



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi

Electromagnetic Field Analysis by Finite Element Method of Lamination Combinations of Different Materials Used in the Core of Distribution Transformers

Yazar(lar) (Author(s)): Yıldırım ÖZÜPAK¹, Mehmet Salih MAMIŞ²

¹ ORCID ID: 0000-0001-8461-8702

² ORCID ID: 0000-0002-6562-0839

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özüpak Y., Mamiş M.S., “Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1): 21-31, (2019).

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



Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi

Yıldırım ÖZÜPAK¹, Mehmet Salih MAMIŞ²

¹Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Programı, 21000, Silvan/DIYARBAKIR

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 44000, Merkez/MALATYA

Öz

Transformatörlerin tasarımında, tasarım parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesi, transformatörün kullanılacağı sistem, aktaracağı elektriksel güç, nüve malzemesinin elektromanyetik alan dağılımı ve nüve kayıpları sistemin devamlılığı ve güvenliği açısından önemlidir. Bu çalışmada, 15 MVA üç fazlı gerçek bir dağıtım transformatörünün nüve laminasyon basamaklarının elektromanyetik sonlu eleman yöntemi sunulmaktadır. Burada, M530-50A ve M125-027S elektrik çelikleri için 3D SEY simülasyonları, elektriksel çeliklerin durumu için nüve kayıplarının (yüksüz kayıplar) hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyonlarda, B-H eğrileri ve elektriksel çeliklerin demir kaybı eğrileri dikkate alınmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'e dayanan ANSYS@Maxwell yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonda hesaplanan nüve kayıpları, laboratuvar testlerinde yüksüz durumda ölçülen nüve kayıpları ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan materyallerin elektromanyetik alan dağılımları elde edilmiş, sorunlu bölgeler tespit edilmiş ve nüve malzemesinin doyuma gittiği noktalar belirlenmiştir. Ayrıca sayısal sonuçlar, nüve laminasyon adımlarındaki elektriksel çeliklerin kombinasyonunun, istiflenmiş manyetik nüveli nüve kayıplarının % 5'ini azaltabildiğini göstermiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 16/12/2018
Kabul: 06/02/2019

Anahtar Kelimeler

Elektromanyetik Alan
Nüve Kaybı
Transformatör
Sonlu Elemanlar Yöntemi
(SEY)

Keywords

Electromagnetic Field
Core Losses
Transformer
Finite Element Method
(FEM)

Electromagnetic Field Analysis by Finite Element Method of Lamination Combinations of Different Materials Used in the Core of Distribution Transformers

Abstract

In the design of transformers, the determination of the optimum values of the design parameters, the system in which the transformer will be used, the electrical power to be transferred, the electromagnetic field distribution of the core material and the losses of the cores are important for the continuity and security of the system. In this paper, electromagnetic finite element method of core laminating steps of a 15 MVA three phase real distribution transformer is presented. Here, 3D FEM simulations for M530-50A and M125-027S electric steels, core losses (no-load losses) were calculated for the condition of electrical steels. In numerical simulations, B-H curves and iron loss curves of electrical steels were taken into consideration. The core losses calculated in the simulation using the ANSYS@Maxwell software program based on the Finite Element Method (FEM) were compared with the core losses measured in unload state in the laboratory tests. Electromagnetic field distributions of the materials used were obtained, problem areas were determined and the points where the core material saturation was determined. In addition, the numerical results showed that the combination of electrical steels in the core lamination step could reduce 5% of the stacked magnetic core corelosses.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektriksel çelik kombinasyonları, manyetik nüveli transformatörlerde, kayıpları, sıcaklığı, ısıya dönüşen enerjiyi ve maliyetleri azaltmak için kullanılmaktadır [1]. Amerika da ve bazı Avrupa ülkelerinde trafo üreticileri, elektrik çeliklerini ve geçirgenliği yüksek alaşımları transformatörlerin manyetik nüvesinde birleştirmektedirler.

Ayrıca, son yirmi yılda, elektriksel çeliklerin ve ferromanyetik malzemelerin kombinasyonları, dağıtım ve güç transformatörlerinde uygulanmış ve elektriksel çeliklerin bu transformatörlerde birleştirilmesi için yeni manyetik nüve topolojileri önerilmektedir. Nüve kayıplarının, sıcaklığın, malzeme ve üretim maliyetlerinin azaltılması için dağıtım ve güç transformatörlerinin manyetik nüvelerinde tanecik konumlu çeliklerin kombinasyonunun kullanılması analiz edilmiştir [2]. Dağıtım transformatörlerinin kayıplarını azaltmak için tanecik konumlu çeliklerin manyetik nüve kombinasyonları analiz edilmiştir [3]. Güç transformatörlerinin modellenmesi ve doğru simülasyonu mühendisler için her zaman zorlu bir görev olmuştur. Güç trafoları enerji dağıtım şebekelerinde en pahalı unsurlardandır. Bu nedenle, transformatörlerin doğru çalıştığı tahmini ve olası arızalar tasarımcılar için sorun teşkil etmektedir. Transformatörler ve güç sistemi arasındaki geçici etkileşimin analizi için güç transformatörlerinin yüksek frekanslı modelleri önerilmektedir [4]. Transformatörde enerji kesintisine yol açan farklı iç arızaların tanımlanması için bir algoritma ve transformatör modeli önerilmektedir [5-8]. Son yıllarda Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), lineer olmayan çeşitli materyalleri ve bu materyallerin kalıcı mıknatıslanmalarını modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır [9-11]. Transformatörün sargısında kısmi deşarjın meydana geldiği durumlarda transformatörün parametrelerini hesaplamak için SEY kullanılmıştır [12]. Son yıllarda, transformatör parametrelerinin, çalışma modlarının ve farklı kayıp türlerinin hesaplanması için çeşitli güçlü yazılımlar geliştirilmiştir [13]. Yüksüz kayıplar analiz edilmiş ve farklı kalite ana malzemelerle karşılaştırılmıştır [14]. Malzemelerin elektromanyetik parametreleri sayesinde, sonlu elemanlar analizi ile yüksek doğruluğa sahip tasarımlar yapılabilmektedir. Transformatörün farklı kısımlarında oluşan kayıplar, SEY kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir [15-16].

Transformatörlerde meydana gelen kayıpları ve malzeme maliyetlerini azaltmak için tanecik konumlu çelik ve amorf çelikler transformatörlerin manyetik nüvelerinde birleştirilmektedir. Bu çalışmada, farklı manyetik özelliklere, demir kaybına (W/kg) ve laminasyon kalınlıklarına sahip M530-50A ve M125-027S elektriksel çelikler göz önünde bulundurularak gerçek bir dağıtım transformatörünün SEY'e dayanan ANSYS@Maxwell programı ile elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, 15 MVA üç fazlı gerçek bir dağıtım transformatörünün manyetik nüvesinde elektriksel çeliklerin kombinasyonlarının meydana gelen manyetik akı dağılımı incelenmiştir. Bunun için trafonun nüvesinde M530-50A ve M125-027S materyalleri kullanılmıştır. İki farklı elektriksel çelik için trafonun manyetik nüvesindeki kayıplar ve manyetik akı dağılımları 3-D Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak hesaplanmıştır. SEY simülasyonundan elde edilen sonuçlar, laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda SEY simülasyonları doğrulanmıştır. Bu çalışmayı doğrulamak ve bilime katkısını sunmak için elde edilen nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. NÜVE KAYIPLARININ MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF CORE LOSSES)

Üç fazlı dağıtım trafosu, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanan ANSYS@Maxwell yazılım ortamından üç boyutlu (3-D) olarak modellenmiştir. Bu yazılım, manyetik nüvede kullanılan manyetik ve termal özellikleri farklı iki materyal için elektromanyetik alan analizi yapmak ve kayıpları hesaplamak için kullanılmaktadır. Trafo tasarımcıları önceden matematiksel modelleri baz alarak tasarımlarını sadece teorik olarak gerçekleştirmişlerdir. Bunun için Maxwell denklemleri kullanılmaktadır.

Faraday'ın indüksiyon yasası:

$$\nabla \times E = -\dot{B} \quad 2.1$$

Gauss'un manyetik yasası:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad 2.2$$

Ampere'nin akım yasası:

$$\nabla \times H = j + \dot{D} \quad 2.3$$

Gauss'un elektrik yasası:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad 2.4$$

Bu yasalar baz alınarak elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmektedir. Genel olarak, nüve kaybı (P_c) iki bileşene ayrılmıştır: histerezis kayıpları (P_h) ve eddy akım kayıpları (P_e). Steinmetz denkleminde göre, nüve kayıplarının ölçümü ve hesaplanması normal olarak değişen Mag-B ve frekansın sinüzoidal akı yoğunluğu ile yapılmaktadır. Bu ölçümler ve hesaplamalar standart bobine bağlı olarak sıklıkla formun iki terimli bir fonksiyonu ile modellenmektedir:

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^n + k_c f^2 B^2 \quad 2.5$$

k_h , k_c ve n , laminasyona, malzeme kalınlığına, iletkenliğe ve diğer faktörlere bağlı olan katsayılarıdır. Bu formül, maksimum akı yoğunluğunun 1 Tesla olduğu durumlarda geçerli olmaktadır.

Bu çalışmada, nüve kayıpları aşağıda verilen denklemlere göre hesaplanmıştır:

$$P_c = P_h + P_e + P_{excess} = K_1 B_m^2 + K_2 B_m^{1.5} \quad 2.6$$

Eddy akım kayıpları:

$$P_e = k_c (f B_m)^2 \quad 2.7$$

Histeresis kayıplar:

$$P_h = k_h f B_m^2 \quad 2.8$$

Excessive kayıplar:

$$P_{exces} = k_e (f B_m)^{1.5} \quad 2.9$$

Bu yüzden:

$$K_1 = k_h + k_c f^2 \quad 2.10$$

$$K_2 = k_e f^{1.5} \quad 2.11$$

Girdap akımı kayıp katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$k_c = \pi^2 \sigma \frac{d^2}{6} \quad 2.12$$

Burada; σ iletkenlik, d laminasyon tabakasının kalınlığıdır.

Katsayılar K_1 ve K_2 fonksiyonun minimize edilmesiyle elde edilmektedir:

$$f(K_1 K_2) = \sum [P_{vi} - (K_1 B_{mi}^2 + K_2 B_{mi}^{1.5})]^2 = \min \quad 2.13$$

P_{vi} , B_{mi} - ölçülen kayıpların karakteristik eğrisi üzerinde verilerin i-inci noktası.

Diğer iki kayıp katsayısı:

$$k_h = (K_1 - k_c f_0^2) / f_0 \quad 2.14$$

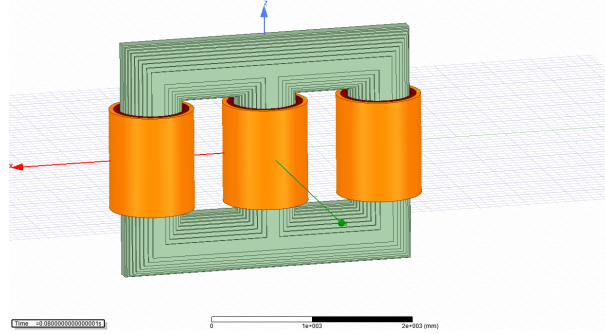
$$k_e = K_2 / f_0^{1.5} \quad 2.15$$

f_0 kayıp eğrisi test frekansı.

2.1. Sargıların Modellenmesi (Modeling of windings)

15 MVA üç fazlı dağıtım transformatörünün nüvesini manyetize etmek için sadece alçak gerilim AG sargısı kullanılmış, açık devre test koşullarını sağlamak için yüksek gerilim YG sargısı ihmal edilmiştir. Uyarma sargısı, kayıpları ihmal edilen, 52 sarımlı, geçirgenliği 1 ve elektrik iletkenliği 3.8×10^7 S/m olan bakırdan

yapılmıştır. Şekil 1’de dağıtım transformatörünün 3D modeli, Tablo 1’de dağıtım transformatörünün teknik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 1. 15 MVA dağıtım transformatörünün manyetik nüvesinin üç boyutlu modeli.

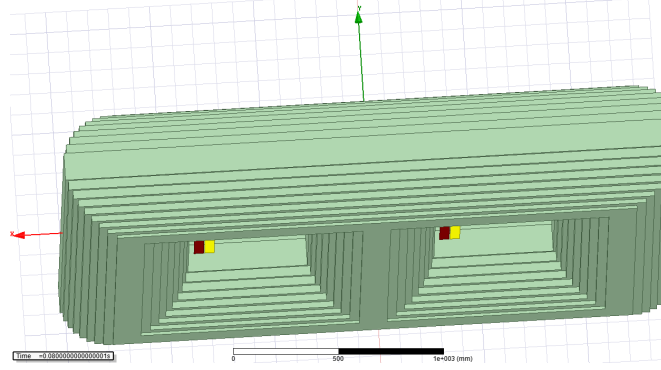
Tablo 1. Dağıtım transformatörünün teknik özellikleri

Parametreler	Değerler
Nominal güç	15 MVA
Yüksek gerilim	33 kV
Alçak gerilim	11 kV
Frekans	50 Hz
Faz sayısı	3
HV Sarım sayısı	665
LV Sarım sayısı	128
Materyal	M125-027S,M530-50A
Yoke uzunluğu	2950 mm
Bacak yüksekliği	2380 mm
İki bacak arası uzaklık	1185 mm
Sargı yüksekliği	1040 mm
Sac kalınlığı (M530-50A)	0.3 mm
Sac kalınlığı (M125-027S)	0.27 mm
İletkenlik (M530-50A)	1960000 S/m
İletkenlik(M125-027S)	5000000 S/m
Yığılma faktörü	0.95

2.2. Manyetik Nüvenin Modellenmesi (Modeling of Magnetic Core)

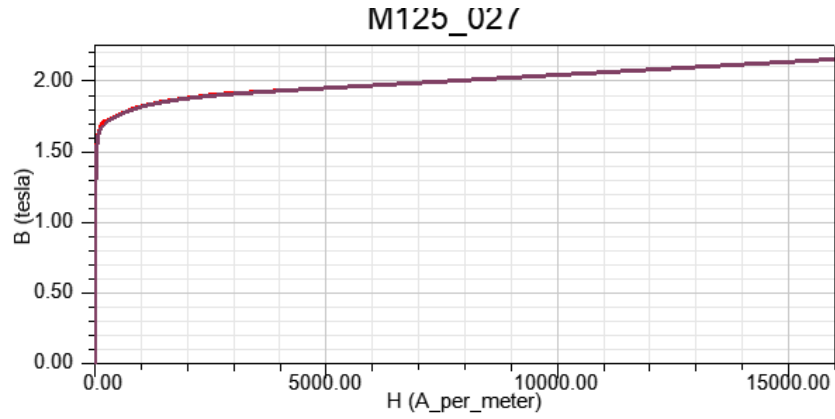
Bu çalışmada simülasyon için 45°'lik açı ile örtüşen nüve derzleri dikkate alınmamıştır. Hesap karmaşasını azaltmak için sadece katı laminasyonlar dikkate alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Modellenen transformatörün manyetik nüvesinde, tanecik konumlu elektrik çeliği (M530-50A) ve M125-027S çeliğinin laminasyonlarından oluşan iki farklı materyal kullanılmıştır. Dağıtım transformatörlerinin üretim sürecinde kullanılan konveksiyonel M530-50A çeliğinin, kalınlığı: 0.3mm, kütle yoğunluğu: 7650 kg/m³ ve

elektriksel iletkenliği: 1960000 S/m şeklindedir. M125-027 çeliğinin, kalınlığı: 0.27, kütle yoğunluğu: 7650 kg/m^3 ve elektriksel iletkenliği: 5000000 S/m'dir. Şekil 2'de dağıtım transformatörünün laminasyon nüvesi adımlarının bir görünümünü sunulmuştur.

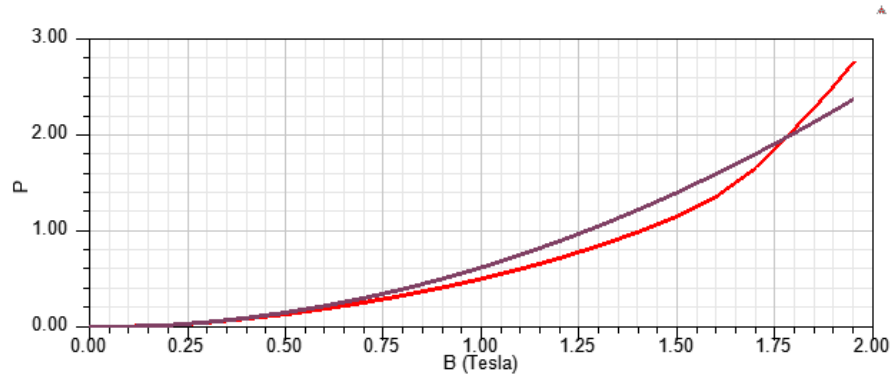


Şekil 2. Dağıtım transformatörünün manyetik çekirdeğinin kesit görünümü ve laminasyon temel adımları.

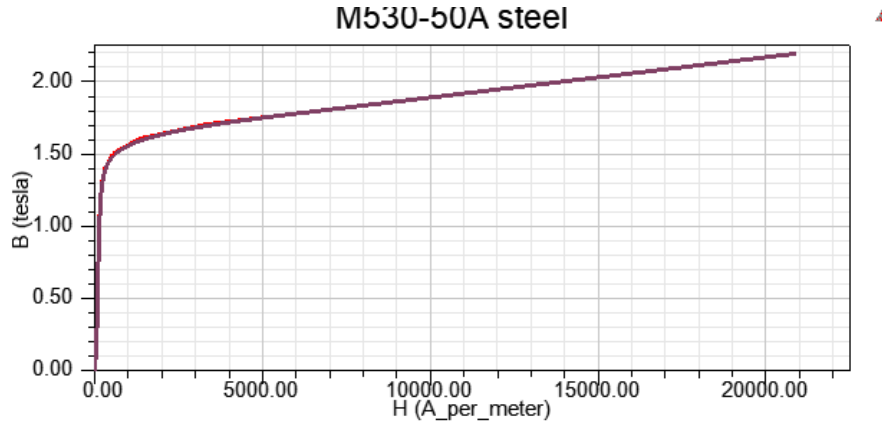
M530-50A ve M125-027S çeliklerinin 50 Hz'deki deneysel B-H eğrileri ve özgül demir kayıp eğrileri SEY simülasyonlarında kullanılmıştır. Şekil 3,4,5 ve 6'da bu çeliklerin B-H ve B-P eğrileri sunulmuştur. Dağıtım transformatörünün manyetik nüvesi 2 Tesla'da çalışacak şekilde tasarlanmıştır.



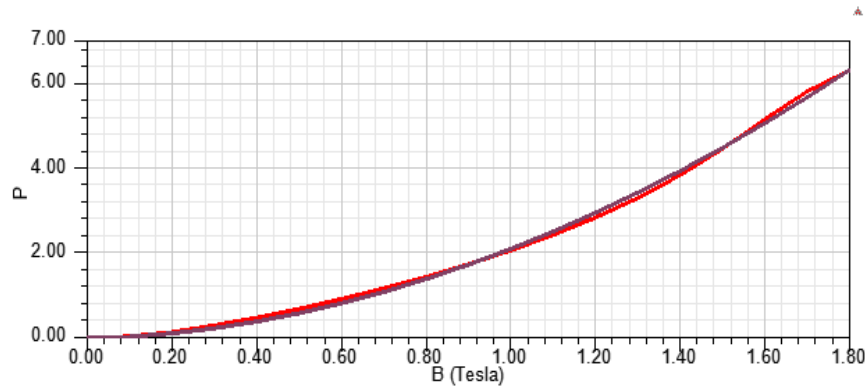
Şekil 3. M125-027S elektriksel çeliğin B-H eğrisi.



Şekil 4. M125-027S elektriksel çeliğin B-P eğrisi.



Şekil 5. M530-50A elektriksel çeliğin B-H eğrisi.



Şekil 6. M530-50A elektriksel çeliğin B-P eğrisi.

2.3. Dağıtım Trafosundaki Nüve Kayıpları (Core Losses in Distribution Transformer)

Dağıtım trafosundaki nüve kayıpları, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) ANSYS@Maxwell yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Trafoların manyetik nüvesindeki toplam nüve kayıplarının hesaplanması için histerezis kayıp katsayısı (k_h) ve girdap akımı kayıp katsayısı (k_c) kullanılmaktadır. SEY, dağıtım trafosunun nüvesindeki kayıpları hesaplamak için manyetik alan dağılımlarını ve kayıp katsayılarını kullanmaktadır.

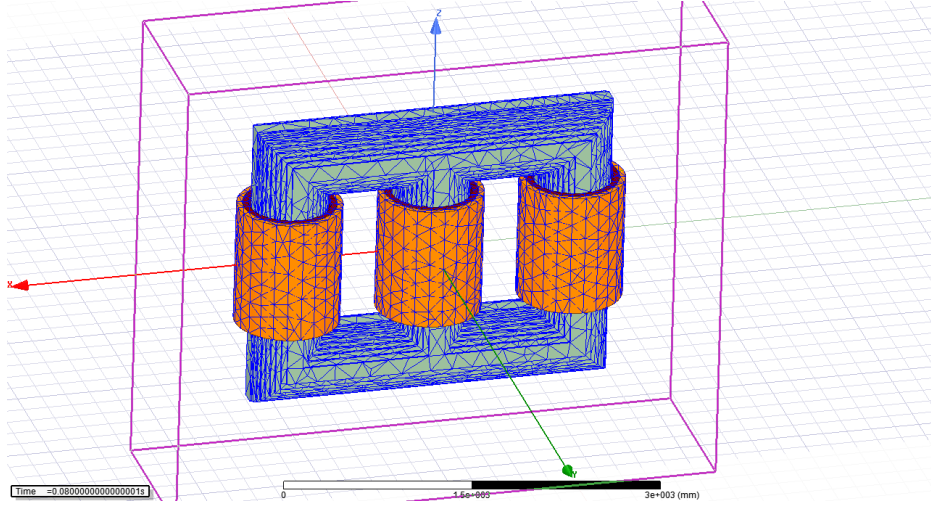
Trafonun manyetik nüvesindeki elektriksel çeliklerin k_h ve k_c kayıp katsayıları, elektriksel çeliklerin spesifik demir kayıp eğrileri ve bu çeliklerin özellikleri kullanılarak, SEY'e dayanan ANSYS@Maxwell yazılımıyla hesaplanmıştır. Aşağıda Tablo 2'de, M530-50A ve M125-027S çeliklerine ait, bu yazılım ortamında 50 Hz frekansta hesaplanan eddy kayıp katsayıları sunulmuştur.

Tablo 2. İki Farklı Materyalin Manyetik Nüvesindeki Kayıp Katsayıları

Kayıp katsayıları	M530-50A (W/m^3)	M125-027S (W/m^3)
K_c	0.28	0.59

2.4. Transformatörün Sonlu Eleman Ağı (Mesh) Oluşturulması (Construction of Transformer Finite Element Mesh)

Transformatör modelinde toplam 83972 sonlu eleman kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 7’de dağıtım transformatörünün manyetik nüvesinin SEY ağı (mesh) sunulmuştur.



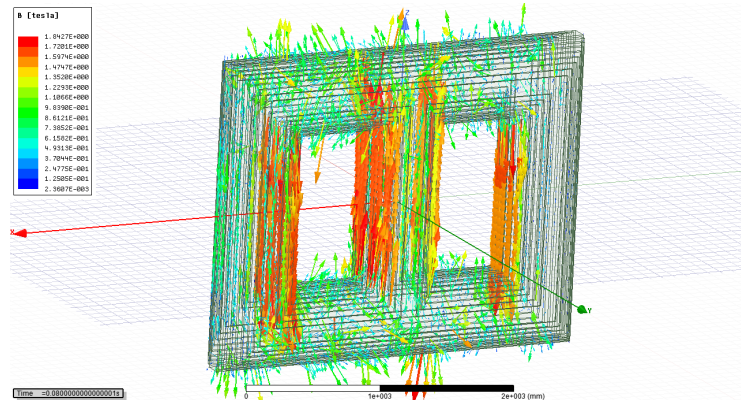
Şekil 7. Dağıtım transformatörünün sonlu eleman ağı.

2.5. Transient Analiz (Transient Analysis)

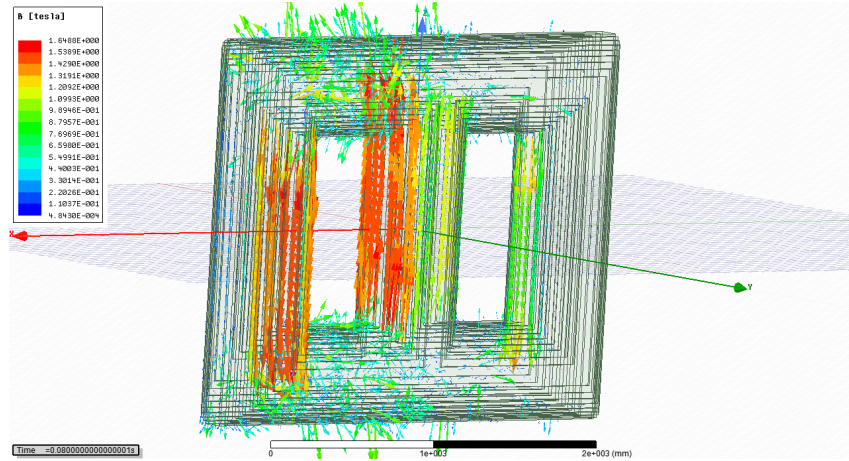
Transformatörün nüvesindeki kayıpları hesaplamak için ANSYS@Maxwell ortamında transient analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik nüveyi manyetize etmek için AG sargısına 50 Hz’de 11 kV gerilim uyarması verilmiştir.

2.6. M530-50A ve M125-027S Materyalleri ile Oluşturulan Manyetik Nüvelerdeki Kayıplar (Magnetic Core Losses with M530-50A and M125-027S Materials)

Dağıtım transformatörünün nüvesinde kullanılan M530-50A ve M125-27S materyallerine ile yapılan nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımları aşağıda Şekil 8 ve 9’da sunulmuştur.



Şekil 8. Transformatörün M125-027S materyali ile yapılan manyetik nüvesindeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı.



Şekil 9. Transformatörün M530-50A materyali ile yapılan manyetik nüvesindeki manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı.

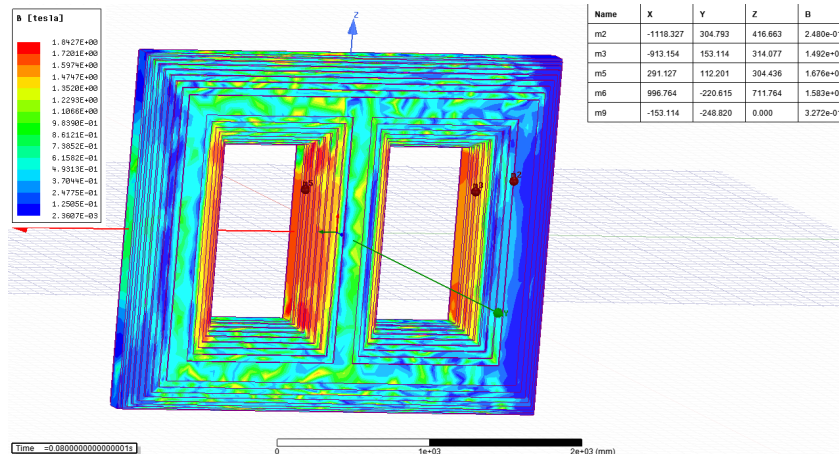
Dağıtım trafosunun, yüksüz durumda hesaplanan ve ölçülen kayıpları aşağıda Tablo 3'te verilmiştir. SEY simülasyonunda hesaplanan nüve kaybı ile yüksüz durumdaki testlerden ölçülen nüve kayıpları karşılaştırıldığında % 0.6'lık bir fark olduğu ortaya çıkmıştır.

Tablo 3. Nüve kayıplarının karşılaştırılması

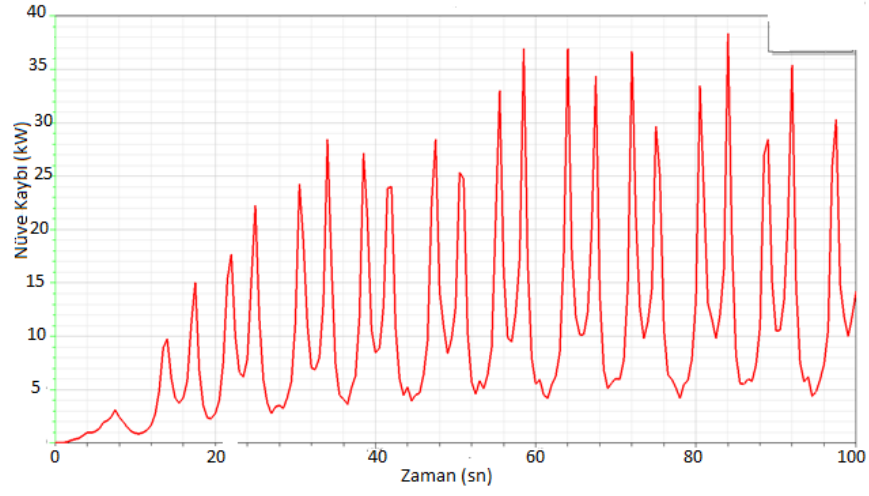
	ANSYS@Maxwell ile hesaplanan	Yüksüz testlerde ölçülen	Fark
M530-50A, M125-027S kombinasyonu	12.56 kW	12.5 kW	%0.6

3. M125-027S VE M530-50A MATERYALLERİ İLE OLUŞTURULAN MANYETİK NÜVELERDEKİ MANYETİK AKI DAĞILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF MAGNETIC FLUX DISTRIBUTION M125-027S AND M530-50A MATERIALS CORE)

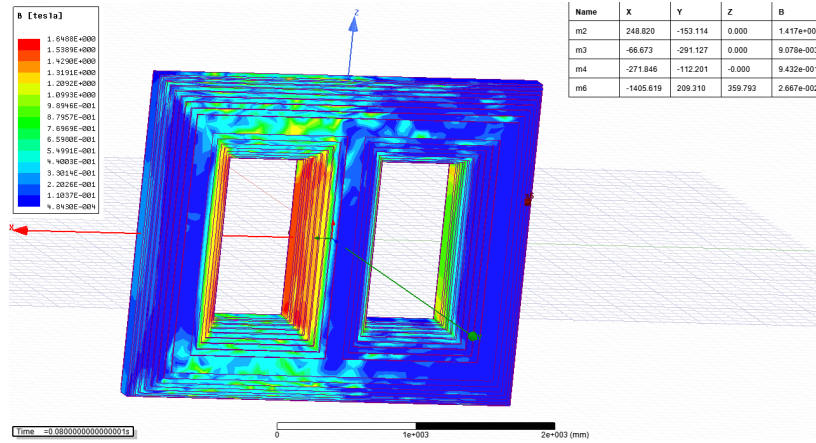
Nüve yapısındaki çelik hacmiyle orantılı olarak nüvede kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenle, nüve yapısında dayanımı yüksek kalınlığı az olan materyaller tercih edilmektedir. Şekil 10, 11, 12 ve 13'te, farklı çeliklerin dağıtım transformatörünün nüvesindeki manyetik akı yoğunlukları ve nüve kaybı dağılımları sunulmuştur.



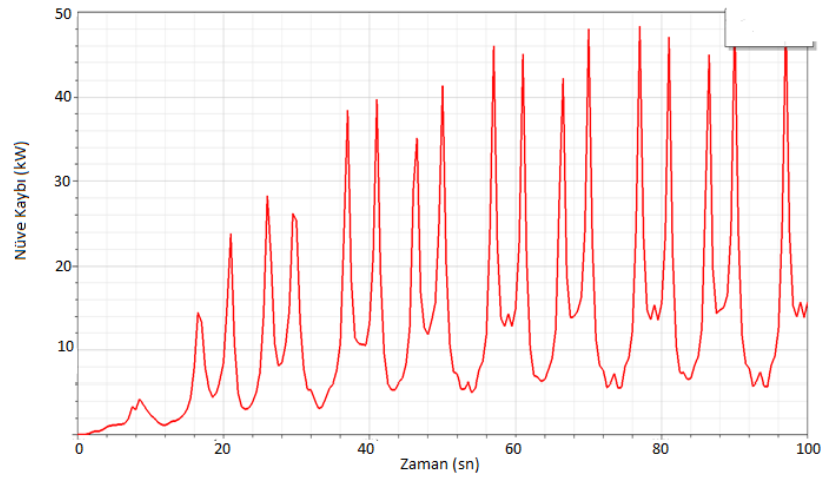
Şekil 10. M125-027S için noktasal manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.



Şekil 11. M125-27S için nüve kaybı



Şekil 12. M530-50A için noktasal manyetik akı yoğunluğunun dağılımı.



Şekil 13. M530-50A için nüve kaybı

Bu şekillerden, nüvenin kütlesinin artmasına bağlı olarak manyetik akı ve kayıp dağılımlarının değiştiği görülebilmektedir. Manyetik akının bir kısmı, geçirgenliğin yüksek ve kayıpların daha küçük olduğu

nüvenin iç kısımlarında dolaşmaktadır. Manyetik akının diğer kısmı, geçirgenliğin daha düşük ve kayıpların biraz daha yüksek olduğu nüveni dış kısmında dolaşmaya zorlanmaktadır. Akı ve kayıpların bu dengesizliği, dağıtım trafosunun manyetik nüvesindeki toplam kayıpların azaltılmasını sağlamaktadır.

Tablo 4'te dağıtım transformatörünün manyetik nüvesinde kullanılan materyaller için elektromanyetik akı yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 4. İki Farklı Materyale Ait Akı yoğunluklarının karşılaştırılması

Materyal	Akı yoğunluğu
M530-50A	1.64 T
M127-027S	1.84 T

Bu çalışmada, her bir elektriksel çelik için transformatör T-bağlantı biçiminin ortalama manyetik akı yoğunluğu hesaplanmıştır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, üç fazlı 15 MVA gerçek bir dağıtım transformatörünün manyetik nüvesindeki manyetik alan dağılımları ve nüve kayıpları Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanan ANSYS@Maxwell yazılım ortamında analiz edilmiştir.

M530-50A materyalinin ortalama akı yoğunluğu $B = 1.64$ T, M125-027S materyalinin akı yoğunluğu ise maksimum 1.84 T olarak belirlenmiştir. Burada sunulan metodoloji, güç, dağıtım ve ölçü transformatörlerinde istiflenmiş manyetik nüveler için uygulanabilmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, farklı manyetik karakteristiklere sahip elektriksel çeliklerin farklı harmonik, kısa devre ve açık devre analizlerinin nüvedeki kayıp, sıcaklık ve manyetik akı dağılımları üzerindeki etkisini incelemek için bu değişkenlere bağlı olarak analizlerin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2017-639. Katkılarından dolayı teşekkürler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Heindl, S. Tenbohlen, R. Wimmer, "Transformer modeling based on standard frequency response model", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, pp. 1-5, 2011.
- [2] O. Ozgonenel, E. Kilic, "Modeling and real-time fault identification in transformer", Journal of the Franklin Institute, vol. 345, no. 3, pp. 205-225, 2008.
- [3] P. Meesuk, T. Kulworawanichpong, P. Pao-Ia-or, "Magnetic Field Analysis for a Distribution Transformer with Unbalanced Load Conditions by using 3D Finite Element Method", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 5, 2011.

- [4] S.M.H. Hosseini, S.M. Enjavi Madar, M. Vakilian, "Using the finite element method to calculate parameters for a detailed model of transformer winding for partial discharge research", Turkish journal of electrical engineering and computer science, vol. 23, no. 3 , pp. 709-718, 2015.
- [5] Tsili MA, Kladas AG, Georgilakis PS, "Computer aided analysis and design of power transformers". Comput Ind 59:338–50, 2008
- [6] Y. Wang, J. Pan, M. Jin, "Finite Element Modeling of the Vibration of a Power Transformer", Proceedings of ACOUSTIC 2-4 November, Australia, pp. 1-7,2011
- [7] Mamizadeh, A., Iskender, I. "Analyzing and comparing thermal models of indoor and outdoor oil-immersed powerl powertech". IEEE Bucharest, 2, 1 – 8,2009
- [8] Lakshminarayanan V., Anand B., Balakrishnan P. A., "Analysis and Design of Ferrite Core Transformer for High Voltage High Frequency Which Is Used In Ozonators", International Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 2, No. 1, 2012.
- [9] Maizana, D. "Analyze eddy current loss in the three phase 100kVA transformer core with the mix 60 T joint core", Asian J. of Sci. Res., 6, 122-128,2013
- [10] Georgilakis, P. S. "Spotlighting on Modern Transformer Design", Springer is part of Springer Science+Business Media, Greece, 75, 125-129, 146-148, 267-269,2009.
- [11] Driesen, J., Olivares, J. C. "Parasitic loss identification techniques for distribution transformer", 15th International conference on electrical machines (ICEM), Belgium, 2-6, 2002.
- [12] Pekin H. 1995. Transformatör arızaları ve sebepleri, Elektrik Mühendisliği Dergisi, 117, 183-185,187-192.
- [13] Saleh A, Omar A, Amin A, Adly A, Fawzi T, El-Debeiky S, "Estimation and minimization techniques of transformer tank losses". In: Proceedings of the CIGRE conference, Paris, France, August;. p. 1–6 paper no. A2-104, 2004
- [14] S. Magdaleno-Adame, E. Melgoza-Vazquez, J.C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, "Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers," Int. Trans. Electr. Energ. Syst., vol. 26, no. 8, pp. 1737-1751, 2016.
- [15] T.D. Kefalas, A.G. Kladas, "Mixed Si-Fe wound cores five legged transformer: losses and flux distribution analysis," IEEE Trans. Magnetics, vol. 48, no. 4, pp.1609-1612, 2012.
- [16] M. Mohan, P.K. Singh, "Distribution transformer with amorphous- CRGO core: an effort to reduce the cost of amorphous core distribution transformer," ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 7, no. 6, pp. 680-685,2012