



# Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinde kullanılan güç aktarım yöntemlerinin incelenmesi

## Analysis of power transfer methods used in wireless charging of electric vehicles

Ahmet Hamdi Reyhan<sup>1</sup> , Ahmet Doğan<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 38055, Kayseri Türkiye

<sup>2</sup> Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38055, Kayseri Türkiye

### Öz

Kullanımdaki elektrikli araç (EA) sayılarının her geçen gün artması ile birlikte şarj edilmeleri önemli bir problem haline gelmektedir. Günümüzde kurulu şarj istasyonlarının tamamına yakınında EA'lar kablo bağlantısı ile şarj edilmektedir. Kablolü şarj işlemi, uzun şarj süreleri ile birlikte güvenlik açısından da riskler taşımaktadır. Bu nedenle son yıllarda EA'ların kablosuz şarjı ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Diğer taraftan, kablosuz şarj işlemi, EA'ların hareket halinde şarj olabilmelerini ifade eden dinamik şarjın uygulanmasına imkan sağlaması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, EA'ların kablosuz olarak şarj edilebilmesini sağlayan endüktif güç aktarım (EGA), kapasitif güç aktarım (KGA), optik güç aktarım (OGA) ve mikrodalga güç aktarım (MGA) yöntemlerinin temel prensipleri, farklı tasarımları, EA'ların kablosuz şarjı ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak açıklanmıştır. Sonuç olarak, EA'ların kablosuz şarjında kullanılan kablosuz güç aktarım yöntemlerinin avantajları, dezavantajları, fırsatları ve zorlukları karşılaştırmalı olarak kapsamlı bir bakış açısı ile sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Elektrikli araç (EA), Kablosuz şarj, Kablosuz güç aktarımı.

### 1 Giriş

Ulaşım sektörü, sera gazı emisyonlarının yaklaşık %28'ini üreterek hava kirliliğe en çok neden olan sektörlerden biridir [1]. Elektrikli Araçlar (EA)'lar, sera gazı emisyonlarının azaltılarak küresel iklim değişikliğinin önlenmesi ve sürdürülebilir bir ulaşım sektörünün oluşturulmasının temel taşlarından birisidir. Yollardaki EA sayısının her geçen gün artmasıyla beraber, şarj istasyonu sayısının sınırlı olması ve bataryaların yüksek maliyeti EA'ların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerdir [2]. Günümüzde, EA'lar tarafından kullanılan ticari şarj istasyonlarının tamamına yakınında şarj işlemleri kablolu olarak gerçekleştirilmektedir. Kablolü şarj işlemi, uzun şarj süreleri ile birlikte sağlık ve güvenlik riskleri taşımaktadır [3]. Şarj istasyonu kablo bağlantıları, özellikle kötü hava koşullarında tehlike oluşturabilir. Ayrıca, benzin istasyonlarının yakınında ve havaalanları gibi yerlerde EA'ların şarja takılması ve şarjdan çıkarılması sırasında

### Abstract

The number of electric vehicles (EV) in use is increasing day by day. With the increasing number of EVs, their charging is becoming a major problem. Today, EVs are charged by cable connection in almost all installed charging stations. Wired charging brings health and safety risks along with long charging times. For this reason, studies with wireless charging of EVs have been developing rapidly in recent years. Wireless charging of EVs is very important due to it allows the application of dynamic charging, which means charging while moving. In this study, the basic principles of inductive power transfer (IPT), capacitive power transfer (CPT), optical power transfer (OPT) and microwave power transfer (MPT) methods that enable wireless charging of EVs, different topology and structures, wireless charging of EVs has been explained by taking into consideration the studies carried out in recent years regarding the charging of the battery. As a result, a comprehensive perspective on the advantages, disadvantages, opportunities and challenges of wireless power transmission methods is presented.

**Keywords:** Electric vehicle, Wireless charge, Wireless power transfer

elektrik arkı oluşabilir [4]. Bunun yanında, kamuya açık şarj tesisleri vandalizm gibi nedenlerle zarar görebilir [5]. Kablosuz şarj işlemi bu dezavantajların birçoğunu ortadan kaldırırken EA'ların dinamik şarjı için yeni olanaklar sunmaktadır [6].

EA'lar için statik, yarı dinamik ve dinamik olmak üzere üç kablosuz şarj türü tanımlanabilir [7, 8]. Statik şarj, EA'lar park konumundayken gerçekleşir. Kamuya açık otoparklarda veya konutlarda uygulanan şarj yöntemidir. Yarı dinamik şarjda, motoru çalışır durumdaki hareketsiz aracın kısa süreli şarj olması sağlanır. Toplu taşıma araçlarının yolcu duraklarında dururken şarj olması için uygundur. Üçüncü ve en önemli şarj türü ise bir EA'nın hareket halinde iken yol boyunca kablosuz olarak şarj olmasını sağlayan dinamik şarjdır. Bu şarj türünde, yolun belirli bölümlerine, EA'ların hareket halinde şarj işlemini gerçekleştirebilmesi için yola güç transferi vericiler ve güç elektroniği ekipmanları yerleştirilir.

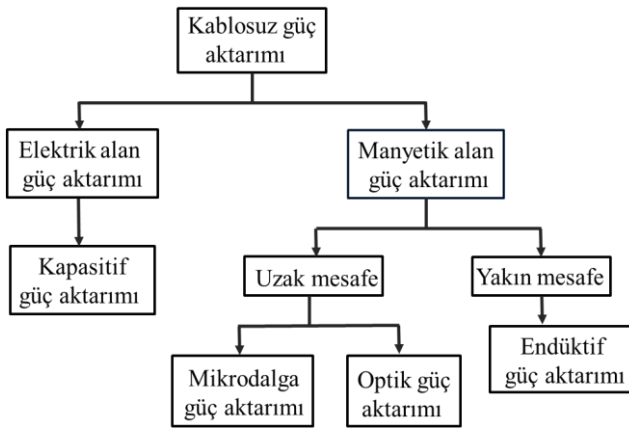
\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: adogan@nyy.edu.tr (A. Doğan)

Geliş / Received: 31.05.2023 Kabul / Accepted: 06.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1307910

EA'ların menzili batarya kapasitesine göre değişmektedir. Batarya kapasitesi arttıkça EA fiyatı da orantılı olarak artmaktadır ve batarya ağırlığından dolayı yakıt ekonomisi de olumsuz etkilenmektedir. Şarj süreleri de EA'lar için bir diğer dezavantajdır. Şarj süresini 30 dakikanın altına indiren hızlı şarj istasyonları daha maliyetli ve karmaşık sistemlerdir. Buna rağmen şarj süreleri klasik fosil yakıtlı araçların yakıt ikmal sürelerinden fazladır [5]. Batarya kapasitesindeki sınırlamalar nedeniyle, EA'lar daha uzun mesafe kat etmek için daha fazla şarj döngüsüne ihtiyaç duyarlar. Dinamik şarj yöntemi, altyapı maliyeti yüksek olmasına rağmen aracın hareket halinde şarj olmasını sağlar. Hareket halinde şarj olabilen araç daha küçük bataryalarla daha uzun yol alabilir. Bu durum, daha ucuz batarya maliyeti ve daha verimli bir sistem sağlar [9].

Kablosuz şarj yöntemleri; endüktif güç aktarımı (EGA), kapasitif güç aktarımı (KGA), optik (lazer) güç aktarımı (OGA) ve mikrodalga güç aktarımı (MGA) gibi farklı iletim ortamına göre çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir [10-12]. Bu yöntemlerin sınıflandırılması Şekil-1'de verilmiştir. Şarj yöntemleri manyetik alan ve elektrik alan temelli olarak ikiye ayrılmaktadır. KGA'da elektrik alan prensibinden faydalanılırken, diğer yöntemlerde manyetik alan temel alınmıştır. Manyetik alanlı yöntemler yakın mesafe ve uzak mesafe olarak kategorize edilir. EGA yakın mesafe kablosuz şarj kategorisinde iken OGA ve MGA uzak mesafe kategorisinde yer almaktadır.



Şekil 1. KGA yöntemlerinin sınıflandırılması

Kullanılacak yöntemin belirlenmesi; şarj gücü, çalışma frekansı, mesafe, elektromanyetik girişim oranı, şarj sisteminin boyutları, güvenlik sorunları ve sistem karmaşıklığı gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulurken yapılır [13, 14].

Bu çalışmada EA'ların kablosuz olarak şarj edilebilmesi için kullanılan farklı güç aktarım yöntemleri incelenmiş olup temel araştırma ve uygulamalardaki en yeni gelişmeler sunulmuştur. EA'ların şarjı için kullanılan teknolojiler farklı açılardan karşılaştırılarak birbirlerine göre üstünlükleri ve dezavantajları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Özellikle, önümüzdeki dönemlerde uygulamaları artacak olan dinamik şarj yöntemi açısından güç aktarım yöntemleri değerlendirilmiştir.

## 2 Endüktif güç aktarımı (EGA)

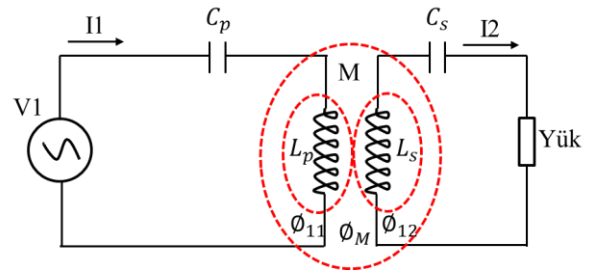
EGA, manyetik akı dağılımı prensibi ile çalışan, geniş güç aralıklarında uygulanabilen ve en olgunlaşmış kablosuz güç aktarım yöntemidir [15]. EGA'da, Amper yasası tarafından tanımlandığı gibi, verici (birincil) bobine zamanla değişen bir akım uygulandığında, bobin etrafında dinamik bir manyetik alan oluşturur. Denklem (1)'de görüldüğü üzere ortaya çıkan manyetik akı, havanın manyetik geçirgenliği, bobin sarım sayısı ve içinden geçen akım ile orantılıdır [5].

$$\sum B_T \Delta l = \mu_0 I N_p \quad (1)$$

Burada  $B_T$ ,  $\Delta l$ ,  $\mu_0$ ,  $I$  ve  $N_p$  sırasıyla manyetik akı yoğunluğunu, iletken uzunluğunu, havanın geçirgenliğini, akımı ve verici bobin sarım sayısını göstermektedir. Zamanla değişen manyetik alan bobinler arasındaki manyetik kuplajdan dolayı alıcı bobinde Faraday yasasına göre ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi gerilim indüklenmesini sağlar.

$$E = -N_s \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

Eşitlikte  $E$  indüklenen gerilimi,  $\Phi_B$  manyetik akıyı ve  $N_s$  ikincil sargıların sarım sayısını ifade etmektedir. Manyetik alan, frekansla orantılı olduğundan yüksek frekanslarda daha güçlü bir manyetik alan oluşması ve gücün daha uzak mesafelere taşınması sağlanabildiği için EGA yüksek frekanslarda gerçekleştirilir [16]. Ayrıca, EA'ların şarj edilebilmesi için oluşturulacak devrenin endüktif yapısı ve büyük hava boşluğu nedeniyle, ikincil bobine kuplajla bağlanacak gerekli manyetik alanı üretmek için yüksek bir akım gerekir. Bu nedenle, birincil dönüştürücünün reaktif gücünü en aza indirmek ve ikincil bobine güç aktarım kapasitesini artırmak için birincil ve ikincil taraf kompanse edilmektedir. EGA, kaynaktan alıcıya güç aktarımını çok çeşitli güç seviyelerinde gerçekleştirebilir [6].



Şekil 2. EGA yönteminin genel yapısı

Şekil 2'de bir EGA yönteminin genel yapısı verilmiştir.  $L_p$  ve  $L_s$  verici ve alıcı bobinler,  $C_p$  ve  $C_s$  kompanse kapasitörleridir.  $M$  karşılıklı endüktansı gösterirken,  $\Phi_{11}$  ve  $\Phi_{12}$  sırasıyla birincil ve ikincil taraflar için kaçak akıyı ifade etmektedir. Sistemin kuplaj katsayısı ( $k$ ) Denklem (3)'de verilmiştir.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (3)$$

EGA sistemleri, bobinler arasındaki mesafenin yakın ve uzak olmasına göre iki ana gruba ayrılır. Gevşek kuplajlı sistemlerde bobinler arası mesafenin fazla olmasından dolayı kaçak akı miktarı fazladır. Özellikle, EA şarj uygulamaları bu grupta değerlendirilmektedir [7]. Orta ve düşük güçlü EA şarj uygulamaları için gevşek kuplajlı bir EGA sisteminin bağlantı katsayısı değeri 0.1 ila 0.3 arasında değiştiğinden, sistemi rezonansa çalıştırmak için kompanzasyon kapasitörleri eklenerek, yüksek verimli ve yanlış hizalamaya daha toleranslı bir alıcı bobin elde edilebilir. Seri RLC devresi için rezonans frekansı Denklem (4) ve (5)'de gösterilmektedir.

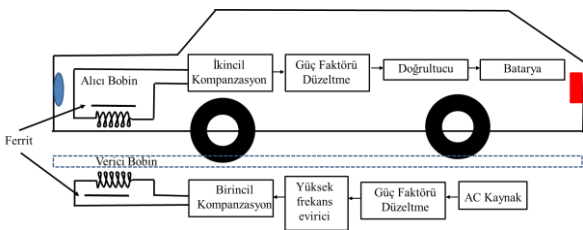
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Burada  $f_0$ , verici veya alıcı bobinlerin rezonans frekansdır ve  $L$  ve  $C$  sırasıyla bobinlerin öz endüktans ve rezonans kapasitör değerleridir. Verici ve alıcı bobinlerin rezonans frekansları eşleştiği durumlarda verimli güç aktarımı mümkündür. Bobinlerin kuplaj performansı, kuplaj katsayısına ( $k$ ), kalite faktörüne ( $Q$ ) ve yanlış hizalama toleransına bağlıdır.  $Q$ , Denklem (6) kullanılarak hesaplanabilir.  $L$ , verici ve alıcı bobinin öz endüktansı,  $R$  bobinlerin direnci ve  $f$  ise  $L$ 'nin frekansdır. [6].

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (6)$$

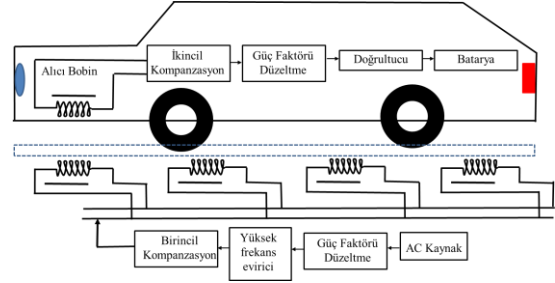
EA'lar için statik EGA temel blok diyagramı Şekil 3'de gösterilmektedir. AC güç kaynağından beslenen sistemde, doğrultucunun çıkışı DC gerilimdir ve zamanla değişen bir manyetik alan oluşturmak için AC gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Çıkışında evirici kullanılarak yüksek frekanslı AC çıkış elde edilir. Verici bobinden akan akım, zamanla değişen bir manyetik alan oluşturur ve bu da alıcı bobinde bir gerilim indüklenmesini sağlar. Elde edilen gerilim, doğrultucu yardımıyla doğrultulur ve akım sistemin çıkışına bağlı olan bataryayı şarj eder [17].



Şekil 3. Statik EGA şarj yapısı

Araç hareket halindeyken şarj etme yöntemi olan dinamik şarj, araçların maliyetini ve ağırlığını azaltır. Dinamik şarj, statik şarja göre daha az batarya boyutu gerektirir veya aynı boyuttaki batarya ile araç menzilin artırır [18]. Aracın hareket halinde olması, ihtiyaç duyulan yüksek güç dönüştürme sistemi için vericiler ve alıcılar

arasındaki etkileşimin kısa süreli olmasını sağlar. Ayrıca, yanlış hizalama toleransı yüksek olmalıdır. Şekil 4'de gösterildiği gibi, dinamik şarjda bobinler küçük parçalar veya uzun yol serileri halinde düzenlenebilir.



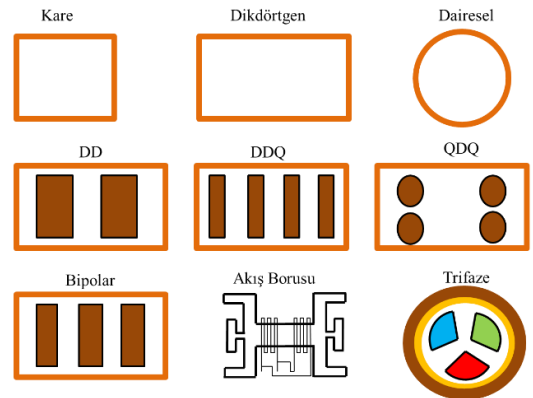
Şekil 4. Dinamik EGA şarj yapısı

Güç aktarma mesafesi, sistemin gücü, endüktans ve kalite faktörü gibi bağlantı parametreleri, frekans, bobin tasarımı, kompanzasyon topolojisi ve hizalama gibi faktörlerin sistemin performansı üzerinde dolaylı veya doğrudan etkileri vardır [18]. Etkili güç aktarımı için verimliliği etkileyen bu faktörler optimize edilmelidir.

### 2.1 EGA bobin yapıları

EGA'da kullanılan kuplaj pedleri, Şekil 5'de gösterildiği gibi farklı şekillerde bobin yapıları, manyetik akıyı eşit şekilde dağıtmak için ferromanyetik bir çekirdek ve manyetik alana maruz kalma düzeyini azaltmak için manyetik korumadan oluşur [6].

Güç aktarma mesafesi, güç değeri, endüktans ve kalite faktörü gibi bağlantı parametreleri, uygun havalandırma, yanlış hizalama toleransı, maliyet, bobin yapısının tasarlanmasında belirleyici faktörlerdir [19, 20]. Şekil-5'de farklı bobin tasarımları gösterilmektedir.



Şekil 5. Kuplaj pedlerinde kullanılan farklı bobin yapıları

Kuplaj pedleri, polarize pedler ve polarize olmayan pedler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Polarize pedler, akımın dikey ve paralel bileşenlerini oluşturmak için çoklu bobinlerden oluşturulur. Buna karşılık, polarize olmayan pedler, akımın yalnızca dikey bileşenlerini üretmek için tek bobin şeklinden yapılıdır [21, 22].

Polarize olmayan pedler, dairesel, kare, dikdörtgen ve altıgen gibi geleneksel şekilli bobinlerdir. Dairesel bobinler,

statik kablosuz güç aktarımı için uygundur. Keskin kenarlarının olmaması nedeniyle düşük kaçak akıya, kompakt ve esnek tasarıma ve düşük girdap akımına sahiptir fakat daha az hizalama toleransı sağlar [23]. Kare ve dikdörtgen şekilli bobinlerin, keskin köşe kenarları girdap akımı oluşturup empedansı artırdığı için endüktansı artırılır. Bu durum, yüksek güçlü uygulamalar için dezavantajdır. Dikdörtgen şekilli bobinler, dairesel ve kare bobinlere kıyasla daha fazla yanlış hizalama toleransı gösterirler. Bununla birlikte, altıgen bobin şekilleri, verici ve alıcı bobinlerin merkezi konumunda maksimum güç aktarım verimliliği sunar [24].

Polarize olmayan pedlerin yanlış hizalamadaki düşük performans nedeniyle, çeşitli şekillerde polarize pedler sunulmuştur [25]. Akış borusu bobini, yüksek k değerini ve hizalama toleransına sahiptir. DD bobinler, kenarda minimum sızıntı akıları ile yalnızca bir yönde akı oluşturan iki kare veya dikdörtgen bobinden oluşturulur. DD bobinin üstünlükleri, gelişmiş kalite faktörü, daha yüksek yanlış hizalama toleransı, düşük alüminyum ekranlama kaybı, daha yüksek bağlantı katsayısı ve düşük akı sızıntısıdır [26].

DD bobinine bir Q bobini eklenerek oluşan DDQ bobini, hizalama probleminde performans artış sağlamaktadır. DDQ pedlerde trifaze sistem kullanılması güç aktarım yoğunluğunu artırır, üniform akış sağlar ve iletim mesafesini artırır [5]. DDQ bobininde bakır kullanımını azaltmak için bipolar ped yapısı sunulmuştur. Bipolar bobinin maliyeti ve karmaşıklığı yüksektir [27]. QDQ pedleri, önemli ölçüde daha yüksek bir bağlantı katsayısı ve yanlış hizalama toleransı sunar [15]. Sistemin performansı, farklı yapılarla sahip, yani W, I, E, U, S, vb. şekillerde ferromanyetik malzeme ile iyileştirilebilir.

## 2.2 EGA elektromanyetik koruma

EGA yönteminde yüksek güçlü kablosuz şarj işleminin frekans seviyesi 20 kHz-200 kHz arasındadır ve sistem çevresinde yüksek seviyede manyetik alanlar oluşur. Bu nedenle, yüksek frekanslı bir güç aktarım sisteminde uluslararası standartlar tarafından bildirilen güvenlik limitleri aşılabılır ve yüksek oranda manyetik alana maruz kalınabilir. EA şarj yapısının tasarımı, kaçak manyetik alanı izin verilen seviyelere indirmek için uluslararası standartlarla uyumlu olmalıdır. Bu nedenle kablosuz şarj sistemlerinde pasif koruma, aktif koruma ve reaktif koruma gibi farklı manyetik koruma çeşitleri kullanılır [5].

Pasif korumada, manyetik kalkan, pede takılan ferrit (manyetik çekirdek) ile sağlanır. Ferrit sistem kullanımında performans artarken ağırlık ve maliyet de artar. İletken pasif korumada, alüminyum levha manyetik alana yerleştirilerek girdap akımları indüklenir ve girdap akımları tarafından yeni bir manyetik alan üretilir. Bu, sistemin etrafındaki net alanın azaltılmasına yardımcı olur. Bu yöntemin dezavantajları, metalik plaka üzerinde büyük manyetik alan kaybı oluşması ve girdap akımlarının kontrol edilememesidir [28]. Alüminyum, uygun maliyeti ve bulunabilirliği nedeniyle uygulamalarda pasif koruyucu malzeme olarak kullanılır. Geleneksel pasif koruma kullanarak yüksek güç uygulamalarında kaçak elektromanyetik alanı yönetmek zordur. Aktif korumada, sızıntı alanını en aza indirmek için

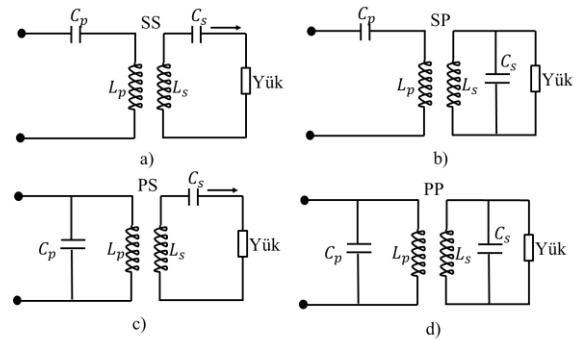
kuplör tarafından oluşturulan orijinal manyetik alana ters yönde bir manyetik alan oluşturmak için ters yönde koruyucu bobinler sarılır. Bu koruma yöntemi için ekstra güç kaynağı gerekmektedir [29]. Reaktif korumada ise farklı sayıda kapasitörlü bobinler kullanılmaktadır [30].

Yüksek frekans değerleri akımın iletken kesitinden değil yüzeyden akmasına neden olur ve bu durum deri etkisi olarak tanımlanır. Özellikle frekans değerleri yüksek olan çalışmalarda bobin olarak litz tel kullanımı tercih edilmektedir. Böylece akımın iletken kesiti boyunca eşit dağılımı sağlanmakta ve deri etkisi azaltılabilmektedir [31].

## 2.3 EGA kompanzasyon topolojileri

EGA yönteminde yüksek kalite faktörlerinin elde edilebilmesi ve maksimum güç aktarımının sağlanabilmesi için kompanzasyon sistemleri birincil ve ikincil taraftaki bobinlere entegre edilir [32]. EA'lara uygulanan EGA yönteminde kompanzasyon topolojileri genelde rezonans frekansında gerçekleştirilir. Rezonans devreleri; aktarılan gücü en üst düzeye çıkarma, iletim verimliliğini optimize etme, akım veya gerilim kaynağı gibi belirli bir kaynak karakteristiği oluşturma, verici bobinindeki mıknatıslanma akımını dengeleme ve yüksek harmonileri bastırma gibi işlevler görürler [33].

Mono-rezonans topolojileri alıcı ve verici taraftaki birer kapasitörden oluşur. Kapasitör bağlantıları seri veya paralel olabilir [6, 34]. Mono-rezonans topolojileri Seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS) ve paralel-paralel (PP) olmak üzere dört çeşittir ve bu topolojiler Şekil 6' da gösterilmektedir.



Şekil 6. Seri-seri (SS), seri-paralel (SP), paralel-seri (PS) ve paralel-paralel (PP) kompanzasyon topolojileri

PS ve PP kablosuz şarj istasyonunda, alıcı tarafta bobin yoksa kaynak bobinin çalışmasını engeller. Bu durum güvenliği sağlasa da, verici ve alıcı uygun şekilde konumlandırılmadığında sistem yeterli gücü aktaramaz [35]. Ani gerilim değişimleri nedeniyle için girişlerinde akım kaynağı kullanılır. Akım kontrolünü daha kolay gerçekleştirmek için topolojiye endüktans eklenebilir. [36, 37]. Yaygın uygulamalarda, iyi verimlilik sağladıkları için SS ve SP topolojileri uygulanır. SS ve SP topolojilerin avantajı, kapasitans değerinin yük değişimine bağlı olmamasıdır. Öte yandan, SP topolojisi kuplaj katsayısına bağlıdır ve güçlü bir manyetik kuplaj için birincil kapasitans değerinin daha büyük olması gerekir [31].

**Tablo 1.** EA'ların EGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

| Ref. | Yıl  | Frekans (kHz) | Güç (kW) | Mesafe (mm) | Bobin Yapısı | Topoloji | Verim (%) |
|------|------|---------------|----------|-------------|--------------|----------|-----------|
| [38] | 2021 | 85            | 0.2      | 100         | Altgen       | SS       | 80        |
| [39] | 2015 | 160           | 1        | 203.2       | Kare         | SS       | 93.7      |
| [40] | 2020 | 85            | 0.5      | -           | Dairesel     | LCC      | 95.5      |
| [41] | 2016 | 90            | 3.3      | 200         | İçiçe        | LLC-LC   | 96.6      |
| [42] | 2020 | 85            | 3        | 300         | Bipolar      | Hybrid   | 92.5      |
| [43] | 2017 | 100           | 19.95    | 300         | Kare         | SP       | 80.3      |
| [44] | 2016 | 20.15         | 1        | 156         | Daire        | SS       | 96        |
| [45] | 2018 | 25            |          | 1000        | Dikdörtgen   | SP       | 88        |

SP topolojisinde birincil tarafa aktarılan empedans karşılıklı endüktansın karesi olması nedeniyle uygulanması çok zordur [5]. SS topolojisinde karşılıklı kuplaj ve yükler, kaynakların veya alıcıların rezonans frekanslarını etkilemez ama ikincil ve ana bobinlerin öz endüktansına bağlıdır. Bu durum, dinamik şarj için önemli olan yüksek hizalama toleransı sağlar. Bu tür sistemler, rezonans frekanslarında aktif güç çekerek birim güç faktörünü koruyabilir. SS topolojisi, hücreye tutarlı bir gerilim ve akım sağlayabildiğinden, bataryayı şarj etmek için daha güvenilir bir yöntemdir [15].

Yukarıda bahsedilen temel kompanzasyon topolojileri ideal koşullar için uygundur. Yanlış hizalama, frekans sapması vb. faktörler kablosuz şarj uygulamasının ideal koşullarda çalışmamasına neden olur. Literatürde temel topolojilerin yanı sıra farklı topolojilerin avantajlarını bir araya getirmek için önerilen hibrit topolojiler de bulunmaktadır. Bu hibrit topolojilerin de birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır [46]. Hibrit topolojiler, yanlış hizalamaya karşı sistem verimliliğini artırma, çok rezonanslı olma, çatallanmayı azaltma, birden fazla aracı şarj etme ve çift yönlü sistemlerin uygulanabilmesi gibi başka ek avantajlar da sunmaktadır [47, 48]. EA'ların EGA yöntemi ile kablosuz şarjı için en popüler hibrit yapılar LCL ve LCC topolojileridir [34]. LCL topolojisinin avantajları akım kaynağı olarak çalışması, harmonik filtreleme yeteneği sağlaması ve yüksek verim sağlamasıdır [49]. S-LCL, LCL-S, LCL-P ve çift LCL gibi çeşitleri vardır. LCC topolojisi, yüksek yanlış hizalama toleransı, yüksek verimlilik, elektromanyetik girişimin azaltılması ve yükten bağımsızlık gibi özelliklerinden dolayı avantajlıdır [50, 51]. S-LCC, LCC-S ve LCC-LCC gibi topolojiler LCC tabanlı topolojiler kategorisinde yer almaktadır.

#### 2.4 EGA eviriciler

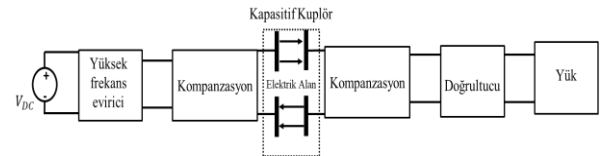
Kablosuz şarj sistemlerini tasarlarken frekans, güç ve verimlilik temel tasarım öğeleridir. Seçilen frekans değerine göre bobin boyutları azaltılabilir fakat bu durum anahtarlar kayıplarının artmasına neden olur. İşlemler için kullanılan çeşitli frekans aralıkları iki bantta yoğunlaşmıştır. Önceki çalışmaların çoğunda çalışma frekansı olarak 20 kHz seçilse de SAE j2954'e göre çalışma frekansının 85 kHz olması önerilmiştir [52]. Bu frekanslarda çalışmak için genelde

MOSFET ve IGBT kullanılır. Kablosuz şarj sisteminde güç aktarımı frekansla orantılıdır. IGBT'ler kablosuz şarj işleminde anahtarlama sıklığını artırmaktadır. Bu durum kayıplar ve ısınma sorunu yaratır. Öte yandan, konvansiyonel silikon MOSFET'ler düşük güç seviyesine sahiptir [53].

Dinamik şarj sistemlerinde yolda konumlandırılmış verici bobinlerinin sayısı, tek veya birden fazla evirici tarafından enerjilendirilebilir. Evirici, doğru akımı yüksek frekanslı alternatif akıma dönüştürür. Bu dönüştürme genellikle tam köprü evirici kullanılarak gerçekleştirilir [46-49]. Şarj cihazı çift yönlü olacak şekilde tasarlanmışsa, güç dönüştürücüler de çift yönlü olacak şekilde tasarlanmalıdır [54]. Tablo-1'de EA'ların EGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda ele alınan farklı parametreler verimlilik değerleri ile verilmiştir.

### 3 Kapasitif güç aktarımı (KGA)

Bir KGA sistemi, verici (birincil) ve alıcı (ikincil) taraftan oluşur. Verici taraf, yüksek frekanslı bir evirici ve birincil kompanzasyon sistemi ile temsil edilir. İkincil taraf, ikincil kompanzasyon sistemi, doğrultucu ve yük ile gösterilmektedir. Kapasitif kuplör, bir güç akışı döngüsü sağlayan bir ortamdır. Birincil ve ikincil rezonans bileşenleri için AC uyarımı sağlamak için yüksek frekanslı bir evirici kullanılır. Yükü DC beslemek için nihai olarak bir doğrultucu kullanılır. Bir KGA sisteminin genel şeması Şekil 7'de gösterilmektedir.



**Şekil 7.** KGA genel yapısı

Kapasitif kuplajın en önemli faydalarından biri ferrit çekirdek gerektirmemesidir. Bunun sonucu olarak daha düşük ağırlık, kayıplar ve maliyetle daha yüksek güç yoğunluğu sağlar. Dezavantajı, ise plakaların yakınında başka materyallerin olması, güç aktarımında ciddi sapmalara neden olur. Ayrıca, plakaların yakınında bulunmak ciddi sağlık sorunlarına yol açan elektromanyetik alanlara maruz

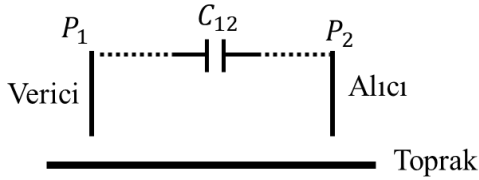
kalmaya neden olur. Bu nedenle, KGA genellikle düşük güçlü uygulamalarda kullanılır [55]. Son zamanlarda, EGA ve KGA birlikte kullanıldığı yeni bir yaklaşım da vardır. Bu hibrit sistemler, araç park halindeyken EGA ile hareket halinde şarj için KGA ile şarj olacak şekilde tasarlanmıştır [56]. KGA'da verimi artırmak için farklı kuplör yapıları, kompanzasyon topolojileri ve eviriciler kullanılır.

### 3.1 KGA kuplör yapıları

Kapasitif kuplör, gücü aktarmak ve elektrik alanları oluşturmak için kullanılan çok sayıda metal plakalardan oluşur. Her plaka çifti arasında kuplaj kapasitansları vardır ve kapasitif kuplörün farklı yapıları ile farklı kuplaj modelleri elde edilebilir. İki plakalı, dört plakalı, altı plakalı yapılar en çok kullanılan yapılarıdır [12].

#### 3.1.1 İki plakalı yapı

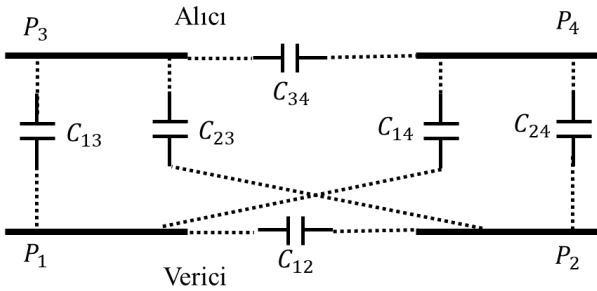
Şekil 8'de gösterilen iki plakalı yapıda bir plaka vericiye ve diğer plaka alıcıya bağlanır. İki plakalı yapıya sahip bir KGA sisteminin ana avantajı, basitleştirilmiş donanımdır [57].



Şekil 8. İki plakalı KGA genel yapısı

#### 3.1.2 Dört plakalı yapı

KGA'nın en yaygın plaka yapısı dört plakalı yapıdır. Dört plakalı yapı, iki ana kuplaj kapasitansı ve dört kaçak kapasitans oluşur. Şekil 9'da gösterildiği gibi paralel iki plaka çiftinden oluşur. Plakalar birbirine yakın yerleştirildiğinde ve iyi hizalandığında, ana kaplin ortaya çıkan kapasiteye hakim olacaktır. İyi hizalanmadığında veya büyük hava boşluğu olduğunda daha düşük bir kapasitif kuplaj kalitesine neden olur [58].

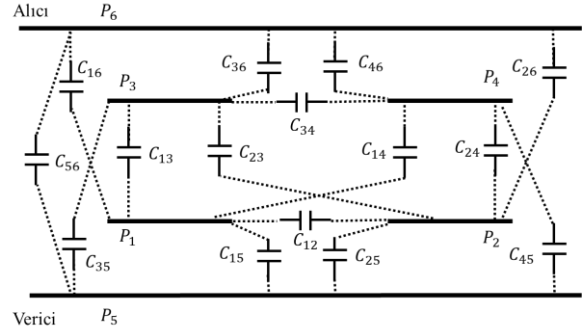


Şekil 9. Dört plakalı KGA genel yapısı

#### 3.1.3 Altı plakalı yapı

Şekil 10'da gösterildiği gibi altı plakalı yapı, aslında iki büyük levhannın koruyucu kısmı ile uzatılmış dört levhali paralel bir kuplaj yapısıdır. Dört plaka birincil ve ikincil arasında güç aktarımı sağlar ve doğrudan kompanzasyon devrelerine bağlanır. İki ekstra koruyucu plaka, içteki dört

plakalı bağlantı yapısını kaplayacak kadar büyüktür ve sisteme doğrudan bağlı değildir. Ekstra koruyucu parçanın asıl amacı elektrik alan emisyonlarını azaltmaktır [59].



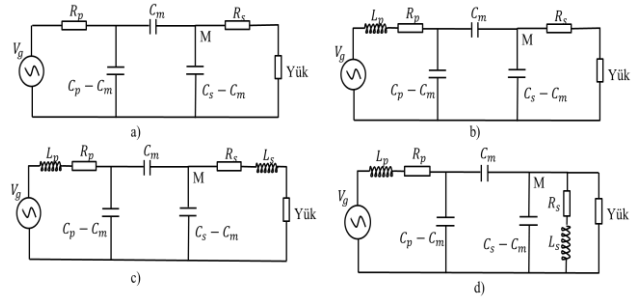
Şekil 10. Altı plakalı KGA genel yapısı

Bunlar dışında, matris yapı, konsantrik yapı ve elektrik alan tekrarlayıcı gibi yapılarda KGA yönteminde farklı kuplaj tasarımları kullanılmaktadır [60].

### 3.2 KGA kompanzasyon topolojileri

KGA sistemlerinin en önemli dezavantajı, plakalar arasındaki düşük kuplaj kapasitansıdır. Bu kadar düşük kuplaj kapasitanslarında etkili bir güç aktarımı gerçekleştirmek için birincil tarafı besleyen gerilimin frekansı ve/veya büyüklüğü artırılabilir. Ancak bu durumda yüksek frekanslar dönüştürücüde önemli kayıplara neden olur. Bu nedenle KGA sistemlerinde verici ve alıcı tarafında kompanzasyon sistemleri kullanılır [10]. İndüktör kompanzasyon sistemi, yüksek ve düşük güç uygulamalarında basit ve yaygın olarak kullanılır ve L kompanzasyon sistemi olarak da adlandırılır.

L kompanzasyon sistemi rezonansız, birincil rezonans, ikincil rezonans, SS ve SP olarak yaygın olarak kullanılan kompanzasyon topolojileridir [53, 61]. Şekil 11'de, L kompanzasyon topolojileri gösterilmektedir. SS devresi, verici plakasında yüksek gerilim elde etmek için gerekli olan rezonanstaki gerilim kazancı sağlarken, SP devresi yükü beslemek için akım kazancı sağlar. İkincil rezonans için L bobini, yükü seri olarak sekonder tarafa yerleştirilir.



Şekil 11. a) Rezonansız b) birincil rezonans c) SS d) SP kompanzasyon topolojileri

KGA sisteminde, kullanılan eviricilere bağlı olarak farklı kompanzasyon topolojilerini uygulanır. Köprü eviricileri kullanan KGA sistemleri için, genellikle rezonans topolojileri uygulanmaktadır.

**Tablo 2.** EA'ların KGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

| Ref. | Yıl  | Frekans (kHz) | Güç (kW) | Mesafe (mm) | Plaka sayısı | Topoloji | Verim (%) |
|------|------|---------------|----------|-------------|--------------|----------|-----------|
| [62] | 2020 | 1000          | 1.5      | 150         | 4            | LCL-L    | 85.5      |
| [63] | 2018 | 1000          | 1.97     | 150         | 6            | LCL-LCL  | 91.6      |
| [57] | 2018 | 6780          | 0.35     | 110         | 2            | LC-LC    | 74.1      |
| [64] | 2019 | 600           | 1        | 150         | 4            | LC-CLC   | 90.5      |
| [58] | 2015 | 1000          | 2.4      | 150         | 4            | LC-LC    | 90.8      |

Rezonans topolojisi, sürücü tarafından üretilen yüksek dereceli harmonikleri filtreleyerek, anahtarlar için yumuşak geçiş elde ederek sistem performansını iyileştirmede önemli bir rol oynar. KGA'da başka birçok yapıda kompanzasyon topolojileri uygulanmıştır; çift taraflı LC, çift taraflı LCC, çift taraflı LCLC, çift taraflı LCL, çift taraflı CLLC, LCLC-LC, LC-CLC, LCL-L [10, 65–68]. Bunlar arasında, LC tipi, bu topolojileri oluşturmak için kullanılan temel biçimdir ve çok aşamalı LC yapısı, gerilimi artırmak, iletim verimliliğini artırmak vb. gibi farklı amaçlara ulaşmak için kullanılabilir.

### 3.3 KGA eviriciler

KGA'nda kullanılan eviriciler PWM dönüştürücü, güç yükseltici ve tam köprü tabanlı sistemler olarak sınıflandırılırlar. PWM evirici, yanlış hizalama nedeniyle kuplaj kapasitesinin değişmesi veya verici ile alıcı arasındaki mesafenin değişmesi gibi sistem parametrelerinin varyasyonlarına karşı daha az duyarlıdır [69]. Bu dönüştürücüler yüksek anahtarlama frekanslarında çalışacak şekilde tasarlanabilir. Bu, sistem verimliliğini artırır ve bileşenlerin boyutunu azaltır. Güç amplifikatörü tabanlı dönüştürücülerin ana dezavantajı, sistem parametre değişikliklerine olan duyarlılığıdır [70]. Tam köprü evirici kolay parametre tasarımı ve sağlamlığı nedeniyle en yaygın eviricidir [71]. Tam köprü eviricinin diğer evirici topolojilerine kıyasla anahtarlama bileşenleri üzerinde yüksek giriş gerilimleri sağlayabilmektedir.

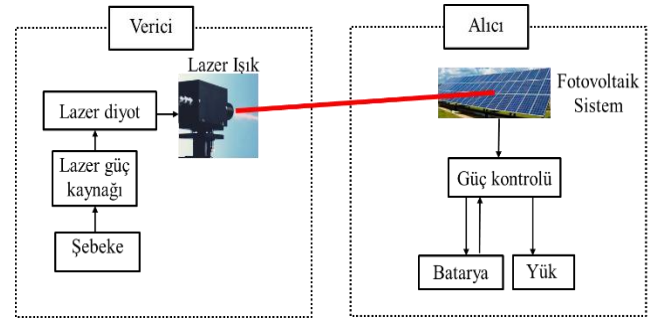
Tablo-2'de EA'ların KGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda ele alınan farklı parametreler ve verimlilik değerleri verilmiştir.

## 4 Optik (Lazer) güç aktarımı (OGA)

Günümüzde EA'ların kablosuz şarjı için yüksek güç dönüştürme verimlilikleri nedeniyle EGA ve KGA üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Fakat bu yöntemlerin iletim mesafesi kısıdır ve bu yöntemlerde EA'larda bulunan bobinler, yol şeritlerinin altına gömülü olan şarj pedlerine yakın olmalıdır [72]. EGA ve KGA teknolojilerinin aksine OGA yöntemi ile kilometre ölçeğindeki mesafelere güç aktarımı sağlanabilir.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, sistemin vericisi ortak bir kaynaktan gelen gücü bir lazer aracılığıyla tek renkli bir ışık huzmesine dönüştürür. Bu lazer ışını daha sonra bir dizi optikle şekillendirilir ve bir ışın yönlendirici aracılığıyla uzaktaki fotovoltaik (FV) alıcısına yönlendirilir. Alıcıda, lazer dalga boyu ve ışın yoğunluğuyla eşleşen özel PV

hücreleri, lazer ışığını tekrar elektrige dönüştürür. OGA sistemi, herhangi bir miktardaki gücü uzaydaki herhangi bir noktaya iletme yeteneğine sahiptir ancak, kaynaktan ve alıcıdaki dönüştürme verimliliği gibi uygulamadaki sınırlamalar, sistemin performansını düşürür [72].



**Şekil 11.** OGA genel yapısı

Elektrik gücü, uyarıcı akım ve gerilimine bağlı olan güç tedarikçisi tarafından sağlanır [73]. Lazer gücü, ancak uyarıcı akım belirli bir eşeğin üzerinde olduğunda üretilebilmektedir. Lazer iletiminde güç zayıflama seviyesi, iletim mesafesine ve hava kalitesine bağlıdır [74]. Alıcıda lazer gücü elektrik gücüne dönüştürülür. Lazerden elektrige dönüştürme mekanizmasını göstermek için, bir PV panelinin tek diyotlu eşdeğer devre modelinden faydalanılır [75]. Yüksek güçlü lazerle ilgili en önemli sorun; göz güvenliğidir. Lazer, insan gözüyle görülemeyen kızılötesine yakın dalga boyunda çalışır. Bu nedenle, lazer ışımına doğrudan bakmak ve yansımalara maruz kalmak retina hasarına neden olabilir [76]. Bir diğer sorun cilt yanması ve yangın riskidir. Doğrudan ışına veya yansımaya maruz kalma, doku yanmasına neden olabilir. Diğer taraftan lazer ışını yanıcı bir malzemeyle temas ettiğinde yangın çıkmasına neden olabilir. Tablo-3'de EA'ların OGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalarda kullanılan parametreler ve verimlilik değerleri sunulmuştur.

## 5 Mikrodalga güç aktarımı (MGA)

MGA yönteminde mikrodalga, yüksek gerilimli bir DC jeneratörü tarafından çalıştırılan bir manyetro tarafından üretilir. Sinyal üretici, düşük güçlü mikrodalga sinyalleri üretmek için kullanılır ve güç amplifikatörü, yüksek güçlü mikrodalga sinyalleri çıkarmak için üretilen küçük sinyalleri yükseltir.

**Tablo 3.** EA'ların OGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

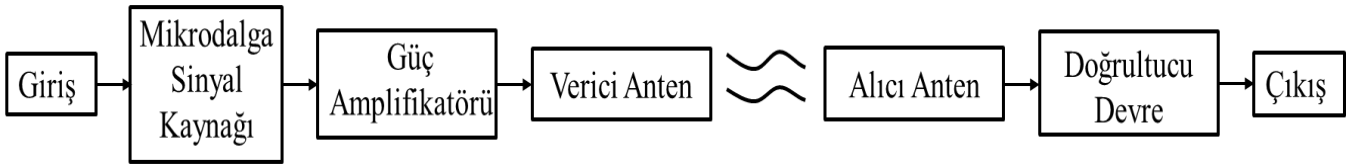
| Ref. | Yıl  | Frekans | Güç(kW) | Mesafe (mm) | Hız (m/s) | Verim (%) |
|------|------|---------|---------|-------------|-----------|-----------|
| [73] | 2021 | 3.7 GHz | 0.0625  | 50000       | N/A       | 12.5      |
| [76] | 2019 | N/A     | 10      | 150         | 3         | 87        |
| [77] | 2019 | 400 kHz | 1.6     | N/A         | 9         | 87.4      |
| [78] | 2012 | N/A     | 0.04    | N/A         | 27        | 45        |
| [79] | 2019 | 50 Hz   | 0.15    | N/A         | 25        | N/A       |

**Tablo 4.** EA'ların MGA yöntemi ile şarj edilmesini içeren çalışmalar

| Ref. | Yıl  | Frekans  | Güç | Mesafe (mm) | Verim (%) |
|------|------|----------|-----|-------------|-----------|
| [80] | 2018 | 10 GHz   | N/A | 23          | N/A       |
| [81] | 2019 | 14.5 GHz | 13  | 250         | N/A       |
| [82] | 2019 | 77 Ghz   | 9   | 15000       | N/A       |

**Tablo 5.** EA'ların kablosuz şarjında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

|                         | EGA        | KGA         | OGA          | MGA            |
|-------------------------|------------|-------------|--------------|----------------|
| Güç Seviyesi            | 0-30 kW    | 0-2.5 kW    | 0-20 kW      | 0-10 kW        |
| Frekans                 | 20-200 kHz | 1kHz-20 MHz | 300 MHz-1THz | 300 MHz-300GHz |
| Mesafe                  | 0-300 mm   | 0-150 mm    | 0 -100 km    | 0 -100 km      |
| Verim                   | 80-96      | 45-93       | 15-78        | 10-87          |
| Elektromanyetik Girişim | Düşük      | Düşük       | Düşük        | Orta           |
| Tehlike durumu          | Düşük      | Düşük       | Yüksek       | Yüksek         |
| Maliyet                 | Orta       | Düşük       | Yüksek       | Yüksek         |
| Dinamik Şarja Uygunluk  | Yüksek     | Yüksek      | Düşük        | Düşük          |
| Çift Taraflı Güç Akışı  | Evet       | Evet        | Hayır        | Hayır          |



**Şekil 12.** MGA genel yapısı

Daha sonra verici anten tarafından yayılır. Verici anten, yayılan gücü toplama bölgesine yönlendirebilecek şekilde tasarlanabilir [83]. Bunun için vericide bir faz kaydırma dizisi kullanılır. Ardından alıcı, mikrodalga sinyalini DC sinyaline dönüştürmek için bir alıcı anten kullanır. DC çıkış EA bataryasına aktarılarak şarj işlemi gerçekleştirilir. MGA genel yapısı Şekil 12'de gösterilmiştir [34].

Çalışma frekansı, frekans kaynağının nominal frekans değeridir ve taşıyıcı frekansı olarak da adlandırılır.

Elektromanyetik dalgaların frekansı ne kadar yüksekse, yönlendirilmeleri o kadar iyi ve mekansal zayıflama o kadar az olur [84]. Güç amplifikatörünün ana işlevi, küçük sinyalleri yükseltmektir. Bir güç amplifikatörü, bir KGA'nın önemli bir bileşenidir ve verimliliği, sistemin iletim verimliliğini doğrudan etkiler. Sistem performansı tamamen verici ve alıcı anten performansına ve karşılıklı eşleşmeye bağlıdır. Verici ve alıcı antenlerin teknik indeksleri esas olarak empedans ve yön özellikleridir. Hareketli hedefler



için mikrodalga kablosuz güç iletim sisteminde, verici anten, ışın yönünün ve ışın gücünün kontrolünü gerçekleştirmek için hedefin hareket durumuna göre ışının iletim yönünü değiştirmelidir [85]. Doğrultucular için verimlilik, doğrultucu diyotun karakteristik parametreleri, DC yükü ve empedans uyumu derecesi ile ilgilidir [83]. Tablo-4’de MGA yöntemi ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

## 6 Kablosuz güç aktarım yöntemlerinin EA’ların şarjı açısından karşılaştırılması

Tablo-5’de EA’ların kablosuz şarj edilebilmeleri için kullanılan kablosuz güç aktarım yöntemleri olan EGA, KGA, OGA ve MGA yöntemleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu yöntemlerden EGA ve KGA yöntemi kısa mesafelerde kullanılabilirken OGA ve MGA daha uzun mesafelerde de kullanılabilir. OGA ve MGA daha uzun mesafelerde de kullanılabilir.

Sunulan yöntemlerden en olgunlaşmış olan ve güncel olarak kullanılabilir yöntem endüktif güç aktarım yöntemidir. KGA yöntemleri içerisinde en düşük mesafede kullanılabilir yöntemdir. Bunun yanında, KGA diğer kuplaj teknolojili EGA ile karşılaştırıldığında daha düşük maliyet, hafiflik, daha düşük girdap akımı kaybı, daha yüksek güvenilirlik ve daha düşük elektromanyetik girişim avantajlı yönleridir. EGA yönteminde elektromanyetik girişimin önlenmesi için ferrit çekirdek ve alüminyum tabaka gibi ekranlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu da sistemin ağırlığını artırırken maliyetin de artmasına neden olmaktadır. EGA yöntemi ile 30 kW’a kadar etkili güç aktarımı yapılabilirken, KGA sisteminde aktarılabilir güç seviyesi çok daha düşüktür. KGA’da verimlilik hava boşluğuna bağlı olarak %45’lere kadar düşebilmektedir. EGA için ise verimlilik %80 ila %96 arasında değişmektedir. EGA genelde 20 kHz -200 kHz arasında uygulanırken, KGA 1 kHz-20 Mhz arasındaki frekanslarda gerçekleştirilir. EGA ve KGA yöntemleri dinamik şarj yöntemleri için uygun olup, araçtan şebekeye güç aktarımına da kullanılabilir. OGA ve MGA, EA’ların şarjı için henüz olgunlaşmamış fakat bu alanda yapılan araştırmalar son yıllarda hız kazanmaktadır. Hem OGA hem de MGA, birkaç kilovattlık gücü birkaç metreden birkaç kilometreye kadar aktarma yeteneğine sahiptir. OGA yönteminde lazerin verimli atmosferik yayılma özelliği ve daha büyük miktarlarda güç iletmeye yeteneği, onu MGA teknolojisinden ayırmaktadır. Uzak mesafe verimlilikleri MGA için %10 civarı iken, OGA için %20 civarındadır. Her iki yöntemde yüksek frekanslarda çalıştırılırken MGA’nın sağlık açısından elektromanyetik etkisi daha yüksektir. OGA yönteminde ise dikkatli yeterli önlem alınmazsa göz veya deri için olumsuz etkiler oluşabilir. Bu yöntemlerin EA’ların dinamik şarjında kullanılması için çalışmalar olsa da henüz dinamik şarj için elverişli değildir ve maliyetleri yüksektir.

## 7 Sonuç

Bu çalışmada, EA’ların kablosuz şarjına yönelik kapsamlı bir genel bakış sunulmaktadır. Kablosuz şarj türlerinden biri olan dinamik şarj, EA’ların daha düşük batarya kapasiteleri ile daha uzun menzile sahip olmalarına olanak sağlamaktadır. Bu durum, EA’ların en önemli maliyet kalemi olan batarya maliyetinin düşmesini sağlamaktadır. Kablosuz şarj teknolojilerden EGA ve KGA yöntemleri

yakın mesafe, OGA ve MGA yöntemleri ise uzak mesafe güç aktarım teknolojileri olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak bir EA’nın kablosuz şarjına etki eden en önemli faktörler güç, mesafe ve frekanstır. EGA yönteminde bobin tasarımları, kompanzasyon teknolojisi, elektromanyetik koruma, yanlış hizalama, evirici gibi etkenler de şarj verimini etkilemektedir. KGA yönteminde ise farklı olarak bobin tasarımı yerine plaka yapıları ve hava boşluğu etkinliği etkileyen önemli faktörlerdir. KGA yöntemi, EGA’ya göre düşük mesafe ve güçlerde etkili olabilmektedir. KGA ve EGA yöntemleri, EA’ların dinamik şarjı için uygun yöntemlerdir ve pratik olarak uygulamaları da hayata geçmeye başlamıştır. Diğer taraftan, OGA ve MGA yöntemleri genelde uzak mesafeler için tercih edilmektedir. EA uygulamaları için erken dönem araştırma safhasındadır ve verimlilikleri oldukça düşüktür. OGA ve MGA yöntemleri çok yüksek frekanslarda çalıştığı için insan sağlığı için tehlike arz edebilmektedir. Bu iki yöntemin dinamik şarjda kullanımı için çalışmalar olsa da uygulanabilirliği düşüktür.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Benzerlik oranı (iThenticate): %7

## Kaynaklar

- [1] EPA-US, Transportation greenhouse gas emissions. <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph240/jo2/docs/epa-21.pdf>, Accessed 21 August 2023.
- [2] S. Alshahrani, M. Khalid, and M. Almuhamini, Electric vehicles beyond energy storage and modern power networks: Challenges and applications. *IEEE Access*, 7, 99031–99064, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928639>.
- [3] G. Kim, I. Ashraf, J. Eom, and Y. Park, Optimal path configuration with coded laser pilots for charging electric vehicles using high intensity laser power beams. *Appl. Sci.*, 11(9), 1-22, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11093826>.
- [4] P. Machura and Q. Li, A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 104, 209–234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.027>.
- [5] A. Mahesh, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles-a review. *IEEE Access*, 9, 137667–137713, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116678>.
- [6] C. Panchal, S. Stegen, and J. Lu, Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 21 (5) 922–937, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- [7] E. Aydın, M. T. Aydemir, A. Aksoz, and M. El Baghdadi, Inductive power transfer for electric vehicle charging applications: a comprehensive review. *Energies*, 15 (14), 1-24, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15144962>.
- [8] F. Durmuş and S. Karagöl, The effect of the wireless power transfer for electric vehicles on state of charge.

- Eur. J. Sci. Technol. 26, 447–455, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.960364>.
- [9] A. A. S. Mohamed, A. Meintz, and L. Zhu, System design and optimization of in-route wireless charging infrastructure for shared automated electric vehicles. *IEEE Access*, 7, 79968–79979, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920232>.
- [10] Z. Wang, Y. Zhang, X. He, B. Luo, and R. Mai, Research and application of capacitive power transfer system: a review. *Electronics*, 11, 1158. 20 22. <https://doi.org/10.3390/electronics11071158>
- [11] J. Dai and D. C. Ludois, A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11) 6017–6029, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2415253>
- [12] F. Lu, H. Zhang, and C. Mi, A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology. *Energies*, 10, 1-20, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10111752>.
- [13] C. G. Colombo, S. M. Miraftabzadeh, A. Saldarini, M. Longo, M. Brenna, W. Yaici, Literature review on wireless charging technologies: future trend for electric vehicle. *Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology*, pp. 1-5, Cassino, Italy, 23-25 November 2022. <https://doi.org/10.1109/SMART5.2022.9990331>
- [14] L. Sun, D. Ma, and H. Tang, A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 91, 490–503, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.016>.
- [15] K. A. Kalwar, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, Coil design for high misalignment tolerant inductive power transfer system for ev charging. *Energies*, 9 (11), 1-13, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110937>.
- [16] H. Chen, Y. Xiao, Basic principles of wireless power transfer and comparisons between electromagnetic induction and microwave wireless charging. *Int. Conf. Appl. Phys. Comput.*, pp. 104–106, Ottawa, Canada, 08-10 September 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00026>.
- [17] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally, and S. I. Selem, A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Appl. Energy*, 262, 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114584>.
- [18] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, C. T. Rim, Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 3 (1), 18–36, 2015. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2343674>.
- [19] H. Feng and R. Tavakoli, Advances in high-power wireless charging systems: overview and design considerations. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 6 (3), 886–919, 2020. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3102543>.
- [20] A. Ahmad, M. S. Alam, A. A. S. Mohamed, Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 5 (4), 934–945, 2019. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2929443>.
- [21] G. Palani, U. Sengamalai, P. Vishnuram, and B. Nastasi, Challenges and barriers of wireless charging technologies for electric vehicles. *Energies*, 16, 1-15, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16052138>
- [22] A. C. Bagchi, A. Kamineni, R. A. Zane and R. Carlson, Review and comparative analysis of topologies and control methods in dynamic wireless charging of electric vehicles. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 9 (4), 4947–4962, 2021. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3058968>.
- [23] G. R. Nagendra, G. A. Covic, and J. T. Boys, Determining the physical size of inductive couplers for IPT ev systems. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 2 (3) 571–583, 2014. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2302295>.
- [24] W. Chen C. Liu, C. H. T. Lee, Z. Zhan, Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging. *Energies*, 9, 1-21, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110906>.
- [25] K. Aditya, V. K. Sood, and S. S. Williamson, Magnetic characterization of unsymmetrical coil pairs using archimedean spirals for wider misalignment tolerance in ipt systems. *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 3 (2) 454–463, 2017. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2673847>.
- [26] A. A. S. Mohamed, S. An, and O. Mohammed, Coil design optimization of power pad in IPT system for electric vehicle applications. *IEEE Trans. Magn.*, 54 (4), 1–5, 2018. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2784381>.
- [27] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C. Y. Huang, Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60 (1), 318–328, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2179274>.
- [28] M. Mohammad et al., Design of an EMF suppressing magnetic shield for a 100-kW DD-coil wireless charging system for electric vehicles. *Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 1521–1527, Anaheim, CA, USA, 17-21 March 2019. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722084>.
- [29] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, Active coil system for magnetic field reduction in an automotive wireless power transfer system. *2019 Int. Symp. Electromagn. Compat. Signal Power Integrity*, pp. 189–192, New Orleans, LA, USA, 22-26 July 2019. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2019.8825202>.
- [30] E. Asa, M. Mohammad, O. C. Onar, J. Pries, V. Galigekere and G. J. Su, Review of safety and exposure limits of electromagnetic fields in wireless electric vehicle charging (wevc) applications. *2020 Transp. Electrification Conf. Expo, Chicago, IL, USA, 23-26 June 2020*. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020>.

- 020.9161597.
- [31] V. Shevchenko et al, Compensation topologies in ipt systems: standards, requirements, classification, analysis, comparison and application. *IEEE Access*, 7, 120559–120580, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937891>.
- [32] H. Li, Y. Liu, K. Zhou, Z. He, W. Li, and R. Mai, Uniform power IPT system with three-phase transmitter and bipolar receiver for dynamic charging. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (3), 2013–2017, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2864781>.
- [33] F. Musavi, M. Edington, and W. Eberle, Wireless power transfer: a survey of ev battery charging technologies. *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 1804–1810, Raleigh, NC, USA, 15-20 September 2012. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342593>.
- [34] J. M. González-gonzález and J. A. Aguado, Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: a review. *Energies*, 14, 1-18, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061547>
- [35] P. Vishuram, P. Suresh, R. Narayanamoorthi, K. Vijayakumar, B. Nastasi, Wireless chargers for electric vehicle: a systematic review on converter topologies, environmental assessment, and review policy. *Energies*, 16, 1-17, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16041731>.
- [36] A. J. Moradewicz and M. P. Kazmierkowski, Contactless energy transfer system with fpga-controlled resonant converter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (9), 3181–3190, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2051395>.
- [37] W. Zhang, and C. C. Mi, Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65 (6), 4768–4778, 2016. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2454292>.
- [38] P. Tan, T. Peng, X. Gao, and B. Zhang, Flexible combination and switching control for robust wireless power transfer system with hexagonal array coil. *IEEE Trans. Power Electron.*, 36 (4), 3868–3882, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3018908>.
- [39] E. Asa, K. Colak, M. Bojarski, and D. Czarkowski, A novel multi-level phase-controlled resonant inverter with common mode capacitor for wireless ev chargers. *Transp. Electrification Conf. Expo*, pp. 1–6, Dearborn, MI, USA, 14-17 June 2015. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165734>.
- [40] A. Ramezani and M. Narimani, Optimized electric vehicle wireless chargers with reduced output voltage sensitivity to misalignment. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 8 (4), 3569–3581, 2020. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2958932>.
- [41] S. C. Moon and G. W. Moon, Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers. *IEEE Trans. Power Electron.*, 31 (10), 6844–6854, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2506779>.
- [42] J. Zhou, P. Yao, K. Guo, P. Cao, Y. Zhang, and H. Ma, A heterogeneous inductive power transfer system for electric vehicles with spontaneous constant current and constant voltage output features. *Electron.*, 9 (11), 1–20, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9111978>.
- [43] Z. Dai, J. Wang, M. Long, and H. Huang, A witrlicity-based high-power device for wireless charging of electric vehicles. *Energies*, 10 (3), 1-24, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10030323>.
- [44] H. Kim et al., Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 64 (2), 383–400, 2016. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2513394>.
- [45] I. Villar, A. Garcia-Bediaga, U. Iruretagoyena, R. Arregi, and P. Estevez, Design and experimental validation of a 50kw IPT for railway traction applications. *Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 1177–1183, Portland, OR, USA, 23-27 September 2018. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558441>.
- [46] M. Zucca et al., Assessment of the overall efficiency in wpt stations for electric vehicles. *Sustainability*, 13, 1–19, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13052436>
- [47] N. A. Keeling, G. A. Covic, and J. T. Boys, A unity-power-factor IPT pickup for high-power applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (2), 744–751, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027255>.
- [48] C. Wang, G. A. Covic, O. H. Stielau, Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications *IEEE Trans. Power Electron.* 19 (4), 995–1002, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.830098>.
- [49] B. Esteban, M. Sid-ahmed, N. C. Kar, and A comparative study of power supply architectures in wireless ev charging systems. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11), 6408–6422, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2440256>.
- [50] N. Rasekh, J. Kavianpour, and M. Mirsalim, A novel integration method for a bipolar receiver pad using LCC compensation topology for wireless power transfer. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 67 (8), 7419–7428, 2018. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2837348>.
- [51] T. Kan, T. Nguyen, J. C. White, R. K. Malhan, and C. C. Mi, A new integration method for an electric vehicle wireless charging system using LCC compensation topology: analysis and design. *IEEE Trans. Power Electron.*, 32 (2), 1638–1650, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2552060>.
- [52] J. M. González-González, A. Triviño-Cabrera, and J. A. Aguado, Design and validation of a control algorithm for a SAE J2954-compliant wireless charger to guarantee the operational electrical constraints. *Energies*, 11, 1-25, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11030604>.
- [53] D. Rozario, N. A. Azeez, S. S. Williamson, Comprehensive review and comparative analysis of compensation networks for capacitive power transfer systems. *Int. Symp. Ind. Electron*, pp. 823–829, Santa Clara, CA, USA, 08-10 June 2016, <https://doi.org/10.1109/ISIE.2016.7744996>.

- [54] Q. Deng et al., Modeling and control of inductive power transfer system supplied by multiphase phase-controlled inverter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (9), 9303–9315, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2886846>.
- [55] C. H. Lin et al., Comprehensive analysis of IPT v/s CPT for wireless ev charging and effect of capacitor plate shape and foreign particle on CPT. *Processes*, 9, 1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9091619>.
- [56] B. Luo, T. Long, L. Guo, R. Dai, R. Mai, and Z. He, Analysis and design of inductive and capacitive hybrid wireless power transfer system for railway application. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 56 (3), 3034–3042, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979110>.
- [57] F. Lu, C. C. Mi., A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (2), 964–969, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2735365>.
- [58] F. Lu et al. Double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (11), 6011–6014, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2446891>.
- [59] H. Zang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu and C.C. Mi, Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (1), 665–675, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2662583>
- [60] C. Lecluyse, B. Minnaert, M. Kleemann, A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies*, 14, 1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14185862>
- [61] S. Ahmad, R. Hattori, A. Muharram, Generalized circuit model of shielded capacitive power transfer. *Energies*, 14, 1-18. 2021. <https://doi.org/10.3390/en14102826>
- [62] V. B. Vu, M. Dahidah, V. Pickert, and V. T. Phan, An improved lcl-l compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging. *IEEE Access*, 8, 27757–27768, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971961>.
- [63] H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu, and C. C. Mi, Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (1), 665–675, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2662583>.
- [64] B. Luo, R. Mai, L. Guo, D. Wu, and Z. He, LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance. *IET Power Electron.*, 12 (10), 2626–2633, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5606>.
- [65] S. K. Mishra, R. Adda, S. Sekhar, A. Joshi, and A. K. Rathore, Power transfer using portable surfaces in capacitively coupled power transfer technology. *IET Power Electron.*, 9 (5), 997–1008, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0332>.
- [66] J. Lian, X. Qu, An LCLC-LC-compensated capacitive power transferred battery charger with near-unity power factor and configurable charging profile. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 58 (1), 1053–1060, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3089448>
- [67] D. A. I. Xin and S. U. N. Min, Generalized hamiltonian energy modeling method for wireless power transfer system. 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, China, 07-10 December 2020. <https://doi.org/10.1109/PESA50370.2020.9344047>.
- [68] J. Lian and X. Qu, Design of a double-sided LC compensated capacitive power transfer system with capacitor voltage stress optimization. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, 67 (4), 715–719, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2918648>.
- [69] J. Dai, and D. C. Ludois, Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 3 (1), 315–323, 2015. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2334621>.
- [70] A. S. Haritha and J. K. Jose, A reliable inverter for wireless power transfer applications. *Int. Conf. Circuits Syst. Digit. Enterp. Technol.* pp 1–5, Kottayam, India, 21-22 December 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCSDET.2018.8821139>
- [71] C. Jiang, K. T. Chau, C. Liu, C. H. T. Lee, An overview of resonant circuits for wireless power transfer, *Energies*, 10 (7), 1-22, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10070894>.
- [72] D. H. Nguyen, Dynamic optical wireless power transfer for electric vehicles. *IEEE Access*, 11, 2787–2795, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234577>.
- [73] A. Mohammadnia, B. M. Ziapour, H. Ghaebi, and M. H. Khooban, Feasibility assessment of next-generation drones powering by laser-based wireless power transfer. *Opt. Laser Technol.*, 143, 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107283>.
- [74] Q. Zhang, W. Fang, Q. Liu, J. Wu, P. Xia, and L. Yang, Distributed laser charging: a wireless power transfer approach. *IEEE Internet Things J.*, 5 (5), 3853–3864, 2018. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2851070>.
- [75] K. Jin and W. Zhou, Wireless laser power transmission : a review of recent progress. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34 (4), 3842–3859, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2853156>
- [76] Y. Rathod and L. Hughes, Simulating the charging of electric vehicles by laser. *Procedia Comput. Sci.*, 155, 527–534, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.073>.
- [77] K. J. Pai, Temperature rise effects on dynamic resistances for laser diodes with a wavelength of 450 nm for vehicle headlight applications. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 68 (10), 9529–9542, 2019. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2929225>.
- [78] V. A. Bogushevskaya et al., An experimental investigation of the feasibility of using silicone and gallium arsenide solar batteries on space vehicles for receiving energy of laser infrared emission. *Therm. Eng.*, 59 (13), 975–980, 2012. <https://doi.org/10.1>

- 134/S0040601512130034.
- [79] U. F. Shaikh, A. Das, A. Barai, and I. Masters, Electrothermo-mechanical behaviours of laser joints for electric vehicle battery interconnects. 2019 Electr. Veh. Int. Conf. EV 2019, pp. 1–6, Bucharest, Romania, 03-04 October 2019. <https://doi.org/10.1109/EV.2019.8892972>.
- [80] T. Li et al., A novel design of microstrip patch antenna array with modified-I-shaped electromagnetic metamaterials applied in microwave wireless power transmission. *Optik (Stuttg.)*, 173, 193–205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.08.012>.
- [81] W. Li, R. Li, J. Dong, J. Yang, and X. Zhang, Demonstration of a microwave photonic radar for high-resolution vehicle sar/isar imaging. *Int. Top. Meet. Microw. Photonics*, pp. 1–3, Ottawa, Canada, 07-10 October 2019. <https://doi.org/10.1109/MWP.2019.8892002>.
- [82] J. D. Castro, S. Singh, A. Arora, S. Louie, and D. Senic, Enabling safe autonomous vehicles by advanced mm-wave radar simulations. *MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1476–1479, Boston, MA, USA, 02-07 June 2019. <https://doi.org/10.1109/mwsym.2019.8700843>.
- [83] C. Wang, W. Xu, C. Zhang, M. Wang, and X. Wang, Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 16, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00846-7>.
- [84] C. Wang, W. Xu, C. Zhang, M. Wang, X. Wang, Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 16, 1–11, 2022. <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00846-7>.
- [85] I. Ahmed, E. A. Elghanam, M. S. Hassan, and A. Osman, Study of the feasibility of using microwave power transfer for dynamic wireless electric vehicle charging. *Transp. Electrif. Conf. Expo*, pp. 365–370, Chicago, IL, USA, 23-26 June 2020. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161475>.

