

MATEMATIČKI MODELI ZA ANALIZU GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U SLOŽENIM MREŽAMA

Emilija Radojčić-Turković, Maja Turković,
Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" u Beogradu

Sadržaj: U radu je dat pregled metoda koje se koriste za proračun gubitaka električne energije u mrežama savremenih elektroenergetskih sistema (EES). Razvijene su dve probabilističko-statističke metode proračuna gubitaka energije, koje se zasnivaju na probabilističko-statističkoj analizi opterećenja čvorišta u nekom računskom periodu, uz korišćenje faktorne ili harmonijske analize. Na izabranom primeru složene mreže izvršeno je poređenje razvijenih i ostalih, u savremenoj praksi najčešće korišćenih metoda, sa aspekta grešaka koje se javljaju pri određivanju ukupne veličine gubitaka i njihove strukture, kao i sa aspekta potrebne informacione osnove za njihovu aplikaciju. Dati su zaključci o domenu primene pojedinih metoda na različitim vremenskim i hijerarhijskim nivoima upravljanja savremenim EES.

Ključne reči: modeli/mreža/gubici energije/analiza

1 UVOD

Poznato je da je veličina gubitaka električne energije jedan od najbitnijih pokazatelja ekonomičnosti rada elektroenergetskih sistema (EES). Važnost problema i složenost njegovog rešavanja doveli su do razrade velikog broja metoda za proračun veličine i strukture gubitaka električne energije koje se u praksi koriste na različitim vremenskim i hijerarhijskim nivoima upravljanja EES-om [1, 2, 3, 4, 5, 16, 17, 19, 20]. Sve te metode razlikuju se među sobom po algoritmima proračuna, karakteru i obimu zahtevane informacione osnove, tačnosti i oblasti primene [3, 5].

Najpotpunije su razrađene i najšire primenjene determinističke metode, koje se zasnivaju na proračunima manjeg ili većeg broja stacionarnih režima u posmatranom periodu računanja T . Složenost proračuna gubitaka električne energije proističe iz činjenice, da se parametri režima menjaju u vremenu, pa je za modelovanje režima rada EES-a u nekom vremenskom intervalu neophodno raspolagati sa odgovarajućom informacionom bazom podataka. Kod savremenih EES-a velikih dimenzija, koji se uz to odlikuju i složenim unutrašnjim i spoljašnjim vezama (rad u okviru velikih interkonekcija) i izrazito promenljivim režimima rada elemenata, naglo je porastao obim polazne informacije neophodne za praktičnu primenu metoda, čije prikupljanje i obradu najčešće nije moguće obezbediti pri savremenom sistemu merenja u EES-ima.

Zbog toga je, umesto tačnih metoda za proračun gubitaka električne energije koje se zasnivaju na širokoj informacionoj bazi podataka, zavisno od karakteristika pojedinih EES-a, njihove tehničke opremljenosti i svrhe proračuna, razrađen čitav niz uprošćenih metoda za proračun gubitaka električne energije koje su našle svoju primenu u praksi. U osnovi tih metoda nalazi se niz matematičkih i algoritamskih pretpostavki koje omogućavaju uprošćenje modela, zamenom realnog procesa promene opterećenja elemenata mreže nekim "računskim", čime se algoritam proračuna gubitaka pojednostavljuje i istovremeno sužava informaciona baza podataka neophodna za praktičnu primenu. Prirodno, pri bitnom uprošćavanju modela snižava se i tačnost

metode. U suštini, metode za proračun gubitaka energije zasnivaju se na različitim prilazima pri prelasku gubitaka snage na gubitke energije u toku razmatranog perioda računanja [3, 5], što u osnovi i određuje njihovu grešku i nameće niz ograničenje na oblast njihove primene. Mogućnost primene neke metode zavisi od svrhe proračuna, što uslovljava i određene zahteve u pogledu tačnosti. Za svaki vremenski i hijerarhijski nivo proračuna definisani su zahtevi u pogledu veličine dozvoljene greške [3], prikazani u Tabeli 1. Pri tome, ukupna greška pri proračunu gubitaka energije sastoji se od metodološke i informacione greške. U prve spadaju greške nastale usled zamene realnog procesa promene režima uprošćenim modelom, a druge su uslovljene korišćenjem nepotpune i netačne polazne baze podataka o parametrima mreže i režimima njenog rada.

Tabela 1. Dozvoljene greške pri proračunu gubitaka električne energije

Teritorijalni nivo	Greška [%] na različitim vremenskim nivoima					
	Planiranje razvoja EES (period 10-20 g.)	Projektovanje EES (period 5 g.)	Eksploatacija EES-a			
			Dugotrajna prognoza (1g.)	Kratkotrajna prognoza (mesec, sedmica)	Dnevna prognoza	Retrospektivna analiza
Prenosna mreža	15-20	10	10	5-7	3-5	1-2
Distributivna mreža visokog napona	-	12	10	7-10	5-7	3-5
Distributivna mreža niskog napona	-	15	15	10-15	10	5-7

Formiranje složenih EES-a i različite primene rezultata proračuna gubitaka energije (prognoza, planiranje, operativni proračuni u pogonu, proračuni u realnom vremenu, retrospektivna analiza gubitaka u cilju razrade mera za sniženje i dr.) zahtevali su određivanje ne samo veličine već i strukture gubitaka električne energije po naponskim nivoima i elementima mreže, sa visokom tačnošću. Posebno se stavljaju oštri zahtevi u pogledu tačnosti metode koja se koristi u retrospektivnim analizama gubitaka energije, pri poznatim dijagramima opterećenja čvorišta i elemenata mreže, u cilju razdvajanja tehničkih i komercijalnih gubitaka, određivanja "žarišta" i uzroka gubitaka i tendencije promene u elementima mreže. Razlog tome je što se rezultati retrospektivnih analiza koriste pri projektovanju i u eksploataciji EES-a za razradu konkretnih mera za njihovo sniženje. Ovim zahtevima ne može da odgovori najveći broj determinističkih metoda.

Intenzivan razvoj računara i šira primena telemerenja u mrežama EES-a stvorili su osnove za analizu probablističko-statističkih karakteristika opterećenja čvorišta [10], što je pogodovalo razvoju probablističko-statističkih metoda visoke tačnosti koje omogućavaju proračun ne samo veličine već i strukture gubitaka električne energije [6]. Ove metode imaju brojne modifikacije i programske realizacije, zavisno od korišćenog matematičkog modela. Među tim metodama posebno se izdvajaju metode zasnovane na faktornoj i harmonijskoj analizi dijagrama opterećenja čvorišta [7, 8]. S obzirom da nijedna metoda nije univerzalna i ne može se primeniti na svim prostorno-vremenskim nivoima odlučivanja, to se u skladu sa tipom mreže i uslovima njene eksploatacije razvijaju ili modifikuju metode za proračun gubitaka energije, koje zavisno od svrhe proračuna obezbeđuju zahtevanu tačnost.

U ovom radu dat je pregled u savremenoj praksi najčešće korišćenih metoda za proračun gubitaka električne energije i na izabranom test-primeru mreže izvršeno

njihovo poređenje sa aspekta grešaka koje se javljaju pri određivanju ukupne veličine i strukture gubitaka po elementima mreže i naponskim nivoima, kao i sa aspekta potrebne informacione osnove za njihovu aplikaciju. Na osnovu analize dati su zaključci o domenu primene pojedinih metoda na različitim vremenskim i hijerarhijskim nivoima upravljanja savremenim EES.

2 MATEMATIČKI MODELI ZA PRORAČUN GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U SLOŽENIM MREŽAMA

Za određivanje gubitaka električne energije u složenim mrežama do danas je predložen veliki broj "tačnih" i uprošćenih matematičkih modela, koji koriste manje ili više uprošćene računarske algoritme i informacionu bazu različitih obima. Bez obzira što brojnost modela otežava njihovu klasifikaciju, prema korišćenom matematičkom modelu sve metode se uslovno mogu svrstati u 2 osnovne grupe:

- determinističke
- probabilističko-statističke.

U Tabeli 2 dat je pregled najčešće korišćenih metoda za proračun gubitaka energije u zatvorenim, složenim mrežama i oblasti njihove primene.

Tabela 2. Pregled metoda za proračun gubitaka električne energije u mrežama EES-a

Metoda proračuna	Oblasti primene				
	Prognoza gubitaka	Planiranje gubitaka	Operativni proračuni	Realno vreme	Retrospektivna analiza
Determinističke metode					
1. τ -metoda	DM	DM	-	-	-
2. Metoda srednjeg opterećenja	DMV	DMV	-	-	-
3. Metoda srednjeg kvadratnog opterećenja	DMV	DMV	-	-	-
4. Metoda karakter. režima	PM	PM	-	-	PM DMV
5. Metoda satnih vrednosti dnevnih dijagrama	OPM	OPM	OPM PM	OPM PM	OPM PM
6. Metoda ekvival.	DM	DM	DVM	-	-
7. Metoda padova napona	DMN	DMN	-	-	DMN
Probabilističko-statističke metode					
1. Regresione metode	PM, DM	PM, DM	PM, DM	PM DMV	PM, DM
2. Metoda integral. karak. opterećenja	PM	PM	OPM PM	OPM	OPM PM
3. Metoda statis. uzorka	DM	DM	-	-	DM
Legenda: OPM – osnovna prenosna mreža visokog napona ($U_n \geq 220$ kV) PM – prenosna mreža ($U_n \geq 110$ kV) DM – distributivne mreže svih nominalnih napona DMV – distributivne mreže visokog napona (35, 20, 10, 6 kV) DMN – distributivne mreže niskog napona (0.4 kV)					

2.1. Determinističke metode proračuna gubitaka energije

2.1.1. Etalon metoda

Najtačnija metoda za proračun gubitaka električne energije ΔW zasniva se na tačnom modelovanju dijagrama opterećenja svih čvorišta, konfiguracije i parametara njenih elemenata, u posmatranom računskom periodu i proračunu stacionarnog režima za svaki vremenski interval u kome se opterećenja čvorišta i šema mreže mogu smatrati nepromenljivim (obično su to intervali od 1h), kojom prilikom se određuju gubici snage u svakom modelovanom režimu, a zatim vrši njihovo sumiranje za računski period (ova metoda se naziva METODA GRAFIČKE INTEGRACIJE).

Za dijagram opterećenja koji se u računskom periodu može aproksimirati sa L stepenica, matematički izraz za ΔW je:

$$\Delta W = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L \Delta P_{kl} \Delta t_l \quad (1)$$

gde su:

ΔP_{kl} – gubici snage u elementu mreže k u režimu kojem odgovara l -ta stepenica dijagrama opterećenja (dobijeni iz proračuna stacionarnog režima l);

Δt_l – trajanje l -te stepenice dijagrama opterećenja;

N – broj elemenata mreže.

Osnovna karakteristika ove metode je visoka tačnost, pa se ova metoda uzima kao etalon metoda. Međutim, nepostojanje potpune informacije o dijagramima opterećenja aktivne i reaktivne snage čvorišta i dimenzije savremenih mreža predstavljaju ozbiljnu teškoću za praktičnu primenu ove metode. Ova metoda nalazi primenu kod retrospektivnih proračuna, kada se zahteva utvrđivanje strukture gubitaka sa visokom tačnošću radi razrade mera za njihovo sniženje.

2.1.2. Metoda vremena trajanja maksimalnih gubitaka snage (τ -metoda)

Pre pojave računara metoda proračuna gubitaka prema vremenu trajanja maksimalnih gubitaka bila je jedna od najšire primenjenih metoda u praksi. Prema ovoj metodi realni režimi EES-a u računskom periodu od 1 godine, modelovani su preko režima maksimalnog opterećenja, pa se proračun gubitaka energije ΔW vrši preko proračuna gubitaka snage u režimu maksimalnog opterećenja ΔP_{max} i vremena trajanja maksimalnih godišnjih gubitaka τ , prema relaciji:

$$\Delta W = \Delta P_{max} \tau \quad (2)$$

Veličina τ zavisi od parametara godišnjeg dijagrama opterećenja, odnosno od koeficijenata ravnomernosti i oblika dijagrama opterećenja.

Sama metoda teoretski je strogo fundirana kad je reč o proračunu gubitaka u jednom elementu mreže, pri poznatom ili bar tipiziranom dijagramu opterećenja tog elementa (ako se proračun vrši preko empirijskih relacija za τ). Primena ove metode u složenim mrežama podrazumeva sledeće pretpostavke:

- maksimalni gubici u bilo kojem elementu mreže javljaju se pri maksimalnom opterećenju EES-a,
- oblik dijagrama aktivnog i reaktivnog opterećenja čvorišta je isti ($\cos\phi = \text{const}$).

Za određivanje trajanja maksimalnih gubitaka koriste se empirijske relacije izvedene za tipične dijagrame opterećenja (isključivo za vremenski period od godinu

dana) različitog analitičkog izraza [3, 5, 9]. U ruskoj literaturi najčešće se za određivanje τ koristi empirijska relacija oblika:

$$\tau = (0.124 + T_{\max} \cdot 10^{-4})^2 8760 \quad (3)$$

gde je T_{\max} [h] vreme trajanja maksimalnog opterećenja EES-a i određuje se iz relacije:

$$T_{\max} = \frac{\sum_{l=1}^L S_l \Delta t_l}{S_{\max}} \quad (4)$$

pri čemu je:

S_l – prividna snaga EES-a u intervalu Δt_l

S_{\max} – maksimalna prividna snaga EES-a

Ako je računski period T manji od godinu dana, tada se umesto relacije (3) koristi analitički izraz

$$\tau = 2T_{\max} - T + \frac{T - T_{\max}}{1 + \frac{T_{\max}}{T} - \frac{2P_{\min}}{P_{\max}}} \left(1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}}\right)^2 \quad (5)$$

gde su:

P_{\max}/P_{\min} – maksimalno/minimalno opterećenje EES-a (po aktivnoj snazi) u računskom periodu T ;

T – dužina računskog perioda [h].

U germanskoj literaturi se češće koristi empirijska relacija čiji je analitički izraz oblika:

$$\tau = 0.17T_{\max} + 0.83T_{\max}^2 / 8760 \quad (6)$$

Zavisno od oblika i ravnomernosti dijagrama opterećenja, razvijen je veliki broj analitičkih izraza za određivanje τ . Detaljna analiza primene različitih modifikacija izraza za izračunavanje τ ukazale su da njegova vrednost varira u širokom opsegu i često značajno odstupa od vrednosti dobijene pri tačnom određivanju τ preko poznatog dijagrama opterećenja:

$$\tau = \frac{\sum_{l=1}^L S_l^2 \Delta t_l}{S_{\max}^2} \quad (7)$$

S obzirom da dijagram opterećenja EES-a najčešće nije poznat (sem kad je reč o retrospektivnim analizama), to se određivanje τ u praksi vrši primenom onih empirijskih relacija koje su izvedene za tipične godišnje dijagrame opterećenja koji odgovaraju razmatranom EES-u.

Ipak, primena τ metode za proračun gubitaka energije u savremenim složenim mrežama je u opštem slučaju neprihvatljiva, zbog činjenice da se u složenim (zatvorenim) mrežama dijagrami opterećenja grana (elemenata mreže) ne podudaraju sa dijagramima opterećenja čvorišta mreže, ni sa dijagramom opterećenja EES-a. Prema tome, određivanje gubitaka energije, prema vrednostima τ zajedničkim za sve elemente

mreže, dovodi do greške, čija je brojna vrednost u opštem slučaju nepoznata. Greške koje se dobijaju primenom ove metode za proračun gubitaka energije u složenim mrežama su velike i one se sastoje od:

- greške usled neadekvatnosti same metode pri tačnom određivanju τ ,
- greške vezane za određivanje τ preko različitih približnih izraza koji su određeni za tipične dijagrame opterećenja, a koji se razlikuju od dijagrama opterećenja razmatranog EES-a.

Ukupna greška kreće se u granicama $-25\div 42\%$, pri čemu se najveće greške dobijaju pri određivanju strukture gubitaka. S druge strane, primena ove metode vezana je za minimalnu bazu podataka koja obično postoji u svim EES-a pa je to razlog što je ova metoda našla široku primenu u praksi pri proračunu gubitaka energije na skoro svim vremenskim i hijerarhijskim nivoima.

U cilju smanjenja grešaka pri određivanju gubitaka ΔW primenom τ metode neophodno je preciznije uvažiti konfiguraciju dijagrama opterećenja, dinamiku promene faktora snage i realno posmatrano vremensku nepodudarnost maksimuma dijagrama aktivnog i reaktivnog opterećenja. U tom cilju razvijene su metode bazirane na posebnom određivanju vremena trajanja maksimalnih gubitaka aktivne snage (τ_p) i vremena trajanja maksimalnih gubitaka reaktivne snage (τ_Q), pri čemu se gubici energije računaju prema sledećem analitičkom izrazu:

$$\Delta W = \Delta P_p \tau_p + \Delta P_Q \tau_Q \quad (8)$$

gde su: ΔP_p i ΔP_Q – respektivno komponente gubitaka snage uslovljene tokovima aktivne i reaktivne snage.

Primenom relacije (8) značajno se povećava tačnost proračuna gubitaka ali se zato zahteva informacija o dijagramima reaktivnog opterećenja sistema koji su ili nepoznati, a svakako manje tačni od dijagrama aktivnog opterećenja. Osim navedenih postoje i druge modifikacije ove metode. Uprkos tome, savremena praksa ograničava primenu ove metode samo na vremenskom horizontu dugoročnog planiranja razvoja EES, kad su i drugi parametri (pored gubitaka) nepouzdati, pa se ne zahteva visoka tačnost kod određivanja ukupnih gubitaka energije.

2.1.3. Metoda srednjih opterećenja čvorišta

Proračun gubitaka energije u nekom računskom periodu T može se vršiti na osnovi proračuna srednjih gubitaka snage ΔP_{sr} u tom periodu (za režim u kojem su modelovana srednja opterećenja čvorišta u periodu T) preko sledećeg analitičkog izraza:

$$\Delta W = \Delta P_{sr} \cdot T \quad (9)$$

Srednje opterećenje čvorišta se određuje u praksi iz pokazivanja brojila kao odnos aktivne i reaktivne energije koje se uzimaju iz čvora u posmatranom računskom periodu i dužine tog perioda T .

Primena ove metode u složenim visokonaponskim mrežama, u opštem slučaju praćena je visokim greškama (do 40%) kad je reč o određivanju ukupne veličine gubitaka, a posebno kad je reč o određivanju strukture gubitaka (preko 80%). Greške su manje kad su dijagrami opterećenja čvorišta (elemenata) mreže ravnomerni, što nije realno očekivati kod prenosnih mreža.

2.1.4. Metode proračuna gubitaka energije prema karakterističnim danima i/ili režimima

Metode za proračun gubitaka energije prikazane u 2.1.2. i 2.1.3. zasnovane su na proračunu 1 stacionarnog režima složene mreže pri čemu je korišćena minimalna informaciona baza podataka, koja je obično raspoloživa u EES-u [11]. To je imalo za posledicu pojavu male informacione i velike metodološke greške.

U cilju povećanja tačnosti određivanja veličine i strukture gubitaka energije u prenosnim mrežama razvijene su metode koje se baziraju na zameni realnog procesa promene opterećenja elemenata mreže u toku računskog perioda T sa nekoliko karakterističnih režima i ekvivalentnom broju sati njihovog trajanja. Kao karakteristični režimi obično se uzimaju maksimalni i minimalni režimi u zimskoj sezoni prethodne i letnjoj sezoni tekuće godine, pri normalnoj pogonskoj šemi mreže [12, 13, 14, 15].

Druga modifikacija metode je određivanje gubitaka energije u karakterističnim danima računskog perioda i uvažavanju ekvivalentnog broja dana njihovog trajanja. U osnovi ove metode leži pretpostavka o većoj homogenosti dijagrama opterećenja u različitim periodima godine nego dijagrama opterećenja različitih čvorova, pa se proračunom gubitaka energije u karakterističnim danima i uvažavanjem ekvivalentnog broja dana njihovog trajanja može eliminisati osnovni deo greške koja se javlja kod primene τ metode.

Proračun gubitaka energije u računskom periodu T prema karakterističnim danima zasniva se na proračunu stacionarnih režima za 24 h karakterističnog dana, uz korigovanje opterećenja čvorišta [15]. Ukoliko u sistemu ne postoji informacija o opterećenju čvorišta za svaki sat dijagrama opterećenja, proračun se vrši za karakteristične dnevne režime. Vreme trajanja svakog režima je Δt , pa se gubici energije u toku računskog perioda T određuju preko sledećeg analitičkog izraza:

$$\Delta W = T \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{24/\Delta t} \Delta P_{kl} \Delta t \quad (10)$$

gde je: T – broj dana u računskom periodu.

Ova metoda pripada grupi determinističkih metoda visoke tačnosti (metodološka greška je 3-5%), pri čemu se veća tačnost postiže korekcijom opterećenja čvorišta u karakterističnom danu, čime se uvažava realno stanje da dijagrami opterećenja čvorišta u karakterističnom danu nisu konstantni u toku računskog perioda. Zbog visoke tačnosti ova metoda se koristi za proračun gubitaka električne energije u prenosnim mrežama na gotovo svim vremenskim i hijerarhijskim nivoima.

2.2. Probabilističko-statističke metode

Sa intenzivnim razvojem računara i njihovom širom primenom u elektroenergetici stvoreni su uslovi za analizu probabilističko-statističkih karakteristika opterećenja čvorišta. S obzirom da su komponente vektora parametara režima slučajne veličine a da su gubici funkcija tog vektora tj. i oni su slučajne veličine, to je moguće ustanoviti vezu između veličine gubitaka i vektora parametara režima u obliku jednačina regresije. Regresione metode omogućavaju da se sa visokom tačnošću odredi ukupna veličina gubitaka u prenosnoj mreži i zato su našle široku primenu, posebno kad je reč o planiranju i prognozi gubitaka energije. Regresione metode imaju veliki broj modifikacija i one neće biti detaljnije razmatrane u ovom radu [3, 6, 10, 15].

Danas je pažnja stručnjaka usmerena na razvoj statističkih metoda [7, 8, 10, 18] za proračun gubitaka električne energije, baziranih na analizi statističke stabilnosti modela

dijagrama opterećenja čvorišta (potrošačkih i generatorskih) i samim tim i gubitaka energije. Vidno mesto među tim metodama zauzimaju metoda faktornog modelovanja opterećenja čvorišta i metoda dominirajućih harmonika.

2.2.1. Metoda za proračun gubitaka energije primenom faktorne analize

Osnovna karakteristika ove metode je da se proračun gubitaka energije u sistemu vrši preko integralnih karakteristika opterećenja čvorišta koje u kompaktnoj formi sadrže informaciju o promenama režima u računskom periodu. Pri tome se koristi statistički model stacionarnog režima mreže, određen na osnovu dijagrama opterećenja čvorišta, uz primenu principa statističke linearizacije. Ovakav prilaz omogućava da se uvaži slučajni karakter opterećenja čvorišta, odrede faktori koji bitno utiču na režim mreže i ocene greške modela [8].

2.2.1.1. Matematička formulacija metode

Kao što je poznato gubici električne energije u elementu ij mreže, u nekom računskom periodu T određuje se prema relaciji:

$$\Delta W_{ij} = \int_0^T \Delta P_{ij} dt \quad (11)$$

pri čemu su gubici snage ΔP_{ij} u elementu ij , napisani u polarnom obliku:

$$\Delta P_{ij} = g_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (12)$$

gde su: U_i, δ_i – moduo i fazni stav napona u čvorištu i ,
 $g_{ij} = j b_{ij}$ – uzajamna admitansa čvorišta i i j .
 Uvažavanjem relacija da su:

$$\begin{aligned} U_i &= MU_i + \Delta U_i \\ \delta_i &= M\delta_i + \Delta\delta_i \end{aligned} \quad (13)$$

gde su:

$MU_i, M\delta_i$ – matematička očekivanja napona čvorišta i njihovih faznih pomeraja;

$\Delta U_i, \Delta\delta_i$ – odstupanja U_i i δ_i od njihovih matematičkih očekivanja

i razvojem jednačine (12) u Tejlorov red, sa zadržavanjem prva 2 člana, jednačina (11) postaje:

$$\Delta W_{ij} = g_{ij} [M^2(U_i - U_j) + MU_i MU_j M^2(\delta_i - \delta_j) + \sigma^2(U_i - U_j) + MU_i MU_j \sigma^2(\delta_i - \delta_j)] T \quad (14)$$

Sumiranjem gubitaka po svim elementima mreže dobija se ukupna veličina gubitaka energije u mreži.

Analiza relacije (14) pokazuje da je za određivanje gubitaka energije dovoljno znati dve osnovne karakteristike napona i faznih uglova čvorišta: njihova matematička očekivanja i disperzije (matrica korelacionih momenata).

Naponi čvorišta i njihovi fazni uglovi (U_i, δ_i) su zavisno promenljive. S obzirom da se ova metoda temelji na uvažavanju statističkog karaktera nezavisno promenljivih aktivnih i reaktivnih snaga čvorišta (P_i, Q_i) (koji predstavljaju polaznu informaciju) to se veza između slučajnog karaktera zavisno i nezavisno promenljivih određuje preko statističke linearizacije jednačina stacionarnog režima EES-a. U polarnom sistemu koordinata model stacionarnog režima dat je preko jednačina:

$$P_i = \varphi_i(U, \delta) = U_i^2 g_{ii} + \sum_{j=1}^N U_i U_j [b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (15)$$

$$Q_i = \psi_i(U, \delta) = U_i^2 b_{ii} + \sum_{j=1}^N U_i U_j [b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

gde su: P_i i Q_i – aktivna i reaktivna snaga u čvoru "i" respektivno.

Razvojem u Tejlorov red u okolini matematičkog očekivanja i zadržavanjem samo linearnih članova dobijaju se sledeće jednačine:

$$MP_i = \varphi_i(U_0, \delta_0) \quad i \quad MQ_i = \psi_i(U_0, \delta_0) \quad (16)$$

i

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (17)$$

gde su:

MP_i, MQ_i - matematička očekivanja P_i i Q_i respektivno;

$\Delta P, \Delta Q$ - odstupanja aktivnih i reaktivnih snaga čvorišta od njihovih matematičkih očekivanja;

U_0, δ_0 - vektori modula i faznih uglova napona čvorišta koji odgovaraju režimu matematičkih očekivanja snaga čvorišta;

$\frac{\partial P}{\partial \delta}, \frac{\partial P}{\partial U}, \frac{\partial Q}{\partial \delta}, \frac{\partial Q}{\partial U}$ - kvadratne matrice koje se sastoje od elemenata

oblika $\frac{\partial \varphi_i}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \varphi_i}{\partial U_j}, \frac{\partial \psi_i}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \psi_i}{\partial U_j}$.

Iz jednačine (17) može se zaključiti da su matematička očekivanja zavisnih parametara režima (U_i, δ_i) približno mogu odrediti iz režima koji odgovara matematičkim očekivanjima snaga čvorišta $M(P_i), M(Q_i)$.

Jednačina (14) može se izraziti preko komponente gubitaka snaga u režimu matematičkih očekivanja snaga čvorišta ΔP_{ij} (MP, MQ) i disperzione komponente:

$$\Delta W_{ij} = T[\Delta P_{ij}(MP, MQ) + \sigma^2(U_i - U_j) + MU_i MU_j \sigma^2(\delta_i - \delta_j)]g_{ij} \quad (18)$$

Određivanje disperzione komponente gubitaka vezana je za određivanje matrice korelacionih momenata čiji se elementi javljaju u relaciji (18).

U skladu sa pravilima obrazovanja korelacione matrice zavisno promenljivih slučajnih veličina (\mathbf{Y}) koje su sa nezavisno promenljivim veličinama (\mathbf{X}) vezani preko matricnih jednačina $\mathbf{Y}=\mathbf{B}\cdot\mathbf{X}$, matrica korelacionih momenata $\mathbf{cov}(\delta, U)$ određena je linearnom transformacijom korelacionih momenata snaga:

$$\mathbf{cov}(\delta, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{U}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{U}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}} \end{bmatrix}_t^{-1} \quad (19)$$

gde je t oznaka za transponovanu matricu.

Matrice $\mathbf{cov}(\delta, \mathbf{U})$ i $\mathbf{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q})$ određene su relacijama:

$$\mathbf{cov}(\delta, \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \mathbf{cov}\delta & \mathbf{cov}(\delta, \mathbf{U}) \\ \mathbf{cov}(\delta, \mathbf{U}) & \mathbf{cov}\mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{cov}\mathbf{P} & \mathbf{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) \\ \mathbf{cov}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) & \mathbf{cov}\mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Kako se vidi iz (17) i (19) matrica korelacionih momenata napona čvorišta određuje se iz linearizovanih jednačina stacionarnog režima. U cilju pojednostavljenja proračuna gubitaka snage, jednačina (17) se može uprostiti uvodeći sledeće aproksimacije koje važe za prenosne mreže: $\sin(\delta_i - \delta_j) = 0$ pošto ugao $(\delta_i - \delta_j)$ ne prelazi $5-10^\circ$,

- $\cos(\delta_i - \delta_j) = 1$
- $g_{ij} = 0 (g_{ij} \ll b_{ij})$

Koristeći ideju dekuplovanog rešavanja (P, δ) i (Q, U) konture, jednačina (17) dobija oblik:

$$\mathbf{B}\Delta\delta = \Delta\mathbf{P} \quad (22)$$

$$\mathbf{B}'\Delta\mathbf{U} = \Delta\mathbf{Q} \quad (23)$$

gde su \mathbf{B} i \mathbf{B}' matrica admitansi čvorišta mreže respektivno bez (\mathbf{B}) i sa (\mathbf{B}') uvažavanjem kapacitivnih provodnosti elemenata mreže.

U jednačinama (22) i (23) zavisno promenljive $\Delta\delta$ i $\Delta\mathbf{U}$ određuju se nezavisno, pa su otuda matrice korelacionih momenata:

$$\mathbf{cov}\delta \approx \mathbf{B}^{-1} \mathbf{cov}\mathbf{P}\mathbf{B}_t^{-1} \quad (24)$$

$$\mathbf{cov}\mathbf{U} \approx \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{cov}\mathbf{Q}\mathbf{B}'_t^{-1} \quad (25)$$

Na taj način dobijeni su elementi za izračunavanje disperzione komponente gubitaka energije u elementima mreže a time i ukupnih gubitaka energije u mreži u toku računskog perioda T .

Pri praktičnoj aplikaciji ove metode i prenosnim mrežama velikih dimenzija najveći problem predstavlja formiranje matrica korelacionih momenata, jer zahteva inverziju matrice visokog reda, koja je po svom karakteru puna matrica. Međutim, savremeni razvoj računara i dalja razrada metode usmerena na dalja pojednostavljenja otvaraju široke mogućnosti za njenu primenu.

2.2.2. Metoda dominirajućih harmonika

Da bi se uvažila nehomogenost dijagrama opterećenja čvorišta, pri uprošćenom proračunu gubitaka energije u složenim mrežama, razvijena je metoda zasnovana na harmonijskoj analizi dijagrama opterećenja čvorišta. Naime, dijagrami aktivnog i reaktivnog opterećenja čvorišta, u toku računskog perioda T razlažu se u Furijeve red i pri tome se uvažavaju samo dominirajući harmonici koji omogućavaju da se dijagrami opterećenja modeluju sa zadatom tačnošću [7].

U skladu s tim, aktivna i reaktivna snaga u čvorištu "i" je:

$$P_i(t) = M(P_i) + \sum_{k=1}^n \left[A_{P_{ik}} \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) + B_{P_{ik}} \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) \right] + P_0(t) \quad (26)$$

$$Q_i(t) = M(Q_i) + \sum_{k=1}^n \left[A_{Q_{ik}} \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) + B_{Q_{ik}} \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) \right] + Q_0(t)$$

gde su:

n – broj dominirajućih harmonika,
 $A_{P_{ik}}, B_{P_{ik}}, A_{Q_{ik}}, B_{Q_{ik}}$ – Furijeovi koeficijenti za dijagram aktivne i reaktivne snage u i -tom čvoru (elementu) mreže,
 $M(P_i), M(Q_i)$ – matematičko očekivanje aktivne i reaktivne snage čvorišta u intervalu T ,
 T – dužina intervala računanja,
 $P_0(t), Q_0(t)$ – stacionarni proces sa nultim matematičkim očekivanjem (greške zbog nevažavanja harmonika čiji je red $> n$).

Koristeći teorem Parsevala [7], a polazeći od osobine ortogonalnosti, srednja kvadratna vrednost signala snage (26) može se razložiti na komponente od svakog harmonika na sledeći način:

$$\sum_{k=1}^m P_{ik}^2 = M^2(P_i) + \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{A_{P_{ik}}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{B_{P_{ik}}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^m Q_{ik}^2 = M^2(Q_i) + \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{A_{Q_{ik}}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{B_{Q_{ik}}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]$$

gde je m – broj merenja.

Gubici energije u EES mogu se izraziti preko sledeće relacije:

$$\Delta W = \Delta P(MP, MQ)T + \sum_{k=1}^n (\Delta P_{1k} + \Delta P_{2k})T + \Delta \quad (28)$$

gde su:

$\Delta P(MP, MQ)$ – gubici snage određeni prema matematičkim očekivanjima aktivne i reaktivne snage čvorišta u računskom periodu T ;

Δ – greška prorapčuna uslovljena nevažavanjem harmonika čiji je red veći od n ,
 ΔP_{1k} i ΔP_{2k} – gubici snage koji se za svaki harmonik određuju iz proračuna 2 stacionarna režima (na osnovu analize integralnih karakteristika i uvažavanja ortogonalnosti Furijevega reda), pri modelovanju opterećenja čvorišta preko relacije:

$$P_{1ik} = \frac{A_{Pik}}{\sqrt{2}}, \quad Q_{1ik} = \frac{A_{Qik}}{\sqrt{2}} \quad (29)$$

$$P_{21ik} = \frac{B_{Pik}}{\sqrt{2}}, \quad Q_{21ik} = \frac{B_{Qik}}{\sqrt{2}}$$

Proračun gubitaka energije primenom metode dominirajućih harmonika omogućuje da se izbegnu teškoće vezane za izračunavanje matrice korelacije pri određivanju integralnih karakteristika opterećenja primenom faktorne analize.

Ova metoda spada u najtačnije metode. Greška pri proračunu gubitaka (ukupnih i po elementima mreže) ne prelazi 1%, pri čemu se modelovanje dijagrama opterećenja takođe vrši sa greškom do 1% uz uvažavanje 10 dominirajućih harmonika koji uvažavaju dnevne i sezonske promene opterećenja u toku godine.

U novije vreme pojavljuju se i metode zasnovane na kombinaciji metoda faktorne analize i dominirajućih harmonika, sa programskim realizacijama koje omogućuju ne samo povećanje tačnosti metode već i bitno skraćanje vremena proračuna gubitaka energije u složenim EES.

3 UPOREĐENJE METODA

Aplikacija metoda i njihovo upoređenje sa aspekta tačnosti vršena je na test primeru mreže, čije su dimenzije 16 čvorova (od toga 12 potrošačkih) i 23 grane. Dnevni dijagrami aktivne i reaktivne snage potrošačkih i generatorskih čvorišta aproksimirani su sa 6 stepenica i po pretpostavci ostaju nepromenljivi u toku perioda T , koji je izražen u [h]. Proračun stacionarnih režima u svim metodama vršen je prema standardnom programu za raspodelu snaga i napona CLF-OPF. Vrednost τ određena je iz dijagrama prividne snage za mrežu kao celinu. Rezultati proračuna dati su u Tabeli 3.

3.1. Analiza tačnosti metoda

Na osnovu dobijenih rezultata moguće je izvršiti upoređenje uprošćenih determinističkih metoda i probabilističko-statističkih metoda sa tačnom metodom. Pri tome, treba naglasiti da u izabranom test primeru, primena metode karakterističnog dana dala bi identične rezultate kao etalon metoda, zbog pretpostavke o nepromenljivosti dnevnog dijagrama opterećenja u toku računskog perioda.

Kao što se vidi iz Tabele 3, primena τ -metode za proračun gubitaka energije na test primeru mreže daje grešku 13.22% pri proračunu ukupne veličine gubitaka energije (greška pri određivanju strukture gubitaka je znatno veća i dostiže 92.68%), što je znatno više od zahtevane tačnosti metode (Tabela 1). Isto tako, primena metode srednjih opterećenja (što znači bez uvažavanja disperziona komponente dijagrama opterećenja u računskom periodu) dala je visoke greške: 19.40% kod proračuna ukupne veličine gubitaka energije u mreži i do 90% pri određivanju strukture gubitaka po elementima mreže. Visina greške kod obe metode ograničava njihovu primenu u složenim prenosnim mrežama na domen planiranja dugoročnog razvoja kada proračun gubitaka nije odlučujući faktor za izbor objekata, pa se ne zahteva visoka tačnost metode (a uz to se vrši proračun ukupnih gubitaka u EES-u ili samo jednom njegovom elementu).

S druge strane, primena probabilističko-statističkih metoda praćena je znatno manjim greškama. Tako, pri primeni metode sa faktornim modelovanjem opterećenja čvorišta dobija se greška 1.55% pri proračunu ukupne veličine gubitaka energije, dok pri

određivanju strukture gubitaka po elementima mreže greška se kreće u granicama (0.56-5%), pri čemu se najveće greške javljaju kod slabo opterećenih elemenata mreže.

Tabela 3. Upoređenje metoda za proračun gubitaka energije

Element mreže	Vrednosti izračunatih gubitaka energije ΔW i grešaka (%)								
	Etalon metoda	τ -metoda		Metoda srednjeg opterećenja		Metoda faktorne analize		Metoda dominirajućih harmonika	
	ΔW (MWh)	ΔW (MWh)	Greška (%)	ΔW (MWh)	Greška (%)	ΔW (MWh)	Greška (%)	ΔW (MWh)	Greška (%)
1-2	3.03 T	4.68 T	54.46	1.60 T	47.19	3.05 T	0.66	3.02 T	0.36
1-8	1.80 T	2.37 T	31.67	1.02 T	43.33	1.82 T	1.11	1.81 T	0.56
1-10	0.74 T	0.79 T	6.76	0.14 T	81.08	0.77 T	4.05	0.735 T	0.68
1-16	0.28 T	0.39 T	39.29	0.16 T	42.86	0.29 T	3.57	0.278 T	0.71
2-3	1.77 T	2.30 T	29.95	1.53 T	13.56	1.78 T	0.56	1.76 T	0.56
2-7	0.10 T	0.07 T	30.00	0.01 T	90.00	0.104 T	4.00	0.099 T	0.80
2-11	1.74 T	2.14 T	22.99	1.53 T	12.07	1.76 T	1.15	1.735 T	0.29
2-15	3.08 T	3.74 T	21.43	3.0 T	2.60	3.10 T	0.65	3.07 T	0.32
3-12	0.55 T	0.51 T	7.28	0.46 T	16.36	0.56 T	1.82	0.548 T	0.36
4-7	0.29 T	0.28 T	3.45	0.21 T	27.59	0.30 T	3.45	0.292 T	0.69
4-12	0.52 T	0.47 T	9.62	0.51 T	1.92	0.54 T	3.85	0.523 T	0.58
4-14	2.22 T	1.80 T	18.92	2.20 T	0.90	2.24 T	0.90	2.21 T	0.45
5-9	0.08 T	0.007 T	91.25	0.06 T	25.00	0.084 T	5.00	0.079 T	0.75
5-13	1.37 T	1.93 T	40.88	1.19 T	13.14	1.40 T	2.19	1.38 T	0.73
5-14	0.56 T	0.52 T	7.15	0.54 T	3.57	0.58 T	3.57	0.558 T	0.36
6-8	0.26 T	0.19 T	26.93	0.06 T	76.92	0.27 T	3.84	0.261 T	0.38
6-9	0.46 T	0.86 T	86.96	0.30 T	34.78	0.48 T	4.35	0.458 T	0.43
6-13	1.52 T	0.69 T	54.61	1.50 T	1.32	1.56 T	2.63	1.51 T	0.66
7-13	2.57 T	2.88 T	12.06	2.38 T	7.39	2.60 T	1.17	2.56 T	0.39
7-14	0.39 T	0.24 T	38.46	0.38 T	2.56	0.40 T	2.56	0.392 T	0.51
10-13	0.41 T	0.03 T	92.68	0.36 T	12.20	0.42 T	2.44	0.408 T	0.49
11-12	0.02 T	0.007 T	65.00	0.01 T	50.00	0.021 T	5.00	0.019 T	1.00
Σ	23.76 T	26.90 T	13.22	19.15 T	19.40	24.13 T	1.55	23.71 T	0.23

Primena metode dominirajućih harmonika dala je još niže vrednosti grešaka: 0.29% pri proračunu ukupnih gubitaka energije u mreži i u opsegu (0.29-1.0%) pri proračunu strukture gubitaka po elementima mreže. Tačnost ovih metoda zadovoljava zahteve koji se postavljaju pri proračunu gubitaka energije na različitim vremenskim i hijerarhijskim nivoima upravljanja složenim EES-a.

4 ZAKLJUČCI

Proračun gubitaka električne energije u savremenim mrežama predstavlja složen zadatak. Ova složenost proističe iz činjenice da se parametri režima sistema menjaju u vremenu, pa je za tačan proračun gubitaka energije neophodno obezbediti obimnu informacionu bazu podataka koja u savremenim EES ne postoji. Zbog toga su u praksi našle primenu uprošćene metode koje se među sobom razlikuju po matematičkim modelima, po obimu korišćene baze podataka i tačnosti. U osnovi ovih metoda nalazi se niz matematičkih i algoritamskih pretpostavki koje omogućavaju uprošćenje modela, zamenom realnog procesa promene opterećenja elemenata mreže nekim "računskim", čime se algoritam proračuna gubitaka pojednostavljuje i istovremeno sužava informaciona baza podataka.

Izbor metode zavisi od svrhe proračuna koja uslovljava tačnost metode i u značajnoj meri je uslovljen obimom i kvalitetom polazne informacije o režimima rada mreže.

Usporedna analiza više uprošćenih metoda pokazala je da kod proračuna gubitaka energije u savremenim prenosnim mrežama probabilističko-statističke metode imaju prednost u odnosu na determinističke, posebno pri retrospektivnim analizama gubitaka koje su osnova za razradu mera za njihovo sniženje. Među probabilističko-statističkim metodama posebno mesto zauzimaju metode sa faktornim modelovanjem opterećenja čvorišta i metoda dominirajućih harmonika. Ove metode omogućuju da se uvažavaju promene dijagrama opterećenja čvorišta (elemenata) u računskom periodu i sa visokom tačnošću odredi kako veličina ukupnih gubitaka, tako i njihova struktura.

Dalji razvoj metoda za proračun gubitaka energije treba usmeriti na kombinovanje ove dve metode, uz razradu efikasnih algoritama za mreže velikih dimenzija (posebno prenosne) koji će se primenjivati na različitim vremenskim i hijerarhijskim nivoima upravljanja EES-om.

LITERATURA

- [1] M. Muhsinghe, W. Stott, "Energy Efficiency: Optimization of Electric Power Distribution System Losses", Project No. 633, World Bank, Washington, 1982.
- [2] B.P. Lebedev, "Poteri v <lektri~eskih set]h v stranah Evropw i Severnoj Ameriki", >lektri~eskie stancii, 1995, No 4, str. 57-59
- [3] Vorotnickij, Y.S.@elezko, V.N.Kazancev, V.G.Pekelis, L.D. Fajbisovi~, "Poteri <lektro<nergii v <lektri~eskih set]h <nergosistem", >nergoatomizdat, 1983.
- [4] Y.S.@elezko, "Vwbor meropri]tij po sni`eniy poterx <lektro<nergii v <lektri~eskih set]h", Moskva, >nergoatomizdat, 1989, 176.str.
- [5] E. Radojičić-Turković, M. Turković, I. Jovanović, "Metode za proračun gubitaka električne energije u prenosnim mrežama", XLIII konferencija ETRAN, Zlatibor, 20.-22. septembar 1999.
- [6] Anders G.J., "Probability Concepts in Electric Power Systems", John Wiley and Sons., Inc. 1990.
- [7] G.M. Jenkins, D. Watts, Spectral analysis and its applications, 1972.
- [8] K. Uberla, Faktorenanalyse, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York 1977 (prevod "Mir" - statistika 1980.)
- [9] G.T.Adonc, A.A.Arutyn]n, "Metodw ras~eta i sposobw sni`eni] rashoda <nergii v <lektri~eskih set]h >S", Erevan, 1986, 184.str
- [10] A.A. Afifi, S.P. Azen, "Statistical Analysis a Computer Oriented Approach", Academic Press, NY, USA, 1979, 488.p.
- [11] L.A.Arutyn]n, "Metodika opredeleni] <konomi~eski opravdannogo koli~estva informacii dl] analiza i sni`eni] tehnologi~eskogo rashoda <nergii v <lektri~eskih set]h <nergosistem", Izvesti] AN Arm]nskoj SSR, No 3, 1986.

- [12] Y.V. Jerbina, V.A.Gulevi~, "Metodi~eskie ukazani] po analizu i planirovanij tehnologi~eskogo rashoda <nergii v <lektri~eskih set]h", Kiev, 1981, 108.str
- [13] W. Schmucki, "Metode d'optimisation du niveau des pertes dans les reseaux aeriens a moyenne tension", Bull. SEV. 63, 1972, No. 1, pp. 39-72.
- [14] D. Walter, W. Gert, "Möglichkeiten zur Verringerung der Verluste in den Elektroenergie-Verlungetzen", Energieanwendung, 1986., No. 4, pp. 139-141.
- [15] Goupy, "La methode des plans d' experiences", Dunob, Paris, 1988.
- [16] Lorenzo Fellin, "Risparmi energetici ed economici negli impianti elettrici", L'elettrotecnica, No. 5, 1982.
- [17] M. Radan, C. Tang, "Energy Efficiency Improvement through Management of Line Losses", V Intern. Conference TESLA: III millennium, 1996, pp. 117-127.
- [18] E. Radojičić-Turković, "Analiza gubitaka električne energije primenom β -raspodele, V Intern. Conference TESLA: III millennium, 1996, pp. 109-116
- [19] M. Shing Chen, Yasuo Ohba, L. Reynolds, W.D. Dickson, "Losses in Electrical Power Systems", El. Power Systems Research 1977/78, No. 1, pp. 9-19.
- [20] Elangovan S., "New Approach for Real Power Loss Minimisation", IEE Proceedings, Vol. 130, No. 6, November, 1983, p. 295-299.

Abstract: The review of the methods for analysis of electrical energy losses in complex modern networks is presented in this paper. Two probabilistic-statistical (ps) methods were developed that enables calculation of electrical energy losses on the base analyses of ps characteristics of load and generator buses in period of calculation: method of factor analysis and method of dominant harmonics. The comparative analysis of developed methods and other chosen methods was done on the test example of network. Obtained results lead to consultation on domain of application of analyzed methods.

MATHEMATICAL MODELS FOR ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY LOSSES IN COMPLEX NETWORKS

Emilija Radojičić-Turković, Maja Turković