Broj rada: R5-08
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-08_260

ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA I PERFORMANSI LINIJSKE REGULACIJE NAPONA NA DUGIM NISKONAPONSKIM IZVODIMA

VOLTAGE PROFILE ANALYSIS AND PERFORMANCE OF LINE VOLTAGE REGULATION ON LONG LOW-VOLTAGE FEEDERS

Saša Đekić, ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj, RS/BiH*
Zdravko Todorović, ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj, RS/BiH

KRATAK SADRŽAJ

Dugi niskonaponski izvodi predstavljaju značajan izazov u radu distributivnih mreža, posebno u ruralnim područjima sa velikim rastojanjima između transformatorskih stanica i krajnjih korisnika. Zbog relativno velikih impedansi vodova i neravnomjerne raspodjele opterećenja, često dolazi do značajnih padova napona i pogoršanja kvaliteta električne energije, naročito u uslovima promjenljivog opterećenja i specifičnih sezonskih režima rada mreže. U cilju unapređenja naponskih prilika na dugim NN izvodima, sve češće se primjenjuju linijski regulatori napona koji omogućavaju lokalnu korekciju naponskog nivoa duž izvoda. Iako predstavljaju efikasno rješenje za poboljšanje naponskog profila, njihova primjena zahtijeva detaljnu analizu stvarnih pogonskih uslova i efekata na rad mreže. U ovom radu prikazana je analiza naponskih prilika i performansi linijske regulacije napona na dugom NN izvodu napajanom iz distributivne transformatorske stanice. Analiza je zasnovana na terenskim mjerenjima napona i struja na karakterističnim tačkama mreže, uključujući izlaz iz transformatorske stanice, lokaciju regulatora napona i priključna mjesta krajnjih korisnika. Izvršen je proračun padova napona duž izvoda na osnovu poznatih parametara vodova i izmjerenih opterećenja, kao i analiza simetričnih komponenti napona i struja. Posebna pažnja posvećena je analizi raspodjele struja po faznim i neutralnom provodniku, kao i uticaju konfiguracije mreže i načina uzemljenja na naponske prilike. Takođe su analizirane radne karakteristike regulatora napona u različitim režimima rada, uključujući i pojavu struja u režimu praznog hoda. Rezultati mjerenja i proračuna omogućili su procjenu efekata primjene linijske regulacije napona i identifikaciju pojava koje mogu uticati na performanse sistema. Rezultati rada pružaju praktičnu osnovu za unapređenje planiranja i eksploatacije dugih NN izvoda i optimalnu primjenu linijskih regulatora napona u realnim distributivnim mrežama.

Ključne reči: niskonaponska mreža, radijalni izvodi, linijski regulatori napona

ABSTRACT

Long low-voltage (LV) feeders represent a significant challenge in the operation of distribution networks, particularly in rural areas with large distances between distribution transformer stations and end users. Due to relatively high line impedances and uneven load distribution, significant voltage drops and deterioration of power quality frequently occur, especially under varying load conditions and specific seasonal operating regimes. In order to improve voltage conditions along long LV feeders, line voltage regulators are increasingly applied, enabling local correction of voltage levels along the feeder. Although these devices represent an effective solution for improving the voltage profile, their implementation requires detailed analysis of actual operating conditions and their impact on network performance. This paper presents an analysis of voltage conditions and the performance of line voltage regulation on a long LV feeder supplied from a distribution transformer station. The analysis is based on field measurements of voltages and currents at characteristic points in the network, including the transformer station outgoing feeder, the voltage regulator location, and end-user connection points. Voltage drop calculations along the feeder were performed based on known line parameters and measured load conditions, along with an analysis of voltage and current symmetrical components. Special attention is given to the analysis of current distribution in phase and neutral conductors, as well as the impact of network configuration and grounding

* Dr Saša Đekić, ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj, Nikole Pašića 77, 74000 Doboj, RS/BiH, sasa.b.djekic@elektrodoboj.net

arrangements on voltage conditions. The operating characteristics of the voltage regulator under different operating regimes were also analyzed, including the presence of no-load currents. The measurement and calculation results enabled the assessment of the actual effects of line voltage regulation and the identification of specific phenomena that may influence overall system performance. The results of this study provide a practical basis for improving the planning and operation of long LV feeders and for the optimal application of line voltage regulators in real distribution networks.

Key words: low-voltage network, radial feeders, line voltage regulators

1. UVOD

Dugi niskonaponski radijalni izvodi predstavljaju jedan od značajnijih tehničkih izazova u radu savremenih distributivnih mreža, naročito u dijelovima sistema sa izraženim ruralnim karakteristikama. Velika rastojanja između transformatorskih stanica i krajnjih korisnika, relativno visoke impedanse vodova, neravnomjerna raspodjela monofaznih opterećenja, kao naslijeđeni problem, i posljedična nesimetrija struja i napona često dovode do izraženih padova napona, pogoršanja kvaliteta električne energije i ograničenja u pogledu priključenja novih korisnika i dodatnih opterećenja.

Iako je ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj u prethodnom višegodišnjem periodu realizovao značajna ulaganja u modernizaciju distributivne mreže, uključujući potpunu rekonstrukciju niskonaponske mreže zamjenom dotrajalih vodova samonosivim kablovskim snopovima (SKS) na armiranobetonskim stubovima, modernizaciju transformatorskih stanica, unapređenje sistema upravljanja i nadzora, digitalizaciju mjernih mjesta i procesa očitanja, određeni dijelovi niskonaponske mreže i dalje predstavljaju poseban tehnički izazov. Posebno se izdvajaju dugi radijalni izvodi u ruralnim područjima, koji predstavljaju naslijeđenu mrežnu infrastrukturu razvijanu u ranijim periodima, karakterističnu po velikim rastojanjima između korisnika, maloj gustini naseljenosti i izraženim ograničenjima u pogledu ekonomičnosti izgradnje novih TS. U takvim uslovima izgradnja novih trafostanica i značajnije skraćenje izvoda često nije tehnički jednostavno niti ekonomski opravdano, posebno u područjima sa manjim brojem korisnika i ograničenim rastom potrošnje. Dodatnu složenost u posljednjim godinama donosi intenzivnije priključenje distribuiranih izvora energije, a posebno fotonaponskih elektrana, koje u određenim dijelovima dana utiču na promjenu tokova snaga i naponskih prilika u mreži.[1] U pojedinim slučajevima navedene promjene zahtijevale su intervencije na regulacionim preklopkama energetskih transformatora radi održavanja napona u dozvoljenim granicama. Međutim, u uslovima dugih radijalnih izvoda, izražene nesimetrije opterećenja i vršnih režima potrošnje, problemi nedovoljnog napona na udaljenim krajevima mreže ostaju jedan od ključnih izazova distributivnih sistema.

U cilju poboljšanja naponskog profila na dugim niskonaponskim izvodima, u praksi se sve češće primjenjuju linijski regulatori napona (VROT), čija je osnovna namjena lokalna korekcija naponskog nivoa na kritičnim dijelovima mreže. Ipak, stvarni efekti njihove primjene u realnim pogonskim uslovima, naročito u ruralnim mrežama sa izraženom nesimetrijom opterećenja i promjenljivim režimima rada, zahtijevaju detaljnu analizu zasnovanu na terenskim mjerenjima i inženjerskim proračunima.

Predmet ovog rada je analiza naponskih prilika na karakterističnom dugom niskonaponskom ruralnom izvodu, sa posebnim osvrtom na efekte primjene linijskog regulatora napona, analizu padova napona, nesimetrije struja i napona, kao i procjenu stvarnih pogonskih performansi u uslovima realne distributivne mreže.

2. KARAKTERISTIKE DISTRIBUTIVNE MREŽE I OPIS POSMATRANOG NN PODRUČJA

1.1 Karakteristike distributivnog sistema ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj

ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj obavlja djelatnost distribucije električne energije na području sjevernog dijela Republike Srpske i Bosne i Hercegovine, koje je većim dijelom obuhvaćeno regijom Posavine i slivovima rijeka Bosne, Ukrine, Usore i Spreče. Teritoriju koju pokriva preduzeće karakteriše izrazita geografska raznolikost – od ravničarskih područja na sjeveru, do brdsko-planinskih terena u južnim dijelovima, što značajno utiče na konfiguraciju i eksploatacione uslove distributivne mreže. Distributivna mreža ODS „Elektro Doboj“ obuhvata 35 kV, 10 kV i 0,4 kV naponske nivoe, sa ukupnom dužinom vodova od preko 10.000 km. Mreža srednjeg napona (35 kV i 10 kV) ima ukupnu dužinu od oko 1989,67 km, od čega je 1465,92 km nadzemnih i 523,75 km podzemnih vodova. Niskonaponska (0,4 kV) mreža je dominantno razvijena kao nadzemna i ima ukupnu dužinu od 8162,34

km, pri čemu na nadzemne vodove otpada 7949,67 km, dok podzemni kablovski vodovi čine svega oko 2,2% (212,67 km). Značajno učešće provodnika presjeka 70 mm² (oko 78,4%) u niskonaponskoj mreži ukazuje na standardizovan pristup izgradnji, ali istovremeno i na ograničenja u pogledu prenosne sposobnosti i padova napona na dužim izvodima. Transformatorski park obuhvata značajan broj trafostanica različitih naponskih nivoa. Na nivou 10/0,4 kV instalisano je 1563 trafostanica ukupne snage 231.574 kVA, dok na nivou višeg napona (35/10 kV) postoji 16 trafostanica. Ovakva struktura ukazuje na razgranat i hijerarhijski dobro organizovan distributivni sistem. Prosječna dužina niskonaponskih izvoda na nivou ODS „Elektro Doboj“ iznosi oko 0,775 km, što je iznad prosjeka za posmatrani region. U pojedinim distributivnim područjima, kao što je Modriča, ovi izvodi spadaju među najduže u regionu jugoistočne Evrope. Ovakva konfiguracija mreže direktno utiče na povećane padove napona, naročito u uslovima vršnog opterećenja, i predstavlja jedan od ključnih razloga za primjenu dodatnih tehničkih rješenja, kao što su linijski regulatori napona.

Pored dužine izvoda, značajan uticaj na rad niskonaponske mreže ima i nesimetrična raspodjela opterećenja. U posmatranoj mreži, koja je karakteristična po velikom učešću monofaznih potrošača, nesimetričnost je izražena i kvantitativno potvrđena. Prema podacima iz prethodnih analiza i studijskih istraživanja, prosječan nivo nesimetričnosti struja (izražen odnosom inverzne i direktne komponente) procijenjen je na oko 21% na nivou ODS „Elektro Doboj“, sa vrijednostima koje u pojedinim područjima dostižu i do 30%, dok se minimalne procijenjene vrijednosti kreću oko 15% [2]. Ovako izražena nesimetričnost ima nelinearan uticaj na gubitke u mreži, pri čemu dolazi do značajnog povećanja gubitaka već pri nivou nesimetričnosti većem od 20%. Pored toga, ona dovodi do povećanih struja u neutralnom provodniku, neravnomjernog opterećenja faza i dodatnog pogoršanja naponskih prilika na krajevima izvoda.

Iako su polazne analize nivoa nesimetričnosti zasnovane na sveobuhvatnoj regionalnoj studiji [2], primjena savremenih tehničkih rješenja i kontinuirana optimizacija u ODS „Elektro Doboj“ ukazuju na trend poboljšanja u pogledu navedenog. ODS „Elektro Doboj“ snabdijeva više od 100.000 aktivnih korisnika, pri čemu je stepen digitalizacije sistema izuzetno visok. U sistemu daljinskog očitanja integrisano je preko 98% mjernih mjesta (102.621 od ukupno 104.478), što predstavlja jedan od najviših stepena automatizacije u regionu. Ovakav nivo digitalizacije omogućava pristup velikoj količini realnih podataka o potrošnji, opterećenjima i naponskim prilikama u mreži u realnom vremenu. Posebno je značajno istaći da ODS „Elektro Doboj“ ostvaruje distributivne gubitke električne energije ispod 5%, što ukazuje na visok nivo tehničke i organizacione efikasnosti u upravljanju mrežom. Ovaj rezultat je direktna posljedica kontinuiranog unapređenja sistema mjerenja, optimizacije rada mreže i primjene savremenih tehničkih rješenja. Uprkos činjenici da ODS „Elektro Doboj“ ostvaruje veoma dobre ukupne tehničke pokazatelje, uključujući niske distributivne gubitke i visok stepen digitalizacije, navedene strukturne karakteristike niskonaponske mreže – prije svega velike dužine izvoda i izražena nesimetričnost – predstavljaju ključne izazove u obezbjeđenju kvaliteta napona u realnim pogonskim uslovima.

2.1 Opis posmatrane NN mreže

Analiza prikazana u ovom radu odnosi se na jedno atipično ruralno područje sa izraženom disperzijom potrošača i dominantno jednofaznim opterećenjem. Od transformatorske stanice do lokacije linijskog regulatora napona (VROT) izvod je realizovan samonosivim kablovskim snopom tipa SKS 3x70+50 mm² Al, dužine oko 1350 m. Od lokacije regulatora do posmatranog krajnjeg korisnika izvod se nastavlja istim tipom provodnika u dužini od približno 620 m, dok je priključni vod korisnika izveden provodnikom tipa SKS 4x16 mm² Al, dužine oko 25 m. U cilju poboljšanja naponskih prilika na krajevima izvoda, na međupoložaju je instaliran linijski regulator napona (VROT), čija je funkcija lokalno povećanje naponskog nivoa u zavisnosti od opterećenja i ulaznog napona. Regulator je uključen u seriju sa izvodom i utiče na promjenu naponskog profila nizvodno od svoje lokacije. Mjerenja su vršena na četiri karakteristične tačke u mreži: na izlazu iz transformatorske stanice, na ulazu i izlazu iz linijskog regulatora napona, na priključnom mjestu krajnjeg korisnika. Na svim mjernim mjestima registrovane su vrijednosti faznih napona i struja, kao i struja neutralnog provodnika, uz dodatnu obradu simetričnih komponenti napona i struja. Posebna pažnja posvećena je mjerenjima u različitim režimima opterećenja, uključujući periode povećanog opterećenja karakteristične za ljetni režim rada. Posmatrana mreža karakteriše izražena nesimetrija opterećenja, uslovljena dominantnim jednofaznim potrošačima, što dodatno utiče na raspodjelu struja i pojavu struja u neutralnom provodniku. Takođe, u mreži postoje višestruke tačke uzemljenja, što može imati uticaj na tokove struja i raspodjelu potencijala duž izvoda. Ovakva konfiguracija mreže predstavlja pogodan primjer za analizu naponskih prilika i evaluaciju efekata primjene linijske regulacije napona u realnim pogonskim uslovima.

Tabela 2.1 - Segmenti mreže i njihova specifikacija

Segment	Dužina	Provodnik	Napomena
TS – WROT	1350 m	3x70 + 50 mm² Al	Glavni NN vod
WROT – korisnik	620 m	3x70 + 50 mm² Al	Isti tip kabla
Priključak korisnika	25 m	4x16 mm² Al	Priključni vod

3. METODOLOGIJA

Analiza naponskih prilika i strujnog opterećenja na posmatranom niskonaponskom (NN) izvodu zasnovana je na integrisanom metodološkom pristupu koji objedinjuje analitičke proračune trofaznog nesimetričnog režima, metodu simetričnih komponenti i kontinualna terenska mjerenja u realnim pogonskim uslovima. Ovako definisan koncept omogućava sveobuhvatno sagledavanje naponskog profila duž izvoda, verifikaciju teorijskih modela, kao i preciznu kvantifikaciju uticaja linijskog regulatora napona.

U cilju sprovođenja predmetne analize, prvi autor rada izvršio je razvoj i implementaciju prilagođenog proračunskog modela za procjenu pada napona u nesimetričnim pogonskim režimima niskonaponskih distributivnih mreža, zasnovanog na integraciji standardnih inženjerskih aproksimacija i modifikovanog pristupa simetričnim komponentama.

U okviru analitičkog dijela istraživanja, izvršen je proračun padova i porasta napona po fazama duž pojedinačnih segmenata izvoda, na osnovu topologije mreže i poznatih longitudinalnih parametara vodova, uzimajući u obzir i aktivni i reaktivni otpor provodnika dominantnog presjeka 70 mm².

S obzirom na izraženo učešće jednofaznih potrošača, primijenjena je metoda simetričnih komponenti za transformaciju faznih veličina (napona i struja) u direktni, inverzni i nulti sistem. Ovaj korak je ključan za kvantitativnu procjenu stepena nesimetrije i analizu strujnih tokova kroz neutralni provodnik, što direktno utiče na dodatne gubitke i deformaciju naponskog profila u uslovima realnog pogona.

Empirijski dio istraživanja obuhvata simultana terenska mjerenja električnih veličina izvršena na ključnim tačkama sistema: na sabirnicama 0,4 kV u napojnoj trafostanici, na ulaznim i izlaznim terminalima linijskog regulatora napona, te na priključnom mjestu ekonomski i geografski najudaljenijeg kupca. Mjerenja su obuhvatila efektivne vrijednosti faznih napona, faznih struja i struje neutralnog provodnika.

4. REZULTATI MJERENJA I ANALIZA

4.1. Formulacija problema i ograničenja klasičnog inženjerskog pristupa

U cilju kvantitativne analize uticaja dužine niskonaponskih vodova i nesimetrije opterećenja na kvalitet napona, posmatran je specifičan, ali u praksi najnepovoljniji pogonski scenario: radijalni rad niskonaponskog izvoda izvedenog samonosećim kablovskim snopom dominantnog presjeka, na čijem se kraju nalazi koncentrisano jednofazno opterećenje poznate aktivne snage i faktora snage.

U prvoj fazi analize primijenjen je konvencionalni inženjerski proračun pada napona za jednofaznu petlju. Ovaj model se u širokoj praksi koristi zbog svoje jednostavnost. Proračun uzima u obzir podužnu aktivnu otpornost provodnika i struju opterećenja, pri čemu se povratni put kroz neutralni provodnik posmatra linearno, odnosno kroz puko udvostručivanje dužine voda.

$$u(\%) = \frac{200}{U_f^2}(r + x tan\varphi) \sum_{i=1}^{i=n} P_i l_i \qquad (1)$$

S obzirom na to da se na posmatranom distributivnom području uglavnom koristi samonoseći kablovski snop većeg presjeka, reaktivni otpor voda počinje da dobija na značaju, iako aktivna otpornost i dalje ostaje dominantna.

4.2. Kvantifikacija uticaja nesimetrije primjenom metode simetričnih komponenti

Realni pogonski uslovi u niskonaponskim mrežama sa izraženim učešćem jednofaznih i dvofaznih potrošača korisnika suštinski odstupaju od pretpostavljene simetrije. Kada kroz izvod teče nesimetrična struja, dolazi do

značajnog strujnog opterećenja neutralnog provodnika. To uzrokuje pad napona na neutralnom provodniku i posljedično pomjeranje, odnosno „plivanje“ neutralne tačke na kraju voda. Ovaj fenomen direktno deformiše fazne napone kod krajnjih kupaca – na opterećenoj fazi dolazi do dodatnog i drastičnog pada napona, dok na neopterećenim fazama može doći do neželjenog porasta napona.

Da bi se ovaj uticaj egzaktno matematički obuhvatio, u radu je primijenjena modifikovana metoda simetričnih komponenti. Transformacijom faznih veličina nesimetričnog monofaznog potrošača dobija se sistem u kojem su direktna, inverzna i nulta komponenta struje jednake po intenzitetu i fazi. Ključna prednost ovog pristupa leži u činjenici da se pad napona posmatra preko sopstvenih i međusobnih impedansi vodova, uvažavajući nultu impedansu sistema.

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

$$I_D = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2 I_c) \quad (2)$$

$$I_I = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + aI_c)$$

$$U_D = U_f - Z_D I_D$$

$$U_I = 0 - Z_I I_I \quad (3)$$

$$U_0 = 0 - Z_0 I_0$$

Međutim, u okviru analize nesimetrije u trofaznim distributivnim sistemima, često se u praksi raspolaže isključivo RMS vrijednostima faznih struja |Ia|,|Ib|,|Ic|, bez dostupnih faznih uglova. Takav skup podataka nameće značajna ograničenja u primjeni klasične Fortescue metode simetričnih komponenti, što direktno utiče na tačnost i interpretabilnost rezultata.

Pri čemu, u niskonaponskim nadzemnim i kablovskim mrežama, nulta impedansa je zbog specifičnosti povratnog puta kroz zemlju i neutralni provodnik višestruko veća od direktne impedanse. Zbog toga, pojava nulte komponente struje nelinearno uvećava ukupni efektivni pad napona na opterećenoj fazi.

Dobijeni rezultati pokazuju da se kod dugih niskonaponskih izvoda sa izraženom nesimetrijom opterećenja stvarni padovi napona mogu značajno razlikovati od vrijednosti dobijenih klasičnim aproksimativnim proračunima zasnovanim na pretpostavci simetričnog režima rada. U predmetnom slučaju, proračun zasnovan na simetričnim komponentama pokazao je znatno bolje slaganje sa izmjerenim vrijednostima napona na kraju izvoda, potvrđujući dominantan uticaj nesimetrije opterećenja na raspodjelu struja i naponske prilike.

Slični zaključci prisutni su i u dostupnoj literaturi [3], gdje je pokazano da pri istoj ukupnoj snazi izvoda povećanje stepena nesimetrije može dovesti do višestrukog povećanja struja u pojedinim fazama i značajno većih padova napona u odnosu na idealizovani simetrični slučaj. Navedeni rezultati dodatno potvrđuju opravdanost rigoroznijeg pristupa analizi dugih ruralnih NN izvoda, posebno u mrežama sa dominantno monofaznim opterećenjima.

4.3. Evaluacija pogonskog stanja i tehno-ekonomska opravdanost ugradnje VROT-a

U cilju direktne aplikativne verifikacije razvijenog rigoroznog modela na realnom konzumnom području ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj, razmatran je specifičan radijalni niskonaponski izvod izveden samonosećim kablovskim snopom Al SKS 3x70+50 mm². Ukupna udaljenost najudaljenijeg krajnjeg korisnika od napojne transformatorske stanice iznosi približno 1970 m, pri čemu je na udaljenosti od 1350 m u sistem, integrisan linijski regulator napona (VROT).

Za potrebe analize usvojen je mjerodavan režim maksimalnog vršnog opterećenja od 54 kW, dok su strujna opterećenja najopterećenije faze, za različite stepene realne nesimetrije (od idealno simetričnog do ekstremnog režima 60/20/20%), obrađena.
Radi procjene primjenjivosti predloženog modifikovanog pristupa zasnovanog na simetričnim komponentama izvršeno je poređenje sa standardnim inženjerskim formulama za proračun pada napona u niskonaponskim distributivnim mrežama. Analiza je provedena za različite stepene fazne neuravnoteženosti opterećenja i dvije

karakteristične dužine voda (600 m i 1350 m), pri čemu je kao referentna veličina posmatran napon na dionice u najopterećenijoj fazi. Rezultati su dati u Tabeli 4.1., dobijeni primjenom inžinjerskog proračuna (inž) i modifikovanog metoda simetričnih komponenti (SK)

Tabela 4.1 – Komparativni teorijski rezultati proračuna struja i napona najopterećenije faze za vod SKS 3x70 + 50 mm^2 , P= 54 kW, L = 600 m i L= 1350 m

Pogonski režim i stepen nesimetrije [%]	Struja najgore faze Ia [A]	Napon na 6**00** m (inž) [V]	Napon na 6**00** m (SK) [V]	Napon na 1350 m (inž) [V]	Napon na 1350 m (SK) [V]	Odstupanje max [%]
Simetrično (33,3%)	82	209.4	208,1	183,6	180,8	-1.53%
Nesimetrija 40/30/30%	98.85	200	200,5	165,24	163,7	-0.93%
Nesimetrija 60/20/20%	148,28	170,4	178	103,42	112,9	+9.17%

Rezultati pokazuju da u uslovima potpuno simetričnog opterećenja (33,3% po fazi) postoji veoma visok stepen podudarnosti između dva pristupa. Dobijena odstupanja iznosila su svega 0,62% za dužinu voda od 600 m i 1,53% za dužinu od 1350 m, što potvrđuje da modifikovani model zasnovan na simetričnim komponentama reprodukuje rezultate standardnog inženjerskog pristupa sa vrlo visokim stepenom tačnosti u uravnoteženim pogonskim režimima.

Kod umjerenog stepena nesimetrije opterećenja (40/30/30%), razlike između modela ostaju minimalne i kreću se u intervalu od 0,25% do 0,93%. Ovakav rezultat ukazuje da predloženi metod zadržava stabilnost i konzistentnost i u realnim eksploatacionim uslovima karakterističnim za distributivne mreže, gdje su određeni nivoi fazne neuravnoteženosti uobičajeni usljed prisustva jednofaznih potrošača i neujednačene raspodjele priključenih opterećenja.

Značajnija odstupanja uočena su tek pri izrazito nesimetričnom režimu rada (60/20/20%), naročito kod većih dužina voda. U tom slučaju maksimalno relativno odstupanje dostiglo je 9,17%, pri čemu je model zasnovan na simetričnim komponentama dao nešto veće vrijednosti krajnjeg napona u odnosu na standardne inženjerske formule. Ovakvo ponašanje može se objasniti drugačijim tretmanom raspodjele struje kroz pozitivnu, negativnu i nultu sekvencu, pri čemu se uticaj neutralnog provodnika i povratnog puta struje modeluje na drugačiji način u odnosu na klasične aproksimativne izraze.

Posebno je značajno istaći da ni u jednom analiziranom scenariju nisu registrovana odstupanja koja bi dovela do kvalitativno različitih zaključaka u pogledu mogućnosti napajanja krajnjih korisnika ili procjene dozvoljenih dužina izvoda. Ovo ukazuje da predloženi modifikovani pristup može predstavljati pouzdanu alternativu standardnim inženjerskim metodama, naročito u uslovima kada je potrebno uključiti efekte fazne nesimetrije bez raspoloživih potpunih fazorskih podataka.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da predloženi model pokazuje visok stepen robusnosti i praktične primjenjivosti za potrebe preliminarnih analiza distributivnih niskonaponskih mreža, uz posebno izraženu prednost u razmatranju nesimetričnih režima rada, koji su u realnim ODS uslovima česta pojava.

Ovaj uvid nedvosmisleno ukazuje na to da se planiranje i integracija linijskih regulatora u slabe niskonaponske mreže ne smije vršiti stohastički. Pravilan odabir lokacije VROT-a mora predstavljati pažljivo balansiranje između tačke maksimalnog nizvodnog pada napona i tačke u kojoj je osiguran minimalni pogonski napon za pouzdan rad samog uređaja, što potvrđuje opravdanost primjene rigoroznog matričnog modela kao nezaobilaznog inženjerskog alata pri predfaznom projektovanju.

Naime, nominalna specifikacija primjenjenog regulatora u ovom slučaju definiše da uređaj garantuje automatsku stabilizaciju izlaznog napona u opsegu od 0,92 Un do 1,05 Un, pod uslovom da ulazni fazni napon na mjestu ugradnje ne padne ispod kritičnih 207 V.
Ukrštanjem ovog fabričkog zahtjeva sa rezultatima proračuna iz Tabele 4.1, dolazi se do zaključka da bi u realnim pogonskim uslovima fizibilnost ugradnje VROT-a na stacionaži od 1350 m bila potpuno kompromitovana, ako bismo imali opterećenja istog približna nominalnim. U takvom pogonskom stanju, ugrađeni VROT uređaj uopšte

ne bi mogao da aktivira svoj algoritam regulacije pod opterećenjem na najugroženijoj fazi, već bi zbog unutrašnjih hardverskih ograničenja prešao u stanje blokade. Krajnji ishod bi bio identičan stanju mreže bez regulacije – nelinearni naponski kolaps duž preostalih 620 m izvoda i trajno nefunkcionalno stanje na priključcima potrošača. Tek primjenom matričnog modela simetričnih komponenti, planer mreže dobija tačan uvid da lokaciju VROT-a mora locirati, kako bi se uopšte obezbijedili minimalni ulazni uslovi za stabilan rad i punu funkcionalnost regulatornog uređaja.

Uvažavajući navedena pogonska ograničenja, u radu je posebno važno naglasiti primarnu ulogu VROT uređaja u pogledu formiranja vještačke neutralne tačke. Kod dominantno jednofaznog konzuma, struja nesimetrije koja teče kroz neutralni provodnik unosi najveći poremećaj u naponsku simetriju mreže. Integracijom VROT-a, kroz njegovu unutrašnju konfiguraciju i spregu namotaja, kreira se stabilna vještačka neutralna tačka koja preuzima ulogu lokalnog kompenzatora nulte komponente struje.

4.4. Terenski eksperiment

U cilju eliminacije eksternih pogonskih uticaja i izolacije čistih uzročno-posljedičnih veza unutar posmatrane mreže, za potrebe ovog rada sproveden je specifičan terenski eksperiment. Sa predmetnog niskonaponskog izvoda privremeno su galvanski otpojeni svi ostali korisnici, čime je sistem sveden na radijalnu dionicu na čijem se samom kraju nalazio isključivo jedan trofazni krajnji korisnik. Navedeni potrošač posjeduje trofazni priključak, sa izraženom nesimetrijom usljed neravnomjernog rasporeda jednofaznih prijemnika u unutrašnjoj instalaciji. Analizator kvaliteta električne energije na lokaciji samog korisnika zabilježio je asimetrične fazne struje I_1 = 10,99 A, I_2 = 9,49 A, I_3 = 6,82 A. Propuštanjem ovih empirijskih vrijednosti struja kroz razvijeni analitički model preko simetričnih komponenti za dionicu, uzimajući u obzir mjerodavne parametre kabla sračunat je ukupni pad napona na najopterećenijoj fazi. Kada se ovaj proračunati pad oduzme od stabilisane baze VROT-a, dobijeni naponi pokazuju izuzetnu, jako visoku metričku podudarnost sa stvarno izmjerenim faznim naponima kod korisnika (U1 = 234,5 V, U2 = 234,9 V, U3 = 235,6 V), za napon na izlazu iz VROT-a u svim fazama oko vrijednosti 238 V, čime je teorijska tačnost modela praktično dokazana.

Dodatna proračunska analiza izvršena je za slučaj izostanka primjene VROT uređaja, uz pretpostavljeni izlazni napon na sekundaru transformatorske stanice od 238 V. Pri relativno malom ukupnom opterećenju od približno 6 kW, procijenjene vrijednosti napona na mjestu priključenja iznosile bi približno 226,8 V, 228,2 V i 230,5 V po fazama, što ukazuje na zadovoljavajuće naponske prilike i odsustvo značajnijih problema kvaliteta napona.

Međutim, pri povećanju ukupnog opterećenja na približno 18 kW, uz iste mrežne uslove i isti izlazni napon transformatorske stanice (238 V), proračunski dobijeni naponi opadaju na približno 204,5 V, 208,5 V i 215,6 V po fazama. Dobijeni rezultati ukazuju na izražen uticaj pada napona usljed povećanja strujnog opterećenja, pri čemu pojedine faze dostižu vrijednosti koje se približavaju ili ulaze u područje granično prihvatljivih naponskih prilika sa aspekta kvaliteta isporučene električne energije. Dok se za uključen VROT uređaj za napon na izlazu iz VROT-a u svim fazama oko vrijednosti 238 V, kod krajnjeg korisnika dobijaju naponi 227,5 V, 228,7 V, 230,9 V.

Takođe, kontinuirano snimanje visokorezolucijom analizatora mrežnih prilika otkrilo je i ključnu tehnološku manu implementiranog rješenja, koja se odnosi na dinamički odziv regulatora. Registrovan je niz brzih promjena napona, kao i kratkotrajnih naponskih propada (voltage sags) koji nastaju u trenucima startovanja unutrašnjih jednofaznih opterećenja visokog intenziteta. Ustanovljeno je da ove brze naponske fluktuacije u potpunosti prevazilaze dinamičke mogućnosti reakcije regulatora. U tim kritičnim intervalima, VROT ostaje inertan, a krajnji potrošač biva izložen direktnom uticaju propada napona. VROT-a ne posjeduje performanse brzih statičkih kompenzatora (poput STATCOM uređaja) i ne može pružiti zaštitu osjetljivim uređajima od brzih tranzijentnih propada napona u distributivnoj mreži.

5. ZAKLJUČAK

Dugi niskonaponski radijalni izvodi predstavljaju jedan od najznačajnijih tehničkih izazova u radu savremenih distributivnih mreža, naročito u dijelovima sistema sa izraženim ruralnim karakteristikama. Velika rastojanja između transformatorskih stanica i krajnjih korisnika, visoke impedanse vodova, te nepredvidiva nesimetrija struja i napona često dovode do izraženih padova napona i pogoršanja kvaliteta električne energije. Iako je ODS „Elektro Doboj“ a.d. Doboj u prethodnom periodu realizovao kapitalna ulaganja kroz rekonstrukciju mreže zamjenom dotrajalih vodova samonosivim kablovskim snopovima (SKS) na armiranobetonskim stubovima, digitalizaciju mjernih mjesta i modernizaciju postrojenja, određeni dijelovi mreže i dalje predstavljaju specifičan izazov.

Posebno se izdvajaju naslijeđeni dugi izvodi u ruralnim područjima sa malom gustinom naseljenosti, smanjenjem broja korisnika i odsustvom životnog rasta. U takvim specifičnim konzumima, izgradnja novih usputnih transformatorskih stanica i skraćenje vodova elektroenergetski i ekonomski nisu opravdani. Dodatnu kompleksnost u novije vrijeme donosi masovnije priključenje distribuiranih izvora, prvenstveno fotonaponskih elektrana, što u određenim dijelovima dana radikalno mijenja tokove snaga i zahtijeva fiksne intervencije na regulacionim preklopkama energetskih transformatora, čime se manevarski prostor za rješavanje podnapona u vršnim režimima potrošnje dodatno sužava.

U okviru ove problematike, elektrodistributivna praksa bilježe oštar i nelinearan uticaj pogonske nesimetrije na naponsku degradaciju. Prema podacima iz prethodnih analiza i studijskih istraživanja na nivou ODS „Elektro Doboj“, prosječan nivo nesimetričnosti struja (izražen odnosom inverzne i direktne komponente) procijenjen je na visokih 21%, dok u pojedinim kritičnim područjima dostiže i do 30% [2]. Ovako izražena nesimetričnost, pojačana činjenicom da su starija seoska domaćinstva pretežno naslijeđeno monofaznog karaktera potrošnje, dovodi do velikih struja u neutralnom provodniku. Budući da SKS kablovi imaju redukovan presjek neutralnog voda, povećana struja nebalansa uzrokuje intenzivno pomjeranje neutralne tačke, drastičan pad napona na opterećenoj fazi i opasan porast napona (prenapon) na neopterećenim fazama, uz drastično uvećanje tehničkih gubitaka.

Kao tehno-ekonomski optimalna alternativa rekonstrukcijama kablovskih trasa, u radu je analizirana primjena linijskih regulatora napona (VROT). Sprovedeni izolovani terenski eksperiment i uporedni analitički proračun metodom simetričnih komponenti dali su ključne zaključke o dometima i ograničenjima ove tehnologije. Planiranje i integracija VROT-a mora se izvoditi isključivo primjenom matričnih proračuna simetričnih komponenti. Eksperimentalno je potvrđeno da VROT, zahvaljujući svom specifičnom spoju, uspješno formira vještačku neutralnu tačku, na sekundarnoj strani koje izoluje struju nesimetrije i sprečava njeno zatvaranje kroz neutralni vod na dugačkoj dionici od regulatora nazad do TS-u, čime se eliminiše pojava prenapona na neopterećenim fazama.

Primjena VROT-a se mora uvoditi restriktivno i oprezno, jer u realnim uslovima uređaj posjeduje hardversku podnaponsku zaštitu. Ukoliko usljed prevelikog monofaznog opterećenja ulazni napon na mjestu ugradnje padne ispod fabrički dozvoljenog praga, uređaj momentalno prelazi u bypass režim (odnos 1:1) i gubi funkciju regulacije, što mrežu trenutno vraća u duboki naponski slom.

Dinamička inertnost kao ključna mana: Visokorezolucijsko snimanje analizatorom kvaliteta električne energije otkrilo je da VROT, zbog svog inherentnog vremena reakcije za preklapanje odcjepa, ne može pratiti brze fluktuacije napona. U uslovima ruralnih mreža sa dugim vodovima, nagla startovanja motora i prateće velike polazne struje uzrokuju trenutne propade napona (voltage sags) koje VROT ne može eliminisati, ostavljajući osjetljive uređaje krajnjeg korisnika privremeno nezaštićenim.

Krajnji zaključak ukazuje da linijski regulatori predstavljaju dobro prelazno rješenje za određeno područje za stabilizaciju stacionarnih naponskih prilika i peglanje nesimetrije nule u ruralnim mrežama, ali isključivo ukoliko se njihovo pozicioniranje i dimenzionisanje sprovede na bazi egzaktnih proračuna simetričnih komponenti koji uvažavaju realna tehnološka i dinamička ograničenja opreme na terenu.

LITERATURA

[1] Đekić S. Challenges to system stability and EU regulatory alignment for Bosnia and Herzegovina’s renewable energy integration: Focus on transient system stability during fault-induced disturbances. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2025;28(1):173–190. doi:10.33223/epj/200358.
[2] Support to SEE DSO in Preparation for Network Loss Reduction Strategies, Study prepared by Energy Institute Hrvoje Požar (EIHP) for United States Agency for International Development (USAID) and United States Energy Association (USEA), Sub-agreement: USEA/USAID-2017-709-01, 2019.
[3] Ž. Šimić, M. Lovrić, G. Leci, Analiza nesimetrije kod projekovanja niskonaponskih mreža i uticaj elektromobilnosti, 9. savjetovanje HO CIRED, 2024, referat br. SO1-114.