

## ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİ VE ÖRNEK BİR SİSTEM İNCELENMESİ

Uğur KIZILDAĞ<sup>1\*</sup>, Ahmet Serdar YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, 46040, Türkiye  
Geliş tarihi: 03.05.2021 Kabul tarihi: 15.06.2021

### ÖZET

Kablosuz güç aktarım sistemleri yaklaşık olarak 20 yıldır kullanılmakta olup 2002 yılından itibaren bu teknoloji elektrikli araçlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Lazer, mikrodalga, manyetik indüksiyon ve manyetik rezonans kablosuz güç aktarım sistemleri için kullanılan temel yöntemlerdir. Elektrikli araçların, enerji darboğazı ve çevre kirliliği sorunlarına bir çözüm olarak görülmesi ile birlikte bu araçların bataryalarının temassız sistemlerle şarj edilmesi düşüncesi yaygınlaşmaya başlamıştır. İlk olarak Nikola Tesla tarafından ortaya atılan temassız güç transferi düşüncesi, enerjinin, ortak bir çekirdek üzerinde bulunmayan iki sargı arasında, oldukça büyük bir hava aralığı üzerinden aktarılması ilkesine dayanmaktadır[1]. Bu makale çalışmasında kablosuz güç aktarım sistemlerinin üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve incelenmiştir. Daha sonra bilgisayar programı ile modelleme ve benzetim yöntemleri kullanılmış ve elde edilen araştırma bulgularına göre karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar ortaya konmuştur. Devre benzetim çalışması yapılarak elektrikli araçların şarj sırasında kullanılan kablosuz güç transfer yöntemlerinden hangisinin daha kullanışlı ve verimli olduğunu belirlemek çalışmanın beklenen sonucudur

**Anahtar Kelimeler:** Endüktif Güç Aktarım Sistemleri, Elektrikli Araç, Kablosuz Güç Transfer Sistemleri, Modelleme

## WIRELESS CHARGING SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES AND A SAMPLE SYSTEM INVESTIGATION

### ABSTRACT

Wireless power transmission systems have been used for approximately 20 years and this technology has also been used in electric vehicles since 2002. Laser, microwave, magnetic induction and magnetic resonance are the main methods used for wireless power transmission systems. With the perception of electric vehicles as a solution to energy bottleneck and environmental pollution problems, the idea of charging the batteries of these vehicles with contactless systems has become widespread. The idea of non-contact power transfer, first put forward by Nikola Tesla, is based on the principle of transferring energy over a rather large air gap between two windings that are not on a common core [1]. In this article, studies on wireless power transmission systems have been researched and examined. Then, modeling and simulation methods were used with a computer program and comparison was made according to the obtained research findings and the results were presented. It is the expected result of the study to determine which of the wireless power transfer methods used during the charging of electric vehicles is more useful and efficient by performing a circuit simulation study.

**Keywords:** Inductive Power Transfer Systems, Electric Vehicles, Wireless Power Transfer Systems, Modeling

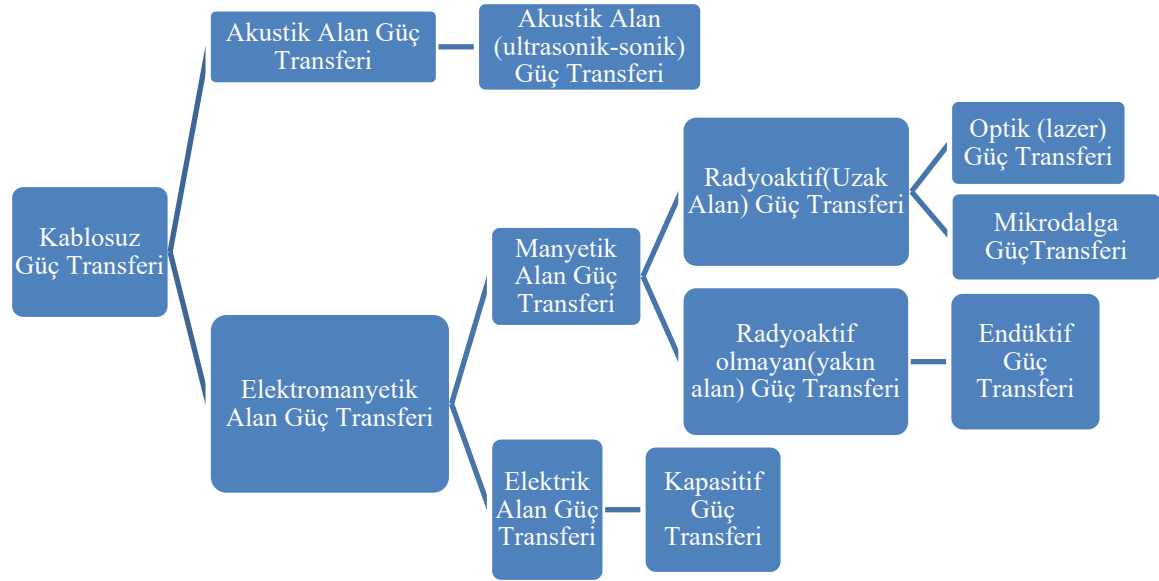
\* e-posta<sup>1</sup>: [ugur.kizildag@hotmail.com](mailto:ugur.kizildag@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2811-0570> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>2</sup>: [asyilmaz@ksu.edu.tr](mailto:asyilmaz@ksu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5735-3857>

## 1. Giriş

Kablosuz güç transferi, elektrik enerjisinin bir güç kaynağından elektrik yüküne herhangi bir kablo kullanılmadan iletilmesidir. Günümüzde kablosuz güç aktarım teknolojisi mobil cihazlarda, endüstriyel ve tıbbi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu elektrik ve elektronik cihazların bataryalarının şarj edilebilmesi çoğunlukla kablolu şarj cihazları kullanılmaktadır. Bu kablo kalabalığından ve kirliliğinden kurtulmak için kablosuz güç transferi, elektronik cihazların daha rahat kullanılmasını sağlayan bir alternatif haline geldiği görülmektedir. Kablosuz güç transfer sistemleri gelişen teknolojik gelişmelere bağlı olarak tıbbi implantların, ev aletlerinin ve elektrikli araçların (EA'lar) şarj edilmesi gibi birçok alanda faydalı bir şekilde kullanılmaktadır. Kablosuz güç transferi kullanıcıya bunun gibi birçok avantaj sunmaktadır[2]. Kablosuz güç transferinde çok fazla güç kullanmak için yapılan ilk çalışma kayıtları arasında, 1980'de yapılan ve Sovyetler Birliği'ndeki bir madende çalışan elektrikli trenlere kablosuz güç transferi ile enerji sağladığı bilinmektedir. 1990'larda yapılan çalışmada ise 20 kHz veya daha yüksek frekanslarda çok büyük miktarlarda akımları kontrol etmek mümkün olup, bu da kablosuz güç transferi yeniliğini hızla geliştirmiştir[3]. Kablosuz güç transfer sistemleri ile ilgili son dönemde yoğun şekilde başlayan çalışmaları etkileyen olay ise 2007 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü 'de bir grup araştırmacının başarılı bir şekilde 60 W gücündeki enerjiyi %40 verimle 2 metreyi aşan mesafeye aktarmasıdır[4].

Kablosuz güç aktarım sistemleri Şekil 1'de gösterildiği gibi akustik güç transferi, optik güç transferi, mikrodalga güç transferi, endüktif güç transferi ve kapasitif güç transferi şeklinde sınıflandırılabilir[5].



Şekil 1. Kablosuz güç transfer sisteminin sınıflandırılması[5]

Akustik güç transfer sistemleri, gücü transfer etmek için ses ve ultrasonik ses dalgalarını kullanır. Optik güç aktarım sistemi, gücü aktarmak için esas olarak yüksek frekanslı elektromanyetik dalga olan terahertz (THz) aralığında lazer ışığı kullanır. Mikrodalga güç transferi, gigahertz (GHz) aralığında elektromanyetik dalgayı kullanan radyo frekansı güç transferi olarak da adlandırılır[6]. Kapasitif güç transferi sistemleri, güç transferi için yüksek verimli elektrik alanları elde etmek için kullanılır[7].

### 1.1 Kablosuz Güç Transfer Teknolojilerinin Karşılaştırması

Kablosuz Güç Transfer teknolojilerinin beş kategorisinin karşılaştırması Çizelge 1'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.**Kablosuz güç teknolojilerinin karşılaştırılması[8].

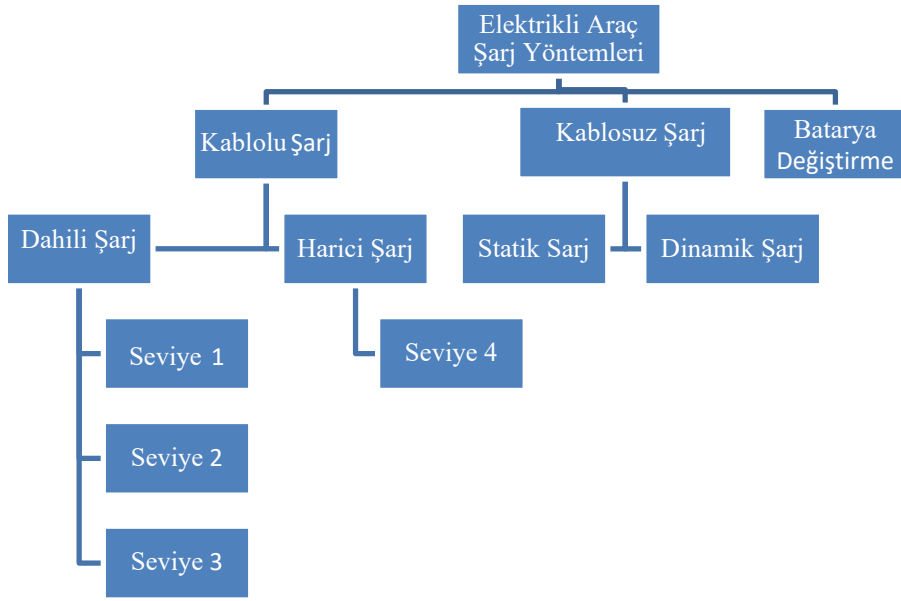
Teknoloji	Akustik	Optik	Mikrodalga	Endüktif	Kapasitif
Frekans	kHz MHz	THz	GHz	kHz MHz	kHz MHz
Güç	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
Verimliliği	Orta	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Mesafe	Uzun	Uzun	Uzun	Orta	Orta
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
Boyutu	Küçük	Küçük	Büyük	Orta	Orta
Uygulama alanları	Biyomedikal , Su altı	Biyomedikal , Uzay, Su altı	Hücrel ve Sensör Ağı, Uzay	Biyomedikal , Taşınabilir cihazlar, Elektrikli araçlar	Biyomedikal , elektrikli makine, Elektrikli araçlar

Çizelge 1'de de gösterdiği gibi, her yöntemin farklı özellikleri vardır. Dolayısıyla mutlak bir en iyi yöntem yoktur. Her yöntem farklı uygulama alanları için uygundur. Endüktif güç transferinin avantajı, yüksek verimliliği ve yüksek güç kapasitesidir. Ayrıca ticari olarak en başarılı kablosuz güç aktarım teknolojisi olmuştur. Uygulama alanları yaygın olarak entegre devreleri, biyomedikal cihazları, sensör ağları, taşınabilir elektronik ürünleri ve elektrikli araçlarıdır. Sistem verimliliği devre rezonansları ve yük koşulu ve transfer mesafesi düzenli şekilde ayarlandığı anda % 90'ın üzerinde DA-DA verim elde edilebilir. verimliliği önemli ölçüde etkilemeden ara rezonans bobinleri kullanılarak mesafe daha da uzatılabilir. Teknolojik özelliklerinden dolayı endüktif güç transfer ile bir sisteminin elektrikli araç şarj uygulaması için kablosuz güç transferini gerçekleştirmek için iyi bir çözüm olduğu sonucuna varılabilir[8].

### 1.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Şarj Yöntemleri

Elektrikli araçlar da etkin olarak kullanılan Şekil 2'de gösterildiği gibi şarj yöntemi olarak batarya değişimi, kablolu şarj ve kablosuz (endüktif) şarj olmak üzere üç farklı yöntem vardır[9].

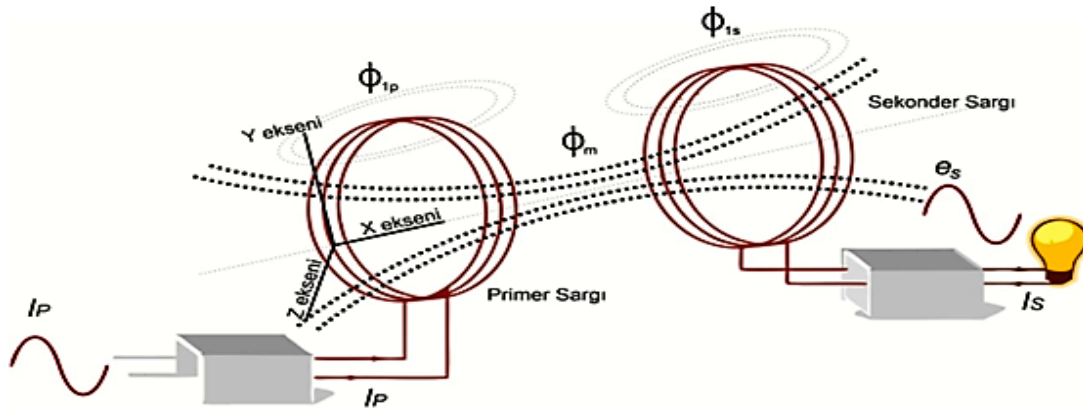
Bu çalışmada elektrikli araçların kablosuz güç aktarım yöntemleri incelenmiş ve elektrikli araçlar için Çizelge 1 de belirtilen özelliklerinden dolayı en uygun metot olan endüktif kablosuz güç transferine genel bir bakış açısı yapıp örnek bir kablosuz güç transfer devresi bilgisayar programında modellenerek, devrenin teknik verilerine göre matematiksel hesaplamalar yapıp ve benzetim sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 2. Elektrikli araçlarda kullanılan şarj yöntemleri[9]

## 2. Materyal ve Metot

Endüktif güç transferi sistemi, güç transferini gerçekleştirmek için tipik olarak kHz ila MHz aralığında radyoaktif olmayan manyetik alan kullanır. Devrede rezonanslar olduğu için buna manyetik rezonans da denilir. İki düzlemsel bobin, manyetik alan oluşturmak için manyetik veya endüktif kuplör adı verilen gevşek bağlı bir transformatör oluşturur. Bobinler arasında büyük bir hava boşluğu olduğu için manyetik bağlantıları nispeten düşüktür[10]. Elektrikli araçların ve diğer tüketici ürünlerinin kablosuz şarjı için endüktif güç aktarım sistemini geliştirmek ve kabul etmek yüzyıldan fazla sürse de, temel fikir, köklü Ampere'nin dolaşım yasasına ve Faraday'ın indüksiyon yasasına dayanmaktadır. Sistemin temel yapısı Şekil 3'de gösterilmektedir[11].

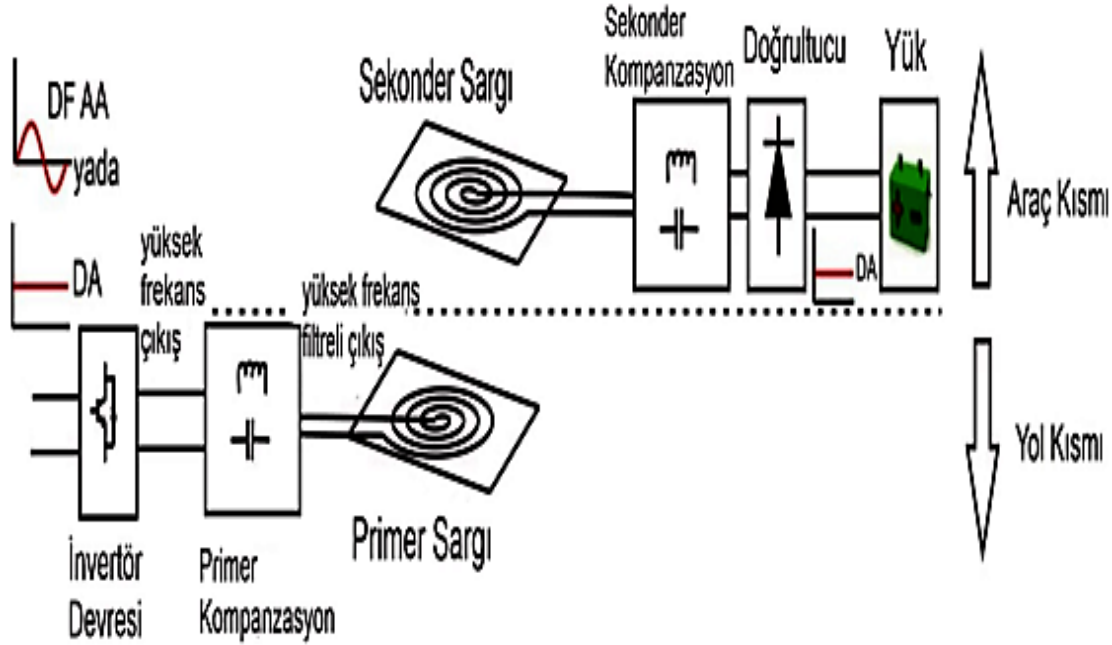


Şekil 3. Endüktif güç aktarım sisteminin yapısı[11]

Şekil 3'de endüktif kuplaj ile bağlanmış iki bobini göstermektedir. Burada, alt simge P ve S sırasıyla primer ve sekonder bobini ifade eder.  $\Phi_m$ ,  $\Phi_{IP}$  ve  $\Phi_{IS}$  terimleri sırasıyla karşılıklı akı, primer kaçak akısı ve sekonder kaçak akısıdır.  $M$ ,  $L_p$ ,  $L_s$  sırasıyla karşılıklı endüktans, primer bobinin öz endüktansı ve sekonder bobinin öz endüktansını ifade etmektedir.

Primer bobine zamanla değişen bir akım uygulandığında, primer bobini çevreleyen bölgede aynı frekansta zamanla değişen bir akı üretilir. Kapalı bir yol etrafındaki manyetik alanın kuvveti, bobin tarafından taşınan akımla doğru orantılıdır ve Ampere yasası ile bulunabilir[12].

EA pil şarjı için endüktif güç aktarım sisteminin geliştirilmiş bir blok diyagramı Şekil 4'de ki gibi çizilebilir[11].



Şekil 4.EA pil şarjı için endüktif güç transfer sisteminin geliştirilmiş blok şeması[11]

Genellikle olarak aracın altına monte edilen alıcı bobin, salınan manyetik akı alanlarını yüksek frekanslı AA'ya dönüştürür. Yüksek frekanslı AA daha sonra yerleşik piller tarafından kullanılan kararlı bir DA kaynağına dönüştürülür. Manyetik düzlemsel ferit plakalar, herhangi bir zararlı sızıntı akısını azaltmak ve manyetik akı dağılımını iyileştirmek için hem verici hem de alıcı tarafında kullanılır[13].

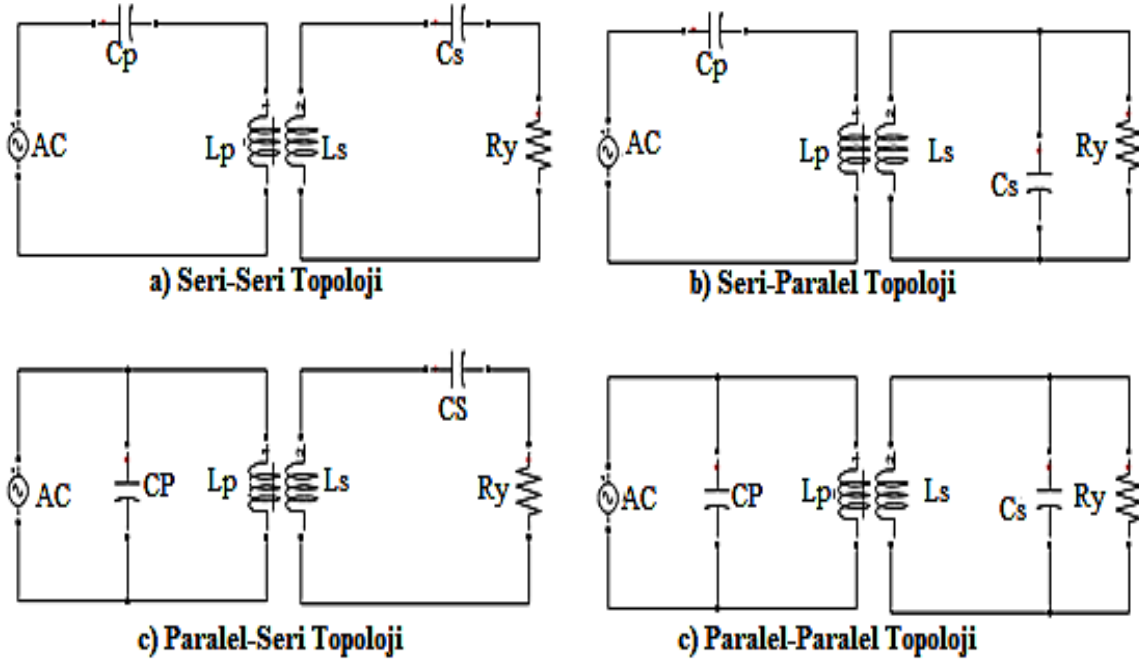
Daha sonra enerji, primer bobin akımı tarafından hava boşluğunda üretilen akı yoluyla primer bobine karşılıklı olarak bağlanan sekonder bobin aracılığıyla araç tarafına aktarılır. Sekonder bobin tarafından alınan enerji daha sonra sistemin güç aktarım kapasitesini iyileştirmek için eklenen sekonder kompanzasyon devresi tarafından işlenir [14]. Son olarak, bu şekilde alınan gerilim, yük (piller) tarafından kullanılabilir hale getirilecek şekilde düzeltilir[15].

Elektrikli araçlara güç sağlamak için manyetik olarak bağlı sistem kullanılması durumunda, yol yüzeyinde tutarsızlığa ve yol ile araç arasında daha iyi açıklığa izin vermek için büyük bir hava boşluğu gereklidir. Bu büyük hava boşluğu nedeniyle, sızıntı akısı çok yüksektir ve bağlantı katsayısı % 1 ile % 3 arasındadır. Bu tür uygulamalar gevşek bağlı sistemler altında sınıflandırılır. Gevşek bağlanmış sistemlerde zayıf bağlantı, zayıf güç aktarımına yol açar. Kuplajı iyileştirmek ve kaçak endüktansı kompanze etmek için, primer ve sekonder sargılarda kapasitif kompanzasyon gereklidir[16]

## 2.1 Kompanzasyon Topolojileri

Kondansatör olan dengeleyici ağlar, bobin endüktansı ile rezonansa girecek şekilde yapılır, böylece bir rezonans endüktif bağlantı oluşturulur. Primer ve sekonder bobinlerdeki kompanzasyon kapasitörünün bağlantısına bağlı olarak, dört tip rezonans endüktif bağlantı tanımlanabilir. Bunlar

şekil 5’de gösterildiği gibi Seri-Seri (SS), Seri-Paralel (SP), Paralel-Seri (PS) Paralel- Paralel ( PP) bağlantıdır[17].



Şekil 5. Kompanzasyon topolojileri

### 2.1.1 Seri Seri Topoloji

Bu topoloji primer bobinde, primer gerilimi azaltmaya yardımcı olur ve kullanıcı talebine bağlı olarak sekonder bobin, seri olarak kompanse edilirse, çıkış geriliminin dengelenmesine yardımcı olabilir. Bu yöntemde, kondansatörler primer bobinde seri olarak endüktansa ve sekonder bobinde aynı bağlantıya bağlanır[19]. Şekil 5.a’da gösterildiği gibi bu topoloji, çoğunlukla kararlı bir gerilim gerektiren ve çoğunlukla benzersiz frekans nedeniyle tüketiciler tarafından tercih edilmektedir.

Seri - seri topoloji bir "akım kaynağı" gibi çalışır. Frekans yüksek ve yük direnci yeterince düşük olduğu sürece sabit bir çıkış akımı verir. Denklem (1) ile hesaplanır.

$$I_{Load} = \frac{1}{\omega_0 M} V_1 \quad (1)$$

### 2.1.2 Seri Paralel Topoloji

Bu topoloji, Şekil 5.b’de gösterildiği gibi Seri-Serisi topolojisinin primer bobini olarak tipik bir yapıya ve kompanzasyona sahiptir. Sekonder bobinde ise kapasitör paralel olarak bağlanır ve böylece kararlı bir akım çıkışı sağlar[19,20]. Bu kompanzasyonlar, araç sistemleri gibi çoklu yüklerle sahip sistemler için tasarlanmıştır.

Çıkış geriliminin genliği yaklaşık olarak denklem (2) ile hesaplanabilir.

$$V_{yük} = \frac{L_s}{M} V_1 \quad (2)$$

### 2.1.3 Paralel Seri Topoloji

Bu yapılandırma, kapasitörlerin primer bobinde paralel bağlanırken sekonder ise seri şekilde

bağlanır. Burada sistem bir gerilim kaynağı görevi görür, ancak çıkış gücü primerdeki paralel bağlantı nedeniyle azalacaktır[20]. Birincildeki paralel kapasitör akımı düşürür, böylece Şekil 5.c'de gösterildiği gibi manyetik alan gücünü azaltır. Çıkış geriliminin genliği yaklaşık olarak denklem (3) ile hesaplanabilir.

$$V_{yük} = \frac{M}{L_p} V_1 \quad (3)$$

#### 2.1.4 Paralel Paralel Topoloji

Şekil 5.d'de gösterildiği gibi kapasitörler hem primer hem de sekonder bobinlere paralel bağlanmıştır. Bu bağlantıda düşük bir verimlilikle çok zayıf bir performans elde edilmektedir. Bu nedenle daha az sıklıkla kullanılır

Her iki kapasitör de aynı değerlere sahiptir. Paralel-Paralel topoloji bir "akım kaynağı" gibi davranır ve sabit bir çıkış akımı üretir. Çıkış akımının genliği aşağıdaki denklem(4) ile yaklaşık olarak bulunabilir[20].

$$I_{yük} = \frac{1}{\omega_0(L_p L_s - M^2)} V_1 \quad (4)$$

**Çizelge2.** Kompanzasyon topolojisinde kondansatör (C) ve kalite katsayısı(Q) hesabı[21].

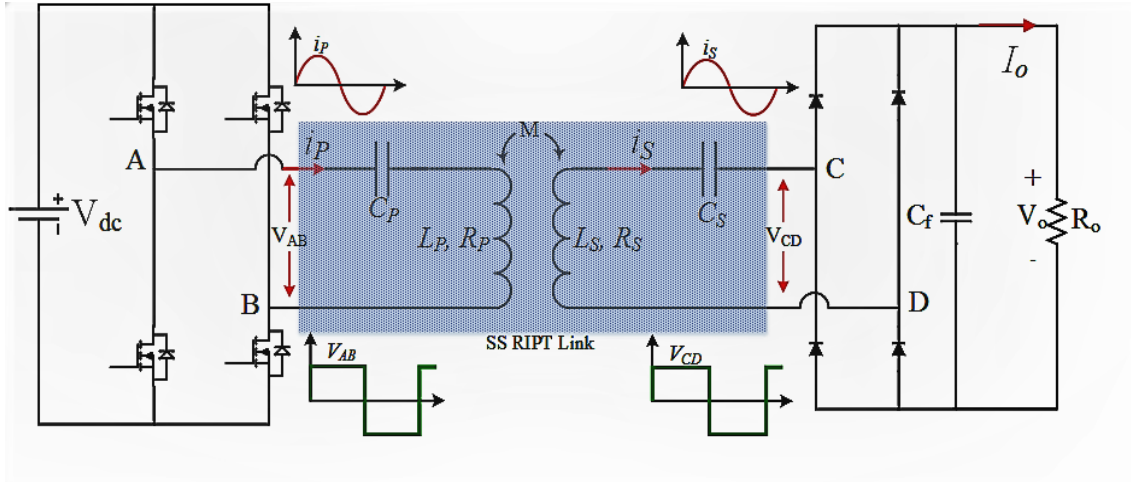
Topoloji	Primer Kapasitans, $C_p$	Sekonder Kapasitans, $C_s$	Primer Kalite Katsayısı, $Q_p$	Sekonder Kalite Katsayısı, $Q_s$
Seri-Seri	$\frac{1}{\omega_0^2 L_p}$	$\frac{1}{\omega_0^2 L_s}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_0 M^2}$	$\frac{\omega_0 L_s}{R_L}$
Seri-Paralel	$\frac{1}{\omega_0^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	$\frac{1}{\omega_0^2 L_s}$	$\frac{\omega_0 L_p L_s^2}{M^2 R_L}$	$\frac{R_L}{\omega_0 L_s}$
Paralel-Seri	$\frac{1}{\omega_0^2 L_p}$	$\frac{1}{\omega_0^2 \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} \right)}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_0 M^2}$	$\frac{\omega_0 L_s}{R_L}$
Paralel-Paralel	$\frac{1}{\omega_0^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	$\frac{1}{\omega_0^2 \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} \right)}$	$\frac{\omega_0 L_p L_s^2}{R_L M^2}$	$\frac{R_L}{\omega_0 L_s}$

Seri-Seri topoloji seçeneği yük ve manyetik bağlantı ne olursa olsun sadece öz endüktansına bağlı olarak kompanzasyon kapasitanslarının seçilmesine izin verir. Bu nedenle, bobin arasında yanlış hizalamalar olması durumunda, karşılıklı endüktans değişikliklerine rağmen sistem rezonans altında çalışmaya devam eder. Bundan dolayı, Seri-Seri topolojisi EA pil şarjı için uygun hale gelmektedir[21]. Bir Seri-Seri rezonans endüktif bağlantı teorik olarak verimlilik, bileşen sayısı, kontrolün karmaşıklığının azlığı ve maliyet açısından en iyisidir ve bu nedenle hazırlanan bu çalışmada Seri-Seri endüktif bağlantılı devrenin üzerinde benzetim çalışması yapılmıştır.

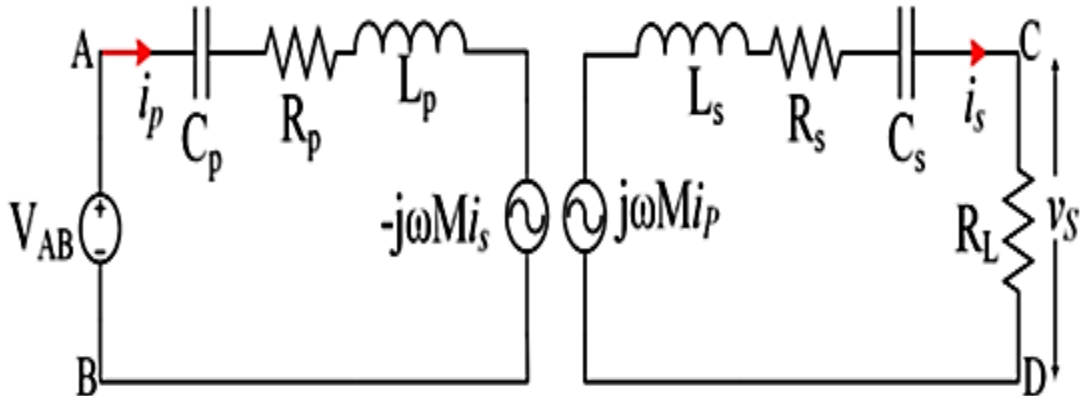
### 3. Örnek Bir Kablosuz Güç Transfer Sisteminin Benzetim Programı İle Çalıştırılıp İncelenmesi

Şekil 6'da bir seri-serisi kompanze edilmiş rezonant endüktif güç transfer sisteminin eşdeğer devresi gösterilmektedir. Seri-serisi kompanze edilmiş rezonant endüktif güç transfer bağlantısının primer tarafı, doğru gerilimi  $V_{DC}$ 'yi yüksek frekanslı Alternatif gerilime  $V_{AB}$ 'ye dönüştüren gerilim kaynaklı tam köprü eviriciden beslenir. Sekonder tarafta, kapasitif filtrelili  $C_f$  bir doğrultucu, yüksek frekanslı gerilimi yükün  $R_o$  gerektirdiği doğru gerilim  $V_o$  ve doğruakım  $I_o$ 'ya dönüştürür. Seri-Seri topolojisi, ideal rezonans koşulunda primer gerilim kaynağından beslendiğinde bir akım kaynağı görevi görür. Bu nedenle basit bir kapasitif filtre yeterlidir. Tam köprü evirici, sonsuz sayıda harmonik içeren bir kare dalga gerilimi  $V_{AB}$  üretir.

Bununla birlikte, Seri-Seri endüktif güç aktarım bağlantısı, primer besleyen güç elektroniği dönüştürücüsünden üretilen istenmeyen frekans bileşenlerini bloke eden bir bant geçiş filtresi görevi görür. Bu nedenle, endüktif güç aktarım bağlantısından geçen akım neredeyse sinüzoidaldir. Bu, Seri-Seri-endüktif güç aktarım bağlantısının parametrelerini hesaplamak için birinci harmonik yaklaşım yönteminin kullanılmasına izin verir[22].



Şekil 6. Seri-Seri kompanze edilmiş rezonant endüktif güç transferi sisteminin eşdeğer devresi[11]

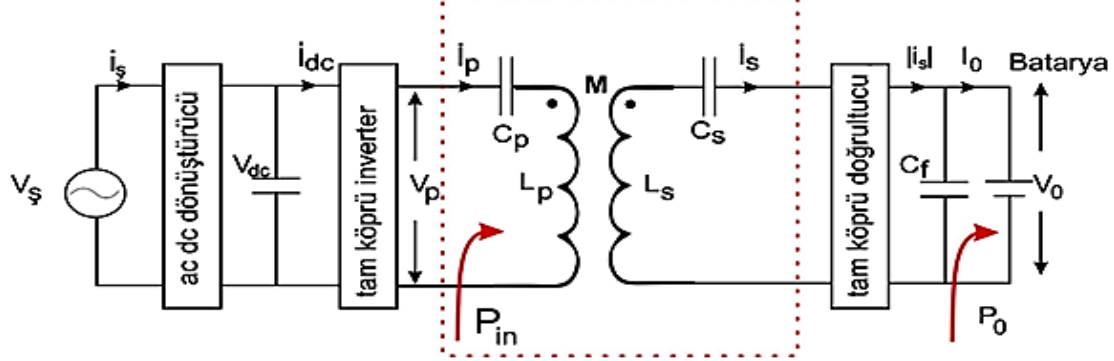


Şekil 7. Seri-Seri endüktif güç aktarım devresinin basitleştirilmiş eşdeğer modeli[11]



### 3.1 Elektriksel Parametrelerin Hesaplanmasında

Şekil 8’de SS-endüktif güç aktarım tabanlı bir kablosuz şarj cihazının blok şemasını ve bileşenlerini gösterilmektedir. Amaç, belirli bir yük (batarya) için SS-endüktif güç aktarım bağlantısının (kırmızı noktalı kutuda gösterilen) parametrelerini hesaplamaktır.



Şekil 8.SS-endüktif güç aktarım tabanlı bir kablosuz şarj cihazının blok şeması[11]

SS-endüktif güç aktarım bağlantısının parametrelerinin hesaplanmasını basitleştirmek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır[11].

- (1) SS-endüktif güç aktarım bağlantısının verimliliğinin% 100 olduğu varsayılır. Bu varsayım, bağlantı tasarımından önce bobin direncinin değeri bilinmediğinden ve bu nedenle ihmal edilebilir olduğu varsayıldığından geçerlidir.
- (2) Yalnızca giriş gerilimi  $V_p$ 'nin temel bileşeni (ilk harmonik) ve SS-endüktif güç aktarım bağlantısının çıkış gerilimi dikkate alınır ve yüksek dereceli harmonikler ihmal edilir. Diğer bir deyişle, sinüzoidal olarak değişen primer ve sekonder akımlar elde etmek için primer ve sekonder devrenin kalite faktörünün yüksek olduğu kabul edilir.
- (3) Tüm anahtarlama elemanları, sıfır komütasyon süresi (anında açma ve kapama) ve sıfır ile ideal kabul edilir. Diğer bir deyişle, tüm dönüştürücülerin% 100 verimli olduğu varsayılır.
- (4) SS-endüktif güç aktarım bağlantısına giriş geriliminin büyüklüğü, yani  $V_p$ , şebeke (besleme) gerilim büyüklüğü  $V_s$ 'ye eşit kabul edilir. Bu varsayım, şebeke beslemesi ile tam köprü evirici arasında genellikle bir güç faktörü düzeltme aşaması olduğu için geçerlidir. Bu aşamada,  $V_p$ 'yi şebeke gerilimine eşit verecek şekilde tam köprü evircininin DA bağlantı gerilimi,  $V_{DC}$ 'yi ayarlayabilir.
- (5) Primer ve sekonder tarafta ideal rezonans varsayılır. İstenen çıkış gücünün  $P_o$  olmasına izin verin. Yük bir pil paketi olduğundan, pil takımının üreticisi tarafından tanımlandığı gibi şarj gerilimi bilinir.  $V_o$ , nominal şarj gerilimi veya çıkış gerilimi ifade edecek olursa. DA direnci (akü direnci)  $R_o$  denklem(5) ile hesaplanabilir

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (5)$$

Bir diyotlu doğrultucu ve kapasitif bir çıkış filtresi ile bir DA direnç yükünün Alternatif Akım eşdeğeri denklem (6) ile verilebilir. Bu, SS-endüktif güç aktarım bağlantısının sekonder tarafından görülen direncin değeridir[11].

$$R_O = \frac{8 V_O^2}{\pi^2 P_O} \quad (6)$$

Sekonder gerilim  $V_S$ , kapasitif çıkış filtresi nedeniyle bir kare dalgadır.  $V_S$  temel bileşenin RMS değeri denklem (7) ile verilebilir. Sekonder akım  $i_S$ , 'nin RMS değeri denklem (8) ile hesaplanabilir.

$$V_{Srms} = \frac{2\sqrt{2}V_O}{\pi} \quad (7)$$

$$I_{Srms} = \frac{V_{Srms}}{R_L} \quad (8)$$

1. Varsayımdan,  $P_O$  değeri  $P_{in}$ 'e eşittir.  $V_p$ 'nin şebeke gerilimi  $V_S$ 'ye eşit olduğu varsayıldığından, primer akımın RMS değeri denklem (9) ile verilebilir:

$$I_{Prms} = \frac{P_{in}}{V_{Prms}} \quad (9)$$

Primer ve sekonder akımın değeri bilindiğinde, istenen çıkış gücü miktarı için karşılıklı endüktans değeri, SS-endüktif güç aktarım bağlantısının sekonder tarafında Kirchhoff'un gerilimler kanunu denklemi uygulanarak türetilebilir. Şekil 8'den, rezonans frekansında,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}}$  aşağıdaki denklem (10) yazılabilir:

$$|j\omega_0 M i_P| = R_L |i_S| \quad (10)$$

Sekonder endüktans, sekonder kalite faktörü  $Q_S$ 'den hesaplanır. Daha önce değinildiği gibi, daha yüksek bir değer sistemin ayarını zorlaştırabileceğinden ve daha düşük bir akım ve gerilim dalga formunda harmonikler oluşturacağından,  $Q_S$ 'nin değeri 2 ila 10 arasında seçilmelidir. Denklem (11) gerekli sekonder endüktans değerini verir.

$$L_S = \frac{Q_S R_L}{\omega_0} \quad (11)$$

Birleştirme katsayısı  $k$  değeri denklem (12)'den hesap edilebilir.

$$k < \frac{1}{Q_S} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_S^2}} \quad (12)$$

Denklem (12), primer ve sekonder bobinler arasındaki minimum hava boşluğu hesap edilebilir. Aynı zamanda, sistemin çatallanma moduna girmesine izin verecek olan ve bu nedenle mümkün olduğu kadar yüksek bir bağlantı katsayısına sahip olmanın iyi bir tasarım uygulaması olmadığını ve bundan kaçınılması gereken bir bağlantı katsayısının maksimum bir değeri olduğunu ifade etmektedir. Bu SS-endüktif güç aktarım sistemi gibi gevşek bağlanmış bir sistem ile mümkün olduğunca yüksek bir kuplaja sahip olmanın istenildiği güç transformatörleri gibi yakından bağlanmış bir sistem arasındaki önemli bir farktır [11].  $k$  değerine karar verildikten sonra, primer endüktans değeri denklem (13) kullanılarak hesaplanabilir.

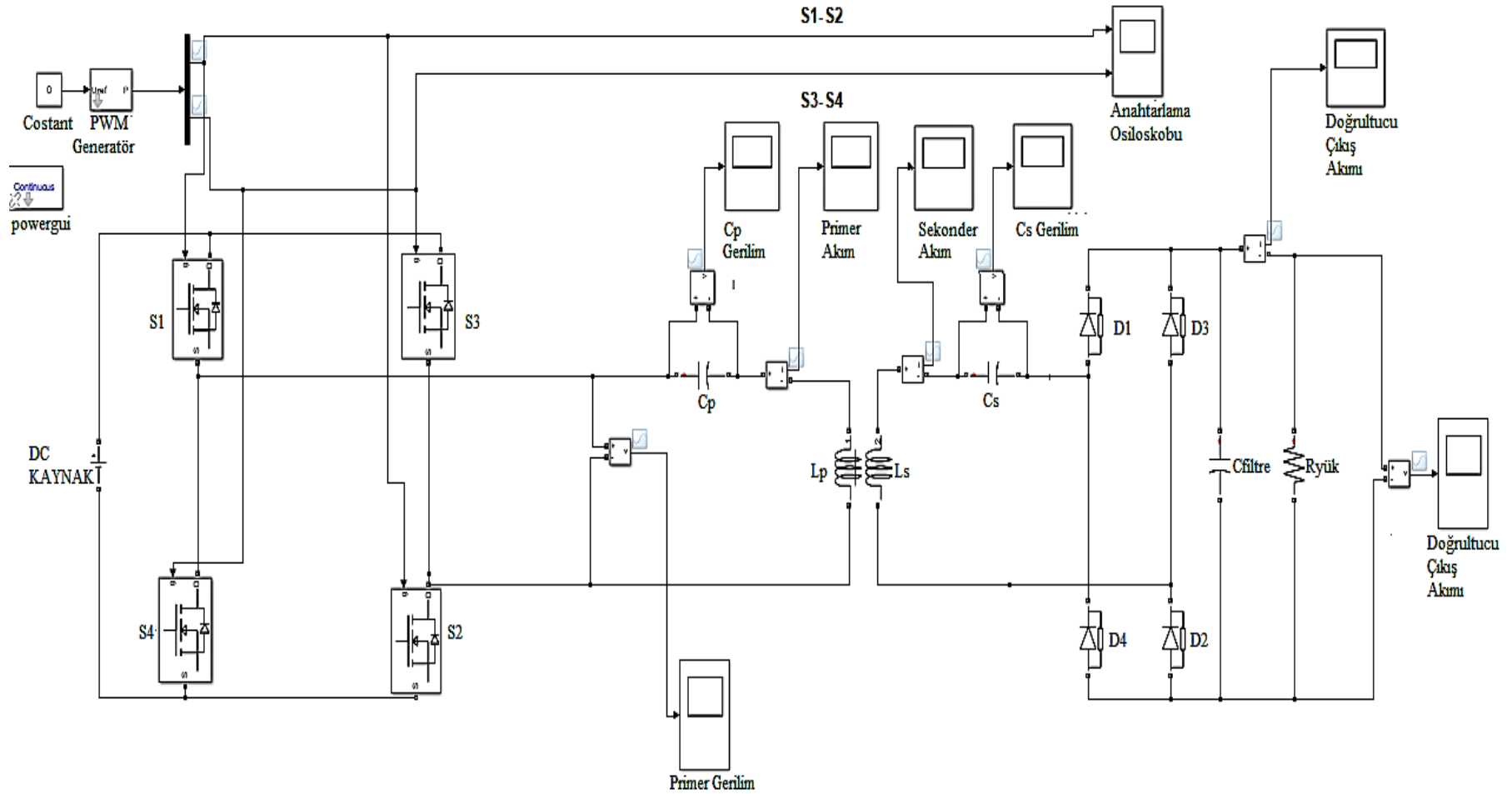
$$L_P = \frac{M^2}{L_S k^2} \quad (13)$$

### 3.1.1 Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması yapılan devrenin Matlab/Simulink Programında Çizimi

Elektrik parametreleri, belirlenen şarj gerilimi için hesaplanır. 16 cm uzaklıktan 240 volt giriş gerilimi ile 168 V çıkış gerilimi ( $V_o$ ) elde etmek için 3,6 kW'lık bir şarj cihazı SAE J1772 şarj standartlarına göre AA seviye 2 şarj cihazı kategorisine girmektedir. Temel cihazın RMS değeri primer geriliminin  $V_p$  bileşeninin 240 V olduğu varsayılır. 40 kHz'lik bir rezonans frekansı ve Sekonder kalite faktörü 4'e eşit  $Q_s$  kabul edilir. Ayrıca benzetim çalışmasının ideal şartlarda yapıldığı kabul edilerek  $R_p$  ve  $R_s$  değerleri de 0 olarak kabul edilmiştir. Benzetimi yapılan devrenin teknik özellikleri ve matematiksel hesaplamaları Çizelge 3 'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Benzetimi yapılan devrenin verilen/hesaplan ve benzetim ölçüm değerleri

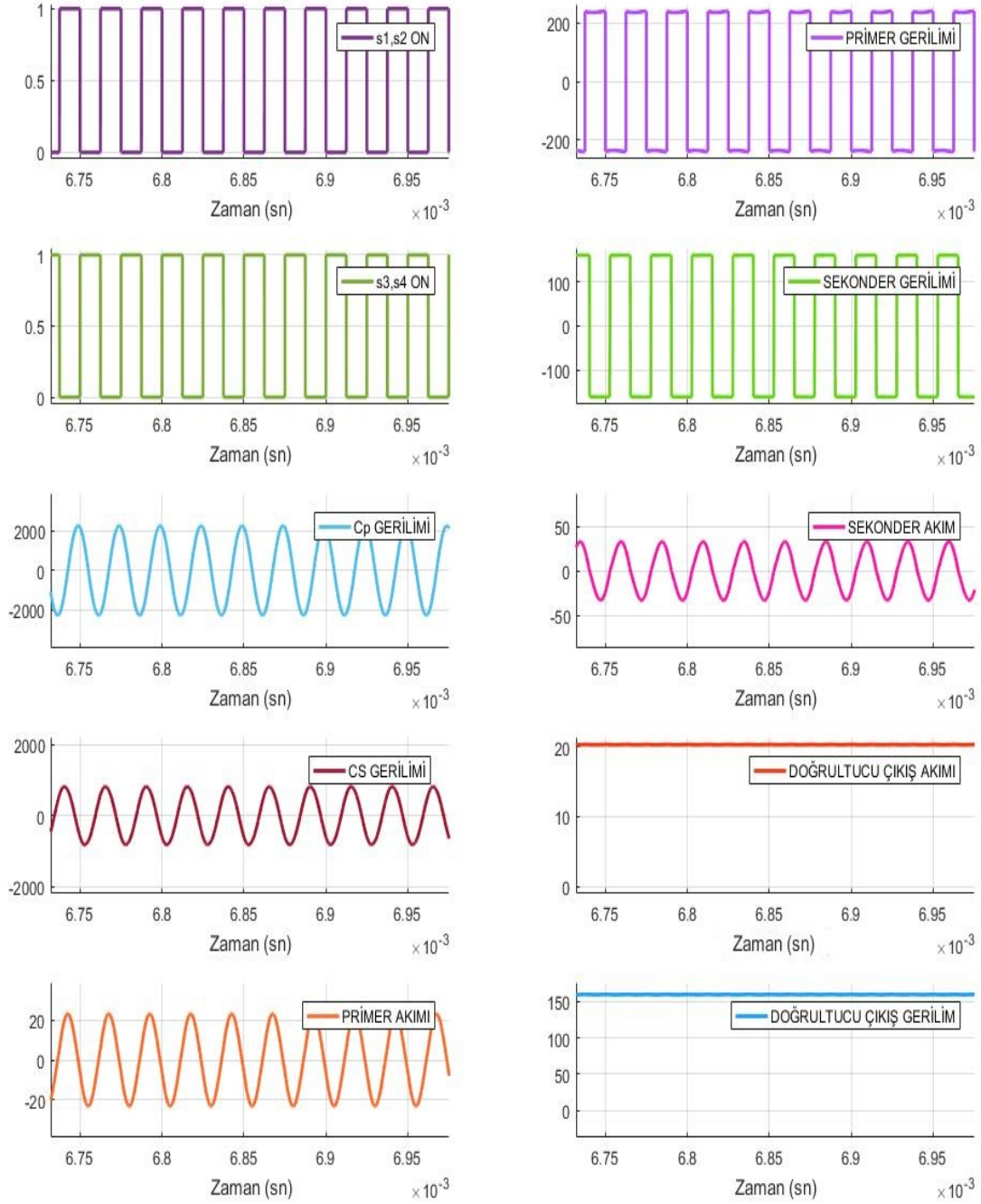
Parametreler	Verilen/Hesaplanan Değerler	Benzetim Sonuçlarından Elde Edilen Değerler
$V_o$	168 V	159.7 V
$I_o$	21 A	20.37 A
$V_{Prms}$	240 V	237.74 V
$I_{Prms}$	15 A	16.40 A
$V_{Srms}$	151 V	159.5 V
$I_{srms}$	23 A	19.63 A
$R_o$	7.84 $\Omega$	
$L_p$	354.01 $\mu$ H	
$L_s$	85.370 $\mu$ H	
$M$	40.12 $\mu$ H	
$C_p$	39.72 $\times 10^{-3}$ $\mu$ F	
$C_s$	156.65 $\times 10^{-3}$ $\mu$ F	
$R_r$	14.228 ohm	
$K$	0.2	
$f$	40kHz	
$h$	16cm	
$N_p$	40 spir	
$N_s$	12spir	
$D_{pout}$	470mm	
$D_{pin}$	95mm	
$D_{sout}$	470mm	
$D_{sin}$	356mm	



Şekil 10. Matlab/Simulink programında benzetimi yapılan devre

#### 4. Sistemin Benzetim Çalışmasının İncelenmesi

Benzetim sonucu elde edilen sonuçlar ile matematiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzetim ve hesaplanan değerler için elde edilen sonuçlar Şekil 11'de grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 11. Benzetim yapılan devrenin benzetim grafikleri

Matlab/Simulinkte yapılan devrenin çizimi Şekil 10'da gösterilmiş olup devre de anahtarlama elemanları olarak MOSFET kullanılmıştır. Anahtarlama elemanlarının frekans değeri ve kontrolü PWM genaratörü ile sağlanmıştır. Devreden istenilen güç 3600W olup devre parametreleri ve değerleri ona göre hesaplanarak seçilmiştir. Sistem topolojisi olarak Seri-Seri devre topolojisi seçilerek devre benzetimi yapılmıştır.

Kablosuz güç transferi tekniği, özellikle elektrikli araçlar olmak üzere çeşitli sistemlerde uygulama bulur. Benzetim yapılan devre topolojisi elektrikli araçlar için en sık kullanılan Seri-Seri topoloji endüktif güç transferi kullanılmıştır. Şebeke geriliminden sonra oluşan 240V doğrultulmuş gerilimi yüksek frekanslı AA akıma dönüştürmek için tam köprü MOSFET ile tasarlanmış evirici devresi kullanılmıştır. Mosfetlerin tetiklenmeleri için PWM sinyalleri kullanılmış ve tetikleme periyotları %50 olarak ayarlanmıştır. Bu makale çalışmasında, 40 kHz çalışma frekansında, karşılıklı iki bobin arasındaki 16 cm hava aralığı ve kaynaktan çekilen güç 3600 W iken yüke aktarılan güç yaklaşık 3253 W olarak benzetim programından elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre elde edilen verim yaklaşık olarak %91 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistem tasarımın geliştirilmesi, dört bobinli sistem veya klasik topolojilerden türetilmiş kompanzasyon yapılarıyla mümkün olup genel olarak verimin artmasını sağlayacaktır. Genel olarak güç ve verimlilik açısından devrenin tüm performansı, topolojilerin sekonder tarafındaki kompanzasyon devresi ile belirlenir. Dolayısıyla, Seri-Seri, Seri-Paralel, Paralel-Seri ve Paralel-Paralel sırasına göre verimliliğin düştüğünü deneysel ve teorik olarak bilinmektedir. Yüksek güç çıkışı nedeniyle şarj edilecek bir araba tercihen SS kompanzasyon veya SP kullanılarak şarj edilmektedir. Küçük güçlü cihazlarda ise genellikle Paralel-Paralel veya Paralel-Seri topolojiler tercih edilmektedir. Hazırlan bu çalışmada elektrikli araçlarda sabit bir güç sağlamak ve güç transferi verimliliği maksimum seviyede olması hedeflendiği için SS endüktif güç aktarım topolojisinden yararlanılmıştır.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Endüktif güç transfer teknolojisi, elektrik gücünü kablosuz olarak aktarmak için verimli ve güvenilir bir yol sağlar. Endüktif Güç Transfer ile ilgili mevcut araştırma, öncelikle akım kaynağı teknolojisinin çok sınırlı ilgi gördüğü gerilim kaynağı evirici teknolojisine odaklanmaktadır. Bu çalışma da kompanzasyon ağlarına ve mevcut endüktif güç transfer sistemlerinin de kullanılan dönüştürücü topolojilerine kapsamlı bir genel bakış sağlar.

Kablosuz güç transferi gevşek bağlaşımlı sargılar üzerinden gerçekleştirildiğinden güç aktarım veriminin düşük olması beklenir. Verim, kompanzasyon topolojileri kullanılarak artırılmalıdır. Endüktif Güç Transfer sistemlerinde güç, sistemde bulunan bobinler arasında aktarılır. Endüktif güç transferinde bobinler transformatörler gibi aynı çekirdek etrafında olmayıp bobinler arasında sistemi gevşek bağlı hale getiren bir mesafe vardır. Gücün verimli bir şekilde aktarılabilmesi için rezonans kavramı kullanılmaktadır. Dört klasik topoloji vardır ve ayrıca bu topolojilerden türetilmiş LCL topolojisi gibi yeni önerilenler topolojilerde vardır. Pil şarj uygulamaları için yeterli olan seri serisi kompanzasyon topolojisini kullanır. Seri-Seri topolojide elde edilen sonuçlar, kapasitör gerilimlerinin çok fazla bir şekilde arttığını ve bunun için özel kapasitörler gerektirdiğini göstermektedir. Bu nedenle, klasik Seri-Seri topoloji yerine LCL topolojisinin kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] N.Tesla, "System of transmission of electrical energy," ,03.20.1900.  
<https://www.google.com/patents/US645576>. Erişim Tarihi (20.09.2020)

- [2] Diab, İ. (2019) “Design Of A Modular Primary For A Wireless Power Transfer System” Master Of Science Thesis Delft University Of Technology Department Of Dc Systems, Energy Conversion, And Storage 2019 M.A.
- [3] M.A. Rodriguez-Otero and E. O’Neill-Carrillo. “Efficient Home Appliances for a Future DC Residence”. In: Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE. Nov. 2008, pp. 1–6.
- [4] Stieneker, Marco, and Rik W. De Doncker.(2016) "Medium-voltage DC distribution grids in urban areas." 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG).
- [5] Notaroš, B. M.(2011) Electromagnetics. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education
- [6] Bhutkar R., Sapre S. (2009). Wireless Energy Transfer Using Magnetic Resonance. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dubai, 28-30 December, 512-515.
- [7] Li, S., Liu, Z. Zhao, H. Zhu, L. Chen, Z. (2016) “Wireless Power Transfer by Electric Field Resonance and Its Application in Dynamic Charging,” IEEE Trans. Ind. Electron., Sayı. 63, no. 10, sayfa. 6602-6612.
- [8] Lu, F.(2017) “High Power Capacitive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications “Doctor of Philosophy (Electrical Engineering: Systems) in The University of Michigan
- [9] Kerem A, Gürbak H.(2020) “Elektrikli Araçlar İçin Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri” GU J Sci, Part C, 8(3): 644-661
- [10] Chen, C. Chu, T. , Lin, C. , Jou, Z (2010) “A Study of Loosely Coupled Coils for Wireless Power Transfer,” IEEE Trans.on Circuits and Systems-II: Express Briefs, Sayı. 57, no. 7, sayfa. 536-540
- [11] Aditya, K.(2016) “Design And Implementation Of An Inductive Power Transfer System For Wireless Charging Of Future Electric Transportation” University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Ontario, Canada
- [12] Cheng, D. K. (1986) “Field and Wave Electromagnetics,” IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, vol. 28, no. 2. pp. 27–28.
- [13] Panchal, C., Stegen, S., Lu, J.(2018) Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 21, Issue 5, 2018, Pages 922-937, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- [14] Qu, X. Wong, S. C. , Tse , C. K. and Zhang, G. (2014) "Design consideration of a current-source-out put inductive power transfer LED lighting system," in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Pittsburgh, PA, 2014, pp. 3607-3611
- [15] Covic, G. A. and Boys, J. T. (2013) "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 28-41.
- [16] Wu, H. , Gilchrist, A., Sealy, K. D. And Bronson, D.(2012) “A high efficiency 5 kW inductive charger for EV s using dual side control,” IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 8, no. 3, pp. 585–595.
- [17] Sohn, Y. H. , Choi, B. H. Lee, E. S. , Lim, G. C. Cho, G. H. and Rim, C. T. (2015) “General Unified Analyses of Two-Capacitor Inductive Power Transfer Systems: Equivalence of Current-Source SS and SP Compensations,” IEEE Trans. On Power

- Electronics, vol. 30, no. 11, pp. 6030–6045
- [18]Chen, L.,Nagendra, G. R. , Boys, J. T. and Covic, G. A. (2015) "Double-coupled systems for IPT road way applications," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp. 37-49
- [19]Zhang, W. and Mi, C. C. (2016). Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(6), 4768-4778.
- [20]Cho, S. ,Y., Lee, I. O., Moon, S., Moon, G. W., Kim, B. C., &Kim, K. Y. (2013). Series series compensated wireless power transfer at two different resonant frequencies In ECCE Asia Down under (ECCE Asia), 2013 IEEE (pp. 1052-1058). IEEE.
- [21]Pashaei A., Aydın E., Polat. M., Yıldırım E., Aydemir M. T., Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri, Cilt 6, Sayı 11, Syf 1-12, Haziran 2016
- [22]Zheng, C. et al.,(2015) "High-Efficiency Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charging Application," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp. 65-74