

Detekcija nasičenja železnega jedra enofaznega transformatorja

Klemen Deželak¹, Beno Klopčič², Gorazd Štumberger¹, Drago Dolinar¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

²Indramat elektromotorji d.o.o., Kidričeva cesta 81, 4220 Škofja Loka, Slovenija

E-pošta: klemen.dezelak@uni-mb.si

Povzetek. V članku so predstavljene tri metode za detekcijo nasičenja železnega jedra transformatorja. Vse tri metode so razvite na enofaznem varilnem transformatorju, uporabljenem v sistemu za uporovno točkasto varjenje z enosmernim tokom. Prva in druga metoda (metoda I in metoda II) temeljita na lastnosti, da se v področju nasičenja zmanjša naklon magnetno nelinearne karakteristike, oziroma na zmanjšanju dinamične induktivnosti, medtem ko tretja metoda (metoda III) temelji na zmanjšanju razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj transformatorja pri nasičenju transformatorja.

Ključne besede: enofazni transformator, železno jedro, detekcija nasičenja, dinamična induktivnost

Detecting the saturation level in the iron core of a single-phase transformer

Extended abstract. This paper deals with the algorithm for the saturation-level detection in the iron core of a welding transformer which represents the main component of the resistance spot-welding system [1] - [9]. The system consists of a single-phase transformer, input rectifier, H-bridge inverter and full-wave output rectifier.

In the resistance spot welding system, resistances of the secondary transformer windings and characteristics of the rectifier diodes connected to these windings can slightly differ [3] - [7]. This can cause strong offsets in the magnetic-flux density and consequently, current spikes in the primary current resulting in current protection switch-off. The unwanted current spikes can be prevented by controlling the saturation level in the iron core. For this reason, the algorithm for saturation level detection is needed.

The focus of our work is on three different methods used in detection of the iron-core saturation. They were all tested on a transformer which is normally used in the spot-welding systems [7] - [9]. The first and the second method (Method I and Method II) are based on the fact that the slope of the magnetically nonlinear characteristic flux linkage versus the magneto-motive force decreases in the region of saturation, while the third method (Method III) is based on the fact that the ratio between magnetic fields inside and outside of the iron core decreases with the increasing level of saturation.

Section 2 describes behavior of the transformer iron core in the region of saturation. Fig. 1 shows a schematic presentation of the resistance spot-welding system. Fig. 2 shows unique characteristic $\psi(i)$ and its partial derivative, called dynamic inductance, determined by the methods described in [10]. The phenomena that can be applied in the saturation level detection are presented. Section 2.1 deals with the slope of the magnetic characteristic which decreases with the increasing level of saturation, while Section 2.2 deals with the ratio between the magnetic fields inside and outside of the iron core which decreases with the increasing level of

saturation.

Detailed descriptions of the three methods for iron-core saturation detection are given in Section 3. They were tested on a transformer which is a part of the spot-welding system (Fig. 3). Methods I and II differ in the denominator in (2). It can be calculated (Method I) or measured with the Rogowsky coil [11] (Method II). The supply voltage is measured in both cases. Method III applies the magnetic field inside the iron-core proportional to the probe-coil output voltage u_{ind} (Fig. 3) and the magnetic field outside the iron core proportional to the output of the Hall sensor B_{hall} (Figs. 3 and 5). Input signals to algorithms for the saturation level detection are shown in Fig. 4 (Methods I and II) and Fig. 5 (Method III). The output signals of the discussed methods, given for two different primary currents, are shown in Figs. 6 and 7. Figs. 8 and 9, show the same signals for highly saturated transformer iron core.

In our opinion, the Method III is the most appropriate for the iron-core saturation detection, which the noise in the vicinity of reversal points on the hysteresis can be neglected.

Keywords: single-phase transformer, iron core, saturation-level detection, dynamic inductance

1 Uvod

V delu so predstavljene tri metode za detekcijo nasičenja železnega jedra transformatorja. Motiv za takšno delo so bile težave, ki lahko nastanejo v sistemu za uporovno točkasto varjenje (slika 1). Omenjen sistem za uporovno točkasto varjenje [1] - [9] je sestavljen iz vhodnega usmernika, H-mosta, enofaznega varilnega transformatorja in polnovalnega usmernika (slika 1). Na sliki 1 so u_1 , u_2 in u_3 medfazne napetosti mreže, u_H pulzna širinska modulirana napetost, R_1 , R_2 , R_3 , $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$, $L_{\sigma 3}$, N_1 , N_2 , N_3 , i_1 , i_2 in i_3 so ohmske upornosti, razsipana induktivnosti, število ovojev in toki primarnega in dveh sekundarnih navitij. R_{Fe} je ohmska upornost prečne veje varilnega transformatorja, D_1 in D_2 diodi polnovalnega

usmernika ter R_w , L_w in i_w ohmska upornost, induktivnost ter tok bremena. Transformator je napajan s pulzno širinsko modulirano napajalno napetostjo z modulacijsko frekvenco 1 kHz [3] – [7]. Transformator z usmernikom je namenjen za montažo na robotsko roko na proizvodnih linijah avtomobilske industrije. S tem sistemom za točkasto varjenje je treba zagotoviti moč 120 kW pri toku 20 kA [3] – [5]. V [3], [6] in [7] je bilo pokazano, da v sistemu s slike 1 neenake karakteristike diod D_1 in D_2 , v kombinaciji z neenakimi upornostmi sekundarnih navitij R_2 in R_3 lahko povzročijo dinamično naraščanje enosmerne komponente gostote magnetnega pretoka v železnem jedru varilnega transformatorja. Posledica tega so nasičenje jedra in konice v primarnem toku, ki povzročijo zaščitni izklop celotnega sistema. Probleme, ki jih povzročajo tokovne konice, je mogoče odpraviti tako, da z algoritmom za detekcijo nasičenja zaznamo, kdaj sistem prihaja v nasičenje. Ta signal, dobljen iz algoritma za detekcijo nasičenja, je namreč mogoče uporabiti v naprednem vodenju celotnega sistema za točkasto varjenje [5], [6].

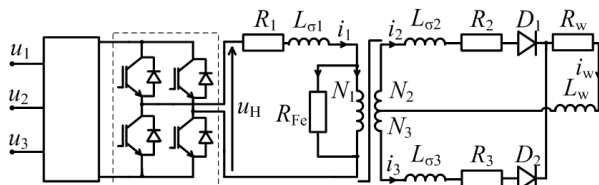
Omenjenim tokovnim konicam se torej lahko izognemo z ustreznim vodenjem sistema [6], če pravočasno zaznamo, da se transformator bliža nasičenju. Zato sta v nadaljevanju predstavljeni dve lastnosti [7], [8], na podlagi katerih je mogoče dobiti informacijo o nasičenosti jedra transformatorja ter tri metode za detekcijo nasičenja transformatorja.

2 Obnašanje železnega jedra transformatorja v primeru nasičenja

Razvite in preizkušene so tri metode za detekcijo nasičenja železnega jedra transformatorja. Pri tem je treba povedati, da so vse tri metode za detekcijo nasičenja preizkušene na jedru transformatorja [7] – [9]. Torej metode za detekcijo nasičenja niso preizkušene na celotnem sistemu za točkasto varjenje, ampak samo na jedru transformatorja, ki je le del sistema za točkasto varjenje. Informacijo o stopnji nasičenosti železnega jedra transformatorja je torej mogoče dobiti na podlagi dveh lastnosti, predstavljenih v razdelkih 2.1 in 2.2 [7].

2.1 Zmanjšanje naklona karakteristike $\psi(i)$

Za vsako napetost, s katero napajamo jedro transformatorja, lahko določimo pripadajočo histerezno zanko. Če povežemo vrhove histereznih zank, izračunanih pri različnih napetostih, dobimo magnetno nelinearno karakteristiko železnega jedra $\psi(i)$ [10], ki je podana na sliki 2 (zgoraj).



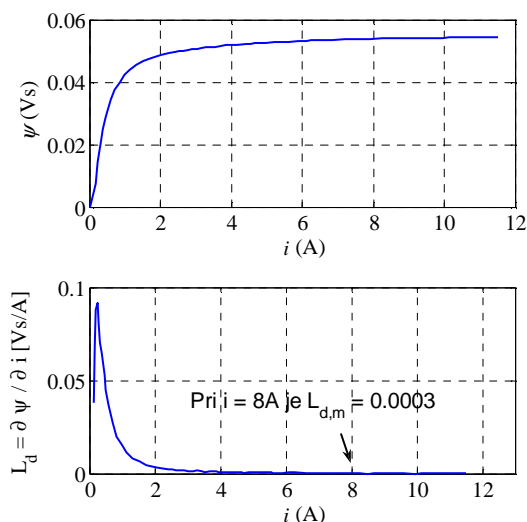
Slika 1: Shematična predstavitev sistema za uporovno točkasto varjenje

Figure 1: Schematic presentation of the resistance spot welding system

Takoj lahko opazimo, da se s povečevanjem toka (slika 2) manjša tako naklon magnetno nelinearne karakteristike kot tudi vrednost dinamične induktivnosti L_d . Karakteristiko $L_d(i)$ je namreč mogoče izračunati takoj, ko imamo časovna poteka toka i in magnetnega sklepa $\psi(1)$ [7].

$$L_d = \frac{\partial \psi}{\partial i} \approx \frac{\Delta \psi}{\Delta i} = \frac{\psi_k - \psi_{k-1}}{i_k - i_{k-1}} \quad (1)$$

V izrazu (1) sta ψ_k in i_k vrednosti magnetnega sklepa in toka v trenutnem odtipku, ψ_{k-1} in i_{k-1} pa vrednosti magnetnega sklepa in toka v predhodnem odtipku. Z enačbo (1) torej izračunamo dinamično induktivnost, ki jo lahko izrišemo v odvisnosti od toka (glej sliko 2 spodaj). Omenjeno lastnost, zmanjšanje naklona karakteristike $\psi(i)$, oziroma zmanjšanje dinamične induktivnosti, smo torej izkoristili za detekcijo nasičenja železnega jedra transformatorja. Pri tem smo na podlagi te lastnosti razvili dve metodi. Metodo, pri kateri smo detekcijo nasičenja izvedli na podlagi merjenja inducirane napetosti in toka, bomo v nadaljevanju imenovali metoda I. Metodo, pri kateri detekcijo nasičenja izvajamo na podlagi merjenja inducirane napetosti in odvoda toka, pa bomo imenovali metoda II. Treba se je zavedati, da imamo pri dejanski izvedbi transformatorja primarni in sekundarni tok, zato je treba namesto karakteristik $\psi(i)$ in $\partial \psi / \partial i$ uporabiti karakteristiki $\psi(\theta)$ in $\partial \psi / \partial \theta$, pri čemer je θ magnetna napetost.



Slika 2: Magnetno nelinearna karakteristika železnega jedra transformatorja $\psi(i)$ in dinamična induktivnost L_d v odvisnosti od toka

Figure 2: Current-dependent magnetically nonlinear characteristic $\psi(i)$ and dynamic inductance L_d

$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} = L_d \frac{di}{dt} \Rightarrow L_d = \frac{u}{\frac{di}{dt}} \quad (2)$$

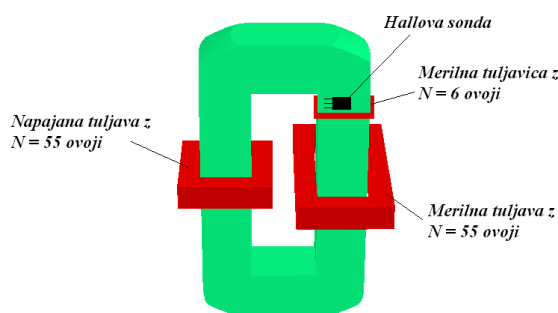
2.2 Zmanjšanje razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj jedra transformatorja

Pri tem je treba meriti magnetno polje znotraj in zunaj železnega jedra transformatorja. Informacijo o stopnji nasičenosti železnega jedra transformatorja dobimo na podlagi razmerja med njima. Ko železno jedro transformatorja prehaja v stanje nasičenosti, se začne delež magnetnega polja zunaj jedra povečevati. To pomeni, da se razmerje med magnetnima poljema znotraj in zunaj železnega jedra transformatorja zmanjšuje s tem, ko je jedro vedno bolj nasičeno.

Na podlagi zmanjšanja razmerja med poljema znotraj in zunaj jedra smo razvili metodo III detekcije nasičenja.

3 Opis metod za detekcijo nasičenja

V nadaljevanju so podani opisi treh metod za detekcijo nasičenja. Vse tri metode smo preizkušali tako, da smo jedro transformatorja napajali s testnimi signali. Na podlagi različnih izmerjenih spremenljivk pa smo skušali ugotoviti, kdaj jedro transformatorja preide v nasičenje. Merjeni objekt je bilo C-jedro transformatorja s tremi tuljavami (slika 3). Napajano tuljavo s številom ovojev $N = 55$ smo magnetno vzbujali z avtotransformatorjem, preostali dve tuljavi ($N = 55$ in $N = 6$) pa smo uporabljali za merjenje inducirane napetosti oziroma za posredno merjenje glavnega magnetnega polja.



Slika 3: C-jedro transformatorja z vsemi uporabljenimi navitji
Figure 3: Horseshoe-shaped transformer iron core with all its windings applied in the measurements

3.1 Metoda I

Pri tej metodi izhajamo iz lastnosti zmanjševanja dinamične induktivnosti, ko se železno jedro transformatorja približuje nasičenju. Zelo pomembna enačba, ki nastopa pri tej metodi, je enačba za izračun dinamične induktivnosti L_d , do katere pridemo z z uporabo izraza za inducirano napetost u (2) [5].

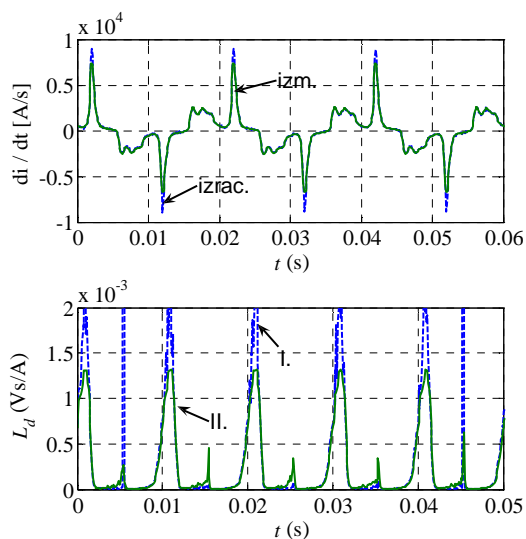
Pri tem sta ψ in i oznaki za magnetni sklep in tok. Kot smo že poudarili, pri tej prvi metodi izvajamo detekcijo nasičenja na podlagi merjenja inducirane napetosti u in primarnega toka i . Če pogledamo izraz za L_d v (2) ugotovimo, da lahko izmerjen časovni potek inducirane napetosti direktno uporabimo, medtem ko lahko odvod toka v imenovalcu numerično izračunamo iz izmerjenega časovnega poteka toka s (3).

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i_k - i_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \quad (3)$$

Treba je še poudariti, da algoritem za detekcijo nasičenja izračunava absolutno vrednost dinamične induktivnosti (2). V naslednjem koraku smo določili mejo, na podlagi katere je mogoče odločiti o tem, ali je jedro transformatorja nasičeno. Pri tem smo izhajali iz podatka, da je vrednost dinamične induktivnosti L_d (oziroma naklon karakteristike $\psi(i)$) pri primarnem toku 8A tako majhna, da lahko pomeni mejno vrednost nasičenja. Vrednost dinamične induktivnosti pri toku 8A je $L_{d,m} = 0,0003$ [H] – slika 2 spodaj. Zavedati se je treba, da ta vrednost $L_{d,m}$ velja za napetost, inducirano na merilni tuljavi z $N = 55$ ovojji (slika 3). Če uporabljamo merilno tuljavico z $N = 6$ ovoji (slika 3) in napetostni delilnik (v našem primeru smo z njim zmanjšali napetost za faktor 6,7), je treba za določitev pravilne mejne vrednosti nasičenja izvesti ustrezen preračun ($meja = (0,0003 \cdot 6) / (55 \cdot 6,7)$ H = $4,88e-6$ H). Na izhodu algoritma za detekcijo nasičenja lahko dobimo vrednost 0, ki pomeni, da transformator ni v nasičenju ali vrednost 1, ki pomeni, da transformator je v nasičenju.

3.2 Metoda II

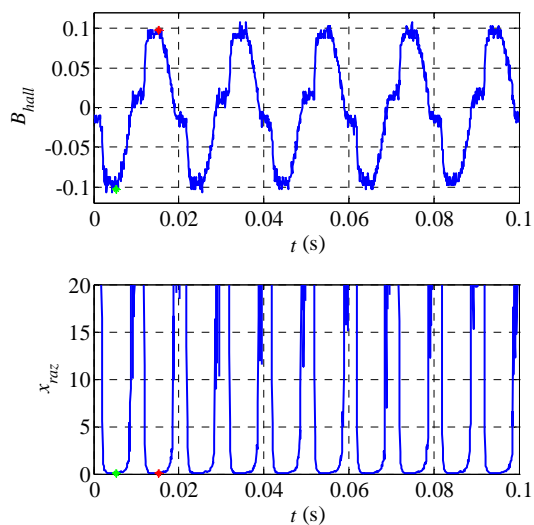
Metoda II je pravzaprav enaka prej opisani metodi, le da v tem primeru di/dt v (2) neposredno izmerimo s pomočjo toroidno navite, zračne tuljavice Rogowski [11]. Torej pri tej metodi II, v nasprotju z metodo I, izvajamo detekcijo nasičenja na osnovi meritve odvoda primarnega toka transformatorja in inducirane napetosti. Na sliki 4 vidimo numerično izračunan časovni potek odvoda toka po času in s tuljavico Rogowski izmerjen signal. Tako dobimo vhodni signal algoritma za detekcijo nasičenja metode II (slika 4 spodaj), ki ga lahko primerjamo z vhodnim signalom algoritma za detekcijo nasičenja, dobljenim pri metodi I in za katerega seveda velja enaka meja nasičenja ($meja = 4,88e-6$ H; glej razdelek 3.1).



Slika 4: Izračunan in izmerjen časovni potek odvoda toka ter vhodni signal algoritma za detekcijo nasičenja (metodi I in II)
Figure 4: Calculated and measured time derivative of the primary current and input signals of the saturation-detection algorithm for Methods I and II

3.3 Metoda III

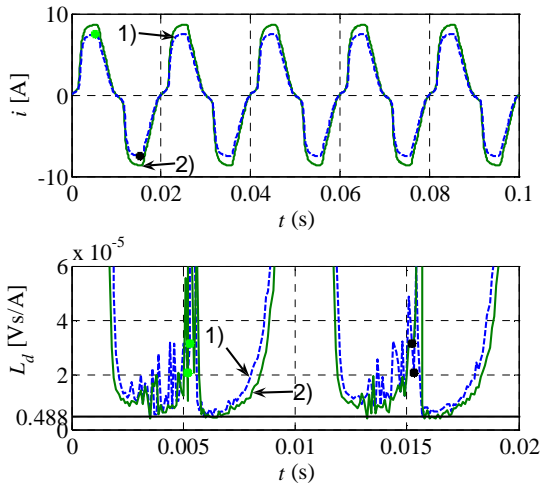
Pri metodi III izhajamo iz lastnosti zmanjšanja razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj železnega jedra transformatorja, ko se jedro bliža nasičenju. Magnetno polje zunaj železnega jedra se pri nasičenju poveča. V ta namen je treba meriti magnetno polje ali signal, proporcionalen magnetnemu polju, znotraj in zunaj železnega jedra ter računati njuno razmerje. Torej tudi pri tej tretji metodi določamo nasičenje jedra transformatorja na podlagi deljenja dveh signalov ($x_{\text{raz}} = u_{\text{ind}}/B_{\text{hall}}$). V tem izrazu pomeni števec inducirano napetost u_{ind} , ki je proporcionalna magnetnemu polju v železnem jedru. Imenovalec B_{hall} pa je magnetno polje zunaj železnega jedra, ki ga lahko merimo s Hallovo sondo [4], [7] (slika 3). Seveda je bilo treba tudi pri tej metodi določiti mejo, na podlagi katere je mogoče odločiti o tem, ali je jedro transformatorja nasičeno. Mejo smo določili z umerjanjem. Pri tem smo izhajali iz podatka, da nasičenje nastopi, ko postane vrednost razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj jedra (x_{raz}) manjša od vrednosti l_e -tega pri mejnem naklonu karakteristike $\psi(i)$, ki nastopi pri toku 8A. Na opisani način smo z umerjanjem določili mejno vrednost nasičenja pri metodi III $x_{\text{raz}} = \text{meja_hall} = 0,0185$. Na sliki 5 vidimo signal, izmerjen s Hallovo sondo B_{hall} , in signal x_{raz} .



Slika 5: Signal, izmerjen s Hallovo sondo B_{hall} , in vhodni signal algoritma za detekcijo nasičenja x_{raz} pri metodi III
Figure 5: Signal measured with the Hall sensor B_{hall} and the input signal of the saturation-detection algorithm for Method III

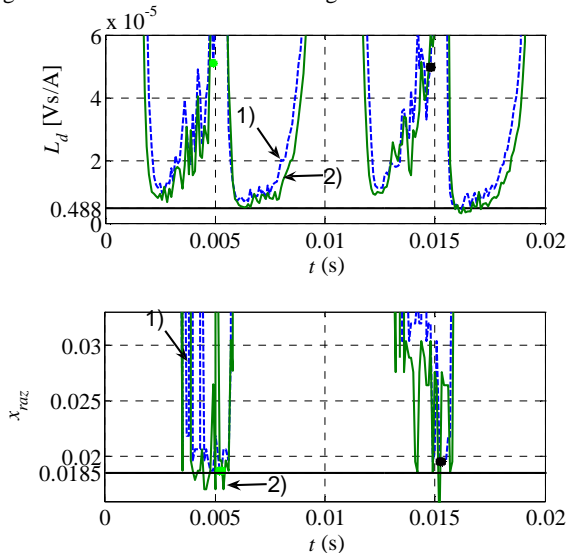
4 Primerjava metod

Pri vseh metodah za detekcijo nasičenja ima bistveno vlogo oblika izračunanega vhodnega signala za detekcijo nasičenja železnega jedra transformatorja. Signal mora vsebovati čim manj motenj oziroma šuma, in to predvsem v tistem območju, kjer nas oblika signala najbolj zanima. Za naš primer je to območje nasičenja. Oblike vhodnih signalov algoritma za detekcijo nasičenja smo si za vse tri metode detekcije že bežno ogledali, sedaj pa si jih oglejmo še nekoliko podrobneje. Na slikah 6 spodaj (metoda I) in 7 (metoda II – zgoraj, metoda III – spodaj) so podani vhodni signali za vse tri metode detekcije nasičenja, in sicer za dve različni napajalni napetosti. Dve različni napajalni napetosti vodita k dvema različnima tokoma – slika 6 zgoraj (1 – manjša vrednost in 2 – večja vrednost toka). Pri tem še povejmo, da smo detekcijo nasičenja z vsemi tremi metodami izvajali hkrati, med istim testom.



Slika 6: Dva različna časovna poteka tokov in povečana pripadajoča vhodna signala algoritma za detekcijo nasičenja za I. metodo

Figure 6: Time-dependent primary currents and the input signal of the saturation-detection algorithm for Method I

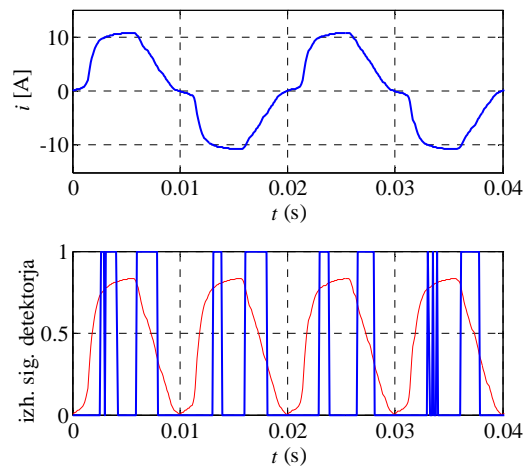


Slika 7: Povečana vhodna signala algoritma za detekcijo nasičenja za metodo II (zgoraj) in III (spodaj) za dva različna časovna poteka tokov

Figure 7: Input signals of the saturation-detection algorithms for Methods II (above) and III (below)

Če najprej pogledamo primer z manjšo amplitudno vrednostjo toka, vidimo, da so v vhodnem signalu algoritma za detekcijo nasičenja pri metodah I in II opazne precejšnje motnje ravno v območju nasičenja, zato je nemogoče postaviti mejo, na podlagi katere bi lahko dobili nedvoumno informacijo o nasičenosti jedra transformatorja. Prav tako vidimo, da točka, ki ustreza maksimalnemu toku, ne pomeni najmanjše vrednosti dinamične induktivnosti. Pri tretji metodi pa lahko ugotovimo nasprotno. Točka maksimalnega toka namreč pomeni najmanjšo vrednost razmerja med u_{ind} in u_{hall} oziroma najmanjšo vrednost razmerja med poljema znotraj in zunaj jedra transformatorja.

Poleg tega ima signal, na podlagi katerega detektiramo nasičenje, v območju nasičenja veliko manjše motnje. Torej je s tretjo metodo mogoče dobiti ustrezno informacijo o nasičenosti jedra transformatorja. Podobno lahko ugotovimo tudi za prekoračitev (večja napajalna napetost) prej določenih mejnih vrednosti nasičenja. Ker smo povečali napetost, se je povečal primarni tok, in sicer s 7.7A na 8.6A, kakor je prikazano tudi na sliki 6 zgoraj. Iz potekov vhodnih signalov detektorja nasičenja je razvidno, da se pri vseh treh metodah vrednosti L_d oziroma x_{raz} v območju nasičenja zmanjšajo za toliko, da prekoračijo mejo nasičenja. Tako smo na slikah 8 in 9 prikazali še izhodne signale iz algoritmov za detekcijo nasičenja pri vseh treh metodah.

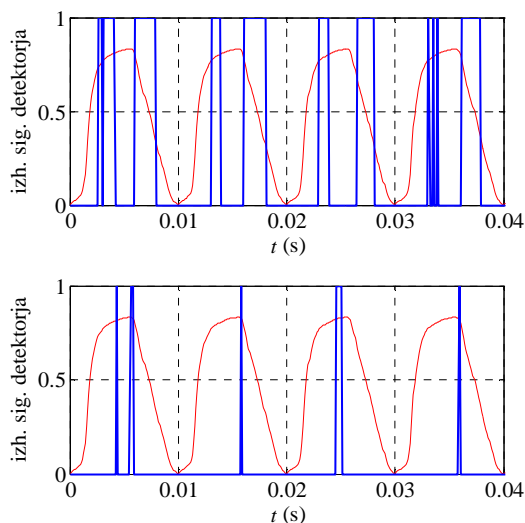


Slika 8: Primarni tok in pripadajoči izhodni signal algoritma za detekcijo nasičenja za metodo I

Figure 8: Primary current and the output signal of the saturation-detection algorithm for Method I

Na vseh slikah je zaradi lažje predstave prikazan še normiran časovni potek absolutne vrednosti primarnega toka. Prej omenjeni izhodni signali algoritma za detekcijo nasičenja lahko zavzamejo vrednost 1 ali vrednost 0, odvisno od tega, ali je transformator v nasičenju ali ni. Izhodne signale algoritma smo prikazali za primer večjega nasičenja - za tok 10.2 A (slika 8 zgoraj). Vidimo, da vse tri metode javljajo nasičenje, vendar ga le metoda III javlja pri maksimalnem toku oziroma najmanjšem naklonu $\psi(i)$ karakteristike.

Iz vsega povedanega lahko povzamemo, da se je za najprimernejšo metodo detekcije nasičenja na nivoju jedra transformatorja izkazala metoda III oziroma metoda, pri kateri uporabljamo merilno tuljavico za merjenje signala, proporcionalnega polju znotraj jedra transformatorja u_{ind} , ter Hallovo sondo za merjenje magnetnega polja zunaj jedra transformatorja B_{hall} . Pri tem velja poudariti, da se tudi med obratovanjem s spreminjanjem obremenitve spreminja razmerje med magnetnim poljem v železnem jedru in zunaj njega, vendar so te spremembe bistveno manjše kot pri nasičenju.



Slika 9: Izhodni signal algoritma za detekcijo nasičenja za metodi II (zgoraj) in III (spodaj)

Figure 9: Output signals of the saturation-detection algorithms for Methods II and III

5 Sklep

V delu smo predstavili dve lastnosti, na podlagi katerih je mogoče dobiti informacijo o nasičenju železnega jedra transformatorja. Prva lastnost je zmanjšanje naklona karakteristike $\psi(i)$ oziroma zmanjšanje dinamične induktivnosti, druga lastnost pa je zmanjšanje razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj jedra transformatorja. Na podlagi zmanjšanja dinamične induktivnosti, smo razvili metodi I in II, medtem ko smo na podlagi zmanjšanja razmerja med magnetnima poljema znotraj in zunaj jedra transformatorja razvili metodo III. Ugotovili smo, da se je za najprimernejšo metodo detekcije nasičenja izkazala metoda III, pri kateri uporabljamo merilno tuljavico za merjenje signala, proporcionalnega magnetnemu polju v jedru transformatorja, ter Hallovo sondo za merjenje magnetnega polja zunaj jedra transformatorja.

6 Literatura

- [1] B. M. Brown, "A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels," *The Welding Journal*, January 1987, vol. 66, no. 1, pp. 18-23.
- [2] W. Li, E. Feng, D. Cerjanec, G. A. Grzazinski, "A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels," *Sheet Metal Welding Conference XI*, Sterling Heights, MI, May 2004.
- [3] B. Klopčič, Modeliranje, analiza in sinteza sistema za točkasto varjenje, Magistrska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko rač. in informatiko, 2005.
- [4] B. Klopčič, G. Štumberger and D. Dolinar, "Iron core saturation of a welding transformer in a medium frequency resistance spot welding system caused by the asymmetric

output rectifier characteristics," Conference record of IAS 2007 Annual Meeting, New Orleans, pp. 2319-1326, 2007.

[5] B. Klopčič, Napredno vodenje sistema za uporovo točkasto varjenje, Doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Maribor 2007.

[6] B. Klopčič, D. Dolinar, G. Štumberger, Advanced control of a resistance spot welding system, *IEEE Transactions on power electronics*, Vol.23, No. 1, pp. 144–152, January 2008.

[7] K. Deželak, Detekcija nasičenja železnega jedra transformatorja v sistemu za točkasto varjenje, Diplomatska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, 2006.

[8] K. Deželak, B. Klopčič, G. Štumberger, D. Dolinar, Detecting saturation level in the iron core of a welding transformer in a resistance spot-welding system, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, No. 20, pp. 878–883, October 2008.

[9] K. Deželak, G. Štumberger, B. Klopčič, D. Dolinar, J. Pihler, Iron core saturation detector supplemented by an artificial neural network, *Prz. Elektrotech.*, Vol. 84, No. 12, pp. 157–159, 2008.

[10] G. Štumberger, B. Polajžer, B. Štumberger, M. Toman, D. Dolinar, Evaluation of experimental methods for determining the magnetically nonlinear characteristics of electromagnetic devices. *IEEE trans. magn.*, vol. 41, no. 10, str. 4030-4032, 2005.

[11] D. J. Ramboz, "Machinable Rogowski coil, design, and calibration," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 45, no. 2, April 1996.

Klemen Deželak je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru v letu 2006, kjer je tudi zaposlen kot asistent.

Beno Klopčič je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani leta 1985, magistriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru leta 2005 ter doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru leta 2007. V letih 1985-1988 je bil zaposlen na Inštitutu za elektroniko in vakuumsko tehniko, kjer se je ukvarjal z elektroniko. Od leta 1988 je zaposlen v podjetju Iskra elektromotorji-sedanji Indramat elektromotorji.

Gorazd Štumberger je diplomiral leta 1989 in magistriral leta 1992 na oddelku ERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 1996 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, kjer je tudi zaposlen kot redni profesor. Ukvarja se z optimizacijo, modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Dr. Gorazd Štumberger je član mednarodnih združenj Compumag in IEEE ter slovenskega komiteja CIGRE

Drago Dolinar je diplomiral, magistriral in doktorat opravil na Tehniški fakulteti Univerze v Mariboru v letih 1978, 1980 in 1985. Od leta 1981 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Leta 1996 je bil izvoljen za rednega profesorja. Ukvarja se z modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov. Dr. Drago Dolinar je član CIGRE, SLOSIM, Compumag, IET in IEEE.