

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMLERİ İÇİN
DEVRE MODELİ TEMELLİ ÇEVİRİM TASARIMI

EMRE ORTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Seyit Ahmet SİS** (Tez Danışmanı)
Dr. Öğr. Üyesi Serhat KÜÇÜKDERMENCİ
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKTAŞ

BALIKESİR, ARALIK - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

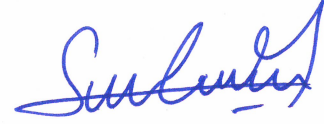
Emre ORTA tarafından hazırlanan “KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMLERİ İÇİN DEVRE MODELİ TEMELLİ ÇEVİRİM TASARIMI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 18 Aralık 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Seyit Ahmet SİS
Balıkesir Üniversitesi



Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serhat KÜÇÜKDERMRENCİ
Balıkesir Üniversitesi



Üye

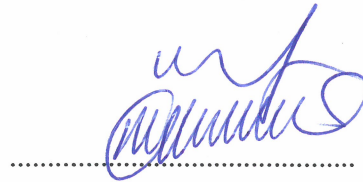
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKTAŞ
Dumlupınar Üniversitesi



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Kablosuz Güç Transfer Sistemleri İçin Devre Modeli Temelli Çevrim Tasarımı**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emre ORTA

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2018/161 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER SİSTEMLERİ İÇİN DEVRE MODELİ TEMELLİ
ÇEVİRİM TASARIMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
EMRE ORTA
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ SEYİT AHMET SİS)
BALIKESİR, ARALIK - 2019**

Bu tez çalışmasında kablosuz güç transfer sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan çevrim yapılarının yanal hizalanma bozulmalarına karşı toleransı incelenmiştir. İlk olarak yaygın çevrim yapılarının toleransları, simülasyon ortamında yapılan analizler ile incelenmiştir. İnceleme sonucunda dikdörtgenel çevrimlerin, uzun kenarı üzerindeki hizalanma bozulmalarına karşı daha yüksek toleransa sahip olduğu görülmüştür. Bu bulgu doğrultusunda artı şekilli çevrim adında aynı geometrik merkeze sahip olan iki özdeş alt birim dikdörtgenel çevrimden oluşan yeni bir çevrim tasarımı önerilmiş ve daha yüksek toleransa sahip olacağı öngörülmüştür. Bu öngörü, ilk olarak simülasyon ortamında farklı boyutta artı şekilli çevrimlerin analizleri ile teyit edilmiştir. Ardından üretilen artı şekilli çevrim çiftlerinin ölçümleri deney ortamında gerçekleştirilmiş ve bu öngörü bir kez daha teyit edilmiştir. Ferrit bloklarının çevrim çiftlerinin üzerine olan etkisi de simülasyon aracılığı ile incelenmiş ve kablosuz güç transfer sisteminin güç iletim verimini iyileştirdiği görülmüştür. Son olarak 100 cm x 70 cm boyutlarında artı şekilli çevrim çifti, bakır borular kullanılarak üretilmiş ve frekans ayarlı bir sistemde kullanılarak hizalanma bozulmalarına karşı toleransı incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar ve ölçümler sonucunda artı şekilli çevrim yapısının, yanal hizalanma bozulmalarına karşı daha yüksek toleransa sahip olduğu kanısına varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Kablosuz güç transferi, çevrim tasarımı, yanal hizalanma bozulması, artı şekilli çevrim.

ABSTRACT

CIRCUIT MODEL BASED COIL DESIGN FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEMS

MSC THESIS

EMRE ORTA

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. SEYİT AHMET SİS)
BALIKESİR, DECEMBER - 2019**

In this thesis, wireless power transfer systems and the effect of lateral misalignment on the coil structures used in these systems are examined. The misalignment tolerance of commonly used coil structures is analyzed through electromagnetic simulations. The results showed that the rectangular coils exhibit better misalignment tolerance along their longer side. This finding has been followed by a novel coil design, called cross-shape coil which consists of two identical subunit rectangular coils with the same centroid, and it is considered to have better misalignment tolerance. Initially, electromagnetic simulations performed on cross-shape coils with varying sizes verified the advantages of the proposed coil structure. Fabricated cross-shape coils are measured using a network analyzer and the same outcome is observed. The effect of ferrite layers on coils is also examined through simulations and the results showed an improvement in the power transfer efficiency of wireless power transfer system. Finally, a cross-shape coil consisting of 100 cm x 70 cm subunit rectangular coils are fabricated with copper tubes and utilized in a frequency-tuned wireless power transfer system to further examine its misalignment tolerance. Simulations and measurements confirmed that the cross-shape coil design exhibit better lateral misalignment tolerance.

KEYWORDS: Wireless power transfer, coil design, lateral misalignment, cross-shape coil.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | v |
| TABLO LİSTESİ | vii |
| KISALTMALAR LİSTESİ | viii |
| ÖNSÖZ | ix |
| 1. GİRİŞ | 10 |
| 1.1 Kablosuz Güç Transferinin Tarihçesi | 10 |
| 1.2 Kablosuz Güç Transferinin Çeşitleri | 12 |
| 1.2.1 Endüktif Kuplajlanma Temelli Kablosuz Güç Transferi | 12 |
| 1.2.2 Manyetik Rezonans Temelli Kablosuz Güç Transferi | 13 |
| 1.2.3 Elektromanyetik Işıma Temelli Kablosuz Güç Transferi | 15 |
| 1.3 Kablosuz Güç Transfer Sistemlerinin Kullanım Alanları..... | 15 |
| 1.4 Kablosuz Güç Transferindeki Temel Problemler ve Ana Araştırma Konuları..... | 16 |
| 1.4.1 İletim Mesafesi ve Veriminin İyileştirilmesi | 16 |
| 1.5 Literatürdeki Diğer Çalışmalar | 18 |
| 1.5.1 Sistem Tasarımı Odaklı Çalışmalar | 18 |
| 1.5.2 Çevrim Tasarımı Odaklı Çalışmalar | 20 |
| 2. KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ İÇİN YAYGIN ÇEVİRİM YAPILARI | 22 |
| 2.1 Kablosuz Güç Transfer Sistemlerinde Kullanılan Yaygın Çevrim Yapıları | 22 |
| 2.2 Karesel, Çembersel ve Dikdörtgensel Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Modellenmesi ve Analizi | 24 |
| 2.2.1 Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Modellenmesi..... | 24 |
| 2.2.2 Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Analizi..... | 27 |
| 3. ARTI ŞEKİLLİ ÇEVİRİM YAPISI | 34 |
| 3.1 Artı Şekilli Çevrim Yapısının Simülasyon Ortamında Modellenmesi ve Analizi..... | 35 |
| 3.2 Çok Sarımlı Karesel, Çembersel ve Artı Şekilli Çevrim Çiftlerinin Deney Ortamında Hizalanma Bozulmaları Analizi..... | 39 |
| 3.2.1 Deney Ortamı | 40 |
| 3.2.2 Çok Sarımlı Karesel, Çembersel ve Artı Şekilli Çevrim Yapılarının Hizalanma Bozulmaları Ölçümleri..... | 41 |
| 3.2.3 Sarım Sayısının Artışının Çevrimler Üzerindeki Etkisi..... | 43 |
| 3.3 Çok Sarımlı Artı Şekilli Çevrim Yapısının Frekans Ayarlı Kablosuz Güç Transfer Sistemine Kullanılması | 45 |
| 3.3.1 Deney Ortamı | 45 |
| 3.3.1.1 Çok Sarımlı Artı Şekilli Çevrim Yapısının Deney Ortamında Analizi..... | 47 |
| 3.4 Ferrit Bloklarının Artı Şekilli Çevrim Yapısının Hizalanma Bozulmalarına Karşı Toleransı Üzerindeki Etkisi | 49 |
| 3.4.1 Simülasyon Ortamı | 50 |
| 3.4.2 Detaylı Analiz | 51 |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 53 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 5. KAYNAKLAR | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ | 61 |



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1: Tesla'nın çalışmasında kullandığı sistemin diyagramı [4]..... | 11 |
| Şekil 1.2: Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transferi sisteminin diyagramı [8]. | 12 |
| Şekil 1.3: Manyetik rezonans temelli kablosuz güç transfer sisteminin diyagramı [10]. ... | 14 |
| Şekil 2.1: Karesel çevrim diyagramı. | 23 |
| Şekil 2.2: Çembersel çevrim diyagramı. | 23 |
| Şekil 2.3: Dikdörtgensel çevrim diyagramı. | 24 |
| Şekil 2.4: Tek sarımlı karesel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü. ... | 25 |
| Şekil 2.5: Tek sarımlı dikdörtgensel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü. | 25 |
| Şekil 2.6: Tek sarımlı çembersel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü. | 26 |
| Şekil 2.7: Çevrim uçları arasındaki yığın port'un üç boyutlu modeli. | 26 |
| Şekil 2.8: Bir çevrim çiftinin a) 2 port'lu ve b) T-eşdeğer devre modeli..... | 28 |
| Şekil 2.9: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış karesel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 29 |
| Şekil 2.10: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış dikdörtgensel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 30 |
| Şekil 2.11: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış çembersel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 31 |
| Şekil 2.12: Karesel, çembersel ve dikdörtgensel çevrim çiftleri için a) x ve b) y doğrultusunda hizalanma bozulmaları uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri. | 32 |
| Şekil 3.1: Artı şekilli çevrim yapısının diyagramı. | 34 |
| Şekil 3.2: Kuplajlanmış artı şekilli çevrimlerin üç boyutlu modeli | 35 |
| Şekil 3.3: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanmış karesel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 36 |
| Şekil 3.4: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanmış karesel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 36 |
| Şekil 3.5: a) x, b) y ve c) çapraz doğrultularda hizalanma bozulmaları uygulanmış artı şekilli çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim). | 37 |
| Şekil 3.6: Karesel, çembersel ve farklı boyutlardaki artı şekilli çevrim çiftleri için a) x veya y doğrultularında ve b) çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri. | 38 |
| Şekil 3.7: Deney ortamında üretilen artı şekilli çevrim çifti ve ağ analizörü. | 41 |
| Şekil 3.8: Çok sarımlı karesel, çembersel ve artı şekilli çevrimlere a) x veya y doğrultularında ve b) çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri. | 42 |
| Şekil 3.9: Her bir çevrim için S parametre ölçümü sırasında kullanılan a) 2 port'lu seri bağlı devre modeli ve bu modelin b) elektrik devre elemanları ile oluşturulmuş devre modeli. | 44 |
| Şekil 3.10: Frekans ayarlı sistemin blok diyagramı. | 46 |
| Şekil 3.11: Deney ortamı. | 47 |
| Şekil 3.12: x ve y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulandığı durumda artı şekilli çevrim çiftinin a) maksimum güç transfer verimliliği ve b) takip edilen rezonans frekansı. | 48 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.13: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulandığı durumda artı şekilli çevrim çiftinin a) maksimum güç transfer verimliliği ve b) takip edilen rezonans frekansı. | 48 |
| Şekil 3.14: Dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış kuplajlanmış artı şekilli çevrim çifti..... | 50 |
| Şekil 3.15: Dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış kuplajlanmış artı şekilli çevrim çiftinin üç boyutlu modeli..... | 50 |
| Şekil 3.16: Çevrim çifti arasındaki mesafenin sabit olması durumunda çevrim çiftine x ve y doğrultularında uygulanan hizalanma bozulmalarının kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi..... | 52 |
| Şekil 3.17: Çevrim çiftinin mükemmel hizalı olması durumunda çevrim çifti arasındaki mesafenin değişiminin kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi. | 52 |



TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Analizde kullanılmak üzere oluşturulmuş karesel, çembersel ve dikdörtgenel çevrim çiftleri..... | 27 |
| Tablo 3.1: Analizde kullanılmak üzere üretilmiş artı şekilli çevrim çiftleri. | 35 |
| Tablo 3.2: Analizde kullanılmak üzere oluşturulmuş karesel, çembersel ve artı şekilli çevrim çiftleri. | 40 |
| Tablo 3.3: Her çevrim için hesaplanan kayıp direnci, öz endüktans, ortak endüktans, ortak endüktans ile öz endüktans oranı, alan ve tel kullanım miktarı. | 44 |
| Tablo 3.4: Üretilen artı şekilli çevrimin özellikleri. | 46 |



KISALTMALAR LİSTESİ

ZPA : Zero phase angle (Sıfır faz açısı)

MRCM : Minimum reflection coefficient magnitude (Minimum yansımaya katsayısı şiddeti)

FEM : Finite element method (Sonlu elemanlar yöntemi)



ÖNSÖZ

Lisans öğrencisi olduğum dönemden itibaren bana yol gösteren, değerli fikirlerini benimle paylaşan, üç yıl boyunca birlikte çalışarak güzel bir çalışma çıkardığımız yüksek lisans sürecinin buraya gelmesindeki en büyük rolü oynayan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Seyit Ahmet SİS'e teşekkür ederim.

Üniversitede aldığım tüm eğitim süresince birçok farklı projede beraber çalıştığım ve bana birçok konuda faydası dokunan Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin GÜNEŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Sabri BİÇAKCI'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans süreci dahil olmak üzere her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ailem ve kız arkadaşım Burcu'ya teşekkür ederim.

Balıkesir, 2019

Emre ORTA

1. GİRİŞ

Kablosuz güç transferi, iki elektriksel sistem arasında herhangi bir fiziksel bağlantı olmadan güç iletim işlemine verilen isimdir.

Kablosuz güç transferinin uygulamalarını hayatlarımızın birçok farklı alanında görebilmek oldukça mümkündür. Bunun en büyük sebeplerinden birisi, günlük hayatlarımızda kullandığımız elektrikli araçların, teknolojinin gelişmesi ile taşınabilir hale gelmesidir. Cihazların taşınabilirliğinin artması, bu cihazların elektriksel anlamda beslenmesinin de taşınabilir hale gelmesine sebep olmuştur.

Taşınabilirliğin yanı sıra, kablosuz güç transfer sistemlerinin çevreye olan pozitif etkisi daha yaygın hale gelmesine sebep olmuştur. Pil ile çalışan cihazlardan dolayı yıllık yaklaşık 6 milyar pil atık ortaya çıkmaktadır [1]. Bu durum, atık pillerden açığa çıkan toksik materyallerin çevreye zarar vermesine neden olmaktadır.

Bazı uygulamalarda bir cihazı (örneğin kalp pilleri) kablo ile kaynağa bağlamak mümkün olmayabilir veya kullanılan cihaz üzerinde herhangi bir zamanda değişiklik yapılması zor olabilir. Böyle bir durumda, cihaza ve cihazın bulunduğu ortama uygun bir kablosuz güç transfer sistemi, faydalı olacaktır.

Bu bölümde öncelikle kablosuz güç transferinin tarihçesi Bölüm 1.1’de kısaca paylaşılacaktır. Ardından kablosuz güç transferinin çeşitleri Bölüm 1.2’de detaylıca incelenecektir. Bölüm 1.3, kablosuz güç transfer sistemlerinin kullanım alanlarını kapsayacaktır. Bölüm 1.4’te ise kablosuz güç transferi alanındaki temel problemler ve ana araştırma alanları ele alınacaktır. Bölüm 1.5’te, bu lisansüstü tez çalışmasının odak noktası olan hizalanma bozulmaları ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar incelenecektir.

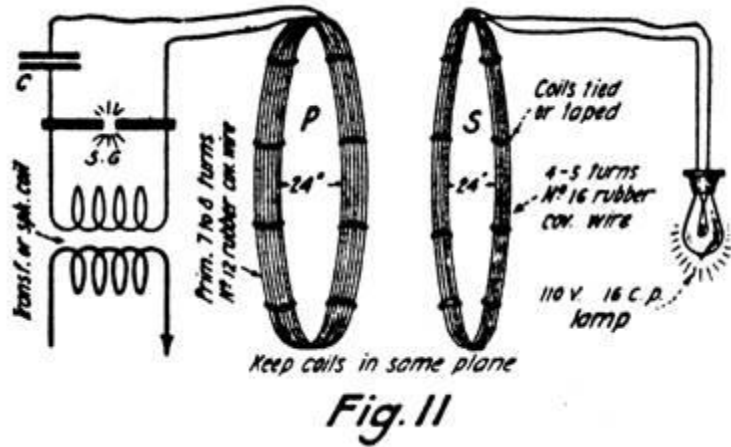
1.1 Kablosuz Güç Transferinin Tarihçesi

1820 yılında Hans Christian Oersted, verdiği bir ders sırasında, iletken bir telin içinden akım geçerken yakınında bulunan pusulanın iğnesinin oynadığını fark etmiştir. Daha sonra yaptığı incelemeler sonucunda elektrik akımının manyetik alan oluşturduğunu göstermiştir. Oersted yaptığı bu çalışma ile elektrik ile manyetizma arasındaki bağlantının görülmesini

sağlamıştır. 1826 yılında ise André-Marie Ampère, elektrik akımı ile akımın oluşturduğu manyetik alan arasındaki ilişkiyi formülize etmiştir. 1831 yılında Michael Faraday, kendi ismini taşıyan Faraday Yasası ile değişken manyetik akı ile, bir iletken üzerinde elektromanyetik kuvvetin indüklenebileceğini göstermiştir. 1888 yılında ise Heinrich Hertz, elektromanyetik ışımının varlığını kanıtlamıştır. Daha sonra Nikola Tesla, Hertz'in çalışmasında kullandığı verici aparatı geliştirmiştir ve 1891 yılında patentini almıştır [2].

1894 yılında 3 kHz frekansta kablosuz güç transferi, Hutin ve Leblanc tarafından gerçekleştirilmiş ve yine bu kişiler tarafından patenti alınmıştır [3]. Yine aynı yılda Tesla, Şekil 1.1'de diyagramı paylaşılan sistemde yalnızca bir çevrim çifti kullanarak bir ampulü aydınlatmayı başarmıştır [4].

Jagdish Chandra Bose, 1895 yılında yaptığı deney ile yaklaşık 23 metre mesafeden bir zili, kaynak ile cisim arasında duvar ve insan olmasına rağmen çalmayı başarmıştır [5]. 1896 yılında ise Guglielmo Marconi, yaklaşık 2.4 kilometrelik mesafeden bir radyo dalgasını başarılı bir şekilde iletmiştir. Tesla ise 48 kilometrelik mesafede kablosuz güç transferini gerçekleştirmiştir [6].



Şekil 1.1: Tesla'nın çalışmasında kullandığı sistemin diyagramı [4].

Yakın tarihte de kablosuz güç transferi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. 2007 yılında Massachusetts Institute of Technology (MIT) bünyesinde çalışan ve Marin Soljačić'in başında olduğu bir araştırma grubu, kablosuz güç transferi vasıtasıyla 60 W gücündeki bir ampulü 2 metrelik mesafeden %40 verim ile aydınlatmıştır [7]. Bunu yaparken 60 cm çap

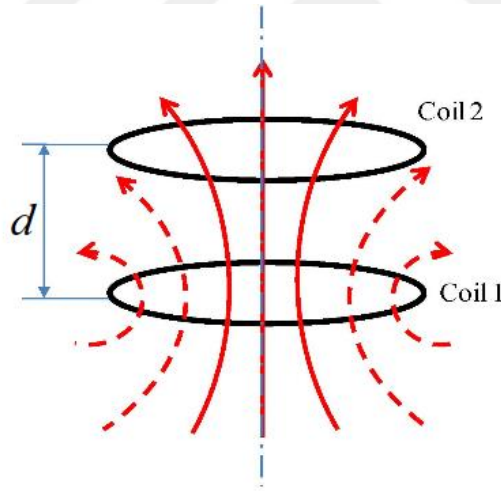
genişliğine sahip iletken telden ürettikleri bir çevrim çifti kullanmışlardır. Aynı çalışma Intel tarafından 2008 yılında tekrardan gerçekleştirilmiş ve yine bir ampul, daha kısa mesafeden %75 verim ile aydınlatılmıştır.

1.2 Kablosuz Güç Transferinin Çeşitleri

Kablosuz güç transferi; endüktif kuplajlanma temelli, manyetik rezonans temelli ve elektromanyetik ışığa temelli olmak üzere üç farklı grupta değerlendirilebilir. Takip eden alt bölümlerde yukarıda bahsedilen gruplar detaylıca incelenecektir.

1.2.1 Endüktif Kuplajlanma Temelli Kablosuz Güç Transferi

Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transferi, manyetik alan indüksiyonu prensibini kullanan bir yöntemdir. Bu yöntemi kullanan bir sistemin diyagramı, Şekil 1.2’de gösterildiği gibidir. Bu yöntem, tipik bir yakın alan iletim tekniğidir. En ileri seviye teknoloji uygulamalarında iletim mesafesi kısadır [8].



Şekil 1.2: Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transferi sisteminin diyagramı [8].

Biot-Savart Yasası ve Faraday Yasası, bu tip kablosuz güç transferinin temelini oluşturmaktadır. Denklem 1’de paylaşıldığı üzere Biot-Savart Yasası, iletken içinden geçen bir akımın oluşturduğu manyetik alanı hesaplamak için kullanılmaktadır ve Denklem (1.1)’de paylaşılmıştır. Burada μ_0 , I , r , sırasıyla manyetik geçirgenlik katsayısını, verici çevrim içinden akan akımı ve öteleme vektörünü temsil etmektedir.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{\mathbf{I}d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad (1.1)$$

Faraday Yasası ise bu manyetik alanın alıcı çevrimin üzerinde oluşturduğu indüklenmiş gerilim değerini hesaplamak için kullanılmaktadır ve Denklem (1.2)'de paylaşılmıştır. Burada V_{ind} , \mathbf{B} ve S sırasıyla indüklenen gerilim değerini, manyetik alanı ve yüzey alanını ifade etmektedir.

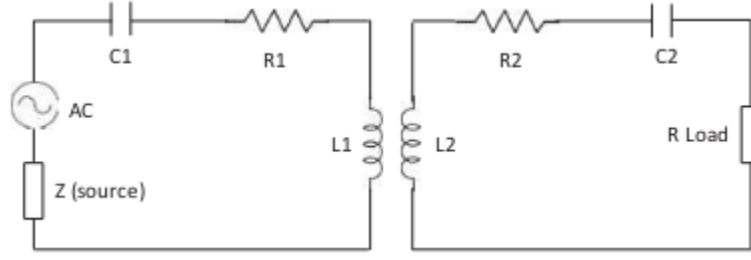
$$V_{ind} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.2)$$

Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transferinin en büyük dezavantajı, iletim mesafesinin çok kısa olmasıdır. Bunun yanında böyle bir kablosuz güç transfer sisteminde kullanılan çevrim çiftinin birbirlerine göre hizalanmış olması da gerekmektedir. Aksi takdirde sistemin güç iletim verimliliğinde ciddi düşüşler meydana gelmektedir.

Her ne kadar önemli dezavantajlara sahip olan bir yöntem olsa da bu yöntemin sağladığı oldukça önemli faydalar da bulunmaktadır. Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transfer sistemleri, tasarım açısından oldukça basittir ve yüksek güvenliğe sahiptir. Bu avantajı sayesinde mobil cihazlar, dizüstü bilgisayarlar, diş fırçaları gibi günlük hayatta kullanılan cihazların bünyesinde kullanılmaktadır [1].

1.2.2 Manyetik Rezonans Temelli Kablosuz Güç Transferi

Tipik bir manyetik rezonans temelli kablosuz güç transfer sistemi, aynı doğal rezonans frekansına sahip olan iki elektromanyetik alt sistemden oluşmaktadır ve verimli bir güç transferine imkan tanımaktadır [9]. Böyle bir sistem, Şekil 1.3'te de gösterildiği üzere bir RLC devresi olarak tasarlanabilmektedir. Burada R_1 , L_1 , R_2 ve L_2 sırasıyla verici ve alıcı çevrimlerin kayıp dirençleri ve özendüktanslarını; C_1 ve C_2 ise çevrimlerin rezonans frekansında çalışmasını sağlamak için kullanılan kondansatörlerdir. Bu sistemde de verici çevrim, bir kaynak tarafından beslenmektedir ve verici ile alıcı çevrimler birbirleri ile kuplajlanmıştır.



Şekil 1.3: Manyetik rezonans temelli kablosuz güç transfer sisteminin diyagramı [10].

Manyetik rezonans temelli kablosuz güç transferinin güç iletim veriminde rol oynayan iki önemli faktör bulunmaktadır. Bunlardan birisi, sistemde kullanılan rezonatörlerin Q faktörüdür. Diğer ise kuplajlanma seviyesi veya ortak endüktans değeridir (M) [10, 11].

Q faktörü, Denklem (1.3)'te tanımlandığı gibidir [9]. Burada ω_0 , rezonans frekansını ifade etmektedir ve Denklem (1.4)'te tanımlandığı gibidir. Q faktörünün artması, kayıpların artmasına ve verimi düşmesine sebep olmaktadır.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (1.3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

Ortak endüktans değeri, Denklem (1.5)'te tanımlandığı gibidir [9]. Burada k , çevrim çifti arasındaki kuplajlanma katsayısıdır.

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (1.5)$$

Endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transfer yöntemi ile karşılaştırıldığında manyetik rezonans temelli kablosuz güç transferi, daha uzun mesafelerde güç iletimi yapabilmektedir. Bunun dışında ışımsız bir yöntem olması sebebiyle bir görüş hattına ihtiyaç duymamaktadır ve canlılara karşı neredeyse hiç zarar vermemektedir [1].

Bu yöntemin sahip olduğu birkaç dezavantaj da bulunmaktadır. Bunlardan birisi, endüktif kuplajlanma temelli kablosuz güç transferinde de olduğu gibi bu yöntem de çevrim çifti

arasındaki hizalanma bozulmalarına karşı hassas olmasıdır. Buna ek olarak birden çok alıcı çevrimin olması durumunda rezonans frekansının ayarlanması zorluk çıkarmaktadır [12].

Manyetik rezonans temelli kablosuz güç transferi, bu çalışmada kullanılan yöntemdir.

1.2.3 Elektromanyetik Işıma Temelli Kablosuz Güç Transferi

Tipik bir elektromanyetik ışına temelli kablosuz güç transferi sistemi; mikrodalga kaynağına, dalga kılavuzuna ve alıcı ve verici antenlere ihtiyaç duymaktadır. Güç iletimi, birkaç aşamadan oluşan bir yolu izlemektedir. İletilecek güç, öncelikle mikrodalga kaynağından dalga kılavuzuna iletilmektedir. Ardından dalga kılavuzundaki elektromanyetik dalga, verici antene iletilmektedir. Daha sonra bu elektromanyetik dalga, alıcı antene iletilir.

Elektromanyetik ışına temelli kablosuz güç transferinin en büyük avantajı, güç iletimini uzun mesafelerde sağlamasıdır. Ancak bu yöntem, uzak alan iletim tekniğidir ve ışınlı bir yöntem olması sebebiyle bir görüş hattına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, bu yöntemin canlılara karşı zarar verebilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca güç aktarım verimliliği oldukça düşüktür.

1.3 Kablosuz Güç Transfer Sistemlerinin Kullanım Alanları

Kablosuz güç transferinin uygulamalarını hayatlarımızın birçok farklı alanında görebilmek oldukça mümkündür. Bunun en büyük sebeplerinden birisi, günlük hayatlarımızda kullandığımız elektrikli ve elektronik araçların, teknolojinin gelişmesi ile birlikte taşınabilir hale gelmesidir. Cihazların taşınabilirliğinin artması, bu cihazların elektriksel anlamda beslenmesinin de taşınabilir hale gelmesine sebep olmuştur.

Taşınabilirliğin yanı sıra, kablosuz güç transfer sistemlerinin çevreye olan pozitif etkisi daha yaygın hale gelmesine sebep olmuştur. Pil ile çalışan cihazlardan dolayı yıllık yaklaşık 6 milyar pil atık ortaya çıkmaktadır [1]. Bu durum, atık pillerden açığa çıkan toksik materyallerin çevreye zarar vermesine neden olmaktadır.

Akıllı telefon, kamera, saat ve televizyon gibi cihazlar, kablosuz güç transfer sistemleri ile beslenebilmektedir [13].

Kablosuz güç transferinin sağlık alanında potansiyel uygulamaları mevcuttur. Kalp pilleri [14], verilebilecek en iyi örneklerden birisidir. Kalp pili kullanan bir kişinin, pilin değişimi için belli zaman aralıklarında ameliyat olması gerekmektedir. Buna ek olarak kalp pillerinin ihtiyaç duyduğu gerilim miktarı oldukça küçüktür. Böyle bir durumda uygun bir kablosuz güç transfer sistemi, pil değişimi için gerekli olan ameliyatların önüne geçilebilmesi mümkün olabilir.

Elektrikli araçlar, kablosuz güç transferinin kullanılabilceği alanlardan bir diğeridir. Geçmişte yapılan bir çalışmada [15], verici ile alıcı arasında 26 cm mesafe olması durumunda 100 kW değerinde güç çıkışı, %80 verim ile sağlanmıştır.

Literatürde geleceğe yönelik kablosuz güç transferi temelli fikirler de bulunmaktadır. Bu fikirlerden birisi, kablosuz güç transfer temelli bir elektrik şebekesi ile kablolu iletim hatlarına olan ihtiyacın azaltılmasıdır [16]. Fikirlerden bir diğeri ise enerji hasatlama [17, 18] yöntemidir.

1.4 Kablosuz Güç Transferindeki Temel Problemler ve Ana Araştırma Konuları

Kablosuz güç transferi ile ilgili yapılan çalışmaları, iletim mesafesinin ve veriminin iyileştirilmesi ile çoklu verici veya alıcı çevrimlerin kullanıldığı tasarımlar olmak üzere iki ana kategoriye ayırmak mümkündür.

1.4.1 İletim Mesafesi ve Veriminin İyileştirilmesi

Bir kablosuz güç transfer sisteminin güç iletim verimini ve iletim mesafesini etkileyen birçok etken, dört alt başlıkta incelenebilmektedir.

Çevrim tasarımı: Çevrim malzemesinin iyileştirilmesi, kablosuz güç transfer sisteminin güç iletim verimini iyileştirebilmektedir. Litz teli kullanarak yapılan bir çalışmada [19]

verimde yaklaşık %20 değerinde bir iyileştirme elde edilmiştir. Başka bir çalışmada ise [20] tel yerine borular kullanılarak verimde iyileştirme sağlanmıştır.

evrim geometrisi de verime etki eden başka bir etkidir. Geçmişte yapılan bir çalışmada [21] farklı geometriye sahip çevrim yapılarının farklı verim değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çevrimlerin hizalanması: Kablosuz güç transfer sisteminin güç iletim verimini etkileyen en önemli etkenler birisi, sistemde kullanılan verici ve alıcı çevrimin birbirine göre hizalanma bozukluğu olması durumudur [21-24]. Yanal ve açısal olmak üzere toplamda iki farklı hizalanma bozukluğu vardır [22, 23, 25].

Yanal hizalanma bozulması durumunda verici ile alıcı çevrimler birbirine göre paralel olmalarına rağmen çevrim merkezleri aynı noktada değildir. Başka bir ifade ile çevrimler arasında yanal olarak mesafe bulunmaktadır.

Açısal hizalanma bozulması durumunda verici ile alıcı çevrimlerin merkezleri birbirine göre hizalanmış olmalarına rağmen çevrimlerden birisi, bir aı değeriyle döndürülmüştür.

Elektronik devre ve yenilikçi teknikler: Kablosuz güç transfer sistemlerinde yüksek verim ile iletimi sağlamak için optimal frekansı bulmak önemlidir. Bunun için frekans takip sistemleri kullanılmaktadır.

Geçmişte yapılan bir çalışmada [26], maksimum verim değerini elde edebilmek için gerekli olan frekansı bulan otomatik frekans takip sistemi önerilmiştir. Başka bir çalışmada [27] önerilen kompanzasyon sistemi ile sistem veriminin iyileştirilmesi öngörülmüştür.

Aynı anda birden fazla cihazın beslenmesi, günlük hayatta ihtiyaç duyulan bir durumdur. Bunun için birden çok alıcı çevrimi besleyebilen bir kablosuz güç transfer sistemi tasarımı gereklidir.

Yapılan bir çalışmada [28], kablosuz güç transfer sisteminde birden çok verici veya alıcı çevrimlerin kullanılmasının etkisi incelenmiştir. Alıcı evrim sayısının arttırılması, iletimdeki verimin artmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak verici çevrim sayısının artışı, tam tersi bir durumun olmasını sağlayabileceği de gözlemlenmiştir.

1.5 Literatürdeki Diğer Çalışmalar

Bu bölümde kablosuz güç transfer sistemlerinde kullanılan verici ve alıcı çevrimler arasında meydana gelen yanıl hizalanma bozulmalarının etkisi üzerine geçmişte yapılan çalışmalar incelenecektir.

Literatürde bulunan çalışmaları, sistem tasarımı odaklı çalışmalar ve çevrim tasarımı odaklı çalışmalar olmak üzere iki farklı grupta değerlendirmek mümkündür.

1.5.1 Sistem Tasarımı Odaklı Çalışmalar

Kuplajlanma farklılıklarından kaynaklanan çıkış gücündeki düşüşleri minimize etmek için sistem tasarımı ile ilgili çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır.

Çalışmaların bir kısmı [29-33], empedans eşleme devreleri üzerinde durmuştur. 2014 yılında yapılan bir çalışmada [29], yeni bir ayarlanabilir empedans eşleme devresi önerilmiş ve mesafe değişimlerine karşı toleransı yüksek bir sistem geliştirilmiştir. Kablosuz güç transfer sisteminin verici tarafında birbirine seri veya paralel bağlı kapasitörlerden oluşan ve maksimum verimi sağlamak için en iyi kapasitör kombinasyonunu hesaplayan bir algoritma sunulmuştur.

Otomatik empedans eşleme sistemi, Beh ve diğ. tarafından önerilmiştir [30]. Bu sistemde kablosuz güç transfer sistemindeki rezonatör çiftinin rezonans frekansı, güç kaynağını frekansına eşlenmektedir. Yapılan simülasyonlar ve deneyler sonucunda çevrim çift arasında farklı mesafe değerleri için güç iletim veriminin iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

Waters ve diğ. [31], çalışmalarında tek frekansta sabit güç iletim verimini sağlamak için uyarlamalı empedans eşleme ağ topolojisini önermişlerdir. Maksimum güç iletim verimini sağlayan topolojiyi oluşturan devre elemanlarının değerlerini hesaplayabilmek için iki farklı algoritma sunulmuştur.

Heebl ve diğ. [32], frekans ayarlı ve empedans ayarlı kablosuz güç transfer sistemlerini detaylıca incelemiştir. İncelemeler sonucunda empedans ayarlı sistemlerin, frekans ayarlı sistemlere göre daha yüksek verimlere erişebildiği elde edilmiştir. Ancak buna ek olarak frekans ayarlı sistemlerin tasarımı ve uygulaması, empedans ayarlı sistemlere göre daha kolay olduğu da çalışmada belirtilmiştir.

Duong ve Lee [33], röle ve anahtarlardan oluşan bir empedans eşleme devresi önermiştir. Anahtarların kontrolü, röle tarafından sağlanmaktadır. Çalışmada önerilen ve üç adımdan oluşan algoritma, röleyi kontrol etmekte ve dolaylı yoldan anahtarları kontrol etmektedir. Anahtarlar ise, empedans eşleme devresinin elemanlarının değerini kontrol etmektedir. Kablosuz güç transferi, yanal ve açılmalarda hizalanma bozulmaları ve çevrim arası mesafe farklılıklarına göre karakterize edilmiştir ve devre elemanlarının değerleri, bu kriterlere bağlı olarak algoritma tarafından bulunmaktadır.

Çalışmaların diğer kısmı ise [34-38], frekans ayarlı sistemlerin üzerinde yoğunlaşmıştır. Gao ve diğ. [34], elektrikli araçların şarj edilmesinde kullanılmak üzere otomatik frekans ayarlama sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sistem, elektrik aracı besleyen gerilim kaynağının frekansını takip ederek darbe-periyot oranında yapılan değişiklikler ile elektrikli aracın bataryası, sabit bir akım değeri ile beslenmiştir.

Kar ve diğ. [35], kablosuz güç transfer sisteminde kullanılan çevrim çifti arasındaki hizalanma bozulmalarının ve çevrim çiftinin yakınında bulunan metal cisimlerin oluşturduğu olumsuz etkiyi, geliştirdikleri frekans ayarlı sistem ile azaltarak sistemin verimini arttırmışlardır.

Sis ve Bıçakçı [36], sistemin yansıma katsayısı değerine bağlı olarak rezonans frekansı takibi yapan ve kaynak frekansını ayarlayan bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem ile kablosuz güç transfer sisteminin maksimum verime ulaşmasına imkan tanınmıştır.

Luo ve diğ. [37], geçmişte yapılan çalışmaları incelediklerinde bu çalışmalarda önerilen yöntemlerin, her ne kadar fayda sağlasa da kablosuz güç transfer sisteminin alıcı kısmının boyutunu arttırdığını gözlemişlerdir. Bu durum, boyut anlamında kısıtın olduğu durumlarda faydalı yöntemlerin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Araştırmacılar bu çalışmada, gömülü cihazlar ile birlikte kullanılmak üzere kablosuz güç transfer sisteminin sağlamlığını iyileştiren ve alıcı kısmının boyutunu arttırmayan yeni bir sistem önerisinde bulunmuştur. Önerdikleri sistemde, hem frekans takibi hem de empedans eşleme tekniklerini kullanmışlardır.

Seo ve Lee, yaptıkları çalışmada [38] kablosuz güç transfer sisteminin güç iletim verimini ve çıkış gücünü arttırmak için ZPA ve MRCM olmak üzere iki farklı frekans ayarlama

yöntemini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda MRCM yönteminin, ZPA yöntemine göre daha iyi sonuç verdiğini paylaşmışlardır.

1.5.2 Çevrim Tasarımı Odaklı Çalışmalar

Kablosuz güç transfer sistemlerinde kullanılan çevrimlerin hizalanma bozulmalarına karşı toleranslarının iyileştirilmesi için çeşitli çevrim tasarımları literatürde bulunmaktadır [39-45].

Literatürdeki birçok çalışma, çift kutuplu çevrim yapısının üzerinde yoğunlaşmıştır. Budhia ve diğ. [39], yaptıkları çalışmada akı borusu fikrini ortaya atmışlardır. Akı borusu, ferrit blok etrafında sarılı ve birbirine paralel bağlı iki sarmal yapıda çevrimlerden oluşmaktadır. İki çevrim arasında oluşan manyetik akı borusu, yatay doğrultuda normalden daha uzun bir akı yolu oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum, akı borusu yapısının yüksek kuplajlanma seviyesine ve hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olmasını sağlamaktadır.

Akı borusu yapısının en büyük dezavantajı, çift taraflı manyetik akı dağılımına sahip olmasıdır. Bu özellik, çevrim yapılarının yakınında metal bir cismin bulunması durumunda çevrim yapısının kalite faktöründe (Q) ciddi bir düşüşe sebep olacağı için istenmeyen istenmeyen bir özelliktir. Bu problem için tek yönlü manyetik akı dağılımına sahip çift kutuplu çevrim yapısı (DD) önerilmiştir [40]. DD çevrim yapısında iletken teller, ferrit bloklarının üzerinde D şekline benzer çevrimler oluşturacak şekile sarılmıştır ve bu çevrimler birbirlerine paralel olarak bağlanmıştır. D şeklindeki çevrimlerin konumu, DD çevrim yapısının ortasındaki sarım sayısını iki katına çıkarmaktadır. Bu durum, çevrim yapısının kuplajlanma seviyesini arttırmaktadır ve dikey doğrultudaki hizalanma bozulmalarına karşı yüksek toleransa sahip olmasını mümkün kılmıştır.

Yapısı gereği DD çevrimler, yatay eksenindeki hizalanma bozulmalarına karşı oldukça hassastır. Bu duruma çözüm olarak, her bir D şeklindeki çevrimin iki kuadrantı arasına dikey eksene paralel olacak şekilde yeni çevrimler (Q) eklenmiştir ve oluşan yeni çevrim yapısı, DDQ çevrim yapısı olarak adlandırılmıştır [40]. DDQ çevrimler, hem yatay hem de dikey eksenindeki hizalanma bozulmalarına karşı yüksek toleransa sahip olsa da DD ve Q çevrimleri arasında herhangi bir elektriksel bağlantı olmadığı için ayrı devrelere ihtiyaç duymaktadır.

Bu durum, DDQ çevrim yapısının kullanıldığı kablosuz güç transfer sisteminin maliyetini ve tasarım karmaşıklığını arttırmaktadır.

Bazı uygulamalarda yalnızca tek bir doğrultudaki hizalanma bozulmalarına karşı yüksek toleransa sahip kablosuz güç transfer sistemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda [41, 42] DD çevrim yapısı kullanılmış ve çevrimler, ihtiyaç duyulan doğrultudaki toleransı arttıracak şekilde yerleştirilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada [43], çift kutuplu DD çevrim yapısı ile tek kutuplu dikdörtgenel çevrim yapısı kullanılarak tek bir çevrim yapısı oluşturulmuş ve daha küçük çevrim boyutlarıyla yüksek kuplajlanma katsayısı ve hizalanma bozulmalarına karşı toleransta iyileştirme elde edilmiştir.

Jonah ve diğ. [44], açısal hizalanma bozulmalarına karşı oldukça yüksek toleransa sahip üç boyutlu çevrim yapısını önermiştir. Üç boyutlu çevrim yapısı, toplamda üç çevrimden oluşan bir yapıya sahiptir. Ancak çevrimlerin kablosuz güç transfer sistemine yerleştirilmesinin zor olması, bu çevrim yapısının en büyük dezavantajıdır.

Kalwar ve diğ. [45], dört komşu çembersel çevrim ile bir dikdörtgenel çevrimden oluşan yeni bir çevrim yapısını (QDQ) önermiştir. Çalışmada, QDQ çevrim yapısının hizalanma bozulmalarına karşı toleransının yüksek olduğu paylaşılmıştır.

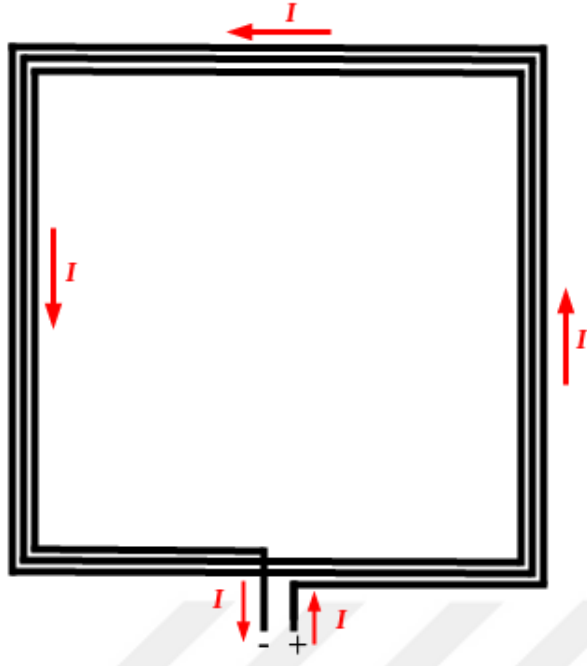
2. KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ İÇİN YAYGIN ÇEVİRİM YAPILARI

Kablosuz güç transfer sistemlerinde kullanılan karesel, çembersel ve dikdörtgensel çevrim yapıları Bölüm 2.1’de incelenecektir. Bölüm 2.2’de bu çevrim yapılarının simülasyon ortamında modellenmesi, hizalanma bozulmalarının çevrim çiftleri üzerindeki etkisi ve bu işlemlerin yapıldığı simülasyon ortamı detaylıca incelenecektir. Bu bölümde elde edilen bulgulardan yola çıkarak geliştirilen ve bu tez çalışmasının odak noktasını oluşturan artı şekilli çevrim yapısı, Bölüm 3’te paylaşılacaktır. Bölüm 3.1’de, artı şekilli çevrim yapısının simülasyon ortamında modellenmesi ve hizalanma bozulmalarının artı şekilli çevrim çifti üzerindeki etkisi üzerinde durulacaktır. Çok sarımlı karesel, çembersel ve dikdörtgensel ve artı şekilli çevrim çiftlerinin deney ortamındaki analizi ve bu işlemin yapılacağı deney ortamı, Bölüm 3.2’de incelenecektir. Ardından Bölüm 3.3, frekans ayarlı bir kablosuz güç transfer sistemi bünyesinde çok sarımlı artı şekilli çevrim çifti kullanılması üzerinde duracaktır. Son olarak artı şekilli çevrimlere ferrit blokları da eklenerek ferrit bloklarının, artı şekilli çevrim çiftinin performansını nasıl etkileyeceği Bölüm 3.4’te incelenecektir.

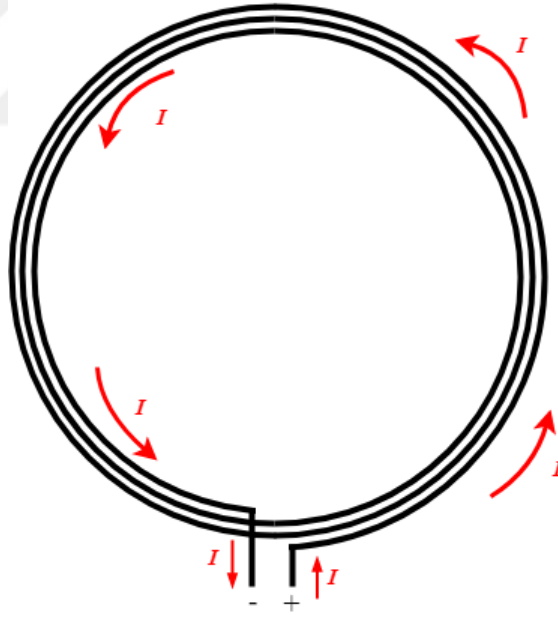
2.1 Kablosuz Güç Transfer Sistemlerinde Kullanılan Yaygın Çevrim Yapıları

Bu bölümde kare, dikdörtgen ve çember olmak üzere üç farklı geometrik şekle sahip çevrim yapıları incelenecektir. Çevrimlerin geometrik yapılarının diyagramları sırasıyla Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’te görüldüğü gibidir.

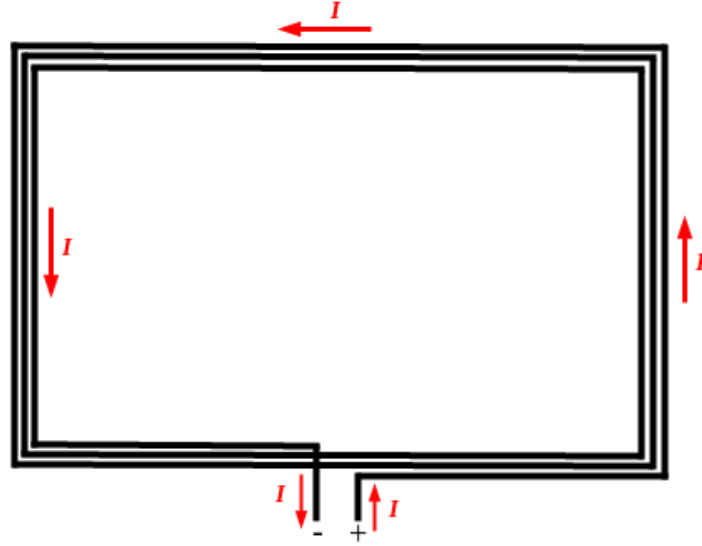
Her bir çevrimde sargılar, iletken tellerle sarılmasıyla çoklu sayıda elde edilmektedir ve giriş bağlantısının yapılabilmesi adına telin başlangıç ve bitiş noktaları, aynı noktaya gelecek şekilde yapılmaktadır. Üretilen çevrimlerde kayıpların az olması adına düşük kayıp sergileyen Litz telleri veya bakır boru da kullanılabilir.



Şekil 2.1: Karesel çevrim diyagramı.



Şekil 2.2: Çembersel çevrim diyagramı.



Şekil 2.3: Dikdörtgenel çevrim diyagramı.

2.2 Karesel, Çembersel ve Dikdörtgenel Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Modellenmesi ve Analizi

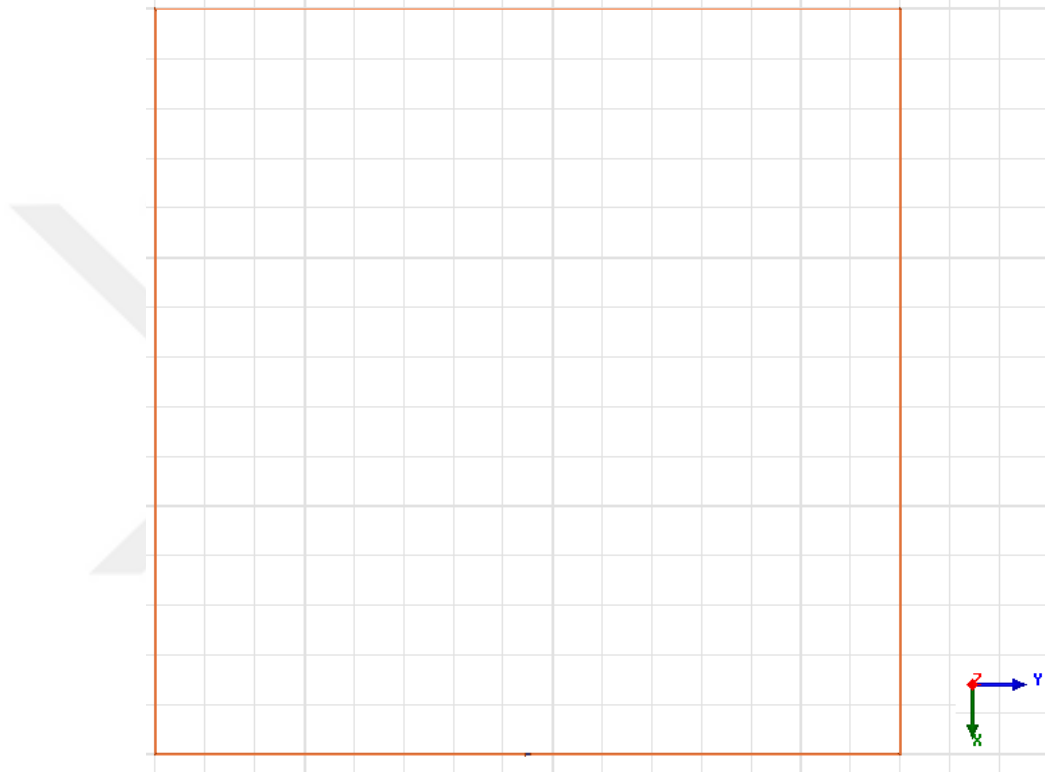
Bu bölümde kuplajlanmış karesel, dikdörtgenel ve çembersel çevrimlerin, simülasyon ortamındaki üç boyutlu modellerinin detayları ve bu çevrim yapılarının yapılan analizlerinin detayları verilecektir. Birçok farklı durum için gerçekleştirilecek simülasyonlar sonucunda çevrim çiftlerinin saçılma parametrelerinin (S parametreleri) elde edilmesi ve bu değerler ile çevrim çiftlerinin endüktif değerlerinin çıkarımları yapılmaktadır.

2.2.1 Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Modellenmesi

Simülasyonlar sonlu elemanlar metodu (FEM) temelli bir elektromanyetik simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak simülasyonların uygulanacağı çevrimlerin üç boyutlu modelleri, High Frequency Structure Simulator (HFSS) isimli programda oluşturulmuştur. Tüm çevrimler tipleri için iletken materyal olarak bakır tercih edilmiş ve tüm çevrimler, 1 mm çap uzunluğundaki bakır tel ile modellenmiştir. Buna ek olarak simülasyonların yapılabilmesi için çevrimlerin içinde bulunacağı bir ortama ihtiyaç vardır. Gerçek ortam ile simülasyon ortamı arasında tutarlılık olması açısından gerçek ortam, simülasyon ortamında modellenmelidir. Bunun için kenar uzunlukları 200 cm olan içi hava

dolu bir küp oluşturularak gerçek ortam modellenmiştir. Çevrim çiftinin S parametrelerinin simülasyon ortamında elde edilebilmesi için, çevrimlerin girişlerine 50Ω değere sahip yığın port'lar (lumped port) kullanılmıştır.

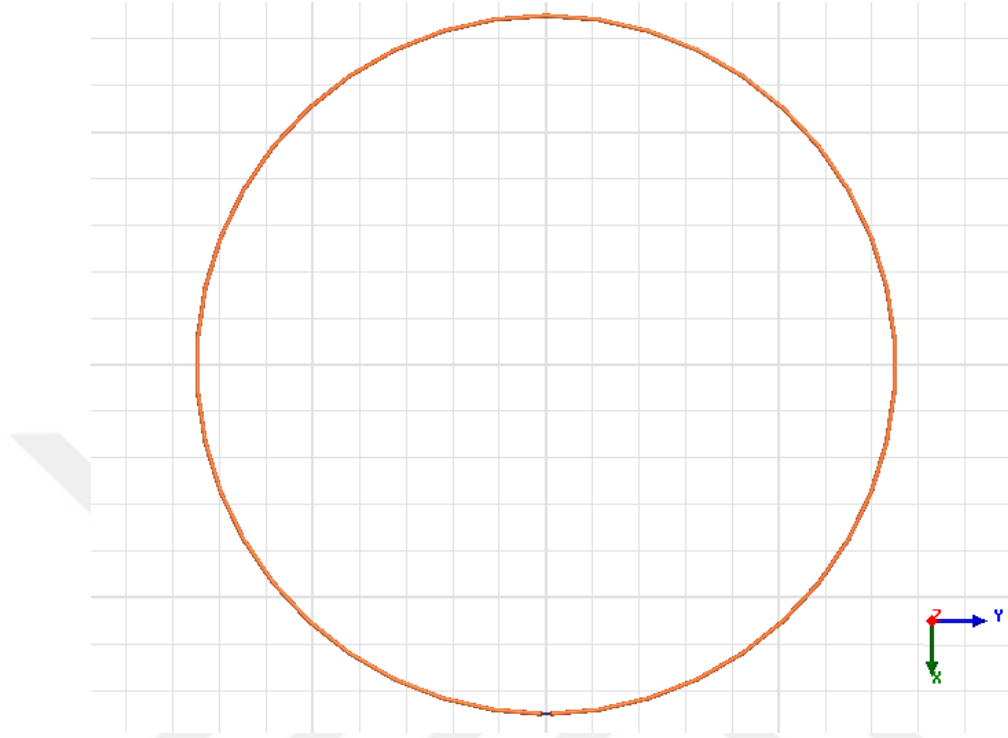
Simülasyon ortamında modellenen karesel, dikdörtgensel ve çembersel çevrimlerin üç boyutlu modelleri ile modellere karşılık gelen koordinat sistemi eksenleri ve yığın elemanlı port sırasıyla Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de görüldüğü gibidir.



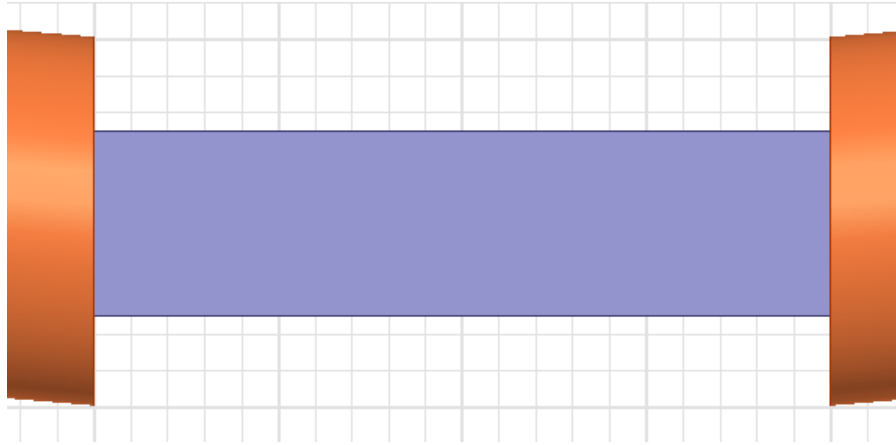
Şekil 2.4: Tek sarımlı karesel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü.



Şekil 2.5: Tek sarımlı dikdörtgensel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü.



Şekil 2.6: Tek sarımlı çembersel çevrim yapısının üç boyutlu modelinin üstten görünüşü.



Şekil 2.7: Çevrim uçları arasındaki yığın port'un üç boyutlu modeli.

2.2.2 Çevrim Yapılarının Simülasyon Ortamında Analizi

Simülasyon ortamında yapılacak analiz için farklı boyutlardaki karesel, dikdörtgenel ve çembersel çevrimlerin üç boyutlu modelleri yukarıda bahsedildiği üzere üretilmiştir. Bu işlem öncesinde belli başlı sınırlamalar oluşturularak üretilen çevrimlerin boyutları belirlenmiştir.

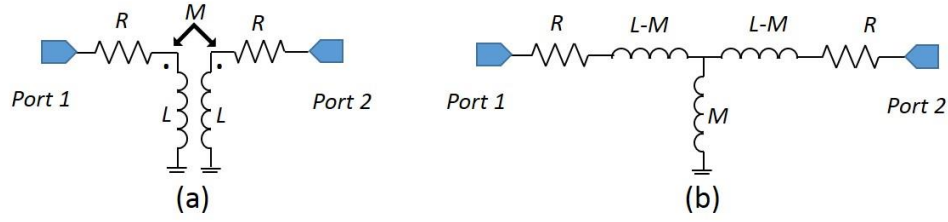
Karesel çevrim için kenar uzunluğu, çembersel çevrimler için ise çap uzunluğu 30 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Dikdörtgenel çevrimler için ise farklı en-boy oranına sahip olacak şekilde farklı boyutlar seçilmiştir. Dikdörtgenel çevrimlerin uzun kenarı 30 cm olacak şekilde belirlenmiş ve bu değer, bu çevrim tipine özel olarak belirlenen tüm boyutlar için sabit tutulmuştur. Çevrimlerin geometrik yapısı ve boyutları, Tablo 2.1’de gösterildiği gibidir.

Simülasyonlar sonucunda her çevrim çifti için S parametreleri elde edilmesi amaçlanmaktadır. Ardından S parametreleri kullanılarak daha detaylı analizlerin de gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple çevrim çiftlerinin, analizlerde kullanılmak üzere bir devre modeli ile modellenmesi gerekmektedir.

Tablo 2.1: Analizde kullanılmak üzere oluşturulmuş karesel, çembersel ve dikdörtgenel çevrim çiftleri.

| Geometrik Yapı | Kenar Uzunlukları / Çap Uzunluğu |
|----------------|----------------------------------|
| Çember | 30 cm |
| Kare | 30 cm x 30 cm |
| Dikdörtgen | 10 cm x 30 cm |
| Dikdörtgen | 15 cm x 30 cm |
| Dikdörtgen | 20 cm x 30 cm |

Bu çalışmada kablosuz güç transfer sistemlerinde kullanılan karesel, çembersel veya dikdörtgenel bir çevrim çifti, Şekil 2.8 (a)’da gösterildiği gibi iki port’lu bir devre olarak modellenmiştir. Bu devre modelinde çevrimler, birbirlerine seri bağlı bir direnç ve indüktör ile temsil edilmiştir. Burada direnç, çevrimlerin kayıp direncini; indüktör ise çevrimlerin öz endüktansını temsil etmektedir. Bu devre modeli, aynı zamanda Şekil 2.8 (b)’de görüldüğü üzere bir T-eşdeğer devre modeline de dönüştürülebilir.



Şekil 2.8: Bir çevrim çiftinin a) 2 port'lu ve b) T-eşdeğer devre modeli.

Bir çevrim çiftinin ortak endüktans değerini hesaplamak için yalnızca simülasyonlar sonucu elde edilen S parametreleri yeterli değildir. Şekil 2.8'deki devre modeli kullanılarak endüktans değerinin hesaplanabilmesi için Denklem (2.1) ve (2.2) aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$M = \frac{Z_{21}}{j \times (2\pi f_0)} \quad (2.1)$$

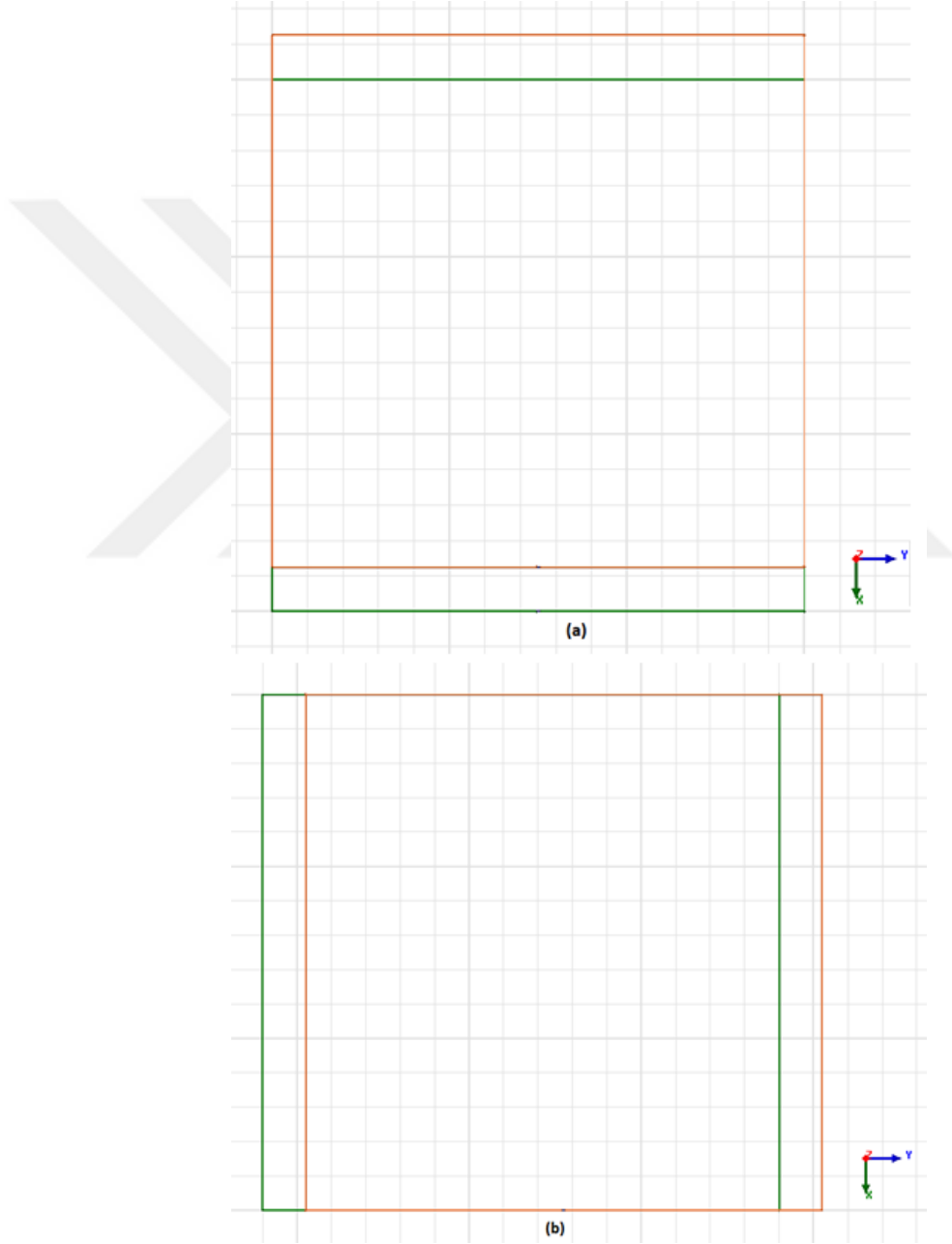
$$Z_{21} = \frac{2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{21}S_{22}} \quad (2.2)$$

Simülasyonlarda, çevrimlerin hizalanma bozulmaları altındaki performanslarını inceleyebilmek için birbirinden bağımsız olarak x ve y doğrultularında, aynı miktarda hizalanma bozulmaları uygulanmaktadır. Karesel ve çembersel çevrimlerin aksine dikdörtgensel çevrimlerde bir simetri durumu söz konusu değildir. Bu sebeple dikdörtgensel çevrimlerin kısa kenarı, x doğrultusu ile paralel olacak şekilde hizalanmıştır.

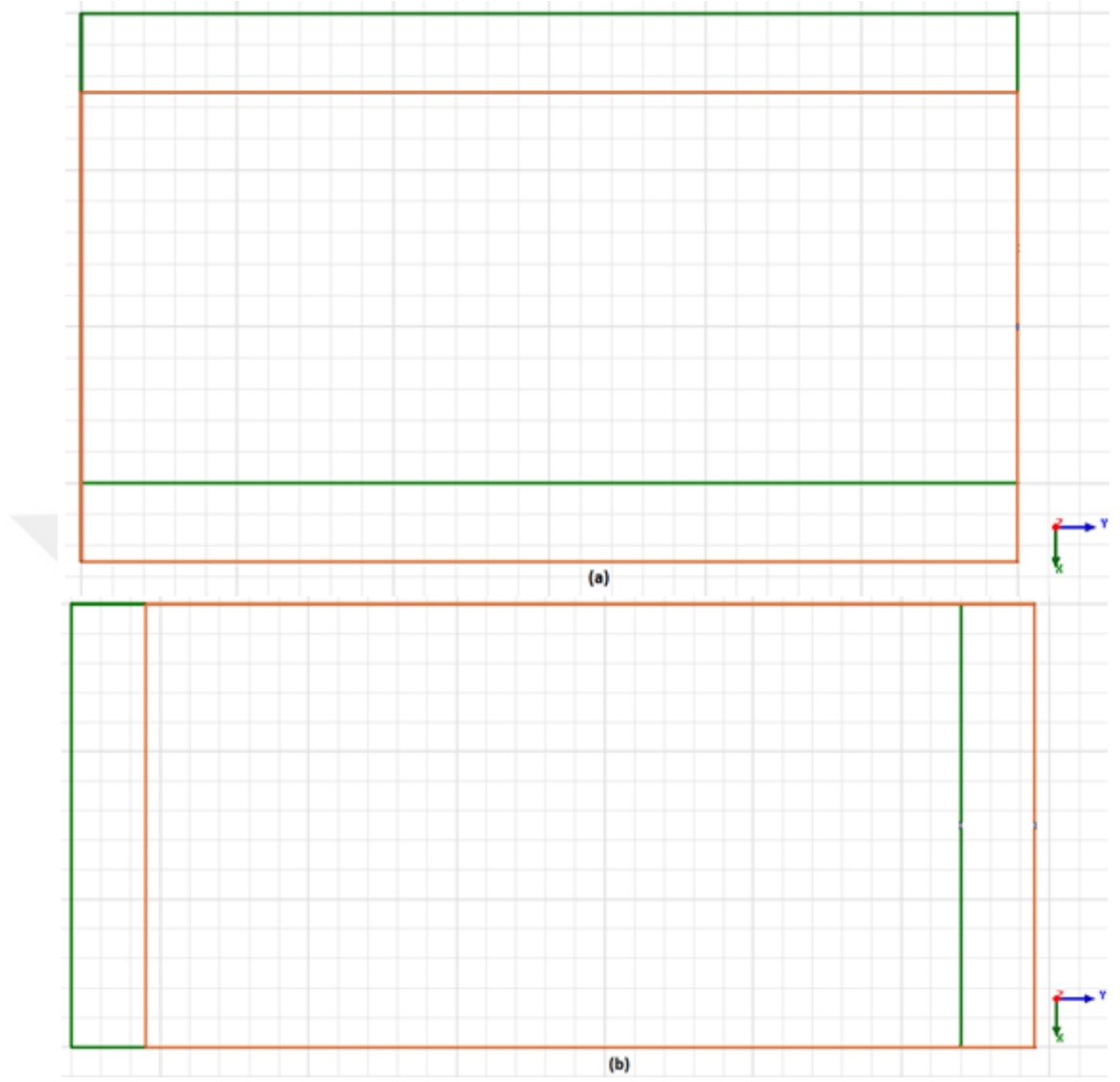
Simülasyonlarda başlangıçta belirlenen ve tüm çalışma boyunca sabit tutulan bir değer parametre ise çevrimler arası mesafedir. Çevrimler arası mesafe, yapılan tüm işlemler boyunca 5 cm olacak şekilde ayarlanmış ve sabit tutulmuştur.

Son olarak tüm çalışma boyunca sabit tutulan bir diğer parametre ise elektromanyetik frekans aralığı ve frekans adım değerleridir. Bu tez çalışması boyunca frekans aralığı, 100 kHz değerinden 2000 kHz değerine kadar uzanmaktadır. Bu aralığın 100 kHz değerindeki adımlara paylaşılması ile simülasyonların, yalnızca bu adımlara denk gelen frekans değerinde yapılması sağlanmıştır.

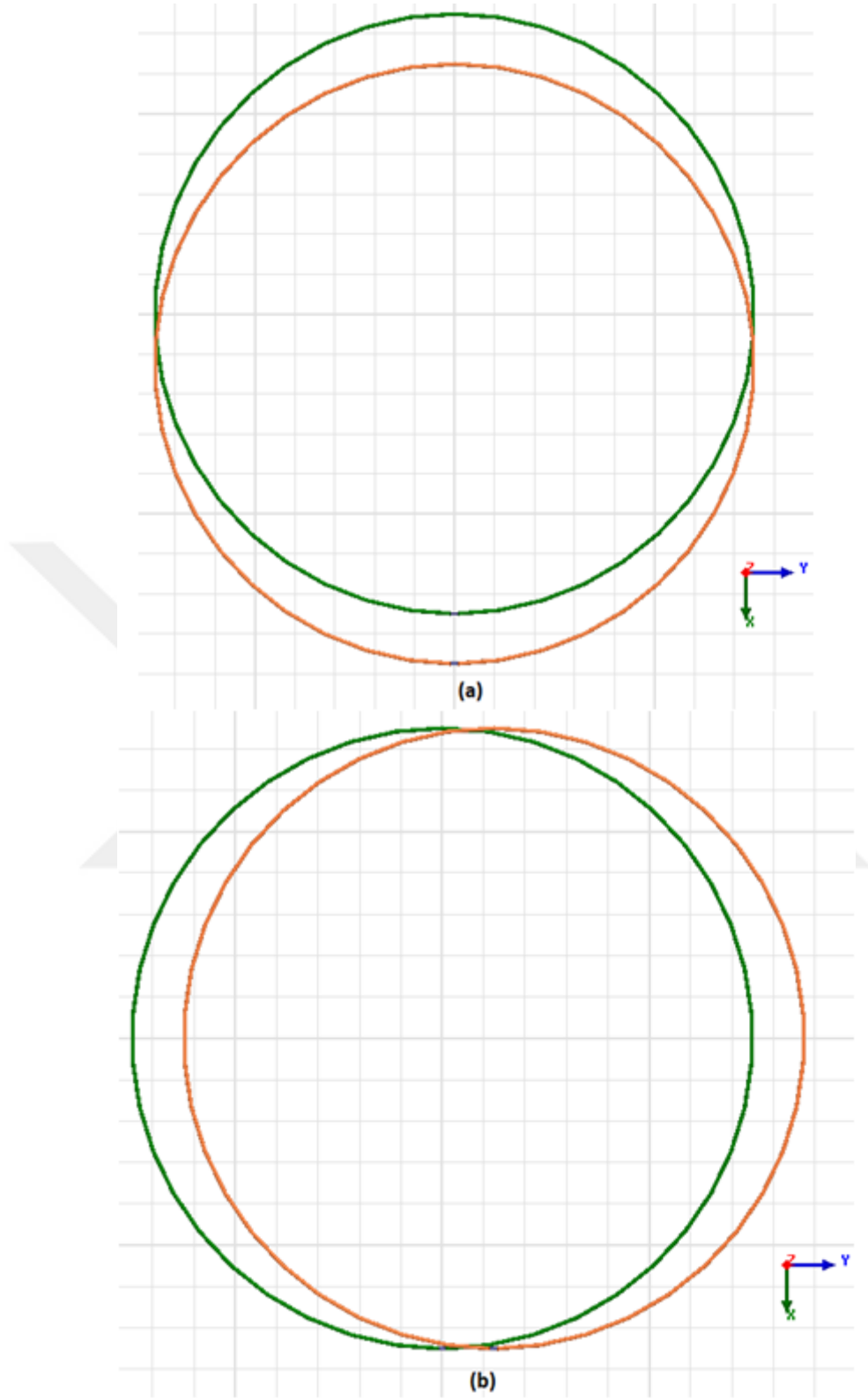
Her bir çevrim çiftine x ve y yönünde birbirinden bağımsız olmak üzere 0, 2.5, 5 ve 7.5 cm olmak üzere toplamda dört farklı hizalanma bozulması uygulanmıştır. Çevrimlere uygulanan hizalanma bozulmaları sonucunda oluşan durum sırasıyla Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11’de gösterildiği gibidir. Yapılan simülasyonlar sonucunda her bir çevrim çifti için nominal ortak endüktans değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.12’de paylaşılmıştır.



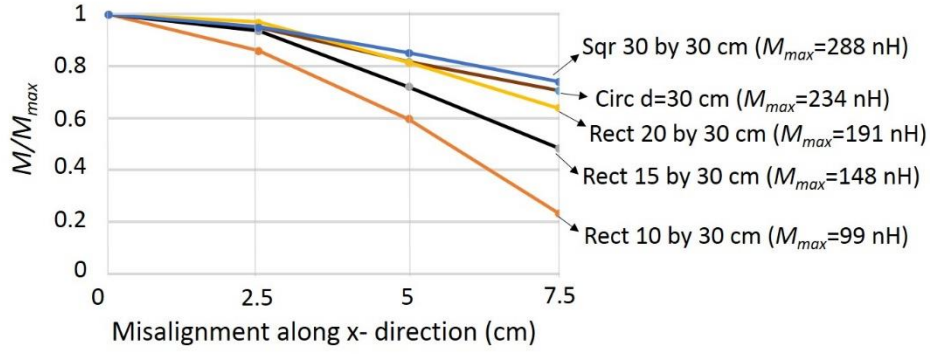
Şekil 2.9: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış karesel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).



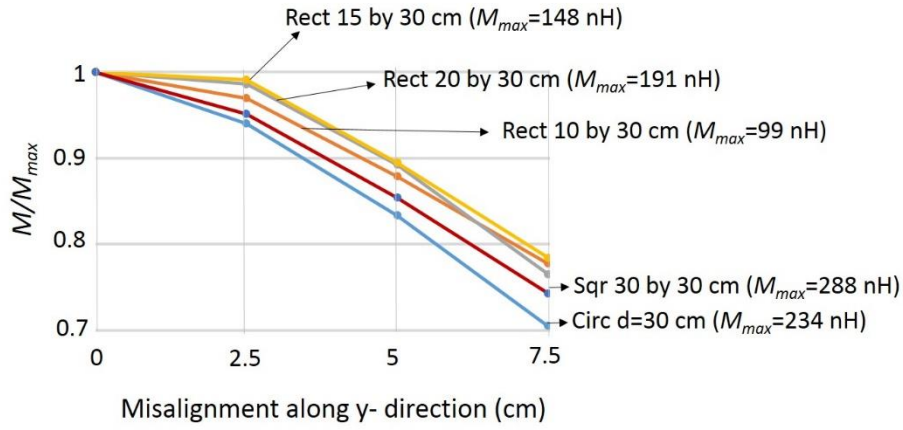
Şekil 2.10: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış dikdörtgensel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).



Şekil 2.11: a) x ve b) y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulanmış çembersel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).



(a)



(b)

Şekil 2.12: Karesel, çembersel ve dikdörtgensel çevrim çiftleri için a) x ve b) y doğrultusunda hizalanma bozulmaları uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri.

Şekil 2.12’de de görüldüğü üzere karesel çevrimler, çembersel çevrimlere göre hem x hem de y doğrultusunda hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi bir toleransa sahiptir. Yine aynı şekilde karesel çevrimler, dikdörtgensel çevrimlere göre x doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olsa da y doğrultusundaki bozulmalarda tam tersi bir durum söz konusudur. Dikdörtgensel çevrimler, karesel ve çembersel çevrimler ile karşılaştırıldığında y doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı çok daha iyi bir toleransa sahip. Bunun sebebi, x doğrultusundaki hizalanma bozulmaları dikdörtgensel çevrimlerin uzun kenarlarının birbirinden uzaklaşmasına sebep olmasıdır. Uzun kenarların birbirlerinden uzaklaşması, dikdörtgensel çevrimlerin büyük bir kısmının birbirinden uzaklaşması anlamında gelmektedir. Bu da çevrimlerin arasındaki kuplajlanma seviyesinin azalmasına neden olmaktadır. Buradan iki farklı ve önemli çıkarım yapılabilmektedir. Öncelikle dikdörtgensel çevrimler, karesel ve çembersel çevrimlere göre x doğrultusundaki

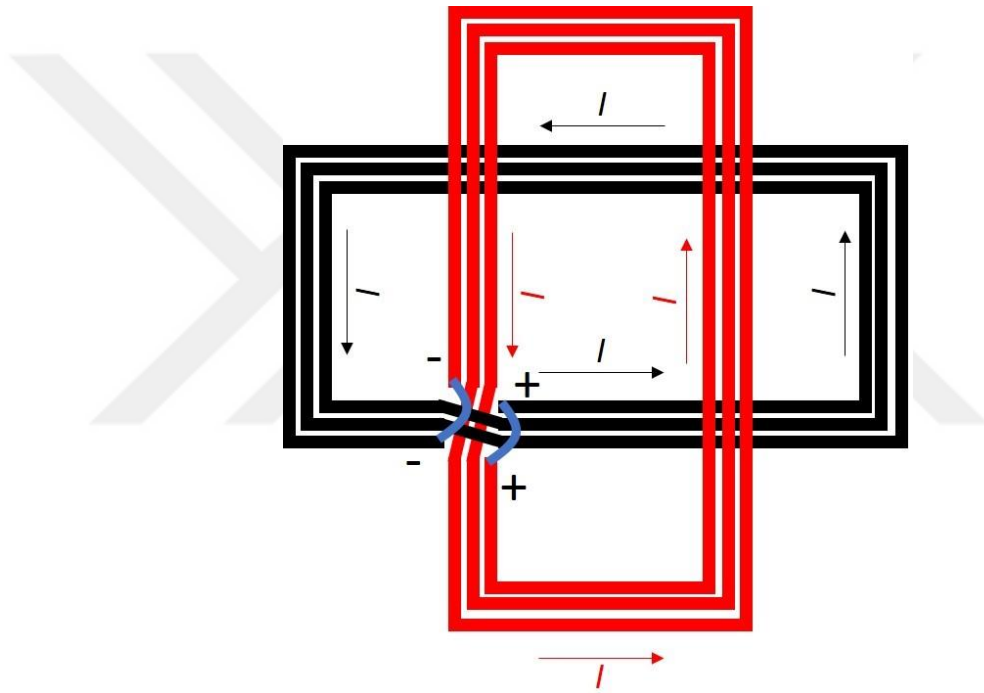
hizalanma bozulmalarına karşı hassasiyeti daha fazla, y doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı hassasiyeti ise daha azdır. Başka bir ifade ile dikdörtgenel çevrimlerin kısa kenarları, x doğrultusu ile paralel olduğu için kısa kenarlar üzerindeki herhangi bir hizalanma bozulması, çevrim çiftinin performansını ciddi anlamda etkilemektedir. Ancak uzun kenarlar üzerindeki değişimlerin, çevrim çiftinin üzerinde bu seviyede bir etkisi bulunmamaktadır.

Bunun yanında fark edilen bir diğer bulgu ise dikdörtgenel çevrimlerin en-boy oranı ile x doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı toleransı arasında bir ilişkinin olmasıdır. En-boy oranı azaldıkça dikdörtgenel çevrimlerin x doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı hassasiyeti de artmaktadır.

Bu bölümde simülasyonlar sonucu elde edilen bulgular baz alındığında dikdörtgenel çevrimlerin faydalı kısımları kullanılarak yeni bir çevrim yapısının oluşturulması mümkün görülmektedir. Bir sonraki bölümde bu tez çalışmasının odak noktası olan yeni çevrim yapısı önerilecek ve incelenecektir.

3. ARTI ŞEKİLLİ ÇEVİRİM YAPISI

Artı şekilli çevrim yapısı, aynı geometrik merkeze sahip olan iki alt birim dikdörtgensel çevrimlerden oluşan yeni bir çevrim yapısıdır. Alt birim çevrimlerden birisi, diğeri ile arasında 90 derece açı farkı olacak şekilde merkezleri etrafında döndürülmüş ve bu şekilde alt birim çevrimler birbirleriyle dikey olarak hizalanmıştır. Bunun yanında alt birim çevrimler, birbirlerine elektriksel olarak paralel bağlanmıştır. Artı şekilli çevrim yapısının diyagramı Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.1: Artı şekilli çevrim yapısının diyagramı.

Bölüm 2’de bahsedildiği üzere karesel ve çembersel çevrimler ile karşılaştırıldığında dikdörtgensel çevrimlerin uzun kenarları üzerinde meydana gelen hizalanma bozulmalarına karşı toleransının daha yüksek olduğu gösterilmişti. Artı şekilli çevrim yapısı da iki adet alt birim dikdörtgensel çevrimlerden oluşmakta olup, her bir alt birim çevrimin uzun kenarı birbirine dik yönlerde (örneğin x ve y yönlerinde) oryante olduğundan dolayı, artı şekilli çevrimlerin yataydaki hizalanma bozulmalarına karşı toleransının artması öngörülmektedir.

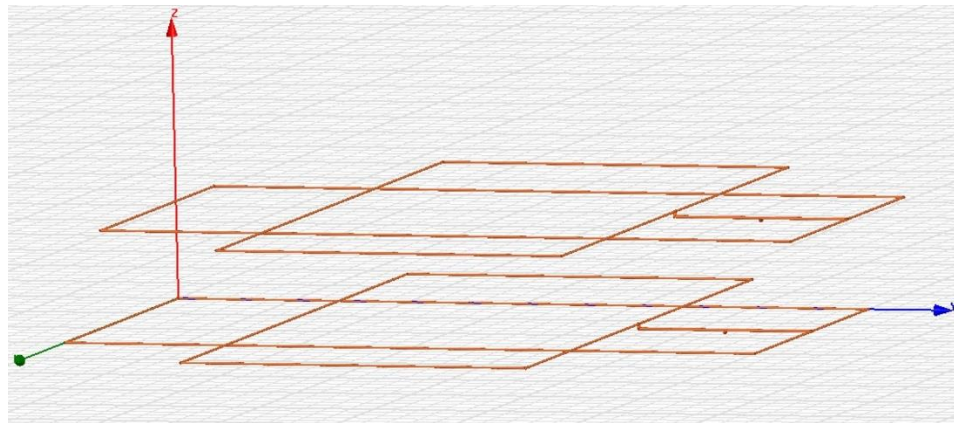
3.1 Artı Şekilli Çevrim Yapısının Simülasyon Ortamında Modellenmesi ve Analizi

Bu bölümde kuplajlanmış artı şekilli çevrimlerin, simülasyon ortamındaki üç boyutlu modellerinin oluşturulması ve bu çevrim yapısının analizi yapılacaktır. Bölüm 2.2’de de olduğu gibi farklı boyutlarda üretilen çevrimlerin üzerinde çeşitli hizalanma bozulmaları uygulanacaktır. Simülasyonlar sonucu çevrim çiftlerinin S parametreleri elde edilip analizin yapılması amaçlanmaktadır.

Analizde kullanılmak üzere farklı boyutlarda artı şekilli çevrim çiftleri simülasyon ortamında üç boyutlu modellenmiştir. Artı şekilli çevrim yapısının üç boyutlu modeli ve analizde kullanılmak üzere oluşturulan artı şekilli çevrim çiftlerinin yapı ve boyut bilgileri, sırasıyla Şekil 3.2 ve Tablo 3.1’de gösterildiği gibidir.

Tablo 3.1: Analizde kullanılmak üzere üretilmiş artı şekilli çevrim çiftleri.

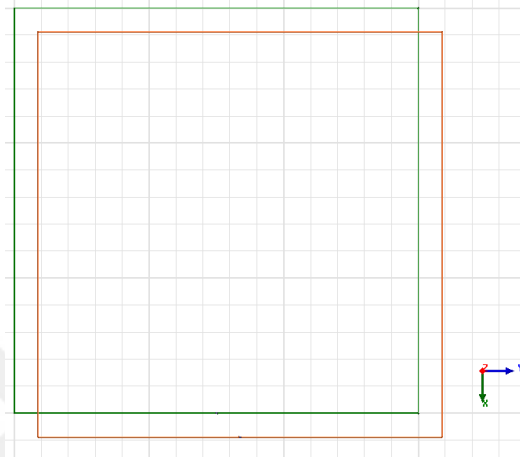
| Geometrik Yapı | Alt Birim Çevrimlerin Geometrik Yapısı | Alt Birim Çevrimlerin Boyutu |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| Artı Şekil | Dikdörtgen | 17 cm x 30 cm |
| Artı Şekil | Dikdörtgen | 20 cm x 30 cm |



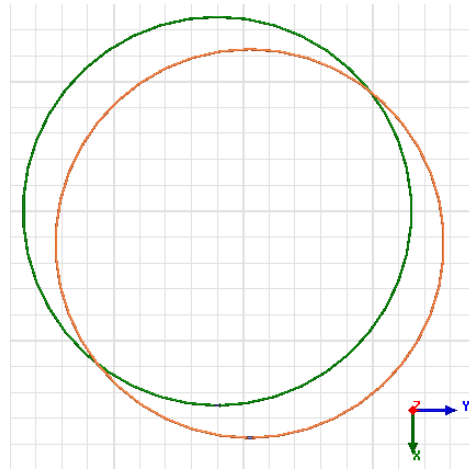
Şekil 3.2: Kuplajlanmış artı şekilli çevrimlerin üç boyutlu modeli

Bölüm 2.2.2’de uygulanan hizalanma bozulmaları, yine aynı simülasyon ortamında ve aynı şekilde yukarıda modellenen artı şekilli çevrim çiftlerine uygulanacaktır. Buna ek olarak çapraz doğrultuda da aynı miktarda hizalanma bozulmaları uygulanacaktır. Birbirinden

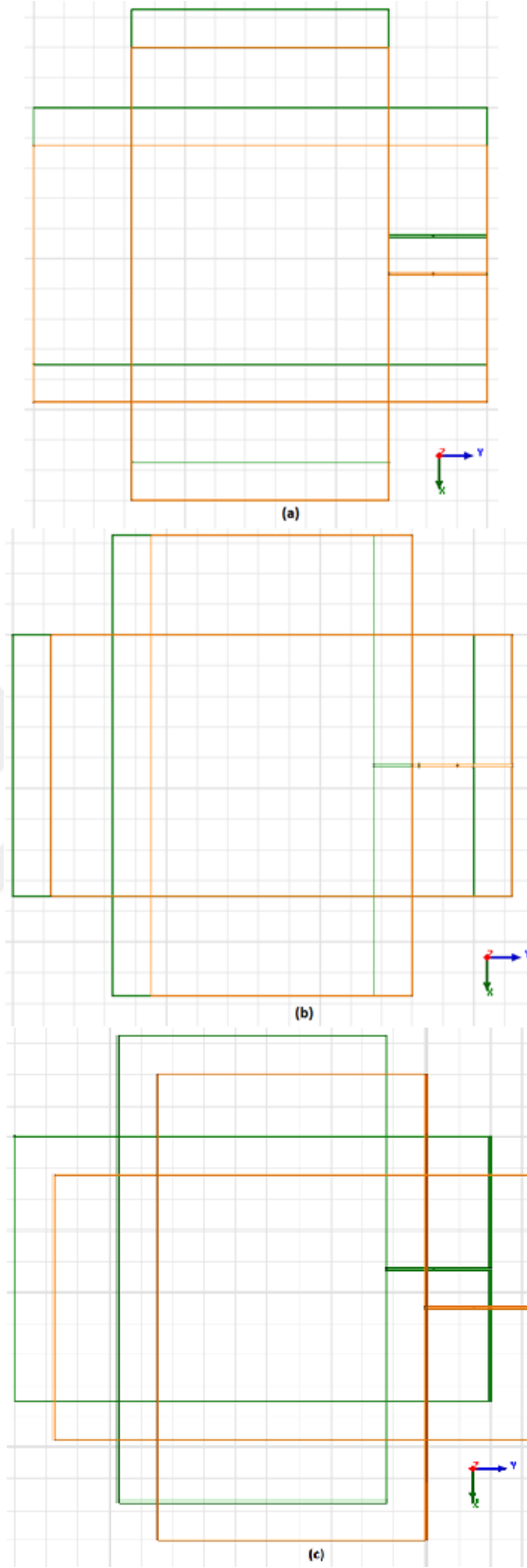
bağımsız olarak x, y ve çapraz doğrultularda 0, 2.5, 5 ve 7.5 cm hizalanma bozulmaları uygulanmış artı şekilli çevrim çifti, Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir. Ayrıca çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulanmış karesel ve çembersel çevrim çiftleri ise Şekil 3.4 ve 3.5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanmış karesel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).

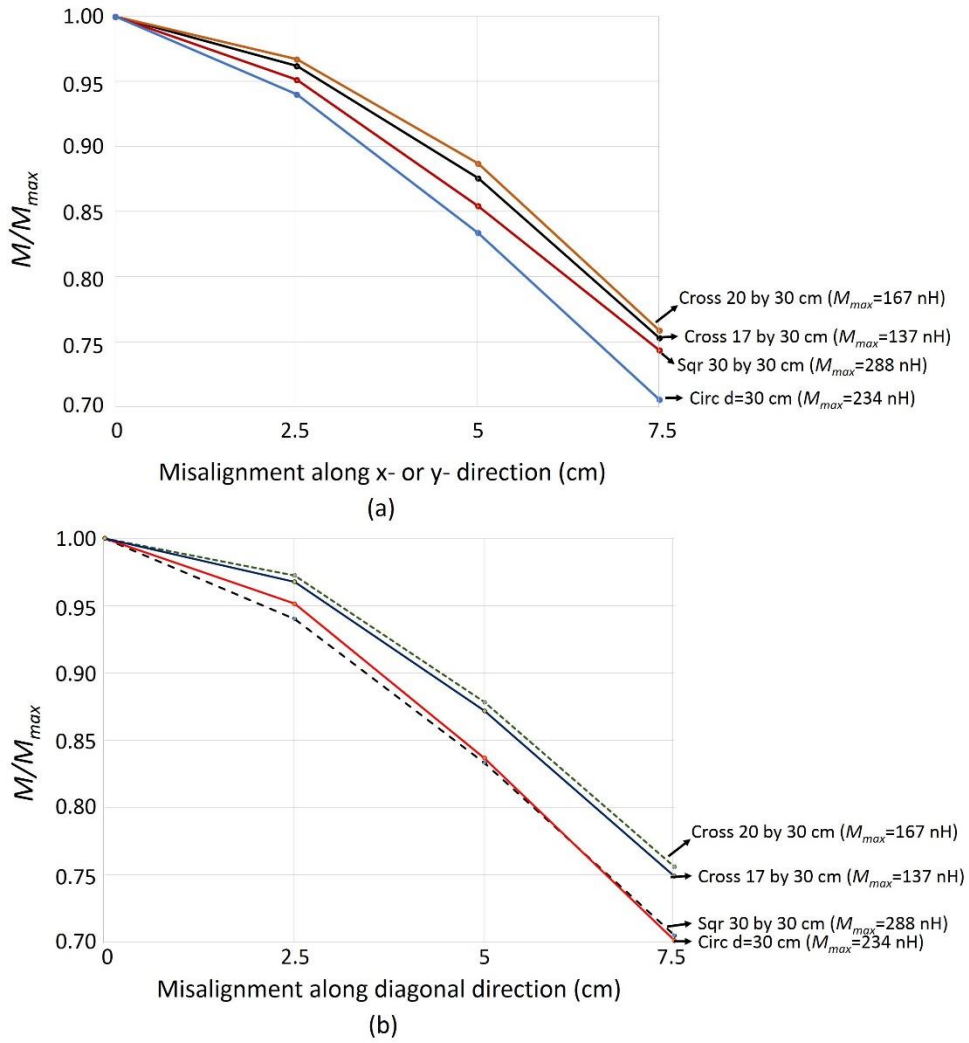


Şekil 3.4: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanmış çembersel çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).



Şekil 3.5: a) x, b) y ve c) çapraz doğrultularda hizalanma bozulmaları uygulanmış artı şekilli çevrimler (Yeşil: Verici çevrim, Turuncu: Alıcı çevrim).

Simülasyonlarda kuplajlanmış çevrim çiftleri arası mesafe 5 cm olarak belirlenmiş ve tüm simülasyon süreci boyunca sabit tutulmuştur. Yine aynı şekilde simülasyonların gerçekleştirildiği frekans aralığı, 100 kHz ile 2000 kHz arası olacak şekilde belirlenmiş ve her 100 kHz değerindeki adımlarda simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.6: Karesel, çembersel ve farklı boyutlardaki artı şekilli çevrim çiftleri için a) x veya y doğrultularında ve b) çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri.

Bölüm 2.2.2’de elde edilen bulgulardan yola çıkılarak artı şekilli çevrim yapısı fikri ortaya atılmıştı ve dikdörtgensel çevrim yapısının faydalı özelliklerini bünyesinde bulunduracağı düşünülmüştü. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere x ve y doğrultularındaki hizalanma bozulmalarında artı şekilli çevrim yapısı, karesel ve çembersel çevrim yapılarına göre daha iyi toleransa sahiptir. Elde edilen bu bulgu ile artı şekilli çevrim yapısının dikdörtgensel çevrim yapısının faydalı özelliklerini bünyesinde bulundurduğu teyit edilmiştir. Buna ek olarak artı şekilli çevrimlerin geometrik yapısı simetriye sahip olduğu için hizalanma bozulmalarının x ve y doğrultuları üzerindeki etkisi aynıdır.

Çapraz doğrultularda uygulanan hizalanma bozulmaları incelendiğinde ise karesel ve çembersel çevrimler ile karşılaştırıldığında artı şekilli çevrim yapısının sahip olduğu toleransta daha fazla iyileşme görülmektedir.

Simülasyonlar sonucu fark edilen bir başka bulgu ise alt birim çevrimlerin boyutu ile ilgilidir. Dikdörtgensel alt birim çevrimlerin kısa kenarı 15 cm’den kısa olduğu durumda karesel çevrim yapısının toleransının, artı şekilli çevrim yapısının hizalanma bozulmalarına karşı toleransına göre daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Buradan yola çıkarak alt birim dikdörtgensel çevrimlerin en-boy oranının ikiden küçük olamayacağı kanısına varılmaktadır.

Şekil 3.6’daki nominal ortak endüktans değerleri incelendiğinde artı şekilli çevrim yapısının, karesel ve çembersel çevrim yapılarına göre daha zayıf kuplajlanmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, artı şekilli çevrim yapısının sahip olduğu en büyük dezavantajdır. Bu dezavantajın önüne geçebilmek için artı şekilli çevrim çiftinin sarım sayısını arttırmak yeterli olacaktır. Ancak sarım sayısının artması, bakır tel kullanımını da arttıracaktır ve bu durum, başka bir dezavantaj olarak görülebilir. Bu durum, Bölüm 3.2’de daha detaylı bir şekilde incelenecektir.

3.2 Çok Sarımlı Karesel, Çembersel ve Artı Şekilli Çevrim Çiftlerinin Deney Ortamında Hizalanma Bozulmaları Analizi

Bu bölümde çok sarımlı karesel, çembersel ve artı şekilli çevrim yapılarının x, y ve çapraz doğrultularda uygulanan hizalanma bozulmalarına karşı performansı incelenecektir. Bu bölümde simülasyon yerine deney yapılacağından dolayı deney ortamında da

bahsedilecektir. Son olarak sarım sayısı artışının çevrim yapıları üzerindeki etkisinin üzerinde durulacaktır.

3.2.1 Deney Ortamı

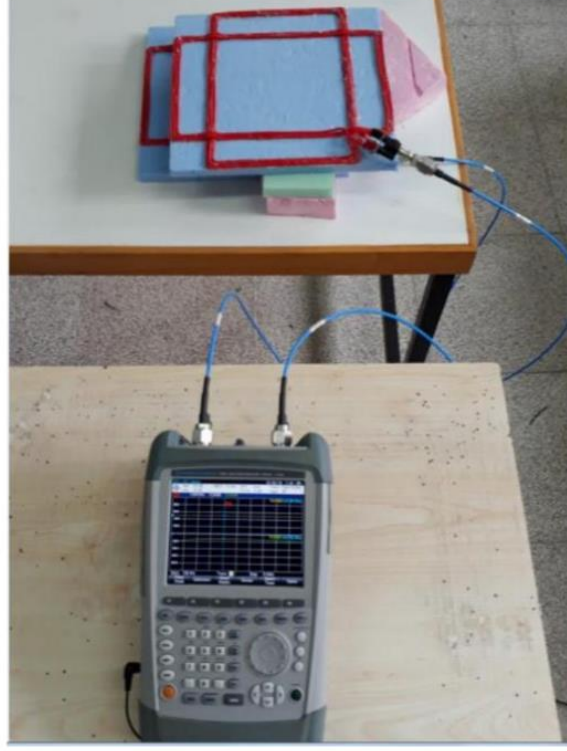
Bir çevrim çiftinin S parametre değerlerinin ölçülmesi için ağ analizörü adı verilen bir cihaza ihtiyaç vardır. Ağ analizörü, genellikle yüksek frekanslı devrelerin analizinde kullanılan bir analiz cihazıdır. Ağ olarak modellenen bir devrenin ağ parametrelerinin (örneğin S parametreleri) ölçülmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada yapılan ölçümlerde Rohde & Schwarz FSH8 Spectrum + Network Analyzer isimli ağ analizörü kullanılmıştır.

Deney ortamında parametre ölçümü yapılacak çevrimlerin üretilmesinde 0.9 mm kalınlığında bakır tel kullanılmıştır. Üretilen çevrimler Styrofoam üzerine yerleştirilmiştir ve bir koaksiyel kablo çifti ile ağ analizörüne bağlanmıştır.

Deney ortamında üretilen çevrimlerin geometrik yapısı, boyut bilgileri ve sarım sayısı, Tablo 3.2’de paylaşılmıştır. Üretilen artı şekilli çevrim çiftinin örneği ve ağ analizörü Şekil 3.7’de gösterildiği gibidir.

Tablo 3.2: Analizde kullanılmak üzere oluşturulmuş karesel, çembersel ve artı şekilli çevrim çiftleri.

| Geometrik Yapı | Kenar Uzunlukları / Çap Uzunluğu | Sarım Sayısı |
|----------------|-------------------------------------|--------------|
| Çember | 30 cm | 3 |
| Kare | 30 cm x 30 cm | 3 |
| Artı Şekil | 20 cm x 30 cm | 4 |



Şekil 3.7: Deney ortamında üretilen artı şekilli çevrim çifti ve ağ analizörü.

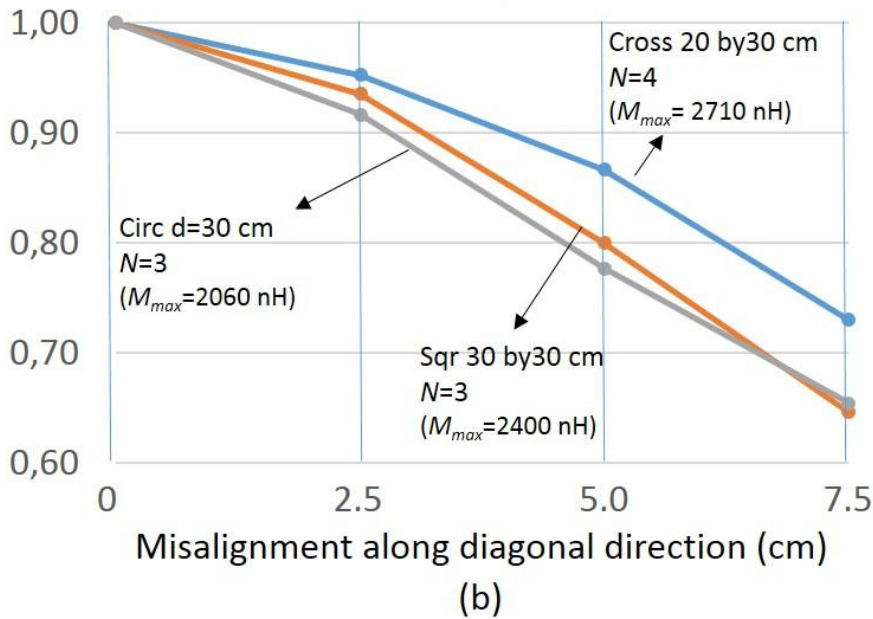
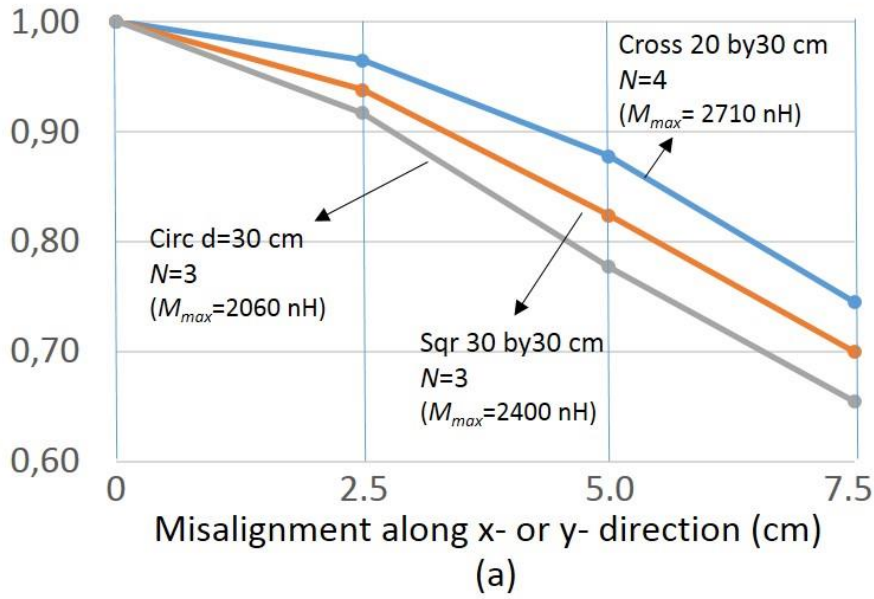
3.2.2 Çok Sarımlı Karesel, Çembersel ve Artı Şekilli Çevrim Yapılarının Hizalanma Bozulmaları Ölçümleri

Bu bölümde Tablo 3.2'deki özelliklere uygun olacak şekilde Bölüm 3.2.1'de üretim detayları verilen çok sarımlı karesel, çembersel ve artı şekilli çevrim çiftlerinin hizalanma bozulmaları analizi yapılacaktır. Daha önceden simülasyon ortamında gerçekleştirilen bu işlem bu bölümde deney ortamında yapılacaktır. Çevrim çiftlerine x, y ve çapraz doğrultularda hizalanma bozulmaları uygulanacaktır.

Çalışma boyunca hizalanma bozulmalarının çevrim yapıları ve dolaylı yoldan kablosuz güç transfer sistemi üzerindeki etkisi üzerinde duruldu. Bölüm 3.1.2'de de bahsedildiği üzere bu bölümde, diğer bölümlerden farklı olarak sarım sayısının artışının çevrim çiftleri üzerindeki etkisi de incelenecektir.

Çevrim çiftlerine birbirinden bağımsız olarak x, y ve çapraz doğrultularda olmak üzere 0, 2.5, 5 ve 7.5 cm hizalanma bozulmaları uygulanmıştır. Ağ analizörü kullanılarak yapılan ölçüm sonunda her bir çevrim çiftine ait 2 port'lu S parametreleri elde edilmiştir. Ardından

sırasıyla (2.1) ve (2.2) kullanılarak her bir çevrim çiftine ait ortak endüktans değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 3.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.8: Çok sarımlı karesel, çembersel ve artı şekilli çevrimlere a) x veya y doğrultularında ve b) çapraz doğrultuda hizalanma bozulması uygulanması durumunda elde edilen normalize ortak endüktans değerleri.

Şekil 3.8’de görüldüğü üzere çok sarımlı artı şekilli çevrimler, karesel ve çembersel çevrim çiftlerine ile karşılaştırıldığında hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 3.6’de elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Bu sebeple hem x ve y doğrultularında hem de çapraz doğrultuda meydana gelen hizalanma

bozulmalarına karşı artı şekilli çevrimlerin, karesel ve çembersel çevrimlere göre daha iyi toleransa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

3.2.3 Sarım Sayısının Artışının Çevrimler Üzerindeki Etkisi

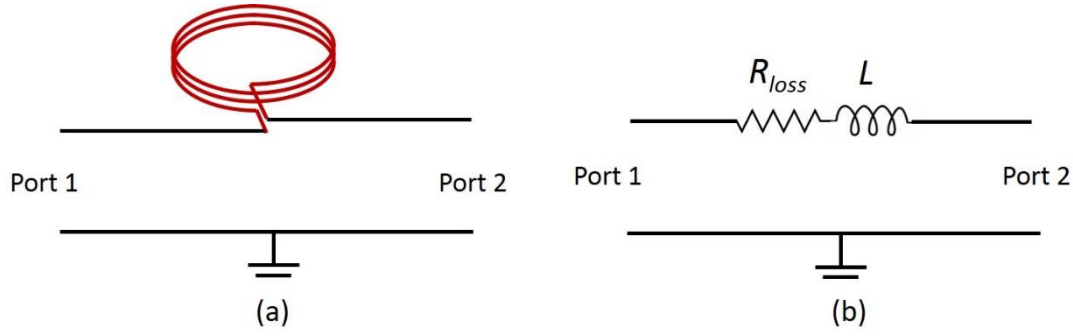
Bölüm 3.1.2’de de bahsedildiği üzere, sarım sayısının artmasıyla birlikte bakır tel kullanımında da artış meydana gelmektedir. Bu durum ilk başta bir dezavantaj olarak görülmektedir. Bu sebeple bu bölümde sarım sayısındaki artışın karesel, çevrimsel ve artı şekilli çevrimler üzerindeki etkisi incelenecektir.

Şekil 3.8’de her çevrim çiftinin sahip olduğu maksimum ortak endüktans değeri verilmiştir. Görüldüğü üzere çok sarımlı artı şekilli çevrim çifti, çok sarımlı karesel ve çembersel çevrim çiftlerinden daha yüksek ortak endüktans değerine sahiptir. Buna ek olarak Şekil 3.5 ile Şekil 3.7 incelendiğinde tüm çevrim yapıları için sarım sayısı ile ortak endüktans değeri arasında N^2 ilişkisi bulunduğu görülmektedir.

Bunun yanında ölçüm sonucu elde edilen S parametreleri kullanılarak kuplajlanmamış her bir çevrim için öz endüktans ve parazitik kayıp direnç değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.9 (a)’da gösterilen kuplajlanmamış bir çevrim, Şekil 3.9 (b)’de gösterildiği üzere birbirine seri bağlı bir bobin ve bir direnç olarak modellenmiştir. Bu devre modelinde kullanılan direnç ve bobin değerleri, sırasıyla Denklem 2 ve 3 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada Z_0 , sistem empedansıdır ve 50Ω değere sahiptir. S_{11} parametresi ise ikinci port’a sistem empedansı bağlandığı durumda ölçüm sonucu ile elde edilen yansıma katsayısıdır.

$$R_{kayıp} = \operatorname{Re} \left[\frac{2Z_0 \cdot S_{11}}{1 - S_{11}} \right] \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\operatorname{Im} \left[\frac{2Z_0 \cdot S_{11}}{1 - S_{11}} \right]}{2\pi f} \quad (3.2)$$



Şekil 3.9: Her bir çevrim için S parametre ölçümü sırasında kullanılan a) 2 port'lu seri bağlı devre modeli ve bu modelin b) elektrik devre elemanları ile oluşturulmuş devre modeli.

Karşılaştırma yapmak amacıyla üretilen her çevrim için kayıp direnci, öz endüktans, tam hizalanmış çevrim çiftine ait ortak endüktans, ortak endüktans ve öz endüktans oranı, alan ve tel kullanım miktarı hesaplanıp Tablo 3.3'te paylaşılmıştır.

Tablo 3.3: Her çevrim için hesaplanan kayıp direnci, öz endüktans, ortak endüktans, ortak endüktans ile öz endüktans oranı, alan ve tel kullanım miktarı.

| Çevrim Yapısı | Parametreler | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|---------|---------|-------|---------------------|----------------------|
| | $R_{kayıp}$ | L | M | M/L | Alan | Tel Kullanım Miktarı |
| Çembersel (d = 30 cm, N = 3) | 0.8 Ω | 6670 nH | 2060 nH | 0.308 | 706 cm ² | 283 cm |
| Karesel (30 cm x 30 cm, N = 3) | 0.9 Ω | 8000 nH | 2400 nH | 0.300 | 900 cm ² | 360 cm |
| Artı Şekil (20 cm x 30 cm, N = 4) | 0.75 Ω | 7400 nH | 2710 nH | 0.366 | 800 cm ² | 800 cm |

Tablo 3.3'te de görüldüğü üzere artı şekilli çevrim yapısını üretmek için kullanılan tel miktarı, karesel ve çembersel çevrimlere nazaran oldukça fazladır. Ancak buna rağmen artı şekilli çevrimin sahip olduğu ortak endüktans değeri, karesel ve çembersel çevrimlere göre daha fazladır. Buna ek olarak artı şekillerin kayıp direnci ve öz endüktansı, karesel ve çembersel çevrimlere göre daha azdır. Bu durum, artı şekilli çevrimleri oluşturan alt birim dikdörtgensel çevrimlerin birbirlerine elektriksel anlamda paralel bağlanmasından kaynaklanmaktadır.

Alt birim çevrimlerin paralel bağlanması sonucu elde edilen bir başka özellik ise artı şekilli çevrimlerin, karesel ve çembersel çevrimlere göre daha düşük öz endüktans değerine sahip

olmasıdır. Bu sebeple artı şekilli çevrimlerin ortak endüktans ile öz endüktans oranı da daha yüksek olmaktadır.

3.3 Çok Sarımlı Artı Şekilli Çevrim Yapısının Frekans Ayarlı Kablosuz Güç Transfer Sisteminde Kullanılması

Bu bölümde çok sarımlı artı şekilli bir çevrim çiftinin, gerçek uygulamalarda kullanılmak üzere bir prototipi üretilmesi ve üretilen prototipin analizinin yapılması amaçlanmaktadır. Çevrim çiftinin üretimi sırasında farklı bir materyal tipi kullanılacaktır. Üretilen çevrim çifti, frekans ayarlı bir kablosuz güç transfer sisteminde kullanılacaktır. Diğer bölümlerden farklı olarak bu bölümde, çok sargılı artı şekilli çevrim yapısının hizalanma bozulmalarına maruz kaldığı durumlardaki güç transfer verimliliği incelenecektir.

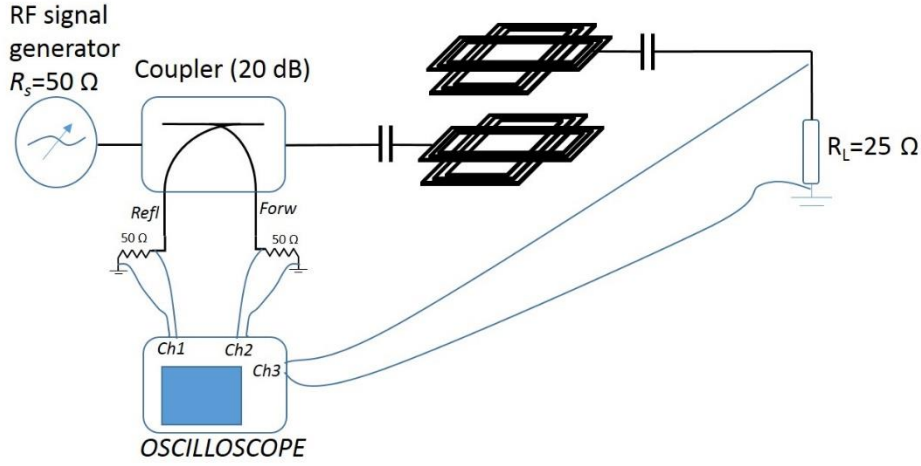
3.3.1 Deney Ortamı

Bu bölümde kullanılacak deney ortamının blok diyagramı ve gerçek ortamda hazırlanmış hali, sırasıyla Şekil 3.10 ve 3.11’de paylaşılmıştır.

Şekil 3.10’deki blok diyagramında görüldüğü üzere bu deney ortamında çevrim çiftinin verici kısmı, bir kuplör vasıtasıyla RF sinyal kaynağına bağlanmıştır. Alıcı kısmı ise, 25Ω değerindeki bir dirence bağlanmıştır. Ayrıca frekans ayarının ve güç transferinin takibi için sisteme bir osiloskop bağlanmıştır.

Sistemde kullanılan kuplörün dört ucu bulunmaktadır. Uçlarından ikisi, çevrim çiftinin verici ve alıcı kısımlarına bağlanmıştır. Diğer iki ucu ise kompanzasyon kapasitörlerine ve bir osiloskopa bağlanmıştır. Deneyin yapılacağı frekans 550 kHz olarak belirlenmiştir. Bu sebeple kullanılan kapasitörlerin değeri yaklaşık 2.4 nF olmaktadır.

Son olarak RF sinyal üretici, 50Ω değerinde empedansa sahiptir. Çıkış gücü ise 7 dBm olacak şekilde ayarlanmıştır.



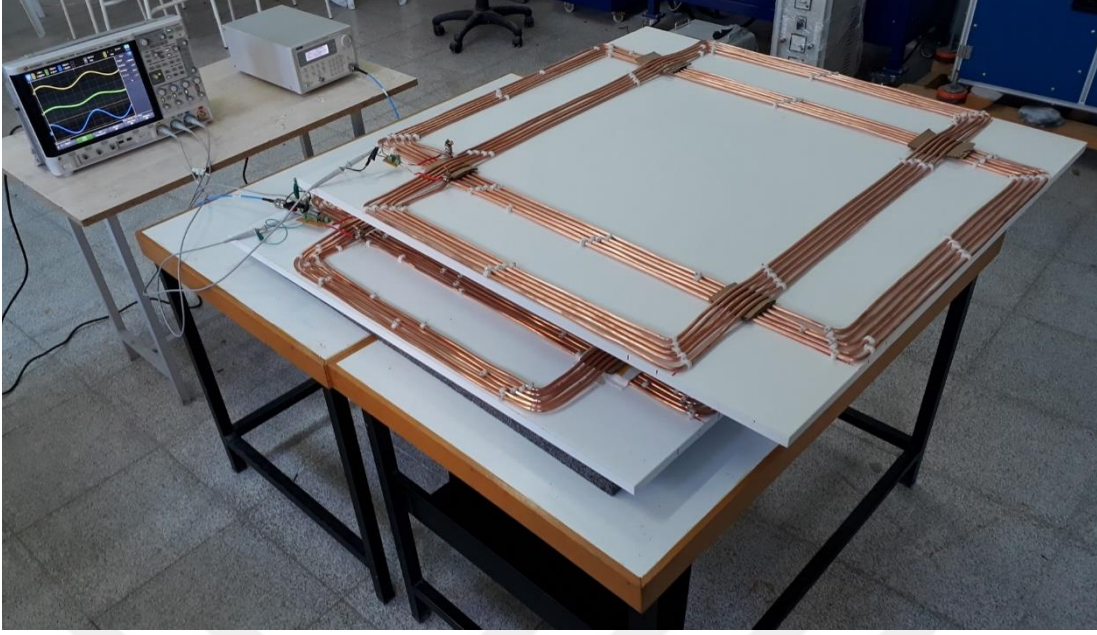
Şekil 3.10: Frekans ayarlı sistemin blok diyagramı.

Bu bölümde üretilen çevrimlerdeki en büyük fark, kullanılan materyalin yapısıdır. Şu ana kadar tüm çalışma boyunca içi dolu bakır teller kullanılmıştı. Ancak bu bölümde çevrimler, içi boş bakır borular kullanılarak üretilmiştir. Yüksek frekanslı sistemlerde iletken materyalin içinden geçen akım, homojen bir dağılım göstermez ve deri etkisinden (skin effect) iletkenin merkezinden uzaklaşarak yüzeyinde akmaya başlar. Bu durum, iletkenin kayıp direncinde artışa sebep olmaktadır. İçi boş bakır borular, deri etkisinin etkilerini azaltmak için kullanılan materyallerden birisidir ve bu bölümde de çevrimlerin üretiminde bu sebeple kullanılmıştır.

Üretilen artı şekilli çevrim çiftinin özellikleri, Tablo 3.4’te paylaşılmıştır. Üretilen çevrimin öz endüktansı Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır ve 34.3 μH değeri elde edilmiştir.

Tablo 3.4: Üretilen artı şekilli çevrimin özellikleri.

| Geometrik Yapı | Boyut | Sarım Sayısı | İç Yarıçap | Tüp Kalınlığı |
|----------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|
| Artı Şekil | 100 cm x 70 cm | 5 | 635 μm | 70 μm |



Şekil 3.11: Deney ortamı.

3.3.1.1 Çok Sarımlı Artı Şekilli Çevrim Yapısının Deney Ortamında Analizi

Bölüm 3.3.1’de üretim detayları verilen artı şekilli çevrim çiftine hem x ve y doğrultularında hem de çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulanmıştır. Diğer bölümlerden farklı olarak uygulanan hizalanma bozulmaları miktarı 0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 cm olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak çevrim çifti arasındaki mesafe ise 17 cm olacak şekilde ayarlanmıştır.

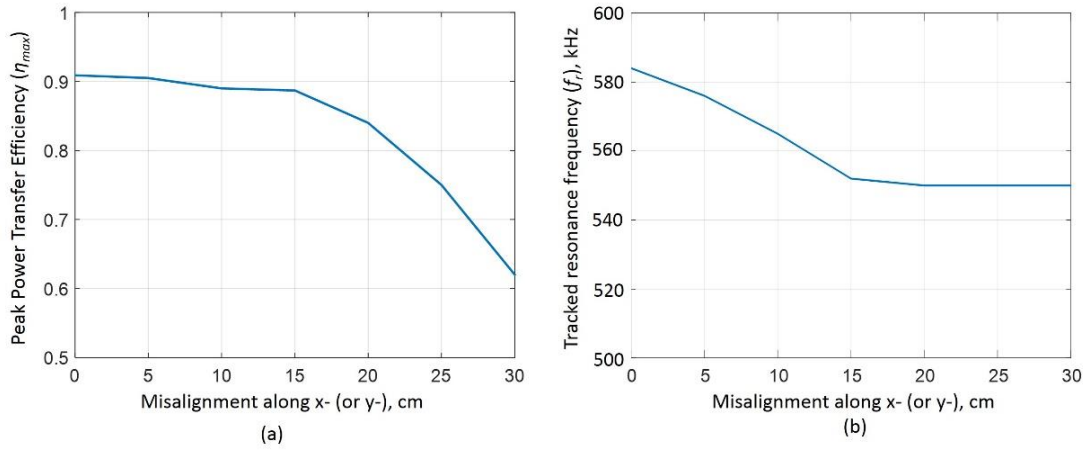
Deney boyunca her hizalanma bozulmasında RF sinyal üreticinin frekansı, sisteme bağlı olan osiloskop kullanılarak kuplörün yansıma ucundaki sinyale göre ayarlanmıştır. Bu frekans, yansıma ucunda görülen güç minimum olana dek elle ayarlanmıştır. Bu işlem sayesinde yalnızca kablosuz güç transfer sisteminin verici kısmını ya da diğer bir ifadeyle primer tarafı kontrol edilerek maksimum güç transferi sağlanmaktadır.

Bu bölümde yapılacak deneylerde, artı şekilli çevrimin hizalanma bozulmalarına maruz kaldığı durumlardaki güç transfer verimliliği performansı incelenecektir. Her frekans değerindeki maksimum güç transfer verimliliğinin hesaplanabilmesi için Denklem 4 kullanılmaktadır. Burada P_L yüke aktarılan güç, P_{avs} ise kaynaktan alınabilen güçleri temsil

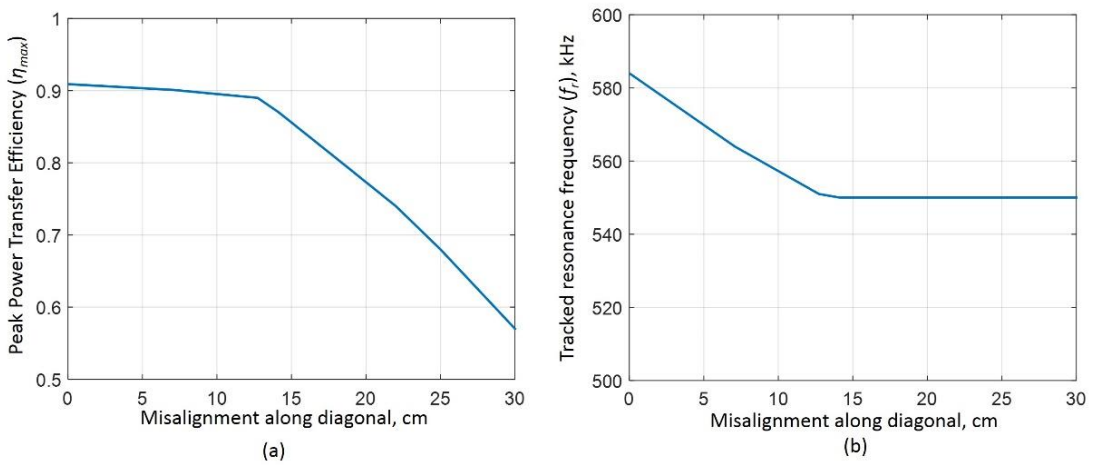
etmektedir. Bu iki parametrenin birbirine oranlanması ile maksimum güç transfer verimliliği bulunabilmektedir.

$$\eta = \frac{P_L}{P_{AVS}} \quad (3.3)$$

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen sonuçlar, Şekil 3.12 ve 3.13'te paylaşılmıştır. x ve y doğrultularındaki hizalanma bozulmalarının artı şekilli çevrim çifti üzerindeki etkisi, Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Çapraz doğrultudaki hizalanma bozulmalarının artı şekilli çevrim çifti üzerindeki etkisi ise Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.12: x ve y doğrultularında hizalanma bozulmaları uygulandığı durumda artı şekilli çevrim çiftinin a) maksimum güç transfer verimliliği ve b) takip edilen rezonans frekansı.



Şekil 3.13: Çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulandığı durumda artı şekilli çevrim çiftinin a) maksimum güç transfer verimliliği ve b) takip edilen rezonans frekansı.

Şekil 3.12 (a)'da görüldüğü üzere 15 cm mesafeye kadar uygulanan yanal hizalanma bozulmaları durumunda maksimum güç transfer verimliliği neredeyse sabit kalmaktadır. Mesafe 15 cm sınırını geçtikten sonra verimde büyük bir azalma görülmektedir. Şekil 3.12 (b)'de de rezonans frekansı için benzer durum söz konusudur. Hizalanma bozulmalarının mesafesindeki artış, rezonans frekansının azalmasına sebep olmaktadır. Ancak bu mesafe 15 cm sınırına geldiğinde bu azalma durmakta ve rezonans frekansı, nispeten sabit bir hale gelmektedir.

Çapraz doğrultuda uygulanan hizalanma bozulmaları için de benzer durum söz konusudur. Şekil 3.13 (a) incelendiğinde hizalanma bozulmaları mesafesi arttıkça maksimum güç transfer verimliliği bir süre sabit kalıp, ardından azalmaktadır. Verimlilikteki azalmanın başladığı nokta ise, 13 cm sınırdır. Aynı şekilde Şekil 3.13 (b) incelendiğinde rezonans frekansı, 13 cm sınırına kadar azalmaktadır. Ancak bu sınırdan sonra neredeyse sabitlenmektedir.

3.4 Ferrit Bloklarının Artı Şekilli Çevrim Yapısının Hizalanma Bozulmalarına Karşı Toleransı Üzerindeki Etkisi

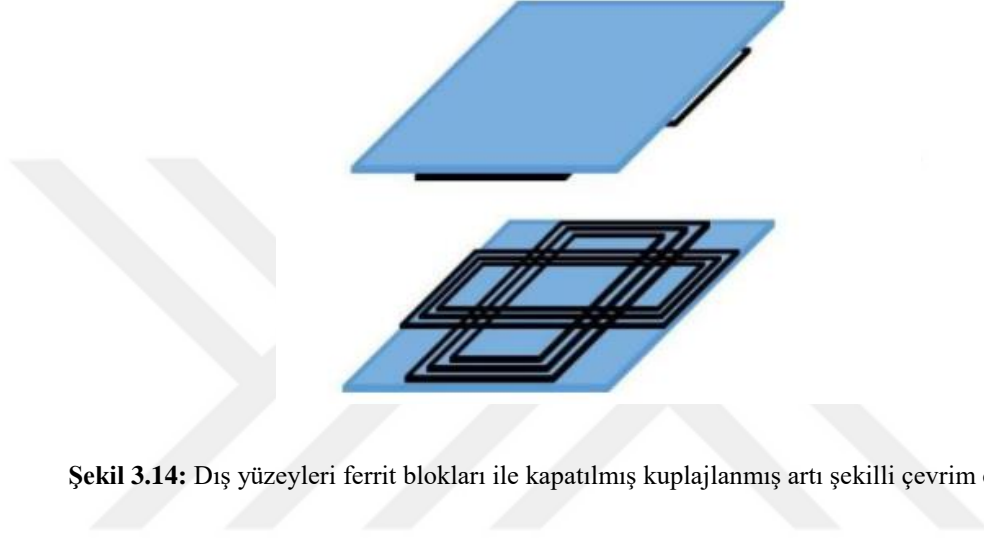
İçinden akım akan bir iletkenin çevresinde oluşan manyetik alan, iletkenin üzerinden çift yönlü olacak şekilde bir yol alır. Böyle bir manyetik alanın sahip olduğu akıya, çift yönlü manyetik akı denir. Bir iletkenin üzerinden akan manyetik akının çift yönlü olması, iletkenin her tarafında elektromanyetik girişim olasılığını arttırmaktadır. Elektromanyetik girişimin artması ise kayıpların artmasına sebep olmaktadır.

Çevrimin bir yüzünü ferrit blokları ile kaplamak, o çevrimin manyetik akı yoğunluğunu ferrit bloğunun olmadığı yere doğru akmasını sağlayacaktır. Başka bir ifade ile tek yönlü manyetik akı durumu meydana gelecektir. Bu sebeple ferrit bloklarının kullanılması, artı şekilli çevrim çiftlerinin hizalanma bozulmalarına karşı toleransı üzerinde faydalı bir etki oluşturacağı öngörülmektedir.

Bu bölümde öncelikle dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış artı şekilli çevrim çiftleri simülasyon ortamında üç boyutlu modellenecektir. Ardından bu modeller üzerinde hizalanma bozulmaları uygulanarak ferrit bloklarının, artı şekilli çevrim yapısının hizalanma bozulmalarına karşı toleransı üzerindeki etkisi incelenecektir.

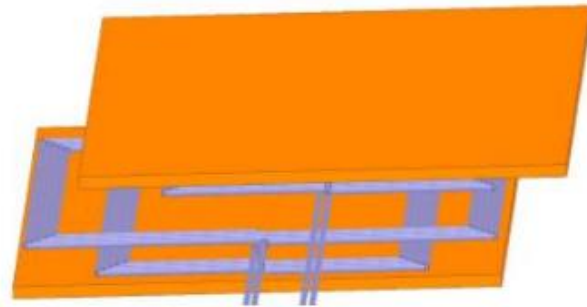
3.4.1 Simülasyon Ortamı

Bu bölümde yapılacak olan simülasyon ortamı, diğer bölümlerden farklı olarak Maxwell isimli elektromanyetik simülasyon programı bünyesinde gerçekleştirilecektir. Analizde kullanılacak olan dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış kuplajlanmış artı şekilli çevrim çiftlerinin şekli, Şekil 3.14'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14: Dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış kuplajlanmış artı şekilli çevrim çifti.

Simülasyon ortamında üç boyutlu modellenen artı şekilli çevrimi oluşturan alt birim çevrimlerin boyutu, 100 cm x 70 cm olarak belirlenmiştir. Çevrim çiftinin malzemesi, önceki bölümlerdeki ile aynı tutulmuştur. Ferrit bloklarının kalınlığı, 27 mm olarak belirlenmiştir. Ferrit bloklarının permeabilite değeri ise 0.001257 H/m olacak şekilde seçilmiştir. Simülasyon ortamında üç boyutlu modellenen çevrim çifti, Şekil 3.15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.15: Dış yüzeyleri ferrit blokları ile kapatılmış kuplajlanmış artı şekilli çevrim çiftinin üç boyutlu modeli.

3.4.2 Detaylı Analiz

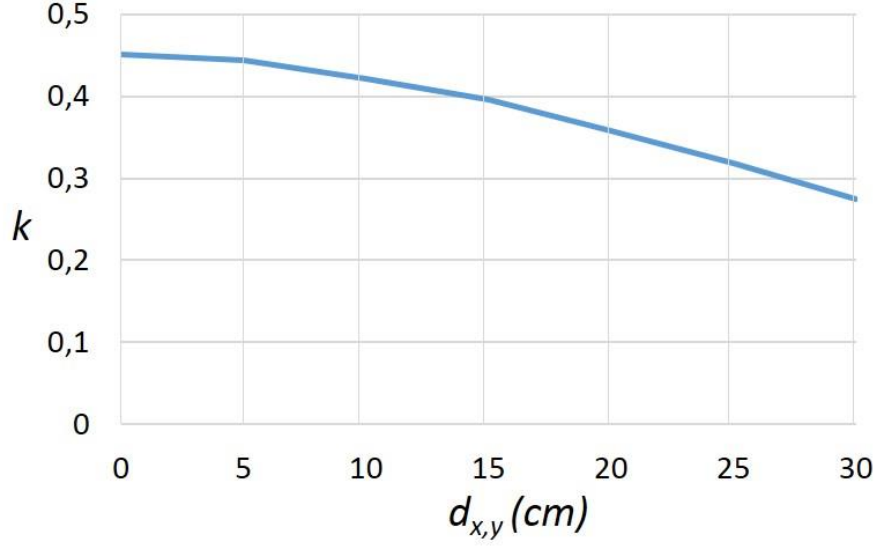
Bu bölümü, çalışmanın diğer bölümlerinden ayıran birkaç farklılık bulunmaktadır. Tüm çalışma boyunca kullanılan çevrim çiftlerinin yanal hizalanma bozulmaları toleransları incelenmişti. Bu bölümde ise ilk olarak mükemmel hizalanma durumunda artı şekilli çevrim çifti arasındaki mesafenin değişiminin, kuplajlanma katsayı üzerindeki etki incelenecektir. Ardından çevrim çifti arasındaki mesafe sabit tutularak çevrim çiftinin, hizalanma bozulmalarına karşı toleransı incelenecektir.

Çevrim çifti arasındaki mesafe diğer bölümlerde 5 cm olarak belirlenmişti. Bu bölümde ise 20 cm olarak belirlenmiştir.

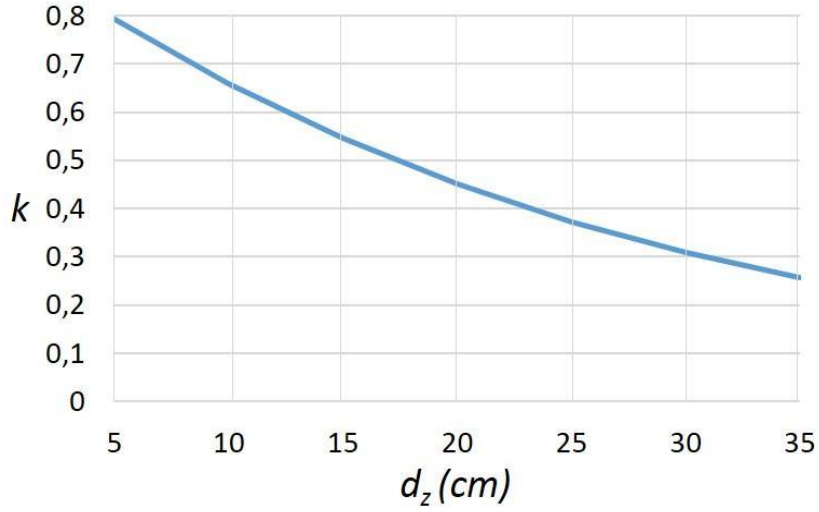
Bir diğer farklılık ise çevrim çiftine uygulanacak olan hizalanma bozulmaları miktarıdır. Çevrim çifti arasındaki mesafe sabitken x ve y doğrultularında uygulanacak olan hizalanma bozulmaları 0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 cm olacak şekilde belirlenmiştir.

Bu bölümdeki son farklılık ise çevrimler üzerine uygulanan hizalanma bozulmalarının etkisinin incelenme şeklidir. Diğer bölümlerde bu etki, çevrim çiftlerinin ortak endüktans değerindeki değişim üzerinden incelenmişti. Bu bölümde ise yapılan her bir simülasyon sonucu çevrim çiftinin kuplajlanma katsayısı hesaplanacak ve bu katsayıdaki değişim üzerinden incelemeler yapılacaktır.

Şekil 3.15'te üretilen çevrim çifti kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen sonuçlar, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de paylaşılmıştır. Çevrim çifti arasındaki mesafe 20 cm olarak sabit tutulduğu durumda çevrim çiftine x ve y doğrultularında uygulanan hizalanma bozulmalarının, çevrim çiftinin kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.16'da görüldüğü gibidir. Çevrim çiftinin mükemmel hizalı olduğu durumda çevrim çifti arasındaki mesafenin değişiminin kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi ise Şekil 3.17'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.16: Çevrim çifti arasındaki mesafenin sabit olması durumunda çevrim çiftine x ve y doğrultularında uygulanan hizalanma bozulmalarının kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi.



Şekil 3.17: Çevrim çiftinin mükemmel hizalı olması durumunda çevrim çifti arasındaki mesafenin değişiminin kuplajlanma katsayısı üzerindeki etkisi.

Şekil 3.16 incelendiğinde yaklaşık 15 cm değerine kadar hizalanma bozulması uygulanmasına rağmen kuplajlanma katsayısında ciddi bir değişim meydana gelmemektedir. Bu mesafeden sonraki değişimlerde ise kuplajlanma katsayısındaki değişim de ciddi oranda artmaktadır. Şekil 3.17 incelendiğinde ise çevrim çifti arasındaki mesafe arttıkça kuplajlanma katsayısında düşüş meydana gelmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yaygın çevrim yapılarının hizalanma bozulmaları analizi Bölüm 2’de, artı şekilli çevrim yapısının hizalanma bozulmaları analizi ile karesel ve çembersel çevrim yapılarıyla karşılaştırılması ise Bölüm 3’te yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar kısaca paylaşılmıştır.

Bölüm 2’de, tek sarımlı yaygın çevrim yapılarına x ve y doğrultularında çeşitli miktarda yanal hizalanma bozulmaları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 2.12’de paylaşılmıştır.

Şekil 2.12’de paylaşılan verilere göre karesel çevrimlerin, çembersel çevrimlere göre yanal hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Karesel çevrimler, dikdörtgensel çevrimlere göre x doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahiptir, ancak bu durum y doğrultusundaki hizalanma bozulmaları için geçerli değildir. Dikdörtgensel çevrimler, y doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı karesel çevrimlere göre daha iyi hizalanma bozulması toleransına sahiptir.

Yukarıda paylaşılan sonuçlara ek olarak dikdörtgensel çevrimlere ait bir bulgu daha elde edilmiştir. Dikdörtgensel çevrimlerin en-boy oranı azaldıkça x doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı toleransı da azalmaktadır.

Bölüm 2’de elde edilen bulgulardan yola çıkarak artı şekilli çevrim yapısı, Bölüm 3’te önerilmiştir. Bu bölümde hem x ve y doğrultularında hem de çapraz doğrultuda hizalanma bozulmaları uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.6’da paylaşılmıştır.

Elde edilen ilk bulgu, artı şekilli çevrimlerin x ve y doğrultudaki hizalanma bozulmaların karşı aynı toleransı göstermesidir. Bunun sebebi, çevrim yapısının simetrik bir geometriye sahip olmasıdır. Aynı durum, karesel ve çembersel yapıları için de geçerlidir.

Şekil 3.6 (a) incelendiğinde, artı şekilli çevrimlerin x ve y doğrultusundaki hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin 5 cm değerinde hizalanma bozulması uygulandığında, küçük ve büyük boyutlu artı şekilli çevrimler, karesel çevrimlere sırasıyla %2.7 ve %4.7 daha iyi tolerans göstermiştir. Yine aynı çevrimler, aynı koşullar altında çembersel çevrimlere göre sırasıyla %6.4 ve %8.2 daha iyi tolerans göstermiştir.

Şekil 3.6 (b) incelendiğinde ise artı şekilli çevrimlerin çapraz doğrultudaki hizalanma bozulmalarına karşı da daha iyi toleransa sahip olduğu görülmektedir. Örneğin 7.5 cm değerinde hizalanma bozulması uygulandığında, karesel ve çembersel çevrimlere göre en az %7 daha iyi tolerans göstermiştir.

Elde edilen bir diğer bulgu ise artı şekilli çevrim yapısını oluşturan alt birim çevrimlerin kısa kenar uzunluğu ile ilgilidir. Alt birim çevrimlerin kısa kenarı, 15 cm'den daha kısa olduğu durumda karesel çevrim yapısı, artı şekilli çevrim yapısına göre daha iyi toleransa sahip olmaktadır. Bu sebeple alt birim çevrimlerin en-boy oranı 2'den küçük olmalıdır.

Son olarak artı şekilli çevrim yapısının, karesel ve çembersel çevrim yapılarına göre daha düşük kuplajlanma seviyelerine ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Bu probleme çözüm olarak çevrimlerdeki sarım sayısının artırılması önerilmiş ve çok sarımlı çevrimler için gerekli analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 3.8'de paylaşılmıştır.

Şekil 3.8 incelendiğinde çok sarımlı çevrimlerin hem x ve y doğrultularında hem de çapraz doğrultuda hizalanma bozulmalarına karşı daha iyi toleransa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tek sarımlı artı şekilli çevrimler için Şekil 3.6'da paylaşılan sonuçları teyit etmektedir. Ayrıca çok sarımlı artı şekillerin, çok sarımlı karesel ve çembersel çevrimlere göre daha büyük ortak endüktans değerine sahip olduğu da görülmüştür. Buna ek olarak Şekil 3.6 ve Şekil 3.8 incelendiğinde tüm çevrim tipleri için, ortak endüktans ile sarım sayısı arasında N^2 ilişkisi olduğu saptanmıştır.

Elde edilen bir diğer bulgu ise artı şekilli çevrim yapısının daha büyük kuplajlanma katsayısına sahip olduğudur. Bu durum, bir kablosuz güç transfer sisteminin daha yüksek seviyelerde güç iletimi yapmasına imkan tanımaktadır.

Bölüm 3.3'te çok sarımlı artı şekilli çevrim yapısı, frekans ayarlı kablosuz güç transfer sisteminde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 3.12 ve 3.13'te paylaşılmıştır. Şekil 3.12'de x ve y doğrultularındaki hizalanma bozulmalarının etkisi, Şekil 3.13'te ise çapraz doğrultudaki hizalanma bozulmalarının etkisi gösterilmektedir.

Şekil 3.12 (a) incelendiğinde, hizalanma bozulması miktarı 15 cm'ye ulaşırken maksimum güç iletim verimi, yaklaşık %89 değerinde neredeyse sabit kalmıştır. Ancak hizalanma bozulması arttıkça verim değerinde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir. Şekil 3.12 (b) incelendiğinde ise hizalanma bozulması değeri 15 cm'ye kadar ulaşırken rezonans frekansı,

586 kHz değerinden yaklaşık 550 kHz değerine kadar düşmektedir. Uygulanan hizalanma bozulmasının artması, rezonans frekansının üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır ve neredeyse 550 kHz değerinde sabit kalmıştır. Elde edilen bu bulgular ışığında artı şekilli çevrim çifti, 15 cm değerindeki hizalanma bozulmalarına kadar güçlü kuplajlanmış bölgededir ve hizalanma bozulmaları için kritik kuplajlanma mesafesi 15 cm olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 3.13'te de benzer bir durum söz konusudur. Çapraz doğrultudaki hizalanma bozulmaları olduğunda artı şekilli çevrim çifti, 13 cm değerindeki hizalanma bozulmalarına kadar elde edilen maksimum güç iletim verimi, yaklaşık %89 olarak gözlemlenmiş ve neredeyse sabit kalmıştır.



5. KAYNAKLAR

- [1] Y.T. Kheng, *Energy Harvesting Autonomous Sensor Systems: Design, Analysis, and Practical Implementation*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [2] N. Tesla, “System of electric lighting”, U.S. Patent 454622, June 23, 1891.
- [3] M. Hutin and M. Leblanc, “Transformer system for electric railways”, U.S. Patent 527857, Oct. 23, 1894.
- [4] Winfield Secor, H., “Tesla apparatus and experiments – how to build both large and small Tesla and Ouding coils and how to carry on spectacular experiments with them”, *Practical Electrics*, Aug. 1921.
- [5] Aggarwal, V., “Sir Jagadish Chandra Bose: the Unsung Hero of Radio Communication”. http://web.mit.edu/varun_ag/www/bose.html. Erişim tarihi: 15 Ekim 2019.
- [6] N. Tesla, “System of electric lighting”, U.S. Patent 645576, Mar. 20, 1900.
- [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances”, *Sci.*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007.
- [8] B. Kallel, T. Keutel, and O. Kanoun, “MISO configuration efficiency in inductive power transmission for supplying wireless sensors”, *2014 11th Int. Multi-Conf. on Syst., Signals and Devices (SSD)*, pp. 1-5, Feb. 2014.
- [9] O. Jonah, and S.V. Georgakopoulos, “Wireless power transfer in concrete via strongly coupled magnetic resonance”, *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 61, no. 3, pp. 1378-1384, Mar. 2013.
- [10] D. Huang, Y. Urzhumov, D. Smith, K.H. Teo, and J. Zhang, “Magnetic superlens-enhanced inductive coupling for wireless power transfer”, *J. of Appl. Phys.*, vol. 111, no. 6, Apr. 2012.

- [11] H. Son, J. Kim, Y. Park, and K. Kim, "Efficiency analysis and optimal design of a circular loop resonant coil for wireless power transfer", *2010 Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 849-852, Dec. 2010.
- [12] Miwa, K., Mori, H., Kikuma, N., Hirayama, H. and Sakakibara, K., "A consideration of efficiency improvement of transmitting coil array in wireless power transfer with magnetically coupled resonance", *2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*, pp. 13-16, May 2013.
- [13] J. Kim, H.-C. Son, D.-H. Kim and Y.-J. Park, "Optimal design of a wireless power transfer via multiple self-resonators for an LED TV", *IEEE Trans. on Consum. Electronics*, vol. 58, no. 3, pp. 775-780, Aug. 2012.
- [14] S. Kim, J.S. Ho, L.Y. Chen and A.S.Y. Poon, "Wireless power transfer to a cardiac implant", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 7, pp. 1-4, Aug. 2012.
- [15] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S.-J. Jeon and D. Cho, "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, Mar. 2014.
- [16] A. Kukde, S. Mattigiri, V. Singh, C. Warty and S. Wagh, "Resonance-based wireless power transfer for smart grid systems", *2014 IEEE Aerosp. Conf.*, 15, 1-6, Mar. 2014.
- [17] K.J. Kim, F. Cottone, S. Goyal and J. Punch, "Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications", *Bell Labs Tech. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 7-29, Sept. 2010.
- [18] M. Erol-Kantarci and H.T. Mouftah, "Suresense: sustainable wireless rechargeable sensor networks for the smart grid", *2012 IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 30-36, June 2012.
- [19] Y. Li, X. Li, F. Peng, H. Zhang, W. Guo, W. Zhu and T. Yang, "Wireless energy transfer system based on high Q flexible planar-Litz MEMS coils", *8th Annu. IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Mol. Syst.*, pp. 837-840, Apr. 2013.

- [20] Z. Pantic and S. Lukic, "Computationally-efficient, generalized expressions for the proximity-effect in multi-layer, multi-turn tubular coils for wireless power transfer systems", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 49, no. 11, pp. 5404-5416, Nov. 2013.
- [21] E.G. Kilinc, C. Dehollaini and F. Maloberti, "Design and optimization of inductive power transmission for implantable sensor system", *2010 XIth Int. Workshop on Symbolic and Numer. Methods, Model. and Appl. to Circuit Des. (SM2ACD)*, pp. 1-5, Oct. 2010.
- [22] K. Fotopoulou and B. Flynn, "Wireless power transfer in loosely coupled links: Coil misalignment model", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 416-430, Feb. 2011.
- [23] R.C. Fernandes and A.A. de Oliveira, "Iterative design method of weakly coupled magnetic elements for inductive power transfer", *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1088-1094, Oct. 2013.
- [24] R. Jegadeesan, Y.-X. Guo and M. Je, "Overcoming coil misalignment using magnetic fields of induced currents in wireless power transmission", *2012 IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, June 2012.
- [25] M.Q. Nguyen, Z. Hughes, P. Woods, Y.-S. Seo, S. Rao and J.-C. Chiao, "Field distribution models of spiral coil for misalignment analysis in wireless power transfer systems", *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, vol. 62, no. 4, pp. 920-930, Apr. 2014.
- [26] A. Sample, D. Meyer and J. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [27] L. Chen, S. Liu, Y.C. Zhou and T.J. Cui, "An optimizable circuit structure for high-efficiency wireless power transfer", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 339-349, Jan. 2013.
- [28] D. Ahn and S. Hong, "Effect of coupling between multiple transmitters or multiple receivers on wireless power transfer", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2602-2613, Apr. 2013.

- [29] Y Lim, H. Tang, S. Lim and J. Park, "An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4403-4414, Aug. 2014.
- [30] T.C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh and Y. Hori, "Automated impedance matching system for robust wireless transfer via magnetic resonance coupling", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3689-3698, Sept. 2013.
- [31] B.H. Waters, A.P. Sample and J.R. Smith, "Adaptive impedance matching for magnetically coupled resonators", *PIERS Proc.*, pp. 694-701, Aug. 2012.
- [32] J.D. Heebl, E.M. Thomas, R.P. Penno and A. Grbic, "Comprehensive analysis and measurement of frequency-tuned and impedance-tuned wireless non-radiative power-transfer systems", *IEEE Antennas and Propag. Mag.*, vol. 56, no. 5, pp. 131-148, Oct. 2014.
- [33] T.P. Duong and J.-W. Lee, "A dynamically adaptable impedance-matching system for midrange wireless power transfer with misalignment", *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 7593-7617, July 2015.
- [34] Y. Gao, C. Zhou, J. Zhou, X. Huang and D. Yu, "Automatic frequency tuning with power-level tracking system for wireless charging of electric vehicles", *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC)*, pp. 1-5, Oct. 2016.
- [35] D.P. Kar, P.P. Nayak, S. Bhuyan and S.K. Panda, "Automatic frequency tuning wireless charging system for enhancement of efficiency", *Electronics Lett.*, vol. 50, no. 24, pp. 1868-1870, Nov. 2014.
- [36] S.A. Sis and S. Bicakci, "A resonance frequency tracker and source frequency tuner for inductively coupled wireless power transfer systems", *2016 46th Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, pp. 751-754, Oct. 2016.
- [37] Y. Luo, Y. Yang, S. Chen and X. Wen, "A frequency-tracking and impedance-matching combines system for robust wireless power transfer", *Int. J. of Antennas and Propag.*, vol. 2017, pp. 1-13, Jan. 2017.

- [38] D.W. Seo and J.H. Lee, "Frequency-tuning method using the reflection coefficient in a wireless power transfer system", *IEEE Microw. and Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 11, pp. 959-961, Nov. 2017.
- [39] M. Budhia, G. Covic and J. Boys, "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems", *IECON 2010 - 36th Annu. Conf. on IEEE Ind. Electronics Soc.*, pp. 2487-2492, Nov. 2010.
- [40] M. Budhia, J.T. Boys, G.A. Covic and C.-Y. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013.
- [41] T.D. Nguyen, S. Li, W. Li and C.C. Mi, "Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers", *2014 IEEE Appl. Power Electronics Conf. and Expo. - APEC 2014*, pp. 1676-1682, Mar. 2014.
- [42] J. Deng, W. Li, T.D. Nguyen, S. Li and C.C. Mi, "Compact and efficient bipolar coupler for wireless power chargers: Design and analysis", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6130-6140, Nov. 2015.
- [43] Y. Li, T. Lin, R. Mai, L. Huang and Z. He, "Compact double-sided decoupled coils-based WPT systems for high-power applications: Analysis, design, and experimental verification", *IEEE Trans. on Transp. Electrific.*, vol. 4, no. 1, pp. 64-75, Mar. 2018.
- [44] O. Jonah, S.V. Georgakopoulos and M.M. Tentzeris, "Orientation insensitive power transfer by magnetic resonance for mobile devices", *2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*, pp. 5-8, May 2013.
- [45] K.A. Kalwar, S. Mekhiler, M. Seyedmahmoudian and B. Horan, "Coil design for high misalignment tolerant inductive power transfer system for EV charging", *Energies*, vol. 9, no. 11, pp. 1-13, Nov. 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Emre Orta
Doğum Tarihi ve Yeri : 06/02/1994 – İstanbul
E-posta : emreorta3@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

| Derece | Okul / Program | Yıl |
|---------------|---|------|
| Yüksek Lisans | Balıkesir Üniversitesi / Elektrik – Elektronik Mühendisliği | 2019 |
| Lisans | Balıkesir Üniversitesi / Elektrik – Elektronik Mühendisliği | 2016 |

Yayın Listesi

H. Güneş, S. Bıçakçı, E. Orta and D. Akdaş, “Development of simulation for artificial intelligence techniques for smart homes”, (in Turkish), *Gazi University J. of Sci. Part C: Des. and Tech.*, vol. 7, no. 3, pp. 554-563, Sept. 2019.

E. Orta, A. Kaya and S.A. Sis, “Coupling characterization of a single sided cross-shape magnetic coupler pair”, *Int. Conf. on Elect. Eng. and Comput. Sci.*, pp. 83-84, May. 2019. **[Tezden türetilmiştir]**

S.A. Sis and E. Orta, “Flux pipe pads with improved coupling characteristics”, 2019 16th Int. Multi-Conf. on Syst., Signals and Devices (SSD), pp. 250-253, March. 2019.

S.A. Sis and E. Orta, “A cross-shape coil design for use in wireless power applications”, *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1-14, Apr. 2018. **[Tezden türetilmiştir]**

H. Güneş, E. Orta and D. Akdaş, “Developing synthetic data generation software for artificial intelligence techniques used in smart home systems”, (in Turkish), *J. of Balıkesir University Inst. of Sci. and Tech.*, vol. 18, no. 2, 1-11, Dec. 2016.