FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XIX.

Kolozsvár, 2014. március 20–21.

TRANSZFORMÁTOR TEKERCSELÉSEK HELYETTESÍTŐ KAPACITÁSAINAK MEGHATÁROZÁSA KONCENTRÁLT PARAMÉTERŰ MODELL SZÁMÁRA ANALITIKUS ÉS VÉGESELEM MÓDSZERREL

CALCULATION OF CAPACITANCES FOR A LUMPED PARAMETER CIRCUIT MODEL WITH ANALYTICAL AND FINITE ELEMENT METHOD FOR TRANSFORMER WINDINGS

OROSZ Tamás⁽¹⁾, SZAKÁLLAS Anna⁽¹⁾, VAJDA István⁽²⁾

(1) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki kar, Villamos Energetika Tanszék. 1111 Budapest, Egry József Utca, 18. ; orosz.tamas@vet.bme.hu

(2) Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki kar, Automatika Intézet, 1431 Budapest, Bécsi út 94-96. Vajda.Istvan@kvk.uni-obuda.hu

Abstract

For designing the high voltage insulation system for power transformers, the voltage stresses arising in a transformer must be precisely known. The different type of voltage stress can be determined from the voltages appearing at the terminals and the knowledge of the geometry of the windings. The distribution of the power-frequency overvoltages does not differ very much from the system frequency. It is proportional to the number of the turns of the windings, and it is uniform within each individual winding. The distribution of the transient overvoltages depends on the capacitances and inductances of the windings. In this paper we present an accurate, 2D finite element method based capacitance calculation routine, which is compared with the classical analytical calculation [1].

Keywords: power transformer, lightning impulse distribution, capacitance model, finite element model.

Összefoglalás

Nagytranszformátorok tekercsrendszerének a méretezéséhez nem elegendő a tekercsek kapcsain megjelenő feszültségek ismerete, a tekercsrendszerben fellépő feszültségeloszlás pontos ismerete szükséges. Ez az ipari feszültséggel végzett próbára történő méretezés során nem jelent problémát, ekkor az azonos fluxushoz kapcsolódó tekercsszegmensek között a feszültség a menetszámok arányában fog megoszlani, más a helyzet a nagyfeszültségű tranziensekre történő méretezés esetén, ahol a nagyon nagy frekvencia miatt, a tekercsek részkapacitásai kulcsszerepet játszanak a feszültségeloszlás meghatározásánál. A dolgozatban, a gyakorlatban is használt analitikus modellt hasonlítom össze, 2D-s végelelem programmal végzett számítással [1].

Kulcsszavak: nagytranszformátor, lökőfeszültség-eloszlás, kapacitás-modell, végelelem-modell.

1. Bevezetés

A transzformátorok kapcsain megjelenő feszültségek között megkülönböztetünk üzemi és túlfeszültségeket. Ebben a dolgozatban a gyors felfutású tranziens túlfeszültségek számítása kerül kidolgozásra, mivel ezek a nagy frekvenciás feszültség tranziensek tekercsen belüli feszültség-

eloszlásának a leírását az 1. táblázatban látható módon, a tekercsek részkapacitásai határozzák meg [4].

1.táblázat. A tranziens jelenségek frekvenciájának a hatásai a transzformátor tervezés szempontjából lényeges paramétereire. A táblázatban használt jelölések értelmezése: 0-elhanyagolható; 1-fontos; 2-nagyon fontos [2][3][4]

	Kis frekvenciás tranziensek		Lassú felfutású tranziensek		Gyors felfutású tranziensek		Nagyon gyors felfutású tranziensek	
	0,1 [Hz]	3 [kHz]	50 [Hz]	20 [kHz]	10 [kHz]	3 [MHz]	100 [kHz]	50 [MHz]
Rövidzárási Impedancia	2		2		1		0	
Vasmag telítődése	2		1		0		0	
Üresjárási veszteségek	1		0		0		0	
Járulékos veszteségek	2		1		0		0	
Kapacitív csatolások	0		1		2		2	

A soros kapacitások jelentőségére már a XX. század elején K.W. Wagner hívta fel a figyelmet a transzformátor tekercsekben a lökőfeszültségű impulzusok hatását leíró modell és számítási módszer megalkotásával [1].

A mai modern mérnöki gyakorlatban alkalmazott analitikus számításhoz használt tekercs modell alapja még mindig az elosztott paraméterű távvezeték modell, amely alkotóelemeit tekintve a Wagner-féle modellre vezethető vissza [5].

2. Menet keveretlen tárcsás tekercsek soros helyettesítő kapacitásainak a meghatározása

2.1. Koncentrált paraméterű modell elemeinek meghatározása analitikus úton

A tekercs Wagner alapján soros induktivitásokból, valamint párhuzamos és soros kapacitásokból álló, homogén, infinitezimális matematikai modellel képezhető le.

A leggyakoribb esetben a tekercs tárcsás felépítésű, ekkor az analitikus számítás során a koncentrált paraméterű modell csomópontjait célszerű a tárcsapárok közé felvenni az 1. ábrán látható módon.

1. ábra. Tárcsás tekercselrendezés folytonosan tekercselt tárcsás tekercs esetében, és annak helyettesítő kapacitásmodellje [5].

Vegyük észre, hogy a parazita kapacitások figyelembevételére a papír szigetelési távolságot megnöveltük. Ez az érték egy adott tartományban helyesen eredményt ad, de extrém esetekben a formula rossz eredményt szolgáltat.

2. ábra. A tárcsapárban feltételezett lineáris feszültségeloszlás [1].

A C_{dh} helyettesítő tárcsakapacitás a következő módon határozható meg C_d ismeretében, a 2. ábrán látható tárcsás tekercs lineáris a feszültségmegoszlását kihasználva, a tárcsapárok közötti kapacitásokban tárolt eredő energia a következőképpen számolható [1] [6] alapján:

$$\frac{1}{2} C_{dh} \cdot V^2 = \int_0^R C_d [V \cdot (1 - \frac{x}{R})]^2 dx \quad (1)$$

Egy tárcsapár eredő soros kapacitása:

$$C_s = C_{dh} + C_t \quad (2)$$

A tekercs N db tárcsájára elvégezve a számítást, és kihasználva az energiamegmaradást, a következő alakba írható a soros kapacitásra kapott kifejezés [1][5]:

$$C_s = \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{n-1}{n^2} \cdot C_t + \frac{4 \cdot N - 1}{N} \cdot C_{dh} \right) \quad (3)$$

2.3. Tárcsa - és menetkapacitások meghatározása analitikus úton

A tárcsa- és tekercskapacitások meghatározásához az 1. ábrán látható jelöléseket alkalmazva, a D átmérőjű tárcsára, amely h magasságú, d_m szélességű papírral szigetelt vezetőből épül fel, a következő egyenletek írhatóak fel, amelyekben a papír és az olaj-prespán réteg relatív permittivitását ϵ_m és ϵ_t jelöli [1][4].

$$C_t = \epsilon_m \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{D \cdot \pi \cdot (h + 2 \cdot \delta_m)}{2 \cdot \delta_m} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{1}{3} \epsilon_0 \cdot \frac{D \cdot \pi \cdot (r + \delta_t)}{\frac{2 \cdot \delta_m}{r_m} + \frac{\delta_t}{\epsilon_t}} \quad (5)$$

2.4. Tárcsa és menetkapacitások meghatározása végelemek módszerrel [VEM]

A VEM megoldáshoz a Laplace-egyenlet megoldása szükséges az adott tekercsszegmensre, majd a kapott potenciál értékeket felhasználva, az elektrosztatikus energia képletéből, konstruálható egy olyan eljárást, amely n db vezetőre, tetszőleges tekercsgeometria esetén képes a tárcsapár helyettesítő kapacitásainak a meghatározására.

$$\epsilon \Delta V = 0 \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2} V^T C V \quad (7)$$

Ahol a V vektor a tárcsa egyes menetein előírt potenciálértékeket tartalmazza, C pedig a részkapacitásokkal felépített kapacitásmátrix. A tekercsszimmetriákat figyelembe véve könnyen belátható, hogy $C_{ij} = C_{ji}$ és $C_{ii} = 0$ miatt, elegendő egy felső háromszög mátrix elemeit kiszámolnunk, így a $a = \frac{2n \cdot (2n-1)}{2}$ ismeretlenes egyenletrendszert megoldanunk. Bevezetve az a

gerjesztés mátrixot, mely értékeit a $\{GND, V_0\}$ halmazból veszi, előállítható a részkapacitások számításához szükséges összes állapot. Melyekre külön-külön megoldva a Laplace-egyenletet, az E mátrix elemeit megkapjuk a VEM után, a következő egyenlet megoldása szükséges

$$2EA^{-1} = C \quad (8)$$

3. ábra. Mintamegoldás két állapota egy kétmenetes tárcsaszervő tekercs esetére [7].

3. Összefoglalás

2. táblázat. Az analitikus és a VEM alapján számolt menet - és tárcsakapacitás értékeinek az összefoglalása $n=2$ menetes teszt tekercs esetén, melyet 10 mm magas, 1.8 mm széles, 0.6 mm-es papírral szigetelt vezetőből képzelünk el. A táblázatban közölt értékekhez 3 mm -es betétvastagsággal, 30 % -os lefedettséggel, 740 mm belső átmérővel, $\epsilon_0 = 0,008854$ pF/m; $\epsilon_{Oil} = 2,2$; $\epsilon_{Pre} = 4.4$; $\epsilon_{Pap} = 3.3$.

	C_d [pF]	C_t [pF]
Analitikus	86,18	639,11
FEM	93,92	619,15

Az eredményekből látható, hogy a két megoldás között kevesebb, mint 10% az eltérés, amely gyakorlati szempontból nagyon jó eredménynek számít, a tapasztalatok szerint 15%-os pontossággal kell ismerni a kapacitás értékeket, hogy jó eredményt kapjunk. Ez egyrészt mutatja, hogy az analitikus, nagyon egyszerű formulák kis számításigényük miatt jól használhatók a lökfeszültségű feladatok megoldására, még bonyolultabb menetkevert, védővezetőt tartalmazó, vagy különleges tekercsek esetén is, jelennek meg tanulmányok újszerű formulákról [8]. Belátható, hogy a VEM módszerrel kapott megoldás során pontosabban tudjuk figyelembe venni a parazita kapacitásokat, illetve újszerű, különleges anyagokból épített tekercsek esetén előnyös lehet a használatuk, hiszen tetszőleges tekercsgeometria esetén használhatók.

Irodalom

- [1] Kiss L., Karsai K., Kerényi D., *Nagytranszformátorok*, Műszaki Könyvkiadó, 1973.
- [2] CIGRE WG 33.02, *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*, CIGRE Brochure 39, 1990.
- [3] IEC TR 60071-4, *Insulations Co-ordination Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Electrical Networks*, IEC, 2004.
- [4] Juan A., M. Velasco, *Power System Transients Parameter Determination*, CRC Press, 2010.
- [5] Eilert Bjerkan, *High Frequency Modeling of Power Transformers Stress and Diagnosis*, PhD thesis, NTNU Department for Electrical Power Engineering, 2005.
- [6] Z. Á. Tamus, *High Frequency Behaviour of Rogowski-coil Passive L/r Integrator Current Transducer*, IEEE Postgraduate Conference, Budapest, 2002.
- [7] P. Karban et al. *Agros2D*.
- [8] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, és R. Ahuja, *Calculation and measurement of winding disk capacitances with wound-in-shields*, Power Delivery, IEEE Transactions on, vol 13, sz 2, o 503–509, 1998.