

Güç Transformatörlerinde Yağ ve Sargı Sıcaklık Modellerinin İncelenmesi

Investigation of Oil and Winding Temperature Models of Power Transformers

Engin Yiğit¹, Canbolat Uçak²,

¹Elektrik Bölümü
İstanbul Arel Üniversitesi
enginyigit@arel.edu.tr

²Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Yeditepe Üniversitesi
canbolat@yeditepe.edu.tr

Özet

Elektrik gücünün kalitesi ve kesintisiz temini, tüketici memnuniyeti ve elektrik sisteminin güvenilirliği açısından önemli bir çalışma konusudur. Gerçekleşen uzun süreli elektrik kesintileri sonucunda termostat kontrollü yükler nedeniyle, dağıtım sisteminin yeniden enerjilendirilmesi sırasında normal güç gereksiniminden daha fazlasına ihtiyaç duyulabilir. Bu durum transformatörlerin aşırı yüklenmesine neden olabilir. Aşırı yük problemlerinin en aza indirilebilmesi ve dağıtım sisteminin yeniden enerjilendirilmesinin etkili gerçekleşmesi, transformatörlerin yüklenme sınırlarının belirlenmesine bağlıdır. Bu nedenle işletme şartlarına bağlı olarak transformatörlere ait dinamik sıcaklık modellerinin çıkarılması ve farklı yük ve zaman aralıkları için transformatörün sıcaklık değişimlerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada güç transformatörlerinin, IEEE Annex G ve ısı eşdeğer devre modelleri kullanılarak, farklı yüklenme şartlarında yağ ve sargı sıcaklıkları incelenmiş ve modeller arasındaki farklılıklara değinilmiştir.

Abstract

The quality of electrical power and serves continuity of electricity is a significant research area for consumer satisfaction and for the reliability of electric system. The prolonged outages of the electricity grid may cause increased power demand during distribution system restoration because of thermostatically control loads. This situation may lead to overloading of the power transformers. Minimization of overload problems and effective restoration of distribution system depend on the determination of power transformer loading limits. Therefore, derivations of dynamic temperature models based on operation conditions and temperature variations should be known for different loadings and time intervals. In this study, top oil and hottest-spot temperatures of power transformers are examined by using IEEE Annex G model and equivalent heat circuit model for different loading conditions, and differences between these models are stated.

1. Giriş

Elektrik enerjisinin üretim santrallerinden son tüketiciye kadar verimli bir şekilde ulaştırılabilmesi için, elektriğin yüksek gerilim seviyelerine arttırılıp, yeniden gerekli olan gerilim düzeylerine düşürülmesi gerekir. İhtiyaç duyulan gerilim

seviyelerini ayarlamamızı sağlayan güç transformatörleri elektrik iletim ve dağıtım sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Bu nedenle, enerjinin son tüketiciye ulaştırılması konusu, güç transformatörlerinin çalışma performansı ve işletimi ile doğrudan ilgilidir. Güç transformatörlerinin çalışma performansını ve buna paralel olarak ömrünü etkileyen en önemli unsur işletme sıcaklık değerleridir. Çevresel faktörler, işletme koşulları, transformatörün yapısal özellikleri ve soğutma tipi işletme sıcaklık değerlerini belirleyen temel faktörlerdir. Farklı yüklenme periyodlarına bağlı olarak yağlı tip transformatörlere ait maksimum sıcaklık limitleri standartlarda belirlenmiştir [1], [2]. Sıcaklık limitleri transformatöre ait üst yağ sıcaklığı ve sargı en sıcak nokta (ESN) sıcaklıkları için belirtilmiştir. İşletme şartlarında yağ ve sargı ESN sıcaklık değerlerini tahmin etmek amacıyla uygulanan belirli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki fiber optik sıcaklık sensörlerin transformatör sargılarına monte edilmesi ile yapılan sargı ve yağ sıcaklık ölçümleridir. Termal sensör kullanımı sıcaklık değerleri hakkında en doğru sonuçları vermesine rağmen mevcut işletme şartları altındaki transformatörler için bu yöntem oldukça maliyetlidir. Transformatörün üst yağ sıcaklığı ve sargı ESN sıcaklıklarının belirlenmesinin bir diğer yöntemi ise standartlar tarafından önerilen dinamik ısı modelleridir [1], [2]. Bu modeller üretici firmalar ve kullanıcılar tarafından yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, bazıları sıcaklık değişimi ile birlikte trafo yağının fiziksel yapısındaki değişimi ve çevre sıcaklık değişimini göz önüne almayan modellerdir. Ancak literatürde ısı ve kütle transferi denklemlerinden yararlanarak transformatörün fiziksel parametrelerindeki değişimi göz önüne alan transformatöre ait ısı eşdeğer devre modelleri önerilmiştir [3], [4], [5]. Bu çalışmada IEEE C57.91-2011 standardında yer alan Annex G modeli ile D. Susa tarafından önerilen ısı eşdeğer devre modeli karşılaştırılmıştır [1], [4]. IEEE Annex G modeli detayları Referans [1]'de verildiğinden burada anlatılmayacaktır.

2. Isı eşdeğer devre modeli

Transformatör kayıpları boşa çalışma (nüve) ve yükte çalışma (sargı) kayıpları olarak başlıca iki gruba ayrılır [6]. Boşa çalışma kayıpları, transformatör nüvesinin ferromanyetik özelliğinden kaynaklanan histerisiz kayıpları ve manyetik alanın nüvede ortaya çıkardığı girdap akım kayıpları olarak tanımlanır. Yükte çalışma kayıpları ise akım geçen sargılarda

meydana gelen bakır veya sargı kayıpları ve zamanla değişen manyetik alanlar nedeni ile ortaya çıkan stray kayıpları olarak tanımlanır [7]. Meydana gelen bu kayıplar işletme şartları altındaki bir transformatörde oluşan ısının ana kaynağıdır. Nüve ve sargılarda oluşan ısı öncelikle yalıtım ve soğutma görevi gören yağa aktarılır, yağa aktarılan ısı soğutma ekipmanları vasıtası ile çevreye aktarılabilir soğutma işlemi sağlanır. Transformatörde oluşan ısının çevreye aktarılması işlemi, ısı transfer temellerine bağlı olarak gerçekleşen dinamik bir süreçtir. Dinamik olarak gerçekleşen ısınma ve soğuma süreçlerinde transformatör yağının fiziksel parametrelerinde değişimler meydana gelir. Özellikle yağ viskozite değeri transformatördeki sıcaklık artışlarını doğrudan etkiler. İncelenen ısı eşdeğer devre modeli, ısı ve elektriksel büyüklükler arasındaki benzetimden yararlanarak, üst yağ ve sargı ESN sıcaklıkları için viskozite etkilerini dikkate alan direnç ve kapasiteden oluşmaktadır [4].

2.1. Elektrik devre benzetimi

Isı, sıcaklık farkı bulunan sistemler arasında ortaya çıkan enerjinin bir formu olarak tanımlanır [8]. Isı transferi ise sıcaklık farkı bulunan sistemler (ortamlar) arasındaki meydana gelen enerji aktarımı olayıdır. Enerji aktarımı iletim, taşınım ve ışıyım yolu ile gerçekleşebilir [9]. Termodinamiğin ve akışkanlar mekaniğinin bir konusu olan ısı transferi *Fourier* denklemleri ile aşağıdaki gibi tanımlanır [5], [3].

$$\Delta\theta = R_{th}q \quad (1)$$

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

$\Delta\theta$ sıcaklık farkını (K), q ısı enerjisini (W), R_{th} sıcaklık farkının bulunduğu ortamın ısıl direncini (K/W) ve C_{th} ısı kapasiteyi (Ws/K) tanımlar. Benzer şekilde, bir direnç elemanının uçlarındaki elektriksel potansiyel fark ve elektriksel akım ifadesi *Ohm* kanunu uyarınca aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\Delta v = R_e i \quad (3)$$

$$i = C_e \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

Δv direnç uçlarındaki potansiyel farkı (V), R_e elektriksel direnci (Ω), i elektrik akımı (A) ve C_e ise elektriksel kapasite (F) olarak temsil edilir. Sıcaklık farkı ve potansiyel fark için verilen denklemler incelendiğinde, her iki denklemde bulunan ifadeler için benzetim yapılabilir. Sıcaklık farkı elektriksel potansiyel farka, ısı enerjisi ise elektrik akımına benzetilerek ısıl-elektrik benzetimi sağlanır [5]. Isıl ve elektriksel büyüklüklere ait temel benzetim Çizelge 1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 1: Isıl elektrik benzetim

Isıl Büyüklükler	Elektriksel Büyüklükler
Akım, i , Amper	Isı, q , Watt
Gerilim, v , Volt	Sıcaklık, θ , Kelvin
Elektriksel Direnç, R_e , Ohm	Isıl Direnç, R_{th} , (K/W)
Elektriksel Kapasite, C_e , Farad	Isıl Kapasite, C_{th} , (Wh/K)

Çizelge 1’de bulunan ısıl direnç ifadesi malzemenin ısı aktarımına karşı gösterdiği zorluğu ifade eder, ısıl kapasite

ifadesi ise malzemenin ısı depolayabilme yeteneğidir [4]. Isıl direnç ısı aktarım çeşidine bağlı olarak farklı şekilde tanımlanır. Isı aktarım yolu iletim yolu ile gerçekleşiyor ise, ısıl direnç aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_i = \frac{\Delta\theta}{q} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

Isı aktarım yolu taşınım ile gerçekleşiyor ise, ısıl direnç ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$R_t = \frac{\Delta\theta}{q} = \frac{1}{hA} \quad (6)$$

Direnç denklemlerinde bulunan L ısı aktarımının gerçekleştiği yüzey uzunluğu (m), A ısı aktarımının gerçekleştiği yüzey alanı (m^2), k ısı iletim katsayısı ve h ısı taşınım katsayısı olarak verilir [8]. Transformatör sargılarında üretilen ısı, sargılar arasında iletim yolu ile aktarılır, ancak sargılardan yağa ısı aktarımı taşınım yolu ile gerçekleşir [3]. Isının yağa aktarılması ile birlikte yağın sıcaklığında artış meydana gelir. Sıcaklık artışı transformatör yağının fiziksel parametrelerinde değişimlere neden olur. Bu değişimler yağın hem ısıl kapasitesini hem de ısıl direncini etkiler. Fiziksel parametrelerden viskozite, sıcaklık değişiminden en çok etkilenen yağ parametresidir [4], [6]. Ayrıca, transformatörün sahip olduğu soğutma çeşidi transformatör yağının sirkülasyon hızını ve soğutma gücünü belirler. Bu nedenle transformatörün soğutma çeşidi yağın hem ısıl kapasitesini hem de ısıl direncini etkileyen bir diğer faktördür.

İncelenen ısı eşdeğer devre modeli transformatör yağının viskozite değişimini göz önüne alır ve viskozite değişimine bağlı doğrusal olmayan ısıl direnç tanımı yapar [4], [10]. Transformatör sargılarında üretilen ısının yağa aktarımı taşınım yolu ile gerçekleştiği için ısıl direnç ifadesindeki ısı taşınım katsayısı h sabit bir değer değildir. Isı taşınım katsayısı soğutma çeşidine ve viskozite değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır [4].

$$h = C_1 \left(\frac{\Delta\theta}{\mu} \right)^n \quad (7)$$

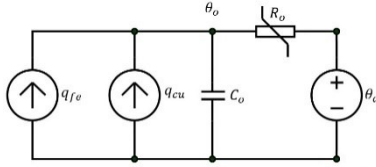
Denklemde C_1 viskozite haricindeki yağın tüm fiziksel parametrelerini içerir ve sabit değer olarak kabul edilir, μ yağ viskozitesi, $\Delta\theta$ yağ ile çevre arasındaki sıcaklık farkı ve n deneysel olarak elde edilen yağın sirkülasyon çeşidine göre belirlenen üstel sabittir [4], [6]. Denklem 7’de yer alan viskozite aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [1], [6].

$$\mu = (1.3573 \times 10^{-6}) e^{\left(\frac{2797.3}{\theta_o + 273} \right)} \quad (8)$$

Denklem 8’de θ_o yağ sıcaklığını temsil eder. İncelenen model, toplam kapasite yöntemi kabulü ile transformatöre ait ısı eşdeğer devreleri önerir [3], [4]. Bu yöntemle göre soğuk bir sıvı içerisinde bulunan sıcak katı bir cismin sıcaklığı, soğuma süresince homojen kabul edilir. Sıcak katı cisimden ısının dağılımı, katı cismin ısı iletim katsayısı k ve cismin yüzeyi ile sıvı arasındaki yüzey ısı taşınım katsayısı h ’ye bağlıdır. Ancak bu yöntemin kabulü için yüzey taşınım direncinin cismin iç iletim direncinden çok daha büyük olması şartı gerekir [11].

2.2. Üst yağ sıcaklık modeli

Transformatörde üst yağ sıcaklığı modeli eşdeğer bir elektrik devresi ile tanımlanmıştır. Devrede, transformatörde ısı kaynağı olan kayıplar (demir ve bakır kayıpları) ideal akım kaynağı (q_{fe} , q_{cu}), ortam sıcaklığı ideal gerilim kaynağı (θ_a) olarak gösterilir. Ayrıca, yağa ait ısı taşıma kapasitesi elektriksel bir kapasite (C_o) ve yağın ısı iletkenliği ise elektriksel bir direnç (R_o) ile temsil edilir. Devrede θ_o düğümünün değeri üst yağ sıcaklık değerini verir. Eşdeğer devre Şekil 1 ile verilmiştir.



Şekil 1: Üst yağ sıcaklık modeli

Şekil 1'deki devrede θ_o düğümü için düğüm denklemi ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$q_{fe} + q_{cu} = C_o \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{(\theta_o - \theta_a)}{R_o} \quad (9)$$

Elde edilen denklemin transformatörün işletme şartları altındaki yağ sıcaklığını etkileyen parametreler cinsinden yeniden düzenlenmesini gerektirir. Isı transferi ve temel elektrik bağıntıları kullanılarak denklem 9 yeniden düzenlenir ise, denklemin son hali aşağıdaki şekilde ifade edilir [4], [3], [1], [8].

$$\left(\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right) \mu_{pu}^n \Delta \bar{\theta}_o = \bar{\tau}_o \mu_{pu}^n \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{(\theta_o - \theta_a)^{1+n}}{\Delta \bar{\theta}_o^n} \quad (10)$$

Burada R bakır kayıplarının demir kayıplarına oranı, K yük akımının anma yük akımına oranı, μ_{pu} per-unit cinsinden viskozite, $\Delta \bar{\theta}_o$ anma yükte yağ ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, $\bar{\tau}_o$ yağın zaman sabiti, n deneysel olarak elde edilen transformatör soğutma çeşidine göre belirlenen sabit olarak ifade edilir. Çizelge 2 farklı soğutma tipleri için n sabitinin alacağı değerleri göstermektedir.

Denklem 10 transformatörün üst yağ sıcaklığını, viskozite değişimine, yağ zaman sabitine ve transformatörün yüklenme tipine bağlı olarak tahmin edilmesini sağlayan doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemdir.

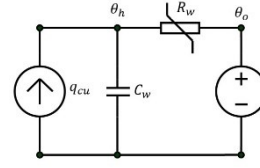
Çizelge 2: Üst yağ sıcaklığı için n değerleri

Başlangıç anı yağ sirkülasyon hızı	n	
	ONAF/OFAF	ONAN
Sirkülasyon hızı=0	0.5	0
Sirkülasyon hızı>0	0.25	

2.3. Sargı en sıcak nokta sıcaklık modeli

Üst yağ sıcaklık modeli için izlenen yaklaşım, sargı ESN sıcaklık modeli içinde geçerlidir. Modele ait ısı eşdeğer devre

Şekil 2 ile gösterilmiştir. Devrede θ_h düğümünün değeri sargı en sıcak nokta sıcaklığını verir.



Şekil 2: Sargı en sıcak nokta sıcaklık modeli

Şekil 2'deki devrede θ_h düğümü için düğüm denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q_{cu} = C_w \frac{d\theta_h}{dt} + \frac{(\theta_h - \theta_o)}{R_w} \quad (11)$$

Burada C_w sargılara ait ısı kapasite, R_w sargılara ait ısı direnç olarak ifade edilir. Denklem 11 transformatörün işletme şartlarına bağlı etkileri içermez. Bu nedenle, denklem ısı transfer ve temel ısı-elektrik benzetim bağıntıları kullanılarak yeniden düzenlenir [1], [4], [3], [8]. Sargı ESN sıcaklığı için elde edilen nihai diferansiyel denklem şu şekilde olur.

$$[K^2 P_{cu,pu}(\theta_h)] \mu_{pu}^m \Delta \bar{\theta}_h = \bar{\tau}_w \mu_{pu}^m \frac{d\theta_h}{dt} + \frac{(\theta_h - \theta_o)^{1+m}}{\Delta \bar{\theta}_h^m} \quad (12)$$

Burada $P_{cu,pu}(\theta_h)$ sargı sıcaklığına bağlı bakır kayıplarını, $\Delta \bar{\theta}_h$ anma yükündeki sargı ile üst yağ arasındaki sıcaklık farkını, $\bar{\tau}_w$ anma yükündeki sargı zaman sabitini, m transformatör soğutma çeşidine göre belirlenen sabit olarak ifade edilir. Elde edilen diferansiyel denklem viskozite değişim etkilerini ve sargılarda sıcaklığa bağlı ortaya çıkan kayıpları göz önüne alan doğrusal olmayan bir ifadedir. m için kullanılan değerler Çizelge 3 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3: sargı ESN sıcaklığı için m değerleri

Başlangıç anı yağ sirkülasyon hızı	m	
	ONAF/OFAF	ONAN
Sirkülasyon hızı=0	2	
Sirkülasyon hızı>0	0.25	

3. Sıcaklık modellerinin karşılaştırılması

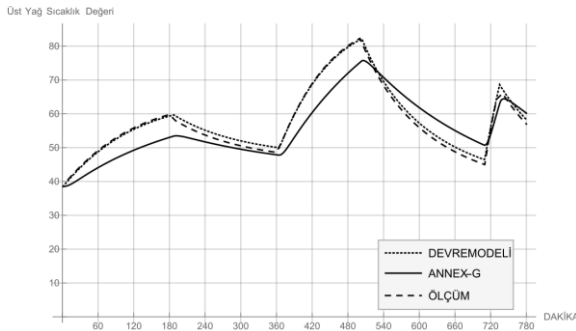
250MVA ONAF soğutmalı güç transformatörü için üst yağ ve sargı ESN sıcaklıkları, *Mathematica* programı kullanılarak, ısı eşdeğer devre modeli için elde edilmiştir. Modele ait diferansiyel denklemler Runge-Kutta numerik yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemle elde edilen sıcaklık değerleri IEEE Annex G modeli ile karşılaştırılmıştır [1], [4]. Analizi yapılan transformatörün gerekli parametreleri ve aynı yüklenme durumunda elde edilen ölçülmüş sıcaklık değerleri Referans [12]'den alınmıştır.

Bu çalışmada yapılan analizlerin Referans [4]'ün elde ettiği sonuçlar ile uyumlu olup olmadığına bakılmıştır. 250MVA ONAF soğutmalı transformatör için uygulanan yük akım aralıkları Çizelge 4 ile verilmiştir [4].

Çizelge 4: Uygulanan yük akımları

Zaman aralığı (dk)	Yük faktörü (pu)
0-187.38	1
187.38-364.86	0.6
364.86-503.4	1.5
503.4- 709.8	0.3
709.8- 735	2.1

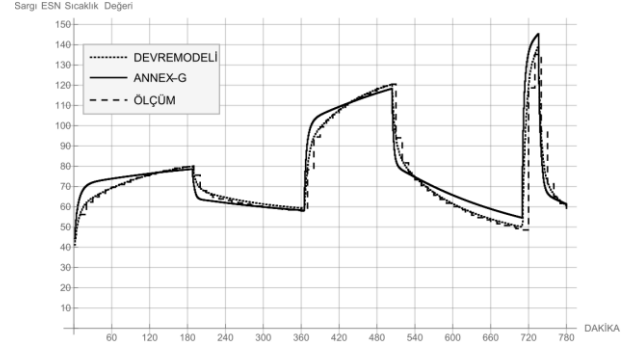
İşletme şartlarından biri olan çevre sıcaklığı hesaplamalar süresince sabit 26 °C olarak kabul edilmiştir. Üst yağ sıcaklık modelinde transformatör demir ve bakır kayıpları, yük faktörü, çevre sıcaklığı ve anma yükünde çevre ile yağ arasındaki sıcaklık farkı ve n değeri sıcaklık hesabı için gerekli sabitlerdir. Üst yağ sıcaklığı için elde edilen grafik Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: Üst yağ sıcaklık grafiği

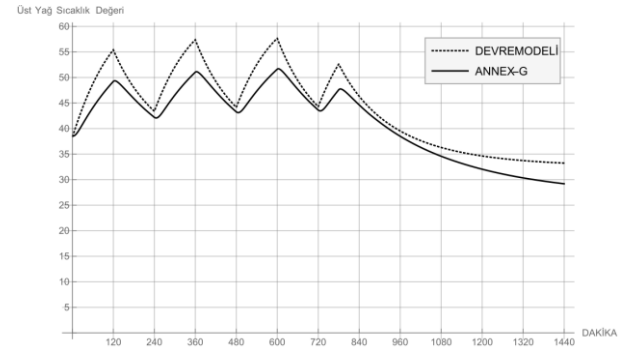
Üst yağ sıcaklık grafiği incelendiğinde transformatör yük akımının arttığı zaman aralıklarında ısı eşdeğer devre modelinin yaklaşık ölçüm değerlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenir. Ancak yük akımının azaldığı zaman aralıklarında (görece olarak soğumanın gerçekleştiği) ısı eşdeğer devre modeli yaklaşık ölçüm değerlerinden farklı olarak daha yüksek sıcaklıklar üretir. Annex G modeli ısınma ve soğuma zaman aralıkları süresince diğer yöntemden farklı değerler üretir. Aynı zamanda üst yağ sıcaklık değişiminin Annex G modelinde daha yavaş gerçekleştiği görülür. Sargı ESN sıcaklığı için elde edilen grafik Şekil 4 ile verilmiştir. Sargı ESN sıcaklık modeli için gerekli olan sabitler üst yağ sıcaklık modeli çıktısı olan yağ sıcaklığı, sargı zaman sabiti, anma yükündeki sargı yağ arasındaki sıcaklık farkı değeri, yük faktörü ve transformatör demir ve bakır kayıpları değerleridir. Şekil 4 incelendiğinde, ısı eşdeğer devre modeli yük akımının arttığı zaman aralıklarında yaklaşık ölçüm değerlerine benzer sonuçlar üretir. Yük akımının azaldığı zaman aralıklarında sıcaklık değerlerinde farklılaşma görülür. IEEE Annex G modeli yük akımı değişiminin gerçekleştiği zaman aralıklarında çok hızlı değişen sıcaklık değerleri ürettiği gözlemlenir.

Sıcaklık modelleri arasındaki farkı daha iyi görebilmek amacıyla transformatör iki saatlik periyotlar ile önce anma yükünde daha sonra boşa olmak üzere üç defa arka arkaya yüklenmiştir. 12 saat yüklenme periyodu ardından bir saat anma yükünde yüklenip transformatörün yükü kaldırılmış ve üst yağ ve sargı ESN sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4: Sargı ESN sıcaklık grafiği

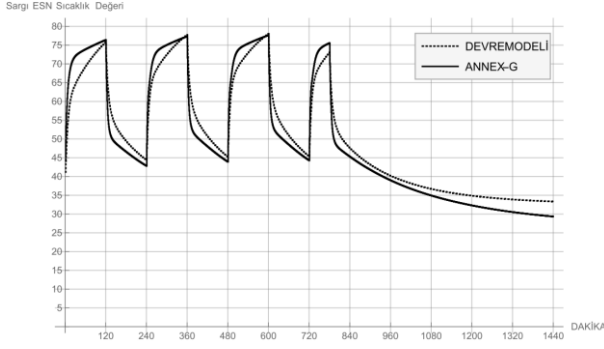
Üst yağ sıcaklık grafiği Şekil 5 ile verilmiştir. Bu analizde ölçüm değerleri bulunmadığından modellerin yapmış olduğu hatalar bilinmemekle birlikte, Şekil 5 kullanılan modeller arasındaki farkı görmek açısından önemlidir.



Şekil 5: Üst yağ sıcaklık grafiği

Üst yağ sıcaklığı incelendiğinde, transformatör anma yükü ile yüklendiği (sıcaklık artışının meydana geldiği) zaman aralıklarında ısı eşdeğer devre modeli ile IEEE Annex G modeli değerleri arasında yaklaşık on derecelik fark gözlemlenir. ısı eşdeğer devre modeli aynı süre içerisinde çok daha hızlı sıcaklık artışına sahiptir. Transformatörün iki saatlik soğuma periyodları incelendiğinde ısı eşdeğer devre modeli yüklenme periyoduna benzer şekilde IEEE Annex G modelinden daha hızlı soğuma grafiğine sahiptir. 13 saatlik süre sonunda, transformatör yükü tamamen kaldırılır ve üst yağ sıcaklığı için uzun süreli bir soğuma eğrisi elde edilir. Bu soğuma süresinde IEEE Annex G modeli ile ısı eşdeğer devre modeli arasında sıcaklık farkı gözlemlenir. Bu fark, sıcaklık düşüşü esnasında azalmasına rağmen, sıcaklık değerlerinin sabit değerlere yaklaştığında artmaya başlar ve yaklaşık beş derecelik bir fark iki model arasında gözlemlenir.

Yağ sıcaklığı grafiğine benzer şekilde sargı ESN sıcaklığı için elde edilen grafik Şekil 6 ile verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, sargı ESN değeri iki model için yaklaşık aynı değerleri verir. Ancak IEEE Annex G modeli yüklenmenin olduğu ilk anlarda hızlı bir artışa sahiptir. Bu hızlı değişim, yük akımının kaldırıldığı iki saatlik zaman aralıklarının ilk anlarında da gözlemlenir.



Şekil 6: Sargı ESN sıcaklık grafiği

Yük akımının tamamen kaldırıldığı soğuma süresi sonunda, üst yağ sıcaklığında gözlemlenen sıcaklık farkı sargı ESN sıcaklığı içinde geçerlidir. IEEE Annex G modeli üst yağ sıcaklığı için ısı eşdeğer devre modeline göre daha yavaş bir değişim gösterirken, sargı ESN sıcaklığı için yük akımının değişiminin gerçekleştiği ilk zaman aralıklarında ısı eşdeğer devre modeline göre daha hızlı bir değişim gösterir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yağ soğutmalı güç transformatörleri için literatürde yer alan ısı eşdeğer devre modeli incelenmiş ve IEEE Annex G modeli ile karşılaştırılmıştır. Belirli yüklenme durumlarında her iki modelin vermiş olduğu sonuçların birbirine yakın olmadığı gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmada 250 MVA transformatör için ısı eşdeğer devre modelinin hem üst yağ hem de sargı ESN sıcaklıkları için IEEE Annex G modelinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ancak, çalışmanın değişik güçlerdeki transformatörler göz önüne alınarak genişletilmesinin, modeller arasındaki farklılıkları çok daha belirgin hale getireceği ve daha sağlıklı değerlendirme yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] IEEE Standards Association, *IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*, vol. 2011, no. March. 2012.
- [2] IEC 60076-7:., “Power Transformers-Part 7 Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers,” *Iec 60076-7 2005*, pp. 60076–7, 2005.
- [3] G. Swift, T. S. Molinski, and W. Lehn, “A fundamental approach to transformer thermal modeling - Part I: Theory and equivalent circuit,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 2, pp. 171–175, 2001.
- [4] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, “Dynamic thermal modelling of power transformers,” *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. 2005.*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, 2005.
- [5] W. H. Tang, Q. H. Wu, and Z. J. Richardson, “Equivalent heat circuit based power transformer thermal model,” *IEE Proc. - Electr.*

- Power Appl.*, vol. 149, no. 2, p. 87, 2002.
- [6] L. W. Pierce, “An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 3, pp. 1347–1358, 1992.
- [7] L. W. Pierce, “Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 633–645, 1996.
- [8] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [9] J. Welty, C. Wicks, R. Wilson, and G. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, heat, and Mass Transfer*, vol. 1. 2008.
- [10] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, “Dynamic thermal modeling of distribution transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 1919–1929, 2005.
- [11] J. P. (Jack P. Holman, *Heat transfer*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [12] H. Nordman, N. Rafsback, and D. Susa, “Temperature responses to step changes in the load current of power transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 4, pp. 1110–1117, 2003.