

POVEĆANJE GUBITAKA U NISKONAPONSKOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI USLED NESIMETRIJE OPTEREĆENJA I VIŠIH HARMONIKA

D. Stojanović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija¹
A. Jović, PD „Jugoistok“ Niš, Elektrodistribucija Leskovac, Srbija
L. Korunović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija
N. Krečković, PD „Elektrokosmet“, Kosovska Mitrovica, Srbija

UVOD

Trofazna elektrodistributivna mreža je uravnotežena i simetrična ako trofazni naponi i struje imaju iste amplitude i ako su njihovi fazori međusobno pomereni za 120° . Ako jedan ili oba od ovih uslova nisu ispunjena, mreža je nesimetrična. Niskonaponske distributivne mreže grade se, po pravilu, kao trofazne četvorožične, sa tri fazna provodnika i jednim neutralnim. Kod simetričnog opterećenja kroz nulti provodnik ne teče struja. Međutim, u realnim uslovima, opterećenje je nesimetrično jer mreža napaja uglavnom skup monofaznih potrošača. Nesimetrija može biti sistematska usled neravnomerne raspodele po fazama pojedinih monofaznih potrošača i slučajna zbog različitih grafika opterećenja pojedinih potrošača. Kao posledica nesimetrije povećavaju se gubici u mreži, a kroz neutralni provodnik teče izvesna struja.

Savremenu etapu razvoja distributivnih mreža karakteriše upotreba velikog broja nelinearnih prijemnika. Sa porastom nelinearnih uređaja i aparata, javljaju se harmonijska izobličenja struja opterećenja, što dovodi do povećanja gubitaka u vodovima i transformatorima. Kroz neutralni provodnik teku i struje harmonika koji su deljivi sa tri, čak i kada su monofazni nelinearni potrošači ravnomerno raspoređeni po fazama. Ove komponente harmonika struje su u fazi, pa se stoga aritmetički sumiraju. Dakle, kroz neutralni provodnik postoji struja iz dva razloga: nesimetrija opterećenja i nelinearnost struje opterećenja. I jedan i drugi razlog dovode do povećanja gubitaka aktivne snage, kako u vodovima tako i u transformatorima.

U ovom radu razmatra se samo povećanje gubitaka u niskonaponskim vodovima usled nesimetrije i harmonika. Imajući u vidu činjenicu da se najveći deo gubitaka energije javlja upravo u niskonaponskoj mreži, jasno je da svako povećanje gubitaka može otežati ionako tešku situaciju u pogledu gubitaka kako snage tako i energije. Radi utvrđivanja nivoa povećanja gubitaka u realnoj mreži izvršena su merenja u distributivnoj mreži PD „Jugoistok“, na području grada Leskovca. Merenja su obavljena u različitim delovima grada u dvogodišnjem periodu, kako bi se obuhvatile različite kategorije potrošnje,

¹ *Dobrivoje Stojanović, dobrivoje.stojanovic@elfak.ni.ac.rs*

kao i uticaj sezonske promene opterećenja. U svakoj transformatorskoj stanici izvršena su uporedna merenja parametara zbirne potrošnje i potrošnje na jednom od izvoda koji napaja karakteristične potrošače i to u periodu od sedam dana u skladu sa preporukama EN 50160. Merenja su izvršena analizatorom snage Chauvin Arnoux C.A. 8334. Korišćeni analizator snage snima struje i napone, a potom daje harmonijski sastav struja i napona, kao i veliki broj indikatora parametara kvaliteta električne energije. Sve vrednosti su usrednjene u intervalu od 10min. Osim toga, u željenom trenutku, uređaj može da snimi talasni oblik svih napona i struja ili spektar njihovih harmonika.

Dobar deo rezultata istraživanja nesimetrije i harmonika prezentovan je u radu (1). U ovom radu razmatra se povećanje gubitaka snage i energije kao posledica nesimetrije opterećenja i harmonika u struji opterećenja. Najpre se daje kratak pregled rezultata merenja nesimetrije i harmonika a potom metodologija za ocenu povećanja gubitata i rezultati proračuna za transformatorske stanice na području Leskovca.

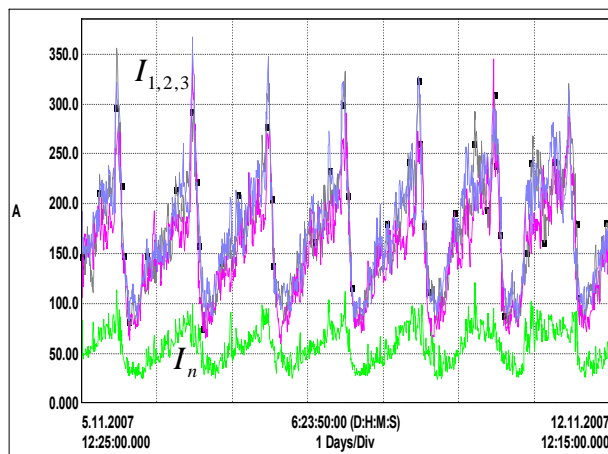
NESIMETRIJA OPTEREĆENJA I HARMONICI U NN MREŽI

Nesimetrija opterećenja je kvantifikovana faktorom nesimetrije struja koji se izračunava kao

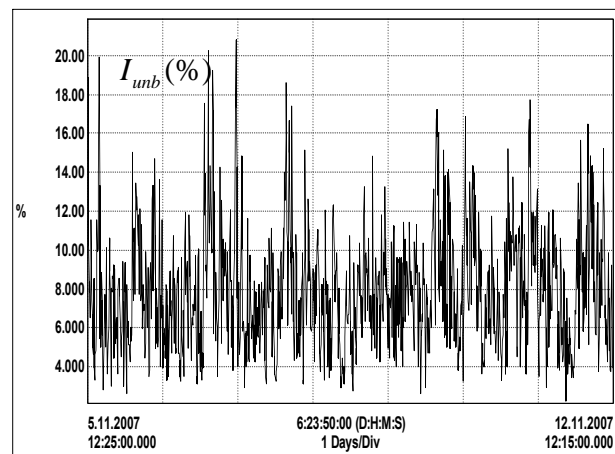
$$I_{unb} = \frac{|I_i|}{|I_d|} \cdot 100, \quad (1)$$

gde indeks i označava inverznu, a indeks d direktnu komponentu struje.

Od mnoštva rezultata dobijenih na osnovu dvogodišnjih merenja, zbog ograničenog prostora, ovde se detaljno prikazuju i analiziraju rezultati samo za jednu transformatorsku stanicu koja napaja stambenu potrošnju, TS „Ilije Strele – Lamele“. Za ostale transformatorske stanice daju se i diskutuju samo najvažniji rezultati. Merenja u pomenutoj transformatorskoj stanici izvršena su u toku nedelju dana, od 05.11. do 12.11. 2007. godine. Zabeležena je značajna nesimetrija struja opterećenja, što se može videti na slici 1, gde je prikazan hronološki dijagram struja opterećenja i struje neutralnog provodnika. Promene struje prate uobičajeni dnevni dijagram opterećenja za ovu vrstu potrošnje. U periodu od sedam dana struje opterećenja transformatora I_1 , I_2 i I_3 variraju zavisno od doba dana, a njihove maksimalne vrednosti bile su 355,7A, 344,6A i 366,4A, respektivno. Faktor nesimetrije struja, definisan relacijom (1), prikazan je na slici 2 i varira u opsegu od 2,9% do 33,7%. Usled nesimetrije opterećenja, struja neutralnog provodnika varira u opsegu od 23,5A do 120,4A. Srednja vrednost struje neutralnog provodnika od 56,26A iznosi 36,46% prosečne struje najmanje opterećene faze.



Slika 1. Fazorski dijagram struja i napona transformatora u TS „Ilije Strele - Lamele“



Slika 2. Faktor nesimetrije struja transformatora u TS „Ilije Strele - Lamele “

Kako je već rečeno, struja kroz neutralni provodnik javlja se iz dva razloga: zbog nesimetrije opterećenja i zbog proticanja harmonika struje deljivih sa tri (koji su posledica nelinearne potrošnje). Postavlja se pitanje kakva je struktura struje neutralnog provodnika, odnosno koliki je udeo viših harmonika u ukupnoj struji neutralnog provodnika? Da bi se dobio zadovoljavajući odgovor na ovo

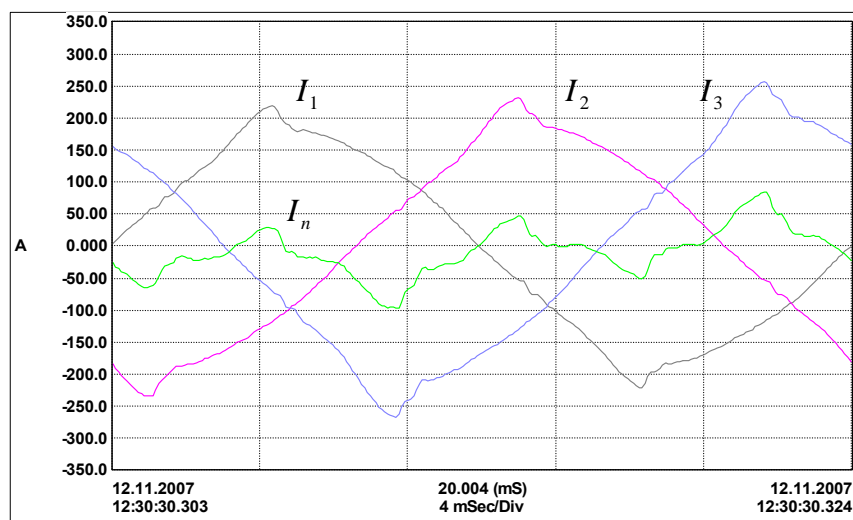
pitanje, razmatra se slika 3 gde su prikazani talasni oblici struja opterećenja I_1 , I_2 i I_3 , i struje neutralnog provodnika I_N . Odgovarajući harmonijski spektri struja prikazani su na slici 4.

Uočava se deformacija svih struja opterećenja, koja iskazana preko totalne harmonijske distorzije struja (THDI) I_1 , I_2 i I_3 iznosi 8,76%, 10,54%, 11,55%, respektivno. Primećuje se učešće trećeg, petog, sedmog i devetog harmonika u strujama opterećenja. Prisustvo trećeg i devetog harmonika u faznim strujama opterećenja naročito dovodi do porasta struje neutralnog provodnika, s obzirom na to da se ovi harmonici sabiraju. Ovo se jasno vidi na slici 4d, gde je prikazan harmonijski spektar struje neutralnog provodnika. Efektivna vrednost struje neutralnog provodnika je 38,26A, a struje prvog (osnovnog), trećeg i devetog harmonika su: 17,3A (100%), 30,5A (176,2%) i 10,6A (61,1%), respektivno. U periodu od sedam dana, THDI varira u opsegu od 4,7 do 20,2% za struju prve faze I_1 , od 4,7 do 13,7% za struju I_2 i od 5,3 do 21,3% za struju I_3 , pri čemu se veće vrednosti imaju u popodnevним i večernjim satima, a manje vrednosti od ponoći pa do podneva.

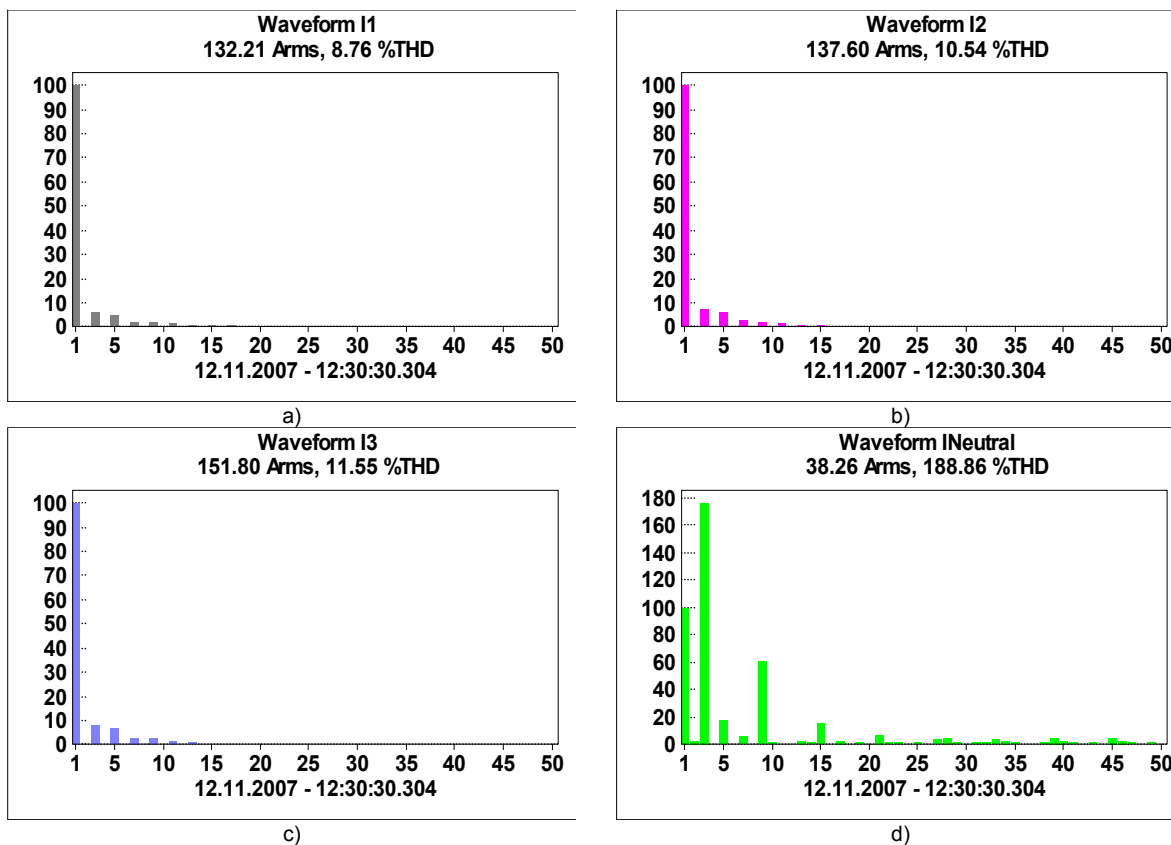
Na slici 5 prikazana je promena struje neutralnog provodnika i promene trećeg i devetog harmonika u periodu od nedelju dana. Struja trećeg harmonika ciklično se menja tokom svakog dana od najmanjih vrednosti u jutarnjim časovima (između 5 i 7h) do najvećih tokom večeri (između 19 i 24h). Procentualno učešće trećeg harmonika u struji neutralnog provodnika prikazano je na slici 6, i varira od 26,124 do 90,135%, dok učešće devetog harmonika varira od 6,79 do 13,418%. Zbirno učešće trećeg i devetog harmonika u efektivnoj vrednosti struje menja se u opsegu od 26,993 do 91,128%, što je neznatno više od procentualnog učešća trećeg harmonika. U ovom primeru, kao i u mnogim drugim primerima, pokazalo se da je treći harmonik odgovoran za porast struje neutralnog provodnika usled harmonika.

U svim transformarskim stanicama u kojima su obavljena merenja uočeno je značajno prisustvo nesimetrije opterećenja i harmonika u struji opterećenja. Nesimetrija postoji u svim delovima dana i svakog dana u nedelji i varira u širokim granicama kod svake transformatorske stanice. Maksimalne vrednosti faktora nesimetrije su iznad 13%, a u tri prelaze 30%. Srednje vrednosti faktora nesimetrije variraju od 5,5 do 13,42%. Prosečna vrednost faktora nesimetrije struja u Leskovcu je 8,49%, a u Nišu 9,60%. Navedene vrednosti faktora nesimetrije odnose se na zbirnu potrošnju.

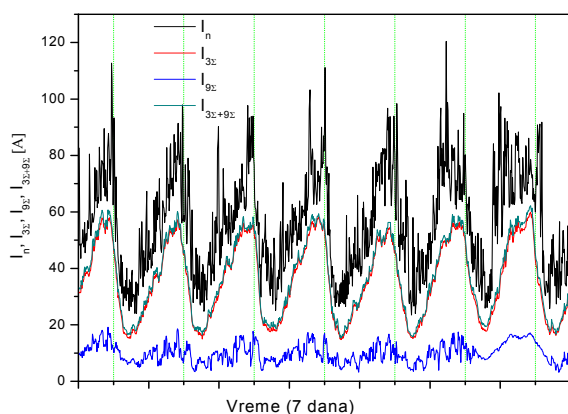
Struja neutralnog provodnika, kao posledica nesimetrije i nelinearne potrošnje, ima velike vrednosti. Relativna vrednost struje neutralnog provodnika u odnosu na prosečnu struju opterećenja sve tri faze varira od 0,1421 (14,21%) u TS „Moravska II“ do 0,6685 (66,85%) u TS „Robna kuća“. Podaci o struji neutralnog provodnika u svim transformatorskim stanicama na području Niša i Leskovca prikazani su u (1).



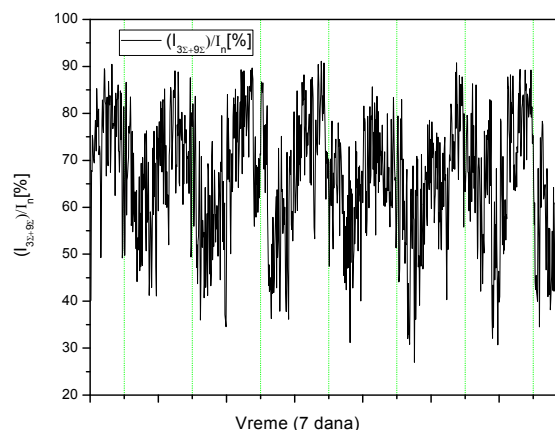
Slika 3. Talasni oblici faznih struja i struje neutralnog provodnika u TS "Ilije Strele - Lamele"



Slika 4. Harmonijski spektri struja u TS „Ilije Strele - Lamele“: a) struja I_1 , b) struja I_2 , c) struja I_3 i d) struja I_N



Slika 5. Struja neutralnog provodnika (I_N), suma struja trećeg harmonika ($I_{3\Sigma}$) i suma struja devetog harmonika ($I_{9\Sigma}$) u TS „Ilije Strele-Lamele“



Slika 6. Procentualno učešće trećeg i devetog harmonika ($I_{3\Sigma} + I_{9\Sigma}$) u struji neutralnog provodnika u TS „Ilije Strele-Lamele“

POKAZATELJI POVEĆANJA GUBITAKA U NN MREŽI USLED NESIMETRIJE OPTEREĆENJA I HARMONIKA

Procena dopunskih gubitaka snage i energije usled nesimetrije i viših harmonika je veoma složeni zadatak, s obzirom na to da su niskonaponske distributivne mreže veoma razgranate. Takođe, nivo nesimetrije i struktura harmonika se razlikuju od izvoda do izvoda, kao i od deonice do deonice jedne iste mreže. U ovom radu računa se sa nesimetrijom i harmonicima zbirne potrošnje, tako da će stvarno povećanje gubitaka u celokupnoj mreži biti još veće.

Generalno, povećanje gubitaka usled distorzije talasnog oblika struje opterećenja (koja uključuje sve redove viših harmonika) u bilo kom provodniku (vodu) distributivne mreže može se odrediti na osnovu THDI, polazeći od izraza za efektivnu vrednost struje:

$$I_k = \sqrt{I_{k,1}^2 + I_{k,2}^2 + \dots + I_{k,h}^2 + \dots + I_{k,n}^2} = I_{k,1} \cdot \sqrt{1 + THDI_k^2} \quad (1)$$

gde je $THDI_k$ totalna harmonijska distorzija struje faze k , a $I_{k,h}$ efektivna vrednost struje h -tog harmonika faze k .

Džulovi gubici u provodniku faze k otpornosti R zbog struje osnovnog harmonika $I_{k,1}$ su $RI_{k,1}^2$. Indeks povećanja gubitaka snage usled prisustva viših harmonika u struji u odnosu na slučaj kada je prisutan osnovni harmonik (skin-efekat se zanemaruje), za konstantno THDI u nekom vremenskom intervalu, izračunava se kao:

$$k_{kh}^2 = 1 + THDI_k^2 = \frac{RI_k^2}{RI_{k,1}^2}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

Treba napomenuti da se indeks povećanja gubitaka snage k_{kh}^2 menja u toku vremena, zavisno od veličine i strukture opterećenja.

Navedeni pokazatelj povećanja gubitaka snage nije reprezentativan za duži vremenski period i analizu gubitaka energije. Zato je neophodno analizirati efektivne vrednosti struje i njihove harmonijske komponente u dužem vremenskom periodu. Raspoloživi rezultati sedmodnevnih merenja sa desetominutnim periodom usrednjavanja se mogu upotrebiti za izračunavanje pokazatelja povećanja gubitaka energije usled nesimetrije i prisustva viših harmonika u niskonaponskoj mreži svake transformatorske stanice.

Porast gubitaka energije računa se u odnosu na hipotetičko simetrično opterećenje bez prisustva viših harmonika. Pod pretpostavkom da su poprečni preseči faznih provodnika i neutralnog provodnika jednaki predlažu se sledeći pokazatelji povećanja gubitaka energije:

1. Faktor povećanja gubitaka definisan kao odnos gubitaka energije kada je prisutna nesimetrija po fazama i kada su prisutni viši harmonici struje i gubitaka energije u hipotetičkoj simetrično opterećenoj mreži bez viših harmonika,

$$\Delta W_{h,n} = \frac{\sum_i \left(I_1^2(t_i) + I_2^2(t_i) + I_3^2(t_i) + I_n^2(t_i) \right)}{\sum_i \left[3 \left(\frac{I_{1,1}(t_i) + I_{2,1}(t_i) + I_{3,1}(t_i)}{3} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

2. Procentualno povećanje gubitaka energije usled viših harmonika koji su deljivi sa tri (u faznim provodnicima i neutralnom provodniku) i gubitaka energije u simetrično opterećenoj mreži bez viših harmonika,

$$\Delta W_{h,3} = \frac{\sum_i \left(\begin{array}{l} I_{1,3}^2(t_i) + I_{2,3}^2(t_i) + I_{3,3}^2(t_i) + I_{n,3}^2(t_i) \\ + I_{1,6}^2(t_i) + I_{2,6}^2(t_i) + I_{3,6}^2(t_i) + I_{n,6}^2(t_i) \\ + I_{1,9}^2(t_i) + I_{2,9}^2(t_i) + I_{3,9}^2(t_i) + I_{n,9}^2(t_i) + \dots \end{array} \right)}{\sum_i \left[3 \left(\frac{I_{1,1}(t_i) + I_{2,1}(t_i) + I_{3,1}(t_i)}{3} \right)^2 \right]} 100. \quad (4)$$

U jednačinama (3)-(4) t_i je vreme u minutima, $t_i \in [10, 20, 30, 40, \dots]$, jer su merni uređaji bili tako podešeni tako da su snimali usrednjene vrednosti struje svakih 10 minuta.

ANALIZA REZULTATA TERENSKIH MERENJA

Kao rezultat istaživanja, u tabeli 1 su date vrednosti pokazatelja porasta gubitaka energije $\Delta W_{h,n}$ i ΔW_{h3} i indeksa povećanja gubitaka snage usled viših harmonika k_{kh}^2 , sračunate na osnovu merenja ukupne potrošnje u izabranim transformatorskim stanicama 10/0.4 kV/kV. Takođe, navedene su i vrednosti registrovane nesimetrije struje opterećenja i struje neutralnog provodnika. Indeks povećanja gubitaka snage usled viših harmonika k_{kh}^2 sračunat je na osnovu izmerene maksimalne vrednosti THDI za svaku fazu sistema. Za svaku transformatorsku stanicu su date informacije o kategoriji potrošnje koju napajaju i to: stambena gradska potrošnja sa daljinskim grejanjem, stambena gradska potrošnja bez daljinskog grejanja, ruralna, administrativna, mešovita i trgovačka. Transformatorske stanice se nalaze u različitim delovima grada. Merenja u transformatorskim stanicama su vršena u zimskoj ili letnjoj sezoni. Sezona predstavlja period od šest meseci, i to: zimska, od oktobra do marta i letnja, od aprila do septembra.

Transformatorske stanice koje napajaju mešovitu potrošnju se nalaze u centralnom delu grada. Kod ovih transformatorskih stanica srednje vrednosti pokazatelja povećanja gubitaka energije usled nesimetrije i prisustva viših harmonika se kreću od 1,0344 (TS "Lepše Stamenković") do 1,0569 (TS "Veljka Vlahovića") u odnosu na gubitke koji bi bili pri idealno simetričnom opterećenju bez prisustva viših harmonika. Prosečna vrednost pokazatelja $\Delta W_{h,n}$ za ovih pet transformatorskih stanica je 1,0442, što znači da se ukupni gubici usled nesimetrije i viših harmonika povećavaju 4,42% u odnosu na gubitke u istoj idealno simetričnoj mreži sa strujama bez viših harmonika. Nađeno je da se vrednost ovog parametra ne menja mnogo u zavisnosti od sezone. Tako prosečno povećanje gubitaka u zimskoj sezoni iznosi 4,56 a u letnjoj 4,32%. Takođe, nije uočena jasna zavisnost povećanja gubitka energije kod ovog tipa potrošnje od lokacije transformatorske stanice u Leskovcu. Parametar ΔW_{h3} se kreće u relativno uskim granicama od 0,431% (za TS "Internat") do 1,79% (za TS "Veljka Vlahovića"). Kod tri od četiri transformatorske stanice koje se nalaze u užem centru grada, vrednost parametra ΔW_{h3} je približno ista, oko 0,574%. Ovaj parametar pokazuje doprinos harmonika deljivih sa tri povećanju ukupnih gubitaka u mreži. Vrednost indeksa k_{kh}^2 se menja u toku vremena i ukazuje na porast gubitaka snage u nekom faznom provodniku ($k = 1,2,3$) u tom desetominutnom intervalu. Njegova vrednost menja se u širokim granicama i zavisi od THDI. Tako npr u TS "Veljka Vlahovića" u letnjoj sezoni, indeks k_{kh}^2 ima najmanju vrednost od 1,00490, a najveću od 1,03881, koja odgovara $THDI = 19.7\%$.

U transformatorskim stanicama koje napajaju administrativnu potrošnju merenja su izvršena u zimskoj i u letnjoj sezoni. Vrednosti pokazatelja $\Delta W_{h,n}$ za dva različita merenja u letnjoj sezoni u TS "S-17" su 1,092 (porast gubitaka od 9,2%) i 1,1009 (10,09%), pri čemu je porast gubitaka zbog trostrukih harmonika 1.89% i 2.09%. U drugim dvema transformatorskim stanicama (TS "Gimnazija" i TS "Dečiji dispanzer") vršena su merenja u zimskoj sezoni. Vrednosti pokazatelja povećanja ukupnih gubitaka energije su različite i iznose 1,0203 za prvu TS i 1,095 (9,5%), za drugu. Odgovarajuće vrednosti pokazatelja ΔW_{h3} su 0,31% i 1,07%.

Transformatorske stanice TS "Robna Kuća", TS "Uniteks", TS "Njegoševa" i TS "Zvezda-IDEA" napajaju potrošače iz kategorije trgovačka potrošnja. Merenja su vršena u letnjoj sezoni u prve tri transformatorske stanice, a u poslednjoj u zimskoj sezoni. Rezultati dva letnja merenja u TS "Robna Kuća" pokazuju najveće vrednosti pokazatelja $\Delta W_{h,n}$ i to 1,2136 i 1,1716. Dakle, u distributinoj mreži ove TS gubici usled harmonika i nesimetrije se povećavaju za najmanje 21,36 %, što je zabrinjavajuće. U ukupnom povećanju gubitaka harmonici deljivi sa tri učestvuju sa 8,48%, u prvoj nedelji merenja, i sa 5,84%, u drugoj nedelji. U preostale tri TS povećanje ukupnih gubitaka je umereno i kreće se od 3,49 do 5,66%, dok je povećanje gubitaka zbog harmonika deljivih sa tri od 0,473 do 1,18%. U TS "Robna Kuća", takođe je registrovana najveća vrednost indeksa povećanja gubitaka snage usled distorzije talasnog oblika struje opterećenja u letnjoj sezoni 2007. godine i to 1,19360 u trećoj fazi pri vrednosti $THDI_3 = 44\%$.

U distributivnoj mreži koja napaja stambenu potrošnju sa daljinskim grejanjem, prosečna vrednost pokazatelja povećanja gubitaka energije $\Delta W_{h,n}$ iznosi 1,08902 (8,9%), u letnjoj sezoni, što je značajno više od vrednosti u zimskoj sezoni 1,03895 (3,895%). Ovo pokazuje da je učešće nelinearnih uređaja u ukupnoj snazi u zimskom periodu mnogo manje, kao i da je nivo nesimetrije strujnog opterećenja manji. Isti zaključak se donosi i pri analizi uticaja viših harmonika koji su deljivi sa tri na gubitke energije. U letnjim uslovima, prosečna vrednost pokazatelja ΔW_{h3} je 3,13%, a u zimskim 1,903%. Najveće relativno povećanje ukupnih gubitaka u iznosu od 1,1313 (13,13%) zabeleženo je u letnjoj sezoni u TS "Dubočica 5". Najveća prosečna vrednost distorzije struje opterećenja, zabeležena je u trećoj fazi u TS "Radnička" u letnjoj sezoni od 33,70%. Zbog toga se u ovoj TS imaju značajne vrednosti faktora povećanja gubitaka, $\Delta W_{h,n}=1,112$ i $\Delta W_{h3}=3,56\%$. Indeks povećanja gubitaka snage usled prisustva viših harmonika u faznim provodnicima ove TS kreće se granicama od 1,09420 do 1,11360.

Merenja u transformatorskoj stanici koja napaja ruralnu potrošnju vršena su u letnjoj sezoni. Rezultati merenja pokazuju da je povećanje gubitaka energije u odnosu na slučaj simetričnog opterećenja bez viših harmonika čak 11,5% ($\Delta W_{h,n}=1,115$), od toga 1,07% usled viših harmonika struja koji su deljivi sa tri ($\Delta W_{h3}=1,07\%$).

Vrednosti pokazatelja povećanja gubitaka na području grada Leskovca variraju u širokim granicama. Tako, $\Delta W_{h,n}$ se menja u granicama od 1,0203 do 1,2136 i ima prosečnu vrednost 1,0701. Faktor ΔW_{h3} se menja u granicama 0,31 do 8,48%, a njegova prosečna vrednost je 1,89%. Navedene prosečne vrednosti ukazuju na problem povećanja gubitaka u niskonaponskoj mreži. Inače, ocena stvarnog povećanja gubitaka u celokupnoj mreži može se dati samo na osnovu udela potrošnje svake TS u ukupnoj potrošnji.

TABELA 1 – REZULTATI MERENJA I PRORAČUNA

Ime TS	Tip potrošnje	Sezona	I_{unb} [%]			I_N [A]			$\Delta W_{h,n}$	ΔW_{h3} [%]
			min	max	avg	max	min	avg		
Robna Kuća	trgovačka	letnja	3,80	26,90	13,42	20,3	86,7	41,49	1,214	8,48
Robna Kuća	trgovačka	letnja	3,20	31,80	12,88	15,7	83,2	35,28	1,172	5,84
Uniteks	trgovačka	letnja	1,10	25,40	7,21	14,3	48,3	21,76	1,035	0,47
Njegoševa	trgovačka	letnja	1,60	28,30	9,46	20,4	94,0	48,21	1,057	1,18
Zvezda-IDEA	trgovačka	zimska	1,20	14,60	5,76	14,7	138,2	59,46	1,044	0,96
S-17 T1	administr.	letnja	2,40	33,70	11,15	10,0	62,3	26,26	1,092	1,89
S-17 T1	administr.	letnja	3,80	26,90	13,42	8,1	68,8	25,25	1,101	2,09
Gimnazija T1	administr.	zimska	1,70	23,70	8,52	17,3	90,5	42,83	1,095	1,07
D. dispanzer	administr.	zimska	1,20	16,40	5,53	22,5	176,4	69,87	1,020	0,31
L. Stamenković	mešovita	letnja	1,30	15,20	6,02	32,8	162,9	71,30	1,034	1,35
V. Vlahovića	mešovita	letnja	2,00	18,20	8,18	25,2	155,3	70,80	1,057	1,79
Internat	mešovita	zimska	1,10	21,80	8,44	22,4	172,1	65,72	1,037	0,43
S.Penezić	mešovita	zimska	1,50	21,00	8,30	25,4	191,9	77,03	1,052	0,76
J. Veselinovića	mešovita	zimska	1,60	18,10	7,70	25,2	158,5	71,40	1,041	0,53
Radnička	stam. bez DG	letnja	2,10	26,30	9,58	34,2	162,5	74,81	1,112	3,56
Dubočica 3	stam. sa DG	letnja	5,00	16,40	6,12	31,5	133,3	69,45	1,055	2,86
Dubočica 5	stam. sa DG	letnja	2,80	31,30	12,02	24,4	111,1	50,18	1,131	4,11
Dubočica 2	stam. sa DG	letnja	1,90	21,90	8,33	32,0	152,5	68,77	1,058	1,99
Ilije Stele N.	stam. sa DG	zimska	1,10	19,20	7,16	39,3	210,3	104,9	1,043	1,40
Ilije Strele- L.	stam. sa DG	zimska	2,20	20,80	7,92	23,5	120,4	56,26	1,063	2,36
28 Mart	stam. sa DG	zimska	1,00	17,70	5,75	32,9	175,0	91,41	1,042	0,87
Radnička	stam. bez DG	zimska	1,00	17,20	5,52	35,2	253,6	95,93	1,031	0,73
Radnička	stam. bez DG	zimska	0,80	16,90	5,55	38,3	250,7	107,10	1,028	0,54
K. Abraševića	stam. bez DG	zimska	1,00	17,00	5,50	25,0	198,3	84,97	1,028	0,61
Kutleš kula	stam. rural.	letnja	0,38	2,90	12,77	19,9	100,7	41,37	1,115	1,07
Prosečna vrednost			1,87	21,18	8,488	24,42	142,3	62,87	1,070	1,89

ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati dvogodišnjeg istraživanja nesimetrije i viših harmonika u niskonaponskoj distributivnoj mreži na području Leskovca, kao i njihov uticaj na povećanje gubitaka električne energije. Merenja su izvršena u transformatorskim stanicama koje napajaju različite tipove potrošnje i nalaze se u različitim delovima grada. Ustanovljeno je da nesimetrija opterećenja postoji u svim danima u nedelji i delovima dana, te da se menja u širokim granicama. Maksimalna nesimetrija zbirne potrošnje transformatora kreće se od 12,9% do 33,7%, a srednja vrednost prosečnih nesimetrija svih TS je 8,49%. Zbog nesimetrije i prisustva nelinearnih potrošača u mreži javljaju se značajne struje neutralnog provodnika. Tako, u jednoj transformatorskoj stanici struja neutralnog provodnika dostiže vrednost od 253.6A.

Istraživan je uticaj nesimetrije i viših harmonika na povećanje gubitaka energije u vodovima niskonaponske distributivne mreže. Predloženi su pokazatelji povećanja gubitaka energije usled nesimetrije i viših harmonika u odnosu na hipotetičko stanje simetrično opterećene mreže sa strujama bez viših harmonika. Posebno se računa uticaj viših harmonika na povećanje gubitaka. Ustanovljeno je da se stvarni gubici energije u niskonaponskim mreži povećavaju za 2 do 21.36%, zavisno od vrste potrošnje i sezone. Stvarno povećanje gubitaka energije u mreži je sigurno veće od navedenih (izračunatih) procenata povećanja gubitaka (kolone $\Delta W_{h,n}$ i $\Delta W_{h,3}$ Tabele 1) s obzirom na to da su proračuni izvršeni na bazi zbirne potrošnje u transformatorskoj stanici, gde je povoljnija situacija u pogledu uravnoteženja struja po fazama nego u pojedinim izvodima ili deonicama mreže. Ovu tvrdnju potvrđuju istraživanja na nekoliko niskonaponskih izvoda gde je ustanovljena izuzetno velika nesimetrija, tako da u dvadesetak slučajno odabranih izvoda povećanje gubitaka iznosi 38,4745%, a otkriveni su i izvodi kod kojih je porast gubitaka ide preko 100%. Drastična situacija je kod izvoda za javno osvetljenje, gde su identifikovani izvodi kod kojih je takva nesimetrija da su gubici trostruko veći od onih koji bi se imali kod simetričnog opterećenja.

LITERATURA

1. Stojanović D., Korunović L., Jović A., 2008, "Merenje i analiza nesimetrije u niskonaponskoj distributivnoj mreži", Šesto sav. CIRED SRBIJA, R-6.16.
1. Balda J. C. et al., 1997, "Measurements of Neutral Currents and Voltages on a Distribution Feeder," IEEE Trans. Power Delivery, No. 4, pp. 1799-1804.
2. Desmet J. et al., 2003, "Analyses of the Neutral Conductor Current in a Three Phase Supplied Network With Non-linear Single Phase Loads", "IEEE Transactions on Industry Applications", No. 3, pp. 587-593.
3. Gruzds T., 1990, "A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems", "IEEE Transactions on Industry Applications", No. 4, pp. 719-725.
4. Baggani A. and Desmet J., 2003, "Neutral Sizing in Harmonic Rich Installations", LPQI, www.lpqi.org.
6. Dugan R. C. et al., 2002, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill.
7. Bollen M., 2000, "Understanding Power Quality Problems", John Wiley & Sons, Ltd and IEEE Press, Piscataway.
8. Francisco C. De La Rosa, 2006, "Harmonics and power systems", CRC Press

Ključne reči: Distributivna mreža, gubici energije, nesimetrija opterećenja, harmonici, neutralni provodnik.

Dobrivoje Stojanović, dobrivoje.stojanovic@elfak.ni.ac.rs