

Güç Transformatörlerinin Isıl Modelenmesi ve Farklı Yükler Altındaki Cevabının İncelenmesi

Yusuf Çilliyüz¹, Yunus Biçen², Faruk Aras³

^{1,3}Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi, 41380 Umuttepe
Kocaeli Üniversitesi

ycilliyuz@kocaeli.edu.tr faruk.aras@kocaeli.edu.tr

² DMYO, Endüstriyel Elektronik, 81010 Uzunmustafa
Düzce Üniversitesi
yunusbicen@duzce.edu.tr

Özet

Yapılan bu çalışmada bir güç transformatörünün yapısal özelliklerine ve işletim şartlarına bağlı olarak ısıl devre modeli oluşturulmuştur. Modelin oluşturulmasında ısı iletimi ile elektrik akımı arasındaki benzerlikten yararlanılmıştır. Örnek bir güç transformatörü için ısıl model kullanılarak yağ üst seviye sıcaklık değerleri belirlenmiş, farklı yük ve zaman aralıkları için güç transformatörünün verdiği ısıl cevaplar incelenmiştir.

Abstract

In this study, simply thermal model of a power transformer is modeled by analogy between heat flow and current flow considering structure properties and operation conditions of the transformer. Top oil temperature and thermal response of the transformer are determined and examined using the thermal model for different loads and time intervals.

1. Giriş

Transformatörler enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin en önemli elemanlarından biridir. Yapısal olarak büyük olmaları, üretim ve tesis edilme durumundaki zorluklar, bunlarla birlikte yaşanabilecek arıza durumlarındaki onarım ve bakım masrafları düşünüldüğünde tesis ve işletim maliyetinin çok yüksek olduğu söylenebilir[1,2]. Bu nedenle güç transformatörlerinin güvenli işletilmesi ve beklenen kullanım ömrünü doldurabilmesi için bakımları periyodik olarak yapılarak bir sistem ile izlenmesi önemlidir[3]. Henüz ülkemizde güç transformatörlerinin izleme ve arızanın teşhis edilmesine dönük çalışmalar ve uygulamaları yeterli seviyede değildir. Bilindiği gibi transformatörlerde yaşlanmayı hızlandıran en önemli etken işletim sıcaklık değeridir. Bu sıcaklık değeri transformatörün yalıtkanının ömrünü etkilemesi nedeniyle %100'lük yük faktörü altında iken standartlara göre ortalama ömrü 20 yıl civarındadır[1,3]. Bu standarttaki değer, ortam sıcaklığının 30°C ve en yüksek sıcaklık noktası 110°C olması koşuluyla sağlanmaktadır. Doğal olarak ortam sıcaklığındaki değişimler ve transformatörün yüklenme durumuna göre değişen işletim sıcaklıkları transformatörün kullanım ömrünü azaltıcı veya artırıcı etkilerde bulunabilmektedir. Daha düşük yük faktörleriyle işletilen transformatörlerde beklenen ömür daha

yüksektir (30–40 yıl). Deneylede maksimum işletim sıcaklığından itibaren yaklaşık her 8°C artışta transformatör ömrünün yarı yarıya azaldığı bildirilmiştir[3]. İşletim sıcaklık seviyelerinin belirlenmesi ve farklı yükler altındaki sıcaklık değerlerinin önceden bilinmesi, güç transformatörleri için yüklenbilirlik analizini gerçekleştirmede önemlidir[3,4]. Oluşturulan bu modeller doğrulukları oranında işletmelere, kurulan güç sisteminin uzun vadede ve güvenilir işletim sıcaklıklarında çalıştırılabilmesini sağlar. Bununla birlikte güç transformatörlerinin farklı işletim durumları için yapılan bazı testler güç transformatörünün ömür kaybına da neden olduğundan tercih edilmemektedir. Modelleme sayesinde sistemden çekilen o anki yüke göre sıcaklık değerleri tespit edilebileceğinden uzun vadede ömür tahminleri de gerçekleştirmek mümkün olabilir. Doğrulukları yüksek modellerin gerçekleştirilmesi aynı zamanda, transformatörlerin tasarlanması ve yüklenbilirlik tahminlerinin yapılmasını güvenli ve ekonomik hale getirdiğinden üreticiler tarafından da tercih edilebilmektedir.

Güç transformatörlerinin güvenli olarak işletilebilmesi ve beklenen kullanım ömrünü doldurabilmesi birçok etkene bağlıdır. Bunlar ;

- Transformatörlerin yapısal, fiziksel ve elektriksel özellikleri
- Gerekli soğutma işlemlerinin yapılması,
- Transformatörlerde kullanılan yalıtkanların fiziksel özelliklerinin uygun olması,
- Transformatörlerin işletim koşulları
- Çevresel koşullar

Diğer yandan, güç transformatörlerinin işletiminde meydana gelen ısının atılmasında soğutma sistemlerinin önemi açıktır. Bu nedenle mevcut soğutma sistemlerinin işlevselliği belirlenerek, aşırı yüklemeler gibi geçici durumlar için ek soğutma sistemlerinin kullanılması transformatörün yüklenbilirliği açısından oldukça önemlidir.

2. Isıl Devre Modelin Oluşturulması

Bilindiği üzere, çevresel faktörlerin dışında, güç transformatörlerindeki ısı oluşumu, iletkenlerden geçen akım

veya metal malzemeler üzerindeki eddy ve histerisis kayıpları ile meydana gelmektedir[5,6]. Oluşan bu ısının büyük bölümü transformatörün iç kısmında kalan iletkenlerde meydana gelmektedir[2]. Üretilen ısının mümkün olduğunca çabuk sistemden dışarıya atılması gereklidir. Bunun için ısı akışına bir engel (ısı direnç) oluşturacak tesis şartlarından ve tasarımlardan kaçınılmalıdır. Bu amaçla oluşturulan ısı modellerinden yararlanılabilmektedir. Literatürde, farklı matematiksel ve benzetişim modelleri kullanılmaktadır. Burada elektriksel benzetimden yararlanarak yağ üst seviye sıcaklığı devre modeli oluşturulmuştur. Kullanılan modelde her bir transformatör bileşeni elektriksel bir parametre ile ifade edilmektedir. Kaynak olarak sargılardaki iletkenler ve üzerinde diğer kayıpların oluştuğu tüm metal aksamlarda oluşan ısı enerjisi kabul edilirken, ısı geçişine engel olan dirençler olarak da transformatör yağı başta olmak üzere tank ve tank yüzeyindeki diğer bileşenler sayılabilir. Bu malzemelerin ısı direnç özelliklerinin yanında ısı kapasite özellikleri de vardır[6,7]. Bileşenlerin ısı kapasite özellikleri ancak yüklerin değişken olduğu geçici durumlarda devre modelinde dikkate alınmaktadır.

2.1. Elektrik - Isıl Benzetimi

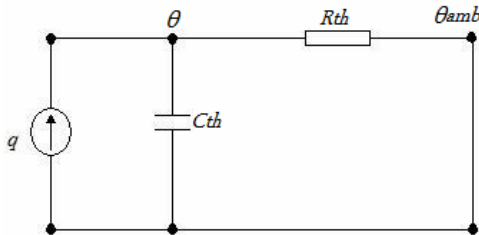
Bu benzetimde ısı transferi fonksiyonunun iki önemli parametresi olan, malzemeye ait ısı kapasite ve ısı direnç parametrelerinin bilinmesi veya hesaplanması gerekmektedir.

Elektriksel direnç ve kapasiteye ait akım gerilim denklemleri eşitlik (1) de görülmektedir. Bu ifadelerde gerilim, sıcaklığa, akım da ısı enerjisine benzetilerek Şekil 1' deki ısı devre elde edilerek, eşitlik (2) yazılabilir[4].

$$v = R_{el} \cdot i \quad i = C_{el} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$\theta = R_{th} \cdot q \quad q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

Eşitliklerdeki ifadeler Tablo - 1'de tanımlanmaktadır ve ısı- elektrik devre modeli bu benzetim esas alınarak oluşturulmaktadır.



Şekil-1: Isıl Elektriksel Devre Modeli

Tablo-1: Isıl Benzetim

Isıl		Elektriksel	
Üretilen Isı	q	Akım	i
Sıcaklık	θ	Gerilim	V
Isıl Direnç	R_{th}	Direnç	R_{el}
Isıl Kapasite	C_{th}	Kapasite	C_{el}

Dinamik bir modelde zamana göre değişen ısı enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir[4].

$$q \cdot dt = C_{th} \cdot d\theta + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \cdot dt \quad (3)$$

Burada; q üretilen ısı enerjisi, C_{th} ısı kapasite, θ sıcaklık, R_{th} ısı direnç, θ_{amb} ortam sıcaklığı olarak ifade edilmektedir.

$$q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \quad (4)$$

Isıl kapasiteler, malzemelerin cinsi ve kütlesi ile doğrudan ilişkili olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır[3,7].

$$C = c_p \cdot \rho \cdot v \quad (5)$$

Bu formüle c_p ; malzemenin özgül ısı kapasitesi olup $c_p=1.8(\text{kJ/kg.K})$ yağ için, $c_p= 0.5(\text{kJ/kg.K})$ nüve veya sargı gibi metal aksamlar için alınan özgül ısı kapasite değerleridir[7], ρ ; malzemenin yoğunluğu, v ise malzemenin hacmi olarak ifade edilmektedir. Sıvı ve katı bileşenler için aynı formül geçerlidir. Her parametreye ait ısı kapasite, ısı dirençten önce devrede paralel olarak yerleştirilmektedir. Modeldeki ısı kapasite üzerindeki düğüm noktası o malzemenin üst nokta sıcaklık değerini göstermektedir.

Bu çalışmada seçilen örnek güç transformatörüne ait bileşenlerin değerleri Tablo-2 gösterilmiştir[8]. Modelde kullanılacak parametreler, tablodaki ilgili değerlerle hesaplanmıştır.

Tablo-2: Örnek güç transformatörünün kütle ve tam yük işletim güç kayıpları değerleri

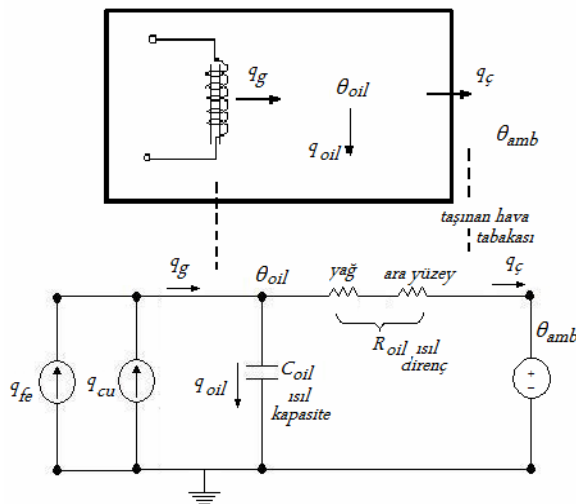
S=250 MVA			
Kayıp Güçler			
Sargıdaki(DC)Kayıp	Eddy kaybı	Kaçak Kayıplar	
P_w (W)	P_E (W)	P_S (W)	
411780	29469	43391	
Kütleler			
Sargı	Nüve	Tank ve Bağlantı	Yağ
m_{wdn} (kg)	m_{fe} (kg)	$m_{mp}=M_{Tank}$ (kg)	$m_{oil}=M_{Fluid}$ (kg)
29181	99389	39760	73887

Tablo-3: 250 MVA Transformatörün üç farklı durum için zamana bağlı yüklenme durumu

Durum 1		Durum 2		Durum 3	
Zaman (dk)	Yük faktörü	Zaman (dk)	Yük faktörü	Zaman (dk)	Yük faktörü
0-120	1	0-120	0,5	0-300	1
120-240	1	120-240	0,25		
240-360	1	240-360	0,30	300-480	1,2
360-480	1	360-480	0,35	480 - 492	4
480-600	1	480-600	0,50		
600-720	1	600-720	0,60	492-780	0,7
720-840	1	720-840	0,55	780-1080	1,2
840-960	1	840-960	0,60		
960-1080	1	960-1080	0,60	1080-1260	1,2
1080-1200	1	1080-1200	0,55		
1200-1320	1	1200-1320	0,65	1260-1440	1,5
1320-1440	1	1320-1440	0,7		

Tablo - 3'de görüldüğü gibi transformatör, üç farklı şekilde yüklenerek analiz edilmiştir. Durum 1'de bir günlük süre içerisinde sabit yük altında yüklenmiştir. Durum 2'de aynı süre içerisinde ikişer saatlik periyotlar halinde değişken yük faktörleri uygulanmıştır. Durum 3'de değişken zaman dilimleri içinde farklı yük faktörleri uygulanmış olup 480 ile 492 dakikalar arasında yük faktörü 4 katına çıkarılmıştır.

Transformatörün eşdeğer ısı devresi Şekil-2'deki gibi gösterilebilir. Burada verilen ısı modelde ısı-elektriksel benzetim ve ısı transfer teorisine bağlı parametreler; q_g toplam kayıp, q_{fe} yüksüzken oluşan ısı, q_{cu} yüklü durumda iken oluşan ısı, C_{th-oil} yağın ısı kapasitesi, θ_{oil} yağ üst seviye sıcaklığı, θ_{amb} ortam sıcaklığı şeklinde tanımlanmaktadır.

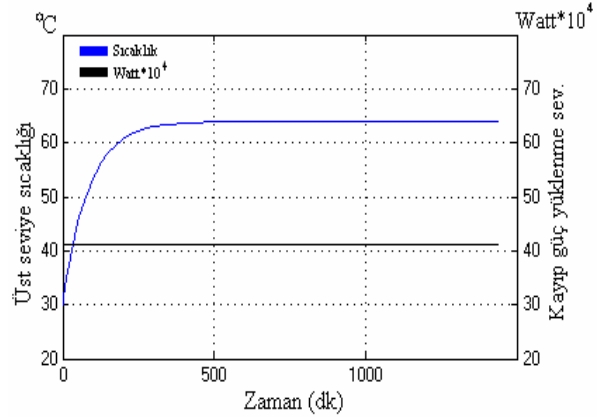


Şekil-2 Nüve ve sargıdan havaya ısı transferi

3. Isıl Modelin Farklı Yükler Altındaki Geçici Durum Isıl Cevapları

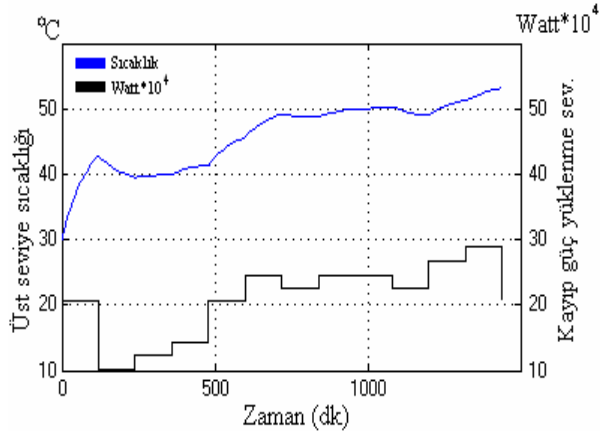
Güç transformatörünün ısı modeli Matlab-Simulink içerisinde oluşturularak, farklı yük faktörleri ve farklı zaman aralıkları için yağ üst seviye sıcaklığı değişimi Tablo - 3'deki koşullara göre incelenmektedir.

Transformatörün dışındaki ortamın sıcaklık değeri 30°C olarak alınmıştır. Simülasyonda her bir uygulama, (t=0 anından başlayarak) güç transformatörünün ilk defa devreye alınma durumu için gerçekleştirilmektedir.



Şekil-3: Sürekli hal çalışma durumu

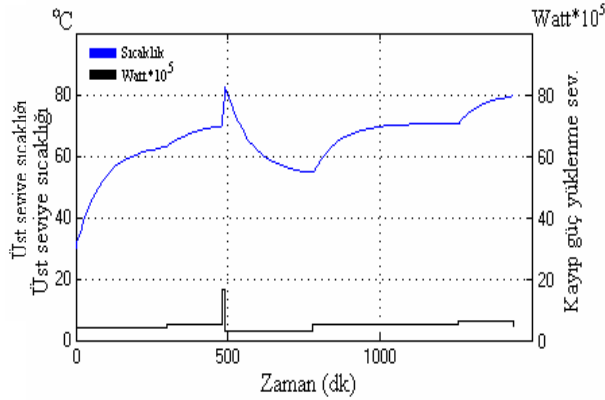
Şekil 3'de Durum 1 için, sürekli ve sabit tam yük altında transformatör yağ üst seviye sıcaklığının değişimi gösterilmektedir. Bu değişim incelendiğinde yaklaşık olarak 350-500 dakika arasında transformatörün kararlı bir sıcaklık seviyesine ulaştığı görülmektedir. Hava sıcaklığı veya yüklenme durumunda herhangi bir değişiklik olmadığı sürece bu sıcaklık değeri değişmemektedir.



Şekil-4: Günlük yük faktörüne bağlı çalışma durumu

Şekil-4'te, Durum 2 için verilen günlük yük faktörlerine uygun olarak güç transformatörünün yağ üst seviye sıcaklık seviyesi değişimi gösterilmektedir. 30 °C 'den başlayan

sıcaklık değeri yüklenme durumuna göre değişmektedir. Değişim incelendiğinde tepkiselliğin yavaş seyrettiği görülmektedir.



Şekil-5 Değişken ve aşırı yüklerde çalışma durumu

Durum 3 için, Şekil-5'te farklı zaman periyotları ve farklı yüklenme durumları için transformatörün ısıl cevabı gösterilmektedir. Burada güç transformatörün 480-492. dakikalar arasında yük faktörü 4 kat artırıldığında yağ üst seviye sıcaklığındaki değişim görülebilir. Dikkat edilirse transformatörün aşırı yüklenme sırasında aldığı ısı enerjisini aynı sürede sistemden dışarıya atamadığı görülmektedir. Bu ise kısa süreli olarak 10 ila 30dk'lık süre içerisinde büyük yük değişimlerinin olduğu transformatörlerde sıcaklığın daha fazla artmasına neden olabilmektedir. Bu durum transformatörün yaşlanmasını hızlandırmaktadır.

4. Sonuç

Bu makalede verilen ısıl model kullanılarak çeşitli işletim koşulları için elde edilecek ısıl cevaplar ile transformatörün yüklenebilirlik analizleri yapılabilir. Modelin geliştirilerek parametrelerinin güncellenmesi ve gerçeğe yakın bir model oluşturulması ile farklı katmanların sıcaklıklarının daha doğru olarak belirlenmesi mümkün olacaktır. Bu durum, özellikle işletmede olan transformatörler için önemli bir katkı sağlayacaktır. Buna ek olarak geliştirilecek izleme ve teşhis sistemleri ile de transformatörlerin daha uzun süreyle güvenilir olarak işletilmesi mümkün hale gelecektir.

5. Kaynaklar

- [1] Hunt, R., Giordano, M. L., "Thermal Overload Protection of Power Transformers – Operating Theory and Practical Experience", *59. Annual Protective Relaying Conference, Georgia Tech, Atlanta, Georgia*, 2005, 1 – 32.
- [2] Kömürgöz, G., Güzelbeyoğlu, N., "Kendi Kendine Soğuyan Kuru Tip Güç Transformatörlerinde Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi", *itüdergisi/d mühendislik*, Cilt 1, Sayı 1, 2002.

- [3] Raymond, T. C., "Power Transformer Thermal Ratings – An Overview", *IEEE Transmission & Distribution Conference – Dallas, Texas*, 2003, 1017 – 10021.
- [4] Swift, G., Molinski, T. S., Lehn, W., "A Fundamental Approach to Transformer thermal Modeling – Part I: Theory and Equivalent Circuit", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt 16, No.2, 171 – 175, 2001.
- [5] Susa, D., Lehtonen, M., Nordman, H., "Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt 20, No. 1, 197 – 204, 2005.
- [6] Susa, D., "Dynamic Thermal Modeling of Power Transformers: Further Development – Part II", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt 21, No. 4, 1971 – 1980, 2006.
- [7] Tang, W. H., Wu, Q. H., Richardson, Z. J., "A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal – Electric Analogy", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt 19, No 3, 1112 – 1119, 2004.
- [8] Susa, S., "Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers", *Doctoral Issertation Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering*, Finlandiya, 2005.