

A transzformátor digitális mása

Az elmúlt évtizedekben az informatika ugrásszerű fejlődésén ment keresztül, az Ipar 4.0 időszakát éljük. A mérnöki tervezés új megvilágítást nyert. A különféle számítógépes eszközök segítségével a modellalkotás sokkal gyorsabbá és hatékonyabbá vált. A modellek hatalmas segítséget jelentenek a különféle rendszerek és eszközök tervezésében.

Ebben a cikkben egy egyfázisú transzformátor digitális mását készítjük el modellezéssel és teszteljük az elkészített modell pontosságát.

Ennek elkészítéséhez először méréseket végzünk egy egyfázisú transzformátoron a helyettesítő kapcsolás azonosítására céljából. Ezt követően levezetjük a lineáris és nemlineáris statikus és a nemlineáris dinamikus modelleket. Végül összehasonlítjuk a mért és a modellekből számolt eredményeket.

1. BEVEZETÉS

A modellalkotás lényege bizonyos eszközök, jelenségek, rendszerek viselkedésének leírása a lehető legpontosabb módon számítható, matematikai módszerek segítségével. A modellek felhasználhatók szabályozási rendszerek tervezéséhez, mérések kiváltására, eszköztervezésre és még sok más téren. [1, 2]

Egy modell lehet statikus és dinamikus. A statikus modellek az eszköz viselkedését állandósult állapotban írják le, míg a dinamikus modellek képesek kezelni a transziens jelenségeket, valamint a pontos jelalakokat is.

A lineáris modellekben az összes felhasznált matematikai művelet lineáris, és a jellemzők között lineáris kapcsolatot feltételezünk, emellett a modell paraméterei is állandóak. Látható lesz, hogy a transzformátor esetében ez a megközelítés nem megfelelő, hiszen a vasmag hiszterézise nemlineáris viselkedést okoz. A nemlineáris modellek azonban figyelembe veszik ezt.

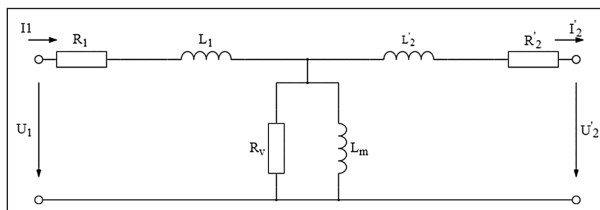
Ezen cikkben egy egyfázisú 220 voltos névleges primer feszültségű és 250 VA névleges látszólagos teljesítményű transzformátor különböző modelljeit vezetjük le, és megvizsgáljuk, hogy ezek a modellek mekkora pontossággal közelítik a mért eredményeket.

A modellek levezetéséhez először a helyettesítő kapcsolást vizsgáljuk meg, majd különböző méréseket végzünk a transzformátoron, amelyek segítségével azonosítani tudjuk a helyettesítő kapcsolás paramétereit és megvizsgálhatjuk a transzformátor üzemi tulajdonságait.

2. A HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS

A transzformátor helyettesítő kapcsolása diszkrét, koncentrált paraméterű áramköri elemek segítségével írja le az eszköz viselkedését. Segítségével a transzformátor veszteségei számolhatók, valamint különféle modellek vezethetők le. [3–8]

A helyettesítő kapcsolás az 1. ábrán látható. Az R_1 és R_2 ellenállás a primer és szekunder tekercsek ohmos ellenállását, az L_1 és L_2 induktivitások pedig ezek szórt induktivitását



1. ábra A transzformátor helyettesítő kapcsolása

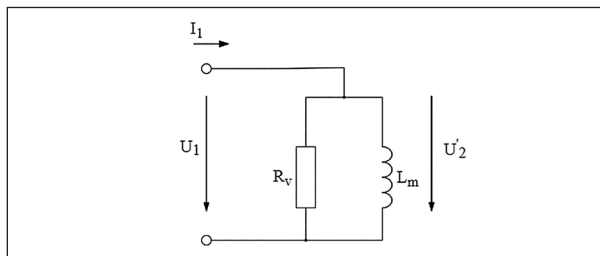
reprezentálják, ahol a vesszővel jelzett tagok a primer oldalra vannak redukálva a menetszámátvitel felhasználásával. R_v a vasvesztéseket létrehozó ellenállás, L_m pedig a főfluxust létrehozó induktivitás. A primer feszültséget és áramot I_1 és U_1 , a primer oldalra redukált szekunder feszültséget és áramot pedig U'_2 és I'_2 jelöli.

3. A HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁS IDENTIFIKÁLÁSA

A helyettesítő kapcsolás azonosítása céljából rövidzárási és üresjárási méréseket végzünk a transzformátoron [3–6]. Ezen mérések eredményeivel egyszerű villamosságtani alaptörvények segítségével számolhatjuk a helyettesítő kapcsolás paramétereit.

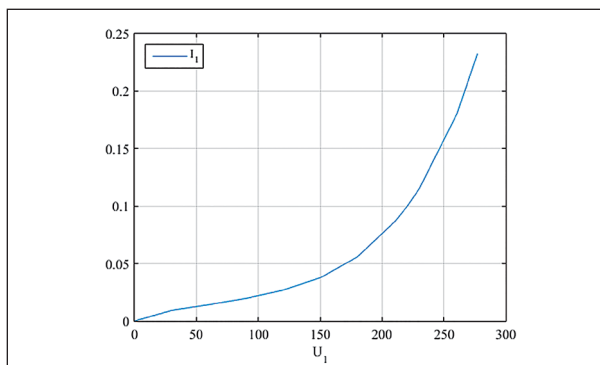
3. 1. Az üresjárási mérés

Az üresjárási mérés során a transzformátor szekunder kapcsait szabadon hagyjuk, így a szekunder tekercsen nem folyik áram és a helyettesítő kapcsolás R'_2 és L'_2 értékei elhagyhatóak. Mivel az R_v és az L_m induktivitás X_m reaktanciája jóval nagyobb a primer tekercs ohmos ellenállásánál és a szórt induktivitást reprezentáló induktivitás reaktanciájánál, ezen értékek is elhanyagolhatók, így a helyettesítő kapcsolás a 2. ábrán látható alakra egyszerűsödik.



2. ábra Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolás üresjárásnál

A mérés során a primer feszültséget 0–280 V-ig változtattuk és teljesítményanalizátor segítségével mértük a primer áramot, és a teljesítményviszonyokat. A primer áram és feszültség kapcsolata a 3. ábrán látható, amely a transzformátor vasmagjának telítődéséből fakadóan nemlineáris.

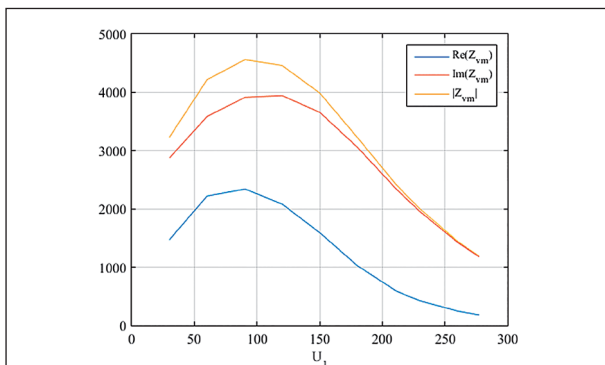


3. ábra A primer áram-feszültség kapcsolat üresjárásnál

A vasmag ezen tulajdonsága a helyettesítő kapcsolásban egy nemlineáris, a primer feszültség függvényében változó Z_{vm} komplex impedanciával vehető figyelembe, amely az R_v és X_m értékek párhuzamos eredője. Ezen értékek az alapvető villamosságtani törvényeket felhasználva a következő módon számolhatóak,

$$R_v = \frac{U_1^2}{P_1}, \quad X_m = \frac{U_1^2}{Q_1}, \quad L_m = \frac{X_m}{2\pi f},$$

ahol P_1 és Q_1 a hasznos és meddő primer teljesítmény, f pedig a hálózati frekvencia, ami 50 Hz. Amennyiben az R_v és X_m értékeket a teljes mérési tartományban kiszámoljuk, a nemlineáris Z_{vm} impedancia felrajzolható (lásd 4. ábra).



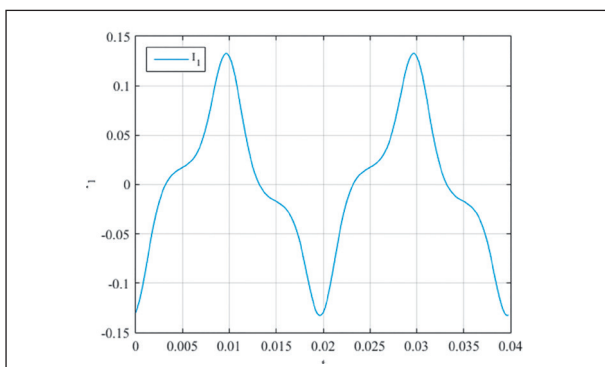
4. ábra A nemlineáris Z_{vm} impedancia

Az R_v és X_m értékek a névleges primer feszültségen az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat A névleges R_v és X_m értékek

$R_v[\Omega]$	$X_m[\Omega]$	$L_m[H]$
9648,0253	2265,5563	7,2115

Emellett fontos kiemelni, hogy a transzformátor hiszterézis karakterisztikája a primer áram jelalakjában is megfigyelhető, amely a primer feszültség növelésével egyre jobban eltér a várt szinusztól. Ez névleges feszültségen az 5. ábrán látható.

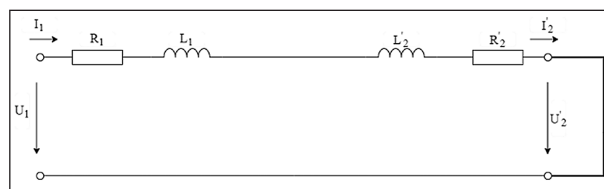


5. ábra A primer áram jelalakja névleges feszültségen

3.2. A rövidzárási mérés

A rövidzárási mérés során a transzformátor szekunder kapcsait rövidre zárjuk, és a mérést így végezzük el. Ahogy azt az üresjárás mérésnél említettük, R_v és X_m jóval nagyobbak, mint a primer és szekunder tekercs értékei, így hatásuk elhanyagolható és a helyettesítő kapcsolat a 6. ábrán látható alakra egyszerűsödik.

A mérés során a primer áramot 0-1,3 A-ig növeltük, és a primer feszültséget és teljesítményviszonyokat teljesítményanalizátor segítségével mértük. Fontos azonban,



6. ábra Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolat rövidzárásnál

hogy rövidzárásnál a szekunder áram jóval nagyobb, mint a primer oldalé, így a primer áram jelentősen nem haladhatja meg a névleges értéket.

Mivel a nemlineáris Z_{vm} impedancia elhanyagolható, a transzformátor primer feszültség és áram kapcsolata lineáris, és az áram jelalakja is szinuszos. Ebből látható az is, hogy az R_1, R_2 és L_1, L_2 értékek nem változnak a feszültség függvényében és értékük a következő módon számolható,

$$R_1 = R_2' = \frac{P_1}{2I_1^2}, \quad R_2 = \frac{R_2'}{a^2},$$

$$X_1 = X_2' = \frac{Q_1}{2I_1^2}, \quad X_2 = \frac{X_2'}{a^2}.$$

ahol a a menetszám áttétel és az L_1, L_2 értékek,

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f}, \quad L_2 = \frac{X_2}{2\pi f}.$$

A névleges primer áram mellett számolt értékek a 2. táblázatban láthatók.

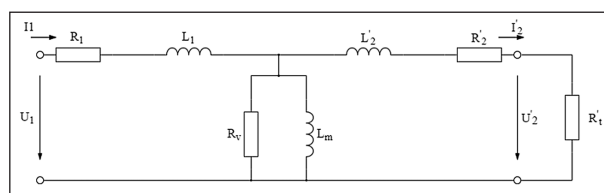
2. táblázat A névleges primer és szekunder kör értékek

$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$X_1[\Omega]$	$X_2[m\Omega]$	$L_1[mH]$	$L_2[\mu H]$
9.6567	0.0312	2.4354	7.8600	7.7520	25.0191

4. A TRANSZFORMÁTOR MODELLEK

4.1. A lineáris statikus modell

A lineáris statikus modell levezetéséhez a transzformátor helyettesítő kapcsolását a névleges primer feszültség és áram-értékek mellett identifkáljuk, és elhanyagoljuk az R_v és X_m értékek feszültségfüggését. Emellett a modell az áramokat szinuszosnak feltételezi, és effektív értékekkel számol.



7. ábra A helyettesítő kapcsolat R_t terhelő ellenállással kiegészítve

A modell levezetéséhez általános villamosságtani egyenleteket írhatunk fel a 7. ábrán látható R_t terhelő ellenállással kiegészített helyettesítő kapcsolásra, ahol R_t -t szintén a primer oldalra redukáljuk. A modell bemenete a primer feszültség, kimenete pedig a szekunder kör értékek. A szekunder áram a következő módon számolható

$$I_2 = a \frac{U_1}{Z_e Z_{vm} + R_2' + jX_2' + R_t'}$$

ahol

$$Z_{vm} = R_v + jX_m,$$

$$Z_e = R_1 + jX_1 + Z_{vm} \times (jX_2' + R_2' + R_t').$$

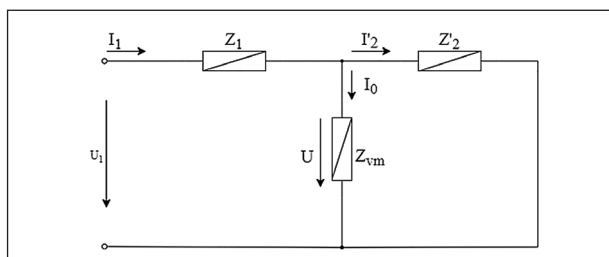
A szekunder feszültség pedig

$$U_2 = \frac{U_1}{a} \frac{Z_p}{Z_p + R_1 + jX_1} \frac{R'_t}{R'_t + jX'_2 + R'_2}$$

4.2. A nemlineáris statikus modell

A nemlineáris statikus modell a lineáris modell kiegészítése a feszültségfüggő Z_{vm} impedancia figyelembevételével. A modell levezetéséhez a helyettesítő kapcsolást a 8. ábrán látható módon egyszerűsítjük a primer és szekunder kör értékek összevonásával,

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \\ Z'_2 = R'_2 + jX'_2 + R'_t.$$



8. ábra Az egyszerűsített helyettesítő kapcsolás

A nemlineáris Z_{vm} impedanciával való számításhoz a 4. ábrán látható feszültség-impedancia karakterisztikának valós és képzetes részét negyedfokú polinommal közelítjük, és ezek felhasználásával Z_{vm} értékére egy komplex polinom függvényt írhatunk fel a rajta eső feszültség függvényében,

$$Z_{vm}(U) = (A_1 + jA_2)U^4 + (B_1 + jB_2)U^3 + (C_1 + jC_2)U^2 + (D_1 + jD_2)U + (E_1 + jE_2),$$

amelynek együtthatói a 3. táblázatban láthatók.

3. táblázat A Z_{vm} függvény együtthatói

A_1		A_2	$1.7888 \cdot 10^{-6}$
B_1	0.0023201	B_2	
C_1	-0.72946	C_2	-0.14725
D_1	77.892	D_2	39.437
E_1	-283.19	E_2	1828.4

A hurok és csomóponti egyenleteket az egyszerűsített helyettesítő kapcsolásra felírva és a komplex Z_{vm} impedanciát felhasználva a következő egyenlethez juthatunk.

$$0 = \frac{U_1}{Z_1} Z_{vm}(U) - \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z'_2} \right) U Z_{vm}(U) - U.$$

Ezen egyenlet megoldásával a Z_{vm} impedancián eső U feszültség meghatározható, és a függvénybe visszahelyettesítve Z_{vm} értéke is számolható. Ezt követően a modell a lineáris modellel megegyező módon számolható.

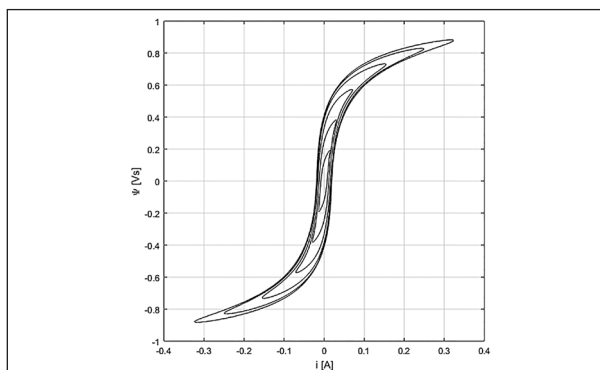
4.3. A nemlineáris és a hiszterézises dinamikus modellek

A transzformátor vasmagjának áram-fluxus karakterisztikája, az üresjárási mérés során meghatározható (lásd 9. ábra).

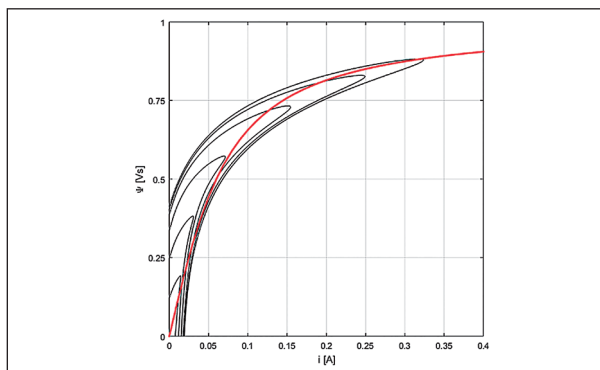
Ezen karakterisztika egy arkusz tangens függvény segítségével közelíthető a következő módon [9]

$$\Psi(i) = \frac{2\Psi_{max}}{\pi} \operatorname{atan} \frac{i}{I_0}$$

ahol $\Psi_{max} = 1 \text{ Vs}$ és $I_0 = 0,06 \text{ A}$ a mért és az ily módon közelített görbe összehasonlítása a 10. ábrán látható. Amennyiben a helyettesítő kapcsolásra felírható differenciálegyenlet rendszerben Z_{vm} helyett az így kapott fluxus-áram görbét hasz-

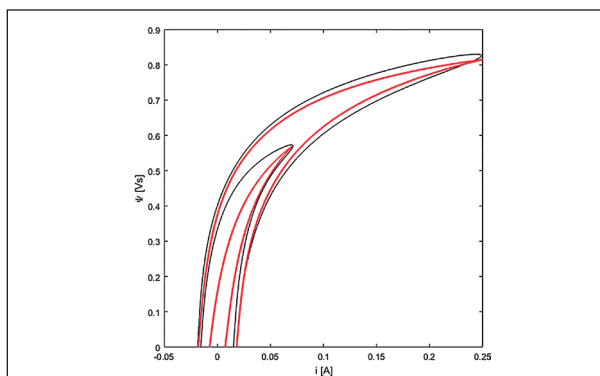


9. ábra Az áram-fluxus karakterisztika üresjárásnál



10. ábra Az áram-fluxus karakterisztika közelítése arkusz tangens függvénnyel

náljuk fel, a transzformátor nemlineáris dinamikus modelljét kapjuk. Ezzel azonban a vasmagból fakadó veszteségek nem közelíthetők. Ennek kiküszöbölésére a Jiles–Atherton-modell (részletesen lásd [9]) felhasználásával a transzformátor hiszterézises dinamikus modelljét kapjuk. Ez a modell jól közelíti a vasmag hiszterézis karakterisztikáját, ahogy az a 11. ábrán látható.



11. ábra Az áram-fluxus karakterisztika közelítése a Jiles–Atherton-modell felhasználásával. (A modell paraméterei: $M_s = 8,48 \cdot 10^5$, $a = 2,72 \cdot 10^{-7}$, $\alpha = 0,078$, $c = 0,83$, $k = 0,22$)

A Jiles–Atherton-modell felhasználásával a transzformátor hiszterézises dinamikus modellje a következő differenciálegyenlet rendszer segítségével számolható,

$$i_1 = -\frac{R_1(L'_2 + L)}{F} i_1 - \frac{(R'_2 + R'_t)L}{F} i_2 + \frac{L'_2 + L}{F}$$

$$i_2 = -\frac{R_1 L}{F} i_1 - \frac{(R'_2 + R'_t)(L_1 + L)}{F} i_2 + \frac{L}{F} u_1,$$

ahol

$$F = L_1 L'_2 + L L_1 + L L'_2 \text{ és } L = \frac{d\Psi(i)}{di}.$$

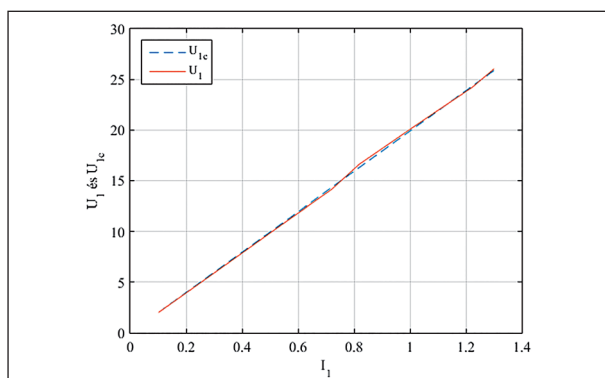
a dinamikus induktivitás a Jiles–Atherton-modellből.

5. A MODELLEK PONTOSSÁGÁNAK ELLENŐRZÉSE.

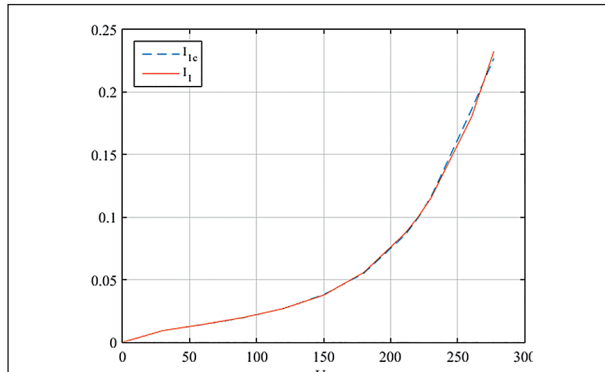
A modellek pontosságának ellenőrzése céljából az elvégzett méréseket szimuláltuk velük, és összehasonlítottuk a mérési és a szimulációs eredményeket. A rövidzárási és üresjárási mérés mellett az üzemi tulajdonságok vizsgálása céljából 1,5 Ω -os terhelő ellenállás mellett is méréseket végeztünk, és ezeket is felhasználtuk a modellek ellenőrzésére.

Mivel rövidzárási üzemmódban a nemlineáris viselkedés elhanyagolható, a lineáris, statikus modell jó közelítéssel képes visszaadni a mérési eredményeket (lásd 12. ábra). Természetesen erre a nemlineáris modellek is képesek.

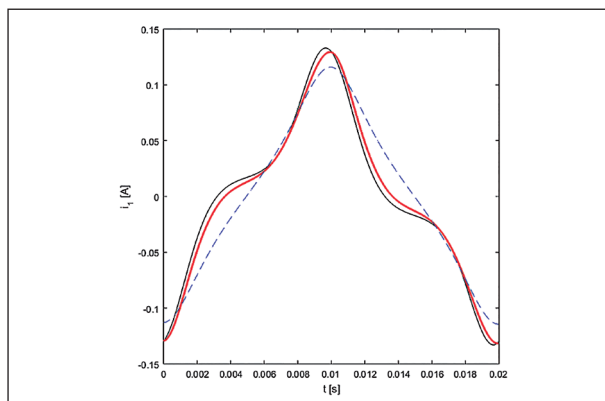
Üresjárási mérésnél azonban a vasmag telítődéséből fakadó nemlineáris viselkedést nem képes visszaadni. Azonban a nemlineáris statikus modell jó pontossággal közelíti ezt is (lásd 13. ábra).



12. ábra Az áram-feszültség görbe rövidzárásnál a lineáris modellel közelítve



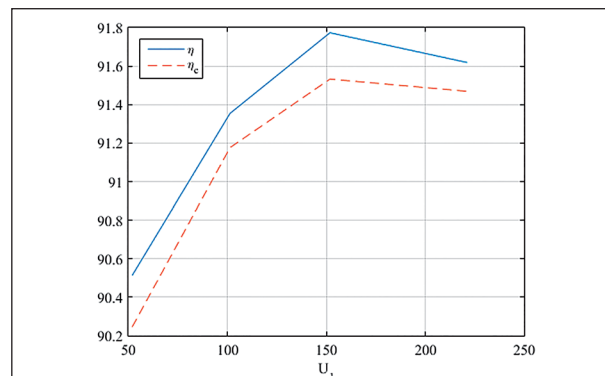
13. ábra Az áram-feszültség görbe a nemlineáris statikus modellel közelítve, üresjárásnál



14. ábra A primer áram jelalak üresjárásnál a dinamikus modellek szerint. (Fekete vonallal a mért, szaggatottal a nemlineáris, pirossal pedig a hiszterézises dinamikus modell eredményei.)

A dinamikus modellek a statikus modellekkel ellentétben az áram jelalakjának közelítésére is képesek (lásd 14. ábra).

Ohmos terhelésnél a transzformátor nemlineáris viselkedése a veszteségeiben figyelhető meg. A 15. ábrán látható, hogy a nemlineáris modell képes a hatásfokot is jó pontossággal közelíteni, ebből következik, hogy a teljesítményeket és az áramokat is jól számolja.

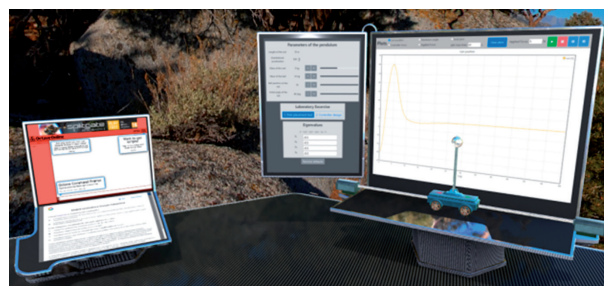


15. ábra A transzformátor hatásfoka 1,5 Ω -os terhelés mellett a nemlineáris statikus modell alapján

6. KONKLÚZIÓ

Ebben a cikkben felírtuk a transzformátor lineáris és nemlineáris statikus modelljét, valamint a nemlineáris és hiszterézises dinamikus modelljét. Láthattuk, hogy a vasmag nemlineáris karakterisztikájának figyelembevételével pontosabb modell érhető el és hogy a dinamikus hiszterézises modellel a transzformátor áram alakjai is szimulálhatóak, amelyhez a Jiles–Atherton-modellt használtuk fel. A hiszterézis közelítésére több másik módszer is felhasználható lenne, például a Preisach-modell [10].

A mérések bebizonyították, hogy ezen módszerrel jó pontosságú modell készíthető, amelyek felhasználásával létrehozhatjuk a transzformátor mását a MaxWhere virtuális terében [11, 12]. Így akár a 16. ábrán látható a Széchenyi István Egyetemen létrehozotthoz [13] hasonló virtuális laboratóriumot tudunk készíteni, amely fejlesztheti és modernizálhatja a villamos gépek és hajtások oktatását az egyetemen.



16. ábra A fordított inga szabályozástechnika e-labor

„Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-1-I-SZE-58 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”

Irodalomjegyzék

- [1] L. Keviczky, Szabályozástechnika, Széchenyi University Press, Győr, 2011
- [2] J. W. Lewis, Modeling Engineering Systems, Newnes, 2013
- [3] A. Frigyes, L. Schnell, I. Szita, R. Tuschák, Elektrotechnika, Tankönyvkiadó, Budapest 1961
- [4] J. Liska, Villamos gépek, I. Transzformátor, Tankönyvkiadó, Budapest 1967

- [5] **J. J. Cathey**, Electric Machines: Analysis and Design Applying Matlab, McGraw-Hill Higher Education, 2001
- [6] **I. H. Teke, Y. Özüpak, M. S. Mamiş**, Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method, International Journal Of Engineering And Computer Science, Vol. 8, No. 1, pp. 24451-24460, 2019
- [7] **S. C. Bell, P. S. Bodger**, Power Transformer Design Using Magnetic Circuit Theory and Finite Element Analysis – A Comparison of Techniques, AUPEC, Perth, Western Australia, 9-12 December, 2007
- [8] **T. Orosz, D. Pánek, P. Karban**, FEM Based Preliminary Design Optimization in Case of Large Power Transformers, Applied Sciences, MDPI, Vol. 10, 1361, 2020
- [9] **A. Iványi**, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, Academic Press, Budapest, Hungary, 1997
- [10] **M. Kuczmán**, Ferromagnetic Hysteresis in Electromagnetic Field Computation, DSc Dissertation, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 2014
- [11] Max Where website. <https://www.maxwhere.com/>
- [12] **B. Berki**, Desktop VR as a Virtual Workspace: a Cognitive Aspect. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 16, No. 2, 2019, pp. 219-231
- [13] **M. Kuczmán, T. Budai**, Linear State Space Modeling and Control Teaching in Max Where Virtual Laboratory, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 16, No. 6, pp. 27-39, 2019
- [14] **Dr. Kuczmán Miklós**, Válogatott mérések Villamosságtanból, Győr 2009



Horváth Tamás

Villamosmérnök, BSc-hallgató
Széchenyi István Egyetem
htamas109@gmail.com



Dr. Kuczmán Miklós

Széchenyi István Egyetem
kuczmán@maxwell.sze.hu

HÍREK

Villamosenergia-minőség

Recenzió a Dán-Tersztyánszky-Varjú-szerzőhármass Villamosenergia-minőség című könyvéről. A könyv első kiadásakor (2006-ban) elmaradt a recenzió, amire most, a második kiadásakor került sor.

Az 531 oldalas könyv első fejezetében „a villamosenergia-minőség-EMC-kapcsolat és szabványhátter van tárgyalva. A fejezet rámutat a tranziens túlfeszültség elleni védelmi megoldásokra, a megfelelő minőségű EMC alkalmazás fontosságára. Itt elsősorban a zavartűrés és a zavarkibocsátás, az elektromágneses zavarjelenségek vannak tárgyalva. A fejezet további részeiben a tranziens túlfeszültségek, a távközlési rendszerek túlfeszültségei, valamint függelékben a szabványok vannak felsorolva.

A könyv második fejezetében a feszültségletörés, feszültségkiesés, feszültségemelkedéssel foglalkozik, a jelenség definíciója, a mérési módszerekkel, a mért adatok kiértékelési lehetőségeivel foglalkozik. A letörés irányának meghatározási módszereit tárgyalja sugaras hálózaton, hurkolt hálózaton, elosztott energiatermelők nélküli, illetve energiatermelőkkel ellátott hálózaton. Letörés kompenzációs módszerek is röviden ismertetve vannak.

A harmadik fejezet az aszimmetriával foglalkozik, sorba veszi a definíciót, a mérési módszereket, a mért adatok kiértékelését. Tárgyalja a fogyasztók által okozott aszimmetriát, a hálózat által okozott aszimmetriát, az aszimmetria keletkezés irányának meghatározását, valamint a fogyasztói aszimmetria kompenzációját.

A negyedik fejezetben a villogást (flicker) tárgyalja, sorba veszi a keletkezést, a definíciót, a terjedést. Ismerteti a villo-

gás mérési módszert. A villogás forrásának beazonosítására olyan módszert ismertet, amely a tényleges villogás értéket méri. A villogás hatás csökkentésére több módszert ismertet, amelyek a gyakorlatban bevált eljárások, végül a flicker kompenzációs aktív megoldását is bemutatja.

Az ötödik fejezet a harmonikusokat tárgyalja. Ez a fejezet a legbővebb, tárgyalja a feszültségtorzulás keletkezését, a soros és párhuzamos rezonanciát, a harmonikusok hálózaton való terjedését. A továbbiakban a harmonikusok mérését, a kiértékelési lehetőségeket, a mérőváltók frekvenciamentét vizsgálja. A harmonikus teljesítmény értelmezése, a harmonikusok által okozott problémák a következő fejezet témája. Külön fejezet foglalkozik a harmonikus forrás azonosítással, az ehhez szükséges mérés technikával. A következő terület a passzív szűrés, majd az aktív szűrés.

A modellezés kérdésével foglalkozik a 6. fejezet, ahol a feszültségletörés-emelkedés, az aszimmetria, a villogás és a harmonikusok területeket tárgyalja.

A 7. és 8. fejezetek a monitoringot és villamosenergia-minőség hatását a hálózati veszteségre tárgyalja a könyv.

Külön fejezetben tárgyalja az elosztott energiaforrások hatását a villamosenergia-minőségre, majd néhány példán keresztül bemutat extrém eseteket a z egyes mutatókra.

A könyv második része a villamosenergia-szolgáltatás minőségi kérdéskörét tárgyalja. A terület állandó fejlődés, változás alatt van, kivétel néhány alapvető és jól mérhető mennyiség, mint a feszültségellátás megbízhatósága (SAIDI, SAIFI, CAIDI, MAIFI rövidítésű) mutatók. Itt az egyes országok mutatóit lehet összehasonlítani, a rendkívüli események kezelését tekintve akár. Ez a könyvrészlet a leginkább változó és fejlődő, míg az előző részek műszaki alapjai nem tekinthetők ilyennek.

