



EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A TRANSFORMER'S INDUCTANCES AND SIMULATION CALCULATION USING ANSYS@MAXWELL

Yıldırım Özüpak*¹ 

¹Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Programı, Diyarbakır, Türkiye

Abstract

Original scientific paper

The transformer is a vital component of electrical power systems for transmission and distribution. Robust design to increase the efficiency of a transformer is one of the main factors in transformer manufacturing. The efficiency of a practical transformer is limited by losses from design and manufacturing defects. Wireless power transmission (WPT) is the transfer of electrical energy without a conductor. WPT is based on technologies that use time-varying electric, magnetic or electromagnetic fields. This technology is useful for powering inconvenient or impossible electrical devices, such as sensors, actuators, and communication devices. Power can be transferred over short distances by inductive coupling between alternating magnetic fields and coils, or by capacitive coupling between alternating electric fields and metal electrodes. An experimental model of a transformer designed with M125-027S core material was created for the wireless power transmission system. The parameters, parameters were measured under these conditions, leaving 20 mm air gap on both sides of the transformer. The Finite Element Method (FEM) was used to calculate and analyze the inductance parameters of the transformer's coils. The system was modeled with ANSYS@Maxwell, and the magnetic field and inductance parameters were calculated with ANSYS @ Maxwell, which realized a FEM-based solution. In this paper, it is aimed to establish a basis for correct compensation of the capacitance of the wireless power transmission system by calculating the inductive parameters of the transformer.

Keywords: Transformer, WPT, FEM, inductance, magnetic field.

BİR TRANSFORMATÖRÜN ENDÜKTANSLARININ DENEYSEL ANALİZİ VE ANSYS@MAXWELL İLE SİMÜLASYON HESABI

Özet

Orjinal Bilimsel Makale

Transformatörler, elektriğin iletim ve dağıtım için elektrik güç sistemlerinin hayati bir bileşendir. Bir transformatörün verimliliğini artırmaya yönelik sağlam tasarım, transformatörün imalatındaki ana etkenlerden biridir. Pratik bir transformatörün verimliliği, tasarım ve imalat kusurlarından kaynaklanan kayıplarla sınırlıdır. Kablosuz güç aktarımı (KGA), elektrik enerjisinin iletkensiz aktarılmasıdır. KGA zamanla değişen elektrik, manyetik veya elektromanyetik alanlar kullanan teknolojilere dayanır. Bu teknoloji sensörler, aktüatörler ve iletişim cihazlarında olduğu gibi uygunsuz veya mümkün olmayan elektrikli cihazlara güç sağlamak için kullanışlıdır. Güç, kısa mesafelerde, alternatif manyetik alanlar ve bobinler arasındaki endüktif kuplaj veya alternatif elektrik alanları ve metal elektrotlar arasındaki kapasitif kuplaj ile aktarılabilir. Kablosuz güç aktarım sistemi için M125-027S nüve malzemesi ile tasarlanan bir transformatörün deneysel bir modeli oluşturulmuştur. Transformatörün her iki tarafında 20 mm hava boşluğu bırakılarak, parametreler, parametreler bu şartlar altında ölçülmüştür. Transformatörün bobinlerinin endüktans parametrelerini hesaplamak ve analiz etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanılmıştır. Sistem ANSYS@Maxwell ile modellenerek, manyetik alan ve endüktans parametreleri SEY bazlı çözüm gerçekleştiren ANSYS@Maxwell ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada, transformatörün endüktif parametreleri hesaplanarak kablosuz güç aktarım sisteminin kapasitesinin doğru kompanzasyonu için temel oluşturulmak istenmiştir.

Keywords: Transformatör, KGA, SEY, endüktans, manyetik alan.

1 Giriş

Kablosuz güç aktarımı, uzun bir zamandır önemli bir araştırma alanı olmuştur. Son zamanlarda, geleneksel güç modlarına oranla güç aktarımında daha verimli olduğu

düşünüldüğünden, kablosuz güç aktarımı alanındaki ilerlemeleri gerçekleştirmek için bu alana çok fazla ağırlık verilmiştir. Dolayısıyla, teknoloji ilerledikçe KGA tabanlı uygulamalar için talepler ciddi anlamda artmaktadır. İlk zamanlarda farklı birçok bilim insanı, KGA'nın farklı

* Corresponding author.

E-mail address: yildirimozapak@gmail.com (Y. Özüpak)

Received 19 January 2021; Received in revised form 29 January 2021; Accepted 25 March 2021

2587-1943 | © 2021 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.864239>

kullanım alanları üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar, kaynak ile yük arasında iletken bir bağlantı olmadan elektrik gücünün aktarılmasını kapsamaktadır. Her tür KGA'nin kendi geçmişleri, son teknolojileri ve gelecekteki kapsamı vardır. Elektrik enerjisi endüstrisinin hızla ilerlemesiyle, geleneksel sonlu güç iletim sistemi endüstrisi insanların ihtiyaçlarını karşılayamaz duruma gelmeye başlamıştır. Bu nedenle Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) ve şarj teknolojisi ilgi çekmeye başlamış ve araştırma konusu olmuştur. Son yıllarda, Kablosuz Güç Aktarımının daha fazla araştırılması ve bu konuda çalışmalar yapılmasıyla, müzik çalar, cep telefonu, bilgisayarlar gibi birçok alanda başarılar elde edilmiş ve normal hayat üzerinde olumlu etkiler yaratmıştır. KGA, Technology Review American tarafından en iyi 10 araştırma alanı arasında kabul edilmektedir [1,2]. Çekirdek tipi telsizin nüvesi gibi gevşek bağlanmış transformatör, sinyal gönderme ve alma cihazı arasındaki geleneksel sıkı bağlantı arasındadır [5-8]. Orta mesafeden güç frekansı veya yüksek frekanslı güç iletimi altında çalışırken elektromanyetik bağlantı ilişkisini kullanırlar. Bu konuda yapılan çalışmalar, gevşek bağlanmış trafo kaplin katsayısının düşük olduğunu, enerji aktarım verimliliğinin yüksek olmadığını bunun geleneksel trafo boşluğunun yüksek iletim verimliliği ile ilgisini daha büyük olduğunu ve bu nedenle WKGA sisteminin enerji verimliliğini iyileştirdiğini göstermiştir [2].

KGA ile orta frekanslı radyo frekansını yüksek frekanslı iletim sistemine aktarılabilir. Bunun için redresör ve invertör sistemlerinde ek yatırım, radyasyon ile birlikte çevre ve insan sağlığı üzerinde büyük bir etki yaratacaktır. Kapasitans kompanzasyonu ise, eğer sistemin endüktans parametreleri doğru bir şekilde belirlenebilirse radyo iletim sisteminin verimliliği etkili bir şekilde artırılabilir [9,10]. Bu yöntemin kullanımı kolaydır ve küçük yatırım avantajına sahiptir.

Bu çalışmada, radyo enerji iletim sistemi teorisine dayanılarak, radyo dalgaları gibi enerjiyi iletim sistemi analiz edilmiştir. Transformatörün endüktans parametrelerini ve manyetik alanını hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, transformatörün endüktans parametrelerini ölçmek için devre deneyi tasarlanmıştır. Deneysel verilere dayanarak, kapasitif kompanzasyonun daha fazla çalışılması için temel oluşturan sonlu elemanlar yönteminin endüktans hesaplamasının doğruluğu analiz edilmiştir. Ayrıca, KGA fikrini yeni araştırmacılarla tanıştırmak için yapılan araştırmalar ve incelemeler sunulmuştur.

2 Çalışma Prensipleri

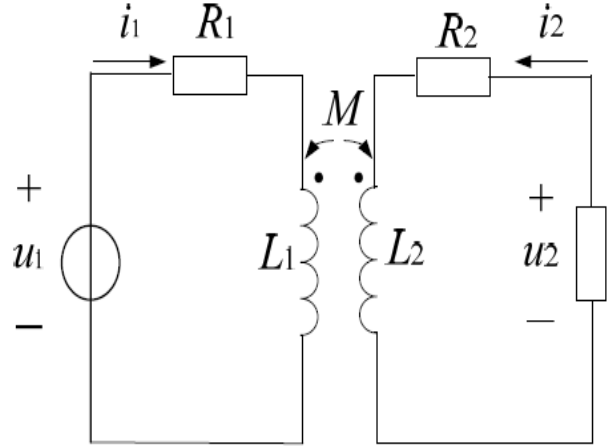
Demir çekirdekli transformatör, kablosuz güç aktarım sisteminin temel parçasıdır. Geleneksel transformatörler gibi Faradayın induksiyon yasasına dayanarak çalışırlar. Enerjilenen taraftaki bobin tarafından üretilen alternatif manyetik alan, transformatörün yük tarafına enerji iletimini gerçekleştirmek için çekirdek ve hava boşluğu boyunca yük bobinine iletilir. Gerilim kaynağı iç direncin r , primer tarafı hat direncini R_{T1} , yük tarafı hat direncini R_{T2} , her iki taraftaki gevşek bağlanmış transformatör bobini direnci R_{L1} , R_{L2} , yük Z_L olarak ayarlanır. L_1 ve L_2 , bobinin her iki tarafında gevşek bağlı transformatör eşdeğer endüktansdır, M eşdeğer ortak endüktansdır.

Uyarma tarafı direnci ve yük tarafı direnci bir dirence eşdeğerdir.

$$R_1 = r + R_{T1} + R_{L1} \quad (1)$$

$$R_2 = R_{T2} + R_{L2} \quad (2)$$

Kablosuz güç aktarım sisteminin şematik diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. KGA temel devresi

Şekil 1'de görüldüğü gibi, Kirchoff'un gerilim yasasına göre, mevcut kablosuz güç aktarım sisteminin temel denklemi:

$$U_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M_{12}I_2 \quad (3)$$

$$0 = (R_2 + Z_L + j\omega L_2)I_2 - j\omega M_{12}I_1 \quad (4)$$

Formülde, AC gerilim kaynağının çıkış gerilimi U_1 , hava aralıklı tasarlanan transformatörün her iki tarafındaki akım sırasıyla I_1 ve I_2 'dir. Hava aralıklı trafoda ve geleneksel trafoda, uyarma tarafı ile yük tarafı arasında önemli farklılıklar vardır. Bunlar büyük bir hava boşluğu, manyetik alan isteksizliği, bağlantı katsayısı küçüklüğü, düşük iletim verimliliğidir. Uygulanan yöntem enerji aktarım verimliliğini artırır. Sistem kondansatör tarafından kompanze edilir. Çalışmanın temel olayı transformatörün endüktans parametrelerinin yani L_1 , L_2 ve M_{12} 'nin nasıl belirleneceğidir [3].

3 Metot

3.1 Endüktans parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 2'de verildiği gibi, deneyde "E-I" tipi hava aralıklı bir transformatör kullanılmıştır. Sargıların her iki tarafı aynı parametrelere sahip bakır bobinden yapılmıştır. Bobinin her iki tarafı koaksiyel konumda sabitlenmiştir. Manyetik alanın uyarılma tarafı bobinin maksimum yük tarafına iletebilir ve kuplaj oranı yüksektir.

Gerilim U_1 , akım I_1 , direnç R_1 , yüksüz gerilim U_2 , direnç R_2 değerleri ölçülerek belirlenir. Uyarma tarafındaki öz endüktans:

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2 - R_1^2}}{2\pi f} \quad (5)$$

ortak endüktansın her iki tarafında da yüksüz gerilim $U_2 = \omega M_{12} I_1$ olduğundan:

$$M_1 = \frac{U_2}{\omega I_1} = \frac{U_2}{2\pi f I_1} \quad (6)$$



Şekil 2. Transformatörün deney model

Kablosuz güç aktarım sistemi, ayarlanabilir voltaj kaynağı, hava aralıklı transformatör, yük ve ölçüm aletleri ve diğer bileşenlerle deney yapılmıştır. Trafo parametreleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Trafo değerleri

Güç (VA)	90
Giriş Gerilimi(V)	220
Çıkış Gerilimi (V)	48
Giriş Sargı Sayısı (N)	752
Çıkış Sargı Sayısı (N)	164
Giriş Faz Akımı (A)	0.409
Çıkış Faz Akımı (A)	1.875
Frekans (Hz)	50
Bakır Kaybı (W)	9
Nüve Kaybı (W)	4
Nüve Hacmi (m3)	$0.222 * 10^{-3}$
Sarguların Derinliği (mm)	67
Sarguların Genişliği (mm)	51

4 SEY ile endüktans hesaplama

4.1 Manyetik alan hesaplaması

Maxwell'in doğrusal olmayan manyetik alan denkleminde göre vektör manyetik potansiyeli A:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad (7)$$

şeklindedir.

μ malzemenin manyetik geçirgenliği, J gerçek ölçüm ve hesaplama ile elde edilmesi gereken akım yoğunluğudur. Kenar enterpolasyon işlevi:

$$A = \sum_{n=1}^{n_n} M_n(x, y, x) A_n \quad (8)$$

şeklindedir.

Burada, M_n , temel fonksiyon dizisinin genel terim numarasıdır. n_n toplam öge sayısıdır (toplam kenar sayısı). Green teoremi uygulanarak Galerkin ağırlıklı manyetik denklem elde edilir:

$$\iiint_V \frac{1}{\mu} (\nabla \times M_m) (\nabla \times M_n) A_n dV = \iiint_V M_m J dV \quad (9)$$

burada M_m , temel fonksiyon sırasıdır ve yük fonksiyonu, temel fonksiyonla aynıdır. Akım I biliniyorsa, yüklem işlevi yukarıdaki denkleme göre ifade edilir. Tüm yük fonksiyonları için, yük denklemi cebirsel bir denklem oluşturmak için ayrıştırılarak A, B, H ve benzeri tüm düğümler veya kenarlar için hesaplanır.

4.2 Endüktans hesaplama prensibi

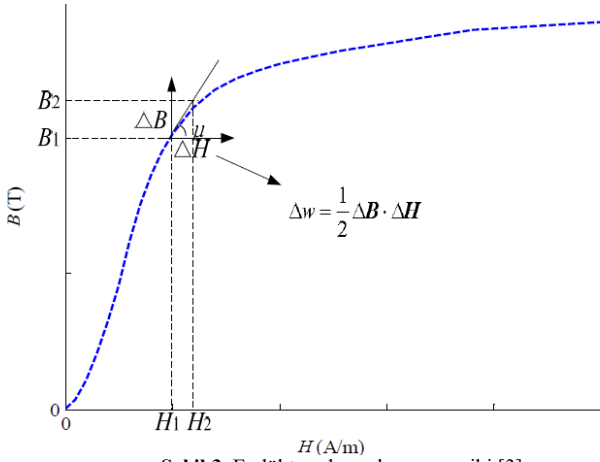
Enerji dönüşüm kuralına göre, bobin akımı arttığında, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre akı artar. Harici güç kaynağı tarafından sağlanan enerji artışı $dW = \Delta U \cdot \Delta I dt = \Delta I d(\Delta \Psi)$ şeklindedir. Bobin akım artışı ΔI ise, manyetik alan enerjisi artışı dinamik endüktans ve uyarma akımı ile ilişkilidir.

$$\Delta W = \frac{1}{2} L_{Dpq} \Delta I_p \Delta I_q, (p, q = 1, 2) \quad (10)$$

Öte yandan, zaman alanı hesaplamasının her anında, doğrusal olmayan manyetik alan, kararlı durum alanına göre çözülür. Bu sırada yerel enerji, Şekil 2'de gösterildiği gibi yerel doğrusallaştırma yöntemiyle hesaplanır. Akım artışının (ΔI) neden olduğu alan değişikliği miktarı ΔH , ΔB 'dir ve hesaplanan enerji artışı şöyledir:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \Delta B \cdot \Delta H d\Omega \quad (11)$$

(10) ve (11), dinamik endüktans parametreleri, yani ΔI_1 , ΔI_2 hesaplanan öz indüktans parametreleri L_1 , L_2 'den hesaplamak için kullanılır. Ardından ortak endüktans M_{12} çözülür. Geleneksel deneyde, ölçülen endüktans statik endüktanstır. ANSYS ise manyetik alanı sonlu eleman hesaplamasına dayalı olarak dinamik endüktansı hesaplar ve dinamik endüktans, doğrusal veya yaklaşık doğrusal koşuldaki statik endüktansa yaklaşık olarak eşittir. Doğrusal koşullarda ANSYS ile statik bobin endüktans parametreleri doğru bir şekilde hesaplanabilir.



Şekil 3. Endüktans hesaplama prensibi [3]

5 Bulgular ve Değerlendirme

5.1 Deneysel sonuçların analizi

0-220 V endüktans parametre değerlerinden uyarma gerilimini ölçmek için deneysel yöntemle hava aralığı genişliği 20 mm alınmıştır. Hava aralıklı transformatörde büyük bir boşluk kalınlığı vardır. Bu durum manyetik isteksizliğin büyümesine neden olur. Şekil 4'te transformatörün deneyinden bazı kareler verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel çalışmalar

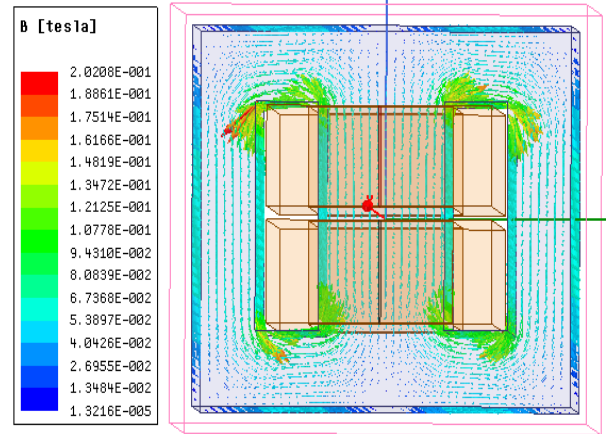
Bu trafolar normal bir transformatör ile karşılaştırıldığında, ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri, transformatörün genel uyarılmasını önemli ölçüde azaltır. Genel uyarma özellikleri doğrusal

olma eğilimindedir. Gerilimin artmasıyla birlikte öz endüktans ve ortak endüktans, ortalama olarak 0.33H ile 0.0158H değerinde değişmeden kalmıştır.

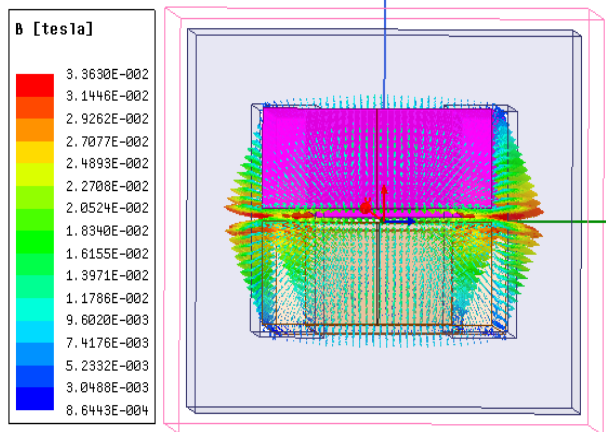
5.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Deneysel model ANSYS yazılımı ile modellenerek, 20 mm hava aralığına sahip trafo için manyetik alan hesaplanmıştır. Manyetik indüksiyon diyagramından sonra elde edilen manyetik alan B Şekil 5'te sunulmuştur.

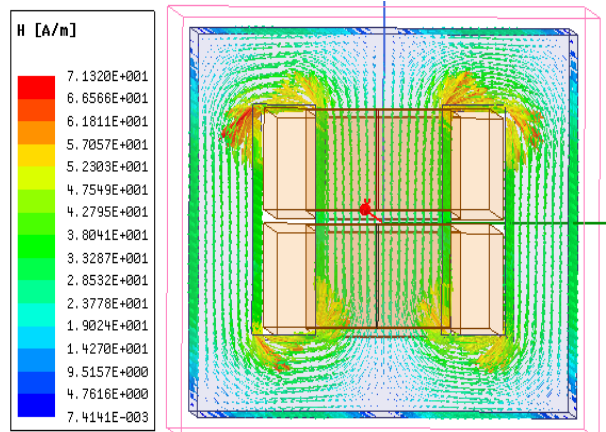
ANSYS simülasyon sonuçları ve deneysel veriler temelde aynıdır. Deneysel verilere göre M_{12} biraz daha küçüktür. Bunun nedeni büyük hava boşluğunun yarattığı enerji kaybindan kaynaklanmaktadır.



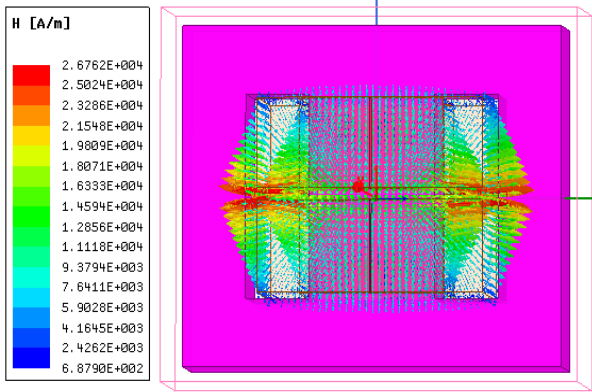
Şekil 5. Nüve deki manyetik alan dağılımı



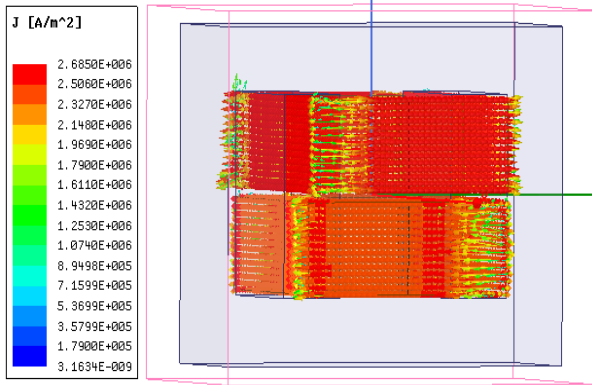
Şekil 6. Sargılardaki manyetik alan dağılımı



Şekil 7. Nüve manyetik alan şiddeti



Şekil 8. Sargılardaki manyetik alan şiddeti



Şekil 9. Sargılardaki akım yoğunluğu

Hava aralığının 20 mm olduğu modelin öz endüktansı L'nin ve ortak endüktansı M_{12} 'nin ortalama değerleri elde edilmiştir. Bu endüktans değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Endüktans değerlerinin karşılaştırılması

Parametre	Deneysel sonuç	ANSYS sonucu
L (H)	0.33	0.35
M (H)	0.0158	0.0163

ANSYS ile hesaplanan endüktans parametreleri, deneysel verilerle tutarlı olup hata oranı küçük olmuştur. Yöntemin uygulanabilirliği ve doğruluğunun manyetik alan endüktans parametrelerini hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi ile kanıtlanmıştır.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, kablosuz güç sistemindeki hava aralıklı transformatörün endüktans parametreleri simüle edilerek analiz edilmiştir. Transformatörün manyetik alanı ve endüktans parametreleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS@Maxwell ile simüle edilerek elde edilmiştir. Modellenen transformatörün hava aralığından dolayı manyetik direnci büyük, doğrusal olmayan ferromanyetik malzemenin etkisi de küçüktür. Bu durum transformatörün daha zor uyarılmasına neden olur. Doğrusal şartlarda çalışan transformatörün endüktans parametresi sabit kalır. Teorik olarak, ANSYS sonlu eleman yöntemi, hava aralıklı bir transformatörün endüktans değerlerini hesaplamak için kullanılabilir.

Deneysel verilere dayanarak, sonlu elemanlar yönteminin sonuçları analiz edilmiştir. Sonuçlar,

transformatörün endüktansının gerilim arttıkça sabit olduğunu ve ANSYS'nin doğruluk derecesinin %97 dolaylarında olduğunu göstermektedir. Kablosuz güç iletim sistemindeki transformatörün endüktans parametrelerini hesaplamak için ANSYS kullanmanın fizibilitesi deneylelerle doğrulanmıştır.

Teşekkür

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

Açıklamalar

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] Hayes, J. G., Egan, M. G., Murphy, J. M., Schulz, S. E., & Hall, J. T. (1999). Wide-load-range resonant converter supplying the SAE J-1773 electric vehicle inductive charging interface. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(4), 884-895.
- [2] Kim, Y. H., & Jin, K. H. (2011). Design and implementation of a rectangular-type contactless transformer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(12), 5380-5384.
- [3] Kerui, C., Yang, H., Yan, Z., Nannan, G., Ying, P., Hongbo, L., ... & Liangfeng, G. (2017, November). Experimental analysis and simulation calculation of the inductances of loosely coupled transformer. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 94, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- [4] Zheng, T., Zhao, Y. J., Jin, Y., Chen, P. L., & Zhang, F. F. (2014). Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of a magnetically controlled shunt reactor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 967-975.
- [5] Wojda, R. P., & Kazimierczuk, M. K. (2013). Analytical winding size optimisation for different conductor shapes using Ampère's Law. *IET Power Electronics*, 6(6), 1058-1068.
- [6] Özüpak, Y., & Mamiş, M. S. (2019). Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(10), 1478-1484.
- [7] 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.
- [8] Yazdani-Asrami, M., Mirzaie, M., & Akmal, A. A. S. (2013). No-load loss calculation of distribution transformers supplied by nonsinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis. *Energy*, 50, 205-219.
- [9] Ostrenko, M., & Andriienko, B. (2017). Transformer impulse surges calculation by FEM coupled to circuit. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(6), 1-4.
- [10] Župan, T., Trkulja, B., Obrist, R., Franz, T., Cranganu-Cretu, B., & Smajic, J. (2015). Transformer windings' RLC parameters calculation and lightning impulse voltage distribution simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 1-4.