

Impedance Analysis and Variable Capacity Array Application for Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances

 Fatih ISSI^{1,*}  Orhan KAPLAN² 
¹ Cankiri Karatekin University, Vocational High School, Department of Electronics and Automation, ,18100, Tasmescit/CANKIRI

² Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

In this study, impedance analysis and variable capacitor array application of Magnetic Resonance Coupled Wireless Energy Transfer (MRWPT) systems have been performed. Wireless energy transmission (WPT) system with Series-Series topology was analyzed and the effect of variable mutual inductance value on the input impedance of the system was modeled. The capacitor array was designed to ensure that the input impedance was equal to the load impedance. An algorithm has been proposed for the control of the capacitor array.

Article Info:

Research article

Received: 29/10/2020

Revision: 08/12/2020

Accepted: 08/12/2020

Highlights

- WPT Topologies
- Capacitor Array
- Matlab-Simulink

Keywords

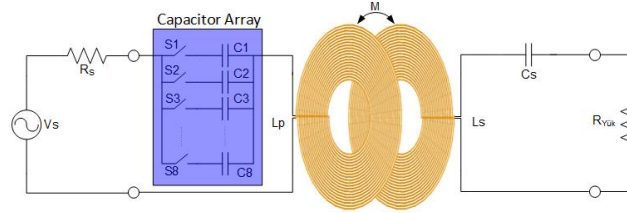
 Wireless Power Transfer
 Mutual Inductance
 Capacitor Array


Figure A. Circuit schema of variable array application of designed WPT

Purpose: In the WPT systems, when the distance between the coils varies, mutual inductance changes. Variation of mutual inductance affects the input impedance of the MRWPT system. In order to eliminate the negative influence of mutual inductance on input impedance, the capacity value should be changed. The purpose of this study is to provide the equality between input impedance and load impedance when the changing of transceiver coils distance.

Theory and Methods: Input impedance analysis of the WPT system was performed using the SIMULINK. An algorithm was developed to calculate the mutual inductance used in the model. In addition, another algorithm was found to provide the capacity value of the resonance system requirement. The capacity value was realized in the application of the capacity array designed by prepared control algorithm. Actual values of the capacities used in the series were used, and the effect of capacity tolerances was included in the study.

Results: The WPT model has been investigated for four different scenarios. In the first scenario, it is seen that input impedance and load resistance are equal at a distance $d=5.5\text{cm}$ and $d=29\text{cm}$. In the second and third scenarios, it is seen that the distance values at where the transmission power will be higher by increasing the capacity value are approximately $d=8\text{cm}$ and $d=21.9\text{cm}$, $d=10.6\text{cm}$ and $d=18.2\text{cm}$. In the fourth scenario, it is observed that the input and output impedance do not match at all and the amount of power transferred will be lower than the other scenarios.

Conclusion: In MRWPT systems, the changing of the distance between transmitter and receiver coils affects the power transmission. In this study, the effect of the series capacity value used in order to keep power transfer between the coils high on the system input impedance was examined on the model. In the model, effect of distance change on the input impedance was analyzed by using the capacitors label values. Then, a flexible variable capacitance matrix performed from 8 capacitors and their all combination values that can be created by the series-parallel connection of capacitors were measured. In this way, the obtained real capacitance values were used instead of the previously used capacitance values in the developed model and the distance-dependent values of the input impedance were calculated. It has been shown that in wireless energy transfer systems where the distance between the transmitter and receiver coils varies under certain limits, the input and output impedance equality and thus the maximum power transfer can continue.

GU J Sci, Part C, 8(4): 1005-1020 (2020)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması

Fatih ISSI^{1,*} Orhan KAPLAN²

¹ Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 18100, Taşmescit/ÇANKIRI

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Seri-Seri manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde alıcı-verici bobinler arası mesafenin değişmesi sistemin giriş empedansını ve dolayısıyla güç aktarımını etkileyen önemli problemlerden biridir. Bu çalışmada, manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji transfer sistemlerinde alıcı-verici bobinler arası mesafenin değişmesi durumunda maksimum güç aktarımının sürdürülebilmesi için sisteme ilave edilen seri kapasite kullanımının etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında alıcı-verici bobinler arası mesafenin 0–30 cm sınırları arasında değiştirildiğinde maksimum güç aktarımının yapılabilmesi için gerekli kapasite değeri ve bu değere göre sistemin giriş empedansı hesaplanmıştır. Buna ilaveten sekiz tane kondansatör ve röleler kullanılarak kapasite matrisi uygulaması gerçekleştirilmiş ve bu devrede her bir kapasitenin gerçek değeri ölçülmüştür. Kapasitörlerin etiket değerleri kullanılarak yapılan benzetim sisteminde, alıcı – verici bobinler arası değişimin giriş empedansı ve güç aktarımı üzerindeki etkisi ölçülen gerçek kapasite değerleriyle tekrar incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, giriş empedansının mesafeye ve dolayısıyla alıcı – verici bobinler arası ortak endüktansa bağlı olarak değişiminin analiz edilebildiği bir model geliştirilmiştir. Modelde, kullanılan kapasitelerin etiket değerleri yerine gerçek değerlerinin kullanılmasının gerekliliği vurgulanmıştır ve gerçek değerlerle oluşturulan değişken kapasite dizisinden gerekli en uygun topolojiyi belirleyen bir algoritma önerilmiştir. Alıcı-verici bobinler arası mesafenin belirli sınırlar arasında değiştiği kablosuz enerji aktarım sistemlerinde giriş ve çıkış empedans eşitliğinin ve böylece maksimum güç aktarımının devam edebileceği gösterilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/10/2020
Düzeltilme: 08/12/2020
Kabul: 08/12/2020

Anahtar Kelimeler

Kablosuz Enerji Aktarımı
Karşılıklı Endüktans
Kapasitör Dizisi

Keywords

Wireless Power Transfer
Mutual Inductance
Capacitor Array

Impedance Analysis and Variable Capacity Array Application for Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances

Abstract

In serial-series wireless energy transfer system via coupled magnetic resonances systems, the change of distance between the transmitter and receiver coils is one of the most important problems affecting the input impedance of the system and thus the power transfer. In this study, the effect of the use of serial capacity added to the system in order to maintain the maximum power transfer in case of changing the distance between the transceiver coils in wireless energy-transfer system via coupled magnetic systems was investigated. In the simulation studies, when the distance between the transceiver coils was changed between 0 and 30 cm limits, the required capacity value for the maximum power transfer and the input impedance of the system according to this value was calculated. In addition, a capacity matrix application using eight capacitors and relays was realized, and the actual value of each capacity was measured for the circuit. In the simulation system made by using the label values of the capacitors, the effect of the change between the transceiver coils on the input impedance and power transfer was examined again with the measured real capacitance values. At the end of the study, a model has been developed in which the change of input impedance depending on the distance and therefore the common inductance between the transceiver coils can be analyzed. It has been shown that in wireless energy transfer systems where the distance between the transmitter and receiver coils varies between certain limits, the input and output impedance equality and thus the maximum power transfer can continue.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kablosuz enerji transferi sistemleri üzerine yapılan çalışmalar ilk kez 1900'lü yılların başında Nikola Tesla tarafından enerjinin manyetik alan kullanılarak karşılıklı bobinler vasıtasıyla aktarılmasıyla ortaya çıkmıştır [1-3]. Fiziksel temasın ortadan kaldırılması, kaynak ile yük arasında hava boşluğundan enerjinin aktarılabilmesi ve daha esnek kullanımın sağlanması, kablosuz güç aktarımının elektrikli araçlar, medikal ve taşınabilir kişisel cihazların şarj edilmesi gibi birçok alanda kullanımına olanak vermektedir [3-19].

Literatürde kablosuz enerji aktarımı için geliştirilen çeşitli yöntemler bulunmasına rağmen elektromanyetik indüksiyon ve mikrodalga prensibi kullanılarak yapılan güç transferi en popüler yöntemler olarak öne çıkmaktadır [20]. Gündelik hayatta kullandığımız diş fırçası ve cep telefonu gibi cihazlarda da yaygın olarak tercih edilen elektromanyetik indüksiyon prensibi alıcı-verici bobinler arası mesafenin birkaç cm ile sınırlandırıldığı sistemlerde yüksek verim ve güç aktarımı performansı sağlamaktadır. Ancak bobinler arası mesafe artırıldığında güç transferi ve verim etkinliği neredeyse tamamen kaybolmaktadır. 2007 yılında Andre Kurs ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya kadar kablosuz enerji transferinin gelişiminde en önemli engel bobinler arası mesafenin artmasıydı. Yapılan çalışmada orta mesafede yüksek verimle güç aktarımı için manyetik rezonans kuplajlı enerji aktarım sistemi gösterilmiştir [16]. İki rezonatör bobin kullanılarak manyetik kuplaj sağlanmış, 60W güç, 2m mesafeye yaklaşık olarak %40 verimle aktarılmıştır. Bu çalışmadan sonra kablosuz güç aktarım çalışmalarında yeni kontrol yöntemleri kullanılarak verimin artırılması, aktarılan güç ve aktarım mesafesinin yükseltilmesi ve fiziksel olarak en uygun devre tasarımının gerçekleştirilebilmesi hedeflenen birçok çalışma yapılmıştır [6, 15, 22-24].

Alıcı – verici bobinler arası belirli bir mesafede yüksek çalışma performansı için tasarlanan manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarımında, mesafesinin değişmesiyle bobinlerin kaçak endüktans ve karşılıklı endüktans değerleri değişmektedir. Literatürde sistemin güç aktarım performansını olumsuz etkileyen bu değişimin etkisini ortadan kaldırabilmek için, ayarlı kapasitör veya bobinler arası belirlenen mesafe aralığı için sabit kapasitörlerin kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır [29-31]. Bunlara ilaveten karşılıklı endüktansın ayarlanabildiği dört bobinli sistemler de bulunmaktadır [29, 30]. Fakat bu sistemlerde yine sabit bir mesafe için güç iyileştirilmesi yapılabilmektedir. Kablosuz enerji aktarım sistemlerinde bobinler arası mesafenin değişmesi durumunda sistemin çalışma frekansının değiştirilerek rezonans şartı ve güç aktarımının artırılması bir diğer çözüm yoludur [25]. Frekans ayarlama teknikleri kullanılarak aktarılan güç artırılmış, bu yöntemde frekans bant aralığı sistemin çalıştırılma frekansının birkaç kHz yakınında tutulmuştur. Fakat, mesafeye bağlı olarak değişen karşılıklı endüktanstaki büyük değişimler için rezonans şartı sağlanamamasından dolayı çalışma sınırları kısıtlı kalmıştır [15, 17, 26]. Frekansın ve aktarım mesafesinin sabit tutulduğu, alıcı bobine bağlı yükün değiştiği durumda veriminin yükseltilmesi için yapılan çalışmalarda ise, sabit kapasitör kullanılarak sistemin rezonans şartı sağlanmıştır [16, 27]. Ancak bu çalışmalarda aktarım mesafesi sabit kabul edilmiş, aktarım mesafesinin değişmesi halinde aktarım gücünün doğrudan etkilendiği göz ardı edilmiştir [28].

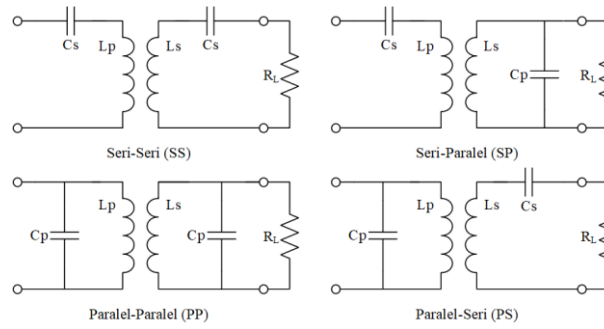
Bu çalışmada, seri kompanzasyonlu manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemi için, değişken kapasitör dizisi uygulamasının analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin maksimum güç aktarımını sürdürebilmesi için giriş empedansının değişimi incelenmiştir. Sistemde alıcı–verici bobinler arası mesafenin değişimi durumunda, karşılıklı endüktanstaki değişim buna bağlı olarak verici devreye yansıyan empedansın giriş empedansına olan etkisinin ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Matlab/Simulink araç kutusu kullanılarak bir model geliştirilmiş ve bu modelde istenilen mesafe aralığında karşılıklı endüktans analizi yapılarak, sistemin giriş empedansı hesaplanmış ve rezonans şartını sağlayan kapasite değeri elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında alıcı – verici bobinler arası mesafenin 0,1cm değişiminin etkisini yok etmek için tasarlanan 0,1nF adım değerli seri kapasitör devresinin kompanzasyon etkisi analiz edilmiştir. Bu sayede, sistemin karşılıklı endüktansa bağlı olarak değişen yansıyan empedansı analiz edilmiş ve sistemin en yüksek güç aktarımını yapabildiği seri kapasite değeri bulunmuştur. Bulunan kapasite değeri, önerilen algoritma yardımı ile sayısal işaret işleyici (DSP) tarafından kontrol edilen kapasitör dizisi kullanılarak sistemin verici devresine uygulanmıştır. Sistemde kullanılan kapasitörlerin gerçek değerleri 100kHz frekans uygulanarak ölçülmüş ve uygulama sonucunda kapasite toleranslarının etkisi en aza indirilmiştir.

Çalışmanın diğer bölümlerinde sırasıyla şunlar anlatılmaktadır. İkinci bölümde manyetik rezonans kuplajlı seri-seri kablosuz enerji aktarım sisteminde karşılıklı endüktans ve yansıyan empedansın giriş empedansına

etkisini analiz etmek amacıyla matematiksel model çıkarılmıştır. Üçüncü bölümde karşılıklı endüktans değerinin farklı mesafelerde giriş empedansına olan etkisini incelemek amacıyla bir kablosuz enerji aktarım sistemi benzetimi sunulmuştur. Benzetimde geliştirilen bir algoritma yardımıyla, giriş empedansı analiz edilmiş, maksimum güç aktarımı yapılabilmesi için gerekli seri kapasite değerinin bulunması sağlanmıştır. Dördüncü bölümde ise, gerçek bir uygulamada kapasite değerinin etiket değeri ve gerçek değeri arasındaki küçük farkın giriş empedansı ve aktarım mesafesi üzerine etkisi ele alınarak seri bir kapasite dizisi uygulaması gerçekleştirilmiştir.

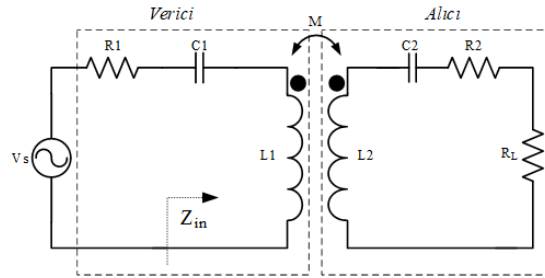
2. MANYETİK REZONANS KUPLAJLI SERİ-SERİ KABLOSUZ ENERJİ AKTARIM SİSTEMİ MODELİ (SERIES-SERIES WIRELESS POWER SYSTEM MODEL)

Manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel olmak üzere Şekil 1’de verilen 4 farklı devre topolojisi kullanılmaktadır [32, 33].

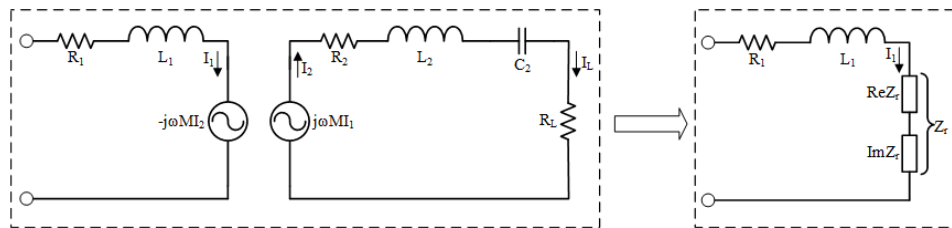


Şekil 1. Kablosuz enerji aktarım sistemi topolojileri

Verici devrenin seri topolojide olması bobinden yüksek akım geçmesini, dolayısıyla alıcı devreye aktarılan gücün yüksek olmasını sağlamaktadır. Verici devrenin, paralel topolojide olması rezonans devresinin açık devre olması nedeni ile verici bobinden çok az akım geçmesine neden olmakta, alıcı devreye çok az güç aktarılmasına izin vermektedir. Alıcı devrenin seri yapıda olması düşük empedanslı yükler için uygun, yüksek yük empedansı için uygun değildir. Yük empedansı dikkatli seçildiğinde ve rezonans sağlandığında, aktarım gücü ve verim en yüksek değerde olmaktadır [35]. Bu çalışmada kullanılan seri-seri devre topolojisi Şekil 2’de verilmiştir. Burada, Z_{in} devrenin giriş empedansını, L_1 verici bobinin endüktansını, R_1 verici bobinin direncini, C_1 verici devresi rezonans kapasitörünü göstermektedir. Aynı şekilde, L_2 alıcı bobinin endüktansını, R_2 alıcı bobinin direncini, C_2 alıcı devresi rezonans kapasitörünü ifade etmektedir.



Şekil 2. Seri-Seri kablosuz enerji aktarım sistemi topolojisi



Şekil 3. Seri-Seri kablosuz enerji aktarım sistemi eşdeğer devresi

Sistemde alıcı devrenin, verici devreye yansıyan empedansı Z_r , eşdeğer devrenin sadeleştirilmesiyle bulunabilir. Şekil 3'te yansıyan empedans eşdeğer devresi sunulmuştur. Yansıyan empedans alıcı devrenin toplam empedansının, verici devreye etkisini kapsamakta ve sistemin giriş empedansını doğrudan değiştirmektedir. Bu değişim, alıcı devre elemanlarının sabit kabul edildiği durumda sadece bobinler arası karşılıklı endüktans değerine bağlı olmaktadır. Yük empedansının değişken olduğu durumlarda da bu etki yüke bağlı olarak değişmektedir. Yansıyan empedans Eşitlik 1 kullanılarak bulunmaktadır.

$$Z_r = \frac{\omega_o^2 M^2}{R_2 + R_L + j\omega_o L_2} \quad 1$$

Eşitlikte ω_o sistemin çalışma frekansını, M karşılıklı endüktansı, R_2 alıcı bobin direncini, L_2 alıcı bobin endüktansını, R_L yük direncini ifade etmektedir. Eşitlikte de görüldüğü gibi alıcı devrenin empedansı ve yük direnci yansıyan empedansa etki etmektedir. Aktarım gücünün yüksek olabilmesi için verici devre empedansı ile yansıyan empedans birbirine eşit olmalıdır [39].

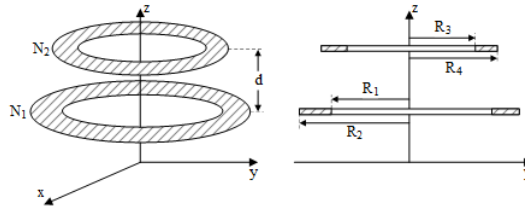
Kablosuz enerji aktarım sisteminin güç aktarım kapasitesi, alıcı kısmın rezonans frekansına bağlıdır [33]. Bu frekansta sistemin çalıştırılması alıcı kısmın omik davranış sergilemesini sağlamaktadır. Burada alıcı kısmın rezonans şartı Eşitlik 2' de ifade edilmektedir.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{C_2(L_2 + M)}} \quad 2$$

Eşitlikte, ω_r alıcı devrenin rezonans frekansını, L_2 alıcı bobine ait öz endüktansı, C_2 alıcı devre kapasitesini ve M ise iki bobin arasında oluşan karşılıklı endüktansı ifade etmektedir. Karşılıklı endüktansın değişiminin alıcı kısmın rezonans şartını doğrudan etkilediği eşitlikte görülmektedir. Sistemin aktarım verimi, alıcı devre yük empedansı ile eşdeğer devre empedansı oranı ile elde edilebilir [36]. Eşitlik 3 seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemlerinde verimi göstermektedir.

$$\eta = \frac{R_L}{(R_L + R_2) \left(1 + \frac{R_1(R_2 + R_L)}{\omega_o^2 M^2}\right)} \quad 3$$

Sistemin giriş empedansını etkileyen diğer önemli parametre olan karşılıklı endüktans değeri, Şekil 4'te görülen, aynı düzlemde birbirine paralel dairesel disk bobinler için Eşitlik 4'te verilen ifadeyle hesaplanabilmektedir [34].



Şekil 4. Eksenleri hizalanmış paralel dairesel bobinlerin yerleşimi

$$M = \frac{\mu_o N_1 N_2}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)} \int_0^\pi \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \frac{\cos \theta r_1 r_{II}}{r} dr_I dr_{II} d\theta \quad 4$$

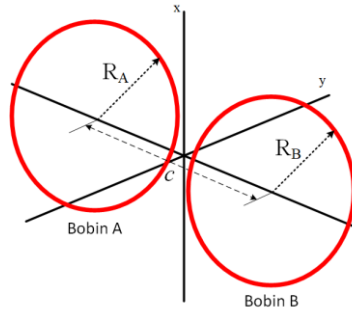
Eşitlikte, N_1 ve N_2 bobinlere ait tur sayılarını, R_2 ve R_4 bobinlerin dış yarıçaplarını, R_1 ve R_3 iç yarıçaplarını belirtmektedir. Mesafe ve bobinlerin yerleşimi Eşitlik 5'te verilen kosinüs teoremiyle bulunmaktadır.

$$r = \sqrt{d^2 + (R_2 - R_1)^2 - 2(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)\cos\theta + (R_4 - R_3)^2} \quad 5$$

Buradan yola çıkarak, Şekil 45'te gösterilen merkezleri hizalanmış iki dairesel telin (Maxwell bobini) karşılıklı endüktans değeri Eşitlik 6 kullanılarak nümerik olarak hesaplanabilir [37].

$$M_{12} = \frac{2\mu_o \sqrt{R_A R_B}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right] \quad 6$$

$$k^2 = \frac{4R_A R_B}{(R_A R_B)^2 + c^2} \quad 7$$



Şekil 5. Maxwell bobini

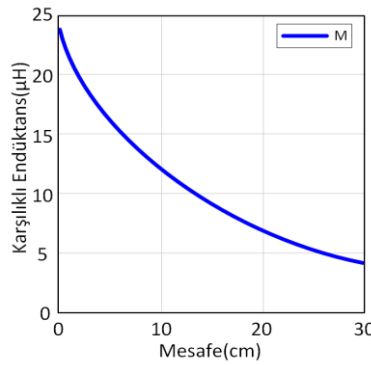
Eşitlik 6, tam eliptik integral çözümünü olup K ve E integralin birinci ve ikinci terimini oluşturmaktadır. Fonksiyon parametresi k (Eşitlik 7), dairesel tellerin yarıçapları R_A ve R_B , teller arası mesafe aralığı c kullanılarak karşılıklı endüktans değeri bulunabilir. Hesaplama dairesel şekildeki iki bobin $(2N + 1) \times (2n + 1)$ hücreye bölünerek, her bir hücre bir teli oluşturmaktadır [34]. Hücreler kümülatif olarak hesaplanarak, karşılıklı endüktans değeri toplamda elde edilmektedir. Tanımlanan bu bobinler arasındaki karşılıklı endüktans Eşitlik 8'de belirtilmektedir.

$$M_0 = \frac{N_1 N_2}{(2N+1)(2n+1)} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{l=-n}^{l=n} M(h, l) \quad 8$$

Eşitlikte, N ve n bobinlerin hücre sayılarını, h ve l çözüm adım değerini göstermektedir. Şekil 2'de eşdeğer devre modeli gösterilen manyetik rezonans kuplajlı seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemi için giriş empedansı Eşitlik 9'da ifade edilmiştir.

$$Z_{in} = j(\omega_s L_1 - \frac{1}{\omega_s C_1}) + \frac{\omega_s^2 M^2}{(\frac{8}{\pi^2}) R_L + j(\omega_s L_2 - \frac{1}{\omega_s C_2})} \quad 9$$

Maksimum güç aktarımının yapılabilmesi için sistemin giriş ve çıkış empedanslarını birbirine eşit olması gereklidir [25,37]. Giriş empedansını doğrudan etkileyen değişkenler frekans ve karşılıklı endüktans değeridir. Sistemin çalışması sırasında topolojik olarak yapılacak değişiklikler de yine giriş empedansını doğrudan etkileyecektir. Bu çalışmada frekansın sabit olarak tutulması sebebiyle giriş empedansı değerini, karşılıklı endüktans ve sistem topolojisinde kullanılan elemanlar belirlemektedir. Giriş empedansı, alıcı-verici bobinler arası mesafeyle karşılıklı endüktansa bağlı olarak değişmektedir. Karşılıklı endüktansın bobinler arasındaki mesafeye göre değişimi Eşitlik 4'e göre bulunabilmektedir. Bu çalışmada eşitlikler geliştirilen bir MATLAB fonksiyonuyla hesaplanmış ve elde edilen değerlerin doğruluğu ANSYS Maxwell programı kullanılarak oluşturulan modelde kanıtlanmıştır. Sistemin anahtarlama frekansının, alıcı-verici bobinlere ait endüktansların ve kapasitelerin sabit olduğu durumda, karşılıklı endüktansın mesafeye bağlı değişimi Şekil 6'da gösterildiği gibi olmaktadır.



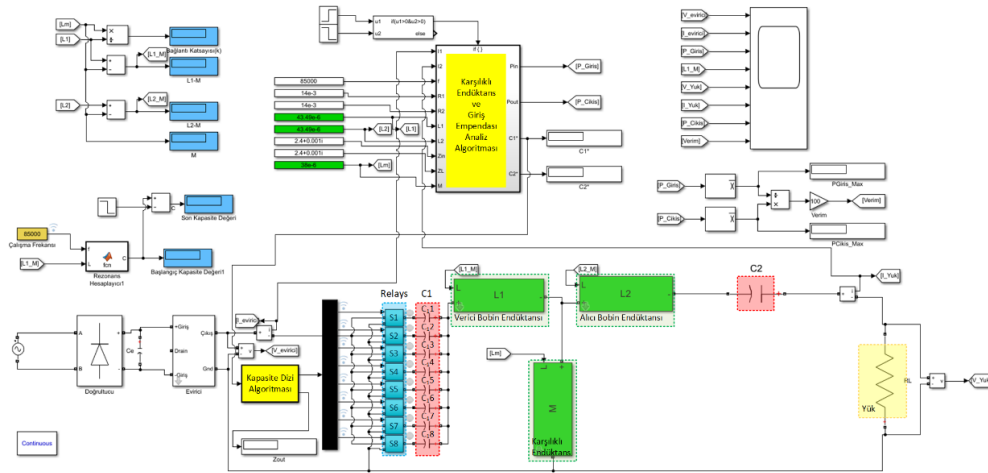
Şekil 6. Alıcı – verici bobinler arası mesafeyle karşılıklı endüktans değişimi

Bobinler arasındaki mesafe arttıkça karşılıklı endüktans azalmaktadır [28]. Buna bağlı olarak verici devrenin empedansı değişmekte, sistemin rezonans frekansı da kaymaktadır. Önceki çalışmalarda bu

durumun telafi edilmesi için anahtarlama frekansının veya sistemde verici bobinde bulunan kapasite değerinin değiştirilmesi önerilmiştir [16-18,26,27,30-32]. Frekans ayarlama aralığının sınırlı kalması nedeniyle devrede topolojik olarak kapasitenin yeniden ayarlanması uygulanabilirliği kolay bir çözümdür.

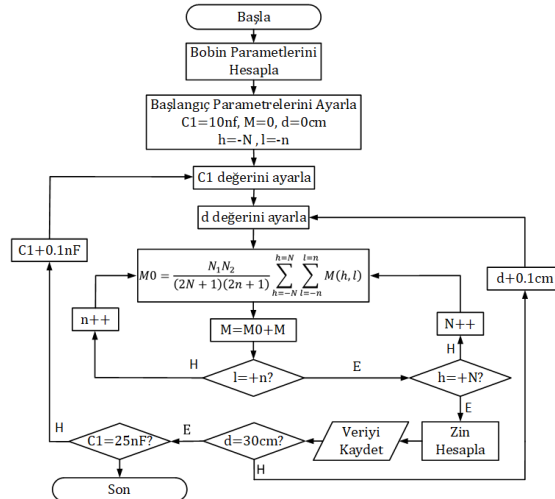
3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Sistemin empedans hesaplamalarını ve karşılıklı endüktansın mesafeye göre değişiminin analizini yapabilmek amacıyla Şekil 7’de gösterilen Matlab/Simulink modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, istenilen mesafe aralığında karşılıklı endüktans analizini yaparak, sistemin giriş empedansını ve rezonans şartını sağlayan kapasite değerini hesaplamaktadır. Böylelikle bulunan kapasite değerinde aktarım gücü ve verim kolaylıkla yorumlanabilmektedir. Bu bölümde geliştirilen model kapasitelerin etiket değerleri kullanılarak açıklanmıştır. Sonraki bölümde ise benzetimi yapılan kapasite dizisi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Empedans analizi ve karşılıklı endüktans SIMULINK modeli

Model seri-seri kablosuz enerji aktarım sistemi eşdeğeri ve hesaplama bloklarından oluşmaktadır. Eşdeğer devrede, kaynak gerilimi doğrultulmuş, evirici bloğu kullanılarak yüksek frekanslı gerilim üretilmiştir. Evirici çıkışında paralel bağlı röleler ve kapasitörler, kapasite dizisini oluşturmaktadır. Rölelerin kontrolü kapasite dizisi algoritması aracılığıyla sağlanmaktadır. Alıcı-verici bobinlerin endüktansları ve karşılıklı endüktans, fonksiyon blokları kullanılarak tasarlanan değişken endüktörler tarafından temsil edilmektedir. Alıcı devre kapasitesi ve yük direnci sistem çıkışına eklenmiştir. Bobin endüktansları, karşılıklı endüktans ve kapasite dizisi değeri hazırlanan algoritma tarafından hesaplanmaktadır. Gerçekleştirilen modelin akış diyagramı Şekil 8’de sunulmuştur.



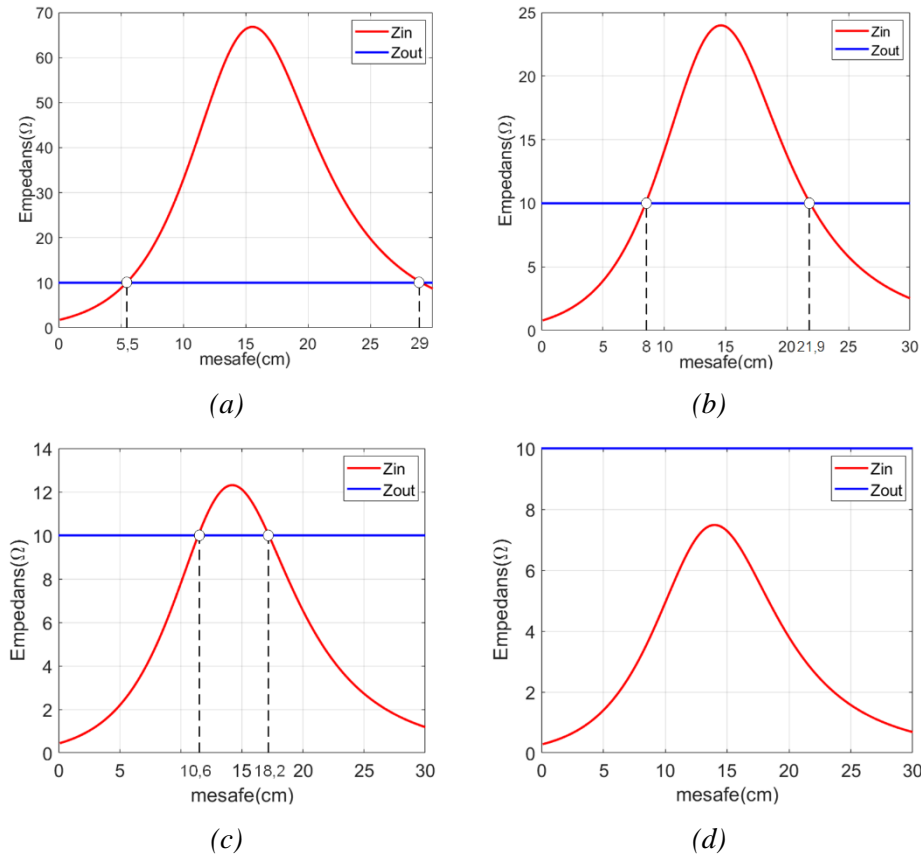
Şekil 8. Empedans ve karşılıklı endüktans analiz modeli akış diyagramı

Modelde ilk olarak, bobinlere ait tur sayıları, iç çap ve dış çap değerleri kullanılarak bobin endüktansları Eşitlik 10'da verilen Wheeler metoduyla hesaplanmaktadır. Eşitlikte her bir bobine ait tur sayısı N , dairesel alanın merkez noktası ile bobinin ortalama genişliği arası mesafe r , ve bobinin ortalama genişliği w ile temsil edilmektedir.

$$L = \frac{r^2 N^2}{(8r+11w)} \quad 10$$

Sistemin eşdeğer empedansı ve karşılıklı endüktansı için başlangıç değerleri $C_1=10nF$, $d=0cm$ ve $M=0\mu H$ olarak tanımlanmıştır. Model, ilk kapasite değeri için karşılıklı endüktans değerini hesaplamaktadır. Hesaplama Eşitlik 2.8 kullanılarak her bir hücre için toplamsal olarak yapılmaktadır. Karşılıklı endüktansın değeri, Eşitlik 2.9'da yerine konularak sistemin giriş empedansı Z_{in} hesaplanmaktadır. Elde edilen giriş empedansı, karşılıklı endüktans, kullanılan kapasite değeri ve bobinler arasındaki mesafe kaydedilerek kapasite değeri 0,1nF adımlar ile artırılmakta ve $d=0-30cm$ mesafe aralığı için 0,1cm hassasiyetle hesaplanmalar yapılmaktadır. Hesaplama sonucunda giriş empedansı ve yük empedansının eşit olduğu kapasite değeri ve aktarım mesafesi belirlenebilmektedir.

Model örnek senaryolar için çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Tüm senaryolarda bobin parametreleri eşit, çıkış yükü $R_L=10\Omega$ olarak kabul edilmiştir. C_2 kapasitörü sadece alıcı bobinin rezonans frekansına etki etmesi nedeni ile sabit tutulmuştur. Mesafe $d=0-30cm$ aralığında, $C_1=10nF-25nF$ aralığında artırılmıştır. Her bir çözüm için kapasite artış adımı 0,1nF olarak belirlenmiş ve bu sayede hassasiyet artırılmıştır. Örnek senaryolar için elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Farklı kapasite değerlerinde giriş empedansı değişimi,
a) $C_1=10nF$, b) $C_1=15nF$, c) $C_1=20nF$, d) $C_1=25nF$

Grafiklerde görüldüğü üzere C_1 kapasite değerine bağlı olarak giriş empedansı değişiklik göstermektedir. İlk senaryoda, $d=5,5cm$ ve $d=29cm$ mesafede giriş empedansı ve yük direncinin eşit olduğu görülmektedir. Aktarım mesafesi $d=5,5cm$ için aktarımın gücü maksimum olmaktadır. Ancak $d=29cm$ mesafede maksimum güç en yüksek mesafeye aktarılmaktadır. İkinci ve üçüncü senaryoda ise, kapasite değerinin artırılması ile aktarım gücünün daha yüksek olacağı mesafe değerlerinin yaklaşık olarak $d=8cm$ ve

$d=21,9cm$, $d=10,6cm$ ve $d=18,2cm$ olduğu görülmektedir. Yine bu senaryolar için de en yüksek aktarım mesafesinin $d=21,9cm$ ve $d=18,2cm$ 'de olduğu, aktarılan gücün maksimum olacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Dördüncü senaryoda $C_1=25 nF$ seçilmesi durumunda giriş ve çıkış empedansının hiç eşleşmediği, aktarılan güç miktarının diğer senaryolardan daha düşük olacağı gözlemlenmektedir. Bu durumlar değerlendirildiğinde, modellemesi yapılan bu sistemin belirli bir mesafe aralığı için ihtiyaç duyulabilecek kapasite değerleri belirlenebilmektedir. Belirlenen kapasite değerleri için topoloji değişikliği yapılabilen bir sistem kurulması halinde, mesafe değişiminde aktarılan gücün yüksek tutulabilmesi sağlanabilmektedir.

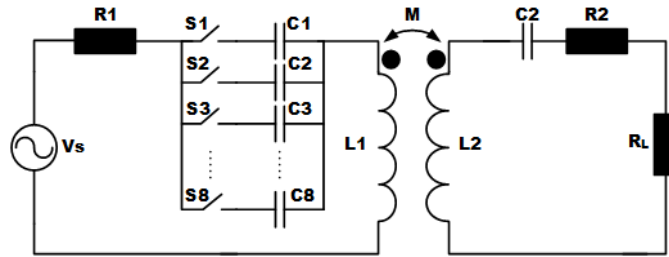
4. TASARIM VE UYGULAMA (DESIGN AND APPLICATION)

Giriş empedansını farklı mesafeler için ayarlayabilmek amacıyla denetleyici, röle sistemi ve farklı kombinasyonlarda kurulan 8 kapasite hattından meydana gelen bir seri kapasitör devresi tasarlanmıştır. Kapasite hattı sayısı artırılarak daha hassas kapasite ayarlaması da yapılabilmektedir. Oluşturulan kapasite sisteminde Tablo 1'de verilen kapasitörler yer almaktadır.

Tablo 1. Kapasitörlerin etiket ve ölçülen gerçek değerleri

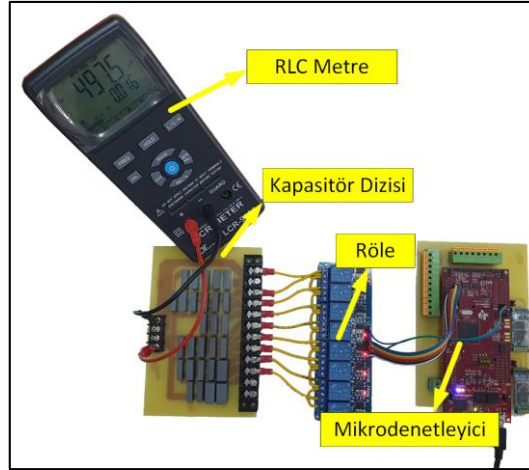
Hat No	Kapasite	
	Etiket Değeri	Ölçülen Değer
1	502 nF	464 nF
2	253 nF	245 nF
3	122 nF	120 nF
4	66 nF	64,7 nF
5	33 nF	32,7 nF
6	15 nF	14,13 nF
7	8,25 nF	7,21 nF
8	5 nF	4,71 nF

Tabloda verilen kapasite değerleri çeşitli kapasitörlerin seri ve paralel bağlanması ile elde edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kapasite hatları eklenen devre topolojisi Şekil 10' verilmiştir.



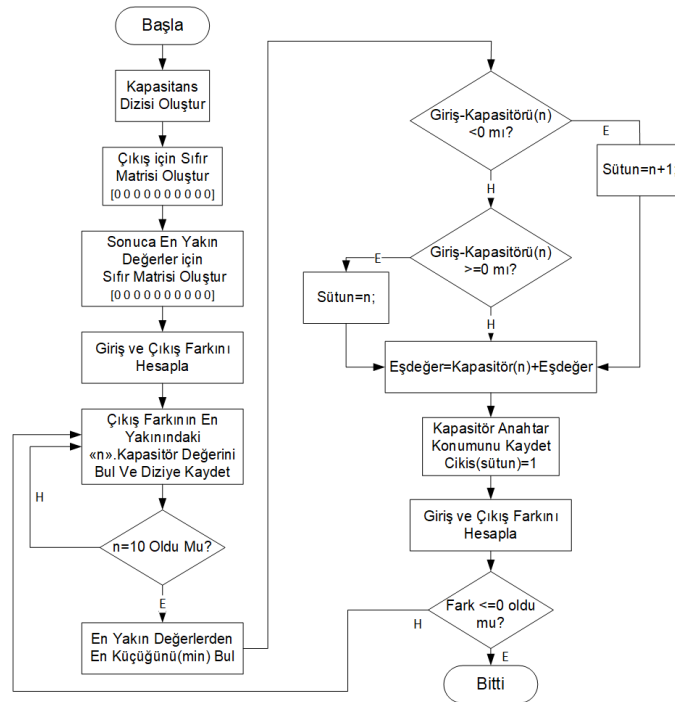
Şekil 10. Seri kapasite hatları eklenmiş devre topolojisi

Tabloda verilen kapasite değerleri etiket değerleri olup, gerçek değerleri RLC metre kullanılarak ölçülmüştür. Kapasitelere ait tolerans değerleri bu sayede değerlendirilmiş ve en doğru sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca farklı frekanslarda kapasite değerlerinin değişkenlik göstermesi nedeni ile ölçüm, sistem çalıştırma frekansı olan 85kHz'e yakın olan 100kHz frekansta gerçekleştirilmiştir. Böylelikle frekansın tolerans üzerindeki etkisi en aza indirilmiştir. Ölçülen bu kapasiteler kullanılarak bir kapasite kontrol devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan kapasite kontrol devresi Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Tasarlanan kapasite kontrol devresi

Oluşturulan kapasite hatları birbirlerine paralel olarak bağlanabilen kombinasyonlar şekilde kullanılmaktadır. Kapasite kontrolü, DSP aracılığıyla Simulink modeliyle gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir. Mesafenin anlık değerine göre önceden belirlenen kapasite kombinasyonu devreye alınmaktadır. Kapasite kontrol devresinin kontrolü için tasarlanan Simulink modeli, gerekli kapasite değerine en yakın diziyi hesaplamaktadır. Hesaplama için kullanılan 8 elemanlı kapasite dizisi, çıkış dizisi ve en yakın kombinasyonun kaydedildiği bir dizi modelde tanımlanmaktadır. İstenilen kapasite değeri ile tanımlanan kapasite dizisindeki her bir kapasite değeri arasındaki fark alınarak, istenilen değere en yakın dizi elemanı bulunmaktadır. Bulunan bu dizi elemanına, bir sonraki dizi elemanı eklenerek aradaki fark tekrar hesaplanmaktadır. Farkın sıfırdan büyük olduğu tüm durumlarda tekrar hesaplama yapılmaktadır. Bu hesaplamalar yapılır iken kullanılan her kapasite değeri için "1" bilgisi, kullanılmayan kapasite değerleri için "0" bilgisi çıkış dizine kaydedilmektedir. Farkın sıfır veya daha düşük olduğu durumda ise istenilen kapasite değerine en yakın kombinasyon oluşturulmaktadır. Elde edilen çıkış dizisi, Simulink modeli tarafından DSP'ye dijital çıkış olarak aktarılmaktadır. Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 12'de sunulmuştur.



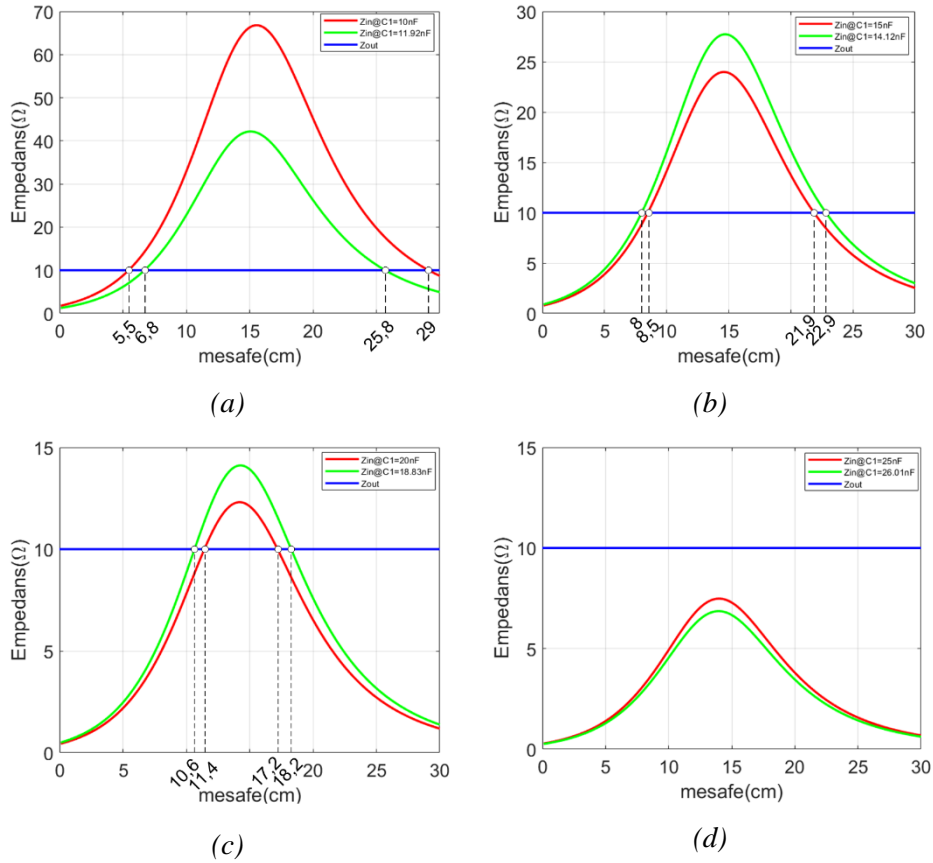
Şekil 12. Hesaplama ve çıkış kontrol algoritması akış diyagramı

Kontrol sistemi, tüm olasılıkları hesaplamakta, istenilen değere en yakın kapasite kombinasyonunu sağlayacak şekilde röleleri devreye almaktadır. Her bir röle hattının bağlı olduğu kapasite, paralel olarak eşdeğer kapasite devresine bağlanmaktadır. Elde edilen kapasite eşdeğeri, enerji aktarım sistemine seri olarak bağlanmaktadır. Seri olarak oluşturulan kapasite dizisi, 100 farklı olasılık ile test edilerek Tablo 2’de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2. Kapasite olasılıkları deney sonuçları

İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)	İstenen (nF)	Ölçülen (nF)
5	4,74	130	128,35	255	254,40	380	381,10
10	11,92	135	135,41	260	259,20	385	386,00
15	14,12	140	140,13	265	266,50	390	388,60
20	18,83	145	147,45	270	268,80	395	395,80
25	26,01	150	152,07	275	273,50	400	400,70
30	32,74	155	154,49	280	280,80	405	403,20
35	32,74	160	161,75	285	288,10	410	408,00
40	39,97	165	166,52	290	292,90	415	415,40
45	44,69	170	168,73	295	295,30	420	420,40
50	51,60	175	176,09	300	300,40	425	423,10
55	54,11	180	180,77	305	307,40	430	430,30
60	58,82	185	187,61	310	310,00	435	434,80
65	65,12	190	192,33	315	314,90	440	442,40
70	69,80	195	194,97	320	322,00	445	442,40
75	77,02	200	201,90	325	326,80	450	450,30
80	79,29	205	206,70	330	329,40	455	455,10
85	86,56	210	209,30	335	334,20	460	462,50
90	91,26	215	214,00	340	341,20	465	465,10
95	98,14	220	221,20	345	343,90	470	470,10
100	102,83	225	225,90	350	348,70	475	477,20
105	105,40	230	228,50	355	356,20	480	477,20
110	110,03	235	235,60	360	361,00	485	485,30
115	117,08	240	240,40	365	363,20	490	485,30
120	121,14	245	247,60	370	368,30	495	497,50
125	125,90	250	254,40	375	375,50	500	501,10

Kapasite dizisinin değer aralığı farklı bobin yapıları için esneklik oluşturması amacı ile çok sayıda olasılığa göre tasarlanmıştır. Böylelikle, sistemin giriş empedans aralığının rezonans frekansına ulaşabilirliği artırılmıştır. Benzetim çalışmasında vurgulanan dört farklı senaryo, gerçek kapasite değerlerine göre tekrarlanmıştır. Senaryolarda yer alan kapasite değerlerine en yakın kapasiteler sistem tarafından belirlenmiştir. Bu sayede kapasite toleransının etkisinin dâhil edildiği değişken kapasitör tasarımı test edilmiştir. Yapılan bu deneylere ait grafikler Şekil 13’te sunulmuştur.



Şekil 13. Farklı kapasite değerlerinde giriş empedansı değişimi, a) $C_1=10nF$ ve $C_1^*=11,92nF$, b) $C_1=15nF$ ve $C_1^*=14,12nF$, c) $C_1=20nF$ ve $C_1^*=18,83nF$, d) $C_1=25nF$ ve $C_1^*=26,01nF$

İlk grafik için $C_1=10nF$ etiket değerine sahip bir kapasite için giriş empedansı grafiği yer almaktadır. Tablo 1'de verilen kapasite etiket değerlerine göre 10nF değerine en yakın 8,25nF kapasitesi ele alınması gerekirken, gerçek değerlere göre modelleme yapıldığında C_7 ve C_8 kapasitelerinin paralel olarak bağlanmasından elde edilecek olan $C_1^*=11,92nF$ değeri en yakın değer olarak bulunmuştur. Bu kapasitenin giriş empedansına etkisi aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Sistemde kullanılan kapasitör değerlerinin hassasiyeti etkilediği ve etiket değeriyle gerçek kapasite değerleri arasındaki farkın sonuçları etkilediği açıkça gözlemlenmiştir. Etiket değerine göre sistemin giriş empedansı ve yük direnci 5,5cm mesafede eşit olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre 6,8cm'de eşit olmuştur. Bu durum, maksimum güç aktarım mesafesinin 1,3 cm daha ileriye kaymasına neden olmuştur. Empedans eşitliği ikinci kez etiket değerine göre $d=29cm$ 'de olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre $d=25,8cm$ 'de meydana gelmiştir. Gerçek kapasite değerine göre 3,2cm daha kısa mesafede empedans eşitliği oluşmuştur. Aynı şekilde ikinci grafikte, $C_1=15nF$ teorik olarak hesaplanan değere en yakın kapasitenin gerçek değeri $C_1^*=14,12nF$ olarak elde edilmiştir. Bu durumun aktarım mesafesini olumlu yönde etkilediği açıkça görülmektedir. Etiket değerine göre $d=8,5cm$ mesafede empedans eşitliği sağlanması gerekirken, $d=8cm$ mesafede eşitlik gerçekleşmiştir. 0,5cm daha kısa mesafede empedans eşitliği sağlanmıştır. Aynı değer için ikinci kez empedans eşitliği ise etiket değerine göre $d=21,9cm$ mesafede, gerçek kapasite değerine göre $d=22,9cm$ 'de gerçekleşmiştir. Gerçek kapasite değerinde aktarım mesafesinin 1cm daha yüksek olduğu görülmüştür. Üçüncü grafikte de önceki grafikte olduğu gibi aktarım mesafesi, ilk empedans eşleşmesi için $d=11,4cm$ yerine $d=10,6cm$ olmuş, ikinci empedans eşleşmesi için $d=17,2cm$ olması gerekirken $d=18,2cm$ 'ye ulaşmıştır. Yüksek güç aktarımı için ilk empedans eşitliğinin aktarım mesafesini olumsuz, ikinci empedans eşitliğinin olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Son grafikte ise empedans eşitliğinin, $C_1=25nF$ kapasite kullanıldığı durumda hiçbir mesafede eşleşme olmadığı görülmektedir. Bu kapasiteye en yakın olarak elde edilebilen $C_1^*=26,01nF$ kapasite değerinin de bu duruma çok yakın bir sonuç verdiği, aktarım gücünün hiçbir zaman maksimum olamayacağı açıkça görülmüştür. Bu sonuçlar kullanılan kapasite değerlerinin gerçek değerlerine göre tanımlanmasının, sistemin güç aktarım kapasitesinin yüksek tutulabilmesi için gerekli olduğunu göstermektedir. Topolojide kullanılacak olan kapasite değerleri

belirlenirken, gerçekte elde edilmesi gereken kapasite değerini oluşturacak büyüklükte kapasitelerden oluşturulmasının en yakın sonuçların elde edilmesine yardımcı olacağı ortaya konulmaktadır.

5. SONUÇ(CONCLUSION)

Seri-Seri manyetik rezonans kuplajlı kablosuz enerji aktarım sistemlerinde alıcı – verici bobinler arası mesafenin değişmesi güç aktarımını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada bobinler arası aktarım gücünün yüksek tutulabilmesi amacıyla kullanılan seri kapasite değerinin sistem giriş empedansına etkisi gerçekleştirilen model üzerinde incelenmiştir. Modellemede ilk olarak mesafe değişiminin giriş empedansı üzerindeki etkisi kapasitörlerin etiket değerleri kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra 8 adet kapasitörden oluşturulan esnek değişken kapasite matrisi oluşturulmuş, bu dizide kapasitörlerin seri/paralel bağlantısıyla meydana getirilebilecek tüm değerler ölçülmüştür. Bu sayede elde edilen gerçek kapasite değerleri geliştirilen modelde daha önce etiket değerleri kullanılan kapasite değerleri yerine kullanılmış ve giriş empedansının mesafeye bağlı değerleri hesaplanmıştır. Buna ilaveten gerçekleştirilen kapasite dizisinde bulunan eleman değerleri kullanılarak bobinler arası mesafenin değişimine göre empedans eşleştirmesinin yapılabileceği en yakın eşdeğer kapasitenin ayarlanabildiği bir algoritma geliştirilmiştir. Örnek senaryolar sunularak, kapasitelerin etiket değerleriyle gerçek değerleri kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda, ilk senaryo için empedans eşitliğinin $d=5,5cm$ ve $d=29cm$ mesafede eşit olması gerekirken, $d=6,8cm$ ve $d=25,8cm$ 'de eşit olduğu görülmüştür. İkinci senaryoda, empedans eşitliği kapasitenin etiket değerine göre $d=8,5cm$ ve $d=21,9cm$ eşit olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre $d=8cm$ ve $d=22,9cm$ mesafede eşit olmuştur. Üçüncü senaryoda ise kapasitenin etiket değerine göre empedans eşitliği $d=11,4cm$ ve $d=17,2cm$ mesafede olması gerekirken, gerçek kapasite değerine göre $d=10,6cm$ ve $d=18,2cm$ mesafede eşit olmuştur. Son senaryoda ise uygulanan kapasite değerinde empedans eşitliğinin hiçbir zaman olmayacağı görülmüştür. Sonuç olarak kablosuz enerji transferi için tasarlanacak böyle bir sistemde kapasitelerin gerçek değerlerine göre tanımlanmasının gerekliliği ispatlanmıştır. Modellemede bobinler arası mesafe değişimine karşılık elde edilen sonuçlara göre kapasite topolojisinin oluşturulmasıyla, istenilen değere en yakın sonuçlara ulaşılabildiği görülmüştür.

TEŞEKKÜR(ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi tarafından 07/2018-10 kodu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N, Tesla, "The Transmission of Electrical Energy Without Wires", Electrical World and Engineer, March 5, 1904.
- [2] X, Liu, L, Clare, X, Yuan, C, Wang, and J, Liu, "A Design Method for Making an LCC Compensation Two-Coil Wireless Power Transfer System More Energy Efficient Than an SS Counterpart," Energies, vol, 10, no, 9, p, 1346, 2017.
- [3] X, Liu, T, Wang, X, Yang, N, Jin, and H, Tang, "Analysis and Design of a Wireless Power Transfer System with Dual Active Bridges," Energies, vol, 10, no, 10, p, 1588, 2017.
- [4] Z, Zhang, K, T, Chau, C, Liu, F, Li, and T, W, Ching, "Quantitative Analysis of Mutual Inductance for Optimal Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," IEEE Transactions on Magnetics, vol, 50, no, 11, pp, 1-4, 2014, doi: 10,1109/TMAG,2014,2329298.
- [5] G, Tortora, F, Mulana, G, Ciuti, P, Dario, and A, Menciassi, "Inductive-Based Wireless Power Recharging System for an Innovative Endoscopic Capsule," Energies, vol, 8, no, 9, pp, 10315-10334, 2015.
- [6] R, Xue, K, Cheng, and M, Je, "High-Efficiency Wireless Power Transfer for Biomedical Implants by Optimal Resonant Load Transformation," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol, 60, no, 4, pp, 867-874, 2013, doi: 10,1109/TCSI,2012,2209297.

- [7] A, Shekhar, V, Prasanth, P, Bauer, and M, Bolech, "Economic Viability Study of an On-Road Wireless Charging System with a Generic Driving Range Estimation Method," *Energies*, vol, 9, no, 2, p, 76, 2016.
- [8] Y, Gao, K, B, Farley, and Z, T, H, Tse, "A Uniform Voltage Gain Control for Alignment Robustness in Wireless EV Charging," *Energies*, vol, 8, no, 8, pp, 8355-8370, 2015.
- [9] U, K, Madawala and D, J, Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 58, no, 10, pp, 4789-4796, 2011, doi: 10.1109/TIE,2011,2114312.
- [10] J, Shin et al., "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 61, no, 3, pp, 1179-1192, 2014, doi: 10.1109/TIE,2013,2258294.
- [11] H, Huy, L, Seunggyu, K, Youngsu, C, Yunho, and F, Bien, "An adaptive technique to improve wireless power transfer for consumer electronics," in 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 13-16 Jan, 2012, pp, 359-360, doi: 10.1109/ICCE,2012,6161901.
- [12] J, C, Lin, "Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects [Telecommunications Health and Safety]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol, 55, no, 2, pp, 250-253, 2013, doi: 10.1109/MAP,2013,6529362.
- [13] Y, Lu and D, B, Ma, "Wireless Power Transfer System Architectures for PorTablo or ImplanTablo Applications," *Energies*, vol, 9, no, 12, p, 1087, 2016.
- [14] R, Bashirullah, "Wireless Implants," *IEEE Microwave Magazine*, vol, 11, no, 7, pp, S14-S23, 2010, doi: 10.1109/MMM,2010,938579.
- [15] 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, doi: 10.1109/tie,2010,2046002.
- [16] A, Kurs, A, Karalis, R, Moffatt, J, D, Joannopoulos, P, Fisher, and M, Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol, 317, no, 5834, pp, 83-86, 2007, doi: 10.1126/science,1143254.
- [17] B, H, Waters, A, P, Sample, P, Bonde, and J, R, Smith, "Powering a Ventricular Assist Device (VAD) With the Free-Range Resonant Electrical Energy Delivery (FREE-D) System," *Proceedings of the IEEE*, vol, 100, no, 1, pp, 138-149, 2012, doi: 10.1109/JPROC,2011,2165309.
- [18] 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, 2009, doi: 10.1109/TIE,2008,2010110.
- [19] J, Park, B, Park, J, Lee, Y, Ryu, E, Park, and S, Kwon, "Optimum frequency of high Q-factor resonator for magnetic resonance coupling," in 2011 41st European Microwave Conference, 10-13 Oct, 2011, pp, 61-63, doi: 10.23919/EuMC,2011,6101706.
- [20] T, Beh, M, Kato, T, Imura, and Y, Hori, "Wireless power transfer system via magnetic resonant coupling at fixed resonance frequency -power transfer system based on impedance matching-," *World Electric Vehicle Journal*, vol, 4, pp, 744-753, 2011.
- [21] P, Raval, D, Kacprzak, and A, P, Hu, "A wireless power transfer system for low power electronics charging applications," in 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 21-23 June 2011, pp, 520-525, doi: 10.1109/ICIEA,2011,5975641.

- [22] C, Li, H, Zhang, and X, Jiang, "Parameters optimization for magnetic resonance coupling wireless power transmission," *ScientificWorldJournal*, vol, 2014, p, 321203, 2014, doi: 10.1155/2014/321203.
- [23] N, Y, Kim et al., "Automated adaptive frequency tracking system for efficient mid-range wireless power transfer via magnetic resonance coupling," in *Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European*, Oct, 29 2012-Nov, 1 2012, pp, 221-224.
- [24] O, Jonah, S, V, Georgakopoulos, and M, M, Tentzeris, "Optimal Design Parameters for Wireless Power Transfer by Resonance Magnetic," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol, 11, pp, 1390-1393, 2012, doi: 10.1109/LAWP,2012,2228459.
- [25] S, Y, R, Hui, W, Zhong, and C, K, Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 29, no, 9, pp, 4500-4511, 2014, doi: 10.1109/TPEL,2013,2249670.
- [26] B, Waters, A, Sample, and J, Smith, "Adaptive impedance matching for magnetically coupled resonators," *PIERS Proceedings*, pp, 694-701, 2012.
- [27] 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, doi: 10.1109/tie,2015,2455524.
- [28] Y, Lim, H, Tang, S, Lim, and J, Park, "An Adaptive Impedance-Matching Network Based on a Novel Capacitor Matrix for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 29, no, 8, pp, 4403-4413, 2014, doi: 10.1109/tpel,2013,2292596.
- [29] A, Karalis, J, D, Joannopoulos, and M, Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol, 323, no, 1, pp, 34-48, 2008, doi: 10.1016/j.aop,2007,04,017.
- [30] B, L, Cannon, J, F, Hoburg, D, D, Stancil, and S, C, Goldstein, "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol, 24, no, 7, pp, 1819-1825, 2009, doi: 10.1109/TPEL,2009,2017195.
- [31] W,-S, L, H,-L, L, K,-S, O, J,-W, Yu,;, "Switchable Distance-Based Impedance Matching Networks for a Tunable HF System," *Progress In Electromagnetics Research*, vol, 128, pp, 19-34, 2012.
- [32] K, Aditya, M, Youssef, and S, S, Williamson, "Design considerations to obtain a high figure of merit in circular archimedean spiral coils for EV battery charging applications," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, 9-12 Nov, 2015, pp, 005396-005401, doi: 10.1109/IECON,2015,7392949.
- [33] S, Chopra and P, Bauer, "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 9-13 Oct, 2011, pp, 1-6, doi: 10.1109/INTLEC,2011,6099774.
- [34] S, Babic, S, Salon, and C, Akyel, "The mutual inductance of two thin coaxial disk coils in air," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol, 40, no, 2, pp, 822-825, 2004, doi: 10.1109/TMAG,2004,824810.
- [35] Wang, J, Leach, M, Lim, EG, Wang, Z, Huang, Y, Investigation of magnetic resonance coupling circuit topologies for wireless power transmission, *Microw Opt Technol Lett*, 2019; 61: 1755– 1763, <https://doi.org/10.1002/mop,31803>.
- [36] J, Sallan, J, L, Villa, A, Llombart and J, F, Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 56, no, 6, pp, 2140-2149, June 2009, doi: 10.1109/TIE,2009,2015359.
- [37] J, C, Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford Universtiy Press, 1881.

- [38] S, D, Barman, A, W, Reza, N, Kumar, M, E, Karim, and A, B, Munir, "Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol, 51, pp, 1525-1552, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.031.
- [39] B, K, Kushwaha, G, Rituraj, and P, Kumar, "Mathematical model of series-series compensation for contactless power transfer system," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, 9-12 Nov, 2015, pp, 001321-001326, doi: 10.1109/IECON.2015.7392283.