

Prenošenje viših harmonika struja kroz transformatore pri različitim spregama sa nesimetričnim opterećenjem

Dejan Govedarica

Student drugog ciklusa studija
Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Elektrotehnički fakultet

Istočno Sarajevo, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

govisarajevo@yahoo.com

Sažetak— U ovome radu izvršena je analiza viših harmonika struja koji se prenose kroz transformatore pri različitim spregama sa nesimetričnim opterećenjem. Za analizu korišćena su dva laboratorijska modela trofaznih transformatora snage $S=250$ VA i $S=2,4$ kVA. Za postizanje nesimetričnog opterećenja korišćeno je induktivno i kapacitivno opterećenje, dok je u oba mjerenja opterećenje druge i treće faze bilo čisto omsko. U jednom od mjerenja nesimetrija je ostvarena monofaznim opterećenjem pomoću personalnog računara (PC). Talasni oblici struja snimani su pomoću digitalnog osciloskopa PeakTech 1200. Prikazani su talasni oblici snimljenih struja primarnog i sekundarnog namotaja transformatora, a zatim su analizirani njihovi harmonijski spektri.

Ključne riječi – kvalitet električne energije; nesimetrično opterećenje; viši harmonici, K-faktor transformatora

I. UVOD

Problemi kvaliteta električne energije posebno su izraženi kod industrijskih potrošača sa velikim udarnim opterećenjima, pogona gdje dominiraju energetske pretvarači, uređaja koji svoju funkciju zasnivaju na dejstvu električnog luka, snažnih jednofaznih prijemnika i slično [1]. U odnosu na postojanje elektroenergetskog sistema kvalitet električne energije relativno je nov pojam, i pojavio se nakon što je električna energija definisana kao roba direktivnom 85/374/EEC, 1985 godine [2].

Kvalitet električne energije je vezan za odstupanje talasnih oblika napona i struja od idealnog prostoperiodičnog oblika. Pa se kvalitet električne energije izražava kao odstupanje od idealnog kvaliteta i definiše se preko određenih pokazatelja kvaliteta električne energije. Poremećaji kvaliteta električne energije mogu da se jave u prenosnoj i distributivnoj mreži i mogu biti isporučeni potrošačima, mogu biti generisani u instalacijama potrošača, a mogu ih proizvesti i potrošači [3]. Kao jedan od najčešćih razloga lošeg kvaliteta električne energije je prisustvo harmonijskih izobličenja talasnog oblika napona i struja. Harmonijsko izobličenje je takvo izobličenje gdje je talasni oblik ne sinusoidalni, ali periodičan sa periodom osnovne frekvencije. Odnosno, drugim riječima, harmonici su

komponente u signalu čija je frekvencija cjelobrojni umnožak osnovne frekvencije signala. Totalna harmonijska distorzija (eng. *Total Harmonic Distortion – THD*) direktna je posljedica sve češćeg korišćenja nelinearnih opterećenja. Harmonici struje, generisani od strane nelinearnih potrošača, injektiraju se u distributivnu i prenosnu mrežu i utiču na ostale potrošače i opremu. Zbog izobličenih struja dolazi do izobličenja i padova napona, tako da se izobličenje struje javlja i kod linearnih potrošača povezanih na isti napojni vod. Uređaji energetske elektronike u najvećoj mjeri predstavljaju nelinearne potrošače. Neki od njih su: energetske i frekvencijske pretvarači, UPS sistemi, invertori, DC kontroleri, punjači baterija i dr. Pored navedenih uređaja tu su i aparati za električno zavarivanje, uređaji sa gasnim pražnjenjem, elektrolučne peći i sl. Takođe, jedan od izvora viših harmonika su i kondenzatorske baterije koje se koriste u industrijskim postrojenjima za popravku faktora snage i popravku naponskog profila. Viši harmonici imaju višestruko negativno dejstvo na transformatore, kao što su povećana temperatura u namotajima i skin efekat, gubici u jezgri i gubici usljed vrtložnih struja. Usljed prekomjernog zagrijavanja transformatora koje nastaje kao posljedica viših harmonika, kao i zasićenja u jezgri, dolazi do smanjenja opteretivosti transformatora ispod nazivne snage. Posljedice se manifestuju u vidu starenje izolacije, što može dovesti do skraćenja radnog vijeka transformatora. Drugim riječima, sveukupna energetska efikasnost se smanjuje [4], [5].

II. PRAZAN HOD TRANSFORMATORA

Ponašanje transformatora u praznom hodu bitno je za analizu procesa magnećenja magnetnog kola, kao i za posmatranje izobličenja talasnih oblika, odnosno sadržaja viših harmonika, koji nastaju zbog nelinearnosti magnetnog kola. Viši harmonici struje magnećenja stvaraju nepotrebne gubitke, pojavu povišenih napona sekundara, a mogu izazvati i neugodne pojave rezonancije ukoliko u mreži postoje kapacitivni elementi. Izobličenje talasnih oblika struje i fluksa najizraženiji su u praznom hodu, jer ih tada ne prikriva struja opterećenja. Tipično se struja praznog hoda nalazi u opsegu $I_m \square (0,01-0,15)I_n$. Ona ima dominantnu reaktivnu komponentu, koja magneti magnetno kolo, i znatno manju

aktivnu komponentu, koja pokriva gubitke snage praznog hoda. Pošto je aktivna komponenta struje praznog hoda vrlo mala (jer je tipično $\cos\phi_0 \approx 0,01$), ona se zanemaruje, a transformator u praznom hodu se može posmatrati kao čisto induktivno kolo (prigušnica) sa nelinearnom karakteristikom magnećenja. Talasni oblik struje magnećenja ima ušiljeni oblik, pa je dominantan treći harmonik. Amplitude viših harmonika zavise od oblika krive magnećenja i nivoa zasićenja. Ako se usvoji da amplituda prvog harmonik iznosi 100%, tada je amplituda trećeg harmonika tipično 25-30%, petog oko 3%, sedmog oko 1%, dok svi ostali viši harmonici obično imaju amplitude značajno manje od 1% i mogu se zanemariti [6].

III. PRENOŠENJE VIŠIH HARMONIKA STRUJE KROZ TRANSFORMATOR PRI RAZLIČITIM SPREGAMA

Svaka sprega ima svoje prednosti i nedostatke, tako da izbor sprega transformatora zavisi od naponskog nivoa i tipa mreže koju napaja. Sprega trougao (D) ima osnovnu prednost jer su fazne struje $\sqrt{3}$ puta manje od linijskih struja, tako da se namotaji kroz koje teku fazne struje mogu graditi od provodnika $\sqrt{3}$ puta manjeg presjeka nego u sprezi zvijezda (Y), ali zbog linijskog napona namotaj ima $\sqrt{3}$ puta više navojaka. Sprega D se ponaša povoljno i u pogledu suzbijanja nesimetrija i prostiranja viših harmonika. S druge strane nedostaci sprega D su potreba za pojačanom izolacijom, te nemogućnost dobijanja faznih napona. Prednost sprega Y je u postojanju faznih i linijskih napona, što je bitno kod transformatora koji na sekundaru napajaju niskonaponske distributivne mreže gdje je neophodan nulti provodnik. Osim toga, kod sprega Y napon na krajevima namotaja prema zvjezdištu je blizak nuli. Nedostaci sprega Y su velike struje kroz namotaje, te se loše ponašaju u slučaju nesimetričnih tereta kao i pri prostiranju viših harmonika. Kada je primar transformatora spregnut u zvijezdu koja nema neutralnog provodnika ili čija neutralna tačka nije uzemljena, a sekundar takođe spregnut u zvijezdu, onda se polazi od toga da zbir struja ovog trofaznog sistema mora da bude jednak nuli. Pošto ne postoji neutralni provodnik ne može postojati ni neka rezultatna struja koja bi prolazila kroz njega, kao što je to slučaj npr. kod sprega YNy ili Yyn. Drugim riječima, sprega Yy ne može postati izvor nulte struje, niti nulta struja može da prođe unutar neuzemljene Y (prekid za nultu struju) [6], [7].

A. Uticaj harmonika na transformator

Kao posljedica izobličenja struje dolazi do značajnog uvećanja gubitaka koji se javljaju u transformatoru. Gubici se mogu podijeliti na aktivne gubitke, koji nastaju kao gubici u magnetnom kolu (gubici u gvožđu P_{Fe}), kao gubici u namotajima (gubici u bakru P_{Cu}), i kao dodatni (dopunski P_{dod}) gubici koji su posljedica parazitnih efekata.

Viši harmonici izazivaju povećanja efektivne vrijednosti struje opterećenja, pa su gubici u bakru dati izrazom:

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

gdje je P_{Cu} – ukupni gubici u bakru, I_{eff} – efektivna vrijednost struje koja protiče kroz namotaje i R – ukupna otpornost namotaja. Zbog gubitaka u bakru javlja se dodatno zagrijavanje

transformatora, pa tako dolazi i do degradacije karakteristika izolacije, koja se koristi za izolaciju namotaja.

Gubici koji se javljaju u namotajima transformatora posljedica su vrtložnih struja i srazmjerni su kvadratima efektivne vrijednosti struje i frekvencije. Pored osnovnog harmonika ($h=1$), struja sadrži i više harmonike $h=2,3,\dots,h_{max}$, pa su ukupni gubici u gvožđu dati izrazom:

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

gdje je P_{EC} – ukupni gubici usljed vrtložnih struja, P_{EF-1n} – ukupni gubici kao posljedica vrtložnih struja pri nazivnoj struji I_{1n} osnovne frekvencije ($h=1$), h – red harmonika.

Usljed vrtložnih struja faktor harmonijskih gubitaka F_{HL} u namotajima računa se kao:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h / I_1]^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h / I_1]^2}. \quad (3)$$

Za određivanje dodatnih gubitaka pri nelinearnom opterećenju potrebno je da se usljed vrtložnih struja nazivni gubici u namotajima transformatora pomnože sa F_{HL} .

Pošto je za većinu mreža iznos viših harmonika struja značajan u odnosu na osnovni harmonik javljaju se dodatni gubici koji mogu da budu veoma visoki. Takođe, viši harmonici mogu da utiču na povećanje buke transformatora, na povećanje gubitaka u namotajima transformatora i u gvožđu. Kada je $THD_I \geq 5\%$ tada udio dodatnih gubitaka postaje značajan. Zbog fluksa rasipanja javljaju se ostali gubici koji predstavljaju gubitke u konstrukcionim dijelovima transformatora i srazmjerni su kvadratu efektivne vrijednosti struje i frekvencije. Zavisnost im se predstavlja preko izraza:

$$P_{SL} = P_{SL-1n} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h / I_{1n}]^2 \cdot h^{0,8}, \quad (4)$$

gdje je P_{SL-1n} – gubici u konstrukcionim dijelovima i sudu zbog rasipnog fluksa pri nazivnoj struji I_{1n} osnovne učestanosti.

Faktor harmonijskih gubitaka F_{HL-ST} računa se iz izraza:

$$F_{HL-ST} = \frac{P_{SL}}{P_{SL-1n}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h / I_1]^2 \cdot h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h / I_1]^2}. \quad (5)$$

Dodatni gubici pri nelinearnim opterećenjima određuju se množenjem gubitaka u konstrukcionim dijelovima i sudu P_{SL-1n} sa faktorom F_{HL-ST} [4], [6], [8].

B. K-faktor

K-faktor definisan prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986, predstavlja mjeru kako viši harmonijski članovi u struji opterećenja utiču na transformator [9]. Takođe, pomoću K-faktora određuje se kako transformator podnosi dodatno zagrijavanje koje nastaje kao posljedica viših harmonika u struji opterećenja. K-faktor se računa prema izrazu:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h / I_1]^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h / I_1]^2}, \quad (6)$$

gdje je h – red harmonika, a I_h/I_1 – odnos efektivnih vrijednosti struje h -tog harmonika i struje opterećenja.

Smanjena raspoloživa snaga transformatora koja se javlja zbog dodatnih gubitaka može se računati na osnovu K-faktora. Prilikom dizajniranja, da bi novi transformator zadovoljio 100% opterećenja, koristi se K-faktor za povećanje projektovane snage. [4]. K-faktor ima standardne vrijednosti, a to su: 4, 9, 13, 20, 30, 40 i 50. Rijetka pojava su pojedinačni tereti sa K-faktorom iznad 20. Uobičajeno je da potrošači kao što su objekti sa velikim brojem nelinearnih potrošača i server sale imaju K-faktor od 4 do 9. Za potrošače koji imaju veliki broj personalnih računara tipično je da imaju K-faktor od 13 do 17. Međutim, ako se veći broj nelinearnih potrošača napaja sa istog izvora moguće je da ukupni sadržaj harmonika usljed pomaka faza pojedinačnih potrošača bude manji [9].

IV. IZVORI HARMONIKA KOD KOMERCIJALNOG OPTEREĆENJA

Kod komercijalnih objekata dosta se koristi monofazno napajana osjetljiva elektronska oprema, koja se sastoji od velikog broja malih potrošačkih jedinica koje generišu harmonike. Nivo izobličenosti napona zavisi i od impedansi kola i od ukupnog harmonijskog izobličenja struje. Kako se kondenzatorske baterije za popravku faktora snage ne koriste kod komercijalnih objekata, impedansa kola dominantno zavisi od impedanse transformatora napajanja. Opterećenja koja koriste elektroniku u novije vrijeme čine dominantan tip nelinearnog opterećenje u sistemu. Prednosti uređaja baziranih na poluprovodničkoj tehnologiji, unijele su revoluciju u energetske elektroniku poslednjih decenija i postoji velika vjerovatnoća da će se ovakav trend i nastaviti. Ti uređaji uključuju motore promjenjive brzine obrtanja, elektronsko napajanje, DC motore, akumulatore, elektronske balaste i mnoge druge ispravljače i invertore. Glavni problem u pogledu napajanja komercijalnih objekata je taj što napajanje monofazne elektronske opreme generiše previše harmonika struje. DC napajanje moderne elektronike i kancelarijske opreme obično je izvedeno ispravljačima sa monofaznim punotalasnim diodnim mostom. Povećanim korišćenjem personalnih računara u svim sektorima povećao se i procenat opterećenja koja sadrže elektronsko napajanje. Personalni računari primjetno utiču na kvalitet električne energije iz razloga što u napojnim jedinicama koriste prekidačke sklopove, jeftine i jednostavne konstrukcije. Ti sklopovi služe za pretvaranje jednofaznog naizmjeničnog napona u niski jednosmjerni napon i zahvaljujući prirodi svoje konstrukcije ozbiljni su generatori harmonika neparnog reda. [3], [5].

V. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA

Praktična realizacija projekta izvedena je u laboratoriji “Električne mašine” na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu. Cilj projekta je pokazati kako se viši strujni harmonici prenose kroz transformatore različitih sprega. Eksperimenti su izvedeni na dva transformatora:

- Trofazni transformator 1, proizvođača WUEKRO:

Primar: 3x400-230 V; 3x0,21-0,36 A

Sekundar: 3x2x115 V; 3x2x0,36 A

Prividna snaga: S=250 VA,

- Trofazni transformator 2, proizvođača ELMA:

Primar: 500-24 V; 3 A

Sekundar: 500-24 V; 2,8 A

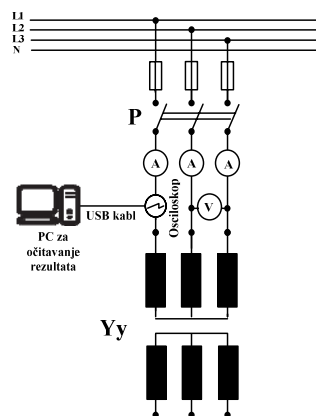
Prividna snaga: S=2,4 kVA,

Tip: VV/0-9409

Kao opterećenje korišćeni su: regulacioni otpornici, 2300 Ω ; induktivitet 200 mH, 5 A; kondenzator 3,3 μ F, 450 V AC i personalni računar. Podešavanje napona vršeno je pomoću regulacionog transformatora 500 V AC, a za mjerenje napona i struja korišćeni su digitalni multimetri PeakTech 3315 USB. Talasni oblici struja snimani su pomoću digitalnog osciloskopa PeakTech 1200, 25 Mhz, 100 MS/s, 100-240 V AC, 15 W, sa koga su podaci putem USB kabla očitavani na PC-iju.

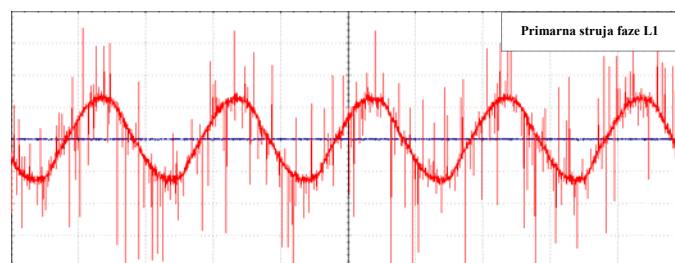
A. Transformator 1 u praznom hodu

Transformator 1, u sprezi Yy, je u praznom hodu. Linijski napon na primaru je $U^l=400$ V, a izmjerene primarne struje su: $I_1=18,05$ mA, $I_2=14,58$ mA, $I_3=17,20$ mA. Na Sl. 1 prikazana je mjerna šema, na osnovu koje je izvršeno spajanje opreme i sprovedeno mjerenje. Talasni oblik primarne struje u fazi L1 snimljen je pomoću digitalnog osciloskopa, sa koga su podaci putem USB kabla očitavani na PC-iju.

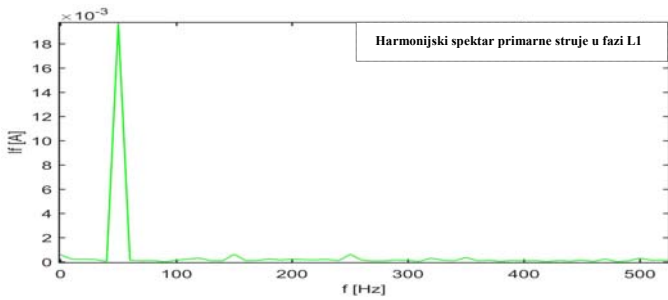


Slika 1. Mjerna šema za transformator 1 (Yy) u praznom hodu

Na Sl. 2 prikazan je talasni oblik primarne struje u fazi L1, a Sl. 3 prikazuje harmonijski spektar primarne struje.



Slika 2. Talasni oblik primarne struje transformatora 1 u praznom hodu

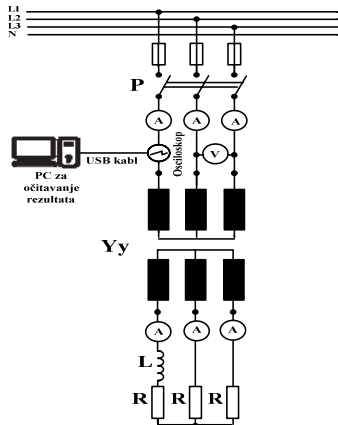


Slika 3. Harmonijski spektar primarne struje u fazi L1

Posmatrajući Sl. 3 uočava se da osnovni harmonik ($h=1$) ima najveću amplitudu. Sa rastućim h , koji je cio broj i predstavlja red harmonika, amplituda harmonika naglo opada. Pored osnovnog harmonika pojavljuju se i viši harmonici, ali sa znatno manjim amplitudama. Pristni su 3, 5 i 7 harmonik.

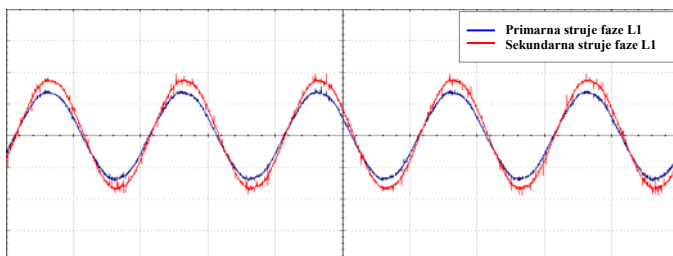
B. Nesimetrično opterećenje sa induktivitetom u fazi L1

Transformator 1, u sprezi Yy, je nesimetrično opterećen. U fazi L1 je omsko (400Ω) i induktivno (200 mH) opterećenje, a u fazama L2 i L3 je čisto omsko opterećenje (400Ω). Linijski napon na primaru je $U=400 \text{ V}$, a primarna struja u fazi L1 je $I_1=0,34 \text{ A}$. Na Sl. 4 prikazana je mjerna šema. Talasni oblici primarne i sekundarne struje snimljeni su pomoću digitalnog osciloskopa koji je povezan na fazu L1, (kanala 1 povezan na primar, a kanala 2 na sekundar).

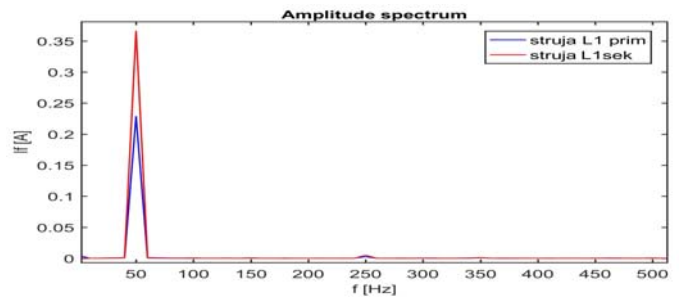


Slika 4. Mjerna šema za snimanje rezultata na transformatoru 1 (Yy) sa induktivitetom u fazi L1

Talasni oblici primarne i sekundarne struje faze L1 dati su na Sl. 5, a Sl. 6 prikazuje harmonijske spektre struja.



Slika 5. Talasni oblici primarne i sekundarne struje transformatora 1 (Yy) sa nesimetričnim induktivnim opterećenjem u fazi L1



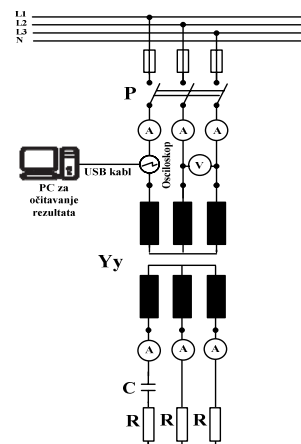
Slika 6. Harmonijski spektar primarne i sekundarne struje u fazi L1 transformatora 1 (Yy) sa nesimetričnim induktivnim opterećenjem

Posmatranjem harmonijskog spektra uočava se da osnovni harmonik ima najveću amplitudu kako u primarnoj tako i u sekundarnoj struji. Od viših harmonika javlja se samo 5-ti harmonik i to značajno manje amplitude, i njegova pojava na sekundaru preslikava se i na primarnu stranu.

Prednost sprege Yy je što na strani visokog i niskog napona postoje neutralne tačke, i što se na niskonaponskoj strani raspolaže sa dvije vrijednosti napona. Međutim, kod sprege Yy, pri opterećenju samo jedne faze sekundara, mana je što se ima dodatni fluks jednovremen kroz sve tri faze, koji indukuje dodatne elektromotorne sile i proizvodi dodatne gubitke u gvožđu. Dolazi i do porasta faznog napona jedne neopterećene faze. Ova neravnomjernost opterećenja prenosi se na primar, a sa njega dalje ka izvoru. Zbog ovih mana transformatori sprege Yy koriste se samo za pogone kod kojih neutralna tačka služi samo za uzemljenje ili se dopušta teret neutralnog voda do 10% nominalne struje. Sekundarna nesimetrija se preslikava na primarnu nesimetriju [7].

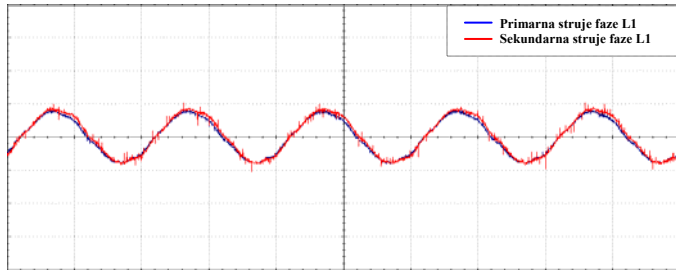
C. Nesimetrično opterećenje sa kapacitetom u fazi L1

Transformator 1, u sprezi Yy, je nesimetrično opterećen. U fazi L1 je omsko (300Ω) i kapacitivno ($3,3 \mu\text{F}$) opterećenje, a u fazama L2 i L3 je čisto omsko opterećenje (300Ω). Linijski napon na primaru je $U=400 \text{ V}$, a primarna struja u fazi L1 je $I_1=0,17 \text{ A}$. Na Sl. 7 prikazana je mjerna šema. Talasni oblici struja primara i sekundara snimani su pomoću digitalnog osciloskopa koji je povezan na fazu L1, tako da je kanal 1 povezan na primarnu stranu, a kanala 2 na sekundarnu stranu.

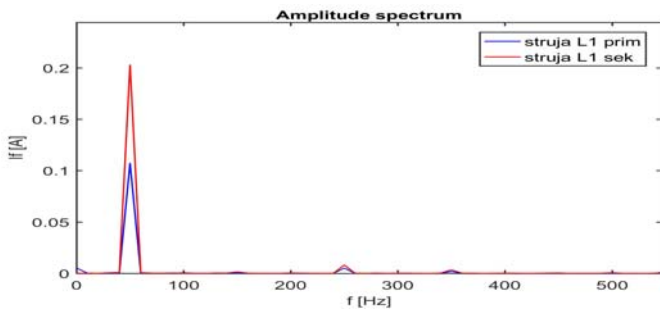


Slika 7. Mjerna šema za snimanje rezultata na transformatoru 1 (Yy) sa kapacitetom u fazi L1

Na Sl. 8 prikazani su talasni oblici primarne i sekundarne struje faze L1, a Sl. 9 prikazuje harmonijski spektar struja.



Slika 8. Talasni oblik primarne i sekundarne struje transformatora 1 (Yy) sa nesimetričnim kapacitivnim opterećenjem u fazi L1

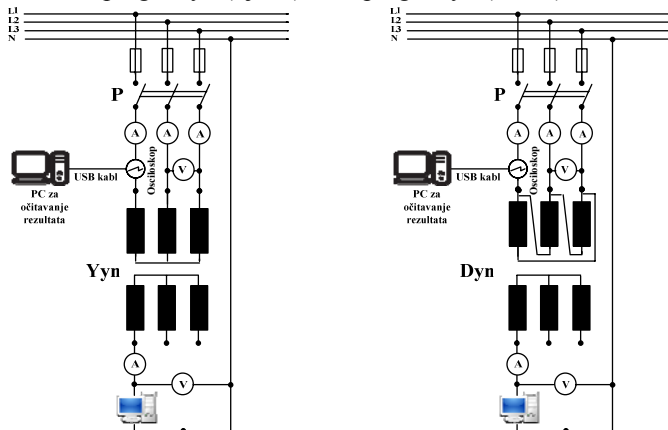


Slika 9. Harmonijski spektar primarne i sekundarne struje u fazi L1 transformatora 1 (Yy) sa nesimetričnim kapacitivnim opterećenjem

Iz harmonijskog spektra primarne i sekundarne struje faze L1 uočava se da je osnovni harmonik najveće amplitude. Međutim, pored osnovnog harmonika sa manjim amplitudama javljaju se 3, 5 i 7 harmonik. Sekundarna nesimetrija preslikava se na primarnu stranu.

D. Monofazno opterećenje sa personalnim računarom

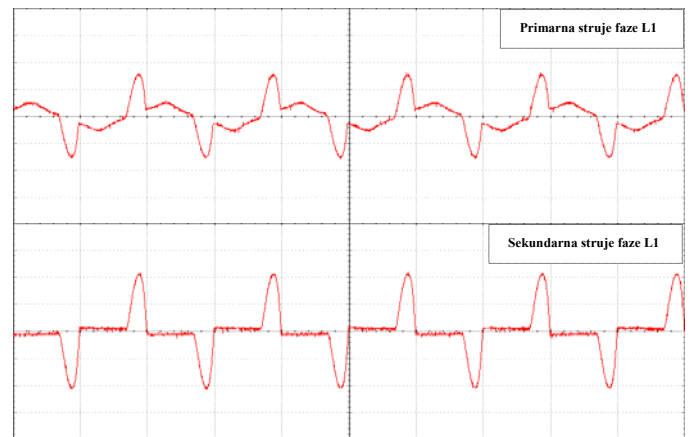
U ovome eksperimentu mjerenja su izvršena prvo na sprezi Yyn, a potom u sprezi Dyn. Na Sl. 10 prikazane su mjerne šeme za spregu Yyn (lijevo) i za spregu Dyn (desno).



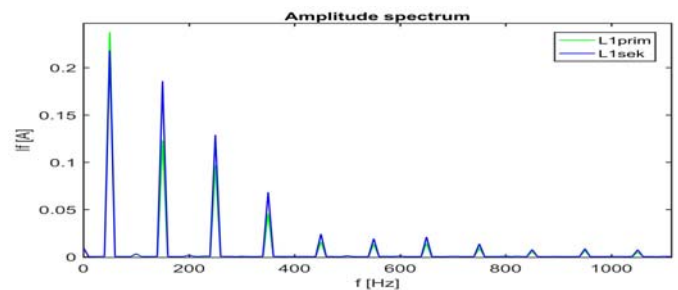
Slika 10. Mjerne šeme za snimanje rezultata na transformatoru 2, u sprezi Yyn (lijevo) i u sprezi Dyn (desno)

Transformator 2 u sprezi Yyn je monofazno opterećen sa PC-ijem u fazi L1. Linijski napon na primaru je $U^l=352$ V, a napon sekundra je $U^m=194$ V. Izmjerene primarne struje su:

$I_1^l=0,20$ A, $I_2^l=0,13$ A, $I_3^l=0,11$ A. Sekundarna struja je: $I_1^m=0,16$ A. Na Sl. 11 prikazni su talasni oblici struje primara i sekundara, a na Sl. 12 prikazan je njihov harmonijski spektar.



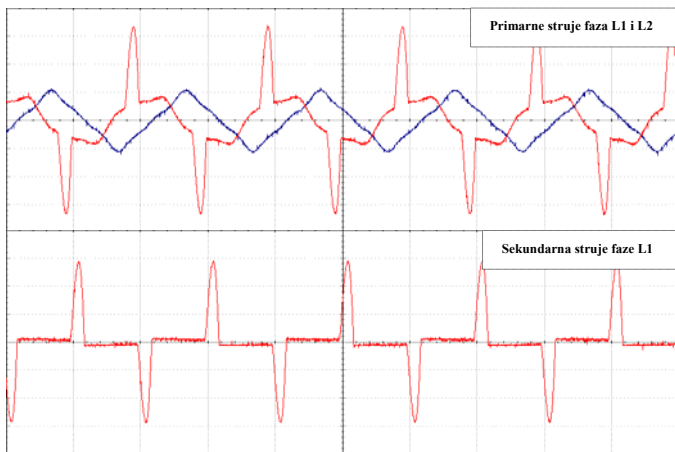
Slika 11. Talasni oblik primarne (gornja) i sekundarne (donja) struje monofazno opterećenog transformatora 2 u sprezi Yyn



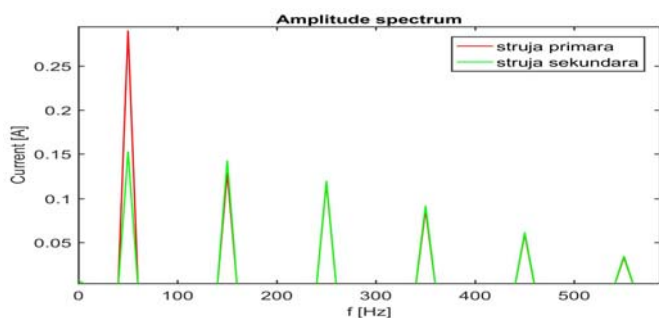
Slika 12. Harmonijski spektar primarne i sekundarne struje monofazno opterećenog transformatora 2 u sprezi Yyn

Osobena karakteristika prekidačkog napajanja je veoma visok nivo triplih harmonika struje, što se može vidjeti na Sl.12. Na dijagramu su dati svi harmonici zaključno sa 22-om harmonikom, i primjećuje se njihova pojava kako na sekundarnoj tako i na primarnoj strani. Od viših harmonika najdominantniji su 3, 5 i 7 harmonik. S obzirom da se tripli harmonici algebarski sabiraju u neutralnom provodniku trofaznog sistema, povećano korišćenje prekidačkog napajanja izaziva preopterećenje neutralnog provodnika, a postoji i opasnost od pregrijavanja transformatora zbog harmonijskih struja, povećanog fluksa rasipanja i velikih struja neutralnog provodnika. Sa rastom nivoa harmonika javlja se potreba za povećanjem presjeka nultog provodnika, jer čak i u idealno simetričnom sistemu harmonici djeljivi sa 3 po fazama se ne poništavaju već algebarski sabiraju u nultom provodniku. Npr. ako je nivo 3-eg harmonika 70% u faznim provodnicima simetričnog sistema, u neutralnom se dobija struja 3-eg harmonika vrijednosti od 210% [3].

Transformator 2 u sprezi Dyn je monofazno opterećen sa PC-ijem u fazi L1. Vrijednosti napona i struje na primaru su: $U^l=220$ V, $I_1^l=0,35$ A, a vrijednosti napon i struje na sekundaru su: $U^m=209$ V, $I_1^m=0,18$ A. Sl. 13 prikazuje talasne oblike struje primara i sekundara, a njihov harmonijski spektar prikazan je na Sl. 14.



Slika 13. Talasni oblik primarne (gornja) i sekundarne (donja) struje monofazno opterećenog transformatora 2 u sprezi Dyn



Slika 14. Harmonijski spektar primarne i sekundarne struje monofazno opterećenog transformatora 2 u sprezi Dyn

Posmatranjem harmonijskog spektra primarne i sekundarne struje transformatora 2 u sprezi Dyn, jasno se vidi prisustvo triplih harmonika u obje struje. Na grafiku su dati svi tripli harmonici zaključno sa 11-tim. Međutim, posmatrajći primarni spektar harmonika uočava se dominantnost osnovnog harmonika, za razliku od sprege Yyn gdje ovaj harmonik nije mnogo procentualno veći u odnosu na 3-ći harmonik. U harmonijskom spektru sekundarne struje situacija je nešto drugačija, gdje osnovni harmonik ima vrlo malo veću vrijednost u odnosu na 3-ći i 5-ti harmonik. Jasno je da sprege Dyn ima pogodnosti za primjenu kod distributivnih transformatora gdje je zastupljeno monofazno opterećenje.

VI. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ispitivanja je da se ispita uticaj različitih nelinearnih potrošača na harmonijski spektar struja primara i sekundara. Upotreba nelinearnih opterećenja, naročito opterećenja koja koriste prekidačke sklopove može izazvati harmonijska izobličenja u sekundarnom kolu transformatora, koja se prenose u primarno kolo transformatora. Upotrebom nelinearnih opterećenja smanjuje se prenosna moć transformatora, a najznačajniji uticaj odnosi se na povećane gubitke usljed vrtložnih struja i gubitke usljed opterećenja. Nelinearna opterećenja izazivaju prijevremeno starenje izolacije namotaja, potom izazivaju povećane gubitke, prijevremene kvarove i na kraju dolazi do smanjena radnog

vijeka transformatora. Na prenošenje viših harmonika sa sekundara na primar značajno se može uticati odgovarajućim izborom sprege transformatora.

ZAHVALNICA

Veliku zahvalnost dugujem doc. dr Željku Đurišiću, koji je ujedno i mentor ovoga rada, na neiscrpoj pomoći i korisnim savjetima. Takođe bih se zahvalio magistru Srđanu Jokiću koji mi je pružio svu potrebnu pomoć pri izradni praktičnog dijela rada u laboratoriji. Rad je nastao u okviru projekta-2 i završnog rada, na drugom ciklusu studija, na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu.

LITERATURA

- [1] N. Rajković, D. Tasić, "Distributivne i industrijske mreže", Akademska misao, Beograd, 2008.
- [2] V. Bečirović, "Razvoj mjernog sistema za analizu kvalitete električne energije", Magistarski rad, Sarajevo, 2011.
- [3] N. Rajković, M. Đurić, Ž. Đurišić, J. Mikulović, I. Nenčić, A. Ivanković, M. Gostović, "Analiza karakterističnih dijagrama opterećenja u ED Beograd sa ciljem tipizacije dijagrama aktivnog i reaktivnog opterećenja i utvrđivanja pokazatelja kvaliteta električne energije", Studija za Elektrodistribuciju Beograd, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2008.
- [4] D. S. Cvijić, P. Matić, "Analiza uticaja nelinearnih opterećenja na distributivne transformatora", Infoteh-Jahorina, 2013.
- [5] M. Zec, Č. Zeljković, S. Zubić, P. Matić, V. Radusinović, "Analiza kvaliteta električne energije objekta sa velikim brojem nelinearnih potrošača male snage", Infoteh-Jahorina, Vol. 8, Ref. D-3, p.297-300, 2009.
- [6] P. Matić, "Električne mašine 1", Akademska misao, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2016.
- [7] B. Mitraković, "Transformatori", Naučna knjiga, Beograd, 1979.
- [8] D. Stevanović, P. Petković, "Harmonici u elektroenergetskom sistemu – praktični problemi i rešenja", Infoteh-Jahorina, Vol. 12, 2013.
- [9] S. Huntter, "Praćenje opterećena distribucijskih transformatora", CIRED, Umag, 2010.

ABSTRACT

In this paper, there was performed the higher current harmonics analysis that are transmitted through transformers at different coupling with asymmetric load. Two laboratory models of three-phase transformers of apparent power $S = 250$ VA and $S = 2,4$ kVA were used for the analysis. In order to obtain asymmetric load, inductive and capacitive load was used, while in case of both measurements, the load of the second and third phase was purely ohm. In one of the measurements, asymmetry is achieved by single-phase load a personal computer (PC). Wave forms of currents are recorded with a digital oscilloscope PeakTech 1200. Wave forms of the recorded currents of the primary and secondary windings of the transformer are shown, and then their harmonics spectra are analyzed.

TRANSMISSION OF HIGHER HARMONICS THROUGH TRANSFORMERS AT DIFFERENT COUPLING WITH ASYMMETRIC LOAD

Dejan Govedarica