

Analiza uticaja nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore

Duško S. Cvijić

ZP “Elektrokrajina”, a.d. Banja Luka
RJ “Elektrodistribucija”, Mrkonjić Grad
Mrkonjić Grad, RS - BiH
dusko.cvijic@elektrokrajina.com

Petar Matic

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Banjoj Luci
Banja Luka, RS - BiH
petar.matic@etfbl.net

Sadržaj — U radu je analiziran uticaj nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore, i to na povećane gubitke, prenosnu snagu, oštećenje izolacije i skraćenje životnog vijeka. Izvršeno je nekoliko eksperimenata u kojima je analizirana struja opterećenja i određen sadržaj viših harmonika na osnovu koje je utvrđeno prisustvo nelinearnih opterećenja u ukupnoj potrošnji. Postavljen je ekvivalentni model za proračun nelinearnih opterećenja i uticaj na karakteristike transformatora. Prikazani su negativni efekti usljed ovakvih opterećenja te je dat postupak analitičkog proračuna ovih uticaja na osnovu postojećih standarda.

Ključne riječi – *Distributivni transformatori; Nelinearna opterećenja; Gubici i prenosna snaga distributivnih transformatora*

I. UVOD

Povećano korišćenje nelinearnih opterećenja u elektrodistributivnoj mreži dovodi do harmonijske naponske i strujne distorzije (eng. *Total harmonic distortion-THD*) koja je u današnje vrijeme sve više u porastu. Posljedice na elemente elektrodistributivnog sistema, a naročito na transformatore (kao najskuplje i najbrojnije komponente u sistemu) postaju sve više izražene. To je i razlog za zabrinutost zbog sve većeg korišćenja takve opreme i kombinovanja energetske elektronike gotovo na svakom električnom uređaju. Uticaji harmonijskog izobličenja u distributivnim mrežama ne moraju biti odmah vidljivi, ali dugoročno mogu imati ozbiljne posljedice jer utiču na životni vijek ugrađene opreme.

Gubici usljed viših harmonika izazivaju povećanje temperature u namotajima i skin efekat koji su funkcija kvadrata efektivne vrijednosti struje opterećenja, kao i gubitke usljed vrtložnih struja i gubitke u jezgri. Pojačano zagrijavanje transformatora uzrokovano višim harmonijskim članovima, kao i efekti zasićenja u jezgri, smanjuju operativnost transformatora ispod nominalne snage u potrošačkim i industrijskim postrojenjima, što za posledicu ima starenje izolacije što na kraju dovodi do smanjenja životnog vijeka transformatora [1], [2].

Norma EN 50464-3 kao i IEEE standard C57.110, daje korisniku smjernice za računanje dozvoljenog opterećenja uljnih transformatora u slučaju kada harmonijski faktori struje opterećenja prelaze maksimalno dozvoljene vrijednosti. U distributivnim mrežama normalna opterećenja se smatraju kada ukupni faktor harmonika u struji opterećenja ne prelazi

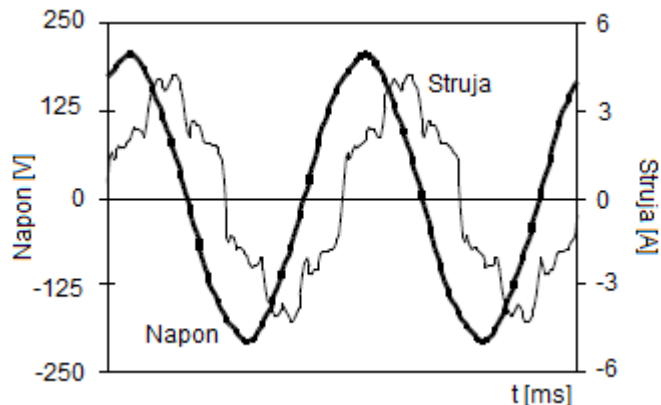
5%, a faktor parnih harmonika 1% [3]. U slučaju većih sadržaja harmonika treba uzeti u obzir da gubici u transformatoru dodatno rastu, a s njima i dozvoljena zagrijavnja koja prelaze vrijednosti računane kod opterećenja sinusnom strujom iste efektivne vrijednosti, što dovodi do negativnih efekata što je i pokazano kroz ovaj rad.

U nastavku su prikazana najčešća nelinearna opterećenja kao izvori viših harmonika napona i struja u distributivnoj mreži. Analiziraće se uticaj viših harmonika na stvaranje dodatnih gubitaka na uljnim trofaznim distributivnim transformatorima. Nakon toga će biti prikazan postupak mjerenja parametara nelinearnih opterećenja na distributivnim TS 20(10) kV/kV, kao i rezultati i analiza mjerenja. Na kraju rada, biće prikazan proračun i analiza uticaja nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore prema IEEE standardu C57.110 koji u prvom planu prikazuje određivanje prenosne snage transformatora koji je opterećen nelinearnim opterećenjima.

II. NELINEARNA OPTEREĆENJA

Nelinearna opterećenja su opterećenja kod kojih talasni oblik struje ili napona nema prostoperiodičan oblik, odnosno talasni oblik struje ne odgovara talasnom obliku napona napajanja zbog niza razloga, kao npr. korišćenja elektronskih prekidačkih kola [1].

Na idealan sinusni napon koji je priključen na nelinearno opterećenje, struja napajanja odgovaraće U-I karakteristici tog opterećenja, Sl. 1.



Slika 1. Talasni oblik napona i struje prekidačke napojne jedinice koja se smatra izrazito nelinearnom [4]

Najprisutniji nelinearni potrošači su uređaji energetske elektronike kao što su: energetski i frekvencijski pretvarači, DC kontrolori, UPS sistemi, punjači baterija, invertori i dr. Osim njih treba pomenuti i rasvjetne uređaje sa gasnim pražnjenjem, kao i aparate za električno zavarivanje, elektrolučne peći i sl. Pojavi viših harmonika doprinose i kondenzatorske baterije koje se koriste za popravak naponskog profila u distributivnoj mreži ili korekciju faktora snage u industrijskim postrojenjima. U nekim slučajevima i linearna opterećenja mogu se ponašati kao nelinearna, a najčešći su transformatori u zasićenju [1], [2].

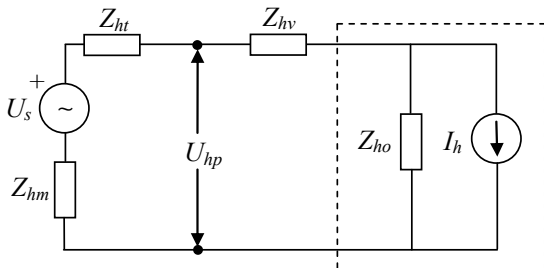
Dakle, za nelinearna opterećenja klasičan oblik Omovog zakona se ne može opisati kao odnos napona i struje. Jednofazna nelinearna opterećenja generišu neparne više harmonike koji izobličuju sinusni talasni oblik struje opterećenja. Ova struja sadrži osnovni i više harmonijske članove, a može se predstaviti izrazom:

$$i(t) = I_1 \sin \omega_1 t + \sum_{h=3,5,7,\dots} I_h \sin \omega_h t, \quad (1)$$

gdje je: $i(t)$ – struja opterećenja, I_1 – struja opterećenja za osnovni harmonik, I_h – struja opterećenja za više harmonike, $\omega_1 = 2\pi f_1$, f_1 – frekvencija osnovnog harmonika, $\omega_h = h f_1$, $h = 3, 5, 7, 9, \dots$

U uslovima linearnih opterećenja relacija (1) sadrži samo osnovnu komponentu struje opterećenja $i(t) = I_1 \sin \omega_1 t$. S obzirom da je osnovna komponenta stalna, intenzitet ukupne struje se povećava povećanjem harmonijskog sadržaja u struji opterećenja. Najveći doprinos izobličenju talasnog oblika struje doprinosi 3 i 5 harmonik [1]–[4].

Na Sl. 2 prikazana je ekvivalentna šema nelinearnih opterećenja u mreži kao izvora viših harmonika.



Slika 2. Ekvivalentna šema nelinearnih opterećenja u mreži kao izvora viših harmonika za h -ti harmonik

Oznake na Sl. 2 imaju sljedeća značenja: U_s – Thevenenov ekvivalentni naponski izvor, U_{hp} – fazor napona h -tog harmonika na priključcima energetskog transformatora, I_h – struja h -tog harmonika nelinearnog opterećenja, Z_{hm} – ekvivalentna impedansa napojne mreže, Z_{ht} – ekvivalentna impedansa transformatora, Z_{hv} – impedansa priključnog voda, Z_{ho} – impedansa nelinearnog opterećenja.

Struje viših harmonika cirkulišu u granama mreže i elementima distributivnog sistema i na impedansama tih elemenata izazivaju padove napona koji su istog reda kao i struje koje ih stvaraju, što se zapisuje izrazom:

$$\underline{U}_h = \sum_{h=2}^k \underline{Z}_h \underline{I}_h = (R_h + jh\omega_h L_h) \underline{I}_h. \quad (2)$$

Ovi padovi napona superponiraju se s prvobitno sinusnim naponom mreže zbog čega napon postaje izobličen,

što se matematički zapisuje kroz *Fourier*-ovu analizu izrazom:

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^k U_h \sin(h\omega_h t + \vartheta_h), \quad (3)$$

gdje je: $u(t)$ – napon opterećenja, U_0 – jednosmjerna komponenta napona, U_h – napon opterećenja za više harmonike, $\omega_h = h f_1$, $h = 3, 5, 7, 9, \dots$, ϑ_h – fazni stav napona h -tog harmonika. Izraz (3) iskazuje da se nesinusoidalni periodičan naponski talas može predstaviti kao zbir jednosmjerne komponente i sinusnih talasa različitih amplituda i faznih pomaka u odnosu na referentni ugao [4].

Opšta relacija koja definiše uticaj nelinearnih opterećenja na harmonijska izobličenja napona na sekundarnim priključcima energetskog transformatora data je sa:

$$\underline{U}_{hp} = \underline{U}_s - \underline{Z}_{ht} \underline{I}_h - \underline{Z}_{hm} \underline{I}_h, \quad h = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

Impedansa napojne mreže za h -ti harmonik struje Z_{hm} zavisi od reda harmonika, ali i od sprege transformatora u napojnoj mreži. Za potrošače u stambenim objektima, dominantan pad napona je u kućnim instalacijama, pa kod Z_{hv} dominira omska otpornost provodnika u strujnom krugu. Za harmonike višeg reda potrebno je uvažiti i otočnu granu (otočne kapacitivnosti) u modelu napojne mreže [5].

III. UTICAJ NELINEARNIH OPTEREĆENJA NA DISTRIBUTIVNE TRANSFORMATORE

A. Uticaj harmonika napona

Harmonici napona utiču na elektromagnetni fluks u transformatoru. Ta pojava se objašnjava *Faraday Lenz*-ovim zakonom. Ukupan fluks Φ se sastoji od glavnog fluksa kroz jezgro Φ_μ i rasipnog fluksa Φ_σ .

$$N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \cdot \frac{d(\Phi_\mu + \Phi_\sigma)}{dt} \cong N_1 \cdot \frac{d\Phi_\mu}{dt} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = u_1(t) - R_1 i_1(t) \cong u_1(t), \quad (5)$$

gdje je: N_1 – broj navoja primarnog namotaja, R_1 – zanemariva rezistansa primarnog namotaja, $i_1(t)$ – struja kroz namotaj i $u_1(t)$ – napon napajanja. Jednačina (3) se može zapisati i u frekvencijskom domenu koja prikazuje povezanost fluksa i harmonika napona:

$$N_1 \cdot \sum_h j(h\omega) \cdot \underline{\Phi}_{\mu,h} \cong \sum_h \underline{U}_h. \quad (6)$$

Dakle, vidimo da je intenzitet fluksa proporcionalan harmonicima napona, a obrnuto proporcionalan redu harmonika h . U realnim situacijama vrijednosti viših harmonika napona ostaju mali u odnosu na osnovni harmonik. Ovo znači da distributivni sistemi imaju nisku unutrašnju impedansu za više harmonike struja. Pojedini harmonici napona rijetko prelaze nivo od 2-3% [6]. Jednačinu (6) možemo pisati kao:

$$N_1 \cdot j\omega_1 \cdot \underline{\Phi}_{\mu,1} \cong \underline{U}_1. \quad (7)$$

Dakle, efekti harmonika napona dovode do:

- dodatnih gubitaka u transformatoru (u gvožđu) i u slučaju kada je opterećenje linearno,
- loše utiču na izolaciju (zbog povećanja eng. *Crest factor-a*, $CF = U_m / U_{eff}$) i dovode do njenog zamaranja i ubranog starenja [4], [6].

B. Uticaj harmonika struja

Za većinu distributivnih mreža iznos viših harmonika struja je značajan u odnosu na osnovni harmonik. Zbog toga harmonici struja dovode do stvaranja dodatnih gubitaka koji mogu biti vrlo visoki. Oni takođe dovode do povećanja gubitaka u gvožđu i namotima distributivnih transformatora zbog povećanja nivoa rasutog fluksa, kao i do povećanja buke koju emituje transformator. Udio dodatnih gubitaka postaje značajan kad je $THD_I \geq 5\%$ [6]–[8].

- Uticaj viših harmonika na dodatne gubitke u namotajima transformatora (P_{Cu}) – Efektivna vrijednost struje opterećenja se povećava zbog sadržaja viših harmonika tako da su sada gubici u bakru P_{Cu} dati izrazom:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{eff}^2 = R \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} I_{h,eff}^2 \quad (8)$$

- Dodatni gubici u namotajima usljed vrtložnih struja (P_{EC}) – Dodatni gubici opterećenja se mjenjaju i sa promjenom frekvencije struje koja protiče kroz namotaje transformatora. Tako su gubici u namotajima zbog vrtložnih struja usljed viših harmonika (P_{EC}) srazmjerni kvadratu efektivne vrijednosti struje i kvadratu frekvencije. Pri proticanju struje koja, pored osnovnog ($h=1$), sadrži i više harmonike reda $h=2,3,\dots,h_{max}$, gubici P_{EC} su dati izrazom:

$$P_{EC} = P_{EC-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_{1n}} \right]^2 \cdot h^2, \quad (9)$$

gdje su P_{EC-1n} – gubici usljed vrtložnih struja pri nominalnoj struji (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

Faktor harmonijskih gubitaka F_{HL} u namotajima usljed vrtložnih struja se računa sa:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2} \quad (10)$$

Stoga, nominalni gubici u namotajima transformatora usljed vrtložnih struja se množe sa F_{HL} da bi se odredili dodatni gubici usljed nelinearnih opterećenja [6]–[8].

- Dodatni gubici u sudu i konstrukcijskim dijelovima transformatora (P_{SL}) – Ostali gubici u transformatoru se pojavljuju zbog fluksa rasipanja koji predstavljaju gubitke u konstrukcijskim dijelovima transformatora kao što su kotao, priključne stezaljke, metalni držači... Ostali gubici usljed viših harmonika (P_{SL}) su srazmjerni frekvenciji i kvadratu efektivne vrijednosti struje, tj. njihova zavisnost se prikazuje pomoću izraza:

$$P_{SL} = P_{SL-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_{1n}} \right]^2 \cdot h^{0.8}, \quad (11)$$

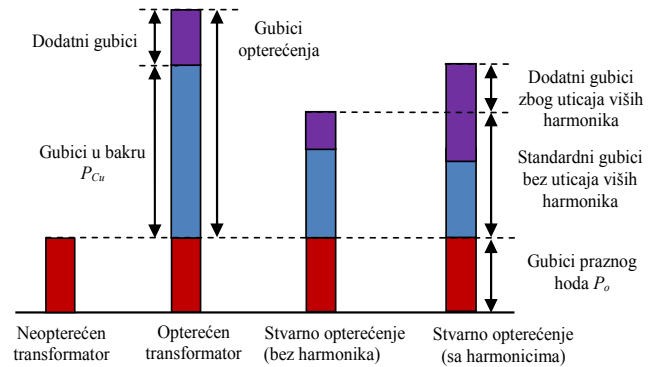
gdje su P_{SL-1n} – gubici u sudu i konstrukcijskim dijelovima zbog polja rasipanja pri nominalnoj vrijednosti struje (I_{1n}) osnovne frekvencije ($h=1$).

Faktor harmonijskih gubitaka F_{HL-ST} u sudu i konstrukcijskim dijelovima zbog fluksa rasipanja se računa prema:

$$F_{HL-ST} = \frac{P_{SL}}{P_{SL-1n}} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2 \cdot h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2} \quad (12)$$

Stoga, gubici u sudu i konstrukcijskim dijelovima zbog fluksa rasipanja se množe sa F_{HL-ST} da bi se dobili dodatni gubici usljed nelinearnih opterećenja [6]–[8].

Na Sl. 3 prikazan je grafički prikaz gubitaka u distributivnim transformatorima. Kako gubici u transformatoru zavise od struje opterećenja, gubici usljed harmonijskog izobličenja struje se takođe povećavaju. Ovi gubici povećavaju temperaturu osnovnih dijelova, a za uljne transformatore to je temperatura ulja.



Slika 3. Grafički prikaz gubitaka u distributivnim transformatorima

C. K–faktor transformatora

K –faktor je mjera uticaja viših harmonijskih članova u struji opterećenja na transformator, a definisan je prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986. K –faktor definiše kako transformator podnosi dodatno zagrijavanje (povećani gubici) izazvani višim harmonicima u struji opterećenja. Ovaj faktor je definisan izrazom [9]:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(I_h / I_1 \right)^2}, \quad (13)$$

gdje je h red harmonika, a I_h/I_1 odgovarajući pojedinačni faktor koji pokazuje udio strije h -tog harmonika u odnosu na osnovni harmonik. Izraz (13) je računat pod pretpostavkom da su gubici usljed vrtložnih struja namotaja transformatora srazmjerni kvadratu učestanosti i kvadratu amplitude svakog harmonika struje. Na osnovu K –faktora se računa smanjenje raspoložive snage transformatora zbog dodatnih gubitaka, a pri dizajniranju novog transformatora K –faktor se koristi za povećanje projektovane snage istog da bi transformator zadovoljio 100% opterećenja.

Jedna od metoda koja omogućuje rad transformatora u prisustvu viših harmonika je projektovanje transformatora sa K –faktorom. U tabeli I su prikazani komercijalno raspoloživi K –transformatori i tipična opterećenja, s tim da svi standardni transformatori spadaju u grupu $K=1$.

K –faktori prema tabeli I označavaju da su takvi transformatori ispitani i sertifikovani za nelinearna opterećenja. Transformator s većim K –faktorom može podnijeti veće nelinearno opterećenje, tj. veće opterećenje snagama viših harmonika, a da mu se zbog toga ne smanji opteretivost snagom na nominalnoj frekvenciji. Jasno je da su takvi transformatori zbog svoje konstrukcije skuplji, ali s obzirom da

su građeni za specijalne uslove rada, imaju duži životni vijek od običnog distributivnog transformatora, ukoliko ih opteretimo istim strujama viših harmonika. Zbog toga se ovi transformatori ugrađuju u nove mreže ili kao zamjena starim transformatorima tamo gdje je to potrebno [9].

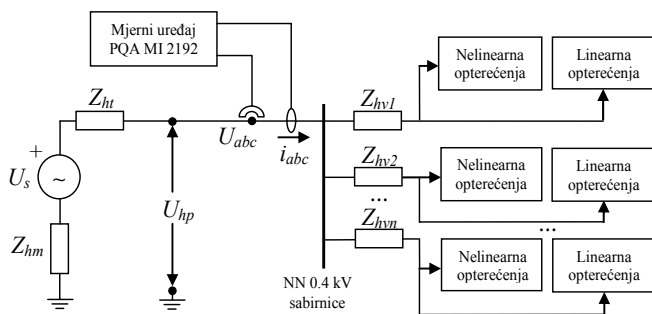
TABELA I. RASPOLOŽIVI K - TRANSFORMATORI

K – faktor	Tipovi opterećenja
$K-1$	Inkandescentna rasvjeta, termička opterećenja (grejna tijela), motori, elektromagnetni pretvarači
$K-4$	Rasvjeta na principu električnog pražnjenja, indukciona grejna oprema, aparati za električno zavarivanje, PLC uređaji, UPS sistemi koji imaju ugrađen filtar za više harmonike
$K-13$	Telekomunikaciona oprema, UPS sistemi koji nemaju ugrađen filtar za više harmonike, Elektronski uređaji sa dosta upravljačkih kola
$K-20$	Računari i računarska oprema, motorni pogoni sa pretvaračima za promjenu brzine obrtanja
$K-30$	Priključni uređaji sa dosta energetskih pretvarača na bazi energetske elektronike u industriji, medicini, obrazovnim laboratorijama, kao i uređaji u komercijalnom kancelarijskom prostoru
$K-40$	Ostala opterećenja identifikovana kao izvori viših harmonika (naročito višeg reda)

IV. POSTUPAK MJERENJA PARAMETARA NELINEARNIH OPTEREĆENJA NA TS 10(20)/0.4 kV/kV

Mjerenjem harmonijskih stuja koje se injektiraju u distributivnu mrežu od strane nelinearnih opterećenja moguće je doći do informacija o harmonijskom izobličenju u posmatranoj niskonaponskoj mreži i njihovih posljedica na distributivne transformatore. U narednoj analizi opisan je jedan praktično realizovani postupak mjerenja parametara nelinearnih opterećenja na distributivnim TS 10(20)/0.4 kV/kV.

Da bi se odredili parametri nelinearnih opterećenja, prvenstveno viši harmonici struja u distributivnoj mreži, na jednom trafo području potrebno je izvršiti njihovo mjerenje. Mjerenje ovih parametara vršeno je direktno na priključcima distributivnih transformatora sa niskonaponske strane na koje je direktno priključen mjerni uređaj, a prikaz postupka mjerenja prikazan je na Sl. 4.



Slika 4. Prikaz mjerenja parametara nelinearnih opterećenja na NN 0.4 kV strani distributivnog transformatora u TS 10(20)/0.4 kV/kV

Korišćeni mjerni uređaj je analizator kvaliteta električne energije Metrel MI 2192 (eng. *Power Quality Analyser*), koji se koristi za mjerenje i analizu parametara trofaznih sistema. Navedeni mjerni uređaj koristi mjerna metode koje se zasnivaju na digitalnom odabiranju ulaznih signala. Svaki ulaz (3 napona i 3 struje) se odabiru 128 puta u periodu. Osnovne mjerne veličine se računaju na kraju svakog perioda odabiranja i rezultati se prikazuju na displeju, ili se snimaju. Rezultati brze Furijeove transformacije (FFT) se računaju svakih 8 perioda (svakih 160 ms pri 50 Hz) [10].

Kao ulazni senzori struje korišćeni su obuhvatni strujni transformatori (strujna kliješta), a kao naponski senzori propisani djelitelji napona koji su sastavni dio mjernog uređaja. Impedanse za osnovni i više harmonike mreže Z_{hm} , transformatora Z_{ht} , odlaznih niskonaponskih vodova $Z_{hv1}, Z_{hv2}, \dots, Z_{hvn}$ koje modeluju udaljenost različitih tipova potrošača kao i impedanse opterećenja Z_{ho} su uvažene u sprovedenom mjerenju i analizi, a napon na priključcima transformatora U_s se smatara konstantnim. Broj niskonaponskih odlaza sa NN sabirnice je od $n=1$ do $n=8$ kod svih distributivnih TS na kojima je vršeno mjerenje. Priključni vodovi različitih objekata koji polaze sa NN sabirnice su izvedeni podzemno i/ili nadzemno kablom tipa PPOO A ili C_u od 25 do 150 mm² i kablom tipa X00/0 –A 3×70+71.5 mm².

V. REZULTATI I ANALIZA MJERENJA

Cilj mjerenja je da se mjerenjem na više lokacija u distributivnoj mreži koju pokriva RJ “Elektrodistribucija”, Mrkonjić Grad u sastavu ZP “Elektrokrajina” a.d. Banja Luka utvrdi sadržaj viših harmonika u struji opterećenja i njihov uticaj na distributivne transformatore za različita trafo područja. Ukupno je izvršeno 6 mjerenja na TS 10(20)/0.4 kV/kV koja su navedena u tabeli II koja napajaju različite tipove potrošnje. Odabrani su karakteristični tipovi potrošnje i to: poslovna, rezidencijalna i industrijska. Analizom rezultata treba da se identifikuje uticaj nelinearnih opterećenja na dodatne gubitke i smanjenje nominalne prenosne snage distributivnih transformatora.

TABELA II. UKUPAN BROJ POTROŠAČA I STRUKTURA POTROŠNJE NA TRAFOPODRUČJIMA NA KOJIM JE VRŠENO MJERENJE

R.br.	Naziv TS	Broj potrošača	Struktura potrošnje
1.	MBTS Banka	110	Poslovna
2.	MBTS Bolnica	231	Poslovna
3.	MBTS Zorište	143	Rezidencijalna
4.	BTS Robna kuća	130	Rezidencijalna
5.	MBTS Medeks	1	Industrijska
6.	ŽSTS Malinović Co	2	Industrijska

Radi utvrđivanja trenutnog stanja i analize uticaja nelinearnih opterećenja na distributivne transformatore mjerenja harmonijskog sadržaja u struji opterećenja su prikazana u tabeli III, s tim da su za srednje vrijednosti THD_U i THD_I uzete one faze sa najvećim sadržajem viših harmonika od minimalne do maksimalne vrijednosti.

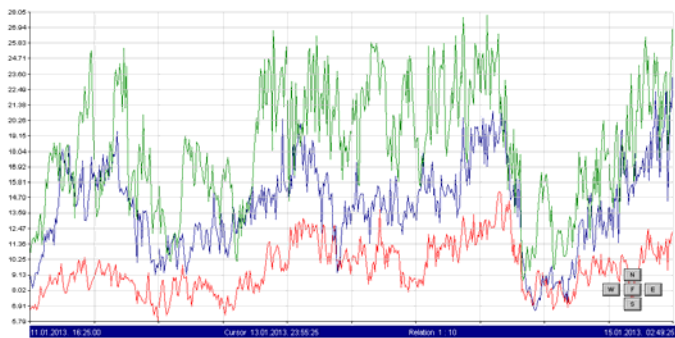
TABELA III. OPSEG TOTALNIH HARMONIJSKIH IZOBLIČENJA NAPONA I STRUJA

R.br.	Naziv TS	U_n, S_n transformatora	THD _U (%) min-max	THD _I (%) min-max
1.	MBTS Banka	20/0.4 kV/kV 630 kVA	0.73% 1.95%	1.57% 13.51%
2.	MBTS Bolnica	20/0.4 kV/kV 630 kVA	0.33% 1.34%	3.95% 13.37%
3.	MBTS Zborište	20/0.4 kV/kV 250 kVA	0.43% 1.40%	7.10% 16.33%
4.	BTS Robna kuća	20/0.4 kV/kV 630 kVA	0.84% 1.73%	11.36% 25.83%
5.	MBTS Medeks	10/0.4 kV/kV 400 kVA	0.82% 2.35%	2.40% 9.73%
6.	ŽSTS Malinović Co	20/0.4 kV/kV 160 kVA	0.73% 1.97%	1.57% 15.22%

Na Sl. 5.a i Sl. 5.b prikazani su rezultati mjerenja u BTS "Robna kuća" gdje je zabilježen najveći sadržaj harmonijskog izobličenja struje opterećenja u odnosu na ostale distributivne TS. Navedeni dijagrami predstavljaju promjenu prividne snage Sl. 5.a, i promjenu totalnog harmonijskog izobličenja struja Sl. 5.b u periodu mjerenja.



Slika 5.a Srednja vrijednost prividne snage po fazama kao i ukupna prividna snaga S [kVA] na karakterističnom mjernom mjestu 4



Slika 5.b Ukupno harmonijsko izobličenje struja – THD_I na karakterističnom mjernom mjestu 4

A. Analiza uticaja i negativni efekti nelinearnih opterećenja na trofazne distributivne transformatore

U ovom dijelu rada prikazan je postupak i proračun dodatnih gubitaka kao i smanjenje prenosne snage distributivnog transformatora u BTS "Robna kuća" 20/0.4 kV/kV, čiji su nominalni podaci preuzeti iz ispitnog lista navedenog transformatora, a parametri opterećenja dobijeni na osnovu mjerenja u određenom vremenskom periodu koja su prikazana u predhodnom odjeljku. U obzir su uzete vrijednosti

struja neparnih viših harmonika zaključno sa $h=15$ harmonikom u odnosu na osnovni harmonik $h=1$ koje su izražene u relativnim jedinicama i redom predstavljene u tabeli IV u kojoj je takođe prikazan i proračun faktora harmonijskih gubitaka.

TABELA IV. PRORAČUN FAKTORA HARMONIJSKIH GUBITAKA

h	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	h^2	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \cdot h^2$	$h^{0.8}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \cdot h^{0.8}$
1	1.0000	1.00000	1	1.00000	1.00000	1.00000
3	0.0814	0.00662	9	0.05958	2.40822	0.01594
5	0.0583	0.00339	25	0.08475	3.62389	0.01228
7	0.0323	0.00104	49	0.05096	4.74327	0.00493
9	0.0278	0.00077	81	0.06237	5.79954	0.00446
11	0.0189	0.00035	121	0.04235	6.80948	0.00238
13	0.0088	0.00007	169	0.01183	7.78313	0.00054
15	0.0084	0.00007	225	0.01575	8.72716	0.00061
Σ	/	1.0123		1.32759	/	1.04114

Iz tabele IV upotrebom izraza (10) i (12) izračunava se vrijednost faktora $F_{HL}=1.311$ i $F_{HL-ST}=1.028$.

B. Analiza i proračun dodatnih gubitaka na trofaznim distributivnim transformatorima

Za navedenu analizu neophodno je uvažiti da su dodatni gubici usljed viših harmonika frekvencijski zavisni. Dobro je poznato da su gubici usljed skin efekta kvadratno zavisni od frekvencije, te se zaključak o povećanju gubitaka usljed prisustva viših harmonika ne može donositi na temelju ukupnog harmonijskog izobličenja (THD), jer je ovaj pokazatelj frekvencijski nezavisan [7], [8].

Osnovni podaci o distributivnom transformatoru u kojem je vršeno mjerenje na karakterističnom mjernom mjestu 4, a koji je korišćen u analizi su:

$$S_n=630 \text{ kVA}, 20/0.42 \text{ kV/kV}, I_n^{VN}=18.20 \text{ A}, I_n^{NN}=866.03 \text{ A}, P_{Cu-n(75^\circ\text{C})}=7024 \text{ W}, P_0=1308 \text{ W}, R_f^{VN}=7.9695 \Omega, R_f^{NN}=0.0011 \Omega.$$

Gubici usljed vrtložnih struja u transformatoru se mogu dobiti oduzimanjem omskih gubitaka od ukupnih gubitaka usljed opterećenja [8]:

$$\begin{aligned} P_{TSL-n} &= P_{SC} - P_{dc} = P_{SC} - k \cdot [R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2] = \\ &= 7024 - 1.5 \cdot [(7.9695)18.20^2 + (0.0011)866.03^2] = \\ &= 1826.761 \text{ W}, \end{aligned}$$

gdje su P_{TSL-n} – ukupni dodatni gubici u transformatoru usljed nominalnog opterećenja, P_{SC} – nominalni gubici u bakru, P_{dc} – gubici u namotajima (RI^2), i k – koeficijent za čiju se vrijednost uzima $k=1.5$ za trofazne transformatore.

Dodatni gubici za trofazne uljne distributivne transformatore izračunavaju se prema [8]:

$$\begin{aligned} P_{EC-n} &= 0.33 \cdot P_{TSL-n} = 602.831 \text{ W} \\ P_{SL-n} &= P_{TSL-n} - P_{EC-n} = 1223.930 \text{ W}, \end{aligned}$$

P_{EC-n} – nominalni dodatni gubici u namotajima usljed vrtložnih struja, P_{SL-n} – nominalni dodatni gubici u konstrukcijskim dijelovima transformatora.

U tabeli V prikazani su razdvojeni kao i ukupni gubici dati u W zbog uticaja nelinearnih opterećenja na trofazni distributivni transformator u BTS "Robna kuća".

TABELA V. ANALIZA GUBITAKA TRANSFORMATORA U BTS ROBNA KUĆA USLJED NELINEARNIH OPTEREĆENJA

Tip gubitaka transformatora	Nominalni gubici [W]	Gubici usljed povećanja I_{eff} - [W]	Faktor harmonijskih gubitaka	Povećani gubici usljed nelinearnih opterećenja [W]
U praznom hodu P_0	1308	1308		1308
Na opornosti R_{dc}	5197.238	5261.164		5261.164
U namotajima usljed vrtložnih struja P_{EC}	602.831	610.245	1.311	800.031
U sudu i konstrukcijskim dijelovima usljed vrtložnih struja P_{SL}	1223.930	1238.984	1.028	1273.675
Σ	8332	8418.393		8642.870

C. Analiza smanjenja prenosne snage transformatora opterećenog višim harmonicima

Jednačina za određivanje najvećih dozvoljenih gubitaka pri nominalnom linearnom opterećenju data je izrazom [7]:

$$P_{LL-n}(r.j.) = 1 + P_{EC-n}(r.j.) + P_{SL-n}(r.j.), \quad (14)$$

gdje su P_{LL-n} – nominalni gubici opterećenog transformatora linearnim opterećenjem.

Utjecaj nelinearnih opterećenja na dodatne gubitke u distributivnim transformatorima opisuje se izrazom [7]:

$$P_{LL}(r.j.) = I^2(r.j.) \cdot [1 + F_{HL} \cdot P_{EC-n}(r.j.) + F_{HL-ST} \cdot P_{SL-n}(r.j.)], \quad (15)$$

Na osnovu izraza (14) i (15) određuje se najveća dozvoljena struja opterećenja transformatora I_{max} u $(r.j.)$ za koju su maksimalni gubici jednaki definisanim gubicima za procijenjene uslove. Ova struja se izračunava prema izrazu:

$$I_{max}(r.j.) = \sqrt{\frac{P_{LL-n}(r.j.)}{1 + [F_{HL} \cdot P_{EC-n}(r.j.) + F_{HL-ST} \cdot P_{SL-n}(r.j.)]}}. \quad (16)$$

Na osnovu izraza (16) za najveću vrijednost maksimalno dozvoljene efektivne vršne struje opterećenja dobija se:

$$I_{max}(r.j.) = \sqrt{\frac{1.2191}{1.2456}} = 0.9893(r.j.)$$

$$I_{max} = 0.9893 \cdot 866.03 = 856.763 A$$

Nominalna prenosna snaga distributivnog transformatora opterećenog nelinearnim opterećenjima na osnovu predhodnog proračuna dobija se na sličan način:

$$S_{ekv} = 0.9893 \cdot 630 = 623.259 kVA$$

Prenosna snaga usljed nelinearnih opterećenja transformatora je samo procijenjena snaga u odnosu na nominalnu snagu transformatora. Ako se harmonijski sadržaj u struji opterećenja promjeni, potrebno je izvršiti ponovnu procjenu ekvivalentne prenosne snage transformatora.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled metoda za analizu uticaja nelinearnih opterećenja na eksploatacione karakteristike transformatora u skladu sa važećim standardima. Postupak je

primijenjen na realnoj distributivnoj mreži i pokazano je da se zbog nelinearnog opterećenja smanjuje prenosna moć transformatora. Najznačajniji uticaj nelinearnih opterećenja na distributivne transformatore odnosi se na povećanje gubitaka usljed vrtložnih struja i gubitka usljed opterećenja. Povećanje gubitaka transformatora usljed nelinearnih opterećenja dovodi do ranog starenja izolacije namotaja, preranih kvarova i smanjenja životnog vijeka transformatora.

LITERATURA

- [1] Francisco C. De La Rosa, "Harmonics and Power Systems," Distribution Control Systems, Hazelwood, Missouri, U.S.A., Published in 2006 by CRC Press Taylor & Francis Group
- [2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality," second edition, McGraw – Hill
- [3] Ivan Sitar, "Distributivni uljni transformatori prema normi EN50464," Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – Ho Cired, 1.savjetovanje Šibenik, 18.-21.svibnja 2008.
- [4] Leon M. Tolbert, Harold D. Hollis and Peyton S. Hale "Survey of Harmonics Measurements in Electrical Distribution Systems," ¹ Oak Ridge National Laboratory, ² U.S. Army Center for Public Works, CECPW-K 7701 Telegraph Drive, IEEE IAS Annual Meeting, Oct. 6-10, 1996, San Diego, CA, pp. 2333-2339
- [5] Željko Đurišić, Milenko Đurić, Zorana Kešeljević, "Uticaj klima uređaja na osnovne pokazatelje kvaliteta električne energije u niskonaponskoj distributivnoj mreži," Elektrodistribucija br. 2-3, 2006. str. 66 – 77.
- [6] Johan Driesen, Ronnie Belmans and Kay Hameyer, "Study of Eddy Currents in Transformer Windings caused by a Non-Linear Rectifier Load," Katholieke Universiteit Leuven, Dep. EE (ESAT), Div. ELEN Kardinaal Mercierlaan 94 - B-3001 Heverlee, BELGIUM
- [7] M. H. Amrollahi¹, S. Hassani², "Determination losses and estimate life of distribution transformers with three computational, measurement and simulation methods, despite harmonic loads," ¹Urmia University of Technology, Urmia, Iran, ²West Azerbaijan Power Distribution Company, Urmia, Iran
- [8] IEEE Std C57.110-1998, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non sinusoidal Load Currents.
- [9] O. E. Gouda, G. M. Amer, W. A. A. Salem, " A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation," ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 1, No. 5, 2011, 114-120
- [10] Analizator kvaliteta električne energije MI 2192, Upustvo za upotrebu, verzija 3, Metrel®

ABSTRACT

This paper analyzes the effects of nonlinear loads in three-phase distribution transformers, and that the increased losses, and transmission power, insulation defects and shortened lifespan. There have been several experiments that analyzed current loads and harmonic content is determined on the basis of which it is determined the presence of nonlinear loads in total consumption. Set is equivalent to a model for the calculation of non-linear loads and the impact on the characteristics of the transformer. Shown the negative effects caused by these loads and presents the procedure of the analytical calculation of these impacts based on existing standards.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF NON-LINEAR LOADS IN THREE-PHASE DISTRIBUTION TRANSFORMERS

Duško S. Cvijić, Petar Matić