

Harmonikli Sistemin Güç Transformatörü Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Harmonic System on Power Transformer

Feyyaz ALPSALAZ¹, M. Salih MAMIŞ², Atilla MAMIŞ³

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Akdağmadeni Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü
feyyaz.alpsalaz@yobu.edu.tr,

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
mehmet.mamis@inonu.edu.tr

³Eren Transformer, Elektrik Dizayn Mühendisi
proje4@erentrafo.com.tr

Özet

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte güç sistemleri içerisindeki yüklerde çeşitlilik kazanmıştır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte doğrusal olmayan yüklerde artış olduğu görülmüştür. Doğrusal olmayan yüklerin gerilim ve akım karakteristikleri doğrusal değişim göstermediğinden, sistemlerde akım ve gerilimlerde harmonik oluşumuna neden olur. Bu harmonikler fazladan enerji kaybına, ısınmalara ve yalıtım arızalarına yol açmaktadır. Güç sistemlerinin temel yapı taşlarından biri olan transformatörler harmonik yük akımı taşınmaktadır. Harmonik akımları transformatörde ekstra ısınmalara neden olduğu bilinmektedir. Transformatörler güç sistemlerinde sürekli olarak çalıştığı göz önüne alındığında bu kayıplar hem kayıpların artmasına hem de transformatör ömrünün azalmasına önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, gerçek boyutları, tasarımı ve etiket değerleri bilinen bir güç transformatörünün ANSYS@Maxwell yazılım ve simülasyon programı kullanılarak 3D tasarımı oluşturulmuştur. Tasarım analizi Sonlu Elemanlar Yönetim (SEY) ile gerçekleştirilmiş olup, çeşitli harmonik seviyeleri için kullanılan Toplam Harmonik Bozulması (THD) değerleri için elektromanyetik durumları ve kayıpları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: THD, Transformatör, Ansys@Maxwell, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Transformatör Kayıpları

Abstract

With the development of technology, the loads in power systems have gained diversity. It has been observed that there is an increase in nonlinear loads with the developments in semiconductor technology. Nonlinear loads cause harmonic formation in current and voltages in systems since voltage and current characteristics do not change linearly. These harmonics cause extra energy

loss, overheating and insulation failures in the systems. Transformers, one of the basic building blocks of power systems, carry harmonic load current. Harmonic currents cause extra heating in the transformer. Considering that transformers operate continuously in power systems, these losses play an important role in both increasing losses and diminishing transformer life. In this study, a 3D design of a power transformer with known real dimensions, design and label values was created using ANSYS@Maxwell software. Design analysis was performed with Finite Element Method (FEM) and electromagnetic states and losses were investigated for Total Harmonic Distortion (THD) values for various harmonic levels.

Keywords: THD, Transformer, Ansys@Maxwell, Finite Element Method, Transformer Losses

1. Giriş

Transformatörler, güç sistemi içerisindeki en temel bileşenlerden biridir. Transformatörler güç sistemlerdeki genellikle lineer yükleri beslemek için sinüzoidal güç frekansı olan 50 veya 60 Hz çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yarı iletken teknolojiyle beraber güç elektroniği cihazlarının ortaya çıkması ve yaygınlaşması endüstriyel uygulamalardan ticari uygulamalara kadar tüm sektörlerdeki doğrusal olmayan yüklerin hızlı bir şekilde çoğalmasına neden olmuştur. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklı oluşan harmonikler, orijinal sinüs şeklindeki şebeke sinyalinde çeşitli bozulmalara neden olmaktadır. Bu bozulmalar, şebekenin temel frekansının katı şeklinde olan daha küçük genlik değerine sahip sinüs sinyallerinde akım ve gerilim dalga formlarında bozulmalara yani harmoniklere neden olur [1]. Bozulan dalga biçimi bu sinüzoidlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Bozulmuş dalga biçimini analiz etmek ve dalga biçimini ayırtmak için Fourier serileri kullanılır [2]. Fourier'e göre dalga formunun pozitif ve negatif

yarım çevrimi aynı şekillere sahip ise, Fourier serisi sadece tek harmonikler içerir. Bununla birlikte, harmoniklerin varlığı ya yük ekipmanında ya da ölçümlerde kullanılan dönüştürücülerde bir hata olduğu anlamına gelir [3]. Oluşan harmonik akımlar ve harmonik gerilimler, transformatörlerde istenmeyen ek kayıplar ve aşırı ısı oluşturur. Harmoniklerden kaynaklanan aşırı sıcaklık artışı, transformatörlerin yalıtımlarının yaşlanmasını hızlandırarak hizmet ömürlerini kısaltır [4]. Bu nedenle, harmonik oluşumu, elektrik şirketleri için giderek artan bir şekilde büyük bir endişe haline gelmiştir. Harmoniklerdeki bozulma seviyeleri, IEC Standardı 61000-3-6 [5] ve IEEE Standardı 519-2014 [6]'te belirlenmiştir. IEC standardından daha düşük seviyede harmonik oluşumu, hem bireysel yüzde hem de toplam harmonik bozulma (THD - Total harmonic Distortion) seviyesi gerektirir. Bu seviyelere göre güç trafosundaki kayıplar analiz edilerek kayıpların transformatör üzerindeki olumsuz etkilerinin hesaplanması gereklidir. Bu hesaplamalar çok karmaşık bir yapıya sahip olduğu için kayıpların tahmininde en iyi yöntemlerden biride Sonlu Elemanlar Yöntemi(SEY) kabul edilmektedir. Bununla ilgili olarak literatürde çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Özüpak (2021) çalışmasında, SEY kullanarak transformatör üzerindeki kayıpları incelemiş, transformatörün deneysel olarak ya da fabrika verilerine çok yakın değerler elde ettiği görülmüştür [7].

Bu çalışmada ilk olarak gerçek boyutları ve etiket değerleri bilinen bir transformatörün Ansys@Maxwell programında 3D tasarlanmış olup, güç sistemlerinde müsaade edilen THD değeri 4.97 değerine göre geçici rejim durumları elektromanyetik olarak hesaplanmıştır. Analizlerin hesaplanmasında SEY kullanılmış olup sonuçlar Eren Transformatörün fabrika verileriyle karşılaştırılmıştır.

2. Harmoniklerin Transformatör Kayıpları Üzerin Etkisinin Hesaplanması

Bu sinüzoidal olmayan akım, transformatörde ekstra kayıplara ve sıcaklığa neden olur [8]. Transformatör kayıpları, (1)'de gösterildiği gibi yüksüz ve yük kaybı olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

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

Burada, P_T toplam kayıpları, P_{LL} yük kayıplarını ve P_{NL} yüksüz kayıplarını ifade etmektedir. Boşta yük kayıpları, çekirdekten geçen elektromanyetik akının zamana göre değişen doğası nedeniyle herhangi bir yük kaybı veya çekirdek kaybı görülmez. Yük kaybı, DC veya Omik kayıp, sargılardaki girdap kaybı ve diğer kaçak kayıpları içerir ve kısa devre testinden elde edilebilir:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSLT} \quad (2)$$

P_{DC} sargı direnci kayıplarını, P_{EC} sargılardaki girdap akımı kayıplarını ve P_{OSLT} tank, kelepçeler, kilit plakaları gibi diğer iletken kısımlarında meydana gelen kaçak kayıplarını ifade etmektedir. Sargı kayıpları, Sargıdan geçen akımın karesi ve DC direnci üzerinden

hesaplanabilir. Harmonik bileşen nedeniyle yük akımının RMS değeri artarsa, bu kayıp aşağıda belirtildiği şekilde RMS akım yükünün karesi kadar artacaktır.

$$P_{DC} = R_{DC} \times I_{RMS}^2 = R_{DC} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h_{max}}^2 \quad (3)$$

IEEE C57.110 standartlarına göre, sargıların anma girdap akımı kaybının miktarı, yağlı transformatörler için toplam kaçak kaybının yaklaşık %33'ü kadardır [9]. Nominal koşullar altında girdap akımı kaybı göz önüne alındığında, harmonikli sinüzoidal yük akımından kaynaklanan girdap akımı kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (4)$$

Burada, h harmonikteki RMS akımı I_h ve sırasıyla I_R ve P_{EC-R} nominal frekans ve yük koşulları altındaki RMS temel akımını ve girdap akımı kaybını göstermektedir. Çekirdek, kelepçeler ve yapısal parçalardaki diğer kaçak kayıpları da yük akımının karesiyle orantılı bir oranda artacaktır. Ancak üreticiler tarafından yapılan çalışmalar ve diğer araştırmalar, baralarda, bağlantılarda ve yapısal parçalarda girdap akımı kayıplarının frekansın karesiyle artmadığını; 0,8'lik bir harmonik üs faktörü ile artığı çalışmalar sonucu tespit edilmiştir [10]. Böylelikle;

$$P_T = P_{NL} + R_{DC-R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h_{max}}^2 + P_{EC-R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 + P_{OSL-R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^{0.8} \quad (4)$$

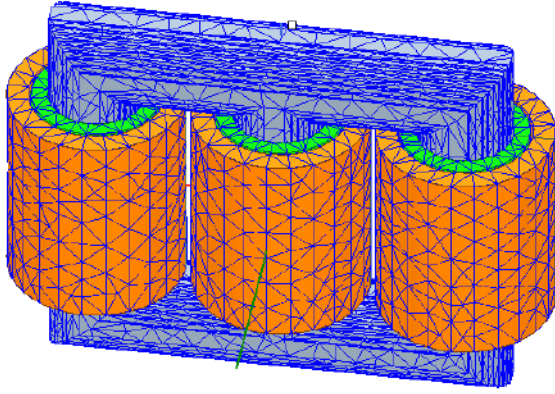
elde edilir ve armonikli sinüzoidal akım içeren toplam kayıplar denklem (7)'deki gibi hesaplanabilir

3. Transformatörün Ansys@Maxwell Analizi

Harmonik etkilerini görebilmek için ilk olarak gerçek boyut ve tasarım değerleri bilinen bir transformatör Ansys@Maxwell programında 3D olarak tasarlanmıştır. Tasarıma ait bazı etiket bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Tasarım modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.

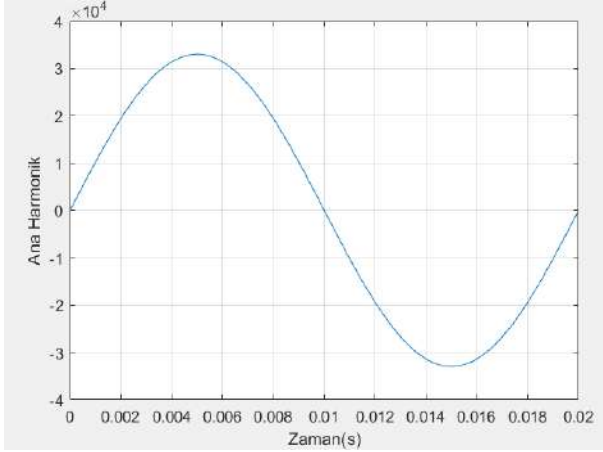
Tablo 1. Transformatöre ait etiket değerleri

Etiket Bilgisi	Değer
Gücü	15 MVA
YG/AG Gerilimleri	33.000 / 11.000 V
Nüve Kaybı	12.000 W
Bakır Kaybı	97.000 W
Uk	%11
I_0	%0.44
YG/AG Bağlantısı	DELTA / YILDIZ
YG/AG Sargı Sayısı	665/128 Tur
YG/AG faz Akımı	152/785 A



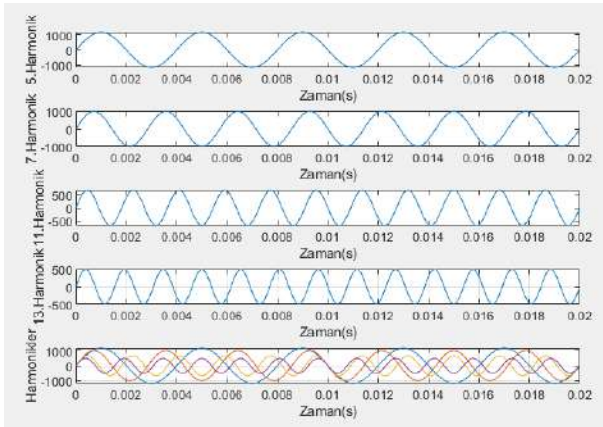
Şekil 1. Transformatörün ANSYS modeli

Şebekeye ait temel harmonik ve genlik değeri Şekil 2’de görülmektedir. Şebekedeki çift harmoniklerin bir birini elemine etmesinden dolayı şebekelerde genellikle frekansın tek sayı katı olan küçük genlik değerine ait harmonikler bulunmaktadır.

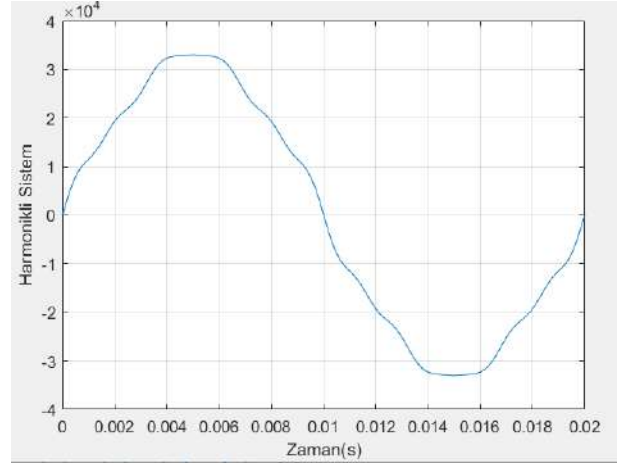


Harmonikler içinde en büyük genlik değerine sahip olan 3. Harmonik transformatörün üçgen bağlantısından dolayı sönmüldüğü için genlik değerleri sırasıyla 5, 7, 11 ve 13 olan harmonikler değerlendirilirken, bunların dışındaki harmonik değerleri çok küçük olduğundan analizlerde bu 4 harmonik değeri yeterli görülmektedir.

Şekil 2. Ana harmonik



Şekil 3. Harmonikler



Şekil 4. THD=4.97 değerli Bozulmuş Harmonik

Şekil 3’te harmonikler ve genlik durumlarına yer verilmiştir. THD harmonik değerleri Tablo 2’de verilmiştir. 33 kV (RMS) genlik değerine sahip şebekelerdeki müsaade edilen THD maksimum sınır değerleri IEC 61000 4-7 standartlarına göre belirlenmiştir [11]. Şekil 4’te THD=4.97 değerindeki harmonikteki bozulmaya ait yapı görülmektedir.

Tablo 2. Harmoniklere ait THD değerleri

Harmonik	Maksimum sınır değeri(%)	THD0 (%)	THD1 (%)
5	5	0	3,5
7	4	0	3
11	3	0	2
13	2,5	0	1,5
Total		0	4,97

Tablo 3. Tasarım Sonuçlarının karşılaştırılması

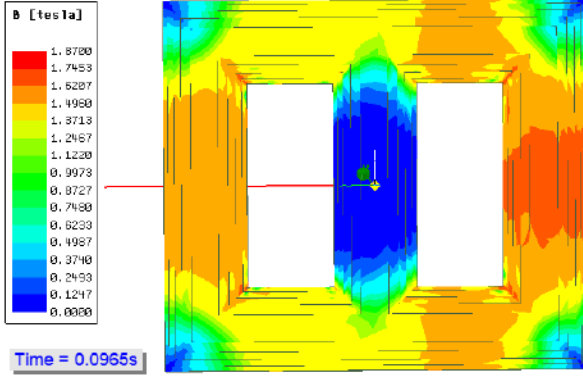
Değişkenler	Fabrika değeri	Simülasyon Sonucu
Manyetik Akı (T)	1.87	1.86
Çekirdek garanti kayıpları(kW)	12	11.36
Bakır Kayıpları(kW)	97	95.4

Tasarlanan Ansys@Maxwell modeli ile fabrika verilerinin karşılaştırıldığı değerler Tablo 3’te verilmiştir. Tasarım verileri ile fabrika verileri birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

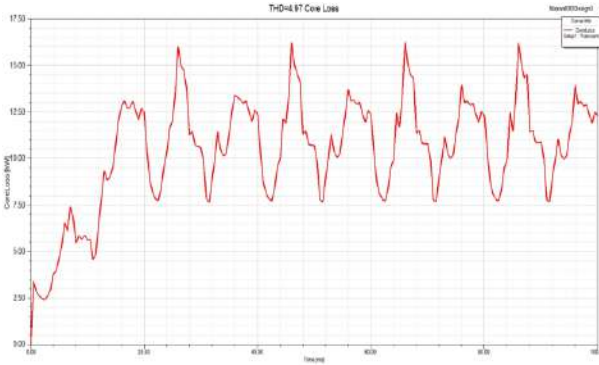
Tablo 3. THD değerlerine göre kayıplar

Kayıplar(kW)	THD=0	THD=4.97
Ortalama Histeresis Kayıpları	7.22	7.24
Maksimum Histeresis Kayıpları	9.51	9.85
Ortalama Eddy Kayıpları	4.09	4.17
Maksimum Eddy Kayıpları	6,82	6,52
Ortalama Çekirdek Kayıpları	11.31	11.66
Maksimum Çekirdek Kayıpları	15.67	16.23

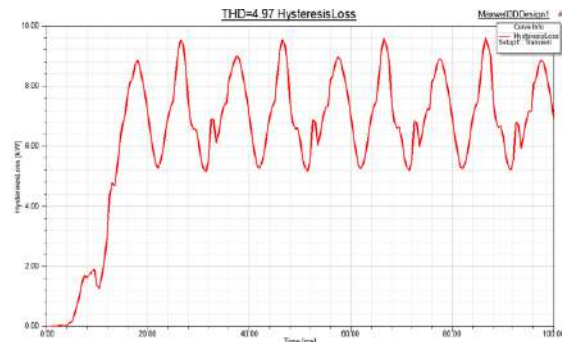
Tablo 2'deki THD=4.92 değerine ait her bir harmoniğe ait yüzdelik harmonik katsayıları ana harmoniğe eklediğinde oluşan Histerezis, Eddy ve Çekirdek kayıplarına ait ortalama ve maksimum değerler Tablo 4'te gösterilmektedir. Şebekedeki bozulma miratındaki artış kayıpların artmasına ve maksimum noktadaki kayıpların değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. THD=0 ve THD=4.97 değerinde ait bazı bilgiler Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 4. THD=0 değerli anlık Manyetik alan değişimi



Şekil 5. THD=4.97 durumundaki Çekirdek kayıpları



Şekil 6. THD=4.97 durumundaki Histerezis Kayıpları

4. Sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda THD=4.97 değerindeki bozulmaya, attıkça transformatördeki tüm kayıplarında attığı belirlenmiştir. Ana harmonikteki bozulma aynı zamanda kayıplardaki maksimum değerlerinin artmasına da neden olduğu belirlenmiştir. Bu durum transformatörde aşırı ısınmalara ve transformatör

ömründe kısaltmaya neden olmaktadır. Oluşan kayıpların dikkate alınması önemlidir, aksi takdirde sargıların aşırı ısınmasına ve limitlerin üzerindeki sıcak nokta sıcaklıklarına neden olabilirler. Bu aşırı ısınmalar ve kayıplar transformatör sürekli olarak şebekede boşa veya yükte çalıştığı göz önüne alındığında sargılarında deformasyonlara sebep olmaktadır. Sargılardaki deformasyon çeşitli kısa devre, ark veya darbe gerilimleri gibi yüksek akıma maruz kaldığında ciddi sonuçlar doğurabilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Gupta, A., & Singh, R. "Computation of transformer losses under the effects of nonsinusoidal currents". *Advanced Computing*, 2(6), 91, 2011
- [2] Lin, HC. "Power harmonics and interharmonics measurement using recursive group-harmonic power minimizing algorithm." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 1184-1193.2011
- [3] Chapman, D. *Harmonics: Causes and Effects Power Quality Application Guide*. Copper Development Association, European Copper Institute (ECI). 2001
- [4] Özüpak, Y., & Mamiş, M. S.. "Analysis of electromagnetic and loss effects of sub-harmonics on transformers by Finite Element Method". *Sādhanā*, 45(1), 1-5. 2020
- [5] IEC, I. (2008). TR 61000-3-6 "Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 3-6: Limits–Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems". HV and EHV power systems.
- [6] IEEE (2014) "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,"ed: IEEE, 2014.
- [7] Özüpak, Y. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dağıtım Transformatörlerinin Harmonik Yük Kayıplarının Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 38-46. 2021
- [8] Sadati, S. B., Tahani, A., Darvishi, B., & Dargahi, M. (2008, December). Comparison of distribution transformer losses and capacity under linear and harmonic loads. *In 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, pp. 1265-1269. IEEE..
- [9] IEEE Standard C57.110-1998, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-sinusoidal Load Currents. *IEEE Standards*.
- [10] Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, USA, 30 March 1999.
- [11] Al Abri, R. S., Albadi, M. H., Al Abri, M. H., Al Rasbi, U. K., Al Hasni, M. H., & Al Shidi, S. M. "Impact of Harmonic Resonance and V-THD in Sohar Industrial Port–C Substation". *International Journal of Energy and Power Engineering*, 10(2), 210-217. 2016)