

PROVJERA IZVORA ZA ZAVARIVANJE

Inrush current of welding machine

Ivan Petrović¹, Marinko Stojkov², Ivan Samardžić², Predrag Marić¹

¹ Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, FERIT Osijek

² Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu

Ključne riječi: Uređaj za zavarivanje, struja uklopa, trofazni transformator za zavarivanje.

Sažetak

U radu je opisan postupak snimanja uklopne struje uređaja za elektrolučno zavarivanje MAG postupkom, odnosno ispitivanje uklopne struje trofaznog transformatora snage 6 kilovoltampera (kVA). Promjenom vrijednosti omskih otpora mijenjaju se parametri za zavarivanje - napon i struja električnog luka, na osnovi kojih se dobiju vrijednosti uklopne struje (ne)opterećenog transformatora, čije se vrijednosti koriste za daljnje proračune zaštite elemenata uređaja, a time i zaštitu transformatora.

Abstract

In this research, a method used to create the inrush current devices for arc welding MAG procedure or test inrush current three-phase power transformers of 6 kVA is described. By changing the value of resistance parameters of control welding unit voltage and arc current are also changed, and further on the values of transformer inrush current are obtained. These inrush current values are used for further calculations for unit protection, and thus the protection of transformers.

1. Uvod

Električna energija iz mreže (230/400 Volta (V), 50 Herza (Hz)) ne koristi se neposredno za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Budući da za električni luk treba osigurati relativno jaku struju (50-1000 Ampera (A)) uz niski napon (nekoliko desetaka V), potrebni su posebni izvori struje [1].

Glavna zadaća izvora struje za elektrolučno zavarivanje je prilagoditi napon mreže na razinu koja omogućuje sigurno uspostavljanje luka pri čemu je važna i mogućnost mijenjanja karakteristika luka [2].

Kao izvori istosmjerne struje mogu se koristiti generatori istosmjerne struje i ispravljači, a kao izvori izmjenične struje energetske transformatori, izmjenični generatori odnosno generatori visokofrekventne struje (pretvarači).

Za uspostavljanje i održavanje električnog luka važan je napon praznog hoda izvora (napon uspostavljena električnog luka). Što je taj napon viši, lakše se uspostavlja i održava električni luk. Radi sigurnosti zavarivača napon praznog hoda izvora struje ograničen je na 70 - 110 V.

Uređaji za zavarivanje sastoje se od trofaznog ili monofaznog transformatora s ispravljačkim diodama, sklopom za regulaciju (regulatorima za ugađanje odgovarajućih radnih parametara) i prigušnicom u istosmjernom krugu. Ispravljanje izmjenične u istosmjernu struju obavlja se pomoću ispravljačkih elemenata.

Trofazni transformator simetrično opterećuje sve tri faze električne mreže. Obično se uključuje neupravljan i praćen je velikim nesimetrijama tokova u željeznoj jezgri. Kao posljedica javljaju se velika izobličenja valnog oblika struje magnetiziranja, vrlo velike struje uklopa, te vrlo velike istosmjerne komponente struje [3, 4].

Najveća vrijednost amplitude struje uklopa u određenoj fazi se javlja kada se transformator uklapa u trenutku prolaska napona te faze kroz nulu i ako je remanentni magnetizam maksimalan. Tada velika amplituda struje uklopa se javlja svakih pet ili šest uklopa.

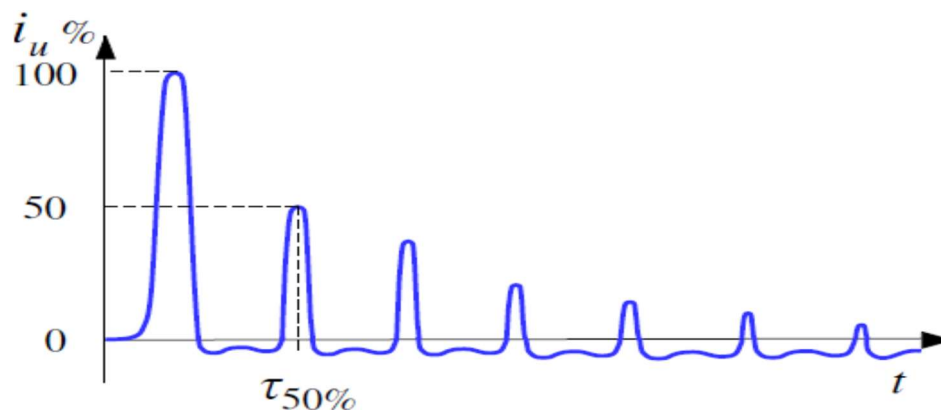
Ustaljeno stanje u transformatoru i u bilo kojem električnom uređaju ne može se dogoditi trenutno već je za to potrebno vrijeme od nekoliko perioda izmjenične struje nazivne frekvencije 50 Hz. Prelazak iz jednog u drugo ustaljeno stanje naziva se prijelazna pojava. Prijelazne pojave javljaju se u slučajevima: priključenja neopterećenog transformatora na električnu mrežu, promjeni opterećenja i pri pojavama kratkih spojeva i napona.

Magnetski tok u jezgri transformatora razmjernan je integralu napona napajanja, što znači da za njim zaostaje za 90° . Ako se transformator uklopi u trenutku prolaska napona kroz nulu, onda je maksimalni magnetski tok dvostruko veći od nazivnog, a time se i pridoda i zaostali magnetski tok. Amplituda toka uvijek je ista, ali tok posjeduje istosmjernu komponentu čije trajanje ovisi o radnom i induktivnom otporu kruga [5].

Prilikom uključenja neopterećenog trofaznog transformatora na mrežu javlja se struja praznog hoda i_0 koja se sastoji od radne komponente i_{0r} i znatno veće jalove komponente i_{μ} [9].

U ustaljenom stanju struja praznog hoda iznosi nekoliko postotaka nazivne struje transformatora, dok prilikom uključenja do uspostave novog ustaljenog stanja komponenta struje magnetiziranja može porasti na iznose puno veće od nazivne struje.

Struja uklopa je struja magnetiziranja koja nastaje prilikom uklapanja neopterećenog transformatora na električnu mrežu [6]. Amplituda te struje može biti višestruko veća od amplitude nazivne struje, a njeno je trajanje karakterizirano vremenom $\tau_{50\%}$ koje je potrebno da struja uklopa padne na pola svoje vrijednosti. Na slici 1. prikazan je karakterističan izgled struje uklopa neopterećenog transformatora.



Slika 1 Karakterističan izgled struje uklopa [6].

Struja uklopa nastaje zbog nelinearnosti krivulje magnetiziranja željezne jezgre, u skladu s Faradeyevim zakonom, dok je remanentni magnetizam može još povećati [6]. Ako se transformator uklopi kad je napon maksimalan odnosno kad je stacionarni magnetski tok jednak nuli, struja uklopa jednaka je stacionarnoj struji praznog hoda. Narinuti sinusni napon uvjetuje i sinusnu promjenu magnetskog toka. Najveća amplituda struje uklapanja nastaje kada se transformator uklopi u trenutku prolaska napona kroz nulu, ako je pritom remanentni tok Φ_R suprotnog preznaka od pripadajuće trenutne vrijednosti. Zbog zasićenja jezgre i velike nazivne magnetske indukcije, pojavit će se najveća vrijednost struje magnetiziranja [8].

2. Analitički izračun struje uklopa

Prvi analitički izračun za određivanje maksimalne struje uklopa daje Specht [5] računa se iz izraza (2):

$$i = -\frac{\sqrt{2}UX}{Z^2} \left[\frac{R}{X} \sin(\omega t) - \cos(\omega t) + e^{-\left(\frac{R}{X}\right)(\omega t + \theta)} \left(\frac{R}{X} \sin\theta + \cos\theta \right) \right] \quad (2)$$

U ... napon napajanja primarne strane transformatora [V];

X ... induktivni otpor transformatora [Ω];

R ... omski otpor namota transformatora [Ω];

Z ... impedancija transformatora [Ω].

Kut θ opisan je sljedećom jednačbom prikazano u izrazu (3):

$$\theta = \cos^{-1}(B_s - B_r - B_m)/B_m \quad (3)$$

gdje je:

B_s ... ukupna magnetska indukcija zasićene jezgre [T];

B_m ... vršna vrijednost indukcije u svitku priključenom na napon E.

Holcomb daje pojednostavljenu verziju Spechtove jednačbe izraz (2) za izračun struje uklopa vrijedi izraz (4):

$$i = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \psi) - e^{-\frac{R}{L\left(\frac{\Theta_{sn}}{\omega}\right)} \cdot \sin(\Theta_{sn} - \psi)} \right] \quad (4)$$

gdje je:

ψ ... fazni kut između napona i struje određen jednačbom, dobije se iz izraza (5):

$$\psi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \quad (5)$$

3. Specifičnosti struje uklopa i njezin utjecaj na mrežu i uređaj u kojem nastaje

Problemi uzrokovani uklopnim strujama uklopa mogu izazvati kvarove ili pogrešan rad osigurača, zaštitnih releja ili drugih vrsta zaštita u energetskom sustavu. Udarne struje uklopa mogu izazvati i mehanička oštećenja. Maksimalni iznos udarne struje uklopa može doseći i desetorostruki iznos nazivne struje transformatora, a moguća pojava struja uklopa iznosi 90 % struje kratkog spoja [9].

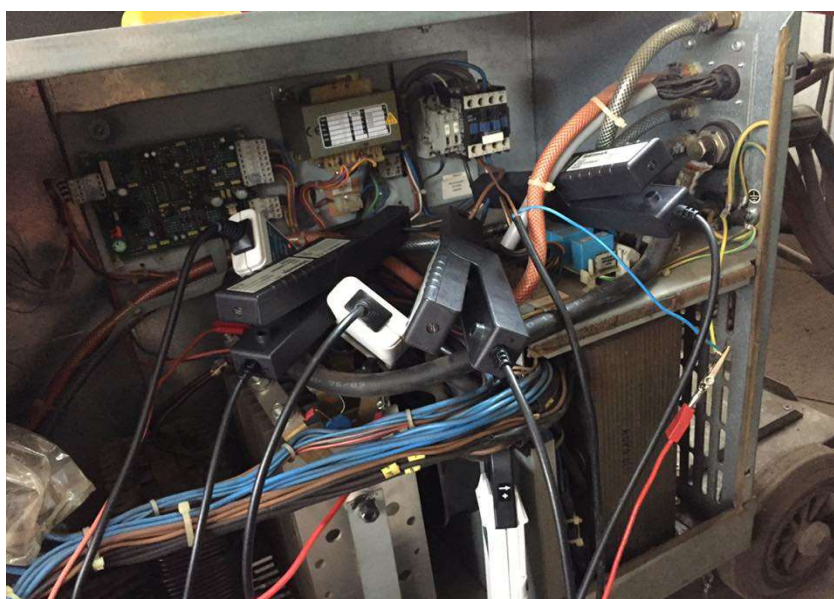
Iznos jačine struje uklopa ovisi o trenutku uključivanja i o remanentnom magnetizmu u jezgri. Pri prvom uključivanju (bez remanencije) najmanja je struja u fazi u kojoj je napon maksimalan, a najveća u fazi u kojoj je u trenutku uključivanja napon nula. U najgorem slučaju i uz dodatak zbog remanentnog magnetizma struja uklopa može postići i do 40-struke vrijednosti nazivne struje. Ako se transformator često uklapa, uklopna struja može izazvati proboj izolacije, jer slučajno uklapanje može se dogoditi u trenutku kada uklopna struja ima najveću vrijednost što odgovara trenutku uključivanja kad je napon faze jednak nula [10].

Velike probleme struja uklopa može izazvati zbog velikog sadržaja viših harmoničkih članova koji mogu djelovati na druge komponente u susatvu u obliku prenapona i pojave rezonancije [11].

Ukoliko se transformator često uklapa na mrežu, može doći do proboja izolacije uzrokovanih strujom uklopa [12, 13].

4. Materijal i metoda

Snimanje struje uklopa uređaja za elektrolučno zavarivanje, proizvođača REHM RD 420, s regulacijom struje opterećenja 35-420 A, priključni napon $3 \times 400\text{V}$, snage $S_n=6\text{ kVA}$; $\cos \varphi=0,98$; zaštitni osigurači 32 A; radni napon 15,5-35 V, napon praznog hoda 18-48 V odnosno u ovom slučaju trofaznog transformatora, prikazano je na slici 2 na kojoj se vidi priključena oprema. Mjerenja su rađena od stanja praznog hoda, nekoliko točaka opterećenja, zatim ukapčanjem transformatora pod 80 % opterećenja. Opterećenje uređaja za zavarivanje su omski otpori uređaja (uređaj ZOD 600) za ispitivanje statičke karakteristike uređaja za zavarivanje, iznosa vršne struje opterećenja do 600 A DC. U ovom slučaju ispitivanje je provedeno strujama do 350 A DC, pogodnima za ispitivani uređaj odnosno transformator uređaja za zavarivanje. Mjerenja jakosti struje su vršena strujnim kliještima i programskom podrškom LabView-a i to na sve tri faze primara i sekundara. Fazni primarni napon i linijski sekundarni napon su također mjereni.

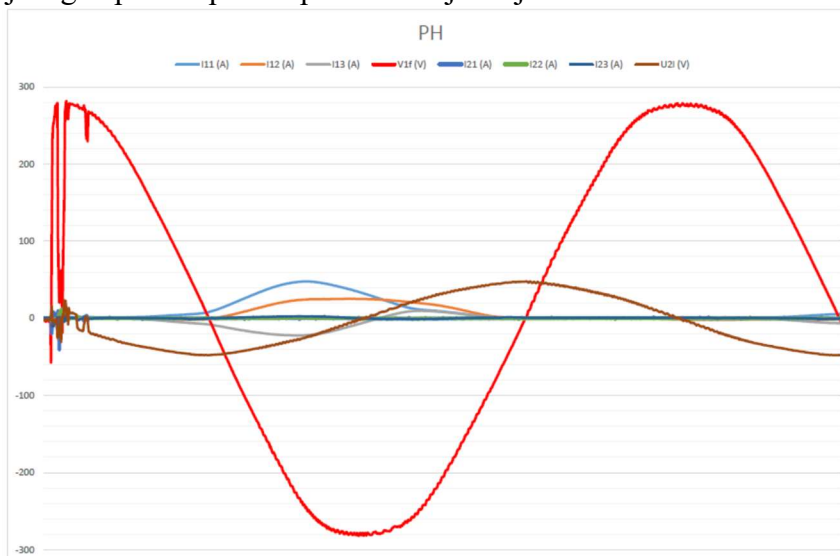


Slika 2 Prikaz mjerenja struje uklopa na uređaju REHM RD 420 za elektrolučno zavarivanje, 2016. (autor: Ivan Petrović)

5. Rezultati mjerenja valnih oblika struje uklopa trofaznog transformatora za zavarivanje

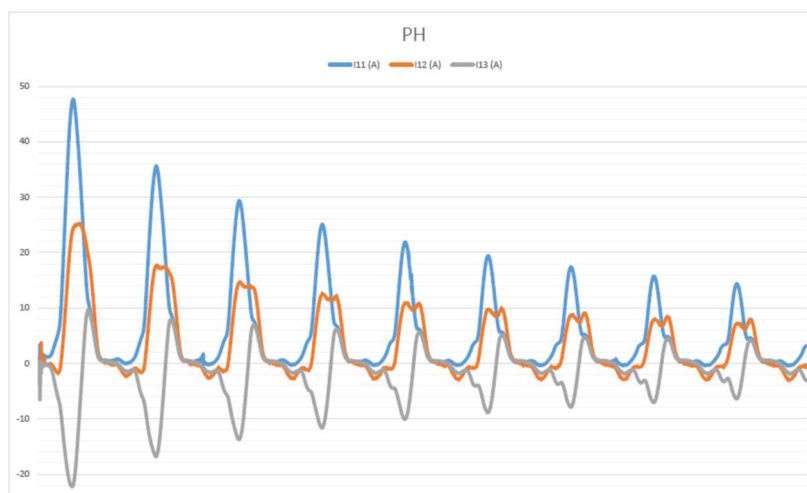
5.1 Ispitno mjerenje I: Uključenje transformatora u praznom hodu

Na slici 3 prikazani su valni oblici struja primara u sve tri faze i faznog napona prve faze, zatim sekundarnog linijskog napona u prvom periodu uključenja transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz.



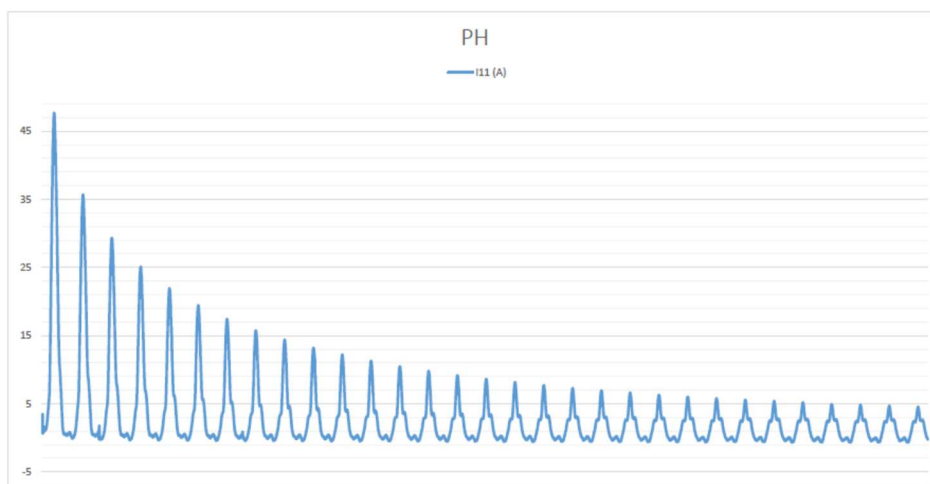
Slika 3 Valni oblici struja i napona kod uključenja transformatora u praznom hodu, 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 4 prikazan je valni oblik struje uklopa za sve tri faze primara uključenja transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz.



Slika 4 Valni oblici uklopnih struja primara transformatora u praznom hodu, 2016. (autor: Ivan Petrović)

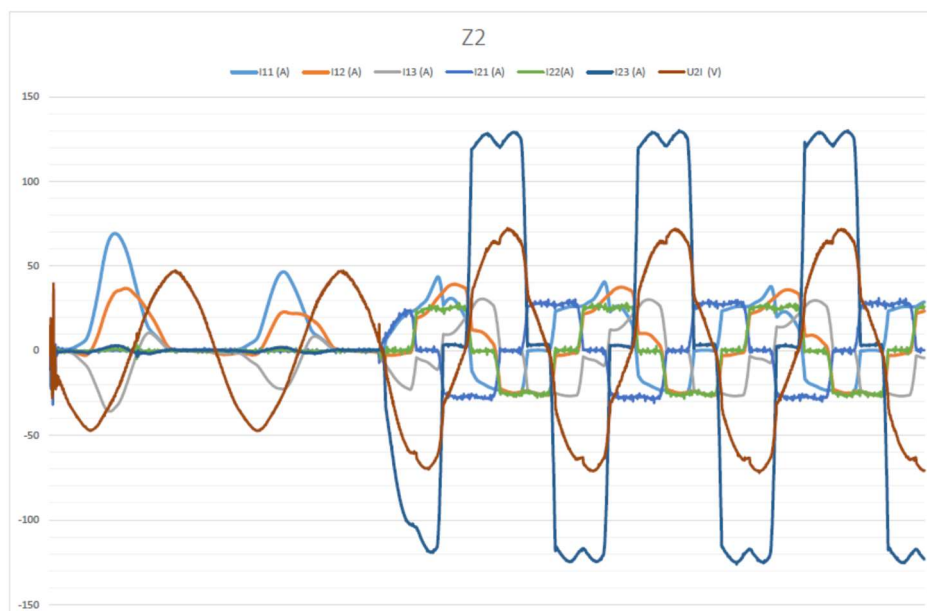
Na slici 5 prikazan je valni oblik struje uklopa prve faze primara.



Slika 5 Valni oblik uklopne struje prve faze, 2016. (autor: Ivan Petrović)

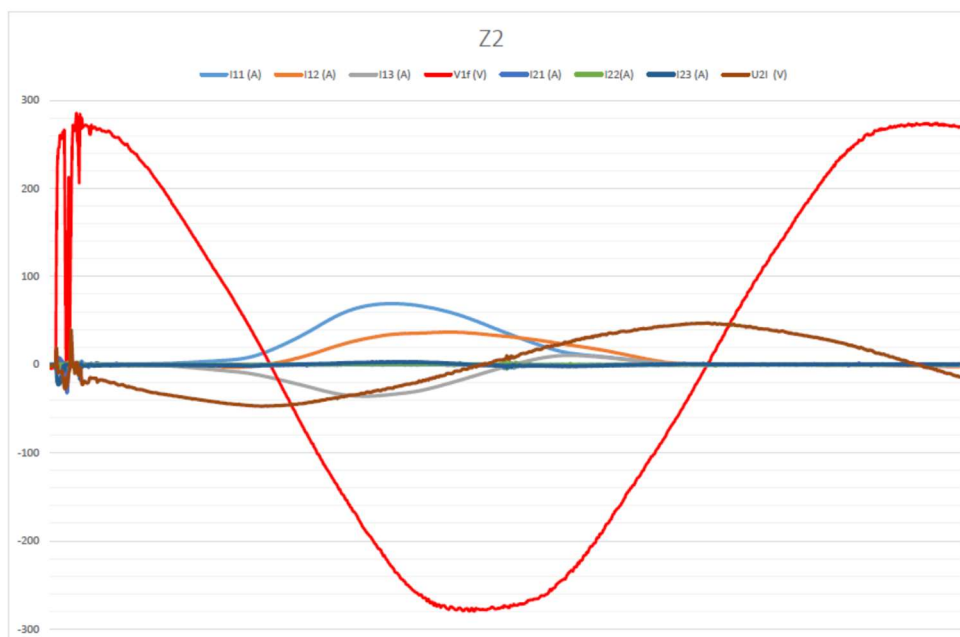
5.2 Ispitno mjerenje II: Uključenje transformatora u prazni hod i zatim opterećenje

Na slici 6 prikazani su valni oblici uklopa primarnih struja, primarni fazni napon prve faze i sekundarni linijski napon, zatim i sekundarne struje opterećenja, nakon ukapčanja tereta.



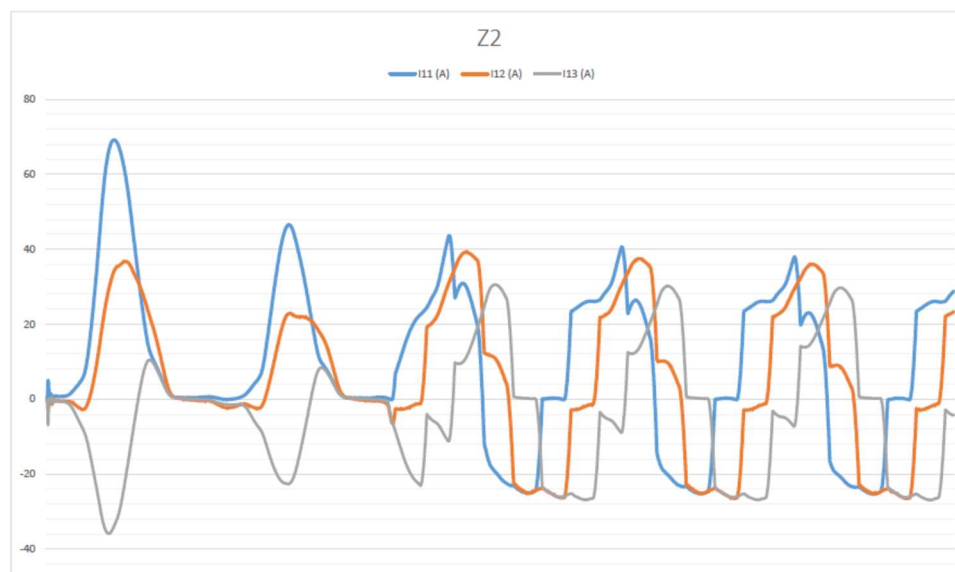
Slika 6 Valni oblici struja i napona, prazni hod i potom opterećenje transformatora (bez primarnog napona), 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 7 prikazani su valni oblici uklopih struja i napona primara i sekundara transformatora u praznom hodu jedne periode.



Slika 7 Valni oblici - uklopna struja i naponi, fazni primarni i linijski sekundarni (prvi period), 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 8 prikazani su valni oblici struja uklopa za sve tri faze transformatora u praznom hodu i nakon toga opterećenje transformatora.



Slika 8 Valni oblici uklopnih struja u sve tri faze primara za prazni hod i zatim opterećenje transformatora, 2016. (autor: Ivan Petrović)

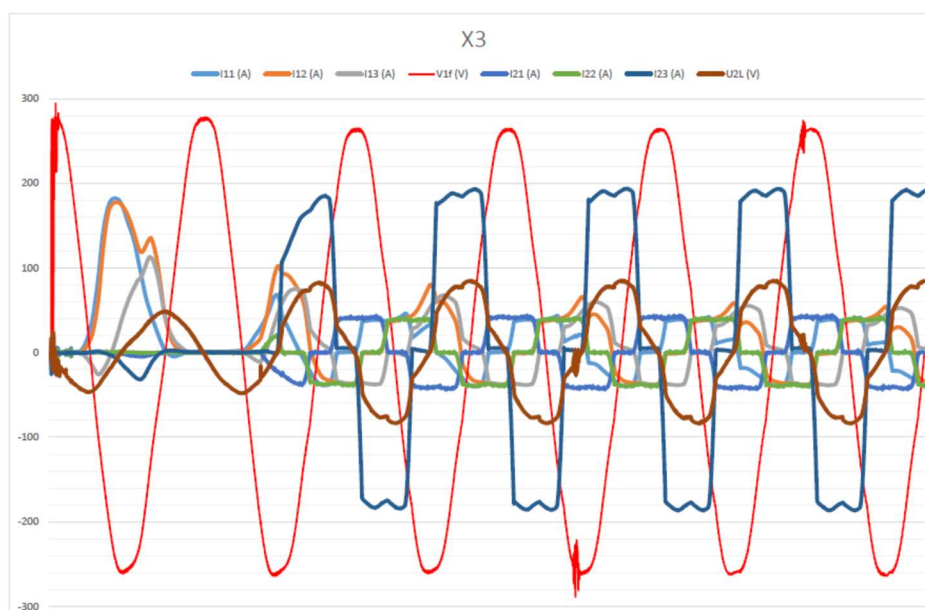
Na slici 9 prikazan je valni oblik struje uklopa za prvu fazu transformatora u praznom hodu i nakon toga opterećenje transformatora za zavarivanje.



Slika 9 Valni oblici uklopne struje prve faze primara za prazni hod i zatim opterećenje transformatora, 2016. (autor: Ivan Petrović)

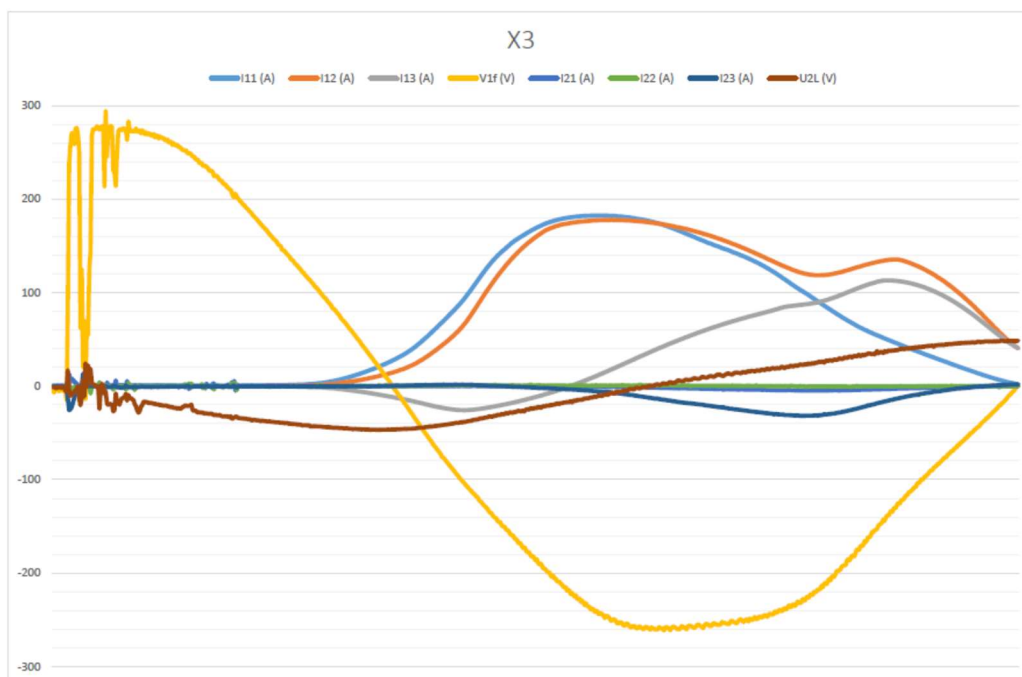
5.3 Ispitno mjerenje III: Uključenje transformatora pod opterećenjem

Na slici 10 prikazani su valni oblici uklopnih struja i napona u trenutku uključivanja opterećenog transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz.



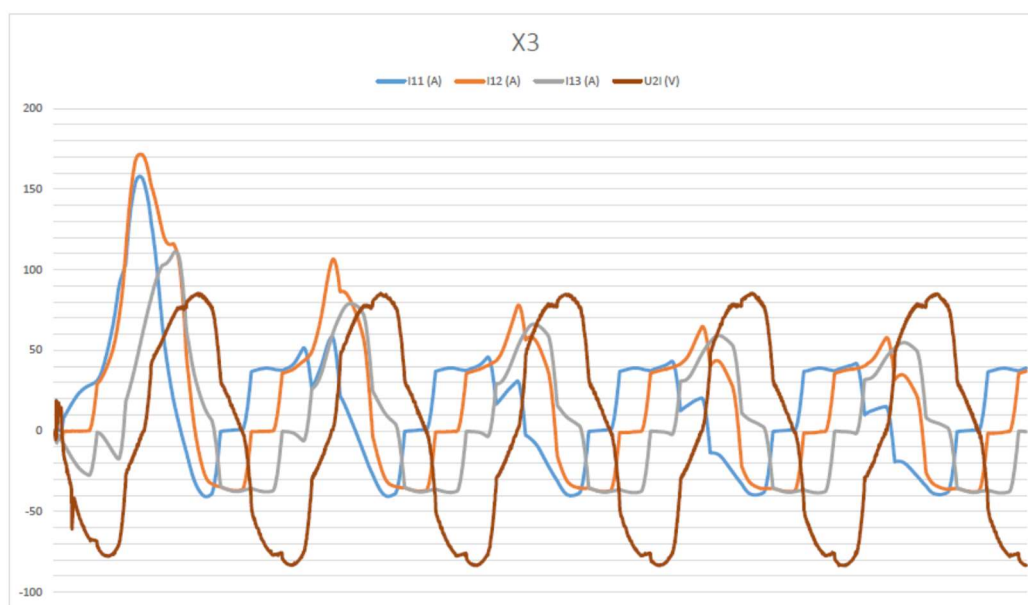
Slika 10 Uklopna struja – uključenje pod opterećenjem, 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 11 prikazani su valni oblici uklopnih struja i napona u trenutku uključenja opterećenog transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz, prikaz u prvoj periodi.



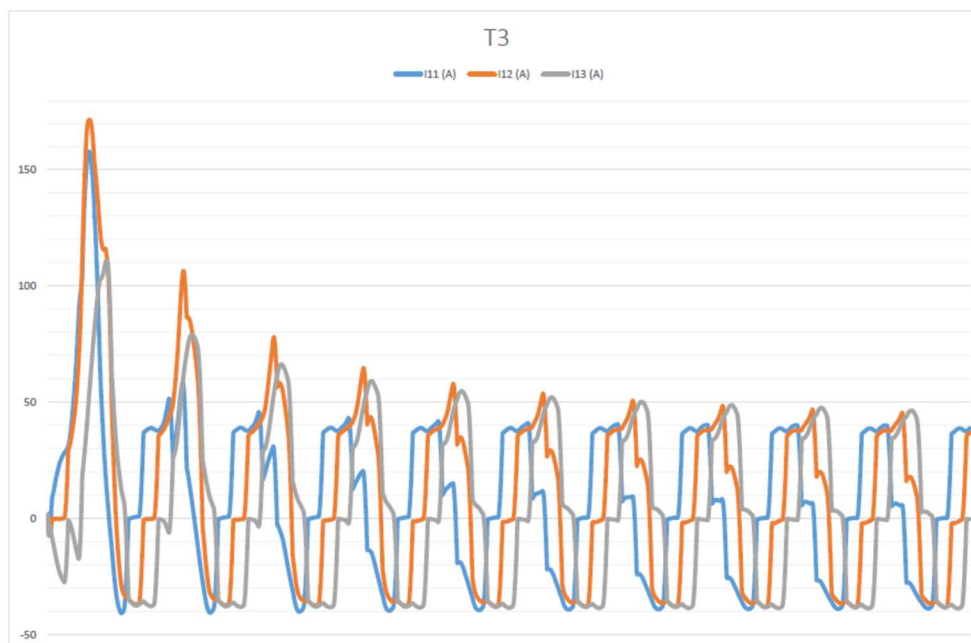
Slika 11 Uklopna struja - uključenje pod opterećenjem (prvi period), 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 12 prikazani su valni oblici uklopnih struja primara i linijska sekundarnog napona u trenutku uključenja opterećenog transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz.



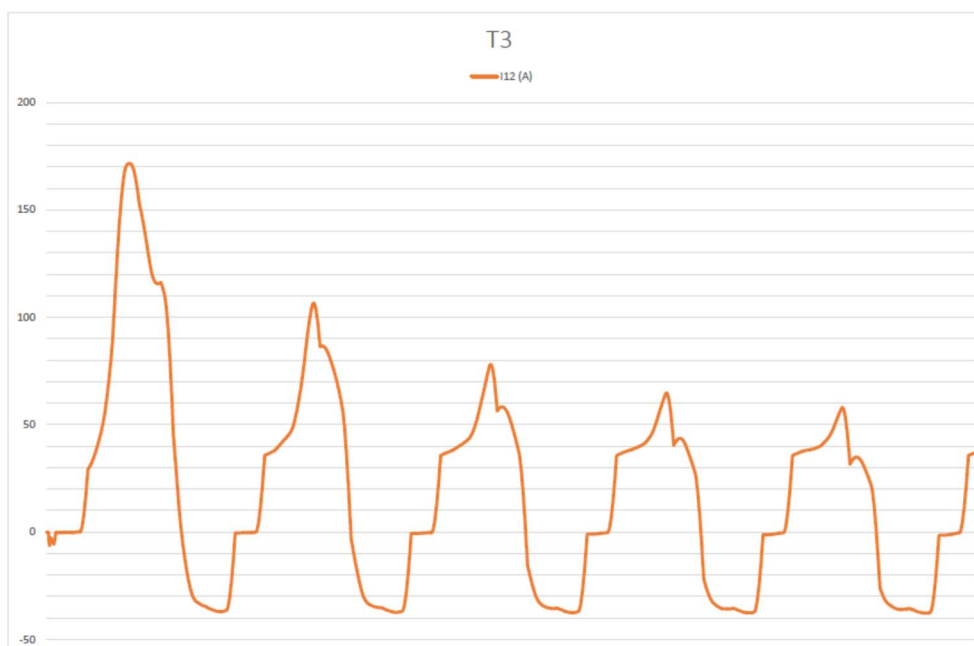
Slika 12 Uklopna struja za slučaj uključenja pod opterećenjem (primarni dio struja), 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 13 prikazani su valni oblici uklopnih struja primara za sve tri faze u trenutku uključenja opterećenog transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz.



Slika 13 Uklopna struja za slučaj uključenja pod opterećenjem (primarni dio struja), 2016. (autor: Ivan Petrović)

Na slici 14 prikazan je valni oblik uklopne struje primara druge faze u trenutku opterećenog transformatora, priključenog na mrežu 400 V, 50 Hz.



Slika 14 Uklopna struja za slučaj uključenja pod opterećenjem (struja primara, faza 2), 2016. (autor: Ivan Petrović)

5.4. Analiza rezultata mjerenja struje uklopa transformatora za zavarivanje

Na slici 4. prikazana je uklopna struja primara trofaznog transformatora u praznom hodu, priključenog na mrežu 400 V, 50 Hz, u prvom periodu naraste na maksimalnu vrijednost $I_{11} = 48,2$ A, $I_{12} = 24,6$ A i $I_{13} = -22,5$ A, dok je vršna vrijednost primarnog faznog napona $U_m = 282,1$ V ($U_{\text{eff}} = 199,47$ V) odnosno sekundarnog linijskog napona $U_{2Lm} = 46,8$ V ($U_{2L} = 33,09$ V).

U ispitnom mjerenju V.II, prazni hod i potom opterećenje transformatora rezultati uklopne struje slični su ispitnom mjerenju 1. praznog hoda, odnosno $I_{11} = 70,1$ A, $I_{12} = 38,4$ A, $I_{13} = -38,5$ A, dok je vršna vrijednost primarnog faznog napona $U_m = 275,1$ V ($U_{\text{eff}} = 194,45$ V), sekundarnog linijskog napona $U_{2Lm} = 48$ V ($U_{2L} = 33,94$ V) odnosno sekundarne struje $I_{21} = 131$ A.

U ispitnom mjerenju V.III. priključena opterećenog transformatora na mrežu 400 V, 50 Hz, izmjerene su sljedeće vršne vrijednosti uklopnih struja primara $I_{11} = 172,4$ A, $I_{12} = 158,4$ A, $I_{13} = 110,4$ A, $U_{1fm} = 284,6$ V; $U_{2Lm} = 85,6$ V, $I_{21} = 182,3$ A.

6. Zaključak

U ovome radu opisano je mjerenje uklopnih struja trofaznog transformatora za zavarivanje, snage $S_n = 6$ kVA, omjera transformacije 400/42 V, Yy spoja. Mjerenje uklopnih struja izvedeno je u nekoliko režima rada trofaznog transformatora odnosno u stanju praznog hoda, praznog hoda i opterećenja i u slučaju direktnog opterećenja s cca 80% S_n . Vršna vrijednost izmjerene uklopne struje praznog hoda prve faze $I_{11PH} = 48,2$ A, dok vršna izmjerena vrijednost uklopne struje pri opterećenju prve faze iznosi $I_{11opt} = 172,4$ A. Postoje razne metode smanjenja struje uklopa koje su primjenjive kod energetskih transformatora u trafostanicama. U uređajima za zavarivanje postoje regulacije struje zavarivanja na primaru i sekundaru, no ne i uklopnih struja transformatora koji su opterećeni snagom ($P=U \times I \times \eta$) za opskrbu stabilnosti električnog luka.

7. Literatura

- [1] Lukačević, Z. (1998): Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Sveučilište u Osijeku, Slavonski Brod
- [2] Puklavec, A.; Domjan, S. (2002): Pregled izvedbi izvora struje zavarivanja, Zavarivanje 45, Društvo za tehniku zavarivanja Zagreb
- [3] Lin, C.E.; Cheng C.L.; Huang, C.L. (1993): Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, No.1
- [4] Wokring Group 13.07, (1999): Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers, Electra No.185.
- [5] Yacamni, R., Eng, C., Abu-Nasser, A. (1986): The Calculation of Inrush Current in Three-phase transformers, IEE Proceedings, Vol.133, No.1.
- [6] Kelemen, T. (1997): Transformator, Tehnička enciklopedija, HRZ Sv. 13, 151-155, HLZ, Zagreb, Hrvatska
- [7] Specht, T. R. (1951): Transformer Inrush and Rectifier Transient Currents, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems).

- [8] Stojkov, M.; Špoljarić, Ž. (2012): New Possibilities in Inrush Current Phenomena Analysis, Journal of Electrical & Electronics, OMICS Group, Vol. 1 (2012.), Issue 3.
- [9] Mitraković, B. (1985): Transformatori, Naučna knjiga Beograd, VIII izdanje, str. 93-107, 134-139.
- [10] Brunke, J.H.; Frolich, K.J. (2001): Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching- part I and II, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 16, No. 2.
- [11] Marić, P.; Nikolovski, S.; Baus, Z. (2006): Simulation of 300MVA Transformer Energization in new substation 400/110 kV using ATP-EMTP, Proceedings of EEUG, Hopfner, S. (p.p. 57-65, Technische Universität Dresden.
- [12] Špoljarić Z.; Jerković V.; Stojkov M. (2012): Measurement System for Transformer Inrush Current Higher Harmonics Determination, The 23rd DAAAM International Symposium Intelligent Manufacturing and Automation, October 24-27, Zadar Croatia.
- [13] Stojkov M.; Špoljarić Z.; (2012): New Possibilities in Inrush Current Phenomena Analysis, Journal of Electrical & Electronics, OMICS Group, Vol.1 No.3.