



**ALTİGEN-KARE MELEZ SARGILI TEMASSIZ GÜÇ AKTARIM SİSTEM
TASARIMI**

Ali PASHAEI

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Ali PASHAEİ

ALTİGEN-KARE MELEZ SARGILI TEMASSIZ GÜÇ AKTARIM SİSTEM TASARIMI
(Doktora Tezi)

Ali PASHAEİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Kablosuz güç aktarımı (KGA), fiziksel temas kullanmadan bir hava boşluğu üzerinden enerji iletimidir. Bu yöntem temiz ve güvenilir olmasından dolayı gün geçtikçe elektrikli araçlar ve farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Literatüre KGA sistemlerinde farklı sargı modelleri kullanılmaktadır. KGA sistemlerinde en önemli sorunlardan biri olan sargıların kayması sonucunda bağlaşım katsayısı değişimi ve dolayısıyla verim düşmesini gidermek için hibrit kare-altıgen sargı yapısı önerilmiştir. Bu sargı yapısı normal kare sargı yapısına göre karşılaştırıldığında X ve Y ekseninde kayma sonucu bağlaşım katsayısı noktasında daha az etkilenmektedir ve bunun sonucunda daha iyi bir verime sahiptir. Çalışmamızda öncelikle kare-altıgen sargı yapısının SEA analizleri ve ANSYS SİMPLOER ortamında benzetimleri yapılmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında 50 W, 85 KHz’te çalışan bir KGA sistemi tasarlanmış ve test edilmiştir. SEA analizleri ve deneysel uygulama sonuçları büyük oranda örtüşmektedir ve buna göre KGA sistemimizin sargıdan sargıya verimi %93.5 ve sistemin genel verimi %87 olarak sonuçlanmıştır. İki sargı arasında hava aralığı 5 cm olup ve sistemin etkinliğini ölçmek için X ve Y eksenlerinde 2 cm’den 10 cm’ye kadar kayma yapılmıştır ve hibrit kare-altıgen sargı yapısının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 90522
Anahtar Kelimeler : Kablosuz güç aktarımı, Sargı tasarımı, Elektrikli araçlar, yanlış Hizalanma
Sayfa Adedi : 82
Danışman : Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

HEXAGON-SQUARE HYBRID COIL DESIGN FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM

(Ph.D Thesis)

Ali PASHAEİ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Wireless power transfer (WPT) is the energy transmission over an air gap without physical contact. Since this method is clean and reliable, it has been widely used in electric vehicles and different applications nowadays. There are different coil models used in WPT literature. Hybrid square-hexagonal coil structure has been proposed in order to eliminate the coupling coefficient change and thus the decrease in efficiency as a result of the misalignment of the coils, which is one of the most important problems in WPT systems. Compared to the normal square coil structure, this structure is less affected by the coupling coefficient as a result of misalignment in the X and Y axis, and as a result, it has a better efficiency. In our study, first of all, SEA analyzes of the square-hexagonal coil structure and simulations were made in the ANSYS SIMPLORER environment. In addition, a WPT system operating at 50 W, 85 KHz was designed and tested in a laboratory environment. FEA analyzes and experimental application results largely overlap, and accordingly, the coil-to-coil efficiency of our WPT system was 93.5% and the overall efficiency of the system was 87%. The air gap between the two windings is 5 cm and a misalignment from 2 cm to 10 cm in the X and Y axes was made to measure the efficiency of the system, and it was observed that the hybrid square-hexagonal winding structure gave better results.

Science Code : 90522

Key Words : Wireless power transfer, Coil design, Electrical vehicles, Misalignment

Page Number : 82

Supervisor : Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans ve doktora eğitim hayatımda hiçbir zaman desteğini benden esirgemeyen ve yılların tecrübesini bana gönülden sunan ve her şeyden önce bana iyi bir insan olmayı öğreten değerli hocam Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR'e teşekkürlerimi bildiririm. Aynı şekilde bu yola beraber başladığımız Dr.Öğr.Üyesi. Emrullah AYDIN'a her zaman bana verdiği desteklerden ve katkılardan dolayı sonsuz teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca değerli fikirleri benimle paylaşan Prof. Dr. İres İSKENDER ve Doç. Dr. Ozan KEYSAN'a teşekkür ederim. Yoğun çalışmalarımın yanı sıra her zaman bana sabır ve şefkatle katlanan ve bana moral olan sevgili eşim Sara POURNAJİ'ye, hayatım boyunca maddi ve manevi olarak beni destekleyen ve dualarını eksik etmeyen babam, annem ve kardeşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. KGA Sistemlerinde Sargı Yapıları	6
2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ VE SARGI YAPILARI	19
2.1. Genel Şema ve Çalışma Prensibi	20
2.2. Kablosuz Güç Aktarımının Temel Teorisi	21
2.3. Kalite Çarpanı	23
2.4. KGA Sistemleri İçin Kompanzasyon Yapıları	24
2.5. KGA Sistemlerde Uygulanan Uluslararası Sağlık Ve Güvenlik Standartları	31
3. KGA SİSTEMLERİ İÇİN KONTROL MEKANİZMASI	37
4. KGA SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT KARE-ALTİGEN SARGI TASARIMI	49
5. HİBRİT KARE-ALTİGEN YAPISI İLE 50 W GÜCÜNDE BİR KGA SİSTEMİN TASARIMI, BENZETİMİ VE DENEYSEL GERÇEKLEŞTİRMESİ	63
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75

ÖZGEÇMİŞ	81
----------------	----



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Farklı sargı modellerinde önemli parametrelerin karşılaştırması	9
Çizelge 1.2. KGA sistemler alanında yapılan akademik çalışmaların özelliklere göre gösterimi	14
Çizelge 1.3. Piyasada bulunan ticari ürünleri özellikleri	16
Çizelge 2.1. KGA sistemlerinin sınıflandırması	20
Çizelge 2.2. Primer ve sekonder kalite çarpanları	24
Çizelge 2.3. Primer ve sekonder kompanzasyon kapasitörleri	26
Çizelge 2.4. Temel kompanzasyon yapılarının özellikleri	27
Çizelge 2.5. Frekansı 3 kHz ile 10 MHz arasında olan alanlar için referans değerler ...	32
Çizelge 2.6. KGA ile şarj olan EA'ların farklı standartları	35
Çizelge 4.1. Hava aralığı değişiminin bağlaşım katsayısına olan etkisi	55
Çizelge 4.2. X ekseninde kaymanın bağlaşım katsayısına olan etkisi	57
Çizelge 4.3. X ve Y ekseninde kaymanın bağlaşım katsayısına olan etkisi	58
Çizelge 5.1. Hedeflenen sistem tasarımı	63
Çizelge 5.2. Sistem tasarım sonuçları	65
Çizelge 5.3. Öz ve ortak endüktans değerlerinin SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması	66
Çizelge 5.4. Mesafe ile değişen ortak endüktans değerleri	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tesla ve KGA külesi	1
Şekil 1.2. Sargı şekilleri (a) Dairesel (b) Kare (c) Dikdörtgen (d) Çift D (e) Bi-polar (f) Çift-D kare (g) Dört-D kare (QDQ)	9
Şekil 1.3. a) Beşgen sargı, b) Altıgen sargı	13
Şekil 2.1. Kablosuz şarj sisteminin bileşenleri	21
Şekil 2.2. Sargılarda dolaşan akım ve manyetik alan oluşumu	22
Şekil 2.3. Kompanzasyon yabatarıyaarının sınıflandırılması	25
Şekil 2.4. Temel kompanzasyon yapıları, a) SS, b) SP, c) PS, d) PP	26
Şekil 2.5. SS kompanzasyonlu KGA sistemi genel devre yapısı	28
Şekil 2.6. SS sisteminin basitleştirilmiş eşdeğer devresi	29
Şekil 2.7. Frekansa göre değişen B'ye maruz kalma için ICNIRP referans seviyeleri ..	32
Şekil 2.8. Standart bir yetişkin insan vücudunda EM alan ölçümü	33
Şekil 2.9. Test ortamının üstten görünüm	33
Şekil 3.1. Primer tarafı kontrol şeması	39
Şekil 3.2. Sabit akım / sabit gerilim ile şarj olan KGA sistemi	41
Şekil 3.3. Evirici çıkışındaki gerilim ve akım görselleri	41
Şekil 3.4. Anahtarla üzerinde olan akım ve gerilim değeri (ZVS işlemi)	42
Şekil 3.5. Kaydırılmış faz açısı yöntemi	42
Şekil 3.6. Verici taraftan alıcı tarafa aktarılan gerilim değeri	43
Şekil 3.7. KGA sistemi kontrol blok diyagramı	44
Şekil 3.8. Batarya sabit gerilim / sabit akım akış şeması	45
Şekil 3.9. KGA sisteminin benzetimi	46
Şekil 3.10. Batarya akım, gerilim ve şarj durumu	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Kare sargı yapısı	50
Şekil 4.2. Altıgen sargı yapısı	51
Şekil 4.3. Belirtilen koordinatlarda tek dönüşlü altıgen sargının gösterimi	52
Şekil 4.4. SEA programında oluşturulmuş 3B sargı modelleri, a) kare b) kare-altıgen	54
Şekil 4.5. Kare-altıgen Hibrit modele ait kenar uzunlukları	55
Şekil 4.6. Hava aralığının bağlaşım katsayısına etkisi	56
Şekil 4.7. Sekonder sargının X ekseninde kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi	57
Şekil 4.8. ANSYS Maxwell ortamında X ekseninde kayma	57
Şekil 4.9. Sekonder sargının Y ekseninde kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi	58
Şekil 4.10. Sekonder sargının X ve Y eksenlerinde aynı anda kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi	59
Şekil 4.11. ANSYS Maxwell ortamında X ve Y ekseninde aynı anda kayma	59
Şekil 4.12. Kare sargı yapısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı	60
Şekil 4.13. Kare-Altıgen Hibrit sargı yapısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı ...	60
Şekil 4.14. Primer sargı yapısı	61
Şekil 4.15. Primer ve sekonder sargı yapısı	61
Şekil 5.1. Endüktans ve rezonans devre parametreleri hesabı akış şeması	64
Şekil 5.2. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar	66
Şekil 5.3. Hava aralığı değişiminin ortak endükyansa olan etkisi	66
Şekil 5.4. X ekseninde kayma sonucu meydana gelen bağlaşım katsayısı değişimi	67
Şekil 5.5. X ve Y ekseninde kayma sonucu meydana gelen bağlaşım katsayısı değişimi	68
Şekil 5.6. KGA sisteminin benzetim yapısı	68
Şekil 5.7. Primer gerilim ve akımı	69
Şekil 5.8. Sekonder primer ve akımı	69
Şekil 5.9. DA çıkış gerilimi	69

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. Laboratuvarda kurulan deneysel test düzeneği	70
Şekil 5.11. Sekonder gerilim ve akım dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü	71
Şekil 5.12. Primer gerilim ve akım dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü	71
Şekil 5.13. X eksen kayma sonucu çıkış gücü değişimi	72



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

μH

A

Khz

V

μF

Açıklamalar

Mikro Henri

Akım

Kilo Hertz

Volt

Mikro Farad

Kısaltmalar

EA

KİBTE

KGA

SEA

SAE

TBR

UEK

Açıklamalar

Elektrikli Araç

Kore İleri bBilim ve Teknoloji Enstitüsü

Kablosuz Güç Aktarımı

Sonlu Eleman Analizi

Otomotiv Mühendisleri Topluluğu

Teknik Bilgi Raporu

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

1. GİRİŞ

1900'lerin başında Nikola Tesla, New York, Long Island yakınlarında, Tesla kulesi olarak da bilinen Wardencllyffe kule tesisinde bir inşaat projesine başladı. Kule, Atlantik üzerinden İngiltere'ye uzun menzilli mesaj iletimini ve dünyayı bir iletim aracı olarak kullanarak güç aktarımı yapmayı planlıyordu. Tesla'nın sistemi, uzun menzilli transatlantik iletişimi gösteren çağdaş Guglielmo Marconi tarafından icat edilen kablosuz telgrafla doğrudan rekabet içindeydi. Tesla, transatlantik kablosuz telgraf yarışını kaybetmesine rağmen, kablosuz güç aktarımını öneren ilk kişi oldu. Finansman eksikliği nedeniyle, kulesinin tam çalışması gerçekleşmedi ve birinci dünya savaşında hurda metale dönüştürüldü. Bundan sonra, enerji aktarımı için bir araç olarak kablosuz güç, mikrodalga teknolojisinin ortaya çıkmasına kadar on yıllarca unutuldu.



Şekil 1.1. Tesla ve KGA kulesi

Kablosuz güç aktarımı uzak alan ve yakın alan olarak ikiye ayrılır. Tesla'nın vizyonu, gücü uzak alan tekniğinin kapsamına giren uzun mesafelere kablosuz olarak iletmektir. Uzak alan kablosuz güç aktarımı, RF enerjisinin uydu dizilerinden toprağa gönderilmesi gibi yalıtılmış bölgelerden güç iletirken en çekici olanıdır. Ayrıca, yüksek güç seviyelerinin uzun mesafelerde kablosuz iletimi, yüksek alan kuvvetine sahip elektromanyetik dalgaların çevreye maruz kalma potansiyeli nedeniyle yaygın değildir.

Tüketici elektroniği için yakın alan kablosuz güç aktarımı ilk olarak 1960'ların başında General Electric Corporation tarafından tanıtıldı. İlk tür, elektrikli diş fırçası oldu. Elektrikli diş fırçası başlangıçta doğrudan bir elektrik prizine takıldı. Elektrik ve su yakınlığından kaynaklanan güvenlik endişeleri nedeniyle, daha sonra bataryayla çalışan

elektrikli diş fırçaları piyasaya sürüldü.

Yakın alan endüktif Bağlaşım kullanan elektronik ürün, ilk olarak Westinghouse Electric Company tarafından 1970'lerin başında piyasaya sürülen indüksiyonlu ocaktı. İndüksiyonlu ocak, bir pişirme kabına verimli enerji iletimi sağladı. Kaplar, girdap akımlarının akışından ısınmaya neden olacak şekilde yüksek manyetik çekirdek kayıplarına sahip ferromanyetik malzemelerden yapılmıştır. Elektrikli ocaklar ise ısıyı hem pişirme kabına hem de konveksiyon yoluyla ortama aktararak verimsizliğin artmasına neden olur.

Modern yakın alan kablosuz güç aktarımı, bir ampulün kablosuz bir kaynaktan uzaktan çalıştırıldığını gösteren 2007 yılında MIT'de bir deneyle tetiklendi (Kurs ve diğerleri, 2007). Güçlü bir şekilde bağlanmış endüktif rezonanslar kullanılarak 60 W'lık bir ampulü yakmak için güç 2 m mesafeden kablosuz olarak iletildi. kablosuz güç aktarımı, tüketici elektroniğinin kablosuz şarjı, biyomedikal implantlar için kablosuz güç gibi çok sayıda uygulama alanına uygulanmıştır. Öte yandan, uzak alan kablosuz güç aktarımı, verimliliğin ön planda olmadığı uygulamalar için en uygun olanıdır (Garnica ve diğerleri, 2013).

Genellikle kablolu şarj cihazlarıyla yakıt ikmali yapan elektrikli araçlar (EA'lar), sera gazı ve hava kirletici emisyonları, öngörülen fosil yakıt krizi ve yenilenebilir enerjiye geçiş isteği nedeniyle giderek yaygınlaşıyor. Sıfır emisyonlu elektrikli araçlar oldukça çekici olsa da, insanlar tek bir şarjla daha kısa seyahat menzili olması ve uzun şarj süresinden endişe duyuyorlar.

Paris Anlaşması'na ulaşmak için, 2030 yılına kadar 100 milyon elektrikli otomobil ve 400 milyon elektrikli araçtan oluşan küresel bir dağıtım hedefi belirledi . Elektrikli otomobil satışları 2019'da küresel olarak 2,1 milyonu aşarak 2018'i geride bıraktı. 2019 yılında küresel otomobil satışlarının %2,6'sını ve küresel otomobil stokunun yaklaşık %1'ini oluşturan elektrikli otomobiller, bir önceki yıla kıyasla %40 artış kaydetti. 2010 yılında dünya yollarında yalnızca yaklaşık 17.000 elektrikli araba vardı. 2019'da bu sayı 7,2 milyona yükseldi ve bunun %47'si Çin Halk Cumhuriyeti'ydi.

Tüketicilerin bakış açısına göre, elektrikli araçların daha fazla kullanılmasının önündeki ana engeller, sınırlı sürüş aralığı, uzun şarj süresi, uygun şarj altyapısının olmaması ve

geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla nispeten yüksek satın alma fiyatıdır . Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için, EA şarjı için kablosuz güç aktarım teknolojileri umut verici görünüyor.

KGA teknolojisi, kablolu şarja çekici bir alternatif sunarak küresel taşımacılıkta devrim yaratabilir ve elektrikli araç pazarındaki büyümeyi hızlandırabilir. Fosil yakıtların tükenmesi ve karbon üretimindeki artışın çevremizi ciddi şekilde kirletmesinin neden olduğu sürdürülebilir bir ulaşım aracına duyulan ihtiyaç, EA teknolojilerinin araştırma ve yeniliklerinde bir büyümeye yol açmıştır.

Kablosuz EA'ların şarj edilmesinin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Şarj istasyonu ile araç arasındaki galvanik bağlantının ortadan kaldırılması, şarj işlemini basitleştirir ve elektrikli ekipmanın kullanımı ile ilgili güvenlik endişelerini ortadan kaldırır.
- Hareketli mekanik bileşenlere ihtiyaç duyulmadan otomatik güç aktarımı, toplu taşıma araçlarının şarj edilmesi için özellikle caziptir, çünkü şarj işleminin rota boyunca otobüs duraklarında, taksi duraklarında veya trafik ışıklarında düzenli araç işletimine entegre edilmesini sağlar.
- Daha sık şarj etme, bataryanın deşarj derinliğini azaltır, bu da batarya ömrünü uzatır ve EA'ların daha küçük bir yerleşik enerji depolama kapasitesiyle boyutlandırılmasına olanak tanır ve böylece başlangıç maliyetlerini düşürür.
- Ayrıca, galvanik bağlantının olmaması, şarj istasyonunu hareketli mekanik bileşenlerden kurtarır ve bu da gerekli bakımı azaltır.

Nikola Tesla, 1890'larda manyetik bağlantı yoluyla bir hava boşluğundan güç sağlama olasılığını kanıtlasa da, KGA araştırması ve uygulaması 1990'ların başlarına kadar önemli bir ilerleme kaydetmedi. 1994 yılında, UC Berkeley'den araştırmacılar, hem statik hem de dinamik modlarda 35 yolcu otobüsüne güç sağlayan 60kW endüktif bir şarj cihazı tasarladı (Shladover, 2007). Hız, mobil test sırasında sırasıyla 18 ve 24 km/Sa olarak ayarlandı. Her iki çalışma modu için verimlilik, 60kW çıkış gücünde yaklaşık % 60 idi. Şarj cihazının performansını büyük ölçüde sınırlayan yüksek güçlü transistörlerin sınırlaması nedeniyle anahtarlama frekansı 400 Hz idi.

1994 yılında, bir endüktif güç aktarım sistemi Auckland üniversitesi'nden Dr. John Boys

tarafından patentlendi (Kumar ve diğerleri, 2015). KGA prototipi, 500W çıkış gücü seviyesinde 10kHz'de çalıştırıldı. Dr. Boys ve Dr. Covic'in KGA araştırmasına dayanarak, Halo KGA, EA kablosuz şarj cihazları sağlamak için oluşturuldu ve Qualcomm tarafından 2011 yılında satın alındı.

2009 yılında, Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (KİBTE), araç hareket halindeyken yola gömülü KGA sargıları ile elektrikle beslenen bir elektrikli aracı (OLEA) piyasaya sürdü (Lee ve diğerleri, 2010). KİBTE, OLEA ve ilgili teknolojilerle ilgili 180'den fazla patentin aldığını duyurdu (Puh, 2011). İlk demoda 60kW'lık bir otobüs %60 verimlilikle test edildi. 2013 yılında, Güney Kore'nin Gumi kentinde 24 km şehir içi transit güzergahı için iki otobüs teslim edildi ve 20 kHz'de 100kW gücü, 20 cm hava boşluğu ile yol yüzeyinden otobüs şasisine aktarmada %85 verimlilikle teslim edildi.

KİBTE'ten araştırmacılar, mevcut EA'larla ilgili düşük yoğunluk, yüksek ağırlık ve uzun şarj sürelerini çözmeyi amaçlayan hareket halinde şarj ile batarya boyutunun %80 oranında azaltılabileceğini iddia ettiler (Brecher ve diğerleri, 2014). Elektrikli araçlara güç sağlamak için KGA teknolojileri üzerine yapılan araştırmalar, son yıllarda halkın ilgisini artırdı ve hem akademi hem de endüstriden bir dizi kurum elektrikli taşımacılığının yaygınlaştırmasına sebep oldular.

Virginia Tech, Georgia Tech, U. of Michigan, New York U., Utah State U., vs.'den kablosuz EA şarjı üzerinde çalışan araştırma grupları vardır (Li ve diğerleri, 2015), (Zheng ve diğerleri, 2015), (Liu ve diğerleri, 2015), (Colak ve diğerleri, 2015). Virginia Tech'ten araştırmacılar 4 kW'lık temassız bir EA şarj cihazı geliştirdiler ve bağlaşım katsayısını hava boşluğu ve kayma değişimlerinden korumak için asimetrik bir kuplör tasarladılar (Zheng ve diğerleri, 2015). Michigan, U.'dan Dr. Chris Mi liderliğindeki araştırma grubu, verimli KGA için çift taraflı bir LSA ağı ve iki kutuplu bir bağlayıcı geliştirdi (Li ve diğerleri, 2015), (Deng ve diğerleri, 2015). Georgia Tech'ten araştırmacılar, birden fazla EA modelini şarj etmeye uygun bir endüktif şarj cihazı tasarladı (Liu ve diğerleri, 2015). New York U.'dan gelen ekip, KGA için çok seviyeli çok fazlı rezonans dönüştürücü üzerinde çalıştı (Bojarski ve diğerleri, 2015). Utah Eyaleti U. Güç Elektroniği Laboratuvarı, elektrikli araçlar için hareketli bir kablosuz şarj projesi uygulayıp ve ekonomik ve çevresel fizibilitesini değerlendirmektedir (Quinn ve diğerleri, 2015). Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORUL) hem sabit hem de hareketli şarj için KGA teknolojisini

geliştirdi (Miller ve diğerleri, 2015). Bu teknolojiyi güç akışı kontrolü, güç dönüştürücü tasarımı, insan vücuduna EM maruziyeti ve KGA'nın standardizasyonu açısından değerlendirdiler (Zhang ve diğerleri, 2016), (Chinthavali ve diğerleri, 2015). Japonya'daki Toyohashi Teknoloji Üniversitesi'nden Dr. Takashi Ohira liderliğindeki bir araştırma grubu tarafından önerilen bir başka çalışmada hareket halindeki kablosuz şarj sistemi, gücü karayolundan araç lastiklerinin içine yerleştirilmiş bir çelik kayışa aktarmak için dielektrik bağlantı uyguladılar (Suzuki ve diğerleri, 2016). Araç lastiği ve yol yüzeyi birbiriyle yakın temas halinde olduğundan, bir insan veya evcil hayvan, KGA elektrotları arasındaki elektrik alanına sınırlı erişime sahip olacaktır.

KGA sistemlerinde uygulanan uluslararası standartlar

Günümüzde KGA standardizasyon aşamasına gelmiştir; Çeşitli standart yönetmelikleri, firmaların üretime geçerken uyması gereken KGA sistemleri için genel gereksinimleri ve spesifikasyonları belirlemiştir. SAE (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu), iletişim, hizalama, yabancı cisim algılama, güç elektroniği topolojileri, test prosedürleri ve birlikte çalışabilirlik dahil olmak üzere EA'ları şarj etmek için KGA teknolojisini standartlaştırmak için 2013 yılında SAE-J2954'ü piyasaya sürdü (Schneider, 2013). SAE, 2016'da Hafif Hizmet Tipi Plug-In / elektrikli araçlar için kablosuz güç aktarımı ve 2018'de standart hale getirilmesi planlanan sabit şarj uygulamaları için hizalama metodolojisi için Teknik Bilgi Raporu (TBR) J2954'ü yayınladı.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (UEK) 90'larda, IEC 61980 olarak yayınlanması amaçlanan KGA sistemleriyle donatılmış elektrikli araçlar için özel bir standart üzerinde çalışan alt komite TC69'u oluşturdu. IEC 6190, 2000 yılında taslak aşamasına ulaştı ve 2013'ten beri standart oylama ile komite taslağı olarak dağıtıldı ve birinci kısmı genel gereksinimler olarak yayınlanmıştır.

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ÜSÖ) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (UEK) işbirliği yapan bir grup, KGAEA ile ilişkili EM alanı, güvenlik ve iletişim gereksinimlerini tanımlamak için PT61980 teknik özellik belgesi üzerinde çalıştı (Onar ve diğerleri, 2013), (Shoki ve diğerleri, 2013). ÜSÖ faaliyetlerine Şubat 2014'te yeni bir ÜSÖ standardı olan ISO / AWI PAS 19363'te başladı (Covic ve diğerleri, 2013).

Farklı standardizasyon komitelerinin ana faaliyetleri şu şekilde özetlenebilir:

- Araç hizalama yöntemleri.
- Farklı çözümlerin birlikte çalışabilirliği.
- Frekans ve güç seviyeleri.
- Araçtaki alıcı veya alıcıların yeri.
- Engel algılama, elektrik çarpması koruması, manyetik alan seviyeleri için referans standardı,
- Elektrik şebekesi, araç ve KGA altyapısı arasındaki iletişim protokolleri.
- Çözümlerin test edilmesi.

IEEE Standartları Derneği, SAE J2954 faaliyetlerini tamamlayıcı olmayı amaçlayan bir ön standardizasyon çalışma grubunu kısa süre önce onayladı. Kabul edilen referans standartlarının kısa listesi aşağıda verilmektedir;

- ISO 15118, bu standart, karayolu araçları için, araçtan şebekeye iletişim arayüzü olarak adlandırılır ve elektrikli araçlar ile güç kaynağı ekipmanı arasındaki iletişimi belirtir.
- SAE J1100, alıcının yerden yüksekliğe göre araç panosuna mekanik entegrasyonu için referansı temsil eder.
- 2010'un sonunda zamanla değişen elektrik ve manyetik alana (1 Hz -100 kHz) maruziyeti sınırlandırmak için, geliştirilen uygulamada yer alan manyetik alana insan maruziyeti sorununun değerlendirilmesi için referans olmuştur.
- IEC 61000 elektromanyetik uyumluluk, elektrik şebekesi ile ilgili olarak KGA sisteminin arayüz problemleri için referans olmuştur.
- ISO 16750, ISO 26262 ve ISO 6469, elektrikle çalışan karayolu taşıtları için elektrikli ve elektronik cihazlar için güvenlik spesifikasyonlarıyla ilgili olarak kabul edilen standartlardır.
- Bobinler ve ilgili elektrikli bileşenler yol yüzeyinin bir parçası olabileceğinden, yolun aynı kurallarına uygun olmalıdır. Bu hususlarla ilgili olarak, referanslar sistemin kurulduğu ülkeye ve kaplama için benimsenen malzemeye bağlıdır.

KGA sistemlerinde sargı yapıları

KGA sistem tasarımı için akademik çalışmalarda güç değeri, uygun sargı yapısının seçilmesi, çalışma frekansının ve uygun kompanzasyon topolojisinin seçimi en önemli

parametrelerdir. Sargılar, bir kablosuz şarj sistemindeki en önemli parçalardan biridir, çünkü enerjiyi elektrik formundan manyetik forma dönüştürür, KGA'yı mümkün kılar ve aynı zamanda aktarılan güç miktarını ve sistem verimliliğini belirler. Sargılar, iki tipte sınıflandırılır: Polarize olmayan (POP'lar) ve Polarize (PP'ler) pedler. PP'ler, hem paralel hem de dikey akı oluşturabilen çoklu bobin sargılardır (DD, DDQ ve BP'yi içerir). POP'lar, akışın yalnızca dikey bileşenini üretebilen tek bobin sargılardır. POP'lar dairesel, kare, dikdörtgen ve altıgen gibi geleneksel şekilli sargılardır. Dairesel sargı, kablosuz transformatörlerde iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir yapıdır, çünkü bu yapıdaki girdap akımı minimumda tutulur (keskin kenarlar yoktur). İç çap ayarlanarak manyetik akı dağılımı kontrol edilebilir. Kare ve dikdörtgen yapılar mükemmel hizalanmış kenarlar olduğu zaman uygundur. Bununla birlikte, keskin köşe kenarları girdap akımı ürettiği ve empedansı ve sıcak noktaları artırdığı için endüktansı artırırlar. Bu, yüksek güçlü uygulamalar için uygun değildir.

Dikdörtgen şekilli sargılar, dairesel ve kare sargılara kıyasla daha büyük yatay kayma hizalama toleransı gösterir. Altıgen sargı, merkezi konumda maksimum çıkış gücünü gösterse de, yatay yanlış hizalama 0 mm'400 mm'ye ulaştığında çıkış gücü zayıf hale gelir (Chen ve diğerleri, 2016). Yatay hizalama 0 mm'den 400 mm'ye değiştiğinde üç tip sargının çıkış gücünün azaldığı görülebilir. Dikdörtgen sargı, daha büyük maliyet değerine sahip olduğundan, dinamik şarj için ana iletim parçası olarak kullanılabilir. Öte yandan, altıgen sargı, çıkış gücünü belirli bir noktada konsantre etme yeteneğine sahip olduğundan dinamik şarj için yardımcı parça olarak kullanılabilir.

POP'ların yatay hizalamadaki zayıf performans nedeniyle, çoklu şekilli sargılar (PP'ler) icat edildi. Bu şekiller sadece tek fazlı uygulamalar için değil, üç fazlı uygulamalar için de uygundur. Solenoidal sargı, çift D (DD), Çift D kareleme (DDQ), bipolar (BP) ve Dörtlü D kareleme (QDQ), PP pedleri örnekleridir.

QDQ şekilli sargılar, yanlış hizalama ile daha fazla tolerans sağlar ancak bunlar yüksek güçlü uygulamalar için uygun değildir (Kalwar ve diğerleri, 2016). Bu sargı yapısı, bir büyük kare sargıyla çevrili dört küçük bitişik dairesel sargıdan oluşur. Her bir dairesel ve kare sargının çapı sırasıyla 10 cm ve 30 cm'dir. Sistem 0 cm kaymada %91.8 ve 15 cm kaymada %78 verim sergilemektedir. Önerilen sargı tasarımı ile, yanlış hizalama toleransı, sargı boyutunun %50'sine kadar genişletilir ve önemli bir gelişme olarak kabul edilebilir.

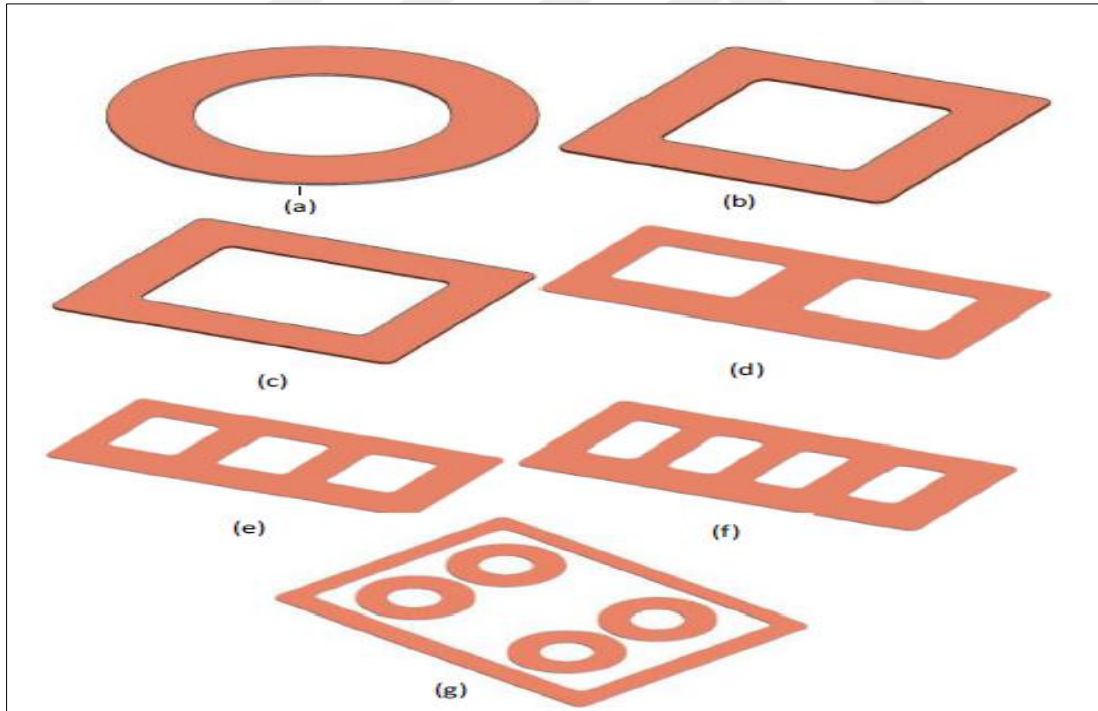
Solenoidal sargılar, kuplörün her iki tarafında polarize keskin kayışlı manyetik akılar üretebilen düz ferrit plakanın etrafına sargılar sarılarak oluşturulur. Bu, iki sarılı sargıyı manyetik olarak seri ve elektriksel olarak paralel bağlayabiliriz. Çift D (DD) polarize pedler, kenarda minimum kaçak akı ile yalnızca bir yönde (ferrit plakanın tersi) akı üreten iki kare veya dikdörtgen sargıdan oluşturulur. Hem yatay hem de dikey yönleri kapsamı bakımından önemli avantajlar sunar. Ayrıca bu tasarım, yüksüz sargı için mükemmel bir bağlaşım katsayısı ve kalite çarpanı sağlayabilir. Yatay hizalamada daha yüksek toleransı nedeniyle bu ped, sabit ve dinamik uygulamalarda verici sargı için uygun olabilir (Budhia ve diğerleri, 2013).

Çift D kareleme (DDQ) sargısı, dairesel ped ile karşılaştırıldığında iki kat akı yüksekliği üretimi ile DD pedinin gelişmiş versiyonudur. DD pedinin özelliklerine ek olarak, Q bobini yanıl hizalama sorunlarında da önemli bir gelişme sağlar. DDQ yapısı, verici veya alıcı tek veya üç fazlı güç uygulaması için uygundur. Hem sinüs hem de kosinüs manyetik akı vektörlerini yakalama yeteneği nedeniyle alıcı bir ped olarak iyi bir seçim olabilir (Covic ve diğerleri, 2013), (Zaheer ve diğerleri, 2012).

Bipolar (BP) şarj pedleri, birçok benzer boyutta sargıdan yapılmıştır. DDQ pedine kıyasla BP, yapım için yaklaşık %25 ila %30 daha az bakır gerektirir. Tek veya üç fazlı uygulamalarda verici ve alıcı sargılar arasında 30 derece açısal hizalama olduğu zaman bağlaşım katsayısı %13 düşer (Ahmad ve diğerleri, 2017). yanlı hizalama ve akı yüksekliği dahil olmak üzere genel performansı artırmak için Quad D kareleme (QDQ) pedleri önerilmiştir. QDQ sargıları, 0.33 bağlaşım katsayısı ve 150 mm hava aralığında, %50 hizalama kayması olduğu zaman yeterli seviyede güç aktarabiliyor (Kalwar ve diğerleri, 2016). Farklı sargı modellerinde önemli parametreler çizelge 2.7'te karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Farklı sargı modellerinde önemli parametrelerin karşılaştırması (Ahmed ve diğerleri, 2020)

Sargı şekli	Yanlış hizalama	Manyetik akı	Şarj bölgesi	Mesafe
Dairesel	Zayıf	Tek taraflı	Küçük	Az
Dikdörtgen	Orta	Tek taraflı	Küçük	Az
Solenoid	İyi	Çift taraflı	Orta	Orta
Beşgen	Orta	Çift taraflı	Orta	Orta
Altıgen	İyi	Tek taraflı	Küçük	Çok
DD	Orta	Tek taraflı	Orta	Orta
DDQ	İyi	Çift taraflı	Büyük	Çok
Bipolar	Orta	Çift taraflı	Büyük	Çok
Homojen	İyi	Çift taraflı	Büyük	Orta



Şekil 1.2. Sargı şekilleri (a) Dairesel (b) Kare (c) Dikdörtgen (d) Çift D (e) Bi-polar (f) Çift-D kare (g) Dört-D kare (QDQ)

(Zahir ve diğerleri, 2014), farklı sargılar tarafından farklı akı dağılımına sahip yapıları karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, EA şarj sistemleri için toplu bir KGA sisteminde Bipolar Pad (BPP) alıcısının performansını sunmakta ve bunu önerilen bir alıcı tasarımı olan

Double-D Quadrature Pad (DDQP) ile karşılaştırmaktadır. Ayrıca DD pad dairesel padlere göre daha iyi bir performansa sahip olduğunu gösterilmiştir. Bu yazıda, bir BPP alıcısının performansı, bir DD vericisi veya bir dairesel vericisi ile kullanıldığında bir DDQP alıcısının performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, BPP alıcısının, daha az miktarda bakır kullanırken, bir DDQP alıcısı tarafından sağlanan çıkış seviyeleriyle yaklaşık olarak eşleştiğini göstermektedir.

(Budhia ve diğerleri, 2011), dairesel güç sargılarının farklı şekillerini ve tasarımını simüle ederek karşılaştırdılar ve 700 mm çaplı sargı ile 2 kW'lık bir KGA sistemini tasarladılar ve test ettiler. Dairesel güç pedlerini optimize etmek için 3 boyutlu sonlu eleman analizi modellenmesi kullanıldı. Bu çalışmada bir güç pedi örneği ele alındı ve bağlı güç ve çalışma üzerindeki etkilerini belirlemek için temel tasarım parametreleri araştırıldı. Önerilen pedler, temel olarak Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) yönergelerini kullanan Avustralya Radyasyondan Korunma ve Nükleer Güvenlik Ajansı (ARPANSA) tarafından belirlenen ölçüm teknikleriyle insan maruziyeti düzenlemelerine uygun olduğu gösterilmiştir.

Başka bir çalışmada dairesel ve dikdörtgen sargıların akı bağlantısını karşılaştırılmıştır ve dairesel sargıların dikdörtgenden daha iyi bir sonuç gösterdiği sonucuna varmışlardır (Ongayo ve diğerleri, 2015). Bununla birlikte, dairesel sargı tarafından üretilen manyetik akının yüksekliği sınırlıdır. Bu sorunu çözmek için (Nagatsuka ve diğerleri, 2010) manyetik akı yolunu iyileştiren solenoid bobin yapısını geliştirdi. 1.5 KW'lık sistemin Boyutları 240 mm×250 mm, boşluk uzunluğu 70±20 mm, yanal yönde sapma toleransı ±125 mm, sekonder sargı ve çekirdeğin kütlesi 4,6 kg, normal konumda verimi %95'tir.

(Takanashi ve diğerleri, 2012) solenoid bobin yapısını kullanan 3 kW kablosuz şarj sisteminin yapıldığı ve 200 mm hava boşluğu ile yanal yönde yanlış hizalamalar için iyi bir toleransa (± 200 mm) sahiptir ve boyutları 320 × 300 × 40 mm olan sistemin %90 DA-DA veriminin sağlandığı bildirilmiştir. Ayrıca solenoid bobin yapısı, geniş bir hava boşluğu ile kablosuz güç iletiminde iyi performans gösterir.

(Park ve diğerleri, 2015) solenoid sargı şekillerini optimize etti ve 3 m'lik bir hava boşluğundan 1.403 kW güç sağlayan bir kablosuz şarj sistemi geliştirdi. Solenoid yapının performansı oldukça iyidir, ancak ciddi bir dezavantajı vardır. Çift taraflı akı üretir ve

akının yarısı güç aktarımında kullanılmaz. Ek olarak, kullanılmayan akı, aracın şasisi ve toprağa gömülü çelik ile birleşebilir ve bu da sistem verimliliğini büyük ölçüde düşürür.

Dairesel sargıların sorunu ise hava aralığı arttıkça ortaya çıkmaktadır. Dikdörtgen sargılar, köşelerde azaltılmış akı sızıntısı ile daha iyi akı alanına sahiptir. Yanal yönde hizalama için daha iyi toleransa sahip olan dinamik kablosuz şarjın sargı yapımında genellikle yararlıdır. Tek taraflı bir akı yoluna sahip olan, dairesele ve dikdörtgen sargı yapısından daha büyük bir şarj bölgesine sahip olmak için DD sargı yapısı olarak bilinen iki kutuplu bir sargı yapısı geliştirilmiştir (Budhia ve diğerleri, 2013).

DD'ler, benzer bir malzeme maliyeti için dairesele pedlerle göre beş kat daha büyük bir şarj bölgesi sağlar ve daha küçüktürler. 0,31 m² DD, 200 mm hava boşluğu ile 540 mm × 800 mm ölçülerinde oval bir alan üzerinden 2 kW güç aktarımı sağlar. Kaçak manyetik alanlar araştırılmış ve benzer güç aktarım koşulları altında çalışan dairesele ve DD kuplörlerin benzer seviyeler ürettiğini göstermiştir. Minimum miktarda ferrit, bakır ve Litz teli ile maksimum bağlantının elde edilmesini sağlamak için bu DD pedinin uzunluğunu ve genişliğini optimize etmek için 3 boyutlu bir sonlu eleman modelleme paketi kullanılmıştır.

Bipolar sargı yapısı, yatay kayma hizalamaya karşı iyi tolerans ile istenen güç seviyesinde iyi sistem verimliliği gösterir. (Nguyen ve diğerleri, 2014) bipolar sargı yapısını aynı boyutta fakat farklı en ve boy oranlarıyla bir dikdörtgen yapısı ile karşılaştırıp ve simüle ettiler. 200 mm'lik bir hava boşluğunda %95,66 DA-DA verimliliğiyle 8 kW'ı aktarmak için optimize edilmiş en boy oranına sahip bipolar sargı yapısını kullanan bir kablosuz şarj sistemi kurdular. Yatay hizasızlık 300 mm'ye yükseldiğinde bile, sistem DA-DA verimliliği hala %95,39 kadar yüksekti.

(Nagendra ve diğerleri, 2014) DD yapısının kullanılmasına dair 300 mm'den 1000 mm'ye farklı boyutlarda sargılar tasarlamış ve incelemişler. Önerilen pad boyutları ve sistemleri, gerçekçi yatay yanlış hizalamalar (± 200 mm) ve hava boşlukları (100–400 mm) için EA'lara 10 kW aktarma kapasitesine sahiptir.

Son yıllardaki çalışmalara baktığımız zaman hizalanma problemi ve bağlaşım katsayısını arttırmak amacıyla yeni sargı tipleri önerilmiştir. Bu yapılardan biri (Budhia ve diğerleri,

2011) DDQ sargı çalışmasıdır. DD sargıları d eksenı akısını ve Q sargısı q eksenı akısını yakalayacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu nedenle, bu sargı yapısı yanlış hizalamayı büyük ölçüde telafi ediyor. Bununla birlikte, sargıların boyutu, dairesel veya kare sargılara göre yaklaşık üç kat artıyor.

(Aqueel ve diğerleri, 2019), dörtlü sargı yapısını önermiştir. Dörtlü sargıda, kayıpların ve kaçakların çok düşük olduğu tek taraflı akıyı gösterir. Karşılaştırmalı akı üretimi, dairesel sargı yapısına kıyasla iki kat daha fazladır. Karşılıklı endüktansın matematiksel hesaplaması SEA analizi ile doğrulanır ve hedeflenen 0,210'luk bağlaşım katsayısı gerçekleştirilir. Kuplaj sonuçlarını bulmak için minimum miktarda sargı malzemesi kullanılmaktadır. karşılaştırma, dikdörtgen, DD ve DDQ ve önerilen dörtlü sargı arasında gerçekleştirildi. DDQ yapıları, yanlış hizalama ile birlikte maksimum uyumluluğu gösterir.

(Kalwar ve diğerleri, 2016), QDQ sargı yapısının avantajlarını anlatmıştır. QDQ tasarımı, herhangi bir konumda maksimum akıyı yakalamak için hem şarj hem de toplama tarafı için dört bitişik dairesel sargı ve bir kare sargı kullanır. 30 cm'lik bir kaymaya kadar yanlış hizalama toleransı için test edilmiştir ve önerilen sargı tasarımı, iyi sonuçlar vermiştir. Sargıların hizalanmış konumunda %91,4'lük bir verimlilik sergiler ve, sargıların %50 yanlış hizalanmış konumunda %78'lik bir verimliliği sahip olur.

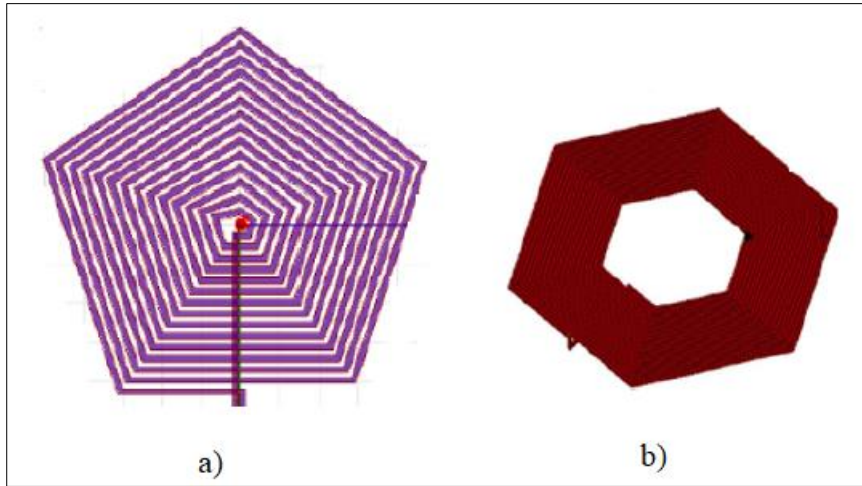
(Pries ve diğerleri, 2019), bipolar faz sargılı üç fazlı endüktif KGA sistemlerinin teorisini ve analizini incelemişler. Manyetik kuplör topolojileri ve seri üç fazlı rezonans kompanzasyon ağlarının teorik ve pratik yönleri tartışılmaktadır. Sistem, hizalanmış durumda 150 mm'lik bir hava aralığı üzerinden %95 DA-DA verimlilikle 50 kW'ı aktarıyor.

(Romlie ve diğerleri, 2018), beşgen bir sargı yapısı önermiştir. Yapılan bu çalışmada önerilen sargı yapısı dairesel ve kare sargılar ile karşılaştırılmıştır ve hava aralığı değişiminde bağlaşım katsayısının daha az etkilendiği gösterilmiştir. Beşgen sargı en fazla akı yoğunluğuna sahiptir ve bu da karşılıklı endüktans ve bağlaşım katsayısı değerlerine yansır.

(Ibsan ve diğerleri, 2019), 7,7 kW'lık ve 85 kHz'de çalışan altıgen sargı yapısını önermiştir. %96,5 olan system verimliliğine sahip yapı, daha uygun, hafif ve daha

verimlidir ve SAEJ2954 gereksinimlerini karşılamak için EA için KGA'da kullanılabilir. Fiziksel test, genel olarak %5'ten daha az bir hatayla eşleşti.

(Aydin ve diğerleri, 2018), 2,2 kW'lık bir altıgen sargı yapısı tasarlamıştır. Kare sargı yapısı ile karşılaştırılan altıgen yapısı hizalanma ve hava aralığı değişimlerinde bağlaşım katsayısının daha az etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 1.3. a) Beşgen sargı, b) Altıgen sargı

Gerçekleştirilmesi planlanan 50 W gücündeki sistem yapısında önemli parametrelerin, frekans, sargı yapısı, aktarım mesafesi ve verim olduğu görülmektedir. Bu amaçla, literatürde kullanılan güç, frekans, hava aralığı, sargı yapısı ve verim parametreleri Çizelge 1.2'te verilmiştir. İncelenen tüm çalışmalar, KGA sistem tasarımlarının akademik alanda çok sayıda atıf almış ve deneysel uygulamalara sahip çalışmalardır.

Çizelge 1.2. KGA sistemler alanında yapılan akademik çalışmaların özelliklere göre gösterimi

Çalışma	Güç (KW)	Frekans (Khz)	Mesafe (mm)	Sargı yapısı	Verim (%)
(Kamineni ve diğerleri, 2015)	1	85	100	Daire-Daire	95,57
(Zeng ve diğerleri, 2017)	1	60	200	DD-DD	83
(Ahmad ve diğerleri, 2018)	1,6	150	150	Daire-Daire	81
(Bi ve diğerleri, 2016)	2	20	100-250	DD-DD	80
(Budhia ve diğerleri, 2011)	2	20	200	Daire-Daire	85
(Takanashi ve diğerleri, 2012)	3	50	200	Solenoid-Solenoid	90
(Gao ve diğerleri, 2014)	3	20	160	Daire-Daire	80
(Lu ve diğerleri, 2015)	3,3	1000	150	Kare-Kare	95
(Choi ve diğerleri, 2016)	4	85	150	Dikdörtgen-Daire	93
(Choi ve diğerleri, 2014)	5	20	150	DD-DD	80
(Wu ve diğerleri, 2012)	5	20	200	Daire-Daire	90
(Panchal ve diğerleri, 2018)	5	20	150	Daire-Daire	85
(Bosshard ve diğerleri, 2015)	5	1000	52	Daire-Daire	96,5
(Wu ve diğerleri, 2012)	5	20	175-265	Daire-Daire	90
(Wu ve diğerleri, 2012)	5	20	152-167	Daire-Daire	90
(Li ve diğerleri, 2015)	6	95	150	Kare-Kare	95,3
(Dai ve diğerleri, 2017)	6	100	300	Daire-Daire	81
(Nguyen ve diğerleri, 2014)	7,7	79	200	Bipolar-Bipolar	96
(Qiu ve diğerleri, 2013)	7,7	20	200	Dikdörtgen-Dikdörtgen	93
(Park ve diğerleri, 2019)	11	85	150	DD-DD	91,4
(Tritschler ve diğerleri, 2014)	22	100	135	Dikdörtgen-Daire	97
(Bojarski ve diğerleri, 2016)	25	85	210	Daire-Daire	91
(Bosshard ve diğerleri, 2016)	50	85	10-200	Dikdörtgen-Dikdörtgen	95.8
(Galigekere ve diğerleri, 2018)	100	22	127	DD-DD	98
(Pries ve diğerleri, 2018)	100	25	125	DD-DD	97.7

Ticari çalışmalar

Teknolojideki son gelişmeler, sabit şarjı ticari olarak mümkün kılmıştır. Sabit şarjın tarihi 1997-1998'de kablosuz güç aktarımı'nın Yeni Zelanda'daki Rotorua Jeotermal Park'ta kablosuz şarjlı bir EA'yı ve 2002'de Cenova ve Torino'daki otobüs duraklarında kablosuz olarak şarj edilen ilk otobüsü göstermesiyle başladı. Sabit KGA üzerinde çalışan en önemli şirketler WiTricity, Qualcomm, Conductix-Wampfler, Momentum Dynamics ve Bombardier'dir ama daha sonra farklı firmalar bu alanda çalışmaya başlamışlar. KGA ile şarj olan EA'lar, tüketiciler için kullanıcı dostu bir ortam sağlamak ve fişli şarj cihazlarındaki güvenlikle ilgili herhangi bir sorundan kaçınmak için uygun alternatiflerdir. WiTricity, tampondan tampona ± 20 ve ± 10 -cm yanal kayma ile 145 kHz'de çalışan 3,3 kW güç değerinde %90 sistem verimliliğine sahip bir yapı tasarlamıştır. Qualcomm Halo, 20 kHz frekansta çalışan ve dairesel sargılara göre iki kat daha yüksek verimlilik ve güç oranı sağlayabilen DD polarize manyetik sargıların patentini almak için Auckland üniversitesi ile işbirliği yaptı (Boys ve diğerleri, 2016).

Conductix-Wampflers, İtalya'nın Torino kentinde elektrikli otobüs için sabit şarj uyguladı. 60 kW güç aktarımı için 40 mm hava aralığına sahip yapının %90 verimlilik çalışabilmesi için sistemin rezonans frekansını ayarlarlar. Momentum Dynamics, %92 güç aktarım verimliliği ile 3,3 kW güç değerine sahip ve 24 inç hava aralığı olan KGA sistemi geliştirdi. Ayrıca, şarj cihazı 7,2 ve 10 kW'a yükseltilebilir, bu da Chevy Volt'u yaklaşık 1 saatte şarj edebilir (Fisher ve diğerleri, 2014). Momentum Dynamics KGA sistemi şu anda Smith EA'lardan seçilen FedEx kamyonlarında uygulanmaktadır. 2016 yılında, Oak Ridge ulusal laboratuvarı (ORNL), daha önceki 10-kW KGA'larının gücünü, 10 kWh pil depolamalı bir Toyota RAV4 olan bir binek otomobilde 20 kW'a çıkardı (Miller ve diğerleri, 2013), (Mi ve diğerleri, 2016).

Utah eyalet üniversitesi 50 KW'lık bir kablosuz şarj olan elektrikli otobüs geliştirdi. Tasarlanan sistemleri 15-30 cm'lik bir hava aralığı, 20 KHz frekanslı ve %90 verimlilikle 50KW'lık bir güç aktarabiliyordu. Bombardier Primov, sabit ve dinamik şarj uygulamaları için KGA sistemleri geliştirmiştir. Dinamik şarj uygulaması için Almanya Augsburg'daki Primove Tramvayları için 250 kW'lık bir sistem geliştirildi. Sistemlerinde, F tipi toplayıcı ile bir E tipi güç rayı kullanıldı. Geliştirilen sistemde hava aralığı 60 mm'dir ve birkaç milimetrelik yanal kayma hizalamayı tolere ediyordu (Onar ve diğerleri, 2016).

Momentum Dynamics, 610 mm hava aralığında çalışan ve %92'lik bir verime sahip 200 kW'lık bir KGA sistemini geliştirdi (Cobb ve diğerleri, 2016). karayoluna gömülü sabit şarj kurulumlarını kullanan teslimat kamyonları için KGA sistemini başarıyla uyguladılar. Utah eyalet üniversitesi, 2016 yılında otobüste kullanım için dairesel verici sargıya sahip 25 kW KGA'yı geliştirdi. Sistem, ± 15 cm'lik yanal kayma hizalama için 25 kW verebiliyordu (Wave, 2016). Bu ürünlerin ilgili tamamen teknik bilgiler elde edilemese bile bir kısmına ait bilgiler Çizelge 1.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Piyasada bulunan ticari ürünleri özellikleri (*BY:Bilgi Yok)

Firma Adı	Mesafe (mm)	Frekans (Khz)	Güç (KW)	Verim (%)
Plugless Power	102	20	3,3-3,6	90
WiTricity Corporation	100-250	85	3,7-7,7	90
Qualcomm Halo	160-220	85	3,6-7	90
Bombardier Primove	10-30	BY	3,6-22	85
Momentum Dynamic	300	BY	30	BY
Conductix-Wampfler	BY	20	20	BY
Siemens and BMW	80-150	BY	3,6	90
Delphi	200	BY	3,3	BY
Wave	178	23,4	50	92
Wuhan University	300	100	6-16	81
KITECH	150	85	4	93
KAIST	200	90	3,3	95
Oak Ridge	100-160	19,5	3,3	90
University of Michigan-Dearborn	200	BY	8	95,7
University of Auckland	100-300	10-40	2-5	85
The University of Georgia	160	20	3	80
Energy Dynamics Laboratory	152-167	20	5	90
Fraunhofer Iwes	200	BY	3,6	94
Hevo Power	304	85	1-10	85

Tez çalışmamızda öncelikle KGA sistemlerinin tarihçesi ve yapılan çalışmalarla ilgili kısa özet verilmiştir. KGA sistemlerinde kullanılan farglı sargı modelleri, herbirinin avantajları ve dezavantajları ve kullanım koşulları ile ilgili bilgi verilmiştir ve karşılaştırılması yapılmıştır. İkinci bölümde KGA sistemlerinin temel yapıları ve kompanzasyon topolojileri incelenmiştir. Üçüncü bölümde KGA sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri tanıtılmıştır ve 600 W'lık bir sistem için bir kontrol mekanizması önerilmiştir. Sargıların aynı hizada olmadığı durumda devrenin etkileşimi gözlenmiştir ve kullanılan kontrol yöntemi ile devrenin güç değeri istenilen miktara getirilmiştir. Ayrıca önerilen kontrol mekanizması ile bataryanın sabit gerilim ve sabit akımla şarj edilmesi hedeflenmiştir. Dördüncü bölümde KGA sistemleri için kare-altıgen melez sargı yapısı önerilmiştir. Bu sargı yapısı daha önce literatürde olmamakla birlikte, kare sargı yapısı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada öncelikle tasarlanan sargı yapısı SEA ile kare sargı yapısı ile x , y ve aynı anda x ve y eksenlerinde kayma durumunda bağlaşım katsayısına olan etkisi ve dolayısıyla verimleri incelenmiştir. Ayrıca hava aralığı değişiminde kare-altıgen melez sargı yapısı kare sargıya göre bağlaşım katsayısı açısından daha az etkilenmektedir. SEA sonuçlarının doğruluğunu göstermek için laboratuvar ortamında 50 W değerinde çalışan bir KGA sistemi tasarlanmıştır ve deneysel olarak sonuçlar elde edilmiştir. SEA ve deneysel uygulama sonuçlarının örtüştüğünü ve kare-altıgen melez sargı yapısının kare sargısına göre daha avantajlı olduğunu, sargıların kayma durumunda bağlaşım katsayısının daha az etkilendiği ve verim açısından daha yüksek bir verime sahip olduğu gösterilmiştir.



2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ VE SARGI YAPILARI

Bu bölümde öncelikle KGA sistemlerinin temel özellikleri, çalışma mantığı ve kullanılan farklı yapıların incelenmesi ile tasarıma yönelik alt yapının oluşturulması amaçlanmıştır. KGA sistemleri genel olarak ikiye ayrılabilir. Yakın alan manyetik bağlaşım ve uzak alan manyetik Bağlaşım. Yakın alan bağlaşımı, kısa menzilli ve orta menzilli uygulamalara bölünmüş, ışımasız bir kablosuz güç aktarımıdır. Kısa menzilli uygulamada, güç kaynağı ile yük arasındaki mesafe, bobin rezonatörlerinin boyutundan daha az iken, orta menzilli uygulamada iletim mesafesi, bobin rezonatörlerinin boyutundan daha büyüktür. Uzak alan bağlaşımı ise, anten boyutunun birkaç katı bir mesafe boyunca bir ortam (hava veya vakum) aracılığıyla bir antenden mikrodalgaların iletimini içeren ışımalı bir kablosuz güç aktarımıdır.

Elektromanyetik radyasyon, bir uzak alan kablosuz güç aktarım yöntemidir; elektrik enerjisi, vakum veya hava yoluyla alıcıdaki (doğrultucu ve anten) yayılan mikrodalgalara dönüştürülür. Anten, mikrodalgaları alır ve elektrik enerjisine dönüştürür. Elektromanyetik radyasyon bilgi iletimi için uygundur ancak iletim sırasında yüksek kayıplar, engellere duyarlılık ve biyolojik organizmalar üzerindeki etkisi nedeniyle güç aktarımı için uygun değildir. Ayrıca mikrodalga ışınlarını yoğunlaştırmak için büyük antenler gerektirir.

Manyetik endüktif bağlaşım, bir verici ve alıcı bobin arasında elektrik enerjisini aktarmak için kullanılan manyetik alan indüksiyonu prensibi üzerine inşa edilmiştir. Rezonatörlerin boyutundan daha az bir mesafede çalışan, ışımsız yakın alan kablosuz güç aktarım yöntemidir. Bu yöntemde, kaynakta alıcı bobin üzerinde bir gerilim indükleyen değişken bir manyetik alan oluşturulur ve bu nedenle yüke güç verilir. Kısa aktarım mesafesi (milimetre aralığında), yüksek verim ve güç gerektiren uygulamalarda kullanılır (Fu ve diğerleri, 2014). Alıcı cihazlar, harici kapasitörler kullanılarak rezonansa girecek şekilde ayarlanmıştır. Bu yöntemin verimliliği, sargının yanlış hizalanmasına karşı oldukça hassastır ve sargılar arasındaki bağlaşım katsayısına bağlıdır.

Manyetik rezonans Bağlaşımı, rezonatörlerin boyutundan daha büyük bir mesafede çalışan, ışımsız, yakın alan kablosuz bir güç aktarım yöntemidir. Manyetik rezonans bağlaşımında, verici sargıda oluşturulan bir alternatif manyetik akı alıcı sargısında elektrik

akımına dönüştürülür. Bu yöntem birkaç metrelik transfer mesafesinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde aktarılan güç ve verim, manyetik endüktif bağlaşımla karşılaştırıldığında daha düşüktür (Wei ve diğerleri, 2014). Bu yöntemde verimlik bağlaşım katsayısı ve kalite çarpanına bağlıdır. Manyetik rezonans kablosuz güç transferinde sargı tasarımının ana parametreleri, güç seviyesi, kalite çarpanı, boyut ve ağırlık, sargı geometrisi, bağlaşım parametreleri ve çalışma frekansıdır (Barman ve diğerleri, 2015). Manyetik rezonans KGA sistemleri, devrenin ayarlanmasında sargının parazitik kapasitansını kullanıldığından megahertz frekans aralığında çalışır. Bu nedenle sargıların kalite çarpanı yüksektir ve düşük bağlaşım katsayısının sistem verimliliği üzerindeki olumsuz etkisinin azaltılmasına yardımcı olur. Bu yöntem, birden fazla alıcıyı destekleme yeteneğine sahiptir, çevredeki ortama daha az duyarlıdır ve uzak alan yönteminden daha verimlidir ayrıca endüktif bağlaşımdan daha uzun mesafelere güç sağlar.

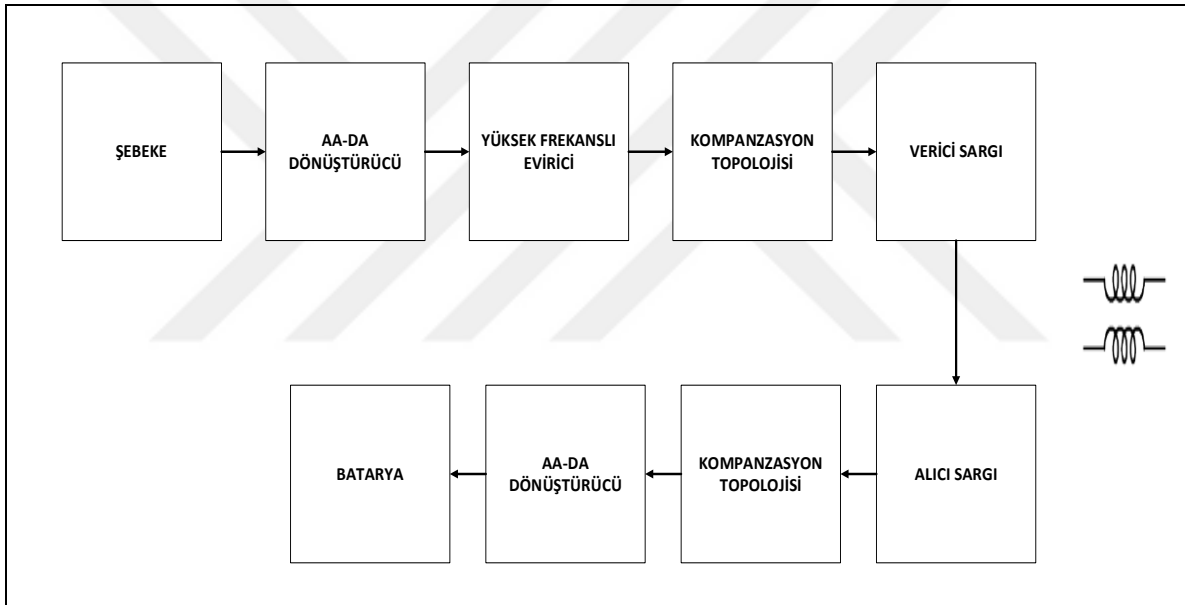
Bazı KGA sistemleri, birkaç santimetrelik iletim mesafeleri için %90'ın üzerinde yüksek güç iletim verimliliği sunmuştur; ancak, daha uzun mesafeler için verimlilik önemli ölçüde düşecektir (Dai ve diğerleri, 2017), (Abdolkhani ve diğerleri, 2015). Bununla birlikte, araştırmacılar, çift kutuplu sargılar kullanarak gücü 5 m'lik bir mesafeye aktarmak için yenilikçi bir KGA sistemi sunmuşlardır (Park ve diğerleri, 2015). Sunulan KGA sistemlerinin çoğu, iletim mesafesinin milimetre aralığı ile sınırlı olduğu USB cihazları, lambalar ve küçük robotlar dahil olmak üzere düşük güç uygulamaları için tasarlanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2016), (Lu ve diğerleri, 2016). Daha uzun bir aktarım mesafesi için manyetik rezonans KGA tarafından yüksek verimlilik sağlanır (Das ve diğerleri, 2017), (Kang ve diğerleri, 2015). Çizelge 2.1'de KGA sistemlerinin sınıflandırılması yapılmıştır.

2.1. Genel Şema ve Çalışma Prensipleri

Çizelge 2.1. KGA sistemlerinin sınıflandırması

KGA	Uzak alan	Yakın alan
Aralık	Uzun	Kısa
Olgu	Birleştirilmiş mod teorisi	İndüksiyon teorisi
Frekans	Mega Hertz	Kilo Hertz
Verim	Düşük	Yüksek

Şekil 2.1, EA'lar için kullanılan tipik bir kablosuz şarj sisteminin bileşenlerini göstermektedir. Şebeke gerilimi önce DA'a doğrultulur, ardından bir rezonans evirici, verici sargıyı çalıştırmak ve bir manyetik alan oluşturmak için DA gerilimi yüksek frekanslı AA'ya dönüştürür. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre, alıcı sargıda manyetik alanla aynı frekansa sahip başka bir AA indüklenir. Bir batarya grubunu şarj etmek için yüksek frekanslı dolaşım akımını DA'a dönüştürmek için bir doğrultucu gerekir. AA yükü tamamen dirençli olmadığından, şebeke gerilimi ile akım arasında güç dağıtımını düşürecek bir faz kayması meydana gelecektir. Böylece, şebekeden çekilen görünen gücü ve toplam akımı azaltmak için şebeke güç girişindeki bir güç katsayısı düzeltici (GFD) kullanılır.



Şekil 2.1. Kablosuz şarj sisteminin bileşenleri

2.2. Kablosuz Güç Aktarımının Temel Teorisi

Gücün endüktif olarak nasıl iletildiğini matematiksel olarak açıklamak için esas olarak iki yasa kullanılır; Amper'in devre yasası, manyetik alan şiddetinin kapalı bir L yolu boyunca integralinin, bu kapalı yolun sınırladığı yüzeyden geçen elektrik akımına eşit olduğunu açıklar.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \Leftrightarrow \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{J} \cdot d\vec{s} = I_K \quad (2.1)$$

$\vec{J}$, akım yoğunluğu $[A/m^2]$, I_K , kapalı yol ile sınırlanan bölgeden geçen net akım $[A]$, $\vec{H}$, manyetik alan şiddeti $[A/m]$. Faraday'ın indüksiyon yasası, zamanla değişen bir manyetik alanın bir elektromotor kuvveti (emk) yarattığını belirtir. Faraday yasasının genel biçimi şu şekilde verilmiştir:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Leftrightarrow \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} dA = emk \quad (2.2)$$

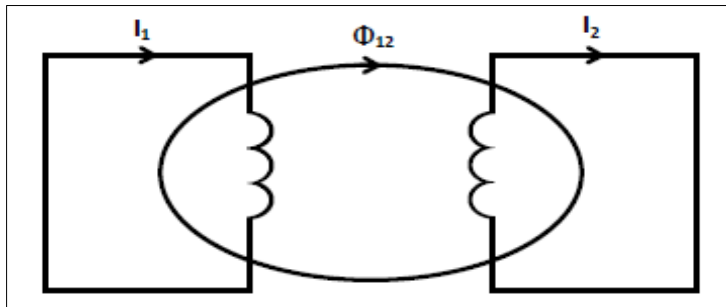
$\vec{E}$, elektrik alan $[V/m]$, $\vec{B}$, manyetik akı yoğunluğu $[T]$, A döngü tarafından çevrelenen alan $[m^2]$. Faraday'ın indüksiyon yasasını aşağıdaki şekilde verilen manyetik akının matematiksel ifadesiyle birleştirerek

$$\Phi = \int B dA \quad (2.3)$$

elektromotor kuvvet emk'nin manyetik akının türevi ile orantılı olduğu gözlemlenebilir. Lenz yasasını uygulayarak, indüklenen emkin bir akımın manyetik alandaki değişime karşı çıkacak bir yönde akmasına neden olduğunu açıklayarak, denklem şu şekilde yazılabilir:

$$emk = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

İki sargı bir manyetik alan aracılığıyla birbirine bağlanırsa, karşılıklı bir akıya Φ_{12} sahip olurlar. Böylece, sargılardan birinden bir akım I_1 akarsa, ikinci sargıda emk'yi indükleyen manyetik akı yaratır. Bu, sargının konumlandırıldığı devre kapalıysa, sargıda bir I_2 akımının akmasına izin verir. Bu, Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sargılarda dolaşan akım ve manyetik alan oluşumu

Ortak endüktans, sargıların birbirine nasıl konumlandırıldığına bağlı olarak değişir. Sargılar arasında daha az mesafe olursa karşı tarafa daha fazla emk aktarılır. Manyetik alan akım akısı ile doğru orantılı olduğundan, aynı zamanda akımla da doğru orantılı olmalıdır (Cheng, 1989). Bu nedenle, ortak endüktans, manyetik akı ile bağlantılıdır.

$$M_{12} = \frac{N_1 \phi_{12}}{I_2} \quad (2.5)$$

N_1 , verici sargıdaki sarım sayısı ve I_2 , ikincil sargıda indüklenen akımdır.

2.3. Kalite Çarpanı

Frekans alanındaki birleştirilmiş rezonans sistemlerinin açıklaması, üç ana parametre aracılığıyla faydalı bir şekilde gösterilebilir. İlk ikisi, bağlaşım katsayısı (k) ve rezonans frekansıdır. Üçüncü parametre kalite çarpanı Q'dur. Bu parametrenin birden fazla tanımı var. Kalite çarpanı, indüktörün veya kapasitörün reaktif gücünün rezonanstaki direncin ortalama gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Ayrıca kalite çarpanı, rezonans frekansı etrafındaki frekans yanıtının keskinliğini temsil etmek için kullanılır ve bir sistemin rezonans frekansının bant genişliğine oranı olarak tanımlanabilir.

KGA sisteminde kalite çarpanı, basitçe sargının endüktif reaktansının ve direncine oranı ile tanımlanabilir:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2.6)$$

Burada ω sistemin frekansını ve L sargının endüktansını temsil eder. (2.6)'dan içse kalite çarpanı sargının öz direnci ile ters orantılı olduğu görülebilir.

Bu değer, bir KGA sisteminde iletilen enerjinin ve dolayısıyla tüm sistemin verimliliğinin önemli bir belirleyicisidir (Kim diğerleri, 2011). Devredeki belirli bir reaktans değeri için, sargının öz direnci ne kadar düşükse, kalite çarpanının o kadar büyük ve güç kaybının o kadar düşük olduğu gözlemlenebilir. Bu nedenle, kayıpları minimumda tutmak için herhangi bir devre için kalite çarpanının yüksek bir değeri arzu edilir.

Yüksek bir kalite çarpanı elde edildiğinde, frekansın gerçek rezonans frekansına yakın olması gerekir. Kompanzasyon topolojisi için maksimum ulaşılabilir transfer verimliliğinin şu şekilde verildiği gösterilebilir.

$$\eta_{mak} = \frac{(kQ)^2}{(1+\sqrt{1+(kQ)^2})^2} \quad (2.7)$$

İletim sargılarının indüktör kalite çarpanı, iki ayrı sargının geometrik ortalaması ile tanımlanır. Burada $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ bağlaşım katsayısıdır.

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (2.8)$$

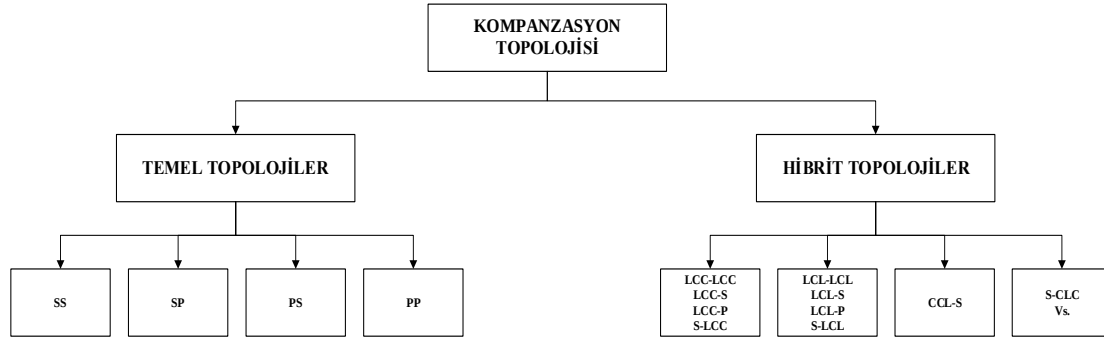
Dört temel topoloji için, primer ve sekonder kalite çarpanına ait elde edilen denklemler Çizelge 2.2’de rezonans frekansında ω_0 çalışma koşulları için verilmiştir.

Çizelge 2.2. Primer ve sekonder kalite çarpanları

	Primer	Sekonder
Seri sekonder	$Q_P = \frac{R_{yük} L_1}{\omega_0 M^2}$	$Q_S = \frac{\omega_0 L_2}{R_{yük}}$
Paralel sekonder	$Q_P = \frac{\omega_0 L_1 L_2^2}{R_{yük} M^2}$	$Q_S = \frac{R_{yük}}{\omega_0 L_2}$

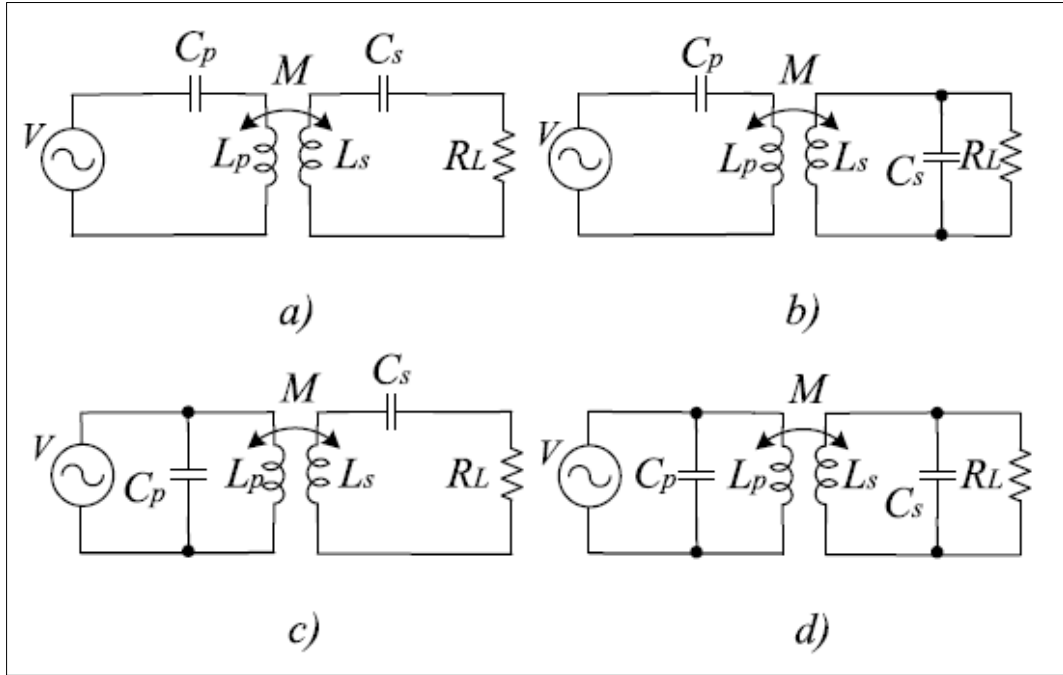
2.4. KGA Sistemleri İçin Kompanzasyon Yapıları

Kompanzasyon için bazı şartlar vardır. Kompanzasyon kondansatörü, endüktansların yeterli bir manyetik alan oluşturması için gerekli olan reaktif gücü sağlamak için verici veya alıcı endüktans ile rezonansa girer. Bu nedenle, bir verici sargının kompanzasyonu için temel işlev, güç kaynağının volt-amper (VA) oranını en aza indirmektir. Alıcı sargıda, kompanzasyon, güç aktarım kapasitesini maksimize etmek için endüktansı iptal eder. Bir KGA sisteminin maksimum verimliliği, iki parametre ile belirlenebilir, bağlaşım katsayısı ve kalite çarpanı (Pinuela ve diğerleri, 2013). Şekil 2.3, kompanzasyon topolojisinin sınıflandırmalarını göstermektedir. Birincisi dört temel topolojiden, ikincisi ise seri ve paralel topolojilerin kombinasyonları olan hibrit topolojileri içerir.



Şekil 2.3. Kompanzasyon yabatarlarının sınıflandırılması

Gösterildiği gibi, dört temel kompanzasyon topolojisi vardır: seri-seri (SS) (Miller ve diğerleri, 2015),(Cheng ve diğerleri, 2016), seri-paralel (SP) (Jegadeesan ve diğerleri, 2012), paralel-seri (PS) (Liu ve diğerleri, 2017) ve paralel-paralel (PP) (Hariri ve diğerleri, 2016). Verici tarafta, kompanzasyon topolojisi uygulama ortamına, iletim aralığına veya gerilim gereksinimine bağlıdır. Seri kompanzasyon topolojisi, kısa iletim mesafesinde kullanışlıdır. Verici sargı büyük akım gerektiriyorsa, paralel yapıyı daha çekici hale getirir. Seri kompanzasyonlu sekonder, bir gerilim kaynağına eşdeğerdir, bu nedenle ara DA barasına sahip sistemler için çok uygundur. Paralel kompanzasyonlu sekonder ise akü şarjı için uygun bir akım kaynağı görevi görür. verici taraf için, seri rezonans bir kompanzasyon, paralelden çok avantaja sahiptir. Paralel kompanzasyonlu bir verici yapı kurulumdaki ayar kondansatörü, yatay kayma hizalama, hava aralığı, elektronik bileşenlerin parametre kaymaları vb. neden olduğu için bağlaşım katsayısı veya kalite çarpanı değişikliği varsa ayarlanmalıdır. Gevşek manyetik bağlaşımın neden olduğu parazitik bileşenler nedeniyle istenmeyen harmonikler oluşabilir. Seri kompanzasyonlu verici yapı, harmonik etkilerini azaltabilir ve sistemi sabit tutabilir. Şekil 2.4'te temel kompanzasyon yapıları gösterilmiştir



Şekil 2.4. Temel kompanzasyon yapıları, a) SS, b) SP, c) PS, d) PP

Dört temel topoloji için, primer ve sekonder kapasitörlerine ait elde edilen denklemler Çizelge 2.3’de rezonans frekansında ω_0 çalışmak için verilmiştir.

Çizelge 2.3. Primer ve sekonder kompanzasyon kapasitörleri

Kompanzasyon türü	Primer	Sekonder
SS	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}$	$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$
SP	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)}$	$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$
PS	$C_1 = \frac{L_1 - \frac{M^2}{L_2}}{\left(\frac{M^2 R_{yük}}{L_2^2} \right)^2 + \omega_0^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)^2}$	$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$
PP	$C_1 = \frac{L_1}{\left(\frac{M^2 \omega_0^2}{R_{yük}} \right)^2 + \omega_0^2 L_1^2}$	$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$

Dört temel topoloji için toplam empedans değerleri aşağıdaki denklemler ile elde edilebilir.

$$Z_{T_{SS}} = \left(R_1 + j \left(L_1 \omega_0 - \frac{1}{C_1 \omega_0} \right) \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left(R_2 + R + j \left(L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right) \right)} \quad (2.9)$$

$$Z_{T_{SP}} = \left(R_1 + j \left(L_1 \omega_0 - \frac{1}{C_1 \omega_0} \right) \right) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left(R_2 + j L_2 \omega_0 + \frac{R_{yük}}{1 + j R_{yük} C_2 \omega_0} \right)} \quad (2.10)$$

$$Z_{T_{PS}} = \frac{1}{(R_1 + j L_1 \omega_0) + \frac{\omega_0^2 M^2}{\left(R_2 + R_{yük} + j \left(L_2 \omega_0 - \frac{1}{C_2 \omega_0} \right) \right)} + j C_1 \omega_0} \quad (2.11)$$

$$Z_{T_{PP}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{\omega_0^2 M^2 (1 + j R_{yük} C_2 \omega_0)}{(R_1 + j L_1 \omega_0) + \left(R_{yük} + (R_2 + j L_2 \omega_0) (1 + j R_{yük} C_2 \omega_0) \right)}} + j C_1 \omega_0} \quad (2.12)$$

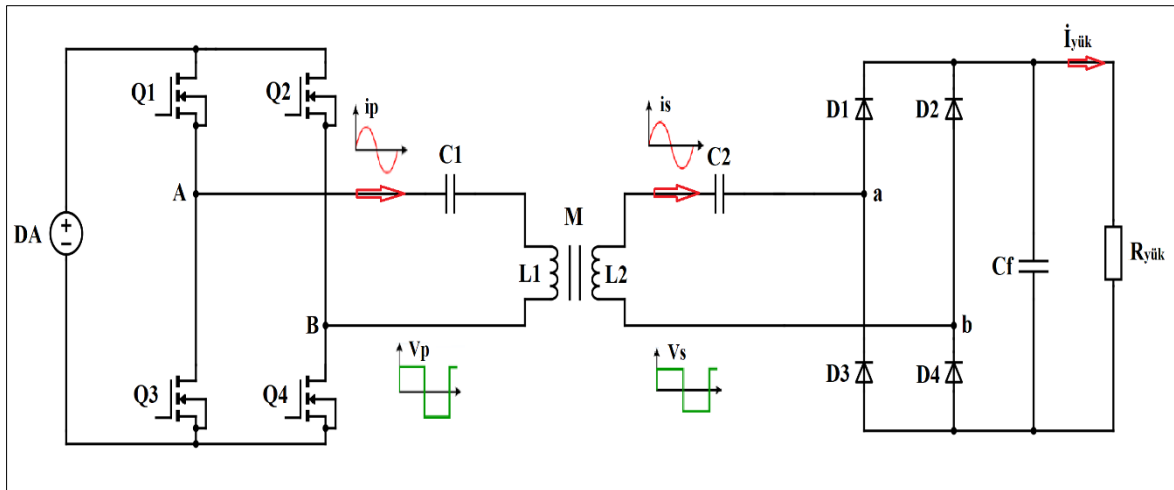
Toplam empedans eşitliklerini incelediğimiz zaman primer ve sekonder sargılarının aynı hızda olmadığı zaman ortak endüktansını ve dolayısıyla bağlaşım katsayısının düştüğünü göstermektedir. SS ve SP kompanzasyon topolojisinde toplam endüktansın düştüğü zaman hem giriş akımı hemde yükü besleyen akımın arttığı görülmektedir. PS ve PP topolojilerinde ise kaymadan kaynaklanan empedans artışı giriş ve yük tarafından akım düşmesine sebep olmaktadır (Sallan ve diğerleri, 2009). SS kompanzasyon yapısı iki önemli avantajı olduğu için EA'lar için uygun bir yapıdır. Birinci avantaj, verici ve alıcı tarafındaki kondansatör değerinin, yük koşullarından ve ortak endüktanstan bağımsız olmasıdır. Dolayısıyla, verici ve alıcı taraflarının rezonans frekansları, ortak endüktans ve yüklere değil, birincil ve ikincil sargılarının öz endüktansına bağlıdır. İkinci avantaj ise bu tür sistemlerin, alıcı sargıya yansıyan empedansı, verici sargıda imajiner kısım eklemediğinden, rezonans frekansında aktif güç çekerek birim güç çarpanını muhafaza etmesidir. Çizelge 2.4. KGA sistemlerinde kullanılan dört temel kompanzasyon topolojilerinin özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 2.4. Temel kompanzasyon yapılarının özellikleri

Özellikler	SS	SP	PS	PP
Güç aktarım kapasitesi	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Hızalama toleransı	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta
Rezonans durumdaki empedans	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Verimlilik üzerinde frekans toleransı	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
EA uygulaması için uygunluk	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta

Son yıllarda dört temel topoloji hariç bazı hibrit kompanzasyon yapıları önerilmiştir. (Liu ve diğerleri, 2016) LCC-P ve LCL-P yapısını önermişler. Bu yapılarda primer taraf LCC ve LCL ve sekonder tarafı paralel rezonans devresi seçilmiştir. (Wang ve diğerleri, 2017) S-CLC, (Samanta ve diğerleri, 2015) CCL-S, (Feng ve diğerleri, 2016) CCL-S, (Park ve diğerleri, 2017) LCL-LCL ve (Kan ve diğerleri, 2017) LCC-LCC yapılarını önermişler. CCL-S yapısı birinci tarafta ekstra seri kapasitöre sahiptir, bu da paralel LC-S'ye kıyasla daha düşük bir anahtarlama kaybına yol açar. Yüksek gerilim kazançlı uygulamalar için CCL yapısı tercih edilirken, düşük gerilim kazancı uygulamaları için paralel LC kompanzasyonlu KGA tercih edilir. SS, S-LCL, S-CLC ve SP kompanzasyon topolojilerinin çıkış akımı ve çıkış gerilimi ortak endüktansla ters orantılıdır ve çıkış gücü ortak endüktansın karesiyle ters orantılıdır. Çift taraflı LCL'nin yanı sıra çift taraflı LCC, LCL-S, LCL-P, PS ve PP kompanzasyon topolojilerinde, çıkış akımı ve çıkış gerilimi ortak endüktansla düz orantılıdır ama çıkış gücü, ortak endüktansın karesi ile orantılıdır. Sonuç olarak yüksek frekanslı devrelerde devre bileşenleri tamamen rezistif olmadığı için empedans eşleşme sorunu ortaya çıkmaktadır. Maksimum güç aktarım verimliliği elde etmek için, devrenin empedans uyumlu olması gerekir.

Çalışmamızda kompanzasyon yapısı olarak SS seçilmiştir. Şekil 2.5, SS kompanzasyonlu kablolu güç aktarım sisteminin genel devre yapısını göstermektedir.

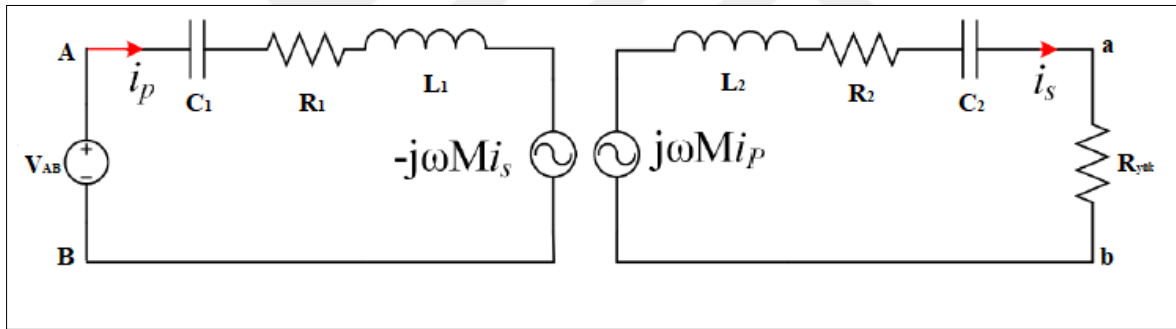


Şekil 2.5. SS kompanzasyonlu KGA sistemi genel devre yapısı

C1 ve C2 primer ve sekonder tarafı kapasitörleri, L1 ve L2 primer ve sekonder sargı endüktansları, M sargılar arası ortak endüktans değeri, Q1-Q4 eviriciye ait yarı iletken

anahtar elemanları, D1-D4 sekonder tarafı tam köprü doğrultucu anahtarlama elemanlarını göstermektedir. KGA genel devre yapısının primer tarafında doğru akım gerilimi bir yüksek frekanslı evirici ile AA gerilimine dönüştürülüyor. Yüksek frekanslı eviricinin ürettiği kare dalga SS rezonans devresinden akmaya başlar ve üretilen manyetik alan sayesinde sekonder tarafa gerilim indüklenir.

Aktarılan kare dalga gerilimini yükün DA karakteristiğinden dolayı tam köprü doğrultucu ile DA formuna çeviririz ve bu sayede yükten akım akmaya başlar. SS topolojisi ideal rezonans durumunda primer tarafından gerilim ile beslendiği zaman bir akım kaynağı gibi davranır. Bu nedenle basit bir kapasitif filtre yeterlidir. Ayrıca SS yapısı primer tarafta eviricinin ürettiği istenmeyen frekans bileşenlerini bloke eden bir bant geçiren filtre gibi davranır. Dolayısıyla rezonans devresinden akım nerdeyse sinüzoidaldir. Şekil 2.6, Şekil 2.5'te gösterilen devrenin basitleştirilmiş eşdeğer modelini göstermektedir.



Şekil 2.6. SS sisteminin basitleştirilmiş eşdeğer devresi

İki sargı arasındaki bağlaşım katsayısı (k), Eş. 2.13'te verilmiştir. M primer ve sekonder sargılarının ortak endüktans değeridir.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.13)$$

Şekil 2.6'daki gerilim denklemleri, ortak endüktans M değerini kullanılarak yazılabilir.

$$V_{AB} = \left(\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 \right) I_p - j\omega M I_s \quad (2.14)$$

$$V_{ab} = j\omega M I_p - \left(\frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_2 \right) I_s \quad (2.15)$$

Primer ve sekonder sargılarının rezonans frekansı Eş. 2.16'da verilmiştir.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.16)$$

Mükemmel rezonans frekansında Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{AB} = R_1 I_p - j\omega M I_s \quad (2.17)$$

$$V_{ab} = j\omega M I_p - R_2 I_s \quad (2.18)$$

Şekil 2.6'da primer taraftan aktarılan güç $P_{yük}$ ve verim η aşağıdaki gibi yazılır.

$$P_{yük} = \frac{\omega_0^2 M^2 V_{AB}^2 R_{yük}}{[R_1(R_{yük} + R_2) + \omega_0^2 M^2]^2} \quad (2.19)$$

$$\eta = \frac{\omega_0^2 M^2 R_{yük}}{R_1(R_{yük} + R_2)^2 + \omega_0^2 M^2 (R_{yük} + R_2)} \quad (2.20)$$

Eş. 2.6'da verilen kalite çarpanını göz önünde bulundurursak maksimum verim aşağıdaki koşul ile elde edilir (Li ve diğerleri, 2015).

$$\eta_{mak} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (2.21)$$

Eş. 2.21'de görüldüğü gibi $k^2 Q_1 Q_2$ değeri arttıkça verimde artar. Dolayısıyla bir KGA sisteminin verimliliği bağlaşım katsayısı ve kalite çarpanının çarpımına bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle KGA sisteminin tasarımında yüksek bağlaşım ve kalite çarpanı dikkate alınmalıdır. Bu iki parameter sargı tasarımının şekli, boyutu ve sargıların konumuyla bağlantılıdır. Tez çalışmamızda amaç yenilikçi bir sargı tasarımıyla sargılar arasında olası kayma durumunda bağlaşım katsayısını yüksek tutmak ve dolayısıyla verimi arttırmaktır.

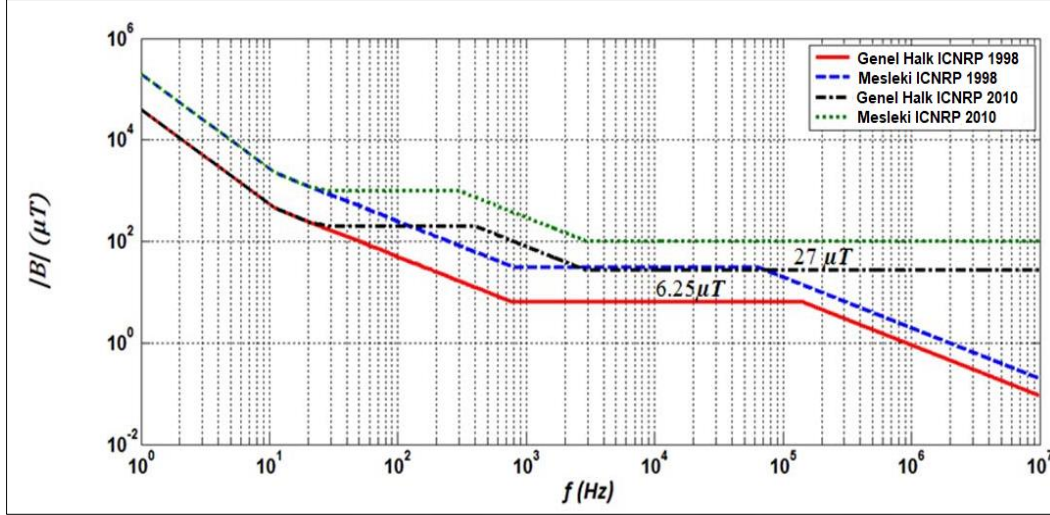
2.5. KGA Sistemlerde Uygulanan Uluslararası Sağlık Ve Güvenlik Standartları

KGA sistemleri fişli elektrikli cihazlara göre önemli avantajlar sağlamaktadır ama bununla birlikte manyetik alan işin içinde olduğu için sağlık ve güvenlik açısından tartışılmaktadır ve dolayısıyla uluslararası kuruluşlar yeni standartlar belirlemektedirler. KGA sistemleri yüksek akım ve gerilim seviyelerinde çalışmaktadırlar. Buda, çevresel koşullardan (sıcak veya soğuk) ve fiziksel hasardan kaynaklanan arıza veya cihazın kazara hasar görmesi nedeniyle elektrik çarpması riski oluşturabilir. Ayrıca seviye 1 (3,7 kW) ve seviye 2 (7,7 kW) EA'lar çoğunlukla evlerde ya da alışveriş merkezlerinde verici şarj pedlerinin zemine veya betona monte edildiği genel park alanlarına kurulur dolayısıyla insanlarda koruma sağlamak ve yaşamı tehdit eden durumlardan kaçınmak için ek güvenlik düzenlemeleri gerektirir.

Yüksek güç seviyelerinde üretilen manyetik akılar, standart kuruluşları tarafından belirlenen minimum standartları ve düzenlemeleri aşabilir ve genel toplum için zararlı olabilir. Birçok uygulamada vericiden alıcıya yüksek güç değerleri 150mm'den 300mm'ye kadar olan hava aralığından ve kilohertzden megahertz frekans seviyelerine kadar gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, büyük hava aralıkları nedeniyle yüksek frekanslı kaçak akılar üretilir. İzin verilen limitlerin değerleri, maksimum izinli maruz kalma (MPE) ve spesifik emme oranı (SAR) açısından belirtilmiştir (Bashirullah ve diğerleri, 2010). Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE), Uluslararası Elektro Teknik Komisyonu (IEC), Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) ve Underwriters Laboratories (UL) gibi birçok uluslararası kuruluş enstitüler, üniversiteler ve otomotiv sektörünü bu standartlara uymaları için zorluyorlar. En yaygın iki standart, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) ve Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) tarafından birçok standart yayınlanmaktadır.

ICNIRP hem elektrik alanları hem de manyetik alanlar için sınırlamalar koymuştur. Elektrik alanları için insan vücudu iyi bir iletkenidir. Dış elektrik alanı, insan vücudunun içinde bir elektrik alanı indükleyecektir. ICNIRP, tüm insan dokularının iç elektrik alanları üzerinde frekans değerinin $1,35 \times 10^{-4}$ katını aşamayacak bir limite sahiptir. Ayrıca, ICNIRP'nin 83 V/m olarak ayarlanmış elektrik alanlarına genel kamu maruziyeti için bir sınırı vardır. Manyetik alanlar için doku hava ile aynı geçirgenliğe sahiptir. Doku, dış alanla aynı manyetik akı yoğunluğuna sahiptir.

ICNIRP'nin, 2010'da $27\mu\text{T}$ olarak güncellenen manyetik alanlara genel olarak maruz kalma sınırı vardır. Ek olarak, 1998'de belirlenen sınır olan $6.25\mu\text{T}$, son deneylerde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. ICNIRP'nin iki kategoride ayırdığı genel halk ve mesleki frekans ve manyetik alan yoğunluğuna maruz kalma limitleri Şekil 2.7'da gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Frekansa göre değişen B'ye maruz kalma için ICNIRP referans seviyeleri

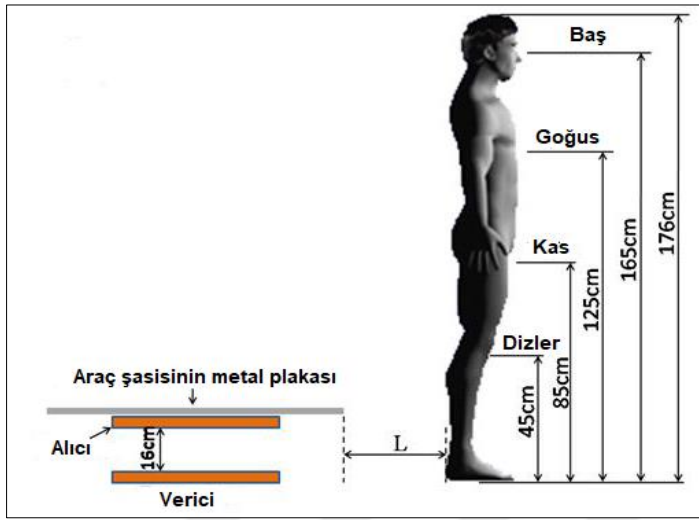
Örneğin, SAE International, hafif hizmet ve yolcu arabaları için 81,39 ile 90 kHz arasında ortak bir çalışma frekansı aralığına sahip EA'lar için TIR J2954 kablosuz güç aktarım standartlarını duyurdu. Ayrıca bu standart, kablosuz elektrikli araçların deneysel ve kanıtlanmış amacı için güç seviyelerini, elektromanyetik sınırları ve minimum verimliliği içerir. SAE J2954 KGA komitesi, prototip (standartlaştırma testleri) ve araç seviyeleri (tam araç testleri) üzerinde çok çeşitli doğrulama testleri gerçekleştirdi. Çizelge 2.5. elektrik alanlar, manyetik alanlar ve manyetik akı yoğunluğu ile ilgili profesyonel ve genel maruz kalma önerilen değerlerini göstermektedir.

Çizelge 2.5. Frekansı 3 kHz ile 10 MHz arasında olan alanlar için referans değerler

Alan türü	Profesyonel maruz kalma	Genel maruz kalma
Elektrik alan şiddeti (E)	0.17 kV/m	0.083 kV/m
Manyetik alan (H)	80 A/m	21 A/m
Manyetik akı yoğunluğu (B)	100 μT	27 μT

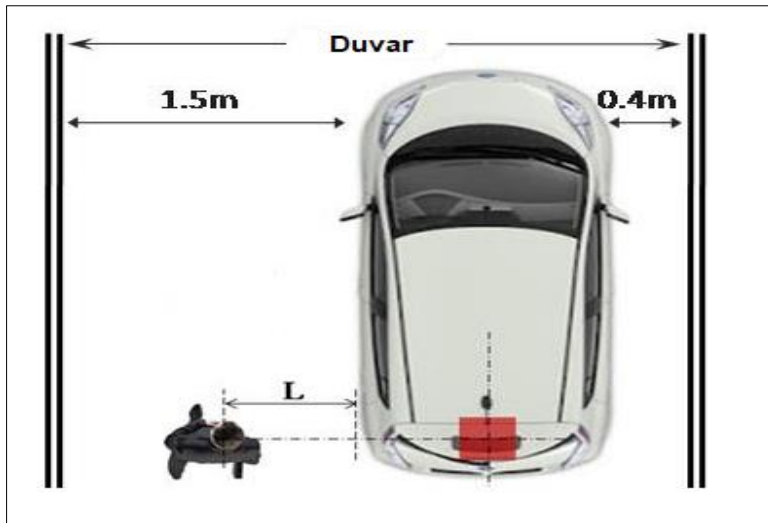
ICNIRP, insan vücudundaki EM sınırlarını belirlemek için özel ölçüm tekniklerini açıklamaz. Ancak, insan maruziyet standartlarını tanımlamak için ICNIRP yönergelerini

kullanan Avustralya Radyasyondan Korunma ve Nükleer Güvenlik Ajansı (ARPANSA) tarafından ölçüm teknikleri önerilmiştir. İnsanların EM alanlarına maruz kalma testi, KGA prototipi ile donatılmış bir Nissan Leaf EA üzerinde gerçekleştirildi ve kablosuz şarj sırasında içerideki yolcuların güvenliğini değerlendirmek için araç içindeki alan güçleri ölçüldü. Şekil 2.8., baş, göğüs, kas ve dizlerdeki alan kuvvetlerinin ICNIRP standartlarına göre bir gauss metre kullanılarak ölçüldüğünü göstermektedir (Ogden ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.8. Standart bir yetişkin insan vücudunda EM alan ölçümü

Sistem 2 kW güç ile çalışmaktadır. KGA deneyi, birbirinden 3m aralıklı 2 tuğla duvar arasında açık bir asfalt yolda gerçekleştirilmiştir. Test edilen EA, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi duvarlardan birinden 1.5 m uzağa park edildi.



Şekil 2.9. Test ortamının üstten görünüm

Gerçek uygulamalarında, küçük bir çocuk arabanın altında emeklerken bir ebeveyn yük taşımak veya başka görevleri yerine getirmek için arkasını dönerken, şarj sırasında birincil ve ikincil sargılar arasındaki alan ve bununla bağlantılı olarak insan üzerindeki etki incelenmiştir. ICNIRP evcil hayvanların EM'ye maruz kalması için güvenlik standartları belirlememiş olsa da, fizyolojileri benzer olduğu için evcil hayvanlar için de insanlarla aynı standartları varsayıyoruz. Ayrıca araç içindeki alanlar koltuk, baş minderi ve yer halısı yüzeyinde de ölçülmüştür.

Sonuç olarak KGA sistemlerinin güvenli çalışması ile ilgili oldukça endişeler var. İlk güvenlik endişesi, yeni kalkan tasarımlarını, özellikle aktif ve reaktif korumayı keşfetmek için ek çaba gerektiren EMK'larla ilgilidir. Diğer bir güvenlik sorunu, etkin bir yabancı metal nesne algılama yöntemi gerektiren, sistemin yakınındaki metal nesnelerde üretilen ısı ile ilişkilidir. Ek olarak, çalışma sırasında evcil hayvanların ve hayvanların sıcak bölgeye erişmesini önlemek için bir canlı nesne algılama aracı gereklidir. Mevcut tüm yabancı nesne algılama teknikleri, nesneyi algılamamanın ve sistemi kapatmanın bir yolunu araştırıyor. İnsan sağlığı önemli olduğu için gelecekte, hizalama metodolojisi, dinamik şarj ve kablosuz çift yönlü güç aktarımı için ek standartlar uluslararası standart kuruluşları tarafından duyurulacaktır. Çizelge 2.6.'da, tüm dünyada duyurulan ve devam eden KGA ile şarj olan elektrikli araçlarla ilgili standartların listesini görebiliriz.

EA şarj sistemi, aküye uygun bir süre içinde yeterli gücü sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca genel olarak EA şarj cihazının güç seviyesine ve özel olarak endüktif tipe göre sınıflandırılabilir. Hafif hizmet EA'lar için şarj gücü 1 kW ile 22 kW arasında değişir ve orta ve ağır hizmet EA'lar için uluslararası standartlar ve yönergelere göre >22 kW olmalıdır. Araç boyutunun güç gereksinimleri üzerindeki etkisine ek olarak, her araç sınıfı, KGA sisteminin verici ve alıcı sargılar (manyetik hava aralığı) arasındaki mesafeyi etkileyen farklı hava aralığına sahiptir. Bu hava aralığı hafif hizmet güç seviyelerindeki araçlar için 10 cmm ile 40 cmm arasında değişir.

Literatüre göre, EA uygulamaları için KGA sisteminin farklı güçleri ve hava boşlukları ile birleştirilmiş çok çeşitli çalışma frekansları bulunmaktadır. KGA sistemlerinin çoğu 10 kHz ila 100 kHz frekans aralığında çalışmaktadırlar, ama az sayıda uygulama hava çekirdekli sargılarla daha yüksek frekansları çalışmaktadırlar. Performans, iletim mesafesi, bağlaşım katsayısı, yanlış hizalamaya tolerans, polarizasyon, birlikte çalışabilirlik,

manyetik akı ve şarj bölgesi açısından farklı ped yapıları arasında karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Ayrıca, geliştirilen prototipleri, ticari olarak mevcut ürünleri ve ilgili ulusal ve uluslararası standartları ve yönergeleri göstererek mevcut kablosuz şarj piyasası araştırılmıştır.

Çizelge 2.6. KGA ile şarj olan EA'ların farklı standartları

Standart kuruluşu	İlgili standart	Standart tanımı
SAE	J2954	Hafif hizmet tipi elektrikli araçların kablosuz şarjı için birlikte çalışabilirlik, elektromanyetik, uyumluluk, EMK, minimum performans, güvenlik ve test için kabul edilebilir kriterleri tanımlar.
	J2847/6	Bir elektrikli araç ile kablosuz güç aktarımı için bir endüktif pil şarj sistemi arasındaki iletişim için minimum gereksinimleri belirler.
	J1773	Aynı coğrafi yapıya sahip alanlarda endüktif şarjın yanı sıra elektrikli arabalar için kabul edilen arayüz gereksinimleri sınırlarını açıklar.
	J2836/6	EA'nın algılanması, şarj işlemi ve şarj işleminin izlenmesi için yerleşik şarj sistemi ile Kablosuz EA Ekipmanı arasındaki iletişim gereksinimlerini ele alır.
IEEE	P2100.1	Birden fazla kablosuz güç ve şarj teknolojisini birleştirmeyi ve endüstri kuruluşlarının bir dizi cihazla birlikte çalışabilirliğini sağlamaya yardımcı olur.
	C95.1	3 kHz ile 300 GHz frekans aralığında elektromanyetik alanlara maruz kalan insanlarda zararlı etkileri önlemek için öneriler.
ISO	19,363	Elektrikli araçların akü şarjı için manyetik alan kablosuz güç aktarımını sağlayan araç üstü araç ekipmanının gereksinimlerini ve çalışmasını tanımlar.
IEC	61980-1	Yalıtkan piller gibi depolama sistemleri veya gerektiğinde şebekeye güç sağlamak için kablosuz olarak güç aktarımı için ekipmanlara geçerli öneriler sunar.
	61980-2	KGA sisteminde şarjı kolaylaştırmak için elektrikli arabalar ve altyapı arasındaki iletişimin özel koşulları belirtir.
	61980-3	Kablosuz şarj sisteminde üretilen manyetik alan için özel gereksinimleri belirtir.
JARI	G109:2001	Gücü kablosuz olarak iletmek için KGA sisteminin kullanımını açıklar. Ayrıca, şarj işlemi için genel gereksinimleri de verir.
UL	UL9741	Güç şebekesini desteklemek ve geleneksel yükleri beslemek için çift yönlü çalışmayı dikkate alarak şarj süreci için gereksinimleri tanımlar.

Bölüm değeriendirmesi

Bu bölümde öncelikle KGA sistemlerinin temel yapısı ve çalışma prensibi anlatılmıştır. KGA sistemlerinde yaygın olarak kullanılan dört temel kompanzasyon yapısı anlatıldıktan sonra son yıllarda önerilen hibrit kompanzasyon yapıların avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tez çalışmamızda kompanzasyon yapısı olarak seçilen SS yapısı matematiksel olarak anlatılmış ve eşdeğer devresi gösterilerek gerilim ve akım eşitlikleri ve dolayısıyla aktarılan güç ve verim eşitlikleri elde edilmiştir.

Son olarak KGA sistemlerinde uygulanan uluslararası standartlar ve sağlık kuruluşlarının yayılan manyetik ve elektrik alanlarına maruz kalma limitleri ve uyulması gereken standartlarla ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

3. KGA SİSTEMLERİ İÇİN KONTROL MEKANİZMASI

Kablosuz güç aktarımı ile şarj olan bir araçta sargılar üst üste olduğu zaman istediğimiz değerde güç aktarabiliyoruz ama bazı durumlarda sargılar aynı hizada olmuyorlar ve bunun sonucu olarak verici taraftan alıcı tarafa istenilen güç aktararılamaz. Sargılar aynı hizada olmadığı zaman ortak endüktans değeri bağlaşım katsayısının değişmesiyle değişiyor ve buda empedans değişimi ve dolayısıyla gerilim ve akım değişimlerine sebep olmaktadır.

Bu sorunu çözmek için literatürde verici, alıcı veya her iki tarafta kontrol mekanizması uygulanmaktadır. Verici tarafta evirici öncesi bir DA-DA dönüştürücü kullanan çalışmada (Xiangtian ve diğerleri, 2018), hizalamadan kaynaklanan gerilim değişimini bu sayede istedikleri değere getiriyorlar. İlk olarak, ortak endüktans ve yükü elde etmek için birincil tarafın gerilimi ve akımı tespit edilir. Ardından, çıkış gerilimi, tahmini ortak endüktans ve yük ile tahmin edilir. Çıkış gerilimi giriş geriliminin değeri ile tahmini çıkış geriliminin ayarlanması ile elde edilir. Bu yöntemin dezavantajı gerçek bir batarya şarj yönetim sisteminde batarya karakteristiği göz arda ediliyor ve sabit akım/gerilim üretimi yapılmıyor.

Çıkış tarafta bir çift anahtar kullanılan başka bir çalışmada doluluk oranı ile kontrol yapılarak güç kontrolü yapılmaya çalışılmıştır ama verici tarafta sıfır gerilim anahtarlama elde edilemiyor (Bo ve diğerleri, 2017). Yapılan başka bir çalışmada çıkış tarafta bir DA-DA dönüştürücü kullanılmıştır ve ortak endüktans değişiminden kaynaklanan gerilim düşmesi kontrol edilmiştir. Bu çalışmada yük değişim ve karakteristiği incelenmemiştir ve devreye olan etkisi göz önünde bulundurulmamıştır ayrıca primer tarafta sıfır gerilim anahtarlama ulaşılmamıştır (Zou ve diğerleri, 2018).

Başka bir çalışmada KGA sisteminde çıkış tarafta bir aktif doğrultucu devresi kullanılmıştır. İlk olarak, sargı iç direncinin çıkış akımı üzerindeki etkisi analiz edilir, İkinci olarak, birinci ve ikinci tarafta iki bağımsız kontrol döngülerinin ortak kontrol stratejisi araştırılmıştır. İkincil PI kontrollü yarı aktif doğrultucu, çıkış akımını otomatik olarak düzenlerken, birincil dönüştürücü, VS-P&O algoritmasına dayalı olarak minimum giriş akımını arar. Ardından, CC şarjı sağlanır ve aktarım verimliliği maksimuma çıkar.(Kai ve diğerleri, 2020).

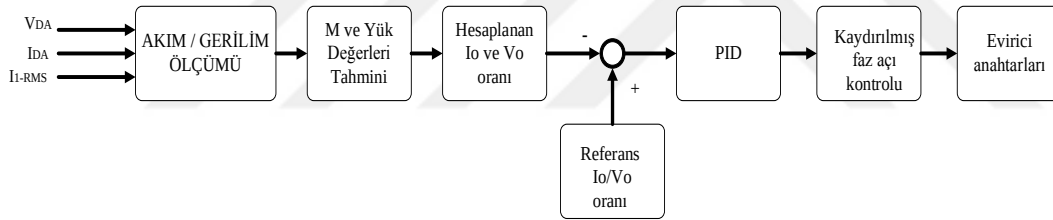
(Ying ve diğerleri, 2021) önerilen tek anahtarlı yükseltici rezonans evirici ve seri-seri kompanzasyon topolojisi kullanarak yüksek verimli bir kablosuz güç aktarım (KGA) sistemi gerçekleştirmişler. Bu rezonant evirici, basitleştirilmiş bir devre yapısı, düşük bileşen sayısı, doğal gerilim artırma, sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) ve yüksek verimlilik gibi avantajlara sahiptir. (Vu ve diğerleri, 2018) bir çalışmada, herhangi bir ek anahtar olmadan ZPA koşulunda bir IPT sisteminin yükten bağımsız özelliklerini kullanarak, tüm şarj süreci boyunca CC/CV modu şarjını minimum frekans değişimi ile uygulamayı mümkün kılan bir tasarım yöntemi önermektedir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini göstermek için 6.6 kW'lık bir prototip şarj cihazı uygulanmıştır. CC modu şarjı sırasında 6,6 kW'da 200 mm hava aralığı ile maksimum %96,1 verimlilik elde edilmiştir.

KGA sistemlerinin en önemli sorunlarından biri yük kısmında batarya kullanılmasıdır. Bataryalar şarj olurken değişken bir yüklerdir. Sabit akım ve gerilimde şarj edilmesi için kontrol edilmelidirler. CC modunda verici, daha fazla güç aktarır ve aşırı yüklenmeyi önler. CV modunda, çıkış gücü şarj durumuna göre ayarlanabilir. KGA sisteminde kontrol yöntemi kullanarak aşağıdaki durumları elde etmektir:

- Yükten bağımsız çalışan CC veya CV şarj ünitesi
- Verici ve alıcı, birim güç katsayısında çalışmalı
- Sıfır gerilim anahtarlama çalışan yüksek frekanslı evirici
- Değişken yük ve bağlaşım katsayılarında sabit güç aktarımı

Bu bölümde 600 W güç değerinde ve 48 V ve 12.5 A akımla şarj edilen bir devre yapısı için tasarım ele alınmaktadır. Giriş gerilimi 220 V AA şebeke ile beslenmektedir. Yaptığımız rezonans devre tasarımına göre sekönder tarafta 50 VAA gerilimine dönüştürülecek ve doğrultucu vasıtasıyla batarya şarj sistemine verilecektir. KGA sistemini sabit gerilim ve akım'da şarj etmek için çıkış tarafında bir DA-DA dönüştürücü kullanılmıştır. Kullanılan buck boost dönüştürücüde verici taraftan alıcı tarafa sargıların durumundan kaynaklanan hizalama probleminin dolayı istenilen değerde güç aktarılamayabilir. Düşük aktarılan gerilimi şarj gerilimine ulaştırmak için dönüştürücü sayesinde yükseltilebilir. Dönüştürücünün giriş gerilimi değişkenlik göstermektedir ama çıkışta sabit gerilim elde edilmektedir.

Primer tarafta ortak endüktans değişiminden kaynaklanan eksik güç aktarımını düzeltmek için eviricide kaydırılmış faz açısı yöntemi kullanılmıştır. Sargıların aynı hızda olduğu zaman çıkış gerilim ve akımının belli bir sabit oranı vardır. Bizim çalışmamızda bu oran 48 volt ve 12.5 amper olarak belirlenmektedir. Sargılar üst üste olmadığı zaman M değeri değişmektedir. Öncelikle bu durumda M ve yük değerini bulmalıyız. Bu değerleri bulmak için primer sargısından akan akımın RMS değeri ve ayrıca eviriciyi besleyen DA gerilim ve akımını ölçüyoruz. Ölçülen bu değerler sayesinde aşağıdaki denklemler ile M ve bu durumdaki yük değerini tahmin ediyoruz. Sistemin anlık durumuna göre bulunan değerler, çıkış gerilimi ve akımının oranını belirliyor. Bu oranı referans oran ile karşılaştırıyoruz. Elde edilen hata değerini bir PID denetleyici sayesinde ve kaydırılmış faz açısı yöntemi ile eviricinin bacaklarına sinyal uyguluyoruz. Eviricide bulunan 4 anahtarın ikisi sabit sinyal ve diğer ikisine kaydırılmış sinyal uyguluyoruz ve dolayısıyla sekönder tarafa istenilen değerde güç aktarmış oluyoruz. Bu kontrol yöntemini kullanarak eviricinin sıfır gerilim anahtarlama çalışmasını sağlıyoruz.



Şekil 3.1. Primer tarafı kontrol şeması

KGA sisteminin eşdeğer devresine dayanarak, primer rezonans akımı ile yük akımı / gerilimi arasındaki ilişki şu şekilde çıkarılabilir:

$$I_{yük} = \frac{\omega_0^2 M L_2}{(\omega_0 L_2)^2 + R_o} I_1 \quad (3.1)$$

$$V_o = \frac{\omega_0^2 M L_2}{(\omega_0 L_2)^2 + R_o} R_o I_1 \quad (3.2)$$

Ortak endüktans M, alıcının konumuna bağlıdır ve yük direnci R_o , bataryanın şarj durumuna bağlıdır. R_o ve M değerleri biliniyorsa, I_1 akımını kontrol ederek şarj akım ve geriliminide kontrol edebiliriz. Kablosuz şarj sistemlerinde yüksek aktarım verimi elde

etmek için sabit frekanslı çalışma tercih edilmektedir. Bu nedenle, rezonans akımının I_1 RMS değerini kontrol ederek, CC / CV şarjı kontrol edilebilir.

Şarj işlemine başlarken sekönder tarafı yüke bağlanır. Bu aşamada sargıların durumuna göre M değeri hesaplanır.

$$M = \sqrt{\frac{P_{DA}}{I_{L1}} - R_1 \frac{Z_s}{\omega_0^2}} \quad (3.3)$$

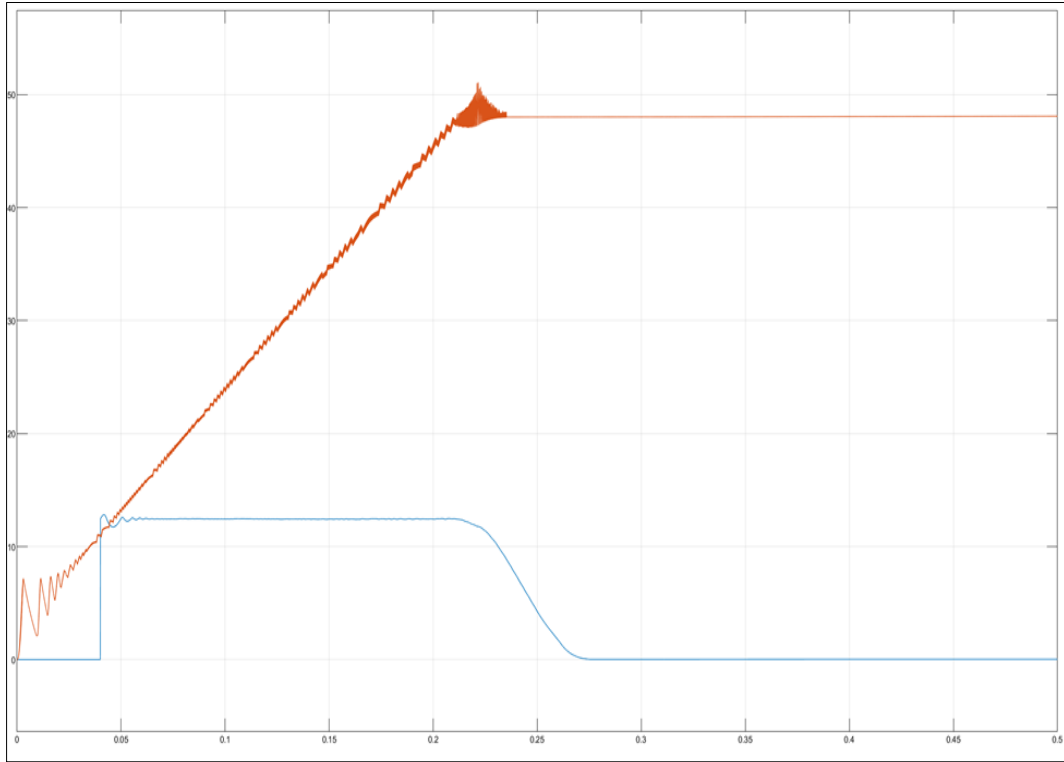
$$Z_s = R_2 + \frac{(\omega_0 L_2)^2}{R_o} \quad (3.4)$$

Z_s sekonder tarafın primer tarafına yansıtılmış empedansıdır. P_{DA} eviricinin çıkış gücüdür. Sistem rezonans koşulunda çalıştığında, 1. adımdaki ortak endüktans değeri kullanılarak eşdeğer yük direnci aşağıdaki gibi tahmin edilir:

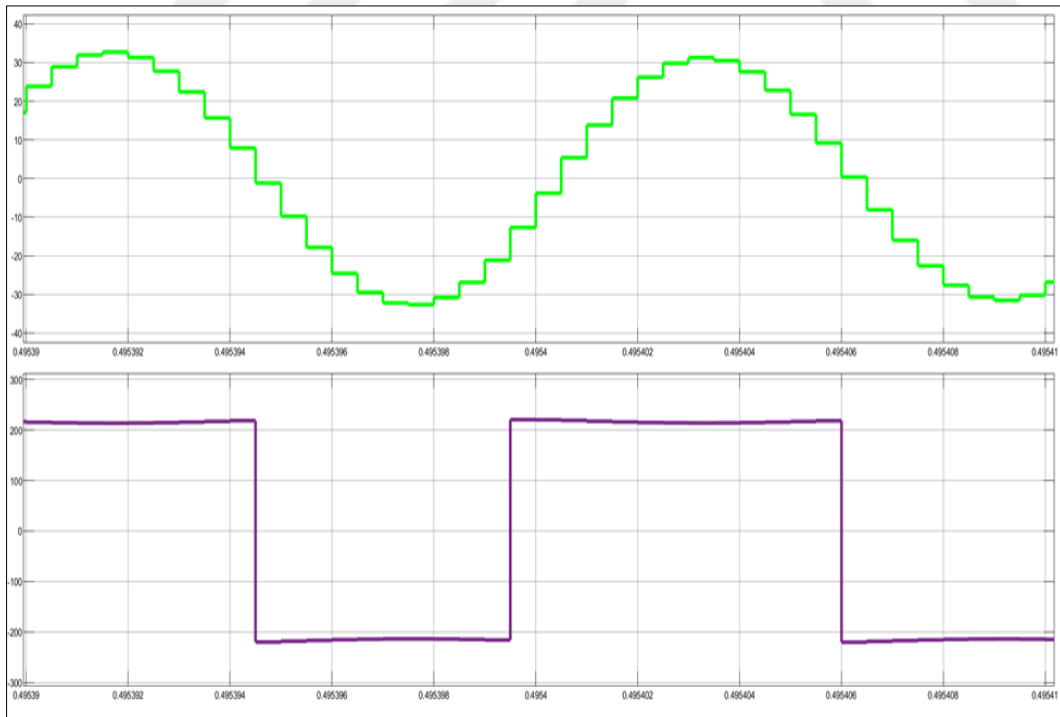
$$R_o = \frac{(\omega_0 L_2)^2}{\frac{(\omega_0 M)^2}{\frac{P_{DA}}{I_1} - R_1} - R_2} \quad (3.5)$$

M ve R_o değerleri bulunduktan sonra çıkış gerilimi ve akım oranı referans değerle karşılaştırılıp ve PID denetleyici sayesinde eviricinin bacakları arasında faz kaydırması ile sekönder tarafa istenilen değerde aktarılır. Yapılan benzetimde sistemimizde ilk başta sargılar aynı hizadalar. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi alıcı tarafa hesaplanan değerde gerilim aktarılıyor. Daha sonra M değeri değişiyor ve dolayısıyla aktarılan gerilim değeri düşmektedir. Bu noktada primer tarafındaki kontrol devreye giriyor ve yeni M değerine göre kaydırılmış faz açısı yöntemi ile gerilimi referans değerlerine yükseltiyor.

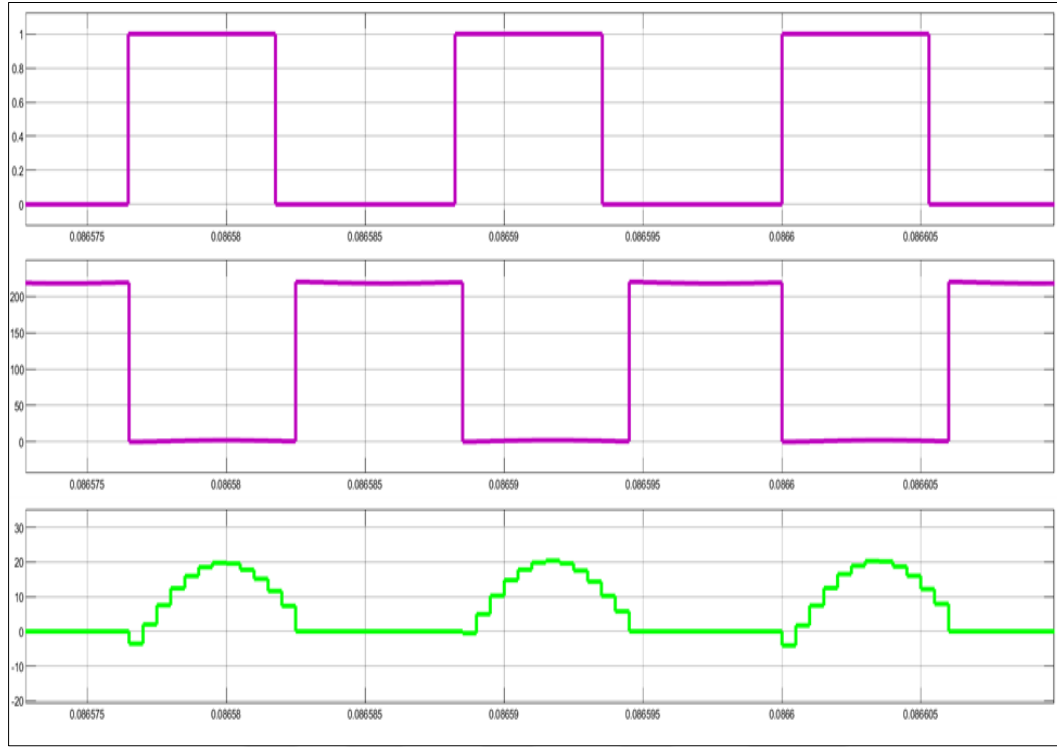
Şarj gerilimi ve akımı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Evirici çıkışında gerilim ve akım grafikleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Kullanılan kontrol yöntemi sayesinde eviricide sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) elde ediliyor ve Şekil 3.4’te gösterilmektedir. Eviricinin anahtarlarına uygulanan kaydırılmış faz açısı yöntemi Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



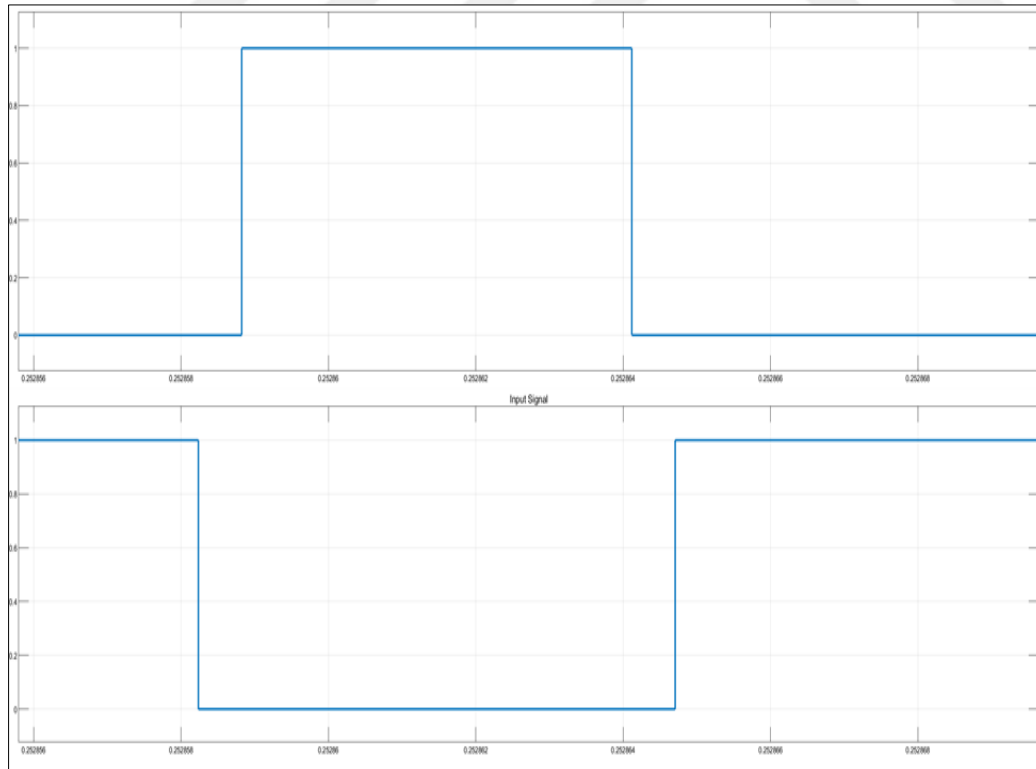
Şekil 3.2. Sabit akım / sabit gerilim ile şarj olan KGA sistemi



Şekil 3.3. Evirici çıkışındaki gerilim ve akım görselleri

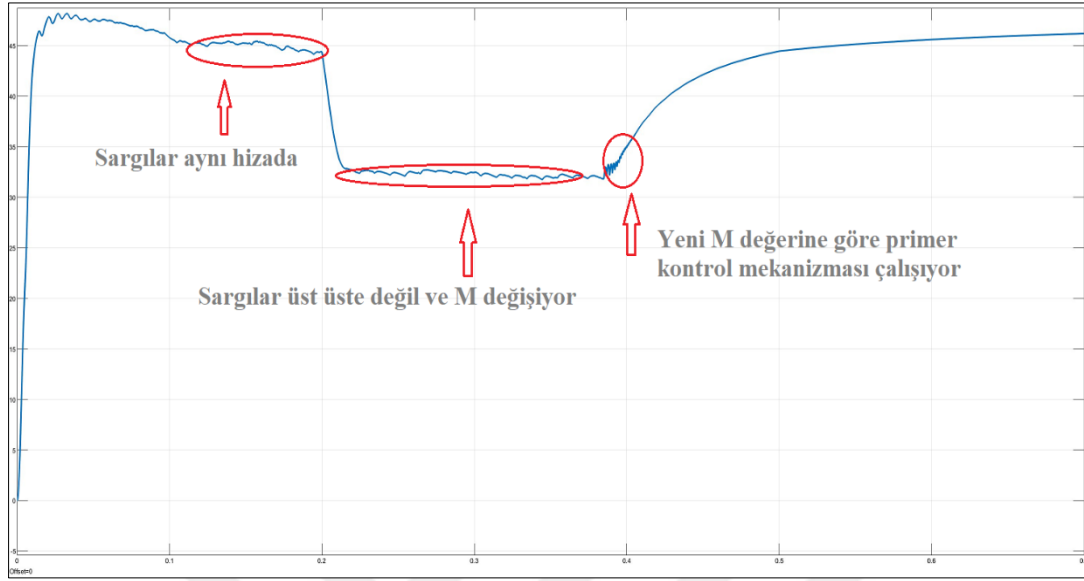


Şekil 3.4. Anahtarla üzerinde olan akım ve gerilim değeri (ZVS işlemi)



Şekil 3.5. Kaydırılmış faz açısı yöntemi

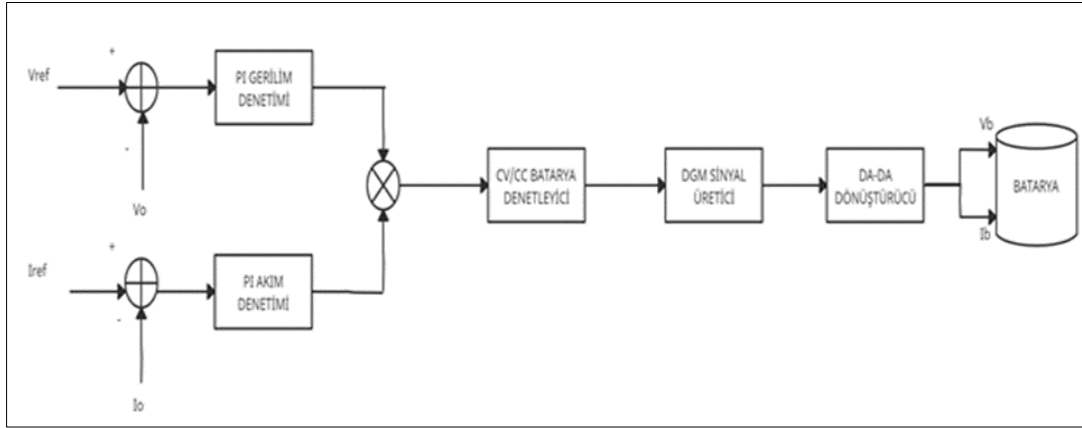
Kontrol yönteminin işleyişi Şekil 3.6’te gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Verici taraftan alıcı tarafa aktarılan gerilim değeri

Ortak endüktans değişiminden kaynaklanan aktarılan güç değerinde değişim yaşanıyor ve dolayısıyla bisikletimizi sabit gerilim ve akım ile şarj edemiyoruz. Primer tarafında kullanılan kontrol yöntemi sayesinde eksik aktarılan güç değerini belli bir seviyeye kadar yükseltiyoruz ama amacımız bataryayı sabit akım ve gerilim ile şarj etmektir. Bu dönüştürücü değişken olan 25-50 volt DA gerilimini sabit 48 volt ile şarj etmektedir. Ayrıca akım üzerinde kontrol sağlamak zorundayız ve sabit 12.5 amper ile bataryamız şarj edilmelidir.

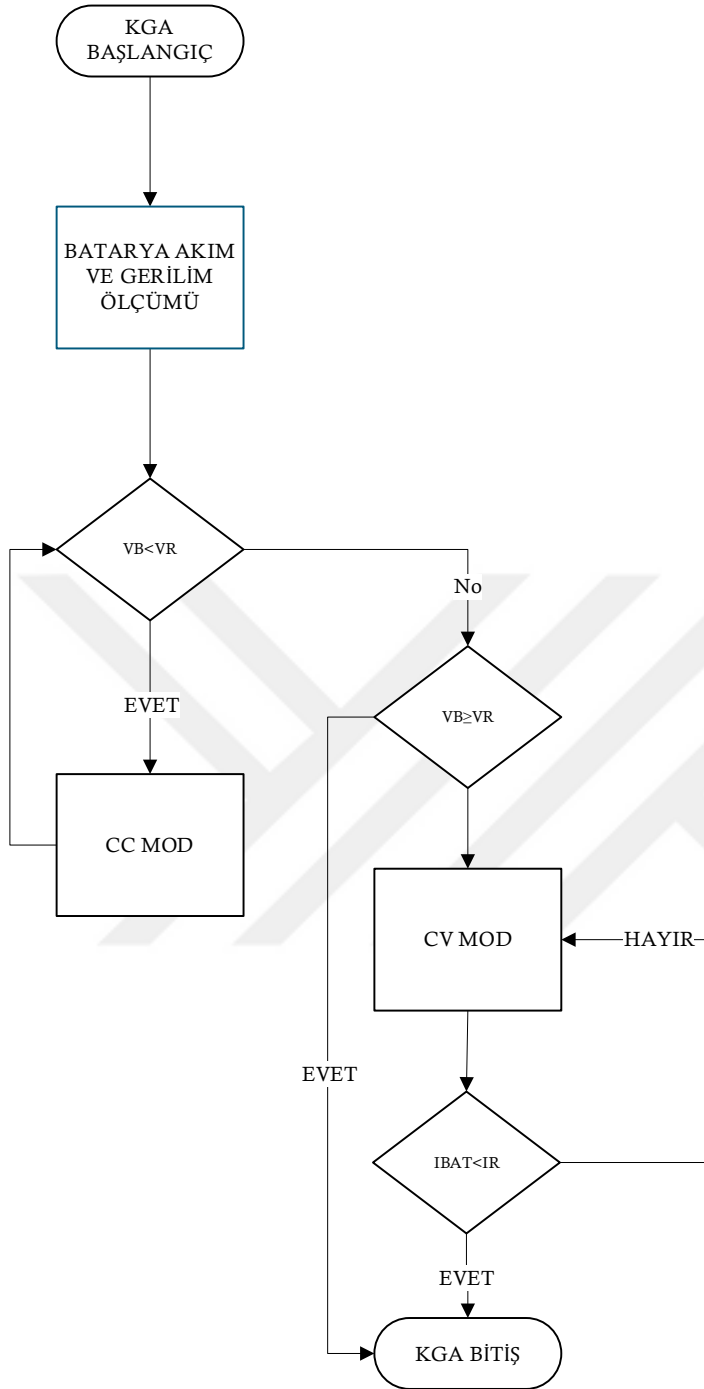
Kontrol mekanizmamız iki aşamalıdır. Birinci aşamada ortak sargılar üst üste değil ve bağlaşım katsayısı değişir. Bu aşamada aktarılan gerilim ve akım değerlerini referans olan 48 V ve 12.5 A seviyesine getirmeliyiz ve 600 W sabit güç aktarmalıyız. İkinci aşamada akım ve gerilim değerlerini istediğimiz seviyede sabit tuttuktan sonra bataryamızı sabit gerilim sabit akım ile şarj etmeliyiz. Yük olarak gerçek bir batarya modeli kullandığımız için batarya şarj sırasında değişken bir karakteristiğe sahiptir ve dolayısıyla endüktans değişiminin yanı sıra yük değişimide sistemi etkilemektedir. Şekil 3.7’da sistemin kontrol blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. KGA sistemi kontrol blok diyagramı

Önerdiğimiz DA-DA dönüştürücü ile öncelikle 48 volt ve 12.5 amper ve 600 W seviyesinde bir güç şarj ünitemize aktarmalıyız. Bunun için hem akım ve hem gerilim için ayrı ayrı bir kapalı çevrim denetleyici tasarlamalıyız. Yük üzerine düşen gerilim değeri, referans gerilimi ile karşılaştırılıyor ve bir PI denetleyici'den geçirilerek dönüştürücü anahtarlarına darbe genişlik modülasyonlu bir sinyal veriyoruz. Ayrıca dönüştürücünün endüktör üzerinden akan akım ile referans akım değerimiz karşılaştırılıyor ve PI denetleyici sayesinde anahtarlama için kullanılıyor.

$V_B < V_R$ olduğu zaman, (V_B batarya gerilimi ve V_R referans gerilimi) DA-DA dönüştürücü anahtarlama modunda çalışıyor ve batarya gerilimi referans gerilime gelene kadar yükseliyor. Bu aşamada bataryaya sabit bir akım uygulanmaktadır (CC mod). $V_B \geq V_R$ olduğu zaman batarya sabit referans gerilim ile şarj ediliyor ve akım azalmaya başlıyor ve batarya dolana kadar akım sıfıra düşmektedir (CV mod). Çekilen akım, bataryanın sabit akım şarj eğrisini sağlamak için tahmin edilen yüke göre ayarlanabilir. Akım döngüsü sadece akım hareketini izler ve yükün değişimine göre bataryanın karakteristik özelliklerine göre kendisini ayarlar. Kullanılan bu denetleyici, alıcı CV modundayken iletim akımını değiştirerek çıkış gücünü ayarlar ve iletim akımı her değişken yük için ayarlıyor. CV aşamasında alıcının geri besleme durumuna göre gerilim kapalı döngü kontrolü kullanılır. Batarya şarj akış şeması Şekil 3.8'da gösterilmektedir. Sistemin genel benzetimi MATLAB programı ile yapılmıştır ve Şekil 3.9'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Batarya sabit gerilim / sabit akım akış şeması

Bölüm değerlendirmesi

KGA sistemlerinde sargı tasarımı ve deneysel uygulamalara başlamadan önce güç elektroniği ve kontrol mekanizmasında yapılan çalışmalar ve avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Sargıların aynı konumda olmamaları durumunda aktarılan güçte değişim yaşanmaktadır. Literatürde devrenin anlık durumuna yük ve ortak endüktansı ve devrenin vereceği optimum tepkiler incelenmiştir ve çeşitli kontrol yöntemleri önerilmiştir. Önerilen bir çift taraflı kontrol yöntemi ile sargıların aynı konumda olmadığı durumda yük ve ortak endüktans değeri tahmin edilip ve devrenin referans oranları ile karşılaştırıldıktan sonra kullanılan DA-DA dönüştürücü ile sabit akım ve sabit gerilim ile şarj edilmesi sağlanmıştır. 600 W, 48 V ve 12.5 A değerlerinde çalışan bir KGA sisteminin MATLAB ortamında benzetimi yapılmıştır ve kontrol mekanizması sonuçları incelenmiştir. Çalışmamız yeni bir sargı yapısının tasarımı ve diğer sargı modellerine göre analitik ve deneysel olarak üstünlüğünü göstermek olduğu için kontrol mekanizması ile ilgili deneysel uygulamalar gelecek çalışmalarımızda yapılması planlanmaktadır.



4. KGA SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT KARE-ALTIGEN SARGI TASARIMI

KGA sargı tasarımında doğru malzeme seçimi sistemin verimliliğini artırır. (Li ve diğerleri, 2013) yüksek Q Litz teli kullanmanın, aktarım mesafesi 0,5 cm olduğunda yaklaşık %40 verimlilik artışına yol açabileceği gösterilmiştir. Litz teli bakırdan yapılmıştır ve her bir telin kesit alanını en aza indirerek cilt etkisini azaltmak için her bir tel tek bir tel gibi davranacak şekilde birkaç ince izole telden oluşur. Bu sargı modelinin nedeni, son iletkendeki tüm tellerin toplam uzunluğunu eşitlemek, böylece akımlar teller arasında eşit olarak dağıtılır ve toplam eşdeğer direnç azalır.

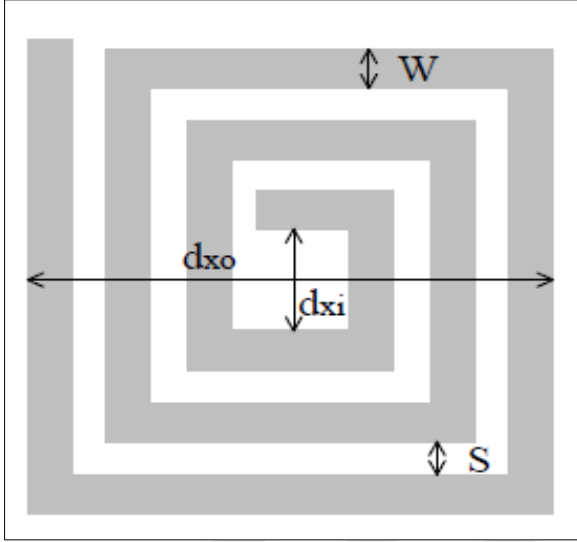
Yüksek frekanslı kayıplarını azaltmak ve Q çarpanını iyileştirmek için sargılar düzlemsel olarak bir tabaka üzerinde birbirinin üstüne gelmeyecek bir şekilde sarılmalıdırlar. Sargı boyutu, KGA sistem tasarımında önemli bir parametredir. Sargı için önemli bir tasarım kısıtlaması alan sınırlamasıdır. Biyomedikal uygulamalar için alıcı sargı boyutu küçük olurken, verici sargı boyutu büyük olabilir. Ancak elektrikli araç şarjı veya endüstriyel uygulamalar için hem verici hem de alıcı sargı geniş yer kaplayabilir. Sargı çapının ve iletim mesafesinin (hava aralığı) oranı da iletim verimliliğini etkileyebilir. Sabit bir Q çarpanı varsayıldığında, hava aralığı (H) sargı çapının (d) yarısından daha küçükse, iletim verimliliği %80'den büyük olacaktır.

Özel akı yoğunlaştırıcılar tipik olarak KGA sistemlerinde verici sargı tarafından üretilen akı hatlarını alıcı sargıya yönlendirmek için kullanılır. Bu akı yoğunlaştırıcılar, bağlaşım performansını, sistem verimliliğini artırmaya ve sistem etrafındaki kaçak akıyı azaltmaya yardımcı olur. Sızıntı akışını azaltarak, sistemin standart güvenlik sınırlarına uyması için basit bir koruyucu kalkan yapılabilir. Çalışmamızda, KGA sistemi herhangi bir manyetik çekirdek (akı yoğunlaştırıcı) olmadan çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, KGA sistemini daha ucuz, hafif ve tasarım ve entegrasyonda daha basit hale getirir. Ayrıca manyetik çekirdekle ilişkili kayıpları da ortadan kaldırır.

Sargı geometrisinin verimlilik üzerinde çok önemli rolü var. Performansı artırmak ve verici ile alıcı pedleri arasındaki yanlış hizalama sorunlarını çözmek için KGA tasarımlarında dairesel, dikdörtgen ve hibrit düzenlemeler gibi çeşitli sargı şekilleri

kullanılmaktadır. Çalışmamızda kare sargı yapısı ile önerdiğimiz hibrit kare-altıgen sargı yapısı mükemmel hizalama ve yanlış hizalama durumlarında karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1’de kare sargı yapısı gösterilmektedir. N sarım sayısı, w kenar kesit genişliği, s sargılar arasındaki mesafe, d_{xi} sargının iç uzunluğu ve d_{xo} sargının dış çap uzunluğudur.



Şekil 4.1. Kare sargı yapısı

Dış kenar uzunluğu d_{xo} , diğer geometrik parametrelerden şu şekilde elde edilir:

$$d_{xo} = d_{xi} + 2[N.w + (N - 1).s] \quad (4.1)$$

Kare sargı yapısında öz endüktans aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$L = 2.34 * \mu_0 * \frac{N^2 * d_{ort}}{1 + 2.75 * \Phi} \quad (4.2)$$

$$d_{ort} = \frac{d_{xo} + d_{xi}}{2} \quad (4.3)$$

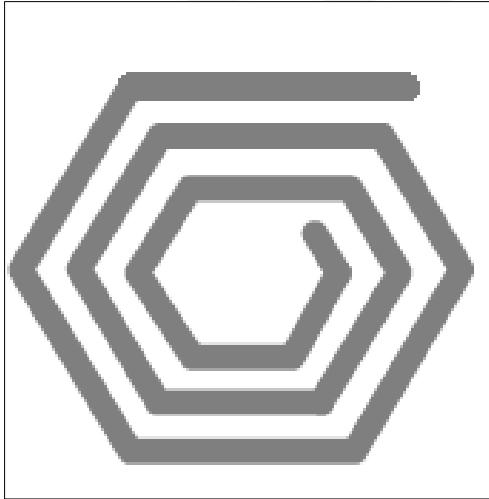
$$\Phi = \frac{d_{xo} - d_{xi}}{d_{xo} + d_{xi}} \quad (4.4)$$

Verici ve alıcı sargı fiziksel olarak aynı olduğunu göz önüne alırsak, ortak endüktans şu şekilde açıklanabilir. Burada h hava aralığını göstermektedir.

$$M = \frac{2N^2\mu_0}{\pi} \left[d \ln \left(\frac{d_{ort}+b}{d_{ort}+X} * \frac{b}{h} \right) + (X - 2b + h) \right] \quad (4.5)$$

$$b = (d_{ort}^2 + h^2)^{1/2} \text{ ve } X = (2d_{ort}^2 + h^2)^{1/2} \text{ ve } \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \quad (4.6)$$

Altıgen sargılarının endüktans hesapları, Biot Savart yasası kullanılarak elde edilen karmaşık integrallerin çözümünü gerektirir. Ancak bu işlem, bobinin iç alanının dikdörtgen ve üçgen parçalara bölünmesi gibi bazı yaklaşımlar kullanılarak basitleştirilebilir (Tavakkoli ve diğerleri, 2016). Ancak, üçgen alanlar için karmaşık integrasyon adımları mevcuttur ve çeşitli integrasyon katsayıları kullanılmalıdır. Bobinin iç bölgesindeki toplam akı, bu akı değerleri toplanarak elde edilebilir. Şekil 3.2’de altıgen sargı yapısı gösterilmektedir.

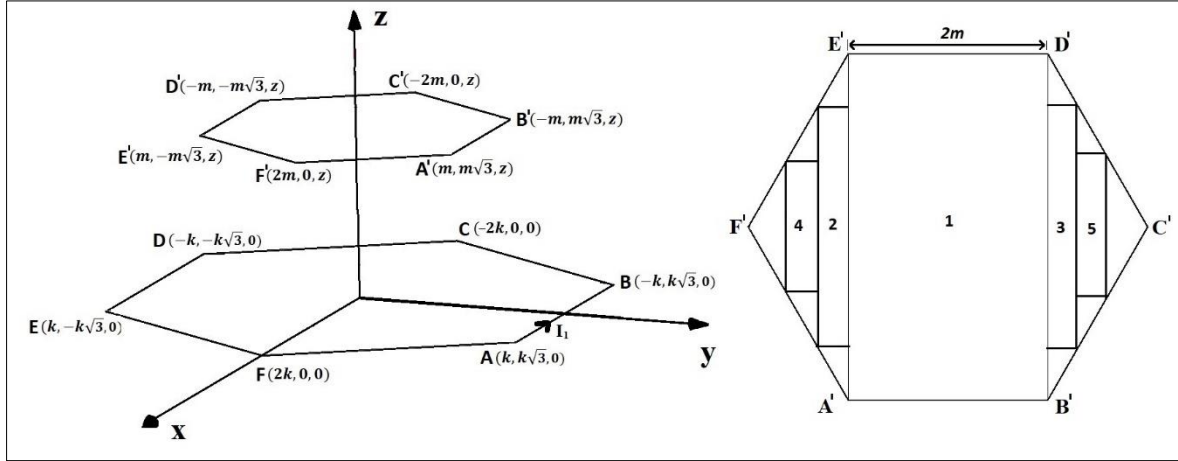


Şekil 4.2. Altıgen sargı yapısı

Bu çalışmada kullanılan yaklaşım, üçgen alanları Şekil 4.3'te gösterildiği gibi daha küçük dikdörtgen parçalara bölmektir (Aydın ve diğerleri, 2021). Daha sonra, akı yoğunluğunu hesaplamak için her küçük bölge için Biot Savart yasasına dayalı basit manyetik akı denklemleri çözülür. Eş 4.7 kullanılarak her alan için manyetik akı yoğunluğu hesaplanabilir.

$$\vec{B}_1 = \frac{u_0 I_1}{4\pi} \frac{(y_1 - 2k\sqrt{3})}{[(y_1 - 2k\sqrt{3})^2 + z_1^2]} \left[\frac{x_1 + 2k}{\sqrt{((x_1 + 2k)^2 + (y_1 - 4k\sqrt{3})^2 + z_1^2)}} - \frac{-x_1 + 2k}{\sqrt{((x_1 - 2k)^2 + (y_1 - 2k\sqrt{3})^2 + z_1^2)}} \right] \hat{k} \quad (4.7)$$

burada u_0 havanın manyetik geçirgenliği ve B_1 verici sargıdan geçen akımın oluşturduğu alıcı sargıdaki iç bölgesindeki herhangi bir $P(x_1, y_1, z_1)$ noktasındaki manyetik akı yoğunluğudur. Şekil 4.3'te, $2k$ ve $2m$ sırasıyla tek dönüşlü birincil ve ikincil bobinlerin yan uzunluklarını göstermektedir. Çok dönüşlü spiral bobinler için doğru bir endüktans değeri hesaplamak için ortalama bir kenar uzunluğu ($2k_{ort}$) kullanılmalıdır.



Şekil 4.3. Belirtilen koordinatlarda tek dönüşlü altıgen sargının gösterimi

$$2k_{ort} = \frac{2k_{dış} - [Nw + (N-1)g]}{2\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

N sarım sayısını, w iletken çapını, g ise iletkenler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bir bobin tarafından çevrelenen alanın sektörlere ayrılmasının ilk adımında, ortadaki en büyük dikdörtgen alan oluşturulur. Daha sonra, bu bölgenin her iki tarafı simetrik bir şekilde daha küçük dikdörtgenlere bölünür, örneğin bir tarafta 2-3, diğer tarafta 4-5 özdeş bölgeler elde edilir. Bölme işlemi devam ettikçe ve daha fazla dikdörtgen parça oluşturuldukça, kenarlarda kalan üçgen bölgeler çok küçülür ve ihmal edilebilir. AEF ve BCD ana üçgen alanlarında en uygun dikdörtgen alt alan sayısını bularak doğru bir endüktans değeri elde etmek için bir iterasyon işlemi uygulanır.

(Aydın ve diğerleri, 2021) altıgen endüktans hesaplaması için algoritma çalışması yapmışlar. Hesaplanan değer doğru kabul edilip nihai endüktans değeri olarak alındığından, belirlenen değişime ulaşırsa algoritma bölgelerin bölünmesini durdurur. Oluşturulan ikizkenar üçgenin yüksekliği n özdeş parçaya bölünmüştür. Dikdörtgen

bölgelerin sayısı i adlandırılır. Böylece, i 'den n -i'ye dikdörtgen parçalarda hesaplanan akının toplamı, eşdeğer üçgen bölgenin toplam akısını verir.

$$\varphi =$$

$$\frac{u_0 I}{4\pi} \int_{-m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)}^{m\sqrt{3}\left(\frac{n-i}{n}\right)} \int_{-m\sqrt{3}\left(\frac{n+i-1}{n}\right)}^{m\sqrt{3}\left(\frac{n+i}{n}\right)} \frac{(k\sqrt{3}-y_1)}{\left[(k\sqrt{3}-y_1)^2+z_1^2\right]} \left[\frac{x_1+k}{\sqrt{\left((x_1+k)^2+(-y_1+k\sqrt{3})^2+z_1^2\right)}} - \frac{-x_1+k}{\sqrt{\left((-x_1+k)^2+(-y_1+k\sqrt{3})^2+z_1^2\right)}} \right] dx_1 dy_1 \quad (4.9)$$

Eş 4.9 üçgen bölgelerin bölünmesiyle elde edilen küçük dikdörtgen parçalar için akı hesabını ve integral sınırlarını göstermektedir (Aydın ve diğerleri, 2021). İki altıgen sargının arasındaki karşılıklı endüktans, verici sargının bir kenar uzunluğundan (AB) akan akım tarafından üretilen alıcı sargının iç bölgesindeki manyetik akı hesaplanarak bulunabilir. Büyük dikdörtgen ve özdeş üçgen alanlarının akılarının toplamı, AB segmenti tarafından üretilen ikincil bobinin iç alanı için akı değerini verir.

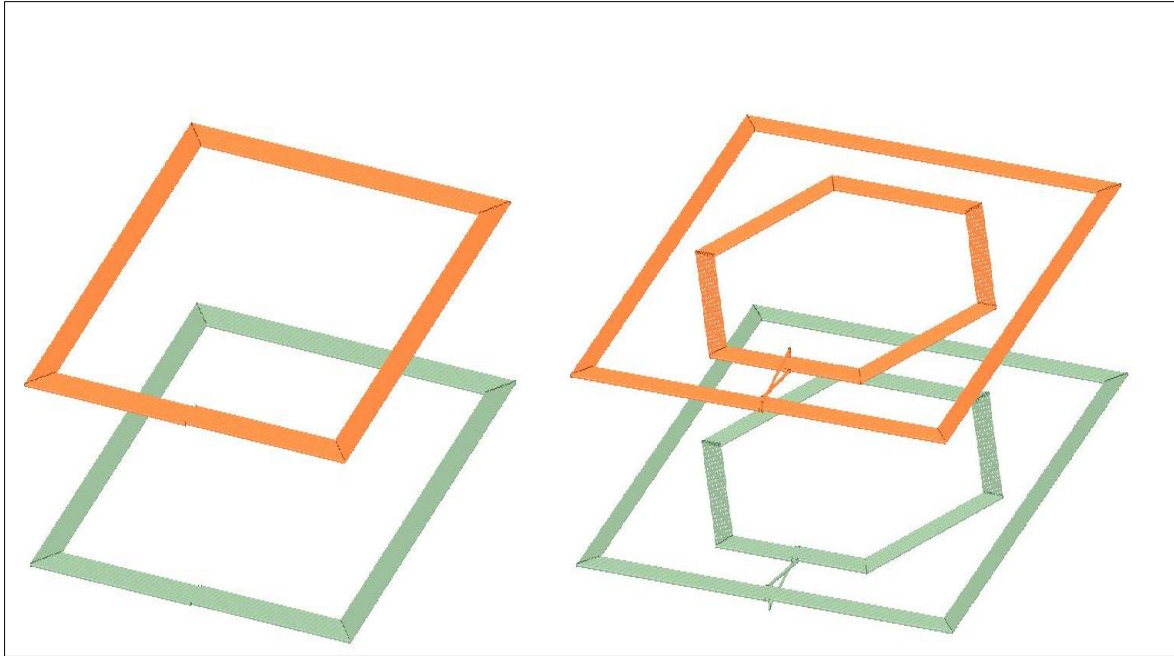
$$M = N_1 N_2 \frac{\varphi_{Top}}{I} \quad (4.10)$$

$$\varphi_{Top} = 6 * \varphi_{AB} \quad (4.11)$$

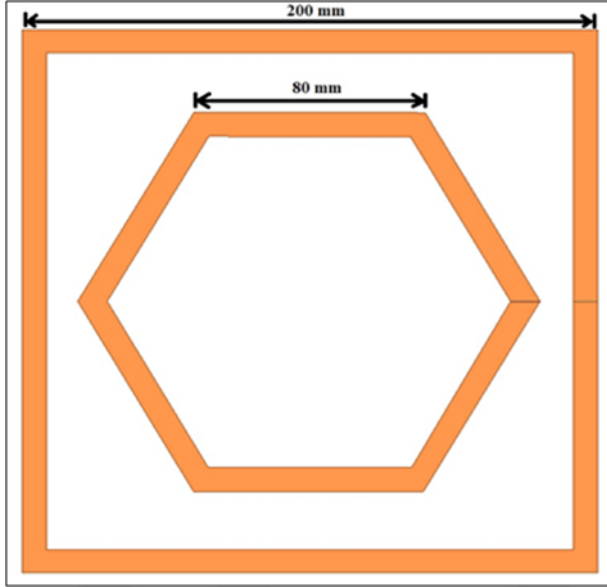
Tez çalışmamızda ortak endüktans ve öz endüktans hesaplaması için sonlu elemanlar analizi (SEA), ANSYS Maxwell programı üzerinde tasarlanan sargı yapısının değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu parametrelerin doğruluğunu ölçmek için laboratuvar ortamında Litz telleri ile sargı yapısı sarılmıştır ve LCR metre ile ölçüm yapılmıştır. SEA ve sarılan sargıların değerleri birbirleri ile örtüşmektedir.

Önerdiğimiz hibrit sargı yapısının avantajı kare ve altıgen sargı yapılarının ayrı ayrı özelliklerini birleştirerek sonuçlanmaktadır. Sargı sarımı yapıldığı zaman öncelikle altıgen sargı yapısından başlamak suretiyle sarımın devamını akım yonu aynı olacak şekilde sarılarak kare kısmına geçilmiştir. Bu yapının özelliği ise kare ve altıgen sargılarının akım yoğunluklarının toplandığı ve ayrı ayrı kare ve altıgen sargılarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tez çalışmamızda 50 W gücünde ve 5 cm hava aralığına sahip bir Kablosuz Güç Aktarım (KGA) sisteminin tasarımına yönelik benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sargı dış boyutları primer ve sekonder sargılar için eşit ve kare kısmı için 200*200 mm ve altıgen kısım için 80*80 mm olarak seçilmiştir. Önerilen yenilikçi sargı yapısı olan kare-altıgen hibrit yapının boyutlarına ilişkin detaylı gösterim Şekil 4.5’de verilmiştir. Sargı yapısının belirlenmesi için ise, en yaygın kullanıma sahip olan kare sargı yapısı ve önerilen yapı olan kare-altıgen hibrit sargı yapılarının farklı koşullarda analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’de geleneksel kare sargı yapısı ve önerilen kare-altıgen Hibrit sargı yapısının oluşturulan üç boyutlu (3B) modelleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. SEA programında oluşturulmuş 3B sargı modelleri, a) kare b) kare-altıgen



Şekil 4.5. Kare-altıgen Hibrit modele ait kenar uzunlukları

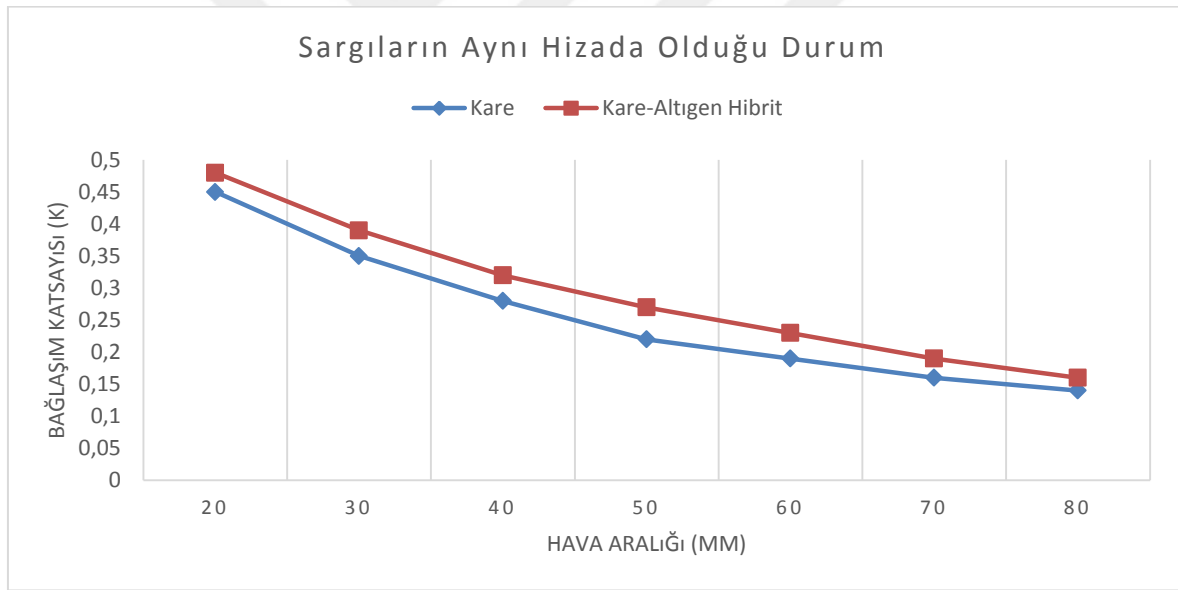
Sargı tasarımında önemli parametrelerden biri olan hizalanma toleranslarının karşılaştırılmasıdır. Öncelikle karşılaştırmanın adil olabilmesi için iki farklı sargı yapısında kullanılan bakır miktarının eşit olması sağlanmıştır. Buna göre, kare sargı yapısının on üç sarımdan, kare-altıgen hibrit yapının ise kare ve altıgen kısımlarının birbirine eşit ve sekizer sarımdan oluşması gerekir. Bu durumda her iki yapıda da primer ve sekonder taraflar için kullanılan bakır miktarı toplamı 15.356 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Bu amaçla literatürde olan kare yapısı ile çalışmamızda önerilen yenilikçi kare-altıgen hibrit yapısının sargıların X ve Y ekseninde aynı hizada olduğu ama hava aralığı değişiminden kaynaklanan bağlaşım katsayısına etkisi Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Hava aralığı değişiminin bağlaşım katsayısına olan etkisi

Hava aralığı (mm)	Bağlaşım Katsayısı (k)	
X=0, Y=0	Kare	Kare-Altıgen
20	0.45	0.48
30	0.35	0.39
40	0.28	0.32
50	0.23	0.27
60	0.19	0.23
70	0.16	0.19
80	0.14	0.16

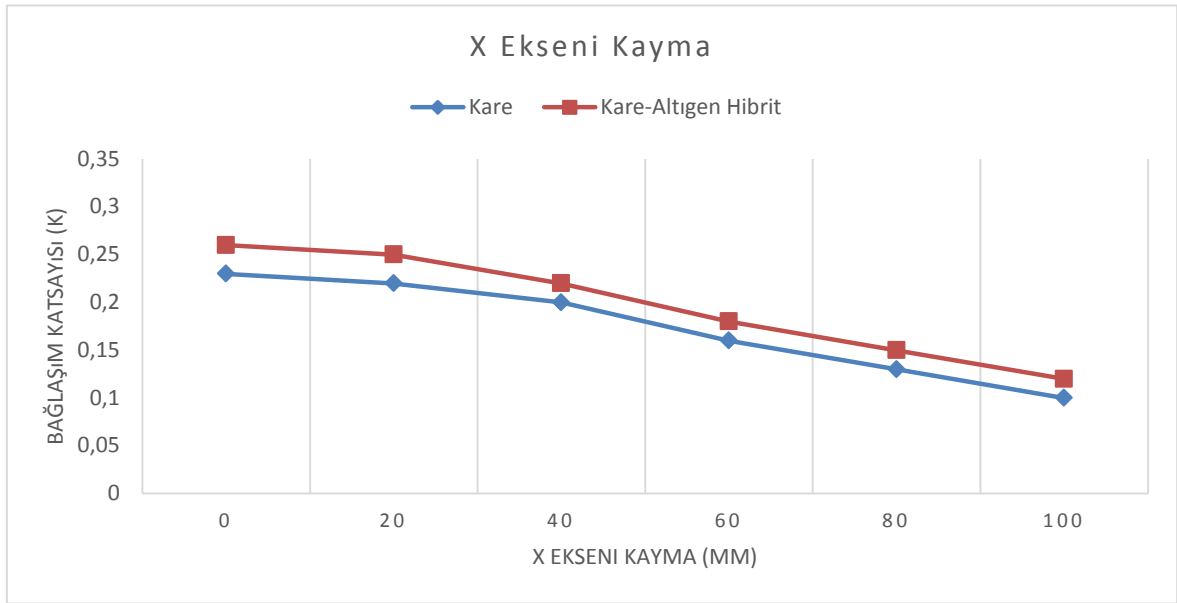
Sargı tasarımında ve istenilen gücün elde edilebilmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerden biri bağlaşım katsayısıdır (k). Şekil 4.4'te verilen iki farklı sargı modelinin bağlaşım katsayılarının incelenmesi amacıyla primer ve sekonder sargılar arasındaki hava aralığı değişiminin, sekonder sargının x ve y eksenlerinde hareket ettirilmesi ile oluşacak olan hizalanma probleminin bağlaşım katsayısına etkisi incelenmiştir. Benzetim çalışmaları Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) yöntemine dayanan bir yazılım olan ANSYS Maxwell programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.6 ile Şekil 4.10 arasında, sekonder sargının farklı pozisyonlarına karşı bağlaşım katsayısının değişiminin incelendiği grafikler verilmiştir. Çizelge 4.1'de gösterildiği üzere sargıların aynı hizada ama hava aralığının değiştiği durumda kare – altıgen yapısında bağlaşım katsayısı daha iyi sonuçlar elde etmektedir.



Şekil 4.6. Hava aralığının bağlaşım katsayısına etkisi

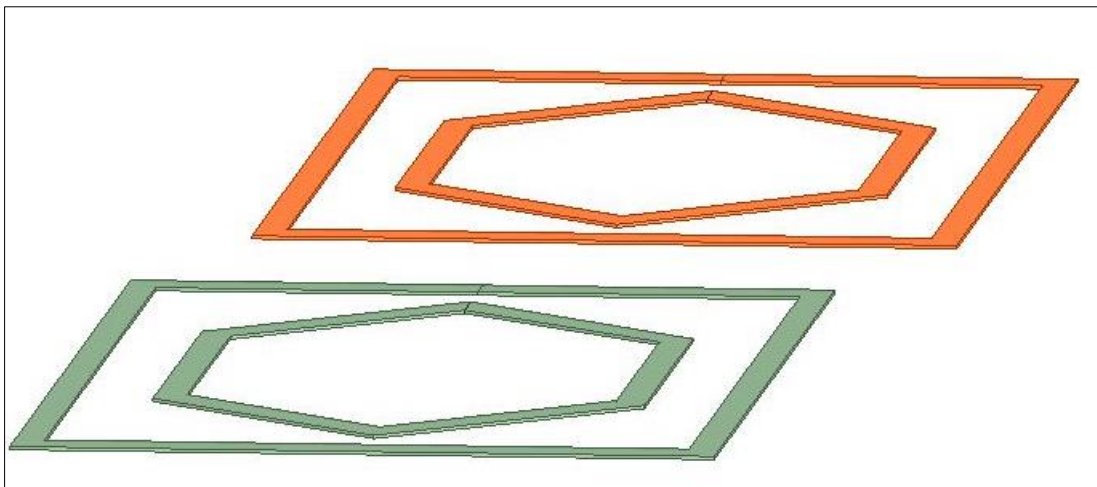
Sargıların X ekseninde tam hizalamadan 100 mm kaymaya kadar bağlaşım katsayısında etkisi çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.7 ve 4.9'de sekonder sargısının X ve Y ekseninde kayma durumunda bağlaşım katsayısına olan etkisi gösterilmektedir. ANSYS Maxwell SEA analizleri sırasında X ve Y ekseninde kayma görseli şekil 4.8'de gösterilmiştir.



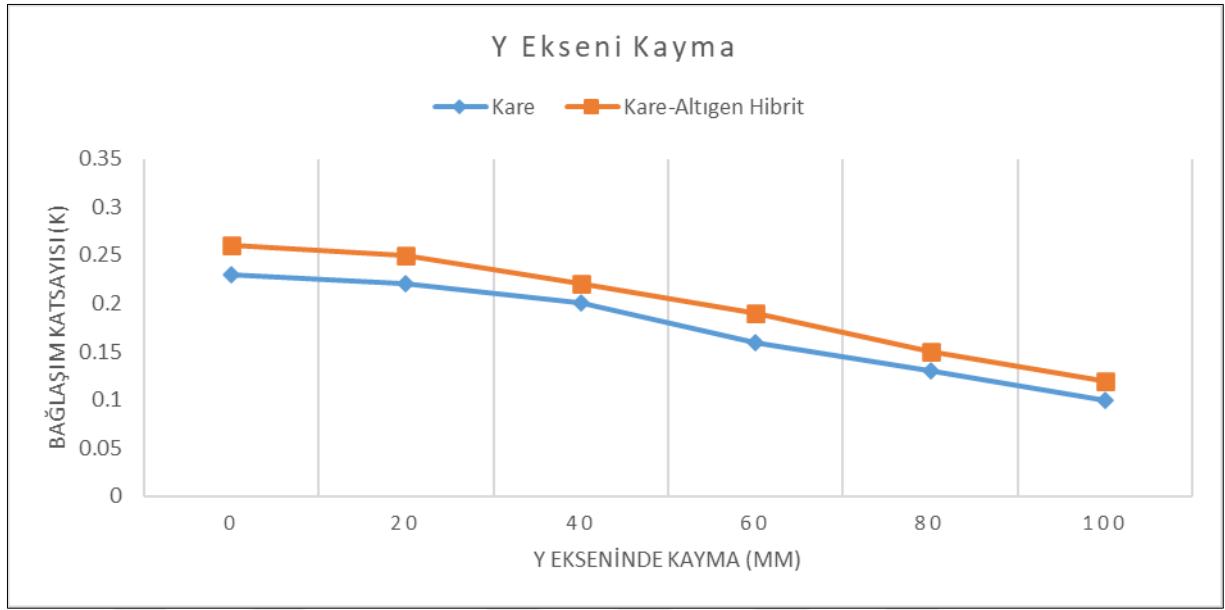
Şekil 4.7. Sekonder sargının X ekseninde kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi

Çizelge 4.2. X ekseninde kaymanın bağlaşım katsayısına olan etkisi

Kayma miktarı	Bağlaşım katsayısı (k)	
	Kare	Kare-Altıgen
X eksenine		
0 mm	0.23	0.26
20 mm	0.22	0.25
40 mm	0.20	0.22
60 mm	0.16	0.17
80 mm	0.13	0.15
100 mm	0.10	0.12



Şekil 4.8. ANSYS Maxwell ortamında X ekseninde kayma

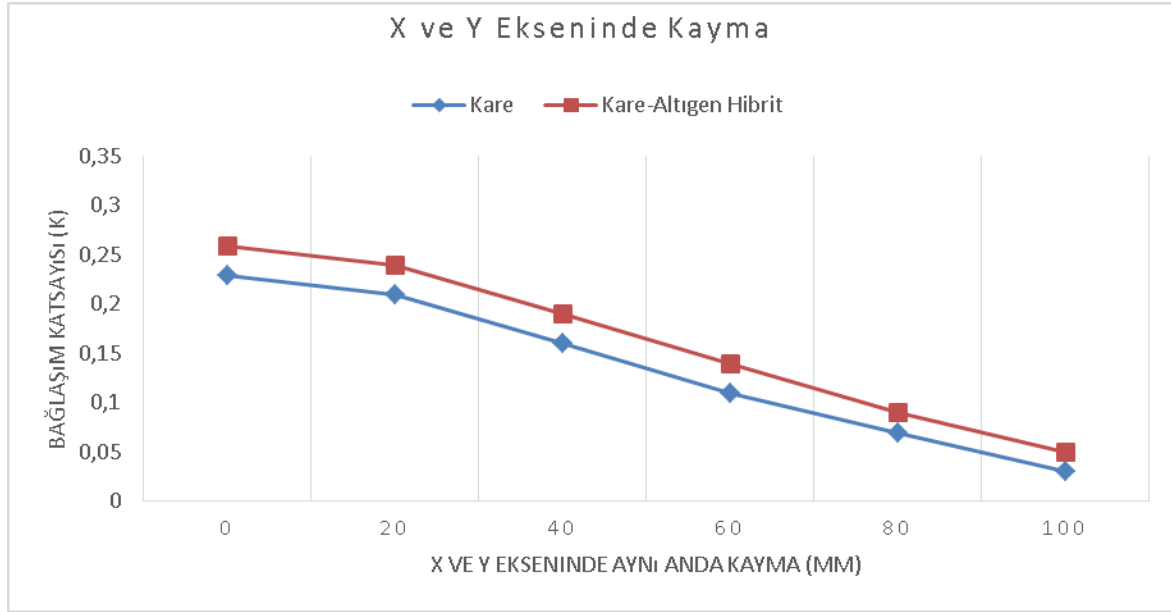


Şekil 4.9. Sekonder sargının Y ekseninde kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi

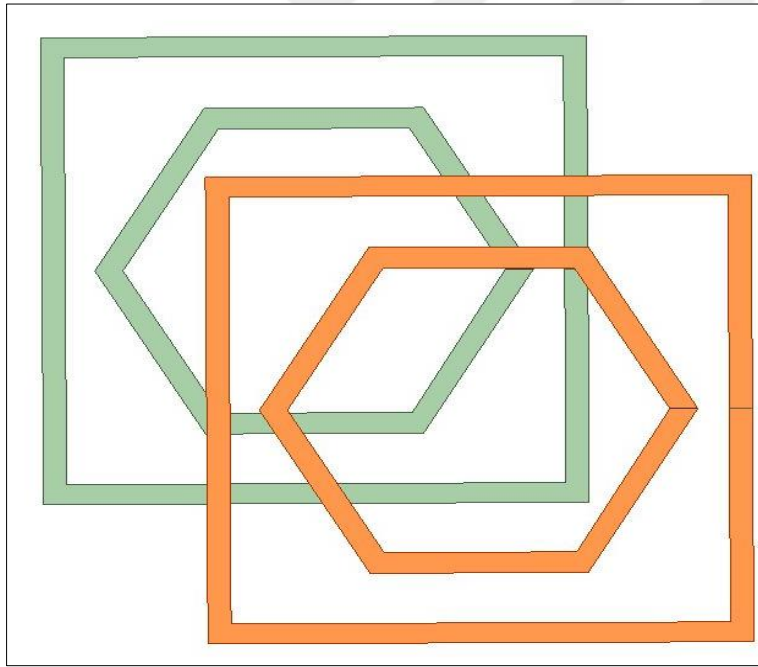
KGA sistemlerinde en son istediğimiz durum sargıların hem X ve hem Y ekseninde aynı anda kaymasıdır. Önerdiğimiz kare altıgen sargı yapısında bu durumda karşılaştırma yaptığımız kare sargı yapısına göre bağlaşım katsayısının daha az etkilendiğini görmekteyiz. Çizelge 4.3 ve şekil 4.10’da sonuçlar gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.11’de ANSYS Maxwell’de X ve Y ekseninde aynı anda kayma görseli gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. X ve Y ekseninde kaymanın bağlaşım katsayısına olan etkisi

Kayma miktarı	Bağlaşım katsayısı (k)	
	Kare	Kare-Altıgen
X ve Y eksen		
0 mm	0.23	0.26
20 mm	0.21	0.24
40 mm	0.16	0.19
60 mm	0.11	0.14
80 mm	0.07	0.08
100 mm	0.03	0.05



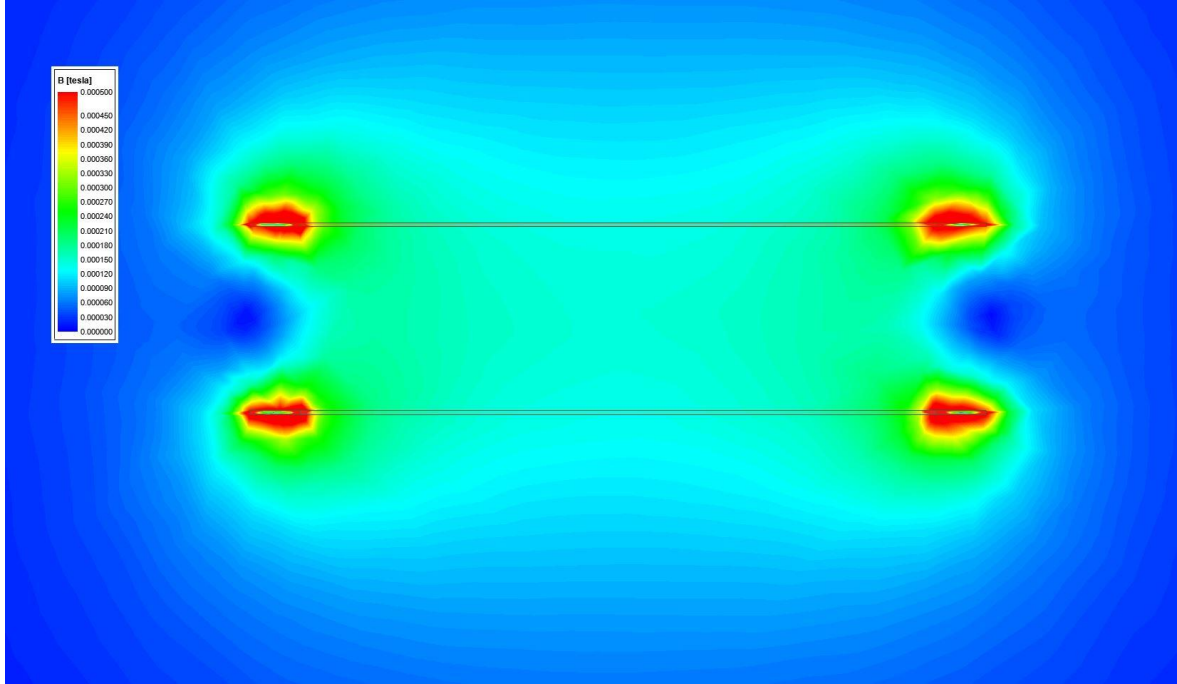
Şekil 4.10. Sekonder sargının X ve Y eksenlerinde aynı anda kaymasının bağlaşım katsayısına etkisi



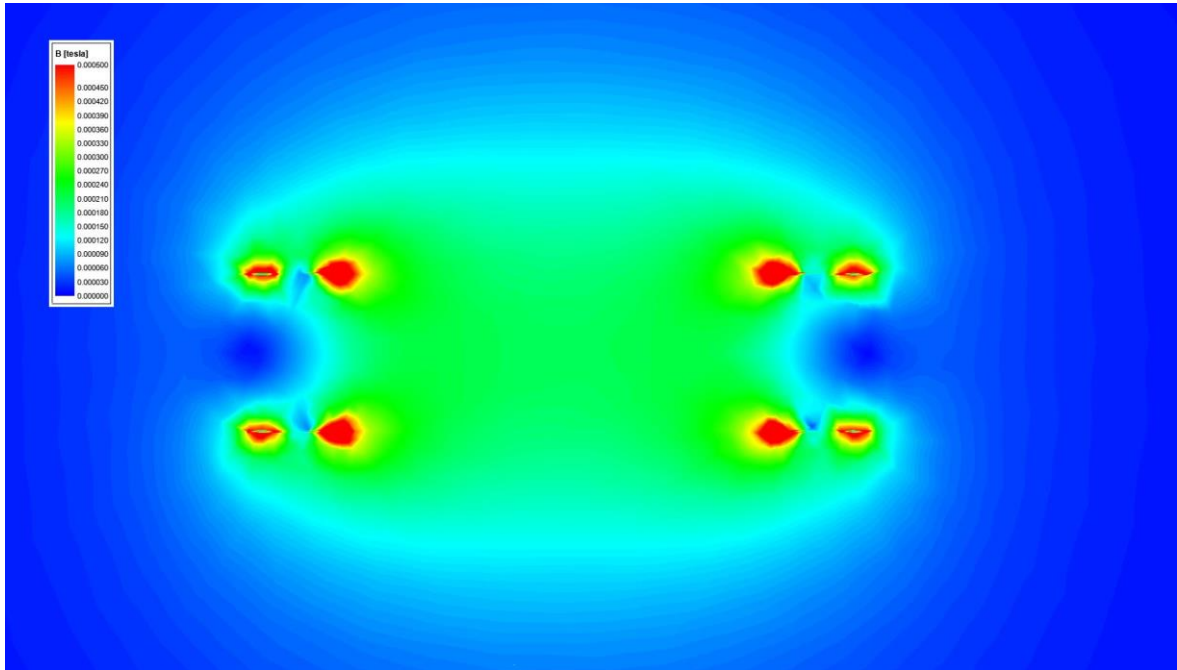
Şekil 4.11. ANSYS Maxwell ortamında X ve Y ekseninde aynı anda kayma

Sonuçlar incelendiğinde mükemmel hizalı durumda ve hava aralığının 5 cm olduğu durumda önerilen sargı yapısının bağlaşım katsayısı değeri 0.27 iken geleneksel kare sargı yapısının bağlaşım katsayısı değeri 0.23 olmaktadır. Bu da %17 daha yüksek bir bağlaşım anlamına gelmektedir. Farklı koşulların analiz sonuçları incelendiğinde her durum için önerilen yapının daha üstün olduğu görülmektedir.

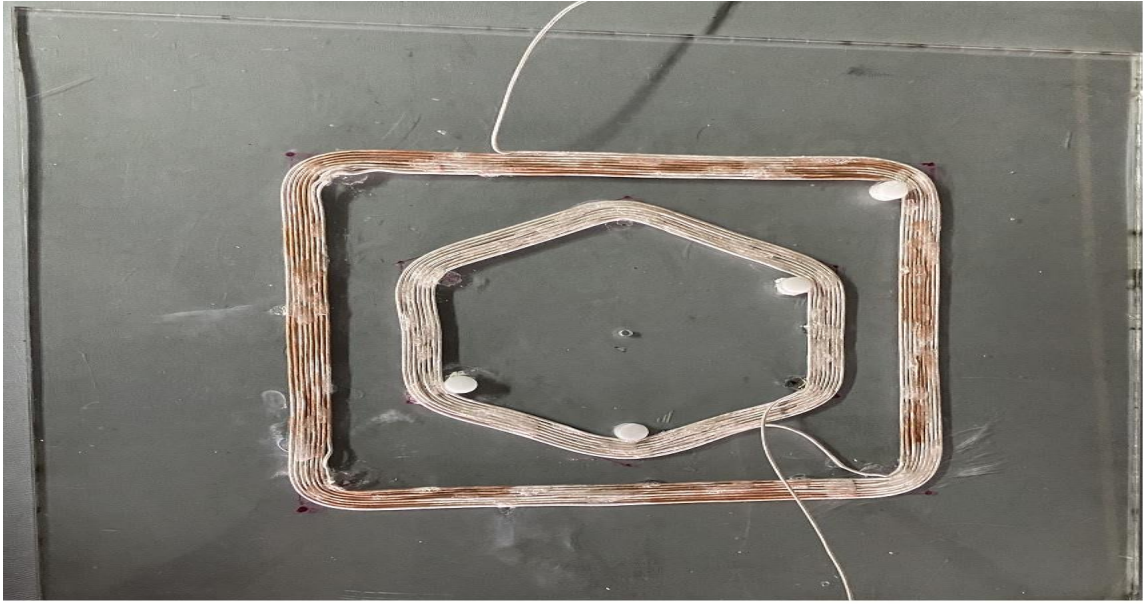
Ayrıca iki modelin manyetik akı dağılımlarına ait görseller Şekil 4.12 ve 4.13’de verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelendiğinde önerilen sargı modelinde akının primer ve sekonder sargılar arasında yoğunlaştığı görülürken, klasik yapıda merkez noktada zayıfladığı görülmektedir.



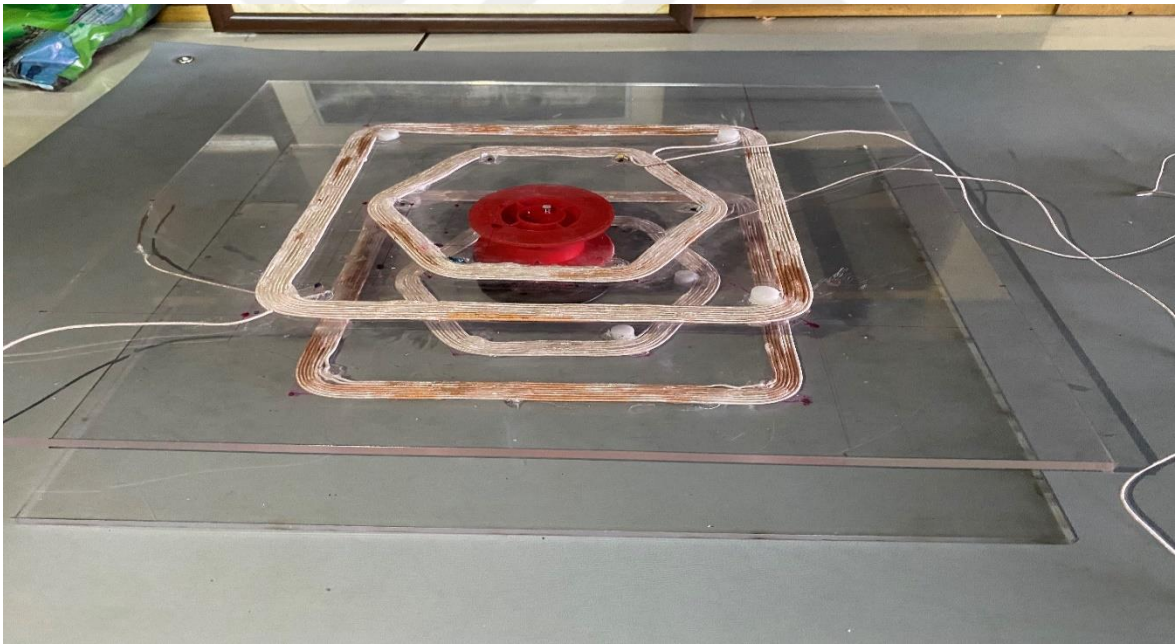
Şekil 4.12. Kare sargı yapısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.13. Kare-Altıgen Hibrit sargı yapısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.14. Primer sargı yapısı



Şekil 4.15. Primer ve sekonder sargı yapısı

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiği zaman kare sargı yapısında manyetik alan yoğunluğu kenarlarda daha fazladır ama hibrit kare-altıgen yapısında yoğunluk merkezde daha fazladır. Bu sargı modelinde iki sargının tüm alanında manyetik alan yoğunluğu fazla olmaktadır ve buda daha verimli bir system demektir. Ayrıca kayma sonucu meydana gelen bağlaşım katsayısı değişimleri daha az olmaktadır.

Bölüm değeriendirmesi

Bu bölümde öncelikle kare-altıgen sargı yapısı tanıtılmıştır. Bu sargı yapısı kare sargı yapısı ile karşılaştırılmıştır ve kayma durumlarında bağlaşım katsayısı açısından daha az etkilenmektedir. Ayrıca verim açısından daha yüksek bir verime sahiptir.

Laboratuvar ortamında ve litz teller ile kare-altıgen sargı yapısı sarılmıştır ve adil bir karşılaştırma yapılmaı için kare altıgen sargı yapısının sekizer sarımdan oluşması sağlanmıştır. LCR metre sayesinde sarılan sargının ortak ve öz endüktans değeri ölçülmüştür ve SEA analizlerinde elde edilen değeriye çok yakın bir değeri elde edildiğı görülmüştür.



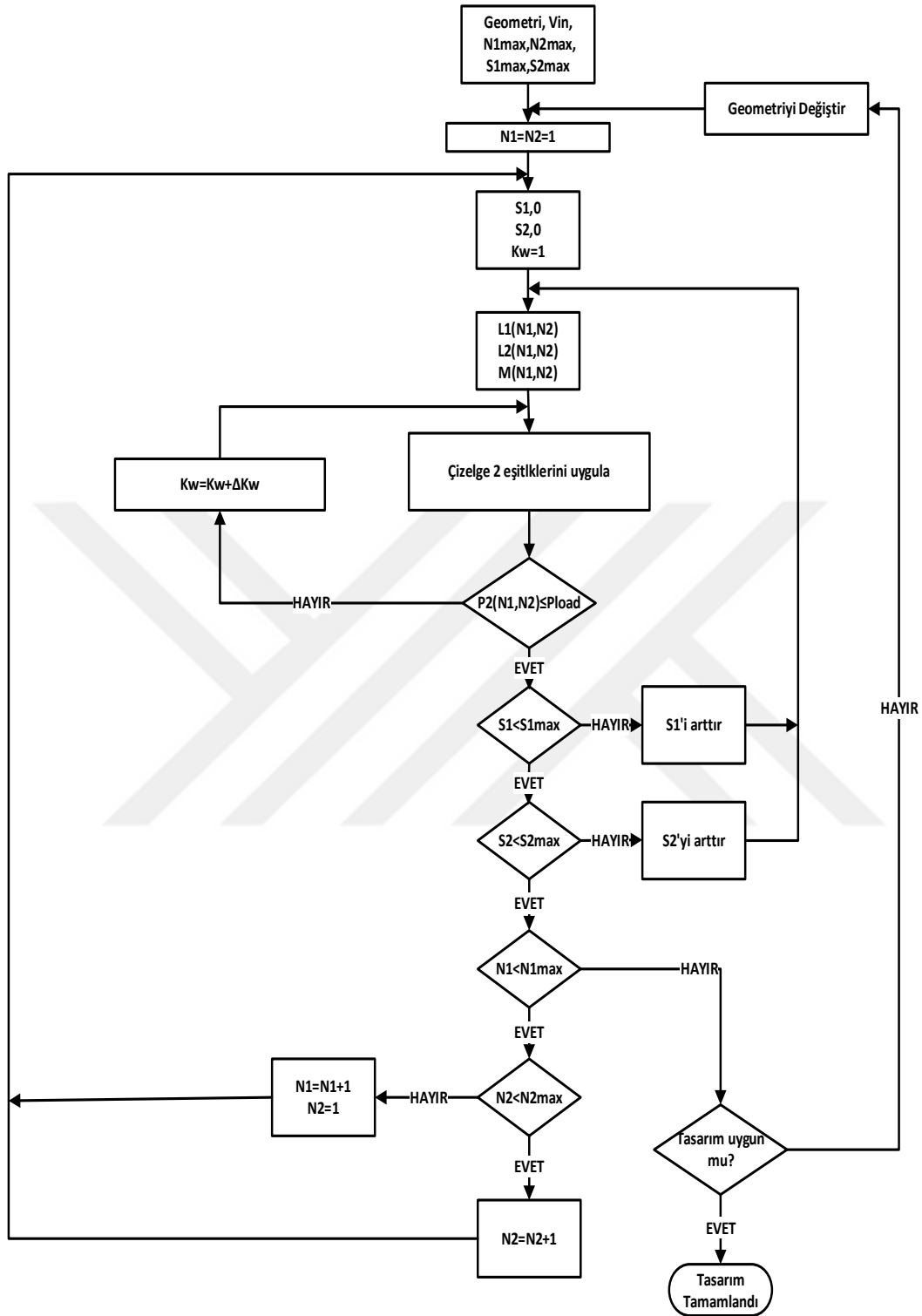
5. HİBRİT KARE-ALTİGEN YAPISI İLE 50 W GÜCÜNDE BİR KGA SİSTEMİN TASARIMI, BENZETİMİ VE DENEYSEL GERÇEKLEŞTİRMESİ

Bu bölümde daha önceki bölümlerde tasarımı yapılan hibrit kare – altıgen sargı yapısının 50 W gücünde bir KGA sistemi için tasarımı, benzetimi ve uygulaması yapılmaktadır. Çizelge 5.1’de gerçekleştirilmek istenen sisteme ait parametreler verilmiştir.

Çizelge 5.1. Hedeflenen sistem tasarımı

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi (V)	25
Çıkış Gerilimi (V)	25
Çıkış Gücü (W)	50
Çalışma Frekansı (KHz)	85
Hava Aralığı (cm)	5
Çıkış Akımı (A)	2.5

Tasarımı hedeflenen sistemin topolojisi ikinci bölümde gösterilen Şekil 2.5’te verilen şema ile aynıdır. Kompanzasyon topolojisi olarak SS yapısı seçilmiştir. Sistemin rezonasta çalışması için öncelikle rezonans parametrelerinin matematiksel hesabı yapılmıştır. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’te SS kompanzasyon devresi için ilgili parametrelerin eşitlikleri gösterilmiştir. Bu çizelgede bulunan ve ikinci bölümde elde edilen eşitlikler verilen tasarım algoritmasında (Sallan ve diğerleri, 2009) kullanılarak hedeflenen güç aktarımının gerçekleştirilmesini sağlayacak en uygun tasarım parametreleri yazılan MATLAB kodu ile elde edilmiştir. Şekil 5.1’de rezonans parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan akış şeması gösterilmiştir. Hibrit kare-Altıgen sargı boyutları kare kısmı için 200 mm ve altıgen kısmı için 80 mm olarak seçilmiştir. Bu değerler 50 W güce sahip KGA sistemi için hesaplanmıştır. Çizelge 2.3’te verilen değerler kullanılarak 50 W gücünde ve kare altıgen sargı yapısına ait bir KGA sisteminin tasarım parametreleri elde edilmiş ve Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

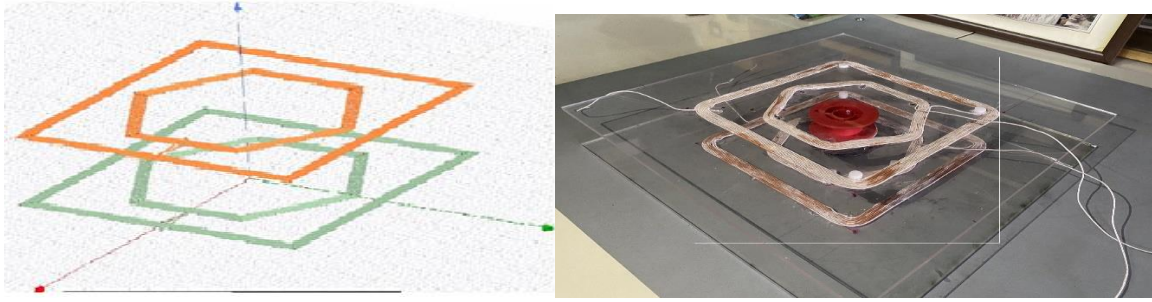


Şekil 5.1. Endüktans ve rezonans devre parametreleri hesabı akış şeması

Çizelge 5.2. Sistem tasarım sonuçları

Parametre	Hesaplanan Değer
C_1 (nF)	49.72
C_2 (nF)	49.72
L_1 (μ H)	70.19
L_2 (μ H)	70.19
M (μ H)	18.83
f (kHz)	85
Q_p	3.96
Q_s	3.39
S_1 (mm ²)	0.78
S_2 (mm ²)	0.78
I_1 (A)	2.52
I_2 (A)	2.28
$R_{yük}$ (Ω)	14
Verim (%)	93.5

Çizelge 5.3'te verilen tasarım parametreleri kullanılarak, sistemin manyetik yapısını oluşturan sargılar ANSYS Maxwell programında üç boyutlu olarak çizilip analizleri yapılmış ve endüktans hesaplamalarının doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca, sistemin genel çalışmasının doğrulanması amacıyla ANSYS Simplerer programı ile tüm sisteme ait devre şeması oluşturulmuş ve tasarım performansı incelenmiştir. Şekil 5.2'de sargılara ait üç boyutlu çizimler ve laboratuvarında üretilmiş sargılar gösterilmektedir.



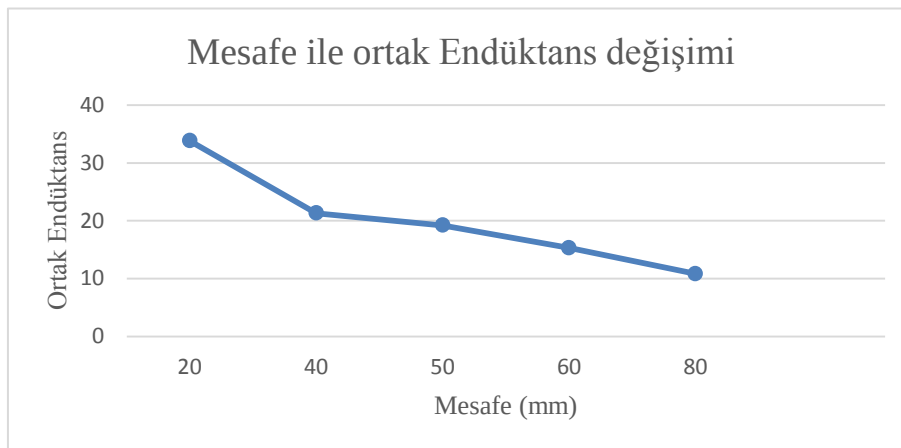
Şekil 5.2. Üretilen ve üç boyutlu SEA modelleri oluşturulan sargılar

Sargıların sarımında iletken kesiti 0.78 mm² olan AWG 33 litz teli kullanılmıştır. Üretilen sargıların öz ve ortak endüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüş, SEA ve nümerik yöntemle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.3. Öz ve ortak endüktans değerlerinin SEA ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Yöntem	Öz Endüktans (μH)		Ortak Endüktans (μH)
	Primer	Sekonder	
SEA	70.19	70.19	18.83
Ölçüm	69.1	69.3	19.2
Hata (%)	1.5	1.26	1.92

Çizelge 5.3'te baktığımız zaman SEA analizleri sonucunda elde edilen değerler sarılan sargı yapısında ölçülen değerler ile çok yakın olmaktadır ve hata oranı çok düşüktür. Tasarlanan sargıların hava aralığından kaynaklanan ortak endüktans değişimi Çizelge 5.4'te ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

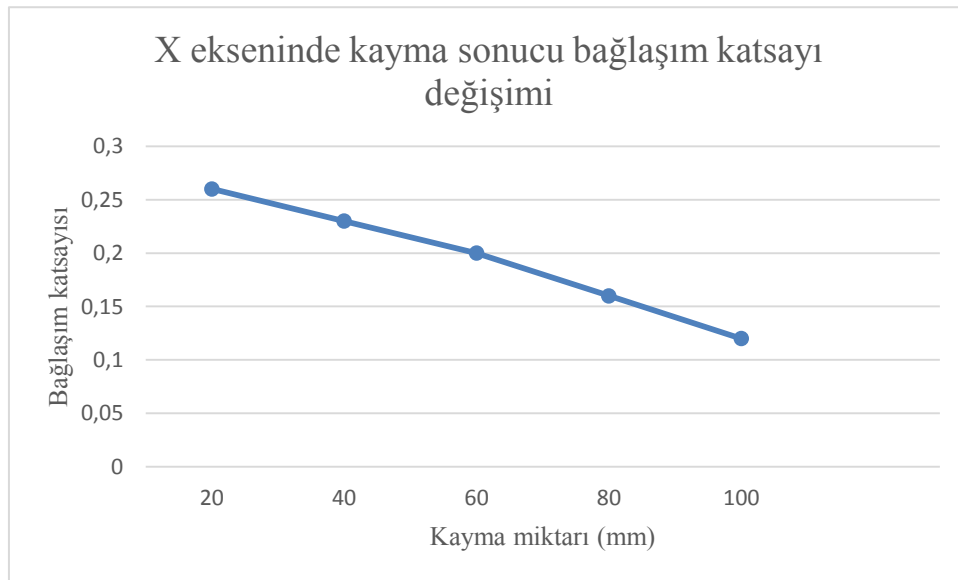


Şekil 5.3. Hava aralığı değişiminin ortak endüktansa olan etkisi

Çizelge 5.4. Mesafe ile değişen ortak endüktans değerleri

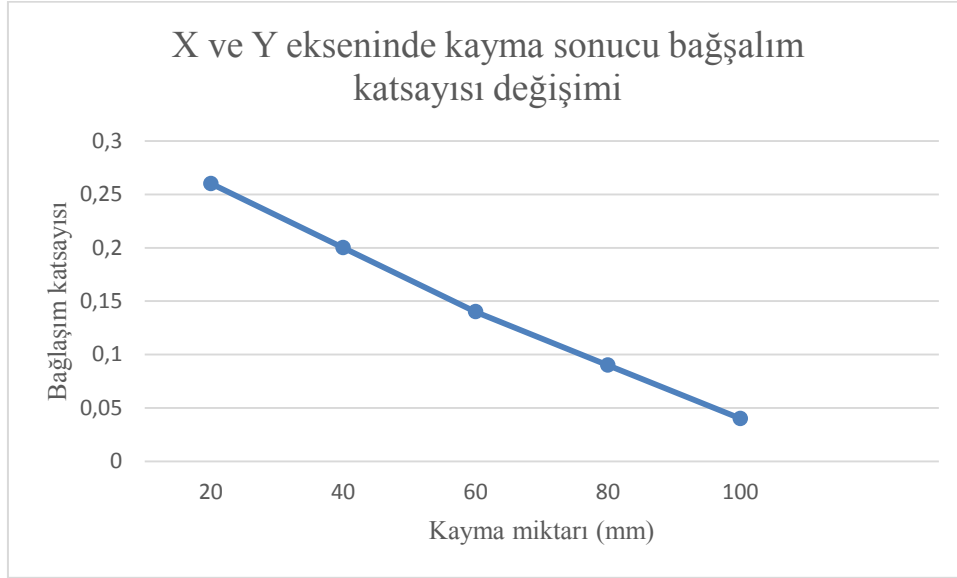
Hava aralığı (mm)	Ortak Endüktans (μH)
X=0, Y=0	
20	33.81
40	21.3
50	19.2
60	15.31
80	10.81

Mükemmel hizalı durumda hava aralığı değişimine baktığımız zaman mesafe 50 mm'den çok olduğu zaman ortak endüktansın düştüğünü ve sargılar birbirine daha yakınlaştıkça ortak endüktansın buyduğunu görmekteyiz. Hava aralığının sabit tutulduğu başka bir deneyde sargıları X ekseninde belli mesafeler ile kaydırdık ve bağlaşım katsayısına olan etkisini gözlemledik. Bu uygulamada sekonder sargısı merkezden sırasıyla 20, 40, 60, 80 ve 100 mm kaydırılmıştır. X eksen kayma sonucu elde edilen bağlaşım katsayısı değişimini Şekil 5.4'te görebiliriz.



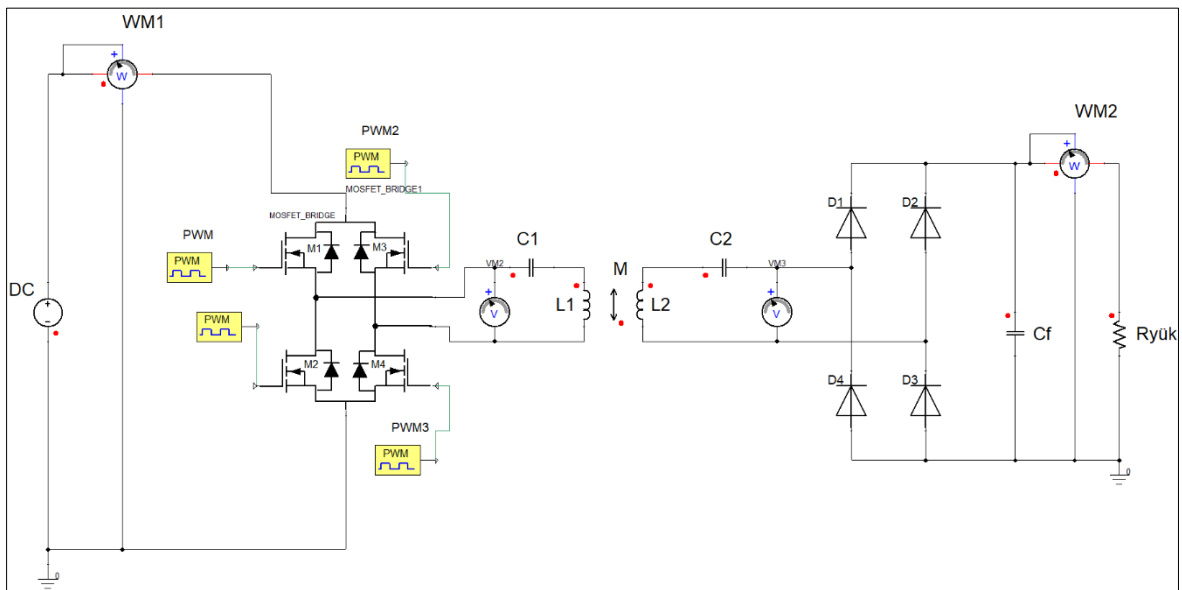
Şekil 5.4. X ekseninde kayma sonucu meydana gelen bağlaşım katsayısı değişimi

Tasarlanan KGA sisteminde sargıları aynı anda hem X ve hem Y ekseninde sırasıyla 20, 40, 60, 80 ve 100 mm kaydirdık ve bağlaşım katsayısına olan etkisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



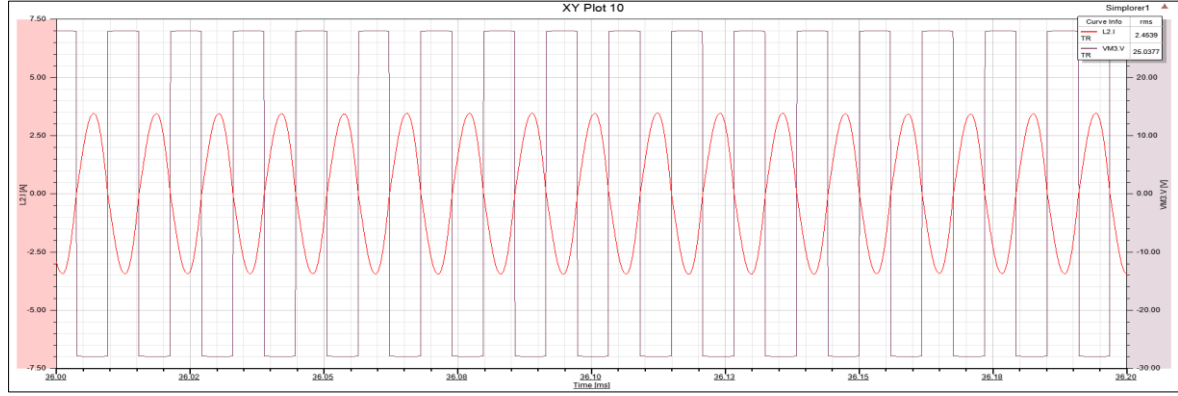
Şekil 5.5. X ve Y ekseninde kayma sonucu meydana gelen bağlaşım katsayısı değişimi

Çizelge 5.3'te elde edilen verilerle, sistemin çalışma performansının doğrulanması ve benzetim çalışmalarının yapılabilmesi için ANSYS Simplorer programı yardımıyla devre tasarımı gerçekleştirilmiş ve Şekil 5.6'te gösterilmiştir.

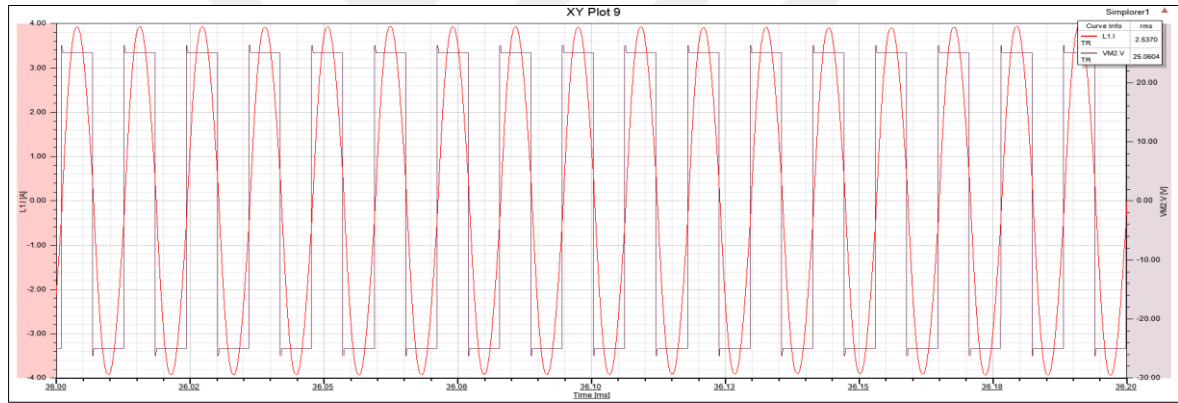


Şekil 5.6. KGA sisteminin benzetim yapısı

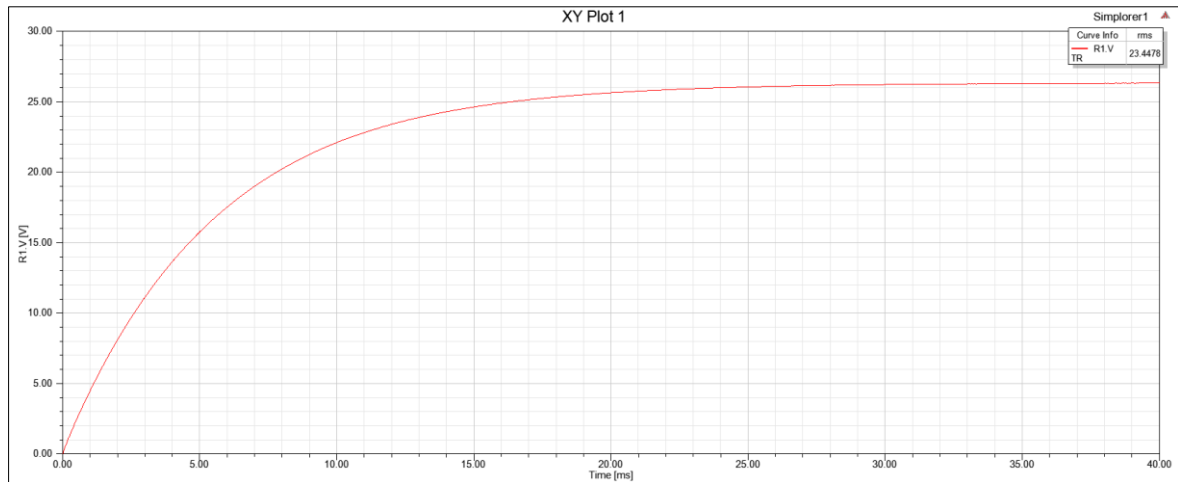
Benzetimi yapılan KGA sisteminin primer ve sekonder sargı gerilim ve akımları ve DA-DA çıkış gerilimi sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Primer gerilim ve akımı

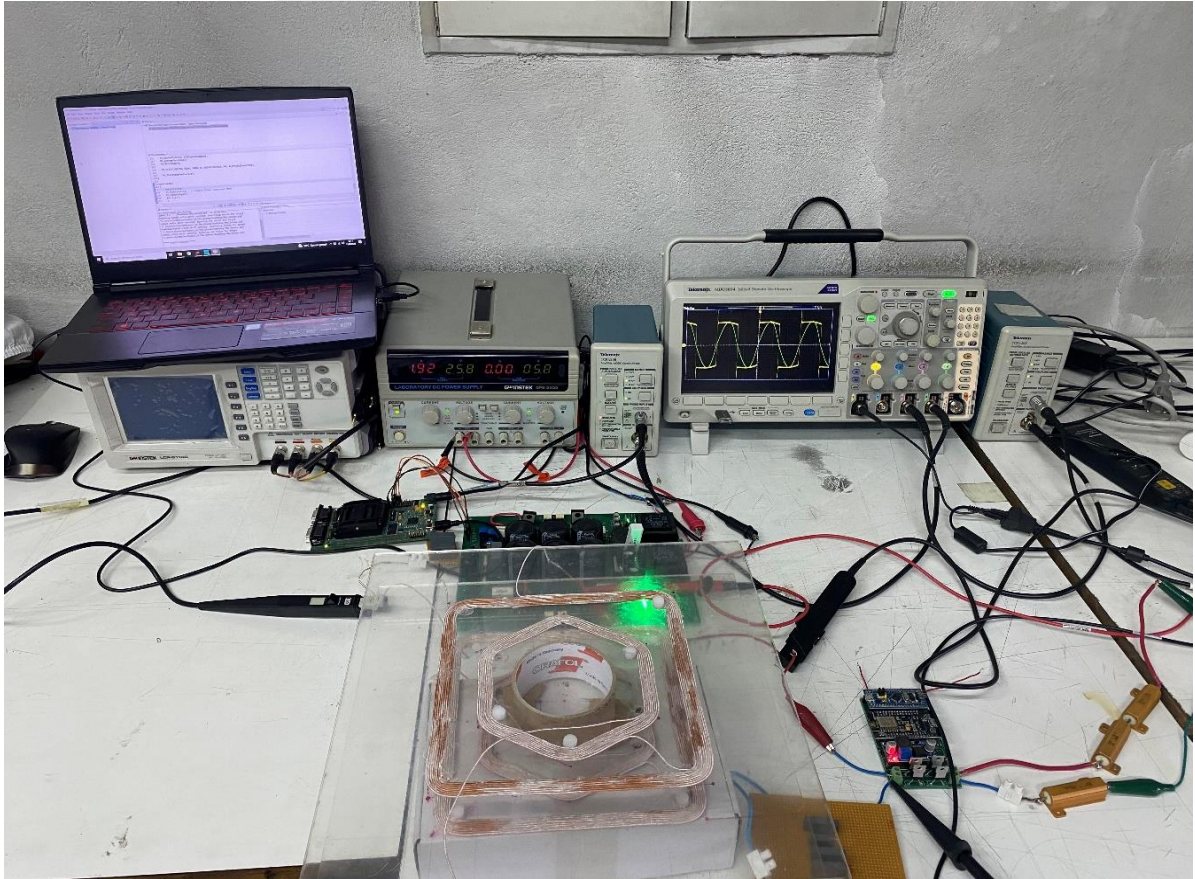


Şekil 5.8. Sekonder primer ve akımı

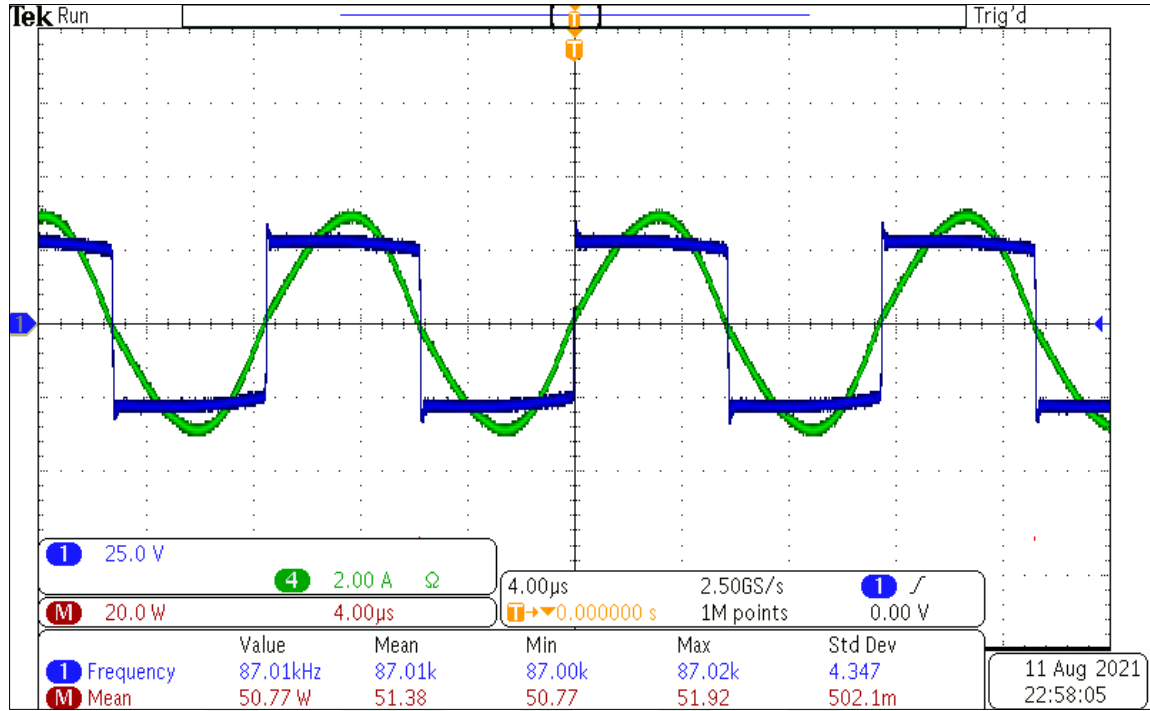


Şekil 5.9. DA çıkış gerilimi

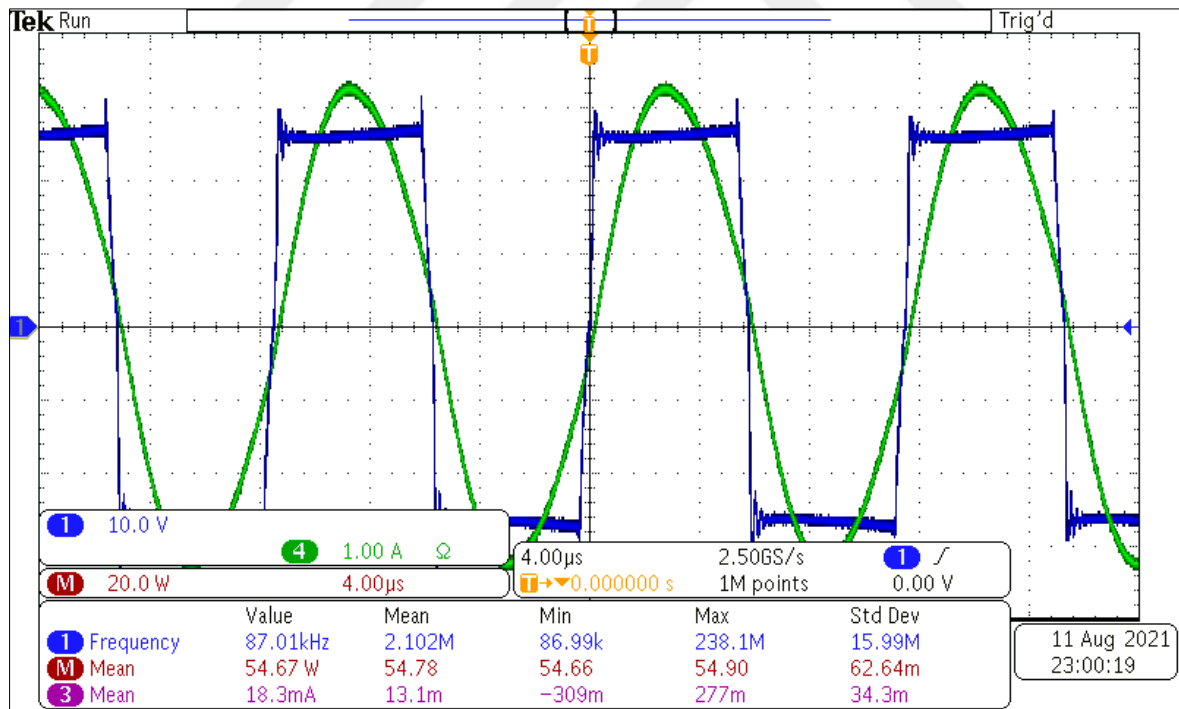
SEA ve teorik hesaplamalarımızın doğruluğunu ispatlamak için laboratuvar ortamında deneysel uygulama yapılmıştır. Sargılar sarıldıktan sonra 5 cm hava aralığındaki ik sargı arasında 50 W güç aktarmaya çalışılmıştır. Giriş gerilimi 25 volt olan DA gerilimi güç elektroniği evirici kartımızı beslemektedir. Darbe genişlik modülasyon yöntemiyle üretilen sinyaller için TMS0F2812 DSP işlemcisi kullanılmıştır. Üretilen yüksek frekanslı kare dalga gerilimi primer sargısına uygulayıp karşı tarafa aktarılmasını sağlamaktayız. Sargıdan sargıya elde edilen verim %93.5 olan KGA yapımızın girişten çıkışa olan verimi ise kopru diyotlarının kayıplarından dolayı %87 olarak görülmüştür. Rezonans devresi için primer ve sekonder tarafta kapasitör olarak 50 μ F değerinde kapasitörler kullanılmıştır. Sargılar LCR metre vasıtasıyla ölçülerek doğru bir şekilde sarıldıklarını görmekteyiz. Şekil 5.10'da uygulama yaptığımız deney düzeneği gösterilmektedir. Primer ve sekonder taraftaki gerilim ve akım görselleri osiloskop sayesinde Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gözlenmektedir.



Şekil 5.10. Laboratuvarda kurulan deneysel test düzeneği

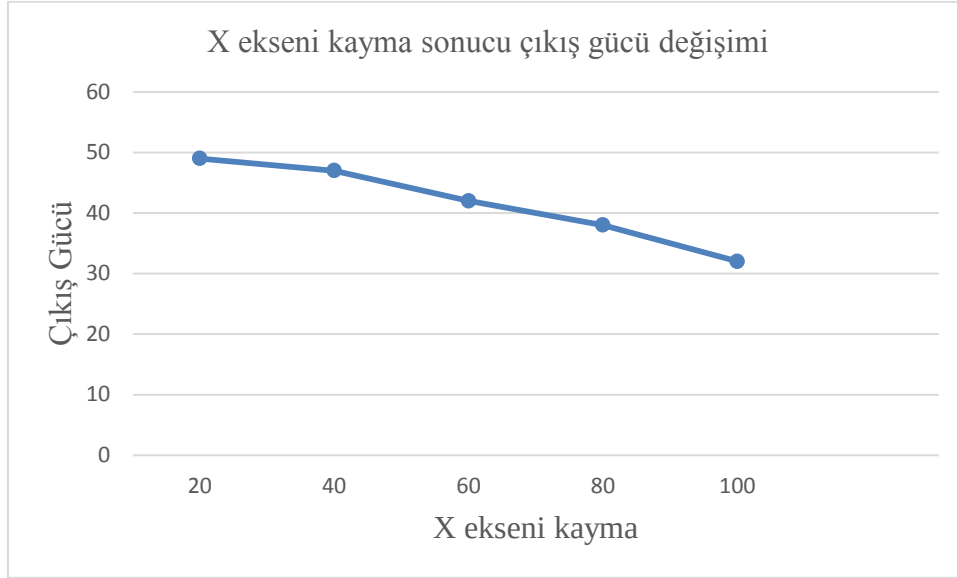


Şekil 5.11. Sekonder gerilim ve akım dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü



Şekil 5.12. Primer gerilim ve akım dalga formlarına ait osiloskop ekran görüntüsü

Çıkış gücünün kaymaya karşı değişimi deneysel olarak gözlenmiştir. Bunun için X ekseninde sırasıyla 20, 40, 60, 80 ve 100 mm kayma yapılmıştır ve aktarılan gücün değişimi Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. X eksen kayma sonucu çıkış gücü değişimi

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında x, y ve her iki aksende kayma sonucu önerilen kare-altıgen yapısında bağlaşım katsayısı ve dolayısıyla çıkış gücünün daha az etkilendiği gösterilmektedir ve sargıdan sargıya olan %93.5 verim değerinin nüve kullanmadan benzer çalışmalara göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği gösterilmektedir.

Bölüm değerlendirmesi

Bu bölümde, elde edilen endüktans eşitlikleri ve SS kompanzasyon yapısına ait eşitlikler kullanılarak 50 W güç değerine sahip bir KGA sistem tasarım, analiz ve gerçekleştirilmesi verilmiştir.

- 50 cm hava aralığından, ölçüm sonuçlarına göre %93.5 verimle yaklaşık 50 W güç aktarımı kablosuz olarak sağlanmıştır.
- Ayrıca tasarlanan sistemin hizalanma problemine karşılık performansı hem benzetim hem de ölçüm sonuçları ile değerlendirilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada günümüzde yaygınlaşan elektrikli araçlar için kablosuz güç aktarım sistemlerine ait bilgiler verilmiştir. Bu teknolojiye ait literatürde bulunan akademik ve ticari çalışmalar incelenmiştir. KGA teknolojisinin insan üzerinde olan etkileri, sağlık ve güvenlik standartları ele alınmıştır.

KGA sistemlerinde önemli parametrelerden biri olan kompanzasyon yapıları detaylıca tanıtılmış ve avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Bir diğer önemli parametre olan sargı tasarımı ele alınmıştır ve tezin amacı olan yenilikçi sargı tasarımı yapılmıştır. Çeşitli çalışmalarda sunulan sargı yapıları incelendikten sonra hizalanma problemine karşı ve bağlaşım katsayısı açısından az etkilenen ve daha iyi sonuçlar veren hibrit kare-altıgen sargı yapısı SEA ve teorik olarak öncelikle hesaplanmıştır. Yapılan benzetimler ve SEA sonuçlarında önerilen hibrit kare-altıgen yapısının kare yapısına göre avantajlı olduğu görülmektedir. Öncelikle karşılaştırmanın adil olabilmesi için iki farklı sargı yapısında kullanılan bakır miktarının eşit olması sağlanmıştır. Buna göre, kare sargı yapısının on üç sarımdan, kare-altıgen hibrit yapının ise kare ve altıgen kısımlarının birbirine eşit ve sekizer sarımdan oluşması gerekir. Bu durumda her iki yapıda da primer ve sekonder taraflar için kullanılan bakır miktarı toplamı 15.356 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Bu amaçla literatürde olan kare yapısı ile çalışmamızda önerilen yenilikçi kare-altıgen hibrit yapısının sargıların x ve y ekseninde aynı hizada olduğu ama hava aralığı değişiminden kaynaklanan bağlaşım katsayısına etkisi gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde mükemmel hizalı durumda ve hava aralığının 5 cm olduğu durumda önerilen sargı yapısının bağlaşım katsayısı değeri 0.27 iken geleneksel kare sargı yapısının bağlaşım katsayısı değeri 0.23 olmaktadır. Bu da %17 daha yüksek bir bağlaşım anlamına gelmektedir.

Önerilen sargı yapısının doğruluğunu görmek için laboratuvar ortamında kurulan 50 W KGA sistemi için çeşitli testler yapılmıştır. Deneysel uygulama üzerinde yapılan incelemeler sonucunda sargıların kayma durumlarında bağlaşım katsayısı ve dolayısıyla gücün daha az etkilendiği görülmüştür. Yapılan uygulama sonucunda sargıdan sargıya %93.5 ve girişten çıkışa % 87 oranında verim elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalar

Tez çalışmamızda önerilen sargı yapısını kare yapısı ile karşılaştırılması yapılmıştır. Buradan edinen tecrübeler doğrultusunda yapımızın diğer sargı yapıları ile karşılaştırılması planlanmaktadır. Yapılan bu sargı yapısının yüksek güçlerde davranışı ve çalışması incelenmelidir. Ayrıca sargı tasarımından sonra güç elektroniği kısmında önerilen sargı yapısını kullanarak çıkışta sabit akım ve sabit gerilim ile KGA sisteminin şarj edilmesi ve sargılar arasında kayma sonucu etkilenen güç aktarımını optimize etmek için kontrol mekanizmasının tasarlanması planlanmaktadır. Bu doğrultuda kayma durumu olduğu zaman otomatik olarak denetleyici sayesinde ortak endüktans hesabının anlık duruma göre yapılması ve primer tarafından sekonder tarafa eksik aktarılan güç değerinin telafisi için sistemin tepki vermesi bekleniyor. Sistemin optimizasyonu yapılarak daha yüksek verimlerde çalışması ayrıca hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, A., Alam, M. S. and Chabaan, R. (2018). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38-63.
- Aqueel, A., Mohammad, S. A., Ahmed, A. S. M M, (2019). Design and Interoperability Analysis of Quadruple Pad Structure for Electric Vehicle Wireless Charging Application. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5, 4.
- Budhia, M, Covic, G., Boys, J.T. (2011). Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems. *IEEE Trans Power Electron*, 26,(11):3096–108.
- Bi Z, Kan T., Mi, CC., Zhang, Y., Zhao, Z., Keoleian, GA. (2016). A review of wireless power transfer for electric vehicles: prospects to enhance sustainable mobility. *Applied Energy* ;179(Oct.):413–25.
- Bosshard, R., Iruretagoyena, U., Kolar, JW. (2016). Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron* , 4(4):1406–15.
- Bo, P., Junjun, D., Peng, L., Zhenpo, W. (2017), *Secondary-Side Power Control Method for Double-side LCC Compensation Topology in Wireless EV Charger Application*, 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Budhia, M., Boys, J. T., Covic, G. A. and Huang, C.-Y. (2013). Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60, 318-328.
- Bojarski, M., Asa, E., Outeiro, M. T. and Czarkowski, D. (2015). *Control and analysis of multi-level type multi-phase resonant converter for wireless EV charging*. in Industrial Electronics Society, 41st Annual Conference of the IEEE, 005008-005013.
- Cheng, L.; Ki, W.H.; Lu, Y.; Yim, T.S, (2016). Adaptive on/off delay-compensated active rectifiers for wireless power transfer systems. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 51, 712–723.
- Colak, K., Asa, E., Bojarski, M., Czarkowski, D. and Onar, O. C. (2015). A Novel Phase-Shift Control of Semibridgeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 30, 6288-6297.
- Chinthavali, M., Onar, O. C., Campbell, S.L. and Tolbert, L. (2015). Integrated charger with wireless charging and boost functions for PHEV and EV applications. in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), IEEE*, 1-8.
- Covic, G. A. and Boys, J. T. (2013). Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, 1, 28-41.

- Chen, L., Nagendra, G.R., Boys, J.T. and Covic, G. A. (2016). Double-coupled systems for ipt roadway applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (1):37–49.
- Choi, SY., Gu, BW., Lee, SW., Lee, WY., Huh, J., Rim, CT.(2014). Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles. *IEEE Trans Power Electron*, 29(11):5770–83.
- Dai, Z., Wang, J., Long, M., Huang, H. (2017). A Witricity-Based High-Power Device for Wireless Charging of Electric Vehicles. *Energies*;10(3):323.
- Deng, J., Li, W., Nguyen, T.-D., Li, S. and Mi, C. (2015). Compact and Efficient Bipolar Pads for Wireless Power Chargers: Design and Analysis. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 20, 6130 - 6140.
- Fisher, T. M., Farley, K. B., Gao,Y, Bai, H. and Tse, Z. T. H. (2014). Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems. *Wireless Power Transfer*, 1, 87-96.
- Feng, H.; Cai, T.; Duan, S.; Zhao, J.; Zhang, X.; Chen, C., (2016). An LCC-Compensated Resonant Converter Optimized for Robust Reaction to Large Coupling Variation in Dynamic Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 63, 6591–6601.
- Garnica, J., Chinga, R.a., Lin, J. (2013).Wireless power transmission: From far field to near field. *Proc. IEEE*, 101, (6):1321–1331.
- Galigekere, VP., Pries, J., Onar, OC., Su, G-J., Anwar, S., Wiles, R. (2018). *Design and Implementation of an Optimized 100 kW Stationary Wireless Charging System for EV Battery Recharging*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 3587–92.
- Gao, Y., Farley, KB., Tse. ZTH.(2014). *Investigating safety issues related to Electric Vehicle wireless charging technology*. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 1–4.
- Hai, Y., Sung, H. K, Byunghee, M. A. (2018) New Circuit Design of Two-Switch Buck-Boost Converter. *IEEE Access*, 6.
- Hariri, A.O., Youssef, T, Elsayed, A., Mohammed, O, (2016). A Computational Approach for a Wireless Power Transfer Link Design Optimization Considering Electromagnetic Compatibility. *IEEE Trans. Magn*, 52, 1–4.
- Ibsan, U., Castillo-Zamora, P., Snag, H., Deepa, V. (2019). Hexagonal Geometry Coil for a WPT High-Power Fast Charging Application. *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, 5, 4.
- Jegadeesan, R.; Guo, Y.X, (2012).Topology selection and efficiency improvement of inductive power links. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 60, 4846–4854.

- Sallan, J., Juan, L., Villa, A, J. Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56,6.
- Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317, 83-86.
- Kumar, S. Pervaiz, C.-K. Chang, S. Korhummel, Z. Popovic, and K. K. Afridi, (2015). *Investigation of power transfer density enhancement in large air-gap capacitive wireless power transfer systems*. in Wireless Power Transfer Conference , 1-4.
- Kafeel, A. K., Saad, M. (2016). Coil Design for High Misalignment Tolerant Inductive Power Transfer System for EV Charging. *Energies*, 9, 937; doi:10.3390.
- Kamineneni, A., Covic, GA., Boys, JT. (2015). Analysis of Coplanar Intermediate Coil Structures in Inductive Power Transfer Systems. *IEEE Trans Power Electron.* 30(11):6141–54.
- Kalwar, KA., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Horan, B. (2016). Coil Design for High Misalignment Tolerant Inductive Power Transfer System for EV Charging. *Energies* ;9(11):937.
- Kaixing, Lu., Yijie, W., Yousu, Y., Yueshi, G., Dianguo, Xu.. .A Novel WPT System with Digitally Closed-loop Control Featuring High Misalignment Tolerance. *IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference*, 25-29.
- Kan, T.; Mai, R.; Mercier, P.P.; Mi, C.C, (2018). Design and Analysis of a Three-Phase Wireless Charging System for Lightweight Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.*, 33, 6622–6632.
- Katsuhiro, H., Takehiro, I., Yoichi, H. (2019). Maximum efficiency control of wireless power transfer via magnetic resonant coupling considering dynamics of DC-DC converter for moving electric vehicles, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 54-59.
- Lee, S., Huh, J., Park, C., Choi, N.-S., Cho, G.-H. and Rim, C.-T. (2010). *On-line electric vehicle using inductive power transfer system*. in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1598-1601.
- Li, S. Pervaiz, Chris., (2015). Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, 3, 1
- Liu, N., and Habetler, T. G. (2015). Design of a Universal Inductive Charger for Multiple Electric Vehicle Models. *Power Electronics, IEEE Transactions* , 30, 6378 - 6390.
- Liu, Z., Chen, Z., Li, J., Guo, Y., Xu, B, (2017). A Planar L-Shape Transmitter for a Wireless Power Transfer System. *IEEE Antennas Wirel. Propag*, 16, 960–963.
- Miller, J.M., Onar, O.C. and Chinthavali, M. (2015). Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. *Emerging and Selected*

Topics in Power Electronics, IEEE Journal of, 3, 147-162.

- Nguyen, T., Diep, N. K.T., Tran, T. (2019) Min. *Control the Constant Current/Voltage Charging Mode in the Wireless Charging System for Electric Vehicle with LCC Compensation Circuit*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Vietnam.
- Nguyen, T. D. S. Li, W. Li, and C. C. Mi, (2014). *Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition , 1676–1682.
- Nagendra, G.R., Boys, J. T., Covic, G. A., Riar, B. S. and Sondhi, A. (2014). *Design of a double coupled ipt ev highway*. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 4606– 4611.
- Ogden, L. and Statistics, N. C. f. H. (2004). Mean body weight, height, and body mass index: United States 1960-2002: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, *National Center for Health Statistics*.
- Ongayo, D., Hanif, M. (2015). *Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis*. IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference. 1–6.
- Quinn, J. C., Limb, B. J., Pantic, Z., Barr, P. and Zane, R. (2015). Techno-economic feasibility and environmental impact of wireless power transfer roadway electrification. in *Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2015 IEEE*, pp. 1-3.
- Qiu, C., Kt, C., Ching, TW., Liu, C. (2013). Overview of wireless charging technologies for electric vehicles. *J Asian Electr Veh*;12(1):1679–85.
- Park, C., Lee, S., Jeong, S. Y., Cho, G. H. and Rim, C. T. (2015). Uniform power i-type inductive power transfer system with dq-power supply rails for on-line electric vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, (11):6446–6455.
- Panchal C, Stegen S, Lu J, (2018). Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Eng Sci Technol Int J*; 21(5):922–37.
- Pries, J., Galigekere, VP., Onar, OC., Su, G. (2019) A 50kW Three-Phase Wireless Power Transfer System using Bipolar Windings and Series Resonant Networks for Rotating Magnetic Fields. *IEEE Trans Power Electron*.
- Pinuela, M.; Yates, D.C.; Lucyszyn, S.; Mitcheson, (2013). P.D. Maximizing DC-to-load efficiency for inductive power transfer. *IEEE Trans. Power Electron*. 28, 2437–2447.
- Pinuela, M.; Yates, D.C.; Lucyszyn, S.; Mitcheson, (2013). P.D. Maximizing DC-to-load efficiency for inductive power transfer. *IEEE Trans Power Electron*. 28, 2437–2447.
- Park, J.; Kim, D.; Hwang, K.; Park, H.H.; Kwak, S.I.; Kwon, J.H.; Ahn, S, (2017). A Resonant Reactive Shielding for Planar Wireless Power Transfer System in Smartphone Application. *IEEE Trans. Electromagn*. 59, 695–703.

- Romlie, MF., Lau, K., Zainol, MZ., Abdullah, MF., Kannan, R. (2018). *Performance of Inductive Coupled Power Transfer Versus the Coil Shape, Investigation using Finite Element Analysis*. MATEC Web Conferencr, 225.
- Suzuki, Y., Mizutani, M., Sugiura, T., Sakai, N. and Ohira,T.(2016). Prototype Experiments on a 1/32- Scale Model Via- Wheel Power Transfer Electric Vehicle. *Electrical Engineering in Japan*, 195, 63-71.
- Shoki, H. (2013). Issues and initiatives for practical deployment of wireless power transfer technologies in Japan. *Proceedings of the IEEE*, 101, 1312-1320,
- Shenli, Z., Omer, C., Veda, G., Jason, P., Gui, J., Alireza, K.(2018) *Secondary Active Rectifier Control Scheme for a Wireless Power Transfer System with Double-Sided LCC Compensation Topology.*, 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, USA.
- Takanashi, H., Sato, Y., Kaneko, Y., Abe, S., Yasuda, T. (2012). *A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition . 269–74.
- Tritschler, J., Reichert, S., Goeldi, B. (2014). *A practical investigation of a high power, bidirectional charging system for electric vehicles*. 16th European Conference on Power Electronics and Applications, 1–7.
- Wu, H., Gilchrist, A., Sealy, K., Bronson, D. (2012). A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control. *IEEE Trans Ind Inf.* 8(3):585–95.
- Wu, H., Gilchrist, A., Sealy, K., Bronson, D. (2012). *A 90 percent efficient 5kW inductive charger for EVs*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 275–82.
- Wei X, Wang Z, Dai H, (2014). A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Energies*; 7(7):4316–41.
- Wang, Y.; Yao, Y.; Liu, X.; Xu, D, (2017). S/CLC Compensation Topology Analysis and Circular Coil Design for Wireless Power Transfer. *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, 3, 496–507.
- Zheng, C., Lai, J.-S., Chen, R., Faraci, W.E., Ullah Zahid, Z., Gu. (2015). High-efficiency contactless power transfer system for electric vehicle battery charging application," Emerging and Selected Topics in Power Electronics, *IEEE Journal*, 3, 65-74.
- Zhang, Y., Chen, K., He, F., Zhao, Z., Lu, T. and Yuan, L. (2016). Closed-Form Oriented Modeling and Analysis of Wireless Power Transfer System With Constant-Voltage 135 Source and Load. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 31, 472-3481.
- Zhicong, H., Chi-Seng, L., Pui-In Mak, R.P., Silva Martins, Siu-C. W., Chi, K. Tse. A Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Constant-Power and Maximum-Efficiency Battery Charging, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 9.

- Zeng, H., Yang, S., Peng, FZ, (2017). Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging. *IEEE Trans Power Electron*, 32(8):5943–52.
- Zaheer A, Kacprzak D, Covic GA, (2012). *A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 283–90.





GAZİ GELECEKTİR..