



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yük Altında Çalışan Tek-Fazlı Transformatörlerin Demir ve Bakır Kayıplarının İzlenmesi

 Hasan DİRİK^{a,*},  Cenk GEZEGİN^b

^a Elektrik ve Enerji Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Sinop Üniversitesi, Sinop, TÜRKİYE

^b Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Amasya Üniversitesi, Amasya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: hasan_dirik@hotmail.com

DOI : 10.29130/dubited.551316

ÖZET

Transformatörlerin termal özellikleri, yüklenebilme sınırlarını ve ömürlerini belirleyen önemli değişkenleri içerir. Bu değişkenler arasında transformatörlerin sargı sıcaklığı en önemli değişkendir. Sargı sıcaklığının değeri transformatörün iç yapısındaki kayıpların neticesinde açığa çıkan ısı enerjinin miktarı ile dış ortama atılan ısı enerjisi miktarı arasındaki denge tarafından belirlenir. Bu noktada transformatörlerin gerçek zamanlı çalışmaları esnasındaki güç kayıplarının iç sıcaklığa önemli etkisinin olduğu anlaşılır. Bu kayıplar demir ve bakır kayıpları olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Her iki kayıp türünün sargı sıcaklığına ve özellikle en sıcak nokta sıcaklığına olan etkisi farklı orandadır. Bu yüzden transformatör sıcaklık hesaplamalarında kullanılan termal modellerin hemen hemen hepsinde her iki kayıp türü farklı oranlarda dikkate alınır. Bu yüzden demir ve bakır kayıplarının ayrı ayrı hesaplanabilmesi termal modellerin doğruluğu bakımından önemli bir avantaj sunar. Bu çalışmada, bu yüzden, gerçek zamanlı transformatör verileri kullanılarak kayıpların nasıl hesaplanabileceği üzerine bir yöntem verilmiştir. Yöntem tek-fazlı transformatörün primer ve sekonder tarafı gerilimlerini ve akımlarını kullanmaktadır. Yöntemin matematiksel eşitlikleri transformatörlerin T-eşdeğer devresi kullanılarak elde edilmiştir. Burada, önerilen yöntemin öncelikle matematiksel temelleri verilmiştir. Sonrasında ise yöntemin hem Matlab/Simulink ortamında yapılmış olan benzetimler ile hem de bir 5 kVA gücüne sahip transformatör üzerinde yapılan deneysel çalışmaları ile yapılmış olan inceleme sonuçları verilmiştir. Sonuçlar kayıpların önerilen yöntem ile oldukça hassas bir şekilde elde edilebildiğini göstermektedir. Hesaplamaların harmonikli koşullarda da geçerli olması ve gerçek zamanlı veriler ile yapıyor olması önemli iki avantajdır.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, Bakır Kayıpları, Demir Kayıpları, Transformatör İzleme, Termal Model.

Iron and Copper Losses Monitoring of Single-Phase Transformers Operating under Load

ABSTRACT

Thermal properties of the transformers include important variables that determine loading limits and lifetime. Among these variables, winding temperatures are the most important variables. The value of winding temperature is determined by the equilibrium between thermal energy produced by internal losses of transformer

and thermal energy given to ambient. At this point, it can be easily understood that power losses of transformers in real time have important effect on the internal temperature. These losses are split into two sub-groups: iron and copper losses. The effect of both types of losses on the winding temperature and especially on the hot-spot temperature is different. Thus, almost all of the thermal models used to determine transformer temperatures take into account both types of losses at different rates. Therefore, computation of iron and copper losses separately can give important advantageous to existing thermal model. It is thus, in this work, a new method that provides to compute losses by using real time data of transformer is given. The method uses voltages and currents of both sides of single-phase transformer. Mathematical equations of the method have been developed considering T-equivalent circuit of transformer. Here, mathematical background of the method is given firstly. Then, examination results of the method that carried out either by simulations in Matlab/Simulink and by experiments on a 5 kVA transformer are given. The results show that losses can be obtained very precisely by the suggested method. Being computations valid even under harmonic conditions and done by real time data are two important advantageous of the method.

Keywords: Transformer, Copper Losses, Iron Losses, Transformer Monitoring, Thermal Model.

I. GİRİŞ

Transformatörler artan elektrik enerjisi talebinin karşılanması adına eskisine oranla daha fazla gücü taşımak zorunda kalmaktadırlar. Bu durum transformatör kayıplarının artmasına da neden olmaktadır. Kayıpların artışına neden olan bir başka önemli faktör gerilimin ve akımın dalga biçiminde meydana gelen bozulmalardır. Transformatörler esasen anma geriliminde, anma frekansında ve sinüzoidal dalga biçimleri ile çalışacak şekilde tasarlanır. Fakat güç elektroniği tabanlı devreleri içeren cihazların son yıllarda daha sık kullanımı nedeniyle hem yük akımlarında hem de şebeke gerilimlerinde meydana gelen bozulmalarda artış gözlenmektedir [1]. Bu durum transformatör kayıplarının beklenenin üstünde gerçekleşmesine neden olmaktadır. Transformatör kayıplarının artışı iç sıcaklıklarının artışı anlamına da geldiğinden dolayı yüklenebilme sınırlarının azalmasına neden olur. Ayrıca, kayıpların artışı enerji gereksiniminin de artışına neden olduğundan azaltılması önemli bir ekonomik gerekliliktir. Avrupa birliğinin enerji verilerine göre dağıtım transformatörlerinin 1 yıllık enerji kaybı 38 TWh civarında olup bunun yaklaşık 5 TWh kadarı reaktif güç ve harmonik bileşenlerden kaynaklanmaktadır [2]. Bu rakam bile transformatör kayıplarının hem tasarım hem de gerçek işletme şartlarında göz önüne alınmasının ve izlenmesinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koyar.

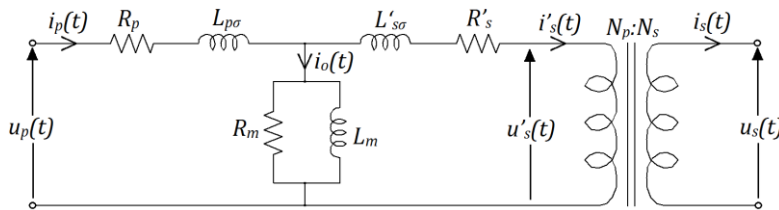
Genel olarak transformatörlerin iç yapısında ortaya çıkan güç kayıpları demir kayıpları (boşta çalışma kayıpları veya çekirdek kayıpları) ve bakır kayıpları (yükte çalışma kayıpları veya yük kayıpları) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Demir kayıpları gerilim değerinin karesi ile doğru orantılı iken bakır kayıplarının sargı akımının karesi ile doğru orantılı olarak değiştiği kabul edilir [3]. Fakat bu teorik çıkarımın yanında kayıpların miktarını etkileyen başka değişkenler de bulunmaktadır. Sargı ve çekirdek sıcaklığı, harmonik bileşenler ve sargı tipi bu değişkenlere örnek olarak verilebilir. İlginç bir biçimde, sargı sıcaklığındaki artış sargı direncinin de yükselmesi nedeniyle kayıpların artışına neden olurken kayıpların artışı sargı sıcaklıklarının daha da artmasına neden olur. Neyse ki sıcaklıklarda meydana gelen artış aynı zamanda transformatörün dış ortama daha fazla ısı enerjisi atmasına neden olduğundan bir denge durumuna ulaşılır. Sonuç olarak, bir transformatörün yüklenme sınırlarının sargı

en sıcak nokta sıcaklığına bağlı olduğu [4] düşünülürse kayıplarının aynı zamanda güç taşıma kapasitesine doğrudan etki ettiği sonucuna da varılabilir. Öyle ki bazı önemli transformatör termal modellerindeki sıcaklık hesaplamaları esasen kayıplara dayanır [5, 6]. Söz konusu termal modellerde transformatörlerin demir ve bakır kayıpları hesaplama sonuçlarına farklı oranlarda etki edecek biçimde kullanılır. Fiziksel açıdan bakıldığında transformatörlerin bakır kayıplarının sargı en sıcak nokta sıcaklığına etkisi demir kayıplarına göre daha fazladır. Bu yüzden transformatör kayıpları üzerinden yapılacak termal hesaplamalarda demir ve bakır kayıplarının ayrı ayrı bilinmesi ve kullanılması önemlidir. Bu durum özellikle gerçek zamanlı transformatör sıcaklık izleme sistemlerinin doğruluğu açısından önemlidir.

Pratikte, işletmedeki bir transformatörün toplam kaybı primerinden ve sekonderinden ölçülen güç değerlerinin farkı alınarak kolayca bulunabilmektedir. Fakat ölçülen bu kaybın ne kadarının demir kayıplarına ve ne kadarının bakır kayıplarına ait olduğunu doğrudan hesaplayabilecek bir yöntem bulunmamaktadır. Söz konusu kayıpları ayrı ayrı elde etmek için mevcut olan bazı ölçüm yöntemleri [7-9] transformatörün bağlı olduğu sistemden ayrılmasını gerektirirken bazıları da [10-12] çok sayıda transformatör parametresi kullandığından güvenilir değildir. Bazı ölçüm yöntemleri [13, 14] ise çok sayıda donanım gerektirdiğinden ekonomik bir çözüm sunmamaktadır.

Bu çalışmada tek fazlı transformatörlerin demir ve bakır kayıplarının gerçek zamanlı ölçümünü mümkün kılan yeni bir yöntem ortaya konulmuştur. Yöntem transformatörlerin her iki tarafına ait akım ve gerilim değerlerini kullanmakta ve her iki kayıp türünü doğru bir biçimde hesaplamaktadır. Gerçek zamanlı hesaplama uygun olmasının yanında harmonikli gerilim ve/veya akımlar altında da hesaplamaların doğru olması yeni yöntemin önemli avantajlarıdır. Yöntemin matematiksel çıkarımı ve teorik açıklaması bir sonraki bölümde verilmiştir. Makalenin sonunda verilmiş olan benzetim çalışmaları ve laboratuvar ortamında yapılmış olan deneysel çalışmalar ile yöntemin geçerliliği açık bir biçimde ortaya konulmuştur. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında yapılırken deneysel çalışmalar için bir 5 kVA gücüne sahip transformatör kullanılmıştır.

II. YÖNTEM



Şekil 1. Tek fazlı transformatörlerin T eşdeğer devresi

Tek fazlı transformatörlerin Şekil 1'de verilmiş olan T eşdeğer devresini göz önüne alalım. Bu eşdeğer devredeki R_p ve R'_s sırasıyla primerin ve primere indirgenmiş sekonder tarafının eşdeğer sargı dirençlerini gösterirken $L_{p\sigma}$ ve $L'_{s\sigma}$ ise sırasıyla primerin ve primere indirgenmiş sekonder tarafının eşdeğer kaçak inüktanslarını gösterir. R_m ve L_m ise sırasıyla çekirdek kayıplarına karşı düşen direnci ve mıknatıslanma inüktansını gösterir. Aynı devrede görünen $u_p(t)$, $i_p(t)$, $u_s(t)$ ve $i_s(t)$ gerilim ve akımları sırasıyla primer ve sekonder tarafı akımları olup gerçek zamanlı çalışmada bu büyüklükler

ölçülebilir büyüklüklerdir. Bu yüzden bu çalışmada bu değerler kullanılarak transformatörlerin demir ve bakır kayıplarının hesaplanması amaçlanmıştır.

Transformatörün primer ve sekonder tarafı gerilim ve akımlarının bir T_s örnekleme periyodu ile eş zamanlı bir biçimde örneklendiğini düşünelim. Bu örnekleme sonucunda her bir temel periyot sonunda gerilimlere ve akımlara ait N -tane örnekleme değeri (1)-(4) eşitliklerinde verildiği biçimde elde edilecektir.

$$u_p = [U_p^0, U_p^1, \dots, U_p^{N-1}] \quad (1)$$

$$i_p = [I_p^0, I_p^1, \dots, I_p^{N-1}] \quad (2)$$

$$u_s = [U_s^0, U_s^1, \dots, U_s^{N-1}] \quad (3)$$

$$i_s = [I_s^0, I_s^1, \dots, I_s^{N-1}] \quad (4)$$

Bu değerlerden sekonder tarafına ait olanlar (5) ve (6) eşitlikleri yardımıyla primer tarafına indirgenerek primere indirgenmiş sekonder tarafı gerilim ve akım değerleri (u'_s ve i'_s) elde edilir.

$$u'_s = u_s \cdot \ddot{u} = [\ddot{u} \cdot U_s^0, \ddot{u} \cdot U_s^1, \dots, \ddot{u} \cdot U_s^{N-1}] \quad (5)$$

$$i'_s = i_s / \ddot{u} = \left[\frac{I_s^0}{\ddot{u}}, \frac{I_s^1}{\ddot{u}}, \dots, \frac{I_s^{N-1}}{\ddot{u}} \right] \quad (6)$$

Son eşitliklerdeki \ddot{u} değeri transformatörün çevirme oranı olup primer sarım sayısının (n_p) sekonder sarım sayısına (n_s) oranına eşittir.

$$\ddot{u} = \frac{n_p}{n_s} \quad (7)$$

Şekil 1'deki eşdeğer devre tekrar göz önüne alınacak olursa sargıda meydana gelen bakır kayıplarının hesabı için kullanılması gereken gerilim olan sargı üzerindeki gerilim düşümü ($u_{winding}$) primer ile sekonder gerilimleri arasındaki farka eşit olacaktır:

$$u_{winding} = u_p - u'_s = [U_p^0 - \ddot{u} \cdot U_s^0, U_p^1 - \ddot{u} \cdot U_s^1, \dots, U_p^{N-1} - \ddot{u} \cdot U_s^{N-1}] \quad (8)$$

Sargılarda meydana gelen bakır kayıplarının hesabında kullanılması gereken sargı akımı ($i_{winding}$) olarak primer ve primere indirgenmiş sekonder tarafı akımlarının ortalaması kullanılabilir:

$$i_{winding} = \frac{i_p + i'_s}{2} = \left[\frac{I_p^0}{2} + \frac{I_s^0}{2\ddot{u}}, \frac{I_p^1}{2} + \frac{I_s^1}{2\ddot{u}}, \dots, \frac{I_p^{N-1}}{2} + \frac{I_s^{N-1}}{2\ddot{u}} \right] \quad (9)$$

Şekil 1'deki eşdeğer devreye göre transformatörün çekirdeğinde ortaya çıkan demir kayıplarının hesabı için kullanılması gereken gerilim (u_{core}) primer ve primere indirgenmiş sekonder tarafı gerilimlerinin ortalaması alınarak elde edilebilir.

$$u_{core} = \frac{u_p + u'_s}{2} = \left[\frac{U_p^0 + \ddot{u} \cdot U_s^0}{2}, \frac{U_p^1 + \ddot{u} \cdot U_s^1}{2}, \dots, \frac{U_p^{N-1} + \ddot{u} \cdot U_s^{N-1}}{2} \right] \quad (10)$$

Yine Şekil 1'deki eşdeğer devreye göre transformatörün demir kayıplarının hesabı için kullanılması gereken akım (i_{core}) primer akımından primere indirgenmiş sekonder tarafı akımı çıkarılarak elde edilebilir.

$$i_{core} = i_p - i'_s = \left[I_p^0 - \frac{I_s^0}{\ddot{u}}, I_p^1 - \frac{I_s^1}{\ddot{u}}, \dots, I_p^{N-1} - \frac{I_s^{N-1}}{\ddot{u}} \right] \quad (11)$$

Transformatörün bakır kayıpları (P_{CU}), gücün tanımı da kullanılarak, sargılar üzerinde kaybolan gerilimler ile sargılar üzerinden akan akımların anlık değerlerinin çarpımlarının ortalaması alınarak elde edilir.

$$P_{CU} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_{winding}(k) \cdot i_{winding}(k)] \quad (12)$$

Transformatörün çekirdek kayıpları (P_{FE}) ise primer ve primere indirgenmiş sekonder gerilimlerinin ortalaması ile çekirdek akımlarının anlık değerlerinin çarpımlarının ortalaması ile elde edilir.

$$P_{FE} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_{core}(k) \cdot i_{core}(k)] \quad (13)$$

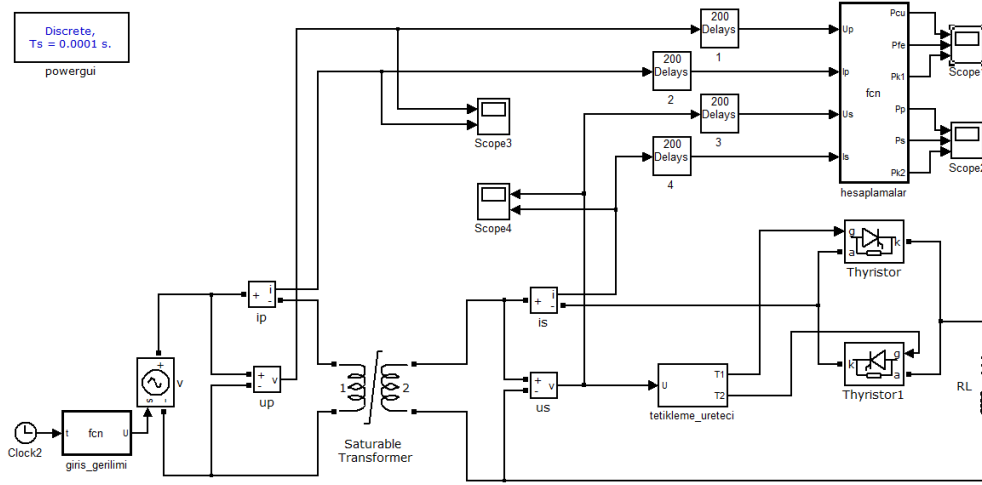
(12) ve (13) eşitlikleri transformatörün temel frekans bileşeni dışında kalan harmonik bileşenlerin neden olduğu kayıpları da içermektedir.

III. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Önerilen yöntem Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetimler ile incelenmiştir. Benzetimlerde bir R-L yükünü tristörlü alternatif gerilim kırpıcısı üzerinden besleyen bir transformatör kullanılmıştır. Kullanılan transformatör modeli doğrusal olmayan (BH karakteristiği modellenmiş) transformatör modelidir. R-L yükünün parametreleri sırasıyla $R=2 \Omega$ ve $L=3 \text{ mH}$ olarak seçilmiştir. Benzetimi yapılan sistemde örnekleme periyodu $T_s = 0,0001 \text{ s}$ olarak seçilmiştir. Bu yüzden 50 Hz frekansa sahip bu sistemde her bir periyot başına örnek sayısı

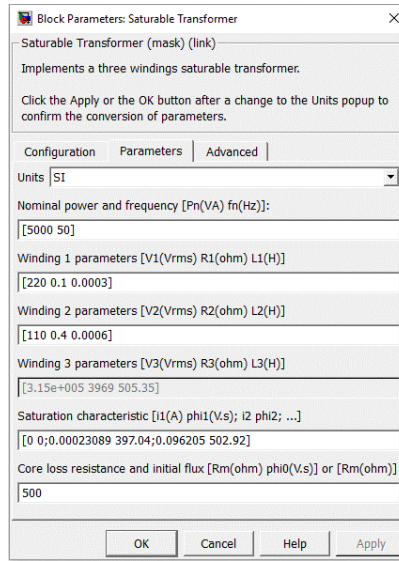
$$N = \frac{T}{T_s} = \frac{1}{T_s f} = 200 \quad (14)$$

olarak bulunur. Şekil 2’de Matlab/Simulink ortamında modellenen bu sistemin benzetim dosyasının görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Benzetimde kullanılan sistemin Matlab/Simulink modeli

Burada kullanılan doymalı Transformatörün Matlab/Simulink ortamında girilen anma parametreleri ise Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Benzetim çalışmalarında kullanılan doymalı transformatörün anma değerleri

Benzetim çalışmaları kaynak geriliminin ve yük akımının hem saf sinüzoidal hem de harmonikli durumları kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu gerilimlerin zamana bağlı eşitlikleri (15) ve (16) eşitliklerinde verilmiştir.

$$u_1(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) \quad (15)$$

$$u_2(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) + 40 \sin(500\pi t) + 10 \sin(700\pi t) \quad (16)$$

Her iki gerilim aynı temel frekans bileşenine sahip olup harmonikli durumda gerilimin içeriğinde 5. ve 7. harmonik bileşenler de bulunmaktadır. Yük akımı ise sistemde yer alan tristörlerin tetikleme açıları (α) üzerinden değiştirilmiştir. Benzetimler gerilimin her iki durumu için tetikleme açılarının sırasıyla $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ değerlerine ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir.

Benzetimin her bir adımında transformatörün demir ve bakır kayıpları önerilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin hesapladığı toplam transformatör kayıpları (P_{k1}) her iki kayıp gücün toplamı ile bulunmuştur.

$$P_{k1} = P_{FE} + P_{CU} \quad (17)$$

Ayrıca, hesaplamaların doğruluğunu test etmek amacıyla transformatörün primer ve sekonder tarafı güçleri (P_p ve P_s) arasındaki fark kullanılarak toplam transformatör kayıpları (P_{k2}) klasik kayıp güç hesaplama yöntemi ile bulunmuştur. Bu amaçla kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$P_p = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_p(k) \cdot i_p(k)] \quad (18)$$

$$P_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_s(k) \cdot i_s(k)] \quad (19)$$

$$P_{k2} = P_p - P_s \quad (20)$$

Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de toplu olarak verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında önerilen yöntem ile hesaplanan kayıp güçlerin klasik yöntemle hesaplanan kayıp güçlerle aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar yöntemin toplamda güçleri oldukça doğru hesapladığını göstermektedir. Öyle ki önerilen yöntem ile hesaplanan demir ve bakır kayıplarının toplamından elde edilen kayıplar klasik yöntem kullanılarak elde edilen kayıplar ile mükemmel bir biçimde uyuşmaktadır. (Söz konusu değerler aynı tabloda koyu renkle gösterilmiştir.) Bu da önerilen yöntemin doğruluğuna işaret etmektedir. Ayrıca, sonuçların harmonikli gerilim ve/veya akım durumlarında da uyuşması önerilen yöntemin harmonikli koşullarda bile doğru hesaplamalar yaptığını göstermektedir.

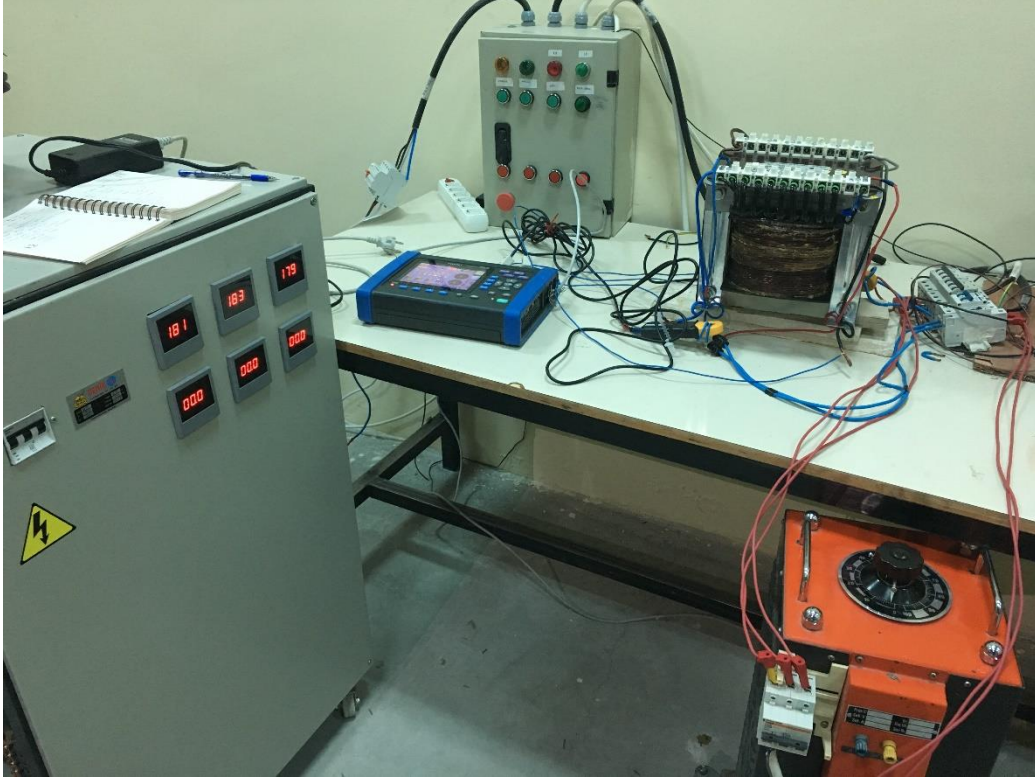
Tablo 1. Benzetim çalışmalarının sonuçları

	α ($^\circ$)	Önerilen yöntem			Giriş-çıkış güçleri ve fark		
		P_{CU} (W)	P_{FE} (W)	P_{k1} (W)	P_p (W)	P_s (W)	P_{k2} (W)
Saf sinüzoidal gerilim	0	712,5	87,2	799,7	4141,9	3342,2	799,7
	45	620,9	87,9	708,8	3620,6	2911,8	708,8
	90	286,2	91,6	377,8	1720,2	1342,4	377,8
	135	28,7	95,8	124,5	259,9	135,4	124,5
Harmonikli gerilim	0	714,7	88,7	803,4	4155,9	3352,5	803,4
	45	622,0	89,4	711,4	3627,5	2916,1	711,4
	90	286,8	93,1	379,9	1724,9	1345,0	379,9
	135	36,8	97,2	134,0	307,1	173,1	134,0

Burada şunu da belirtmekte fayda vardır: Harmonikli durumda transformatörün toplam kayıplarında yaklaşık birkaç watt'lık bir artış olduğu görülmektedir. Bu da gerilimin 3. ve 5. harmoniklerinin neden olduğu kayıplardır. Söz konusu gerilim harmoniklerinin genlikleri sırasıyla 40 V ve 10 V gibi küçük değerler olup bu bileşenlerin neden olduğu kayıplar da oldukça küçük olmuştur.

IV. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için 5 kVA gücüne sahip bir tek fazlı transformatör kullanılmıştır. Bu transformatörün diğer anma değerleri ise $U_p/U_s=380V/220V$, $I_p/I_s=13,2A/22,7A$ ve $n_p/n_s=150/90$ biçimindedir. İki farklı bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ilk bölümünde transformatöre ikişer farklı gerilim ve akım değerlerinde boşa çalışma, kısa devre çalışma ve yükte çalışma testleri uygulanmıştır. Sonrasında ise testlerde ölçülen değerler kullanılarak güç değerleri hesaplanmış ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların ikinci bölümü ise transformatöre bir tristör tetiklemeli AA kıyıcısı üzerinden beslenen bir direnç yükünün farklı akım değerleri ile yapılan deneylerden oluşmaktadır. Kullanılan deney düzeneğinin bir görünümü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel çalışmalarda kullanılan düzeneğin bir görünümü

Boşa çalışma testleri transformatörün sekonder tarafı boşa iken primerine anma gerilimi uygulanarak yapılmıştır. Her bir test esnasında primer tarafı gerilimi (u_p) ve akımı (i_{p0}) bir güç kalitesi analizörü (Hioki PW3198 marka ve modelinde) yardımıyla $T_s = 0,00005 s$ örnekleme periyodu ile 10 temel periyot boyunca örneklendirilmiştir. Boşa çalışma testlerinin sonunda transformatörün boşa çalışma kayıplarının (P_0) hesabı için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_p(k) \cdot i_{p0}(k)] \quad (21)$$

Benzer şekilde transformatöre kısa devre testleri de uygulanmıştır. Bu testler transformatörün sekonder tarafı uçları kısa devre edilerek ve primerden istenilen değerlerde akımlar akacak şekilde bir gerilim uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Burada primere uygulanan gerilim bir oto-trafo (varyak) kullanılarak ayarlanmıştır. Test esnasında primer tarafı gerilimi (u_{pk}) ve akımı (i_{pk}) yine güç kalitesi analizörü yardımıyla 10 temel periyot boyunca örneklenerek kaydedilmiştir. Burada da ölçülen değerler yardımıyla transformatörün kısa devre çalışma kayıpları (P_{kd}) hesaplanmıştır. Bunun için kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$P_{kd} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [u_{pk}(k) \cdot i_{pk}(k)] \quad (22)$$

Yine aynı transformatöre boşa ve kısa devre çalışma testlerinde kullanılan gerilim ve akım değerleri yükte çalışma testinde de uygulanarak iki farklı yükte çalışma testi yapılmıştır. Her bir yükte çalışma testi esnasında primer ve sekonder taraftan örneklenen gerilim ve akım değerleri önerilen yöntemde kullanılarak transformatörün demir ve bakır kayıpları hesaplanmıştır. Pratikte, boşa çalışma kayıplarının demir kayıplarına ve kısa devre çalışma kayıplarının da bakır kayıplarına eşit olduğu varsayılır. Bu varsayım göz önüne alınarak transformatörün boşa ve kısa devre çalışma deneyleri ile elde edilen kayıplarının önerilen yöntem ile elde edilen kayıplar ile ne derecede uyduğunun incelenmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar özet olarak Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Boşa, kısa devre ve yükte çalışma testlerinin sonuçları

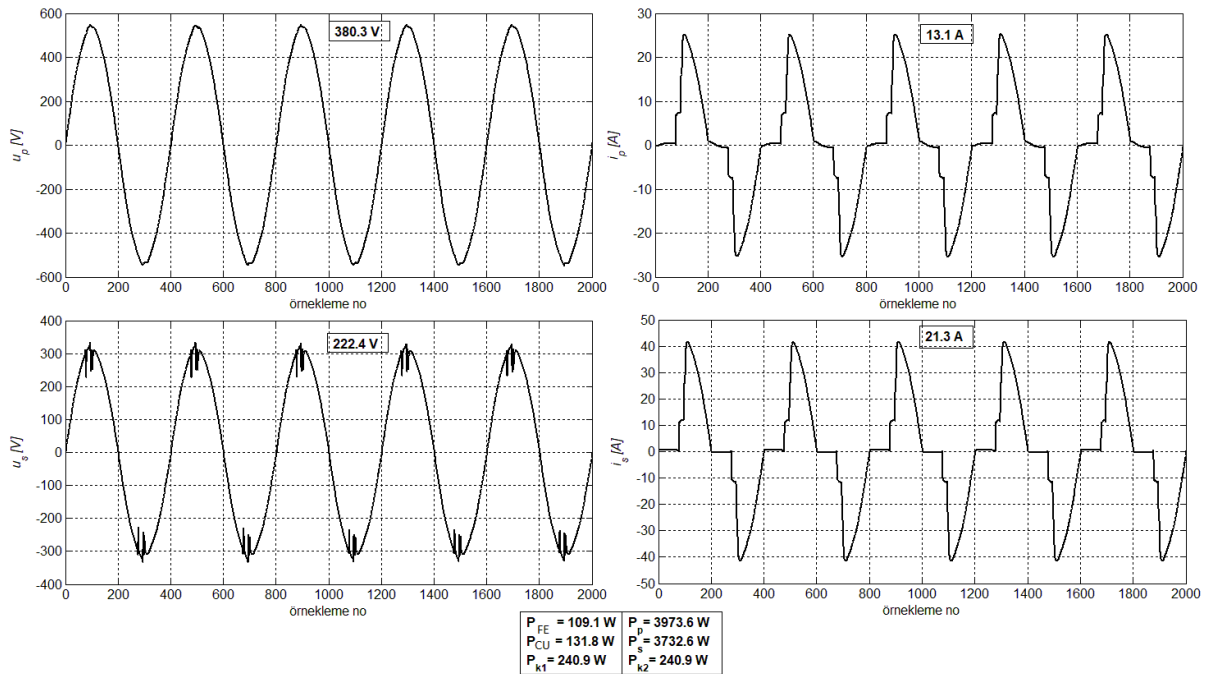
Deney	Deney no	U_p (V)	I_p (A)	U_s (V)	I_s (A)	P_0 (W)	P_{kd} (W)	P_{FE} (W)	P_{CU} (W)
Boşa çalışma testi	a1	380,2	0,4	380,1	0,0	106,9	-	-	-
Kısa devre çalışma testi	a2	9,0	10,8	0,0	10,8	-	64,9	-	-
Yükte çalışma testleri	a3	380,2	10,8	374,4	10,5	-	-	104,9	61,6
Boşa çalışma testi	b1	300,4	0,3	300,3	0,0	69,2	-	-	-
Kısa devre çalışma testi	b2	5,9	7,1	0,0	7,1	-	27,7	-	-
Yükte çalışma testleri	b3	300,4	7,1	296,6	6,9	-	-	68,5	26,4

Bir transformatörün herhangi bir gerilimdeki demir kayıpları boşa çalışma testi ile ölçülebilir. Benzer şekilde bir transformatörün herhangi bir akımdaki bakır kayıpları kısa devre testi yardımıyla ölçülebilir. Bu yüzden bir transformatörün herhangi bir gerilim ve akımda yapılan yükte çalışma testindeki demir ve bakır kayıpları aynı gerilim ve akım değerleri ile yapılan boşa ve kısa devre testleri ile de ölçülebilir. Burada, bu eşdeğerlilik önerilen yöntemin geçerliliğini incelemek amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 2’de a1, a2 ve a3 sırasıyla aynı gerilim ve akım değerlerinde yapılan boşa, kısa devre ve yükte çalışma testlerini göstermektedir. Benzer biçimde b1, b2 ve b3 deneyleri de sırasıyla aynı gerilim ve akım değerlerinde yapılan boşa, kısa devre ve yükte çalışma testlerini ifade etmektedir. Tabloda verilmiş olan yükte çalışma testinin demir ve bakır kayıpları önerilen yöntem ile hesaplanmıştır. Boşa ve kısa devre testlerinin kayıp güçleri ise (21) ve (22) eşitlikleri yardımıyla hesaplanmıştır. İlk

gruptaki testlere bakıldığında a1 ve a2 testlerinden elde edilen P_0 ve P_{kd} güçlerinin a3 testinden elde edilen P_{FE} ve P_{CU} güçlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Aradaki çok küçük farkın (birkaç watt civarında) yükte çalışma durumunda sargılardaki gerilim düşümünün daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer durum ikinci grup test sonuçlarında da görülmektedir. Bu sonuçlar önerilen yöntemin geçerliliğini açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

DeneySEL çalışmaların ikinci bölümünde transformatörün sekonder tarafında yer alan tristör tetiklemeli alternatif gerilim kısıcısının tetikleme açısı değiştirilerek kısıcıcı çıkışındaki yükün farklı değerlerde harmonikli akımlar çekmesi sağlanmıştır. Böylece harmonikli koşullar altında transformatör sargılarından çeşitli değerlerde akımlar geçmesi sağlanmıştır. Yapılan bu deneylerin sonunda güç kalitesi analizörü yardımıyla ölçülen değerler hem önerilen yöntem hem de klasik yöntem kullanılarak transformatörün kayıp güçleri hesaplanmıştır. Böylece önerilen yöntemin harmonikli koşullar altında toplam kayıp gücü doğru hesaplayıp hesaplayamadığı incelenmiştir. Aşağıda, bir örnek olarak, transformatörden ölçülen gerilim ve akımların dalga biçimleri ile hesaplanan değerler Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Harmonikli yükün ölçülen dalga biçimleri ve hesaplanan değerler

Dalga biçimleri Şekil 5'te verilmiş olan transformatörün sekonder tarafı geriliminin ve akımının THD (Total Harmonic Distortion, Toplam Harmonik Bozulma) değerleri sırasıyla %5,5 ve %47,7 olarak hesaplanmıştır. Harmonik bozulmanın bu kadar yüksek olduğu dalga biçimlerine karşın önerilen yöntem ile hesaplanan toplam kayıplar klasik kayıp hesaplama yöntemi ile aynı olmuştur. Toplam kayıpların doğru elde edilmesi demir ve bakır kayıplarının da doğru hesaplanabildiğine işaret etmektedir.

Aynı deney düzeneği kullanılarak harmonikli akımlar ile yapılan diğer ölçümler ve hesaplama sonuçları toplu olarak Tablo 3'te verilmiştir. Bu sonuçlar deneysel çalışmalar ile benzetim çalışmalarında olduğu gibi toplam kayıp gücün neredeyse mükemmel bir biçimde hesaplandığını göstermektedir. Bakır kayıpları beklendiği gibi akımın karesi ile artış göstermiştir. Çekirdek kayıpları ise pratikte gerilime bağlı olup yüksek sargı akımlarında transformatörün ortalama geriliminin

düşmesi nedeniyle hafif bir azalma göstermiştir. Bu sonuçlar önerilen yöntemin harmonikli koşullar altında bile doğru hesaplama yaptığını göstermiştir.

Tablo 3. Çeşitli harmonikli akımlarda ölçülen ve hesaplanan değerler

Etkin değerler				Önerilen yöntem			Giriş-çıkış güçleri ve fark		
U_p	I_p	U_s	I_s	P_{CU}	P_{FE}	P_{k1}	P_p	P_s	P_{k2}
(V)	(A)	(V)	(A)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
389,1	6,6	231,3	10,5	26,2	105,7	131,9	1453,8	1321,9	131,9
376,8	8,1	222,6	13,0	43,8	106,2	150,0	2519,7	2369,7	150,0
373,6	9,6	220,0	15,5	70,0	107,3	177,3	2650,3	2473,0	177,3
374,0	12,4	218,8	20,1	114,8	107,2	222,0	3597,0	3375,0	222,0
370,8	13,1	216,1	21,2	127,4	103,9	231,3	4339,0	4107,7	231,3

V. SONUÇ

Transformatörlerin en sıcak nokta sıcaklıkları yüklenebilme sınırlarını belirleyen en önemli parametredir. Bu sıcaklığın hesabı için kullanılan başlıca termal modellerin hesaplamaları transformatör kayıplarına dayanır. Hesaplamalarda demir ve bakır kayıpları sonuca belli oranlarda etki edecek biçimde ayrı ayrı kullanılır. Bunun en önemli nedeni transformatör en sıcak nokta sıcaklığının bakır kayıplarına daha çok bağlı olmasındandır. Pratikte yük altında çalışan bir transformatörün toplam kayıplarını belirlemek oldukça kolaydır. Öyle ki bu değer transformatörün primer ve sekonder tarafı güçlerinin farkı alınarak bulunabilir. Fakat bu kayıpların ne kadarının demir ne kadarının bakır kayıplarından oluştuğunu hesaplamak için pratik bir yöntem yoktur. Bu yüzden, bu çalışmada tek fazlı transformatörlerin demir ve bakır kayıplarının gerçek zamanlı gerilim ve akım değerleri kullanılarak elde edilmesini sağlayan yeni bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntem transformatörlerin tek-fazlı T-eşdeğer devre modeli göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Yöntem tek-fazlı transformatörlerin bakır ve demir kayıplarının (yük ve çekirdek kayıplarının) hem saf sinüzoidal hem de harmonikli koşullar altında oldukça doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Kayıp değerlerine transformatörün yalnızca her iki taraf gerilim ve akım örneklemeleri ile sarımlar oranı değeri kullanılarak ulaşılmaktadır. Önerilen yöntemin geçerliliği hem Matlab/Simulink ortamında doğrusal olmayan bir transformatör modeli üzerinde yapılan benzetim çalışmaları hem de bir 5 kVA gücüne sahip tek-fazlı transformatör üzerinde yapılmış olan deneysel çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Benzetimler ve deneysel çalışmalar yöntemin hem saf sinüzoidal koşullarda hem de harmonikli koşullarda demir ve bakır kayıplarını birbirinden ayrı olarak hesaplayabildiğini göstermiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] M. Yazdani-Asrami, M. Mirzaie and A. A. S. Akmal, "No-load loss calculation of distribution transformers supplied by non-sinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis," *Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 205-219, 2013.
- [2] T. D. Kefalas and A. G. Kladas, "Harmonic impact on distribution transformer no-load loss," *IEEE Transaction on Industrial Electronic.*, vol. 57, no. 1, pp. 193-200, Jan. 2010.

- [3] S. B. Sadati, A. Tahani, B. Darvishi, M. Dargahi and H. Yousefi, "Comparison of Distribution Transformer Losses and Capacity under Linear and Harmonic Loads," *IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, Johor Bahru, 2008, pp. 1265-1269.
- [4] *Power Transformers Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*, International standard 60076-7, 2005.
- [5] Z. Radakovic, "Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer," *Transaction Electrical Power*, vol. 13, pp. 47-54, 2003.
- [6] *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*, IEEE Standard C 57.91-2011, 7 March 2012.
- [7] Y. Han and Y.-F. Liu, "A practical transformer core loss measurement scheme for high-frequency power converter," *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, vol. 55, no. 2, pp. 941-948, Feb. 2008.
- [8] Y. Han, W. Eberle and Y. F. Liu, "A practical copper loss measurement for the planer transistor in high-frequency switching converters," *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, vol. 54, no. 4, pp. 2276-2287, 2007.
- [9] M. Mu, Q. Li, D. Gilham, F. Lee and K. Ngo, "New core loss measurement method for high frequency magnetic materials," *Energy Conversion Congress and Exposition.*, 2010, pp. 4384-4389.
- [10] J. Reinert, A. Brockmeyer and R. W. De Doncker, "Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 4, pp. 1055-1061, 2001.
- [11] M. Sippola and R. E. Sepponen, "Accurate prediction of high-frequency power-transformer losses and temperature rise," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 5, pp. 835-847, 2002.
- [12] M. S. Hwang, W. M. Grady and H. W. Sanders, "Distribution Transformer Winding Losses Due to Nonsinusoidal Currents," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 7, no. 1, pp. 46-46, 1987.
- [13] E. F. Fuchs, D. Yildirim and T. Batan, "Innovative procedure for measurement of losses of transformers supplying nonsinusoidal loads," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 6, pp. 617-625, Nov. 1999.
- [14] E. F. Fuchs, Dingsheng Lin and J. Martynaitis, "Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 665-672, April 2006.