

# Transformatörlerde Sargı Sıcaklığının Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Cenk GEZEGİN<sup>1</sup>, Hasan DİRİK<sup>2</sup>, Muammer ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Amasya Üniversitesi

cenkgezegin@gmail.com

<sup>2</sup>Meslek Yüksekokulu

Sinop Üniversitesi

hasan\_dirik@hotmail.com

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

ozdemirm@omu.edu.tr

## Özet

*Bu çalışmada, trafo sargı sıcaklığının trafo verimine, kayıplarına, gerçek çevirme oranına ve eşdeğer devre parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. İncelemeler teorik incelemeler ve deneysel çalışmalar üzerinden olmak üzere iki başlık altında yapılmıştır. 1 kVA gücündeki bir trafodan alınan sıcaklık artış verileri bilgisayar ortamında verim, kayıp ve çevirme oranlarının hesabında kullanılmıştır. Ayrıca, iki farklı sıcaklıkta yapılan boşta ve kısa devre deneyleri ile trafonun T eşdeğer devre parametreleri hesaplanmış ve sargı direncindeki artış deneysel olarak gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar üç farklı yük için tekrarlanarak yükün etkisi de ortaya konulmuştur. İnceleme sonuçları sıcaklığın trafo kayıplarına etki eden önemli bir değişken olduğunu göstermiştir. Ayrıca, soğutmanın trafo kayıplarını kayda değer ölçüde azalttığı da gösterilmiştir.*

## Abstract

*In this work, the effects of winding temperature of transformers on transformers' efficiency, losses, real turn ratio and equivalent circuit parameters have been examined. Examinations have been done under two headings over theoretical examinations and experimental works. Temperature rise data that obtained from a transformer rated 1 kVA has been used for the computation of the efficiency, losses and real turn ratio in computer environment. Also, by using the data of no-load and short circuit experiments that have been done at two different temperature, equivalent circuit parameters of transformer have been computed and rise on the winding resistance has been demonstrated experimentally. In order to observe the effect of the load, experimental works have been repeated for three different loads. Results have showed the temperature is an important factor that affects transformer losses. Also, it is shown the transformer cooling can reduce transformer losses remarkably.*

## 1. Giriş

Bütün elektrikli cihaz ve makineler gibi transformatörler de çalışmaları esnasında ısınırlar. Bu ısınmanın temel nedeni cihaz veya makinede oluşan kayıplardır. Sargılarda sıcaklık artışına neden olan transformatör kayıpları genel olarak bakır ve demir kayıpları olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bakır kayıpları, sargılardan akan akımların sargı direnci nedeniyle sargılarda oluşturduğu ısınmalara karşı düşer. Genel olarak bakır kayıpları, kayıpların olduğu sargıya göre primer (birincil) ve sekonder (ikincil) bakır kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Transformatörlerde meydana gelen kayıpların diğer önemli bir kısmı da demir nüvede meydana gelen enerji kayıplarıdır. Demir kayıpları olarak adlandırılan bu kayıplar da oluşma biçimlerinin farklılığına bağlı olarak Eddy ve histerezis kayıpları olmak üzere iki alt gruba ayrılır [1].

Söz konusu kayıplar sargı sıcaklığını arttırmakta ve bununla beraber artan sargı direnci nedeniyle ek kayıpların oluşmasına neden olmaktadır [2]. Bu durum transformatör soğutma sisteminin transformatörün işletme maliyetleri açısından da önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Direnç artışı transformatör sargılarındaki gerilim düşümünü de arttırmakta ve dolayısıyla transformatörün gerçek gerilim çevirme oranını da etkilemektedir. Güç kalitesi açısından bakıldığında, çevirme oranının değişmesi tüketiciye sunulan gerilimin genliğinin kayıplara ve yüke bağlı olarak değişmesi anlamına da gelmektedir. Sargı sıcaklığının sargılarda meydana gelen kayıplar ile ilişkili olmasından ve sargı yalıtımının ömrünün de çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişmesinden dolayı [3, 4] transformatör ömrünün kayıplar ile bağlantılı olarak değişebileceği söylenebilir. Bu açılarından bakıldığında sargı sıcaklığının transformatörlerin kayıplarını, gerçek çevirme oranını ve transformatör ömrünü etkileyen önemli bir parametre olduğu görülür.

Bu çalışmada transformatör sargı sıcaklığının transformatörün çevirme oranına, verimine, kayıplarına ve eşdeğer devre parametrelerine ne oranda ve nasıl bir etkide bulunabileceği

incelenmiştir. İncelemeler, transformatörün eşdeğer devresi göz önüne alınarak ve deneysel çalışmalar yapılarak gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonuçları, sıcaklığın trafo kayıplarına kayda değer oranda etki ettiğini göstermiş ve soğutmanın önemini ortaya koymuştur.

## 2. Teorik İnceleme

Transformatörler, diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi eşdeğer devreler ile temsil edilebilmektedir. Genel olarak, eşdeğer devre ne kadar çok parametreyi barındırıyorsa o oranda makine davranışlarını temsil edebilir. Transformatörler için sıklıkla kullanılan genel eşdeğer devre Şekil 1’de verilmiş olan T eşdeğer devredir. Bu devrede transformatörün mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olduğu varsayılmaktadır.

Bu devrede, doğrudan sekonder tarafı akımı ( $I_s$ ), gerilimi ( $U_s$ ), sargı direnci ve kaçak endüktansı ( $R_s$  ve  $L_s$ ) değerleri yerine bir ideal trafo üzerinden primere indirgenmiş değerleri ( $I_s'$ ,  $U_s'$ ,  $R_s'$  ve  $L_s'$ ) yer almaktadır. İndirgemedeki geçerli eşitlikler,  $N_p$ ,  $N_s$  ve  $r_t$  sırasıyla primer sargı sarım sayısı, sekonder sargı sarım sayısı ve sargı çevirme oranı olmak üzere,

$$r_t = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

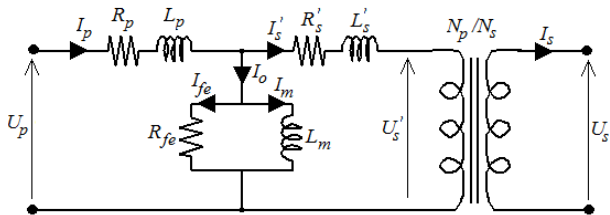
$$U_s'(t) = r_t \cdot U_s(t) \quad (2)$$

$$I_s'(t) = \frac{I_s(t)}{r_t} \quad (3)$$

$$R_s' = \frac{R_s}{r_t^2} \quad (4)$$

$$L_s' = \frac{L_s}{r_t^2} \quad (5)$$

biçimindedir. Aynı eşdeğer devrede demir kayıplarına karşı düşen direnç ve mıknatıslanma endüktansı değerleri sırasıyla  $R_{fe}$  ve  $L_m$  ile gösterilmektedir. Primer tarafı sargı direnci ve kaçak endüktansı ise  $R_p$  ve  $L_p$  ile temsil edilmektedir.



Şekil 1: Transformatörün T eşdeğer devresi

Söz konusu eşdeğer devrede sıcaklığın etkisi göz ardı edilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi normal çalışma esnasında meydana gelecek bakır kayıplarından dolayı sargının sıcaklığında ve direnç değerlerinde artış olur. Sıcaklık değerlerindeki artış bütün sargı boyunca aynı olmayıp sıcaklığın sargının iç ve üst kısımlarında en yüksek değerlerde olması beklenir [5]. Buna karşın sargı direnci bütün sargı boyunca ortalama bir sıcaklık ile temsil edilebilir. İletkeninin cinsi bakır olan bir trafo sargısının  $T_1$  sıcaklığındaki direnci  $R_1$  olarak belirlenmiş veya ölçülmüşse  $T_2$  sıcaklığındaki  $R_2$  direnci

$$R_2 = R_1[1 + 0,0039(T_2 - T_1)] \quad (6)$$

eşitliği ile bulunabilir. Bu eşitliğe göre sargı sıcaklığının  $50^\circ\text{C}$  artışı direnç değerlerinde yaklaşık olarak %20'lik bir artış meydana getirmektedir. Bu da bakır kayıplarının aynı oranda artacağı anlamına gelmektedir.

Normal şartlarda bir trafonun sargı direncinde meydana gelen gerilim düşümü ( $\Delta U$ ) anma geriliminin %1'i ile %3'ü arasında değişmektedir. Oluşan bu gerilim düşümünün direnç artışı nedeniyle daha da artacağı açıktır. Bu gerilim düşümünün Şekil 1’de verilen eşdeğer devreden

$$\Delta U = U_p - U_s' \quad (7)$$

$$\Delta U = I_p(R_p + j\omega L_p) + I_s'(R_s' + j\omega L_s') \quad (8)$$

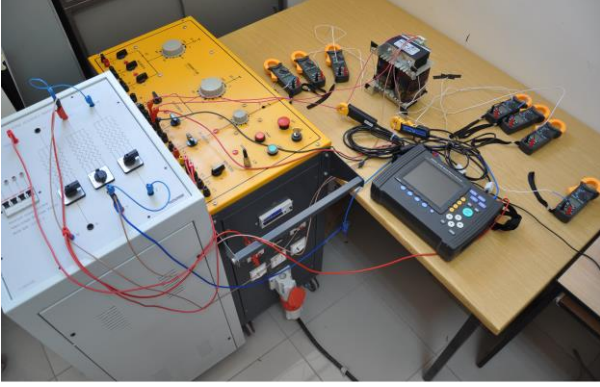
eşitliklerine sahip olduğu görülebilir. Pratikte, kaçak endüktanslardan kaynaklanan gerilim düşümünün sargı dirençlerinden kaynaklanan gerilim düşümüne göre oldukça küçük olduğu göz önüne alınırsa toplam gerilim düşümünün yaklaşık olarak dirençlerden kaynaklanacağını varsayabiliriz.

Eşdeğer devreye göre transformatör kayıplarının bir kısmı da  $R_{fe}$  direncinde meydana gelir. Demir kayıplarını temsil eden bu direncin değerine Eddy ve histerezis kayıpları yaklaşık olarak aynı oranlarda katkı yapar. Histerezis kayıpları sıcaklığa bağlı olmamasına karşın Eddy kayıpları, girdap akımlarının demir nüvede karşılaştığı direncin sıcaklığa bağlı olmasından dolayı sıcaklıkla değişen bir değerdir. Pratikte, trafo nüveleri silisyum alaşımıyla ince saclardan yapılır. Bu, direncin yüksek olmasını ve dolayısıyla Eddy akımlarının ve kayıplarının küçük olmasını sağlamaktadır. Sıcaklık artışı, Eddy akımlarının demir nüvede karşılaştığı direnci daha da arttıracığı için bu akımın azalması beklenir. Yani demir nüvedeki sıcaklık artışı demir kayıplarını azaltıcı yönde etki yapacaktır. Demir kayıpları, yüksek demir direncinden dolayı küçük değerlerde olup bu kayıpların sıcaklık ile değişimi de ihmal edilecek kadar az olacaktır.

Pratikte,  $I_o$  akımı oldukça küçük olup bu akımın sargılardaki gerilim düşümüne ve dolayısıyla gerçek çevirme oranına olan etkisi ihmal edilecek kadar azdır. Bu yüzden sıcaklığa bağlı olarak bu akımdaki değişimin trafo gerçek çevirme oranını değiştirmesi beklenmemektedir.

## 3. Deneysel Çalışmalar

Bu kısımda bir tek fazlı trafo kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar verilmiştir. Deneysel çalışmalar, sargı sıcaklığı ile transformatörün çevirme oranı, verimi, kayıpları ve eşdeğer devre parametreleri arasındaki ilişkinin bulunması amacıyla yapılmıştır. Deneyde kullanılan transformatörün anma gücü ve gerilim değerleri sırasıyla 1kVA ve 380V/220V biçimindedir. Transformatörün primer ve sekonder tarafı sarım sayıları ise 708 ve 420'dir. Deneylerde transformatörün her iki taraf akımları ve gerilimleri 12,8 kHz örnekleme hızıyla çalışan bir güç kalitesi analizörü ile ölçülmüştür. Sıcaklık değerleri ise transformatörün her iki bacakta bulunan sekonder sargılarının alt, orta ve üst noktalarına yerleştirilmiş olan 6 farklı sıcaklık algılayıcısı ile ölçülmüştür.



Şekil 2: Deneysel çalışmada kullanılan düzenek

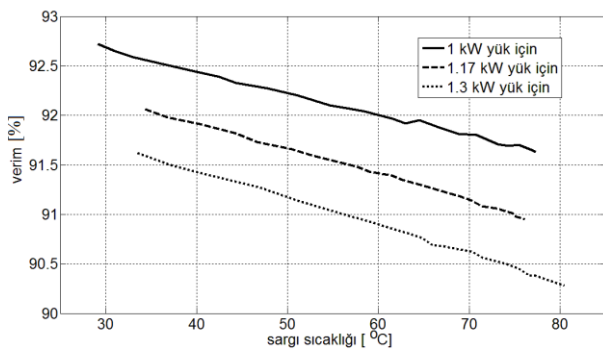
Deneyler yükün de etkisini görebilmek için üç farklı yük için (1 kW, 1,17 kW ve 1,3 kW gücündeki yükler ile yüklenerek) yapılmıştır. Her bir deney, sargıların bulunduğu oda sıcaklığından itibaren ulaştığı en üst değere kadar alınan ölçümlerle yapılmıştır. Deneylerde, başlangıçta oda sıcaklığında olan transformatör sabit yük ile yüklenerek sargı sıcaklığının artışı sağlanmıştır. Sıcaklık artarken, belirli aralıklarla, sargı sıcaklıkları, trafonun primer ve sekonder tarafı akımları ve gerilimleri bir enerji analizörü yardımıyla kaydedilmiştir. Ölçülen anlık değerler bilgisayar ortamına yüklenerek verim, kayıp ve gerçek çevirme oranı değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesabında

$$\%verim = 100 \cdot \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

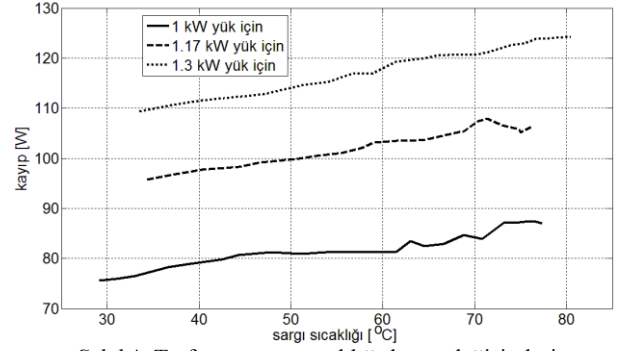
$$kayıp = P_1 - P_2 \quad (10)$$

$$gerçek\_çevirme\_oranı = \frac{U_1}{U_2} \quad (11)$$

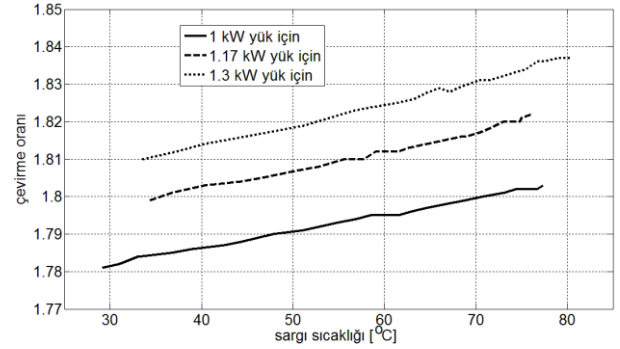
eşitlikleri kullanılmıştır. Şekil 3, 4 ve 5'te deneyler sonucunda elde edilen verilerden hesaplanan sargı sıcaklığı ile transformatör verimi, kayıpları ve gerçek çevirme oranları arasındaki değişimler her üç yük için verilmiştir. Bu değişimlerin yatay eksenini gösteren sıcaklık değerleri, sıcaklık algılayıcıları ile ölçülen değerlerin ortalamasıdır.



Şekil 3: Trafonun sargı sıcaklığı-verim değişimleri



Şekil 4: Trafonun sargı sıcaklığı-kayıp değişimleri



Şekil 5: Trafonun sargı sıcaklığı-çevirme oranı değişimleri

Her üç değişim bize sargı sıcaklığı ile verimler, kayıplar ve gerçek çevirme oranları arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu değişimler sıcaklık artışı ile beraber verimde azalma yönünde olurken kayıplar ve gerçek çevirme oranlarında artış yönünde olmaktadır. Aynı değişimlerden yükün etkisini de görebilmekteyiz. Buna göre, anma değer üzerindeki yük artışı verimin düşmesine neden olurken kayıpların ve gerçek çevirme oranlarının artmasını sağlamaktadır.

Verim değişimleri trafonun bütün yükler için her 10 °C'lik sıcaklık artışında veriminin yaklaşık olarak % 0,4 civarında azaldığını göstermektedir. Bu değişim ciddi bir değer olup sıcaklığın verime ve dolayısıyla kayıplara etki eden önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Örneğin, 100 kVA gücünde bir trafosu göz önüne alalım. Bu trafonun soğutma sistemi sayesinde normalin 20 °C daha düşük sargı sıcaklığında çalıştığını düşünelim. Trafonun aynı sıcaklık-verim değişimine sahip olduğunu varsayarak bir yıllık yaklaşık enerji kazancını hesaplırsak,

$$\Delta E = 2 \cdot 0,004 \cdot 100 \cdot 24 \cdot 365 = 7008 \text{ kWh} \quad (12)$$

elde edilir ki, bu sonuç ciddi bir kazanç işaret etmektedir.

Kayıplar, verimin sıcaklık ile beraber azalmasının doğal bir sonucu olarak artış göstermiştir. Aslında, kayıpların artışı ikinci bölümde de bahsedildiği gibi sabit sargı akımlarında sargı direncinin artışıyla kaynaklanmaktadır. Yük artışı, I<sup>2</sup>R eşitliğine göre kayıpların da artmasına neden olmuştur.

Sıcaklık artışı, sargı dirençlerinde meydana gelen gerilim düşümlerini dirençlerdeki artışa paralel olarak arttırmaktadır. Bu yüzden, sekonder tarafı geriliminde azalma olmuştur. Bu

da, gerçek çevirme oranının (11) eşitliğine göre artışı anlamına gelmekte olup deney sonuçları bunu göstermiştir.

Sıcaklığın trafonun eşdeğer devre parametrelerine olan etkisini görebilmek amacıyla iki farklı sargı sıcaklığında boşa ve kısa devre deneyleri de yapılmıştır. Yapılan deneylerden alınan değerler ile parametreler hesaplanmış ve Çizelge 1'deki değerler bulunmuştur.

Çizelge 1: İki farklı sıcaklıkta trafo parametreleri

sargı sıcaklığı [°C]	$R_p$ [Ω]	$L_p$ [mH]	$R_{fe}$ [Ω]	$L_m$ [H]
31	3,723	1,782	6444	21,01
71	4,444	1,722	6708	21,24

Çizelgedeki değerler sargı direncinin ve demir kayıp direncinin sıcaklık ile beraber arttığını göstermektedir. Bu değişim sargı direncinde yaklaşık olarak %20 oranında olmuştur. Diğer parametrelerdeki değişimler ihmal edilebilecek düzeylerde dir. Bu sonuçlar ikinci bölümde yapılan analizlerin doğruluğunu da göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada trafo sargı sıcaklığının trafo verimine, kayıplarına, gerçek çevirme oranına ve sargı parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. İncelemeler, trafonun T eşdeğer devresi göz önüne alınarak yapılmış ve deneysel sonuçlar ile birlikte yorumlanmıştır.

Deney sonuçları, sıcaklık artışının sargı direncinde meydana getireceği artışa bağlı olarak trafo verimini düşürdüğünü, kayıplarını ve çevirme oranını arttırdığını göstermiştir. Sargı direnci için yapılan deneylerin sonuçları direnç değişimini açık bir şekilde ortaya koymuştur. İnceleme sonuçları soğutmanın trafo kayıplarını azaltmak için önemli bir fırsat sunduğunu da göstermektedir.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Zhu R., Liu Y., Wu X., Zhang L., Ye J. and Zhang Z., "Study of On-Line Detecting System for Capacity and Loss of Distribution Transformer," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 25-28 March 2011, pp.1,4.
- [2] Gour P., Chautre K., Kotwalla A. and Arora T., "Effective Conversion of Transformer Losses into Dissipated Heat", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, volume 2, issue 6, pp. 14-16, December 2012.
- [3] Suechoey, B., Tadsuan, S., Khluabwannarat, P. and Chompoo-inwai, C., "An analysis of total loss and temperature of oil-immersed transformer with short circuit test linear load and non-linear load," *The 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005*, Vol. 2, Nov. 29 2005-Dec. 2 2005, pp.643, 647.
- [4] Kweon D.-J., Koo K.-S., Woo J.-W. and Kwak J.-S., "2A study on the hot spot temperature in 154kV power transformers", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 7, Issue 3, pp. 312-319, 2012.
- [5] Chen L., Zheng Z., Liu S., Guo L. and Dun C., "Temperature prediction on power transformers and the

guide on load dispatch," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 14-17 Oct. 2012, pp.444, 447.