Broj rada: R5-05
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-05_169

EMPIRIJSKI PRISTUP PROCENI GUBITAKA U DISTRIBUCIONIM SISTEMIMA

AN EMPIRICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF LOSSES IN DISTRIBUTION SYSTEMS

Sarah ZELJKOVIĆ-AŠČERIĆ, Go2Power Consulting, Serbia*
Nenad BELČEVIĆ, Go2Power Consulting, Serbia
Bojan DIMITRIJEVIĆ, MH „ERS“ MP a.d. Trebinje, BiH

KRATAK SADRŽAJ

Precizna procena tehničkih gubitaka u distribucionim mrežama predstavlja ključni element za optimizaciju rada elektroenergetskog sistema i planiranje energetskog bilansa. U ovom radu je predstavljena metodologija proračuna tehničkih gubitaka u srednjenaponskoj distribucionoj mreži. Primenjena metoda zasnovana je na korišćenju savremenih softverskih alata (PSS Sincal) za proračun gubitaka, pri čemu su dijagrami opterećenja formirani na osnovu realnih podataka preuzetih sa SCADA sistema. Rezultati proračuna poređeni su sa mernim vrednostima mreže kao i sa empirijskim relacijama koje se uobičajeno koriste u praksi, čime je evaluirana tačnost metode. Analiza pokazuje da primenjena metodologija daje rezultate koji su u visokoj korelaciji sa stvarnim gubicima i da je pogodna za analizu savremenih distribucionih mreža. Ovaj pristup može doprineti unapređenju planiranja energetskog bilansa, optimizaciji rada distribucionih mreža i smanjenju tehničkih gubitaka u elektroenergetskim sistemima.

Ključne reči: tehnički gubici, distribuciona mreža, empirijske metode, SCADA sistem, PSS Sincal

ABSTRACT

Accurate assessment of technical losses in distribution networks is a key element for optimizing power system operation and energy balance planning. This paper presents a methodology for calculating technical losses in a medium-voltage distribution network. The applied approach is based on the use of advanced software tools (PSS Sincal) for loss calculation, with load profiles constructed using real measurement data obtained from the SCADA system. The calculated results are compared with actual network measurements as well as with empirical relationships commonly used in practice, enabling an evaluation of the accuracy of the proposed method. The analysis shows that the applied methodology yields results with a high correlation to actual losses and is suitable for the analysis of modern distribution networks. This approach can contribute to improved energy balance planning, enhanced operation of distribution networks, and the reduction of technical losses in power systems.

* Sarah Zeljković-Aščerić sarah.zeljkovic@go2power.eu; Nenad Belčević nenad.belcevic@go2power.eu; Bojan Dimitrijević bojan.dimitrijevic@elektrodoboj.net

Keywords: technical losses, distribution networks, empirical methods, SCADA system, PSS Sincal

UVOD

Savremeni trendovi u razvoju elektroenergetskih sistema koji podrazumevaju integraciju distribuiranih izvora i povećanje energetske efikasnosti, nameću potrebu za što preciznijom analizom parametara distributivnih mreža. U tom kontekstu, tehnički gubici električne energije predstavljaju jedan od najznačajnijih indikatora efikasnosti rada sistema. Oni utiču na tehničko stanje elemenata mreže, naponske prilike, planiranje budućeg razvoja, kao i na ekonomsku održivost rada distributivnog preduzeća.

Tradicionalni pristup proceni gubitaka često se oslanjao na uprošćene empirijske formule i procene zasnovane na tipskim dijagramima opterećenja. Međutim, takve metode u današnjim uslovima rada često ne pružaju dovoljnu preciznost. Razvoj pametnih mreža (engl. Smart Grids) i implementacija naprednih sistema, poput SCADA sistema, omogućili su prikupljanje realnih podataka o opterećenju u visokoj vremenskoj rezoluciji.

U ovom radu analizira se metodologija procene tehničkih gubitaka na realnom primeru srednjenaponskog (SN) odlaza 10 kV Žarkovina, koji se nalazi u nadležnosti ooperatora distributivnog sistema ODS „Elektro Doboj" a.d. Doboj. Pomenuti odlaz modelovan je u softverskom alatu PSS Sincal. Kroz istraživanje je prikazana primena empirijske metode za proračun tehničkih gubitaka, dok je evaluacija njene tačnosti izvršena poređenjem sa realnim merenjima preuzetim sa SCADA sistema. Analizom su obuhvaćeni podaci sa samog početka izvoda, kao i pojedinačna merenja za sve transformatorske stanice 10/0,4 kV koje se napajaju sa ovog odlaza. Cilj rada je da se pokaže u kojoj meri savremeni softverski alati, podržani realnim podacima sa terena, mogu unaprediti tačnost proračuna energetskog bilansa.

Energetski gubici u distributivnim mrežama predstavljaju jedan od značajnih pokazatelja efikasnosti rada elektroenergetskog sistema, budući da direktno utiču na tehničke performanse mreže, kvalitet napajanja i ekonomske pokazatelje poslovanja distributivnih preduzeća. U literaturi se gubici najčešće dijele na tehničke i netehničke, pri čemu tehnički gubici nastaju usljed fizičkih procesa u elementima mreže, dok su netehnički gubici povezani sa greškama mjerenja, neovlaštenom potrošnjom i drugim administrativnim faktorima [1], [2]. Veliki broj istraživanja bavi se metodama procjene i smanjenja energetskih gubitaka u distributivnim mrežama. Queiroz i dr. [3] analizirali su problem procjene gubitaka u uslovima ograničene dostupnosti mjernih podataka, dok Keoliya i Vaidya [4] naglašavaju značaj pravilnog modelovanja elemenata mreže i opterećenja pri proračunu tehničkih gubitaka. Savremeniji pristupi zasnivaju se na detaljnim modelima mreže i korištenju podataka iz SCADA sistema, pri čemu se omogućava preciznija analiza rada distributivnih sistema [5], [6]. Pored detaljnih simulacionih metoda, u praksi se često koriste i aproksimativne metode procjene godišnjih gubitaka zasnovane na maksimalnom opterećenju i empirijskim faktorima gubitaka [7], [8]. Takođe, savremena istraživanja sve više pažnje posvećuju mogućnostima smanjenja gubitaka kroz optimizaciju rada distributivnih mreža, rekonfiguraciju mreže i integraciju novih tehnologija [9], [10].

Rad je organizovan kroz nekoliko cjelina. Nakon uvodnog dijela i pregleda teorijske osnove energetskih gubitaka u distributivnim mrežama, prikazana je metodologija proračuna gubitaka korištena u radu. Zatim je dat opis posmatranog testnog sistema, nakon čega su prikazani

simulacioni modeli, rezultati proračuna i njihovo poređenje sa mjerenjima preuzetim iz SCADA sistema.

1 TEHNIČKI GUBICI U DISTRIBUTIVNIM SISTEMIMA

Tehnički gubici u distributivnoj mreži predstavljaju deo električne energije koji se nepovratno gubi u vidu toplote prilikom protoka kroz elemente elektroenergetskog sistema (EES). Ovi gubici su direktna posledica fizičkih karakteristika provodnika, opreme i magnetnih procesa u gvožđu transformatora. Pravilno sagledavanje gubitaka u distributivnoj mreži važno je kako kod planiranja bilansa energije, tako i tokom eksploatacije elektroenergetskog sistema.

U zavisnosti od načina na koji nastaju i veze sa opterećenjem, tehnički gubici se primarno dele na dve kategorije: stalne i promenljive.

1.1 Stalni gubici

Stalni gubici se javljaju čim je oprema pod naponom, bez obzira na to da li postoji protok struje opterećenja ka potrošačima. Prema mjestu nastanka, stalni gubici električne energije u distributivnoj mreži mogu se podijeliti na sljedeći način:

- gubici u željezu transformatora,
- gubici u poprečnim kapacitivnostima vodova,
- gubici u namotajima mjernih transformatora, brojila itd.
- gubici uslijed struje odvodnje na izolatorskim lancima.

Oni zavise od: kvaliteta materijala magnetnog jezgra, naponskog nivoa na sabirnicama (kvadratna zavisnost), učestanosti sistema. Dominantno nastaju u jezgrima transformatora usled procesa histerezisa i vrtložnih struja. Naime, kada je riječ o distributivnim sistemima, praktično je moguće zanemariti ostale izvore stalnih gubitaka (gubitke u poprečnim kapacitivnostima vodova, gubitke u namotajima mjernih transformatora i gubitke uslijed struje odvodnje na izolatorskim lancima).

1.2 Promenljivi gubici

Promenljivi ili strujni gubici nastaju usled protoka struje kroz aktivnu otpornost provodnika i namotaja transformatora. Nazivaju se i Džulovi gubici, a njihova snaga se definiše relacijom:

$$P_{gub} = 3 \cdot R \cdot I^2 \tag{1}$$

gde je:

- R – termogeni otpor provodnika ili namotaja,
- I – struja opterećenja koja teče kroz element.

Kako su ovi gubici srazmerni kvadratu struje, svaka promena u vršnom opterećenju ili debalans faza značajno utiče na njihovu vrednost.

2 METODOLOGIJA PRORAČUNA GUBITAKA

Izbor metode za proračun promenljivih gubitaka u srednjenaponskoj (SN) mreži direktno je uslovljen raspoloživošću ulaznih podataka. U ovom radu primenjena je metoda aproksimativnog dijagrama opterećenja, koja se smatra najpreciznijim pristupom jer predstavlja

diskretizaciju metode integracije. Proračun se zasniva na sumiranju gubitaka u određenim vremenskim intervalima Δt prema relaciji:

$$\Delta W \approx 3 \cdot R \cdot \sum_{i=1}^{n} I_i^2 \cdot \Delta t_i \tag{2}$$

gde su:

- ΔW- gubici električne energije [kWh],
- R – aktivna otpornost elemenata [Ω],
- I_i – struja u posmatranom trenutku [A],
- Δt_i – vremenski interval.

Zahvaljujući SCADA sistemu i programskom alatu PSS Sincal, metodologija je implementirana na satnom nivou. Kako bi se obezbedila reprezentativnost rezultata bez potrebe za simulacijom svakog dana u godini, izvršena je selekcija dvanaest karakterističnih dana (jedan za svaki mesec). Izbor reprezentativnog dana izvršen je na osnovu srednje dnevne energije:

1. Za svaki dan u mesecu izračunata je ukupna plasirana energija na početku odlaza.
2. Određena je srednja vrednost dnevne energije za taj mesec.
3. Za reprezentativni dan usvojen je onaj čija je dnevna energija po vrednosti najbliža izračunatoj srednjoj vrednosti, uz eliminaciju dana sa identifikovanim anomalijama u merenju (npr. prekidi u komunikaciji ili nerealni pikovi).

Za ovu metodu potrebno je imati merenja aktivne i reaktivne snage na početku odlaza, te je potrebno odrediti pojedinačno opterećenje svih SN/NN transformatorskih stanica na razmatranom odlazu. Postupak određivanja opterećenja TS se zasniva na raspodeli ukupne izmerene snage sa početka odlaza na pojedinačne TS, koristeći koeficijente proporcionalnosti k_{ni} koji su definisani na osnovu njihove godišnje potrošnje energije W_{ni}, kao što je prikazano u narednoj relaciji.

$$\frac{P_{ni}}{P_{1i}} = \frac{W_n}{W_1} = k_{n1} \tag{3}$$

S obzirom na to da suma opterećenja svih TS i tehničkih gubitaka mora odgovarati ukupnoj snazi izmerenoj na početku izvoda P_i, primenjen je iterativni postupak:

1. U prvoj iteraciji se zanemaruju gubici, a snaga se raspoređuje na TS samo na osnovu koeficijenata proporcionalnosti. Snaga referentne stanice P_{1i} u prvoj iteraciji se računa iz relacije (5), koja je dobijena iz (4).

$$P_i = P_{1i}^{(1)} + k_{21} \cdot P_{1i}^{(1)} + k_{31} \cdot P_{1i}^{(1)} + \cdots + k_{n1} \cdot P_{1i}^{(1)} \tag{4}$$

$$P_{1i}^{(1)} = \frac{P_i}{1 + \sum k_{n1}} \tag{5}$$

Rezultat simulacije u softveru PSS Sincal tada pokazuje veći tok snage na početku izvoda od stvarno izmerenog $P_{i(Sincal)}^{(1)} > P_i$.

2. U narednim iteracijama vrednosti snaga na TS se postepeno koriguju (smanjuju) za vrednost ΔP sve dok se proračunati tok snage na početku izvoda u softveru ne izjednači sa vrednošću preuzetom sa SCADA sistema.

3. Kao konačni rezultat se dobiju satna opterećenja za sve TS uz uvažavanje gubitaka snage u mreži.

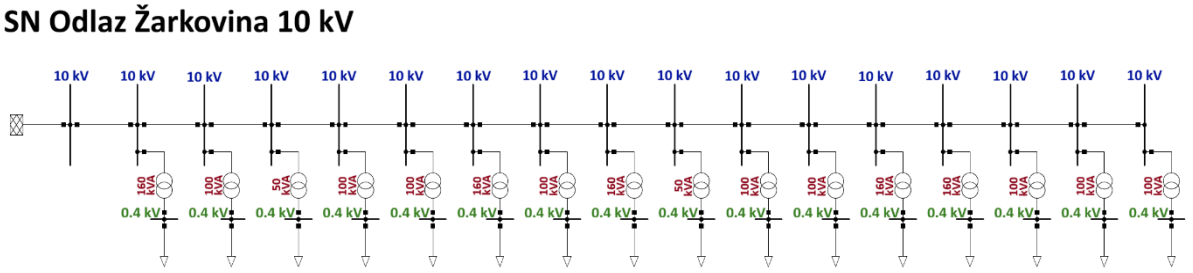
Obzirom na to da je prethodno opisani postupak potrebno sprovesti za svih dvanaest karakterističnih dana, manuelni proračun bi bio nepraktičan. U okviru ovog rada, razvijen je namenski softverski alat u programskom jeziku Python. Ovaj alat automatski pokreće iterativni postupak, vrši simulacije tokova snaga u PSS Sincal programu, te spašava rezultate u posebnom Excel formatu, nakon čega je moguće izračunati ukupne gubitke u razmatranom sistemu.

3 TESTNI SISTEM

U ovom radu simulacije su vršene na modelovanom SN odlazu 10kV Žarkovina u programskom paketu PSS Sincal. Odlaz 10 kV Žarkovina posmatran je od njegove napojne tačke (sabirnice u transformatorskoj stanici TS 35/10 kV Žarkovina) pa sve do najudaljenijih ogranaka. Ukupno je modelovano 16 transformatorskih stanica 10/0.4 kV koje su radijalno raspoređene duž voda.

Radi lakše unosa podataka, kao i lakše analize, potrošači prikačeni na niskonaponsku stranu transformatorskih stanica su ekvivalentirani jednim potrošačem.

Modelovani sistem prikazan je na narednoj slici.

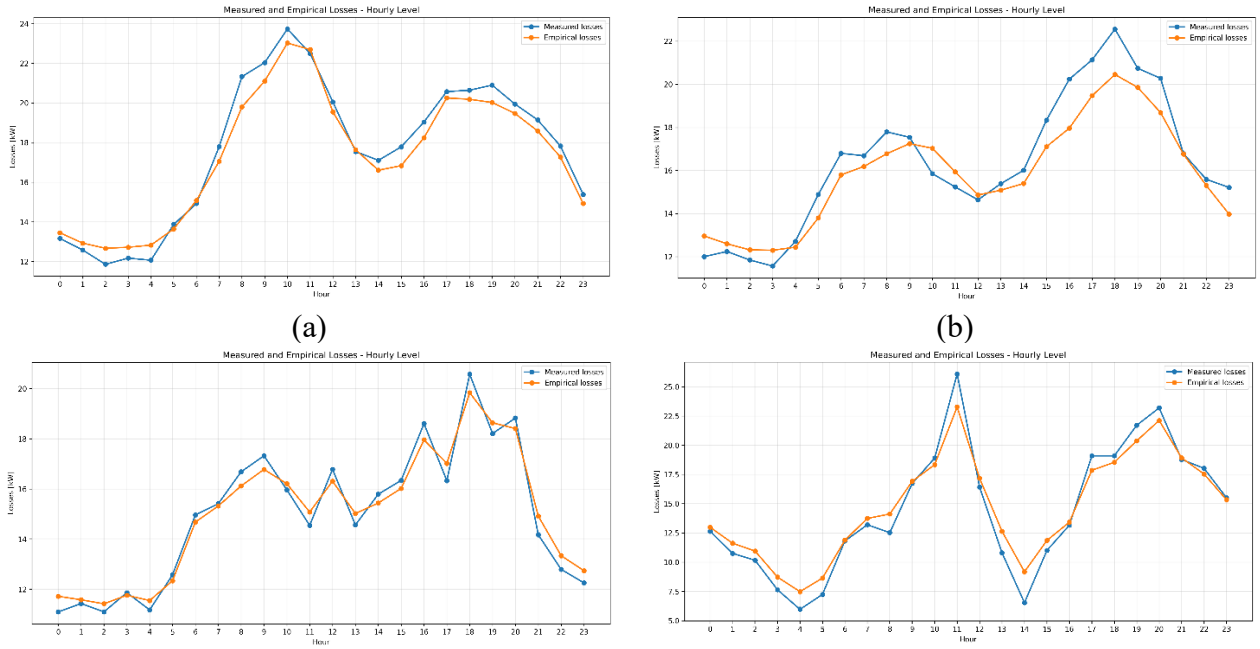


Slika 1 – Modelovani sistem SN odlaza Žarkovina 10kV

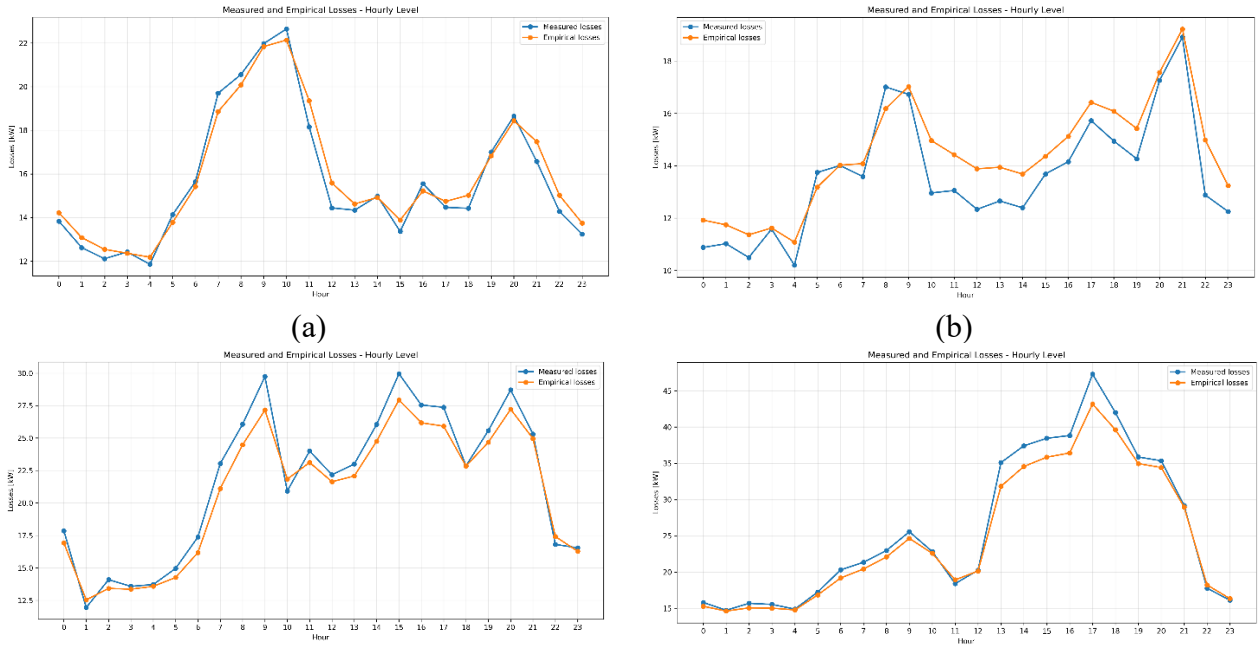
4 SIMULACIJA I REZULTATI

Za potrebe analiza ovog rada, za svaki od 12 meseci odabran je po jedan karakterističan dan, na osnovu očitanja koja su dobijena sa SCADA sistema. Za te karakteristične dane su izračunati stvarni gubici, kao i gubici dobijeni prethodno opisanom metodom u radu. Na osnovu dobijenih rezultata izvršeno je poređenje merenih i proračunatih vrednosti gubitaka, kako bi se procijenio stepen podudaranja modela sa stvarnim pogonskim stanjem mreže.

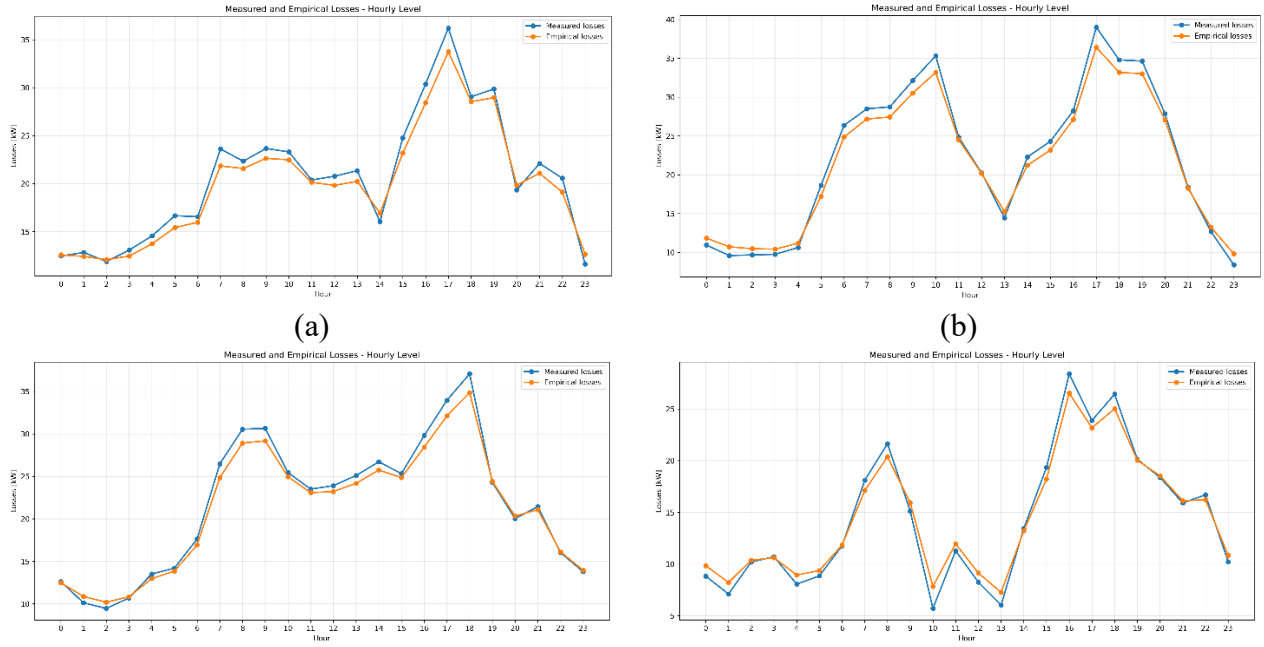
Na narednim slikama su prikazani rezultati za svih 12 meseci.



Slika 2 – Mereni i empirijski gubici snage u mreži za mesec: (a) Januar, (b) Februar, (c) Mart, (d) April



Slika 3 – Mereni i empirijski gubici snage u mreži za mesec: (a) Maj, (b) Juni, (c) Juli, (d) Avgust



Slika 4 – Mereni i empirijski gubici snage u mreži za mesec: (a) Septembar, (b) Oktobar, (c) Novembar, (d) Decembar

Dobijeni rezultati pokazuju da proračunski model uspješno reprodukuje osnovni oblik dnevnih dijagrama gubitaka, kao i promene nivoa gubitaka usled promene opterećenja tokom dana. Uočava se dobro poklapanje trendova između merenih i proračunatih vrijednosti, naročito u periodima srednjeg i povećanog opterećenja mreže. Model pravilno prati porast gubitaka u vršnim satima, kao i njihovo smanjenje tokom perioda nižeg opterećenja.

Najveća odstupanja između merenih i proračunatih vrednosti prisutna su u režimima izrazito visokog ili izrazito niskog opterećenja. Navedena odstupanja mogu se objasniti ograničenjima raspoloživih podataka o stvarnim parametrima pojedinih elemenata distributivne mreže, pojednostavljenjima usvojenim prilikom modelovanja, kao i nemogućnošću potpunog obuhvata svih promjena pogonskih stanja i potrošačkih režima tokom rada mreže.

Ukupna suma gubitaka određenih na osnovu SCADA merenja iznosila je 5254.83 kW, dok su ukupni gubici dobijeni proračunom u softveru SINCAL iznosili 5179.84 kW. Ostvareno odstupanje od približno 1.43 % potvrđuje da razvijeni model distributivne mreže daje zadovoljavajuću aproksimaciju realnog pogonskog stanja sistema.

4.1 Poređenje sa metodom maksimalnih opterećenja i vremena maksimalnih gubitaka

Metoda maksimalnog opterećenja i ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka predstavlja jednu od najčešće korištenih aproksimativnih metoda za procenu godišnjih energetskih gubitaka u distributivnim mrežama. Metoda se zasniva na određivanju gubitaka snage pri maksimalnom opterećenju posmatranog elementa mreže, nakon čega se godišnji gubici energije procenjuju korištenjem ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka τ, prema narednim relacijama [11].

$$\tau_1 = 0.17 \cdot T_{max} + 0.83 \cdot \frac{T_{max}^2}{8760} \quad (6)$$

$$\tau_2 = \left(0.124 + \frac{T_{max}}{10000}\right)^2 \cdot 8760 \quad (7)$$

$$\tau_2 = \left(T_{max} + \frac{T_{max}^{\ 2}}{2920}\right)^2 \cdot 0.25 \quad (8)$$

U Tabeli I su prikazani rezultati proračuna ukupnih godišnjih gubitaka za sva tri vremena trajanja maksimalnih gubitaka, kao i ukupni godišnji gubici dobijeni metodom aproksimativnih dijagrama opterećenja i stvarni gubici u sistemu, izračunati na osnovu dobijenih merenja sa SCADA sistema.

Tabela I – Rezultati ukupnih godišnjih gubitaka za sve tri metode

Metoda	**Ukupni gubici [MWh]**
τ_1	145.62
τ_2	151.84
τ_3	148.73
Aproksimativni dijagram opterećenja	157.55
Stvarni gubici	159.83

Rezultati prikazani u tabeli pokazuju da metode maksimalnih opterećenja i vremena maksimalnih gubitaka daju nešto niže vrednosti godišnjih energetskih gubitaka u odnosu na stvarne gubitke određene na osnovu SCADA merenja. Dobijene vrednosti kreću se u opsegu od približno 145 MWh do 152 MWh, pri čemu metoda τ_2 daje rezultate najbliže stvarnim gubicima. Navedena odstupanja su očekivana, budući da se ove metode zasnivaju na pojednostavljenim pretpostavkama o režimu opterećenja i koriste empirijske izraze za procenu ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka.

Sa druge strane, metoda zasnovana na aproksimativnom dijagramu opterećenja daje rezultate znatno bliže stvarnim godišnjim gubicima, pri čemu odstupanje u odnosu na SCADA merenja iznosi svega nekoliko procenata. Dobijeni rezultati potvrđuju da detaljniji prikaz promene opterećenja tokom vremena omogućava precizniju procenu energetskih gubitaka u distributivnoj mreži.

5 ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izvršena je analiza tehničkih gubitaka u distributivnoj mreži 10 kV korištenjem modela razvijenog u softveru PSS Sincal, uz poređenje sa stvarnim merenjima preuzetim iz SCADA sistema. Za svaki mesec u godini odabran je po jedan karakterističan dan, na osnovu kojeg su analizirani tokovi snaga i gubici električne energije.

Dobijeni rezultati pokazali su dobro poklapanje između merenih i proračunatih vrednosti gubitaka, naročito u režimima srednjeg i povećanog opterećenja mreže. Uočena odstupanja

mogu se objasniti ograničenom raspoloživošću podataka o stvarnim parametrima elemenata mreže, kao i pojednostavljenjima usvojenim prilikom modelovanja.

Analiza je pokazala da nivo gubitaka značajno zavisi od režima opterećenja distributivne mreže, pri čemu su najveći gubici registrovani u periodima vršnog opterećenja. Pored detaljnog simulacionog pristupa, u radu je razmatrana i aproksimativna metoda maksimalnih opterećenja i vremena trajanja maksimalnih gubitaka, čime je omogućeno dodatno poređenje i validacija rezultata.

Na osnovu sprovedenih analiza može se zaključiti da razvijeni model predstavlja dobru osnovu za procenu tehničkih gubitaka i analizu rada distributivne mreže u različitim pogonskim režimima.

LITERATURA

[1] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, “Real-time demand response model,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, 2010.
[2] J. R. Agüero, “Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction,” in *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2012.
[3] L. M. O. Queiroz, C. Cavellucci, C. Lyra, and C. A. Castro, “Energy losses estimation in power distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1879–1887, 2012.
[4] J. A. Keoliya and G. A. Vaidya, “Estimation of technical losses in a distribution system,” *Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 2621–2626, 2013.
[5] A. R. A. Manito, et al., “Technical and non-technical losses calculation in distribution grids using a defined equivalent operational impedance,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 8, pp. 1315–1323, 2019.
[6] Council of European Energy Regulators, *2nd CEER Report on Power Losses*, CEER, 2020.
[7] M. W. Gustafson and J. S. Baylor, “Approximating the system losses equation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 850–855, 1989.
[8] J. S. Baylor, M. W. Gustafson, and L. L. Houghton, “Distribution system load characteristics for losses and load modeling,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 2, pp. 142–148, 1986.
[9] E. H. Sadiq and R. K. Antar, “Minimizing power losses in distribution networks: A comprehensive review,” *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 20–36, 2024.
[10] P. Parvizi, et al., “Technical losses in power networks: mechanisms, mitigation strategies, and future directions,” *Electronics*, vol. 14, no. 17, Article 3442, 2025.
[11] M. Hajro, S. Bišanović, “Industrijski i distributivni elektroenergetski sistemi”, Sarajevo, BiH, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevo, 2012.
[12] MEDREG, *Regulatory Practices on Handling Technical and Non-Technical Losses for Electricity*, Consumer Working Group, “Empowering Mediterranean regulators for a common energy future.”