



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KABLOSUZ ŞARJ
DEVRELERİNİN İNCELENMESİ VE
MODELLENMESİ

UĞUR KIZILDAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2021

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KABLOSUZ ŞARJ
DEVRELERİNİN İNCELENMESİ
VE MODELLENMESİ

UĞUR KIZILDAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin, etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur KIZILDAĞ



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KABLOSUZ ŞARJ DEVRELERİNİN
İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

UĞUR KIZILDAĞ

ÖZET

Kablosuz güç transfer (KGT) sistemleri yaklaşık 20 yıldır kullanılmakta olup bu kavramı kullanan birçok uygulama bulunmaktadır. 2002 yılından itibaren bu teknoloji elektrikli araçların bataryalarını şarj etmek için kullanılmaya başlanmıştır. Lazer, mikrodalga, manyetik indüksiyon ve manyetik rezonans kablosuz güç transfer sistemleri için kullanılan başlıca yöntemlerdir. Elektrikli araçların, enerji darboğazı ve çevre kirliliği sorunlarına bir çözüm olarak görülmesi ile birlikte, bu araçların bataryalarının temassız sistemlerle şarj edilmesi düşüncesi yaygınlaşmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, simülasyon programı ile KGT sistemlerinde mesafe, topoloji ve frekansın etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında örnek bir kablosuz güç transfer sisteminin modellenmesi yapılmış ve simülasyon programıyla çalıştırılmıştır. Elektrikli araçları şarj için kullanılan KGT'leri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda en kullanışlı ve verimli KGT yöntemi üzerinde yapılan çalışmalar araştırılıp incelenmiştir. Modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılıp elde edilen araştırma bulgularına göre karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göre en verimli KGT yöntemi olan endüktif güç transferi teknolojisi ile 3 senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1 ile mesafeye göre verim değişimleri, senaryo 2'de devre topolojilerinin verimlerinin karşılaştırılması, senaryo 3'de ise frekans değişimine göre verim durumları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüktif Güç Transfer Sistemleri, Kablosuz Güç Transfer Sistemleri; Elektrikli Araçlar, Modelleme

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Haziran/2021

Danışman: Prof.Dr Ahmet Serdar YILMAZ

Sayfa Sayısı: 86

INVESTIGATION AND MODELING OF WIRELESS CHARGING CIRCUITS IN ELECTRIC VEHICLES

(M.SC. THESIS)

UĞUR KIZILDAĞ

ABSTRACT

Wireless power transmission systems have been used for about 20 years and there are many applications using this concept. Since 2002, this technology has been used to charge the batteries of electric vehicles. Laser, microwave, magnetic induction and magnetic resonance are the main methods used for wireless power transmission systems. As electric vehicles are seen as a solution to energy bottlenecks and environmental pollution problems, the idea of charging the batteries of these vehicles with non-contact systems has become widespread.

In this study, it is aimed to observe the effects of distance, topology and frequency in WPT systems with the simulation program. In this thesis, a sample wireless power transfer system has been modeled and run with a simulation program. WPT's used for charging electric vehicles were examined. As a result of this study, the studies on the most useful and efficient WPT method were researched and examined. Modeling and simulation methods were used and a comparison was made according to the obtained research findings. According to the results obtained, 3 scenarios were created with inductive power transfer technology, which is the most efficient WPT method. Efficiency changes according to distance in scenario 1, comparison of efficiency of circuit topologies in scenario 2, and efficiency status according to frequency change in scenario 3 are examined.

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

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Department of Electrical and Electronics Engineering

June/2021

Supervisor: Prof.Dr Ahmet Serdar YILMAZ

Page number: 86

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen değerli arkadaşlarım Zafer Ramazan ŞAHİN'e, Yaşar SEVER'e, Ercan KARA'ya ve Cebail ASLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan eşime zamanlarından çaldığım kızım Gülben Leyla'ya ve oğlum Alperen'e en içten teşekkürlerimi iletirim.

Uğur KIZILDAĞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tıbbi İmplantların Kablosuz Şarj Edilmesi	1
1.2. Ev Aletlerinin Şarj Edilmesi	2
1.3. Elektrikli Araçların Şarj Edilmesi	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1 Kablosuz Güç Transferinde Kullanılan Genel Yöntemler ve Karşılaştırılması	11
3.1.1. Akustik Güç Transferi	11
3.1.2. Optik güç transfer sistemi	12
3.1.3. Mikrodalga Güç Transferi	13
3.1.4. Endüktif Güç Transferi	14
3.1.5. Kapasitif Güç Transferi	14
3.1.6. KGT Teknolojilerinin Karşılaştırması	15
3.2. Elektrikli Araçlar ve Batarya Teknolojileri	16
3.2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Şarj Yöntemler	17
3.2.1.1. Batarya Değiştirme teknolojisi	17
3.2.1.2. Kablolu Şarj teknolojisi	18
3.2.1.3. Endüktif Şarj (Kablosuz Şarj) Teknolojisi	21
3.2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar-Akümülatörler	25
3.3. Elektrikli Araç Teknolojilerinde Kablosuz Güç Transferi	26
3.3.1. Kompanzasyon Topolojileri	30
3.4 Örnek Bir Kablosuz Güç Transfer Sisteminin Simülasyon Programı İle Çalıştırılıp İncelenmesi	34
3.5. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	38
3.6. Simülasyon İçin Kullanılan Devrelerin Parça Parça İncelenmesi	41
3.6.1. Tek Fazlı Tam Dalga Köprü İnvertörü	41
3.6.2. Karşılıklı endüktans (Rezonant Circuits) Devresi	45
3.6.2.1. Koaksiyel Bobinlerin Karşılıklı Endüktansının Hesaplanması	46
3.6.2.2. Bobin Boyutunun ve Aralığının M Üzerindeki Etkisi	46
3.6.3. Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu Devresi	47
4. BULGULAR	49
4.1. 3600 W Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı	49
4.1.2. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	49

4.5 Simülasyonu Yapılan Devrenin Matlab/Simulink Yardımıyla Çizimi	52
4.5.1. İnvertörden geçen primer gerilimin grafiksel gösterimi	54
4.5.2. Primerden geçen akımın grafiksel gösterimi	54
4.5.3. Cp kondansatöründe indüklenen gerilimin grafiksel gösterimi;.....	55
4.5.4. Sekonder tarafından geçen gerilimin grafiksel gösterimi	55
4.5.5. Sekonder sargısından geçen akımın (Is) grafiksel gösterimi	56
4.5.6. Cs kondansatöründe indüklen gerilimin grafiksel gösterimi	56
4.5.7. Doğrultucudan çıkan akımın(filtre kondansatörsüz) grafiksel gösterimi .	57
4.5.8. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörlü) geçen akım grafiği.....	57
4.5.9. Doğrultucudan çıkan çıkış gerilimin grafiksel gösterimi	58
4.5.10. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörlü) grafiği	58
4.6. Simülasyon Sonuçlarının Yorumlanması	59
4.7. Sistemin Simülasyonun Analizi	60
4.8. SS topoloji ile kurulan devrenin aşağıdaki senaryolara göre çalıştırılıp verim analizlerinin yapılması	61
4.9. Senaryo 1	61
4.9.1 Elde edile değerler ile simülasyondan elde edilen giriş ve çıkış grafik şekilleri	62
4.10 Senaryo 2:.....	67
4.10.1 Topolojilerin Giriş Çıkış Grafiklerinin Gösterimi	67
4.11 Senaryo 3.....	70
4.11.1 Senaryo 3:	71
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	77
KAYNAKÇA	79
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Elektronik tıbbi implant olan bir pulse üretici	2
Şekil 2.1. Tesla'nın "Elektroterapötik ve Diğer Amaçlar için Yüksek Frekanslı Osilatörler"	7
Şekil 2.2. Goldstone Deep Space Communications deney kurulumu	8
Şekil 3.1. Kablosuz güç transfer sisteminin sınıflandırılması	11
Şekil 3.3. Optik güç transfer sisteminin yapısı	12
Şekil 3.4. Bir mikrodalga güç transfer sisteminin yapısı	13
Şekil 3.5. Endüktif güç transfer sisteminin yapısı	14
Şekil 3.6. Kapasitif bir güç transfer sisteminin yapısı	15
Şekil 3.7. EA şarj yöntemleri	17
Şekil 3.8. EA için değişime hazır araç bataryaları görseli	18
Şekil 3.9. Dâhili (on-board) batarya şarj cihazının temel düzeni	18
Şekil 3.10. Seviye 2 şarj durumunun bir görseli	19
Şekil 3.11. DA hızlı şarj cihazının bir görseli	20
Şekil 3.12. Statik kablosuz EA şarj sisteminin temel diyagramı	22
Şekil 3.13. Merkezi güç kaynağı tarafından sağlanan uzun yol	23
Şekil 3.14. Topraklama pedlerine uzatılmış bağlantılara sahip merkezi güç kaynağı ...	24
Şekil 3.15. Bölümlere ayrılmış kablosuz güç transferi	24
Şekil 3.16. Endüktif kuplaj ile bağlanmış iki bobin	27
Şekil 3.17. EA batarya şarjı için EGT sisteminin genelleştirilmiş blok şeması	28
Şekil 3.18. Seri Seri topoloji	30
Şekil 3.19. Seri Paralel topoloji	31
Şekil 3.20. Paralel Seri topoloji	32
Şekil 3.21. Paralel Paralel topoloji	32
Şekil 3.22. SS kompanze edilmiş rezonant EGT sisteminin eşdeğer devresi	35

Şekil 3. 23 SS endüktif güç transfer devresinin basitleştirilmiş eşdeğer modelini	35
Şekil 3.24. SS-endüktif güç transfer tabanlı bir kablosuz şarj cihazının blok şeması ...	38
Şekil 3.25. Kablosuz güç transferini oluşturan temel güç elektroniği yapısı	41
Şekil 3.26. Tek fazlı tam dalga köprü evirici.....	42
Şekil 3.27. Anahtarlama elamanlarının (MOSFET) çalışma sıralarını gösterir dalga şekilleri	43
Şekil 3.28. İnvörtör sonrası oluşan gerilimin dalga şekli.....	44
Şekil 3. 29. İnvörtör devresinden çıkan akımın dalga şekli	44
Şekil 3.30. Eksenleri hizalanmış paralel dairesel bobinlerin yerleşimi	45
Şekil 3. 31. h , r_2 ve M arasındaki ilişki	46
Şekil 3.32. h r_2 ve M arasındaki ilişki	47
Şekil 4.1. Primer bobi	49
Şekil 4.2. Sekonder bobin	49
Şekil 4.3. Matlab/Simulink programında simülasyonu yapılan devre.....	53
Şekil 4.4. İnvörtörden geçen primer gerilimin grafiksel gösterimi	54
Şekil 4.5. Primerden geçen akım grafiği.....	54
Şekil 4.6. (C_p) Primer kondansatörde indüklenen gerilim.....	55
Şekil 4.7. Sekonder tarafında indüklenen gerilim.....	55
Şekil 4.8. (I_s) Sekonder kondansatörde geçen akım grafiği	56
Şekil 4.9. Sekonder kondansatörde indüklenen gerilim grafiği.....	56
Şekil 4.10. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörsüz) geçen akım grafiği	57
Şekil 4.11. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörlü) geçen akım grafiği.....	57
Şekil 4.12. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörsüz) grafiği	58
Şekil 4.13. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörlü) grafiği	58
Şekil 4.14. Simülasyonu yapılan devrenin simülasyon değerleri	60
Şekil 4.15. Uygulanan senaryolar	61
Şekil 4.16. 0 cm den gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri.....	62
Şekil 4. 17 4 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri.....	63

Şekil 4. 18 12 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri	64
Şekil 4. 19 30 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri	65
Şekil 4.20 100 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri	66
Şekil 4.21 Seri Paralel topoloji akım gerilim çıkış grafiği	67
Şekil 4. 22 Paralel Seri topoloji akım gerilim grafiği	68
Şekil 4.23. Paralel Paralel topoloji akım gerilim grafiği	69
Şekil 4. 24 1 kHz frekanslı devrenin giriş çıkış grafikleri	71
Şekil 4. 25 10 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri	72
Şekil 4. 26 20 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri	73
Şekil 4. 27 60 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri	74
Şekil 4. 28 80 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri	75
Şekil 4.28 100 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri	76

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 3.1. KGT karşılaştırılması	16
Tablo 3. 2 Şarj Seviyeleri	20
Tablo 3.3. Batarya teknolojilerinin özelliklerin tablo halinde gösterimi	26
Tablo 4.1. Simülasyonu yapılacak devrenin elektrik parametreleri ve hesap değerleri .	51
Tablo 4.2. Simülasyonu yapılacak devrenin verilen/hesaplanan ve simülasyon değerleri	59
Tablo 4.3. Çeşitli hava aralığında SS sistemin karşılıklı endüktans ve verim değerleri.	62
Tablo 4.4 Kompanzasyon topolojilerinin çıkış verilerinin karşılaştırılması.....	67
Tablo 4.5 Simülasyonu yapılan devrenin farklı frekanslardaki verim değerleri	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Alternatif Akım
BEA	: Bataryalı Elektrikli Araç
C	: Kondansatör-Kapasitans
DA	: Doğru akım
DKŞ	: Dinamik Kablosuz Şarj
EA	: Elektrikli Araç
EGT	: Endüktif Güç Transfer
Ghz	: Gigahertz
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
İYM	: İçten Yanmalı Motor
KGT	: Kablosuz Güç Transfer
kHz	: Kilohertz
Km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
L	: Bobin-Endüktans
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
PFC	: Güç Faktör Kontrolü
PS	: Paralel Seri
PP	: Paralel Paralel
R	: Direnç
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SP	: Seri Paralel
SS	: Seri Seri
Thz	: Terahertz
VA	: Voltamper

1. GİRİŞ

Kablosuz Güç Transferi (KGT), elektrik enerjisinin bir güç kaynağından elektrik yüküne herhangi bir kablo kullanılmadan iletilmesidir. İlk olarak Nikola Tesla tarafından ortaya atılan temassız güç transferi düşüncesi, enerjinin ortak bir çekirdek üzerinde bulunmayan iki sargı arasında, oldukça büyük bir hava aralığı üzerinden aktarılması ilkesine dayanmaktadır [1]. Günümüzde kablosuz güç transfer teknolojisi mobil cihazlarda, endüstriyel ve tıbbi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu elektrik ve elektronik cihazların bataryalarının şarj edilebilmesi genellikle kablolu şarj cihazları kullanılmaktadır. Bu kablo kalabalığından ve kirliliğinden kurtulmak için KGT, elektronik cihazların daha rahat kullanılmasını sağlayan bir alternatif haline geldiği görülmektedir. Kablosuz güç transfer sistemleri gelişen teknolojik gelişmelere bağlı olarak tıbbi implantların, ev aletlerinin ve Elektrikli Araçların (EA) şarj edilmesi gibi birçok alanda faydalı bir şekilde kullanılmaktadır. KGT kullanıcıya birçok avantaj sunmaktadır [2].

Bu avantajlar şu şekilde özetlenebilir.

- ✓ Elektrik enerjisi herhangi bir karasal mesafeye kablosuz ve ekonomik olarak iletilebilir. Bu nedenle iletim ve dağıtım kaybı olmayacaktır.
- ✓ Belli bir alanda ve aynı zamanda tek bir modül ile cep telefonu, kamera ve dış fırçası gibi birden fazla ekipmanı şarj edebilecektir.
- ✓ Kısa devre ve kablo arızasından kaynaklı elektrik kesintisi yaşanmayacaktır.
- ✓ Bu yöntemeye dayalı bir elektrik dağıtım sistemi, kablolar, direkler ve trafo merkezlerinden oluşan verim düşük, maliyet yüksek bir şebeke ihtiyacını ortadan kaldıracaktır.
- ✓ Bu sistem, tüketici tarafından kullanılan elektrik enerjisi maliyetini düşürecektir [2].

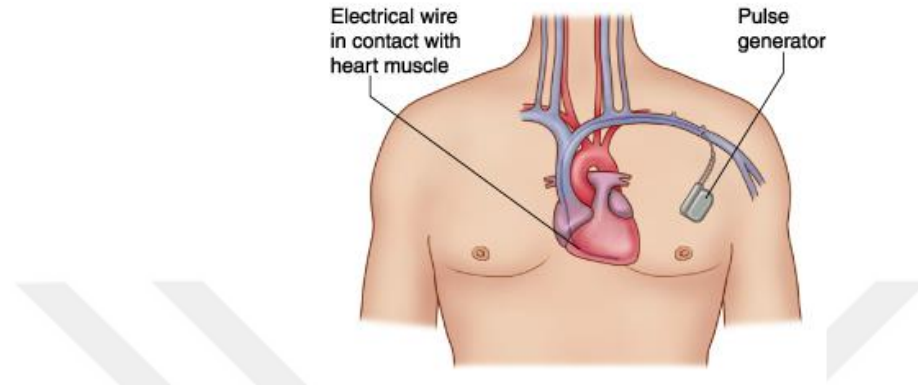
Kablosuz şarj uygulamaları başlıca tıbbi implantlar, ev aletlerinin şarjı ve EA'ların şarjında yaygın kullanılmaktadır.

1.1 Tıbbi İmplantların Kablosuz Şarj Edilmesi

Tıbbi implanta örnek, kalp pilidir. Kalp bataryası, kalbin ritmini kontrol etmek için kullanılan elektronik tıbbi bir cihazdır. Düzenli kalp atış hızını koruyan elektrikselsel uyarılar sağlar. Böyle bir cihaz, sürekli bir güç kaynağı gerektirir ve kablolarla şarj

etmenin mümkün olmadığı açıktır. Kablolı şarj tıbbi implant için tehlikeli, pahalı ve zahmetlidir.

Şekil 1.1’de kalp bataryası, kalbin ritmini kontrol etmek için kullanılan bir elektronik tıbbi implant olan bir Pulse üretici gösterilmektedir. Pulse üretici pilinin kablolu bir yöntemle şarj edilmesi hem tehlikeli hem de pahalıdır ve bazı durumlarda ise imkansızdır [2].



Şekil 1.1. Elektronik tıbbi implant olan bir pulse üretici [2]

1.2. Ev Aletlerinin Şarj Edilmesi

KGT, elektrikli ev aletleri için uygun şarj yöntemleri oluşturur. Ev ortamında, banyodaki fön makinesi gibi bazı geleneksel fiş ve priz uygulamaları tehlikelidir. KGT'nin çekiciliği, verici ve alıcı devresinin birbirinden elektriksel olarak izole edildiği bir şarj yöntemi sunarak daha güvenli çalışma ortamları sağlamasından kaynaklanır [2].

1.3. Elektrikli Araçların Şarj Edilmesi

Ulaşım elektrifikasyonu ve EA dağıtımındaki artış, araştırmacıları gelişmiş batarya teknolojileri, elektrikli sürücüler, araç içi (on-board) ve araç dışı (off-board) hızlı şarj sistemleri dahil olmak üzere EA ve şarj teknolojilerinin çeşitli yönlerini araştırmaya yönlendirmiştir. Yerleşik şarj cihazlarının, yerleşik elektroniklerin galvanik izolasyonuna, şarj cihazının boyutuna ve ağırlığı ile yağmurda ve karda çalıştırma ile ilgili güvenlik sorunlarına duyulan ihtiyaçtan dolayı kablosuz şarj sistemleri üzerinde çalışmayı zorunlu hale getirmektedir.

KGT, bu sorunları ele almak için bir yol sağlayan ve tüketicilere iletken olarak şarj etmeye sorunsuz ve kullanışlı bir alternatif sunan bir yaklaşımdır. Ek olarak, doğal bir elektrik yalıtımı sağlar ve yerleşik şarj maliyetini, ağırlığını ve hacmini azaltır [3].

EA'nın geleceği için daha da iddialı olan ise kablosuz güç transfer sistemlerinde hareket halindeyken (dinamik) EA'ların şarj edilmesi üzerinde çalışılmaktadır [2].

1900'lu yıllardan beri EA kullanımı, İçten Yanmalı Motorlu (İYM) araçlara göre sahip oldukları avantajlar nedeniyle artmıştır. Özellikle küresel ısınmayı önemli ölçüde önleyen çok daha az karbon emisyonuna sahip olmaları en büyük avantajlarıdır [4].

Teknolojinin ve kentleşmenin gelişimindeki mevcut hız ile kişisel araç sayısının artması beklenmektedir. Şu anda kullanılan araçların çoğu fosil yakıtlara bağlı olduğundan, petrol kullanımının insanlığa getirebileceği sorunlar tahmin edilebilmektedir. Dünya da yaklaşık 85 milyon varil petrol günlük olarak kullanılmaktadır. Bu durum EA'ların önerilmesinde temiz ve güvenli oldukları için önemli bir rol oynamaktadır [5].

EA'lar, enerji verimliliği ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından geleneksel İYM araçlarla rekabet halinde olsa da, güç transferi için fiziksel ortamın kullanımı bazen tehlikeli olabilmektedir. EA'lar 1895'te icat edilmesine rağmen EA pazarını etkileyen ve 1930'da EA'ların satışının düşmesine neden olan birçok faktör vardı. Bu önemli faktörlerden bazıları aşağıda listelenmiştir [4].

- 1) EA'lar için şarj süresi yaklaşık 8 saat veya daha fazla ve bu süre bir bataryanın şarjı için çok uzun olması.
- 2) EA'ların maliyeti İYM araçlara göre % 40 daha fazla olması.
- 3) EA satın almanın yanı sıra, işletme ve bakım maliyetleri İYM araçlarına göre yüksek olması.
- 4) EA'ların İYM'li araçlarına göre daha az güvenli olduğuna dair bir kanıt olmamasına rağmen, otomobil üreticileri o zamana kadar piyasada bir düşüş olduğu için EA'ların araştırma, geliştirme ve imalatına para harcamakta tereddüt etmişlerdir.
- 5) 1990'larda EA'ları şarj etmek için iyi bir altyapısını olmamasına rağmen birçok EA'larda uzun bir akü şarj süresi gerektiren ve ağır olan kurşun asit aküler kullanıldı.
- 6) Hibrit Elektrikli Araçların (HEA'lar) ve Plug-in Hibrit Elektrikli Araçların (PHEA) fiyatları benzine göre daha yüksek olması.

Son zamanlarda bile EA'larda, enerji depolama teknolojilerinin neden olduğu dezavantajlar bulunmaktadır. Pillerin yetersiz enerji yoğunlukları, daha kısa ömürleri ve daha yüksek maliyetleri bunlardan birkaç tanesidir [6]. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, uygun güvenlik ve güvenilirliğe sahip bir batarya tasarlamak kolay bir iş değildir. Ayrıca, aracın tek seferde şarj edilmesi, şarj cihazının güç

seviyesine bağlı olarak yarım saat ile birkaç saat sürebilmektedir. Bunun üstesinden gelmek için hızlı şarj kabiliyetine sahip bataryalar gerekmektedir [4].

Dünyanın çeşitli yerlerinde KGT, büyük endüstriyel şirketler , araştırma merkezleri ve üniversiteler tarafından geniş çapta ilgi görmekte, uygulanmakta ve araştırılmaktadır [7].



2. LİTERATÜR TARAMASI

KGT çalışmalarından önce bu çalışmalara öncülük etmiş teoremler ve yapılan çalışmalar kronolojik olarak açıklanmıştır.

1820 yılında Hans Christian Ørsted'in 1820'de bir elektrik akımının (manyetik) bir pusula iğnesini döndürebileceğini keşfetmesiyle başlar [8]. Böylelikle akımın “uzaktan harekete” neden olabileceği tespit edilmiştir. Kısa süre sonra, Fransız fizikçiler Jean-Baptiste Biot ve Félix Savart, manyetik alanın elektrik akımının yönüne, büyüklüğüne, uzunluğuna ve ona yakınlık arasındaki matematiksel ilişkiyi buldular [9].

Çalışmayı, 1827'de Ampère yasasını "Deneyden Çıkarılmış Elektrodinamik Olayların Matematiksel Teorisi " (Fransızca) olarak formüle eden André-Marie Ampère sürdürdü [10].

1831'de Michael Faraday (İngiltere'de) ve Joseph Henry (ABD) elektromanyetik indüksiyonu bağımsız olarak keşfettiler. 29 Ağustos 1831 Faraday ilk bulgularını yayınladı [11]. Açıklamaları (hala "kuvvet çizgileri" olarak adlandırılıyor) o sırada matematiksel formülasyonları aşarken, Maxwell daha sonra bunları doğrudan elektromanyetik teorisinin temeli olarak kullandı. 1835'te Emil Lenz, temelde negatif işareti Faraday'ın denklemine ekledi, bu da indüklenen elektromanyetik kuvvetin manyetik akı'daki değişime karşı olduğunu gösterdi. Bu da Lenz yasası olarak bilinmektedir [9].

KGT çalışmalarına başlamadan önce, James Clerk Maxwell'in incelemesinde şu anda Maxwell denklemleri olarak adlandırılan, 1873'te genel bir elektromanyetik teorisinin gelişiyile sona ermiştir. 1879'daki ölümünden sonra teorisi doğru bir şekilde anlaşılana, uygulanabilir biçimlere konulana ve deneysel olarak tam olarak doğrulanana kadar birkaç yıl geçmiştir [12].

Aşağıda, KGT alanında yapılan ilk çalışmaları, KGT'nin temel fikirlerini keşfeden ilk araştırma çalışmaları açıklamaktadır.

Tesla'nın KGT çabalarından önce, Fransa'da M. Hutin ve 1890-1894 yılları arasında M. LeBlanc, 1890'da Fransız eşdeğerini (Patent No. 209,323) aldıktan sonra ABD Patenti (Patent No.527,857) aldı. Patentleri KGT'yi trenlerde çeşitli uygulamalar için düşük kHz aralığında çalıştırılan bir açık transformatör biçiminde ilk kez tanımlamaktadır.

Hutin ve LeBlanc řu anda manyetik rezonans olarak bilinen terimi aşağıdaki gibi tanımlamışlardır [9]:

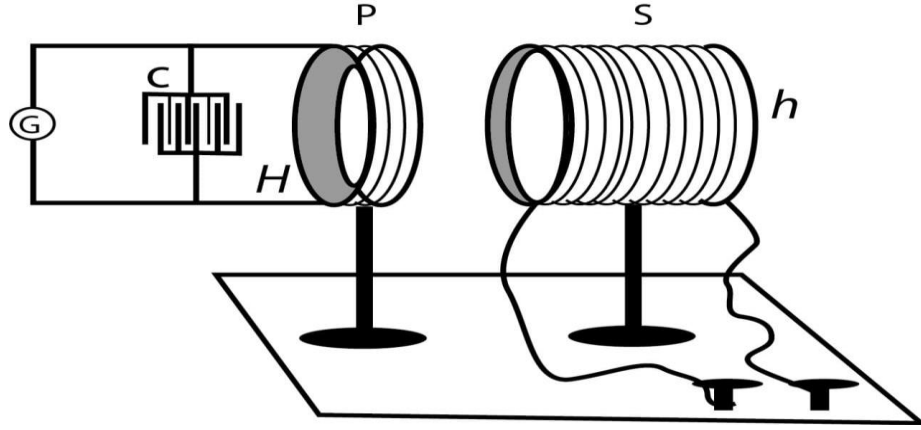
"Bir bobindeki özindüksiyonun etkilerini bazı özel yollarla etkisiz hale getirmedikçe, sekonder bobininin aracılığıyla hattan önemli miktarda enerji alamayacağımızı belirtmek yeterli olacaktır."

Kasım 1894'te Kalküta'da halka açık bir gösteri sırasında, Radio Science'ın ve milimetrik dalgaların öncüsü olan J. Chandra Bose, bir zil çalarak ve mikrodalgalar kullanarak uzaktan barutu ateşleme gösterisi yapmıştır. Bu "görünmez ışık" ile mesajların tuğla duvarlardan ve binalardan geçirilebileceğini gösteren ilk çalışmalarından birisi olup ayrıca kullanılan aparatın önceki gösterilere göre küçük olması tüm dünyada ilgi görmüştür [9].

1896 Nikola Tesla, yaklaşık 48 km'lik bir mesafede kablosuz transfer gösterdi [13].

1896-1897 Hertz'in 1894'teki ölümünden sonra, Guglielmo Marconi elektromanyetik dalgalara dayalı bir "kablosuz telgraf" sistemi geliştirmeye olan ilgiyi yeniledi. İlk olarak tekel düzeneğı ile 1,75 mil ve daha sonra 4 mil üzerinden radyo iletimini gösterdi [14].

1898, 19. yüzyılın sonlarına doğru Tesla, kablolu güç transferinden tamamen kablosuz güç transferine geçti. Şekil 2.1'de gösterildiğı gibi "yüksek gerilim indüksiyon bobini" ve "elektro-terapötik ve diğerk amaçlar için yüksek frekanslı osilatörler" kullanan elektrostatik indüksiyon gibi birçok görünümde KGT'nin potansiyellerini sergiledi. Daha sonra Chicago'daki Dünya Kolomb Sergisi'nde fosforlu lambaların kablosuz aydınlatmasını ve sonunda St. Louis'deki Ulusal Elektrik Işık Birliğı toplantısından önce sinyallerin kablosuz iletimini sergiledi [9].



Şekil 2.1. Tesla'nın "Elektroterapötik ve Diğer Amaçlar için Yüksek Frekanslı Osilatörler" [9]

1900 Tesla'nın ünlü KGT patenti (ABD Patenti 649.621) 1900'de verildi [9].

1901 yılında, Tesla'nın Wardenclyffe Kulesi, Atlantik ötesi kablosuz telefon, yayın ve en önemlisi de iyonosfer yoluyla Atlantik üzerinde KGT'yi göstermek ve keşfetmek için inşa edildi fakat hiçbir zaman tam olarak faaliyete geçmedi ve 1917'de yıkıldı [15].

1914/1920 K.S. Johnson, Western Electric Company için indüktör bobinleri üzerinde çalışırken, kalite faktörü Q kavramı geliştirdi. Bu tanım ilk olarak rezonans devrelerinden veya depolanmış enerji ve yayılma hususlarında kullanılmamış, indüktörler için "*bobin dağılım sabiti*" ve kapasitörler için "*kondansatör sabiti*" olarak adlandırdı.

8 Ekim 1958, Stockholm, İsveç'te gizli bir acil operasyonda, kalp cerrahı Ake Senning, doktor ve mühendis Rune Elmqvist tarafından geliştirilen ilk implante edilebilir yapay kalp pilini o zamanki 43 yaşındaki Arne Larsson'un göğsüne implante etti. Elmqvist daha sonra kalp pilinin tasarımı yeterince geliştirilmeden implante edildiğini, ancak Senning'in hastanın eşi tarafından, sağlığı ciddi şekilde kötüleştiği ve bu yeni teknolojinin geliştirildiğini duyduğu için teşvik edildiğini belirtti [9].

1960 yılında "*Rectenna*" yı icat ettikten sonra, William "Bill" C. Brown, KGT'nin mikrodalga frekanslarındaki olasılıklarını araştıran bir makale yayınladı. Daha sonra kendisinin de belirttiği gibi, "1950'lerin sonlarında, büyük miktarlarda gücün kablosuz olarak verimli bir şekilde iletilmesini makul bir kavram haline getirmek için bir dizi gelişme meydana geldi". KGT kavramı daha sonra ilk güneş enerjisi uydusu olarak da kabul edilip ve böyle bir sistem için temel bileşenler geliştirdi [9].

Pasif RFID (Radyo Frekansı Tanımlama) ilk kez 1973 yılında Los Alamos'taki Ulusal Laboratuarda gösterildi [13].

1975 Aynı zamanlarda Goldstone Deep Space Communications Şekil 2.2 ile gösterilen deneysel düzenekle onlarca kW gücü kablosuz olarak aktarmayı dendi. 1975'te, Bill Brown'ın ekibi bugün hala geçerli olan alıcıda 30 kW DA güç ($3,4 \text{ m} \times 7,2 \text{ m}$ alıcı dizisi), 1,6 km'nin üzerinde % 82,5 düzeltme verimliliği ile rekoru kırdı [9].



Şekil 2.2. Goldstone Deep Space Communications deney kurulumu [9]

Bunlar, modern KGT'nin ilk patentleri olup ve şirket bugün hala KGT ile ilgili çalışmalar yapmaktadır [9].

1987 Zetl GmbH CNC Präzisions'dan Otto Zetl - Und Sonderwerkzeuge, Avrupa (Patent No.EP0229399-A2) olan "Dönen bir gövdeden kablosuz sinyal iletimi için düzenleme" başlıklı bir kablosuz güç transferinin çalışmasının ilk Avrupa patenti sayılan bir çalışma geliştirildi [17].

1990'lı yıllarda, KGT ile ilgili pek çok çalışma o dönemde yürütülen patentlerden de görülebileceği gibi, özellikle Japon araştırma grupları tarafından yapılmıştır. Odak noktası esas olarak sensörlere cihazların ve makinelerin uzaktaki parçalarına kablosuz ("*temassız*") güç sağlamak ve onlarla iletişim kurmaktır [9].

2004 WiPower Florida Üniversitesi'nden kurulan ve kurucusu Ryan Tseng'in manyetik rezonans prensibine dayalı olarak KGT teknolojisini keşfetmeye başladı ve

prototip şarj pedi geliştirildi. Bu teknoloji 2010 yılında Qualcomm tarafından satın alındı [9].

KGT sistemleri ile ilgili son dönemde yoğun şekilde başlayan çalışmaları etkileyen olay esasında 2007 yılında MIT’ de bir grup araştırmacının başarılı bir şekilde 60 W gücündeki enerjiyi % 40 verimle 2 metreyi aşan mesafeye aktarması olarak ifade edilebilir [18]. Kısa bir süre sonra, genellikle KGT'ye odaklanan (manyetik rezonans kullanarak) ilk Amerikan mühendislik şirketi olarak bilinen WiTricity'yi kurdular. KGT’nin “*yeniden keşfedilmesinden*” sonraki yıllarda, çeşitli ekipler ve araştırma grupları bu sistemi inceleyerek konuyla ilgili çok sayıda makaleler yayımladılar. Birçok uygulamanın yanı sıra aynı zamanda kablosuz güç transferinin temelleri, özellikle transfer verimliliğinin sınırları ve geliştirmeleri incelenmiştir [9].

2008 yılında Kablosuz Güç Konsorsiyumu sekiz şirket tarafından kuruldu bunlar; Convenient Power, Fulton Innovation, Logitech, Motorola, National Semiconductor, Royal Philips, Sanyo ve SangFei Consumer Communications. Şuanda kablosuz Güç Konsorsiyumu 200'den fazla üye şirketten oluşuyor ve 2017'nin başlarında Apple'ın eklenmesiyle 25 şirketten oluşan bir yönlendirme grubu tarafından yönetilmektedir [19].

2010 Kablosuz Güç Konsorsiyumu, ilk toplantıdan 18 ay sonra, Ağustos 2010'da ilk düşük güçlü Qi spesifikasyonunu yayınladı. İlk Qi uyumlu ürün bir sonraki ayda onaylandı. Sonraki iki yıl içinde 100'ün üzerinde ürün onayı verilmiştir. Şirketin kendi beyanlarına göre, 2015 yılına kadar, dünya çapında 50 milyondan fazla kişiden oluşan bir müşteri tabanı tarafından kullanılan 700'den fazla Qi özellikli cihazı kaydettirdiler [19].

2012 yılında, Power Matters Alliance (PMA) ve Alliance for Wireless Power (A4WP) ile mevcut Qi standardıyla rekabet eden KGT standartları oluşturmak amacıyla Kablosuz Güç Konsorsiyumu gibi iki benzer kuruluş kuruldu [9].

2015 yılının ortalarında, PMA ve A4WP güçlerini birleştirerek AirFuel Alliance'ı kurdu. Üye olarak 170'den fazla lider teknoloji şirketiyle birlikte, WPC / Qi için güçlü bir rakiptirler. Aynı zamanda benzer güç ve frekans aralıklarında hem rezonanslı hem de rezonanssız güç transferi ilkelerini kullanan standartları tanımladılar [9].

Apple'ın 2017'nin başlarında WPC / Qi ile güçlerini birleştirdiği duyurdu. Bu ortaklaşma KGT’nin sanayileşmesinin kilometre taşlarından birini oluşturdu. KGT

ürünlerin güncel beklenen gelir yaklaşık 2015 yılında 2,5 milyar dolar üzerinde olmuştur ve önümüzdeki birkaç yıl içinde ise 22 milyar doları aşması bekleniyor [9].

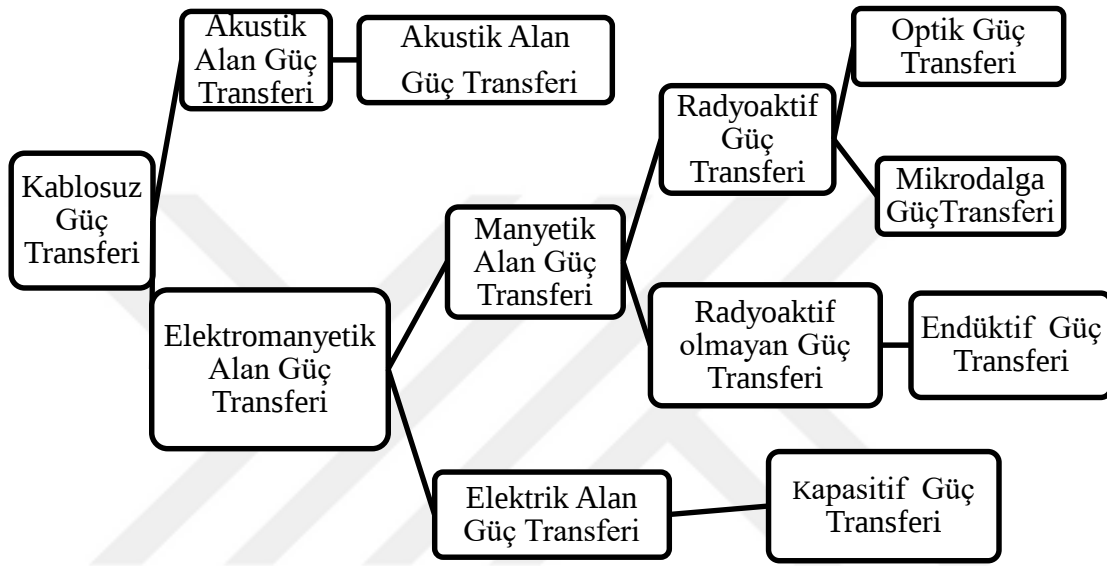
Gelecekte de güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak KGT'nin hayatımızda ki yerinin daha da fazla olması beklenmektedir [20].



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Kablosuz Güç Transferinde Kullanılan Genel Yöntemler Ve Karşılaştırılması

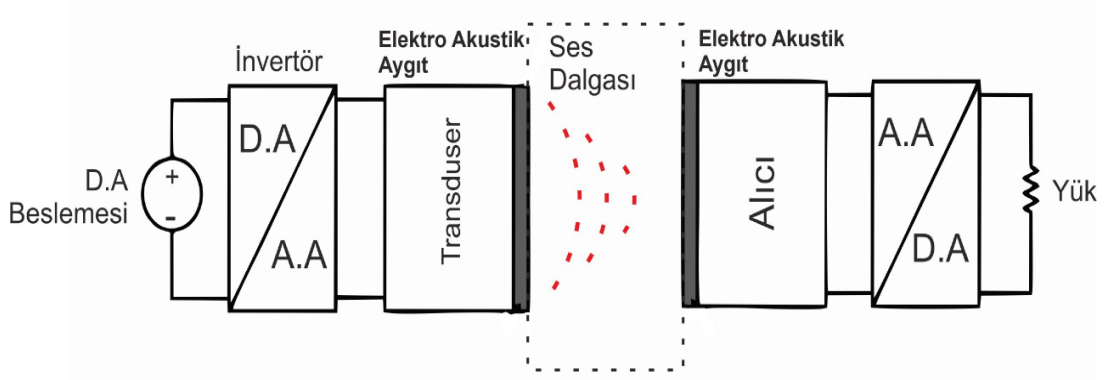
Kablosuz güç transfer sistemlerini Şekil 3.1'de gösterildiği gibi akustik güç transferi, optik güç transferi, mikrodalga güç transferi, endüktif güç transferi ve kapasitif güç transferi şeklinde sınıflandırılabilir [21].



Şekil 3.1. Kablosuz güç transfer sisteminin sınıflandırılması

3.1.1. Akustik Güç Transferi

Akustik güç transfer sistemleri, gücü transfer etmek için ses ve ultrasonik ses dalgalarını kullanır ve yapıları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Primer tarafta, bir elektro akustik cihaz, tipik olarak tipik bir piezoelektrik cihaz, elektrik enerjisini akustik güce dönüştürmek ve gücü ortam boyunca iletmek için kullanılır. Sekonder tarafta bir başka elektro akustik cihaz, akustik gücü tekrar elektriksel forma dönüştürür ve yüke gönderir. Bazı durumlarda, mekanik empedansı eşleştirmek ve böylece çıkış gücünü maksimize etmek için dönüştürücü ile ortam arasına bir ara eşleştirme tabakası yerleştirilir. Empedans uyumu, sekonder taraftaki elektrik devresi ile de gerçekleştirilebilir. Burada bir DA-DA dönüştürücü genellikle çıkış redresörü ile yük arasına bağlanır [21].

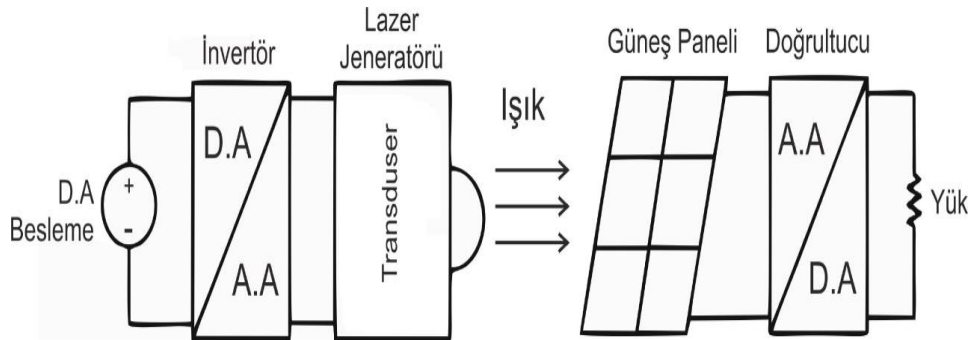


Şekil 3.2. Bir akustik güç transfer sisteminin yapısı [21]

Akustik güç transfer teknolojisinin avantajı, göreceli olarak insan vücudu için güvenilir oluşu ve metal detektörlerinden rahat bir şekilde geçebilmesidir. Araştırmalar, implante edilebilir tıbbi cihazlar, su altı sensör ağları ve metal güç transferi gibi hem düşük hem de yüksek güçlü uygulamalarda yapılmıştır [22-25].

3.1.2. Optik güç transfer sistemi

Optik güç transfer sistemi, gücü aktarmak için esas olarak yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar olan Terahertz (THz) aralığında lazer ışığı kullanmaktadır ve yapısı Şekil 3.3 'de gösterilmiştir [26,27]. Primer taraftaki lazer jeneratörü, elektrik gücünü ışığa dönüştürmek için kullanılır. Sekonder tarafta, bir fotovoltaik cihaz ışığı alır ve onu tekrar elektrik şekline dönüştürür. Lazer jeneratör tipleri, gaz lazeri, kristal lazerler, aktif fiber lazerler ve yarı iletken diyot lazerleri içerir; burada diyot lazer daha küçük boyuta ve daha yüksek verimliliğe sahiptir [28].



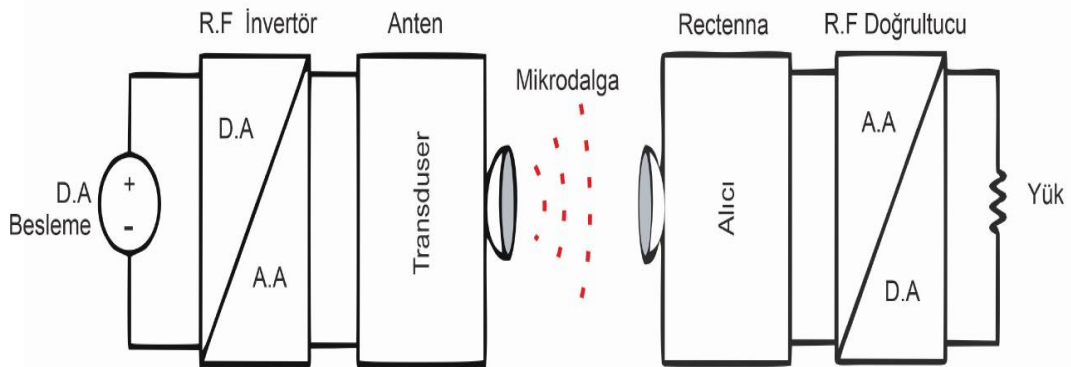
Şekil 3.3. Optik güç transfer sisteminin yapısı [26]

Optik güç transfer teknolojisinin en önemli avantajı, etkili kolimasyon yeteneğidir, bu da ışınlama yolundan çok az güç sızıntısı olduğu anlamına gelir [29].

Bu teknoloji başlangıçta uzay aracı ve uyduların dış uzay uygulamaları için geliştirilmiştir [30]. Son zamanlarda, su altı ortamlarında ve düşük güçlü implante edilebilir biyomedikal cihazlara kadar genişletilmiştir [31,32].

3.1.3. Mikrodalga Güç Transferi

Mikrodalga güç transferi, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, Gigahertz (GHz) aralığında elektromanyetik dalgayı kullanan radyo frekansı güç transferi olarak da adlandırılır [33]. Bir anten, primer tarafta güç dönüştürücü görevi görür ve bir Rectenna(doğrultucu), sekonder tarafta alıcı görevi görür [34]. Bu sistemde, hem radyo frekans evirici hem de alıcı yüksek frekanslı rezonans dönüştürücülerdir. Empedansları, sistem gücünü en üst düzeye çıkarmak için anten ve rectennanın empedanslarıyla eşleşecek şekilde tasarlanmıştır [35].



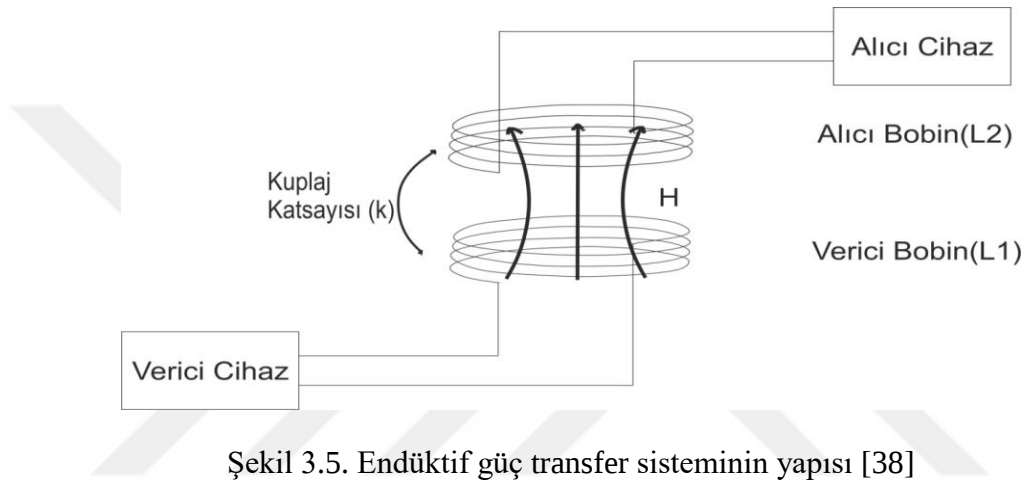
Şekil 3.4. Bir mikrodalga güç transfer sisteminin yapısı [33]

Mikrodalga güç transfer teknolojisinin avantajı, gücü uzun mesafeli bir özellik üzerinden aktarabilmesidir. Düşük güç uygulamalarında, büyük ölçekli bir hücresel ağ, etkili veri ve güç transferini aynı anda gerçekleştirmiştir ve kablosuz bir sensör ağı, boş alandaki mikrodalgalardan kendi kendine çalıştırılmıştır. Yüksek güç uygulamalarında, iyi bir kolimasyon gerçekleştirmek için yansıtma tüpleri kullanılmıştır. 30 kW güç yaklaşık olarak % 6,7 bir doğru akım verimi ile 1,6 km'lik bir mesafeden aktarılmıştır [21].

3.1.4. Endüktif Güç Transferi

EGT sistemi, güç transferini gerçekleştirmek için tipik olarak kHz ila MHz aralığında Radyoaktif olmayan manyetik alanlar kullanır. Devrede rezonanslar olduğu için buna manyetik rezonans da denilir [36]. İki düzlemsel bobin, manyetik alanlar oluşturmak için manyetik veya endüktif kuplör adı verilen gevşek bağlı bir transformatör oluşturur. Bobinler arasında büyük bir hava boşluğu olduğu için manyetik bağlantıları nispeten düşüktür [37].

Sistem temel yapısı Şekil 3.5 ile aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Endüktif güç transfer sisteminin yapısı [38]

EGT'nin avantajı, yüksek verimliliği ve yüksek güç kapasitesidir. Ayrıca ticari olarak en başarılı kablosuz güç transfer teknolojisi olmuştur. Uygulama alanları yaygın olarak entegre devreleri, biyomedikal cihazlar, sensor ağları, taşınabilir elektronik ürünler ve EA'lardır. Sistem verimliliği devre rezonansları ve yük koşulu ve transfer mesafesi düzenli şekilde ayarlandığı anda % 90'ın üzerinde Dc-Dc verim elde edebilir. Verimliliği önemli ölçüde etkilemeden ara rezonans bobinleri kullanılarak mesafe daha da uzatılabilir. Optimize edilmiş bir verici yapısı ile üç boyutlu (3D) çok yönlü güç transferi de gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, pratik uygulamada, yakındaki metal nesnelerdeki girdap akımı kayıplarının neden olduğu alan emisyonları ve aşırı ısınma ile ilgili güvenlik endişeleri gibi dezavantajları da vardır [21].

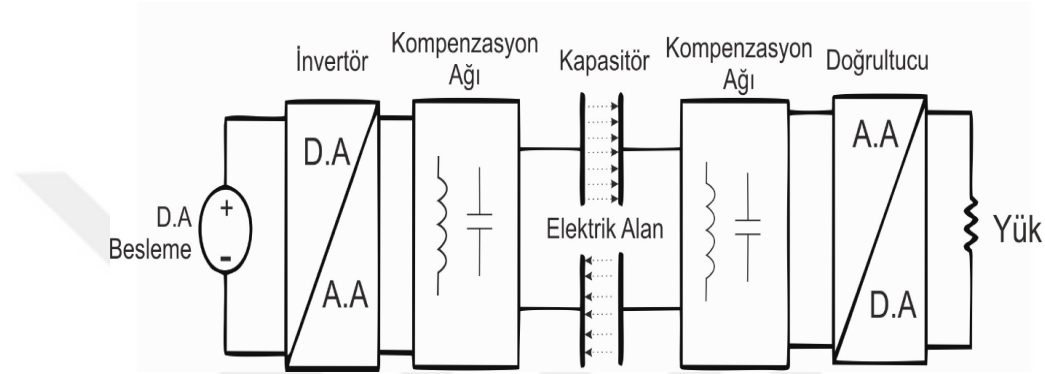
3.1.5. Kapasitif Güç Transferi

Kapasitif güç transferi sistemleri, güç transferinde yüksek verimli elektrik alanları elde etmek için kullanır [39]. Şekil 3.6'da ortak bir sistemin yapısı

gösterilmektedir. İki çift metal plaka, elektrik alanlarını oluşturmak için kapasitif kuplör olarak da adlandırılan iki kapasitör oluşturur [40].

İki kapasitör, giriş kaynağından çıkış yüküne bir güç akışı döngüsü sağlama görevi görmektedir. Bağlantı kapasitansları, plaka alanına, plaka mesafesine ve plakalar arasındaki dielektrik malzemeye bağlıdır [41].

Endüktif güç transfer sistemine benzer şekilde, güç transferi için plakalar üzerindeki gerilimleri artırmak üzere kondansatörlerle rezonans etmek için hem primer hem de sekonder tarafta kompanzasyon ağları gereklidir [42].



Şekil 3.6. Kapasitif bir güç transfer sisteminin yapısı [42]

Kapasitif güç transfer sisteminin EGT sistemlerine göre avantajı, düşük maliyeti ve yakındaki metallerdeki düşük girdap akım kaybıdır. Endüktif kuplör ile karşılaştırıldığında, kapasitif kuplör, sistemin maliyetini ve ağırlığını azaltmak için manyetik ferrit kullanımını ortadan kaldırabilir. Kapasitif güç transfer sistemindeki elektrik alanları, yakındaki metal nesnelerde önemli bir kayıp oluşturmaz. Kapasitif güç transfer teknolojisi, entegre devreler, biyomedikal cihazlar senkron makine uyarımı ve EA'lar gibi birçok uygulamada kullanılmıştır.

3.1.6. KGT Teknolojilerinin Karşılaştırması

KGT teknolojilerinin beş kategorisinin karşılaştırması Tablo 3.1'de sunulmuştur. Buradan EGT sistemi, EA şarj uygulaması için KGT ile gerçekleştirmek için iyi bir çözüm olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 3.1. KGT karşılaştırılması [21]

Teknoloji	Akustik	Optik	Mikrodalga	Endüktif	Kapasitif
Frekans	kHz MHz	THz	GHz	kHz MHz	kHz MHz
Güç	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
Verimliliği	Orta	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Mesafe	Uzun	Uzun	Uzun	Orta	Orta
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
Boyutu	Küçük	Küçük	Büyük	Orta	Orta
Uygulama alanları	Biyomedikal, su altında enerji hasadı, metal duvar	Biyomedikal, uzay, su altı	Hücrel ve sensör ağı, uzay	Biyomedikal, sensör ağı taşınabilir cihaz, elektrikli araç	Biyomedikal, elektrikli makine elektrikli araç

1. Tablo 3.1'in gösterdiği gibi, her yöntemin farklı özellikleri vardır. Dolayısıyla mutlak bir en iyi yöntem yoktur. Her yöntem farklı uygulama alanları için uygundur.

2. Manyetik indüksiyon yöntemi şu anda piyasadaki en popüler yöntemdir. Çoğu kablosuz şarjlı telefon bu yöntemi kullanır.

3. Rezonans yöntemi gelecekte en büyük potansiyele sahiptir. Mesafe ve güç araçlara uygun olmasına rağmen boyutunu küçültmek zordur. Şu anda bu yöntem ile 50 cm yarıçapındaki bobinlerden 2 m mesafe arasında 60 W güç sağlanabilmektedir [43].

4. Radyo dalgası alma yöntemi yalnızca düşük güçlü cihazlar için uygundur. Radyo dalgasının yönünü kontrol etmek çok zordur bu nedenle güç kaybı çok fazladır.

5. En önemli sorun şarj mesafesidir. Mevcut kablosuz şarj ürünleri, birbirine sıkı kuplaj teknolojisi ile bağlanmaktadır. Bu nedenle şarj mesafesi çok kısadır. Ancak güç elektroniği teknolojisinin gelişmesiyle birlikte şarj mesafesinde artış gerçekleşmiştir [44].

3.2. Elektrikli Araçlar ve Batarya Teknolojileri

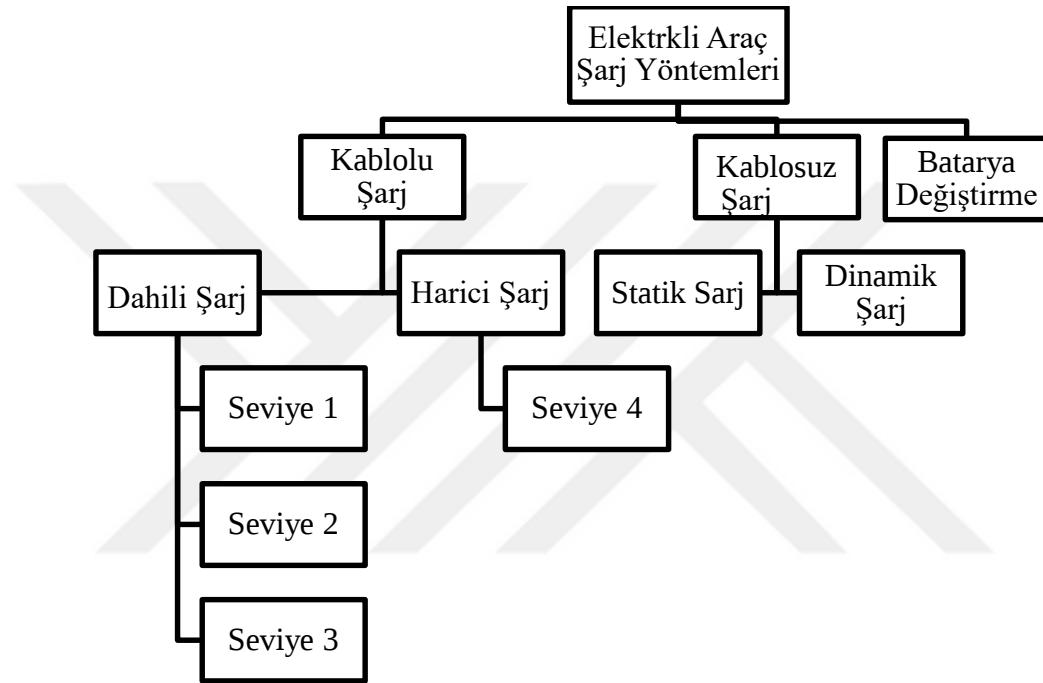
Bataryaların kapasite sorunlarına ek olarak şarj etme olayı Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA) için başka bir zorluktur. Şarj teknolojisi ve batarya teknolojisi birbirini tamamlayıcı niteliktedir. EA sürücülerinin “menzil endişesini” serbest bırakmak için şarj teknolojisi çok önemlidir ve bataryalı EA endüstrisinde önemli bir rol oynar. Şarj teknolojisinin hızla gelişmesi ve şarj altyapısının yaygınlaşmasıyla, şarj daha rahat ve

daha hızlı hale gelmekte ve şarj yöntemlerine göre EA'lar farklı şarj altyapılarına ve şarj ekipmanlarına ihtiyaç duymaktadır [45].

3.2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Şarj Yöntemler

EA'lar da etkin olarak kullanılan şarj yöntemi olarak batarya değişimi, kablolu şarj ve kablosuz (endüktif) şarj olmak üzere üç farklı yöntem vardır [46].

Bu yöntemler Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. EA şarj yöntemleri

3.2.1.1. Batarya Değişirme teknolojisi

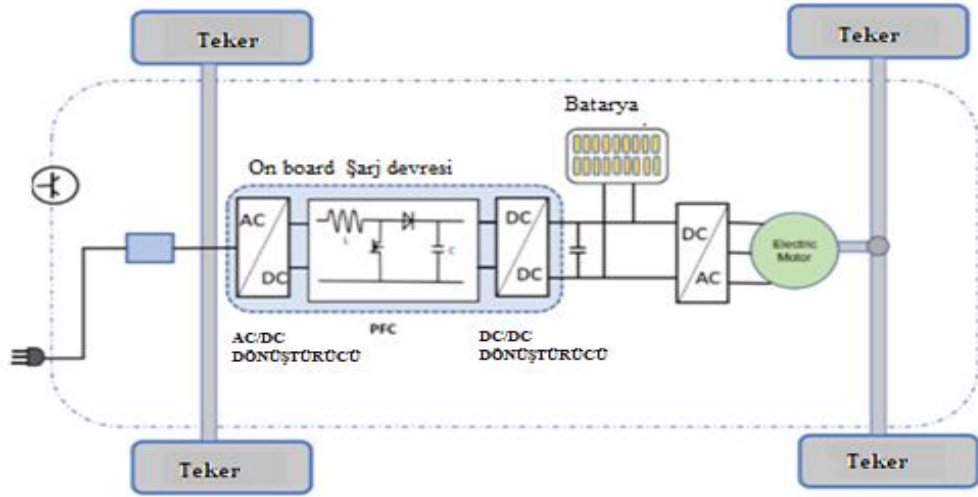
Batarya değişimi şüphesiz en çok zaman kazandıran ve kolay şarj yöntemlerinden biridir. Bir batarya değişirme istasyonunda, EA sahipleri biten pillerini yenisiyle değiştirebilirler. Bir batarya değişirme istasyonunda genellikle bir dağıtım transformatörü, AA / DA dönüştürücüler, akü şarj cihazları, robotik kollar, şarj rafları, bakım sistemleri, kontrol sistemleri ve akülerin değiştirilmesi ve şarj edilmesiyle ilgili diğer ekipmanlar bulunur [47,48]. Şekil 3.8'de değişime hazır araç bataryaları görülmektedir.



Şekil 3.8. EA için değişime hazır araç bataryaları görseli [48]

3.2.1.2. Kablolu Şarj teknolojisi

Kablolu şarj teknolojisi araç ile şarj cihazının fiziksel olarak bağlanmasına imkân sağlar [49]. Alternatif akım (AA) / doğru akım (DA) ve güç faktörünü düzeltmesine yardımcı olacak bir DA / DA dönüştürücülerden oluşur. Kablolu şarj teknolojisinde Dâhili (On-Board) ve Harici (Off-Board) şarj olmak üzere iki farklı tekniği bulunmaktadır [46]. Şekil 3.9’da, Dâhili (on-board) bir batarya şarj cihazının temel düzenini göstermektedir [45].



Şekil 3.9. Dâhili (on-board) batarya şarj cihazının temel düzeni [45]

i. Dâhili şarj yöntemi (On-board Charging Methods)

Batarya ve doğrultucu grubunun aracın içinde, şarj cihazının araç dışında olduğu bir yöntemdir [51]. Bu yöntemde şarj çıkışının güç seviyesi, şarj seviyesi olarak ifade edilmektedir [52]. Şarj işlemini süresinin uzunluğunu belirlemede en önemli parametre

güç seviyedir. Dâhili şarj yönteminde kullanılan dört şarj seviyesi vardır. Bunlar; Seviye 1, Seviye 2, Seviye 3 ve Seviye 4 olarak isimlendirilir [53,54].

Seviye 1 EA Şarj Cihazları: Standart bir priz ve uzatma kablosu yardımıyla herhangi bir güvenlik önlemi alınmadan şarj işlemi gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ile elektrikli araçların şarj işlemi konutlarda veya işyerlerinde park halinde şarj edilmesine olanak sağlar. Alternatif akım şarj istasyonlarında şarj olup şarj süreleri 8 ile 10 saat arasındadır. Seviye 1 şarj cihazları IEC 62196 standartlarına göre topraklama yapılması gerekmektedir. Ayrıca 16 A ve 250 V tek faz ve 480 V üç faz da sınırlandırılmıştır [46]. Seviye 1 en yavaş şarj yöntemi olsa da sürücünün ihtiyaçlarını karşılayabilir.

Seviye 2 EA Şarj Cihazları: Seviye 2 şarj cihazları, evde veya halka açık yerlerde şarj istasyonları için kullanılabilir. Bu şarj cihazı, tek fazlı veya üç fazlı AA şebekesi 80 Amperi geçmeyeceği halde, 19,2 kW güç değeri için 208/240 V AA'ya ihtiyacı vardır. Bu tip bir şarj cihazının tam şarj olması 3 ile 5 saate ihtiyaç duyar [56].



Şekil 3.10. Seviye 2 şarj durumunun bir görseli [56]

Seviye 3 EA Şarj Cihazları: Şekil 3.11 de gösterilen DA Hızlı Şarj Cihazı olarak da bilinen bu tür şarj cihazları, 50 kW'a kadar destek sağlamak için 480 V AA gerektirir. Şu andaki şarj etmenin en hızlı yoludur. Çoğunlukla halka açık istasyonlarda kullanılan DA hızlı şarj cihazları, bir redresör kullanarak AA gerilimini DA'ya dönüştürebilen, yerleşik olmayan bir şarj cihazıyla çalışır. Arabadaki batarya, DA

gücünü doğrudan istasyondan alır. Tesla'nın, süper şarj cihazı adı verilen kendi DA hızlı şarj cihazı vardır [56].



Şekil 3.11. DA hızlı şarj cihazının bir görseli [56]

Tablo 3. 2 Şarj Seviyeleri [46]

Özellikler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Güç	1-3kW	7-43kW	50-250kW
Dolum süresi	3-10s (% 80)	1-7s (% 80)	30dk (% 100)
Batarya tipi	Pb-acid, Ni-MH, Li-Ion	Ni-MH, Zebra, Li-Ion	Li-Ion
Konum	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları, caddeler, bağlantı geçiş noktaları	Müstakil evler, apartmanlar, özel mülkler, kamu alanları, park alanları, caddeler, bağlantı geçiş noktaları, şehirlerarası otobanlar, topluma açık alanlar

i. Harici Şarj Yöntemi (Off-Board Charging Methods)

EA'lar harici bir şarj cihazı ile ana güç şebekesine bağlanmakta olan bu yöntem Seviye 4 olarak bilinmektedir [57]. Bu yöntemde şarj cihazı aracın dışında olup araç

DA ile şarj olmaktadır. İletişim bağlantısı ile şarj cihazına batarya bilgileri ve şarj durumu ile ilgili bilgiler gönderilir. Bataryaya 400 A ve 500 V'a kadar yüksek gerilim sağlayabilmektedir.

Bu tarz hızlı şarj istasyonları çok yüksek güç ve elektronik cihazlar gerektirmektedir [52]. 20-30 dk kadar kısa bir sürede şarj edebilen bu teknoloji SAE J1772 Combo standardı ve Japon CHAdeMO standardı tarafından yönetilmektedir [46].

3.2.1.3. Endüktif Şarj (Kablosuz Şarj) Teknolojisi

Kablosuz şarj fikri, gücü araç ile şebeke arasında fiziksel temas olmadan bir hava boşluğu boyunca sabit veya hareketli araçlara aktarmaktır. EA ile şebeke arasında, kablo ile bağlantı yerine manyetik bir bağlantı kullanılır ve şarj işlemi elektromanyetik bir alan aracılığıyla gerçekleşir [58].

EA'ların kablosuz şarjı için 2 yöntem bulunmakta olup bunlar;

- i. Statik (Sabit) elektrikli araç kablosuz şarj
- ii. Dinamik (hareket halinde) elektrikli araç kablosuz şarj [59].

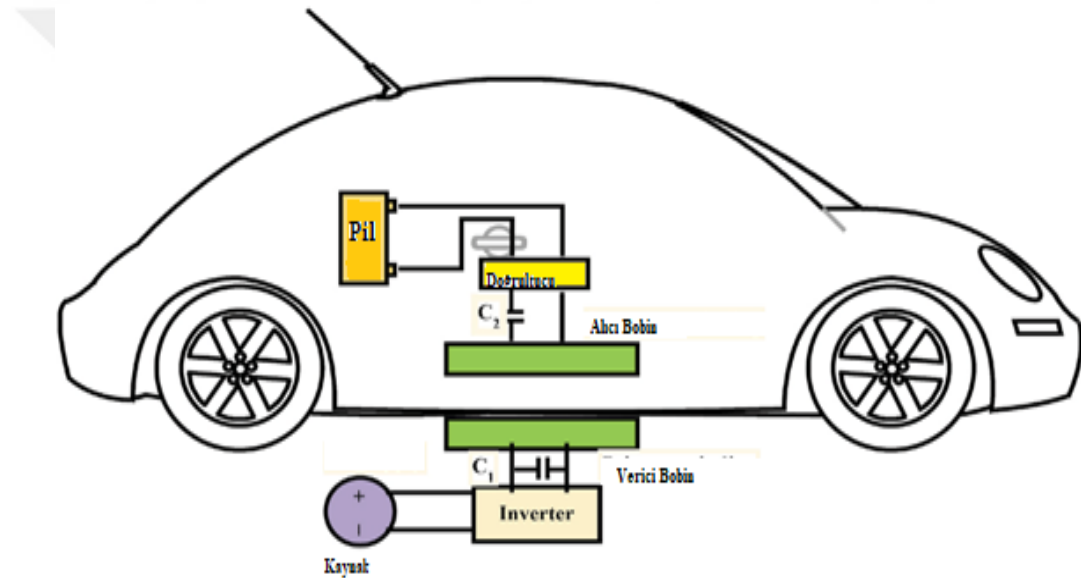
i. Statik (Sabit) Elektrikli Araç Kablosuz Şarj Sistemi

Statik şarj için EA, tasarlanmış bir otoparkta veya garajda şarj edilebilir. Statik kablosuzca şarj sistemi tüketiciler için kullanıcı dostu bir ortam sağlamak için başka bir kullanım yolu sunmaktadır. Statik kablosuz elektrikli araç şarj sisteminde, kablolu şarj cihazlarında bulunan güvenlikle ilgili takılma tehlikeleri ve elektrik çarpması gibi güvenlik sorunlarına bulunmamaktadır. Şekil 3.12'de statik kablosuz araç şarj sisteminin temel şeması göstermektedir [60]. Primer bobin (verici bobin) devresi, güç elektroniği devreleriyle yola veya zemine monte edilir. Primer bobin veya sekonder bobin normalde EA'ların önüne, arkasına veya merkezine monte edilir. Alıcı, enerjiyi güç dönüştürücüyü kullanılarak AA'dan DA'ya dönüştürülüp ve bataryaya aktarılmaktadır. Şarj süresi, kaynak güç seviyesine, şarj pedi boyutlarına ve iki sargı arasındaki hava boşluğu mesafesine bağlıdır. Hafif ticari araçları arasındaki ortalama mesafe yaklaşık 150–300 mm'dir. Statik kablosuzca şarj sistemi park alanları, otoparklar, evler, ticari binalar, alışveriş merkezleri gibi tesislerine kurulabilir.

Güç seviyeleri, 81,9–90 kHz frekans aralıkları dâhil olmak üzere, seviye 1 (3,3 kW) ve 2 (7,7 kW) için yakın zamanda duyurulan uluslararası SAE standartları (J2954) güç sınıfına uygundur [61].

Şu anda SAE organizasyonu, izin verilen yanlış hizalama ve alıcı pedlerinin arabadaki kurulum yeri ile ilgili standartlar üzerinde çalışmaktadır. Ön, arka ve aracın altındaki alıcı pedlerinin merkezi gibi çeşitli montaj konumlarına sahip bir dizi prototip sunulmuştur. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı çoğunlukla bobin tasarımı yoluyla güç transferi verimliliğini artırmaya odaklanırken, Auckland Üniversitesi, eklenti verimliliğini artırmak için bazı donanım ve yazılımlar (şarj pedi geliştirme dâhil) önermiştir.

Genel olarak, EA'lar için statik kablosuz şarj prototipleri veya laboratuvar deneyleri, 1 ile 20 kW güç aralığında, 100–300 mm hava boşluğu mesafesinden % 71 ile % 95 verimlilikle geliştirilmiştir [59].



Şekil 3.12. Statik kablosuz EA şarj sisteminin temel diyagramı [60]

i. Dinamik (Hareket Halinde) Elektrikli Kablosuz Araç Şarj Sistemi

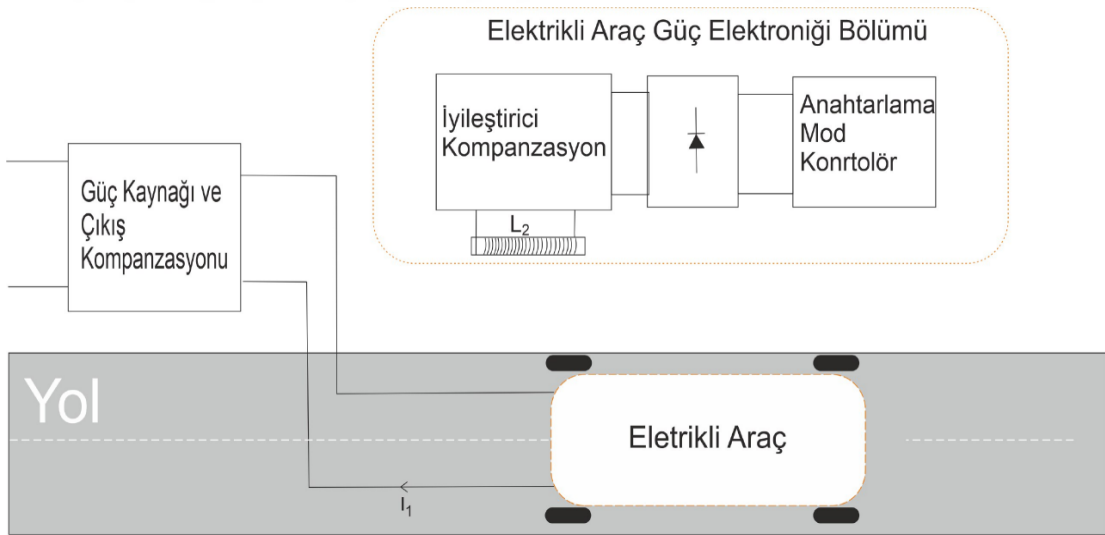
Statik kablosuz EA şarj sistemleri gibi, sekonder bobin araçların altına monte edilir. EA'lar vericinin üzerinden geçerken, bir alıcı bobin aracılığıyla manyetik bir alan oluşur. Güç dönüştürücü ve batarya yönetim sistemini kullanarak batarya bankasını şarj etmek için DA'ya dönüştürür. EA'ların sık şarj imkânı, mevcut EA'lara kıyasla genel batarya gereksinimini yaklaşık % 20 oranında azaltır [62].

Dinamik kablosuz şarj veya hareket halindeki KGT, hareket halindeki bir elektrikli aracı şarj etme yeteneğini ifade eder.

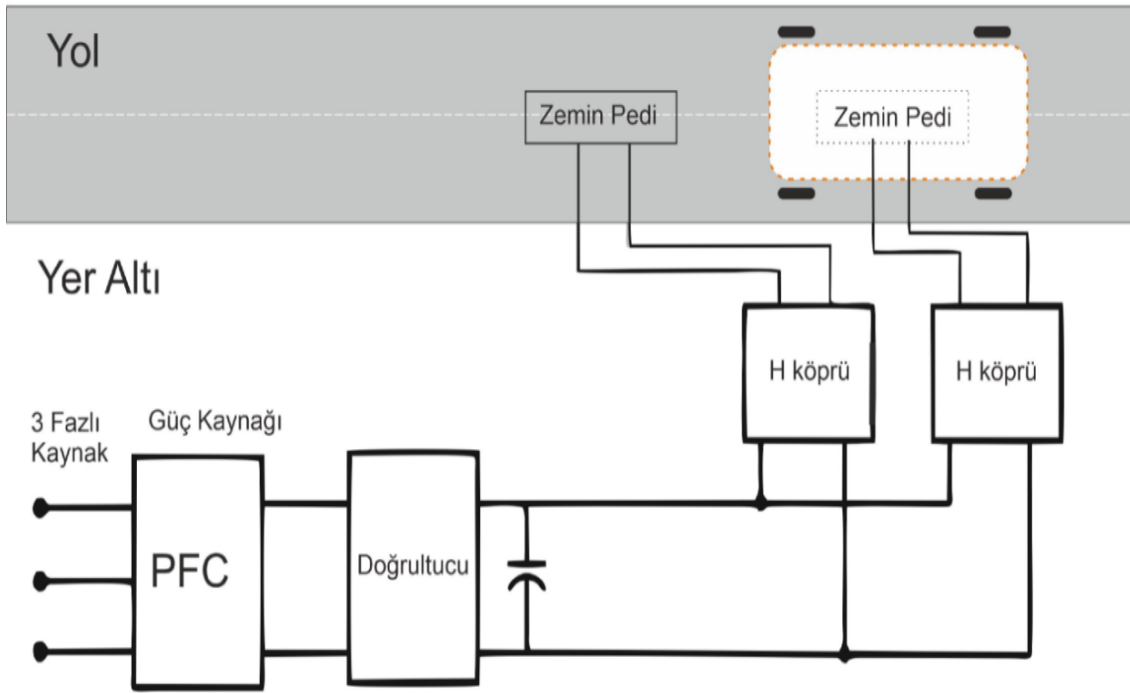
Dinamik kablosuz şarj, batarya boyutunun küçültülmesini sağlar ve maliyeti düşürür. Ayrıca EA'ların genel menzilini artırır [63,64].

Dinamik kablosuz şarj'ın bir zorluğu da, yüksek sistem verimliliğini kolaylaştırmak için yüksek güç oranlı elektronikler ve yüksek yanlış hizalama toleransı ihtiyacına yol açan bir dizi yol verici bobinleri ile hareket halindeki bir alıcı bobinin kısa etkileşim süresidir.

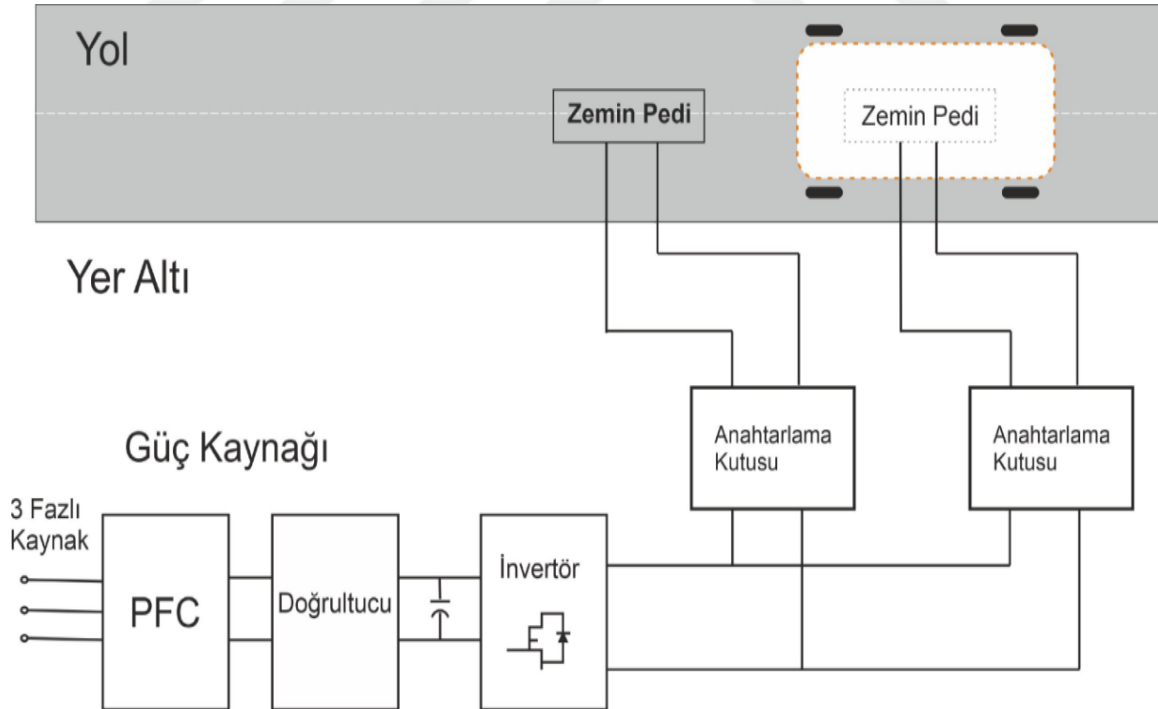
Dinamik kablosuz şarj, iki farklı yöntemden birinde uygulanabilir: birincisi tek bir uzun yollu verici kablosu kullanır (Şekil 3.13) iken ikincisi yol boyunca çok sayıda, küçük parçalı bobinlerden oluşur (Şekil 3.14) [65]. Bobin bölümlemesinin uygulamadaki zorluğu, bobinler için uygun aralığı yani bobin uzunluğunun bölüm aralığına oranını seçmektir. Şasiye monte edilmiş alıcı (sekonder) bobinli EA, primer bobinlerden yüksek frekanslı AA sinyalini yakalamak için kullanılır [66]. Uzun bir hat sisteminde, tek bir güç kaynağı, Şekil 3.13 ile gösterildiği gibi sabit akımı korurken tüm yolu çalıştırır. Segmentli (bölünmüş) dinamik kablosuz şarj, tam köprü evirici tarafından sağlanan çoklu topraklama pedlerinden oluşur [63,67,68]. Zemin pedi, her bir zemin pedi için ayrı H köprüsü dönüştürücü ile bağlanabilir (Şekil 3.14). Diğer bir yaklaşım, birden fazla toprak pedi besleyen tek bir yüksek güçlü evirici bağlamaktır. Her bir bobin, Şekil 3.15'de gösterildiği gibi bir anahtarlama devresi aracılığıyla açılıp kapatılır [67,69].



Şekil 3.13. Merkezi güç kaynağı tarafından sağlanan uzun yol [69]



Şekil 3.14. Topraklama pedlerine uzatılmış bağlantılara sahip merkezi güç kaynağı [69]



Şekil 3.15. Bölümlere ayrılmış kablosuz güç transferi [69]

3.2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar-Akümülatörler

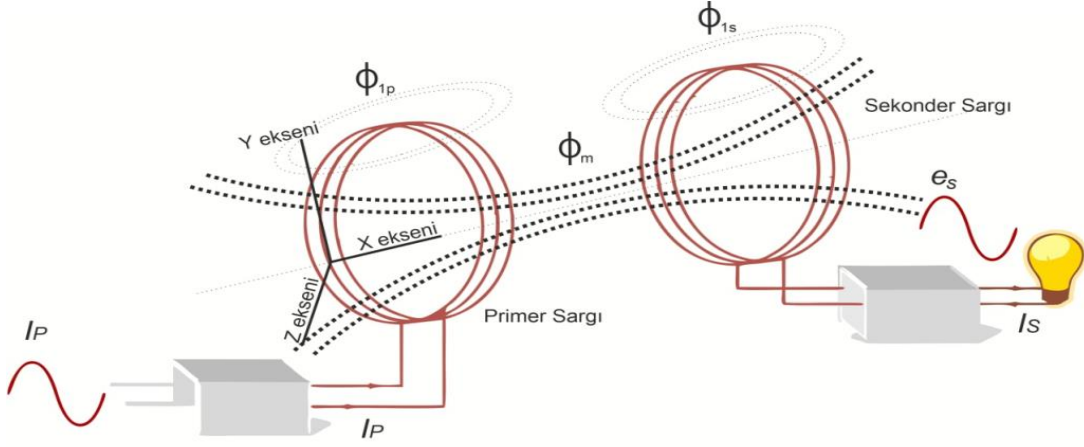
Akülerinin teknolojik gelişimi, elektrikli otomobil endüstrisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çekiş aküleri EA'nın tahrik sistemine güç sağlamak için kullanılmaktadır. Batarya teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, bu piyasasında artan sayıda farklı tip güç transfer verimliliği güç bataryaları ortaya çıkmıştır. Bataryaların yeni teknolojilere rağmen, çekiş bataryası gereksinimlerin önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. Çalıştırma, aydınlatma ve ateşleme bataryalarından farklı olarak, EA bataryalarının sürekli güç sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle, daha yüksek bir enerji kapasitesi son derece önemlidir. Dahası yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve yüksek enerji yoğunluğu da çok önemlidir. Şu anda, AA'larda kullanılan şarj edilebilir batarya türleri temel olarak kurşun-asit piller, nikel-metal hibrit (Ni-MH) piller, lityum iyon bataryaları içermektedir. Bu bataryaların özelliklerini Tablo 3.3 ile özetlenebilir [45].

Tablo 3.3. Batarya teknolojilerinin özelliklerin tablo halinde gösterimi [45]

Katot Malzemesi	Özgöl Enerji (Wh/kg)	Döngü	Optimal Çalışma Sıcaklığı (°C)	Verimlilik (%)	Avantaj	Dezavantaj
Kurşun asit	30–50	2000–4500	–20–60	70–90	Düşük maliyetli, Gelişmiş teknoloji, Yüksek özgöl güç	Düşük özgöl enerji, kısa hizmet ömrü, yüksek bakım gereksinimleri
Ni-Fe	30–55	1200–4000	–10–45	75	Çekiş uygulamaları için iyi kapsam	Düşük özgöl enerji, güç ve enerji yoğunluğu; yüksek kendi kendine deşarj
Ni-Zn	60–65	100–300	–10–50	76	Yüksek özgöl enerji	Yüksek maliyet, kısa hizmet ömrü
Ni-Cd	40–50	2000–3000	–40–60	60–90	Yüksek özgöl enerji	Yüksek maliyetli kadmiyum toksisitesi, geri dönüşüm sorunları
Ni-MH	50–70	500–3000	–40–50	50–80	Yüksek özgöl enerji, güvenlik, Uzun ömür	Yüksek maliyet, hafıza etkisi
Ni-H ₂	60–70	6000–40000	–20–60	80–90	Aşırı uzun ömür döngüsü ve hasarsız aşırı şarj	Pahalı, düşük bir hacimsel enerji yoğunluğu,
LiCoO ₂	150–190	500–1000	150	80–90	Ortak kullanımda, yüksek güç yoğunluğu,	Düşük kendi kendine deşarj, düşük güvenlik, yüksek maliyet
LiMn ₂ O ₄	100–135	500–1000	250	85	Yüksek güç yoğunluğu, çok iyi termal kararlılık	Orta çevrim ömrü, daha düşük enerji
LiFePO ₄	90–120	1000–2000	270	90	Çok iyi termal kararlılık ve çevrim ömrü, daha hafif	Düşük enerji yoğunluğu

3.3. Elektrikli Araç Teknolojilerinde Kablosuz Güç Transferi

EA'ların ve diğer tüketici ürünlerinin kablosuz şarjı için endüktif güç transfer sistemini geliştirmek ve kabul etmek yüzyıldan fazla sürsede, temel fikir Ampere'nin dolaşım yasasına ve Faraday'ın indüksiyon yasasına dayanmaktadır. Bu iki yasa ile güç transferinin nasıl gerçekleştiği Şekil 3.16 yardımıyla açıklanabilir [70].



Şekil 3.16. Endüktif kuplaj ile bağlanmış iki bobin [70]

Şekil 3.16’da endüktif kuplaj ile bağlanmış iki bobini göstermektedir. Burada, alt simge P ve S sırasıyla primer ve sekonder bobini ifade eder. Φ_m , Φ_{IP} ve Φ_{IS} terimleri sırasıyla karşılıklı akı, primer kaçak akısı ve sekonder kaçak akısıdır. M , L_P , L_S sırasıyla karşılıklı endüktans, primerin öz endüktansı ve sekonder bobinin öz endüktansı ifade etmektedir. Primer bobine zamanla değişen bir akım uygulandığında, primer bobini çevreleyen bölgede aynı frekansta zamanla değişen bir akı üretilir. Kapalı bir yol etrafındaki manyetik alanın kuvveti, bobin tarafından taşınan akımla doğru orantılıdır ve Ampere yasası tarafından denklem 3.1 bulunabilir [71].

$$\oint_1 Hdl = \int_s Jds \quad (3.1)$$

Akımlar, N dönüşlü bir bobindeki tellerle taşıyorsa, denklem 3.1 aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir:

$$\oint_1 Hdl = N_p I_p \quad (3.2)$$

Burada, 'H' manyetik alan kuvvetidir, N_p dönüş sayısıdır, I_p primer bobinde akan akımdır ve l kapalı yolun çevresinin uzunluğudur. Zamanla değişen manyetik akı, sekonder bobini bağlar ve emk, denklem 3.3 ile verilen Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası ilkesine göre sekonder bobinde indüklenir.

$$e_s = N_s \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.3)$$

Burada e_s sekonder bobinde indüklenen elektro motor kuvvettir ve Φ_m ise sekonder bobini bağlayan akıdır. Bu elektro motor kuvvet devre kapalıysa yükte bir akım oluşturur. Denklem 3.2 'den, primerdeki akımın büyüklüğü ne kadar büyükse,

manyetik alan gücünün o kadar güçlü olacağı anlaşılabilir. Denklem 3.3 'den, karşılıklı akının değişim oranı ne kadar yüksekse, sekonderde indüklenen elektro motor kuvvetin o kadar büyük olduğu anlaşılabilir. Besleme frekansına eşit olan bu karşılıklı akı değişim oranı, sekonderde yüksek elektro motor kuvvet oluşturmak için primerde yüksek frekanslı bir akımın gerekli olduğunu gösterir. Bununla birlikte, tüm akı sekonder etkilemez; kuplaj katsayısı k , ortak akıyı toplam akı ile ilişkilendirir.

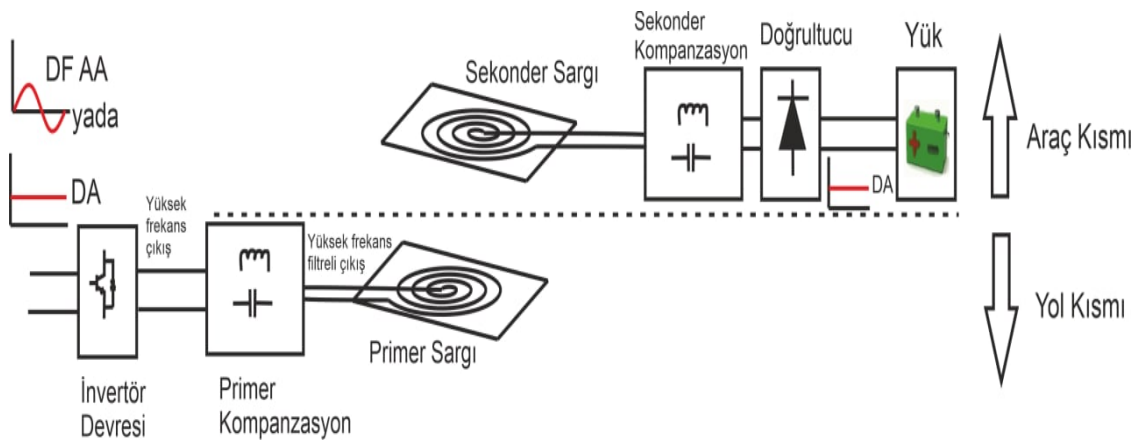
$$k = \frac{\phi_m}{(\phi_m + \phi_{lp})} \quad (3.4)$$

(3.4) 'te $\Phi_P = \Phi_m + \Phi_{IP}$ primer bobin tarafından üretilen toplam akıdır. Bağlanma katsayısı cinsinden indüklenen elektro motor kuvvet (3.5) ile verilmiştir.

$$e_s = k N_s \frac{d\phi_p}{dt} \quad (3.5)$$

Tüm akı sekonder ile bağlantılıysa, $k=1$ 'dir ve akıların hiçbiri birbirine bağlanmazsa, $k=0$ 'dır, yani $0 \leq k \leq 1$ 'dir. k değerlerine dayanarak, manyetik olarak bağlı sistem iki kategoride sınıflandırılabilir. Sıkı bağlı sistemler ve gevşek bağlı sistemler. Transformatör ve endüksiyon motoru gibi sıkıca bağlı sistemlerde, primer sargı sekonder sargının yakınına yerleştirilir ve yüksek manyetik geçirgenliğe sahip çekirdek üzerine sargılar yerleştirilerek akı şekillendirilir. Sıkı kuplaj nedeniyle k değeri transformatör için genellikle % 95 ile % 98, endüksiyon motoru için ise yaklaşık % 92 arasındadır [72].

EA batarya şarjı için endüktif güç transfer sisteminin geliştirilmiş bir blok diyagramı Şekil 3.17'de ki gibi çizilebilir [70].



Şekil 3.17. EA batarya şarjı için EGT sisteminin geliştirilmiş blok şeması [70]

İletim bobininden alıcı bobine güç transferini sağlamak için, şebekeden gelen AA şebekesi, AA / DA ve DA aracılığıyla yüksek frekanslı AA'ya dönüştürülür. Genel sistem verimliliğini artırmak için, seri ve paralel kombinasyonlara dayalı kompanzasyon topolojisi hem verici hem de alıcı taraflara dâhil edilmiştir [74,75].

Tipik olarak aracın altına monte edilen alıcı bobin, salınan manyetik akı alanlarını yüksek frekanslı AA'ya dönüştürür. Yüksek frekanslı AA daha sonra yerleşik piller tarafından kullanılan kararlı bir DA kaynağına dönüştürülür. Manyetik düzlemsel ferrit plakalar, herhangi bir zararlı sızıntı akısını azaltmak ve manyetik akı dağılımını iyileştirmek için hem verici hem de alıcı tarafında kullanılır [59].

Yüksek frekanslı gerilim, bir kompanzasyon ağı ve primer bobin aracılığıyla yüksek frekanslı bir akım biçiminde enerji üretir. Volt Amper (VA) derecelendirmesini ve dolayısıyla yüksek frekanslı güç dönüştürücünün boyutunu en aza indirmek için primer giriş gerilimi ve fazda akımın olması için bir primer kompanzasyon devresi eklenir. Ayrıca, primer kompanzasyon, primeri besleyen güç elektroniği dönüştürücüsünden üretilen istenmeyen frekans bileşenlerini bloke eden bir bant geçiş filtresi görevi görür. Bu nedenle, primer bobinde neredeyse sinüzoidal bir akım akar ve bu primer bobini besleyen dönüştürücünün yumuşak anahtarlama işlemini de sağlar [75]. Daha sonra güç, primer bobin akımı tarafından hava boşluğunda üretilen akı yoluyla primer bobine karşılıklı olarak bağlanan sekonder bobin aracılığıyla araç tarafına aktarılır. Sekonder bobin tarafından alınan enerji daha sonra sistemin güç transfer kapasitesini iyileştirmek için eklenen sekonder kompanzasyon devresi tarafından işlenir [76]. Son olarak, bu şekilde alınan gerilim, yük (batarya) tarafından kullanılabilir hale getirilecek şekilde düzeltilir. Kumandaya bağlı olarak, bazen redresör ile yük arasına ek bir DA-DA dönüştürücü de dâhil edilebilir [77].

EA'lara güç sağlamak için manyetik olarak bağlı sistem kullanılması durumunda, yol yüzeyinde tutarsızlığa ve yol ile araç arasında daha iyi açıklığa izin vermek için büyük bir hava boşluğu gereklidir. Bu büyük hava boşluğu nedeniyle, sızıntı akısı çok yüksektir ve bağlantı katsayısı % 1 ile % 3 arasındadır. Bu tür uygulamalar gevşek bağlı sistemler altında sınıflandırılır. Gevşek bağlanmış sistemlerde zayıf bağlantı, zayıf güç transferine yol açar. Kaplini iyileştirmek ve kaçak endüktanslı kompanze etmek için, primer ve sekonder sargılarda kapasitif kompanzasyon gereklidir [78].

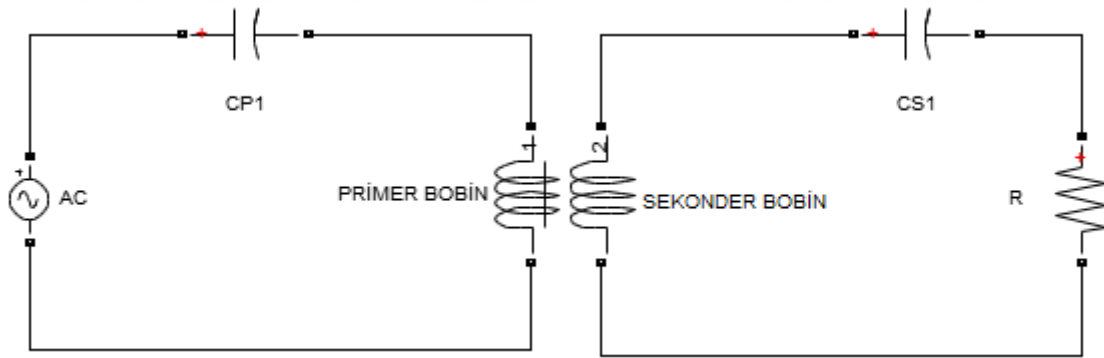
3.3.1. Kompanzasyon Topolojileri

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

- A) Seri seri (SS)
- B) Seri paralel (SP)
- C) Paralel seri (PS)
- D) Paralel paralel (PP) [79].

A) Seri Seri Topoloji

Bu topoloji primer bobinde, primer gerilimi azaltmaya yardımcı olur ve kullanıcı talebine bağlı olarak sekonder bobin, seri olarak kompanse edilirse, çıkış geriliminin dengelenmesine yardımcı olabilir. Bu yöntemde, kondansatörler primer bobinde seri olarak endüktansa ve sekonder bobinde aynı bağlantıya bağlanır [80]. Şekil 3.18’de gösterildiği gibi bu topoloji, çoğunlukla kararlı bir frekans ve gerilim gerektirmesi nedeniyle tüketiciler tarafından tercih edilmektedir.



Şekil 3.18. Seri Seri topoloji [69]

Rezonans kompanzasyon kapasitansları denklem (3.6) ve (3.7) ile hesaplanabilir.

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 L_p} \quad (3.6)$$

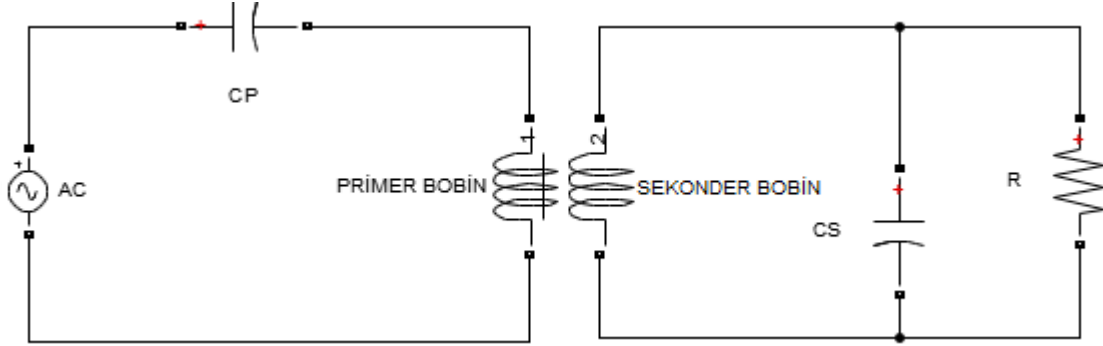
$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s} \quad (3.7)$$

Seri - seri topoloji bir "akım kaynağı" gibi çalışır. Frekans yüksek ve yük direnci yeterince düşük olduğu sürece sabit bir çıkış akımı verir. Denklem 3.8 ile hesaplanır.

$$I_{Load} = \frac{1}{\omega_0 M} V_1 \quad (3.8)$$

B) Seri Paralel Topoloji

Bu topoloji, Şekil 3.19'da gösterildiği gibi SS topolojisinin primer bobini olarak tipik bir yapıya ve kompanzasyona sahiptir. Sekonder bobinde ise kapasitör paralel olarak bağlanır ve böylece kararlı bir akım çıkışı sağlar [80, 81]. Bu kompanzasyon topolojisi, EA sistemleri gibi çoklu yüklerle sahip sistemler için tasarlanmıştır.



Şekil 3.19. Seri Paralel topoloji [69]

Devrede kullanılacak kondansatörlerin hesabı için denklem (3.9) ve (3.10) kullanılır.

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.9)$$

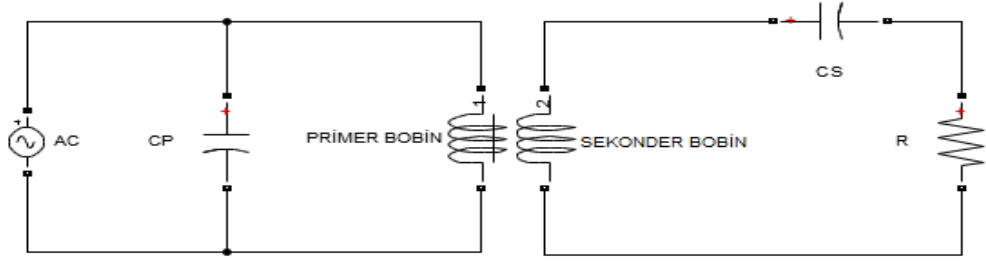
$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s} \quad (3.10)$$

Çıkış geriliminin genliği yaklaşık olarak denklem (3.11) ile hesaplanabilir.

$$V_{yük} = \frac{L_s}{M} V_1 \quad (3.11)$$

C) Paralel Seri Topoloji

Bu yapılandırma, kapasitörün primer bobinde paralel ve sekonderde seri halinde olmasını içerir. Burada sistem bir gerilim kaynağı görevi görür, ancak çıkış gücü primerdeki paralel bağlantı nedeniyle azalacaktır [81]. Primerdeki paralel kapasitör akımı düşürür böylece Şekil 3.20'de gösterildiği gibi manyetik alan gücünü azaltır.



Şekil 3.20. Paralel Seri topoloji [82]

Rezonans kompanzasyon kapasitansları denklem (3.12) ve (3.13) ile hesaplanır.

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 L_p} \quad (3.12)$$

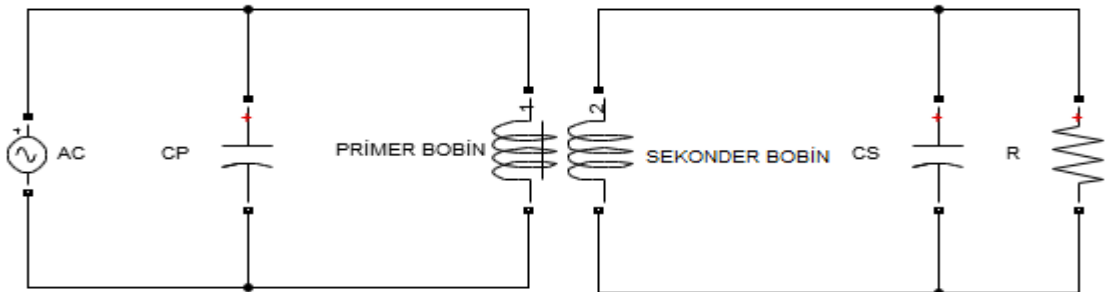
$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_s - \frac{M^2}{L_p} \right)} \quad (3.13)$$

Çıkış geriliminin genliği yaklaşık olarak (3.14) ile hesaplanabilir

$$V_{yük} = \frac{M}{L_p} V_1 \quad (3.14)$$

D) Paralel Paralel Topoloji

Bu topolojide, Şekil 3.21'de gösterildiği gibi kapasitörler hem primer hem de sekonder bobinlere paralel bağlanmıştır. Bu düşük bir verimlilikle çok zayıf bir performans üretir. Bu nedenle daha nadir bir kullanıma sahiptirler.



Şekil 3.21. Paralel Paralel topoloji [69]

Rezonans kompanzasyon kapasitansları denklem (3.15) ve (3.16) ile hesaplanır.

$$C_p = \frac{1}{w_0^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (3.15)$$

$$C_s = \frac{1}{w_0^2 \left(L_s - \frac{M^2}{L_p} \right)} \quad (3.16)$$

Her iki kapasitör de aynı değerlere sahiptir. Paralel-paralel topoloji bir "akım kaynağı" gibi davranır ve sabit bir çıkış akımı üretir. Çıkış akımının genliği aşağıdaki denklem ile yaklaşık olarak bulunabilir [81].

$$I_{\text{yük}} = \frac{1}{w_0(L_p L_s - M^2)} V_1 \quad (3.17)$$

Tablo 3. 4 Kompanzasyon çeşitlerinin genel özeti [82]

Topoloji	Kaynak Türü	Değişimden Bağımsız	Kısa mesafede Güç faktörü	Rezonans Durumunda Toplam Empedans	Verim
SS	Akım	Cs	Düşük/ Çok Yüksek	Düşük	Çok Yüksek
SP	Gerilim	Cs	Düşük/ Yüksek	Düşük	Orta
PS	Gerilim	Cp	Yüksek/ Orta	Yüksek	Orta
PP	Akım	Cp	Çok Yüksek/ Orta	Yüksek	Orta

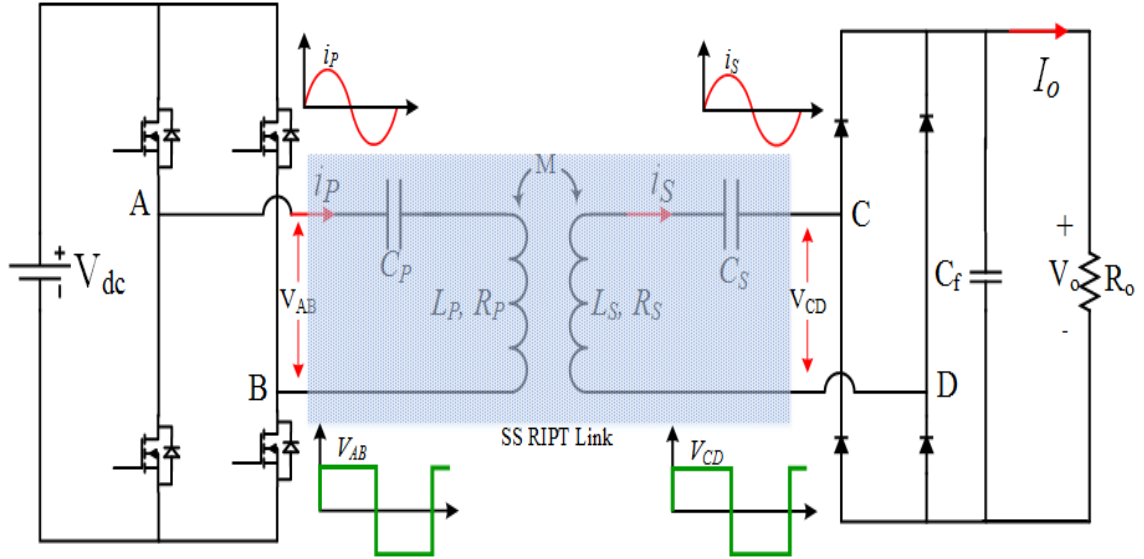
Seri Seri topoloji seçeneği yük ve manyetik bağlantı ne olursa olsun, yalnızca özendüktanslara bağlı olarak kompanzasyon kapasitanslarının seçilmesine izin verir. Bu nedenle, bobin arasında yanlış hizalamalar olması durumunda, karşılıklı endüktans değişikliklerine rağmen sistem rezonans altında çalışmaya devam eder. Bu nedenlerden dolayı, SS topolojisi EA batarya şarjı için uygun hale gelmektedir. Araçların EGT ile şarjında, bobinler arasındaki azda olsa yanlış hizalamalar bile kaçınılmazken mükemmel hizalama sadece ideal bir durumu temsil etmektedir [83].

Bir SS rezonant endüktif bağlantı teorik olarak verimlilik, bileşen sayısı, kontrolün karmaşıklığı ve maliyet açısından en iyisidir ve bu nedenle hazırlanan bu

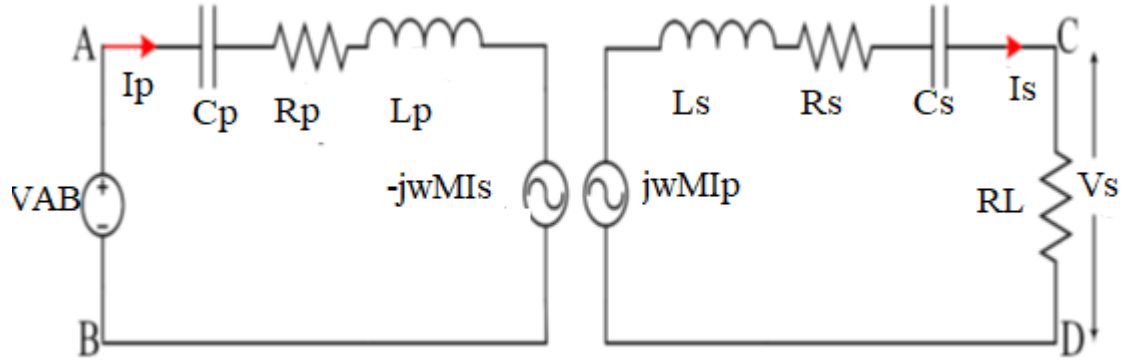
tezde simülasyon için SS endüktif bağlantılı devre üzerinde çalışmalarına yoğunlaşmıştır.

3.4 Örnek Bir Kablosuz Güç Transfer Sisteminin Simülasyon Programı İle Çalıştırılıp İncelenmesi

Rezonans endüktif güç transfer ile kablosuz güç transferi, güncel ve üzerinde en çok çalışılan KGT teknolojisidir. Nikola Tesla'nın öncülüğünü yaptığı ve son zamanlarda modern elektronik bileşenlerle etkinleştirilerek yeniden popüler hale gelmiştir. Bu teknikte, aynı frekansta rezonansa giren iki veya daha fazla ayarlanmış rezonans devresi kullanılır [3]. Şekil 3.22'de bir SS kompanze edilmiş rezonant EGT sisteminin eşdeğer devresini göstermektedir. SS kompanze edilmiş rezonant endüktif güç transferi bağlantısının primer tarafı, DA gerilimi V_{DC} 'yi yüksek frekanslı AA gerilimi V_{AB} 'ye dönüştüren gerilim kaynaklı tam köprü invertöründen beslenir. Sekonder tarafta, kapasitif filtreli C_f bir doğrultucu, yüksek frekanslı gerilimi yükün R_O gerektirdiği DA gerilim V_O ve DA akım I_O 'ya dönüştürür. SS topoloji, ideal rezonans koşulunda primer gerilim kaynağından beslendiğinde bir akım kaynağı görevi görür [84]. Bu nedenle basit bir kapasitif filtre yeterlidir. Tam köprü evirici, sonsuz sayıda harmonik içeren bir kare dalga gerilimi V_{AB} üretir. Bununla birlikte, SS-endüktif güç transfer bağlantısı, primer besleyen güç elektroniği dönüştürücüsünden üretilen istenmeyen frekans bileşenlerini bloke eden bir bant geçiş filtresi görevi görür. Bu nedenle, endüktif güç transfer bağlantısından geçen akım neredeyse sinüzoidaldir. Bu, SS-endüktif güç transfer bağlantısının parametrelerini hesaplamak için birinci harmonik yaklaşım yönteminin kullanılmasına izin verir [85].



Şekil 3.22. SS kompanze edilmiş rezonant EGT sisteminin eşdeğer devresi [70]



Şekil 3. 23 SS endüktif güç transfer devresinin basitleştirilmiş eşdeğer modelini [70]

Şekil 3.23'te C_P primer kondansatör C_S sekonder kondansatör R_P primer bobinin iç direnci R_S sekonder bobinin iç direnci L_P primer bobinin öz endüktansı L_S sekonder bobin öz endüktansı M karşılıklı bobin endüktansı ve ω çalışma frekansını ifade etmektedir. Primer bobin kompanze edilir (primer bobinin kendi endüktansı ile rezonansa girecek şekilde yapılır). Kaynağın VA değerini en aza indirmek için güç faktörünü iyileştirirken, sekonder sargı ise sistemin güç transfer kapasitesini artırmak için dengelenir [70].

Bir SS endüktif KGT sistemi için primer ve sekonder kapasitörün değeri denklem (3.5 ve 3.6) ile hesaplanabileceği belirtilmiştir.

Denklemlerde bulunan ω_0 , devrenin rezonans frekansını temsil eder. Primer kapasitör, primer bobinin kendi kendine endüktansı ile rezonansa girecek şekilde yapıldığından, keskin şekilde ayarlanmış bant geçiren filtre görevi görür ve bu nedenle,

primer akım I_p neredeyse sinüzoidaldır. Transformator hareketinden dolayı sekonder akım I_s 'de neredeyse sinüzoidaldır [70].

Kapasitif çıkış filtreli bir redresör için, redresör girişinde kare bir gerilim dalgası görünür. Bu nedenle, C-D terminali V_{DC} 'deki gerilim, evirici çıkışına benzer bir kare dalgadır [90,91].

Diyot köprüsü doğrultucunun sürekli iletimi dikkate alınır, C-D terminalinden görülen yük direnci R_O denklem (3.18) ile hesaplanabilir [88].

$$R_l = \frac{8}{\pi^2} R_O \quad (3.18)$$

Bu aşamada, endüktif güç transfer sisteminin iki önemli kavramını tanıtmak önemlidir: Kalite faktörü ve çatallanma olayı. Bir endüktif güç transfer sistemi için bobinler tasarlanırken bu iki kavramın dikkate alınması gerekir.

Endüktif güç transfer sistemi için, primer ve sekonder kalite faktörü ayrı ayrı tanımlanır. Bir SS-endüktif güç transfer sisteminde sekonder taraf ve primer taraf için kalite faktörünün değeri sırasıyla denklem (3.19) ve (3.20) ile verilebilir [89].

$$Q_S = \frac{(\omega_0 L_S)}{(R_S + R_P)} = \frac{1}{\omega_0 C_S (R_L + R_S)} \quad (3.19)$$

$$Q_P = \frac{\omega_0 L_P}{(R_r + R_p)} = \frac{1}{\omega_0 C_p (R_p + R_r)} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20) 'de R_r , rezonans durumunda primer tarafa yansıyan sekonder tarafın empedansıdır ve denklem (3.21) ile bulunabilir.

$$R_r = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_S + R_L} \quad (3.21)$$

Yukarıdaki denklemlerden, devredeki reaktansın belirli bir değeri için, bobinin öz direnci ne kadar düşükse, kalite faktörü o kadar büyük ve güç dağıtımı o kadar düşük olduğu gözlemlenebilir. Bu nedenle, herhangi bir devrenin kayıpları minimumda tutması için kalite faktörünün yüksek bir değeri istenir. Kalite faktörünün düşük olması ile rezonans frekansı bileşeninin diğer frekans bileşenlerinin devreye girmesini engellemesine (veya önemli ölçüde azaltmasına) izin verdiği anlamına gelir. Böylece devredeki kayıplar minimum olacak ve devreden geçen akım sinüzoidale yakın olacaktır [70].

Bir SS-endüktif güç transfer sisteminin Kalite Faktörü (Q), endüktif güç transfer sisteminde önemli bir başarı figürüdür. Literatürde farklı şekillerde tanımlanmıştır [90]. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- i. Kalite faktörü, indüktörün veya kapasitörün reaktif gücünün rezonanstaki direncin ortalama gücüne oranı olarak tanımlanabilir:

$$Q = \frac{\text{Reaktif Güç}}{\text{Ortalama Güç}} \quad (3.22)$$

- ii. Kalite faktörü aynı zamanda depoya ne kadar enerji yerleştirildiğinin (bir reaktif elementten diğerine sürekli transfer), harcananla karşılaştırıldığında bir göstergesidir. Bu nedenle enerji oranı açısından şu şekilde tanımlanabilir:

$$Q = \frac{\text{Maksimum depolanan enerji}}{\text{periyod başına toplam kaybedilen enerji}} \quad (3.23)$$

- iii. Kalite faktörü, reaktif elemandaki gerilimin besleme geriliminden ne kadar daha büyük olduğunun bir ölçüsünü temsil etmek için kullanılır ve bir seri rezonans devresindeki indüktör veya kapasitör boyunca gerilimin direnç boyunca gerilime oranı olarak tanımlanabilir.

$$Q = \frac{\text{İndüktör veya kapasitör gerilimi}}{\text{Direnç gerilimi}} \quad (3.24)$$

- iv. Son olarak, kalite faktörü, rezonans frekansı etrafındaki frekans yanıtının keskinliğini temsil etmek için kullanılır ve bir sistemin rezonans frekansının bant genişliğine oranı olarak tanımlanabilir.

$$Q = \frac{\text{Rezonans frekansı}}{\text{Bant genişliği}} \quad (3.25)$$

Değişken frekans kaynağı ve bir osiloskop kullanarak bir rezonans devresinin hem rezonans frekansını hem de bant genişliğini ölçmek mümkün olduğundan, (3.25) ile verilen tanım laboratuvar ölçümü için kullanışlıdır [70].

Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı gibi kalite faktörünün daha yüksek değerinin, bir seri rezonans devresinin arzu edilen bir özelliği olduğu görülmektedir. Bununla birlikte denklem (3.24)'den, yüksek kaliteli bir faktörün izolasyon boyunca tehlikeli derecede yüksek gerilime yol açabileceğini ve dikkatli bir şekilde ele alınmadığı takdirde elektrik arızasına neden olabileceğini anlaşılmaktadır.

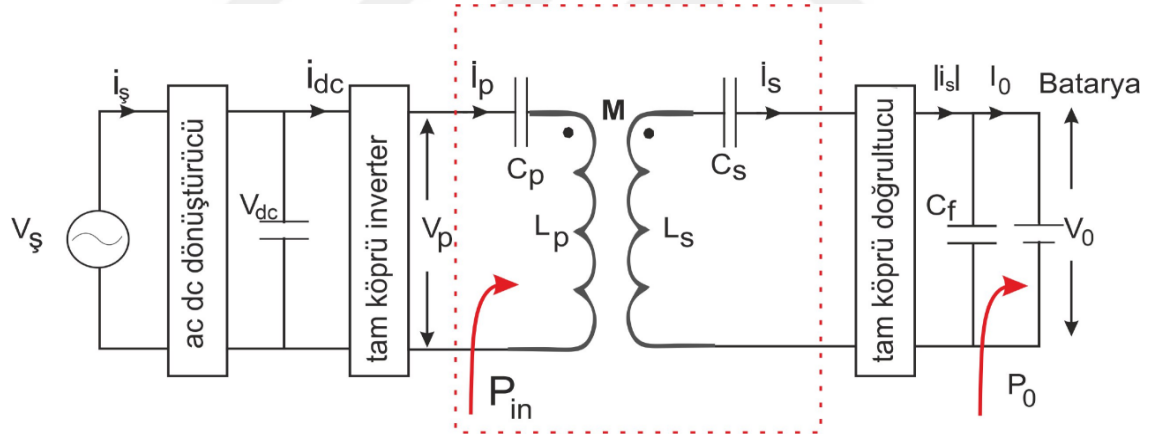
Örneğin, Şekil 3.22’de, yük direnci üzerindeki gerilim 400 V ise ve bobinin öz direnci boyunca gerilim düşümü ihmal edilirse, 10 değerindeki Q_s için, indüktör ve kapasitör terminali boyunca gerilim yaklaşık 4000 V olacaktır. Bu nedenle, daha yüksek dereceli bir bileşen gerekli olacaktır.

Ek olarak, bu bileşenleri birbirine bağlayan kablo da ekstra yalıtım gerektirecektir. Ayrıca (3.25)’de, kalite faktörünün ne kadar yüksek olduğunu, kazanç eğrisinin eğimi ne kadar dikse, devrenin ayarlanması ve kontrolü o kadar zorlaşır [93].

Kalite faktörünün seçiminin, kontrolün karmaşıklığı, bileşen derecelendirmeleri ve sistemdeki kayıplar arasında bir denge gerektirdiği sonucuna varılabilir. Pratik uygulamalarda, Q genellikle 2 ila 10 arasında bir değer seçilir [70].

3.5. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Şekil 3.24’te SS-endüktif güç transfer tabanlı bir kablosuz şarj cihazının blok şemasını ve bileşenlerini göstermektedir. Belirli bir yük (batarya) için SS-endüktif güç transfer bağlantısının parametrelerini hesaplanması amaçlanmaktadır.



Şekil 3.24. SS-endüktif güç transfer tabanlı bir kablosuz şarj cihazının blok şeması [70]

SS-endüktif güç transfer bağlantısının parametrelerinin hesaplanmasını basitleştirmek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [70]:

(1) SS-endüktif güç transfer bağlantısının verimliliğinin % 100 olduğu varsayılır. Bu varsayım, bağlantı tasarımından önce bobin direncinin değeri bilinmediğinden ve bu nedenle ihmal edilebilir olduğu varsayıldığından geçerlidir.

(2) Yalnızca giriş gerilimi V_p 'nin temel bileşeni ve SS-endüktif güç transfer bağlantısının çıkış gerilimi dikkate alınır ve yüksek dereceli harmonikler ihmal edilir. Diğer bir deyişle, sinüzoidal olarak değişen primer ve sekonder akımlar elde etmek için primer ve sekonder devrenin kalite faktörünün yüksek olduğu kabul edilir.

(3) Tüm anahtarlama elemanları, sıfır komütasyon süresi (yani anında açma ve kapama) ve sıfır direnç (yani, gerçekleştirirken ne gerilim düşümü ne de kayıplar göstermezler) ile ideal kabul edilir. Diğer bir deyişle, tüm dönüştürücülerin % 100 verimli olduğu varsayılır.

(4) SS-endüktif güç transfer bağlantısına giriş geriliminin büyüklüğü, yani V_P şebeke (besleme) gerilimi büyüklüğü V_G 'ye eşit kabul edilir. Bu varsayım, şebeke beslemesi ile tam köprü evirici arasında genellikle bir güç faktörü düzeltme aşaması olduğu için geçerlidir. Bu aşamada, V_P 'yi şebeke gerilimine eşit verecek şekilde tam köprü inverterinin DA bağlantı gerilimini, V_{DA} 'yi ayarlayabilir.

(5) Primer ve sekonder tarafta kullanılan kapasitörlerle devrenin ideal rezonansda olduğu varsayılır. İstenen çıkış gücünün P_O olmasına izin verilir. Yük bir batarya paketi olduğundan, şarj gerilimi bilinir. V_O , şarj gerilimini veya çıkış gerilimini ifade edecek olursa. DA direnci (akü direnci) R_O denklem (3.26) ile hesaplanabilir.

$$R_O = \frac{V_O^2}{P_O} \quad (3.26)$$

Bir diyotlu doğrultucu ve kapasitif bir çıkış filtresi ile bir DA direnç değerinin alternatif akım eşdeğeri denklem (3.27) ile verilebilir. Bu, SS-endüktif güç transfer bağlantısının sekonder tarafından görülen direncin değeridir [86,90].

$$R_O = \frac{8}{\pi^2} \frac{V_O^2}{P_O} \quad (3.27)$$

Sekonder gerilim V_S , kapasitif çıkış filtresi nedeniyle bir kare dalgadır. V_S 'nin temel bileşeninin RMS değeri (3.28) ile verilebilir. Sekonder akım I_S , 'nin RMS değeri (3.29) ile verilebilir.

$$V_{Srms} = \frac{2\sqrt{2}V_O}{\pi} \quad (3.28)$$

$$I_{Srms} = \frac{V_{Srms}}{R_l} \quad (3.29)$$

1.Varsayımdan P_O , P_{IN} 'e eşittir. V_P 'nin şebeke gerilimi V_G 'ye eşit olduğu varsayıldığından, primer akımın RMS değeri denklem (3.30) ile verilebilir.

$$I_{Prms} = \frac{P_{in}}{V_{Prms}} \quad (3.30)$$

Primer ve sekonder akımın değeri bilindiğinde, istenen çıkış gücü miktarı için karşılıklı endüktansın değeri, SS-endüktif güç transfer bağlantısının sekonder tarafında Krişofun gerilimler kanunu denklemi uygulanarak türetilir.

Şekil 3.23'den, rezonans frekansında, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}}$ aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$|j\omega_0 M_{ip}| = R_L |i_S| \quad (3.31)$$

Sekonder endüktans, sekonder kalite faktörü Q_S 'den hesaplanır. Daha önce değinildiği gibi, daha yüksek bir değer sistemin ayarını zorlaştırabileceğinden ve daha düşük bir değer akım ve gerilim dalga formunda harmonikler oluşturacağından, Q_S 'nin değeri 2 ila 10 arasında seçilmelidir. Denklem (3.32) gerekli sekonder endüktansın değerini verir.

$$L_S = \frac{Q_S R_L}{\omega_0} \quad (3.32)$$

Birleştirme katsayısı k değeri denklem (3.33)'dan hesaplanabilir.

$$k < \frac{1}{Q_S} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_S^2}} \quad (3.33)$$

Denklem (3.33)'den, primer ve sekonder bobinler arasındaki minimum hava boşluğu hesap edilebilir. Aynı zamanda, sistemin çatallanma moduna girmesine izin verecek olan ve bu nedenle mümkün olduğu kadar yüksek bir bağlantı katsayısına sahip olmanın iyi bir tasarım uygulaması olmadığını ve bundan kaçınılması gereken bir bağlantı katsayısının maksimum bir değeri olduğunu ifade etmektedir. Bu SS-endüktif güç transfer sistemi gibi gevşek bağlanmış bir sistem ile mümkün olduğunca yüksek bir kuplaja sahip olmanın istenildiği güç transformatörleri gibi yakından bağlanmış bir sistem arasındaki önemli bir farktır [70].

k değerine karar verildikten sonra, primer endüktans değeri denklem (3.34) kullanılarak hesaplanabilir.

$$L_P = \frac{M^2}{L_S k^2} \quad (3.34)$$

SS-endüktif güç transfer bağlantısı için parametreleri hesapladıktan sonra Matlab/Simulink programından devrenin çalışması ve analiz yapılacaktır.

3.6. Simülasyon İçin Kullanılan Devrelerin Parça Parça İncelenmesi

KGT devresi Şekil 3.25’de gösterildiği gibi 3 güç elektroniği devresinden oluşur [82].

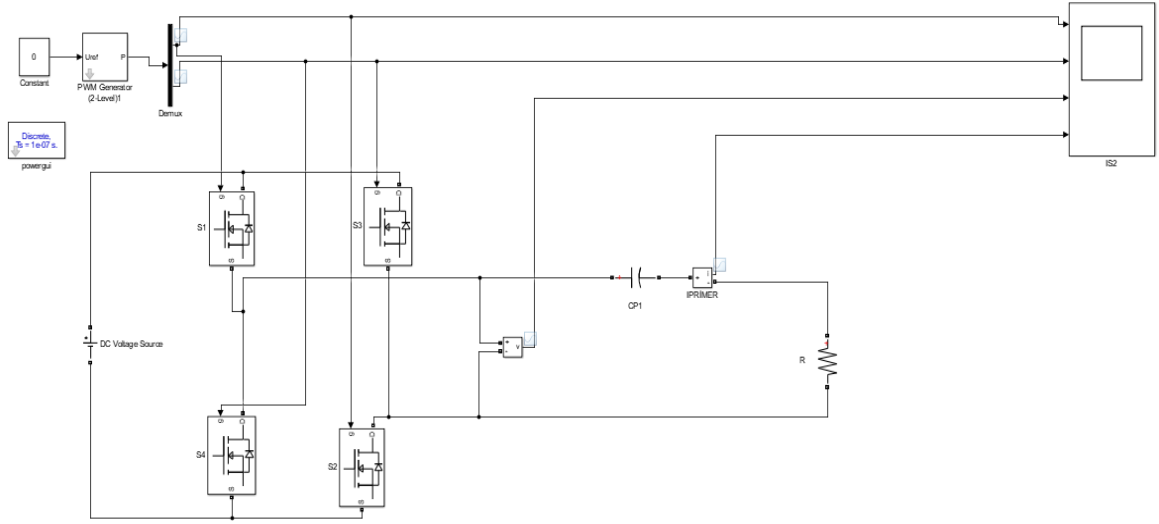
- a) Tek Fazlı Tam Dalga Köprü İnvörtörü.
- b) Karşılıklı Endüktans Devresi
- c) Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu Devresi



Şekil 3.25. Kablosuz güç transferini oluşturan temel güç elektroniği yapısı [82]

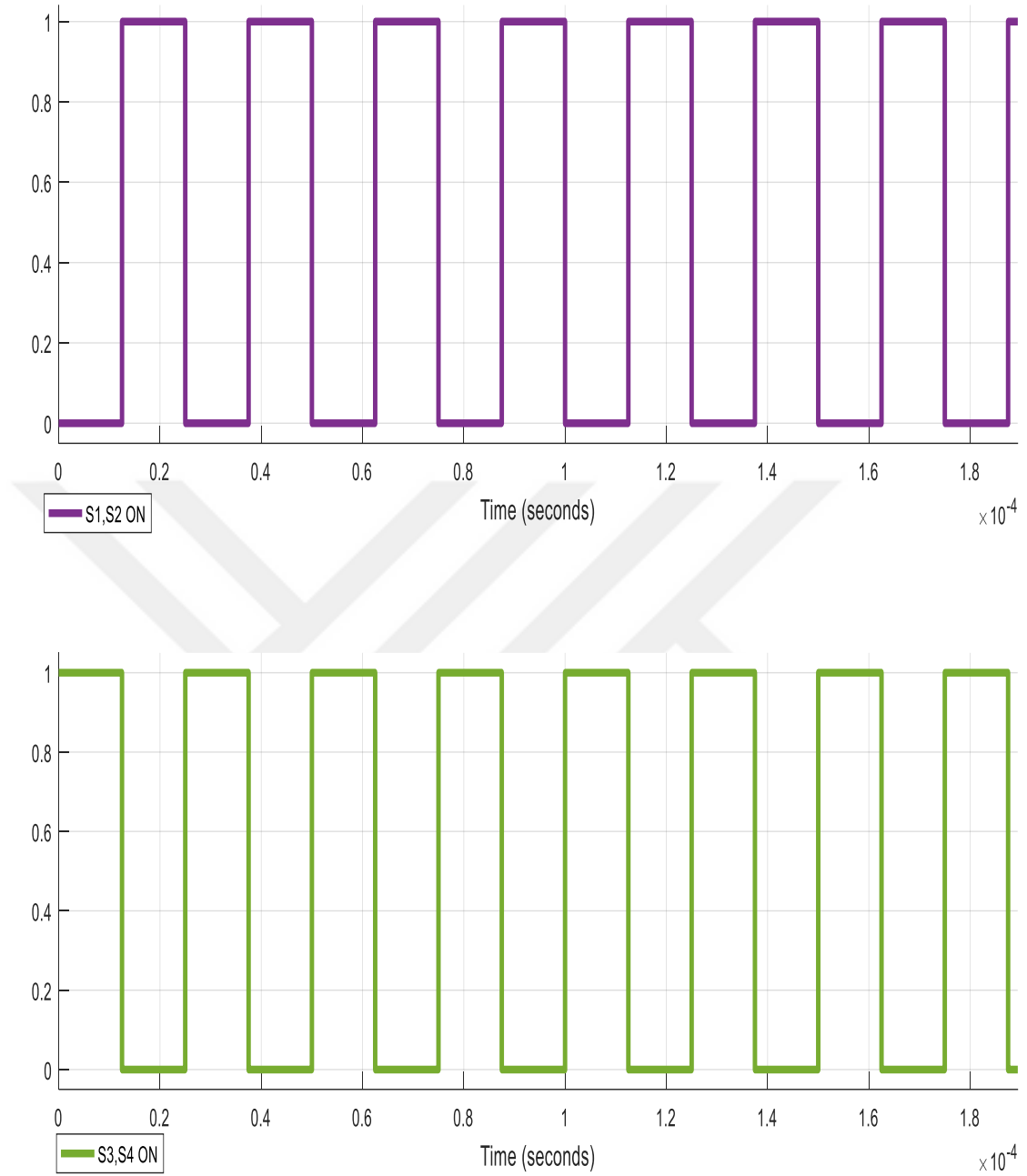
3.6.1. Tek Fazlı Tam Dalga Köprü İnvörtörü

Kablosuz güç transfer sistemlerinde kullanılan dönüştürücü topolojisi Şekil 3.26’da verilmiştir. Bu sistemde eviricinin görevi, şebekeden beslenen sistemin verici sargısında yüksek frekanslı akım üretmesidir. Tam dalga köprü evirici iki kol, iki anahtar ve anti-paralel diyotlar içerir. Bunlar ters akımlar için yollar sağlamak için kullanılır. Anahtarlar burada sırasıyla S1, S2, S3 ve S4 olarak temsil edilmektedir. Her dal için üst ve alt anahtarlar, geçişler arasında kısa bir ölü zaman olacak şekilde dönüşümlü olarak açılır ve kapanır. İki ayak arasında 180 ° faz kayması vardır, bu çapraz anahtarların yük boyunca kare dalga gerilimi uygulamak için birlikte hareket ettiği anlamına gelmektedir [82].



Şekil 3.26. Tek fazlı tam dalga köprü evirici

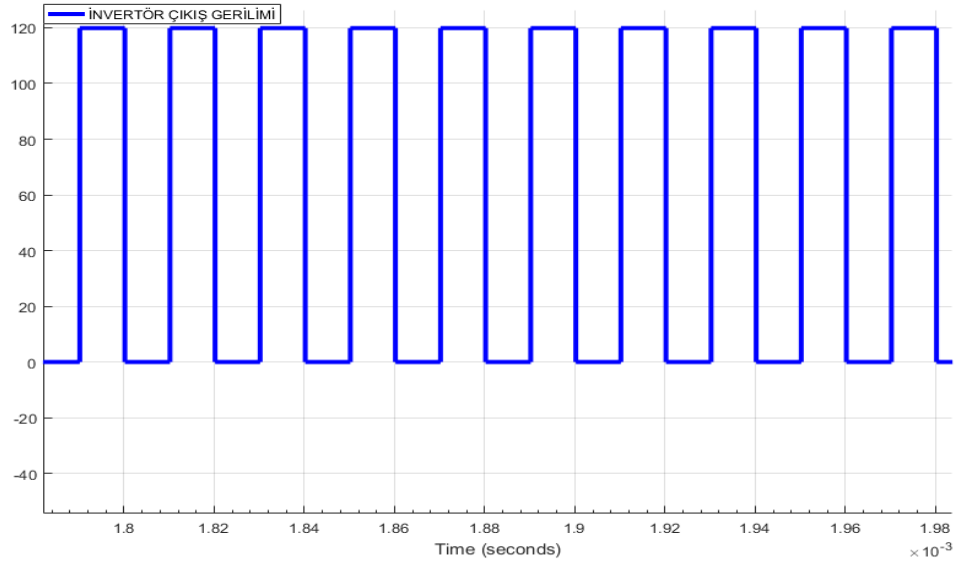
Anahtarlama Elamanlarının (MOSFET) Çalışma Sıralarının Gösterimi



Şekil 3.27. Anahtarlama elamanlarının (MOSFET) çalışma sıralarını gösterir dalga şekilleri

Simülasyon devresinde kullanılan anahtarlama elamanı olarak kullanılan mosfetler tam dalga olarak tasarlanmıştır. S1 ve S2 aynı anda S3 ile S4 ise onların hemen sonrasında çalışarak anahtarlama görevi yapmaktadırlar. Anahtarlama frekansına bağlı olarak oluşan dalga şekilleri Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Bu şekilde üsteki grafik S1 ve S2 mosfetlerinin çalışma grafiğini alttaki ise S3 ve S4 mosfetlerin çalışma grafiğini göstermektedir.

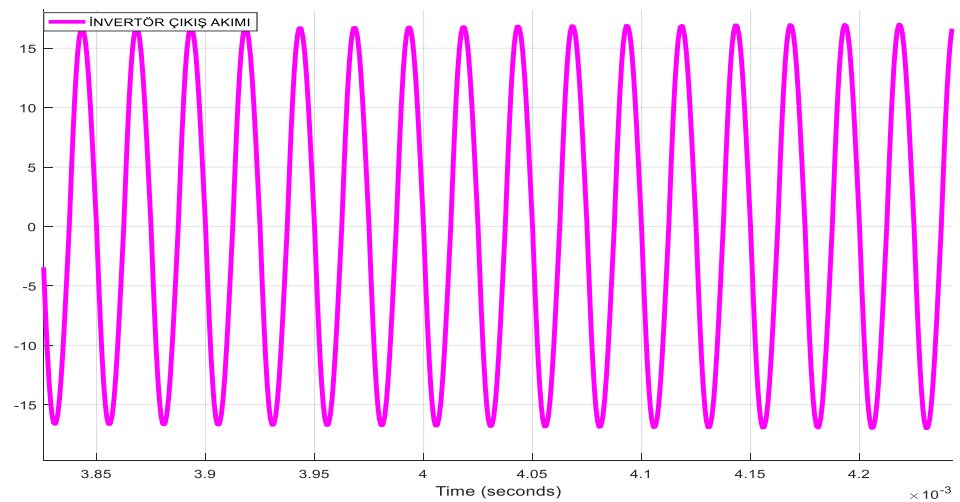
İnvertör Devresi Çıkış Gerilimi



Şekil 3.28. İnvertör sonrası oluşan gerilimim dalga şekli

İnvertör tasarımı yapılırken tam dalga mosfet devresinden yararlanılmıştır. İnvertörün çıkış geriliminin dalga şekli Şekil 3.28’de gösterilmiştir. S1 ve S2 aynı anda S3 ile S4 ise onların hemen sonrasında çalışarak anahtarlama görevi yapmaktadırlar. Dikey kollar (S1 ile S3, S2 ile S4) kesinlikle aynı anda çalışmazlar böyle durumda devre de bulunan gerilim kaynağı kısa devre olur ve sistem zarar görebilir.

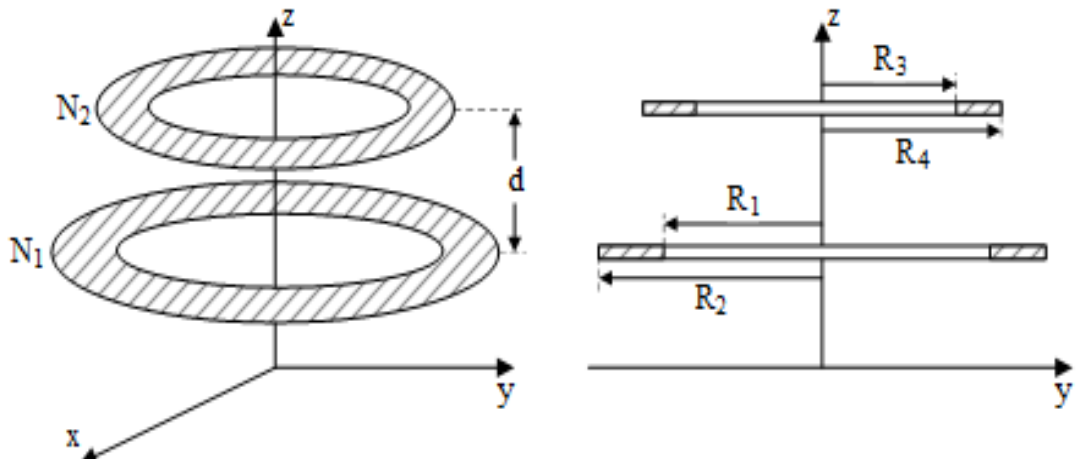
İnvertör Çıkışı Akım Dalga Şekli



Şekil 3. 29. İnvertör devresinden çıkan akımın dalga şekli

3.6.2. Karşılıklı endüktans (Rezonant Circuits) Devresi

L_1 ve L_2 arasındaki güçlü manyetik bağlantıyı karakterize eden karşılıklı endüktans M , kablosuz güç transfer sisteminin gücü ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Eş eksenli olarak yerleştirilmiş iki bobin için, her bir bobinin yarıçapı, bobinler arasındaki mesafe ve bobin dönüşlerinin sayısı, karşılıklı endüktansın büyüklüğünü belirler. İki bobinin yarıçapının ve göreceli konumunun, aralarındaki karşılıklı endüktans üzerindeki etkisi aşağıda incelenmiştir [94].



Şekil 3.30. Eksenleri hizalanmış paralel dairesel bobinlerin yerleşimi

Rezonans devrelerinin temel işlevleri şunları içerir [3]:

- † Aktarılan gücü maksimize etmek,
- † İletim verimliliğini optimize etme,
- † İletilen gücün frekans değişimi ile kontrol edilmesi,
- † Belirli bir kaynak karakteristiğinin oluşturulması (akım veya gerilim kaynağı),
- † Manyetik kaplinin kompanze edici değişimi,
- † Jeneratör kayıplarını azaltmak için verici bobinindeki mıknatıslanma akımının dengelenmesi,
- † Verici bobin empedansının jeneratöre uydurulması,
- † Jeneratörden gelen yüksek harmonikleri bastırma.

3.6.2.1. Koaksiyel Bobinlerin Karşılıklı Endüktansının Hesaplanması

Şekil 3.25'deki Koaksiyel dairesel bobin için, iki bobin arasındaki karşılıklı endüktansı hesaplamak için Neumann formülü kullanılır.

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \frac{\cos\phi r_1 r_2 d\phi}{r} \quad (3.35)$$

Denklemden R_2 ve R_4 bobin dış çaplarını R_1 ve R_3 bobinlerin iç çapını, N_1 primer bobin siper sayısı. N_2 sekonder siper sayısını ifade etmektedir.

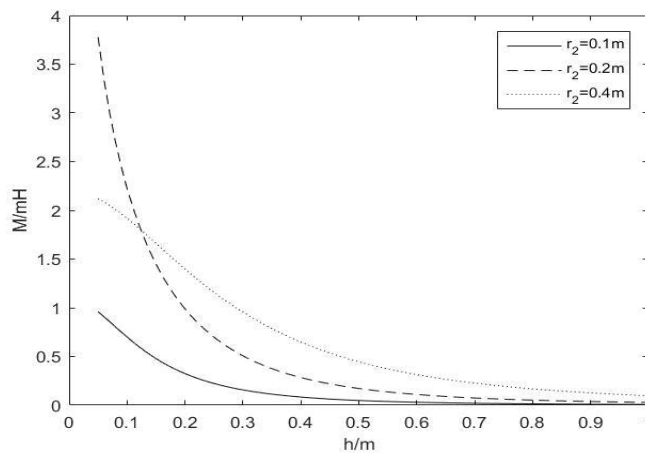
$$r = \sqrt{d^2 + (R_2 + R_1)^2 - 2(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)\cos\phi + (R_4 - R_3)^2} \quad (3.36)$$

(3.37)

Denklemler çözülerek farklı mesafelerde oluşacak karşılıklı endüktans değerleri M bulunabilir.

3.6.2.2. Bobin Boyutunun ve Aralığının M Üzerindeki Etkisi

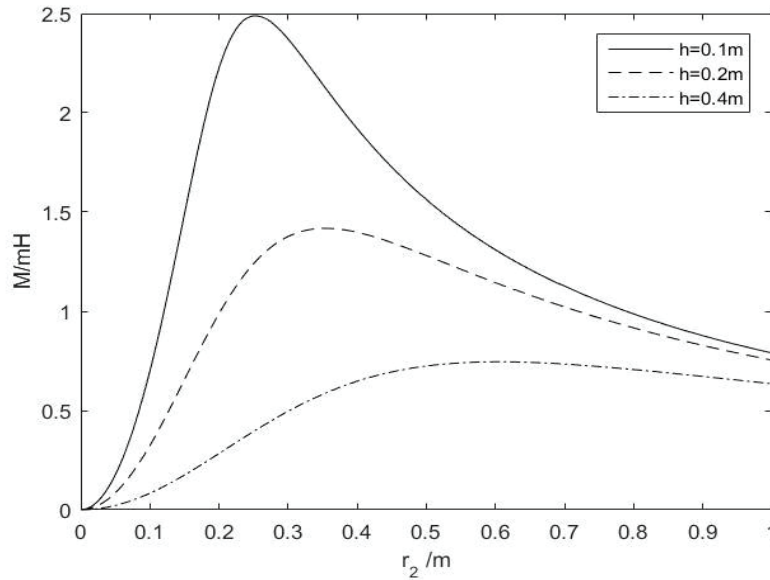
Bobin boyutunun ve aralığının karşılıklı endüktans (M) üzerindeki etkisini bir örnek ile açıklayacak olursak, alıcı bobin r_2 ve iki bobinli bir sistem olduğunda, verici bobinin ile alıcı bobinin N_1 ve N_2 siper sayısının 100, verici bobinin yarıçapının $r_1 = 0,2$ m olduğunu varsayarak aralığın h farklı değerlerde iken karşılıklı endüktans değeri hesaplanabilir.



Şekil 3. 31. h , r_2 ve M arasındaki ilişki [94]

Şekil 3.31’de $r_2 = 0,1\text{m}$, $0,2\text{m}$ ve $0,4\text{m}$ olduğunda h ile karşılıklı endüktansının değişimini göstermektedir. Şekilden, maksimum M 'ye katkıda bulunan farklı h için $r_2 = r_m$ 'nin mevcut olduğu görülebilir ve bobin aralığı h arttıkça, r_m de artar ve karşılık gelen maksimum karşılıklı endüktans değeri azalır.

Bu sonuç, iki bobin arasındaki mesafe ve verici bobinin yarıçapı belirlenirse, alıcı bobinin yarıçapının en güçlü karşılıklı endüktans etkisini oluşturmak için makul bir şekilde seçilebileceğini gösterir [94].

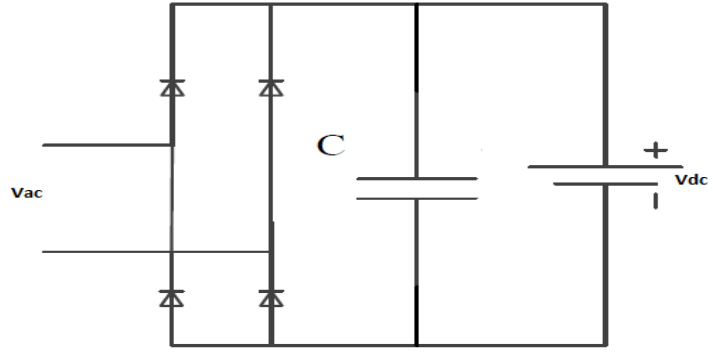


Şekil 3.32. h r_2 ve M arasındaki ilişki [94]

Şekil 3.32’de $h = 0,1\text{ m}$, $0,2\text{ m}$ ve $0,4\text{ m}$ olduğunda karşılıklı M endüktansının r_2 ile değişimini göstermektedir. Şekilden iki bobin aynı yarı çapa sahip olduğunda ($r_2 = r_1 = 0.2\text{m}$), bobin aralığı h sıfıra yaklaşırsa, karşılıklı endüktans M önemli ölçüde artar, ancak h arttıkça, karşılıklı endüktans M 'nin zayıflaması da hızla artar. İki bobinin yarıçapı eşit olmadığında, alıcı bobinin yarıçapındaki uygun bir artış, özellikle bobinler arasındaki mesafe büyük olduğunda, karşılıklı endüktansı artırabilir [94].

3.6.3. Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu Devresi

Devrenin ikinci tarafında bulunan güç elektroniği devresinde, kontrolsüz doğrultucu köprüsü, yüksek frekanslı AA’yı DA’ya dönüştürerek DA-link kapasitöründe depolanır ve bu da yükü (batarya) besler. DA-link kondansatörü, kararlı DA gerilim sağlar ve bu nedenle redresörün AA terminallerindeki gerilim kare dalga yapısına sahiptir. Kontrolsüz doğrultucu devresi Şekil 3.33’de verilmiştir [95].



Şekil 3.33. Tek fazlı kontrolsüz doğrultucu [95]

4. BULGULAR

4.1. 3600 W Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı

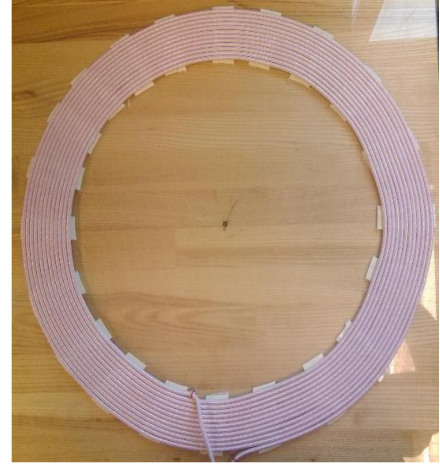
3600 W lık devrenin tasarım aşamasından önce kullanılacak metot olarak endüktif kablosuz güç transfer tekniği kullanılmasına karar verilmiştir. Devre parametreleri buna göre seçilip matematiksel hesaplamalar yapılmıştır. Devrede bir tane mosfet sürücülü evirici devresi, karşılıklı bobin (mutual inductance) devresi ve evirici çıkışı oluşan kare dalgayı tam doğru akıma getirmek için doğrultucu devresi kullanılmıştır.

4.1.2. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Hesaplanması yapılacak olan bobin tipleri Şekil (4.1) ve (4.2) de gösterilmiştir. Sarım sayıları sırasıyla $N_p = 40$, $N_s = 12$ olan bobinlerden, verici bobinin dış çapı (D_{out}) = 470mm, iç çapı (D_{in}) = 95mm alıcı bobinin dış çapı (D_{out})= 470mm, iç çapı (D_{in})= 356mm olarak seçilerek bobinlerin teknik özellikleri matematiksel olarak hesaplanacaktır.



Şekil 4.1. Primer bobin



Şekil 4.2. Sekonder bobin

Elektrik parametreleri, belirlenen şarj gerilimi için hesaplanacaktır. 16 cm uzaklıktan 240 V giriş gerilimi ile 168 V çıkış gerilimi V_o elde etmek için 3,6 kW'lık bir şarj cihazı SAE J1772 şarj standartlarına göre AA seviye 2 şarj cihazı kategorisine girdiğinden, temel cihazın RMS değeri primer gerilimin V_p bileşeninin 240 V olduğu varsayılır. 40 kHz'lik bir rezonans frekansı ve sekonder kalite faktörü 4'e eşit Q_s kabul

edilir. Ayrıca simülasyonun ideal şartlarda yapıldığı kabul edilerek R_p ve R_s değerleri de 0 olarak kabul edilmiştir. Simülasyonu yapılacak devrenin teknik özellikleri ve matematiksel hesaplamaları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

$$R_O = \frac{V_O^2}{P_O} = \frac{168^2}{3600} = 7,84 \, \Omega \quad (4.1)$$

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} R_O = \frac{8}{\pi^2} 7,84 = 6,354 \, \Omega \quad (4.2)$$

$$V_{Srms} = \frac{2\sqrt{2}V_O}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}168}{\pi} = 151,253 \, V \quad (4.3)$$

$$I_{Srms} = \frac{V_{Srms}}{R_L} = \frac{151,253}{6,354} = 23,804 \, A \quad (4.4)$$

$$P_{in} = P_O \text{ olduğu düşünülürse} \quad (4.5)$$

$$I_{Prms} = \frac{P_{in}}{V_{Prms}} = \frac{3600}{240} = 15 \, A \quad (4.6)$$

$$L_S = \frac{Q_S R_L}{\omega_0} = \frac{4 \cdot 6,354}{2\pi \cdot 40 \cdot 10^3} = 101,12 \cdot 10^{-6} H \quad (4.7)$$

$$k < \frac{1}{Q_S} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_S^2}} = k < \frac{1}{4} \sqrt{1 - \frac{1}{4 \cdot 4^2}} \quad (4.8)$$

$$k < 0,248 \text{ yaklaşık olarak } 0,2 \text{ kabul edilebilir.} \quad (4.9)$$

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \frac{\cos \phi r_1 r_2 d\phi}{\sqrt{d^2 + (R_2 + R_1)^2 - 2(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)\cos \phi + (R_4 - R_3)^2}} \quad (4.10)$$

$$M = 38,54 \cdot 10^{-6} H$$

Buradaki M değeri MAPPLESOFT programında çözülerek bulunmuştur.

$$L_P = \frac{M^2}{L_S \cdot k^2} = \frac{(38,54 \cdot 10^{-6})^2}{101,12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^2} = 367,22 \cdot 10^{-6} H \quad (4.11)$$

$$C_S = \frac{1}{L_S \cdot \omega_0^2} = \frac{1}{101,12 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi \cdot 40 \cdot 10^3)^2} = 156,65 \cdot 10^{-9} F \quad (4.12)$$

$$C_P = \frac{1}{L_P \cdot \omega_0^2} = \frac{1}{397,94 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi \cdot 40 \cdot 10^3)^2} = 43,11 \cdot 10^{-9} F \quad (4.13)$$

Tablo 4.1. Simülasyonu yapılacak devrenin elektrik parametreleri ve hesap değerleri

PARAMETRELER	VERİLEN/HESAPLANAN DEĞERLER
V_o	168 V
I_o	21 A
V_{prms}	240 V
I_{prms}	15 A
V_{srms}	151,253 V
I_{srms}	23,804 A
R_0	7,84 Ω
L_p	367,22 μH
L_s	101,12 μH
M	38,54 μH
C_p	43,11 $\times 10^{-3}$ μF
C_s	156,65 $\times 10^{-3}$ μF
R_R	14,228 Ω
k	0,2
f	40 kHz
h	16 cm
N_p	40 sipir
N_s	12 sipir

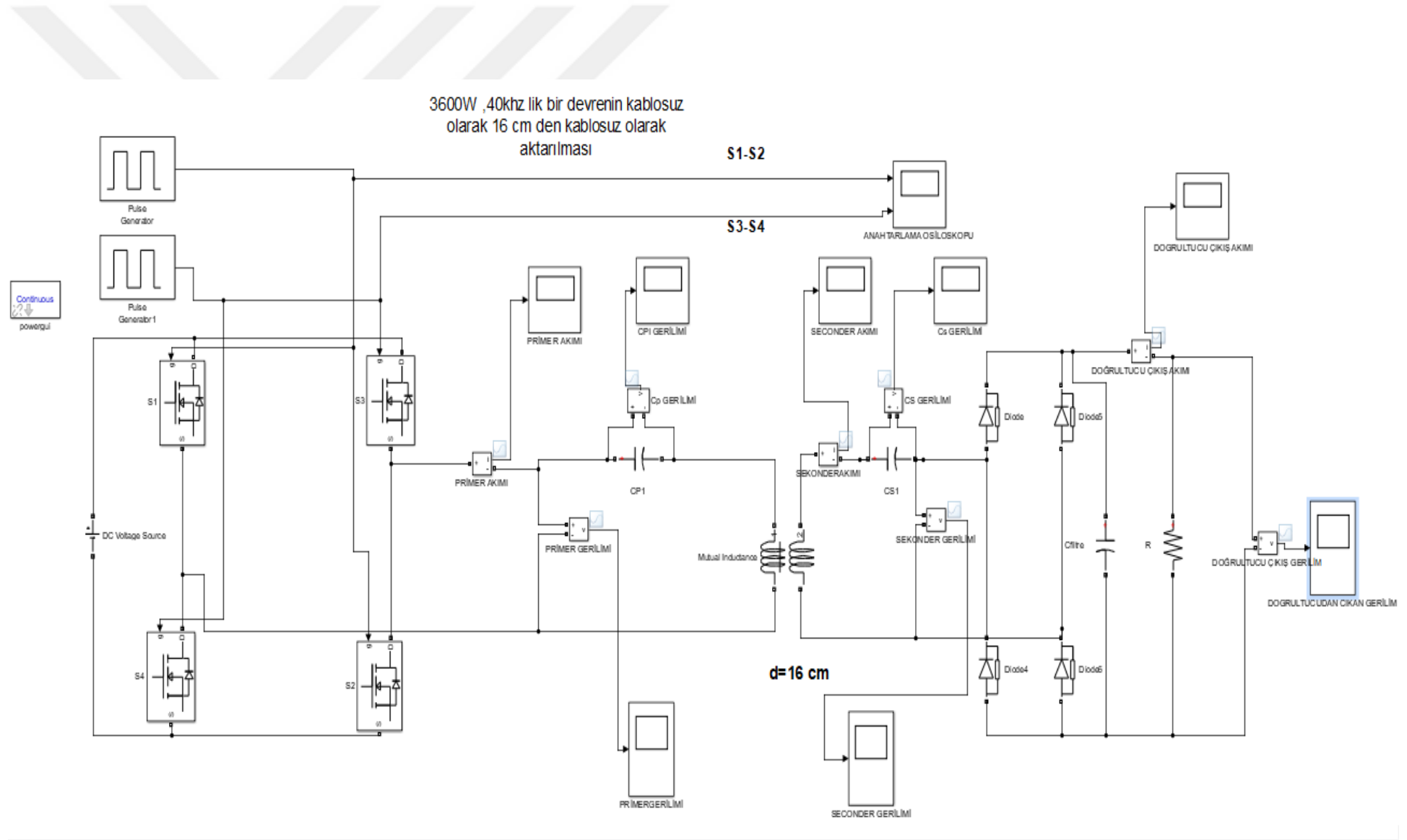
40 kHz'lik bir çalışma frekansı kullanıldığından, girdap akımlarından dolayı telin direncindeki artış dikkate alınmalıdır. Girdap akımına, cilt etkisi ve yakınlık etkisi

olarak bilinen iki mekanizma neden olur. Litz teli olarak bilinen örgülü emaye iletkenlerin bu iki yüksek frekans etkisini azaltmada çok etkili olduğu bulunmuştur [70].

Bir Litz teli, her biri ayrı ayrı yalıtılmış ve bir tele sarılan birçok ince telden oluşur. Her bir iplikçik, iletken alanın verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan cilt derinliğinden daha kalın değildir. Teller daha sonra birbirine dokunur, böylece her bir telin konumu telin merkezi ile telin kenarı arasında değişir. Bu yakınlık etkisinin her bir ipliği aynı şekilde etkilemesini ve böylece aynı akımı taşımasını sağlar [96].

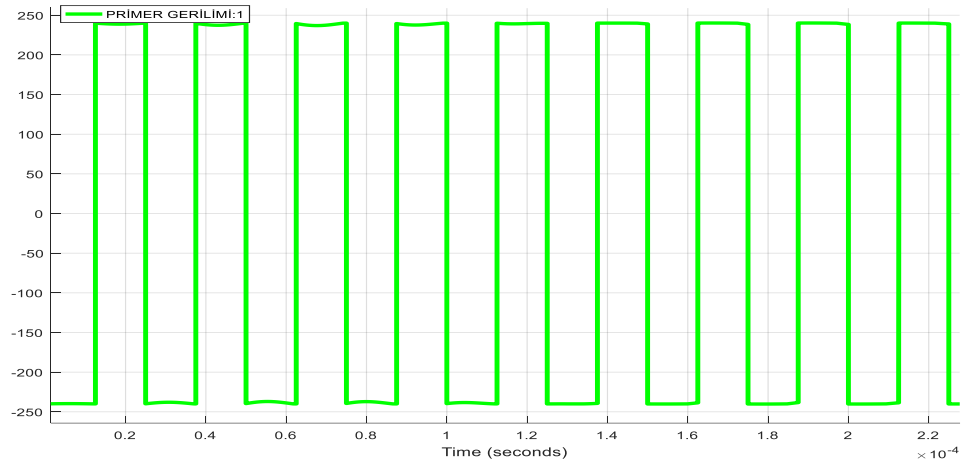
4.5 Simülasyonu Yapılan Devrenin Matlab/Simulink Yardımıyla Çizimi

Matlab/Simulinkte yapılan devrenin çizimi Şekil 4.3’de gösterilmiş olup devrede anahtarlama elamanları olarak mosfet kullanılmıştır. Anahtarlama elemanlarının frekans değeri ve kontrolü pulse genaratörü ile sağlanmıştır. Devrede karşılıklı bobin kullanılmış olup değerleri 4.1.2’de hesaplanmıştır. Devrede oluşan alternatif kare gerilimi tam doğrultmak için klasik tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi kullanılmıştır. Simülasyon çalışması için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Devreden istenilen güç 3600W olup devre parametreleri ve değerleri ona göre hesaplanarak seçilmiştir. Sistem topolojisi olarak SS devre topolojisi seçilerek devre simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen grafik ve ölçümler adım adım işlenmiştir.



Şekil 4.3. Matlab/Simulink programında simülasyonu yapılan devre

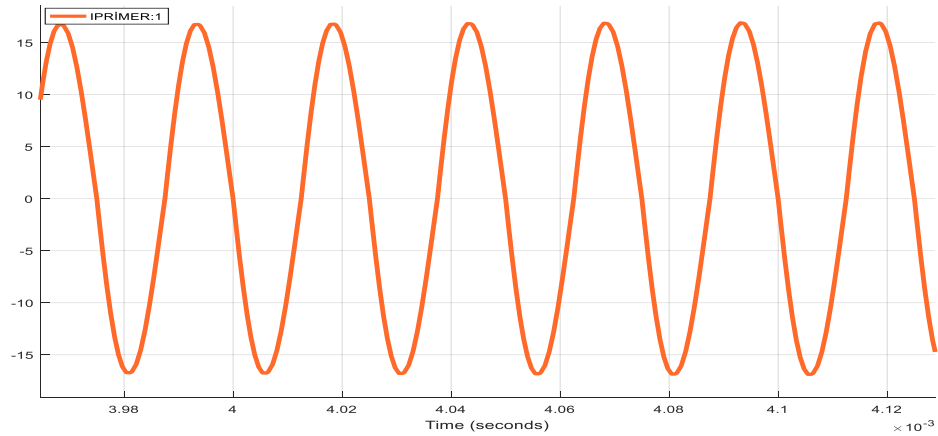
4.5.1. İnvörtörden geçen primer gerilimin grafiksel gösterimi



Şekil 4.4. İnvörtörden geçen primer gerilimin grafiksel gösterimi

Giriş geriliminin değeri 240 V olacaktır, bu nedenle çıkışın 240 V ile -240 V arasında salınan Şekil 4.4'deki gibi evirici çıkış gerilimin kare dalga olduğu görülmektedir. Devrede kullanılan mosfetlerin anahtarlama sırasına göre oluşan kare dalga için mosfetlerden S1 ve S2 kare dalganın pozitif (+) alternansını oluştururken S3 ile S4 ise oluşan kare dalganın negatif (-) alternansını oluşturmaktadır.

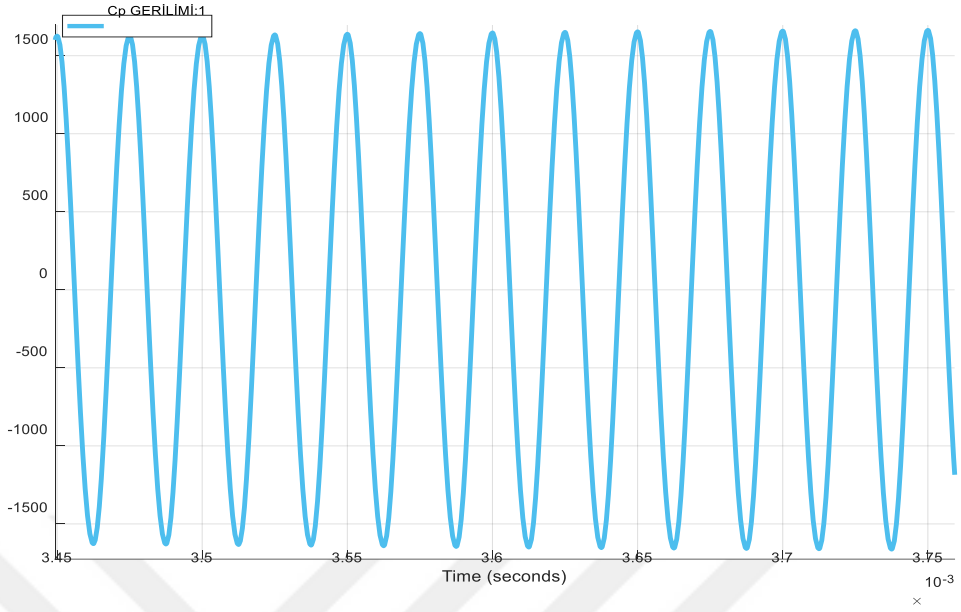
4.5.2. Primerden geçen akımın grafiksel gösterimi



Şekil 4.5. Primerden geçen akım grafiği

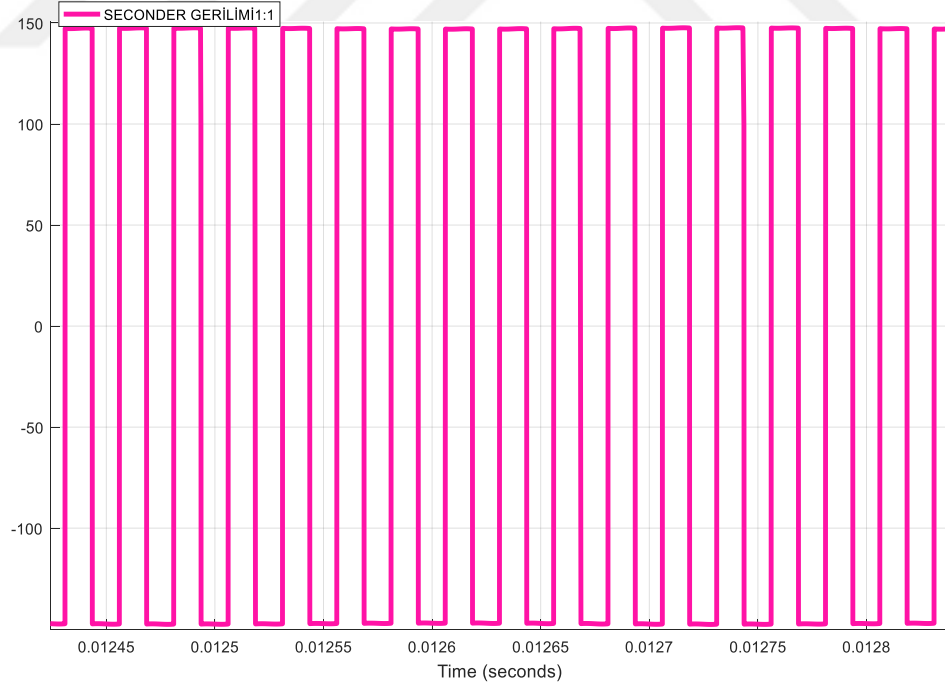
Şekil 4.5'de görüldüğü gibi primer kapasitör, primer bobinin kendi endüktansı ile rezonansa girecek şekilde yapıldığından, keskin şekilde ayarlanmış bant geçiren filtre görevi gördüğü için primer akım I_p sinüzoidale çok yakın bir grafik çizmektedir.

4.5.3. C_p kondansatöründe indüklenen gerilimin grafiksel gösterimi;



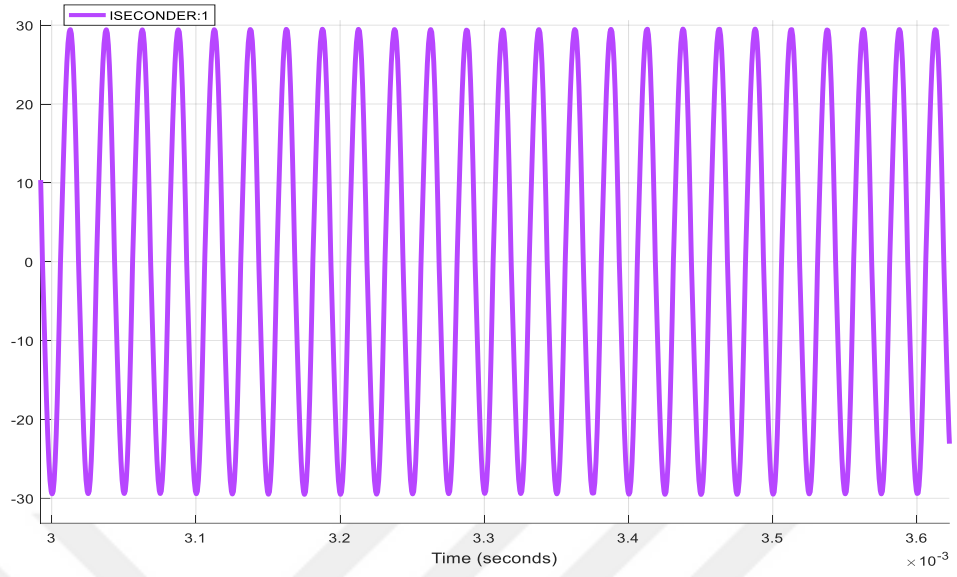
Şekil 4.6. (C_p) Primer kondansatörde indüklenen gerilim

4.5.4. Sekonder tarafından geçen gerilimin grafiksel gösterimi



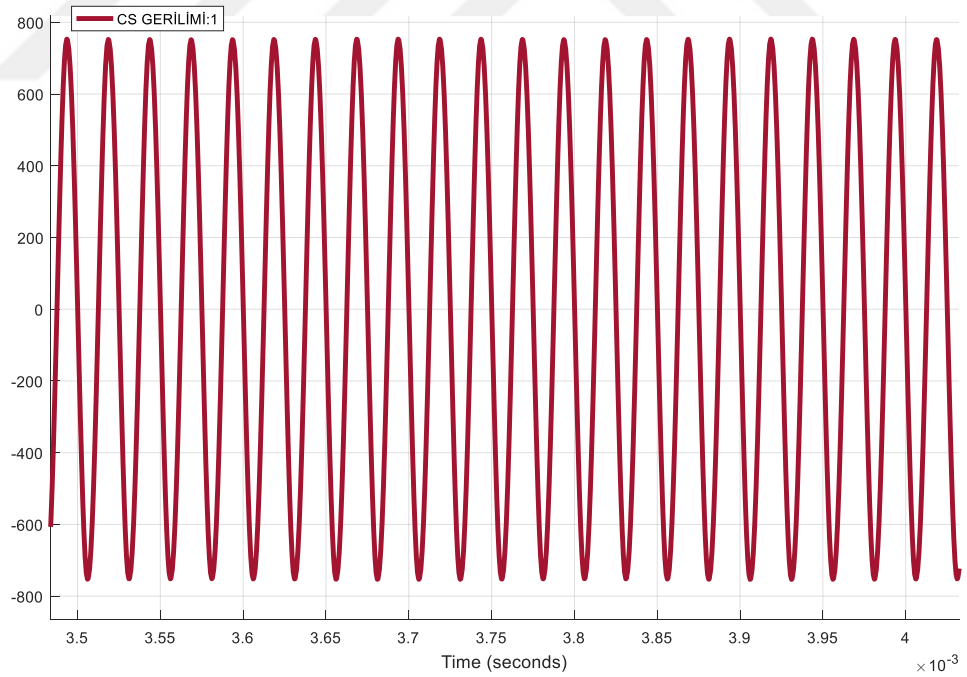
Şekil 4.7. Sekonder tarafında indüklenen gerilim

4.5.5. Sekonder sargısından geçen akımın (I_s) grafiksel gösterimi



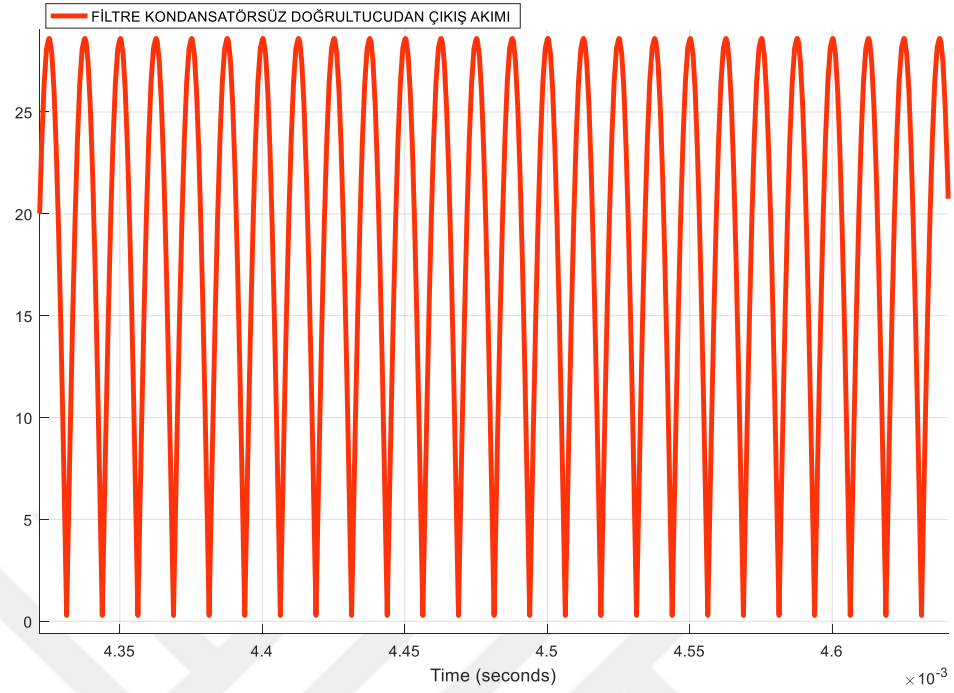
Şekil 4.8. (I_s) Sekonder kondansatörde geçen akım grafiği

4.5.6. C_s kondansatöründe indüklen gerilimin grafiksel gösterimi



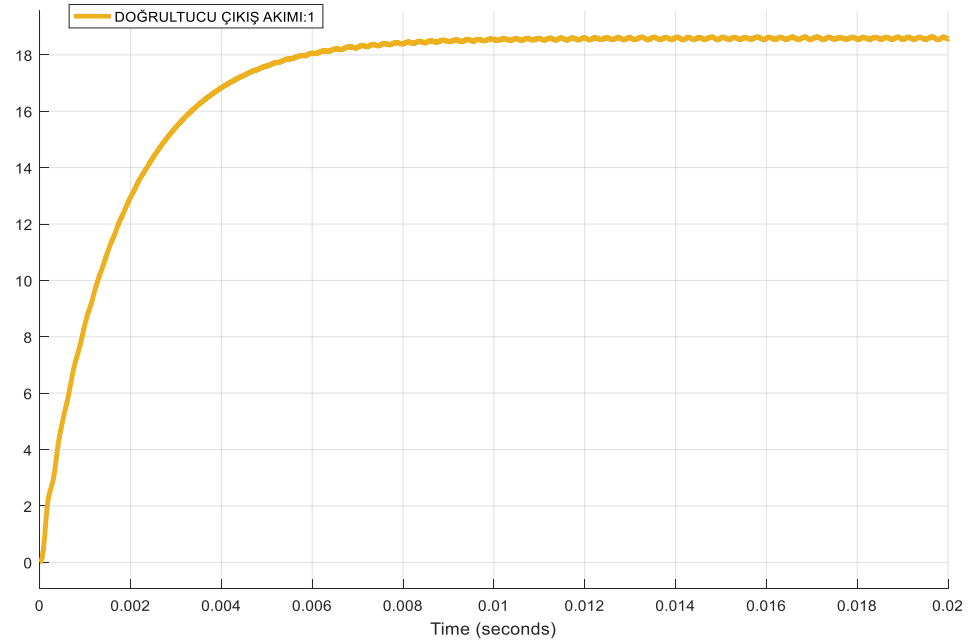
Şekil 4.9. Sekonder kondansatörde indüklenen gerilim grafiği

4.5.7. Doğrultucudan çıkan akımın(filtre kondansatörsüz) grafiksel gösterimi



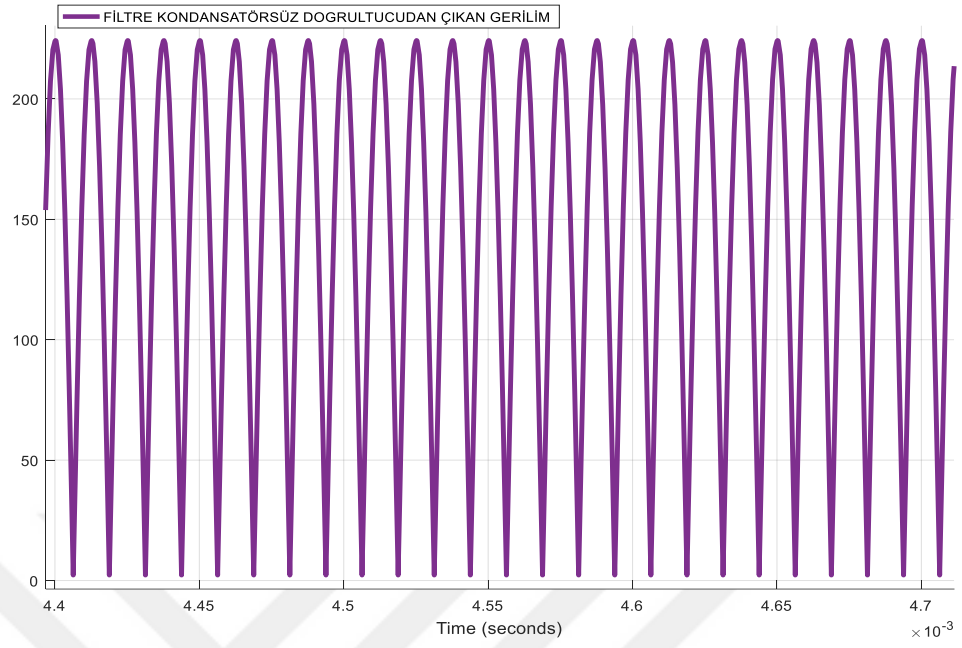
Şekil 4.10. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörsüz) geçen akım grafiği

4.5.8. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörlü) geçen akım grafiği



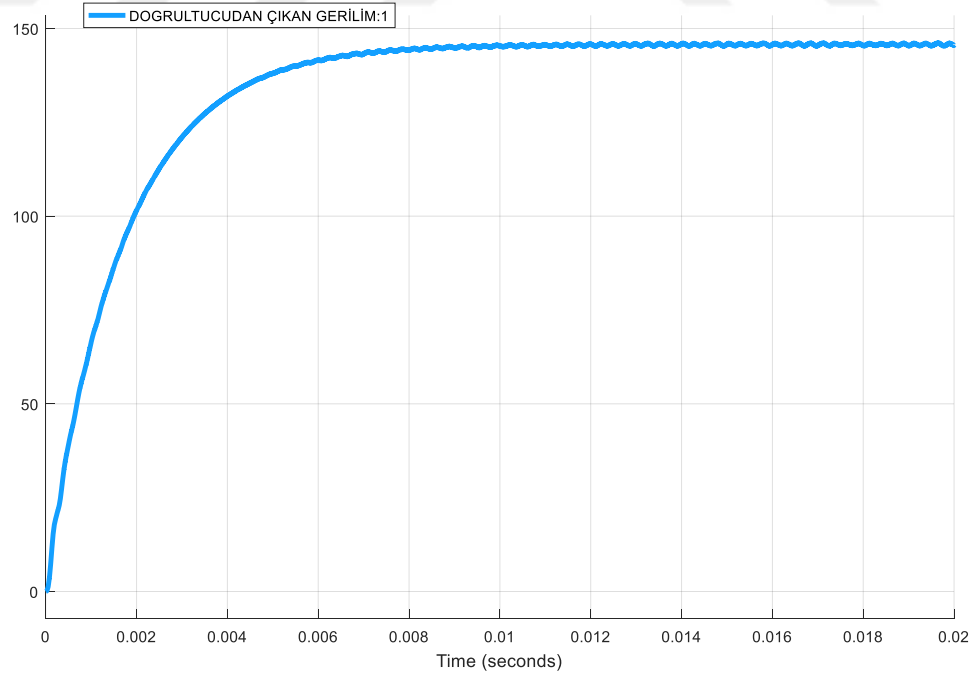
Şekil 4.11. Doğrultucudan çıkan akım (filtre kondansatörlü) geçen akım grafiği

4.5.9. Doğrultucudan çıkan çıkış gerilimin grafiksel gösterimi



Şekil 4.12. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörsüz) grafiği

4.5.10. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörlü) grafiği



Şekil 4.13. Doğrultucudan çıkan gerilimin (filtre kondansatörlü) grafiği

4.6. Simülasyon Sonuçlarının Yorumlanması

KGT tekniği, özellikle EA'lar olmak üzere çeşitli sistemlerde kullanılmaktadır. Simülasyonu yapılan devre topolojisi olarak EA için en sık kullanılan EGT ile SS topoloji devresi kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada şebeke geriliminden sonra oluşan 240V doğrultulmuş gerilimi yüksek frekanslı AA akıma dönüştürmek için tam köprü mosfet ile tasarlanmış evirici devresi kullanılmıştır. Mosfetlerin tetiklenmeleri için Pulse jeneratör sinyalleri kullanılmış ve tetikleme periyotları % 50 olarak ayarlanmıştır.

3600 W tasarımın hesaplanan parametrelerini doğrulamak için, SS-endüktif güç transfer bağlantısı Tablo 4.1'de gösterilen sabit devre parametrelerin matematiksel olarak değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4.1'de gösterilen nominal devre parametreleri için MATLAB/ SIMULINK de simüle edilmiş olup Tablo 4.2'de simülasyon değerleri ile birlikte verilmiştir.

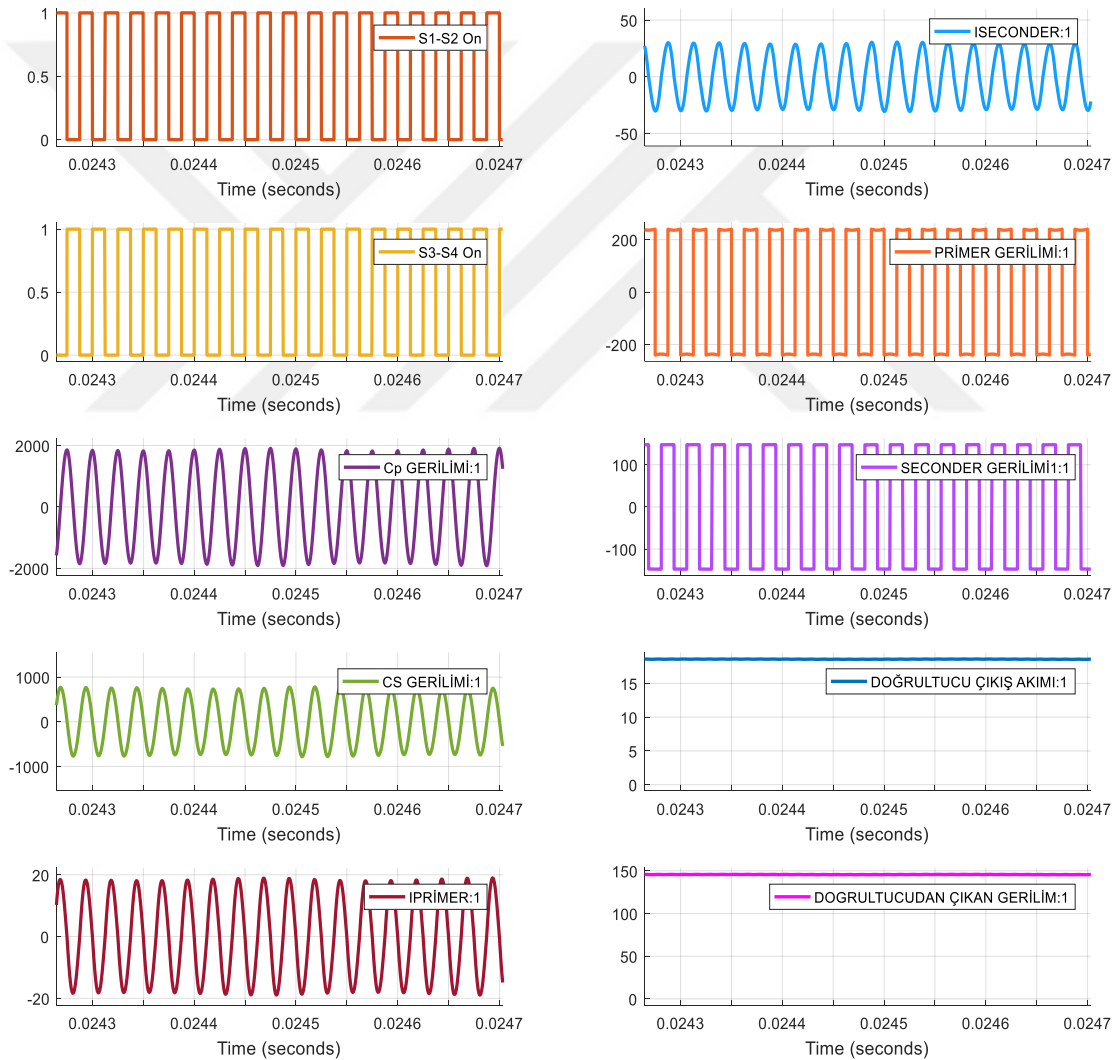
Tablo 4.2. Simülasyonu yapılacak devrenin verilen/hesaplanan ve simülasyon değerleri

PARAMETRELER	VERİLEN/HESAPLANAN DEĞERLER	SİMÜLASYON SONUÇLARINDA ELDE EDİLEN DEĞERLER
Vo	168 V	145.7 V
Io	21 A	18.59 A
VPrms	240 V	237.7 V
IPrms	15 A	14.86 A
VSrms	151 V	143.6 V
Isrms	23 A	19,57 A
Ro	7,84 Ω	
LP	367,22 μ H	
LS	101.2 μ H	
M	38,54 μ H	
CP	43,11 $\times$ 10-3 μ F	
CS	156,65 $\times$ 10-3 μ F	
f	40 kHz	
h	16 cm	
Np	40 siper	
Ns	12 siper	

Elde edilen veriler ve hesaplamalar ile 16 cm den 3600 W bir gücün çıkıştan 2810,25 W olarak alındığı görülmüştür. Buna göre verimin 0.7806 yani yüzde 78'in üzerinde olduğu hesap edilmiştir. Bobinler arası mesafesinin değişmesiyle birlikte M değerinin değişebileceğinden verimin de artabileceği belirlenmiştir.

4.7. Sistemin Simülasyonun Analizi

Simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar ile matematiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve hesaplanan değerler için elde edilen sonuçlar Şekil 4.14 ile grafiksel olarak gösterilmektedir.



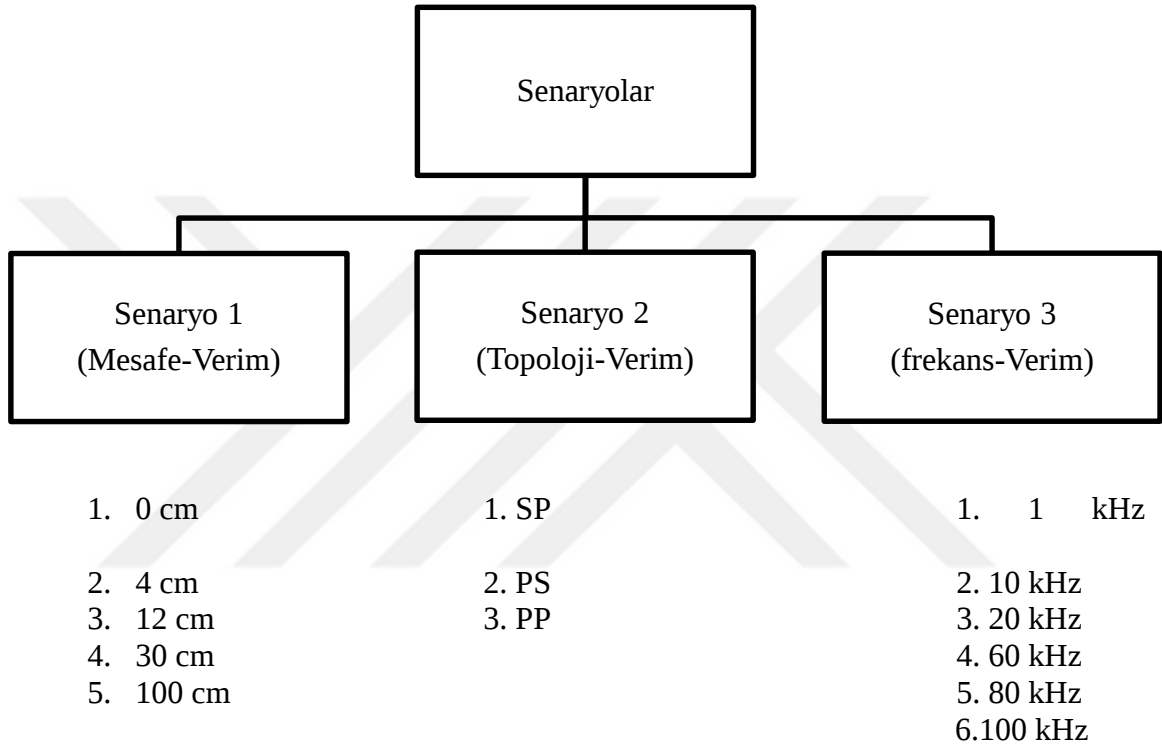
Şekil 4.14. Simülasyonu yapılan devrenin simülasyon değerleri

4.8. SS topoloji ile kurulan devrenin aşağıdaki senaryolara göre çalıştırılıp verim analizlerinin yapılması

Senaryo1: SS topolojinin farklı mesafelerdeki endüktans ve verim değerleri.

Senaryo2: SS topolojisinin SP, PS, PP topolojilerle verim oranlarının karşılaştırılması.

Senaryo 3: SS topolojinin farklı frekans değerlerinde verim değerleri.



Şekil 4.15. Uygulanan senaryolar

4.9. Senaryo 1

Yapılan tez çalışmasında kullanılan Seri Seri topoloji için 16 cm lık hava aralığındaki devrenin farklı mesafelerdeki karşılıklı endüktans değerinin değişimi denklem 3.35'in MAPLESOFT matematik programıyla çözülerek bulunan değerler Tablo 4.3'de verilmiştir. Daha sonra bulunana sonuçlardan yola çıkarak devre tasarlanıp Matlab/Simulink programında çalıştırılmış ve elde edilen veriler ile verim analizi yapılmıştır.

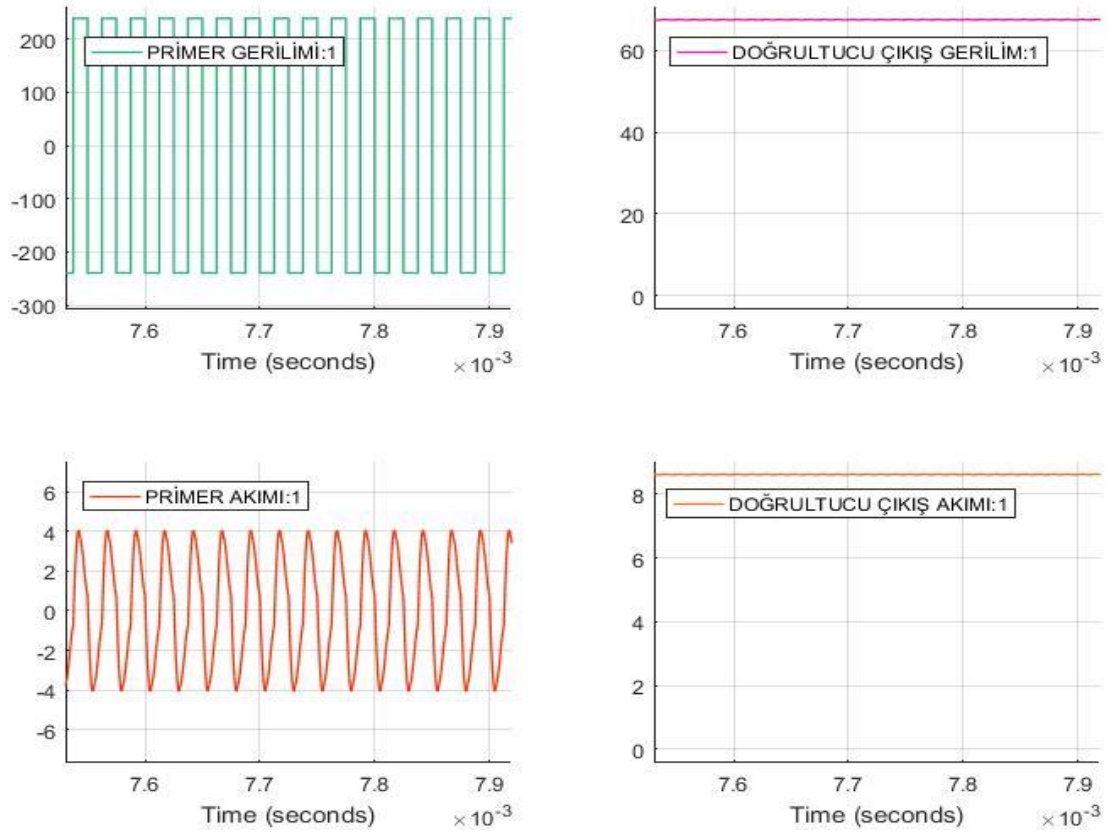
Tablo 4.3. Çeşitli hava aralığında SS sistemin karşılıklı endüktans ve verim değerleri

Devre Parametreleri	Hava aralığı (cm)								
	0	4	8	12	16	25	30	50	100
$L_p(\mu H)$	367,22	367,22	367,22	367,22	367,22	367,22	367,22	367,22	367,22
$L_s(\mu H)$	101,12	101,12	101,12	101,12	101,12	101,12	101,12	101,12	101,12
$M(\mu H)$	92,92	86,07	70,13	52,88	38,54	18,82	13,01	3,82	0,56
k	0,481	0,451	0,363	0,274	0,2	0,097	0,067	0,019	0,003
$C_p(nF)$	43,11	43,11	43,11	43,11	43,11	43,11	43,11	43,11	43,11
$C_s(nF)$	156,65	156,65	156,65	156,65	156,65	156,65	156,65	156,65	156,65
Verim (η)	95	84	82	80	78	72	59	32	9

Hesaplanan karşılıklı endüktans değerlerine göre MATLAB/SIMULINK programında çalıştırılan SS topolojiye sahip devrenin verim değerleri kuplaj katsayısı azaldıkça logaritmik olarak düştüğü görülmüştür.

4.9.1 Elde edile değerler ile simülasyondan elde edilen giriş ve çıkış grafik şekilleri

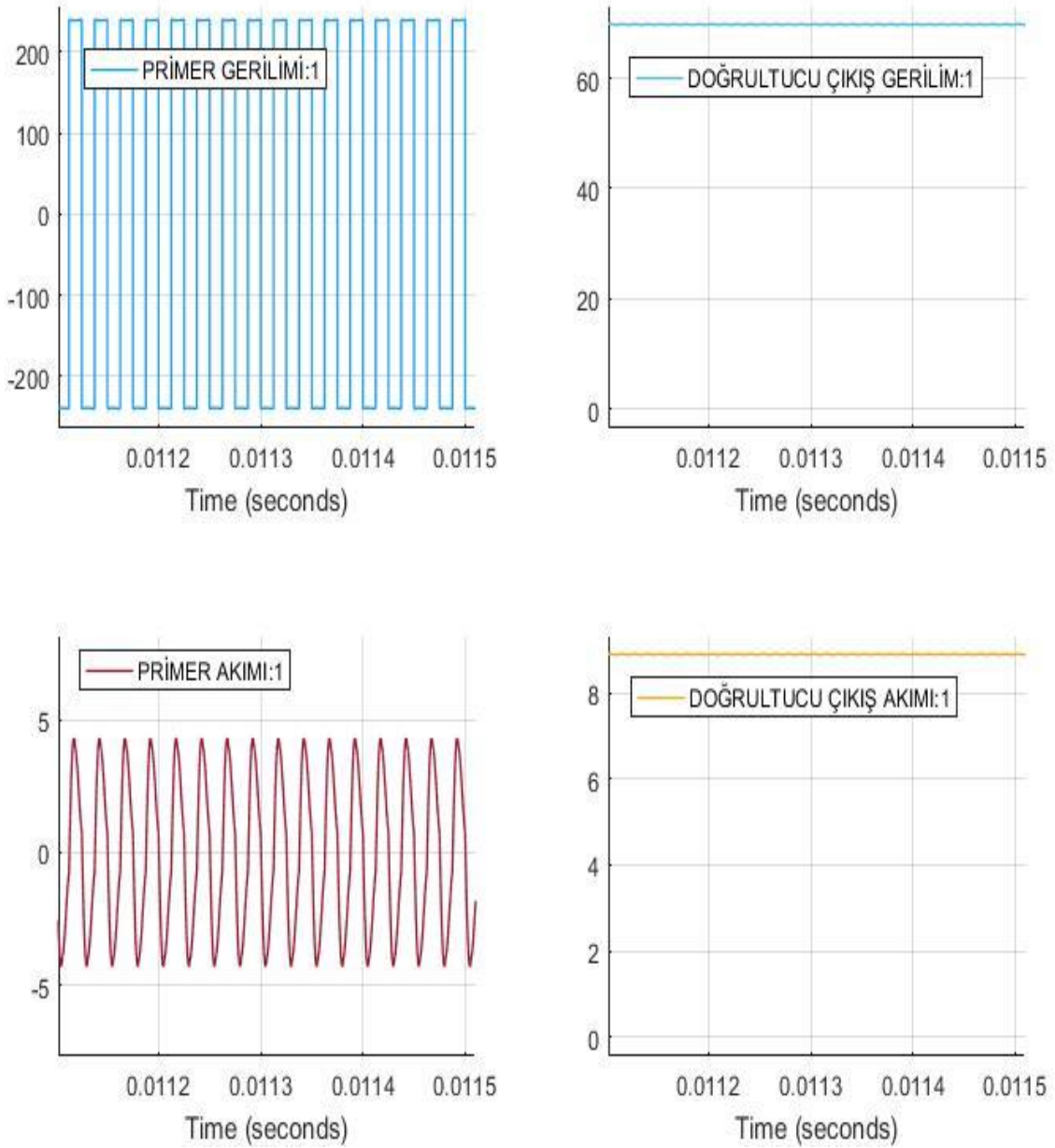
i. 0 cm için;



Şekil 4.16. 0 cm den gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri

0 cm için kurulan devrede primer bobin ile sekonder bobin arasında herhangi bir mesafe farkı olmadığından giriş gücü ile çıkış gücü oranı yaklaşık olarak % 95 olarak bulunmuştur.

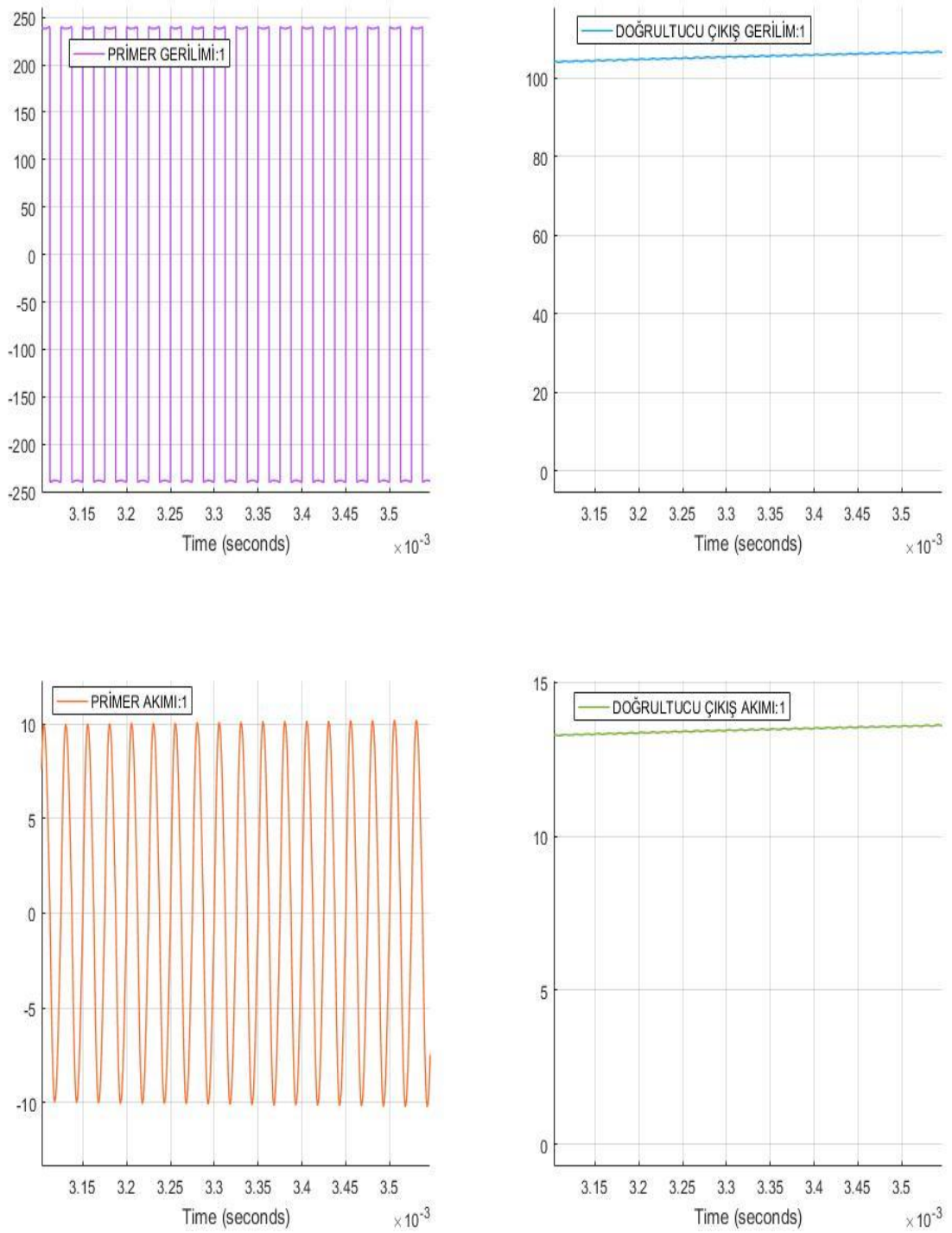
ii. **4 cm için;**



Şekil 4. 17 4 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri

4 cm için yapılan simülasyon ile karşılıklı endüktans değerinin düştüğü ve buna bağlı olarak çıkışa aktarılan gücün de düştüğü görülmüştür. Elde edilen verim % 84 olarak hesaplanmıştır.

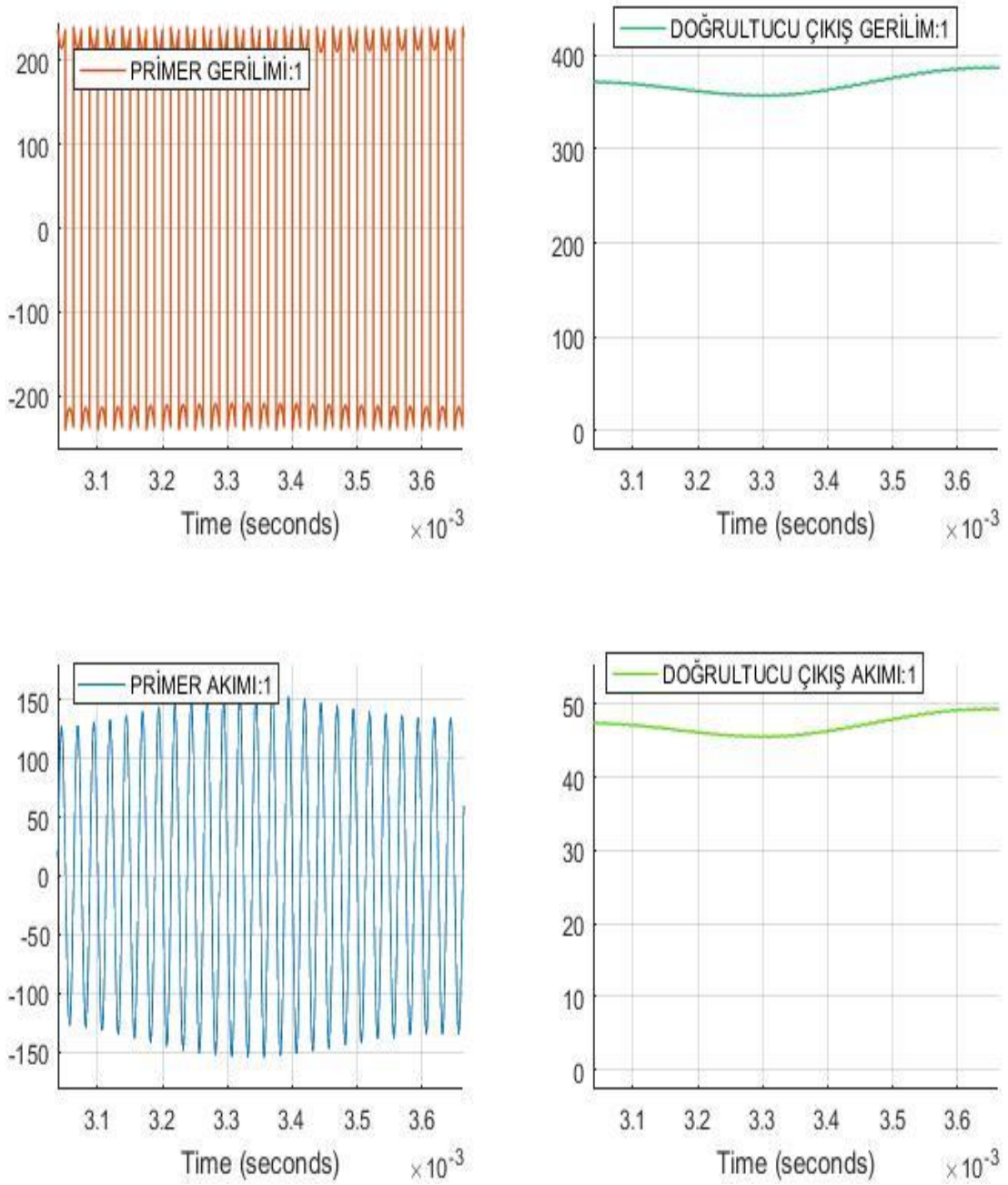
iii. 12 cm için;



Şekil 4. 18 12 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri

12 cm uzaklıkta bulunan primer ve sekonder bobinlerin karşılıklı endüktans değeri mesafeye bağlı olarak azaldığından verimde logaritmik olarak düşmeye devam etmiştir.

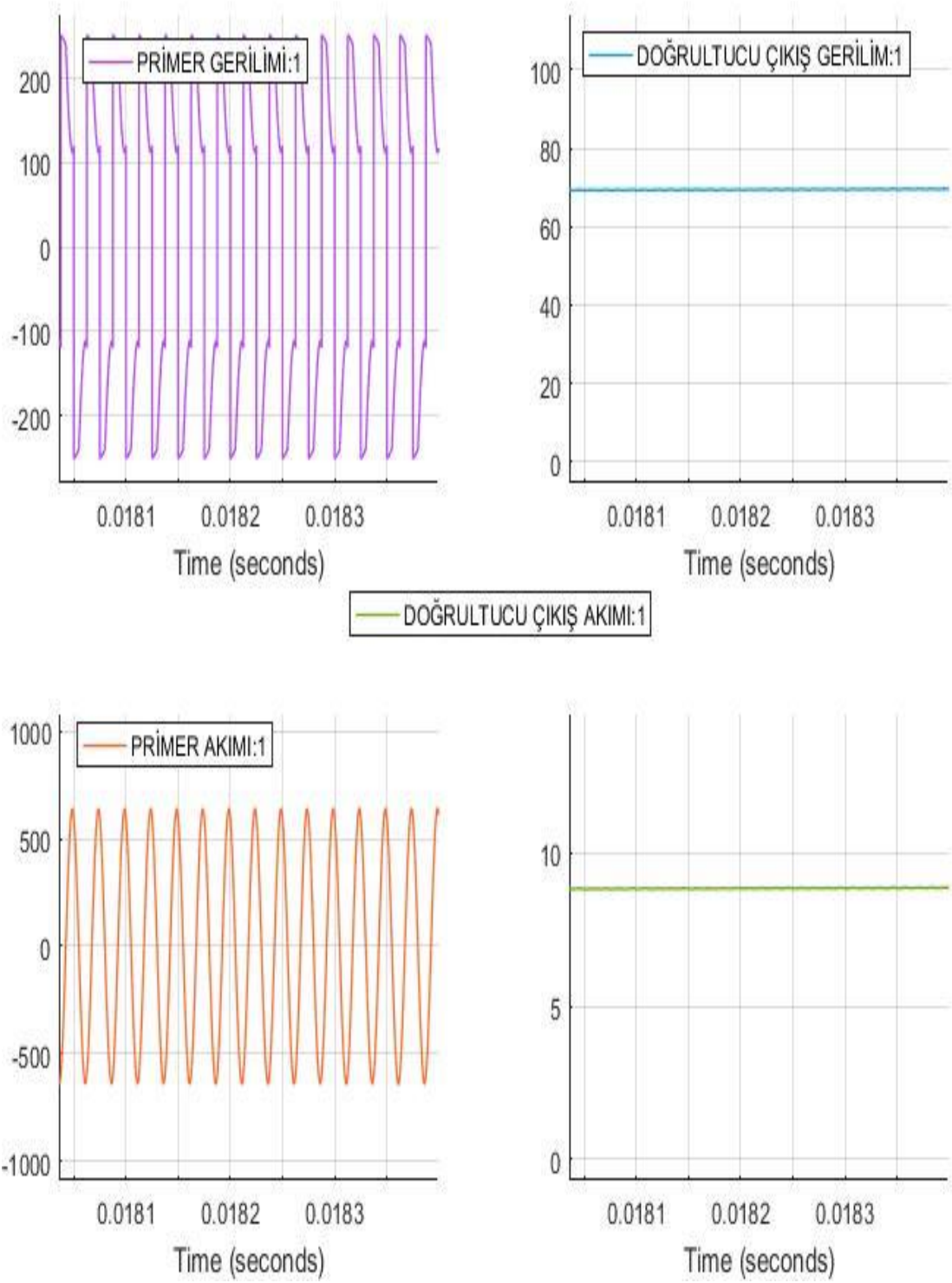
iv. 30 cm için;



Şekil 4. 19 30 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri

30 cm den sonra devrede kullanılan bobinlerin endüktans değeri ve karşılıklı endüktans değerinin hızlı düşmesinden dolayı giriş akımında keskin düşüşler meydana gelmiş; bunun sonucunda verimde de hızlı bir düşüş olup % 59 olarak hesaplanmıştır.

v. 100 cm için;



Şekil 4.20 100 cm uzaklıktan gerçekleştirilen simülasyonun giriş çıkış değerleri

Tez için seçilen devre parametreleri ile 100 cm için yapılan simülasyon çalışmasında devrenin giriş çıkış grafiklerinden de anlaşılabacağı üzere devrenin neredeyse hiç performans vermediği görülmektedir.

4.10 Senaryo 2:

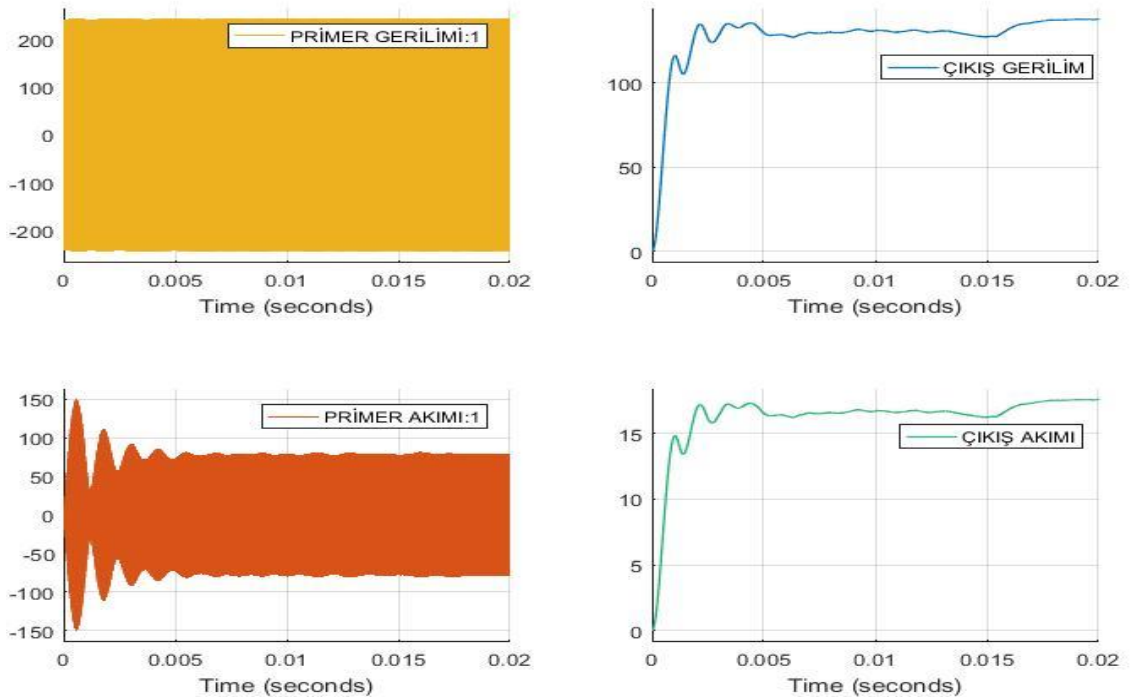
Sistemin diğer topolojilerle giriş çıkış verileri ve buna bağlı olarak verim değerleri Tablo 4.4'deki gibi hesaplanmış olup verim değerlerin sırasıyla SS, SP, PS, PP olarak bulunmuştur.

Tablo 4.4 Kompanzasyon topolojilerinin çıkış verilerinin karşılaştırılması

Topo.	C_p	C_s	L_s	L_p	M	V_{IN}	I_{IN}	I_O	V_O	P_O	$\eta(\%)$
SS	43,1 nF	156 nF	101,1 μ H	367,2 μ H	38.5 μ H	237,7 V	14,8 A	19,55A	143 V	2803 W	78
SP	44,9 nF	156 nF	101,1 μ H	367,2 μ H	38.5 μ H	238,0 V	36,7 A	18,14A	142 V	2579 W	30
PS	43,1 nF	163 nF	101,1 μ H	367,2 μ H	38.54 μ H	209,8 V	3,59 A	3,48 A	23,82 V	82,94 W	11
PP	44,9 nF	156, nF	101,1 μ H	367,2 μ H	38.5 μ H	224,0 V	511 A	0,735 A	5,41 V	3,98 W	1

4.10.1 Topolojilerin Giriş Çıkış Grafiklerinin Gösterimi

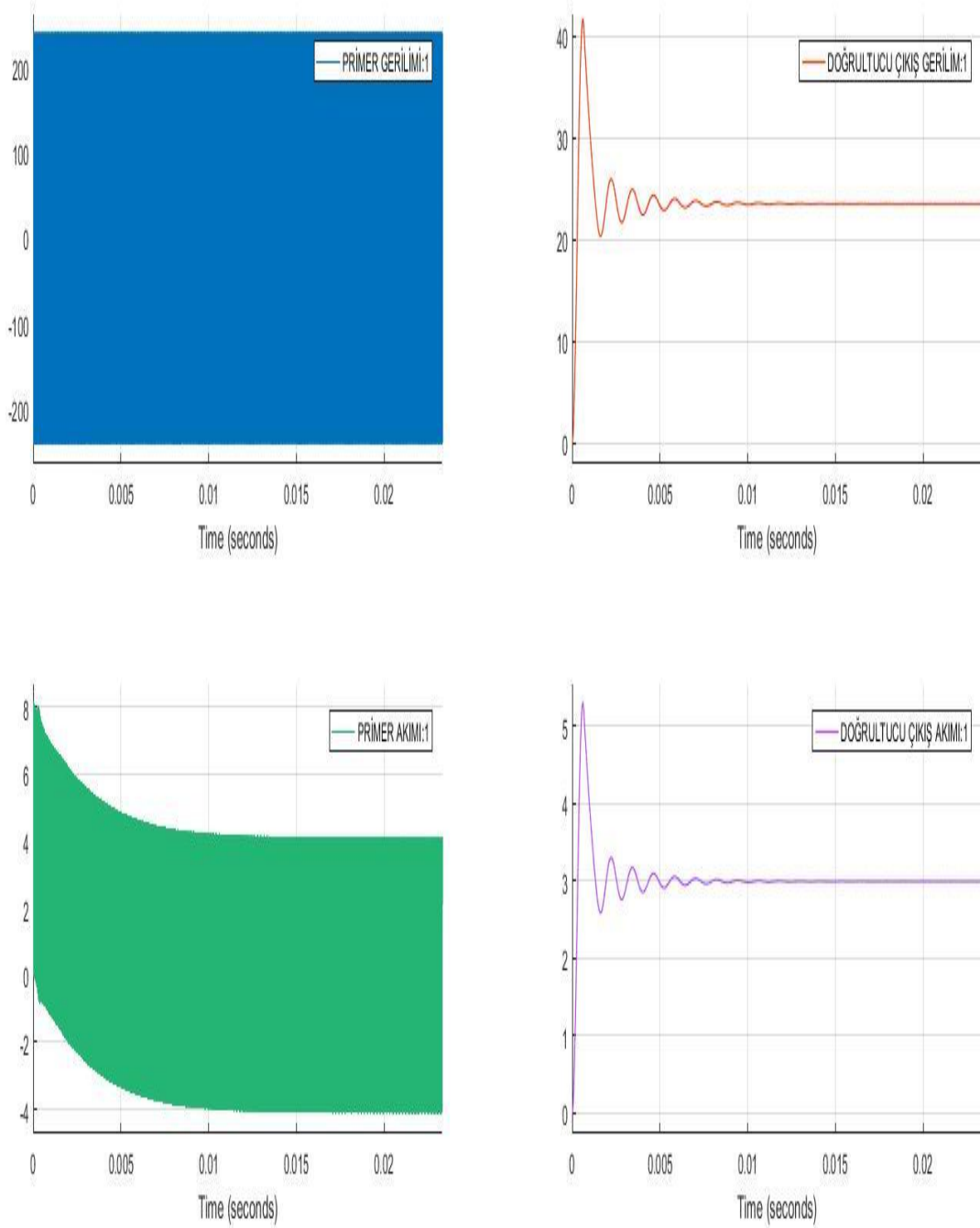
i. Seri Paralel Devre Topolojisi için ;



Şekil 4.21 Seri Paralel topoloji akım gerilim çıkış grafiği

Seri Paralel kompanzasyon topolojisi Seri Seri topolojiden sonra verim değeri en yüksek olan klasik topolojidir.

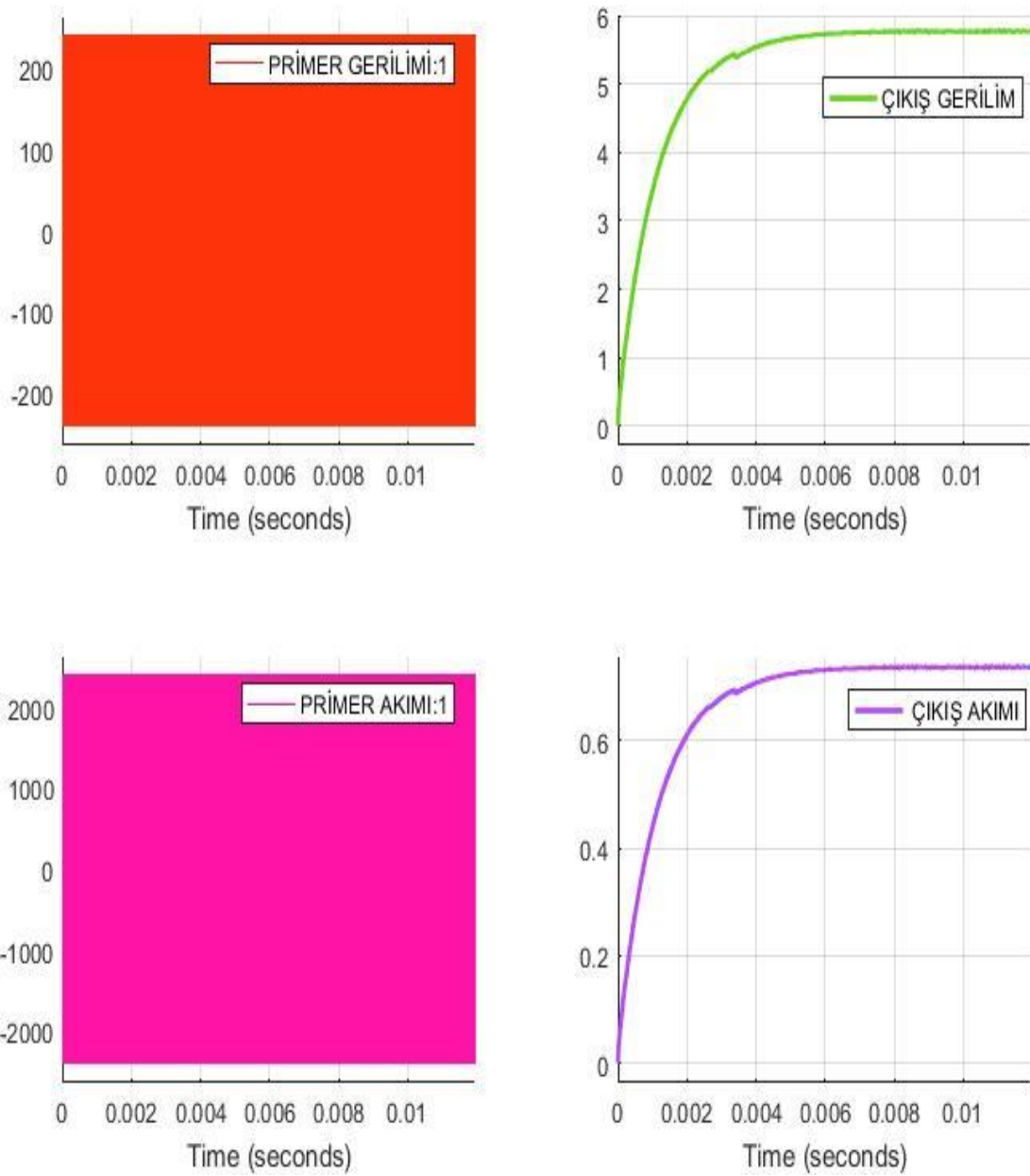
ii. **Paralel Seri Devre Topolojisi için;**



Şekil 4. 22 Paralel Seri topoloji akım gerilim grafiği

Paralel Seri topolojinin giriş çıkış grafiklerinden verimin çok düşük olduğu görülmektedir. Bu yüzden yüksek güçlü sistemlerde kullanışlı bir topoloji değildir.

iii. **Paralel Paralel Devre Topolojisi için;**



Şekil 4.23. Paralel Paralel topoloji akım gerilim grafiği

Paralel Paralel topoloji giriş çıkış grafiklerinden verimi ve performansı en az olan topoloji olduğu anlaşılmaktadır. Paralel Seri topoloji gibi bu topolojide yüksek güçlü sistemlerde kullanıma uygun değildir.

4.11 Senaryo 3

Simülasyonu yapılan program 40 kHz de % 78 verimle çalıştığı görülmüştür. Mosfetleri anahtarlama için frekans değerleri 1 kHz-100 kHz arasında ayarlanarak simülasyon sonuçları tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Simülasyonu yapılan devrenin farklı frekanslardaki verim değerleri

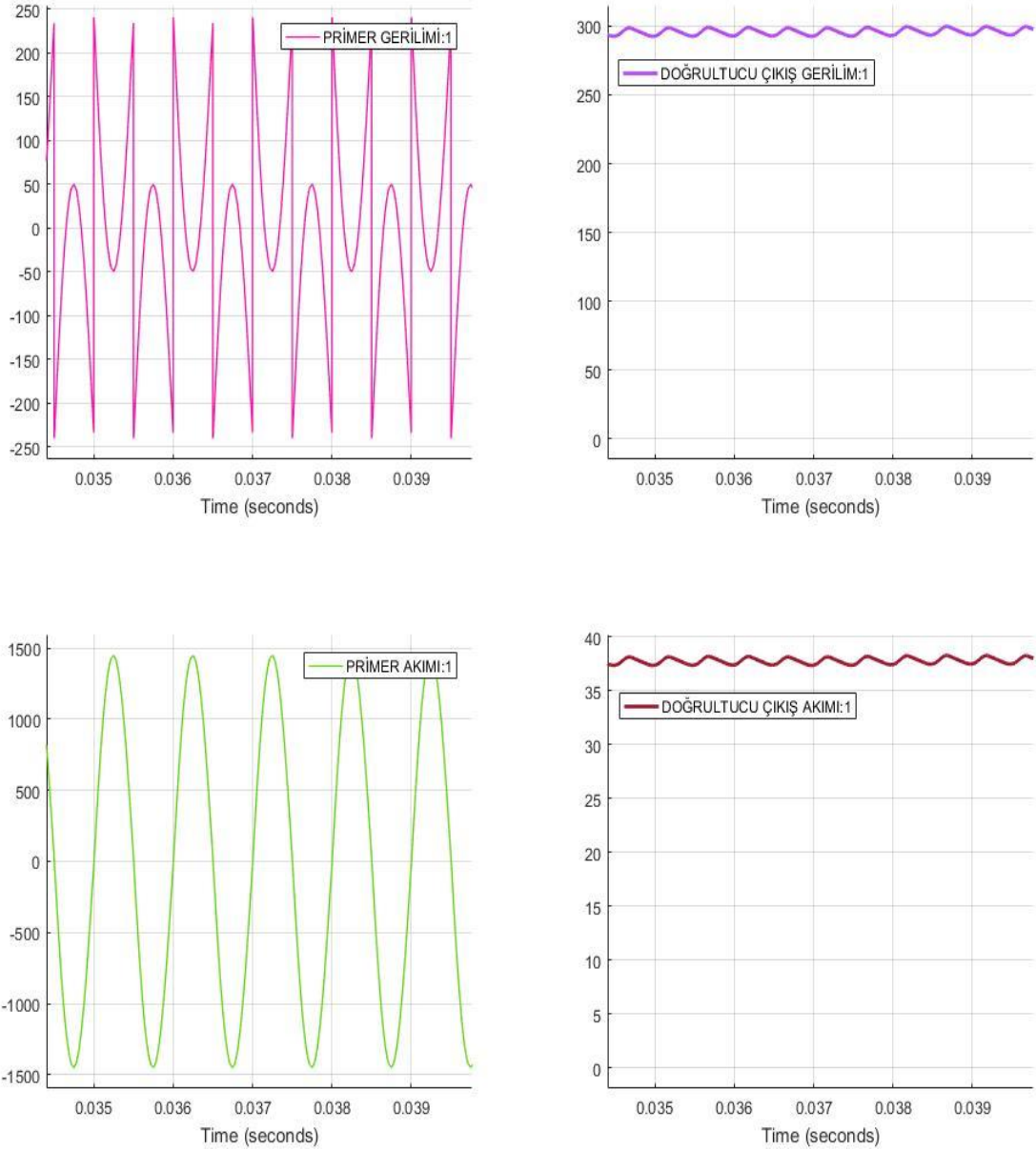
Devre Elemanları (Seri-Seri)	Frekans (kHz)							
	1 kHz	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	60 kHz	80 kHz	100 kHz
L_p	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H	367,22 μ H
L_s	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H	101,12 μ H
C_p	68.97 μ F	689.7 nF	172.44 nF	76,64 nF	43,11 nF	19.16 nF	10,77 nF	6.89 nF
C_s	250 μ F	2.5 μ F	626,3 nF	278,33 nF	156,65 nF	69.58 nF	39.14 nF	25 nF
$\eta(\%)$	14	71	73	76	78	78	78	78

EGT’de frekans ile verim arasındaki ilişki 10 khz den düşük frekans değerlerinde verimsiz çalıştığı görülmektedir. Bu durumun sebeplerinden bir tanesi tezin içerisinde de anlatılan faraday yasasına Denklem (3.5)’e göre sekonderde indüklenmesi istenen gerilimin uygulanan Primer bobinininde oluşacak manyetik akı ile doğru orantılıdır. Sıkı bir kuplaj sağlanabilmesi için uygulanan frekansının ve buna bağlı olarak ortak manyetik akının artması gerekmektedir. Anahtarlama frekansı istenilen seviyede ayarlanmaz ise düşük frekanslarda düşük manyetik akı oluşacak buda devrenin verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Denklem (3.32)’den devrenin Q_s sayısına bağlı olarak belli bir frekans değerine kadar maksimum değeri vermesi beklenir [97].

Tablo 4.5’de oluşan verim değerleri ve aşağıdaki grafiklerin giriş ve çıkış eğrileri bize bu teoremlerin doğruluğunu göstermektedir.

4.11.1 Senaryo 3:

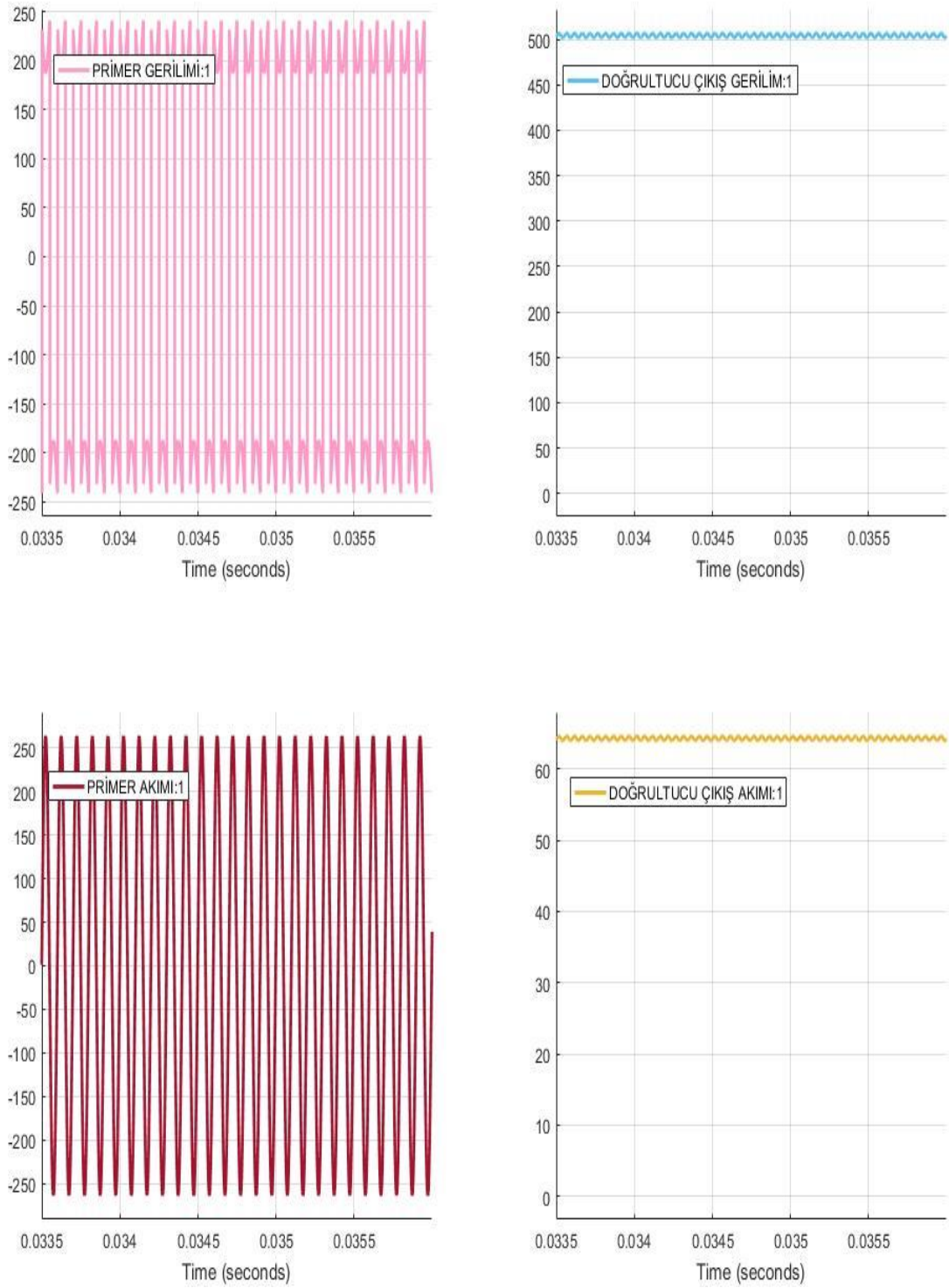
i. 1 kHz için;



Şekil 4. 24 1 kHz frekanslı devrenin giriş çıkış grafikleri

1 Khz değerine ayarlanan frekans ile evirici devresinin tam performans ile çalışmadığı bunun sonucu olarak tasarlanan devrenin verimsiz olduğu grafiklerden ve tablo 4.5’ de hesaplanan değerlerden anlaşılmaktadır.

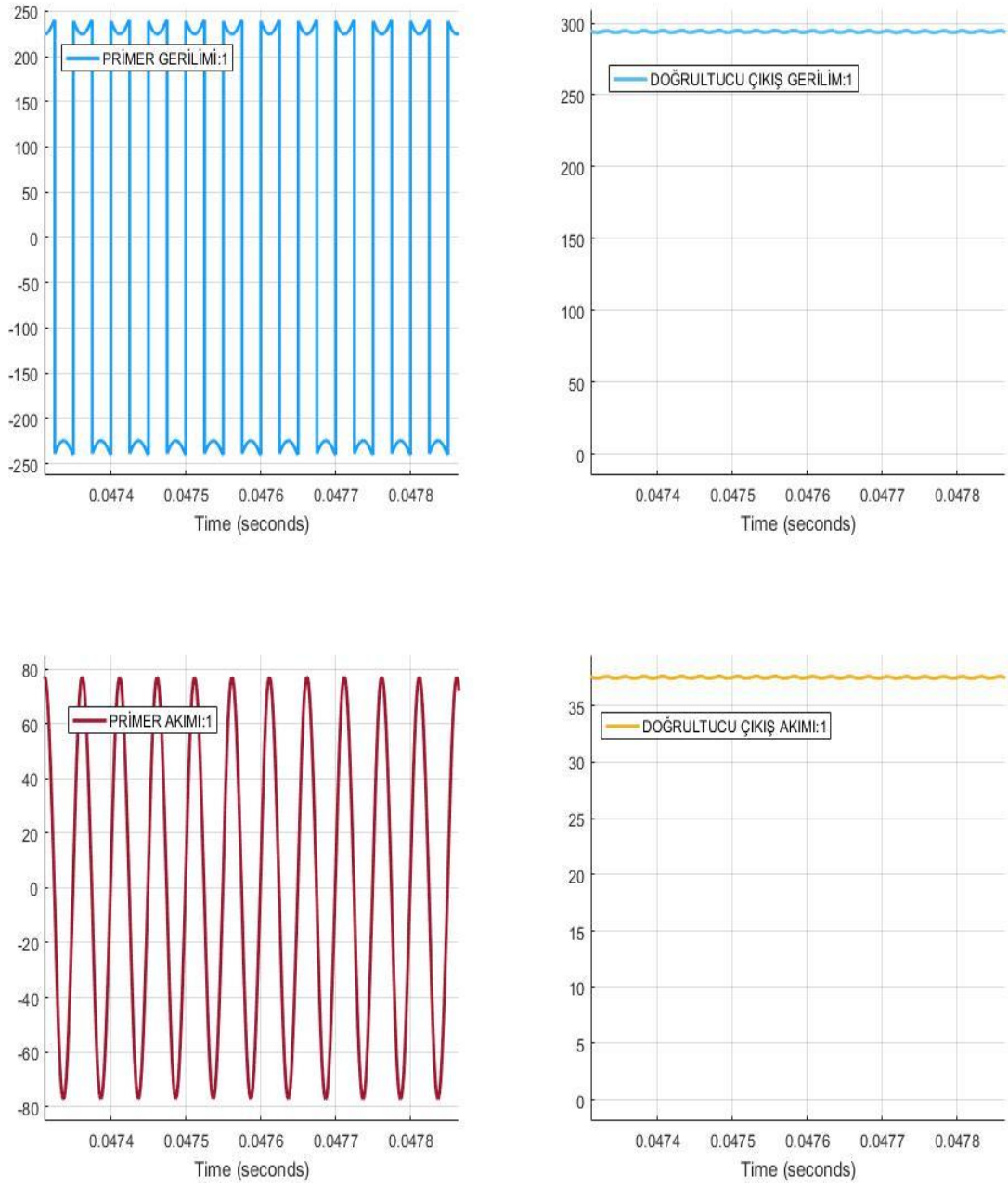
ii. 10 kHz için;



Şekil 4. 25 10 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri

Anahtarlama elemanları 10 kHz üzerindeki frekanslarda daha iyi çalışma koşullarına sahip olduklarından verimin % 71 değerine çıktığı hesap edilmiştir.

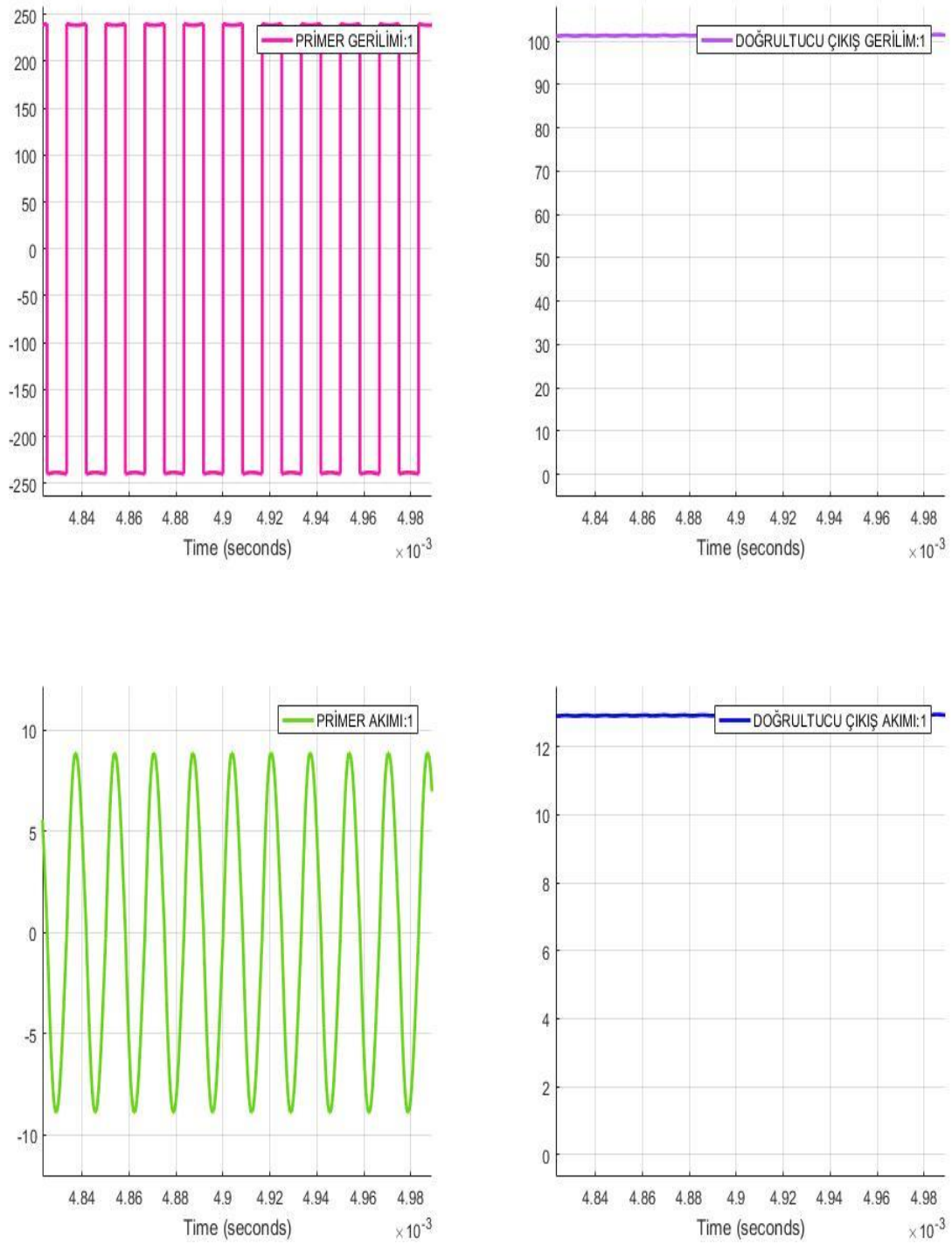
iii. 20 kHz için;



Şekil 4. 26 20 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri

Frekansın 20 kHz olarak ayarlanması ile verim değerinde bir miktar daha artış meydana gelip % 73 değerine ulaşmıştır.

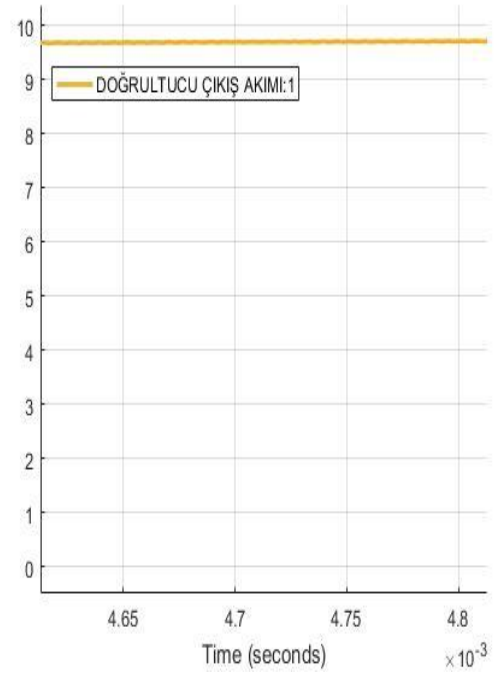
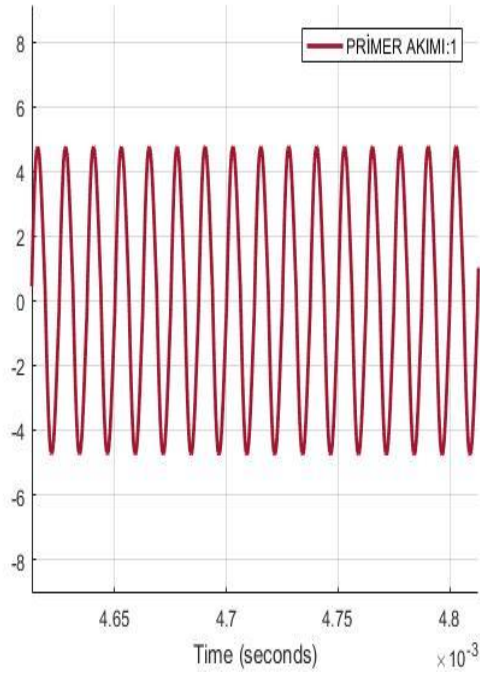
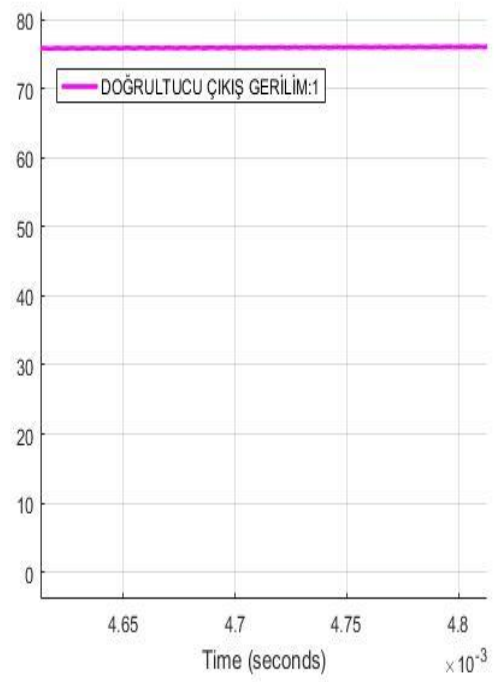
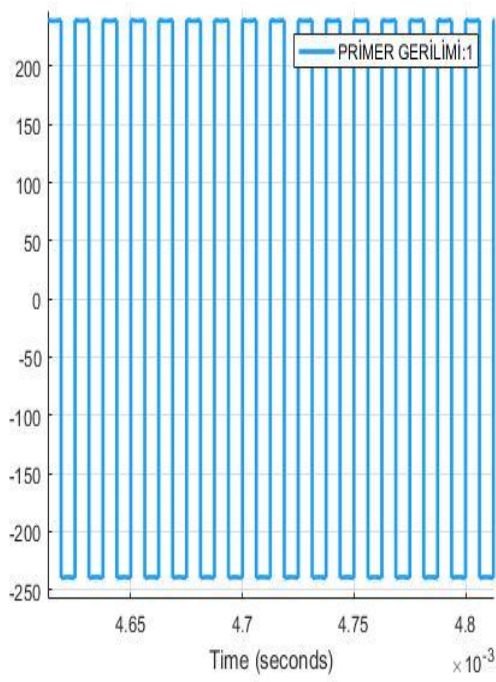
iv. 60 kHz için;



Şekil 4. 27 60 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri

60 kHz de verim değeri tez de seçilen 40 kHz lık frekans değeri ile aynı değerde olup % 78 verim elde edilmiştir.

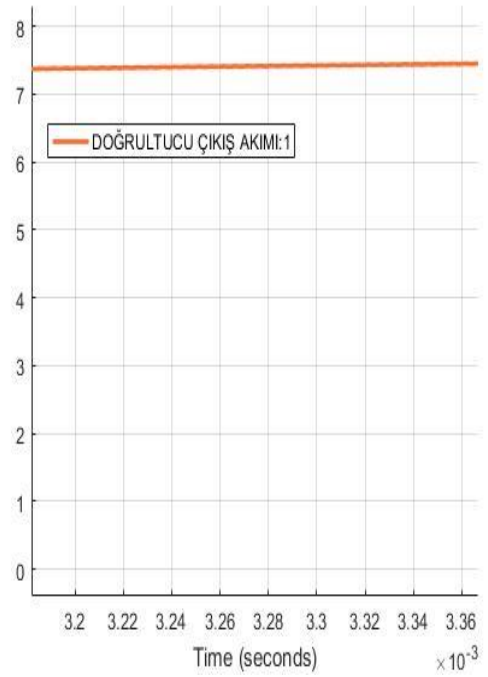
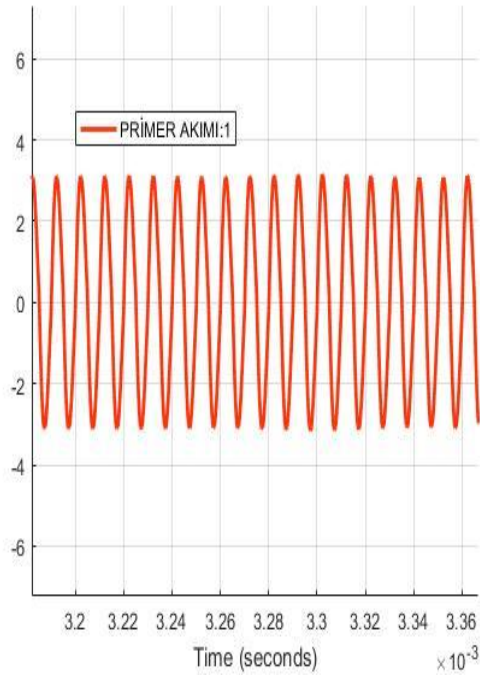
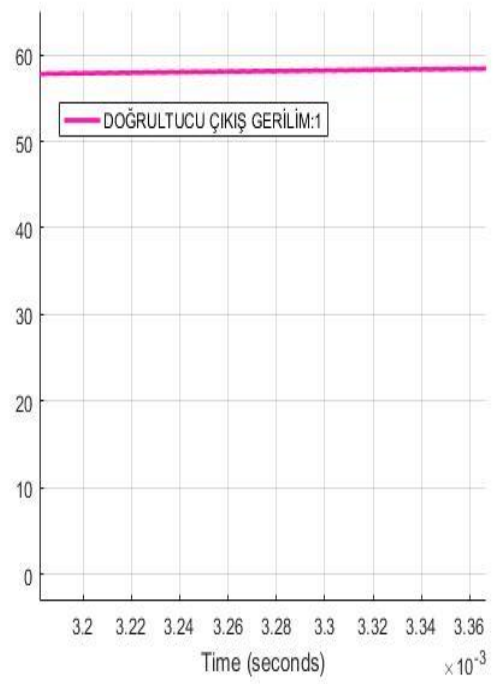
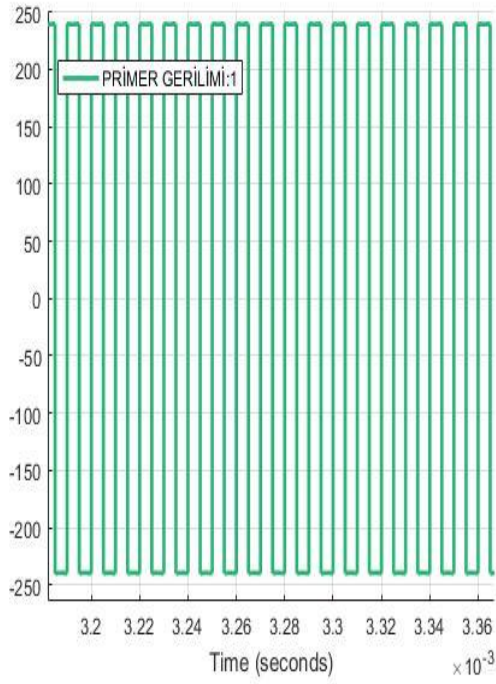
v. 80 kHz için;



Şekil 4. 28 80 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri

80 kHz lık çalışma frekansında verim değeri % 78 olarak bulunmuştur.

vi. 100 kHz için;



Şekil 4.28 100 kHz lik devrenin giriş çıkış grafikleri

Örneklenen son frekans değeri olan 100 kHz de de verim değerinde çok az bir değişim gözlemlenmiştir ve verim % 78 olarak bulunmuştur.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

EGT teknolojisi, elektrik gücünü kablosuz olarak aktarmanın çok uygun, güvenli, verimli ve güvenilir yollarından biridir. EGT ile ilgili mevcut araştırma, öncelikle akım kaynağı teknolojisinin çok sınırlı ilgi gördüğü gerilim kaynağı evirici teknolojisine odaklanmaktadır. Bu çalışma kompanzasyon ağlarına ve mevcut EGT sistemlerinin dönüştürücü topolojilerine kapsamlı bir genel bakış sağlamaktadır.

KGT, gevşek bağlaşımlı sargılar üzerinden gerçekleştirildiğinden güç transfer veriminin düşük olması beklenir. Verim, kompanzasyon topolojileri kullanılarak artırılmalıdır. Endüktif güç transfer sistemlerinde güç, sistemde bulunan bobinler arasında aktarılır. EGT’de bobinler transformatörler gibi aynı çekirdek etrafında olmayıp bobinler arasında sistemi gevşek bağlı hale getiren bir mesafe vardır. Gücün verimli bir şekilde aktarılabilmesi için rezonans kavramı kullanılmaktadır. Dört klasik topoloji vardır ve ayrıca bu topolojilerden türetilmiş LCL topolojisi gibi yeni önerilen topolojilerde vardır.

Tasarlanan çalışmada 3 farklı senaryo çalışması oluşturulmuştur. Senaryo 1 de mesafeye bağlı verim çalışması, senaryo 2 de topolojiler arasında verim karşılaştırması, senaryo 3 ise frekansa bağlı verim değerleri ölçülmüştür.

Senaryo 1 çalışmasında devre parametreleri sabit tutulmuş primer sargı ile sekonder sargı arasındaki mesafe artırılmıştır. Bunu yaparak devrenin verim değerindeki değişimler tablo haline getirilip grafiksel olarak da incelenmiştir. Mesafe azaldıkça karşılıklı endüktansa bağlı olarak verimin artışı görülmüştür.

Senaryo 2 ise devre parametrelerinden primer bobin ve sekonder bobin değerleri ve mesafe aynı olmak şartı ile yapılan simülasyon programında SP-PS-PP devreleri de MATLAB/SIMULINK programında çalıştırılmıştır. Elde edilen giriş çıkış grafik değerleri ile en iyi verimini SS devrenin verdiği SP’in ise ondan daha az verim verdiği görülmüştür. PS ve PP devrelerin vermiş olduğu giriş çıkış değerlerinin ise yüksek güçteki devrelerde kullanışlı olmadığını görülmüştür.

Günümüz güç elektroniği dönüştürücülerinin çalışma frekansları, kW seviyesindeki güç seviyeleri için 10 kHz ile 100 kHz arasındadır [79]. Senaryo 3 de yapılan çalışmada 1Khz ile 100 kHz arasından seçilmiş bazı frekans değerlerinden sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda 10 kHz in altındaki frekanslarda

evirici devresinin pasif elemanlardan dolayı verimli çalışmadığı ve bunun sonucunda devreden yeterli performans alınmadığı görülmüştür.

Yapılan bu çalışma, KGT için temel bir giriştir. Sistemin daha ileri seviye de kullanılması, verim ve kapasitesinin yükseltilmesi için geliştirilmiş LCL kompanzasyon topolojileri üzerinde çalışmalar yapılmalıdır.



KAYNAKÇA

- [1] Tesla, N., "System of transmission of electrical energy," (03/20/1900). Erişim adresi <https://www.google.com/patents/US645576>.erişim tarihi (10 Eylül 2020 erişildi.).
- [2] Diab, İ., "Design Of A Modular Primary For A Wireless Power Transfer System" Master Of Science Thesis Delft University Of Technology Department Of Dc Systems, Energy Conversion, And Storage (2019).
- [3] Musavi, F. and Eberle, W. (2014). Overview of wireless power transfer Technologies for electric vehicle battery charging. IET Power Electronics, 7: 60-66. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0047>.
- [4] Daida, S.R., "A Design Of Inductive Coupling Wireless Power Transfer System For Electric Vehicle Applications" Master Of Science Electrical And Computer Engineering Old Dominion University August (2019).
- [5] Rodriguez-Otero, M.A., O'Neill-Carrillo, E. "Efficient Home Appliances for a Future DC Residence". In: Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE. Nov. 2008, pp. 1–6.
- [6] Stieneker, Marco, and Rik W. De Doncker. "Medium-voltage DC distribution grids in urban areas." 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, (2016).
- [7] Li, Jie, "Wireless Power System Design for Maximum Efficiency. " Master's Thesis, University of Tennessee, 2018.https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/5110.
- [8] Notaroš, B.M., Electromagnetics. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2011.
- [9] Lang, H.D., " Optimization of Wireless Power Transfer Systems with Multiple Transmitters and Receivers" Doctor of Philosophy The Edward S. Rogers Sr. Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto 2018.
- [10] Ampère, A.M., "Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience," Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'institut de France, vol. 5, pp. 175–388, 1827.
- [11] Day, P. (1999) The Philosopher's Tree: A Selection of Michael Faraday's Writings. CRC Press.
- [12] Hunt, B.J., (1994) The Maxwellians, 1st ed. Ithaca, United States: Cornell University Press, First Edition.
- [13] Sun, L., Tang, H., Zhong, S. (2015) "Load-independent output voltage analysis of multiple-receiver wireless power transfer system," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. PP, no. 99, pp. 1–1.
- [14] Marconi, G., (1909) "Wireless telegraphic communication," in Nobel Lectures in Physics.

- [15] Carlson, W. B., Tesla: Inventor of Electrical Age. Princeton University Press, 2013.
- [16] Khanna,V. K., (2016) Implantable Medical Electronics. Springer International Publishing.
- [17] Zettl, O.i(1987) “Arrangement for wireless signal transmission from a rotating body,”
,ePPatentApp.EP19,860,118,165.[Online].Available:<http://www.google.com.pg/patents/EP0229399A2?cl=en> (Erişim Tarihi 17.12.2020).
- [18] Aydın, E., Pashaei ,A., Yıldırız, E., M. Aydemir M.T.” Elektrikli Araçlar için 2.2 kW Gücünde Bir Kablosuz Güç Aktarım Sisteminin Tasarım” 1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi | 21-22 Eylül 2017 | Elazığ Sayfa. 7
- [19] M. Treffers,M., (2015). “History, current status and future of the wireless power consortium and the qi interface specification,” IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 28–31, 2Q .
- [20] R, Bhutkar , S, Sapre., (2009). Wireless Energy Transfer Using Magnetic Resonance. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dubai, 28 30 December, 512-515.
- [21] Lu, F., “High Power Capacitive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications “ Doctor of Philosophy (Electrical Engineering: Systems) in The University of Michigan2017
- [22] Vihvelin, H., Leadbetter, J.R., Bance, M., Brown, J.A., Adamson, R.B.,(2016) “Compensating for Tissue Changes in an Ultrasonic Power Link for Implanted Medical Devices,” IEEE Trans.on Biom.Cir.and Syst.,Sayı. 10, no. 2, sayfa. 404-411.
- [23] Stein, A.L., Hofmann H., (2016) “Autonomous Wideband Piezoelectric Energy Harvesting Utilizing a Rezonant Inverter,” IEEE Trans. Power Electron. doi: 10.1109/TPEL.2016.2616301.
- [24] Zhou, Z., Peng, Z., Cui J.H., Shi Z., (2011) “Efficient Multipath Communication for Time-Critical Applications in Underwater Acoustic Sensor Networks,” IEEE/ACM Trans.on Netw.,Sayı. 19, no. 1, sayfa. 28-41.
- [25] Zhu, X., Bin, L., Liu, L., Luan, Y., (2016) “Power Transfer Performance and Cutting Force Effects of Contactless Energy Transfer System for Rotary Ultrasonic Grinding,” IEEE Trans. Ind. Electron.,Sayı. 63, no. 5, sayfa. 2785-2795.
- [26] Sherrit, S., Bao, X., Badescu, M., Aldrich, J., Bar-Cohen, Y. et al, (2008) “1 kW Power Transmission using Wireless Acoustic-Electric Feed-through (WAEF)”, Proc.ASCE, sayfa. 1-10.
- [27] Zhou, W., Jin,K., (2015) “Efficiency Evaluation of Laser Diode in Different Driving Modes for Wireless Power Transmission,” IEEE Trans. Power Electron.,Sayı. 30, no.11, sayfa. 6237-6244.
- [28] Zhou,W., Jin,K., “Optimal Photovoltaic Array Configuration under Gaussian Laser Beam Condition for Wireless Power Transmission,” IEEE Trans. Power Electron.,doi:10.1109/TPEL.2016.2583502.

- [29] Dicklinson, R.M., (2003) "Wireless Power Transmission Technology Satte of the Art: The First Bill Brown Lecture", Acta Astronaut, Sayı. 53, no. 4-10, sayfa. 561-570.
- [30] ASahai, A., Graham, D., (2011) "Optical Wireless Power Transmission at Long Wavelength", Proc.IEEE Intern.Conf.on Space Optical System and Application (ICSOS), sayfa. 164-170.
- [31] Shi, D., Zhang, L., Ma, H., Wang, Z., Wang, Y., Cui, Z., (2016) "Research on Wireless Power Transmission System between Satellites," Proc. IEEE Wireless Power Transfer Conf.(KGAC), sayfa. 1-4.
- [32] Kaushal, H., Kaddoum, G., (2016) "Underwater Optical Wireless Communication," IEEE Access, Sayı. 4, sayfa. 1518-1547.
- [33] Duncan, K.J., (2016) "Laser Based Power Transmission: Component Selection and Laser Hazard Analysis," Proc.IEEE Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer(WoW), sayfa. 100-103.
- [34] Shinohara, N., (2011)"Power without Wires," IEEE Microwave Magazine, Sayı. 12, no. 7, sayfa. 64-73.
- [35] Huang,Y., Shinohara, N., Mitani, T.,(2016) "Impedance Matching in Wireless Power Transfer," IEEE Trans.on Microwave Theory and Techniques, doi: 10.1109/TMTT.2016.2618921.
- [36] Ron Hui, S.Y., (2016) "Magnetic Resonance for Wireless Power Transfer," IEEE Power Electron.Mag.,Sayı. 3, no. 1, sayfa. 14-30.
- [37] Chen, C., Chu,T., Lin, C., Jou, Z., (2010) "A Study of Loosely Coupled Coils for Wireless Power Transfer," IEEE Trans.on Circuits and Systems-II: Express Briefs, Sayı. 57, no. 7, sayfa. 536-540,
- [38] Domingos, F.C.,(2019) " Wireless Power Transmission Topology using Capacitively Coupled Open-Ended Helical Resonators" Department of Electrical and Computer Engineering University of Alberta.
- [39] Li, S., Liu, Z., Zhao, H., Zhu, L., Chen, Z.,(2016) "Wireless Power Transfer by Electric Field Resonance and Its Application in Dynamic Charging," IEEE Trans. Ind. Electron.,Sayı. 63, no. 10, sayfa. 6602-6612.
- [40] Kline, M., I. Izyumin, I., Boser, B., Sanders,S., (2011) "Capacitive Power Transfer for Contactless Charging," Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), sayfa. 1048-2334.
- [41] Amanci, A., Ruda, H., Dawson, F., (2016) "Galvanic Isolation for High-Frequency Applications Using an Integrated Dielectric Structure," IEEE Trans. Power Electron.,Sayı. 31, no. 8, sayfa. 5797-5804.
- [42] Xia, C.Y., Li, C.W., Zhang, J.,(2011) "Analysis of Power Transfer Characteristic of Capacitive Power Transfer System and Inductively Coupled Power Transfer System", Proc.IEEE Intern.Conf.on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer Science, sayfa. 1281-1285.
- [43] Hadley, F. (2007). Goodbye wires! MIT News [electronic newspaper]. 7 June 2007 Available from: <http://newsoffice.mit.edu/2007/wireless-0607>. [Erişim Tarihi 3 Nisan 2021].

- [44] Kaijun, Y., (2014) “Application And Promotion Of Wireless Charging Technology” Savonia University Of Applied Sciences Bachelor’s Thesis.
- [45] Sun, X., Li, Z., Wang, X., Li, C., (2020) Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13010090>.
- [46] Kerem A, Gürbak H (2020) “ Elektrikli Araçlar İçin Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri” GU J Sci, Part C, 8(3): 644-661.
- [47] Sarker, M.R., Pandzic, H. Ortega-Vazquez, M.A.(2013) Electric vehicle battery swapping station: Business caseand optimization model. In Proceedings of the 2013 International Conference on Connected Vehicles andExpo (ICCVE), Las Vegas, NV, USA, 2–6, sayfa. 289–294.
- [48] Avci, B., Girotra, K., Netessine, S. Electric vehicles with a battery switching station: Adoption andenvironmental impact. *Manag. Sci.* 2015, 61, 772–794.
- [49] Rahman, I., Vasant, P.M., Singh, B.S.M., Abdullah-Al-Wadud, M., Adnan, N (2016) Review of recent trends inoptimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renew. Sustain.Energy Rev.* 58, 1039–1047.
- [50] Electric Light & Power [Internet]. IEC Publishes Tow International EV Standards. Erişim:<http://www.elp.com/articles/2011/10/iec-publishes-two-international-ev-standards.html> (Erişim Tarihi 19 Ekim 2020).
- [51] Angelov, G., Andreev, M., Hinov, N. (2018). Modelling of electric vehicle charging station for DC fast charging. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (sayfa. 1-5). IEEE.
- [52] Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M. U., Onur, B., Tumay, M. (2018). A Review of Charging Technologies For Commercial Electric Vehicles. *International Journalof Advances on Automotive and Technology*, 2(1), 61-70.
- [53] Sutopo, W., Nizam, M., Rahmawatie, B., Fahma, F. (2018). A Review of Electric Vehicles Charging Standard Development: Study Case in Indonesia. In 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT) (sayfa. 152-157). IEEE.
- [54] Meissner, E., Richter, G. (2003). Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of power sources*, 116(1-2), 79-98.
- [55] Paschero, M., Anniballi, L., Del Vescovo, G., Fabbri, G., & Mascioli, F. M. F. (2013,). Design and implementation of a fast recharge station for electric vehicles. In 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (sayfa. 1-6). IEEE.
- [56] Habib,S., M. Khan, M.M., Hashmi,K., Ali, M., Tang,H., (2017) "A Comparative Study of Electric Vehicles Concerning Charging Infrastructure and Power Levels," 2017 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), Islamabad, sayfa 327-332.
- [57] Ricaud, C.,& Vollet, P. (2010). Connection method for charging systems–a key element for electric vehicles. *Schneider Electric*.

- [58] Musavi, F., Eberle, W., (2014) "Overview of Wireless Power Transfer Technologies for Electric Vehicle Battery Charging," IET Power Electronics, Sayı. 7, no. 1, sayfa. 60-66.
- [59] Panchal, C., Stegen, S., Lu, J., (2018) Review of static and dynamic wireless Electric vehicle charging system, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 21, Issue 5, 2018, Pages 922-937, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- [60] Subudhi, P.S., S2Wireless Power Transfer Topologies used for Static and Dynamic Charging of EV Battery: A Review DOI: 10.1515/IJEPS-2019-0151
- [61] "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In EVs and Alignment methodology," ed. Warrendale, Pennsylvania, United States: SAE International, 2017, p. 150.
- [62] Musavi, F., Edington, M. Eberle, W. (2012) "Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies" Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE , pp. 1804-1810.
- [63] Choi, S.Y., Gu, B.W., Jeong, S.Y., Rim, C.T., (2015) "Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 18-36.
- [64] Mi, C.C., Buja, G., Choi, S.Y., Rim, C.T., (2016) "Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6533-6545.
- [65] Patil, D., (2019) "Dynamic Wireless Power Transfer For Electric Vehicles" Doctor Of Philosophy In Electrical Engineering The University Of Texas At Dallas May 2019.
- [66] Miller, J.M., Jones, P.T., Li, J.M., Onar, O.C., (2015) "ORNL experience and challenges facing dynamic wireless power charging of EV's," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 40-53.
- [67] Miller J.M., et al., (2014) "Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: The benefit of electrochemical capacitor smoothing," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 12-24.
- [68] Gil, A., Taiber, J., (2014) "A literature review in dynamic wireless power transfer for electric vehicles: Technology and infrastructure integration challenges," in *Sustainable automotive technologies 2013*: Springer, 2014, pp. 289-298.
- [69] Chen, L., G. Nagendra, G.R., JBoys, J.T., Covic, G.A., (2015) "Double-coupled systems for EGT roadway applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 37-49.
- [70] Aditya, K., (2016) "Design And Implementation Of An Inductive Power Transfer System For Wireless Charging Of Future Electric Transportation" August 2016 University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Ontario, Canada.
- [71] Cheng, D.K., (1986) "Field and Wave Electromagnetics," *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, vol. 28, no. 2, pp. 27-28.
- [72] Zaheer, A., Budhia, M., Kacprzak, D., Covic, G.A., (2011) "Magnetic design of a 300 W under-floor contactless Power Transfer system," in *Proc. Annual*

- Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, pp. 1408-1413.
- [73] Villa, J.L., Sallan, J., Osorio, J.F.S., Llombart, A., High-misalignment tolerant compensation topology For ICPT Systems, *IEEE Trans. Indust. Electr.* 59 (2012) 945–951.
 - [74] Kalwar, K., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Horan, B., (2016) Coil Design for high misalignment tolerant inductive power transfer system for EV charging, *Energies*.
 - [75] Diekhans, T., Stewing, F., Engelmann, G., Hoek, H.V., De Doncker, R.W., (2014) "A systematic comparison of hard- and soft-switching topologies for inductive power transfer systems," in *Proc. IEEE Electric Drives Production Conference, 2014 4th International*, Nuremberg, pp. 1-8.
 - [76] Qu, X., Wong, S.C., Tse C.K., Zhang, G., (2014) "Design consideration of a current-source-output inductive power transfer LED lighting system," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Pittsburgh, pp. 3607-3611.
 - [77] Covic, G.A., Boys, J.T., (2013) "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 28-41.
 - [78] Wu, H.H., A. Gilchrist, A., Sealy, K.D., Bronson, D., (2012) "A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 585–595.
 - [79] Sohn, Y.H., Choi, B.H., E. S. Lee, G. C. Lim, G. H. Cho, G.H., C. Rim, T., (2015) "General Unified Analyses of Two-Capacitor Inductive Power Transfer Systems: Equivalence of Current-Source SS and SP Compensations," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6030–6045.
 - [80] Zhang, W., Mi, C. C. (2016). Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4768-4778.
 - [81] Cho, S. Y., Lee, I. O., Moon, S., Moon, G. W., Kim, B. C., & Kim, K. Y. (2013). Series series compensated wireless power transfer at two different resonant frequencies In *ECCE Asia Downunder (ECCE Asia)*, 2013 IEEE (pp. 1052-1058). IEEE.
 - [82] Wahab A.S (2016) "Analysis And Design Of Inductive Power Transfer Systems For Automotive Battery Charging Applications" Near East University Nicosia.
 - [83] S. Chopra, (2011) "Contactless Power Transfer For Electric Vehicle Charging Application," Delft University Of Technology, The Netherlands.
 - [84] Aditya K., Williamson, S.S., (2014) "Comparative study of Series-Series and Series- Parallel compensation topologies for electric vehicle charging," in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Istanbul, pp. 426-430.
 - [85] Zheng, C., *et al.*, (2015) "High-Efficiency Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charging Application," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 65-74.

- [86] Steigerwald, R.L.,(1988) "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 174-182.
- [87] Joung, G.B., Cho, B.H., (1998) "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 1013–1022, 1998.
- [88] Vorperian,V., (1990) "Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. Continuous conduction mode," in *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*,vol. 26, no. 3, pp. 490-496.
- [89] Waffenschmidt, E., Staring, T. (2009) "Limitation of inductive power transfer for consumer applications," in *Proc. European Conference on Power Electronics and Applications*, Barcelona, pp. 1-10.
- [90] Boylestad,L., Robert,(2011) *Introducción al análisis de circuitos*. México : Prentice-Hall.
- [91] Chopra, S., P. Bauer,P. (2011) "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2011, pp. 1–6.
- [92] Steigerwald,R.L., (1988) "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 174-182.
- [93] Keeling, N.A., Covic, G.A., Boys, J.T.,(2010) "A unity-power-factor EGT pickup for high-power applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp.744–751.
- [94] Mingjie L. (2018) "Analysis on the power and efficiency in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances" *AIP Conference Proceedings* 1971, 040023 <https://doi.org/10.1063/1.5041165>.
- [95] Batra T. (2015) *Design of Static Wireless Charging System for Electric Vehicles with Focus on Magnetic Coupling and Emissions*. Department of Energy Technology, Aalborg University. 168 p.
- [96] Sullivan, C.R.,(1999) "Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 283–291.
- [97] Xu, J., Xu,Y., Zhang, Q., (2019) Calculation and analysis of optimal design for wireless power transfer, *Computers & Electrical Engineering*, Volume 80, 106470, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106470>.