

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ

MUSTAFA ÇELİK

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ

MUSTAFA ÇELİK

Prof. Dr. Nurettin ABUT

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NİL

Jüri Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)

Mustafa Çelik

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

(İmza)

Mustafa Çelik

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, elektrikli araçlarda kablosuz şarj için sistem modellemesi yapmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, bana güvenen ve yöreklendiren danışmanım Prof. Dr. Nurettin ABUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca görüşleri ile çalışmalarına katkıda bulunan, karşılaştığım her zorlukta desteğini ve zamanını esirgemeyen hocam Dr. Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN ve Öğr. Gör. Dr. Abdülvehhap KAZDALOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım sırasında, birçok aşamada beni destekleyen Arş. Gör. Bilal CANOL, Arş. Gör. Onur KIRCIOĞLU ve Elektrik Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili eşim Arzu ÇELİK, babam Mehmet ÇELİK, annem Emine ÇELİK ve kardeşim Beyza ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2023

Mustafa ÇELİK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	2
1.2. Literatür Taraması	3
2. SİSTEMİN YAPISI	6
2.1. Topolojiler.....	7
2.1.1. AA-DA Dönüştürücü Topolojisi.....	7
2.1.2. DA-AA Dönüştürücü Topolojisi.....	8
2.2. Rezonans Devre Yapısı ve Kompanzasyon Topolojileri.....	9
2.3. Endüktans Değerinin Belirlenmesi.....	10
2.4. Bobin Tasarımı.....	10
3. KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMİ MODELLEMESİ.....	22
3.1. Verici Devre Yapısı.....	22
3.2. Güç Faktörü Düzeltme Devresi.....	23
3.2.1. Güç Faktörü Düzeltme Devresi Simülasyonu	26
3.3. Alıcı Devre Yapısı.....	28
3.4. Kablosuz Güç Transfer Sistemi Simülasyon Sonuçları.....	29
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR.....	39
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İndüktif ve Kapasitif KGT karşılaştırması.....	3
Şekil 2.1.	Nicola Tesla'nın Colorado Springs Laboratuvarındaki ilk çalışması.....	6
Şekil 2.2.	Kablosuz Güç Transfer sisteminin blok şeması	7
Şekil 2.3.	Kompanzasyon Topolojileri.....	9
Şekil 2.4.	Tam hizalanmış eşit ferromanyetik plakalara sahip bobin tasarımı	11
Şekil 2.5.	Değişken frekansa göre kuplaj katsayısı değişimi ($z = 20$ mm).....	12
Şekil 2.6.	Tam hizalanmış farklı ferromanyetik plakalara sahip bobin tasarımı.....	16
Şekil 2.7.	Farklı ferromanyetik plakalara sahip iki bobin arasındaki akı yoğunluğu.....	21
Şekil 3.1.	Kablosuz güç transfer (KGT) sistemi	22
Şekil 3.2.	Kablosuz güç transferi verici devre yapısı.....	23
Şekil 3.3.	Darbe Genişlik Ayarı (DGA) anahtarlama sinyalleri	23
Şekil 3.4.	PI kontrollü aktif güç faktörü düzeltme devresi	24
Şekil 3.5.	PFC'siz kaynak gerilimi ve kaynak akımı	27
Şekil 3.6.	PFC'li kaynak gerilimi ve kaynak akımı	27
Şekil 3.7.	PFC'li çıkış gerilimi ve referans gerilimi	27
Şekil 3.8.	Kablosuz güç transferi alıcı devre yapısı	28
Şekil 3.9.	Doluluk oranına göre çıkış güçleri	29
Şekil 3.10.	$D=0,1$ doluluk oranına göre kaynak akımı ve kaynak gerilimi.....	30
Şekil 3.11.	$D=0,1$ doluluk oranına göre doğrultulmuş kaynak gerilimi ve kaynak akımı.....	30
Şekil 3.12.	$D=0,1$ doluluk oranına göre rezonans frekansa evrilen gerilim.....	31
Şekil 3.13.	$D=0,1$ doluluk oranına göre batarya akım ve gerilim grafikleri.....	31
Şekil 3.14.	$D=0,1$ doluluk oranına göre batarya şarj durumu.....	32
Şekil 3.15.	$D=0,1$ doluluk oranına göre doğrultulmuş kaynak gerilimi ve kaynak akımı.....	32
Şekil 3.16.	$D=0,5$ doluluk oranına göre batarya akım ve gerilim grafikleri.....	33
Şekil 3.17.	$D=0,5$ doluluk oranına göre batarya şarj durumu.....	33
Şekil 3.18.	Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemde doluluk oranına göre çıkış güçleri	34
Şekil 3.19.	Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemin batarya şarj grafiği.....	35
Şekil 3.20.	Nominal akım batarya deşarj eğrisi	36
Şekil 3.21.	Farklı akım değerlerine göre batarya deşarj eğrisi	36

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 20\text{mm}$).....	11
Tablo 2.2. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 20\text{mm}$).....	11
Tablo 2.3. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 30\text{mm}$).....	12
Tablo 2.4. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 30\text{ mm}$).....	13
Tablo 2.5. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 40\text{ mm}$).....	13
Tablo 2.6. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 40\text{ mm}$).....	14
Tablo 2.7. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 50\text{ mm}$).....	14
Tablo 2.8. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 50\text{ mm}$).....	14
Tablo 2.9. Mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları.....	15
Tablo 2.10. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 20\text{ mm}$).....	16
Tablo 2.11. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 20\text{ mm}$).....	17
Tablo 2.12. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları ($z = 30\text{ mm}$).....	17
Tablo 2.13. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 30\text{ mm}$).....	17
Tablo 2.14. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları ($z = 40\text{ mm}$).....	18
Tablo 2.15. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 40\text{ mm}$).....	18
Tablo 2.16. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları ($z = 50\text{ mm}$).....	19
Tablo 2.17. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 50\text{ mm}$).....	19
Tablo 2.18. Mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları.....	20
Tablo 2.19. Karşılıklı endüktans iç direnç değerleri.....	21
Tablo 3.1. Güç faktörü düzeltme devre parametreleri.....	26
Tablo 3.2. Doluluk oranına göre sistem parametreleri.....	29
Tablo 3.3. Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemde doluluk oranına göre sistem parametreleri.....	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

X_L	: Endüktif direnç
X_C	: Kapasitif direnç
L_P	: Primer bobin
L_S	: Sekonder bobin
C_P	: Primer kapasite
C_S	: Sekonder kapasite
M	: Ortak endüktans
k	: Kuplaj katsayısı
T	: Periyot
t_{on}	: Anahtar iletim süresi
t_{off}	: Anahtar kesim süresi
D	: Doluluk oranı
ΔI_L	: Akım dalgalanma miktarı
f_s	: Anahtarlama frekansı
P_g	: Giriş gücü, (W)
$P_ç$: Çıkış gücü, (W)
λ	: Bağlı iletimde kalma oranı
Δt	: Kondansatörün yükü besleme süresi
$V_ç$: Çıkış gerilimi, (V)
I_g	: Giriş akımı, (A)
V_g	: Giriş gerilimi, (V)
V_{ref}	: Referans gerilimi, (V)
$R_{yük}$: Yük direnci, (Ω)

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DGA	: Darbe Genişlik Ayarı
IKGT	: İndüktif Kablosuz Güç Transferi
KGT	: Kablosuz Güç Transferi
KKGT	: Kapasitif Kablosuz Güç Transferi
Li-ion	: Lityum iyon
PFC	: Power Factor Correction (Güç Faktörü Düzeltme)
SOC	: State of Charge (Şarj durumu)

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ

ÖZET

Son yıllarda gelişen teknoloji sayesinde elektrik araçlar prototip olmaktan çıkıp hızla seri üretime geçen geleceğin çevreci ulaşım araçları olmaya başlamıştır. Elektrikli araçlar, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını önleme ve enerjinin verimli kullanımı açısından geleceğin taşımacılığını temsil etmektedir. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara oranla %80'e varan enerji tasarrufu sağlarken, doğayı kirletmeyen, gürültü kirliliğine yol açmayan, çevreye duyarlı, sessiz ve ekonomik araçlar olarak ortaya çıkmaktadırlar. Elektrikli araçların çok daha yaygın bir şekilde kullanılması için şarj istasyon noktalarının geniş bir ağa sahip olması ve şarj sürelerinin optimal olması gerekmektedir. Bu bağlamda günümüzde oldukça önem taşıyan elektrikli araçların şarj süreleri ve bu sürenin hızlı şarj üniteleri ile minimum seviyeye düşürülme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemi ile ilgili literatür incelemesi yapılmış, Ansys/Maxwell programında bobin tasarımı yapılarak Matlab/Simulink aracılığı ile kablosuz şarj sistemi modellenmesi gerçekleştirilmiştir. PWM doluluk oranı değiştirilerek sistemin çıkış gücü kontrol edilmiştir. Optimum doluluk oranına göre batarya şarj süresi hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Darbe Genişlik Ayarı Modülasyonu, Elektrikli Araçlar, Kablosuz Şarj, Yükseltici Güç Faktörü Düzeltme.

WIRELESS POWER TRANSFER FOR ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

Thanks to the developing technology in recent years, electric vehicles have ceased to be prototypes and have started to become the environmentalist transportation vehicles of the future, which rapidly went into mass production. Electric vehicles represent the transportation of the future in terms of preventing greenhouse gas emissions that cause global warming and climate change, and efficient use of energy. While electric vehicles provide up to 80% energy savings compared to internal combustion engine vehicles, they appear as environmentally friendly, quiet, and economical vehicles that do not pollute nature and do not cause noise pollution. In order for electric vehicles to be used more widely, charging station points should have a wide network, and charging times should be optimal. In this context, the charging times of electric vehicles, are very important today, and efforts to reduce this time to a minimum with fast charging units are carried out. In this study, a literature review on wireless charging systems for electric vehicles was made, and the coil design was made by using Ansys/Maxwell software and wireless charging system modeling was carried out via Matlab/Simulink. The output power of the system was controlled by changing the PWM duty cycle. Battery charging time is calculated according to the optimum charge rate.

Keywords: Pulse Width Modulation, Electric Vehicles, Wireless Charging, Booster Power Factor Correction.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorların verimli olmayan yapısı, çevre ve gürültü kirliliğine yol açması gibi nedenlerden dolayı araç teknolojisi, çevreye duyarlı, sessiz ve daha ekonomik olan elektrikli araçlara doğru yönelmiştir (IEA, 2018). Elektrikli araçların, içten yanmalı motorlu araçlara göre çevre kirliliğine daha az sebep olması, karbon emisyonu gibi avantajlarından ötürü çevreci araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir (Adnan ve diğ., 2018; Hu ve diğ., 2015; Hannan ve diğ., 2017). İlk aşamada hibrit olarak ortaya çıkan araçlar yakıt tasarrufu sağlasa da tam anlamıyla elektrikli araçlardaki hedeflenen yakıt tasarrufu ve basit yapıya ulaşamamıştır. Gelişen batarya sistemleri ve elektrik motor tasarımları ile günümüzde sadece elektrik motoru ile çalışan araçlar kullanılmaktadır.

Kablosuz güç transferi için elektromanyetik radyasyon, mikrodalga, lazer, kapasitif kuplaj, endüktif kuplaj ve manyetik rezonanslı kuplaj güç transferi gibi birçok yöntem literatürde bulunmaktadır (Pannier ve diğ., 2011; Qui ve diğ., 2013). Bu yöntemler arasında manyetik rezonans ve endüktif kuplaj güç transferi en etkili yöntemler olarak ortaya çıkmaktadır. Manyetik rezonans yöntemi, oluşturduğu rezonans ile radyasyon problemlerine neden olmadan, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla güç transferi prensibiyle çalışmaktadır. Bu sebeple rezonans frekansı, devre tasarımında çok önemli bir faktördür (El Rayes ve diğ., 2016; Li ve Zao., 2017). Elektrikli araçların içten yanmalı motora sahip araçlardan daha avantajlı duruma geçebilmesi için menzil ve şarj süresi problemleri ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır (Sachan ve Adnan, 2018). Kablosuz güç transferinde fiziksel bağlantı olmaması, bu yöntemin TV'lerde (Kim ve diğ., 2012), telefon şarjlarında (Moon ve diğ., 2017; Martis ve Vorel, 2014) ve indüksiyon ocaklarında (Esteve ve diğ., 2015) kullanılmasında önemli rol oynamıştır. Ayrıca, vücuda yerleştirilebilen kalp pilleri gibi tıbbi alanlarda da kullanılmaktadır (Agraval ve diğ., 2017; Gore ve Gawali, 2016). Bir diğer kullanım alanı olarak radyo frekansı ile tanımlama teknolojisi (RFID) (Lin ve diğ., 2015), sensörler (Porto ve diğ., 2017; Trivisan ve diğ., 2016) ve robotik teknolojisi (Su ve diğ., 2018) örnek verilebilir.

Günümüzde şarj süresi, hızlı şarj üniteleri ile 1 saatin altına indirilmiştir. Yenilenen ve gelişime açık batarya tasarımları ile menzil uzunluğu sürekli artmaktadır. Farklı türde batarya çeşitleri kullanılmaya çalışılsa da günümüz için en verimli batarya türünün li-ion bataryalar olduğu görülmektedir (Zeng ve diğ., 2018; Zhou ve diğ., 2020).

Elektrikli araçların kullanımındaki başlıca problemlerden biri yüksek batarya maliyetleridir. Farklı türde batarya tipleri üzerinde çalışılmakta ve maliyetin en aza indirgenmesi hedeflenmektedir. Bir elektrikli araçtaki batarya, yaklaşık olarak toplam ağırlığının %26'sına, toplam maliyetinin %39'una eşittir (Morris, 2013).

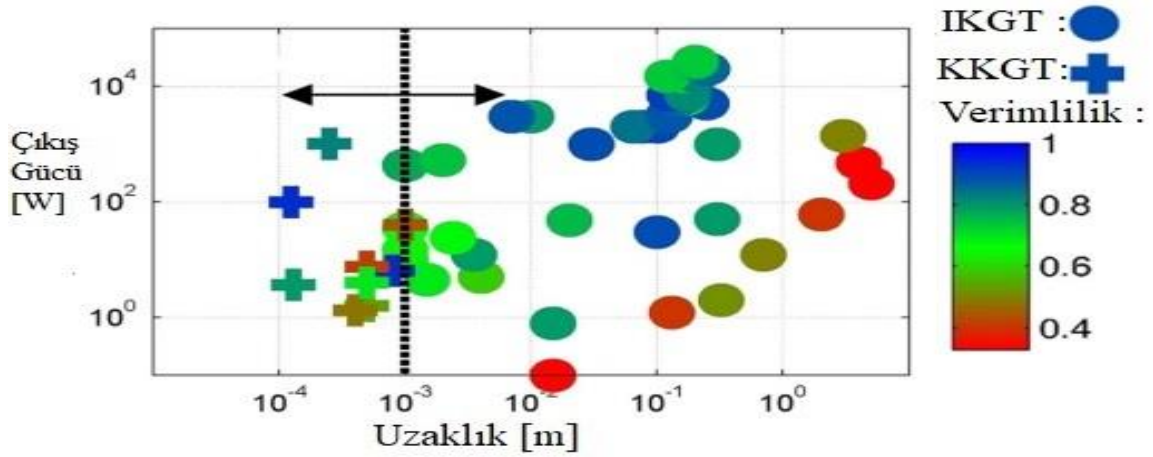
Sistemin temelinde, şebekedeki AC gerilim doğrultularak DC gerilime dönüştürülür. DC gerilim istenen frekansta evrilerek AC gerilim elde edilir ve manyetik rezonans sayesinde güç, kablosuz bir şekilde alıcı bobine transfer edilir. Alıcı kısımdaki AC gerilim tekrar doğrultularak batarya şarj edilir (Leo ve diğ., 2012; Petersen ve Fuchs, 2014; Tian ve diğ., 2018).

Bu çalışmada, elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemi incelenmiştir. Literatüre katkı olarak önce bobin tasarımı yapılmış daha sonra kablosuz şarj sistemi Matlab/Simulink'te modellenmiştir. Şebeke kısmında yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresi kullanılmış, şebeke'den alınan AC gerilim önce doğrultulmuş daha sonra darbe genişlik ayarı (DGA) kullanılarak evrilmiştir. Ansys/Maxwell'de tasarlanan bobinlerin endüktans ve iç direnç değerleri modellemede kullanılmış, DGA doluluk oranı kontrol edilerek sistemin çıkış gücü ve verimi hesaplanmıştır. Elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemlerinde, rezonans frekans genellikle 20 kHz ile 100 kHz aralığındadır (Vilathgamuwa ve Sampath, 2017). Sistemin rezonans frekansı, elektrikli araçlarda kablosuz güç iletimi için uluslararası standart olan SAE J2954 referans alınarak 85 kHz olarak belirlenmiştir.

1.1. Genel Bilgiler

Kablosuz güç transfer (KGT) sistemi temel olarak, herhangi bir fiziksel bağlantı olmadan elektrik enerjisinin yüke iletilmesidir. İndüktif ve kapasitif kablosuz güç transferi, KGT yöntemlerinden ikisidir. İndüktif kablosuz güç transferi, alıcı ve verici bobin arasında manyetik rezonans sayesinde güç transferi yaparken, kapasitif kablosuz güç transferi ise karşılıklı kapasiteler arasındaki manyetik alan sayesinde güç transferi yapabilir (Regensburger ve diğ., 2018).

Şekil 1.1'de de görüldüğü üzere kapasitif güç transferi, indüktif güç transfer yönteminden daha kısa mesafede ve daha düşük güçlü şarj sistemlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. İndüktif ve Kapasitif KGT karşılaştırması (Dai ve Ludois, 2015)

KGT günümüzde, mobil cihazlar, biyomedikal uygulamalar ve elektrikli araçlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kablosuz enerji transferi çalışmalarının başlangıcı 20. yüzyıla dayanmaktadır (Tesla, 1914). 20 yy. başlarında Nikola Tesla tarafından temeli atılan KGT'nin günümüzde daha gelişmiş çalışmaları görülmektedir. Nikola Tesla'nın çalışmalarındaki temel eksiklik iletilen gücün belirli bir yöne değil de, birçok yöne aktarılması sonucu verimin düşük olmasıdır (Arslan ve Erkan, 2022).

Günümüzde kablosuz güç transferi ile ilgili yapılan çalışmalarda, mesafenin ve sistem veriminin artırılması hedeflenmektedir. Kablosuz güç transferinde en önemli 3 parametre, karşılıklı bobinler arası mesafe, aktarılan güç ve sistemin verimidir. Düşük güçlü KGT sistemlerinde kayıplar önemsenmese de yüksek güçlü KGT sistemlerinde oluşan kayıplar ve düşük verim durumu dikkate alınmalıdır (Imura ve diğ., 2009).

1.2. Literatür Taraması

20. yüzyıl başlarına dayanan kablosuz güç transfer sistemi günümüzde yaşamın birçok alanında görülmektedir. Mesafe, verimlilik ve bataryaların şarj süresini daha aza indirmek için geçmişten günümüze çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. 2007 yılında Kurs ve diğerleri 60 W gücü yaklaşık 2 metre mesafede % 40 verimle aktarmayı başarmışlardır (Kurs ve diğ., 2007). Wang ve diğerleri, 2015 yılında seri-seri kompanzasyon topolojisi kullanarak 3 kW'lık bir kablosuz şarj prototipi yapmışlardır. Karşılıklı bobinler arası mesafe 20 cm olarak tasarlanmıştır. Prototipi yapılan sistemin verimi % 95 olarak bulunmuştur (Shuguang ve diğ., 2018).

Kablosuz güç transfer sistemlerinde, verimliliği arttırmak amacıyla enerji kayıplarının azaltılması hedeflenir. Çünkü, büyük miktarlarda güç transferi yapıldığında kaybolan enerjinin maliyeti önemlidir ve dolayısıyla yüksek verimli transfer amaçlanır. Literatürde, maksimum enerji verimliliği için birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, Chen ve arkadaşları manyetik olarak eşleşmiş bobinler kullanarak planlanan enerji miktarını en verimli şekilde aktaran ışımsız kablosuz güç transferi çalışması yapmıştır. Bu çalışmada, kuplaj katsayısını ayarlamaya ve indüktans ve kapasitans değerlerini güncellemeye odaklanılmıştır, ancak sonuçlar sadece simülasyonlarla sınırlıdır (Chen ve diğ., 2010).

Alıcı ve verici bobin arasına yerleştirilen metamateriyaller ile güç aktarım verimliliğinin artırılması konularında da birçok çalışma yapılmıştır; Lee ve Yoon tarafından yapılan bir derleme çalışması bu konuda son gelişmeleri sunmaktadır (Lee ve Yoon, 2020).

Kablosuz şarj teknolojisinde maksimum enerji verimliliği ve minimum enerji kaybının yanında karşılıklı bobinlerin hizalanmasında da yapılacak hatalarla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Nguyen ve ekibi, 8 kW kablosuz şarj cihazının bir prototipini bobinler arası mesafe 200 mm ve karşılıklı bobinlerin 300 mm yanlış hizalanma toleransına sahip olduğu bir prototip tasarlamış ve test etmiştir. Prototip %95.66 verimle çalışmıştır ve 300 mm yanlış hizalama durumunda bile %95.39 verim sağlamıştır (Nguyen ve diğ., 2014).

Wuhan üniversitesinden Dai ve arkadaşları 2017 yılında değişken çıkış gerilimi ve değişken çıkış akımı yöntemini kullanarak 6,04 kW ile 16,02 kW aralığında çıkış gücü elde ettikleri bir donanımsal sistem tasarlamışlardır. Giriş akımının 29,4 A giriş geriliminin 254 V, çıkış akımının 14,18 A ve çıkış geriliminin 426 V olduğu durumda, giriş gücü 7,47 kW ve çıkış gücü 6,04 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemin verimi % 80,91 olarak bulunmuştur. Çıkış geriliminin 751 V ve çıkış akımının 21,34 olduğu durumda çıkış gücü 16,02 kW olarak bulunmuş ve sistem verimi % 80,32 olarak bulunmuştur (Dai ve diğ., 2017).

Kore endüstriyel teknoloji enstitüsünden Choi ve arkadaşları bobinler arası mesafenin 15 cm, çıkış geriliminin DC 400 V olduğu ve çıkış gücünün 4 kW olduğu sistem tasarlamışlardır. Anahtarlama frekansı 85 kHz seçilen bu sistemde verim %93 olarak hesaplanmıştır (Choi ve diğ., 2016).

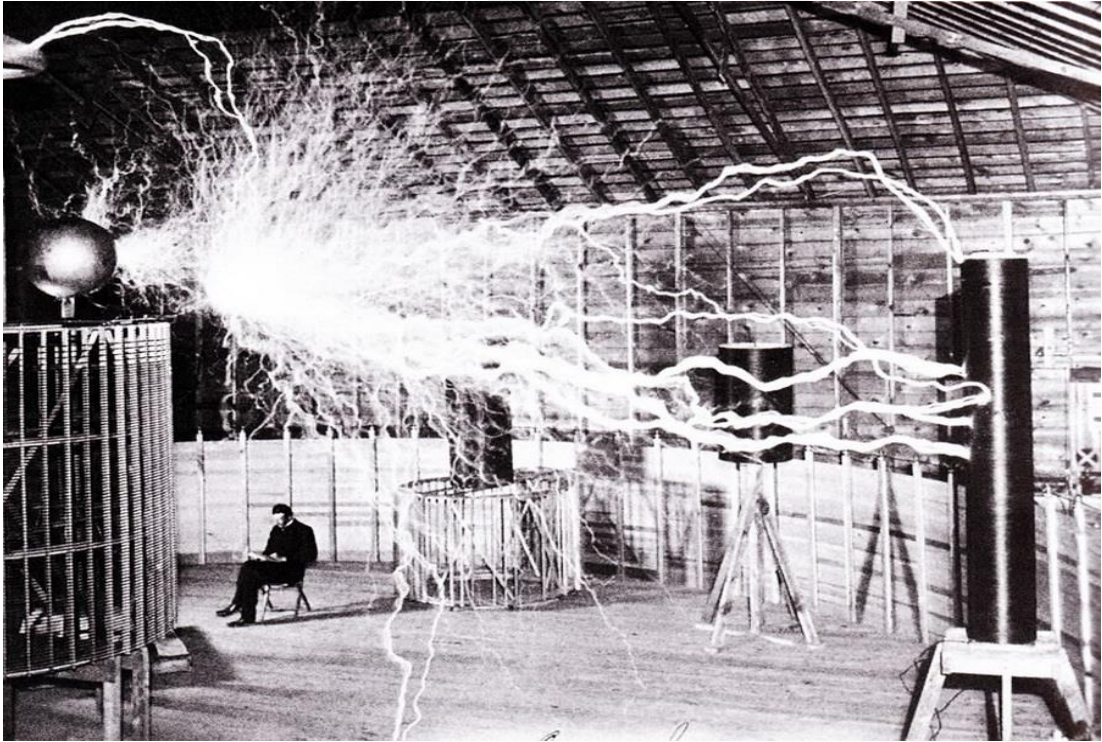
WiTricity firması, sistem veriminin %90'dan büyük olduğu, çıkış güçleri 3,6 kw, 7,7 kw ve 11 kw olan sistem tasarlamıştır. Sistemin rezonans frekansı 85 kHz olarak seçilmiştir. Tasarlanan sistemde hava boşluğu 10 cm ile 25 cm aralığında değişmektedir (URL-1).



2. SİSTEMİN YAPISI

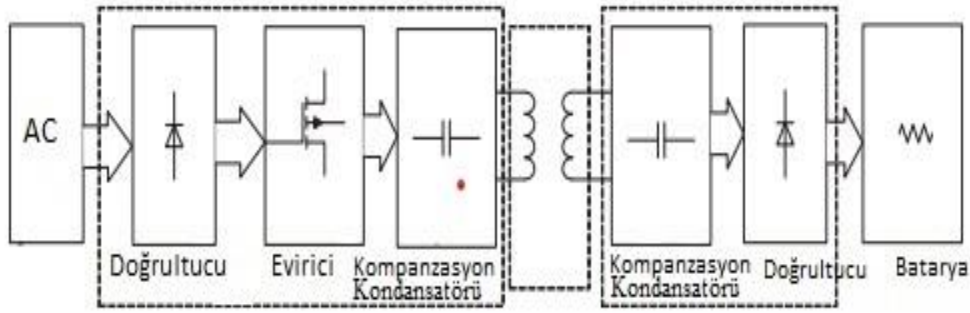
Kablosuz güç transfer sisteminin temeli, 1890'lı yıllarda Nicola Tesla'nın çalışmalarına dayanmaktadır. Tesla, iletkenler olmadan dünyanın her tarafına elektrik enerjisini aktarmak için çalışmalar yapmıştır (Özder, 2020). Nicola Tesla, gücün kablosuz olarak iletilebilmesi için manyetik rezonansın kullanılması gerektiğini düşünmektedir (Pashei ve diğ., 2016). Tesla daha sonra 1899 yılında Colorado Springs Electric Company laboratuvarında kablosuz güç transferi ile ilgili ilk çalışmasını yapmıştır (Şekil 2.1).

Colorado Springs laboratuvarındaki çalışmasından sonra iyonosferi kullanarak güç transferi yapmayı hedefleyen Tesla, 1901 yılında "Wardenclyffe" kulesini inşa etmeye başlamıştır. İyonosferi kullanarak dünyaya enerji transferi yapmak isteyen Nicola Tesla'nın bu düşüncesi gerçekleşmemiştir (Tesla, 1908).



Şekil 2.1. Nicola Tesla'nın Colorado Springs Laboratuvarındaki ilk çalışması (Thostenson ve Chou, 1999)

Kablosuz güç transferi temelde 2 adet doğrultucu, 1 adet evirici ve rezonans devresinden oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Kablosuz Güç Transfer sisteminin blok şeması (Shuguang ve diğ., 2018)

Şekil 2.2’de kablosuz güç transfer sisteminin blok şeması verilmiştir. Temel olarak doğrultulan AC gerilim istenen frekansta evrilir ve manyetik rezonans sayesinde güç, kablosuz bir şekilde alıcı bobine transfer edilir. Alıcı devredeki AC gerilim tekrar doğrultularak batarya şarj edilir.

2.1. Topolojiler

2.1.1. AA-DA Dönüştürücü Topolojisi

Günümüzde kullanılan birçok elektrikli aletin doğru akım ile çalıştığı bilinmektedir. Pil veya akü benzeri doğru akım kaynaklarının hem uzun ömürlü olmaması hem de sürekli maliyete sebep olması nedeniyle alternatif akımdan doğru akım elde etmek için doğrultucuya ihtiyaç duyulmaktadır. AC şebeke geriliminden DC gerilim elde etmek için ihtiyaç duyulan doğrultucular kontrollü ve kontrolsüz olarak ikiye ayrılmaktadır.

AA-DA doğrultucu topolojisinin en basit olanı tek diyota sahip olan yarım dalga doğrultucudur. Doğrultucunun çıkışı, AA dalga geriliminin yalnızca pozitif alternansını içeren bir DA gerilimidir. Yarım dalga doğrultucudan daha kompakt olan tam dalga doğrultucu, AA gerilimin hem pozitif alternansını hem de negatif alternansını düzenlemek için 4 adet yarı iletken oluşmaktadır.

Doğrultucular, elektronik cihazlar için güç kaynakları, pil, şarj cihazları, yenilenebilir enerji kaynakları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Doğrultucular, elektronik cihazlara istenen verimde güç sağlamak için kullanılır.

2.1.2. DA-AA Dönüştürücü Topolojisi

DC gerilimi AC gerilime dönüştüren elektronik cihazlara evirici (inverter) denilmektedir. En yaygın kullanılan evirici tipi, piller veya güneş panelleri tarafından elde edilen düşük DC gerilimini, istenilen daha yüksek değerli AC gerilimine dönüştürmek için kullanılan güç devreleridir. Güç eviricileri boyutları, çıkış güçleri ve özellikleri açısından farklılık gösterebilir de temel olarak hepsinin çalışma prensibi aynıdır.

En basit çalışma prensibi olarak bir dizi giriş terminali aracılığıyla elde edilen DC gerilim, bir elektronik devre yardımıyla AC dalga biçimine dönüştürülür. Farklı tipte eviriciler bulunmaktadır.

- Kare dalga eviriciler, kare dalga çıkışı üretir. Genellikle diğer eviricilere göre verimi daha düşüktür fakat daha ekonomiktir. Akkor ampuller, ısınmak için kullanılan cihazlar ve taşınabilir elektrikli aletler gibi dirençli yükler için uygundur.
- Düzenlenmiş Sinüs dalga eviriciler, kare dalga eviricilere göre daha verimlidir ve sinüs dalgasına daha yakın bir gerilim üretir. Evlerde kullanılan çoğu elektrikli aletlere istenilen gücü sağlarlar. Gürültülü çalışmaları ve bazı elektronik cihazlar için uygun olmamaları dezavantajlarıdır.
- Saf sinüs dalga eviriciler, diğer evirici türlerine göre sinüs dalgasına en yakın gerilimi üretirler. Hayatın birçok alanında kullanılan hassas elektronik ekipmanlar ve motorlu cihazlar da dahil olmak üzere çoğu cihaz için uygundur. Diğer türlere göre çok daha verimlidir. Fakat ekonomik olarak en pahalı evirici türüdür.

Eviriciler, asenkron motorların hız kontrol yönteminde de kullanılmaktadır (Bharti ve diğ., 2019).

Tek fazlı, üç fazlı ve çok seviyeli eviriciler olmak üzere üçe ayrılırlar. Bir fazlı eviriciler, daha düşük güç ve gerilim uygulamalarında kullanılmaktadır. Bir fazlı kesintisiz güç kaynağı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç fazlı eviriciler, yüksek güç ve gerilim gerektiren uygulamalar için daha uygundur. Çok seviyeli eviriciler, daha düşük gürültüye sahip olmaları ve düşük frekanslardaki etkinlikleri nedeniyle güç elektroniği uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir (Ikonen ve diğ., 2006).

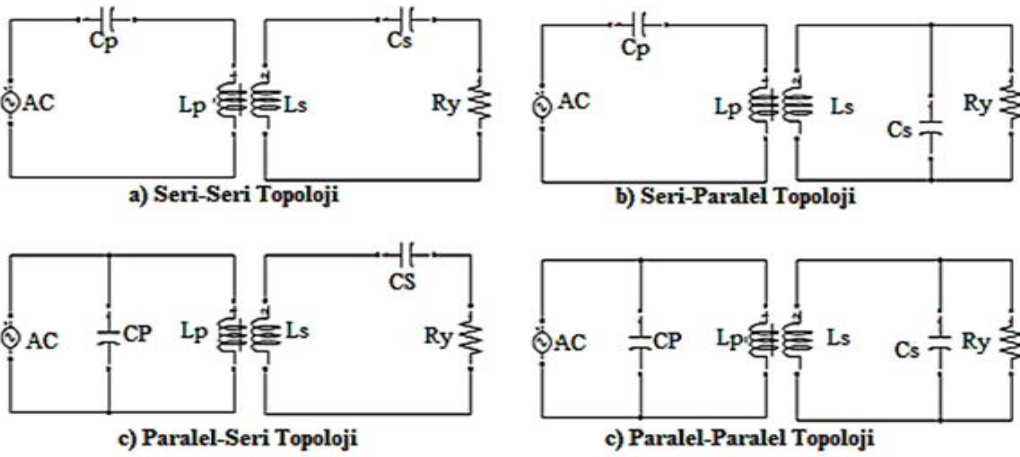
2.2. Rezonans Devre Yapısı ve Kompanzasyon Topolojileri

Kablosuz güç transferinde devrede direnç, bobin, kapasite gibi devre elemanları bulunmaktadır. Endüktif ve Kapasitif reaktans değerlerinin birbirine eşit olduğu durum (Denklem 2.1) rezonans durumu olarak kabul edilir. Rezonans frekansı da bu iki değer birbirine eşitlenerek (Denklem 2.2) bulunabilir.

$$X_L = X_C \quad (2.1)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.2)$$

Güç iletim sisteminde sistemi kompanze etmek için hem alıcı tarafta hem de verici tarafta kompanzasyon devresi bulunur. Bu kompanzasyon devresi yalnızca sistemi kompanze etmez aynı zamanda besleme akımını ve yük gerilimini düzenler. Literatürde birçok kompanzasyon çeşidi bulunmaktadır. Verici ve alıcı taraftaki kompanzasyon kapasitelerinin bağlantı şekline göre seri-seri, seri-paralel, paralel-seri ve paralel-paralel kompanzasyon türleri bulunur.



Şekil 2.3. Kompanzasyon Topolojileri (Kızıldağ ve Yılmaz, 2021)

Seri-seri kompanzasyon topolojisinde yük gerilimi sabit tutulup, yük akımını değiştirilerek çıkış gücü kontrol edilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle çalışmada seri-seri kompanzasyon topolojisi kullanılmıştır.

$$C_P = \frac{1}{\omega_0^2 L_P} \quad (2.3)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) kullanılarak verici ve alıcı taraftaki kapasite değerleri hesaplanır.

2.3. Endüktans Değerinin Belirlenmesi

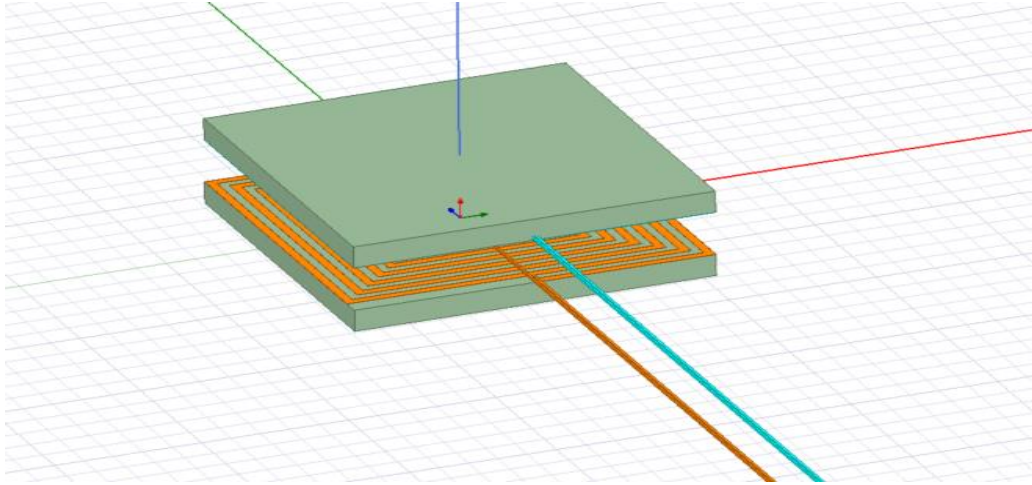
Endüktif kablosuz güç transferi için sistemde iki adet karşılıklı bobin bulunmalıdır. Bu bobinlerin endüktans değerleri, istenen rezonans frekansa ve bobinler arası mesafeye bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan self endüktans değerleri ve kuplaj katsayısı (k) Ansys/Maxwell programında tasarlanıp hesaplanmıştır. Belirlenen endüktans değeri ve kuplaj katsayısı ile Denklem (2.5)'ten faydalanılarak ortak endüktans değeri bulunmuştur.

$$M = k \cdot \sqrt{L_P \cdot L_s} \quad (2.5)$$

2.4. Bobin Tasarımı

Kablosuz güç transfer sisteminde endüktans tasarımı yapılırken sarım sayıları, ortak endüktans, kuplaj katsayısı dikkate alınmalıdır. Yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda kare ve dairesel bobin tasarımlarında, kare bobin yapısında kuplaj katsayısının daha yüksek çıktığı görülmektedir (Li ve diğ., 2017). Bu sebepten dolayı Ansys/Maxwell programında yapılan bobin tasarımında kare bobin yapısı kullanılmıştır.

Tasarlanan karşılıklı bobinler için mesafe, frekans, ferromanyetik plaka kesiti parametrelerine göre kuplaj katsayısı incelenerek, en yüksek kuplaj katsayısına sahip endüktans değeri belirlenerek, Matlab/Simulink programında kurulan modelde kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Tam hizalanmış eşit ferromanyetik plakalara sahip bobin tasarımı

Şekil 2.4'te sarım sayısı 10, sarımlar arası mesafe 6 mm, sarım kesitinin 3 mm olduğu karşılıklı kare bobin tasarımı görülmektedir. Alıcı ve verici bobini saran, geçirgenlik katsayısı 1000 ve boyutları 12cm x 12cm olan 10mm kalınlıktaki ferromanyetik plakalar bulunmaktadır.

Tablo 2.1. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 20$ mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,39003
35	0,388928
60	0,387716
85	0,386843

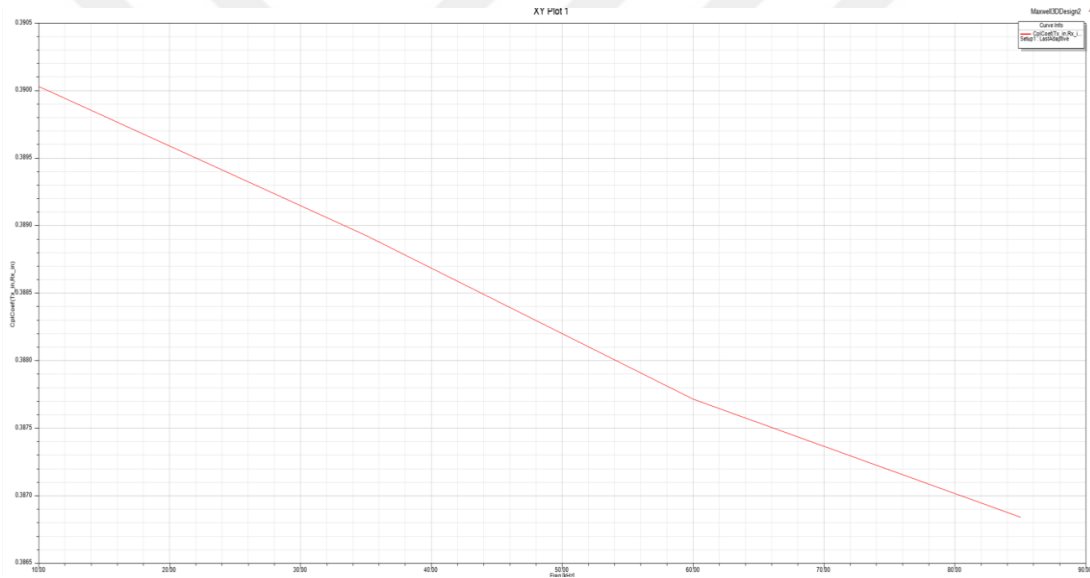
Tablo 2.1'de aralarındaki mesafe 20 mm olan iki karşılıklı bobinin değişken rezonans frekansına göre kuplaj katsayısının değişimi görülmektedir. 10 kHz frekans değerinde kuplaj katsayısının en büyük, 85 kHz'de ise en küçük değerde olduğu görülmektedir. Frekans değişiminin, kuplaj katsayı değişimine büyük oranda etkisinin olmadığı bulunmuştur.

Tablo 2.2. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri ($z = 20$ mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μ H)	Ortak Endüktans (μ H)	Tx_Self Endüktans (μ H)
10	35,321421	8,702181	14,09358
35	35,24018	8,642754	14,012914
60	35,163362	8,583097	13,936997
85	35,111815	8,541821	13,886008

Tablo 2.2’de çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 35,32 μH , verici bobin endüktansı 14,09 μH , ortak endüktans değeri ise 8,702181 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 35,11 μH , verici bobin endüktansı 13,886 μH , ortak endüktans değeri ise 8,541821 μH olarak bulunduğu görülmektedir. Ansys/Maxwell programındaki Eddy Current analizi sonucu bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansa göre elde edilen değerler arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Şekil 2.5’te ise değişen rezonans frekansına göre bulunan kuplaj katsayıları görülmektedir.



Şekil 2.5. Değişken frekansa göre kuplaj katsayısı değişimi ($z = 20 \text{ mm}$)

Tablo 2.3. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 30 \text{ mm}$)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,27025
35	0,269705
60	0,269116
85	0,268701

Tablo 2.3’te karşılıklı bobinler arası mesafenin 30 mm olduğu tasarımda hesaplanan kuplaj katsayıları görülmektedir. Rezonans frekans 10 kHz iken kuplaj katsayısı 0,27025, 85 kHz iken ise 0,268701 bulunmuştur.

Tablo 2.4. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 30 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	34,015224	5,582672	12,545269
35	33,961311	5,554355	12,488308
60	33,915631	5,528005	12,441089
85	33,886964	5,510639	12,411773

Tablo 2.4'te çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 34,301 μH, verici bobin endüktansı 12,545 μH, ortak endüktans değeri ise 5,582672 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 33,887 μH, verici bobin endüktansı 12,411 μH, ortak endüktans değeri ise 5,510639 μH olarak bulunduğu görülmektedir. Ansys/Maxwell programındaki Eddy Current analizi sonucu bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansa göre elde edilen değerler arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Karşılıklı bobinler arası mesafenin (z) 20 mm olduğu durumda 85 kHz rezonans frekansına göre bulunan kuplaj katsayısının 0,386843, mesafenin 30 mm olduğu durumda ise kuplaj katsayısının 0,268701 olduğu görülmektedir. Karşılıklı bobinler arası mesafenin artması durumunda hesaplanan kuplaj katsayıları arasında önemli fark olduğu görülmektedir.

Tablo 2.5. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları (z = 40 mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,19285
35	0,19249
60	0,192099
85	0,191824

Tablo 2.5'te aralarındaki mesafe 40 mm olan iki karşılıklı bobinin değişken rezonans frekansına göre kuplaj katsayısının değişimi görülmektedir. En büyük rezonans frekansı ile en küçük rezonans frekansında bulunan kuplaj katsayılarının arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir.

Tablo 2.6. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 40 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	33,211321	3,846079	11,975949
35	33,164573	3,828395	11,927252
60	33,124231	3,812186	11,88913
85	33,098474	3,801596	11,866362

Tablo 2.6’da çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 33,211 μH, verici bobin endüktansı 11,975 μH, ortak endüktans değeri ise 3,884079 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 33,098 μH, verici bobin endüktansı 11,866 μH, ortak endüktans değeri ise 3,801596 μH olarak bulunduğu görülmektedir.

Karşılıklı bobinler arası mesafenin (z) 40 mm olduğu durumda Ansys/Maxwell programındaki Eddy Current analizi sonucu bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansa göre elde edilen değerler arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 2.7. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları (z = 50 mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,140501
35	0,140248
60	0,139966
85	0,139766

Tablo 2.7’de iki bobin arası mesafenin 50 mm olduğu durumda bulunan kuplaj katsayıları görülmektedir. Değiştirilen rezonans frekansın kuplaj katsayısına büyük etkisi olmadığı bu durumda da görülmektedir.

Tablo 2.8. Değişken frekansa göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 50 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	32,753194	2,724458	11,480154
35	32,707741	2,712747	11,438671
60	32,669226	2,701482	11,402949
85	32,645066	2,693935	11,380352

Karşılıklı bobinler arası mesafenin 50 mm olduğu durumda, 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 32,753 μH , verici bobin endüktansı 11,480 μH , ortak endüktans değeri ise 2,724458 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 32,645 μH , verici bobin endüktansı 11,380 μH , ortak endüktans değeri ise 2,693935 μH olarak bulunmaktadır.

İncelenen tüm durumlarda değişen rezonans frekanslara göre bulunan kuplaj katsayısının çok küçük oranda değiştiği görülmektedir. Mesafe arttıkça kuplaj katsayısının değeri azalarak sifira yaklaşmaktadır. Kablosuz şarj sistemi için en yüksek kuplaj katsayısına sahip karşılıklı bobin tasarımı yapılmaya çalışılmıştır.

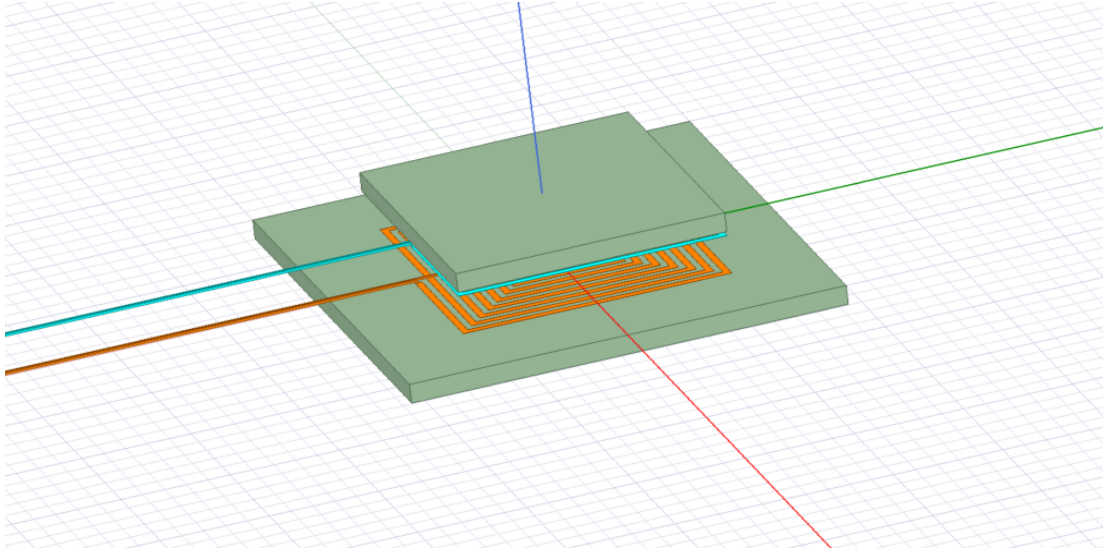
Kablosuz güç iletimi için uluslararası standart kabul edilen SAE J2954 referans alınarak rezonans frekansı 85 kHz olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.9'da, rezonans frekansı 85 kHz seçilen karşılıklı iki bobinin arasındaki mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları görülmektedir.

Tablo 2.9. Mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları

Mesafe (mm)	Kuplaj Katsayısı
20	0,386843
30	0,268701
40	0,192099
50	0,139766
60	0,10332
70	0,076518
80	0,058986
90	0,045409
100	0,037563

Karşılıklı iki bobin arasındaki mesafenin 20 mm olduğu durumda kuplaj katsayısı, tasarımdaki en yüksek değer olan 0,386843 olarak hesaplanmıştır. Mesafe arttıkça kuplaj (k) katsayısı doğrusal olmayan şekilde azalmaktadır. Mesafenin 100 mm olduğu durumda ise en düşük değer olan 0,037563 olarak bulunmaktadır. Bobinler arası mesafe arttıkça kablosuz güç transferindeki verimin düştüğü görülmektedir.



Şekil 2.6. Tam hizalanmış farklı ferromanyetik plakalara sahip bobin tasarımı

Şekil 2.6'da sarım sayısı 10, sarımlar arası mesafe 6 mm, sarım kesidinin 3 mm olduğu karşılıklı kare bobin tasarımı görülmektedir. Alıcı bobini saran geçirgenlik katsayısı 1000 olan ferromanyetik plaka, 12 cm x 12 cm boyutunda ve 10mm kalınlığındadır. Verici bobini saran geçirgenlik katsayısı 1000 olan ferromanyetik plaka ise 20 cm x 20 cm boyutunda, 10 mm kalınlığındadır.

Şekil 2.4'teki bobin tasarımı ile Şekil 2.6'daki bobin tasarımı arasındaki fark, verici bobini saran ferromanyetik plaka boyutlarıdır.

Tablo 2.10. Değişken frekansa göre hesaplanan kuplaj katsayıları ($z = 20$ mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,643548
35	0,643214
60	0,642514
85	0,641780

Tablo 2.10'da aralarındaki mesafe 20 mm olan, farklı boyutlarda ferromanyetik plakalara sahip karşılıklı iki bobinin değişken rezonans frekansına göre kuplaj katsayısının değişimi görülmektedir.

10 kHz frekans değerinde kuplaj katsayısının 0,643548, 85 kHz'de ise 0,641780 olduğu görülmektedir. Frekans değişiminin, kuplaj katsayı değişimine büyük oranda etkisinin olmadığı bulunmuştur.

Tablo 2.11. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 20 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	13,446646	9,163968	15,079649
35	13,382216	9,112559	14,998271
60	13,311347	9,055112	14,921109
85	13,250560	9,006877	14,864222

Tablo 2.11’de çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 13,446 μH, verici bobin endüktansı 15,079 μH, ortak endüktans değeri ise 9,163968 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 13,250560 μH, verici bobin endüktansı 14,864 μH, ortak endüktans değeri ise 9,006877 μH olarak bulunduğu görülmektedir. Analiz sonucu bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansa göre elde edilen endüktans değerleri arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 2.12. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları (z = 30 mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,479978
35	0,479830
60	0,479335
85	0,478786

Tablo 2.12’de karşılıklı bobinler arası mesafenin 30 mm olduğu tasarımda hesaplanan kuplaj katsayıları görülmektedir. Rezonans frekans 10 kHz’de iken kuplaj katsayısı 0,479978, 85 kHz’de ise 0,478786 bulunmuştur.

Tablo 2.13. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 30 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	11,627822	5,984756	13,370629
35	11,582801	5,957212	13,307555
60	11,533178	5,925607	13,250671
85	11,490785	5,899189	13,211505

Tablo 2.13'te çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 11,627 μH , verici bobin endüktansı 13,37 μH , ortak endüktans değeri ise 5,984756 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 11,490 μH , verici bobin endüktansı 13,211 μH , ortak endüktans değeri ise 5,889189 μH olarak bulunduğu görülmektedir. Analiz sonucu bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansına göre elde edilen değerler arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Karşılıklı bobinler arası mesafenin (z) 20 mm olduğu durumda 85 kHz rezonans frekansına göre bulunan kuplaj katsayısının 0,641780, mesafenin 30 mm olduğu durumda ise kuplaj katsayısının 0,478786 olduğu görülmektedir. Karşılıklı bobinler arası mesafenin artması durumunda hesaplanan kuplaj katsayıları arasında önemli fark olduğu görülmektedir.

Tablo 2.14. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları (z = 40 mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,353226
35	0,353260
60	0,353008
85	0,352688

Tablo 2.14'te aralarındaki mesafe 40 mm olan iki karşılıklı bobinin değişken rezonans frekansına göre kuplaj katsayısının değişimi görülmektedir. En büyük rezonans frekansı ile en küçük rezonans frekansında bulunan kuplaj katsayılarının arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir.

Tablo 2.15. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 40 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	10,924369	4,161055	12,702955
35	10,882469	4,144660	12,649124
60	10,840255	4,126400	12,604709
85	10,805517	4,111368	12,576092

Tablo 2.15'te çeşitli rezonans frekansına göre hesaplanan endüktans değerleri gösterilmektedir. 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 10,924 μH , verici bobin endüktansı 12,7029 μH , ortak endüktans değeri ise 4,161055 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 10,805 μH , verici bobin endüktansı 12,576 μH , ortak endüktans değeri ise 4,111368 μH olarak bulunduğu görülmektedir.

Karşılıklı bobinler arası mesafenin (z) 40 mm, farklı boyutlardaki ferromanyetik plakaların olduğu durumda bulunan değerler incelendiğinde, tasarımda kullanılan rezonans frekansa göre elde edilen değerler arasında büyük fark olmadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 2.16. Değişken frekans, farklı ferromanyetik plakalara göre kuplaj katsayıları (z = 50 mm)

Frekans (kHz)	Kuplaj Katsayısı
10	0,264064
35	0,263969
60	0,263738
85	0,263487

Tablo 2.16'da iki bobin arası mesafenin 50 mm olduğu durumdaki kuplaj katsayıları görülmektedir. Değiştirilen rezonans frekansın kuplaj katsayısına büyük etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 2.17. Değişken frekans, farklı ferromanyetik boyutta plakalara göre hesaplanan endüktans değerleri (z = 50 mm)

Frekans (kHz)	Rx_Self Endüktans (μH)	Ortak Endüktans (μH)	Tx_Self Endüktans (μH)
10	10,393168	2,990893	12,343424
35	10,360976	2,979310	12,294917
60	10,325262	2,966584	12,253667
85	10,294053	2,956093	12,227276

Karşılıklı bobinler arası mesafenin 50 mm olduğu durumda, 10 kHz rezonans frekansında alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 10,393168 μH , verici bobin endüktansı 12,343 μH , ortak endüktans değeri ise 2,990893 μH olarak hesaplanmıştır. 85 kHz rezonans

frekansında ise alıcı bobin endüktansı yaklaşık olarak 10,393 μH , verici bobin endüktansı 12,2272 μH , ortak endüktans değeri ise 2,956093 μH olarak bulunmaktadır.

Farklı ferromanyetik plakalara sahip karşılıklı bobin tasarımında, incelenen tüm durumlarda farklı rezonans frekanslara göre bulunan kuplaj katsayılarının çok küçük oranda değiştiği görülmektedir. Mesafe arttıkça kuplaj katsayısının değeri azalarak sıfıra yaklaşmaktadır.

Bu tasarımda da rezonans frekansı 85 kHz olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.18’de rezonans frekansı 85 kHz seçilen, farklı boyutta plakalara sahip karşılıklı iki bobinin arasındaki mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları gösterilmektedir.

Tablo 2.18. Mesafeye göre hesaplanan kuplaj katsayıları

Mesafe (mm)	Kuplaj Katsayısı
20	0,641780
30	0,478786
40	0,352688
50	0,263487
60	0,197552
70	0,150243
80	0,115267
90	0,089803
100	0,070645

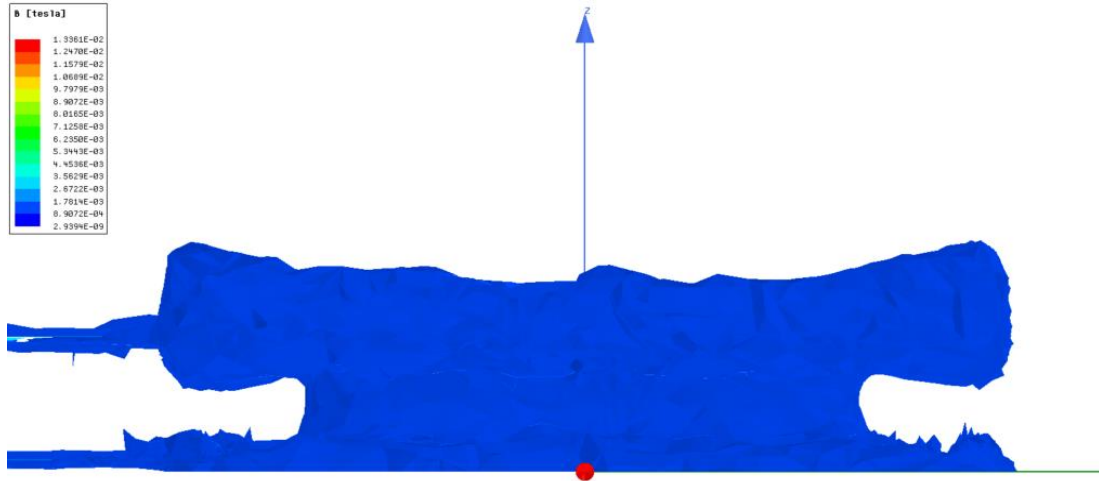
Karşılıklı iki bobin arasındaki mesafenin 20 mm olduğu durumda kuplaj katsayısı, tasarımdaki en yüksek değer olan 0,641780 olarak hesaplanmıştır. Mesafe arttıkça kuplaj (k) katsayısı nonlineer olarak azalmaktadır. Mesafenin 100 mm olduğu durumda ise en düşük değer olan 0,070645 olarak bulunmaktadır. Bobinler arası mesafe arttıkça kablosuz güç transferindeki verimin düştüğü görülmektedir.

Tablo 2.9 ve Tablo 2.18’de karşılıklı iki bobinin, eşit ve farklı ferromanyetik plakalara sahip olduğunda kuplaj katsayılarının değişimi görülmektedir. Mesafe 20 mm olduğu her iki durumda eşit boyuttaki plaka tasarımında kuplaj katsayısı 0,386843, farklı boyuttaki plaka tasarımında ise 0,641780 olmaktadır. Verici taraftaki ferromanyetik plakanın boyutu büyütüldüğünde kablosuz güç transferindeki verim artmaktadır.

Tablo 2.19. Karşılıklı endüktans iç direnç değerleri

Frekans (kHz)	Verici bobin R (mOhm)	Alıcı Bobin R (mOhm)	Ortak Endüktans R (mOhm)
85	311,03615	323,80993	86,08115

Tablo 2.19’da Ansys/Maxwell programında tasarlanan karşılıklı bobinlerin iç direnç değerleri gösterilmektedir. Matlab/Simulinkte tasarlanan modelde, bulunan iç direnç değerleri kullanılarak gerçeğe daha yakın bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde endüktans iç direnç değerleri kullanılarak ve ihmal edilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

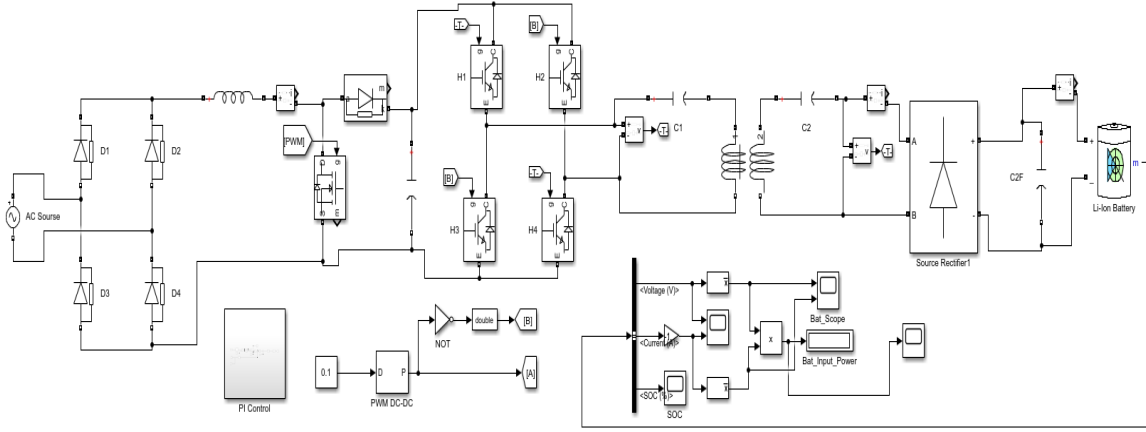


Şekil 2.7. Farklı ferromanyetik plakalara sahip iki bobin arasındaki akı yoğunluğu

Şekil 2.7’de ise tam hizalanmış farklı ferromanyetik plakalara karşılıklı iki bobin arasındaki manyetik akı yoğunluğu görülmektedir.

3. KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMİ MODELLEMESİ

Kablosuz güç transfer (KGT) sistemi temelde doğrultulan şebeke geriliminin istenen rezonans frekansta evirilmesi, evirilen gerilimin kablosuz bir şekilde alıcı tarafa ulaştırılmasını amaçlamaktadır. Karşılıklı endüktans tasarımında birçok çeşit endüktans tipi bulunmaktadır. Sistemde kullanılacak endüktans için Ansys/Maxwell programında tasarlanan kare tip bobin seçilmiştir.



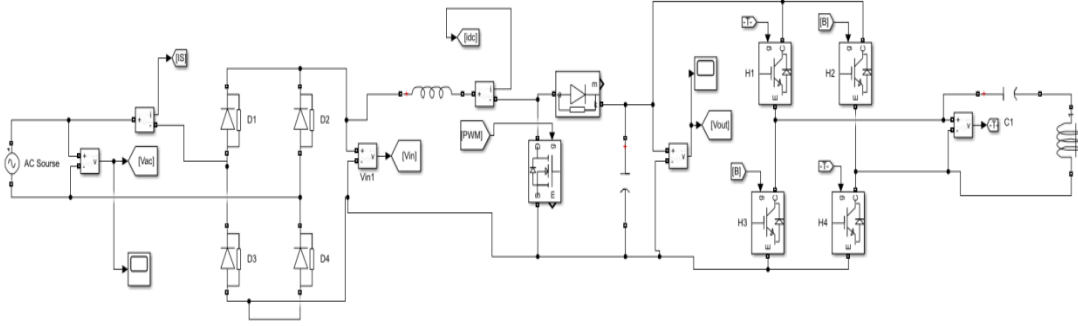
Şekil 3.1. Kablosuz güç transfer (KGT) sistemi

Şekil 3.1’de Matlab/Simulink’te tasarlanan kablosuz güç transfer sistemi modellemesi gösterilmektedir. Verici devre tarafında doğrultucu, PI kontrollü aktif yükseltici tip güç katsayısı düzeltme devresi ve evirici bulunmaktadır. Alıcı devre tarafında ise evrilen gerilimi doğrultmak için 1 adet doğrultucu bulunmaktadır. Doğrultulan DC gerilim ile Li-ion batarya şarj edilmektedir.

3.1. Verici Devre Yapısı

Kablosuz güç transfer sisteminde temel çalışma prensibi olarak önce şebeke gerilimi doğrultulur, doğrultulan şebeke gerilimi evirici yardımıyla istenen rezonans frekansına evrilir. KGT’nin verici devre yapısında 1 adet doğrultucu, 1 adet evirici ve 1 adet PI kontrollü yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresi kullanılmıştır. PI kontrollü yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresi ile çıkış gerilimi 360 V seviyesine sabitlenmiştir.

Ansys/Maxwell programında hesaplanan endüktans değerleri bu simülasyonda kullanılmıştır.

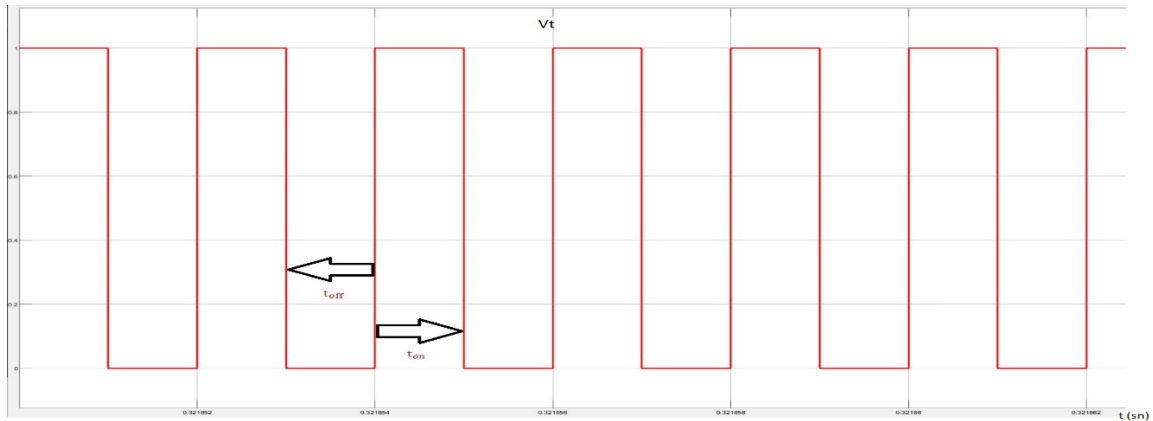


Şekil 3.2. Kablosuz güç transferi verici devre yapısı

3.2. Güç Faktörü Düzeltme Devresi

Elektrikli araçların sistemlerinde güç faktörü düzeltme devreleri kullanılmaktadır. Tasarımda, güç faktörü düzeltme devrelerinin en yaygın olanı aktif yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresi kullanılmıştır. Şekil 3.4'te aktif güç faktörü düzeltme devresinin yapısı görülmektedir. İlk olarak AC şebeke gerilimi doğrultulur, anahtarlama elemanı kontrol edilerek, endüktansın şarj ve deşarj durumları giriş akımının giriş gerilimini takip etmesini sağlar (Özdentürk ve Akkaya, 2020).

Darbe genişlik ayarı (DGA) yapılarak elde edilen sinyaller ile anahtarlama elemanı kontrol edilir. Şekil 3.4'te PI kontrollü, çıkış gerilimi 360 V referans alınan bir darbe genişlik sinyali üretilmiştir. Şekil 3.3'te ise darbe genişlik ayarı ile elde edilen anahtar sinyalleri gösterilmektedir.



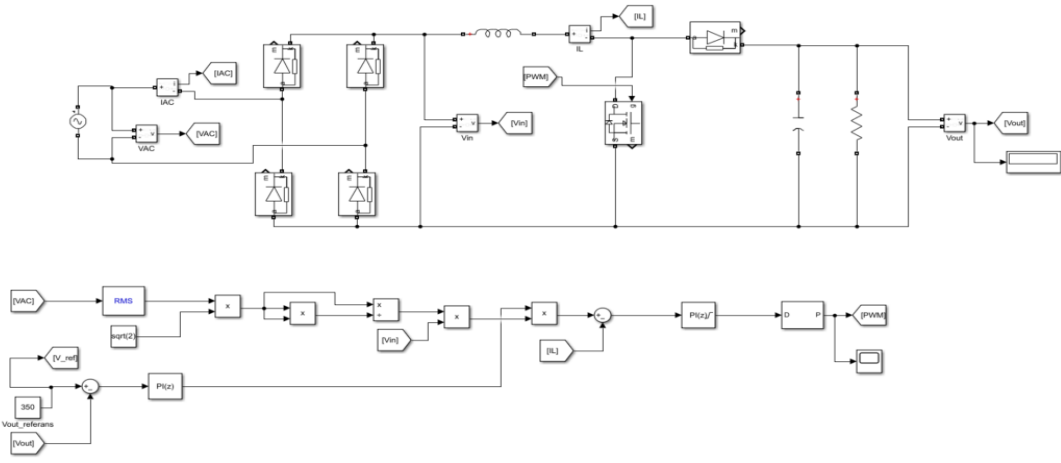
Şekil 3.3. Darbe Genişlik Ayarı (DGA) anahtarlama sinyalleri

Burada t_{on} anahtarın iletimde kalma süresini, t_{off} ise anahtarın kesimde kaldığı süreyi göstermektedir. İletimde kalma süresi ve kesimde kalma süresinin toplamı periyoda (T) eşittir.

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de D, doluluk oranı (Duty Cycle) olarak isimlendirilmiştir. Çıkış geriliminin istenenden daha düşük olması durumunda doluluk oranı artırılarak anahtarın iletimde kalma süresi artırılır ve çıkış gerilimi yükseltilir. Çıkış geriliminin istenenden yüksek olması durumunda ise doluluk oranı azaltılarak anahtarın kesimde kalma süresi artırılır ve çıkış gerilimi daha düşük değerlere regüle edilir.



Şekil 3.4. PI kontrollü aktif güç faktörü düzeltme devresi

Aktif yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresinde kullanılan eleman değerlerinin belirlenmesi, güç faktörünün uygun şekilde düzeltilmesi ve sistemin verimi açısından oldukça önemlidir. Yükseltici endüktans ve kondansatör değerleri Denklem (3.3),... (3.13) den faydalanılarak hesaplanabilir. PF güç faktörünü, f_s anahtarlama frekansını, ΔI_L akım dalgalanma oranını, P_g ve P_c giriş ve çıkış güçleri, λ bağıl iletimde kalma oranını, L endüktans değerini, Δt kondansatörün yükü besleme süresini, V_c ise çıkış gerilimidir.

Giriş gücü,

$$P_g = \frac{P_c}{\eta} \quad (3.3)$$

Giriş akımı,

$$I_g = \frac{P_\zeta}{\eta(V_{g(\text{eff})})PF} \quad (3.4)$$

Giriş akımının maksimum tepe değeri,

$$I_{g(\text{tepe})\text{max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{\zeta(\text{mak})}}{\eta_{\text{min}} (V_{g(\text{eff})\text{min}})} \quad (3.5)$$

Giriş akımının maksimum ortalama değeri,

$$I_{g(\text{ort})\text{max}} = \frac{2 \cdot I_{g(\text{tepe})\text{mak}}}{\pi} \quad (3.6)$$

Giriş geriliminin minimum tepe değeri,

$$V_{g(\text{tepe})\text{min}} = \sqrt{2} \cdot V_{g(\text{eff})\text{min}} \quad (3.7)$$

Bağlı iletim süresi,

$$\lambda = \frac{V_\zeta - V_{g(\text{tepe})\text{min}}}{V_\zeta} \quad (3.8)$$

İzin verilen akım dalgalanma miktarı,

$$\Delta I_L = \%I_L \cdot I_{g(\text{tepe})\text{mak}} \quad (3.9)$$

Akımın maksimum tepe değeri,

$$I_{L(\text{tepe})\text{mak}} = I_{g(\text{tepe})\text{mak}} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.10)$$

Endüktans değeri,

$$L = \frac{V_{g(\text{tepe})\text{min}} \cdot \lambda}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (3.11)$$

Kapasite değeri,

$$C=1,1\left(\frac{2.P_{\zeta}.\Delta t}{V_{\zeta}^2-V_{g(tepe)min}^2}\right) \quad (3.12)$$

PF (güç faktörü) ise,

$$PF=\frac{P}{S} \quad (3.13)$$

denklemlerinden bulunabilir (Akın 2012).

3.2.1. Güç Faktörü Düzeltme Devresi Simülasyonu

Şekil 3.4'teki Matlab/Simulinkte tasarlanan aktif yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresinin parametreleri, Tablo 3.1'de verilmiştir.

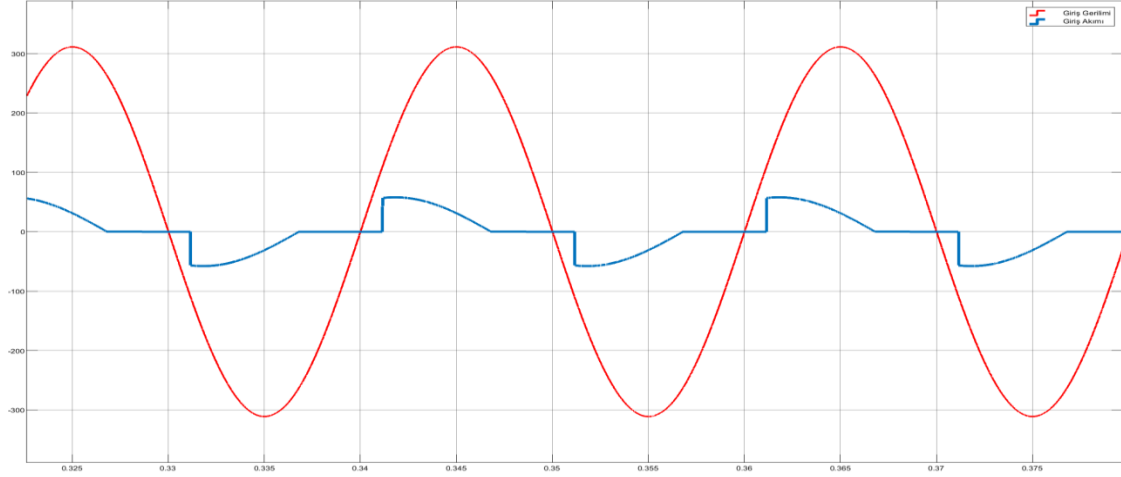
Tablo 3.1. Güç faktörü düzeltme devre parametreleri

V_{ζ}	360 V
V_g	311 V
V_{ref}	360 V
L	0,3 mH
C	2000 μ F
$R_{yük}$	80 ohm

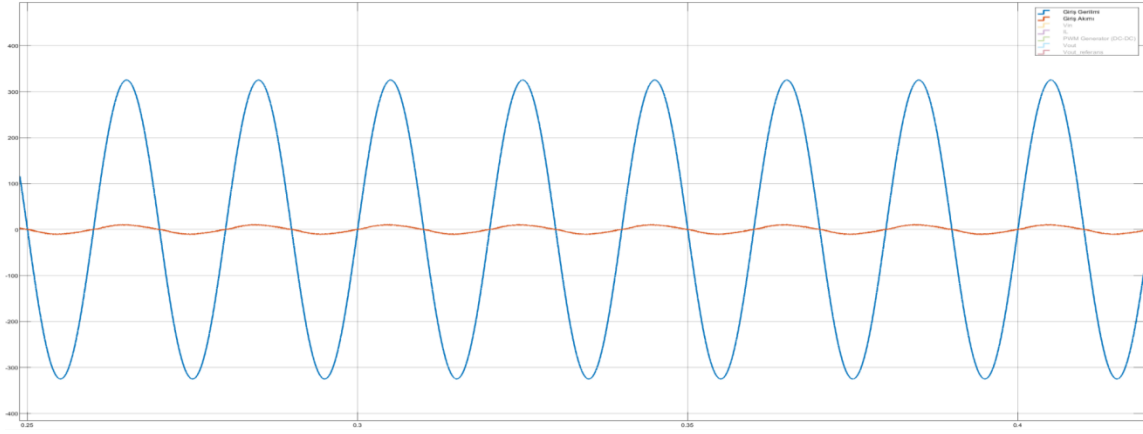
Anahtarlama frekansı 85 kHz seçilmiştir. Şekil 3.5'te güç faktörü düzeltme devresi yokken giriş akımı ve giriş geriliminin grafiği görülmektedir. Akım ve gerilim grafiklerinde, belirgin faz farkı vardır. Güç faktörü 0,92 olarak bulunmuştur. Akım tam sinüzoidal formda değildir, gerilim grafiğini takip etmesi için güç faktörü düzeltme devresine (PFC) ihtiyaç duyulmaktadır.

Kablosuz güç transfer sisteminin verici kısmına uygulanan yükseltici tip güç faktörü düzeltme devresi sayesinde çıkış gerilimi hedeflenen gerilim değerine sabitlemiş, akım ve gerilim grafikleri arasındaki faz farkı kaldırılmıştır.

Şekil 3.6'da güç faktörü düzeltme devresi uygulandığı durumda giriş akımı ve giriş geriliminin grafiği görülmektedir.

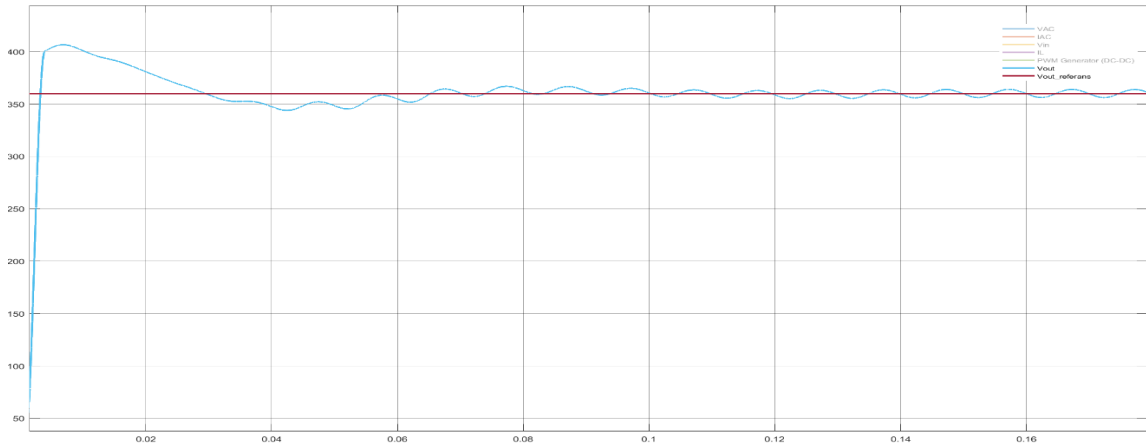


Şekil 3.5. PFC'siz kaynak gerilimi ve kaynak akımı



Şekil 3.6. PFC'li kaynak gerilimi ve kaynak akımı

Akım ve gerilim grafikleri birbirini takip etmektedir. Akım grafiği tam sinüzoidal forma yakındır, devrenin güç faktörü $PF = 0,99$ çıkmaktadır.



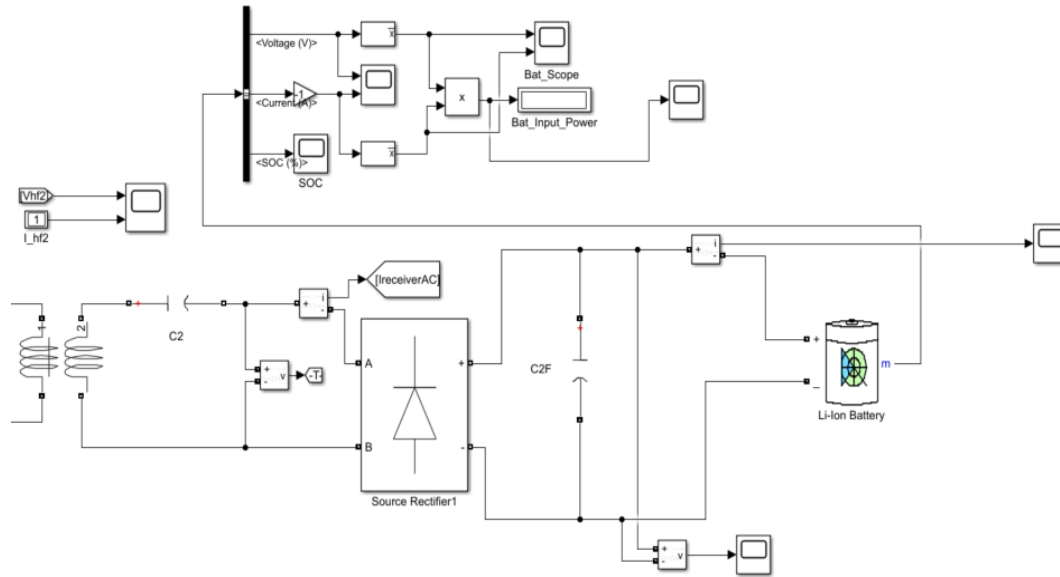
Şekil 3.7. PFC'li çıkış gerilimi ve referans gerilimi

Şekil 3.7’de PFC uygulanmış devredeki çıkış gerilimi ve referans gerilim grafiği görülmektedir. Referans gerilimi 360 V olarak belirlenmiştir. PI kontrolör sayesinde 311 V olan giriş gerilimi 360 V seviyesine yükseltilmiştir.

3.3. Alıcı Devre Yapısı

Verici devresinde istenilen rezonans frekansta evrilen AC gerilim, kablosuz olarak iletimi sonrasında alıcı devresi tarafında DC gerilime dönüştürülür. Verici devre yapısı bünyesinde 1 adet doğrultucu bulundurulur. Verici kısımdan iletilen gerilimi DC gerilime doğrultularak Li-ion bataryayı beslemektedir. Şekil 3.8’te alıcı devre yapısı gösterilmektedir. Doğrultucunun çıkışına paralel bağlanan kapasite harmonik filtre görevi yapmaktadır. Devre sonunda ise gerçek parametrelere göre modellenen Li-ion batarya paketi bulunmaktadır.

Modellenen batarya, nominal gerilimi 3,6 V, tam şarj gerilimi 4,2 V ve kesme gerilimi 2,7 V olan 100 adet Li-ion pillerin seri bağlanmasıyla oluşmaktadır.



Şekil 3.8. Kablosuz güç transferi alıcı devre yapısı

Bu pil değerlerinden yola çıkarak batarya paketinin nominal gerilimi 360 V, tam şarj gerilimi 420 V ve kesme gerilimi 270 V olarak belirlenmiştir.

3.4. Kablosuz Güç Transfer Sistemi Simülasyon Sonuçları

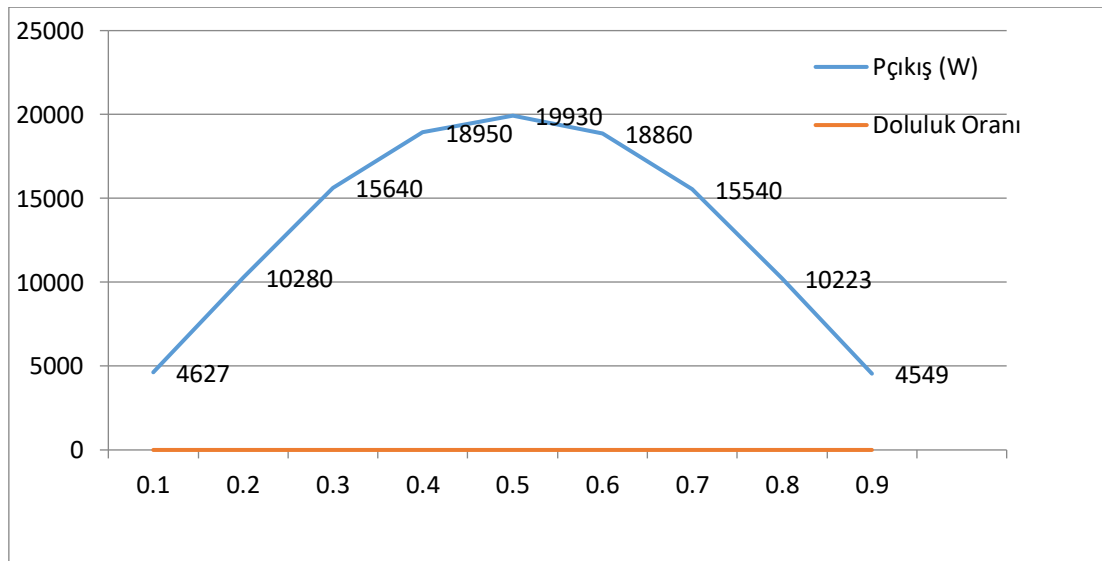
Kablosuz güç transfer sistemi modellemesinde kullanılan endüktanslar için Ansys/Maxwell programında yapılan bobin tasarımında endüktans değerleri, iç direnç değerleri ve kuplaj katsayısı dikkate alınmıştır. Bulunan değerler Şekil 3.1'deki KGT sistemi modelinde karşılıklı endüktans değerlerinde kullanılmıştır.

Sistemin doluluk oranı değiştirilerek çıkış gücü, giriş gücü, sistemin verimi, bataryanın akım, gerilim ve başlangıç şarj (SOC%) durumları kontrol edilmiştir.

Tablo 3.2. Doluluk oranına göre sistem parametreleri

Doluluk Oranı	Pgiriş (W)	Pçıkış (W)	Verim %	PF	Çıkış Akımı (A)
0,1	6193	4627	74,72	0,9999	12,1
0,2	12460	10280	82,48	0,9988	27,58
0,3	18790	15640	83,24	0,993	41,9
0,4	22560	18950	84,02	0,982	50,7
0,5	23410	19930	85,12	0,987	53,3
0,6	22490	18860	83,88	0,984	50,5
0,7	18700	15540	83,09	0,988	41,57
0,8	12395	10223	82,49	0,9989	27,45
0,9	6089	4549	74,71	0,9999	12,23

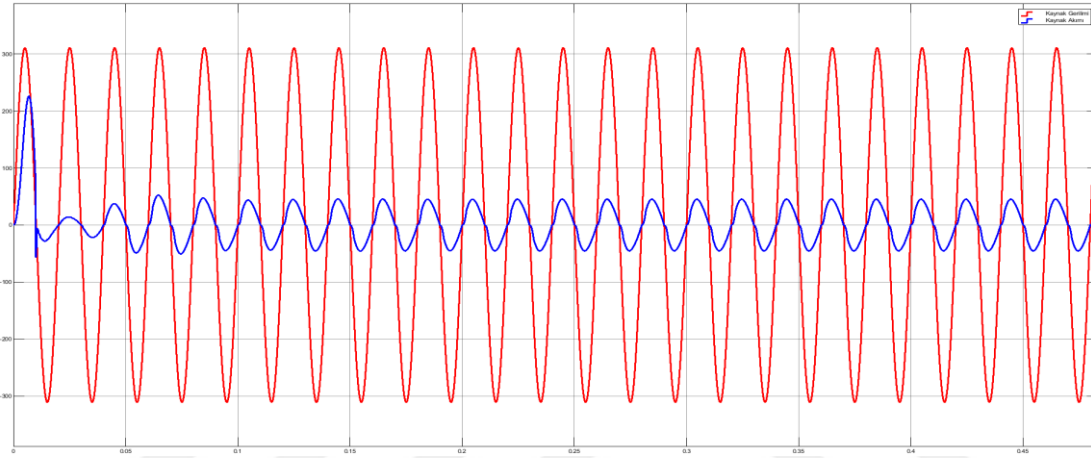
Tablo 3.2'de doluluk oranına göre sistemin giriş gücü, çıkış gücü, verim, çıkış akımı ve güç faktörü gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Doluluk oranına göre çıkış güçleri

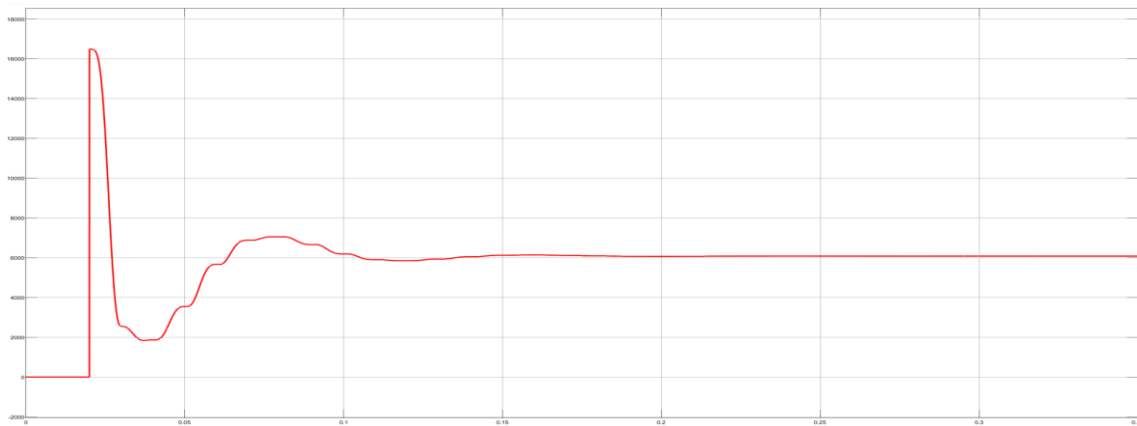
Şekil 3.9’da doluluk oranına göre sistemin çıkış güçleri gösterilmekte ve grafiğin simetrik olduğu görülmektedir.

$D=0,2$ ’deki çıkış gücü ile $D=0,8$ ’deki çıkış gücünün yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu, $D=0,3$ doluluk oranındaki çıkış gücünün de $D=0,7$ doluluk oranındaki çıkış gücüne neredeyse eşit olduğu görülmektedir. $D=0,5$ doluluk oranında, her iki alternanstaki dalga boyu genlikleri birbirine eşit olduğu için ortalama gerilim diğer durumlara göre daha yüksektir. Bu nedenle $D=0,5$ durumunda çıkış gücü en yüksektir.



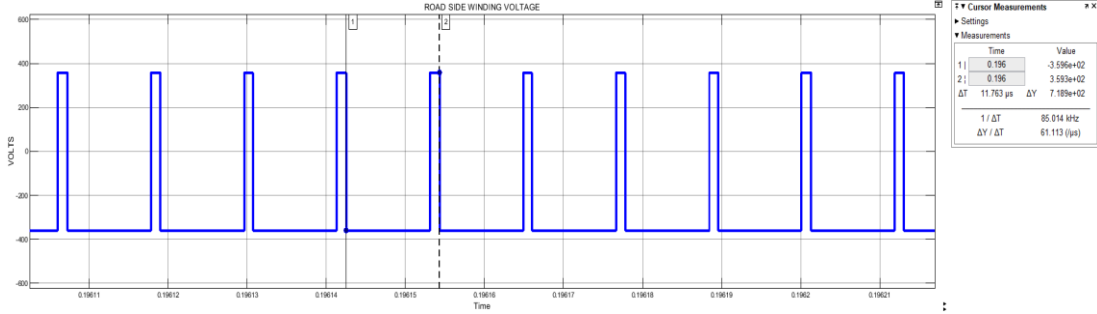
Şekil 3.10. $D=0,1$ doluluk oranına göre kaynak akımı ve kaynak gerilimi

Şekil 3.10’da $D=0,1$ doluluk oranına göre kaynağın akım ve gerilim grafikleri gösterilmektedir. Aktif yükseltici tip güç katsayısı düzeltme devresi kullanıldıktan sonra kaynak akımı ve gerilimi arasında faz farkı olmadığı, $D=0,1$ doluluk oranına göre kaynak akımının ortalama değeri 27,2 A, kaynak geriliminin tepe değeri ise 311 V olduğu görülmektedir.



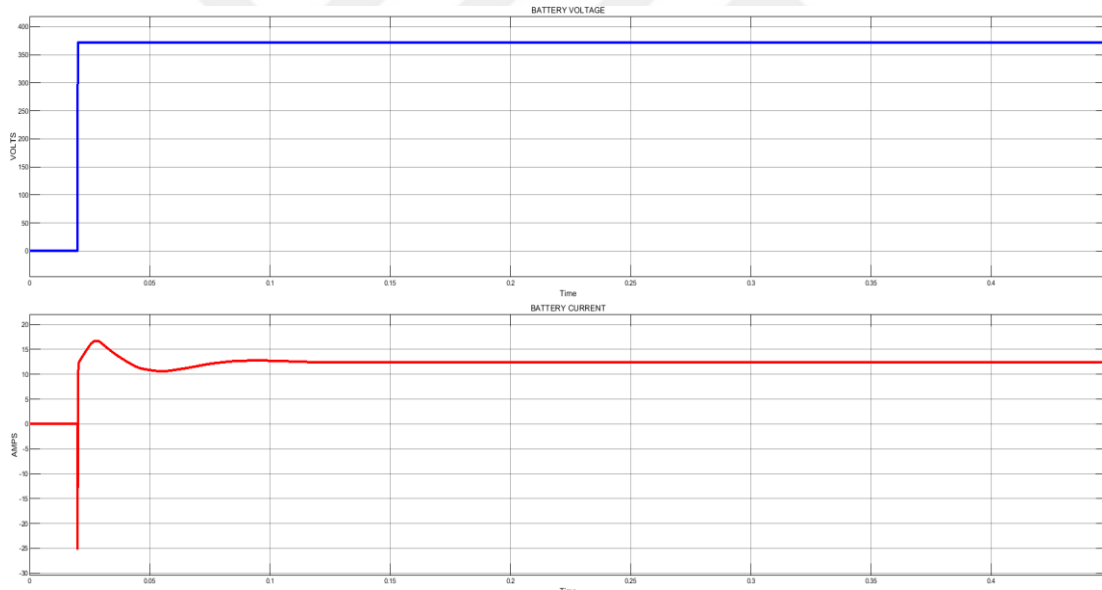
Şekil 3.11. $D=0,1$ doluluk oranına göre doğrultucu çıkış gücü

Şekil 3.11’de $D=0,1$ doluluk oranına göre doğrultucu çıkış gücü gösterilmektedir. Giriş gücü 6193 W olan doğrultucunun çıkış gücü 6162 W olduğu için doğrultucu verimi %99,49 olarak hesaplanmaktadır.



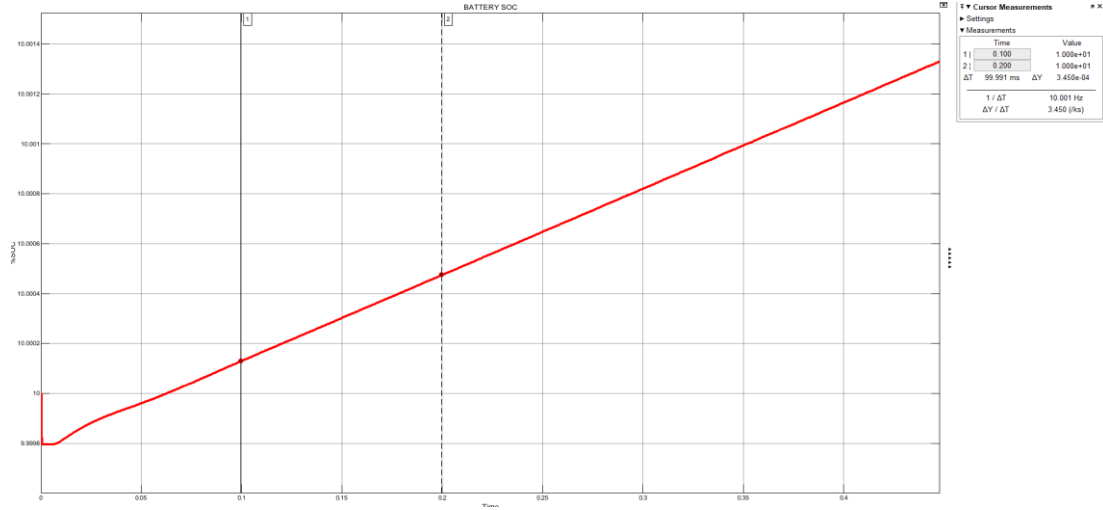
Şekil 3.12. $D=0,1$ doluluk oranına göre rezonans frekansa evrilen gerilim

Şekil 3.12’de istenilen rezonans frekansta evrilen gerilim grafiği gösterilmektedir. Grafikte doluluk oranının 0,1 ve frekansın 85 kHz olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13. $D=0,1$ doluluk oranına göre batarya akım ve gerilim grafikleri

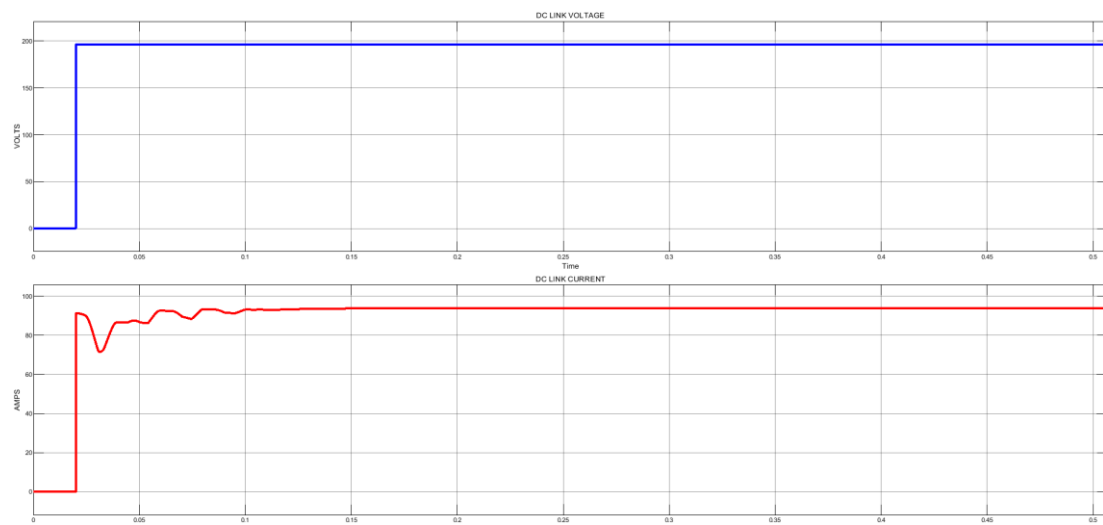
$D=0,1$ doluluk oranına göre batarya akımının 12,1 A, batarya geriliminin ise 372 V olduğu Şekil 3.13’te görülmektedir. Bu verilerden yola çıkarak kablosuz güç transfer sisteminin çıkış gücü, aynı zamanda batarya giriş gücü 4627 W çıkmaktadır. 6193 W giriş gücü, 4627 W çıkış gücüne sahip olan KGT sisteminin verimi %74,72 hesaplanmıştır. Şarj akımı 12,1 A, batarya şarj durumu (%SOC) %10 olan bir bataryanın dolum grafiği Şekil 3.14’te görülmektedir.



Şekil 3.14. D=0,1 doluluk oranına göre batarya şarj durumu

Şekil 3.14'e göre batarya 0,1 saniye sürede %0,000345 kadar şarj olmuştur. Bu veriden yola çıkarak 1 saniyede %0,00345, 1 dakikada %0,207, 1 saatte ise %12,42 kadar şarj olması beklenmektedir. Bataryanın %10 başlangıç şarj durumundan %80 şarj durumuna gelmesi için geçmesi gereken süre 5,63 saat ya da 338 dakika olarak hesaplanmaktadır.

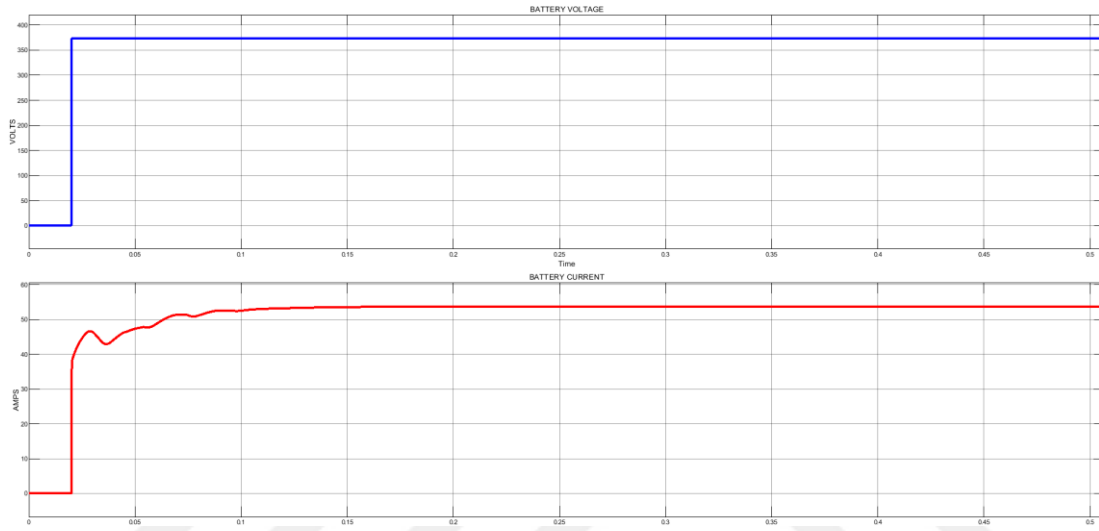
Tablo 3.4'e göre doluluk oranının 0,5 olması durumunda giriş gücü, çıkış gücü, sistem verimi ve çıkış akımının arttığı görülmektedir. Doluluk oranının 0,1 olduğu durumda batarya şarj akımı 12,1 A iken, D=0,5 olduğu durumda batarya şarj akımı 53,2 A olmaktadır. Batarya çıkış akımının daha yüksek olması batarya şarj süresinin daha az olması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.15. D=0,5 doluluk oranına göre doğrultulmuş kaynak gerilimi ve kaynak akımı

Şekil 3.15'te $D=0,5$ doluluk oranına göre doğrultulmuş kaynak akım ve kaynak gerilim grafikleri gösterilmektedir. Doğrultulan gerilim yaklaşık 196 V, akım ise 93,8 A olmaktadır. Giriş gücü 23520 W olan doğrultucunun çıkış gücü 18450 W olduğu için doğrultucu verimi %78,44 olarak hesaplanmaktadır.

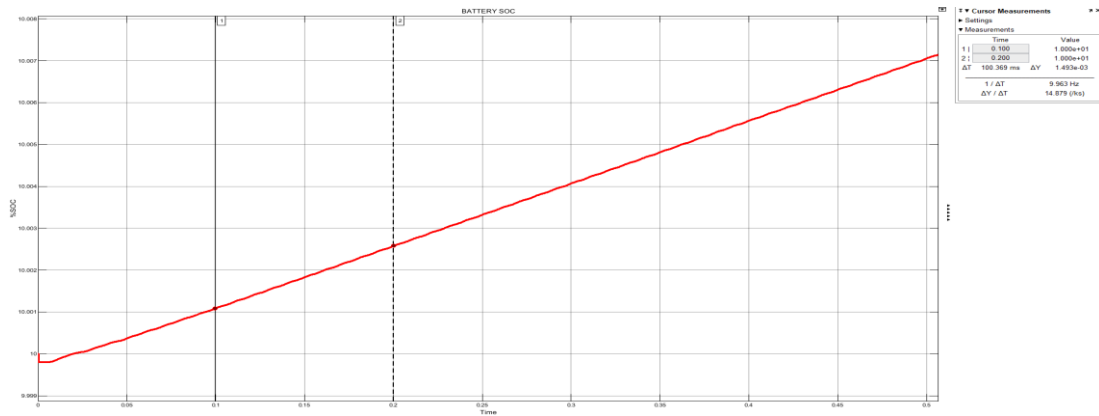
Tablo 3.2'ye göre $D=0,5$ olduğu durumda giriş gücü 23520 W, çıkış gücü ise 19930 W olduğu görülmektedir. Bu veriden yola çıkarak sistemin verimi %85,12 bulunmuştur.



Şekil 3.16. $D=0,5$ doluluk oranına göre batarya akım ve gerilim grafikleri

Şekil 3.16'ya göre $D=0,5$ olduğu durumda batarya şarj akımının 53,3 A, şarj geriliminin ise 372 V olduğu görülmektedir.

Doluluk oranı arttıkça batarya şarj akımı ve sistemin verimi artmıştır. 0,5 doluluk oranına göre batarya şarj durumu (SOC%) Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. $D=0,5$ doluluk oranına göre batarya şarj durumu

Şekil 3.17'e göre batarya 0,1 saniye sürede %0,001493 kadar şarj olmuştur. Bu veriden yola çıkarak 1 saniyede %0,01493, 1 dakikada %0,8958, 1 saatte ise %53,748 kadar şarj olması beklenmektedir. Bataryanın %10 başlangıç şarj durumundan %80 şarj durumuna gelmesi için geçmesi gereken süre 1,49 saat olarak hesaplanmaktadır.

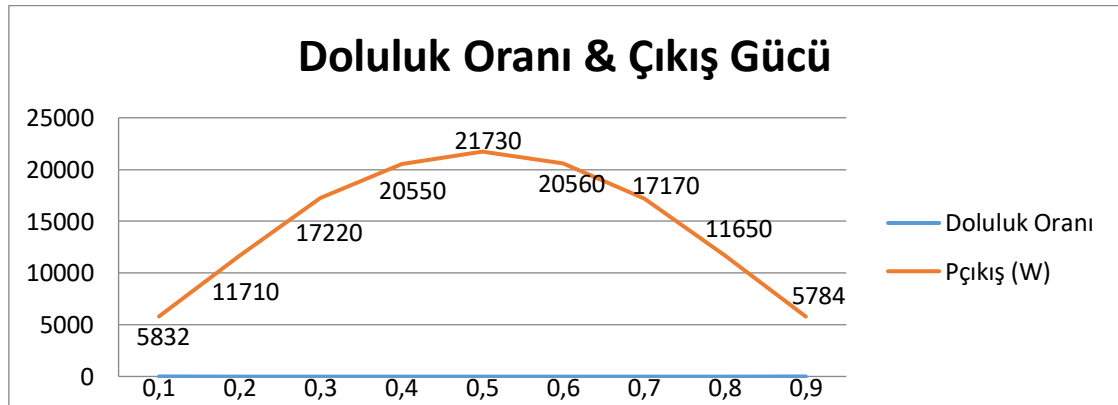
Sonuç olarak $D=0,5$ olduğu durumda şarj akımı 53,3 A ve şarj gerilimi 372 V olan bataryanın %10 doluluktan %80 seviyesine gelebilmesi için gereken şarj süresi 89,4 dakikadır.

Karşılıklı endüktansların iç dirençleri ihmal edildiğinde hesaplanan değerler Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemde doluluk oranına göre sistem parametreleri

Doluluk Oranı	Pgiriş (W)	Pçıkış (W)	Güç Faktörü	Batarya akımı (A)	Batarya Gerilimi (V)	Verim (%)
0,1	6060	5832	0,99	15,6	372	96,2
0,2	12040	11710	0,99	31,5	372	97,3
0,3	17710	17220	0,99	46,12	372	97,2
0,4	21170	20550	0,977	54,8	372	97,1
0,5	22336	21730	0,97	58,12	372	97,2
0,6	21160	20560	0,977	54,9	372	97,1
0,7	17650	17170	0,99	45,98	372	97,2
0,8	11980	11650	0,99	31,25	372	97,2
0,9	6010	5784	0,99	15,54	372	97,2

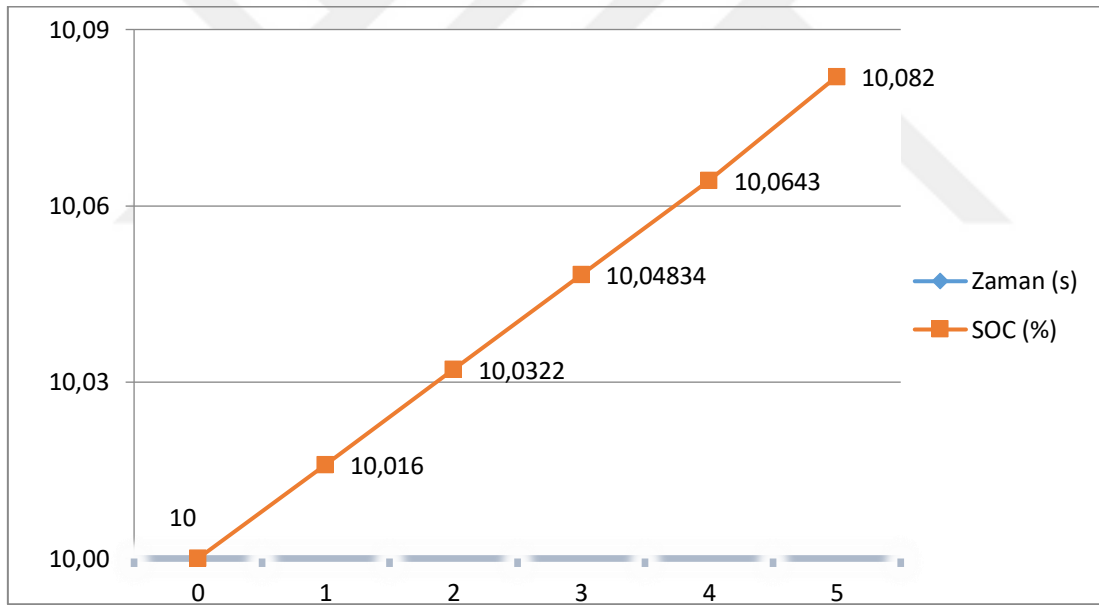
Tablo 3.3'teki parametrelere göre doluluk oranı 0,5'e yaklaştıkça çıkış gücü artmaktadır. Sistem veriminin tüm doluluk oranlarında yaklaşık olarak %97 olduğu görülmektedir.



Şekil 3.18. Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemde doluluk oranına göre çıkış güçleri

Tablo 3.3'teki parametrelerden yola çıkarak sistemin sabit çıkış gerilimi değişken çıkış akımı yöntemiyle kontrol edildiği söylenebilir. Çıkış gerilimi tüm doluluk oranlarında 372 V olmaktadır. Çıkış akımı $D=0,1$ olduğu durumda 15,6 A, $D=0,5$ olduğu durumda ise 58,12 A olduğu görülmektedir. Şekil 3.18'de karşılıklı endüktans iç dirençleri ihmal edilmiş sistemin doluluk oranına göre değişen çıkış güçlerinin grafiği görülmektedir. Grafiğin simetrik olmasının sebebi doluluk oranına göre negatif ve pozitif alternanstaki dalga boyunun birbirine eşit olmasıdır. Örneğin doluluk oranının 0,2 olduğu durum ile 0,8 olduğu durumda negatif ve pozitif alternanstaki dalga boyları birbirine eşittir. Bu sebepten bu iki durumda çıkış güçleri ve sistem parametreleri neredeyse birbirine eşittir. Aynı durumun $D=0,3$ ve $D=0,7$ doluluk oranlarında da olduğu görülmektedir.

Şekil 3.19'da endüktans iç dirençleri ihmal edilmiş sistemin $D=0,5$ olduğu durumda batarya şarj grafiği gösterilmektedir.

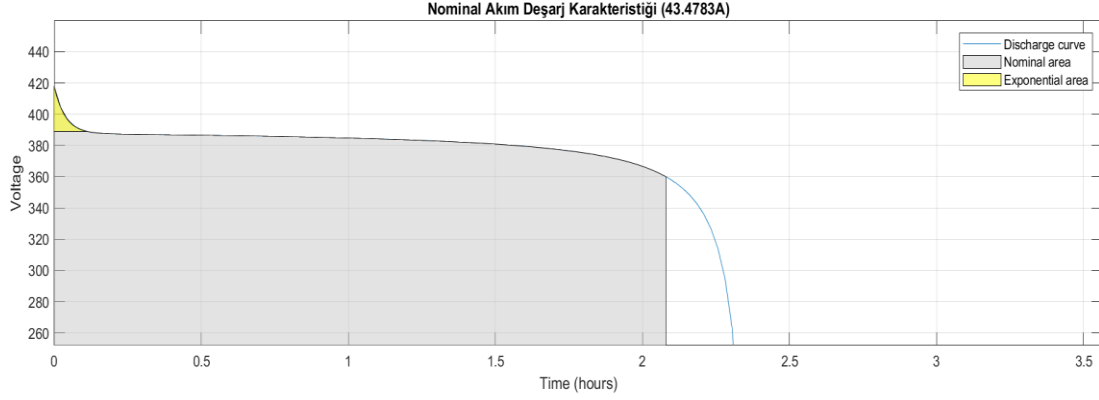


Şekil 3.19. Endüktans iç direnci ihmal edilmiş sistemin batarya şarj grafiği

Şekil 3.19'a göre batarya 1 saniyede %0,016 kadar şarj olmuştur. Bu veriden yola çıkarak 1 dakikada %0,96, 1 saatte ise %57,6'lık kısmın şarj olması beklenir.

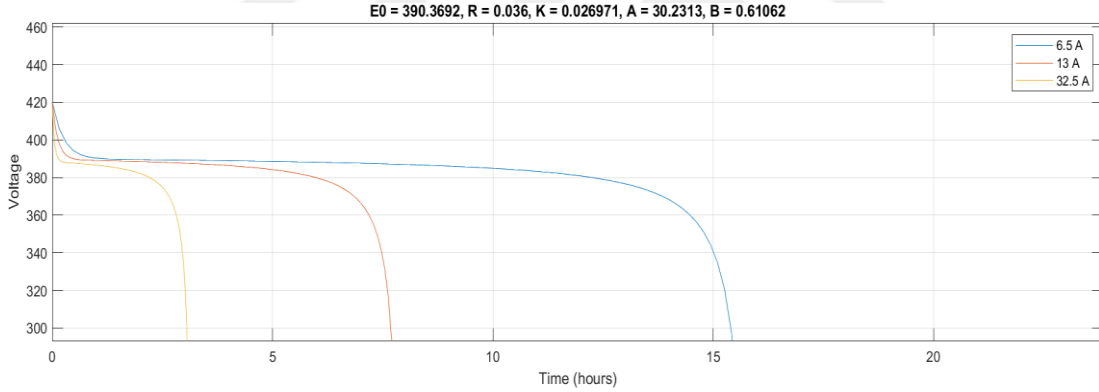
Bataryanın %10 başlangıç şarj durumundan %80 şarj durumuna gelmesi için geçmesi gereken süre 1,21 saat olarak hesaplanmaktadır. Sonuç olarak $D=0,5$ olduğu durumda şarj akımı 58,12 A ve şarj gerilimi 372 V olan bataryanın %80 dolması için gereken şarj süresi

72,6 dakikadır. Bataryanın %100 dolması için gereken sürenin ise 93,75 dakika olduğu hesaplanmaktadır.



Şekil 3.20. Nominal akım batarya deşarj eğrisi

Nominal gerilimi 360 V, kapasitesi 100 Ah olan li-ion bataryanın nominal akımındaki deşarj eğrisi gösterilmektedir. 43,4738 A olan nominal akımda deşarj süresi Şekil 3.20’de 2,32 saat olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Farklı akım değerlerine göre batarya deşarj eğrisi

Modelde kullanılan bataryanın 3 farklı akım değeri için deşarj eğrisi Şekil 3.21’de gösterilmektedir. 6,5 A deşarj akımına göre batarya 15,38 saatte deşarj olmaktadır. 13 A deşarj akımında 7,69 saat, 32 A deşarj akımında ise 3,125 saatte deşarj olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrikli araçların batarya maliyetleri ve şarj süreleri, sektörün karşılaştığı en büyük zorluklar arasında yer almaktadır, ancak batarya teknolojisindeki gelişmelere rağmen Li-ion piller hala enerji yoğunluğu bakımından en çok tercih edilen pil türüdür. Son yıllarda hızlı şarj ünitelerinin kullanımıyla şarj süreleri bir saatin altına düşürülmüştür, ancak bu alandaki araştırmalar devam etmektedir. Ek olarak, batarya kapasitelerinin artırılması dolayısıyla aracın menzilinın artırılması ile elektrikli araçlara olan rağbeti daha da artıracığı düşünülmektedir. Günümüzde çeşitli firmaların ürettiği elektrikli araç bataryaları ile sürüş menzili 1000 km seviyesine çıkmıştır. ABD’li elektrikli otomobil üretici Lucid Motors’un 2022 yılında piyasaya sürdüğü 118 kWh bataryaya sahip Lucid Air Dream isimli model 837 km menzile, Mercedes’in 2022 yılında piyasaya sürdüğü 115 kWh bataryaya sahip EQS 580 isimli modeli 547 km menzile ve Tesla’nın 2022 yılında piyasaya sürdüğü 100 kWh bataryaya sahip Tesla S isimli model ise 652 km menzile sahiptir. Mercedes, prototip aşamasında olan ve test sürüşü yapılan Vision EQXX isimli modelde 1000 km menzili aşmayı başarmıştır (URL-2). Önümüzdeki yıllarda piyasaya sürülmesi planlanan bu modelle birlikte elektrikli araçların içten yanmalı motorlara sahip araçlara göre dezavantajlarından biri olan menzil problemi de ortadan kalkacaktır.

Elektrikli araçların bir diğer avantajı da içten yanmalı motora sahip araçlara göre daha yüksek tork değerine sahip olmasıdır. Elektrik motoru kalkış anından itibaren maksimum seviyedeki torku sağlayarak sürüş konforu oluşturur. Kalkış anında ve eğimli zeminde yüksek tork, sürüş güvenliğini de sağlar. Elektrikli araçlar diğer araçlara göre daha basit yapıya sahiptir. Elektrik motorları diğer motorlara göre hacimsel olarak daha küçük, daha hafif ve daha yüksek güce sahiptir.

Bu çalışmada statik ve dinamik kablosuz güç transferinden, endüktif kuplaj yöntemi kullanılarak statik kablosuz güç transfer sistemi modellenmiştir. Devre tasarım modeli Matlab/Simulink’te yapılmış, endüktans değerleri ise Ansys/Maxwell yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Verici taraftaki bobinin ferromanyetik plaka boyutu değiştirilerek kuplaj katsayısının değişimi izlenmiştir. Verici taraftaki ferromanyetik plaka artırıldığı zaman kuplaj katsayısının arttığı görülmektedir. Karşılıklı endüktansların iç dirençleri ihmal edildiğinde sistemin verimi %97,2 olarak bulunmuştur.

Darbe genişlik ayarı yapılarak doluluk oranı değiştirilip sistemin çıkış akımı diğer bir ifadeyle batarya şarj akımı değiştirilmektedir. $D=0,1$ 'den $D=0,5$ doluluk oranına doğru batarya şarj akımı artmaktadır. Şekil 3.19'da $D=0,5$ olduğu durumda çıkış akımı 58,12 A, çıkış gücü 21730 W olarak hesaplanmaktadır. Bu şarj durumunda, sistemde 36 kWh olarak tasarlanan batarya %10'dan %80'e yaklaşık 72 dakikada dolmaktadır. Tasarlanan karşılıklı endüktansların iç direnci ihmal edilmediği durumda verim doluluk oranlarına göre değişmektedir. $D=0,1$ olduğu durumda verim %74,72 bulunurken, $D=0,5$ olduğu durumda verim %85,12 çıkmaktadır. Şekil 3.17'de, $D=0,5$ olduğu durumda çıkış akımı 53,3 A ve çıkış gücü 19930 W olarak hesaplanmaktadır. Bu şarj durumunda, 36 kWh batarya %10'dan %80'e yaklaşık 89 dakikada dolmaktadır.

Yüksek verimlilik için, iyi tasarlanmış bir kablosuz güç transfer sistemi sabit bir çıkış gerilimine sahip olmalıdır. Tasarımımızda, çıkış gerilimi sabit olarak 372 V olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, verimliliği artırmak için, Maxwell programında tasarlanan karşılıklı bobinler arasındaki mesafe 20 mm olarak belirlenmiştir ve bobinlerin ferromanyetik plakalarla sarılması kuplaj katsayısının artmasına yardımcı olmuştur. DGA doluluk oranı kontrolü kullanılarak, çıkış akımı değiştirilerek çıkış gücü ayarlanmıştır. Bu yöntem literatürde "sabit çıkış gerilimi, değişken çıkış akımı" yöntemi olarak bilinir. Bundan sonraki çalışmalarda karşılıklı endüktanslar arası mesafe artırılarak yüksek kuplaj katsayısı hedeflenmektedir. Tasarlanan sistemde endüktans iç dirençleri ihmal edildiğinde şarj süresi 72 dakika, iç dirençleri ihmal edilmediğinde ise 89 dakika olduğu görülmektedir. İlerleyen çalışmalarda çıkış akımı ve çıkış gerilimi artırılarak şarj süresinin azaltılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Agarwal, K., Jegadeesan, R., Guo, Y.-X., Thakor, N. V. (2017). *Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics*. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 10, 1–28. <https://doi.org/10.1109/rbme.2017.2683520>
- Adnan, N., Nordin, S., M., Rahman, I., Vasant, P., Noor, M. A. (2018). An overview of electric vehicle technology: a vision towards sustainable transportation. *Intelligent transportation and planning: breakthroughs in research and practice*, 8, 292-309.
- Akın, B., (2012). Elektrikli Arabalarda Kullanılan Li-ion Akülerin Tek Fazdan Hızlı ve Verimli Şarjı için Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselticilerin Karşılaştırması, *EMO Bilimsel Dergi*, 2.
- Bharti, R., Kumar, M., Prasad, B. M. (2019). V/F Control of Three Phase Induction Motor. In *2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN)*. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/vitecon.2019.8899420>
- Chen, C. J., Chu, T. H., Lin, C. L., Jou, Z. C. (2010). A study of loosely coupled coils for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 57(7), 536–540.
- Choi, Y., Kwak, B., Kim, M. (2016). 4kW magnetic resonance wireless power transfer system. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 1-3.
- Dai, J., Ludois, D. C. (2015). A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6017–6029. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2415253>
- Dai, Z., Wang, J., Long, M., Huang, H. (2017). A Witricity-based high-power device for wireless charging of electric vehicles. *Energies*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/en10030323>
- Esteve, V., Jordan, J., Sanchis-Kilders, E., Dede, E. J., Maset, E., Ejea, J. B., Ferreres, A. (2015). Comparative study of a single inverter bridge for dual-frequency induction heating using Si and SiC MOSFETs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), 1440–1450. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2359411>
- Gore, V.B., & Gawali, D.H. (2016). Wireless power transfer technology for medical applications. *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, 455-460.
- Ikonen, M., Laakkonen, O., Kettunen, M. (2006). Two-Level And Three-Level Converter Comparison In Wind Power Application. *Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Ind. Elec*, pp. 215-219

- Imura, T., Okabe, H., & Hori, Y. (2009). Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 936940. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289747>
- IEA, International Energy Agency. (2018). Global Energy y & CO2 Status Report 2017, *IEA*
- Kızıldağ, U., Yılmaz, A. S. (2021). ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİ VE ÖRNEK BİR SİSTEM İNCELENMESİ. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (14), 209-224.
- Kim, J., Son, H. C., Kim, D. H., & Park, Y. J. (2012). Optimal design of a wireless power transfer system with multiple self-resonators for an LED TV. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(3), 775–780. <https://doi.org/10.1109/TCE.2012.6311317>
- Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljacic, M. (2007). Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science (New York, N.Y.)*, 317, 83–86. <https://doi.org/10.1126/science.1143254>
- Lee, W., & Yoon, Y. K. (2020). Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review. *IEEE Access*, 8, 147930147947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015176>
- Li Z., Zhu C., Jiang J., Song K., Wei G. (2017). A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(5), 330.
- Li, H., Member, S., Li, J., Wang, K., Member, S., & Chen, W. (2015). A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling. *IEEE Trans. Power Electron*, 30(7), 3998-4008 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2349534>
- Lin, D. B., Wang, T. H., & Chen, F. J. (2015). Wireless power transfer via RFID technology for wearable device applications. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications. *IMWS-BIO 2015 - Proceedings*, 210–211. <https://doi.org/10.1109/IMWS-BIO.2015.7303851>
- Leo, H., Aiguo, P., & Covic, G. (2012). A High Frequency AC-AC Converter for Inductive Power Transfer (IPT) Applications. *Wireless Power Transfer - Principles and Engineering Explorations*, 301-303. <https://doi.org/10.5772/17458>
- Martiš, J., Vorel, P. (2014). Apparatus for induction heating 2.5 kW using a series resonant circuit. *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, 130-135.

- Mohamed, M., El, R., Gihan, N., Wahied, G., Ali, A. A Review on Wireless Power Transfer. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 40(5), October 2016.
- Morris C. (2014). *The dynamic road ahead: Utah State University builds the nation's most advanced test facility for dynamic wireless charging*. Charged EVs: chargedevs.com/ (Ziyaret Tarihi : 22 Mayıs 2021).
- Moon, J., Hwang, H., Jo, B., Kwon, C. K., Kim, T. G., & Kim, S. W. (2017). Design and implementation of a high-efficiency 6.78 MHz resonant wireless power transfer system with a 5 W fully integrated power receiver. *IET Power Electronics*, 10(5), 577–587. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0107>
- Musavi, F., Edington, M., & Eberle, W. (2012). Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies. *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1804-1810.
- Nguyen, T. D., Li, S., Li, W., & Mi, C. C. (2014). Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 1676–1682. <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803531>
- Özdentürk, A. & Akkaya, R. (2020). Elektrikli Araç Şarj Cihazlarında Kullanılan Güç Faktörü Düzeltmeli Yükseltici Tip Dönüştürücünün Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Special Issue 2020 (ICCEES)*, 308-314. DOI: 10.31590/ejosat.804561
- Özder, Ö. (2020) Kablosuz Güç Transferinde Kullanılan Bobin Yapılarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 629614
- Pannier, J. L., Hendrickx, D., Petré, F., Nobels T. (2011) Wireless Power Transfer For Industrial Application Thorough Strongly Coupled Magnetic Resonances. Leuven, Belgium.
- Petersen, M., Fuchs, F. W. (2014). Development of a 5 kW inductive power transfer system including control strategy for electric vehicles. *PCIM Europe Conference Proceedings*, May, 1370–1377.
- Porto, R. W., Brusamarello, V. J., Müller, I., Cabrera Riaño, F. L., & De Sousa, F. R. (2017). Wireless power transfer for contactless instrumentation and measurement. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 20(4), 49–54. <https://doi.org/10.1109/MIM.2017.8006394>
- Regensburger, B., Sinha, S., Kumar, A., Vance, J., Popovic, Z., & Afridi, K. K. (2018). Kilowatt-scale large air-gap multi-modular capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 666–671. <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341083>

- Sachan, S., & Adnan, N. (2018). Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids. *Sustainable Cities and Society*, 40, 91–100. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.03.031>
- Shuguang, L., Zhenxing, Y., & Wenbin, L. (2018). Design and Simulation of Coupling Coil for EV's Wireless Charging System. *2018 IEEE International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE)*, 115–119.
- Su, M., Liu, Z., Zhu, Q., & Hu, A. P. (2018). Study of maximum power delivery to movable device in omnidirectional wireless power transfer system. *IEEE Access*, 6, 76153–76164. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883503>
- Qiu, C., Chau, K. T., Liu, C. and Chan, C. (2013). Overview of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. *EVS27 Barcelona*, Spain, 17-20 November 2013.
- Pashei, A., Aydın, E., Polat, M., Yıldırım, E., Aydemir, M.T., 2016. Elektrikli araçlar için temassız güç aktarım sistemleri, *EMO Bilimsel Dergi*, 6(11), 1-12.
- Tesla N. (1914). Apparatus for Transmitting Electrical Energy. USA Patent No 1119732, *New York, USA*.
- Thostenson, E. T., Chou, T. (1999). Microwave processing: Fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(9), 1055-1071.
- Tian, Y., Tian, J., Li, D., & Zhou, S. (2018). A Multiple Legs Inverter with Real Time–Reflected Load Detection Used in the Dynamic Wireless Charging System of Electric Vehicles. *Energies*, 11(5), 1275.
- Trevisan, R., & Costanzo, A. (2016). A UHF Near-Field Link for Passive Sensing in Industrial Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(5), 1634–1643. doi:10.1109/tmtt.2016.2544317
- URL-1: <https://witricity.com/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2021).
- URL-2: <https://insideevs.com/reviews/344001/compare-evs/>, (Ziyaret tarihi: 01 Şubat 2023).
- Vilathgamuwa, D. M., & Sampath, J. P. K. (2014). Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs). *Springer Singapore, In Plug In Electric Vehicles in Smart Grids*, 33–60. https://doi.org/10.1007/978-981-287-299-9_2
- Zheng, C., Li, W., & Liang, Q. (2018). An Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9, 1880-1888.
- Zhou, S., Chen, Z., Huang, D., & Lin, T. (2020). Model Prediction and Rule Based Energy Management Strategy for a Plug-in Hybrid Electric Vehicle with Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3028154>

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çelik, M., Abut, N. (2022). Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Sistemi Simülasyonu.
2022 *ELECO*, Bursa, Türkiye, 24-26 Kasım 2022.



ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Muammer Dereli Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2013 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Elektrik Makinaları Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde elektrikli araçlarda kablosuz şarj sistemi modellenmesi konusunda çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca, 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde başladığı araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.

