

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YILDIRIM DARBE ANALİZLERİNİN ANSYS@MAXWELL-3D İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Yıldırım ÖZÜPAK^{1*}, Mehmet Salih MAMİŞ², Taner GÖKTAŞ³, Müslüm ARKAN⁴

¹Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, Diyarbakır
^{2,3,4}İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya

Özet

Transformatörlerde ani olarak meydana gelen yüksek gerilim ve akımlara karşı transformatörün mekanik dayanımının tahmini, transformatörün hem tasarım aşaması hem de ömrü için çok önemlidir. Transformatörlerin dayanımının yıldırım darbelerine karşı sağlanabilmesi için tasarım aşamasında aşırı gerilimlere maruz kalan bölgelerinin bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada, tasarlanan güç transformatörünün, hem normal çalışma koşullarında hem de yıldırım darbesi durumundaki elektromanyetik akı değerleri ve transformatörün sargılarında meydana gelen elektromanyetik kuvvetler analiz edilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (SEY) dayanan ANSYS@Maxwell-3D ile transformatörün 3D simülasyon model tasarlanıp analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan model ile transformatörün hem normal çalışma koşullarındaki analizleri hemde yıldırım darbesine maruz kaldığı durumdaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her iki çalışma koşulu için elektromanyetik akı ve elektromanyetik kuvvetler hesaplanmıştır. Bu sayede, nüvedeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı, sorunlu ve mekanik dayanımın az olduğu bölgeler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yıldırım darbesi, Elektromanyetik kuvvetler, Güç transformatörü, Elektromanyetik akı, ANSYS@Maxwell.

* yildirim.ozupak@dicle.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8461-8702>

PERFORMING LIGHTNING IMPACT ANALYSIS OF POWER TRANSFORMERS WITH ANSYS@MAXWELL-3D

Abstract

The estimation of the mechanical strength of the transformer against sudden high voltages and currents in transformers is very important for both the design stage and the life of the transformer. It is important to know the regions exposed to overvoltages during the design phase in order to provide the resistance of the transformers against the lightning pulses. In this study, the electromagnetic flux values of the designed power transformer, both under normal operating conditions and lightning pulses, and the electromagnetic forces occurring in the transformer windings were analyzed. With the ANSYS @ Maxwell-3D based on the Finite Element Method (SEY), a 3D simulation model of the transformer was designed and analyzed. With the designed model, the analyzes of the transformer in both normal working conditions and in case of lightning impact were carried out. In addition, electromagnetic flux and electromagnetic forces were calculated for both operating conditions. In this way, the distribution of magnetic flux density in the core, the problematic and mechanical strength of the regions were determined.

Keywords: Lightning impulse, Electromagnetic force, Power transformer, Electromagnetic flux, ANSYS@Maxwell.

1. GİRİŞ

Son yıllarda Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (SEY) ANSYS@Maxwell gibi yazılım programları elektrik makinaları modellemek için lineer olmayan çeşitli materyallerin kalıcı mıknatıslanmalarını, manyetik akı dağılımlarını ve elektromanyetik kuvvetlerini belirlemek için çok kullanılmıştır. [1] ve [2]'de, yüksüz kayıplar analiz edilmiş ve farklı kalite ana malzemelerle karşılaştırılmıştır. Malzemelerin elektromanyetik parametreleri sayesinde, sonlu elemanlar analizi ile yüksek doğruluğa sahip tasarımlar yapılabilmektedir. Transformatörün farklı kısımlarında oluşan kayıplar, SEY kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir [3-8]. Benzer şekilde, kaçak akıların neden olduğu kayıplar için farklı koruyucu ve şönt uygulamalarının verimliliği [9] 'da tanımlanmıştır.

Transformatör tasarımında, Elektrik alan modeli ile sargıların hem giriş hem de çıkış tarafında oluşan elektriksel alan dağılımları incelenerek sistemin izolasyon seviyesi analiz edilebilir. Manyetik Alan modeli ile de transformatörün nüve ve sargı tasarımı, eşdeğer parametrelerin

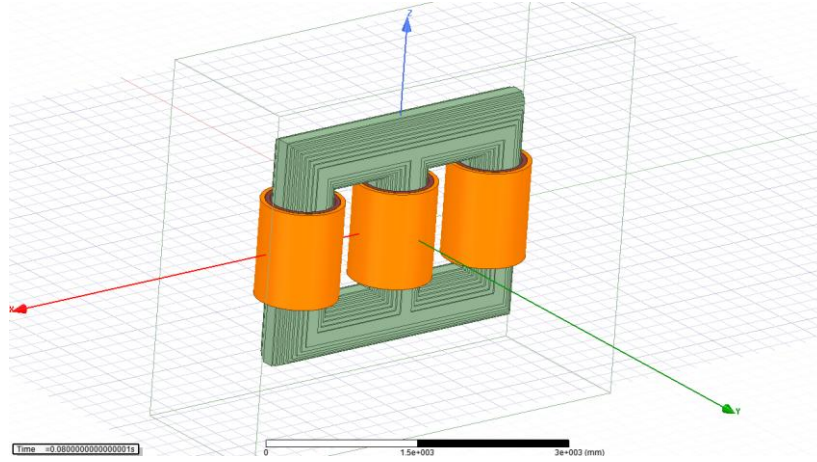
bulunması, kısa devre testinde sargılara gelen Laplace kuvvetleri ile analiz edilebilir. [10]'de ince saçlar kullanarak önemli ölçüde girdap akım kaybını azaltmak için çalışmalar yapılmıştır. [11]'de başka bir yeni yaklaşım ise nüvenin yapısında stranded demir kullanılarak eddy kayıpları azaltılmaya çalışılmıştır.

Transformatörlerde meydana gelen elektromanyetik kuvvetler transformatörün sargılarına etki eder. Bu kuvvetler, tahribatlara ciddi mekanik hasarlara ve transformatörün patlamasına yol açabilecek etkilere olabilir. Bu nedenle, transformatörün kısa devre ve yıldırım darbesi durumlarındaki dayanıklılığı güç transformatörlerinin temel özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir [12]. Bir elektrik tesisine güç trafosu kurmadan önce, kısa devre akımlarından kaynaklanan elektromanyetik kuvvetlerin tahmin edilmesi, güvenli çalışma şartları ve trafonun ömrü için tasarım aşamasında bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Transformatörün kısa devre testi için, özel tesisler, özel cihazlar ve bu testleri gerçekleştirebilecek uzmanlar gerekmektedir. Transformatörün nominal güç değeri arttıkça kısa devre testini gerçekleştirmek daha zorlaşmaktadır.

Bu çalışmada, güç transformatörüne elektromanyetik akı yoğunluğu ve sargılarda meydana gelen elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanması için 3D güç transformatör modeli kullanılmıştır. Bunun için hem yıldırım darbesi altında hem de normal çalışma koşullarında analizler gerçekleştirilmiştir.

2. MAXWELL-3D ORTAMINDA TRANSFORMATÖRÜN MODELLENMESİ

Gerçek trafo boyutlarına ve geometrisine dayanan SEY modelleri, düşük frekanslı geçici elektromanyetik alanın 3-D simülasyonu için oluşturulmuştur. Transient simülasyonun temel süreci, fiziksel denklemlerin mekansal ve zamansal ayrılmasını içermektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık, homojen olmayan ve anizotropik materyaller modellenen ve düzensiz ağlar (mesh) kullanılarak karmaşık geometriler analiz edilebilmektedir. Aşağıda Şekil 1'de SEY'e dayanan ANSYS@Maxwell ortamında tasarlanan trafo modeli sunulmuştur.



Şekil 1. Transformörün 3D Modeli

SEY, verilen bir uyarma ve frekans değerine bağlı olarak Maxwell denklemlerini çözmektedir. Geçici simülasyon, tüm zaman aşamalarını eşzamanlı olarak çözmek için zaman eksenini boyunca alan ayrıştırması yapılarak gerçekleştirilir. Transformör modelinde, sınır koşulları, dış geometri ve tüm materyallerin özellikleri üzerinde tanımlanmaktadır. Tasarlanan transformöre ait elektriksel ve mekaniksel veriler aşağıda Tablo 1’de verilmiştir.

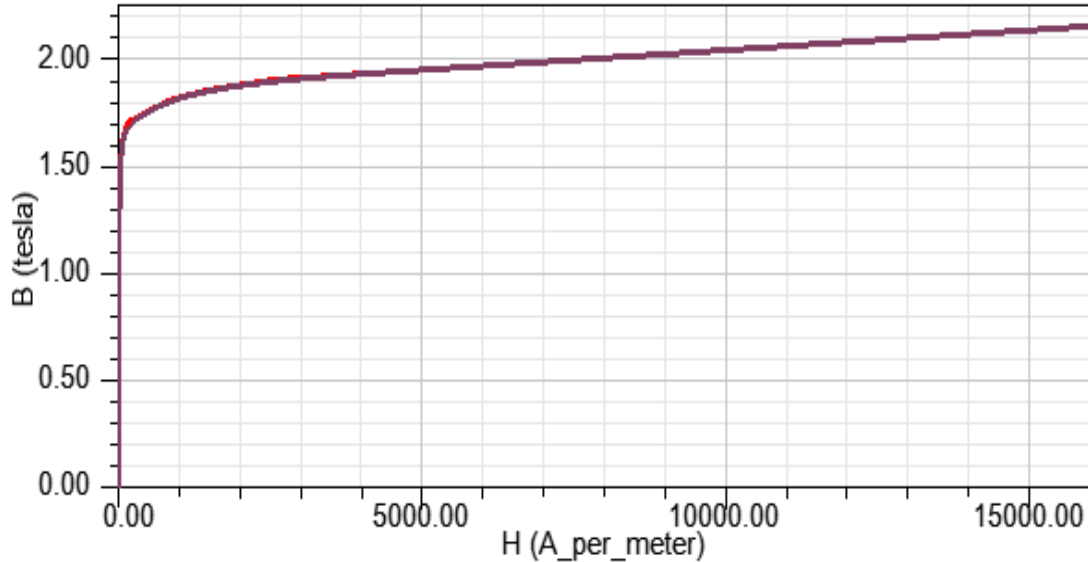
Tablo 1. Üç Fazlı 15 MVA Transformör Tasarım Öncesi Bilgileri

Parametre	Değer
Görünür Güç	15 MVA
Yüksek Gerilim (YG)	33 kV
Alçak Gerilim (AG)	11 kV
Nüve Kaybı	12.5kW
Bakır Kaybı	97kW
Frekans	50 Hz
Nüve Materyali	M125-027S
YG Sargı Direnci	1.7 Ω
AG Sargı Direnci	40 m Ω
YG Bağlantı	Delta
AG Bağlantı	Yıldız
YG Spir Sayısı	135
AG Spir Sayısı	665
YG Faz Akımı	784 A
AG Faz Akımı	156 A
Akım Yoğunluğu	1.8 A/m ²

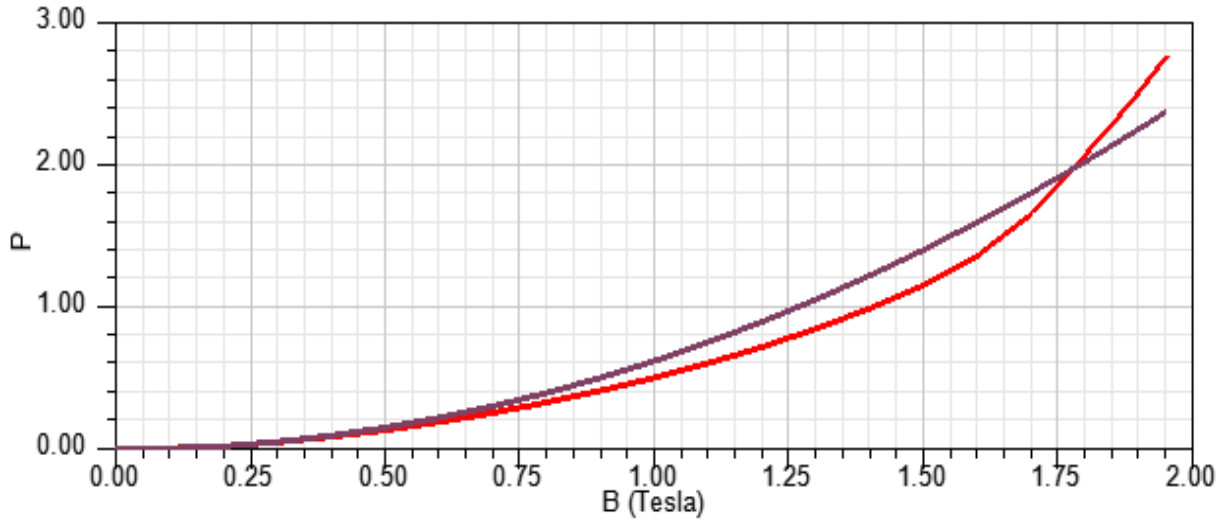
Kısa devre testi için geçici rejim çözücüyeye bağlı simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilmiştir. Trafonun 3-D modelinin simülasyonundan elektromanyetik akı yoğunluğu, elektromanyetik alan şiddeti ve elektromanyetik kuvvetler elde edilmiştir. Analizler, 0.08-0.1 s zaman aralığında 0.005 s adımlarla gerçekleştirilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık, homojen olmayan ve anizotropik materyaller modellenabilir ve düzensiz ağlar (mesh) kullanılarak karmaşık geometri analiz edilebilir.

SEY verilen bir uyarma ve frekans değerine bağlı olarak Maxwell denklemlerini çözmektedir. Transient simülasyon, tüm zaman aşamalarını eşzamanlı olarak çözmek için zaman eksenini boyunca alan ayrıştırması yapılarak gerçekleştirilmiştir. Hem yıldırım darbesi uygulanarak gerçekleştirilen analizler için hem de normal şartlardagerçekleştirilen analizler içintransformatör modelinde, sınır koşulları, dış geometri ve tüm materyallerin özellikleri üzerinde tanımlanmaktadır. Manyetik nüve, manyetizasyonun B-H eğrisi ve ince laminasyonlarla karakterize edilmektedir. Bu karakteristik özellikler trafo modelinin her iki simülasyonunda da kullanılmıştır. Manyetik nüve materyaline ait B-H eğrisi aşağıda Şekil 2’de sunulmuştur. Spesifik nüve kayıpları B-P eğrisi deŞekil 3’te sunulmuştur.



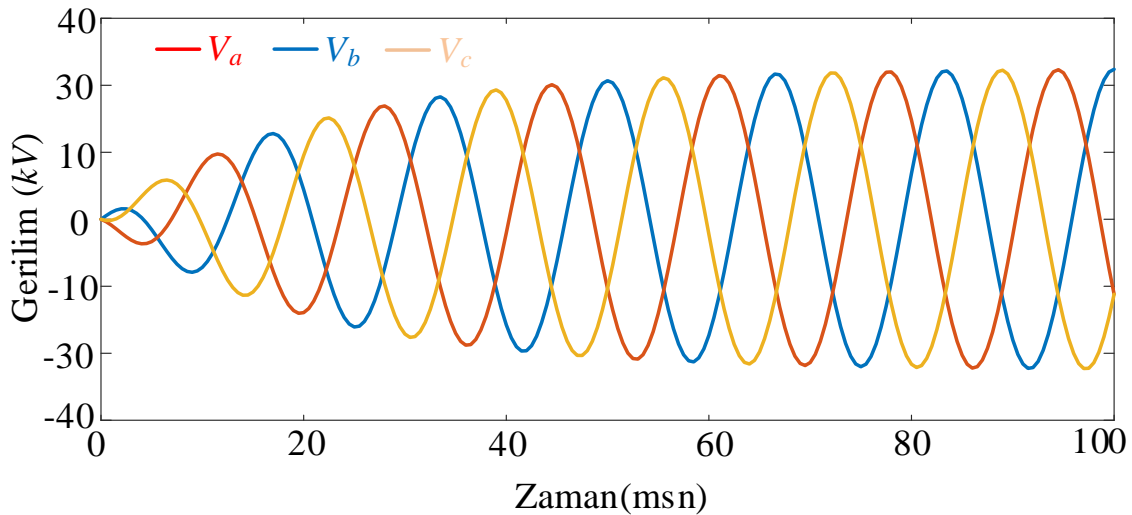
Şekil 2. Nüve laminasyonunun B-H eğrisi.



Şekil 3. Akı kayıplarına karşı nüve yoğunluğunun B-P eğrisi

3. Transformatörün Normal Çalışma Koşullarındaki Analizi

Bu çalışma koşulunda transformatör modellerindeki tasarımların analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda transformatörün, manyetik alan analizi ve elektromanyetik kuvvetleri kalıcı rejim durumu için hesaplanmıştır. Ani akımları elimine etmek ve simülasyon süresini kısaltmak için Şekil 4’te sunulan veüssel olarak artan bir gerilim uygulanmıştır.



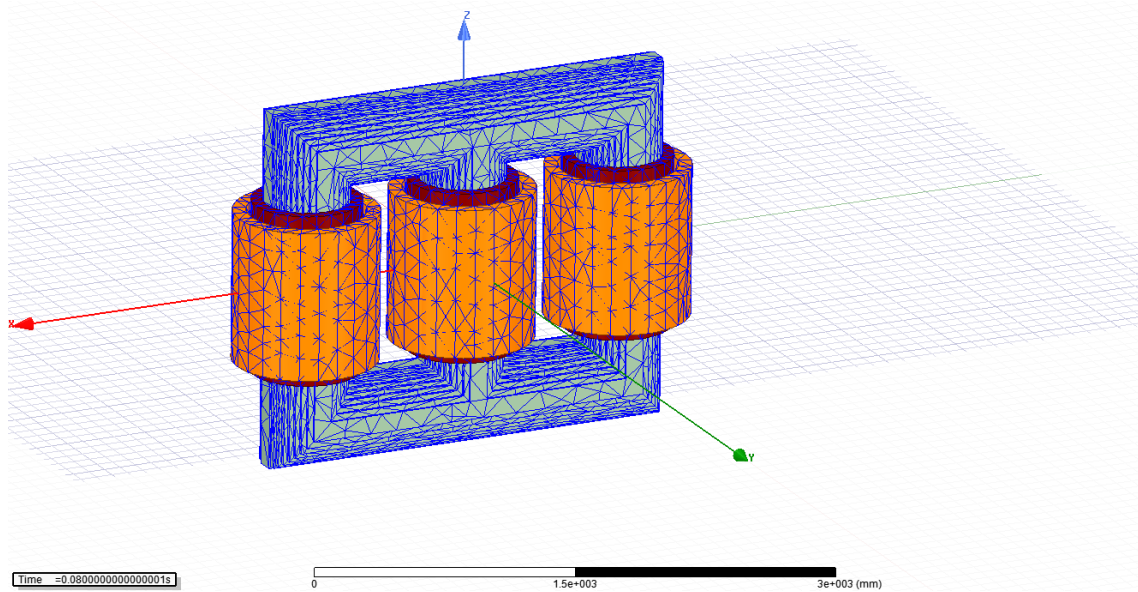
Şekil 4. Transformatörün giriş gerilimi

$$V_a = V_p (1 - e^{1-50t}) \cdot \cos(2\pi t \cdot 50) \quad (1)$$

$$V_b = V_p (1 - e^{1-50t}) \cdot \cos\left(2\pi t \cdot 50 + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2)$$

$$V_c = V_p (1 - e^{1-50t}) \cdot \cos\left(2\pi t \cdot 50 + \frac{4}{3}\pi\right) \quad (3)$$

Manyetik akı yoğunluğu B'nin hesaplanması için manyetik vektör potansiyeli A bulunmalıdır. Bu amaçla, tüm model geometrisi, A'nın basit bir işlevle yaklaşık olarak eşleştirildiği, genellikle üçgenler ve düzgün dörtyüzlüler olmak üzere birçok öğeye ayrılır. 3D modelinde sonlu elemanların oluşturduğu mesh (ağ) Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Trafo 3D modelinin mesh'ı (ağ).

3.1 Elektromanyetik Alan Analizi

Trafo tasarımcıları eskiden matematiksel modelleri baz alarak tasarımlarını sadece teorik olarak gerçekleştirmişlerdir. Bunun için Maxwell denklemleri kullanılmıştır.

- Faraday'ın indüksiyon yasası:

$$\nabla \times E = -\dot{B} \quad (4)$$

- Gauss'un manyetik yasası:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

- Ampere'nin akım yasası:

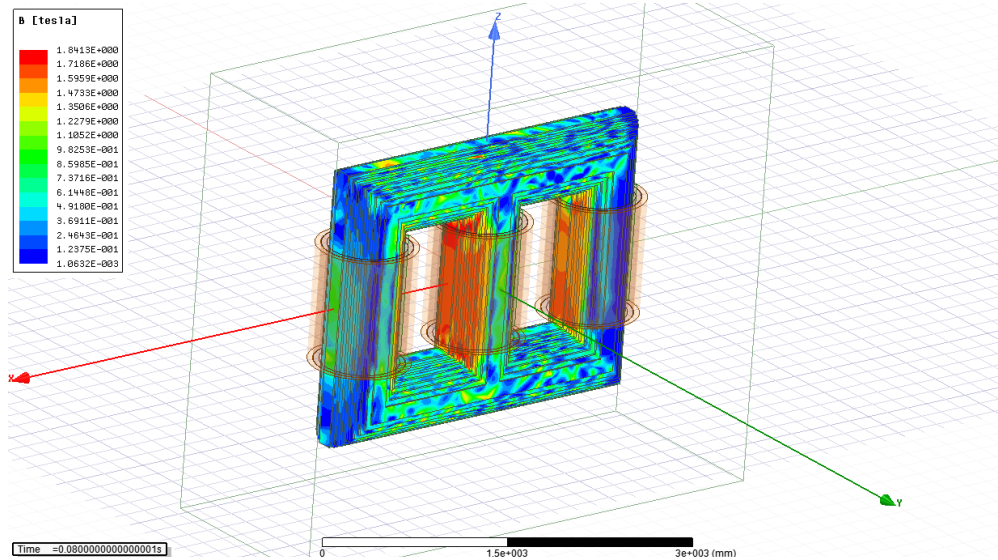
$$\nabla \times H = j + \dot{D} \quad (6)$$

- Gauss'un elektrik yasası:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (7)$$

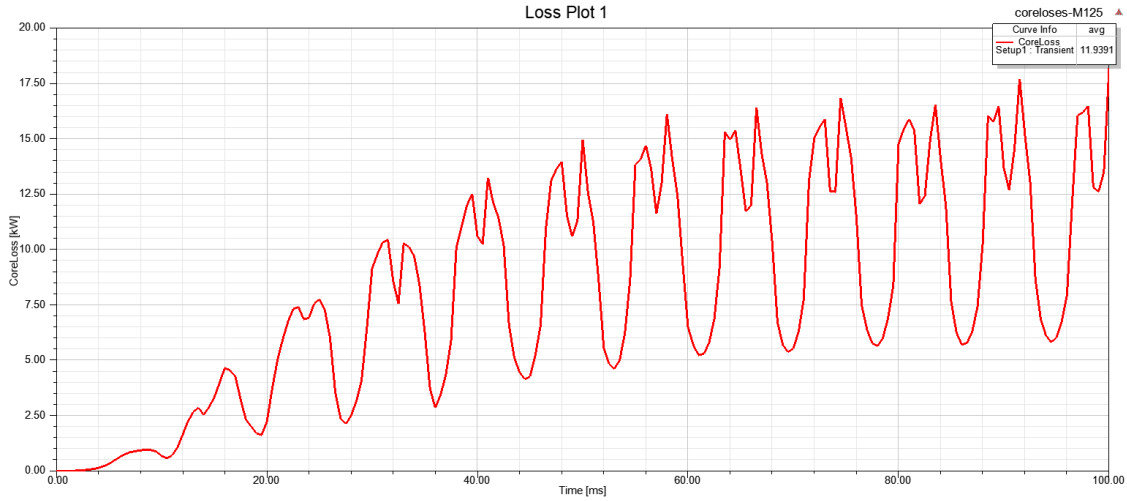
Bu yasalar baz alınarak elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmiştir.

Transformatörün çalışması koşulları nüve doyma noktasına yakın olursa transformatörde kayıplar artar, açığa çıkan ısı artar ve transformatörün verimi düşer. Bu nedenle, simülasyonu gerçekleştirilen modelin akı yoğunluğu farklı zaman dilimleri için analiz edilmiştir. Tasarlanan transformatör modelinin elektromanyetik akı yoğunluğunun dağılımı Şekil 6'da 3D olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan, transformatörün nüvesinin akı yoğunluğu dağılımının doyuma gittiği bölgeler görülebilmektedir.



Şekil 6. 3D Akı Yoğunluğu Dağılımı

Tasarlanan transformatör modelinin nüve kayıp eğrisi aşağıda Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Manyetik nüvenin kayıp eğrisi

Transformatörün normal çalışma koşullarındaki simülasyonundan elde edilen değerler aşağıda Tablo 2’de sunulmuştur.

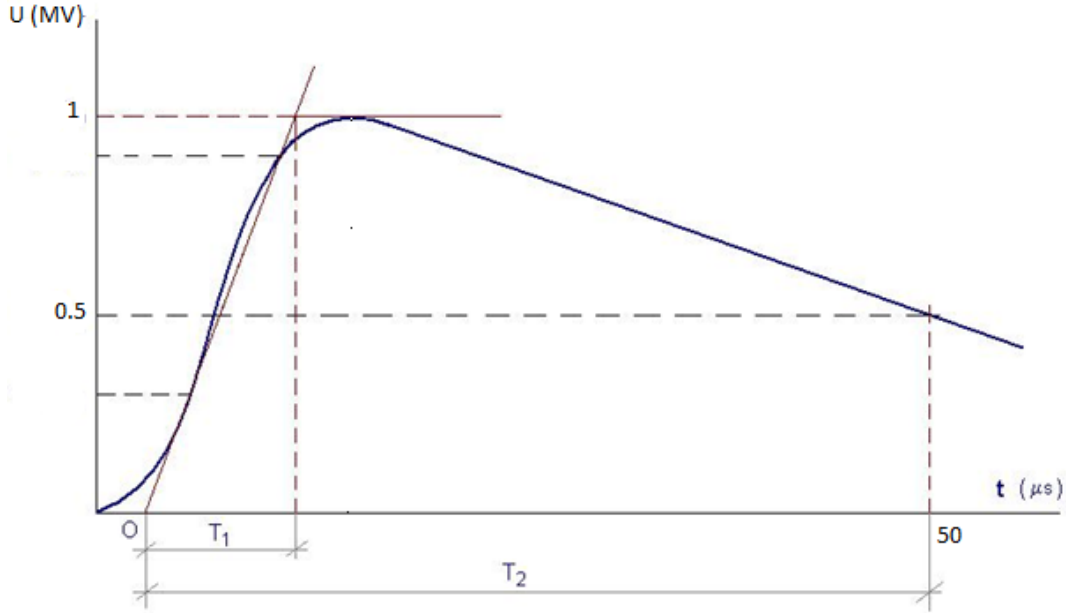
Tablo 2. Modelin Normal Çalışma Koşullarındaki Elektromanyetik akı ve Kayıp değerleri

Maksimum Elektromanyetik akı (T)	Nüve kaybı (kW)	Eddy akım kayıpları (kW)	Histeresiz kayıplar (kW)	Diğer kayıplar (kW)
1.84	11.9391	4.4876	3.6509	3.8006

4. YILDIRIM DARBESİNİN TASARLANAN MODELE UYGULANMASI

Yıldırım darbesini uygulamak için “Transient” çözücü tipi kullanılmıştır. Burada uyarma AG sargılarına verilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

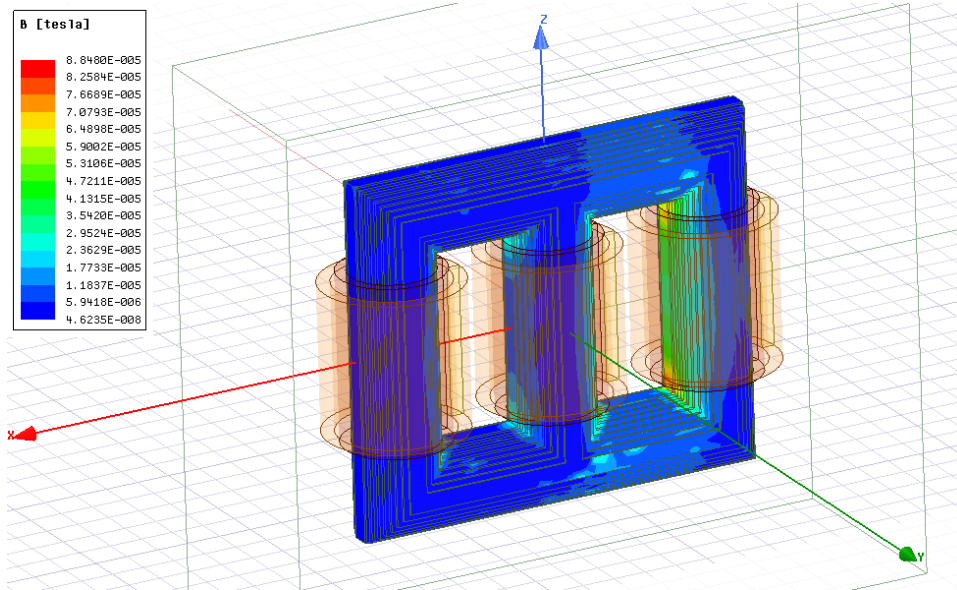
Yıldırım darbesini uygulamak için “SheetScan” yöntemi kullanılmıştır. Yeni bir koordinat sistemi ve eğri oluşturulmuştur. Analiz, 0-50µ saniye aralığında birer mikro-saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yıldırım darbe geriliminin maksimum değeri 1MV’dir. Aşağıda Şekil 8 ve 9’da, uygulanan yıldırım darbesinin şekli ve elde edilen koordinat sistemine ait eğrinin grafikleri sırasıyla sunulmuştur.



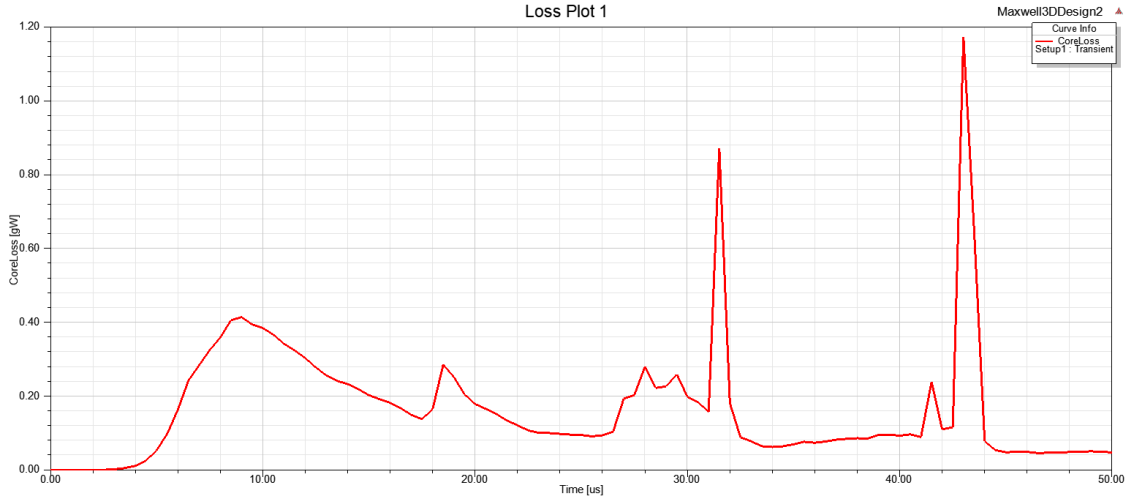
Şekil 8. Uygulanan yıldırım darbesine ait grafik.

4.1 Yıldırım Darbesi Uygulanan Modelin Analizi

Tasarlanan modele SheetScan metoduyla yıldırım darbesi uygulanmıştır. Gerilim seviyesi 1 MV ve analiz süresi için 0-50 μ saniye aralığı için 1 μ saniyelik adımlar seçilmiştir. Simülasyondan sonar elde edilen nüve kaybı grafiği aşağıda Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. 3D transformatör modelinin yıldırım darbesi için akı yoğunluğunun dağılımı



Şekil 10. 3D transformatör modelinin yıldırım darbesi için nüve kayıp eğrisi.

Ampirik formüllere dayanan manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması, makinenin farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun sadece yaklaşık değerlerini vermektedir. Makinenin farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun doğru tahmini için, nüve malzemesinin doyma noktasına (B-H) yakın olduğu makinenin zayıf parça olarak adlandırılan kısımlarını doğru tahmin etmek tasarım sürecinde önemlidir. Makinenin nüve doyma noktasına yakın çalışması, kayıpları ve ısı yayılımını artırır, verimi düşürür. Bu nedenle, akı yoğunluğu, her iki test durumu için farklı zaman aralıklarında analiz edilmiştir.

Yıldırım darbe analizi gerçekleştirilen modelde nüve malzemesinde meydana gelen elektromanyetik akı değerinin normal çalışma koşullarındaki elektromanyetik akı değerinden çok yüksek olmuştur. Bu durumun da nüve malzemesinin doyuma gitmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca nüvedeki zayıf noktalar ve sıkıntılı bölgeler tespit edilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada SEY bazlı transformatör simülasyon modeli sunulmuştur. SEY'ye dayanan simülasyon yöntemi bu çalışmada önerilmiştir. Elde edilen 3D modeller, normal analizler için üç fazlı simetrik güç kaynağı, yıldırım darbesi için asimetrik güç kaynağı için ana kayıpların hesaplanmasını sağlamıştır. Nüve laminasyon materyalinin manyetik ve elektriksel özellikleri

kayıpların meydana gelmesinde büyük etkiye sahip olduğu için, M125-027 materyali kullanılmıştır. Yıldırım Darbesine bağlı olarak yapılan analizde hem kayıplar hem elektromanyetik akı çok çok yüksek olmuştur. Transformatör kesitindeki akı yoğunluğu dağılımı da hesaplanmıştır. Tüm modellerden elde edilen sonuçlardan yıldırım darbesi altında çalışan transformatörün, nüvenin doyma noktasının çok üstünde çalıştığı kanıtlanmıştır.

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

- [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, 2011, pp. 1-5.
- [2] O. Ozgonenel, E. Kilic: Modeling and real-time fault identification in transformer, Journal of the Franklin Institute, vol. 345, no. 3, May 2008, pp. 205-225.
- [3] 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, 2015, pp. 709-718.
- [5] Tsili MA, Kladas AG, Georgilakis PS. Computer aided analysis and design of power transformers. Comput Ind 2008;59:338–50
- [6] Y. Wang, J. Pan, M. Jin: Finite Element Modeling of the Vibration of a Power Transformer, Proceedings of ACOUSTIC 2-4 November, Australia, 2011, pp. 1-7.
- [7] Mamizadeh, A., Iskender, I. (2009). Analyzing and comparing thermal models of indoor and outdoor oil-immersed powerl powertech. IEEE Bucharest, 2, 1 – 8.
- [8] 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] User’s guide – Maxwell 2D/3D. 2018.
- [11] Georgilakis, P. S. (2009). Spotlighting on Modern Transformer Design, Springer is part of Springer Science+Business Media, Greece, 75, 125-129, 146-148, 267-269.
- [12] J. Smajic, T. Steinmetz, M. Rüegg, Z. Tanasic, R. Obrist, J. Tepper, B. Weber, M. Carlen, “Simulation and Measurement of Lightning-Impulse Voltage Distributions Over Transformer Windings.” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, 553-556, (2014).