za klasterovanje javlja se potreba za normalizacijom podataka. Ovo iz razloga što se u velikom broju slučajeva može vršiti grupisanje podataka koji karakterišu raznorodne veličine (npr. aktivne snage, reaktivne snage, naponi). Normalizacijom se postiže da rezultat grupisanja bude potpuno nezavisan od jedinica u kojima se veličine iskazuju. Ovim postupkom se opseg vrednosti svake dimenzije svodi na opseg 0÷1.

Kod proračuna gubitaka klasterovanje se vrši sa kompletnim vektorima stanja, tj. vektorima aktivnih i reaktivnih snaga svakog od čvorova mreže i napona napojne tačke za svaki sat u toku godine. Kao mera sličnosti koristi se Euklidovo rastojanje. Klasterovanje se vrši tako da rastojanje između centra klastera i bilo kog podatka koji pripada tom klasteru bude manje od unapred definisane granične vrednosti Euklidovog rastojanja ϵ_k . Proces klasterovanja počinje tako što se za prvi ispitivani podatak uzme da predstavlja centar prvog klastera. Zatim se po utvrđenom redosledu vrši razvrstavanje drugog podatka. Ukoliko je Euklidovo rastojanje manje od graničnog onda se on smešta u prvi klaster, u suprotnom on formira drugi klaster. U slučaju kada se drugi podatak svrstava u prvi klaster treba izračunati novi centar tog klastera. Potom se ispituje rastojanje između trećeg podatka i centra prvog, odnosno drugog klastera. Ovaj podatak se svrstava u onaj klaster od čijeg je centra najmanje udaljen, pod uslovom da je to rastojanje manje (ili jednako) od specificirane granične vrednosti Euklidovog rastojanja. Ukoliko to nije slučaj on formira novi klaster. Postupak se sprovodi sve dok ne budu razvrstani svi podaci.

Nakon toga određuju se centri klastera. Centar klastera ili centroid predstavlja procenjenju "srednju vrednost" svih članova tog klastera. Drugim rečima, on je reprezent svih podataka (primera) koji pripadaju klasteru. Pošto se radi sa kompletnim vektorom stanja, elementi vektora koji reprezentuju centre klastera su naravno aktivne, reaktivne snage i napon napojne tačke.

Nakon izvršene faze klasterovanja, vrši se detaljan proračun karakterističnih stanja sistema postupkom prezentovanim u [12]. Kao rezultat proračuna dobijaju se naponi čvorova, tokovi snaga, gubici snage u svakom elementu mreže, kao i ukupni gubici snage. Pošto se smatra da su opterećenja konstantna u toku skupa sati koji čine klaster godišnji gubici energije se mogu sračunati kao suma gubitaka snaga pojedinih klastera pomnoženih sa brojem sati koji čine klaster.

Statističko probablističke metode

Kao što je već istaknuto, deterministički metode proračuna gubitaka energije koji se baziraju na ograničenim podacima o režimu rada ne daju tačne rezultate. Greška pri određivanju gubitaka može, zavisno od izabranog pristupa, da bude i značajna. U cilju prevazilaženja nedostataka determinističkih

metoda razvijene su metode proračuna gubitaka energije zasnovane na teoriji verovatnoće [1,7,13]. Kod proračuna gubitaka energije u jednom elementu statističkim metodama pretpostavlja se da je promena struje u posmatranom elementu podvrgnuta nekom od zakona raspodele slučajne promenljive. Najčešće korišćene raspodele verovatnoće su normalna i β raspodela. Što se tiče gubitaka električne energije u distributivnim mrežama najčešće se koriste:

- regresione metode,
- Monte-Karlo simulacioni metod.

Regresione metode [1] koriste statističku vezu gubitaka električne energije sa generalisanim parametrima električne mreže i dijagramima opterećenja. Struktura mreža različitih naponskih nivoa je različita. U cilju kvalitetnijeg nalaženja zavisnosti gubitaka od generalisanih parametara distributivne mreže formiranje regresionih modela vrši se za svaki naponski nivo posebno. Kao regresione zavisnosti po pravilu se koriste višeparametarski linearni i eksponencijalni modeli. Za parametre obično se uzimaju isporučena aktivna energija i ukupna dužina vodova. Ponekad se kao parametri koriste i: dužine izvoda (udaljenost od sabirnica napojne TS do najudaljenijeg distributivnog transformatora), ukupne dužine vodova, ukupne instalisane snage, broj distributivnih TS itd.

Kao ulazni podaci za formiranje regresionih modela koriste se rezultati proračuna gubitaka električne energije izabranih, reprezentativnih distributivnih vodova. Reprezentativni izbor je jako teško izvršiti tako da daje rezultate za sve distributivne vodove sa dovoljnom tačnošću. Proračun gubitaka energije regresionim metodima može se vršiti u apsolutnim i relativnim jedinicama.

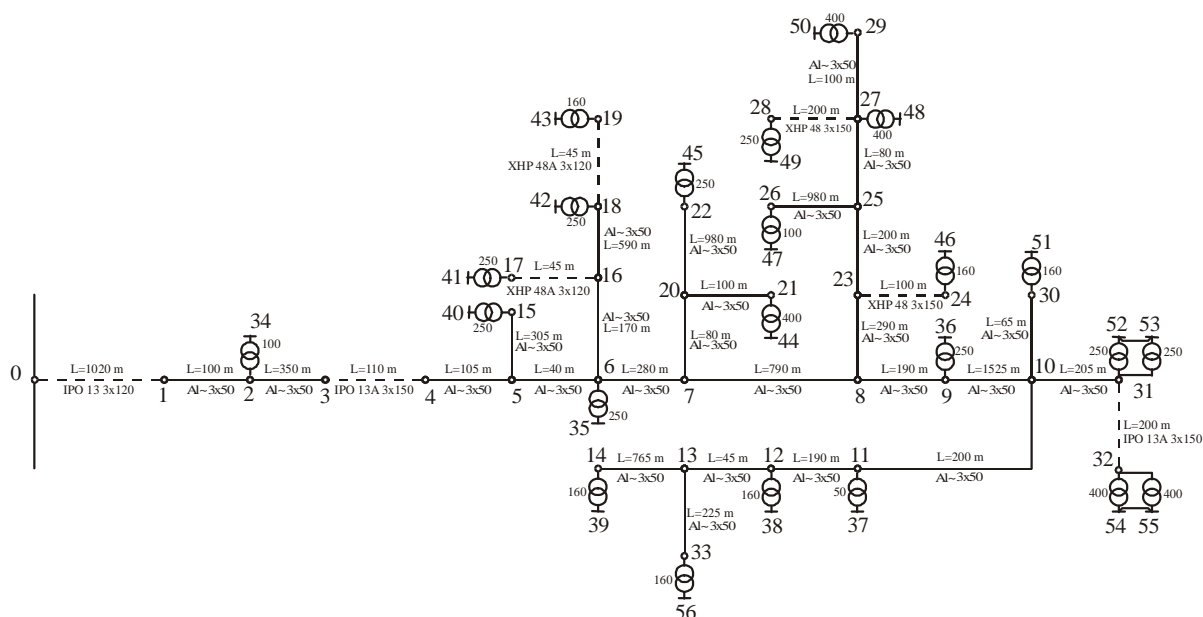
Monte-Karlo simulacioni metod [14] polazi od činjenice da ne postoje podaci o opterećenjima potrošačkih čvorova i da se ona mogu simulirati slučajno generisanim brojevima. Ovim postupkom se generiše strujno opterećenje svakog od potrošačkih čvorova na osnovu generisanih slučajnih brojeva, vrednosti struje napojne deonice i nominalnih snaga transformatora.

Metode bazirane na fuzzy proračunima

Ovde se sreću dva pristupa. Prvi se zasniva na fuzzy proračunu tokova snaga [15,16], a drugi na primeni tehnike fuzzy klasterovanja [17,18]. Fuzzy proračun tokova snaga polazi od realne činjenice da snage potrošnje u mnogim čvorovima distributivne mreže nisu u potpunosti poznate, već se na određeni način procenjuju. Ovo iz razloga što se merenja snage i energije u distributivnim mrežama vrše samo kod industrijskih potrošača, kao i na transformaciji visoki/srednji napon, dakle na mestima kupoprodaje električne snage i energije, a broj takvih mernih mesta u distributivnoj mreži je mali.

Pošto snage potrošnje nisu strogo poznate to je pogodno tretirati ih kao fuzzy brojeve. U prilog ovoj konstataciji ide i činjenica da se na osnovu iskustva mogu sa velikom tačnošću za svaki potrošački čvor pretpostaviti granice između kojih se nalazi snaga potrošnje [19]. Pored snaga potrošnje, kao fuzzy broj se može posmatrati i napon napojne tačke. Kada se odrede fuzzy brojevi kojima se predstavljaju snage potrošnje i napon napojne tačke, uz uslov da su poznati parametri elemenata mreže proračun napona i tokova snaga može se vršiti pomoću postupaka predloženih u [15,16].

Kao rezultat proračuna dobijaju se naponi čvorova i tokovi snaga/struja kao fuzzy brojevi. Zatim se, znajući snagu odnosno struju kroz svaki element mreže, određuju gubici snage kao fuzzy broj.



Slika 1. Distributivna test mreža

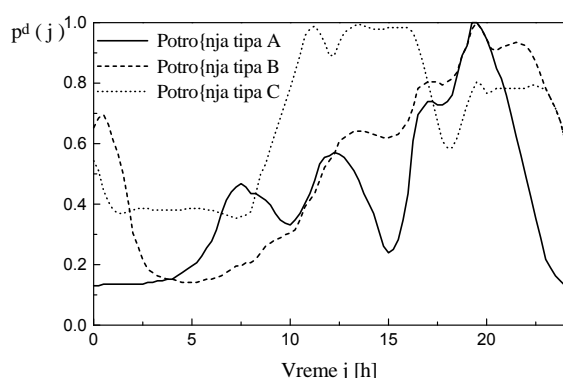
Defazifikacijom ovog broja dobija se deterministička vrednost snage gubitaka koja pomnožena sa brojem sati za razmatrani period (za godinu dana 8760h, odnosno 8784h ako je godina prestupna) daje vrednost gubitaka energije za dati period. Defazifikacija se može vršiti na više načina, a autori ovog rada su konstatovali da je pogodno koristiti metod jednakih površina (bisector method).

Pored fuzzy proračuna tokova snaga, proračun gubitaka električne energije može se vršiti i tehnikom fuzzy klasterovanja. Naime, kod klasičnog klasterovanja, klasteri se nalaze u obliku podskupova od skupa X za koje se zahteva da je stepen povezanosti veliki za podatke unutar podskupa a mali za podatke u različitim podskupovima. Međutim ovakav zahtev je suviše strog u mnogim praktičnim primenama, i poželjno je zameniti ga nekim manje strogim zahtevom. Kada se zahtev za čvrstom podelom skupa X zameni slabijim zahtevom za fuzzy podelom ili fuzzy pseudo podelom dolazi se u oblast fuzzy klasterovanja. Fuzzy pseudo podela se često naziva i fuzzy c -podela, gde c označava broj fuzzy klasa u podeli. Postoje dva osnovna metoda fuzzy klasterovanja, a za proračun gubitaka električne energije pogodno je koristiti *fuzzy c-means* metod klasterovanja [17,18].

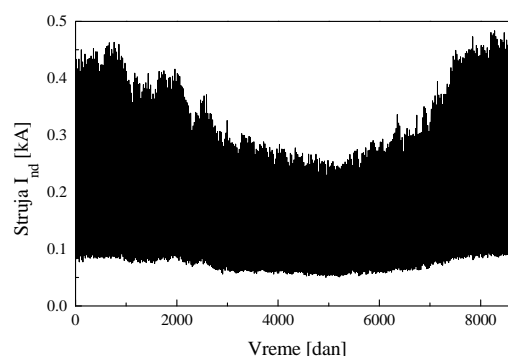
REZULTATI PRORAČUNA

Da bi se sagledale prednosti i nedostaci pojedinih metoda, autori su njima vršili proračune gubitaka za različite distributivne mreže. Ovde su prikazani rezultati proračuna za distributivnu mrežu prikazanu na sl.1. Zaključci do kojih se dolazi na osnovu ove mreže važe i za druge distributivne mreže koje su autori analizirali. Pretpostavljeno je da se potrošači mogu razvrstati u tri kategorije, koje su radi opštosti obeležene sa A, B i C. Pretpostavljeni normalizovani dnevni dijagrami ova tri tipa potrošača prikazani su na sl.2, dok su u tabeli 1 date vrednosti maksimalnih snaga potrošačkih čvorova, faktora snage i procentualnog učešća pojedinih kategorija potrošača u ukupnoj snazi datog čvora. Na sl.3 prikazan je hronološki dijagram struje napojne deonice.

Rezultati proračuna gubitaka električne energije različitim metodama prikazani su u tabeli 2. Pored ukupnih prikazani su i gubici energije u pojedinim elementima mreže. Da bi se mogla konstatovati tačnost rezultata do kojih dovode korišćene metode izvršena je, na osnovu dnevnih dijagrama opterećenja i dijagrama struje napojne deonice simulacija opterećenja mreže i izvršen proračun tokova snaga (a samim tim i gubitaka) za svaki sat u godini.



Slika 2. Dnevni dijagrami opterećenja tri hipotetička tipa potrošača



Slika 3. Hronološki dijagram struje napojne deonice

Tabela 1. Maksimalne snage potrošačkih čvorova i učešće pojedinih kategorija potrošača

Br. čvora	A (%)	B (%)	C (%)	S_{max} [MVA]	$\cos \varphi$	Br. čvora	A (%)	B (%)	C (%)	S_{max} [MVA]	$\cos \varphi$
34	70	30	0	0,090	0,96	46	0	90	10	0,170	0,99
35	60	20	20	0,220	0,96	47	10	20	70	0,05	0,99
36	100	0	0	0,240	0,95	48	10	10	80	0,350	0,96
37	20	20	60	0,020	0,97	49	0	20	80	0,230	0,97
38	20	0	80	0,170	0,98	50	20	30	50	0,380	0,95
39	0	20	80	0,170	0,96	51	20	20	60	0,160	0,96
40	20	50	30	0,180	0,94	52	20	0	80	0,270	0,94
41	30	70	0	0,180	0,93	53	20	0	80	0,270	0,94
42	80	20	0	0,200	0,95	54	20	20	60	0,380	0,97
43	0	80	20	0,200	0,98	55	20	20	60	0,380	0,97
44	60	40	0	0,300	0,96	56	10	50	40	0,160	0,96
45	90	0	10	0,180	0,95						

Tabela 2. Rezultati proračuna gubitaka električne energije

	Ukupni gubici		Gubici u vodovima		Gubici u transform.		Gubici voda 4-5		Gubici voda 9-10		Gubici u transform.30-51			
	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh	MWh	MVArh		
Simulacija	795,1	716,1	546,5	330,2	248,7	385,9	30,87	18,43	81,75	48,8	9,916	15,61		
Ekv. otp.	751,9	679,5	506,2	306,2	245,7	373,3								
Sr. kv. struja	751,1	672,6	510,6	308,9	240,6	363,8	31,06	18,55	65,82	39,3	7,995	10,8		
Monte-Karlo	760,9	695,6	511,8	309,6	249,1	386,0	31,08	18,55	66,23	39,54	8,33	11,59		
Fuzzy pristup	794,1	735,3	560,7	339,1	255	396,2	33,2	19,8	70,1	41,9	7,8	10,3		
Br. Klastera	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69	
	2	742,8	663,8	503,6	304,5	239,2	359,3	29,4	17,55	71,73	42,82	9,474	14,48	
	5	767,6	690,9	523,1	316,3	244,5	374,6	30,54	18,23	74,27	44,34	9,645	14,93	
	10	774,1	700,6	527,1	318,7	247,1	381,9	30,76	18,37	74,86	44,7	9,736	15,15	
	20	776,5	704,2	528,5	319,6	248	384,7	30,84	18,41	75,05	44,81	9,756	15,2	
Fuzzy klasterovanje	m=1,1	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	744	665,1	504,5	305	239,4	360	29,46	17,59	71,81	42,88	9,485	14,51
		3	763,4	686	520	314,4	243,4	371,6	30,37	18,13	73,93	44,14	9,643	14,91
		5	769,4	693,9	524	316,8	245,3	377	30,61	18,27	74,36	44,4	9,690	15,03
		10	774,5	701	527,3	318,8	247,2	382,2	30,79	18,38	74,82	44,67	9,720	15,11
		20	777,1	705,1	528,9	319,8	248,2	385,3	30,87	18,43	75,1	44,83	9,766	15,22
	m=1,25	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	743,1	665	504,5	305,1	239,4	359,9	29,46	17,58	71,82	42,89	9,478	14,48
		3	764,4	687	520,8	314,9	243,6	372,1	30,41	18,16	74,03	44,2	9,643	14,91
		5	769,1	693,6	523,8	316,7	245,3	376,9	30,58	18,26	74,36	44,4	9,682	15,01
		10	773,3	700,4	526,2	318,1	247,2	382,2	30,72	18,34	74,7	44,6	9,724	15,12
		20	777,5	705,5	529,2	320	248,3	385,4	30,88	18,44	75,16	44,87	9,763	15,22
	m=1,5	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	744	665	504,6	305,1	239,4	359,9	29,45	17,58	71,84	42,89	9,469	14,47
		3	765	687,4	521,3	315,2	243,7	372,2	30,43	18,17	74,09	44,23	9,626	14,87
		5	769,6	693,8	524,3	317	245,3	376,8	30,59	18,26	74,49	44,47	9,675	14,99
		10	771,3	698	524,6	317,2	246,7	380,9	30,62	18,28	74,51	44,49	9,710	15,08
		20	776,6	704	528,7	319,7	247,9	384,4	30,84	18,41	75,09	44,83	9,739	15,16
	m=2	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69
		2	721,3	640,5	486,4	294,1	234,8	346,4	28,35	16,93	69,44	41,46	9,277	13,97
3		742	662,9	502,9	304,1	239	358,8	29,35	17,53	71,66	42,78	9,468	14,47	
5		770,1	693	525,3	317,6	244,8	375,3	30,59	18,26	74,9	44,72	9,670	14,98	
10		769,3	693,9	523,8	316,7	245,5	377,2	30,5	18,21	74,41	44,42	9,602	14,81	
20		771,2	697,2	524,8	317,3	246,4	379,9	30,57	18,25	74,76	44,64	9,703	15,06	
m=5	1	655,7	570,7	434,2	262,5	221,5	308,2	25,26	15,08	62,51	37,32	8,766	12,69	
	2	696,5	613,8	466,6	282,1	229,7	331,7	27,15	16,21	66,92	39,95	9,083	13,48	
	3	744,6	665,4	505,2	305,5	239,4	359,9	29,44	17,57	72,3	43,16	9,520	14,61	
	5	729,6	649,2	493,1	298,2	236,4	351	28,71	17,14	70,64	42,18	9,379	14,24	
	10	665,7	581,2	443,1	267,3	223,5	313,9	25,71	15,35	63,7	38,03	8,868	12,94	
	20	668,3	584	444,3	268,6	224,1	315,4	25,84	15,42	64	38,2	8,887	12,99	

Očigledno je da je ovde za godišnje gubitke energije trebalo izvršiti 8760 (za prestupnu godinu 8784) proračuna tokova snaga. Rezultati do kojih se dolazi na ovaj način smataće se tačnim, a oni se u tabeli 2 nalaze u vrsti označenom sa "simulacija". Upoređenjem rezultata prikazanih u tabeli 2 može se konstatovati da od korišćenih metoda najbolje rezultate daju metod zasnovan na fuzzy proračunu tokova snaga, kao i metodi zasnovani na tehnici klasterovanja i fuzzy klasterovanja. Ovi metodi daju dobre rezultate kako za ukupne gubitke, tako i za gubitke po elementima mreže. Na ovom test primeru fuzzy pristup dao je najbolje rezultate pošto je došlo do poništavanja greške koja se estimacionim pristupom i greške samog metoda. U nekim primerima koje su autori analizirali došlo je do sabiranja ovih grešaka tako da se dolazi do zaključka da je greška fuzzy pristupa veća od greške koja se čini primenom klasterovanja ili fuzzy klasterovanja sa dvadesetak klastera. Prednost fuzzy pristupa koji se bazira na fuzzy proračunu tokova snaga je što se vrši samo jedan proračun tokova snaga, ali je problem u određivanju fuzzy brojeva kojima se predstavlja potrošnja. Kod klasterovanja se pokazuje da je dovoljno koristiti 20 klastera. S obzirom da ovo nije veliki broj, a imajući u vidu i relativnu jednostavnost ovog postupka to se može zaključiti da ovaj postupak ima prednost nad ostalim determinističkim postupcima. Pored klasterovanja dobre rezultate daje i tehnika fuzzy klasterovanja. I ovde je dovoljno raditi sa 20 klastera, ali treba imati u vidu da vrednost koeficijenta m, kojim se definiše rasplinitost klasterovanja, mora biti iz opsega 1,1÷2.

ZAKLJUČAK

U radu je izvršena klasifikacija metoda za proračun gubitaka električne energije u distributivnim mrežama. Pored podele na tri osnovne kategorije determinističke, statističko probablističke i metode bazirane na fuzzy proračunima izvršena je i klasifikacija unutar svake od ovih kategorija.

Analize koje su autori vršili pokazuju da od determinističkih metoda, u slučaju kada je potrebno odrediti raspodelu gubitaka po elementima mreže najpre treba izvršiti izbor postupka za procenu dijagrama opterećenja u zavisnosti od raspoloživih podataka. Nakon procene dijagrama opterećenja potrošačkih čvorova može se izvršiti proračun tokova snaga za svaki sat analiziranog perioda i na ovaj način odrediti gubitke energije.

Kod rasprostranjenih mreža, odnosno mreža koje sadrže veliki broj elemenata može se izvršiti smanjenje broja potrebnih proračuna tokova snaga metodom klasterovanja, fuzzy klasterovanja ili fuzzy metodom. Metod klasterovanja i fuzzy klasterovanje daju jako dobre rezultate već sa manje od dvadeset klastera. Proračunsko vreme fuzzy klasterovanja je kraće od vremena potrebnog za klasterovanje, međutim kod primene ovog metoda potrebno je izvršiti izbor parametra koji definiše rasplinitost klastera. Autori predlažu da se vrednost ovog parametra bira iz opsega 1.1-2. Fuzzy pristup zahteva jedan fuzzy proračun tokova snaga, ali je postupak određivanja fuzzy broja koji karakteriše potrošnju dosta složen.

U slučajevima kada se ne zahteva velika tačnost mogu se koristiti metod srednje kvadratne struje i Monte-Karlo metod. Monte-Karlo metod daje nesto bolje rezultate, ali zahteva veliki broj proračuna tokova snaga pa je pogodan za primenu kod problema manje dimenzionalnosti. Ukoliko je potrebno odrediti samo ukupne gubitke u mreži moguća je i primena metoda ekvivalentne otpornosti

LITERATURA

- [1] В. Э. Воротницкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев, В. Г. Пекелис, Д. Л. Файбисович, *Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем*, Энергоатомиздат, 1983.
- [2] Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко, *Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях*, НЦ ЭНАС, Москва, 2004.
- [3] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, 1401-1407.
- [4] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 3, July 1992, 1484-1491.
- [5] S. Cilanvar, J.J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1217-1223.
- [6] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1492-1498.
- [7] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica, *Specijalizovani DMS algoritmi*, DMS group, Novi Sad, 2004.
- [8] V. C. Strezoski, D. S. Janjić, *Sistem regulacije napona radijalnih distributivnih mreža*, Stylos, Novi Sad, 1997.
- [9] M. S. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema*, Tom 2, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.
- [10] T. A. Short, *Electric Power Distribution – Handbook*, CRC Press LLC, 2004.
- [11] T. J. E. Miller, *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley and Sons, New York, 1972.
- [12] D. Tasić, "Izbor optimalnih lokacija i veličina kondenzatorskih baterija u električnim mrežama", *Elektroprivreda*, br. 9-10, sept.-okt. 1991, str. 348-353.
- [13] D. S. Tasić, N. Lj. Rajaković, Z. P. Stajić, "Linearized Model for an Optimal Exploitation of Reactive Power Resources in Industrial Networks", *Proceedings of the 35th Universities Power Engineering Conference UPEC 2000*, Belfast, September 2000.
- [14] D. Rajičić, R. Ačkovski, "Optimalna kompenzacija radijalnih distributivnih mreža dekompozicijom funkcije cilja", R39.14, JUKO CIGRE, Bled, 1989.
- [15] N. Rajaković, *Analiza elektroenergetskih sistema I*, Elektrotehnički fakultet i Akademska misao, Beograd, 2002.
- [16] T. Gønen, *Electric Power Distribution System Engineering*, Mc Grow-Hill, New York, 1986.
- [17] N. Rajaković, D. Tasić, G. Savanović, *Distributivne i industrijske mreže*, Elektrotehnički fakultet i Akademska misao, Beograd, 2004.
- [18] D. Tasić, M. Stojanović, *Gubici električne energije u distributivnim mrežama*, Edicija Monografije, Elektronski fakultet, Niš, 2006.