



Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi

Orhan KAPLAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Beşevler/ANKARA

Öz

Kablo karmaşıklığını ve cihazlar arasındaki bağlantı terminali farklılığını ortadan kaldırmayı amaçlayan kablosuz güç aktarım sistemleri günümüzde cep telefonu, diş fırçası, tıraş makinası ve elektrikli taşıtlar gibi birçok alanda geniş kullanıma sahiptir. Yapılan çalışmalar aktarılan güç miktarının ve sistem veriminin alıcı-verici bobinler arasındaki mesafeyle ters orantılı değiştiğini göstermektedir. Kablosuz güç aktarım sistemi tasarlanırken alıcı-verici bobinler arasındaki en uygun mesafenin belirlenmesi sistemin yüksek verimle çalışabilmesi için gereklidir. Sonlu elemanlar analizi yapan birçok yazılım alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin uygun değerinin belirlenmesinde kullanılabilmesine rağmen ve bu yazılımlar uzmanlık gerektiren karmaşık yapıya sahiptir. Bu çalışmada, düşük maliyetli, basit kullanımlı karşılıklı endüktans hesaplama aracı tanıtılmıştır. Karşılıklı endüktans değerinin, sabit frekansta endüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinde verimi doğrudan etkilediği göz önünde bulundurulduğunda, alıcı-verici bobinler arasındaki mesafeyle verim ilişkisinin analiz edildiği bir araç geliştirilmiştir. Geliştirilen hesaplama aracı hava nüveli özdeş iki bobin arasındaki farklı mesafe ve hizalanma değerleri için karşılıklı endüktans ve bobinlerin öz endüktans değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilen benzersiz bir uygulamadır. Bunlara ilaveten tasarlanan görsel ara yüz sayesinde, bobinlerin konumu üç boyutlu koordinat sisteminde değiştirilebilir ve karşılıklı endüktans değerinin mesafeyle değişimini gösteren eğriler oluşturulabilir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 29/10/2018

Düzeltilme: 27/11/2018

Kabul: 13/12/2018

Anahtar Kelimeler

Kablosuz güç aktarımı,
 karşılıklı endüktans,
 bağlantı katsayısı,
 endüktif güç aktarımı,
 eşdeğer devre

Keywords

Wireless power transfer,
 mutual inductance,
 coupling coefficient,
 inductive power transfer,
 equivalent circuit

THE DEVELOPMENT OF MUTUAL INDUCTANCE COMPUTATION TOOL FOR WIRELESS POWER TRANSFER

Abstract

Wireless power transmission systems, which aim to eliminate cable complexity and the difference between the connection terminals of devices, are now widely used in many areas such as mobile phone, toothbrush, shaver and electric vehicles. Studies show that the amount of power transferred and the system efficiency are inversely proportional to the distance between the transceiver coils. Therefore, while the wireless power transmission system is designed, it is necessary to determine the optimum distance between the transceiver coils in order for the system to operate at high efficiency. Although many software systems using finite element analysis can be used to determine the appropriate value of the distance between the transceiver, these softwares has a complex structure that requires expertise. In this study, a mutual inductance calculation tool low-cost, simple-to-use is introduced. Considering that the mutual inductance value directly affects the efficiency of the fixed frequency inductive wireless power transmission systems, a tool has been developed in which the relationship between the distance of transceiver and the efficiency is analyzed. The developed calculation tool is a unique application that can be used to calculate the mutual inductance and self-inductance values of the two identical coils with air-core for the different distance and alignment values. In addition, thanks to the visual interface designed, the position of the coils can be changed in the 3-dimensional coordinate system and the curves indicating the change of the mutual inductance value versus the transmission distance can be generated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjinin herhangi bir aracı olmaksızın kablosuz olarak aktarılması fikri, özellikle Nikola Tesla'nın çaba harcadığı ve günümüzde yapılan sistemlere ışık tutan prensipleri kanıtladığı önemli bir çalışma konusudur. O dönemki çalışmalarda aktarılan güç miktarı, aktarım yapılabilen mesafe ve sistem verimi çok düşük değerlerle sınırlı kalmıştır. Kablosuz güç aktarım sistemlerinde kullanılan teknolojilerde yıllar içinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Son olarak, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) 2007 yılında kablosuz güç aktarım sistemlerinde mesafeyi ve verimi artıran manyetik rezonans bağlı sistemi tanıtmıştır [1]. Geliştirilen bu teknoloji sayesinde güç aktarımı, büyük hava aralıklarında ve yüksek verimle gerçekleştirilebilir. Manyetik rezonans bağlı kablosuz güç aktarım yönteminin kullanıldığı çalışmalardan elde edilen sonuçlar, 1 metre hava aralığında %90 verimle ve 2 metre hava aralığında %45-50 verimle güç aktarımı yapılabileceğini göstermiştir [2, 3]. Son yıllarda kişiye özel taşınabilir elektrikli cihazların yeniden şarj edilmesinde ve gündelik hayatta kullandığımız aydınlatma cihazları, TV setleri gibi cihazların ikinci bir batarya kullanmadan doğrudan çalıştırılmasında kablosuz güç aktarım sistemi teknolojisi yoğun olarak kullanılmaktadır [4, 5].

Daha önceleri genellikle fiziksel teorilere dayalı olarak yapılan analizler elektrik mühendislerine somut sonuçlar sağlaması bakımından başarılı olamamıştır [6-7]. Aktarım yapılan alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin artırılması sistemin verimini ve güç aktarım kapasitesini düşürdüğü sezgisel olarak bilinmektedir [8, 9]. Ancak yüksek verimde enerji transferi gerçekleştirebilmek için gerekli mesafenin tam olarak belirlenmesi, anlaşılması zor bir durumdur. Enerjinin elektromanyetik dalgaların ışınımı olmadan, yüksek verimle aktarılmasına olanak sağlayan ve en bilinen yöntem, endüktif bağlı kablosuz enerji transfer sistemidir. Kablosuz enerji aktarım sistemi temel olarak transformatör prensibine dayanmaktadır. Nüve olarak havayı kullanan alıcı-verici bobinler arasında karşılıklı endüktans değeri meydana gelmektedir [9]. Endüktif bağlı sistemler üzerine yapılan çalışmalar %80 verimle bir kaç santimetrede sınırlı olan aktarım mesafesini 20-40 kHz frekans bandında 10 santimetre menzilde yapılabilmesine olanak sağlamıştır [10]. Ancak bu aralık aktarım için kullanılan bobinlerin çaplarının %30'undan daha küçük mesafelerde, endüktif bağlı sistemlerin verimli olarak kullanılabilmesine izin verir [11]. Ayrıca bobinler arasında oluşabilecek küçük hizalama hatasında kablosuz enerji aktarımı tamamen durabilir. Endüktif bağlı kablosuz enerji transfer sistemi sadece sabit ve çok yakın mesafe kullanımı için uygundur [3].

Kablosuz güç aktarım sistemlerinde karşılıklı endüktans değeri sistem verimini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdendir [12, 13]. Bobinler arasındaki mesafe ve bobinlerin hizalanması karşılıklı endüktans değerinin temel değişkenleridir [14-16]. Bu değişkenlerin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisinin analizi ve kablosuz enerji aktarım sistemlerinin verimin artırılmasına yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle kapsamlı paket programlar kullanılarak modelleme yapılmakta ve karşılıklı endüktans değeri elde edilmektedir [17-24].

İki farklı bobin yapısı kullanılarak yapılan çalışmada bobinler arası hizalamada oluşabilecek değişimlerin, kablosuz güç aktarım sisteminin verimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan benzetim çalışmasında, bobinlerin çeşitli hizalama değerlerinde sistemin verimi gösterilmiştir [18]. Başka bir çalışmada yüksek verim elde edebilmek için bobin tasarımı yapılmış ve bu tasarımın sonuçları gerçek bir uygulamada değerlendirilmiştir. Yazarlar karşılıklı endüktans modellemesi için Ansys Maxwell yazılımını kullanmıştır [21]. Yukarıda bahsedilen çalışmalara ilaveten kablosuz güç aktarımıyla ilgili birçok çalışmada, Ansys Maxwell, PSIM, COMSOL vb. sonlu elemanlar metodu tabanlı yazılımlar, karşılıklı endüktans hesabında kullanılmıştır [25-30].

Bu çalışmada, dairesel bobinli kablosuz güç aktarım sistemi için karşılıklı endüktans değerinin, bobinler arası mesafe ve hizalamaya bağlı olarak değişiminin analiz edilebileceği bir hesaplama aracı geliştirilmiştir. Kullanıcı bu parametreleri hazırlanan ara yüz üzerinden istediği gibi belirleyerek karşılıklı endüktans değerini hesaplayabilir. Yazılımın uygulanabilirliğini gösterebilmek amacıyla belirlenen mesafe-hizalama değerleri için örnek karşılıklı ve öz endüktans değerleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen test değerleri için elde edilen sonuçlar tablo halinde sunulmuş ve mesafe-hizalama değerleri ile karşılıklı endüktans değişimi eğrileri görselleştirilmiştir. Yazılım sayesinde kablosuz güç transferinde aktarım mesafesinin karşılıklı endüktans ve sistem verimi üzerindeki etkisi hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenebilir.

Çalışmanın geri kalan bölümlerinde sırasıyla şunlar anlatılmaktadır. İkinci bölümde kablosuz güç aktarım sistemlerinin temel çalışma prensibini açıklayabilmek amacıyla endüktif bağlı hava nüveli iki bobin, devre

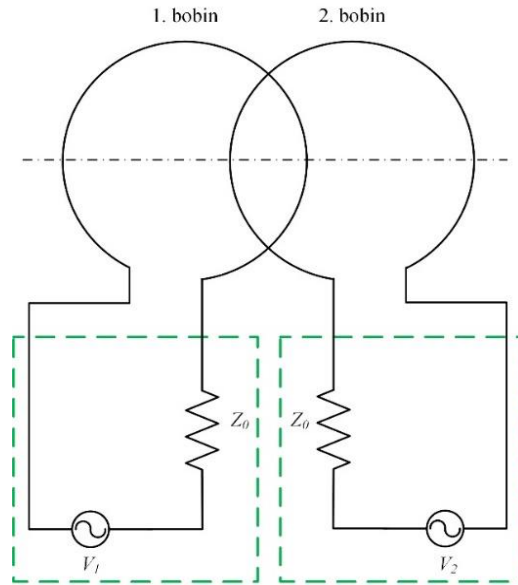
analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Karşılıklı endüktans değerinin sistem verimi üzerindeki etkisi ve gerçekleştirilen çalışmada karşılıklı endüktans hesabının analitik hesabını yapmak için kullanılan Neumann formülleri verilmiştir. Üçüncü bölümde geliştirilen karşılıklı endüktans hesaplama uygulaması tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde hava nüveli eşdeğer iki bobin için karşılıklı ve öz endüktans değerlerinin, bobinler arası mesafe ve hizalamayla değişimini gösterebilmek amacıyla geliştirilen uygulama kullanılarak bir test çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMİNİN ANALİZİ (ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEM)

Kablosuz güç aktarım sistemleri farklı yöntemler kullanılarak analiz edilse de, elektrik mühendisleri açısından en anlamlı sonuçlar düğüm denklemleri kullanılarak elde edilebilir. Güç aktarımı için kullanılan yöntem esas alındığında sistemler arasında farklılıklar bulunmasına rağmen, kablosuz güç aktarımının temel prensibi transformatör çalışmasından açıklanabilir.

2.1. Endüktif Bağlı Kablosuz Güç Aktarım Sistemi (Inductive Connected Wireless Power Transmission System)

Bu bölümde endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemlerinin temel prensipleri ve karşılıklı endüktansın sistem verimi açısından önemi gösterilecektir. Bu amaçla Şekil 1’de gösterilen hava nüveli transformatör kullanılacaktır.

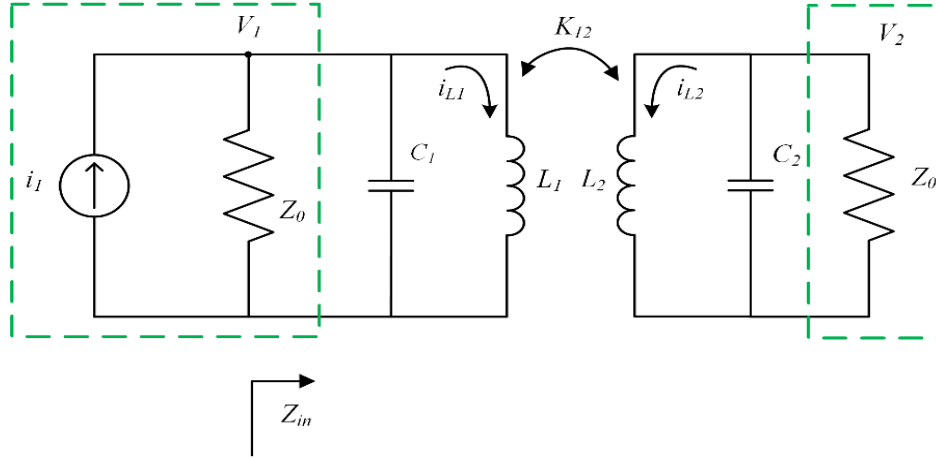


Şekil 1. Hava nüveli transformatör modeli

Hava nüveli transformatör için karşılıklı endüktans değeri M_{12} , alıcı-verici bobinlerin öz endüktansları L_1 , L_2 ve bobinler arası bağlantı katsayısı K_{12} eşitlik 1 de ifade edilmektedir.

$$K_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

Sistemin elektriksel devre modeli Şekil 2’de gösterilmiş ve bu modelde belirtilen alıcı-verici devre için akım gerilim ifadeleri eşitlikler 2-5’de verilmiştir [9].



Şekil 2. Hava nüveli transformatörün elektriksel devre modeli

$$i_1 = \frac{V_1}{Z_0} + j\omega C_1 V_1 + i_{L1} \quad (2)$$

$$V_1 = j\omega L_1 i_{L1} + j\omega M_{12} i_{L2} \quad (3)$$

$$0 = \frac{V_2}{Z_0} + j\omega C_2 V_2 + i_{L2} \quad (4)$$

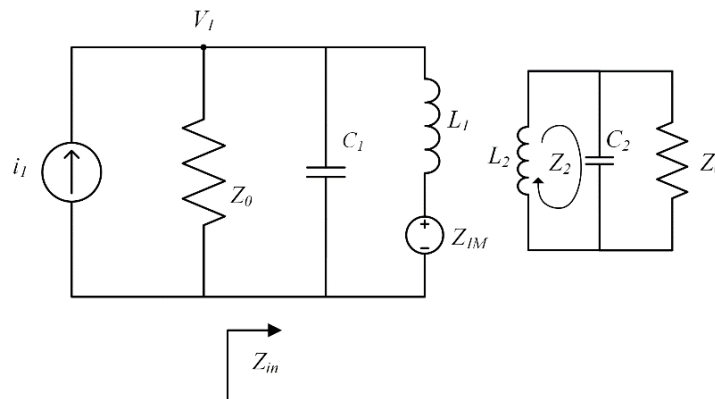
$$V_2 = j\omega L_2 i_{L2} + j\omega M_{12} i_{L1} \quad (5)$$

Her bir bobinin rezonans frekansı ω_0 ve karakteristik empedans Z_0 ile ifade edilirse, sistemin giriş empedansı eşitlik 6'da verilen ifade ile hesaplanabilir.

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{i_1}{V_1} - \frac{1}{Z_0} = j\omega C_1 + \frac{1}{\frac{\omega^2 M_{12}^2}{\frac{1}{\frac{1}{Z_0 + j\omega C_2} + j\omega L_2} + j\omega L_1}} \quad (6)$$

Eşitlik 6'nın payda kısmında yer alan bölüm yansıyan empedans olarak isimlendirilir, manyetik bağlantı sayesinde ikinci devrede endüklenen ve V_2 ile gösterilen gerilime katkıyı temsil etmektedir. Yansıyan empedans, eşitlik 7 de gösterilen Z_{1M} ile ifade edilirse, sistemin elektriksel devre modeli Şekil 3'te verilen, karşılıklı endüktansın etkisinin yer aldığı elektrik devre modeli elde edilebilir [9].

$$Z_{1M} = \frac{1}{\frac{1}{Z_0 + j\omega C_2} + j\omega L_2} + j\omega L_1 = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{Z_2} = \frac{\omega^2 K_{12}^2 L_1 L_2}{Z_2} \quad (7)$$



Şekil 3. Karşılıklı endüktans değerinin gösterildiği elektrik devre modeli

Özdeş iki bobinin kullanıldığı bir sistemde rezonans frekansı ve bu frekans değeri için giriş empedansı eşitlik 8 ve 9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\omega_0^2 L_1 C_1 = \omega_0^2 L_2 C_2 = \omega_0^2 L_1 C_2 \quad (8)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega_0 C_1} // (j\omega_0 L_1 + Z_{1M}) = \frac{1}{j\omega_0 C_1} // (j\omega_0 L_1 (1 - K_{12}^2) + K_{12}^2 Z_0) \quad (9)$$

Eşitlik 9'da parazitlik kapasite (C_1) değerinin düşük frekanslarda ihmal edilebileceği ve bağlantı katsayısının (K_{12}) bir olduğu kabul edilirse, giriş empedansı (Z_{in}) ile karakteristik empedans (Z_0) tam olarak eşit olacaktır. Bu sayede endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemi için maksimum verim şartı sağlanmış olur. Ancak alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin artması veya bobinlerin hizalamasında oluşabilecek kaymalar sonucunda bağlantı katsayısı (K_{12}) değeri küçülür ve sonuç olarak giriş empedansı (Z_{in}) değeri ile karakteristik empedans (Z_0) değeri arasındaki eşitlik bozulur. Bu eşitliğin bozulması sistemde aktarılan gücün azalması ve veriminin düşmesi anlamına gelir. Bu sebeple endüktif bağlı kablosuz güç aktarım sistemlerinde alıcı-verici bobinler arasındaki mesafe ve hizalama değeri sistem verimi üzerinde büyük öneme sahiptir ve özenle belirlenmelidir.

2.2. Karşılıklı Endüktansın Matematiksel Analizi (Mathematical Analysis of Mutual Inductance)

Karşılıklı endüktans, paralel konumlandırılmış iki bobinin birbirlerine etkisi ile ortaya çıkan endüktanstır [12]. Dairesel bir iletkende, akı (ϕ), manyetik akı yoğunluğu (B) ve alana (A) bağlı olup bu ifade eşitlik 10'da gösterilmektedir.

$$\phi = \oint_S A ds = \int B dS \approx BA \quad (10)$$

Burada s dairesel iletken uzunluğunu, S ise iletken tarafından çevrelenen alanı temsil etmektedir. Bu noktadan hareketle, A alanına sahip içerisinden t yolundan I akımı geçen bir iletkende s yolunu kesen akı eşitlik 11 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\phi = \oint_S A ds = \oint_S \left(\oint_t \frac{\mu I dt}{4\pi r} \right) ds = \oint_S \oint_t \frac{\mu I}{4\pi r} dt ds \quad (11)$$

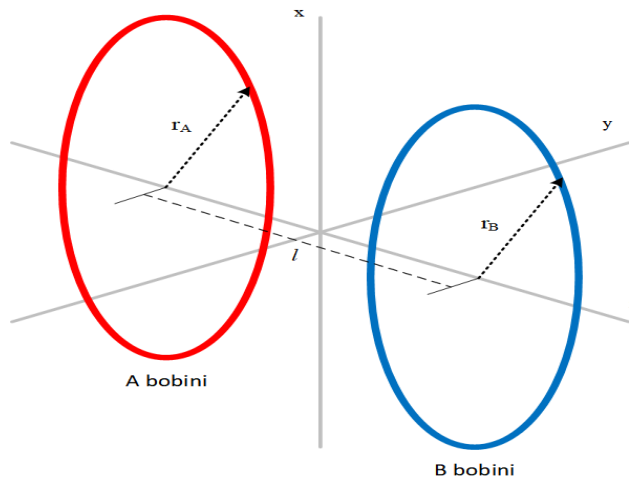
Karşılıklı endüktans ile akı arasındaki ilişki eşitlik 12'de görülebilir.

$$\phi = MI \quad (12)$$

Buradan eşitlik 13'de verilen Neumann formülü elde edilebilir [3].

$$M = \mu \oint_S \oint_t \frac{dt ds}{4\pi r} \quad (13)$$

Bu denklemde dt ve ds değeri hesaplanarak yerlerine konulduğunda iki bobin arasındaki karşılıklı endüktans değeri hesaplanabilir. Karşılıklı endüktans hesabı yapılacak A ve B olarak isimlendirilen iki bobinin yerleşimi Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Karşılıklı iki dairesel bobin yerleşimi

Bobinler arasındaki mesafe l , birinci bobinin yarıçapı r_A , ikinci bobinin yarıçapı r_B olarak tanımlanmıştır. Bobinlerin orijine uzaklıkları eşit kabul edildiğinde, her bir bobinin orijine uzaklığı $\pm l/2$ olmaktadır. A

bobini için kullanılan açı parametresi α , B bobini için kullanılan açı parametresi ise θ olarak adlandırılmıştır. Bu bobinler için ds ve dt değerleri eşitlik 14-17 kullanılarak hesaplanabilir.

$$ds = r_A(-\sin\alpha a_x + \cos\alpha a_y) d\alpha \quad (14)$$

$$dt = r_B(-\sin\theta a_x + \cos\theta a_y) d\theta \quad (15)$$

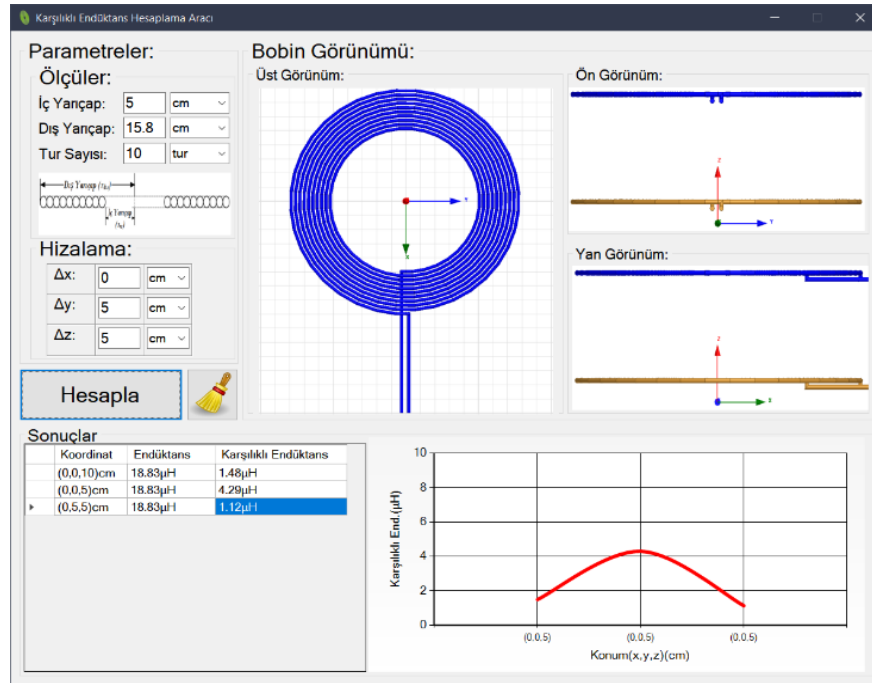
$$dsdt = r_A r_B (-\sin\alpha \sin\theta + \cos\alpha \cos\theta) d\alpha d\theta \quad (16)$$

$$dsdt = r_A r_B (\cos(\alpha - \theta)) d\alpha d\theta \quad (17)$$

Bobinlerin karşılıklı hizalanmalarında meydana gelen kaymalarda her bir bobin için oluşan yeni açı parametresi göz önüne alınarak $dsdt$ değişimi tekrar hesaplanmaktadır. Böylelikle hizalamada oluşacak kayma değerleri için karşılıklı endüktansın değişimi belirlenebilir. Bu değişime bağlı olarak Eşitlik 1'de ifade edildiği gibi kablosuz güç aktarım sistemlerinde bağlantı katsayısı K_{12} değeri ve sistem verimi değişmektedir.

3. KARŞILIKLI ENDÜKTANS HESAPLAMA ARACI (MUTUAL INDUCTANCE CALCULATION TOOL)

İkinci bölümde açıklanan matematiksel modele göre, karşılıklı endüktans hesabının yapılabildiği bir yazılım geliştirilmiştir. Uygulama Visual C# derleyici kullanılarak hazırlanmıştır. Uygulamada kullanıcı tarafından girilen bobin parametreleri kullanılarak, bobinlerin öz endüktansı (L) ve karşılıklı endüktans (M) değerleri hesaplanmaktadır. Hazırlanan hesaplama aracını tanıtabilmek amacıyla geliştirilen uygulamanın görsel ara yüzü ve bobin tasarım işlemi Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Karşılıklı endüktans uygulaması ekran görüntüsü

Uygulama 2 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci kısım kullanıcının şekil 5'de gösterilen ara yüzden ilgili menüleri kullanarak alıcı-verici bobinlerin tur sayısı (N), bobinlerin dış ($r_{dış}$) ve iç çapı ($r_{iç}$), bobinler arasındaki mesafe ve hizalama bilgilerinin belirlenmesine olanak sağlayan bölümdür. Bunlara ilaveten geliştirilen görsel ara yüzde, kullanıcının tercihleri doğrultusunda oluşturulacak bobin görselleri ve alıcı-verici bobinlerin üç boyutlu koordinat sisteminde, z-eksenine göre üstten, x-eksenine göre karşıdan ve y-eksenine göre de yandan görünüşleri yer almaktadır. Bu görseller sayesinde istenilen eksende hizalama farkının hesaplama etkisi üzerindeki etkisi incelenebilir. Kullanıcı tercih ettiği parametreleri belirledikten sonra, sayfada yer alan "Hesapla" butonu aracılığı ile bobinlere ait öz endüktansı ve bobinler arasındaki karşılıklı endüktansı hesaplanmaktadır.

Yapılan hesaplama sonuçları tablo olarak ikinci bölümde sunulmaktadır. Her bir mesafe için bobinlere ait öz endüktans değerleri ve karşılıklı endüktans değeri tabloya eklenmektedir. Ayrıca elde edilen bu değerler sayfanın alt bölümünde bulunan grafiğe işlenerek karşılıklı endüktans değerinin, bobinler arası mesafeyle değişimi görselleştirilmiştir.

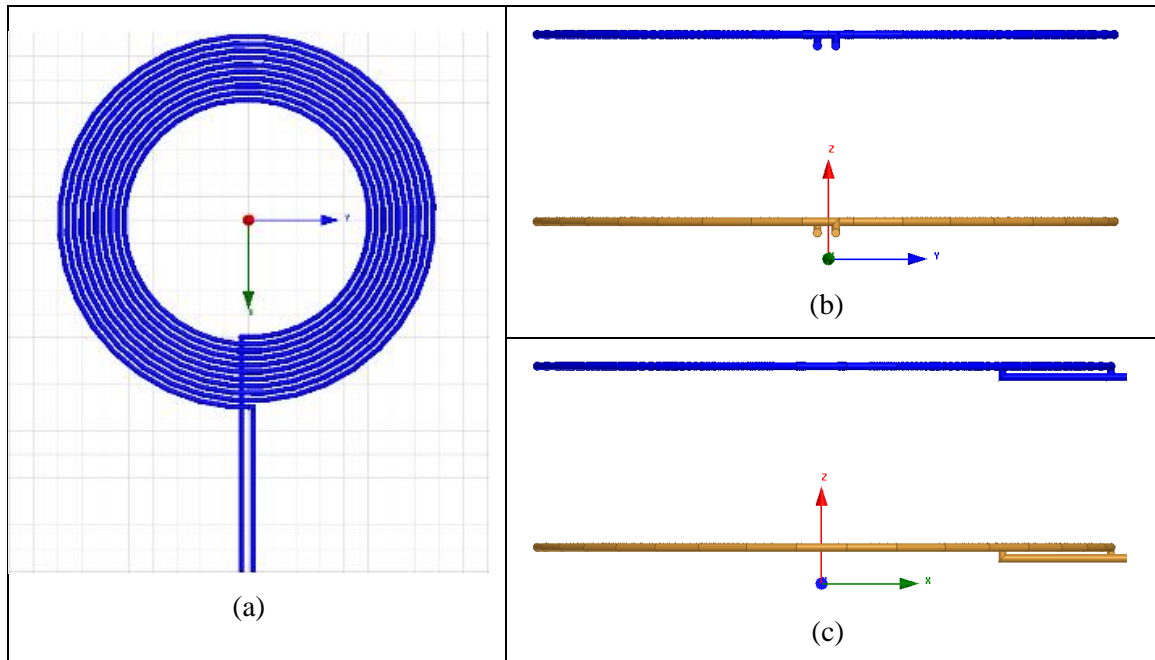
4. DEĞERLENDİRME (EVALUATION)

Bu bölümde geliştirilen hesaplama aracının etkinliğini ve kullanım kolaylığını kanıtlayabilmek amacıyla örnek alıcı-verici bobin tasarımı yapılmış ve sonuçlar verilmiştir. Hesaplama kullanılan bobinlerin tasarım özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm için belirlenen alıcı-verici bobin parametreleri

Parametre	Değeri
Tel Kesiti	4 mm ²
Tur Sayısı	10
İç Çap	10 cm
Dış Çap	15.8 cm
Radyal Değişim	0.3 cm

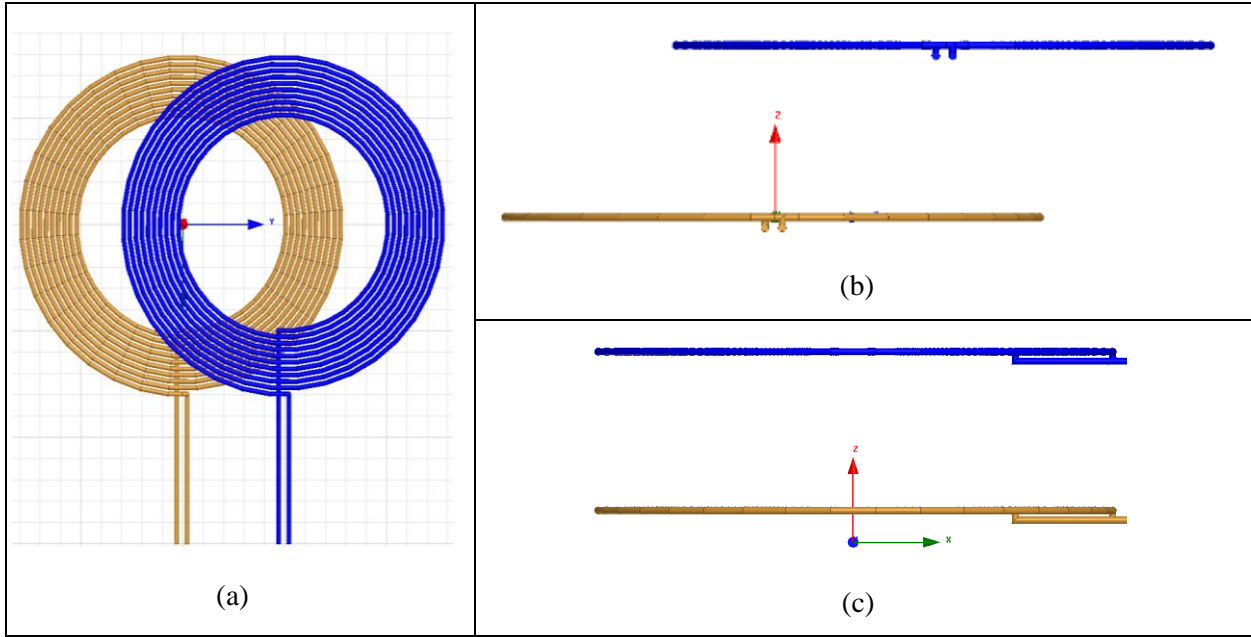
Gerçekleştirilen hesaplama aracı kullanılarak tasarlanan alıcı-verici bobinlerin x, y ve z eksenlerinde farklı yerleşim değerleri için, karşılıklı endüktans değeri belirlenmiştir. Bu amaçla ilk olarak iki bobinin merkezleri x=0, y=0 olan orijin noktasında belirlenmiş ve sadece z-ekseninde meydana gelen mesafe değişimiyle, karşılıklı endüktans değerindeki değişim ele alınmıştır. Bir başka ifadeyle, iki bobinin merkezleri tam karşılıklı ve bobinler arasındaki hizalama farkı yoktur. Sadece iki bobin arasındaki mesafe 0,1 cm aralıklarla değiştiğinde karşılıklı endüktans değeri analiz edilmiştir. Bu durumda, bobinler arasındaki mesafenin z-ekseninde her 0,1 cm artmasıyla oluşacak karşılıklı endüktans değeri, 10 cm mesafeye kadar incelenmiştir. Yapılan hesaplama için bobinlerin yerleşimini gösteren hesaplama aracına ait ekran görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. x ve y ekseninde sabit, z ekseninde boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

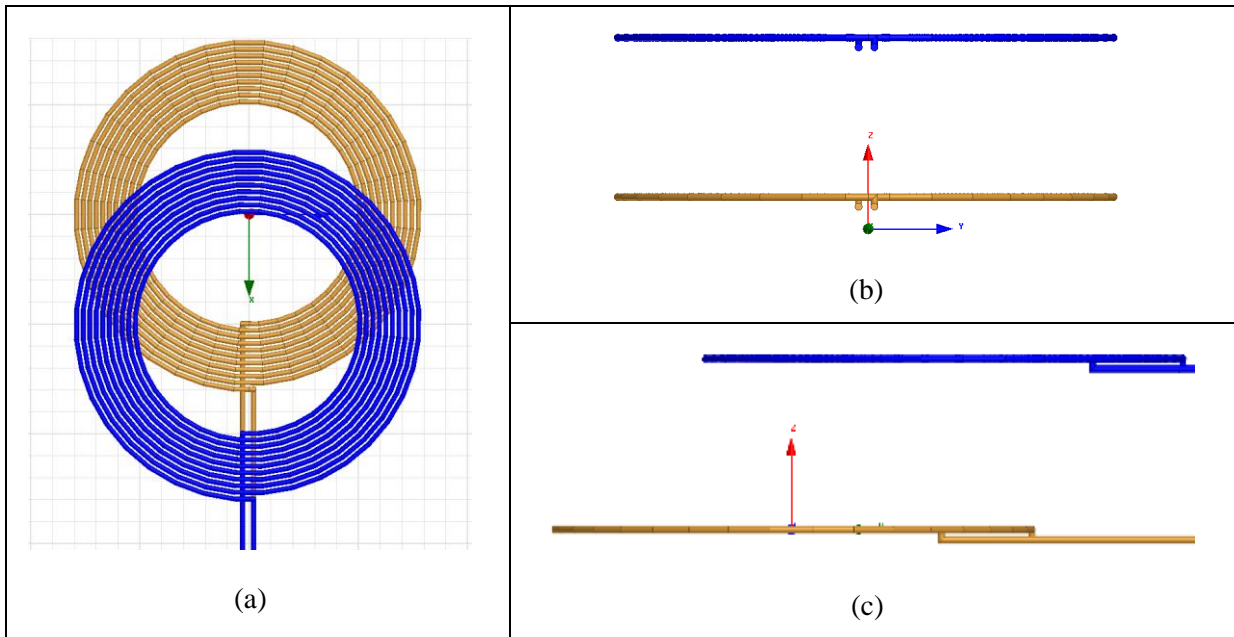
Alıcı-verici bobinler arasında hizalama farkı olmadığı durumda bobinler arasındaki mesafenin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi değerlendirildikten sonra, bobinler arasındaki hizalama farkı oluştuğunda mesafenin karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla alıcı-verici bobinler x-ekseninde 0 cm ve y-ekseninde 5 cm kaydırılarak hizalama farkı oluşturulmuştur. Bobinlerin merkezleri arasındaki 5

cm kayma değeri sabit tutulmuş ve z-ekseninde 0,1 cm aralıklarla bobinler arası mesafe 10 cm'ye kadar artırılarak karşılıklı endüktans hesabı yapılmıştır. Hesaplama yapılan durum için bobinlerin üç boyutlu koordinat düzlemine yerleşimini gösteren ekran görüntüsü Şekil 7'de gösterilmiştir.



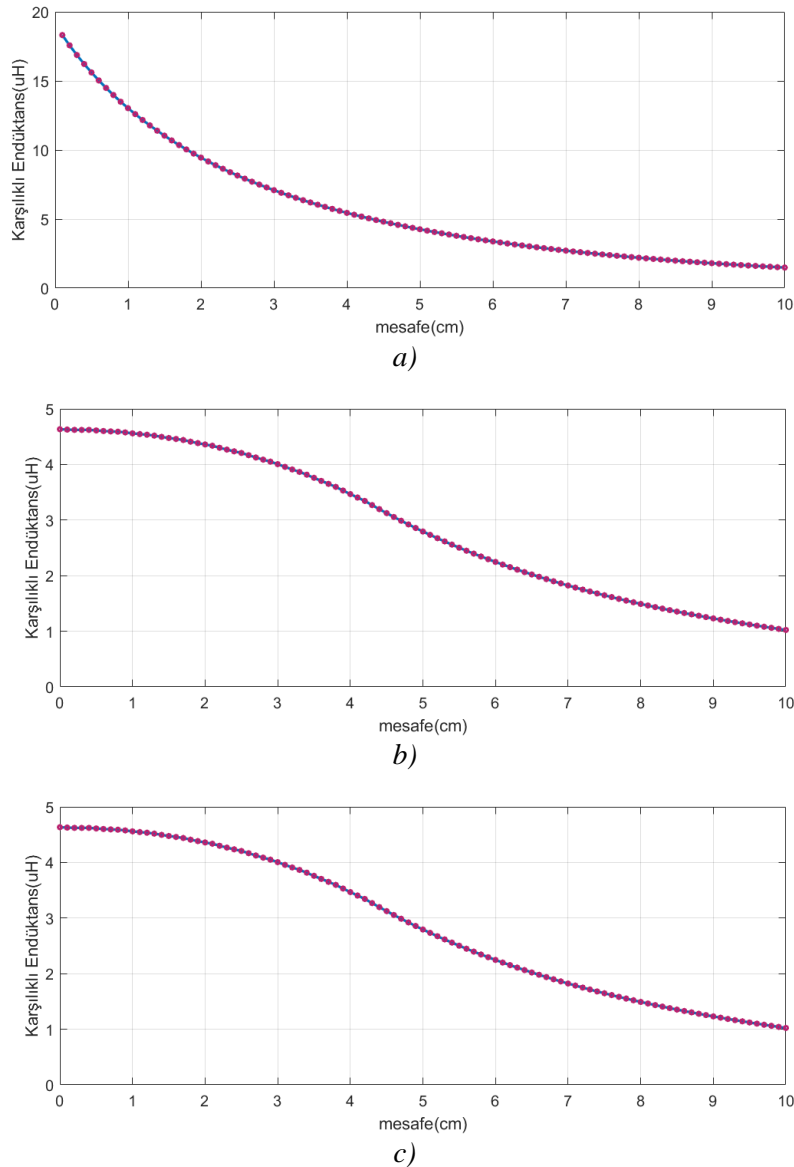
Şekil 7. x-ekseninde 0 cm ve y-ekseninde 5 cm, z-ekseni boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

Son olarak bobinlerin merkezleri arasında oluşan hizalama farkının bir önceki duruma göre sayfa düzleminde dik olarak diğer eksen boyunca oluşması durumunda bobinler arası mesafe değişiminin karşılıklı endüktans hesabı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla alıcı-verici bobinler y-ekseninde 0 cm ve x-ekseninde 5 cm kaydırılarak hizalama farkı oluşturulmuştur. Bobinlerin merkezleri arasındaki 5 cm kayma değeri sabit tutulmuş ve z-ekseninde 0,1 cm aralıklarla bobinler arası mesafe 10 cm'ye kadar artırılarak karşılıklı endüktans hesabı yapılmıştır. Bu şartlar altında bobinlerin yerleşimini ifade eden ekran görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. x-ekseninde 5 cm ve y-ekseninde 0 cm, z-ekseni boyunca oluşacak değişimler için bobinlerin yerleşim görüntüsü, (a) üstten, (b) karşıdan ve (c) yandan görünüm

Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen alıcı-verici bobinler için karşılıklı endüktans hesaplamalarında bobinlerin üç boyutlu koordinat düzleminde yerleşim değerleri ve bu değerler için elde edilen karşılıklı endüktans hesaplamaları Tablo 2’de, bu değerler için hesaplanan bağlantı katsayısı ve öz endüktans değerleri Tablo 3’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bobinlerin merkezleri tam simetrik iken karşılıklı endüktans değeri 0,1 cm mesafe için 18,32 μH değerinde iken bu mesafe 10 cm değerine ulaştığında karşılıklı endüktans değeri 1,48 μH değerine düşmüştür. Karşılıklı endüktansın kablosuz güç aktarım sistemlerinde verimi doğrudan etkilediği göz önüne alındığında, aktarım yapılan frekansın sabit tutulduğu durum için sistem verimi yaklaşık olarak %92 azalacaktır. Bobinlerin merkezlerinde oluşacak 5 cm hizalama farkı için bobinler arası mesafe 0,1 cm değerinde karşılıklı endüktans değeri 4,62 μH ve aynı hizalama farkında 10 cm’de karşılıklı endüktans değeri 1,02 μH olarak hesaplanmıştır. Bobinlerin simetrik ve bobinler arası mesafenin 0,1 cm olduğu duruma göre karşılıklı endüktanstaki değişim değeri, 5 cm hizalama farkı, 0,1 cm ve 10 cm mesafeler için sırasıyla %75 ve %95 oranında azalmıştır. Bu durum sabit frekansta kablosuz güç aktarımının yapıldığı bir sistemde, verimin aynı oranda düşeceğini göstermektedir. Ayrıca çalışmada tasarlanan alıcı-verici bobinler için hesaplama yapılan bütün bobin yerleşimleri için elde edilen karşılıklı endüktans değişimini gösteren grafikler Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Hesaplama aracı kullanılarak oluşturulan alıcı-verici bobinler arası karşılıklı endüktans değerinin üç farklı durum için değişimi, a) $x=0, y=0, z=0.1:0.1:10$ b) $x=0, y=5, z=0.1:0.1:10$ c) $x=5, y=0, z=0.1:0.1:10$

Tablo 2. Hesaplama sonuçları

Verici Bobin	x=0 y=0 z=0	Verici Bobin	x=0 y=0 z=0	Verici Bobin	x=0 y=0 z=0
Alıcı Bobin	x=0 y=0 z=0.1:0.1:10	Alıcı Bobin	x=0 y=5 z=0.1:0.1:10	Alıcı Bobin	x=5 y=0 z=0.1:0.1:10
Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)	Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)	Mesafe (cm)	Karşılıklı Endüktans (μH)
0,1	18,32201745	0,1	4,627161124	0,1	4,627161124
0,5	15,61219929	0,5	4,612340731	0,5	4,612340731
1	13,03186012	1	4,559959564	1	4,559959564
1,5	11,0357655	1,5	4,476158466	1,5	4,476158466
2	9,446660835	2	4,359308415	2	4,359308415
2,5	8,155607781	2,5	4,207217266	2,5	4,207217266
3	7,090186428	3	4,005269237	3	4,005269237
4	5,448641518	4	3,467004946	4	3,467004946
5	4,261369238	5	2,794322957	5	2,794322957
6	3,380060622	6	2,246936642	6	2,246936642
7	2,713227049	7	1,82270332	7	1,82270332
8	2,20103998	8	1,491703102	8	1,491703102
9	1,802700261	9	1,231033747	9	1,231033747
10	1,489529213	10	1,023845212	10	1,023845212

Tablo 3. Hesaplama sonuçları

Senaryo	Mesafe(cm)			$L_1=L_2$	M	K_{12}
	x	y	z			
1	0	0	5	18.83 μH	4.26 μH	0.226
	0	0	10	18.83 μH	1.48 μH	0.078
2	0	5	5	18.83 μH	2.79 μH	0.148
	0	5	10	18.83 μH	1.02 μH	0.054
3	5	0	5	18.83 μH	2.79 μH	0.148
	5	0	10	18.83 μH	1.02 μH	0.054

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kablosuz güç aktarımı için birçok metot olmasına rağmen, endüktif güç aktarımı günlük hayatta birçok tüketici uygulamasında karşımıza çıkan ve en yaygın kullanılan temassız enerji iletim uygulamasıdır. Endüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinin en büyük sınırlaması alıcı-verici bobinler arasındaki mesafe ve bobinlerin hizalamasıdır. Bu çalışmada endüktif güç aktarım sistemlerinde mesafeyle karşılıklı endüktansın değişiminin hesaplanabilmesi amacıyla geliştirilen bir uygulama sunulmuştur. Çalışmada öncelikle hava nüveli alıcı-verici bobinler arasındaki maksimum verimin elde edilmesi için gerekli şartlar matematiksel olarak türetilmiştir. Alıcı-verici bobinler arasındaki mesafenin karşılıklı endüktans değeri ve dolayısıyla sistem verimi üzerindeki etkisi ifade edilmiştir. Daha sonra Neumann formülü kullanılarak geliştirilen endüktif bağlı sistemler için karşılıklı endüktans hesaplama aracı tanıtılmıştır. Uygulamanın kullanılabilirliğini kanıtlamak için hava nüveli özdeş iki bobin tasarımı uygulama arayüzü kullanılarak kolaylıkla tasarlanmıştır. Bobinlerin birlerine göre yerleşimi üç boyutlu koordinat sisteminde belirlenmiş ve her bir pozisyon için karşılıklı endüktans değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen görsel ara yüz kullanıcılara bobinlerin birlerine göre konumunu üç boyutlu koordinat sisteminde gözlemlene imkânı vermektedir. Ayrıca bobinlerin koordinat düzleminde yer değişimiyle, karşılıklı endüktansın değişim eğrisi oluşturulmuştur. Bobinler arasında aktarım verimini etkileyen diğer önemli parametre olan bobinlerin öz endüktans değerleri hesaplanmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda karşılıklı endüktans değerini etkileyen, tasarlanacak bobinler için iletken kesiti ve bobin yapısının seçimi uygulamaya ilave edilmesi ve geliştirilen uygulamanın doğrudan kablosuz güç aktarım sistemleri için kullanılabilir hale getirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [2] A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics* 323 (2008) 34–48.
- [3] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, October 2011, pp-4746-4752.
- [4] J. Yungtaek and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 520–527, Jun. 2003.
- [5] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T. Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3329–3331, Sep. 2002.
- [6] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," *Phys. Today*, vol. 50, no. 7, pp. 36–42, Jul. 1997.
- [7] A. Kurs, R. Moffatt, and M. Soljacic, "Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 4, p. 044 102-1-3, 2010.
- [8] E. Waffenschmidt and T. Staring, "Limitation of inductive power transfer for consumer application," in *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Sep. 2009, pp. 1–10.
- [9] S. Cheon, Y.-H. Kim, S-Y Kang, M. L. Lee, J.-M. Lee, and T. Zyung, "Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, July 2011, pp. 2906-2914.
- [10] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, Member, IEEE, and Y. Hori, "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, September 2013, pp. 3689-3698.
- [11] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1801–1812, May 2009.
- [12] I. Villar, U. Iruretagoyena, A. Rujas, A. GarciaBediaga, and I. P. d. Arenaza, "Design and implementation of a SiC based contactless battery charger for electric vehicles," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 1294-1300.
- [13] T. Fujita, T. Yasuda, and H. Akagi, "A moving wireless power transfer system applicable to a stationary system," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, pp. 4943-4950.
- [14] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, 2011.
- [15] M. Ibrahim, L. Pichon, L. Bernard, A. Razek, J. Houivet, and O. Cayol, "Advanced Modeling of a 2-kW Series-Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 421-430, 2015.
- [16] N. Liu and T. G. Habetler, "Design of a Universal Inductive Charger for Multiple Electric Vehicle Models," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6378-6390, 2015.
- [17] S. Wang, D. G. Dorrell, Y. Guo, and M.-F. Hsieh, "Inductive Charging Coupler With Assistive Coils," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, 2016.
- [18] W. Zhang, J. C. White, A. M. Abraham, and C. C. Mi, "Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6356-6367, 2015.

- [19] K. Woronowicz, A. Safaee, T. Dickson, and B. Koushki, "Effects of parallel load-side compensation in wireless power transfer," 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015, pp. 369-374.
- [20] R. A. Deshmukh and D. B. Talange, "Design of 1kW inductive power transfer system for electric vehicle," 2015 International Conference on Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 2015, pp. 93-97.
- [21] H. Kim, "Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp. 1-18, 2016.
- [22] H. Kim, C. Song, D. H. Kim, and J. Kim, "Design of conductive shield for wireless power transfer system for electric vehicle considering automotive body," 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 1369-1374.
- [23] G. Rezmerita, L. Bobaru, M. Stanculescu, M. Iordache, and D. Niculae, "A self and mutual inductance calculation resonators with finite element analysis," 7th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017, 2017: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [24] T. Yilmaz, N. Hasan, R. Zane, and Z. Pantic, "Multi-Objective Optimization of Circular Magnetic Couplers for Wireless Power Transfer Applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 8, 2017, Art. no. 7894196.
- [25] E. Gati, G. Kampitsis, and S. Manias, "Variable Frequency Controller for Inductive Power Transfer in Dynamic Conditions," IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 1-1, 2016.
- [26] Y. Tang, F. Zhu, Y. Wang, and H. Ma, "Design and optimizations of solenoid magnetic structure for inductive power transfer in EV applications," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, 2015, pp. 001459-001464.
- [27] S. Wang and D. G. Dorrell, "Copper Loss Analysis of EV Charging Coupler," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [28] G. Buja, M. Bertoluzzo, and K. N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 12, pp. 7436-7447, 2015.
- [29] G. Xu, X. Yang, Q. Yang, J. Zhao, and Y. Li, "Design on Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission and Monitoring System for Implanted Devices," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, 2016.
- [30] F. P. Wijaya and K. Kondo, "Charging power limitation method of a wireless power transmission system for railway vehicle," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, 2015, pp. 003525-003530.