

TRANSFORMATÖRLERİN YAKLAŞIK ÖMÜR BEKLENTİLERİNİN ANALİZİ

Yıldırım Özüpak

Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 21640, Diyarbakır, Türkiye

Öz

Üç fazlı dağıtım transformatörleri elektrik dağıtım sistemlerinde, genel olarak nominal frekansta ve doğrusal yükte kullanılmak üzere tasarlanırlar. Doğrusal olmayan yüklerden dolayı elektrik güç sisteminde harmonikler meydana gelmektedir. Bir AC güç sistemindeki harmonik bileşen, sistemin temel frekansının tam sayı katına eşit bir frekansa sahip periyodik bir dalga formunun sinüzoidal bileşeni olarak tanımlanır. Bu harmonikler, nominal çalışma şartları için tasarlanan transformatörlerin farklı bir çalışma performansı sergilemesine neden olurlar. Transformatör ömrü kaybı tahmini, yalıtım malzemeleri ile elde edilen bozulma oranına dayanmaktadır. Bir transformatörün ömür kaybının yaklaşık %50'si doğrusal olmayan yük akımının ürettiği termal gerilmelerden kaynaklanır. Doğrusal olmayan yüklerin kullanılmalarının artması ile birlikte ortaya çıkan harmonik yükler, transformatörün daha fazla ısınmasına ve düşük güç kalitesine yol açar. Harmonik bozulma sebebiyle gereksiz sargı kaybı ve sıcaklık artışı da meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayanan ANSYS@Maxwell programı ile gerçek değerler kullanılarak doğrusal olmayan yük altındaki dağıtım transformatörünün kayıplarının analizi ve değerlendirilmesi sunulmaktadır. Burada, birim başına, nominal güç ve akım değerlerinin, sırasıyla sinüzoidal uyarım altında transformatörün nominal yük kaybı ve transformatörün primer tarafının nominal akımı olarak seçildiğine dikkat edilmelidir. Yük kayıpları ayrıca gerçek yük ve harmoniğin etkileri dikkate alınarak hesaplanır. Toplam girdap akımı kaybı ve diğer kaçak kayıplar da girdap akımı kaybı için harmonik kayıp faktörü ve diğer kaçak kayıplar için harmonik faktör kullanılarak belirlenir. Aynı şekilde, harmoniklerin neden olduğu ek kayıplar ve transformatörün ömrü yaklaşık olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada yük altında çalışan transformatörlerin harmonik bozulmalarının neden olduğu kayıpların verimli ömürleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve transformatörlerin faydalı çalışma ömürleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Simülasyondan elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, elektrikli cihazların ürettiği akım harmoniklerinin neden olduğu yükler ne kadar fazla olursa transformatör ömrünün o kadar düşük olacağını görülmüştür. Harmonik bozulmadaki artışın, transformatörün kayıplarını artıracak ve ömrünü kısaltacağını göstermektedir. Kullanılan yöntem tasarlanan ve analiz edilen transformatörün sonuçlarını doğrulamıştır. Bu durum bu yöntemin tasarım ve analiz konusunda kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, harmonik yük, ömür kaybı, manyetik akım

ANALYSIS OF APPROXIMATE LIFE EXPECTATIONS OF TRANSFORMERS

Extended Abstract

Three-phase distribution transformers are designed for use in electrical distribution systems, generally at nominal frequency and linear load. Harmonics occur in the electrical power system due to non-linear loads. The harmonic component in an AC power system is defined as the sinusoidal component of a periodic waveform with a frequency equal to an integer multiple of the fundamental frequency of the system. These harmonics cause transformers designed for nominal operating conditions to exhibit a different operating performance. Transformer life loss estimation is based on the rate of deterioration obtained with insulating materials. About 50% of a transformer's life loss is caused by thermal stresses generated by the non-linear load current. Harmonic loads that occur with the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):

Yıldırım ÖZÜPAK; Dicle University, Silvan Vocational School, Department of Electrical and Energy, 21000, Diyarbakır-Turkey.

Geliş (Received) : 01.01.2021

Kabul (Accepted) : 26.01.2021

Basım (Published) : 31.07.2021

increasing use of non-linear loads cause the transformer to overheat and lower power quality. Due to harmonic distortion, unnecessary winding loss and temperature increase also occur. In this study, analysis and evaluation of the losses of the distribution transformer under nonlinear load using the ANSYS @ Maxwell program based on the Finite Element Method (FEM) are presented. It should be noted here that the nominal power and current values per unit are selected as the nominal load loss of the transformer under sinusoidal excitation and the nominal current of the primary side of the transformer, respectively. Load losses are also calculated taking into account the effects of actual loads and harmonics. The total eddy current loss and other stray losses are also determined using the harmonic loss factor for eddy current loss and the harmonic factor for other stray losses. Also, additional losses caused by harmonics and the life of the transformer are approximately determined. In this study, the effects of losses caused by harmonic distortions on the productive life of transformers operating under load have been examined and the useful working life of transformers has been determined approximately. When the results obtained from the simulation are analyzed, it is seen that the more the loads caused by the current harmonics produced by the electrical devices, the lower the transformer life will be. It shows that the increase in harmonic distortion will increase the losses of the transformer and shorten its life. The method used verified the results of the transformer designed and analyzed. This shows that this method can be used in design and analysis.

Keywords: Transformer, harmonic load, loss of life, magnetic flux

1. Giriş

Son yıllarda lineer olmayan yüklerin artmasıyla güç sistemindeki harmonikler önemli ölçüde artmıştır. Doğrusal olmayan yüklerin güç sistemindeki varlığı, transformatörlerde yüksek kayıplara ve transformatörlerin kullanım ömründe kısaltmaya neden olur. Harmonik bozulma nedeniyle artan kayıplar, transformatörde beklenmedik sıcaklık artışına neden olabilir. Beklenmedik sıcaklık değerleri transformatörün verimli çalışma ömrünü kısaltmaktadır. Bu durum, transformatörün beklenen ömür beklentisinde azalmaya ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Harmonik yük içeriğini tahmin etmenin üç yöntemi vardır. Bunlar, tepe faktörü, harmonik faktör (toplam harmonik bozulma yüzdesi -% THD) ve K-Faktördür. İlk iki yöntem en yaygın kullanılan harmonik tahmin yöntemleri olmakla birlikte bazı sınırlamaları vardır. Çünkü bu yöntemlerde harmonik frekanslar dikkate alınmaz. K faktörü ile harmonik tahmini etkili bir yöntemdir fakat K faktörünün hesaplamaları çok karmaşıktır (Özüpak & Mamiş, 2019). Bir transformatörün harmonik bozulma bileşeninin artması, ek sıcaklık kayıplarına, yalıtım malzemesinin bozulmasına, transformatörün verimli çalışma ömrünün kısaltılmasına, daha yüksek sıcaklık değerlerine, güç faktörünün azalmasına, transformatörde güç kayıplarına ve performans eksikliğine neden olabilmektedir (Sadati vd., 2008). Bu sorunları önlemek için, doğrusal olmayan yükü besleyen transformatörün nominal kapasitesi azaltılmalıdır (Muthanna vd., 2006). Dağıtım transformatörü üreticileri, harmonik yük akımlarının etkilerine dayanabilen bir tasarım olan K-Faktörü adlı bir derecelendirme sistemi geliştirmişlerdir (Lee vd., 2010). Harmonik gerilim, manyetik çekirdeklerdeki kayıpları arttırmaktadır. Harmonik akımlar ise transformatörün sargılarındaki kayıpları arttırmaktadır.

Genel olarak, harmonik kayıplar, sargılardaki artan ısı dağılımından meydana gelir. Bunların her ikisi de rms akımının karesinin yanı sıra girdap akımları ve çekirdek kayıplarının bir fonksiyonudur. Meydana gelen ek sıcaklık, transformatörün yalıtım malzemesinin ömrünü azaltmada önemli bir etkiye sahip olabilir. Sinüzoidal olmayan bir yük akımı tarafından üretilen artan girdap akımı kayıpları, anormal sıcaklık artışına ve dolayısıyla aşırı sargı kayıplarına neden olabilir. Harmoniklerin, güç transformatörlerinin verimli ömürlerine etkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Soh vd., 2013). Bu çalışmada harmonik limitleri standartları dikkate alınmıştır. Harmoniklere bağlı olarak transformatörün kayıpları ve ömür kayıpları SEY ile incelenmiştir.

2. Harmonik Yük Kayıpları ve Ömür Kaybı

Bir AC güç sistemindeki harmonik bileşen, sistemin temel frekansının tam sayı katına eşit bir frekansa sahip periyodik bir dalga formunun sinüzoidal bileşeni olarak tanımlanır. Ana harmonik kaynaklar, üç ekipman kategorisindedir; güç sistemi ekipmanları, endüstriyel yükler ve konut yükleri. IEEE 519: 1992 ile tanımlanan harmonik kaynaklar arasında güç dönüştürücüleri, ark fırınları, statik VAR kompansatör, dağıtım üretim invertörleri, gücün elektronik faz kontrolü, anahtarlamalı mod güç kaynakları ve darbe genişliğinde modülasyonlu

sürücüler bulunmaktadır (IEEE 519, 1992). Bu standart, yeni harmonik kaynağın ölçüm ve detaylı modelleme ve simülasyon çalışmaları ile değerlendirilmesi önerisiyle sona ermektedir.

Transformatörler, temel frekansta minimum kayıpla bağlı yüklerle gerekli gücü verecek şekilde tasarlanmıştır. Transformatör kayıpları, denklem (1)'de gösterildiği gibi genellikle yüksüz kayıp ve yük kaybı olarak sınıflandırılır.

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (\text{Denklem 1})$$

Burada P_T toplam kayıp, P_{NL} yüksüz durumdaki kayıp ve P_{LL} ise yük altında meydana gelen kayıplardır.

Yük kaybı veya uyarma kaybı, çekirdeğin gerilim uyarımı, manyetik histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanan kayıplardır. Yük kayıpları veya empedans kaybı, sargılar, nüve, nüve kelepçeleri, manyetik kalkan, muhafaza veya tank duvarlarında meydana gelen kayıplardan oluşmaktadır. Elektromanyetik akının neden olduğu I^2R kaybı ve başıboş kayıp olarak alt bölümlere ayrılmıştır. Böylece, toplam başıboş kayıp, sargılar dışındaki bileşenlerde sargı başı kaybı ve başıboş kaybı olarak alt bölümlere ayrılır. Sargıların başıboş kaybı, sarmallar veya paralel sargı devreleri arasındaki dolaşım akımlarından kaynaklanan sargı iletken kordonu kaybını içerir. Toplam yük kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{LL} = P_{I^2R} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (\text{Denklem 2})$$

Burada P_{I^2R} bakır kayıplarını, P_{EC} eddy kayıplarını, P_{OSL} ise diğer kaçak kayıpları temsil etmektedir.

Başlangıç durumunda primer ve sekonder nominal akımları şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$I_{1-rated} = \frac{S(kVA)}{\sqrt{3}V_1} \quad (\text{Denklem 3})$$

$$I_{2-rated} = \frac{S(kVA)}{\sqrt{3}V_2} \quad (\text{Denklem 4})$$

Eğer I^2R yerine yazılırsa;

$$P_{I^2R-rated} = K[I_{1-rated}^2 R_1 + I_{2-rated}^2 R_2] \quad (\text{Denklem 5})$$

Burada K
tek fazlı transformatörler için =1
üç fazlı transformatörler için =1.5 alınmaktadır.

$$P_{LL-rated} = P_{I^2R-rated} + P_{TSL-rated} \quad (\text{Denklem 6})$$

$$P_{TSL-rated} = P_{EC-rated} + P_{OSL-rated} \quad (\text{Denklem 7})$$

Burada,
 I_1 = transformatörün birincil tarafındaki akım,
 I_2 = transformatörün sekonder tarafındaki akım
 R_1 = birincil dc direnci
 R_2 = ikincil dc direnci
 P_{TSL} = toplam başıboş kayıptır.

Yağlı tip transformatörler için IEEE Standardına göre, girdap akımı kaybının toplam kaçak kayıpların yaklaşık 0.33'ü olduğu varsayılır (IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Std C57.91 1995).

$$P_{EC-rated} = 0.33P_{TSL-rated} \quad (\text{Denklem 8})$$

$$P_{OSL-rated} = P_{TSL-rated} - P_{EC-rated} \quad (\text{Denklem 9})$$

3. Harmonik Kayıp Faktörü

Harmonik kayıp faktörü, F_{HL} , sargı girdap kaybı ve diğer kaçak kayıplar üzerindeki mevcut harmonik etkinin önemli bir göstergesidir. Harmonik kayıp faktörü, temel veya rms akımına normalleştirilir.

Sargı girdap akımı için F_{HL} , harmoniklerden kaynaklanan toplam girdap akımı kayıplarının güç frekansındaki girdap akımı kayıplarına oranıdır. F_{HL-STR} , harmoniğe bağlı diğer kaçak kaybın güç frekansındaki diğer kaçak kayıplara oranıdır. Girdap akımı kaybı, bir F_{HL} faktörü kadar artırılır ve diğer kaçak kayıp, harmoniklerin varlığında bir F_{HL-STR} faktörü ile artar. Sinüzoidal olmayan durumdaki transformatörün yük kayıpları denklem (10)'da gösterildiği gibidir;

$$P_{LL} = P_{I^2R-rated} + F_{HL}P_{EC-rated} + F_{HL-STR}P_{OSL-rated} \quad (\text{Denklem 10})$$

Bu faktör aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (\text{Denklem 11})$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (\text{Denklem 12})$$

Burada F_{HL} girdap akımları harmonik kaybını, F_{HL-STR} ise diğer kayıplar için harmonik faktörü ifade etmektedir.

4. Transformatörün Yaşam Kaybı Hesaplaması

Transformatör ömrü kaybı tahmini, yalıtım malzemeleri ile elde edilen bozulma oranına dayanmaktadır. Bir transformatörün ömür kaybının yaklaşık %50'si doğrusal olmayan yük akımının ürettiği termal gerilmelerden kaynaklanır (Samesime vd., 1995). En sıcak nokta sargı sıcaklığı şu şekilde hesaplanır;

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-rated} \left(\frac{P_{LL-C+PNL}}{P_{LL-rated+PNL}} \right)^{0.8} \quad (\text{Denklem 13})$$

$$\theta_g = (\theta_w - \theta_{TO-rated}) \left(1 + \frac{F_{HL}(P_{EC-ratedpu})}{1+P_{EC-ratedpu}} \times P_{LL-pu} \right)^{0.8} \quad (\text{Denklem 14})$$

En sıcak nokta sıcaklığı;

$$\theta_H = \theta_{TO} + \theta_g + \theta_A \quad (\text{Denklem 15})$$

şeklinde olur.

Burada;

θ_{TO} = yağ sıcaklığı yükselmesi,

θ_w = sargı sıcaklığı artışı,

θ_A = ortam sıcaklığı

θ_g = en yüksek yağ sıcaklığının üzerinde en sıcak nokta iletken yükselmesi,

θ_H = sıcak nokta sıcaklığı

Bir transformatörün bağlı yaşlanma faktörü, yaşam kaybı ve gerçek yaşam şu şekilde ifade edilebilir [14];

$$F_{AA} = \exp \left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right) \quad (\text{Denklem 16})$$

$$\%LOL = \frac{F_{AA} \times t \times 100}{normal_yalitim_ömrü} \quad (Denklem 17)$$

$$Life(pu) = 9.8 \times 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right)} \quad (Denklem 18)$$

Transformatörün gerçek ömrü = Ömür(pu) x normal yalıtım ömrü = normal yalıtım ömrü (yıl)/ F_{AA}

Burada,

F_{AA} = bağıl yaşlanma faktörü

% LOL = yüzde olarak ömür kaybı

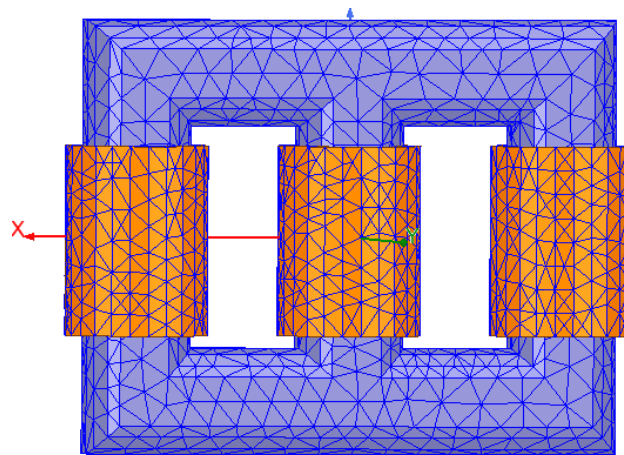
t = verilen zaman aralığıdır.

5. Transformatörün Modellenmesi ve Analizi

Transformatör Sonlu Elemanlar Yöntemi ile ANSYS@Maxwell ortamında modellenmiştir. Modelleme için tüm değerler program ortamında tanıtılmıştır. Analiz için veriler, 0.05sn aralıklarla kaydedilmiştir. Kaydedici; frekans, gerilim, akım, toplam harmonik bozulma, aktif güç, reaktif güç, görünen güç, gerilim harmoniği, akım harmoniği, gerçek güç faktörü ve yer değiştirme güç faktörü gibi büyüklükleri ölçmek üzere ayarlanmıştır. Tablo 1'de transformatörün özellikleri verilmiştir. Şekil 1'de tasarlanan transformatörün 3-D modeli sunulmuştur.

Tablo 1. Transformatöre ait özellikler.

Primer Gerilimi	33.000 V
Sekonder Gerilimi	11.000 V
Yüksüz Kayıp	12.500 W
Yük Kayıpları	97.000 W
YG Sargı Direnci	1.7 Ω
AG Sargı Direnci	40 m Ω
YG Faz Akımı	152 A
AG Faz Akımı	785 A
I_o	% 0.44
Normal İzolasyon Ömrü (yıl)	23



Şekil 1. Transformatörün 3-D modeli ve ağ örgüsü.

Modellenmiş transformatörün sargı ve nüve kayıpları bir alt harmonik ile üst üste getirilen birincil faz-nötr anma sinüzoidal gerilimleri altında yüksüz durum için analiz edilir. Verilen harmonikli uyarma gerilimleri aşağıda verilmiştir.

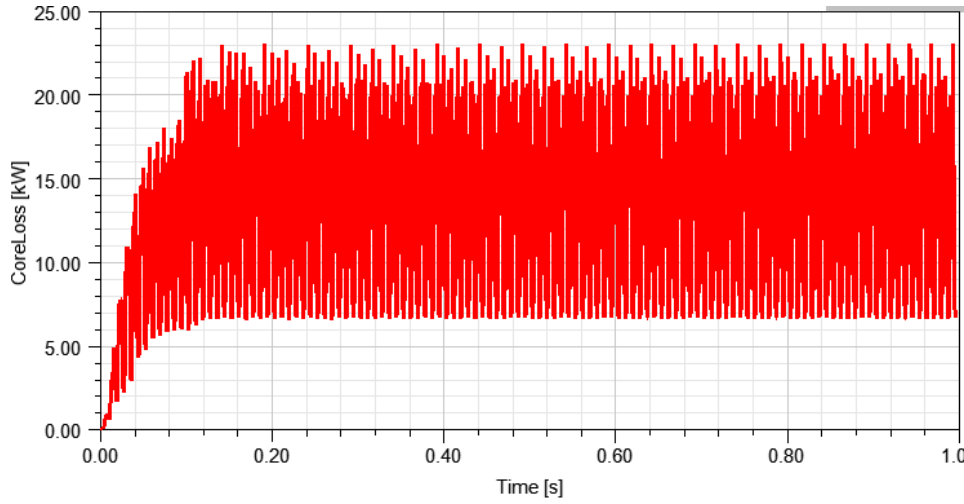
$$V_a = \sqrt{2}V_s \cos(2\pi f_s t) + \sqrt{2}/2 V_R \cos(100\pi t) \quad (\text{Denklem 19})$$

$$V_b = \sqrt{2}V_s \cos\left(2\pi f_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}V_R \cos\left(100\pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{Denklem 20})$$

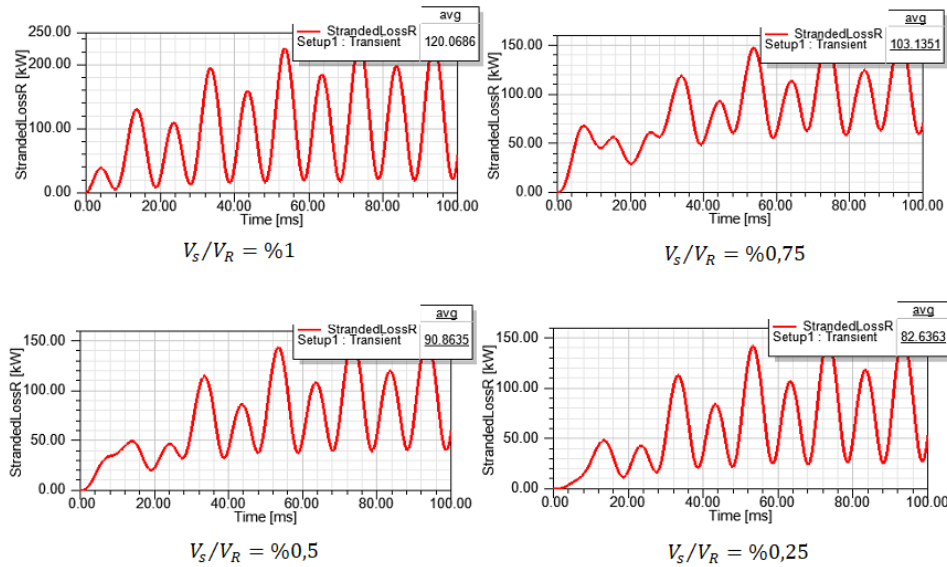
$$V_c = \sqrt{2}V_s \cos\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}V_R \cos\left(100\pi t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{Denklem 21})$$

Burada, V_R temel bileşen, yani incelenen transformatörün faz-nötr geriliminin nominal değeridir. V_s harmonikli gerilimin rms değeri, f_s harmonik frekansdır. Burada üçüncü, beşinci ve yedinci harmonikler incelenmiştir.

Bu analiz için V_s/V_R oranı %0.25 ile %1 arasında değiştirilmektedir. $V_s/V_R = \%1$ için, nüvenin maksimum akı yoğunluğunun 1,97 T civarında olduğunu göstermektedir. Tablo 2’de harmonik analizlerden elde edilen sonuçların normal çalışma koşullarındaki sonuçlarla ve teorik sonuçlarla karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 2’de Transformatörün birim başına düşen günlük yükü verilmiştir. Şekil 3’te Her harmonik dalgası için bakır kayıpları verilmiştir.



Şekil 2. Transformatörün birim başına düşen dalgalı yükü.



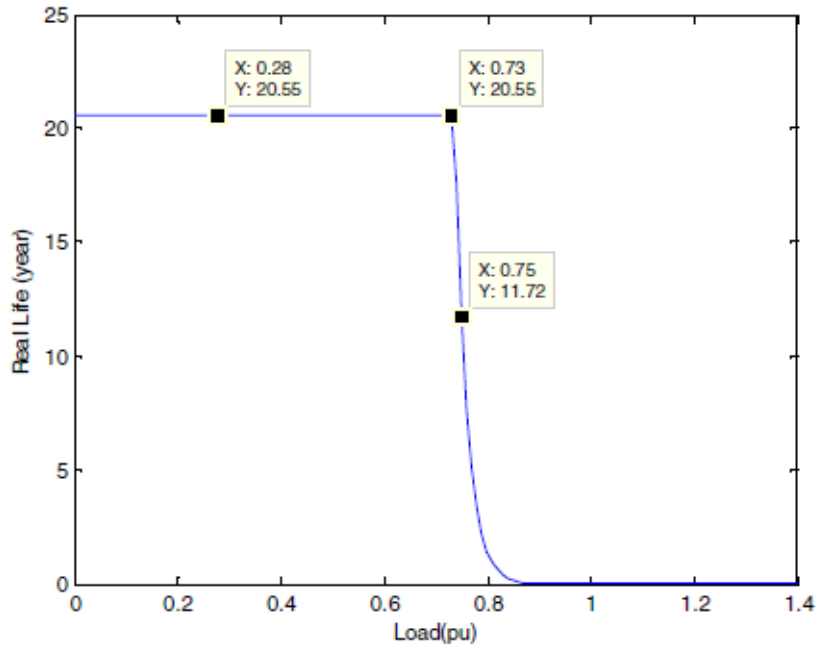
Şekil 3. Transformatörün harmoniklerli yük kayıpları.

Belirtilen her durum için modelin analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sonuçların karşılaştırılması

	V_s/V_R				
	%1	%0,75	%0,5	%0,25	
Nüve kaybı (kW)	12.44	12.432	12.42	12.418	
Harmonikli bakır kaybı (kW)	120.01	103.14	90.86	82.63	
Harmoniksiz bakır kaybı (kW)					97.5

V_s/V_R % 0.25'ten % 1'e kadar çıkarılmasıyla, sargı kayıpları artmış, çekirdek kayıpları ise neredeyse hiç değişmemiştir. Burada, birim başına, nominal güç ve akım değerlerinin, sırasıyla sinüzoidal uyarım altında transformatörün nominal yük kaybı ve transformatörün primer tarafının nominal akımı olarak seçildiğine dikkat edilmelidir. Yük kayıpları ayrıca gerçek yük ve harmoniğin etkileri dikkate alınarak hesaplanır. Toplam girdap akımı kaybı ve diğer kaçak kayıplar da girdap akımı kaybı için harmonik kayıp faktörü ve diğer kaçak kayıplar için harmonik faktör kullanılarak belirlenir. Sonuç, harmonik yük akımının güç transformatörü üzerinde zararlı olabileceğini göstermektedir. Bu durum, harmonik mevcut olduğunda kayıpların artacağını göstermektedir. Birim yükleme miktarı arttığı zaman yaşlanma hızlanma faktörü de artar. Bu, transformatör ömrünün normal ömründen daha az olacağı anlamına gelir. Sıcaklığın referans değerlerinin aralığında olmamasıyla yaşlanma daha da hızlı olacaktır. Transformatörün yaşlanma eğrisi Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 4. Transformatörün yüke göre ömür kaybı (Said vd., 2010).

6. Sonuç

Bu çalışmada yük altında çalışan transformatörlerin harmonik bozulmaların neden olduğu kayıpların verimli ömürleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve transformatörlerin faydalı çalışma ömürleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Simülasyondan elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, elektrikli cihazların ürettiği akım

harmoniklerinin neden olduğu yükler ne kadar fazla olursa transformatör ömrünün o kadar düşük olacağını görülmüştür. Daha yüksek THD, transformatör kayıplarının ve sıcak nokta sıcaklığının artması nedeniyle transformatörün ömrünü de kısaltır.

Harmonik standart, harmonik akımın izlenmesi gerektiğini gösterir. IEC TR 61000-3-4: 1998 Standardına karşılık gelen bu maksimum MS 1555: 2002 sınırları, olabilecek güç sistemi ekipmanını korumak için en yüksek toplam harmonik bozulma ile karşılaşan hem müşteri hem de tedarikçiler için bir kılavuz olarak kullanılmalıdır. Yüksek harmonik akımlardan etkilenene transformatörün güç kaynağının kalitesini düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca harmoniklerin transformatörün yalıtım malzemesine zarar verdiği ve bu nedenle transformatörün verimli çalışma ömrünü de azalttığı görülmüştür.

Kaynaklar

1. **De La Rosa, F. (2006).** *Harmonics and power systems*, Boca Raton: CRC press. 184 p.
2. **Emanuel, A.E. & Wang, X. (1985).** "Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. March .628 – 636.
3. **IEEE (1995).** Recommended Practice for Establishing L Type Power and Distribution Transformer Capab Nonsinusoidal Load Currents, IEEE Std C57.110-2.
4. **IEEE (1995).** Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Std C 57-91.
5. **IEEE 519 (1992).** IEEE Recommended Practices and Requirements f in Electrical Power Systems,
6. **Lee, M., Abdullah, H. A., Jofriet, J. C. & Patel, D. (2010).** Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers, *Electric Power Systems Research*, 80(1): 121–129.
7. **Malaysian Standard (2009).** Electromagnetic Compati Limitation of Emission of Harmonic Currents in Supply Systems for Equipment with Rated Curren Department of Standards Malaysia.
8. **Marzband, M. & Shaikholeslami, A. (2006).** A Pro Modeling of Distribution Network Transformers a Loss in the Transformers and the Amount of Life, *International Conference on Power Ele Energy Systems, PEDES '06*. 12-15 Dec.
9. **Muthanna K.T., Sarkar, A., Das, K. & Waldner K. (2006).** Transformer Insulation Life Assessment, *IEEE Trans. Power Deliv.* 21(1): 150 – 156.
10. **Özüpak, Y. & Mamiş, S. (2019).** Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(10): 1478-1484. Doi: 10.1002/tee.22966.
11. **Pierrat, L., Resende, R.J. & Santana, J. (1996).** Power transformers life expectancy under distorting power electronic loads, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. ISIE '96*. 17-20 June. Warsaw: IEEE, 578 – 583.
12. **Radmehr, M., Farhangi, S. & Nasiri, A. (2006).** Effect of Power Quality Distortion on Electrical Drives and Transformer Life in Paper Industries: Simulation and Real Time Measurements, *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 18-23 June, Iran: IEEE, 1 - 9.
13. **Said, D.M., Nor, K.M. & Majid, M.S. (2010).** Analysis of Distribution Transformer Losses and Life Expectancy using Measured Harmonic Data, Conference Paper · DOI: 10.1109/ICHQP.2010.5625404, October 2010.
14. **Sadati, S.B., Tahani, A., Jafari, M. & Dargahi, M. (2008).** "Derating of Transformers under Non-sinusoidal Loads", in: *11th International Conferenec on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM*, pp.263-268.
15. **Samesima, M.I., Wilson Resende, J. & Araujo, S.C.N (1995).** Analysis of transformer loss of life driving nonlinear industrial loads by the finite elements approach, *IEEE Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95*. 8-12 Oct. 1995. Orlando, FL: IEEE, 2175 – 2179.
16. **Soh T.L.G, Said D.M., Ahmad, N., Nor, K.M & Salim, F. (2013).** Experimental study on the impact of harmonics on transformer, *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp.686-690.
17. **Teke, I., Özüpak, Y., Mamiş, M., & Plant, P. (2019).** Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 8(01), 24451-24460.