T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNDÜKSİYONLU OCAKLARDA KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ

Uğur Can İÇEN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Koray Gürkan

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Ağustos, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Uğur Can İÇEN tarafından, **Doç. Dr. Koray GÜRKAN** danışmanlığında hazırlanan **" İNDÜKSİYONLU OCAKLARDA KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **10/07/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Doç. Dr. Koray GÜRKAN İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Erkan ATMACA İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Fatih ADIGÜZEL Yıldız Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Uğur Can İÇEN

(İmza)

Aileme …

BÜTÇE DESTEKLERİ

İNDÜKSİYONLU OCAKLARDA KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince, her türlü teknik imkândan faydalanmamı sağlayan Beko Corparate'a, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen bağlı bulunduğum Güç Elektroniği Departmanı yöneticisi İbrahim GÜNEŞ ve ekip arkadaşlarım Hakan ALTUNTAŞ, Ulaş OKTAY, Sezer ASLAN ve Ahmet DEMİR'e, çalışma boyunca göstermiş olduğu sabır ve desteklerinden dolayı değerli hocam Doç. Dr. Koray GÜRKAN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışma süresince kendilerine ayırmam gereken zamandan feragat eden sevgili eşim Sümeyra İÇEN ve oğlum Cengiz Han'a ve hayatımın her anında yanımda olan ve desteğini esirgemeyen annem Fatma İÇEN'e ve ablam Leyla Kübra İÇEN BOYACI'ya teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2024 Uğur Can İÇEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ii
BEYAN iii
BÜTÇE DESTEKLERİ v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1. GİRİŞ 18
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 20
2.1. LİTERATÜR ÖZETİ 20
2.2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI TEMEL PRENSİPLERİ 27
2.2.1. İndüktif Bağlantılı Kablosuz Güç Aktarımı 28
2.2.2. Kalite Faktörü (Q) 30
2.2.3. Kablosuz Güç Aktarımı Sistemi Ayarlamaları 31
2.2.4. Kablosuz Güç Aktarımı Devre Topolojileri 34
2.3. RF ENERJİ HASADI 41
2.3.1. RF Enerji Hasadı Topolojisi 42
2.4. İNDÜKSİYONLU OCAK 43
2.4.1. İndüksiyonlu Isıtmanın Temeli 46
2.4.2. İndüksiyonlu Ocaklarda Kullanılan Rezonans Çeviriciler 47
3. YÖNTEM 50
4. BULGULAR 57
5. TARTIŞMA 60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 62
7. KAYNAKLAR 63

EKLER **68**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **69**
ETİK KURUL İZİN YAZISI **70**
KURUM İZNİ YAZILARI **71**
ÖZGEÇMİŞ **72**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1: Tesla Kulesi 21

Şekil 2: Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri 23

Şekil 3: Manyetik Rezonans Enerji Aktarımının Basitleştirilmiş Şematik Diyagramı sürücü bobini A, rezonans kaynağı S, alıcı cihaz rezonans bobini D ve ampul (yük) B bobini 24

Şekil 4: Sinyal üretimine dayalı WPT Node blok diyagramı 25

Şekil 5: Sinyal yükseltmeye dayalı WPT Node blok diyagramı 25

Şekil 6: Geleneksel sınıf E Güç Amplifikatörü Devre Şeması 26

Şekil 7: Önerilen Güç Amplifikatörü Devre Şeması 26

Şekil 8: Kablosuz Güç Aktarımı Temel Teorisi 27

Şekil 9: ICWPT Sistemlerinde Tipik Akı Bağlantısı 29

Şekil 10: ICWPT Basitleştirilmiş Devresi 30

Şekil 11: Birincil Bobin Seri Kompanzasyon Topolojisi 32

Şekil 12: Birincil Bobin Paralel Kompanzasyon Topolojisi 32

Şekil 13: Birincil Bobin Seri Paralel Kompanzasyon Topolojisi 33

Şekil 14: İkincil Bobin Seri Kompanzasyon Topolojisi 33

Şekil 15: İkincil Bobin Paralel Kompanzasyon Topolojisi 34

Şekil 16: Basit Kompanzasyon Topolojileri (a) Seri-Seri, (b) Paralel-Seri, (c) Seri-Paralel ve Paralel-Paralel 34

Şekil 17: Seri-Seri Kompanzasyon Eş Değer Devresi 35

Şekil 18: Seri Paralel Kompanzasyon Eş Değer Devresi 36

Şekil 19: Paralel Paralel Kompanzasyon Eş Değer Devresi 38

Şekil 20: Paralel Seri Kompanzasyon Eş Değer Devresi 39

Şekil 21: RF Enerji Toplayıcısı Blok Diyagramı 42

Şekil 22: İndüksiyon Ocak Blok Diyagramı 45
Şekil 23: İndüksiyonlu Ocak Temel Yapısı 45
Şekil 24: İndüksiyonlu Isıtma ve Kayıplar 46
Şekil 25: Yarım Köprü Rezonans Evirici Yapısı 47
Şekil 26: Tam Köprü Rezonans Evirici Yapısı 48
Şekil 27: Tek Anahtarlı Sıfır Geçiş Gerilim Anahtarlamalı (ZVS) Rezonans Evirici Topolojisi 48
Şekil 28: Tek Anahtarlı Sıfır Geçiş Akım Anahtarlamalı (ZCS) Rezonans Evirici Topolojisi 49
Şekil 29: Kahve Makinasında Kullanılan Bobin 50
Şekil 30: Kahve Makinası Rezonans Kapasitesi 51
Şekil 31: Kahve Makinası NFC Arayüz Kartı 52
Şekil 32: RF – EH Devresi 52
Şekil 33: Kablosuz Enerji Aktarımına Uygun Kahve Makinası Blok Diyagramı 53
Şekil 34: İndüksiyon Ocak NFC Arayüz Kartı 53
Şekil 35: NFC Eşleştirme Ağı Devresi 54
Şekil 36: Vektör Network Analizör ve SEFTech NFC Anten 54
Şekil 37: Yazılım Durum Diyagramı 55
Şekil 38: İndüksiyon Ocak NFC Anten Ölçümü 57
Şekil 39: Anten Eşdeğer Devresi 57
Şekil 40: 13.56 MHz'e uyumlaştırılmış anten eşdeğer devresi 58
Şekil 41: RF Eşleştirme Devresi 58
Şekil 42: Kahve Makinası Giriş Gerilimi Osiloskop Görüntüsü 59
Şekil 43: İyileştirilmiş Algoritma ile Çalıştırılan Ürünün Osiloskop Görüntüsü 59

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: Kompanzasyon devrelerinin karakteristikleri 40

Tablo 2: Kompanzasyon Devrelerinin Denklemleri [31] 40

Tablo 3: Farklı RF Sinyallerinin Güç Yoğunluğu 41

Tablo 4: Kahve Makinası Özellikleri 50

Tablo 5: Kahve Makinasında Kullanılan Bobinin Teknik Detayları 51

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
H	: Manyetik Alan Şiddeti
I	: Akım
V	: Gerilim
f	: Frekansı
Q	: Kalite Faktörü
L	: Bobin
C	: Kapasite
R	: Direnç
ω	: Açısal Frekans
Δ	: delta

Kısaltmalar	Açıklama
UI	: Kullanıcı Arayüzü
NFC	: Yakın Alan Haberleşmesi
PA	: Güç Yükseltici
MHz	: Mega Hertz
ICWPT	: İndüktif Bağlanmalı Kablosuz Enerji Aktarımı
WPT	: Kablosuz Enerji Aktarımı
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
RF	: Radyo Frekansı
EH	: Enerji Hasadı
IC	: Entegre Devre
IoT	: Nesnelerin İnterneti
W	: Watt
mW	: Miliwatt

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNDÜKSİYONLU OCAKLARDA KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ

Uğur Can İÇEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Koray GÜRKAN

Teknolojik gelişmelerin hız kazandığı günümüzde, kablosuz iletişim ve güç aktarımı alanında önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Özellikle evde kullanılan küçük elektrikli cihazların kablosuz olarak çalıştırılması, bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini hızlandırmıştır. İndüksiyonlu ocaklar, bu kablosuz güç aktarımı teknolojisinin günlük hayattaki en yaygın örneklerinden birini sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin küçük ev aletlerinin çalıştırılmasında nasıl kullanılabileceği ve bu kullanımın pratikte ne gibi avantajlar sağlayabileceği henüz tam olarak araştırılmamıştır.

Bu çalışma, indüksiyon ocaklarda kablosuz olarak küçük ev aletlerine güç aktarımını hedefleyen bir araştırmayı kapsamaktadır. RF enerji hasatı kullanılarak küçük ev aletlerinin kullanıcı arayüzü (UI) fonksiyonlarını çalıştırmak için gerekli enerjinin toplandığı bir sistem geliştirilmiştir. NFC (Near Field Communication) 13.56 MHz frekansı, haberleşme için kullanılan bir protokol olarak tercih edilmiştir.

RF enerji hasatı ile indüksiyon ocak üzerinden enerjilendirilecek küçük ev aletinin güç aktarım aşamasına geçmeden önce, haberleşmesinin sağlanabilmesi gerekli enerji sağlanmıştır.

Çalışmanın odak noktası, güç aktarımı ve haberleşme kanallarının birbirinden ayrıştırılmasıdır. Bu yöntem, güç aktarımının etkinliğini artırırken, haberleşme sinyallerinin daha az gürültüden etkilenerek iletilmesini sağlar.

Bu araştırma, indüksiyon ocaklarından elde edilen manyetik alan enerjisinin kullanılmasıyla, kablosuz güç aktarımının ve NFC gibi haberleşme protokollerinin bir araya getirilmesinin pratik uygulamalarını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında ısıtma fonksiyonu kaybedilmeden küçük ev aletlerine enerji aktarabilen kablosuz enerji transferi konsepti önerilmiştir. Çalışmanın sonuçları günlük yaşamda kullanılan küçük ev aletlerinin enerjilendirmesini kablo karmaşası olmadan, daha güvenli ve kullanışlı bir ortamda sağlamak ve kullanıcı deneyimini iyileştirmek için önemli bir adım olabilir. Ayrıca, endüstride yeni kablosuz enerji aktarımı ve iletişim sistemlerinin geliştirilmesine ilham verebilir.

Ağustos 2024 , 72 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kablosuz güç aktarımı, küçük ev aletleri, indüklenme, indüktif güç aktarımı, kontaksız güç aktarımı

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

WIRELESS POWER TRANSFER ON DOMESTIC INDUCTION HOBS

Uğur Can İÇEN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering Programme

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Koray GÜRKAN

In today's rapidly advancing technological landscape, significant progress has been made in the field of wireless communication and power transfer. Particularly, the wireless operation of small household appliances has accelerated research and development activities in this area. Induction cooktops present one of the most common examples of this wireless power transfer technology in everyday life. However, how this technology can be utilized to operate small household appliances and the practical advantages it may offer have not been fully explored yet.

This study encompasses research aimed at wireless power transfer to small household appliances using induction cooktops. A system has been developed to harvest RF energy to power the user interface (UI) functions of small household appliances. NFC (Near Field Communication) at a frequency of 13.56 MHz has been preferred as the communication protocol.

Before transitioning to the power transfer stage of the small household appliance to be energized via RF energy harvesting from the induction cooktop, the necessary energy for communication has been provided.

The focus of the study is on separating the power transfer and communication channels. This method enhances the efficiency of power transfer while ensuring that communication signals are transmitted with minimal interference.

This research demonstrates practical applications by combining wireless power transfer and communication protocols such as NFC, utilizing the magnetic field energy derived from induction cooktops. Within this study, a concept of wireless energy transfer capable of energizing small household appliances without sacrificing heating functionality has been proposed. The outcomes of this research could represent a significant step towards energizing small household appliances used in daily life in a more convenient and safer environment, without the hassle of cables, thereby enhancing user experience. Furthermore, it may inspire the development of new wireless power transfer and communication systems in the industry.

August 2024, 72 pages.

Keywords: Wireless Power Transfer, Small Domestic Appliances, Induction, Inductive Power Transfer, Contactless Power Transfer

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, kablosuz iletişim ve güç aktarımı alanlarında büyük gelişmeler kaydedilmektedir. Özellikle evde kullanılan küçük elektrikli cihazların kablosuz olarak çalıştırılması, bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini hızlandırmıştır. Geleneksel olarak, ev aletlerinin güç kaynağı için elektrik prizlerine bağımlı olmaları ve bu prizlerin konumuna bağlı olarak kullanım esnekliğinin sınırlı olması, kullanıcıların yaşamını belirli bir şekilde kısıtlamaktadır. Ancak, indüksiyon ocaklarının yaygınlaşması ve kablosuz güç aktarım teknolojilerindeki ilerlemeler, bu durumu değiştirmektedir.

İndüksiyon ocaklarının popülaritesi, manyetik alanlar aracılığıyla ısı üretme yetenekleriyle büyük ölçüde artmıştır. Son zamanlarda yaşanan enerji kaynaklarındaki tedarik sıkıntısından dolayı özellikle Avrupa'da gazlı ocaklar yerine indüksiyonlu ocaklar tercih edilmektedir. İndüksiyon ocakların temel çalışma teknolojisi olan manyetik alanlar aynı zamanda kablosuz güç iletimi için de bir potansiyel sağlar. Bu durum, indüksiyon ocaklarının sadece yemek pişirmek için değil, aynı zamanda küçük ev aletlerinin çalıştırılması için de kullanılabileceği anlamına gelir. Bu, kullanıcıların kablolardan ve prizlerden bağımsız olarak ev aletlerini kullanma esnekliğini artırırken, aynı zamanda yaşam alanlarını daha temiz ve düzenli hale getirebilir. Kablo karmaşasından uzak, daha düzenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Ayrıca kettle gibi bazası olan ve çoğunluk prize takılı bekleyen küçük ev aletlerinin sıvı teması gibi güvenlik açıklarının neden olduğu arızalarında önüne geçecektir.

Bu tez, indüksiyon ocakları üzerinden kablosuz olarak küçük ev aletlerine güç aktarımını amaçlayan çalışmaları içermektedir. Geleneksel güç kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, kullanıcıların günlük yaşamlarını kolaylaştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu çalışma, akıllı mutfak teknolojilerinin ev yaşamına entegrasyonunda bir adım olabilir ve endüstride yeni kablosuz güç aktarımı uygulamalarının geliştirilmesine ilham verebilir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda indüksiyon ocaklarda ısıtma fonksiyonlarına ek olarak küçük ev aletlerine %90 verimle güç aktarımı yapabilen bir sistem geliştirilmiştir. İndüksiyon ocaklarının kablosuz güç iletimi için kullanılması, ev aletlerinin

kullanımını daha verimli, esnek ve kullanıcı dostu hale getirebilir. Bu tez, bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarına katkı sağlayarak, gelecekteki ev teknolojilerinin gelişimine destek olmayı amaçlamaktadır. Daha güvenli, kullanışlı ve geliştirilebilir akıllı mutfak teknolojilerinin öncüsü olacaktır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Kablosuz enerji aktarımı ile ilgili öncül çalışmalar Michael Faraday tarafından yapılmıştır. 1831 yılında Faraday, demir bir çekirdek üzerinde sardığı iki adet bobinden birine alternatif akım uyguladığında diğer bobinde de gerilim oluştuğunu fark etmiştir. Bu teknoloji elektromanyetik indüklenmedir ve elektromanyetiğin temellerini oluşturmaktadır [1].

1890 yılından sonra Nikola Tesla yüksek alternatif gerilim üreten tesla bobinleri ile indüktif ve kapasitif bağlantı yoluyla güç aktarımı denedi [2][3][4]. İlk olarak yakın alanda indüktif ve kapasitif bağlanma kullanarak kablosuz aydınlatma sistemi geliştirmeye çalıştı [2]. Halka açık alanlarda sahnenin bir ucundan diğer uçta bulunan Geissler Tüplerini ve hatta akkor ampulleri yaktığı gösteriler düzenledi [3] [4] [5]. Bu gösteriler sırasında vericinin LC devresiyle, alıcının LC devresini birbirine ayarlayarak (indüktif bağlanma rezonansı ile) lamba yakabileceği mesafeyi artıracağını keşfetmiştir [6]. Tesla bu çalışmalarıyla herhangi bir ticari ürün çıkaramamıştır. Fakat günümüzde rezonans indüktif bağlanma kısa mesafeli kablosuz güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tesla NewYork'un Shoreham köyünde bulunan Long Island'da 1901-1902 yıllarında kablosuz enerji iletim istasyonu olarak kullanacağı deneysel bir kule inşa etmiştir. Daha sonra Tesla Kulesi olarak adlandırılacak olan bu kule, sinyalleri iletmek için dünyanın kendi doğasını kullanma teorisine dayanarak sinyalleri Atlantik Okyanusu üzerinden İngiltere'ye ve denizdeki gemilere iletmeyi amaçlamıştır. Daha sonra finans desteği bulunamadığı için 1906 yılında proje kapatılmıştır [7][8][9].



Şekil 1: Tesla Kulesi

Kablosuz güç aktarımı teknolojisi, günümüzde çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır ve bu teknolojinin insan sağlığına etkileri ve performansı üzerine bir dizi çalışma yapılmıştır [10][11].

İlk olarak, kablosuz güç aktarımı teknolojisinin insan sağlığına etkileri üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Elektromanyetik radyasyonun insan sağlığına potansiyel etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bazı araştırmalar, elektromanyetik radyasyonun uzun süre maruz kalmanın kanser riskini artırabileceğini öne sürmektedir. Ancak, kablosuz güç aktarımı için kullanılan endüktif kuplaj yöntemi genellikle düşük frekanslarda çalışır ve bu nedenle elektromanyetik radyasyonun sağlık üzerindeki etkileri sınırlı olabilir [12].

Diğer bir önemli konu, kablosuz güç aktarımının verimliliği ve güç kaybıdır. Kablosuz güç aktarımı genellikle endüktif kuplaj yöntemiyle gerçekleştirilir ve bu yöntemde enerji, manyetik alan aracılığıyla iletilir. Ancak, bu yöntemde sıklıkla verim kaybı yaşanabilir [13] ve ısınma sorunları ortaya çıkabilir. Bu nedenle, kablosuz güç aktarımı teknolojisinin verimliliğini artırmak için sürekli olarak araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [14].

Kablosuz güç aktarımı teknolojisinin kullanım alanlarına gelindiğinde, birçok fayda sağladığı görülmektedir. Kablo karmaşasını ortadan kaldırarak kullanıcı deneyimini iyileştirebilir, su ve toza karşı dayanıklılık sağlayabilir ve elektrikli cihazların daha esnek bir şekilde

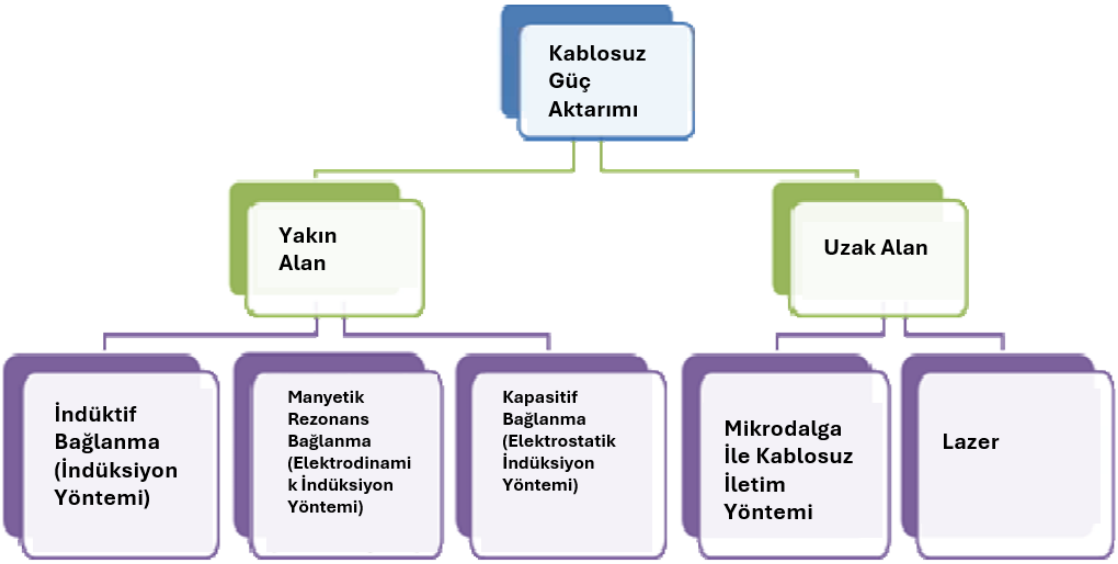
konumlandırılmasını mümkün kılar. Ancak, kablo ile güç aktarımına kıyasla maliyetinin daha yüksek olduğu, ısınma ve verim kaybı gibi dezavantajlarının olduğu unutulmamalıdır [14].

M.Itraj ve Will Ettes yapmış oldukları çalışmada kablosuz güç aktarımın en az 4 cm'ye kadar maksimum verimlilikle aktarılması için bir sistem üzerinde çalışmışlardır. İndüktif güç aktarımı yapan sistem için ilk olarak mevcut sistem analizi yapılmış, iyileştirmek için yeni bir topoloji sunmuşlardır. Sonuçları karşılaştırmalı olarak göstermişler ve 2.4 kW'a kadar %90 verimle güç aktaran bir sistem tasarımı ortaya koymuşlardır [15].

Kablosuz güç aktarımı teknolojisi, birçok avantajı ve dezavantajı ile gelmektedir. Endüktif kuplaj yöntemi genellikle insan sağlığına en güvenilir olanı olarak kabul edilirken, teknolojinin verimliliğini artırmak için sürekli olarak araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir. Kablosuz güç aktarımı, çeşitli uygulamalarda kullanılabilirken, kullanılacağı alan ve güvenlik önlemleri de dikkate alınmalıdır.

1960'ların sonlarında, mikrodalga ışınları kullanılarak bir helikoptere güç vermek ve konumlandırmak için kablosuz güç iletimi deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, kablosuz güç iletiminin farklı bir kullanım alanını ortaya koymuştur. O zamandan bu yana, enerji hasadı kavramları daha fazla önem kazanmıştır ve çeşitli fiziksel özellikler kullanılarak enerji temini için farklı ortamlarda çeşitli konseptler geliştirilmiştir. Termoelektrik dönüşüm, piezoelektrik etki, güneş enerjisi dönüşümü ve daha birçok teknoloji, enerji temini için farklı fiziksel özelliklerin kullanıldığı enerji hasadı konseptlerine yol açmıştır [16].

Kablosuz enerji aktarım yöntemleri 2 başlık altında toplanmıştır. Bunlar yakın alan kablosuz güç aktarımı ve uzak alan kablosuz güç aktarımıdır. Yakın alan **(nearfield)** güç aktarım yöntemler; induction technique **(inductive coupling)**, electrodynamic induction technique **(magnetic resonance coupling)** ve electrostatic induction technique **(capacitive coupling)** yöntemleridir. Bu yöntemler 1 metrenin altında güç aktarımı için kullanılmaktadır. Uzak alan güç aktarım yöntemleri ise; **Microwave Power Transmission Technique** ve **Laser**'dir [17].



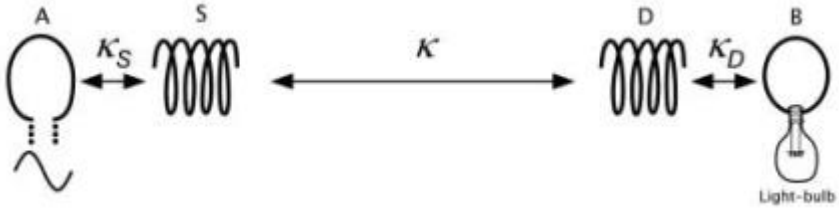
Şekil 2: Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri

Facta Universitatis tarafından yapılan çalışmada [17] yakın alan kablosuz enerji transferi üç ana başlıkta altında incelenmiştir.

Indüktif Bağlama Tekniği (Inductive Coupling): Elektromanyetik alanlar üzerine dayanan temasız enerji transfer yöntemlerinden biridir. Manyetik alanın değişimi, ikincil bir sargıda gerilim indükler ve bu gerilim, enerjinin aktarılmasını sağlar. Gevşek bağlı bir transformatörün işleyişi bu tekniğin basit bir örneğidir. İndüktif olarak bağlanan bobinler, Maxwell'ın yasalarına ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine manyetik (elektromanyetik) indüksiyon alt yasasına ihtiyaç duyarlar. Mobil telefon veya elektrikli diş fırçası şarj cihazları, bu tekniğin uygulamaları arasındadır. Ancak, bu yöntemin ana dezavantajı, aktarım menzilinin kısa (genellikle birkaç santimetreye kadar) olmasıdır.

Elektrostatik İndüksiyon Tekniği (Capasitive Coupling): A. Rozin tarafından 1998'de patentlenmiş bir yöntemdir [18]. Enerji, bir veya daha fazla kapasitör oluşturacak şekilde metal plakalar arasında iletilir. Enerji transferi yüksek frekanslı bir elektrik alanının salınımıyla gerçekleşir. Alıcı tarafta, batarya veya güç aktarılacak elektronik cihaz, taşınan yüksek frekanslı kapasitif akım tarafından beslenir. Ancak, bu yöntemde makul güç seviyelerine ulaşmak için elektrik alanının çok yüksek yoğunluğa ulaşması gerekmektedir. Bu durum olası uygulamaları sınırlar.

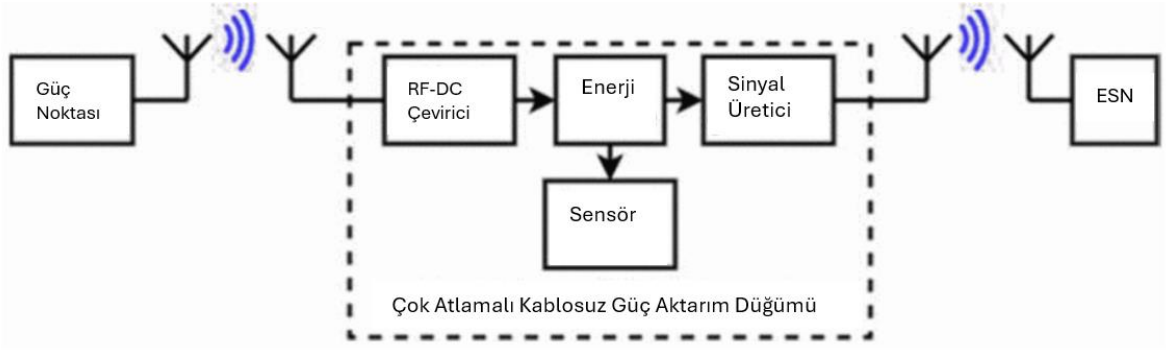
Manyetik Rezonans Bağlama Tekniği: İndüktif bağlama yöntemi, enerjinin uzak mesafelerde aktarılmasında etkili değildir. Mesafe arttıkça enerji aktarımında rezistif kayıplar artar. Ancak, primar ve sekonder bobinlerin aynı frekansta rezonans devrelerinde yer aldığı bir durumda, daha uzun mesafelerde önemli miktarda enerji transfer edilebilir. Böylelikle kayıplar daha az olur. Manyetik rezonans bağlama yöntemi, rezonant döngülerin manyetik alanlarının salınımı aracılığıyla enerji alışverişi yaparken ortaya çıkar. Bu durumda, çevredeki tüm empedanslar, iyi bir rezonant çiftleşmeye göre, pozitif ve negatif reaktansa denge sağlayan çok daha yüksek değerlere sahiptir. Marin Soljacic ve Massachusetts Institute of Technology (MIT) ekibi, iki akordeonlu bobinli bir kurulumla kablosuz olarak enerji aktarımının mümkün olduğunu göstermiştir [19]. Bu deneysel tasarım, dört bakır bobinden oluşur, her biri uygun bir rezonant döngüde bağlıdır.



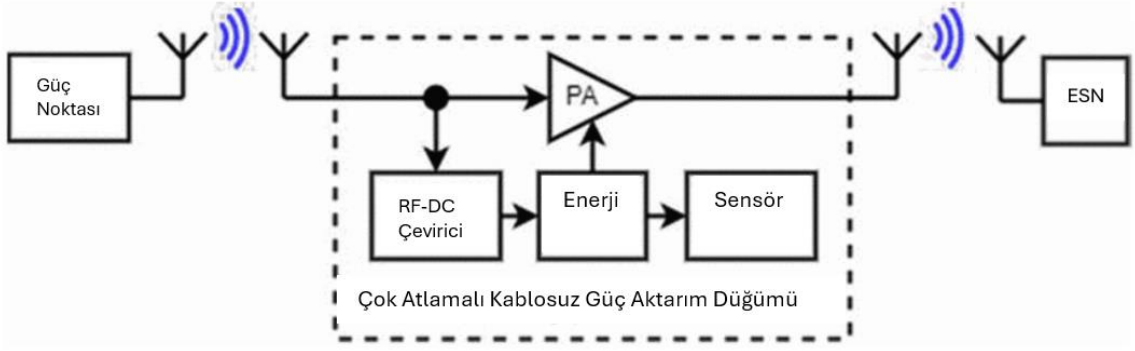
Şekil 3: Manyetik Rezonans Enerji Aktarımının Basitleştirilmiş Şematik Diyagramı sürücü bobini A, rezonans kaynağı S, alıcı cihaz rezonans bobini D ve ampul (yük) B bobini

A, AC güç kaynağına (9,9 MHz) bağlı olan birincil bir bakır döngüsüdür, bu, rezonant kaynağa bağlı güç sürücüsüdür. D, rezonant yakalama cihazıdır ve 60 wattlık bir lambaya manyetik olarak bağlanmıştır. Sadece lamba sönmedi, aynı zamanda teorik tahminlerin büyük mesafelerde yüksek verimlilikle doğrulandığı deneysel olarak gösterildi. Kaynak ve yakalama cihazı arasına çeşitli nesneler yerleştirilerek, manyetik alanın izolatörler arasından ve metal engellerin etrafından nasıl enerji aktardığı gösterildi. Bu kablosuz aktarım yöntemi ile tüketici elektroniği ürünlerini (TV gibi) uzun mesafelerde (birkaç metre) beslemek için en az %50 verimle güç aktarımının gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

J. Eidaks yaptığı çalışmada [20] RF sinyalleri ile multi-hop iletim yaklaşımını araştırmıştır. Friis yaklaşımı ile serbest alandaki sinyallerden enerji iletimini simüle edilirken, çok kanallı yayılma simülasyonu için de Shooting and Bouncing Ray yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5'te olası WPT düğümleri gösterilmiştir. Çalışmada RF-DC dönüştürücüler yardımı ile sensörler için gerekli düşük seviyedeki enerji ihtiyacı karşılanarak sensörlerin aktif edilebileceği anlatılmıştır.



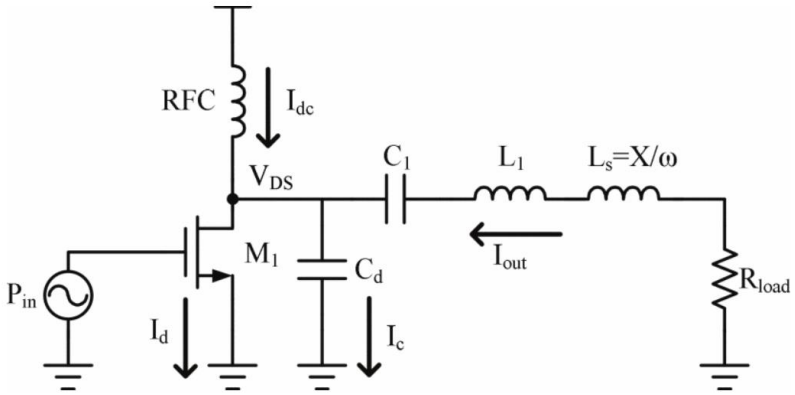
Şekil 4: Sinyal üretimine dayalı WPT Node blok diyagramı



Şekil 5: Sinyal yükseltmeye dayalı WPT Node blok diyagramı

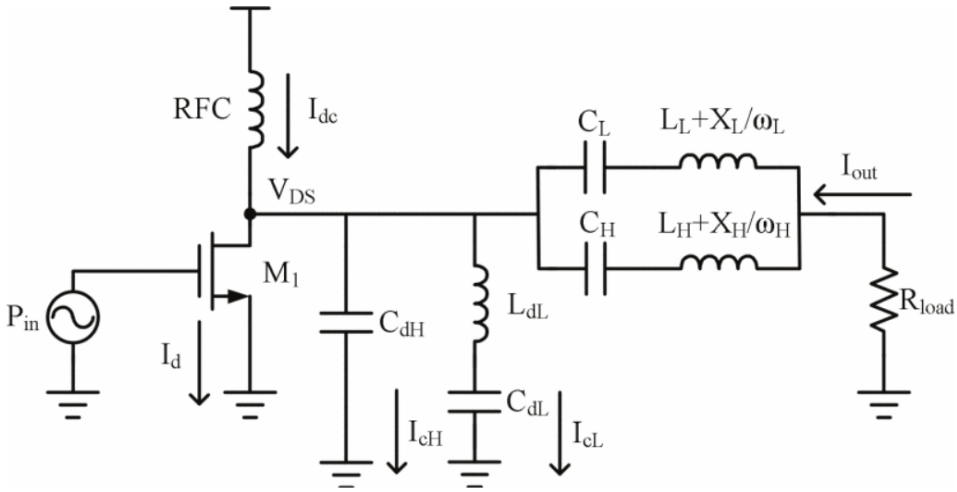
Niotaki ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [21] RF enerji hasadının kablosuz güç transferi uygulamalarındaki önemini vurgulamış, otonom kablosuz cihazlar ve RFID'ler için potansiyel uygulamaları tartışmışlardır.

Tao-Cheng Yu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [22], kablosuz güç ve veri iletimi için kullanılan bir çift frekanslı güç amplifikatörü (PA) tasarımını ve analizini yapmışlardır. Şekil 6'da gösterilen Geleneksel sınıf-E PA yapısını, çift kutuplu bir ek paralel empedans ekleyerek modifiye ederek, tek bir cihazın her iki mod için de kullanılabilir hale getirilmesi önermişlerdir. Bu tasarımın özellikle önemli olduğu çünkü kablosuz iletimde hem veri hem de güç aktarımının aynı cihazla gerçekleştirilmesi mümkün hale getirmişlerdir.



Şekil 6: Geleneksel sınıf E Güç Amplifikatörü Devre Şeması

Şekil 7'de gösterilen ve Tao-Cheng Yu ve arkadaşları tarafından önerilen PA, 1 MHz'de veri aktarımı ve 13.56 MHz'de güç aktarımı için tasarlanmıştır. Bu iki farklı frekans aralığında yüksek verimlilik sağlayabilen bir cihazın önemi büyüktür, çünkü her iki modda da güvenilir ve etkili bir performans elde edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışmada önerilen güç amplifikatörünün matematiksel modeli ve tasarım denklemleri ayrıntılı bir şekilde hesaplanmıştır. Bu, tasarım sürecinin temelini oluşturmuş ve tasarımın optimize edilmesine ve sonraki adımlarda gerçekleştirilecek olan fiziksel uygulamaya geçilmesine olanak sağlamıştır.

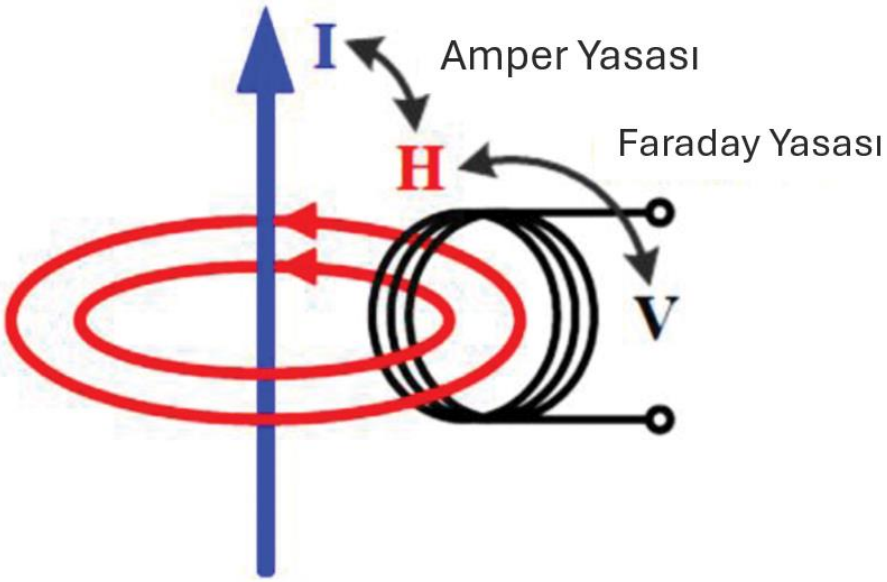


Şekil 7: Önerilen Güç Amplifikatörü Devre Şeması

Simülasyon sonuçları ile, önerilen PA'nın hem 1 MHz'de hem de 13.56 MHz'de yüksek verimlilikle çalıştığını ortaya koymuşlardır. 1 MHz'de 193 mW çıkış gücü ve %90,53 verimlilikle, 13.56 MHz'de ise 179 mW çıkış gücü ve %90,93 verimlilikle çalışmıştır. Yapılan çalışmalar ile önerilen çift frekanslı PA'nın başarılı bir şekilde görevini yerine getirdiğini göstermişlerdir. Çalışmanın önemli sonuçlarında biri de mW seviyesinde aktarılan güçle birlikte veri aktarımının mümkün olduğunun gösterilmesidir.

2.2. KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI TEMEL PRENSİPLERİ

Kablosuz güç aktarım sistemlerinin temel teorisi, Faraday ve Ampere yasaları tarafından yönetilir. Ampere yasasına göre, akım I bir manyetik alan H üretir. Bu manyetik alanın bir kısmı, ikincil güç alıcı bobini ile bağlantılıdır ve Faraday yasasına göre bu manyetik alan bir gerilim V'nin indüklenmesine neden olur. [23][26]



Şekil 8: Kablosuz Güç Aktarımı Temel Teorisi

Ampere yasası matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\oint H \cdot dL = I_{enc}$$

(2-1)

Yukarıdaki denklem, kapalı bir döngü etrafındaki manyetik alan yoğunluğunun çizgi integralinin döngüden geçen akıma eşit olduğunu göstermektedir.

Faraday yasası ise N2 sarım sayılı bir sekonder için aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$V = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

(2-2)

Denklem (2-2)' gelen negatif işaret, Lenz Yasası ile açıklanır. Lenz Yasası bir elektromanyetik indüksiyon sürecindeki temel prensiplerdendir. Bu yasaya göre, manyetik alan değişikliği bir iletken döngü içinde indüklenen akımın yönünü belirler. Lenz yasası indüklenen akımın manyetik alan değişikliğine ters hareket edecek şekilde olacağını belirtir. Yani indüklenen akım, manyetik alan değişimine neden olan etkenin etkisini azaltmaya çalışır. Matematiksel olarak ifade edilirse:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi}{dt}$$

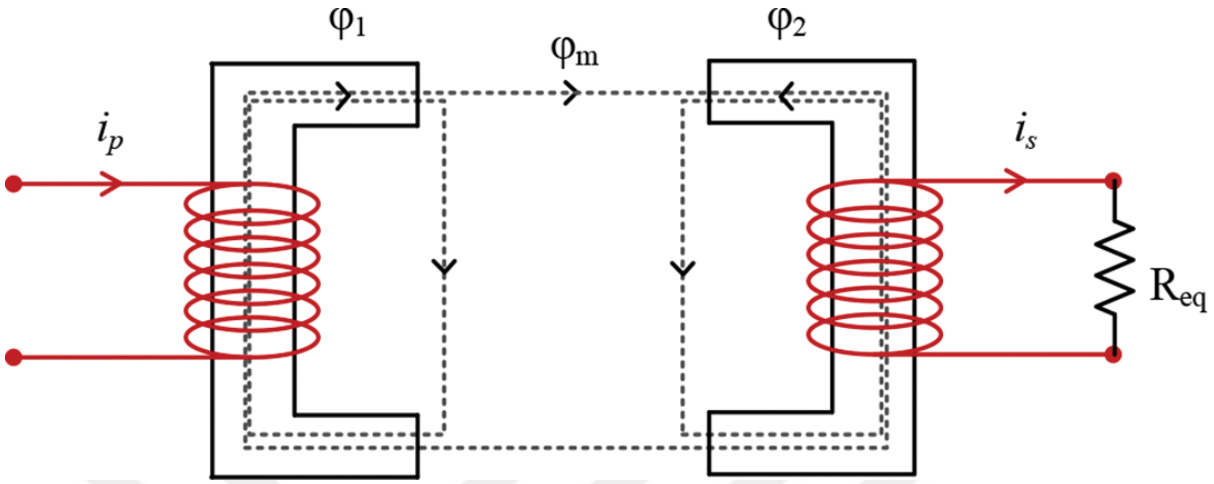
(2-3)

Burada $\boldsymbol{\varepsilon}$ indüklenen elektromotor kuvveti temsil eder. $\frac{\boldsymbol{-d\phi}}{\boldsymbol{dt}}$ ise manyetik akıdaki değişim oranını temsil eder. Bu denklemdeki negatif işaret Lenz yasasının unsurlarında biridir. İndüklenen EMK'nın manyetik akıdaki değişim yönüne zır bir akım oluşturacağını gösterir.[26]

2.2.1. İndüktif Bağlantılı Kablosuz Güç Aktarımı

İndüktif bağlantılı kablosuz güç Aktarımı (ICWPT), iki cihaz arasında elektrik enerjisinin kablosuz olarak iletilmesini sağlayan bir teknolojidir. Bu sistemde, birincil bobin adı verilen bir verici ve ikincil bobin adı verilen bir alıcı bulunur. Birincil bobin, bir elektrik akımı uygulandığında manyetik bir alan oluşturur. Bu manyetik alan, ikincil bobindeki bir bobin tarafından algılanır ve elektriksel enerjiye dönüştürülür. Bu şekilde, enerji kablosuz olarak bir cihazdan diğerine iletilir. Şekil 9'da birincil ve ikincil bobinlerin ferrit çekirdeklerin ayrılmış yarısına sargılanmasıyla ve aralarında hava boşluğu bırakarak oluşturulmuş bir indüktif bağlantılı kablosuz güç aktarımı sistemi gösterilmektedir. Fiziksel temas böylelikle ortadan kaldırılmıştır. Güç aktarımı manyetik bağlantı kullanılarak yapılmaktadır. Manyetik akı, çekirdeğin bir yarısından diğerine çiftlenir ve birincil bobin ile ikincil bobin arasında enerji

aktarımını sağlayan karşılıklı endüktans **(mutual inductance) M** oluşturulur. M, bir geometri fonksiyonudur ve fiziksel yapının simülasyonu, ölçümü veya modellenmesi ile bulunabilir. [24]



Şekil 9: ICWPT Sistemlerinde Tipik Akı Bağlantısı

Şekil 9'da gösterildiği gibi bağlanan sistemlerde sızıntı akıları çok büyük olabilir ve ihmal edilemez. [25] Birincil bobin bağlanma katsayısı olarak bilinen, birincil bobin akısının ikincil bobinle bağlantılı kısmının oranı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_1 = \frac{\phi_m}{\phi_1}$$

(2-4)

İkincil bobin bağlanma katsayısı benzer şekilde, ikincil bobin akısının birincil bobinle bağlantılı kısmına oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_2 = \frac{\phi_m}{\phi_2}$$

(2-5)

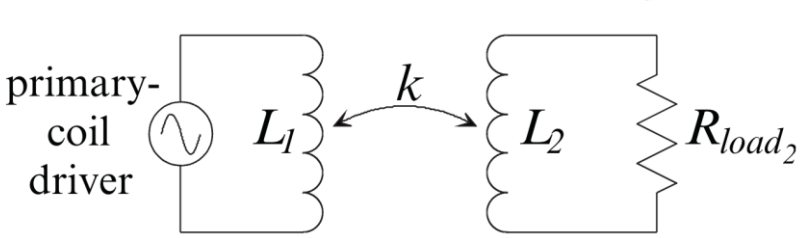
Sistem bağlama katsayısı **(coupling coefficient)** belirlenirken yukarıda bulunan iki değer birleştirilir:

$$k = \sqrt{k_1 k_2}$$

(2-6)

Birincil ve ikincil bobin arasındaki karşılıklı endüktans (mutual inductance) birincil bobin endüktansı Lp ve ikincil bobin endüktansı L_s olduğunda aşağıdaki gibi bulunur [26]:

$$M = k\sqrt{LpL_s}$$



Şekil 10: ICWPT Basitleştirilmiş Devresi

Şekil 10'da basitleştirilmiş ICWPT devresi gösterilmektedir. Verici, sol tarafta bir AC gerilim kaynağı ve birincil bobin (Lp) içerirken, alıcı ikincil bir bobin (Ls) ve Rload2 (yük direnci) içerir. Bir köprü doğrultucu ve daha fazla elektronik devre, sağ tarafta Rload2 olarak toplanmıştır. Verici, birincil bobinde manyetik akı üreten bir AC kaynağı (bir bobin sürücü) aracılığıyla beslenir. Bu, Lp'de bir gerilim indükler ve sırasıyla ikincil bobinde bir akı üretir. Bu akı, ikincil bobinde bir gerilim üretir ve daha fazla kullanım için doğrultulabilir. [27]

Bu devrenin temel prensibi, birincil ve ikincil bobinler arasında manyetik indüksiyon yoluyla güç transferidir. Birincil bobindeki AC kaynak, manyetik bir alan oluşturur ve bu alan, ikincil bobinde bir gerilim indükler. Bu indüklenen gerilim, alıcı devredeki yükü beslemek için kullanılabilir. Köprü doğrultucu, ikincil bobindeki alternatif gerilimi doğru gerilime dönüştürür, böylece alıcı devre DC yüküyle beslenebilir. Bu sistem, kablosuz güç transferi için kullanılabilir ve özellikle endüstriyel uygulamalarda ve kablosuz şarj cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Kalite Faktörü (Q)

Kalite Faktörü (Q), bobin endüktans ve direnç oranıyla hesaplanır. Kablosuz güç aktarımı sistemlerinde iletilen enerjinin verimliliğinde etkili olan belirleyici bir etkendir. Kalite faktörü Denklem 2-7 'deki gibi hesaplanır.

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

(2-7)

Burada $\boldsymbol{\omega}$ sistem çalışma, L bobin endüktansı ve R bobin iç direncidir.

Kalite faktörü ve açısal frekans ($\boldsymbol{\omega}$) arasındaki bağlantı rezonans karakteristiğini belirler. Kalite faktörü ve açısal frekans arasındaki ilişi genellikle rezonans frekansı (f) ve bant genişliği (BW) ile tanımlanır.

$$Q = \frac{\omega_o}{\Delta\omega}$$

(2-8)

$\boldsymbol{\omega_o}$ = Rezonans frekansı (radyan/saniye cinsinden açısal frekans)

$\boldsymbol{\Delta\omega}$ = Bant genişliği (radyan/saniye cinsinden)

Denklem 2-8'de gösterildiği gibi, kalite faktörü arttıkça, bant genişliği azalır.

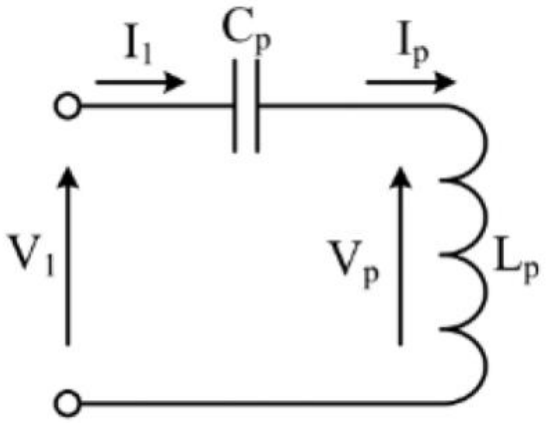
2.2.3. Kablosuz Güç Aktarımı Sistemi Ayarlamaları

Kablosuz güç aktarım sisteminin performansını optimize etmek için bazı ayarlamalar yapılmaktadır. Bu ayarlamalar hem birincil (verici) tarafta hem de ikincil (alıcı) tarafta yapılmaktadır. [26]

2.2.3.1. Birincil (Verici) Bobinde Yapılan Ayarlamalar

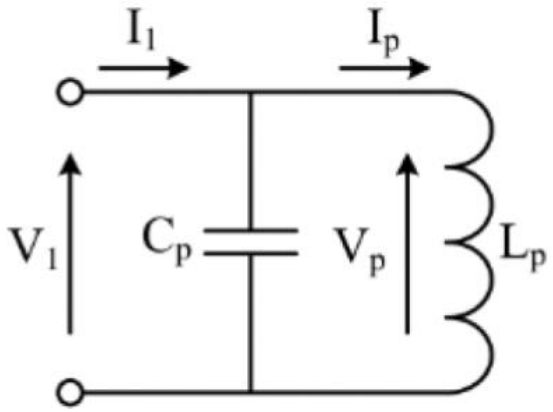
Kablosuz güç aktarım sisteminin birincil tarafta yapılan ayarlamalar güç faktörünü iyileştirir ve birincil güç kaynağının gereken volt-amper değerini azaltır. Birincil tarafta yapılabilecek seri, paralel ve seri paralel olmak üzere üç farklı kompanzasyon devresi bulunmaktadır.

Seri Kompanzasyon Topolojisi: Seri kompanzasyonda, kapasitansın üzerindeki gerilim, birincil eşdeğer reaktansın gerilim düşmesini kompanze eder. Böylelikle gereken besleme gerilimini azaltılır. Ancak, bu yöntemde, birincil akımın invertör köprüsü boyunca dolaşması nedeniyle anahtarlamada güç kaybı oluşabilir. Ayrıca, ayarlama kondansatörü nedeniyle gerilim yükselir, birincil bobinde daha yüksek bir gerilim oluşturur.



Şekil 11: Birincil Bobin Seri Kompanzasyon Topolojisi

Paralel Kompanzasyon Topolojisi: Paralel kompanzasyonda, kapasitans üzerinden akan akım, birincil bobindeki akımı kompanze eder. Bu, gereken besleme akımını azaltır. Reaktif akımın rezonans tankı içinde dolaşması nedeniyle, anahtarlamada daha az akıma ihtiyaç duyulur. Böylelikle daha düşük akım ile çalışan anahtarların kullanılmasını sağlar.



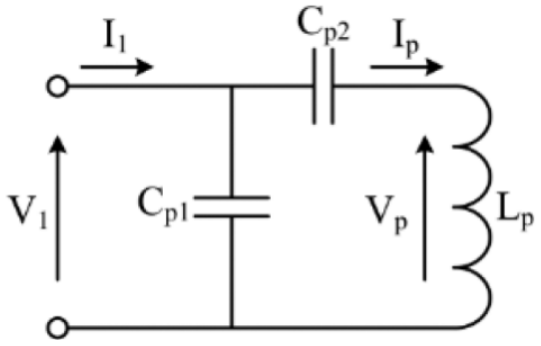
Şekil 12: Birincil Bobin Paralel Kompanzasyon Topolojisi

Paralel ve Seri kompanzasyon devrelerinde eklenecek kapasitör (Cp), ω birincil çalışma açısal frekansı olmak üzere aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 Lp}$$

(2-9)

Seri Paralel Kompanzasyon Topolojisi: Bu yöntem hem gerilimde hem de akımda azalma sağlar. Seri-paralel kompanzasyonda hem gerilimin hem de akımın optimum şekilde azaltılmasını sağlayarak güç faktörü iyileştirilir ve gereken Volt-Amper değerini düşürülür.



Şekil 13: Birincil Bobin Seri Paralel Kompanzasyon Topolojisi

Birleşik yapılı topolojide Cp2 birincil sızıntı indüktansını (Lp – M) tamamen iptal etmek için kullanılır. Cp1 ise birincil iç indüktansın (M) kalan kısmını ayarlamak için kullanılır.

Cp1 ve Cp2 aşağıdaki denklemler ile hesaplanır:

$$C_{p1} = \frac{1}{\omega^2 M}$$

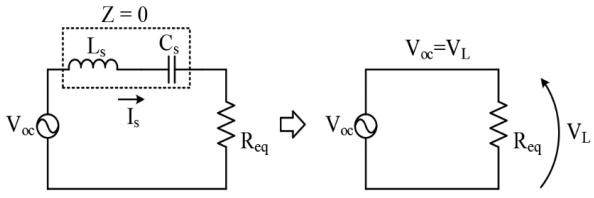
(2-10)

$$C_{p2} = \frac{1}{\omega^2 (Lp - M)}$$

(2-11)

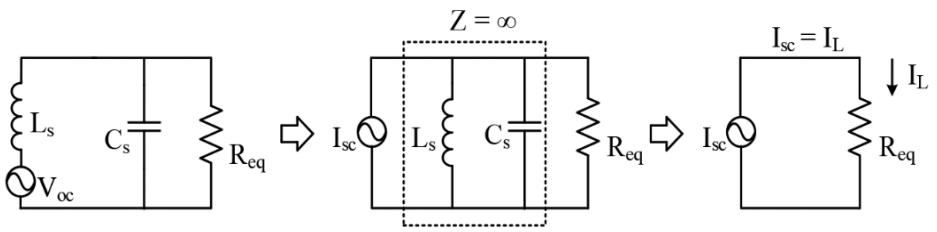
2.2.3.2. İkincil (Alıcı) Bobinde Yapılan Ayarlamalar

Sistem güç aktarım yeteneğini artırmak için ikincil taraf birincil tarafın çalışma frekansına ayarlanır. İkincil tarafın frekans ayarlamasında temelde iki topoloji vardır. Bunlar seri kompanzasyon ve paralel kompanzasyon topolojileridir.



Şekil 14: İkincil Bobin Seri Kompanzasyon Topolojisi

Şekil 14'te gösterilen Seri kompanzasyon topolojisinde rezonans frekansında eşdeğer reaktans ve kompanzasyon kapasitansı birbirini iptal eder. Bu durum çıkış geriliminin yükten bağımsız hale gelmesini sağlar ve ikincil açık devre gerilimine eşitlenir.



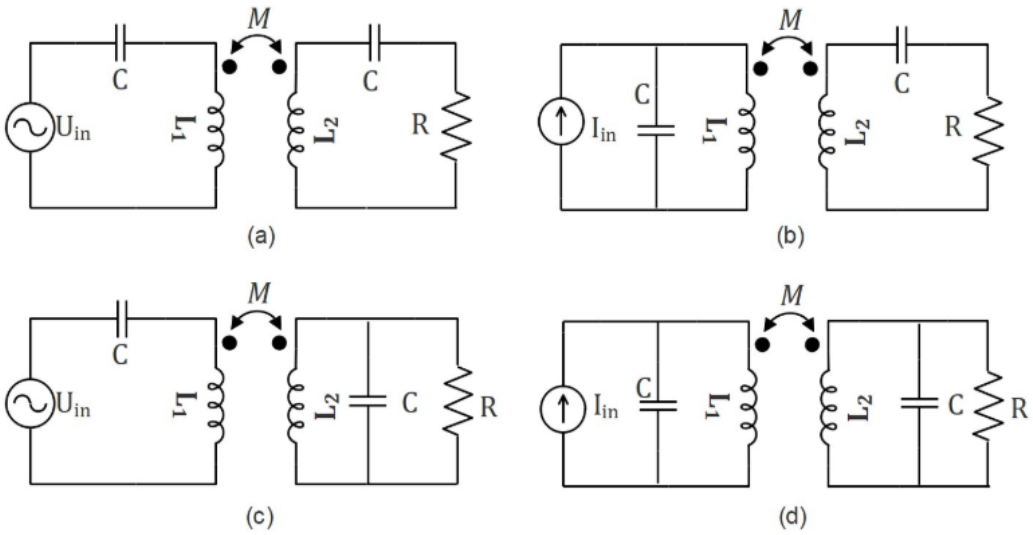
Şekil 15: İkincil Bobin Paralel Kompanzasyon Topolojisi

Şekil 15'te gösterilen paralel kompanzasyon topolojisinde eşdeğer admitans ve kompanzasyon kapasitansı rezonans frekansında birbirini iptal eder. Bu durumda çıkış akımı yükten bağımsız hale gelir ve ikincil kısa devre akımına eşitlenir.

Yapılan bu ayarlamalar güç aktarım verimliliğini artırır ve güç aktarım sisteminin istikrarlı çalışmasını sağlar.

2.2.4. Kablosuz Güç Aktarımı Devre Topolojileri

Kablosuz güç aktarım devreleri farklı kompanzasyon yapılarına göre değişiklik gösterebilir. En yaygın kullanılan devre topolojileri seri-seri kompanzasyon, seri-paralel kompanzasyon, paralel-seri kompanzasyon ve paralel-paralel kompanzasyon topolojileridir. [28]

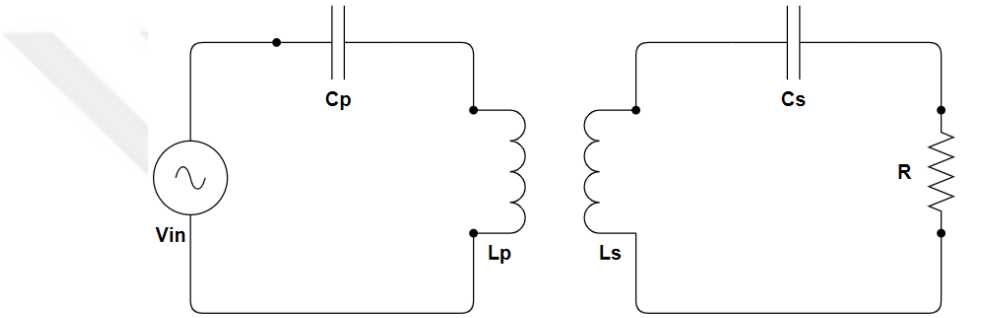


Şekil 16: Basit Kompanzasyon Topolojileri (a) Seri-Seri, (b) Paralel-Seri, (c) Seri-Paralel ve Paralel-Paralel

2.2.4.1. Seri-Seri Kompanzasyon Devresinin Elektriksel Modeli ve Analizi

Seri-Seri kompanzasyon devresi, bobinler arasındaki indüktif ve kapasitif bileşenler arasındaki uyumsuzlukları düzelterek enerji transfer verimliliğini artırır. Seri-seri kompanzasyon devresi, alıcı ve verici bobinin seri bağlı kapasitörlerle kompanse edildiği bir yapıya sahiptir. Bu kapasitörler, bobinlerin endüktansıyla birlikte rezonans oluşturarak, enerji transferini optimize etmek için kullanılır.

Seri-Seri rezonans devresinde verici (transmitter) bobin ve alıcı (receiver) bobin, aynı frekans ve fazda rezonans çalışacak şekilde tasarlanır ve seri olarak bağlanır. Bu sayede, enerji transferi sırasında daha fazla güç aktarımı sağlanır.



Şekil 17: Seri-Seri Kompanzasyon Eş Değer Devresi

Şekil 17'de gösterilen seri-seri kompanzasyon eş değer devresinde Cp çalışma frekansında Lp bobinini kompanze edebilmek için giriş voltajının sabit bir voltaja dönüştürür. Denklem 2-9 'a göre çalışma frekansında Cp değeri,

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 Lp}$$

(2-12)

Bobin üzerindeki gerilim değeri Vdc ve karşılıklı endüktans M olduğunda, bobin akımı $\boldsymbol{I_l}$,

$$I_l = -\frac{1}{j\omega M} Vdc$$

(2-13)

İkinci tarafta Cs kapasitörü, Ls bobini kompanze ederek Vdc gerilimi ile oluşan güç transferini verimini optimize eder. Bu durumda Cs,

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 Ls}$$

(2-14)

Empedans değeri göz ardı edilmez. Yüksek dirençli bir yük ile giriş akımı yükselmeye zorlanır. Böylelikle $\boldsymbol{I_l}$ çıkışa aktarılır. Buradan empedans değeri $\boldsymbol{Z_{total}}$ denklem 2-15'teki gibi hesaplanır.

$$Z_{total} = \frac{(\omega M)^2}{R}$$

(2-15)

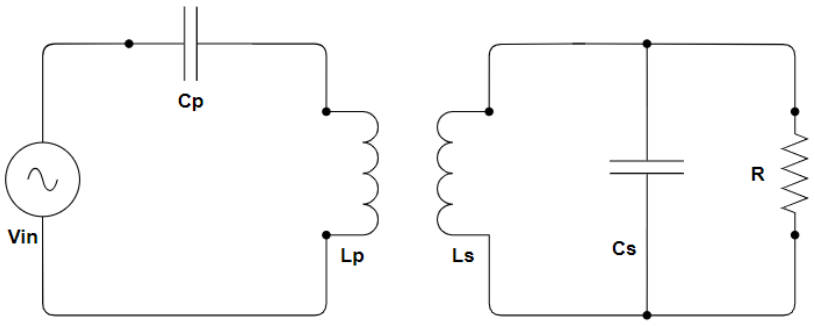
Denklem 2-15 kullanılarak güç hesabı $\boldsymbol{P = {V^2}/{R}}$ formülü ile hesaplanacak olursa, denklem 2-16'daki gibi olacaktır.

$$P_{SS} = \frac{(Vdc)^2}{(\omega M)^2} R$$

(2-16)

2.2.4.2. Seri-Paralel Kompanzasyon Devresinin Elektriksel Modeli ve Analizi

Seri-Seri kompanzasyona benzer çalışmaktadır. Seri-Paralel kompanzasyon devresinin amacı yine Seri-Seri kompanzasyon devresinde olduğu gibi birincil ve ikincil bobin akımlarını artırmak ve sistem verimliliğini artırmaktır. Seri – Paralel kompanzasyon devresinde toplam empedans azaldığı için seri-seri kompanzasyon devresinden daha yüksek güce sahiptir.



Şekil 18: Seri Paralel Kompanzasyon Eş Değer Devresi

Sistem bağlanma katsayısı,

$$k = \frac{M}{\sqrt{LpL_s}}$$

(2-17)

Seri-Paralel kompanzasyon topolojisinde Cs kapasitörü paralel olarak yerleştirilmiş ve R yüküne paralel bir akım yolu oluşturmaktadır. Dolayısıyla giriş akımı ile R yük üzerinde oluşan akım arasında fark oluşur. Cp ve Cs kapasitörlerinin değerleri,

$$C_p = \frac{1}{(\omega^2 Lp(1-k^2))}$$

(2-18)

$$C_S = \frac{1}{\omega^2 Ls}$$

(2-19)

Çıkış gerilimi Vout yükten bağımsızdır. Bu durumda,

$$\frac{V_{out}}{V_{dc}} = \frac{1}{\omega^2 MCs} = \frac{Ls}{M} = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{Ls}{Lp}}$$

(2-20)

Bu durumda toplam empedans,

$$Z_{total} = \frac{(\omega M)^2 RCs}{Ls} = \left(\frac{M}{Ls}\right)^2 R$$

(2-21)

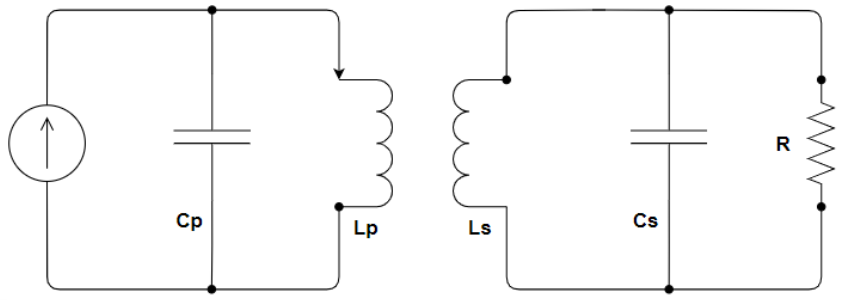
Bu empedans değerine göre güç hesabı Denklem 2-22'deki gibi olacaktır.

$$P_{SP} = \frac{(LsVdc)^2}{M}\frac{1}{R}$$

(2-22)

2.2.4.3. Paralel-Paralel Kompanzasyon Devresinin Elektriksel Modeli ve Analizi

Bu kompanzasyon yapısında empedans ve ikincil akım rezonans frekansında zirveye ulaşır. Çünkü birincil akım rezonans frekansında maksimum değerdedir. Bu nedenle yüksek kayıplar oluşacaktır. Dolayısıyla sistem verimi oldukça düşüktür.



Şekil 19: Paralel Paralel Kompanzasyon Eş Değer Devresi

Şekil 19'da gösterilen eş değer devresinde toplam empedans değeri gerilim/akım formülü şöyle hesaplanır

$$Z_{total} = \frac{-j\omega M^2}{Ls} + \frac{(\omega M)^2 RCs}{Ls} = -j\omega \frac{M^2}{Ls} + \left(\frac{M}{Ls}\right)^2$$

(2-23)

Cp ve Cs kapasite değerleri,

$$C_p = \frac{1}{(\omega^2 Lp(1-k^2))}$$

(2-24)

$$C_S = \frac{1}{\omega^2 Ls}$$

(2-25)

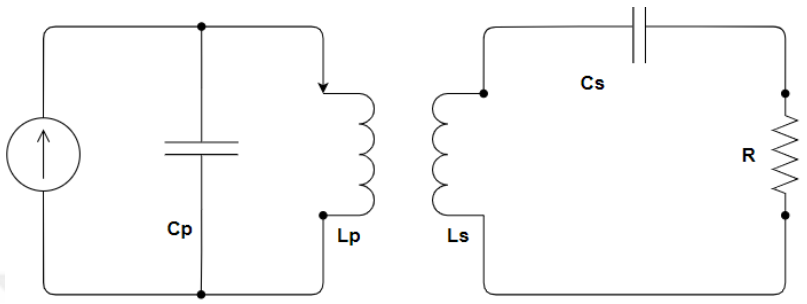
Bu değerler kullanılarak güç hesabı yapılırsa,

$$P_{PP} = \left(\frac{K^2 Vdc}{(1-K^2)\omega M}\right)^2 R$$

(2-26)

2.2.4.4. Paralel-Seri Kompanzasyon Devresinin Elektriksel Modeli ve Analizi

Bu kompanzasyon devresinde rezonans frekansında empedans maksimum olacak ve akım kaynağı maksimum güç aktarımı sağlayacaktır. Böylelikle ikincil tarafta akım rezonans frekansında maksimum seviyeye ulaşacaktır. Paralel-seri kompanzasyon devreleri yüksek verimlilikle çalışır.



Şekil 20: Paralel Seri Kompanzasyon Eş Değer Devresi

Şekil 20'de gösterilen eş değer devre için empedans değeri,

$$Z = \frac{\omega^2 M^2}{R} \qquad \textbf{(2-27)}$$

Tam bir kompanzasyon için gerekli olan kapasite değerleri,

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 Lp} \qquad \textbf{(2-28)}$$

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 Ls} \qquad \textbf{(2-29)}$$

Paralel-Seri kompanzasyon sistemi bütünüyle gerilim kaynağı gibi davranma eğilimindedir. Bu durumda çıkış voltajı,

$$\frac{V_{out}}{V_{dc}} = \omega^2 MCp = \frac{M}{Lp} = k\sqrt{\frac{Lp}{Ls}} \qquad \textbf{(2-30)}$$

Bu durumda paralel seri kompanzasyon devresi için güç hesabı,

$$P_{PS} = \left(\frac{K^2 VdcLs}{M}\right)^2 \frac{1}{R}$$

(2-31)

olacaktır.

Kompanzasyon devrelerinin karakteristikleri aşağıdaki Tablo 1'de [29] gösterilmiştir.

Tablo 1: Kompanzasyon devrelerinin karakteristikleri

Topoloji	**Tasarım amacı**	**Güç Faktörü (dar hava aralığı)**	**Güç Faktörü (geniş hava aralığı)**	**Rezonans Empedansı**	**Verim**
Seri-Seri	Gerilim Kaynağı	Düşük	Çok Yüksek	Düşük	Çok Yüksek
Seri-Paralel	Akım Kaynağı	Düşük	Yüksek	Düşük	Orta
. Paralel-Seri	Gerilim Kaynağı	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
Paralel-Paralel	Akım kaynağı	Çok Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek

Tablo 2: Kompanzasyon Devrelerinin Denklemleri [31]

Topoloji	**Primer Kapasitesi**	**Sekonder Kapasitesi**	**Yansıyan Direnç**	**Verim**
Seri-Seri	$\frac{CsLs}{Lp}$	$\frac{1}{\omega^2 Ls}$	$\frac{\omega^2 M^2}{R}$	$\frac{\omega^2 M^2}{RpR + \omega^2 M^2}$
Seri-Paralel	$\frac{Ls^2 Cs}{LpLs - M^2}$	$\frac{1}{\omega^2 Ls}$	$\frac{M^2 R}{Ls^2}$	$\frac{RM^2}{RM^2 + Ls^2 Rp}$
. Paralel-Seri	$\frac{LsCs}{\frac{M^4}{LpLsCsR^2} + Lp}$	$\frac{1}{\omega^2 Ls}$	$\frac{\omega^2 M^2}{R}$	$\frac{\omega^2 M^2}{RpRL + \omega^2 M^2}$
Paralel-Paralel	$\frac{Ls^3 Cs(LpLs - M^2)}{M^4 CsR^2 + Ls(LpLs - M^2)^2}$	$\frac{1}{\omega^2 Ls}$	$\frac{M^2 R}{Ls^2}$	$\frac{RM^2}{RM^2 + Ls^2 Rp}$

2.3. RF ENERJİ HASADI

RF enerji hasadı, radyo frekansı (RF) elektromanyetik spektrumundaki enerjiyi toplama ve dönüştürme sürecidir. Bu süreç, düşük güç tüketimine sahip elektronik cihazların çalışması için enerji sağlamak amacıyla kullanılır. RF enerji hasadı (EH), mikrodalga, radyo veya diğer kablosuz iletişim sinyallerinden enerjiyi yakalayarak, doğru devreler aracılığıyla toplanan bu enerjiyi depolama veya doğrudan kullanma işlemine dayanır.

RF enerji hasadı, genellikle pasif bileşenler, antenler ve enerji depolama/bölüşüm devreleri gibi öğelerin entegrasyonunu içerir. Bir RF enerji hasadı sistemi, çevresel RF sinyallerini algılamak için bir anten, bu sinyalleri doğru bir şekilde düşük güç tüketen cihazlar için kullanılabilir enerjiye dönüştüren bir düzenek ve bu enerjiyi depolamak veya işlemek için gerekli devrelerden oluşur.

Bu teknolojinin ana avantajlarından biri, enerjinin çevrede yaygın olarak bulunabilen RF sinyallerinden toplanabilmesidir, bu da özellikle pil değiştirme veya şarj etme gereksinimlerini azaltır veya ortadan kaldırır. RF enerji hasadı, IoT (nesnelerin interneti) cihazları, kablosuz sensör ağları ve giyilebilir teknolojiler gibi birçok alanda uygulama potansiyeline sahiptir ve araştırmacılar tarafından sürekli olarak geliştirilmekte ve iyileştirilmektedir. [34]

RF sinyalleri kablosuz yayın yaptığı için farklı cihaz ve frekanslardan yayılan RF dalgalarının güç yoğunluğu birbirinden farklıdır.

Tablo 3: Farklı RF Sinyallerinin Güç Yoğunluğu

Kaynak/Osilatör	Frekans Aralığı	Güç Yoğunluğu
DTV	470-610 MHz	0,89 nW/cm^2
GSM900 (YA)	880-915 MHz	0,45 nW/cm^2
GSM900 (AA)	920-960 MHz	36 nW/cm^2
GSM1800 (YA)	1710-1785 MHz	0,5 nW/cm^2
GSM1800 (AA)	1805-1880 MHz	84 nW/cm^2
3G (YA)	1710-1785MHz	0,46 nW/cm^2
3G (AA)	2110-2170 MHz	12 nW/cm^2
Wi-Fi	2400-2500 MHz	0,18 nW/cm^2

(AA: Ana Aktarıcı, YA: Yardımcı Aktarıcı)

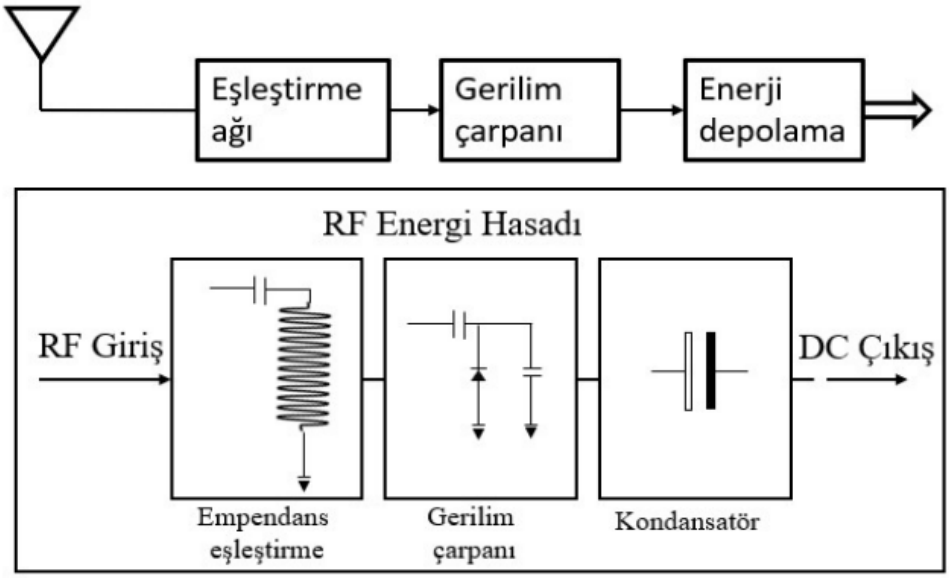
RF-EH için gerekli RF enerji kaynakları özel ve çevre kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır [35]. Özel kaynaklar belirli bir cihaza, belirli bir seviyede enerji sağlamak için kullanılan RF

kaynaklardır. Güç ve frekans gibi parametreler RF düğüm veya sensör cihazlarının ihtiyaçlarına uygun olarak optimize edilebilir. ISM frekans bantları özel olarak RF enerji transferi için kullanılabilir ve optimize edilebilir. 915 MHz Powercaster vericisi bu kullanıma örnektir.

Çevre kaynakları statik ve dinamik ortam RF kaynaklarıdır. Statik çevre RF kaynakları genellikle belirli bir frekansta yayın yapar. TV ve radyo yayınları, Wi-Fi yönlendiricileri statik çevre kaynaklarına örnek verilebilir.

Dinamik ortam RF kaynakları ise hareket halindeyken RF sinyali üretebilen kaynaklardır. Mobil cihazlar, araç içi sistemler ve navigasyonlar dinamik ortam RF sinyaline örnek verilebilir.

2.3.1. RF Enerji Hasadı Topolojisi



Şekil 21: RF Enerji Toplayıcısı Blok Diyagramı

Şekil 21'de [36] RF EH genel topolojisi gösterilmiştir. Anten elektromanyetik dalgaları çalışma frekansında toplayan (alıcı anten) veya sinyalleri boşluğa yayan (verici anten) cihazdır. Anten tasarımı tek bir frekansta çalışacak şekilde veya birden fazla frekans çalışacak şekilde tasarlanabilir. Çoklu frekans bandında tasarım yapıldığında birden fazla kaynaktan enerji toplanabilir.[37]

Eşleştirme ağında yapılan işlemler ile çalışma frekansında maksimum güç ve minimum kayıpla çalışma sağlanır. Düşük güç seviyelerinde empedans uyumu verimlilik için önemli bir etkendir.

Gerilim çarpanı AC formda bulunan RF sinyallerini DC sinyale çeviren doğrultucu komponentleri içerir. Uygulamalarda düşük gerilime sahip diyotlar seçilerek yüksek verimlilikte AC-DC dönüşümleri yapılır.

Kondansatörler, hasat ile elde edilen gerilimin yüke düzgün şekilde aktarılmasında rol oynar. RF sinyali kesildiğinde veya anahtarlandığında kısa süreliğine sistemin enerji gereksinimi karşılayacak gerilim kaynağı görevi yapar.

Tez kapsamında RF-EH yöntemi ile küçük ev aletlerine güç aktarımı yapılmadan önce çalışmasını sağlayacak enerji hasat edilecektir. Böylelikle batarya kullanımına ihtiyaç olmadan küçük ev aletinin kullanıcı arayüzü aktif hale gelecektir.

2.4. İNDÜKSİYONLU OCAK

İndüksiyonlu ocaklar, geleneksel ocaklara kıyasla farklı bir ısıtma yöntemi kullanır. Bu ocaklar, elektromanyetik alanlar aracılığıyla tencere veya tava içindeki yemekleri ısıtarak pişirme işlemini gerçekleştirirler. İndüksiyonlu ocak, bir indüksiyon bobini vasıtasıyla bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, tencere veya tavada bulunan ferromanyetik malzemeler tarafından algılanır. Tencere veya tava, manyetik alana maruz kaldığında, içindeki malzemelerin moleküllerinin titreşmesine neden olur ve bu da ısı üretir. Manyetik alana maruz kalan tencere veya tava hızla ısınır ve yemekler pişirilir.

İndüksiyonlu ocakların birçok avantajı vardır. Öncelikle, geleneksel ocaklara kıyasla daha hızlı ve daha hassas bir şekilde ısı sağlarlar. Isı, doğrudan tencere veya tava içine iletilir, bu da daha hızlı pişirme süreleri sağlar. Ayrıca, indüksiyonlu ocaklar, kullanım sırasında çok az enerjiyi boşa harcarlar, bu da daha enerji verimli bir pişirme deneyimi sunar. Ek olarak, ocak yüzeyi, çoğu zaman tencere veya tavaların altında olduğu için, yanmış gıda parçacıklarının ocak yüzeyine yapışması gibi sorunlarla daha az karşılaşılır ve temizliği daha kolaydır.

İndüksiyonlu ocaklar, ev kullanımından ticari mutfaklara kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Hızlı ve enerji verimli pişirme yetenekleriyle tanınırlar ve modern mutfaklarda popüler bir seçenek haline gelmişlerdir. Bu nedenle, indüksiyonlu ocaklar üzerine yapılan araştırmalar, bu teknolojinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için önemlidir.

İndüksiyonlu ocakların temel çalışma prensibi:

İndüksiyon Bobini: İndüksiyonlu ocakta, bir indüksiyon bobini bulunur. Bu bobin, yüksek frekanslı alternatif akımla beslenir ve manyetik bir alan oluşturur.

Manyetik Alan Oluşturma: İndüksiyon bobini tarafından oluşturulan manyetik alan, ocak yüzeyindeki cam seramik tabakanın altına kadar yayılır. Oluşan bu manyetik alan, tencere veya tava içindeki ferromanyetik malzeme ile etkileşime girer.

Isı Üretimi: Tencere veya tava içindeki ferromanyetik malzeme, manyetik alana maruz kaldığında moleküler titreşime geçer. Bu titreşimler, tencere veya tavada ısı üretilmesine neden olur.

Pişirme: Isı, doğrudan tencere veya tavanın içine iletilir. İletilen ısı tencere veya tava içindeki yiyeceklerin hızla pişmesini sağlar. Isı, ocak yüzeyine iletilmez, bu nedenle ocak yüzeyi soğuk kalır ve yanmış gıda parçacıkları gibi sorunlarla daha az karşılaşılır. Ancak tencereden yansıyan ısı ocak yüzeyinde bulunan cam örtü üzerinde bir sıcaklık oluşturabilir.

İndüksiyonlu ocakların teknolojik özellikleri şunları içerir:

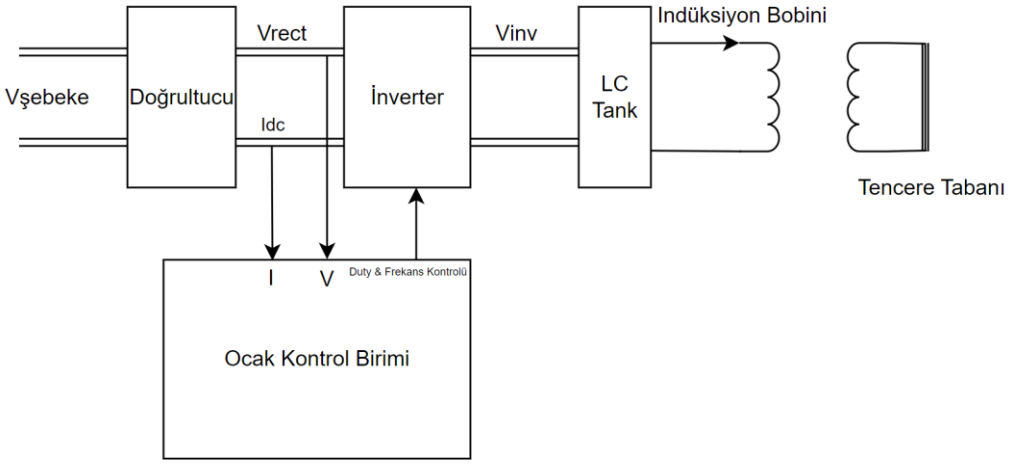
Dokunmatik Kontroller: Genellikle dokunmatik ekranlar aracılığıyla kontrol edilirler. Isı seviyeleri ve zamanlayıcı gibi fonksiyonlar bu kontrol panelinden ayarlanabilir.

Otomatik Sensörler: Bazı indüksiyonlu ocaklar, tencere veya tava türünü algılayabilen otomatik sensörlere sahiptir. Bu sensörler, ocağın sadece uyumlu tencere veya tavalarla çalışmasını sağlar.

Güvenlik Özellikleri: Anlık aşırı ısı algılaması ve otomatik kapanma gibi güvenlik özellikleri bulunur. Tencere veya tava kaldırıldığında veya ocak yüzeyine yanlışlıkla bir şey konulduğunda otomatik olarak kapanabilirler.

İndüksiyonlu ocaklar, modern mutfaklarda popüler hale gelmiştir. Hızlı, enerji verimli ve güvenli bir pişirme deneyimi sunmalarıyla bilinirler.

Şekil 22’de indüksiyon ocak temel blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 22: İndüksiyon Ocak Blok Diyagramı

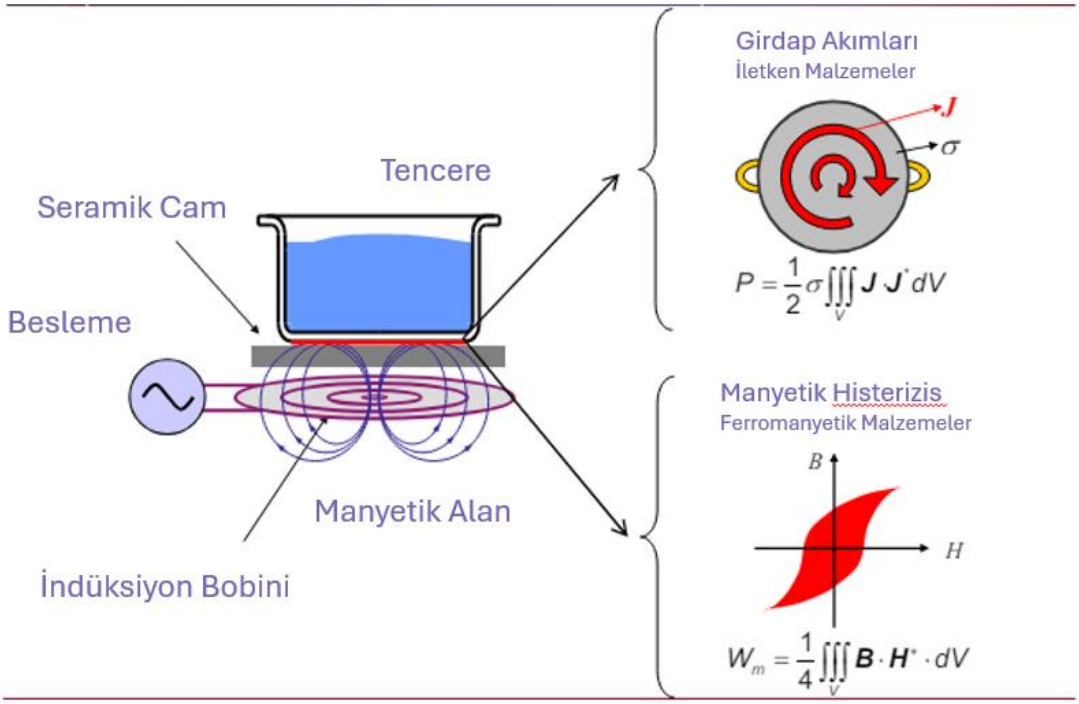


Şekil 23: İndüksiyonlu Ocak Temel Yapısı

Şekil 23’de [30] indüksiyon ocağın temel bileşenleri gösterilmiştir. İndüksiyonlu ısıtma sistemleri, AC akım geçen indüksiyon bobinlerinin oluşturduğu değişken manyetik alanlar sayesinde çalışır. Bu değişken manyetik alanlar, metal bir tencerenin veya başka bir yükün tabanı etrafında girdap akımlarını oluşturur. Bu akımlar, malzemenin içinde elektrik direnci tarafından karşılanırken ısıya dönüşür. Bu olay, Joule etkisi olarak bilinir. Sonuç olarak, indüklenen akımın ürettiği elektrik enerjisi ısıya dönüşür ve malzeme ısınır. Bu yöntem, hızlı ve hassas ısıtma gerektiren birçok uygulamada tercih edilir.

2.4.1. İndüksiyonlu Isıtmanın Temeli

İndüksiyon ısıtma, temelde manyetik indüksiyon, deri etkisi ve ısı transferi kavramlarına dayanır. Herhangi bir indüksiyon ısıtma sistemi, bu üç temel kavramı içerir. Sistem, bir indüksiyon bobini aracılığıyla manyetik alanı oluşturur ve bu alan deri etkisi yoluyla malzemeye nüfuz eder. Deri etkisi, malzemenin yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşan manyetik alanın neden olduğu elektriksel akımları ifade eder. Bu akımlar, malzemenin içinde direnç tarafından enerjiye dönüştürülür ve ısı üretilir. Bu ısı, malzemenin ısınmasını sağlar. İndüksiyon ısıtma sistemlerinin performansı, kullanılan bobin tipi, ısıtılacak malzemenin özellikleri, kullanılan frekans, güç çıkışı ve invertörün yapısı gibi faktörlere bağlıdır, ancak bu temel kavramlar her sistemin temelinde yer alır. Bu nedenle, herhangi bir indüksiyon ısıtma sistemi, manyetik indüksiyon, deri etkisi ve ısı transferi prensiplerine dayanır.



Şekil 24: İndüksiyonlu Isıtma ve Kayıplar

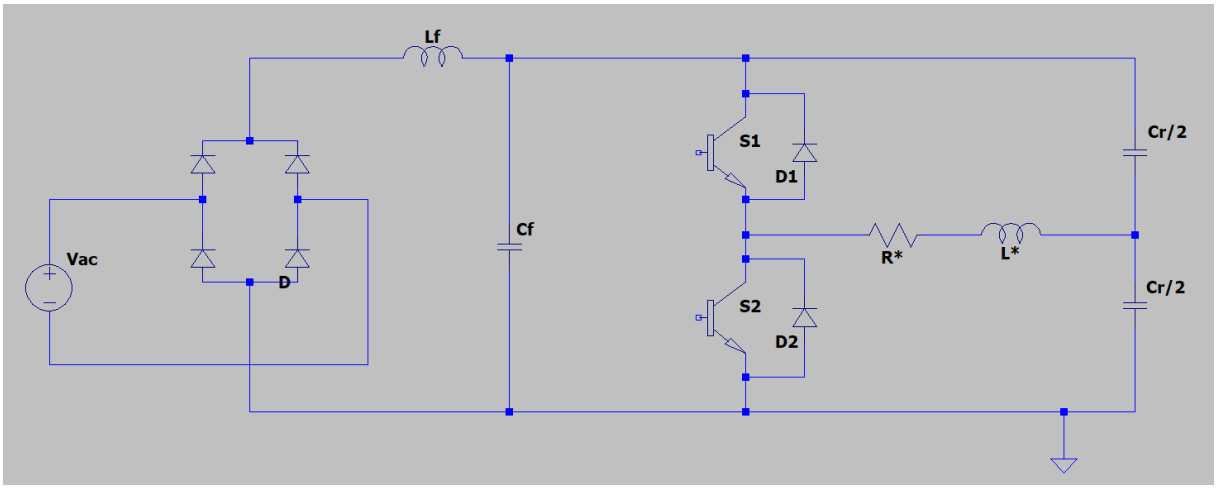
Şekil 24'te [33] görüldüğü üzere, tencere üzerinde, indüksiyon ısıtma sürecinde girdap akımı ve histerezis kayıpları meydana gelir. Ferromanyetik malzemelerde, moleküllerin frekansa bağlı olarak hızla yön değiştirmesi ve birbiriyle sürtünmesi sonucu manyetik histerezis denilen bir kayıp oluşur. Bu histerezis kayıpları, malzeme içinde manyetik alanın tersine dönmesi sırasında enerji kaybını ifade eder. Diğer yandan, tencere üzerindeki girdap akımları, malzemenin içinde dönen elektrik akımlarından kaynaklanır ve bu da ısı kaybına yol açar.

Genelde, girdap akımlarının neden olduğu kayıplar, histerezis kayıplarına göre daha belirgindir ve daha büyüktür. Bu nedenle, indüksiyon ısıtma sistemlerinde genellikle histerezis kayıpları ihmal edilebilir.

2.4.2. İndüksiyonlu Ocaklarda Kullanılan Rezonans Çeviriciler

İndüksiyonlu ocaklarda yarım köprü rezonans evirici, tam köprü rezonans evirici, sıfır gerilim anahtarlamalı (ZVS) ve sıfır akım anahtarlamalı (ZCS) rezonans evirici olmak üzere 4 farklı evirici topolojisi bulunmaktadır. [32].

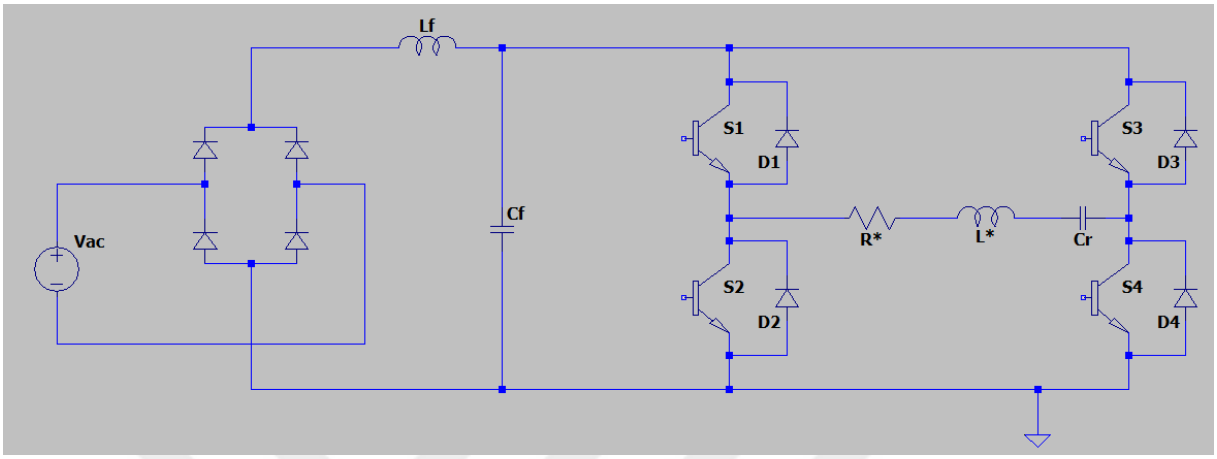
2.4.2.1. Yarım Köprü Rezonans Evirici



Şekil 25: Yarım Köprü Rezonans Evirici Yapısı

Yarım köprü rezonans evirici topolojisi Şekil 25'te gösterilmiştir. Bu topolojinin uygulamasında devre üretimi ve kontrolü oldukça kolaydır. Bu nedenle en çok tercih edilen topoloji türlerinden biridir.

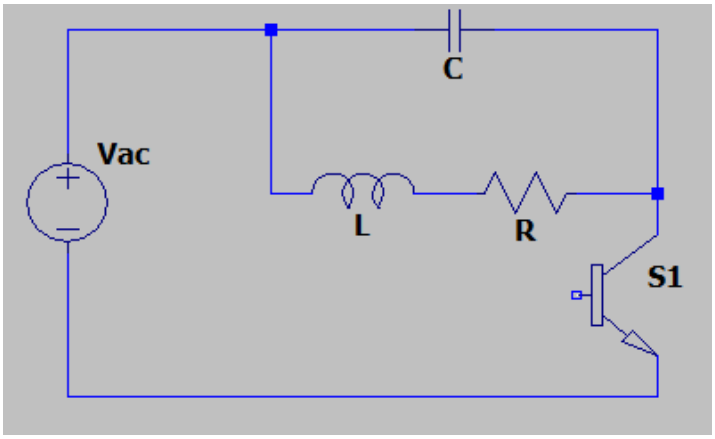
2.4.2.2. Tam Köprü Rezonans Evirici



Şekil 26: Tam Köprü Rezonans Evirici Yapısı

Tam köprü rezonans evirici topolojisi Şekil 26'da gösterilmiştir. Bu topoloji çok fazla komponent içermektedir. Bu durum uygulama ve PCB üretimini zorlaştırmaktadır. Verimliliği yüksektir fakat pratikte uygulaması karmaşık bir yapıya sahiptir.

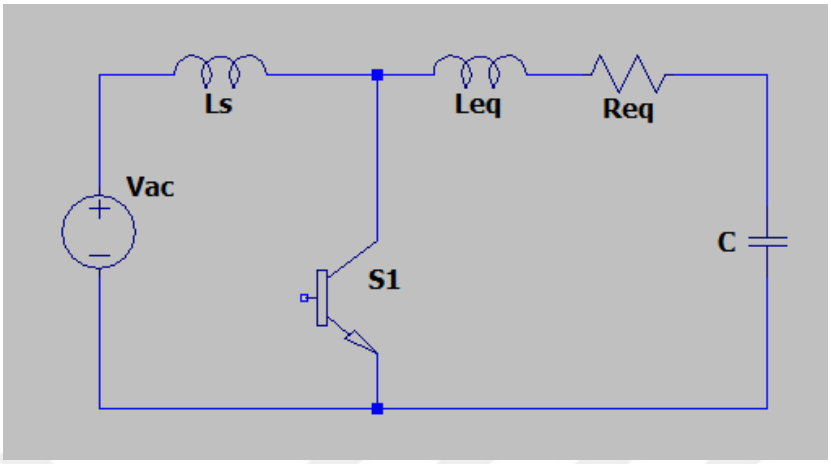
2.4.2.3. Sıfır Gerilim Anahtarlamalı (ZVS) Rezonans Evirici



Şekil 27: Tek Anahtarlı Sıfır Geçiş Gerilim Anahtarlamalı (ZVS) Rezonans Evirici Topolojisi

Tek anahtarlı sıfır geçiş anahtarlamalı rezonans evirici topolojisi Şekil 27'de gösterilmiştir. Topolojide az komponent bulunduğu için uygulaması kolaydır. Fakat kontrol aşamasında geri beslemeye ihtiyaç duyulduğu için kontrolü zordur.

2.4.2.4. Sıfır Akım Anahtarlamalı (ZCS) Rezonans Evirici



Şekil 28: Tek Anahtarlı Sıfır Geçiş Akım Anahtarlamalı (ZCS) Rezonans Evirici Topolojisi

Şekil 28'de tek anahtarlı sıfır geçiş akım anahtarlamalı evirici topolojisi gösterilmiştir. Bu topoloji sıfır geçiş gerilim anahtarlamalı topoloji gibi yapısında az komponent bulundurur. Kontrol aşamasında yine geri beslemeye ihtiyaç duyar ve kontrolü zordur. Sıfır geçiş gerilim anahtarlamalı topolojiden farklı olarak yüksek akıma dayanıklı bir indüktöre ihtiyaç duyar. Bu nedenle uygulaması daha zordur.

Tez kapsamında kullanılacak indüksiyon ocak yarım köprü rezonans evirici topolojisinde seçilmiştir.

3. YÖNTEM

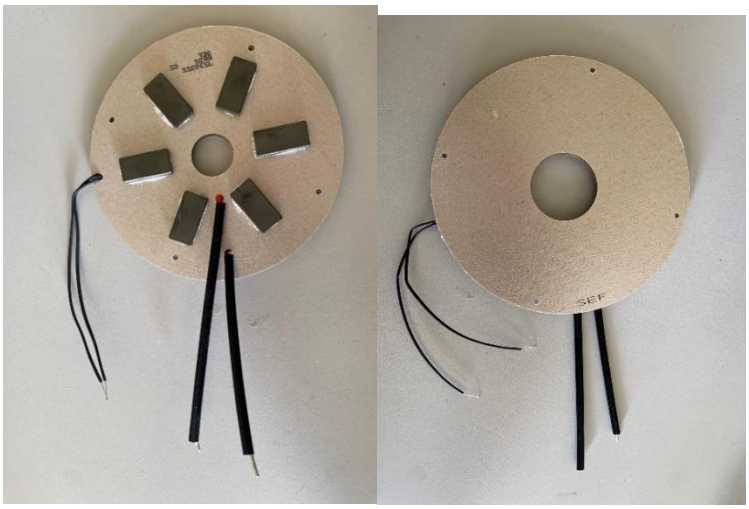
Bu tezde küçük ev aletlerinin indüksiyon ocak teknolojisi kullanılarak kablosuz olarak çalıştırılması için bir yöntem sunulmuştur.

Uygulama aşamasında küçük ev aleti olarak bir adet dirençli Türk kahvesi makinası kullanılmıştır. Seçilen kahve makinası yapısal ve teknik özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Belirlenen bu kahve makinası üzerinde enerjilendirme ve haberleşme yapısının kurgulanması için değişiklikler yapılmıştır.

Tablo 4: Kahve Makinası Özellikleri

Güç	670 W
Yükseklik	23,7 cm
Derinlik	17,9 cm
Genişlik	15,7 cm
Giriş Gerilimi	220 AC

Kahve makinasında giriş kablosu çıkarılmıştır. Bunun yerine besleme gerilimini oluşturacak bir bobin kullanılmıştır. Kullanılan bobin Şekil 29'da gösterilmiştir. Bobin SEFTech[38] firmasında satın alınmıştır. Bobin üzerinde haberleşmenin sağlanabilmesi için NFC uyumlu bir anten bulunmaktadır.



Şekil 29: Kahve Makinasında Kullanılan Bobin

Kullanılan bobinin teknik detayları Tablo 5'te gösterilmiştir. Kahve makinası güç aktarım frekansı 30 kHz olarak seçilmiştir. Haberleşme için kullanılacak olan NFC Anten 13.56 MHz frekansında çalışacak şekilde seçilmiştir.

Tablo 5: Kahve Makinasında Kullanılan Bobinin Teknik Detayları

Sarım Sayısı	67
Bobin İç Çapı	50±2 mm
Bobin Dış Çapı	150±2 mm
İç Sarım Tel Uzunluğu	100±2 mm
Dış Sarım Tel Uzunluğu	100±2 mm
NFC Anten Tel Kalınlığı	0.44 mm
NFC Anten Sarım Sayısı	2
NFC Anten Çapı	140 mm
NFC Anten Boşluğu	1 mm
Bobin Direnci (30kHz)	<0.8 ohm
Bobin Endüktansı (30kHz)	481 uH
Bobin Kalite Faktörü(Q)	>100
NFC Anten Endüktansı (13.56MHz)	1.9±0.3uH
NFC Anten Kalite Faktörü(Q)	>25

Bobin endüktansı 481 uH'dir. Bu durumda 30 kHz frekansta çalışabilmesi için rezonans kapasitesi eklenmelidir.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

$$30000 = \frac{1}{2\pi\sqrt{481 \cdot 10^{-6} \cdot C}}$$

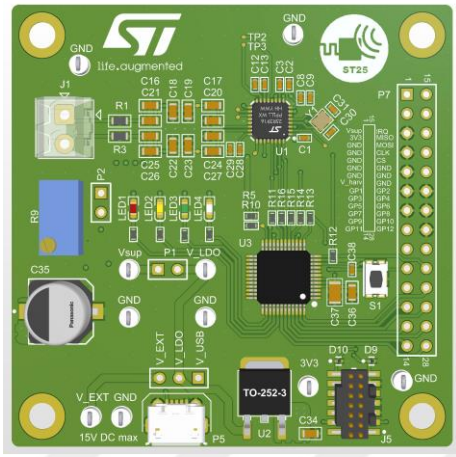
$$C = 58.513\ nF$$

58.513 hesaplanan kapasite değerine en yakın değer olan 56nF ile Şekil 30'da gösterilen rezonans kapasitesi devresi bobine seri eklenmiştir.



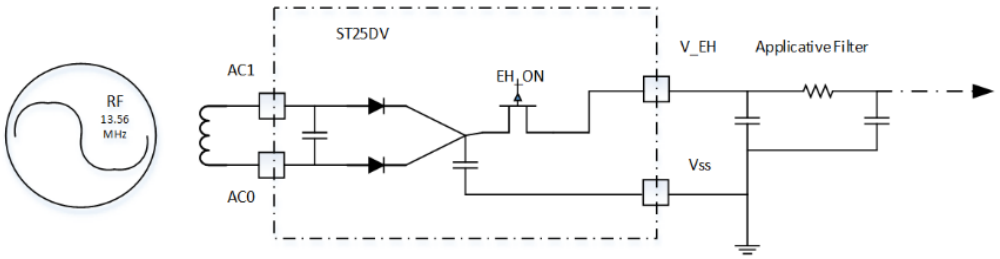
Şekil 30: Kahve Makinası Rezonans Kapasitesi

Kahve makinasının indüksiyon ocak ile haberleşmesi için harici bir NFC arayüz kartı kullanılmıştır. Bobin üzerindeki anten doğrudan bu arayüze bağlanacaktır. NFC arayüz kartı ST25R3918 [39][40] NFC transceiver kullanılmıştır.



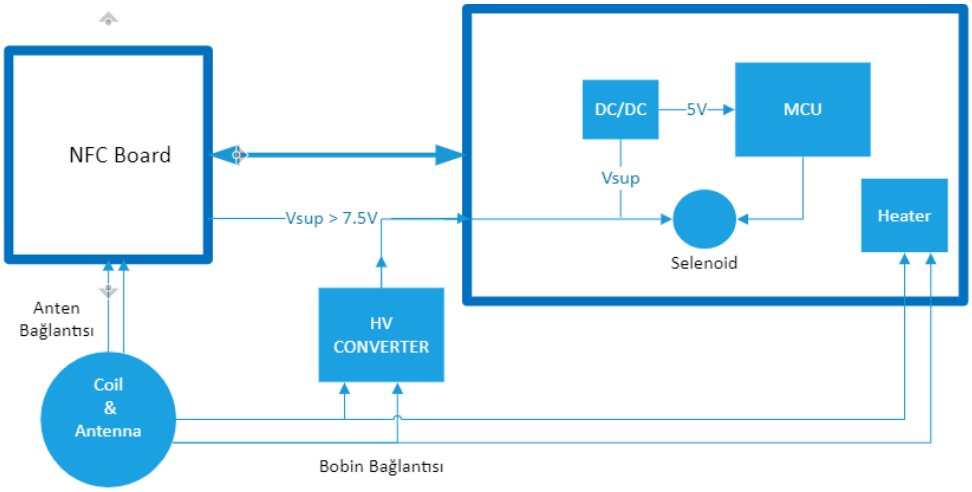
Şekil 31: Kahve Makinası NFC Arayüz Kartı

NFC arayüz kartı kahve makinasının arayüzünün çalışması için gerekli olan enerjiyi karşılayacak şekilde RF-EH yapmaktadır. RF-EH devre blok şeması Şekil 32'de [41] gösterilmiştir.



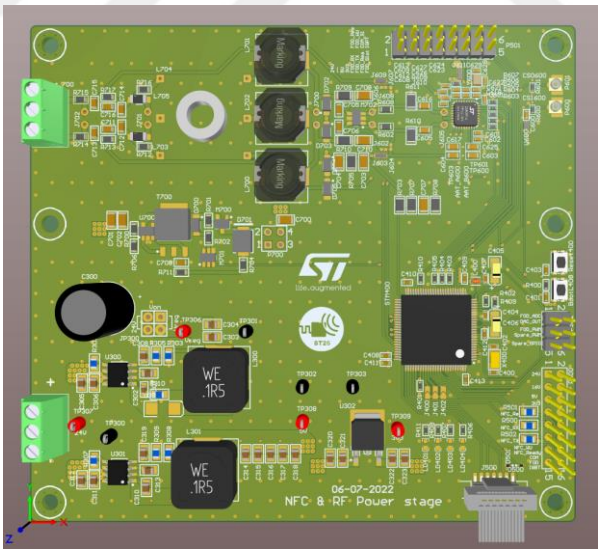
Şekil 32: RF – EH Devresi

RF-EH devresi ile bobinden indüklenen gerilim by-pass şekilde çalışarak haberleşmenin kesilmemesini sağlamaktadır. Minimum hasat edilecek gerilim 7.5V seçilmiştir. Böylece UI fonksiyonları çalıştırıldığında haberleşme kesilmeden fonksiyonlar kullanılabilecektir. Yeni oluşan kablosuz enerji aktarımına uygun kahve makinası blok diyagramı Şekil 33'te gösterilmiştir.



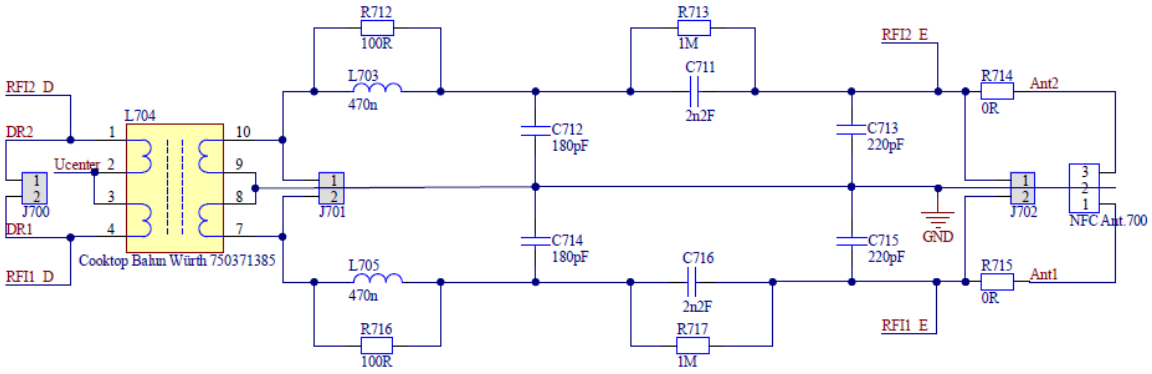
Şekil 33: Kablosuz Enerji Aktarımına Uygun Kahve Makinası Blok Diyagramı

Tez kapsamında kullanılan indüksiyon ocak 3000W üzerinde ısıtma kabiliyeti olan 4 gözlü standart bir indüksiyon ocaktır. Yarım köprü rezonans evirici mimarisi ile geliştirilmiştir. Küçük ev aletlerine güç aktarımına uygun hale getirilmesi için haberleşme alt yapısı için bir NFC arayüz kartı eklenmiştir. Şekil 34'te gösterilen arayüz kartı, küçük ev aletinin RF-EH yapacağı gerilimi sağlayan bir güç amplifikatörü ve NFC okuyucu içermektedir.



Şekil 34: İndüksiyon Ocak NFC Arayüz Kartı

NFC haberleşme ve RF-EH için kullanılacak anten NFC arayüz kartına takılmaktadır. Bu antene ait uyumlaştırma devresi Şekil 35'te gösterilmiştir. NFC çalışma frekansı 13.56MHz'e uygun bir ayarlama (tuning) işlemi yapılmıştır.



Şekil 35: NFC Eşleştirme Ağı Devresi

Eşleştirme yapılması için Şekil 36'da gösterilen Chelegance Vektör Network Analizör (VNA) [42] ve SEFTech NFC anten[38] kullanılmıştır.

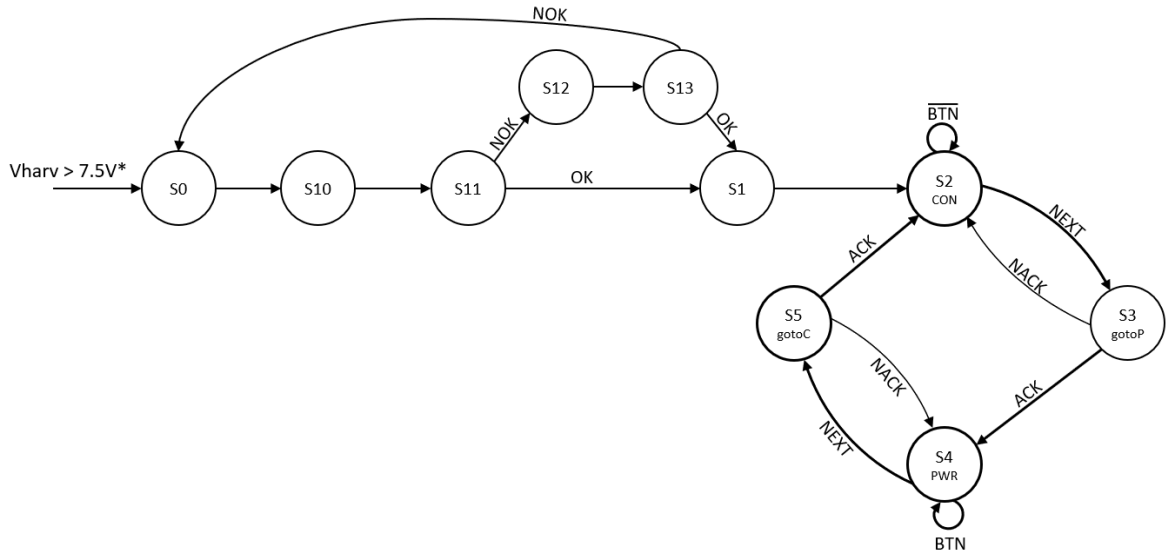


Şekil 36: Vektör Network Analizör ve SEFTech NFC Anten

İndüksiyon ocak NFC arayüz kartı, küçük ev aleti NFC arayüz kartı tarafından yönetilecek şekilde programlanmıştır. Küçük ev aletinden aldığı RF sinyallerini anlamlandırarak indüksiyon ocak invertörünü kontrol eder ve güç aktarımını yönetir. Bunun için; keşif, bağlantı ve güç aktarımı olarak 3 modda çalışacak şekilde programlanmıştır.

Keşif aşamasında ürünü algılar ve EH için gerekli gücü vermeye başlar. Bağlantı aşamasında EH sinyali devam eder ve üründen NFC RF sinyalleriyle anlamlı bir komut bekler. Güç komutu geldiğinde ise istenilen miktarda gücü küçük ev aletine aktarmak için indüksiyon ocak invertörünü yönetir. İnvertör gücü açıkken haberleşmenin gürültüden etkilenmemesi için zaman bölmeli iletim yapılmıştır. İnvertör sinyali yaklaşık 1-1.5 ms kesilerek haberleşme sinyali gönderilmiştir.

Modlar arasındaki yazılım durum diyagramı Şekil 37'de gösterilmiştir.



Şekil 37: Yazılım Durum Diyagramı

State 0: Uygulama başlamadan önce yeterli seviyede hasat gerlimine ulaşılmalıdır. Gerilim seviyesine ulaşmışsa NFC aktif edilir.

State 10: İstenilen güç seviyesi indüksiyon ocak NFC arayüz kartına gönderilir.

State 11: İndüksiyon ocak NFC arayüz kartından gelen cevap işlenir. Olumlu ise S1'e geçilir. Olumsuz ise S12'ye geçilir.

State 12: Aktarılabilecek güç seviyesi istenir.

State 13: NFC arayüz kartından gelen cevap işlenir. Olumlu ise S1'e geçilir. Olumsuz ise S0'a geçilir.

State 1: Ürün başlangıç indikatörleri burada aktif edilir.

State 2: Bağlantı moduna geçilir NFC gücü regüle edilir. Bir sonraki aşamaya geçmek için beklenir. Buton veya anahtarlar gibi ünitelerden güç aktarımı için aktifleştirme beklenir.

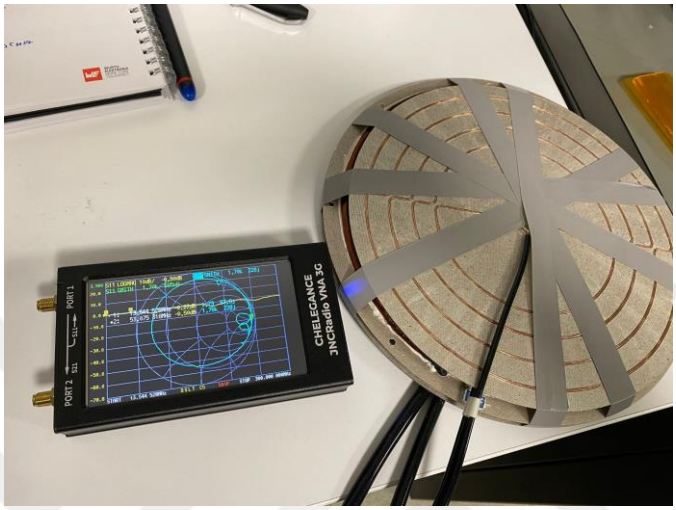
State 3: Güç aktarım moduna geçme isteği yapılır. NFC arayüz kartı invertörden güç aktarımına geçmek için bir ACK bekler.

State 4: İnverterden olumlu güç aktarımı mesajı almıştır. Güç aktarımı başlar. Güç kesilene kadar bu modda kalır.

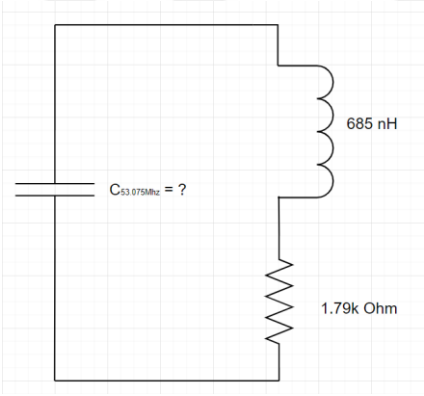
State 5: Bağlantı moduna geçiş yapılır. Gücü kesmek için invertere mesaj gönderir. Bağlantı modda aktifleştirme mesajı beklenir.

4. BULGULAR

NFC arayüz kartının antenin VNA ölçüm sonuçları Şekil 38'de gösterilmiştir. Ölçüm sonucunda, L anten = 685nH, R anten = 1,70k ohm, Rezonans frekansı = 53.075 MHz olarak ölçülmüştür. Eşdeğer devresi Şekil 39'daki gibi bulunmuştur.



Şekil 38: İndüksiyon Ocak NFC Anten Ölçümü



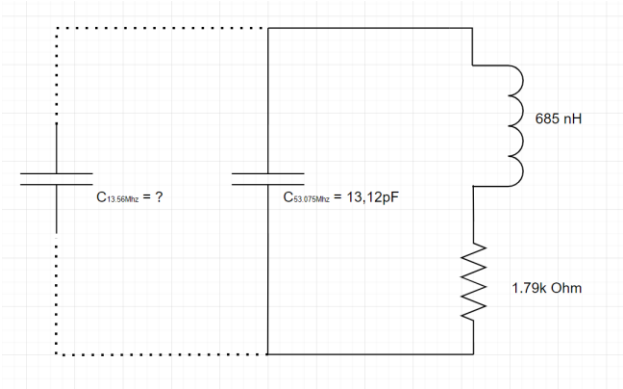
Şekil 39: Anten Eşdeğer Devresi

Eşdeğer devresi kullanılarak, anten iç kapasitesi hesaplanmıştır. 53,075 MHz için anten iç kapasitesi 13,12 pF bulunmuştur.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}c} => c = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} => c = 13{,}12\ pF$$

(4-1)

13.56 MHz de çalışabilmesi için antene paralel eklenecek kapasitenin değeri hesaplanmıştır ve 201,10 pF bulunmuştur.



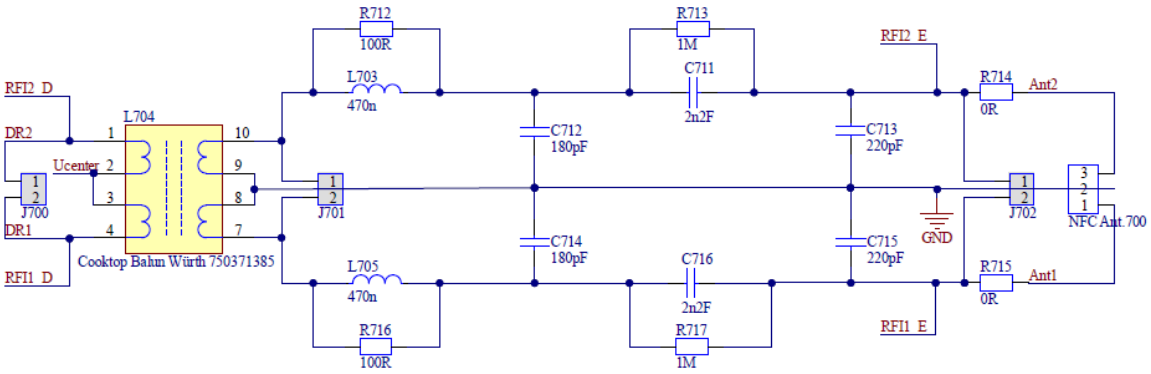
Şekil 40: 13.56 MHz'e uyumlaştırılmış anten eşdeğer devresi

$$f_{13,56} = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc}} => c = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} => c = 201{,}10\ pF$$

(4-2)

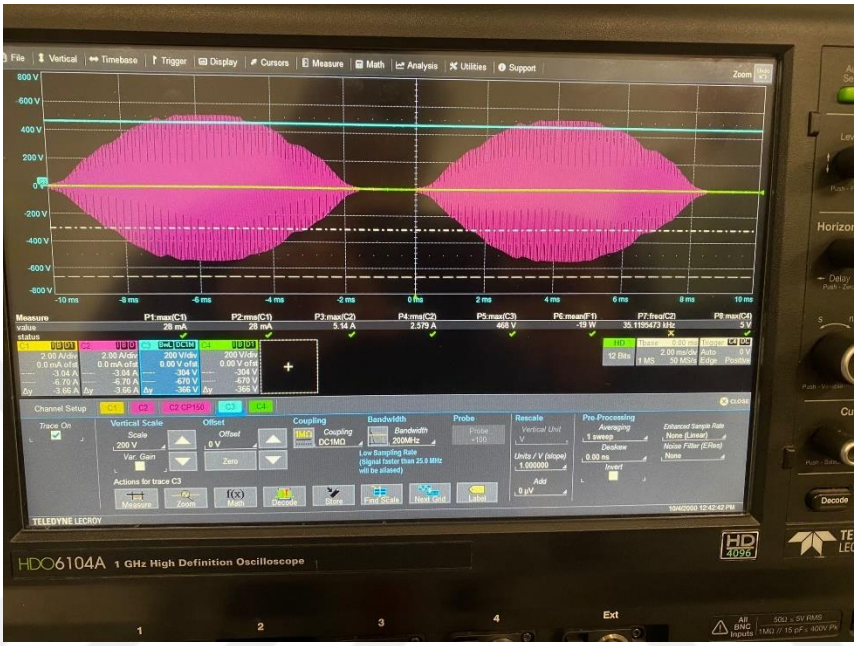
Toplam kapasite değeri 201,10 pF olarak hesaplanmıştır. 13,12 pF anten iç kapasitesi bulunmaktadır. Bu durumda 13.56MHz rezonans frekansı için 201,10 - 13,12 = 187,98 pF kapasite gerekmektedir.

Şekil 41'de RF eşleştirmes devresi gösterilmiştir. 187,98pF olması gereken kapasite değeri C713 ve C715 kapasiteleri ile elde edilmektedir. Bu değerler birbirine paralel 330pF ve 47 pF iki kapasite takılarak toplam 377 pF olacak şekilde devreye takılmıştır.



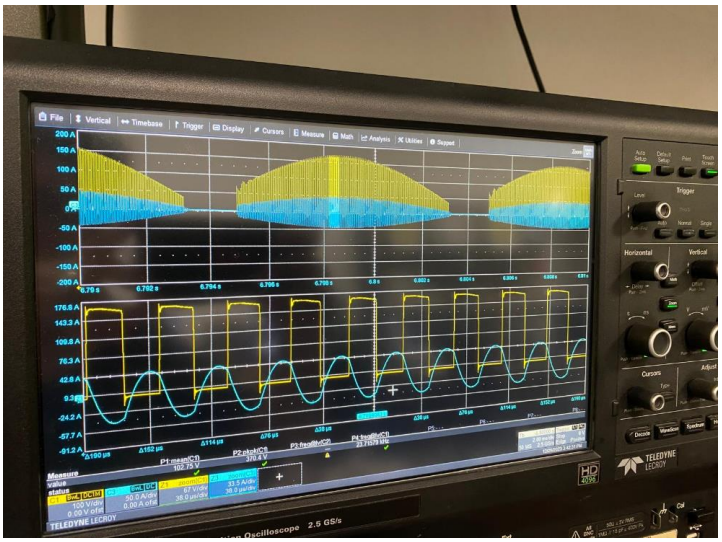
Şekil 41: RF Eşleştirme Devresi

Rezonans kapasitesi bobine seri eklendikten sonra NFC arayüzü ve anten ile kahve makinasına eklenmiştir ve osiloskoptan giriş gerilimi ölçülmüştür. Gerilim seviyesinin 600V civarında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca haberleşmenin gerçekleşmesi için sinyalin devamlı olmadığı ve 1.5 ms civarında kesildiği gözlemlenmiştir. Doğrultulan bara gerilimi 468V ölçülmüştür. Frekans 35.11 kHz civarında ölçülmüştür.



Şekil 42: Kahve Makinası Giriş Gerilimi Osiloskop Görüntüsü

Giriş gerilimi beklenende yüksek olduğu için indüksiyon ocak kontrol algoritması iyileştirilerek ürün tekrar çalıştırılmıştır. Bu durumda giriş gerilimi 320V civarında ölçülmüştür.



Şekil 43: İyileştirilmiş Algoritma ile Çalıştırılan Ürünün Osiloskop Görüntüsü

5. TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada indüksiyonlu ocakların teknolojisi, güç aktarım için uygun hale getirilerek küçük ev aletleri için kablosuz güç aktarım yapılmıştır. Mevcut literatür incelendiğinde endüktif bağlanma ile kablosuz güç aktarımının indüksiyon ocaklar için uygun olduğu gözlemlenmiştir [15].

Gelişen RF teknolojisinde RF-EH yöntemi WSN gibi sistemlerde batarya ihtiyacının giderilmesi için kullanılmaktadır [20]. Bu yöntem küçük ev aletinin kablosuz çalıştırılmasında, 500 mW'a kadar enerji ihtiyacının giderilmesinde kullanılmıştır. Böylelikle ürün ocak üstüne yerleştirildiğinde batarya ihtiyacı olmadan RF-EH teknolojisi ile enerjilendirilip kullanıma hazır hale gelmiştir. Haberleşmenin sürekliliğinin sağlanması içinde güç aktarım esnasında zaman çoğullamalı (time-multiplexing) kullanılması ile haberleşme ve güç aktarım sinyalleri fiziksel olarak birbirine bağlı zamanda birbirinden ayrılmıştır [43]. Böylelikle haberleşme sinyali varken güç sinyali kesilmiştir ve olası gürültüler engellenmiştir.

Bununla birlikte geliştirilen sistemin yabancı nesne algılamasında bazı zorlukları olabilir. Fakat kullanılan NFC okuyucu [39] NFC-A/B (ISO 14443A/B), NFC-V (ISO 15693) gibi standartları desteklediği için bu tip ürünlerin ayrıştırmasını yapabilir. Banka kartı vb. gibi cisimler güç aktarım esnasında yaklaştırıldığında güç aktarımı durdurulabilir. Yine ferromanyetik bir malzemenin varlığını, endüktans değişiminde algılayarak güç aktarımına olası sorunların önüne geçilebilir. İndüktif yük algılama yöntemi [44] ile ferromanyetik nesnelerin algılanması da mümkün hale gelebilir. Böylelikle sistem güvenli bir şekilde çalışabilecektir.

İlk aşamada frekans kontrolü düşük frekanslarda yapılmıştır. Fakat bu durumun gerilim de çok yüksek seviyelere çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum üründe tahribata yol açabileceği için frekans ve duty kontrolü birlikte yapılarak gerilim seviyesi düşürülmüştür. Önerilen yöntemde birden fazla kontrol yöntemi ile sistemi kontrol altında tutmak mümkündür. Frekans, duty ve phase cutting gibi kontrol yöntemleri kolaylıkla kontrol altına alınabilir. 100W altında çalıştırılan küçük ev aletleri için phase cutting yöntemi ile güç aktarımı yapılarak ortalama gücün istenilen seviyede kalması sağlanabilir.

İndüksiyon ocaklarının kablosuz küçük ev aletlerinde kullanılması, kablo karmaşıklığını ortadan kaldırarak maliyeti düşürebilir. Bu durum, özellikle küçük mutfaklarda alan kullanımını artırarak kullanıcıya fayda sağlar. Ayrıca, kettle gibi ısıtıcılara uygulandığında su sızması gibi tehlikeli durumlarda oluşabilecek elektriksel kazalar önlenebilir. Aynı zamanda yenilikçi ve kullanışlı bir teknoloji ile kullanıcının hayatını kolaylaştırabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, indüksiyon ocaklarının sadece yemek pişirmek için değil, aynı zamanda küçük ev aletlerinin kablosuz olarak çalıştırılması için de kullanılabileceğini göstermektedir. Bu, kullanıcıların kablolardan ve prizlerden bağımsız olarak ev aletlerini kullanma esnekliğini artırırken, aynı zamanda yaşam alanlarını daha temiz ve düzenli hale getirebilir. Geliştirilen sistem, daha güvenli, daha düzenli ve akıllı bir çözüm sunmakta olup, teknolojisi geliştirilebilir bir altyapıya sahiptir. Bu çalışma, gelecekte endüstride yeni kablosuz güç aktarımı uygulamalarının geliştirilmesine de ilham verebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında kablosuz enerji transferi konsepti indüksiyon ocak ve küçük ev aletinde kullanılacak şekilde uyarlanmıştır. Deneysel sonuçlar gösterilmiştir.

Kavramsal çerçevede elektromanyetiğin temel yasaları anlatılmıştır. Kablosuz güç aktarımında kullanılabilecek topolojilerden bahsedilmiştir. Bu çalışma kapsamında yarım köprü rezonans çevirici sistemi kullanılmıştır. Ayrıca NFC RF-EH hakkında bilgi verilmiş bu teknolojinin temel yapısı anlatılmıştır.

Yöntem kısmında sistemde kullanılan bobin, anten ve uyumlaştırma sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında küçük ev aletlerinin indüksiyonlu ocaklarda enerjilendirilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Önerilen yöntemde yarım köprü rezonans çevirici topolojisinde çalışan bir indüksiyon ocak güç aktarım ünitesi olarak seçilmiştir. NFC teknolojisi ile ocak ve küçük ev aleti arasındaki haberleşme ve güç yönetimi sağlanmıştır. Böylelikle kademeli çalışan küçük ev aletleri için istenilen miktarda güç aktarımı yapacak bir alt yapı sağlanmıştır.

Önerilen sistem daha güvenli, daha düzenli, akıllı ve yönetilebilir bir çözüm sunmaktadır. Sahip olduğu teknolojisi geliştirilebilir bir alt yapıya sahiptir. Kullanılan yöntemde, literatürde yer alan endüktif bağlanma ve NFC teknolojisi bir araya getirilerek bir çözüm sunulmuştur.

7. KAYNAKLAR

[1]. Sadiku, M.N.O., 2018, *Elements of Electromagnetics*. 7th ed. New York: Oxford University Press.

[2]. Shinohara, N., 2014, *Wireless Power Transfer via Radiowaves*, Chichester: John Wiley & Sons.

[3]. Lee, C.K., Zhong, W.X. and Hui, S.Y.R., 2012, Recent progress in mid-range wireless power transfer, in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, pp. 3819-3824.

[4]. Tesla, N., 1891, Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 8(1), pp. 266-319.

[5]. Carlson, W.B., 2013, *Tesla: Inventor of the Electrical Age*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

[6]. Wheeler, L.P., 1943, Tesla's contribution to high frequency, *Electrical Engineering*, 62(8), pp. 355–357.

[7]. Tesla, N., 1900, *Apparatus for transmission of electrical energy*. U.S. Patent 649,621. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[8]. Tesla, N., 1901, *Means for increasing the intensity of electrical oscillations*. U.S. Patent 685,012. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[9]. Tesla, N., 1905, *Art of transmitting electrical energy through natural mediums*. U.S. Patent 787,412. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[10]. Pudur, R., Hanumante, V., Shukla, S. and Kumar, K., 2014, Wireless power transmission: A survey, *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, pp. 1–6.

[11]. Pedder, D., Brown, A. and Skinner, J., 1999, A contactless electrical energy transmission system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(1), pp. 23–30.

[12]. Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D.I. and Han, Z., 2016, Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), pp. 1413–1452.

[13]. Ağcal, A., 2017, *Yeni bir kapalı çevrim algoritmalı yüksek verimli kablosuz enerji transferi sistemi tasarımı ve uygulanması*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[14]. Zhong, W.X. and Hui, S.Y.R., 2015, Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems,'*IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(7), pp. 4025–4034.

[15]. Itraj, M. and Ettes, W., 2018, Topology Study for an Inductive Power Transmitter for Cordless Kitchen Appliances, *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies Wireless Power Transfer (WoW)*, Montreal, QC, Canada, pp. 1-8.

[16]. Hamed, I., 2022, *Design and evaluation of ambient RF energy harvesting platform for sensor-based systems: An experimental study of RF energy harvesting.* Degree Project in Electrical and Electronic Engineering, Stockholm, Sweden.

[17]. Valtchev, S., Baikova, E.N. and Jorge, R.L., 2012, Electromagnetic field as the wireless transporter of energy, *Facta Universitatis: Series Electronics and Energetics*, 25(3), pp. 171–181.

[18]. Rozin, A. and Kaplun, G., 1998, *Capacitively coupled bi-directional data and power transmission system*. U.S. Patent 5,847,447.

[19]. Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J.D., Fisher, P. and Soljacic, M., 2007, Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science Express*, 317(5834), pp. 83–86.

[20]. Eidaks, J., et al., 2022, Multi-hop RF Wireless Power Transfer for Autonomous Wireless Sensor Network, *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, Oct. 2022.

[21]. Niotaki, K., et al., 2023, RF Energy Harvesting and wireless power transfer for Energy Autonomous Wireless Devices and RFIDs, *IEEE Journal of Microwaves*, 3(2), pp. 763–782.

[22]. Yu, T.C. and Yang, C.L., 2017, Design and analysis of dual-frequency power amplifier for wireless power and data transfer application, *2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Taipei, Taiwan, pp. 1-4.

[23]. Abdolkhani, A., 2016, Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems, *Wireless Power Transfer-Fundamentals and Technologies*. InTech.

[24]. Papastergiou, K.D. and Macpherson, D.E., 2005, Contact-less Transfer of Energy by means of a Rotating Transformer, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2005)*, Dubrovnik, Croatia, pp. 1735-1740.

[25]. Abdolkhani, A., Hu, A.P. and Nair, N.C.K., 2012, Modelling and parameters identification of through-hole type wind turbine contactless sliprings, *SCIRP/Engineering*, 4, pp. 272–283.

[26]. Triviño-Cabrera, A., González-González, J.M. and Aguado, J.A., 2019, Fundamentals of wireless Power Transfer, in *Power Systems*, pp. 1–18.

[27]. Van Schuylenbergh, K. and Puers, R., 2009, *Inductive Powering: Basic Theory and Application to Biomedical Systems*. Dordrecht: Springer.

[28]. Hong, H., Yang, D. and Won, S., 2017, The Analysis for Selecting Compensating Capacitances of Two-Coil Resonant Wireless Power Transfer System, *IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, Beijing, China, pp. 220-225.

[29]. Farnana, T., 2017, *Analysis and Comparison of Classical Compensation Topologies for Inductive Power Transfer for Electrical Vehicles*, Yüksek Lisans Tezi, Yakın Doğu Üniversitesi.

[30]. Lucía, Ó., Cvetkovic, I., Sarnago, H., Boroyevich, D., Mattavelli, P. and Lee, F.C., 2013. Design of Home Appliances for a DC-Based Nanogrid System: An Induction Range Study Case, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1(4), pp. 315-326.

[31]. Zhang, Z., Pang, H. (2023) 'The Era of Wireless Power Transfer,' in Wireless Power Transfer: Principles and Applications, IEEE, pp.1-17.

[32]. Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J.M. and Acero, J., 2002, A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers, *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Dallas, TX, USA, pp. 1168-1174 vol.2.

[33]. Burdio, J.M., 2012, R&D in Domestic Induction Heating, *CEI-UPM Annual Meeting*, Madrid, SPAIN.

[34]. Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D.I. and Han, Z., 2015, Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(2), pp. 757-789.

[35]. Mejjaouli, S. and Babiceanu, R.F., 2015, RFID-wireless sensor networks integration: Decision models and optimization of logistics systems operations, *Journal of Manufacturing Systems*, 35, pp. 234–245.

[36]. Yalçın, A.B., 2021, *Çok bantlı RF enerji hasadı, Yüksek Lisans Tezi*, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

[37]. Öztürk, E., 2021, *Enerji Hasadı ile Nesnelerin İnterneti Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

[38]. SEFTech, 2021, WPC Coils, https://www.sef.com.tw/products-view-wpc-induction-coil.html [Ziyaret Tarihi: 24 Haziran 2024]

[39]. STMicroelectronics, 2021, *Multi-purpose RF Transciever Reference Web Page*, https://www.st.com/en/nfc/st25r3918.html [Ziyaret Tarihi: 25 Haziran 2024]

[40]. STMicroelectronics, 2019, *X-Nucleo-NFC06A1 Reference Cad Resources Web Page*, https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-nfc06a1.html#cad-resources [Ziyaret Tarihi: 25 Haziran 2024]

[41]. STMicroelectronics, 2021, *ST25 Series RF Energy Harvesting Application Note*, https://www.st.com/resource/en/application_note/an4913-energy-harvesting-delivery-impact-on-st25dvi2c-series-behaviour-during-rf-communication-stmicroelectronics.pdf [Ziyaret Tarihi: 25 Haziran 2024]

[42]. Chelegance, 2021, *JNC Radio VNA 3 GHz Network Analyzer Referemces*, https://chelegance.com/products/jncradio_vna_3g/ [Ziyaret Tarihi : 27 Haziran 2024]

[43]. Mamiya, T., Mochiyama, S. and Hikihara, T., 2021, An Experimental Study on Time Division Multiplexing of Wired and Wireless Power Transfer by Power Packets, in *2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Kyoto, Japan, pp. 882-884.

[44]. Son, S. et al., 2021, Foreign Object Detection of Wireless Power Transfer System Using Sensor Coil, 2*021 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, San Diego, CA, USA, pp. 1-4.

EKLER

Uyarı: Tez çalışmasında kullanılan hesaplamalar, tablolar, şekiller, veriler, kaynak kodları, formlar vb. materyal metin içinde akışı bölecek kadar çoksa bu bölümde ayrı başlıklar halinde ekleyebilirsiniz (Örn: Kaynak Kodlar, Anket Formları, Onam Formu Örneği başlıkları gibi). Ekler kısmına eklenmeyecek ve materyali olmayan tez çalışmaları için **EKLER** bölümü kaldırılabilir. Ekler bölümüne ait yazım kuralları ile ilgili tez yazım kılavuzu incelenmelidir. Bu uyarıyı okuduktan sonra siliniz!

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Uğur Can İÇEN

ORİJİNALLİK RAPORU

%13	%11	%3	%10
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%5
2	Submitted to University of Salford Öğrenci Ödevi	%3
3	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
4	Submitted to Giresun Ãniversitesi Öğrenci Ödevi	<%1
5	gcris.pau.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	ijrar.com İnternet Kaynağı	<%1
7	www.publicite-responsable.ecologie.gouv.fr İnternet Kaynağı	<%1
8	acikerisim.istanbul.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
9	www.researchgate.net İnternet Kaynağı	<%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Öğrenci Adı SOYADI
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Öğrenci Adı SOYADI
(İmza)