



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Dağıtım transformatörleri için en sıcak-nokta sıcaklığına dayalı bir ömür sayacının tasarımı ve saha uygulaması

Design and field application of a lifetime metering device for distribution transformers based on hot-spot temperature

Yazar(lar) (Author(s)): Hasan DİRİK¹, Cenk GEZEGİN², Okan ÖZGÖNENEL³, Ali GEYİKOĞLU⁴, İdris SANCAKTAR⁵

ORCID¹: 0000-0003-0625-7213

ORCID²: 0000-0002-4442-904X

ORCID³: 0000-0001-9995-1460

ORCID⁴: 0009-0001-9140-6932

ORCID⁵: 0000-0002-4790-0124

To cite to this article: Dirik H., Gezegin H., Özgönel O., Geyikoğlu A. ve Sancaktar İ., “Dağıtım transformatörleri için en sıcak-nokta sıcaklığına dayalı bir ömür sayacının tasarımı ve saha uygulaması”, *Journal of Polytechnic*, 27(6): 2255-2267, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Dirik H., Gezegin H., Özgönel O., Geyikoğlu A. ve Sancaktar İ., “Dağıtım transformatörleri için en sıcak-nokta sıcaklığına dayalı bir ömür sayacının tasarımı ve saha uygulaması”, *Politeknik Dergisi*, 27(6): 2255-2267, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1308444

Dağıtım Transformatörleri İçin En Sıcak-Nokta Sıcaklığına Dayalı Bir Ömür Sayacının Tasarımı ve Saha Uygulaması

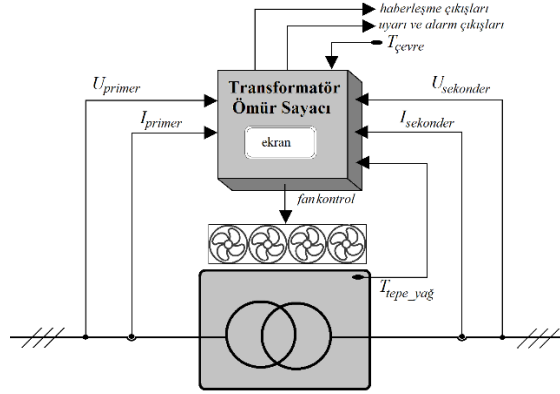
Design and Field Application of a Lifetime Metering Device for Distribution Transformers Based on Hot-Spot Temperature

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Transformatörler için ilk defa bir ömür sayacının tasarımı ve saha uygulaması yapılmıştır./ For the first time, the design and field application of a lifetime metering device has been made for transformers.
- ❖ Tasarlanan cihaz ile transformatörlerin enerji verimli soğutma kontrolünün yapılması sağlanmıştır./ With the designed device, energy efficient cooling control of transformers is provided.
- ❖ Üç-fazlı transformatörlerin en sıcak-nokta sıcaklığının hesaplanması sağlanmıştır./ Calculation of hot-spot temperature of three-phase transformers is provided.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada transformatörler için bir ömür sayacı cihazının tasarımı ve saha uygulaması anlatılmıştır. Cihaz, enerji verimli soğutma kontrolünün yanında kullanıcıya uyarı/alarm işaretleri üretmekte ve çeşitli parametrelerin hem ekrandan hem de uzaktan izlenebilmesini sağlamaktadır. Cihazın genel yapısı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil. Trafo ömür sayacı cihazının genel yapısı /Figure. General structure of transformer lifetime metering device

Amaç (Aim)

Bu çalışmada transformatörler için bir ömür sayacı cihazının tasarlanması amaçlanmıştır./ In this work, it is aimed to design a lifetime metering device for transformers.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Cihaz, transformatörün akım, gerilim, çevre ve tepe yağ sıcaklığını kullanarak yapılan hesaplamalarla sıcaklıkları ve ömür değerini hesaplamaktadır./The device computes the temperatures and lifetime value using transformers' current, voltage, ambient and peak oil temperature.

Özgünlük (Originality)

Yapılan bu çalışmada ilk kez geliştirilen bir transformatör ömür sayacı cihazı sunulmuştur./In this work, a transformer lifetime device that is developed for the first time is presented.

Bulgular (Findings)

Transformatörlerin en-sıcak nokta sıcaklığı üzerinden kalan/kullanılan ömür değerleri izlenebilir./Remaining/used Lifetime values of transformers can be monitored over the hot-spot temperature.

Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma sonucunda Transformatör en sıcak-nokta sıcaklığı üzerinden ömür değerini hesaplayan bir cihazın tasarımı yapılmıştır./As a result of this study, a device that calculates the lifetime value of transformer over hot-pot temperature has been designed.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Dağıtım Transformatörleri İçin En Sıcak Nokta-Sıcaklığına Dayalı Bir Ömür Sayacının Tasarımı Ve Saha Uygulaması

Araştırma Makalesi / Research Article

Hasan DİRİK^{1*}, Cenk GEZEGİN², Okan ÖZGÖNEL², Ali GEYİKOĞLU³, İdris SANCAKTAR²

¹Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sinop Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye

³Akıllı Şebekeler ve AR-GE Müdürlüğü, Aras Elektrik Dağıtım AŞ, Türkiye

(Geliş/Received : 01.06.2023 ; Kabul/Accepted : 05.01.2024 ; Erken Görünüm/Early View :20.03.2024)

ÖZ

Genellikle ömürleri 30 yıl civarında olacak şekilde tasarlanan transformatörlerin gerçek ömrünü belirleyen en önemli parametre sargı yalıtımlarının maruz kaldığı aşırı sıcaklıklardır. Sargı yalıtımının maruz kaldığı sıcaklığın kritik sıcaklığı aşması halinde yaşlanma hızı beklenen değerin çok üzerine çıkarken altında yaşlanma çok daha yavaş olmaktadır. Bu yüzden bir transformatörün sargı sıcaklığının doğru bir biçimde izlenebilmesi ile transformatörün yaşlanma hızının ve kalan ömrünün doğru bir biçimde tayin edilebilmesi mümkündür. Bu çalışmada bu bilgilere dayanılarak geliştirilen bir ömür sayacı cihazının tasarımı ve saha uygulaması anlatılmıştır. Tasarımda kullanılan hesaplama yöntemi ilk olarak gerçek zamanlı akım ve gerilim değerleri üzerinden hesaplanan sargı direncini kullanarak ortalama sargı sıcaklığı (OSS) değerini hesaplamaktadır. Sonraki adımda ise OSS ile birlikte transformatörün tepe yağ sıcaklığı (TYS) ve çevre sıcaklığı kullanılarak sargı en sıcak-nokta sıcaklığı (ESNS) bulunmaktadır. Son adımda ise sargı ESNS değeri üzerinden transformatörün yaşlanma hızına ve kullanılan/kalan ömür değerlerine ulaşılmaktadır. Cihaz, aşırı sıcaklığa bağlı olarak kullanıcıya uyarı ve alarm işaretleri de üretebilmekte ve enerji verimli soğutma kontrolü yapabilmektedir. Geliştirilen cihaz ölçtüğü ve hesapladığı verileri üzerinde yer alan bir dokunmatik ekran ile kullanıcıya sunabildiği gibi kablosuz internet bağlantısı üzerinden bir sunucuya da aktarmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, ömür sayacı, en sıcak-nokta sıcaklığı, yalıtım yaşlanması.

Design and Field Application of a Lifetime Metering Device for Distribution Transformers Based on Hot-Spot Temperature

ABSTRACT

Solar air collectors The most important parameter determining real lifetime of transformers, which are generally designed to have a lifespan of around 30 years, is excessive temperatures exposed to winding insulations. If the temperature of winding insulation exceeds the critical temperature, aging rate decreases below the expected value, while it is under the critical temperature the aging becomes much slower. Therefore, by accurately monitoring winding temperature of a transformer, it is possible to accurately determine the aging rate and remaining life. In this study, design and field application of a lifetime metering device that developed based on this information is explained. The calculation method first calculates average winding temperature using winding resistance that is obtained by the real-time currents and voltages. Next, the winding hot-spot temperature is calculated using top oil, ambient and average winding temperature. Last, the aging rate and used/remaining life values of transformer are obtained by winding hot-spot temperature. The device can also generate warning and alarm signals for user depending on excessive temperature, and perform energy efficient cooling control. The developed device can not only present the data to user with a touch screen on it, but also transfer it to a server via wireless internet connection.

Keywords: Transformer, lifetime meter, hot-spot temperature, insulation aging.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri olan transformatörler kritik ve pahalı donanımlardır [1]. Bu yüzden transformatörlerin uzun yıllar boyunca devrede kalarak çalışması istenir. Fakat transformatörlerin elektrik şebekelerindeki kullanım sürelerini sınırlayan pek çok faktör bulunur. Sargıların maruz kaldığı yüksek sıcaklıklar, yağın nem içeriği, darbe gerilimleri, mekanik zorlanmalar ve kısmideşarjlar

transformatör ömrünü belirleyen en önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin izlenmesi amacıyla yapılmış literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Frekans cevabı analizi [2], çözünmüş gaz analizi [3], titreşim analizi [4], doğrudan sıcaklık ölçümü [5] ve yağın kimyasal içerik analizi [6] izlemede kullanılan başlıca yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Her bir yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Frekans cevabı analizi yöntemi transformatörün bağlı olduğu sistemden

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : hdirik@sinop.edu.tr

ayrılmasını gerektirdiğinden gerçek zamanlı transformatör izleme sistemlerine uygulanması mümkün değildir. Çözünmüş gaz ve yağ analizi yöntemleri ilgili transformatörden periyodik olarak numune alınmasını gerektirir. Bu da bu yöntemlerin pratik izleme sistemleri için uygun olmaması sonucunu doğurur. Ayrıca, bu analiz yöntemleri ile elde edilen sonuçlar transformatör sargı yalıtımında oluşan bozulmaları gecikmeli bir biçimde verirler. Titreşimin analizine dayanan yöntemler transformatör sargı yalıtımı hakkında bilgi vermediği gibi ek yöntemlerin beraberce kullanımını gerektirir. Doğrudan sıcaklık izleme transformatör sargılarının en sıcak-noktasına yerleştirilen bir fiber optik sensör aracılığı ile yapılan bir izleme tekniği olup pahalı donanımları gerektirmesi ve mevcutta kullanılan transformatörlere uygulanamaması gibi olumsuzluklara sahiptir. Öte yandan, transformatör sağlığını ve kullanım ömrünü etkileyen en önemli parametre sargılarının maruz kaldığı yüksek sıcaklık değerleridir. Bu yüzden transformatör izlemede kullanılmak üzere kullanımdaki transformatörlere de uygulanabilir, özellikle en-sıcak nokta sıcaklığının elde edilebildiği, pratik, ucuz ve doğru yöntemlere ihtiyaç bulunmaktadır.

Aşırı yüklemeler nedeniyle transformatörlerin içyapılarında oluşan yüksek sıcaklıklar, transformatörlerin beklenenden daha kısa ömürlü olmasına neden olur. Transformatörlerin içyapısındaki sıcaklık artışının temel nedeni yük ve çekirdek kayıpları (bakır ve demir kayıpları olarak da adlandırılır) olarak sınıflandırılan kayıp güçlerdir. Bu kayıplardan yük kayıpları akımın karesi ile değişen ve doğrudan sargıların ısınmasına neden olan bir özelliğe sahiptir [7]. Çekirdek kayıpları ise gerilimin karesi ile orantılı olarak değişen ve soğutucu yağın sıcaklığında artışa neden olan bir kayıp türüdür [8]. Sonuç olarak bu kayıpların neden olduğu aşırı sıcaklık artışları transformatör parçalarında çeşitli ısıl gerilmelere neden olur. Aşırı sıcaklıklardan etkilenen en önemli kısım sargıların yalıtımında kullanılan kâğıttır. Öyle ki, her aşırı sıcaklık artışı yalıtım kâğıdının DP (Degree of Polymerization) değerini düşürerek yalıtım özelliğinin azalmasına neden olur [9,10]. Sıcaklık artışının en fazla olduğu ve dolayısıyla bu etkinin en çok görüldüğü nokta sargı en sıcak-nokta (hot-spot) noktası olarak adlandırılır. Bu noktanın sıcaklığı doğrudan transformatörün ömrünü belirler [11,12].

Transformatörlerin sıcaklık dağılımı kayıp güçlerin yanında ortam sıcaklığı, transformatör geometrisi, sargı yapısı, soğutma tipi gibi birçok yapısal faktör tarafından belirlenir. Bu nedenle, bir transformatörün içindeki termal ilişkiler çok karmaşıktır ve doğru bir model oluşturmak çok zordur. Bu da sıcaklığın ölçümü için daha az parametreye ihtiyaç duyulan basit ve doğru yöntemlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Genel olarak, yalıtım kâğıdı sıcaklığının kritik sıcaklığı aştığı her 6 oC için yaşlanma hızı iki katına çıkar [13]. Sonuç olarak, sargıların yalıtımında kullanılan kâğıdın kimyasal özelliklerinin bozulması transformatörün ömrünün sonuna gelmesinin temel nedeni olarak göz önüne alınır [14]. Bu nedenle bir transformatörün sıcaklık dağılımının

bilinmesi ve en sıcak-nokta sıcaklık değerinin izlenerek güvenli sınırlar içinde tutulması, güç sisteminin güvenilirliği ve transformatörün optimum kullanımı bakımından önemlidir. Transformatörlerin en sıcak-nokta sıcaklığını elde edebilmek amacıyla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [15-19]. Bu yöntemlerin başlıcaları sıcaklığın doğrudan ölçümüne dayanan yöntemler [20], sonlu elemanlar yöntemine dayanan yöntemler [21], termal-elektriksel benzerliğe dayanan yöntemler [22] ve transformatörün bir termal diyagramına dayanan yöntemler [23] olmak üzere dört alt gruba ayrılabilir. Söz konusu yöntemlerin her biri kendine has avantaj ve dezavantajlara sahip olmakla beraber halen bütün transformatöre uygulanabilecek standart bir yöntem bulunmamaktadır.

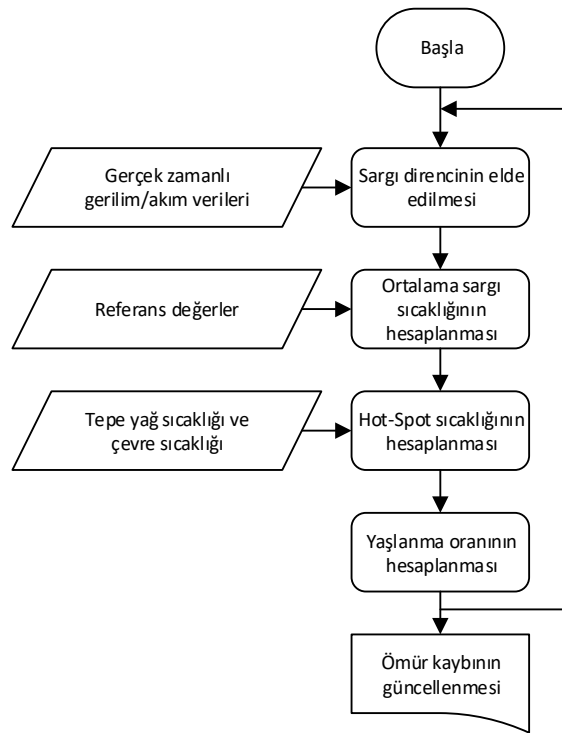
Transformatör ESNS değerini izlemeyi amaçlayan bu yöntemlerin nihai hedefi aslında transformatörlerin kullanım ömürlerini olabildiğince uzun olacak şekilde yük yönetimi yapmak ve güç sistemi planlamasına yardımcı olmaktır. Bu da transformatörlerin kalan veya kullanılan ömür değerlerinin izlenmesi gereken önemli bir parametre olarak karşımıza çıkarır. Bu çalışmada bu ihtiyaca yönelik olarak geliştirilmiş olan bir yöntem [24] kullanılarak sargı ESNS değerini hesaplayan ve bu hesaplama dayanarak sargı yalıtımının ve dolayısıyla yağlı tip transformatörlerin kullanılan ve kalan ömrünün izlenmesine olanak sağlayan bir ömür sayacı cihazının tasarımı ve saha uygulaması anlatılmıştır. Cihaz, sargı sıcaklıklarını gerçek zamanlı olarak izleyebilme özelliğine sahip olmasına bağlı olarak uyarı ve alarm işaretlerini üretebilme ve enerji verimli soğutma kontrolü yapabilme özelliklerine de sahiptir. Literatürde ve uygulamada bahsedilen özellikleri bir arada taşıyan bir ömür sayacı bulunmamaktadır. Bu yönü ile yapılan çalışma özgün bir geliştirmeyi kapsamaktadır. Geliştirilen cihaz ARAS EDAS sorumluluk bölgesi içinde olan Erzurum ili merkezindeki bir dağıtım transformatörüne montajı yapılarak saha uygulaması yapılmıştır. Saha uygulama sonuçları yöntemin ve cihazın transformatör sıcaklığını oldukça iyi bir şekilde izleyebildiğini, transformatöre ait ömür değerlerini hesaplayabildiğini ve enerji verimli bir biçimde soğutma kontrolünün yapılmasına olanak sağladığını göstermiştir.

Çalışmanın bundan sonraki ikinci bölümünde ömür sayacı cihazında kullanılan hesaplama yöntemi hem tek fazlı hem de Y_y ve D_y bağlı üç fazlı transformatörler için verilmiştir. Üçüncü bölümde cihazın aşırı sargı sıcaklığına karşı uyarı, alarm ve soğutma kontrolü için geliştirilmiş olan algoritma açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise geliştirilen ömür sayacı cihazı tanıtılarak saha montajına ilişkin bilgiler verilmiştir. Son bölümde ise yapılan çalışmanın sonuçları kısaca yorumlanarak verilmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada verilen transformatör ömür kaybı hesabı dört aşamadan oluşan bir yöntem ile yapılmaktadır. Bu aşamalar; transformatör sargı direncinin elde edilmesi,

OSS değerinin hesaplanması, sargı en sıcak-nokta sıcaklığının ve kullanılan/kalan ömrün hesaplanması aşamalarıdır. Ömür hesabının hesabında transformatorün primerinden ve sekonderinden alınan gerçek zamanlı gerilim ve akım değerleri, transformatorün TYS değeri ve transformatöre ait referans sıcaklık ve direnç değerleri girdi olarak kullanılmaktadır. Referans değerler transformatorün fabrika test verilerinden kolaylıkla elde edilebilecek değerlerdir. Yöntemin kullandığı algoritmanın genel blok şeması Şekil 1'de verilmiş olup kullanılan hesaplama yönteminin ve geliştirilen donanımın detayları sonraki bölümlerde açıklanmıştır.



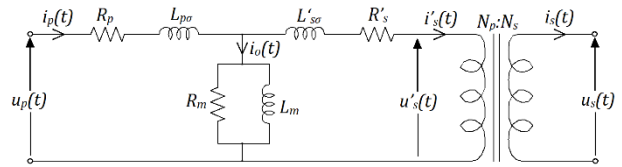
Şekil 1. Deneysel Ömür sayacı hesaplama algoritmasının genel blok şeması (General block diagram of the lifetime metering calculation algorithm)

2.1. Transformator Sargı Direncinin Elde Edilmesi (Obtaining Transformer Winding Resistance)

Ömür sayacının kullandığı algoritmada ömür değerleri transformatorün ESNS değeri üzerinden hesaplanmaktadır. ESNS değeri ise [24] referansında tek-fazlı transformatorler için verilmiş olan yöntemin 3-fazlı biçimi geliştirilerek elde edilmiştir. Bunun için ilk olarak transformatorün sargı dirençleri elde edilmektedir. Üç-fazlı transformatorün gerçek zamanlı akım ve gerilim değerleri ile sargı direncinin hesabı temelde tek-fazlı transformatorün eşdeğer devresine dayanmakta olup transformatorün bağlantı grubuna göre farklılık göstermektedir. Bu yüzden hesaplamalar öncelikle tek fazlı transformator için verilmiş ve sonrasında sıklıkla kullanılan iki farklı bağlantı grubuna (Yy ve Dy) sahip 3-fazlı transformatorler için ele alınmıştır.

2.1.1. Tek fazlı transformator (Single phase transformer)

Şekil 2'de verilmiş olan tek-fazlı transformator eşdeğer devresini göz önüne alalım.



Şekil 2. Tek-fazlı transformatorün T-eşdeğer devresi (Equivalent T-circuit of single-phase transformer)

Belli bir yük altında çalışmakta olan bir transformatorün primer ve sekonder tarafı gerilimlerinin ve akımlarının (u_p , i_p , u_s ve i_s) bir T_s örnekleme periyodu ile örneklendiğini düşünelim. Bir temel periyot (T) boyunca alınan örnek sayısı N olmak üzere örneklenen gerilimleri ve akımları içeren vektörler aşağıdaki denklem takımları ile ifade edilmektedir.

$$u_p = [u_p(t_0), u_p(t_1), \dots, u_p(t_{N-1}), u_p(t_N)] \quad (1)$$

$$i_p = [i_p(t_0), i_p(t_1), \dots, i_p(t_{N-1}), i_p(t_N)] \quad (2)$$

$$u_s = [u_s(t_0), u_s(t_1), \dots, u_s(t_{N-1}), u_s(t_N)] \quad (3)$$

$$i_s = [i_s(t_0), i_s(t_1), \dots, i_s(t_{N-1}), i_s(t_N)] \quad (4)$$

Bu değerlerden u_p bir bileşen ayrıştırma tekniği kullanılarak karmaşık sayılar dönüşümü (KSD) işlemi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla yapılabilir:

$$U_{px} = \frac{1}{N \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right)} \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} (u_p(t_k) - u_p(t_{k-1})) \cdot \\ \cos(\omega t_k) \cos\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \\ + \sin(\omega t_k) \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U_{py} = \frac{1}{N \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right)} \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} (u_p(t_k) - u_p(t_{k-1})) \cdot \\ \sin(\omega t_k) \cos\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \\ - \cos(\omega t_k) \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U_p = U_{px} + jU_{py} \quad (7)$$

Aynı hesaplamalar diğer büyüklükler için de yapılarak karmaşık değerlere dönüşüm sağlanır:

$$I_p = I_{px} + jI_{py} \quad (8)$$

$$U_s = U_{sx} + jU_{sy} \quad (9)$$

$$I_s = I_{sx} + jI_{sy} \quad (10)$$

Karmaşık sayı cinsinden elde edilmiş olan bu değerler tek-fazlı transformatorün toplam sargı direncinin

hesabında kullanılır. Bunun için Şekil 2'yi göz önüne alalım. Sekonder tarafı gerilim ve akım değerleri öncelikle çevirme oranı kullanılarak primere indirgenir:

$$r = \frac{N_p}{N_s} \quad (11)$$

$$U_s' = r \cdot U_s \quad (12)$$

$$I_s' = \frac{I_s}{r} \quad (13)$$

Şekil 2'de görünen R_m ve X_m parametreleri mıknatıslanma parametreleri olup sargı parametrelerinin (R_p , $L_{\sigma p}$, R_s' ve $L_{\sigma s}'$) yanında çok büyük değerlere sahiptir. Bu yüzden mıknatıslanma akımı (i_0) ihmal edilebilir. Bu durumda sargı akımı olarak primer ve sekonder akımlarının ortalamaları kullanılabilir. Dolayısıyla primerden sekondere gerilim farkı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$U_p - U_s' = \left(\frac{I_p + I_s'}{2} \right) \left[(R_p + R_s') + j(X_{\sigma p} + X_{\sigma s}') \right] \quad (14)$$

Toplam sargı empedansı (Z_w)

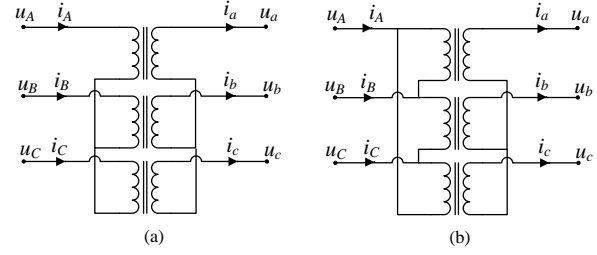
$$Z_w = R_w + jX_w = (R_p + R_s') + j(X_{\sigma p} + X_{\sigma s}') \quad (15)$$

ile ifade edilecek olursa toplam sargı direnci (R_w) aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$R_w = \text{Re} \left[\frac{2(U_p - U_s')}{I_p + I_s'} \right] \quad (16)$$

2.1.2. Üç fazlı transformatör (Three phase transformer)

Üç-fazlı transformatörlerin her bir bacağı birer tek fazlı transformatör olarak göz önüne alınabilir. Yukarıda tek-fazlı transformatör için verilmiş olan yöntemle göre parametrelerin doğru bir biçimde hesabı için her bir bacadaki sargılara ait gerilimlerin ve akımların ölçülmüş olması gerekmektedir. Normalde bir üç-fazlı transformatörün sargıları kendi aralarında üçgen bağlı olan tarafında sargı akımlarını ölçebilmek mümkün değildir. Fakat yıldız bağlı olan sargılarda hat akımları sargı akımlarına eşit olduğundan ölçülebilir. Pratikte yıldız bağlı taraf AG tarafı olup yıldız noktası nötr ucu olarak dışarı çıkartıldığından yıldız bağlantılı olan tarafta gerilimi ölçmek mümkündür. Üçgen bağlı tarafta ise faz-faz gerilimi sargı üzerine düşen gerilime eşit olduğundan ölçülebilir bir büyüklüktür. Sonuç olarak sargıları üçgen bağlı olan bir transformatörde sargı akımı ölçmek mümkün olmadığından hat akımları üzerinden hesaplamaya yarayan bir yöntem geliştirilmiştir. Sıklıkla kullanılan Yy ve Dy bağlantılı iki farklı transformatörün Şekil 3-a'da verilmiş devre diyagramlarını göz önüne alalım.



Şekil 3. Yy ve Dy bağlantı grubuna sahip transformatörlerin sargı bağlantı yapısı (Winding connection structure of transformers with Yy and Dy connection groups)

Her iki transformatörün her bir bacağındaki sargılar birer tek fazlı transformatör olarak göz önüne alınarak her bir bacak için ayrı ayrı toplam sargı dirençleri (R_{wA} , R_{wB} ve R_{wC}) elde edilebilir. Bunun için öncelikle Yy bağlı transformatörün primer tarafı gerilimlerinin faz-nötr olarak (u_{AN} , u_{BN} , u_{CN}) ve Dy bağlı transformatörün primer tarafı gerilimlerinin faz-faz olarak (u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}) ölçülmüş olması gerekir. Bunun yanında her iki transformatör bağlantısı için sekonder tarafı gerilimlerinin faz-nötr olarak (u_{an} , u_{bn} , u_{cn}) ölçülmüş olması gerekmektedir. Ayrıca, ölçülebilir akımlar olarak transformatörün her iki taraf hat akımlarının (i_A , i_B , i_C , i_a , i_b , i_c) ölçülmüş olması gerekir. Ölçülmüş olan bu değerler KSD işlemi uygulanarak karmaşık sayı biçimine dönüştürülebilir. Öyle ki, Yy bağlı transformatör için (U_{AN} , U_{BN} , U_{CN}) ve Dy bağlı transformatör için (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) elde edilirken her iki transformatör için (U_{an} , U_{bn} , U_{cn}) ve (I_A , I_B , I_C , I_a , I_b , I_c) karmaşık sayı değerleri bulunmuş olur. Bir sonraki aşamada ise transformatörlerin sekonder tarafı için hesaplanmış değerleri (11)-(13) eşitlikleri yardımıyla primer tarafa indirgenerek (U_{an}' , U_{bn}' , U_{cn}' , I_a' , I_b' , I_c') değerleri bulunur. Son olarak karmaşık sayı değerleri kullanılarak Yy bağlı transformatör için her bir bacağın primerden görünen toplam sargı direnci (17)-(19) eşitlikleri ile ve Dy bağlı transformatör için her bir bacağın primerden görünen toplam sargı direnci (20)-(22) eşitlikleri ile hesaplanmış olur.

$$R_{wA} = \text{Re} \left[\frac{2(U_{AN} - U_{an}')}{I_A + I_a'} \right] \quad (17)$$

$$R_{wB} = \text{Re} \left[\frac{2(U_{BN} - U_{bn}')}{I_B + I_b'} \right] \quad (18)$$

$$R_{wC} = \text{Re} \left[\frac{2(U_{CN} - U_{cn}')}{I_C + I_c'} \right] \quad (19)$$

$$R_{wA} = \text{Re} \left[\frac{2(U_{AB} - U_{ab}')}{I_{wA} + I_a'} \right] \quad (20)$$

$$R_{wB} = \operatorname{Re} \left[\frac{2(U_{BC} - U_{bn}')}{I_{wB} + I_b'} \right] \quad (21)$$

$$R_{wC} = \operatorname{Re} \left[\frac{2(U_{CA} - U_{cn}')}{I_{wC} + I_c'} \right] \quad (22)$$

(20)-(22) eşitliklerindeki I_{wA} , I_{wB} ve I_{wC} akımları sargı akımlarını göstermektedir. Bu akımlar sekonder tarafı sargı akımlarına boşa çalışma akımları eklenerek hesaplanabilir. Dolayısıyla, (23)-(25) eşitlikleri yazılabilir.

$$I_{wA} = I_{A0} + I_a' \quad (23)$$

$$I_{wB} = I_{B0} + I_b' \quad (24)$$

$$I_{wC} = I_{C0} + I_c' \quad (25)$$

Boşa çalışma akımları ise Şekil 2 göz önüne alınarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$I_{A0} = \frac{U_{AB} + U_{an}'}{2 \cdot R_m} + \frac{U_{AB} + U_{an}'}{2 \cdot jX_m} \quad (26)$$

$$I_{B0} = \frac{U_{BC} + U_{bn}'}{2 \cdot R_m} + \frac{U_{BC} + U_{bn}'}{2 \cdot jX_m} \quad (27)$$

$$I_{C0} = \frac{U_{CA} + U_{cn}'}{2 \cdot R_m} + \frac{U_{CA} + U_{cn}'}{2 \cdot jX_m} \quad (28)$$

Son üç eşitlikteki R_m ve X_m parametreleri transformatörün fabrika test raporlarında yer alan boşa çalışma verileri yardımıyla elde edilebilir.

2.2. Transformatör Ortalama Sargı Sıcaklıklarının Elde Edilmesi (Obtaining Transformer Average Winding Resistance)

Bir iletkende ortaya çıkan ısı kaybı, o iletkenin akan akımın karesi ile iletkenin bu akıma karşı gösterdiği direnç değerinin çarpımına eşittir. Akan akımın DA olması durumunda bu eşitlik tamamen doğrudur. Her nasılsa, bu eşitlik akan akımın AA olması durumunda aynı DA direnç değeri ile sağlanamaz. Öyle ki, AA direnç değerinin DA direnç değerinden daha büyük olduğu görülür. İçerisinden doğru akım taşıyan bir iletkenin akım yoğunluğu bütün kesit boyunca düzgün bir dağılım göstermesine karşın aynı iletkenin alternatif akım taşımada halinde akım yoğunluğu iletkenin bütün kesiti boyunca aynı kalmamaktadır. Bunun temel nedenleri yaklaşım ve deri etkileridir. Bu etkiler iletkenin yüzeyinden merkezine doğru azalan bir akım yoğunluğunun ortaya çıkmasına ve iletkenin etkin olarak kullanılan kesitinde azalmaya neden olmaktadır. Bu da iletkenin doğru ve alternatif akımları taşıırken gösterdiği direnç değerlerinin farklı olması anlamına gelmektedir. Bu fark büyük güçlü transformatör sargılarında deri ve yaklaşım etkilerinin daha fazla olmasından dolayı daha belirgindir. Transformatör sargılarında bu fark nedeniyle oluşan ek kayıplar stray kayıpları (P_{str}) olarak adlandırılır. Sonuç olarak transformatörün toplam yük

kayıpları ohmik kayıplar veya stray kayıpları olmak üzere iki kayıp gücün toplamından oluşur:

$$P_{LL} = P_{dc} + P_{str} \quad (29)$$

Stray kayıplarından dolayı AA ile DA direnç arasındaki fark küçük güçlü transformatörlerde ihmal edilebilecek kadar küçük iken büyük güçlü transformatörlerde bu fark çok daha net bir biçimde görülür. Burada, P_{LL} toplam sargı kayıplarını (veya yük kayıplarını) ve P_{dc} sargının DA direncinden dolayı ortaya çıkan ohmik kayıpları temsil etmektedir. Ohmik kayıplar, sargı dirençleri ile sargılardan akan akımların karelerinin çarpımı kullanılarak oldukça doğru bir biçimde hesaplanabilmektedir. Fakat stray kayıplarının modellenmesi ve değerinin hesaplanması oldukça zordur. Yük kayıpları, sargı akımının (I_w) karesi ile doğru orantılı olarak değişir. Bu yüzden bu kayıplar:

$$P_{LL} = I_w^2 (R_{dc} + R_{str}) \quad (30)$$

biçiminde yazılabilir. Burada, R_{dc} sargıların DA direncini ve R_{str} stray kayıplarına karşı düşen direncin değerini göstermektedir. (30) eşitliğinin sağ tarafındaki dirençlerin toplamı (31) eşitliğindeki gibi bir AA direnci (R_{ac}) olarak tanımlanabilir:

$$R_{ac} = R_{dc} + R_{str} \quad (31)$$

Bu direnç değeri aslında Bölüm 2.1'de alternatif akım ve gerilimler yardımıyla hesaplanmış olan dirençtir. Sargı iletkeni olarak kullanılan iletkenlerin DA direnç değeri ile sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Öyle ki θ_{ref} ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığındaki DA direnci R_{dc-ref} olan bir iletkenin θ_w sıcaklığındaki DA direnci aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$R_{dc-\theta} = R_{dc-ref} \frac{\theta_k + \theta}{\theta_k + \theta_{ref}} \quad (32)$$

Burada R_{dc-ref} ve $R_{dc-\theta}$ sargı iletkeninin θ_{ref} ($^{\circ}\text{C}$) ve θ_w ($^{\circ}\text{C}$) OSS değerlerindeki direncini ifade etmektedir. Ayrıca θ_k bakır için 234.5 $^{\circ}\text{C}$ ve alüminyum için 225 $^{\circ}\text{C}$ olan sabitlerdir. IEC ve IEEE standartlarına göre stray kayıpları ile sıcaklık ters orantılı olarak değişir. Bu, aynı zamanda stray dirençleri ile sıcaklık arasında da bir ters orantı olduğu anlamına gelir. Yani bir transformatörün stray kayıplarına karşı düşen stray direncinin iki farklı sıcaklıktaki değerleri için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$R_{str-\theta} = R_{str-ref} \frac{\theta_k + \theta_{ref}}{\theta_k + \theta_w} \quad (33)$$

Son iki eşitlik toplanarak yazıldığında θ_w sıcaklığındaki AA direnç değeri elde edilir:

$$\begin{aligned} R_{ac-\theta} &= R_{dc-\theta} + R_{str-\theta} \\ &= R_{dc-ref} \frac{\theta_k + \theta_w}{\theta_k + \theta_{ref}} + R_{str-ref} \frac{\theta_k + \theta_{ref}}{\theta_k + \theta_w} \end{aligned} \quad (34)$$

Bu eşitlikten θ_w çekildiğinde

$$\theta_w = \frac{R_{ac-\theta} \pm \sqrt{R_{ac-\theta}^2 - 4R_{dc-ref} R_{str-ref}}}{2R_{dc-ref}} (\theta_k + \theta_{ref}) - \theta_k \quad (35)$$

bulunur. Eşitlik (35) iki farklı çözüm sunmaktadır. Stray kayıplarının sıfır olduğu ($R_{str-\theta} = 0$) ve sargının referans sıcaklıkta bulunduğu ($\theta_w = \theta_{ref}$) durumda

$$R_{ac-\theta} = R_{dc-ref} \quad (36)$$

olmalıdır. Bu şartı sağlayan eşitlik aranan çözümdür. Dolayısıyla, sıcaklık ile sargı dirençleri arasındaki ilişkiyi veren eşitlik aşağıdaki gibi bulunur:

$$\theta_w = \frac{R_{ac-\theta} + \sqrt{R_{ac-\theta}^2 - 4R_{dc-ref}R_{str-ref}}}{2R_{dc-ref}} (\theta_k + \theta_{ref}) - \theta_k \quad (37)$$

Son eşitlik, referans direnç ve sıcaklık değerleri (R_{dc-ref} , $R_{str-ref}$ ve θ_{ref}) bilinen bir transformatorün herhangi bir sıcaklıktaki AA sargı direnci ($R_{ac-\theta}$) kullanılarak OSS (θ_w) değerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

2.3. Transformator En-Sıcak Nokta Sıcaklığının Elde Edilmesi (Obtaining Transformer Hot-Spot Temperature)

Bu kısımda yer alan eşitlikler transformatorler için genel kabul görmüş olan bir ısıl diyagrama dayanmaktadır. IEEE Std. C57.91, 2011 standardının Annex-G bölümüne göre bir transformator yağından çevreye yayılan ısı enerjisi miktarı için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$Q_{LOST,O} = \left[\frac{\theta_{AO-1} - \theta_{A-1}}{\theta_{AO-R} - \theta_{A-R}} \right]^{1/y} P_T \Delta t \quad (38)$$

Bu eşitlikteki $Q_{LOST,O}$ yağın dış ortama verdiği ısıyı, θ_{AO-R} yağın anma yükündeki ortalama sıcaklığını, θ_{A-R} anma çevre sıcaklığını, θ_{AO-1} ve θ_{A-1} ise yağın ve çevrenin hesaplama yapılan zaman başlangıcındaki sıcaklıklarını ifade eder. Aynı eşitlikteki P_T transformatorün anma yükündeki kayıplarını, Δt hesaplama yapılan zaman aralığını ve y ise transformatorün soğutma tipine bağlı bir değişmezi gösterir. Bu değişmez ONAN soğutma modu için 0.8 değerini alır. Annex-G yöntemine göre transformatorün TYS ve alt yağ sıcaklıkları arasındaki fark (39) eşitliği ile elde edilebilmektedir.

$$\theta_{TO} - \theta_{BO} = \left[\frac{Q_{LOST,O}}{P_T \Delta t} \right]^z (\theta_{TO-R} - \theta_{BO-R}) \quad (39)$$

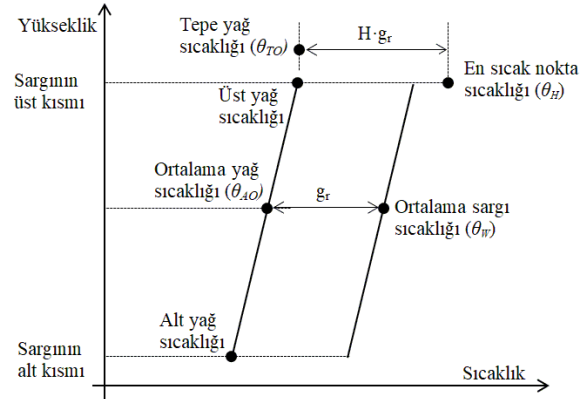
Burada θ_{TO} ve θ_{BO} sırasıyla söz konusu kayıplardaki TYS ve alt yağ sıcaklıklarını gösterirken θ_{TO-R} ve θ_{BO-R} ise sırasıyla TYS ve alt yağ sıcaklıklarının anma değerlerini ifade etmektedir. Yine bu eşitlikte yer alan z ise değeri ONAN soğutma modu için 0.5 olan bir değişmezdür. (38) eşitliğindeki $Q_{LOST,O}$ değerini (39) eşitliğinde yerine koyup θ_{BO} değişkenini çekersek

$$\theta_{BO} = \theta_{TO} - \left[\frac{\theta_{AO-1} - \theta_{A-1}}{\theta_{AO-R} - \theta_{A-R}} \right]^{z/y} (\theta_{TO-R} - \theta_{BO-R}) \quad (40)$$

bulunur. Dolayısıyla Δt süresinin sonunda transformator yağının ortalama sıcaklığı

$$\theta_{AO-2} = \frac{\theta_{TO} + \theta_{BO}}{2} \quad (41)$$

eşitliği ile elde edilebilir. IEC ve IEEE standartlarına [23,25] göre transformatorlerin sargı ve yağ sıcaklıkları aşağıdan yukarıya doğru doğrusal olarak artar. Bu artış hem yağ hem de sargı için aynı oranlardadır. Bu varsayım dayalı transformator ısıl diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yağlı transformatorler için sadeleştirilmiş ısıl diyagram (Simplified thermal diagram for oil-immersed transformers) [23]

Bu ısıl diyagrama göre bir transformatorün herhangi bir andaki ESNS (θ_H) değeri o andaki OSS (θ_w), ortalama yağ sıcaklığı (θ_{AO}), TYS değeri (θ_{TO}) ve bir ESNS faktörü (H) kullanılarak elde edilebilir. Aynı diyagramdaki g_r anma durumundaki OSS değeri ile ortalama yağ sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$\theta_H = \theta_{TO} + H (\theta_w - \theta_{AO}) \quad (42)$$

Burada H faktörü transformatorün boyutu, kısa devre empedansı ve sargı tasarımı biçimine bağlı olarak değeri 1.1 ile 1.5 arasında değişen bir katsayıdır.

Sonuç olarak yöntemin eşitlikleri sırasıyla (40), (41) ve (42) eşitlikleri olarak elde edilir. Bu eşitliklerde giriş değişkenleri TYS (θ_{TO}), çevre sıcaklığı (θ_A) ve OSS (θ_w) değeridir. OSS hesabında bir önceki bölümde anlatıldığı gibi transformatorün birincil ve ikincil yan gerilim ve akım değerleri kullanılmaktadır. Hesaplamaların her bir zaman adımında önce alt yağ sıcaklığı hesaplanmaktadır. Ortalama yağ sıcaklığı ise TYS ve alt yağ sıcaklıklarının ortalaması alınarak elde edilmektedir. Son olarak (42) eşitliği yardımıyla ESNS bulunmaktadır.

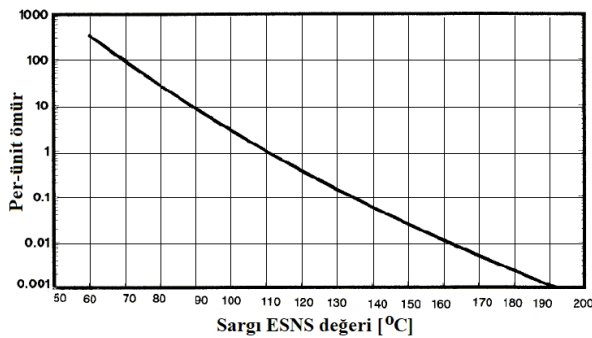
2.4. Transformator Yaşlanma Hızının ve Ömür Kaybının Hesaplanması (Computation Aging Speed and Lifetime Consumption)

Bu kısımda verilmiş olan ömür hesaplama yöntemi [23] referansında verilmiş olan standarttan alınmıştır. Yalıtımın yaşlanması veya bozulması sıcaklığın, nemin, oksijen ve asit içeriğinin zamana bağlı bir işlevidir. Modern yağ temizleme sistemleriyle yalıtım bozulmasına karşı nem ve oksijen katkıları en aza

indirilebilir. Dolayısıyla transformatör yaşlanması belirleyen en önemli faktör sıcaklıktır. Transformatör içerisindeki sıcaklık dağılımı eşit değildir. Bu nedenle, yaşlanma üzerine yapılan çalışmalarda, ESNS değerinin neden olduğu yaşlanma etkilerini göz önüne almak gerekir. Deneysel çalışmalar yalıtımın bozulmasının zamana ve sıcaklıkla ilişkisinin aşağıda verilen Arrhenius reaksiyon hızı kuramının uyarlanmasını izlediğini göstermektedir:

$$\text{Birim_ömür} = Ae^{\frac{B}{\theta_H + 273}} \quad (43)$$

Burada θ_H sargı ESNS değerini gösterir. A ve B ise sabit değerlerdir. Şekil 5'teki eğri transformatörlerin birim yalıtım kâğıdı ömrü ile sargı ESNS arasındaki ilişkiyi vermektedir.



Şekil 5. Transformatör yalıtım kâğıdının ömrü ile sargı ESNS değeri arasındaki ilişki (The relation between the lifetime of transformer insulation paper and the winding hot-spot temperature value) [23]

Bu egride yalıtım malzemesinin sıcaklığı ile ısı ömrü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu eğriye göre 110°C'lik referans sıcaklığın üzerinde yaşlanma hızı artarken altında olağanın altına düşer [23]. Bu eğri için denklem aşağıdaki gibidir:

$$\text{Birim_ömür} = 9.8 \cdot 10^{-18} e^{\left[\frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \quad (44)$$

Şekil 5'te verilen eğri bir sabit yük ve sıcaklık için yaşlanma hızlandırma faktörünün (F_{AA}) hesabında temel alınabilir. F_{AA} , referans sıcaklığı 110°C'dan daha yüksek olan sargı ESNS değerleri için 1'den büyük iken 110°C'nin altındaki sıcaklıklarda 1'den küçük bir değerdedir. Yaşlanma hızlandırma faktörü (45) eşitliğindeki gibi tanımlanmıştır.

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \quad (45)$$

Belirli bir zaman döneminde verilen bir sıcaklık değişimi döngüsü kullanılarak eşdeğer yaşlanma faktörü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$F_{EQU} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (46)$$

Burada F_{EQU} toplam zaman dönemindeki eşdeğer yaşlanma faktörünü, $F_{AA,n} \Delta t_n$ zaman aralığındaki yaşlanma hızlandırma faktörünü, N zaman aralığının toplam sayısını ve Δt_n zaman aralığını ifade etmektedir [23].

3. TRANSFORMATÖR AŞIRI SARGI SICAKLIĞI UYARI, ALARM VE SOĞUTMA SİSTEMİ KONTROL ALGORİTMASI (CONTROL ALGORITHM OF TRANSFORMER WINDING OVER-TEMPERATURE WARNING, ALARM AND COOLING SYSTEM)

Transformatörlerin güvenli bir şekilde aşırı yüklenmesine izin verilebilir. Buna karşın aşırı yüklenme durumlarında transformatörlerin tasarımından kaynaklanan bazı standart sıcaklık sınır değerlerinin aşılmaması gerekir. Bu değerler standartlarda belirtilen değerler olup genellikle transformatör plakalarında da yer alır. Standart olarak kullanılan transformatör yalıtım kâğıdının yaşlanma hızı 108 °C'nin üzerinde hızlı bir şekilde yükselir. Bu da bu sıcaklığın kritik bir sıcaklık olduğunu ve sistem operatörlerinin ESNS sıcaklığının bu sıcaklık değerlerine ulaştığında bir uyarı ile bilgilendirilmesinin gerektiğini gösterir. Ayrıca standartlarda zorunlu durumlarda transformatör ESNS değerlerinin 118 °C olmasına belli ölçülerde izin verilir. Bu sıcaklığın da üzerine çıkılması neredeyse hiç istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden bu sıcaklığa ulaşılması halinde transformatör operatörlerini alarm durumuna geçirmek ve transformatörü bağlı olduğu sistemden ayıracak şekilde devre kesicileri açmak gerekir.

Bu çalışmada tasarımı yapılan cihazın uyarı ve alarm algoritmasında, transformatörün ömrüne etki eden temel parametre olan ESNS değerinden başka önemli transformatör sıcaklık parametreleri olan OSS ve TYS değerlerine bağlı olarak da uyarı ve alarm vermesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece daha güvenilir bir uyarı-alarm sistemi kullanılmış olacaktır. Buna göre tasarımı yapılan ömür sayacı cihazının uyarı ve alarm algoritması ESNS, OSS ve TYS değerlerine dayandırılarak aşağıdaki biçimde kurgulanmıştır.

if ESNS > 118 °C → Alarm ver elseif ESNS > 108 °C → uyarı ver,
if OSS > 105 °C → Alarm ver elseif OSS > 95 °C → uyarı ver
if TYS > 105 °C → Alarm ver elseif TYS > 95 °C → uyarı ver.

Transformatör soğutma sistemlerinin amacı bir soğutucu vasıtasıyla transformatörün iç yapısındaki ısının dış ortama atılmasını sağlamak ve böylece sıcaklık değerlerinin sınır değerlere ulaşmasına engel olmaktır. Ayrıca, soğutma sistemi yardımıyla transformatörün tasarlandığı anma gücü değerinin daha yüksek bir değere yükseltilmesi ve böylece ek kapasite oluşturulması sağlanabilir. Bu tasarım çalışmasında ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklara bağlı olarak çalışan bir soğutma sistemi kullanılarak transformatör anma gücünün artırılması ve böylece ek kapasitenin oluşturulması amaçlanmıştır.

Soğutma için 4 tane radyal fan kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bu fanların enerji verimli soğutma için iki parametreye (yüklenme oranı ve ESNS sıcaklığı) bağlı olarak kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Yüklenme oranı (K) transformatör akımının pu (per-ünit) değeridir. Bu değer in soğutma sistemi kontrol algoritmasında kullanımı ile hedef ESNS değerine erişilmeden yeterli miktarda soğutma fanı devreye alınmış olur. Böylece ani yük artışlarından kaynaklanacak sıcaklık artışlarına erkenden müdahale

edilmiş olacaktır. Bu aynı zamanda ani yük artışlarında ESNS sınır değerleri aşılmaksızın daha uzun süreli aşırı yüklenmelere müsait bir ortam hazırlayacaktır.

Sonuç olarak yüklenme oranındaki ve ESNS değerindeki artışa bağlı olarak devredeki fan sayısının artırılması gerekecektir. Buna uygun olarak geliştirilen soğutma sistemi kontrol algoritması tablo olarak Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Transformator soğutma sistemi kontrol algoritması (Transformer cooling system control algorithm)

	$K < 1$	$1 < K < 1.2$	$1.2 < K < 1.3$	$1.3 < K$
$\theta_H < 100 \text{ }^\circ\text{C}$		F1	F1-F2	F1-F2-F3
$100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_H < 108 \text{ }^\circ\text{C}$	F1	F1-F2	F1-F2-F3	F1-F2-F3-F4
$108 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_H < 118 \text{ }^\circ\text{C}$	F1-F2	F1-F2-F3	F1-F2-F3-F4	F1-F2-F3-F4
$118 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_H$	F1-F2-F3-F4	F1-F2-F3-F4	F1-F2-F3-F4	F1-F2-F3-F4

Bu çizelgede yer alan K ($K = I_{gerçek}/I_n$ olmak üzere) yüklenme oranını ve θ_H ESNS değerini göstermektedir.

4. TASARIM (DESIGN)

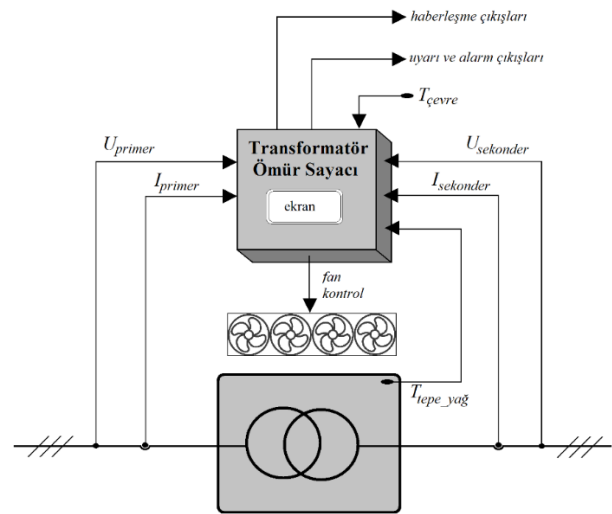
Bu bölümde hesaplama yöntemi yukarıda detaylı olarak verilmiş olan transformator ömür sayacı cihazının tasarımı, laboratuvar testleri ve saha montajları açıklanmıştır. Cihazın genel bağlantı şeması Şekil 6’da verilmiştir.

Transformatörün üst yağ cebine yerleştirilen bir PT100 termorezistans yardımıyla TYS bilgisi ve bir adet sıcaklık (AHT15) yardımıyla çevre sıcaklığı bilgisi ölçülerek cihaza verilmektedir. Cihaza gelen akım, gerilim ve sıcaklık bilgileri cihazın işlemcisinde (STM32F429) kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Cihaz tarafından elde edilen ömür bilgisi, yaşlanma hızı, akım, gerilim değerleri, OSS değeri, ESNS ve çevre sıcaklığı bilgileri cihazın üzerinde yer alan bir 4.3 inç’lik dokunmatik ekran yardımıyla kullanıcıya sunulmaktadır. Bu veriler aynı zamanda cihaz üzerinde yer alan bir Wi-Fi modülü ve cihaza sağlanan kablosuz internet erişimi vasıtasıyla bir sunucuya aktarılmakta ve sunucudaki bu veriler üzerinden uzaktan izlemenin yapılmasına ve analiz için gerekli veri setinin oluşturulmasına imkân sağlamıştır. Tasarlanan bu cihaza ait bir hesaplama blok şeması Şekil 7’de verilmiştir.

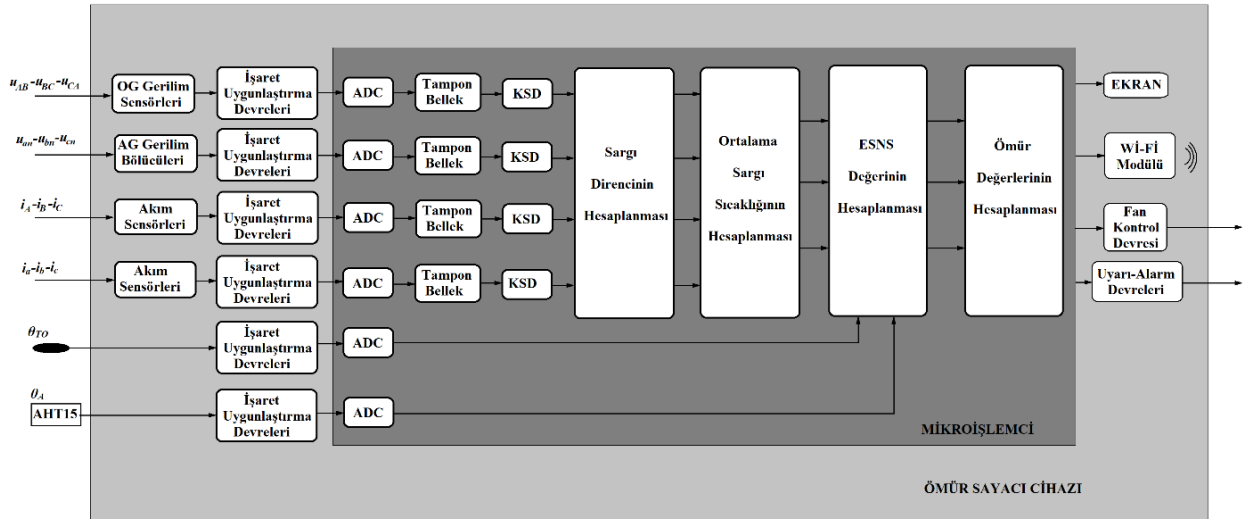
Tasarım sonrası imalatı yapılan ömür sayacı cihazı saha montajından önce laboratuvar ortamında test edilmiştir. Bunun için anma değerleri 3-faz, 50 kVA, 6300 V/400 V, ONAN olan ve en sıcak-noktasına imalatı aşamasında bir fiber optik sıcaklık sensörü yerleştirilmiş olan bir test transformatorü kullanılmıştır. Test transformatorünün sekonderi kısa-devre edilerek sargılarından anma akımı akacak kadar bir gerilim uygulanmış ve transformatorün 12 saat süreyle ısınması için beklenmiştir. Test sonunda fiber optik sensörden gelen ESNS değeri 50.6 °C iken transformatöre bağlı cihazın hesapladığı ESNS değerinin

Ayrıca, F1, F2, F3 ve F4 sırasıyla Fan-1, Fan-2, Fan-3 ve Fan-4’ün devrede olduğunu ifade etmektedir.

51.2 °C olduğu görülmüştür. Ayrıca cihazın ölçtüğü ve gerçek OSS değerlerini karşılaştırmak amacıyla testin başında ve sonunda bir mikro-ohm-metre cihazı ile sargı dirençleri ölçülmüş ve dirençteki değişim kullanılarak gerçek OSS değeri 47.4 °C olarak hesaplanmıştır. Cihazın hesapladığı OSS değerinin ise 48.1 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar cihazın sıcaklık değerlerini oldukça doğru bir şekilde elde edebildiğini göstermiştir. Ömür sayacı cihazının hesapladığı ESNS değerinin farklı akım değerlerindeki başarımını test etmek ve fanların soğutmaya etkisini görebilmek amacıyla yine kısa-devre bağlantıda iken transformatöre yaklaşık olarak 3 gün süren bir ısınma testi uygulanmıştır.



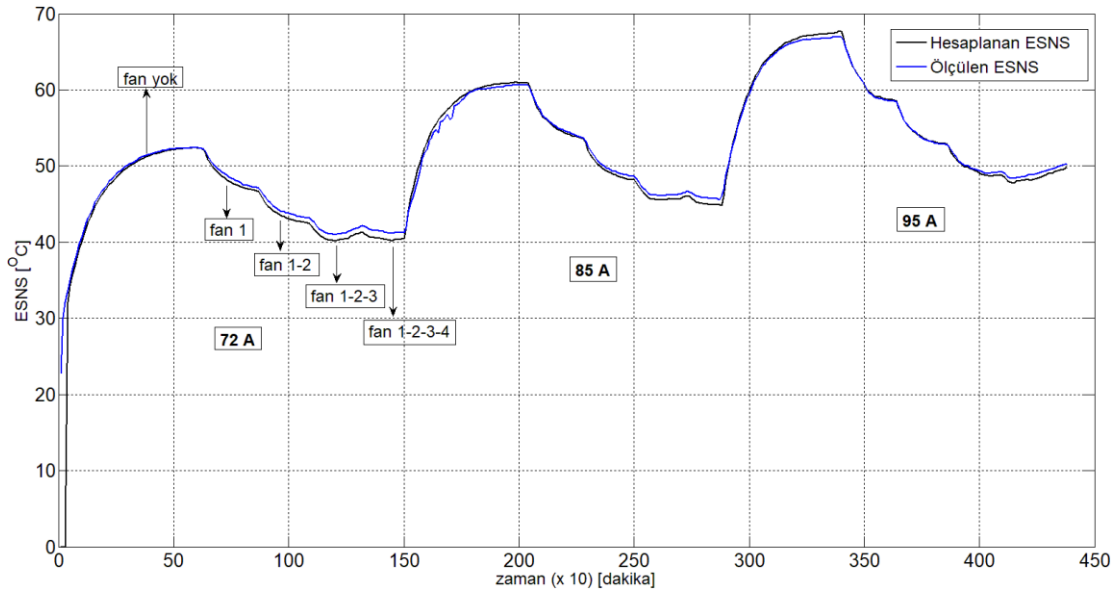
Şekil 6. Tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılan transformator ömür sayacı cihazının genel şeması (General scheme of the transformer lifetime metering device that is designed and implemented)



Şekil 7. Ömür sayacı cihazının hesaplama blok şeması (Computation block diagram of the lifetime metering device)

Test boyunca transformatör sargılarından 72 A (anma akımı), 85 A (%118 aşırı yüklenme) ve 95 A (%132 aşırı yüklenme) akım akıtılarak hesaplanan ve ölçülen değerler kaydedilmiştir. Çevre sıcaklığının yaklaşık 20 °C olarak ölçüldüğü bu testler boyunca elde edilen ESNS değerinin değişimleri Şekil 9’da verilmiştir. Kullanılan transformatörün ESNS değerleri fan kontrol sisteminin fanları kendiliğinden devreye alacak kadar yükselmediğinden ısınma testi boyunca fanlar manuel bir biçimde kademeli olarak devreye alınmış ve fanların soğutma başarımı incelenmiştir.

Şekil 8’de verilen değişimler geliştirilen cihazın farklı akım/sıcaklık değerlerinde ESNS değerini hesaplamada oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Öyle ki yapılan hata en fazla 1 °C civarında hesaplanmıştır. Değişimler fanların her devreye girme sonrası ESNS artışlarının kayda değer miktarda düştüğünü de göstermiştir. Öyle ki anma durumunda bu değişim 10 °C’nin üzerinde gerçekleşmiş olup bu oldukça iyi bir değer sayılır.



Şekil 8. 72 A, 85 A ve 95 A akımlarda ölçülen ve hesaplanan sargı ESNS değerlerinin değişimleri

Laboratuvar testlerinin ardından geliştirilen ömür sayacı cihazının Aras EDAŞ firması sorumluluk sahasında yer alan DM5-12 dağıtım merkezinde yer alan 630 kVA gücüne ve 33/0.4 kV çevirme oranına sahip yağlı tip dağıtım transformatörüne saha montajı yapılmıştır. Cihaz ile izlemesi yapılan transformatörün bir görünümü Şekil 9’da verilmiştir. Cihaza sağlanan akım işaretleri

transformatörün primer ve sekonder tarafında yer alan akım ölçü transformatörleri vasıtasıyla elde edilmiştir. Transformatörün AG tarafı gerilimleri cihaza doğrudan verilirken OG tarafı gerilimleri önce bir 3-fazlı gerilim sensörü ile ölçülmüş ve sensör çıkışından alınan işaret bir dönüştürücü (Inotel VIS100) yardımıyla 0-60V aralığına getirilerek cihaza aktarılmıştır.

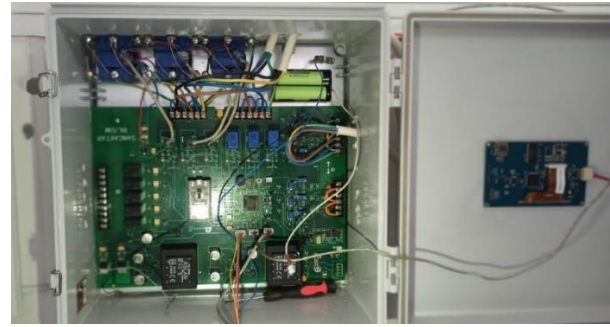


Şekil 9. Ömür sayacı cihazı ile izlemenin yapıldığı transformatöre ait bir görünüm (A view of the transformer that is monitored with lifetime metering device)

OG tarafı geriliminin hassas bir şekilde ölçümü için kullanılan gerilim sensörlerinin ve dönüştürücünün montajı yapılmış halinin bir görünümü Şekil 10'da verilmiştir. Cihazın saha montajı sonrasında ait son görünümü ise Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. OG tarafı gerilimlerinin ölçümü için kullanılan sensörlerin ve dönüştürücünün görüntüleri (Views of sensors and transducer used for measurement of MV side voltages)



Şekil 11. Saha montajı yapılan transformatör ömür sayacının görünümü (View of the transformer lifetime metering device installed in the field)

Bütün donanımları ile saha montajı yapılan ömür sayacının akım ve gerilim kalibrasyonları yazılım ortamında yapılmıştır. Cihaz, transformatörün iki yanına yerleştirilmiş olan toplamda dört adet fanı kontrol eden enerji verimli soğutma yeteneğine sahiptir. Bütün kablolar çekilerek bağlantılar yapıldıktan sonra cihazın soğutma sistemi manuel olarak test edilerek çalışması gözlenmiştir. Son olarak cihazın besleme bağlantıları da yapılarak devreye alınmıştır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Elektrik güç sistemlerinin hayati ve pahalı donanımlarından olan transformatörlerin kullanım sürelerinin olabildiğince uzun olması ekonomik bir gerekliliktir. Bir transformatörün ömrü büyük ölçüde sargı yalıtımlarının maruz kaldığı aşırı sıcaklıklardır. Bu sıcaklığın doğru bir biçimde izlenmesi ile enerji verimli soğutma kontrolünün yapılabilmesi ve transformatör ömrünün doğru tayin edilmesi sağlanabilir. Transformatör ömrünün izlenebilmesi yatırım planlamalarının da doğru yapılmasına olanak verir.

Bu çalışmada bir EPDK projesi kapsamında tasarımı yapılarak saha uygulaması gerçekleştirilmiş olan bir transformatör ömür sayacı cihazı anlatılmıştır. Cihazın mikroişlemci ortamında yapılan tüm hesaplamalar bu çalışma içerisinde detaylı olarak verilmiştir. Cihaz, transformatörün gerçek zamanlı akım ve gerilim verilerini, transformatörün TYS değerini, çevre sıcaklığını ve fabrika test raporlarından elde edilebilen

referans değerleri kullanarak transformatörün ESNS değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık değeri cihaz tarafından enerji verimli soğutma kontrolünün yanında transformatörün yaşlanma hızının ve kalan/kullanılan ömrünün hesaplanmasında kullanılmıştır. Hesaplanan verilere cihaz üzerinden ulaşılabilmektedir. Ayrıca, cihazın bir internet sunucusuyla olan bağlantısı üzerinden veriler bir sunucuya kaydedilmekte ve sonradan yapılacak analizler için veri sağlanmaktadır.

Tasarımı ve gerçekleştirmesi yapılan ömür sayacı cihazı saha montajından önce laboratuvar ortamında çeşitli transformatör ısınma deneyleri ile test edilmiştir. Deney sonuçları cihazın herhangi bir ESNS ölçümü olmaksızın gerçek ESNS değerini gerçek zamanlı olarak oldukça doğru bir biçimde elde edebildiğini göstermiştir. Dolayısıyla transformatörün sıcaklığa bağlı olan kalan/kullanılan ömür değerleri doğru bir biçimde hesaplanıp izlenebilmektedir. Ayrıca, ESNS değerlerinin izlenebilmesi sayesinde soğutma amaçlı kullanılan fanların enerji verimli kontrolü de mümkün olmuştur. Cihazın laboratuvar testleri sonrasında 630 kVA gücüne sahip bir transformatör üzerine montajı gerçekleştirilmiştir. Son olarak, cihaz gerekli kalibrasyon ve testleri yapılarak dağıtım şirketinin hizmetine sunulmuştur.

SİMGELER (SYMBOLS)

$u_p(t_1), i_p(t_1)$:Primer tarafı geriliminin ve akımının t_1 anındaki değerleri
$u_s(t_1), i_s(t_1)$:Sekonder tarafı geriliminin ve akımının t_1 anındaki değerleri
T_s, T	:Örnekleme periyodu ve temel periyot
N	:Örnek sayısı
U_p, U_{px}, U_{py}	:Primer geriliminin karmaşık sayı değeri ve bileşenleri
r	:Çevirme oranı
N_p, N_s	:Primer ve sekonder sarım sayıları
U_s', I_s'	:Primer tarafa indirgenmiş sekonder sargı gerilimi ve akımı
R_m, X_m	:Mıknatıslanma direnci ve reaktansı
R_p, L_{op}	:Primer sargı direnci ve kaçak endüktansı
R_s', L_{os}	:Primere indirgenmiş sekonder sargı direnci ve kaçak endüktansı
i_0	:Boşta çalışma akımı
X_{op}, X_{os}'	:Primer ve primere indirgenmiş sekonder sargı kaçak reaktansları
Z_w, R_w, X_w	:Toplam sargı empedansı, direnci ve reaktansı
R_{wA}, R_{wB}, R_{wC}	:A, B ve C sargılarının toplam dirençleri
u_{AN}, u_{BN}, u_{CN}	:OG tarafı faz-nötr gerilimleri
u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}	:OG tarafı faz-faz gerilimleri
u_{an}, u_{bn}, u_{cn}	:AG tarafı faz-nötr gerilimleri
i_A, i_B, i_C	:OG tarafı hat akımları
i_a, i_b, i_c	:AG tarafı hat akımları
U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}	:OG tarafı faz-nötr gerilimlerinin karmaşık sayı değerleri
U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}	:OG tarafı faz-faz gerilimlerinin karmaşık sayı değerleri

U_{an}, U_{bn}, U_{cn}	:AG tarafı faz-nötr gerilimlerinin karmaşık sayı değerleri
I_A, I_B, I_C	:OG tarafı hat akımlarının karmaşık sayı değerleri
I_a, I_b, I_c	:AG tarafı hat akımlarının karmaşık sayı değerleri
$U_{an}', U_{bn}', U_{cn}'$:Primere indirgenmiş AG tarafı faz-nötr gerilimlerinin karmaşık sayı değerleri
I_a', I_b', I_c'	:Primere indirgenmiş AG tarafı hat akımlarının karmaşık sayı değerleri
I_{wA}, I_{wB}, I_{wC}	:OG tarafı sargı akımlarının karmaşık sayı değerleri
I_{A0}, I_{B0}, I_{C0}	:OG tarafından görünen boşta çalışma akımlarının karmaşık sayı değerleri
P_{LL}, P_{dc}, P_{str}	:Yük, ohmik ve stray kayıpları
I_w	:Sargı akımı
R_{dc}, R_{str}, R_{ac}	:Sargının DA, stray ve AA dirençleri
θ_{ref}, θ_w	:Referans ve ortalama sargı sıcaklıkları
$R_{dc-ref}, R_{dc-\theta}$:Sargının referans sıcaklıktaki ve θ sıcaklığındaki dirençleri
θ_k	:Bakır için 234.5 °C ve alüminyum için 225 °C olan sıcaklık sabiti
$R_{str-\theta}, R_{str-ref}$:Sargının θ ve referans sıcaklığındaki stray dirençleri
$R_{ac-\theta}$:Sargının θ sıcaklığındaki AA direnci
$Q_{LOST,0}$:Yağın dış ortama verdiği ısı enerjisi
$\theta_{AO-R}, \theta_{A-R}$:Ortalama yağ sıcaklığının ve çevre sıcaklığının anma değerleri
θ_{AO}, θ_A	:Ortalama yağ sıcaklığı ve çevre sıcaklığı
P_T	:Transformatörün anma yükündeki kayıpları
Δt	:Zaman aralığı
y, z	:Yağ sıcaklık sabitleri
θ_{TO}, θ_{BO}	:Tepe ve alt yağ sıcaklıkları
$\theta_{TO-R}, \theta_{BO-R}$:Tepe ve alt yağ sıcaklıklarının anma değerleri
θ_H	:En sıcak-nokta sıcaklığı
H	:ESNS faktörü
θ_w	:Ortalama sargı sıcaklığı
g_r	:Anma durumunda OSS değeri ile ortalama yağ sıcaklığı arasındaki fark
F_{AA}	:Yaşlanma hızlandırma faktörü
F_{EQU}	:Toplam zaman dönemindeki eşdeğer yaşlanma faktörü
$F_{AA,n}$:Yaşlanma hızlandırma faktörünün n. zaman aralığındaki değeri
Δt_n	:n. zaman aralığı
K	:Yüklenme oranı
$I_{gerçek}, I_n$:Gerçek ve anma akım değerleri

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

OSS	:Ortalama sargı sıcaklığı
TYS	:Tepe yağ sıcaklığı
ESNS	:En sıcak-nokta sıcaklığı
DP	:Polimerizasyon derecesi
KSD	:Karmaşık sayılara dönüşüm işlemi
Yy	:Yıldız-yıldız bağlantı grubu
Dy	:Üçgen-yıldız bağlantı grubu

OG	:Orta gerilim
AG	:Alçak gerilim
AA	:Alternatif akım
DA	:Doğru akım
IEEE	:The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	:International Electrotechnical Commission
ONAN	:Doğal yağ ve doğal hava soğutma

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma EPDK AR-GE komisyonu tarafından Temmuz 2021 dönemi 02/21/04-02 karar sayılı “Dağıtım Transformatörlerinde Hot-Spot Sıcaklığının Hesaplanması İçin Yeni Bir Yöntem ve Ömür Sayacı Geliştirilmesi Pilot Uygulaması” isimli proje ile desteklenmiştir.

Bu çalışma Sinop Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: MYO-1901-21-001, 2021.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hasan DİRİK: Yöntemin geliştirilmesini, makalenin yazımını ve cihazın saha montajını gerçekleştirmiştir.

Cenk GEZEGİN: Makalenin yazımını yapmış cihazın laboratuvar testlerini ve saha montajını gerçekleştirmiştir.

Okan ÖZGÖNENEL: Yöntemin geliştirilmesini ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir

Ali GEYİKOĞLU: Prototip cihazın saha montajını yapmıştır.

İdris SANCAKTAR: Prototip cihazın imalatını ve yazılımlarını yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özgönenel, O. (2002). Güç Transformatörü Korumasında İkinci Harmoniğin Etkisinin Azaltılması. *Politeknik Dergisi*, 5(3), 221-225.
- [2] Behkam, R., Moradzadeh, A., Karami, H., Nadery, M. S., Mohammadi Ivatloo, B., Gharehpetian, G. B., & Tenbohlen, S. (2023). Mechanical Fault Types Detection in Transformer Windings Using Interpretation of Frequency Responses via Multilayer Perceptron. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 11(1), 11-21.
- [3] Ali, M. S., Omar, A., Jaafar, A. S. A., & Mohamed, S. H. (2023). Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review. *Electric Power Systems Research*, 216, 109064.
- [4] Li, C., Chen, J., Yang, C., Yang, J., Liu, Z., & Davari, P. (2023). Convolutional Neural Network-Based Transformer Fault Diagnosis Using Vibration Signals. *Sensors*, 23(10), 4781.
- [5] Betta, G., Pietrosanto, A., & Scaglione, A. (2001). An enhanced fiber-optic temperature sensor system for power transformer monitoring. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 50(5), 1138-1143.
- [6] Soni, R., & Mehta, B. (2023). A review on transformer condition monitoring with critical investigation of mineral oil and alternate dielectric fluids. *Electric Power Systems Research*, 214, 108954.
- [7] Çınar, M. A. (2019). Transformatörlerde Kazan Kayıplarının Azaltılmasında En Uygun Yatay Şönt Eleman Boyutu ve Konumunun Parametrik Sonlu Elemanlar Analizleri ile İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 729-736.
- [8] Karademir, A., & Eker, M. K. (2016). Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 389-397.
- [9] Kachler, A. J. and Hohlein, I., “Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 21(2), 15-21, (2005).
- [10] Duval, M., De Pablo, A., Atanasova-Hoehlein, I. and Grisaru, M., “Significance and detection of very low degree of polymerization of paper in transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 33(1), 31-38, (2017).
- [11] Susa, D. and Nordman, H., “A simple model for calculating transformer hot-spot temperature”, *IEEE transactions on power delivery*, 24(3), 1257-1265, (2009).
- [12] Arabul, A. Y. and Senol, I., “Development of a hot-spot temperature calculation method for the loss of life estimation of an ONAN distribution transformer”, *Electrical Engineering*, 100, 1651-1659, (2018).
- [13] *IEC Standards*, “Power Transformers-Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers”, IEC 60076-2, 1-95, (2011).
- [14] Abu-Elanien, A. E. and Salama, M. M. A., “A Monte Carlo approach for calculating the thermal lifetime of transformer insulation”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 481-487, (2012).
- [15] Radakovic, Z. and Feser, K., “A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4), 1284-1292, (2003).
- [16] Isha, M. T. and Wang, Z., “Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide”, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 1017-1020, (2008).
- [17] Rommel, D. P., Di Maio, D. and Tinga, T., “Transformer hot spot temperature prediction based on basic operator

- information”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124, 106340, 1-15, (2021).
- [18] Josue, F., Arifianto, I., Saers, R., Rosenlind, J. and Hilber, P., “Transformer hot-spot temperature estimation for short-time dynamic loading”, *IEEE international conference on condition monitoring and diagnosis*, 217-220, (2012).
- [19] Deng, Y., Ruan, J., Quan, Y., Gong, R., Huang, D., Duan, C. and Xie, Y., “A method for hot spot temperature prediction of a 10 kV oil-immersed transformer”, *IEEE Access*, 7, 107380-107388, (2019).
- [20] Nicola, M., Nicola, C. I., Sacerdoțianu, D., Hurezeanu, I. and Duță, M., “Monitoring system for power transformer windings hot spot temperature using fiber optic sensors, Kalman filter and integration in SCADA system”, *American Journal of Signal Processing*, 8(2), 33-44, (2018).
- [21] Reddy, A. S. and Vijaykumar, M., “Hottest spot and life evaluation of power transformer design using finite element method”, *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 4(3), 238-243, (2008).
- [22] Susa, D., Lehtonen, M. and Nordman, H., “Dynamic thermal modelling of power transformers”, *IEEE transactions on Power Delivery*, 20(1), 197-204, (2005).
- [23] **IEEE Standards Association**, “IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators”, IEEE Std C57.91-2011, 1-123, 7 March 2012.
- [24] Gezeğin, C., Özgonenel, O. and Dirik, H., “A Monitoring Method for Average Winding and Hot-Spot Temperatures of Single-Phase, Oil-Immersed Transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(5), 3196-3203, (2020).
- [25] **IEEE Standards Association**, “IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Liquid-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings”, IEEE Std C57.119-2018, 1-49, (2018).