

Модел једнофазног трансформатора заснован на струјно-напонској карактеристици празног хода

Митар Симић
NORTH Point Ltd.
Суботица, Република Србија
mitarsimic@yahoo.com

Томислав Б. Шекара
Електротехнички факултет,
Универзитет у Београду,
Република Србија
tomi@etf.rs

Срђан Јокић
Електротехнички факултет,
Универзитет Источно Сарајево,
Босна и Херцеговина
srdjan.jokic@etf.unssa.rs.ba

Садржај— У овом раду описана је реализација модела електричног трансформатора заснованог на нелинеарној струјно-напонској карактеристици празног хода. Резултати симулације упоређени су са резултатима који су добијени експериментом у Лабораторији за електричне машине Електротехничког факултета Универзитета у Источном Сарајеву. Додатна верификација предложеног модела урађена је хармонијском анализом струје празног хода.

Кључне ријечи- Хистерезис, трансформатори, нелинеарна карактеристика празног хода, хармонијска анализа

I. УВОД

Проблеми изградње модела у инжењерској пракси заузимају важно мјесто. Уз помоћ модела настоје се истражити и препознати законитости које су присутне у дијелу објективног свијета који је предмет анализе. Значај моделовања у анализи проблема у електротехници огледа се у сљедећем: једноставност и безбједност, увид у величине које се тешко мјере или нису доступне за мјерење, могућност симулирања екстремних режима рада и могућност развијања сложених алгоритама за управљање различитим системима. Значај израде сопствених модела је што се има потпуни увид у математичке једначине на којима је модел заснован.

Моделовање електричног трансформатора дуги низ година представља предмет великог интересовања стручне и научне јавности како код нас тако и у свијету.

Прва идеја која се јавља код моделовања једнофазних трансформатора јесте формирање математичког модела на основу еквивалентне електричне шеме [1]. Вриједности линеарних елемената као што су отпорности и индуктивности се врло лако одређују кроз експерименте празног хода и кратког споја као и мјерењем отпора коришћењем једносмјерне струје. Нелинеарно понашање магнетског језгра тада се често представља преко нелинеарне карактеристике флуks–струја, коришћењем зависних струјних извора или се уводи нелинеарна индуктивност што захтјева мало сложенији математички модел.

За неке примјене неопходна је детаљна хармонијска анализа као и оцјена понашања трансформатора у прелазним режимима [2]-[6]. То захтјева реализацију сложенијег модела трансформатора јер за анализе на високим фреквенцијама треба узети у обзир паразитне капацитивности између појединих навојака на намотају као и између самих намотаја и капацитивности појединих намотаја према кућишту.

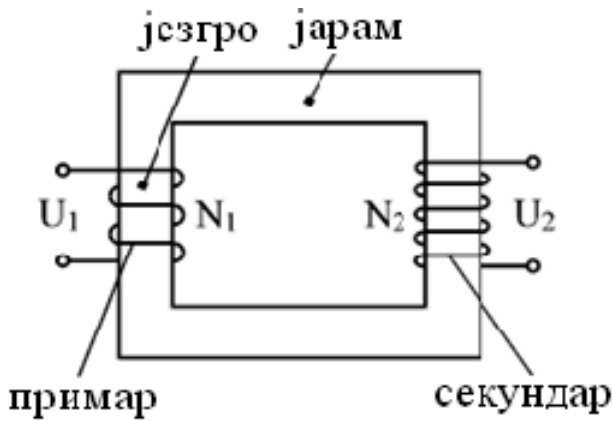
За прецизно описивање нелинеарности магнетског језгра потребно је моделовати магнетски хистерезис који постоји код реалних трансформатора [7]-[18]. Међутим често је ширина хистерезисне петље толико уска да се довољно прецизни резултати могу добити коришћењем нелинеарности која је описана једнозначно кривом првог магнетовања.

Основни циљ практичног дијела истраживања у овом раду био је предложити модел трансформатора који захтјева једноставну процјену параметара реалног објекта а да при том посједује малу мјерну несигурност за широк опсег радних режима трансформатора као и анализу величина које је тешко мјерити на реалном објекту.

II. ЕЛЕМЕНТАРНА ТЕОРИЈА ТРАНСФОРМАТОРА

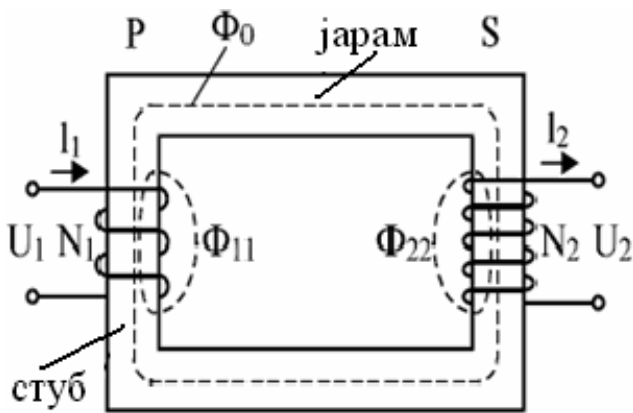
Основни дијелови трансформатора су: магнетско коло и намотаји. Магнетско коло, које служи за затварање магнетског флуksа, израђује се од челичних лимова на бази силицијума који се називају трафо-лимови. Лимови су изоловани специјалним лаком како би се смањиле вртложне струје индуковане у магнетском колу, а тиме се смањују губици снаге - губици у гвожђу. Дебљина лимова се креће од 0,3 до 0,5 mm. Трансформатори чије је магнетско коло израђено као на сл. 1 називају се стубни трансформатори [19]. Овакав трансформатор је коришћен за анализу у овом раду. Постоје и тзв. оклопљени трансформатори који се одликују равномјерном расподјелом магнетског флуksа и тај тип магнетског кола је карактеристичан за трофазне трансформаторе.

Намотаји примара и секундара нису кондуктивно повезани. Енергија се са примарне стране преноси на секундарну захваљујући феномену међусобне индукције.



Слика 1. Магнетско коло стубног једнофазног трансформатора

Да би индуктивна спрега између примара и секундара била што боља, намотаји се постављају на гвоздено језгро (сл. 2) [19].



Слика 2. Магнетско коло и распоред намотаја једнофазног трансформатора

Магнетска индукција у средишту једног намотаја у виду соленоида је:

$$B = \mu \frac{NI}{l}$$

Пошто је магнетска пермеабилност:

$$\mu_{Fe} = \mu_r \mu_0$$

за гвожђе много већа од магнетске пермеабилности ваздуха μ_0 , то ће и магнетски флуks $\Phi_0(t) = B(t)S_{Fe}$, кроз магнетско коло бити знатно већи од флуksева "расипања" $\Phi_{11}(t)$ и $\Phi_{22}(t)$, који се затварају кроз околни ваздух и тако не учествују у међусобној индукцији примара и секундара, па тиме ни у преносу енергије са примарне на секундарну страну.

Дакле, у оба намотаја постоји заједнички флуks $\Phi_0(t)$ и флуks расипања:

за примар:

$$\Phi_1(t) = \Phi_0(t) + \Phi_{11}(t)$$

за секундар

$$\Phi_2(t) = \Phi_0(t) + \Phi_{22}(t).$$

Када се на примарни намотај прикључи наизмјенични напон $u_1(t)$, под његовим утицајем кроз примарни намотај протећи ће наизмјенична струја $i_1(t)$ која ствара промјенљиви магнетски флуks $\Phi_1(t)$. Према Фарадејевом закону електромагнетске индукције, овај флуks ће у намотајима примара индуковати електромоторне силе, које заједно са падом напона $R_1 i_1(t)$ држе равнотежу прикљученом напону $u_1(t)$.

Једначина динамичке равнотеже напона у примару је:

$$u_1(t) - R_1 \cdot i_1(t) - N_1 \frac{d\Phi_0(t)}{dt} - N_1 \frac{d\Phi_{11}(t)}{dt} = 0$$

Како заједнички флуks $\Phi_0(t)$ обухвата и намотаје секундара и у њима ће се индуковати електромоторна сила, па је једначина динамичке равнотеже напона у секундару:

$$-u_2(t) - R_2 \cdot i_2(t) - N_2 \frac{d\Phi_0(t)}{dt} - N_2 \frac{d\Phi_{22}(t)}{dt} = 0$$

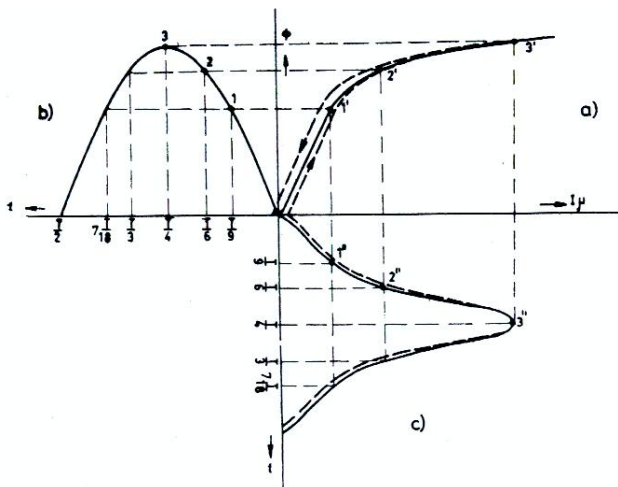
III. ОБЛИК СТРУЈА ПРАЗНОГ ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Пошто трансформатори, као и све остале електричне величине, имају магнетско коло од гвожђа, онда сразмјера између флуksа и магнетопобудне силе односно струје која производи тај флуks није линеарна. Шта више, флуks у зависности од струје магнећења не може се изразити помоћу једног аналитичког израза или функције. Сразмјера између флуksа и струје магнећења зависи од врсте материјала (разних врста лимова, гвожђа, челика), за сваку врсту материјала је другачија и може се добити експериментално.

Обично се за једну врсту материјала помоћу једносмјерне струје експериментално добије карактеристика магнећења $B=f(H)$ где је B густина флуksа (индукција), а H густина Ампернавојака (NI/l , јединична магнетопобудна сила). Пошто је индукција сразмјерна са флуksом онда то може, у некој другој сразмјери бити и крива $\Phi=f(H)$. Када се од неког материјала направи магнетско коло онда се може, према карактеристици магнећења и знајући димензије магнетског кола, добити потребне вриједности струје магнећења за одговарајуће жељене вриједности индукције и таква крива $B=f(I_\mu)$ за једно одређено магнетско коло зове се магнетска

карактеристика. У некој другој размјери магнетска карактеристика може представљати и криву $\Phi=f(I_\mu)$.

Ако је једнофазни трансформатор прикључен на мрежу хармоничног напона онда контраелектромоторна сила, која држи равнотежу овом напону, треба да буде такође хармонична. Према томе и флуks, коме је електромоторна сила директно сразмјерна, треба да буде хармоничан. Међутим струја празног хода односно, када се занемаре губици на хистерезису и вихорне струје, њена реактивна компонента— струја магнећења од које потиче флуks није хармонична функција, јер су флуks и струја магнећења везани магнетском карактеристиком $B=f(I_\mu)$ односно $\Phi=f(I_\mu)$, која је представљена на сл. 3 [20]. На сл. 3b приказан је потребан хармоничан облик флуksа. На истој слици испрекиданим линијама је нацртан тачнији облик карактеристике када се води рачуна о хистерези односно да постоје разлике у вриједности флуksа у зависности од тога да ли се струја повећава или смањује.



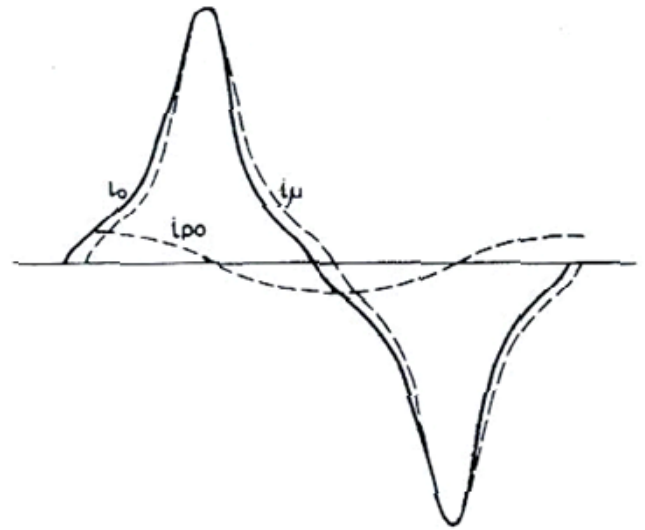
Слика 3. Магнетска карактеристика једнофазног трансформатора

Струја магнећења са сл. 3c може се као и свака периодична нехармонична функција, раставити у Фуријеов ред, који поред основног хармоника, пошто је сложенопериодична функција симетрична у односу на апсисну осу и координатни почетак, има само непарне синусне чланове.

Ако је напон на који је трансформатор прикључен хармоничан, онда је хармонична и активна компонента струје празног хода i_{p0} која одговара магнетским губицима и која износи по вриједности 10 % струје магнећења. Стога се струја празног хода једнофазног трансформатора према сл. 4, може добити као резултанта струје магнећења и активне компоненте $i_0=i_\mu+i_{p0}$ [20].

Може се за једнофазни трансформатор поступити и обрнутим редом, односно добијени облик струје празног хода i_0 може се раставити на једну активну хармоничну компоненту i_{p0} и реактивну знатно већу и нехармоничну i_μ . Водећи рачуна о хистерези зна се да је ова реактивна компонента мало помјерена. Пошто је утицај хистерезе на облик струје магнећења трансформатора врло мали овај помјерај се обично занемарује и посматра се облик струје

према кривој првог магнећења тј. према магнетској карактеристици извученој пуном линијом на сл. 3a. Најзад реактивна компонента се може раставити на низ непарних хармоничних компонената од којих највећи утицај има трећи хармоник.



Слика 4. Струја празног хода једнофазног трансформатора

IV. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЈЕДНОФАЗНОГ ТРАНСФОРМАТОРА

Практични дио ово рада реализован је у Лабораторији за електричне машине Електротехничког факултета Универзитета у Источном Сарајеву. Номинални подаци анализираног једнофазног трансформатора (сл. 5) су:

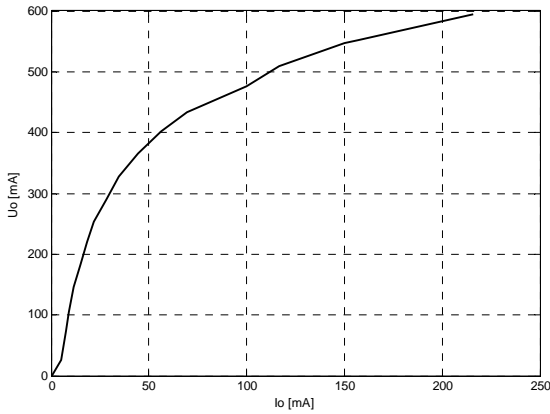
- Номинална снага: $S_n=0,35 \text{ kVA}$
- Номинални напон и струја на примару:
 $U_{pn}=380 \text{ V}, I_{pn}=1 \text{ A}$
- Номинални напон и струја на секундару:
 $U_{sn}=380 \text{ V}, I_{sn}=1 \text{ A}$



Слика 5. Једнофазни трансформатор који је предмет истраживања

За добијање нелинеарне карактеристике напон–струја празног хода поступак је следећи: почевши од 0 V напајања на примарном намотају, у корацама од по нпр. 10 V, врши се повећавање вриједности напона и биљежи се струја кроз примарни намотај. Занемарујући елементе у

редној грани еквивалентне шеме може се сматрати да је струја одређена само елементима гране магнећења и да је измјерена струја заправо струја магнећења. Овај напон је потребно подизати и нешто изнад номиналног како би се трансформатор одвео даље у засићење и добила што боља крива. У конкретном случају напон на примару је подизан до 410 V и добијена карактеристика дата је на сл. 6.



Слика 6. Нелинеарна карактеристика напон – струја празног хода

При номиналном напону од $U_0=380\text{ V}$ на примарној страни измјерене су сљедеће вриједности:

- струја празног хода (ефективна вриједност) $I_0=76,3\text{ mA}$ или 7,63 % номиналне струје примара

- губици у празном ходу $P_0=5,4\text{ W}$

Једноставним прерачунавањем добијају се вриједности елемената гране магнећења:

- фактор снаге $\cos\varphi_0=0,1862$

- отпорност гране магнећења $R_m=26,75\text{ k}\Omega$

- индуктивност гране магнећења $L_m=16,14\text{ H}$.

У кратком споју при номиналној струји кроз примарни намотај $I_n=1\text{ A}$ добијене су сљедеће вриједности:

- напон кратког споја $U_k=22,6\text{ V}$ или 5,94 % номиналног напона примара

- снага губитака у бакру $P_k=22,5\text{ W}$

Једноставним прерачунавањем добијају се вриједности елемената редне гране:

- омске отпорности намотаја $R_1=R_2=11,14\ \Omega$

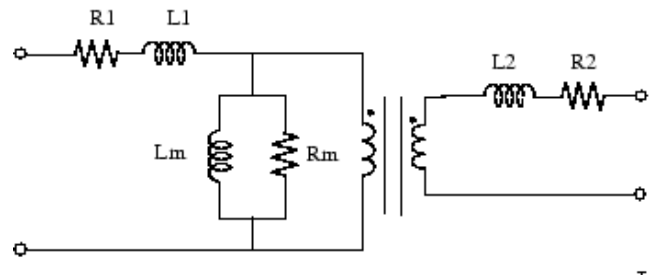
- расипне индуктивности намотаја $L_1=L_2=4,9\text{ mH}$

На овај начин одређени су сви елементи еквивалентне шеме неопходни за симулацију.

V. МОДЕЛ ЈЕДНОФАЗНОГ ТРАНСФОРМАТОРА И ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА

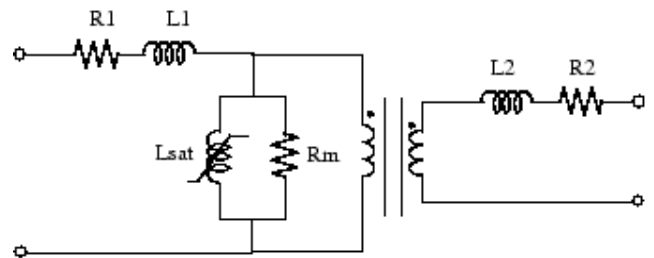
Линеарни модел једнофазног трансформатора заснован је на еквивалентној шеми приказаној на сл. 7 која

подразумијева да се грана магнећења представља паралелном везом отпорности R_m и индуктивности L_m [21].



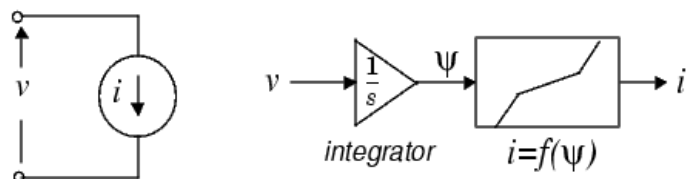
Слика 7. Еквивалентна шема једнофазног трансформатора- линеарни модел

Нелинеарни модел једнофазног трансформатора заснован је на еквивалентној шеми приказаној на сл. 8 која подразумева да се грана магнећења представља паралелном везом отпорности R_m и нелинеарном индуктивности L_{sat} [21].



Слика 8. Еквивалентна шема једнофазног трансформатора- нелинеарни модел

У нелинеарном моделу са сл. 8 нелинеарна индуктивност реализована је према блок-шеми са сл. 9 [21] на основу које се јасно види основна идеја: мјерењем напона на индуктивитету, затим интеграљењем тог напона (добија се магнетски флуks) и множењем са фактором пропорционалности могуће је нелинеарну индуктивност реализовати на основу струјно-напонске карактеристике празног хода. Примјеном интегратора обезбјеђује се и неопходни фазни помјерај који реално постоји између напона и струје.

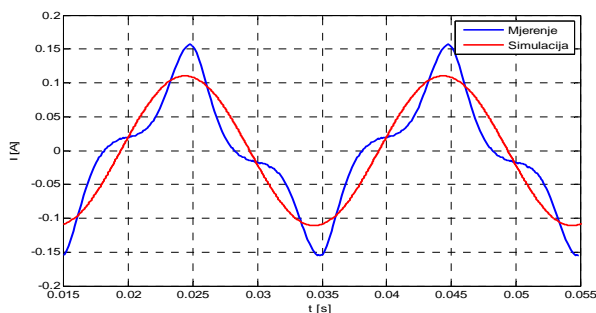


Слика 9. Нелинеарни модел индуктивитета – блок шема

VI. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ

На сл. 10 приказано је поређење таласних облика струје празног хода добијених симулацијом линеарног модела (сл. 7) и експериментално у лабораторији. Црвеном бојом

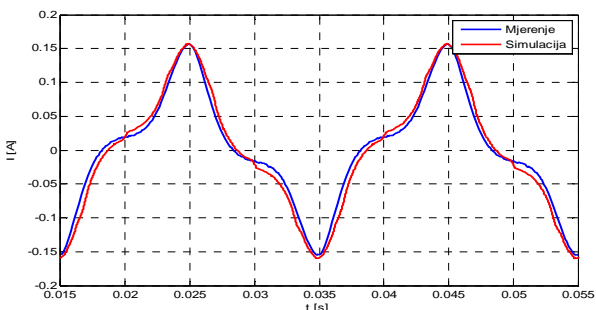
означен је таласни облик струје добијен симулацијом а плавом бојом експериментално добијен таласни облик.



Слика 10. Таласни облик струје празног хода – поређење таласног облика добијеног лабораторијским тестом са симулацијом линеарног модела

Очигледно је да линеарни модел не може бити примјењен за анализу понашања трансформатора у празном ходу јер таласни облик добијен симулацијом линеарног модела значајно одступа од експерименталних резултата. Међутим, измјерена ефективна вриједност струје празног хода од 76,3 mA јако мало одступа од вриједности добијене симулацијом: 78,1 mA. Из тог разлога није тешко закључити да се чини мала грешка приликом рачунања снаге губитака у празном ходу и да се линеарни модел може користити за симулацију експеримента празног хода у циљу одређивања параметара еквивалентне шеме.

На сл. 11 приказано је поређење таласних облика струје празног хода добијених симулацијом нелинеарног модела (сл. 9) и експериментално у лабораторији.

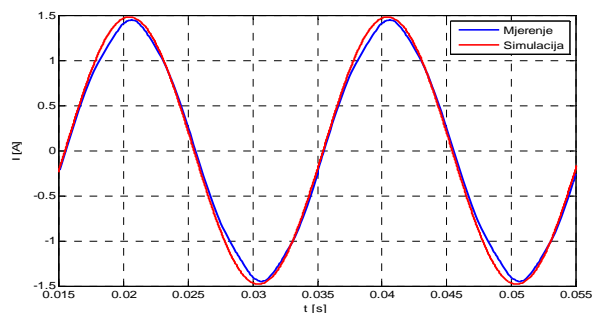


Слика 11. Таласни облик струје празног хода – поређење таласног облика добијеног лабораторијским тестом са симулацијом нелинеарног модела

Направљена грешка таласног облика струје празног хода је мања од 0,1 % што указује на предложени модел омогућава врло добру процјену таласног облика струје. Анализа показује да исто вриједи и за рачунање ефективне вриједности струје.

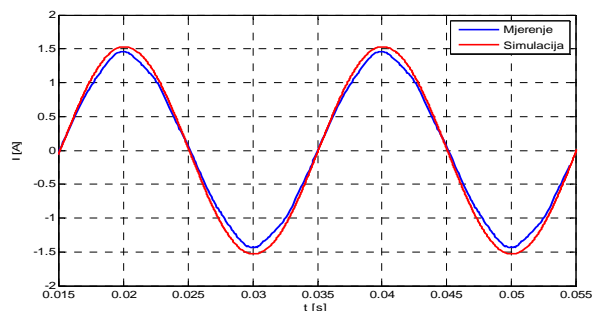
У току извођења експеримента кратког споја у лабораторији секундарни намотај се кратко споји а напон на примарном намотају се полако повећава све док не протекне номинална струја кроз примарни намотај.

Добијени резултати струја кроз примарни намотај дати су на сл. 12.

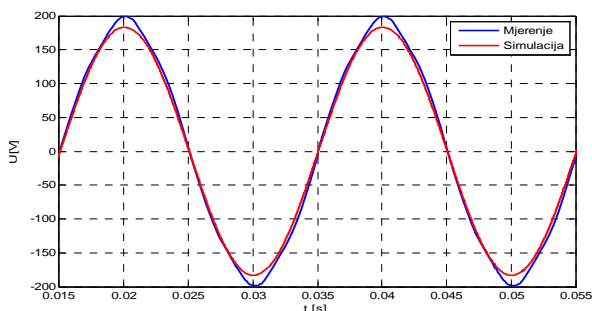


Слика 12. Таласни облик струје кратког споја – поређење таласног облика добијеног лабораторијским тестом са симулацијом нелинеарног модела

Додатни тест верификације предложеног модела урађен је на основу лабораторијског теста у ком је посматрани трансформатор оптерећен са потрошачем од 120 Ω. На примарни намотај доведен је напон ефективне вриједности 150 V а снимани су таласни облици напона и струје на потрошачу. Поређење измјерених вриједности са симулацијом дато је на сл. 13 и 14.



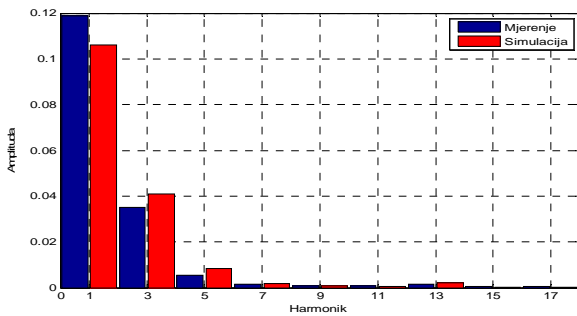
Слика 13. Таласни облик струја кроз потрошач – поређење таласног облика добијеног лабораторијским тестом са симулацијом нелинеарног модела



Слика 14. Таласни облик напона на потрошачу – поређење таласног облика добијеног лабораторијским тестом са симулацијом нелинеарног модела

На сл. 15 приказано је поређење хармонијског спектра струје магнећења при чему је направљена упоредна анализа резултата који се добијају симулацијом и експериментом. Може се шримјетити да предложени

нелинеарни модел даје прихватљиве резултате и у погледу хармонијске анализе.



Слика 15. Хармонијски спектар струје магнетезања – поређење резултата добијеног лабораторијским тестом са симулацијом нелинеарног модела

VII. ЗАКЉУЧАК

У овом раду описане су примјењене методе за реализацију линеарног и нелинеарног модела електричног трансформатора у МАТЛАБ Симулинк окружењу. Кроз поређење таласних облика добијених симулацијом и лабораторијским тестом утврђено је да линеарни модел индуктивности не може обезбедити адекватне резултате у погледу хармонијског спектра струје магнетезања као и њеног таласног облика. Рачунање губитака у баку и гвожђу је могуће извршити уз веома мало одступање резултата добијених симулацијом и лабораторијским тестом. Опште речено примјена линеарног модела је ограничена на оне ситуације када се не захтјева детаљна хармонијска анализа струје празног хода. Све недостатке линеарног модела надокнађује предложени нелинеарни модел при чему се задржавају све позитивне особине линеарног модела (релативно једноставно добијање параметара модела, мала грешка у кратком споју и при омски оптерећеном секундару).

ЗАХВАЛНИЦА

Митар Симић захваљује за финансијску помоћ фирме KV Team d.o.o из Сарајева у току истраживачког рада.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andrzej Wilk, Janusz Nieznanski, Ireneusz Mosen, Piotr Dobrowolski, Nonlinear Equivalent Circuit Model of a Traction Transformer for Winding Internal Fault Diagnostic Purposes, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Paper ID 1207, 2008
- [2] S. Chimklai, J.R. Marti, Simplified Three-phase Transformer Model for Electromagnetic Transient Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995
- [3] Lieven Degroote, Bert Renders, Bart Meersman, Lieven Vandeveldel, Harmonic nonlinear analysis of three-phase four-wire distribution networks, 19th International Conference on Electricity Distribution, Paper 0408, Vienna, 21-24 May 2007
- [4] Amir Tokic, Vlado Madzarevic, Ivo Uglesic, Numerical calculations of Three-Phase Transformer Transients, IEEE transactions on power delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005

- [5] Cornelia A. Bulucea, Doru A. Nicola, Nikos E. Mastorakis, Daniel C. Cismaru, Modelling of Electrical Transformers in Dynamic Regimes, Proceedings of the 9th WSEAS/IASME International Conference on electric power systems, high voltages, electric machines
- [6] Juan A. Martinez-Velasco, Bruce A. Mork, Transformer modelling for simulation of low frequency transients in power systems, 17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona, 12-15 May 2003
- [7] Andreas D. Theocharis, John Miliadis-Arghitis, Thomas Zacharias, A systematic method for the development of a three-phase transformer non-linear model, International journal of circuit theory and applications, Int. J. Circ. Theor. Appl.; 38:797-827, 2010
- [8] Gitte B. Nielsen Dynamic modeling of a three-phase transformer, Department of Energy Technology, Electrical Energy Engineering, Aalborg University, Aalborg East, Denmark
- [9] D. Dolinar, J. Pihler, B. GrEar, Dynamic model of a three-phase power transformer, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993
- [10] Andreas D. Theocharis, John Miliadis-Arghitis, Thomas Zacharias Three-Phase Transformer Model Including Magnetic Hysteresis and Eddy Currents Effects, IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 3, July 2009
- [11] Damien Halbert, Erik Etien, Gerard Champenois, An inversible model for hysteresis characterization at constant flux amplitude, Journal of electrical engineering, Vol. 55, No. 11-12, 319-323, 2004
- [12] D. W. P. Thomas, John Paul, Okan Ozgonenel, Christos Christopoulos, Time Domain Simulation of Nonlinear Transformers Displaying Hysteresis, IEEE transactions on magnetics, Vol. 42, No. 7, JULY 2006
- [13] Bogomir Zidari, Damijan Miljavec, J-A hysteresis model parameters estimation using GA, Advances in Electrical and Electronic Engineering
- [14] R. Marion, N. Siauve, M.A. Raulet, L. Krahenbuhl, Identification of Jiles-Atherton model parameters using Particle Swarm Optimization, Universit'e de Lyon, Lyon, F-69003, France
- [15] DC.Jiles, D.L. Atherton, Theory of Ferrmagnetic Hysteresis, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, p48-60, 1986
- [16] D Lederer, H Igarashi, A Kost, T Honma, On the Parameter Identification and Application of the Jiles-Atherthon Hysteresis Model for Numerical Modelling of Measured Characteristics, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, May 1999
- [17] Eszter Sárospatak, Miklós Kuczmann, Realization of the jiles atherton hysteresis model applying the labview and matlab software package, Journal of electrical engineering, Vol. 57. NO 8/S, 40-43, 2006
- [18] Andreas Müller, A reformulation of the Jiles-Atherton hysteresis model for ferromagnetic/ferroelectric components, PAMM · Proc. Appl. Math. Mech. 9, 401 – 402, 2009
- [19] Електричне машине и електромоторни погони, <http://www.sau.ac.me/>, (приступљено 20. марта 2012. године)
- [20] Бранко Митраковић, Трансформатори, Научна књига, Београд, 1972.
- [21] <http://www.mathworks.com/> (приступљено 18. јануара 2012. године)

ABSTRACT

This paper describes the realization model of an electrical transformer based on non-linear open circuit current-voltage characteristic. The simulation results are compared with results obtained in experiments in Laboratory for electrical machines on Faculty for electrical engineering of University in East Sarajevo. Additional verification of the proposed model was performed by harmonic analyzing.

Single Phase Transformer Model Based On Open Circuit Current-Voltage Characteristic

Mitar Simić, Tomislav B. Šekara, Srđan Jokić