T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİNİN KÜÇÜK EV ALETLERİNE UYGULANMASI

Canberk SEZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİNİN KÜÇÜK EV ALETLERİNE UYGULANMASI

Canberk SEZER tarafından hazırlanan tez çalışması 18.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ahmet Faruk BAKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Kübra ERENOĞLU, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kablosuz Güç Transferinin Küçük Ev Aletlerine Uygulanması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Canberk SEZER

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca olumlu eleştirilerde bulunan, bilgileri ve tecrübeleriyle bana yol gösteren kıymetli tez hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen Sn. Akif Hakkı POLAT, Sn. Sercan SİNİRLİOĞLU, Sn. Hasan ERAYDIN, Sn. Faruk TAŞ, Sn. Gamze ODABAŞ ve Arçelik ARGE Güç Elektroniği ailesine teşekkür ederim.

Tüm bu çalışmalarım boyunca yanımda olan, desteklerini esirgemeyen Sn.Ecem ERGÜN'e, babam Ercan SEZER, annem Emine SEZER ve kardeşim Ataberk SEZER'e sonsuz teşekkür ederim.

Canberk SEZER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 5

1.3 Hipotez 6

2 KÜÇÜK EV ALETLERİ 7

2.1 Özellikleri 7

2.2 Tez Kapsamında Kullanılan Küçük Ev Aletleri 8

3 KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ 10

3.1 Temel Elektromanyetik Kanunları 10

3.1.1 Faraday Kanunu 10

3.1.2 Amper Kanunu 10

3.2 Çalışma Prensibi 11

3.3 Kullanılan Devre Topolojileri 13

3.4 Yarım-Köprü Seri Rezonanslı Topoloji ile Kablosuz Güç Transferinin İncelenmesi 13

4 TASARIM KRİTERLERİ 19

4.1 Küçük Ev Aletleri Kriterleri 19

4.2 Kablosuz Güç Transferi Kriterleri 20

5 TASARIM 21

5.1 Bobin Tasarımı 21
5.1.1 145mm Tekil Bobin Analizi 22
5.1.2 Karşılıklı İki Adet 145mm'lik Bobinin Analizi 22
5.1.3 Bobin LCR Metre Ölçümleri 23
5.1.4 Bobinler Arası Hava Aralığının Etkisinin İncelenmesi 24
5.2 Kablosuz Güç Sistemi Tasarımı 27
5.2.1 Elektronik Devre Simülasyon Çalışmaları 27
5.2.2 Güç Kartı Elektronik Devre Şeması Tasarımı 29
5.3 Küçük Ev Aleti Tarafının Uyumlaştırma Tasarımı 34
5.3.1 Su Isıtıcısı Uyumlaştırma Tasarımı 36
5.3.2 Blender Uyumlaştırma Tasarımı 36

6 DENEY VE ÖLÇÜMLER **38**
6.1 Bobin Kuplajının Ölçülmesi 40
6.2 Şebekeden Çalışan Su Isıtıcısı 43
6.3 Şebekeden Çalışan Blender 45
6.4 Kablosuz Güç Transferi Sistemi 45
6.5 Kablosuz Güç Transferi Sistemi ile Su Isıtıcısı 48
6.5.1 Şebeke Girişinden Alınan Ölçümler 49
6.5.2 Birincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler 51
6.5.3 İkincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler 51
6.5.4 IGBT Üzerinden ve Birincil Bobin Kablosundan Alınan Ölçümler 51
6.6 Kablosuz Güç Transferi Sistemi ile Blender 57
6.6.1 Şebeke Girişinden Alınan Ölçümler 59
6.6.2 Birincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler 59
6.6.3 İkincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler 61
6.6.4 IGBT Üzerinden ve Birincil Bobin Kablosundan Alınan Ölçümler 61
6.7 Şebeke Giriş Akım Harmoniklerinin Ölçümü ve Analizi 61
6.8 Verim Ölçümü 65
6.9 Termal Ölçüm 68

7 SONUÇ VE ÖNERİLER **71**

KAYNAKÇA **73**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **76**

SİMGE LİSTESİ

I_{out}	Çıkış Akımı
V_{out}	Çıkış Gerilimi
V_{in}	Giriş Gerilimi
H	Manyetik Alan Şiddeti
N	Sarım Sayısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
AGK	Anahtarlamalı Güç Kaynağı
DA	Doğru Akım
GE	Güç Elektroniği
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör
KGT	Kablosuz Güç Transferi
PCB	Baskılı Devre Kartı
PFC	Power Factor Correction
PI	Proportional-Integral
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RMS	Efektif Değer
SiC	Silisyum Karbür
WPT	Wireless Power Transfer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Su ısıtıcısı için sistem blok diyagramı 9
Şekil 2.2 Blender için sistem blok diyagramı 9
Şekil 3.1 Amper kanunu benzetimi [30] 11
Şekil 3.2 Elektromanyetik yasalar arası ilişkiyi gösteren diyagram [31] 11
Şekil 3.3 Endüktif kablosuz güç transferi sistemi genel blok diyagramı 12
Şekil 3.4 Basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer devre [28] 13
Şekil 3.5 Yarım-Köprü seri rezonanslı devresi ve eşdeğer devresi 14
Şekil 5.1 Kablosuz güç aktarımı sistem modeli [28] 22
Şekil 5.2 Solid sargılı bobin modeli 23
Şekil 5.3 LCR metre ile bobin ölçüm yöntemleri şeması [28] 24
Şekil 5.4 4-8mm hava aralığı için özendüktansın değişimi 25
Şekil 5.5 4-8mm hava aralığı için mutual endüktansın değişimi 25
Şekil 5.6 4-8mm hava aralığı için kuplaj faktörü değişimi 25
Şekil 5.7 Değişen hava aralığına bağlı olarak manyetik akı yoğunluğunun dağılımı 26
Şekil 5.8 Sistemin PSIM programındaki modeli 28
Şekil 5.9 PSIM programı üzerinde kuplajlı endüktans modelleme 28
Şekil 5.10 PSIM programı üzerinde C blok fonksiyon örnek görseli 30
Şekil 5.11 ANSYS simplorer üzerinde oluşturulan devre modeli 31
Şekil 5.12 ANSYS simplorer üzerinde bobin modelinin dönüşümü 31
Şekil 5.13 ANSYS simplorer üzerinde oluşturulan tam devre modeli 32
Şekil 5.14 145mm/145mm - birincil/ikincil bobinler akım dalga şekli 32
Şekil 5.15 145mm/145mm durumunda birincil bobin çıkış gerilim-akım dalga şekli 33
Şekil 5.16 145mm/145mm - birincil/ikincil bobinler aktarılan ve alınan güçlerin grafiği 33
Şekil 5.17 Güç devresi şema gösterimi 35
Şekil 5.18 Şebeke sıfır geçişi algılama devresi ve DC bara gerilimi okuma devresi şema gösterimi 36
Şekil 5.19 FFSH2065B-F085 diyodunun özellikleri 37
Şekil 6.1 Kullanılan güç analizörü 38

Şekil 6.2 Kullanılan osiloskop 39
Şekil 6.3 Deney düzeneği blok diyagramı 39
Şekil 6.4 Kurulan deney düzeneği ölçümler için açık hali 40
Şekil 6.5 Kurulan deney düzeneği kapalı hali 41
Şekil 6.6 Testler için geliştirilen arayüz 41
Şekil 6.7 Değişen hava aralığı için endüktans değerlerinin karşılaştırılması . . 42
Şekil 6.8 Su ısıtıcısı ile birlikte birincil bobin endüktans ölçümü 42
Şekil 6.9 Blender ile birlikte birincil bobin endüktans ölçümü 43
Şekil 6.10 Su ısıtıcısının şebekeye direkt bağlanması için hazırlanan test düzeneği 44
Şekil 6.11 Su ısıtıcısının şebeke bağlantısındaki gerilim-akım-güç durumu . . . 44
Şekil 6.12 Blender şebekeye direkt bağlanması için hazırlanan test düzeneği . . 46
Şekil 6.13 Blender'ın şebeke bağlantısındaki gerilim-akım-güç durumu 47
Şekil 6.14 Birincil taraf için tasarlanan sistemin CAD çizimi 47
Şekil 6.15 Birincil tarafın prototip görseli 48
Şekil 6.16 Sistem tarama durumundayken şebekeden ölçülen gerilim-akım değerleri 48
Şekil 6.17 Su ısıtıcısı yükü ile kurulan test sistemi 49
Şekil 6.18 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği 50
Şekil 6.19 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği 50
Şekil 6.20 Su ısıtıcısı ile 30kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği 50
Şekil 6.21 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği 51
Şekil 6.22 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği . . . 52
Şekil 6.23 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği . . . 52
Şekil 6.24 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği . . . 53
Şekil 6.25 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği . . . 53
Şekil 6.26 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği 54
Şekil 6.27 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği 54
Şekil 6.28 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği 54
Şekil 6.29 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği 55
Şekil 6.30 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği 55
Şekil 6.31 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği 56
Şekil 6.32 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği 56
Şekil 6.33 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği 57
Şekil 6.34 Blender yükü ile kurulan test sistemi 58
Şekil 6.35 İkincil taraf için kurulan köprü diyot devresi 58
Şekil 6.36 Blender ile 75kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği 59
Şekil 6.37 Blender ile 75kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği 60
Şekil 6.38 Blender ile 75kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği 61
Şekil 6.39 Blender ile 75kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği . 62

Şekil 6.40 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma şebeke giriş akım harmoniği ölçüm grafiği 62
Şekil 6.41 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma güç faktörü ölçüm grafiği 63
Şekil 6.42 Blender 75kHz çalışma şebeke giriş akım harmoniği ölçüm grafiği . 64
Şekil 6.43 Blender 75kHz çalışma güç faktörü ölçüm grafiği 65
Şekil 6.44 Verim ölçümü için su ısıtıcısının iki farklı test düzeneği 65
Şekil 6.45 İkincil bobin dışarıdayken sistem verim değerleri grafiği 66
Şekil 6.46 İkincil bobin içerideyken sistem verim değerleri grafiği 67
Şekil 6.47 Üst IGBT termal ölçüm görüntüsü 69
Şekil 6.48 Alt IGBT termal ölçüm görüntüsü 69
Şekil 6.49 Köprü diyot termal ölçüm görüntüsü 70

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Kablosuz güç transferi için topolojilerin karşılaştırılması [33] 14
Tablo 5.1 Değişen hava aralığı için endüktans değerlerinin karşılaştırılması . . 27
Tablo 5.2 Yarım köprü seri rezonans eviricide tasarım parametreleri 34
Tablo 6.1 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma harmonik ölçüm tablosu 63
Tablo 6.2 Blender 75kHz çalışma harmonik ölçüm tablosu 64
Tablo 6.3 İkincil bobin dışarıdayken sistem çalışma değerleri 66
Tablo 6.4 İkincil bobin içerideyken sistem çalışma değerleri 67
Tablo 6.5 İkincil bobin dışarıdayken bobinler arası güç aktarım değerleri . . . 68
Tablo 6.6 İkincil bobin içerideyken bobinler arası güç aktarım değerleri 68

ÖZET

Kablosuz Güç Transferinin Küçük Ev Aletlerine Uygulanması

Canberk SEZER

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nihan ALTINTAŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte günlük hayatımızda farklılıklar yaşamaktayız. Bu değişimlerin temeli insan yaşantısını kolaylaştırmak ve daha güvenli hale getirmektir. Bu çalışmaların elektrik ile kesiştiği noktada kablosuz güç transferi konusu da bulunmaktadır. Otomotiv sektörü, sağlık sektörü gibi alanlarla birlikte kullanıcı elektroniği olan cep telefonlarında da bu teknoloji yer edinmektedir. Bu değişim ile birlikte kullanıcı kullanım kolaylığı bakışaçısı daha ilerilere taşınmaktadır. Tüm bunlarla birlikte kablosuz güç transferi sisteminin getirdiği diğer bir olumlu etki, sistemin daha güvenilir çalışmasıdır. Herhangi bir elektriksel kontak bulunmayan bu sistemler sayesinde nem, sıvı teması gibi kulllanıcıyı tedirgin edebilecek etkenlere karşı dayanım arttırılmaktadır. Bu gelişmeler ile birlikte bahsedilen kablosuz güç transferi sisteminin günlük hayatta oldukça sık karşılaştığımız küçük ev aletleri ile buluşturulması anlatılan bu gelişmeleri destekleyecek yönde bir girişimdir.

Yapılan bu tez çalışmasında küçük ev aletlerinin genel yapısı incelenip test edildikten sonra kablosuz güç transferine uygun hale getirilebilmeleri için uyumlaştırma çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca küçük ev aletleri ile uyumlu çalışabilecek güç aktarım kartı tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kablosuz güç transferi sisteminin sistem modellemesi yapılarak kapalı çevrim simüle edilmiştir. Bobin manyetik analizi, elektriksel devre simülasyonları birleştirilerek ortak çalışma gerçekleştirilmiştir. Tasarım gerçeklenerek laboratuvar ortamında testleri yapılmış ve sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Sonuç olarak halihazırda kullanmaya devam edilen küçük ev aletleri için yapılabilecek

uyumlaştırma devreleri ile önerilen sistemle uyumlu bir çalışma sağlanabilmektedir. Ayrıca önerilen bu sistemin geleceğe yönelik indüksiyonlu ocaklarla kullanımı mümkündür. Hatta bu ocakların mutfak tezgahı altına yerleştirilmesiyle tezgah üstü kullanım gibi daha yenilikçi ve kullanım kolaylığı sunan tasarımlara temel oluşturabilir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz güç transferi, küçük ev aletleri, indüklenme, simülasyon, modelleme, manyetik, kontaksız, indüktif güç aktarımı

ABSTRACT

Application of Wireless Power Transfer to Small Home Appliances

Canberk SEZER

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Nihan ALTINTAŞ

Today, people experience differences in their daily lives with the developing technology. The basis of these changes is to make human life easier and safer. At the intersection of these studies with electricity, there is also the issue of wireless power transfer. In addition to areas such as the automotive sector and the health sector, this technology also takes place in mobile phones with user electronics. With this change, the user-friendliness perspective is moved further. Along with all this, another positive effect brought by the wireless power transfer system is the more reliable operation of the system. Thanks to these systems, which do not have any electrical contacts, resistance to factors such as moisture and liquid contact that may disturb the user is increased. Along with these developments, combining the mentioned wireless power transfer system with small household appliances that people frequently encounter in daily life is an attempt to support these developments.

In this thesis study, after examining and testing the general structure of small household appliances, harmonization studies were carried out to make them suitable for wireless power transfer. In addition, a power transfer board has been designed to work in harmony with small household appliances. The system modeling of the designed wireless power transfer system was made and closed loop was simulated. Coil magnetic analysis and electrical circuit simulations were combined and a collaborative study was carried out. The design was realized and tested in the laboratory environment and the results were presented in comparison with the simulation results.

As a result, with the harmonization circuits that can be made for small household appliances that are currently in use, a compatible operation with the proposed system can be achieved. It is also possible to use this proposed system with future-oriented induction cookers. In fact, by placing these hobs under the kitchen counter, it can form the basis for more innovative and easy-to-use designs such as countertop use.

Keywords: Wireless power transfer, small home appliances, induction, simulation, modelling, magnetic, contactless, inductive power transfer

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kablosuz enerji transferinin temeli 'Elektromanyetik İndüklenme' teknolojisine dayanır. Bu teknoloji 1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir. İki adet bobin demir bir nüve üzerine sarıldığında bobinlerden birisine alternatif akım uygulanırsa diğer bobin üzerinde gerilim oluşur. Bu oluşan gerilimi fark eden Faraday, elektromanyetiğin temellerini oluşturmuştur. [1]

1900 yılında Nikola Tesla tarafından 'Kablosuz Güç Transferi' fikri ortaya atılmıştır. Elektromanyetik radyasyon ile elektriğin tüm dünya'ya iletilmesini amaçlayarak çalışmalar yapan N.Tesla maddi destek alamaması nedeniyle çalışmalarını yarıda kesmiştir. [2–4]

Elektromanyetik radyasyon konusundaki çalışmaların insan sağlığı açısından etkileri ve yüksek güçlerde uzun mesafeler olmasına rağmen verim kaybı yaşanması nedeniyle yerini büyük ölçüde Endüktif Kuplaj Yöntemi ile Güç aktarımı almıştır. [5–7]

Günümüzde kablosuz güç transferi teknolojisi, düşük güçlü şarjlı diş fırçalarından yüksek güçlü elektrikli araçlara kadar, ev elektroniği, biyomedikal cihazlar, taşınabilir akıllı cihazlar gibi çeşitli uygulamalarda bataryayı şarj etme amacıyla kullanılmaktadır [8]. Kablosuz güç aktarma sistemlerinin kullanıcıya yansıyan en temel faydası ürünlerdeki kablo karmaşası ve bağımlılığını ortadan kaldırmasıdır. Elektriksel kontağı ortadan kaldırdığı için güvenilirdir, su ve toz riski bulunan ortamlar için iyi bir çözümdür [9–11]. Buna karşın kablo ile güç aktarımına kıyasla daha maliyetlidir, ısınma ve verim kaybı söz konusudur. Kablosuz güç transferi verici bobin sargılarından geçen akımın oluşturduğu manyetik alana maruz kalan alıcı bobinin sargılarında gerilim endüklenmesi ve akım akması ile gerçekleşir [12–14]. Kablosuz Güç Transferi için kullanılmakta olan üç teknik bulunmaktadır: radyo frekansı(RF), manyetik rezonans ve endüktif kuplaj teknolojileri [15]. Endüktif kuplaj teknolojisi, kablosuz güç transferi teknikleri arasında insan sağlığı için en güvenilir olanıdır. Etkin

güç aktarımı için alıcı ve verici bobinlerin sıkı bir şekilde hizalanması gereklidir.Bir dalganın manyetik alanı, elektrik alana göre daha hızlı zayıfladığından dolayı RF teknolojisine göre aktarım mesafesi oldukça kısıtlıdır [16]. Aktarım mesafesi düşük olmasına karşın aktarılabilen güç seviyesi 10kW mertebesine kadar ulaşabilir.

Kablosuz güç transferi geniş ve çok açılı bir konu olması nedeniyle farklı çalışmalar içermektedir. Manyetik devre, elektronik devre topolojisi, kontrol yöntemi, yük algılama gibi çeşitli alanlarda çalışmalar yapılmıştır. Örnek olarak aşağıdaki çalışmalar gösterilebilir.

Moon vd. yaptıkları çalışmada geleneksel iki bobinli kablosuz güç transferi sistemleri ile önerdikleri üç bobinli kablosuz güç transferi sistemini incelemişlerdir. Çalışmada geleneksel iki bobinli sisteme kuplaj katsayısını arttırmak için yardımcı üçüncü bir bobin eklenmiştir. Eklenen bu bobin sayesinde kuplaj faktörü artmış ve böylelikle verim arttırılmıştır.

Eklenen yardımcı bobinin birincil bobine yakın konumlandırılması önerilmiştir. Ayrıca çalışmada Si ve SiC mosfet kullanılarak yarı iletkenler de karşılaştırılmıştır. Çalışmada seçilen anahtarlama frekansı olan 100kHz için geleneksel Si mosfetlerin daha verimli olduğu görülmüştür. SiC mosfetlerin 200kHz ve üzerinde daha verimli olabileceği belirtilmiştir. [17]

Zhong vd. yaptıkları çalışmada topoloji tipinden bağımsız olarak doluluk oranının kontrolüyle alıcı devrenin giriş empedansının ve dolayısıyla güç aktarımının kontrol edilmesinden bahsedilmiştir.

Ayrıca maksimum enerji verimliliğini sağlamak için, belirlenen bir çıkış gücünde minimum giriş gücünün hedeflenip bunu sağlamak için uygun kontrol algoritmalarından bahsedilmiştir. [18]

Wang vd. yaptıkları çalışmada istenen güç aktarımının sağlanabilmesi ve ekipman boyutlarının yönetilebilir olması için anahtarlama frekansının yükseltilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca kablosuz güç aktarımı kapasitesinin arttırılması için kullanılan devrelerin birincil veya ikincil taraflarında rezonans devrelerin kullanıldığından bahsedilmiştir.

Ayrıca uygulanan değişken frekans kontrolünün gerekli evirici güç kapasitesini düşürdüğü fakat daha kompleks bir tasarıma yol açtığı gözlemlenmiştir. [19]

S. Li ve C.C. Mi yaptıkları bu çalışmada elektrikli araçlar şarjı için kablosuz güç transferi sistemlerinin temelleri incelenmiştir. Yapılan incelemede birincil ve ikincil bobinler arasındaki kuplaj katsayısı ve kalite faktörünün yüksek olması vurgulanmıştır.

Ayrıca yapılan çalışmada kablosuz güç transferi sisteminin kompanzasyon katına ihtiyacı olduğu sonucuna varılmış ve buna yönelik önerilerde bulunulmuştur. Sistemin verimli bir şekilde çalışması için kablosuz güç transferi sistemlerinde kullanılabilecek yumuşak anahtarlama tekniklerine de örnekler verilmiştir. [20]

Hao vd. yaptıkları çalışmada endüktif güç aktarımı teknolojisi ile çalışan güç kaynaklarının yüksek güçlerde çalıştırılabilmesi için yeni bir topoloji önerilmiştir. Yeni önerilen topoloji temelini LCL-T topolojisinin çıkışlarının paralel olarak bağlanmasından almıştır. Bu şekildeki paralel bağlama sayesinde paralel kollardan herhangi birindeki arıza durumunda sistem daha küçük güçte de olsa diğer kol veya kollar sayesinde çalışmaya devam edecektir.

Çalışma kapsamında önerilen topolojiyi doğrulamak için 3 adet 2kW'lık güç dönüştürücüsü paralel bağlanarak çalıştırılmıştır. Sistemin anahtarlama frekansı 20kHz seçilmiştir. Ayrıca sistem hata modlarında incelenerek herhangi bir koldaki hata durumunda da sistemin diğer kollarının çalışması incelenmiştir. [21]

Uzay düzleminde tek boyutta kablosuz güç transferi yapılmasının yanında üç boyutlu sistemler de tasarlanmaktadır. x,y,z eksenlerinden herhangi bir noktaya veya eksenler arası yerleştirilen noktalara güç transferi yapılabilmesi için omnidirectional bobin ve devre tasarımları bulunmaktadır. Zhang vd. yaptıkları çalışmada omnidirectional sistem kontrolü için basit bir kontrol metodu öne sürmektedirler. Gerilim mod kontrolünü ve akım mod kontrolünü teorik olarak hesaplamalar ile karşılaştırıp bu sistem için uygun olan metodun akım mod kontrolü olduğunu göstermişlerdir.

Ayrıca önerilen bu akım mod kontrolün birbirine dik üç ayrı eksene konumlandırılan bobinlerin oluşturduğu küresel yapıda her alanı kapsayıcı bir yöntem olduğunu öne sürmektedirler. Bahsedilen bu çalışma yönteminde üç ayrı bobinin akım mutlak değerleri kontrol edilerek vektörel toplamları olan bileşke akımın yük ile etkileşime girmesi anlatılmıştır.

Önerilen basit kontrol yöntemi üç farklı adımdan oluşmaktadır. İlk olarak gerilim mod kontrollü çalışarak küresel yapının her noktası için bir yük tarama adımı gerçekleştirilmektedir. Sonrasında belirlenen yük konumuna göre akım mod kontrollü çalışma başlamaktadır. Ardından bu çalışma esnasında parçalı olarak durum kontrolü gerçekleştirilmektedir. Yük konumundaki ufak çaplı değişiklikler ihmal edilerek çalışmaya devam edilmektedir. Yük konumunda büyük ölçekli bir değişim olursa bahsedilen birinci adıma geri dönerek yük taraması ve yeni konum belirlenmesi yapılmaktadır. Ayrıca bu çalışmada önerilen sistemin MATLAB üzerinde bir simülasyonu ile birlikte gerçeklenmesi ve gerçeklenen sistemin verilerinin yine MATLAB üzerinde işlenmesini göstermişlerdir. [22]

Zhi-Hui Wang vd. yaptıkları çalışmada yük algılama modeli üzerinde durmuşlardır. Kablosuz güç transferinin genel yapısından bahsedildikten sonra konvansiyonel olarak yükün algılanma yöntemi anlatılmıştır. Bu çalışmada tam-köprü seri-seri kompanzasyona sahip gerilim kontrollü endüktif kuplaj teknolojisine sahip devre kullanılmıştır. İlk olarak kablosuz güç transferi sistemi matematiksel yollar ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunu, seçilen sistem için belirlenmiş parametreleri kullanarak basitleştirilmiş sonucu çıkarmışlardır. Çıkan bu basitleştirilmiş yük algılama formülü iki farklı sonuca varabilmektedir. Yükün olmadığı veya yükün tam merkezlenmediği durumları ortaya çıkarmaktadır. Analizler sonrasında sistemin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kontrol tasarımında birincil taraf rezonans akım tepe değeri kullanılmıştır. Bu akımın tepe değeri ve sıfır geçişleri algılandıktan sonra sıfır geçişine bağlı olarak oeriyodu ve frekansı belirlenmiştir. Eldeki bu üç veri filtrelenerek yük algılama fonksiyonuna aktarılmaktadır. Yük alıgılama fonksiyonu genel akışı, 200μs enerji vermek, serbest salınıma izin verip izlemek, frekansa karar vermek ve tepe akımından örnekler almak, eşleşen akım tepesini bulmak, R_x değerini hesaplamak ve sonrasında bu değeri tasarım kriterleri ile karşılaştırarak yüke karar vermektir. Son olarak önerilen yapının simülasyon ve test sonuçlarının birbiri ile örtüştüğünü göstermişlerdir. [23]

Lihao Wu vd. yaptıkları çalışmada küçük ev aletlerinin kablosuz güç transferi teknolojisi ile çalışması için yeni bir kontrol yöntemi öne sürmüşlerdir. Bu kontrol yöntemi self-osilasyon(serbest salınım) ve PWM' in(Darbe genişlik modülasyonu) bir arada kullanılmasını içermektedir. Yüksek kuplaj bölgesinde sabit güç aktarılacağı kesinliği olduğu durumlarda self-osilasyon yöntemini, zayıf kuplaja sahip durumlarda PWM çalışmanın frekansı ve doluluk oranını değiştiren yöntemi öne sürmüşlerdir. Bu ortak çalışma durumu sayesinde 500W'lık bir prototip için verimin %91.6' lara ulaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu yöntem sayesinde merkeze olan saçınıklık durumunu tolere etme miktarını %172 oranında arttırdıklarını savunmaktadırlar. Yapılan çalışmada ilk olarak RLC devresi analiz edilmiş ve ardından self-osilasyon durumu için analizler düzenlenmiştir. Ardından PWM çalışma için gerekli analizler yapılmıştır.

Önerilen kontrol sistemi şu şekildedir. Başlangıç olarak kontrol sinyalini yüksek seviyede ayarla. Birincil tarafın akımını ölç. Rr değerini tahmin et. Rr değeri Rc değerinden büyük mü diye sorgula. Eğer ki büyükse, kontrol sinyalini düşük seviyede bırakarak çalışmaya devam et böylece self-osilasyon bölgesinde çalış. Büyük değilse, kontrol sinyalini yüksek seviyede ayarla. Böylece PWM mod çalışmayı sürdür. Tüm bu kontrol adımlarını başa dönerek tekrar et.

Yapılan çalışmada ortaya konulan kontrol yönteminin gerçeklenmesi yapılmış ve

simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistemin ani değişimlere tepkisi gibi farklı durumları da test edilmiştir. Son olarak bu öneri ile standart metod arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. [24]

Endüktif kuplaj teknolojisinin tüketici elektroniği uygulamalarına baktığımızda kablosuz küçük ev aletleri ve kablosuz kişisel bakım ürünleri ön plana çıkmaktadır. [25] Küçük ev aletlerinin kablosuz çözümleri düşünüldüğünde batarya içeren tasarımlar ağırlık, güvenlik ve ömür açısından dezavantajlıdır. Bataryasız tasarımlara bakıldığında belirli küçük ev aletleri için kablo karmaşasının azaltıldığı çözümler önerilmektedir. Bu çözümlerin avantajları kullanıcıların ürünleri mobil bir şekilde kullanabilmeleridir. Küçük ev aletleri kendi içerisinde farklı güç seviyelerine sahiptir. Yüksek güçlü ürünlerin bataryalı tasarımları boyut ve ağırlık açısından efektif değildirler. Bu nedenle tüm ürünleri kapsayacak yapı, genel bir verici ve bu verici ile uyumlu çalışabilen alıcılar içeren kablosuz güç transferi sistemidir. [26]

Endüktif kuplaj teknolojisi ile birlikte farklı devre topolojileri kullanılabilmektedir. Kullanılan topolojilerin sisteme uyumluluğuna karar veren en büyük parametre, sürekli kuplaj ihtiyacını karşılayabilmeleridir. Bunun dışında manyetik devreye bağlı olarak çalışma frekansı ve güç yoğunluğu diğer etkenlerdir. [27, 28]

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde kıllanılan küçük ev aletlerinin kablolu yapıları nedeniyle mutfaklarda oluşan kablo karmaşası yanında güvenlik ve kullanım zorluğu yaratması sorunları doğmaktadır. Ayrıca Türkiye olarak çok etkin bir pazar payına sahip olmamanın yanında indüksiyonlu ocak teknolojisinin globalde oldukça yaygın kullanılması ile bu küçük ev aletlerinin uyumlaştırılması geleceğin teknolojilerinde yer edeceği öngörülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında öne sürülen kablosuz güç transferi sistemi teknolojisinin indüksiyonlu ocaklara adaptasyonu için bir altyapı oluşturulması hedeflenmiştir.

Kablosuz güç transferinin otomotiv sektöründe yaygın kullanılmaya başlanmasının yanında düşük güçlü telefon şarjı gibi uygulamalar da literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmada iki alan arasında bulunan güç değerleri hedef alınarak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Böylece diğer alanlardan gelen bilgi birikimi ve indüksiyonlu ocak alt yapısından gelen manyetik tasarım tecrübesi bir araya getirilerek küçük ev aletleri ile uyumlu çalışabilen sistem tasarlanmıştır.

Küçük ev aletlerinde genel olarak iki farklı elektriksel yük çeşidi bulunmaktadır. Bu

yük çeşitleri dinamik ve statik olarak ayrıştırılabilir.

Şekil 2.1' da statik yük için tasarlanan sistemin genel blok diyagramı gösterilmiştir.

Şekil 2.2' da dinamik yük için tasarlanan sistemin genel blok diyagramı gösterilmiştir.

Bu yük çeşitleri için tasarlanan kablosuz güç transferi sistemi farklı çalışma koşulları açısından incelenmiş, deneysel olarak gerçeklenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Günümüzde kullanılan küçük ev aletlerinin genel yapısında yapılacak olan az sayıdaki değişiklik sonucunda ortaya çıkan cihazlar ile uyumlu bir şekilde çalışarak kablosuz güç transferi yapılacak sistem tasarlanabilir. Tasarlanan sistem, küçük ev aletleri için kullanım kolaylığı ve kullanım güvenliği sunar.

2
KÜÇÜK EV ALETLERİ

Küçük ev aletleri, portatif veya yarı portatif cihazlar olup tezgah üstü veya masaüstü kullanım şekillerine sahiptirler. tost makinesi, su ısıtıcısı, blender, doğrayıcı, ekmek kızartma makinesi, kahve makinesi bu kategori içerisinde yer alırlar.

Gruplandırmak istenirse, ısıtma özelliğine sahip motor içermeyen cihazlar ve parçalama, doğrama, sıkma gibi özelliklere sahip haraket kabiliyeti olan elektrik motorlu cihazlar. İki farklı grup olarak inceleyebileceğimiz bu cihazların karma türleri de bulunmaktadır. Örenğin, çok amaçlı pişiriciler. Bu cihazlar ısıtma ve parçalama, karıştırma gibi fonksiyonları bir arada bulundururlar. [29]

2.1 Özellikleri

Küçük ev aletleri karmaşık özelliklere sahip olmayan cihazlardır. Bu sayede teknolojileri rahatlıkla çözümlenebilir.

Su ısıtıcısı, tost makinesi, ekmek kızartma makinesi gibi ısıtma özelliğine sahip olan cihazlar içlerinde rezistans barındırırlar. Bu rezistans sayesinde oluşacak ısının transfer miktarını kontrol altında tutabilmek için bir kontrol mekanizmasına sahiptirler. Günümüzde dijital kontrolün gelişmesiyle farklı kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Örneğin NTC (Sıcaklıkla Direnci Azalan Termistör) içeren bir devre tasarımı ile sıcaklıkla değişen direnç değerinin mikroişlemci tarafından okunarak rezistansın devreye girip çıkmasına karar verilir. Bu sayede istenilen sıcaklık seviyesinde sabit tutulmaya çalışılır. Tüm bunlarla birlikte istenilen durumun temel mantığını içeren ve günümüzde de hala kullanılmaya devam edilen dijital kontrol olmayan yöntemler de bulunmaktadır. Yine bir NTC'nin direnci röle sürme katı için anahtarlama sinyalini tetikleyecek şekilde analog bir yapı kurularak gerçekleştirilir. Bu yöntemler sayesinde fiyat odaklı tasarımlar yapılabilmektedir.

Blender, doğrayıcı, meyve suyu sıkma makinesi gibi cihazlar hareket kabiliyetine sahip elektrik motoru içerirler. Rezistans içeren ürünlere benzer olarak buradaki tasarımlar

da teknolojik gelişmeler ile birlikte güncellenmektedir. Ancak yine diğer gruptaki ürünler gibi bu gruptaki ürünlerin de fiyat odaklı yaklaşımdan dolayı basit tasarımları yapılmaya devam etmektedir. Basit tasarımlı ürünlerde genelikle universal motorlar kullanılarak AC veya DC fark etmeksiniz direkt olarak kademeli sürme düğmesi ile manuel kontrol edilmektedirler. Gelişmiş ürünler için bu durum biraz daha farklıdır. Kullanıcının seçmiş olduğu kademe ayarı sadece bir komut olarak algılanarak kontrol devresinde değerlendirilir. Sürme devresi kontrol devresi tarafından yönetilir. Ayrıca bu tasarımlarda fırçasız doğru akım motorları oldukça sık tercih edilmektedir. Gelişmiş bu tasarımların diğer olumlu yanlarından birisi, sürme devresi tarafından algılanan motor durumu sıkışma veya zorlanma gibi anlar için farklı kontrol edilebilmektedir.

Tüm bu cihazların tasarımları esnasında ev kullanımı, taşınabilirlik, basitlik ve güvenlik konuları dikkate alınmaktadır. Tasarımda dikkate alınan konular tasarım sonrası kullanım şartlarını etkilemektedir. 0°C - (+45)°C çalışma ortam sıcaklığı olması, (-25)°C - (+60)°C depolama ortam sıcaklığı olması, motorlu cihazlarda bir çalışma periyodunun 2dk'dan fazla olmaması gerektiği, su ısıtıcısı gibi cihazların susuz çalıştırılamaması gibi kullanım gereklilikleri bulunmaktadırlar.

2.2 Tez Kapsamında Kullanılan Küçük Ev Aletleri

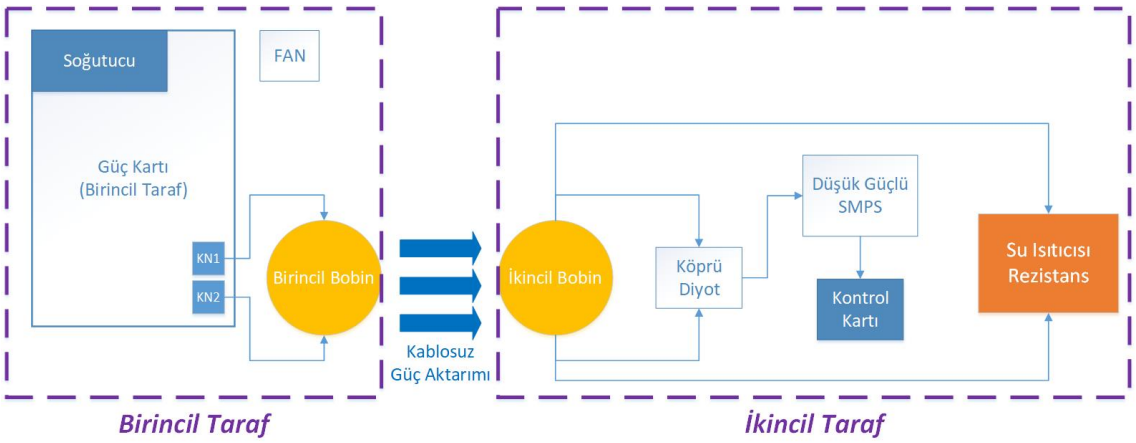
Yapılan bu tez çalışması esnasında iki farklı küçük ev aleti seçilmiştir. Bu aletler su ısıtıcısı ve blender'dır. Bu sayede iki farklı ana kategoriden ürünler incelenmiştir.

Ayrıca bu ürünler seçilirken dikkat edilen diğer bir özellik güç değerleridir. En yüksek güç talebinde bulunan su ısıtıcıları içerisinden seçilen örnek ürün 2200W giriş gücüne sahiptir. Diğer bir ürün olan blender etiket güç değeri olarak 400W gözükmesine karşın olağan kullanım senaryolarında maksimum 230W, genel olarak 100W mertebelerinde güç çekmektedir. Bu sayede tasarlanan sistemin geniş bir aralığı kapsaması sağlanmıştır.

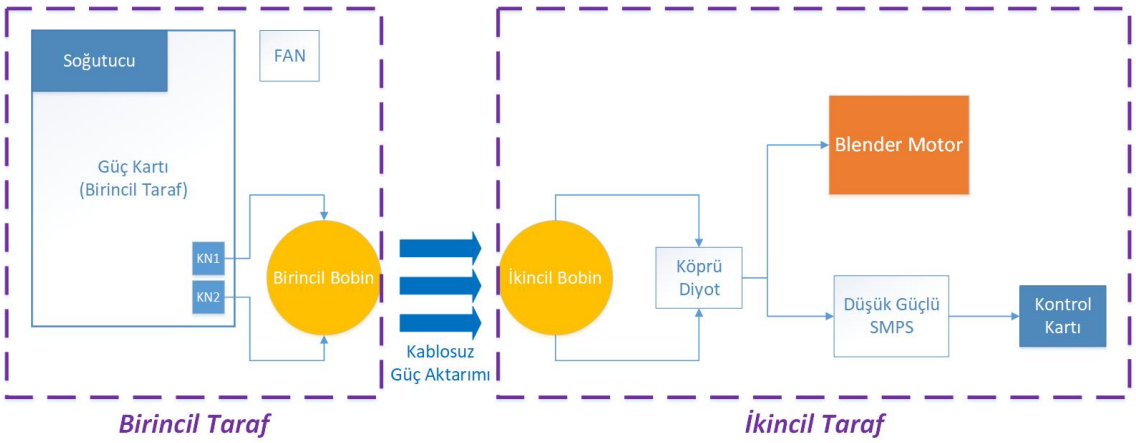
Ayrıca seçilen bu iki farklı özellikteki ürün sayesinde rezistans gibi stabil güç talebinde bulunan bir cihaz ve elektrik motoru gibi yüke bağımlı değişken güç çeken bir cihaz incelenmiştir. Rezistansın yüksek güçlere çıkabilmesi ile sistem sınırları incelenmiştir. Motorun ani akımlar çekmesi sayesinde kontrol sisteminin cevabı incelenmiştir.

Şekil 2.1' de su ısıtıcısının uyumlaştırılması sonrası kurulacak sistemin genel blok diyagramı gösterilmiştir.

Şekil 2.2' de blender devresinin uyumlaştırılması sonrası kurulacak sistemin genel blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Su ısıtıcısı için sistem blok diyagramı



Şekil 2.2 Blender için sistem blok diyagramı

3
KABLOSUZ GÜÇ TRANSFERİ

Kablosuz Güç Transferi, verici bir devreden alıcı bir devreye arada herhangi bir fiziksel bağlantı olmadan manyetik alan sayesinde güç aktarımıdır. Bu manyetik alanın oluşumu, manyetik alan ile gücün aktarılması ve elektriksel güce geri dönüşümü elektromanyetik yasaları doğrultusunda gerçekleşir.

3.1 Temel Elektromanyetik Kanunları

Faraday Kanunu ve Amper Kanunu kablosuz bir şekilde güç aktarımı yapabilmenin temelleridir.

3.1.1 Faraday Kanunu

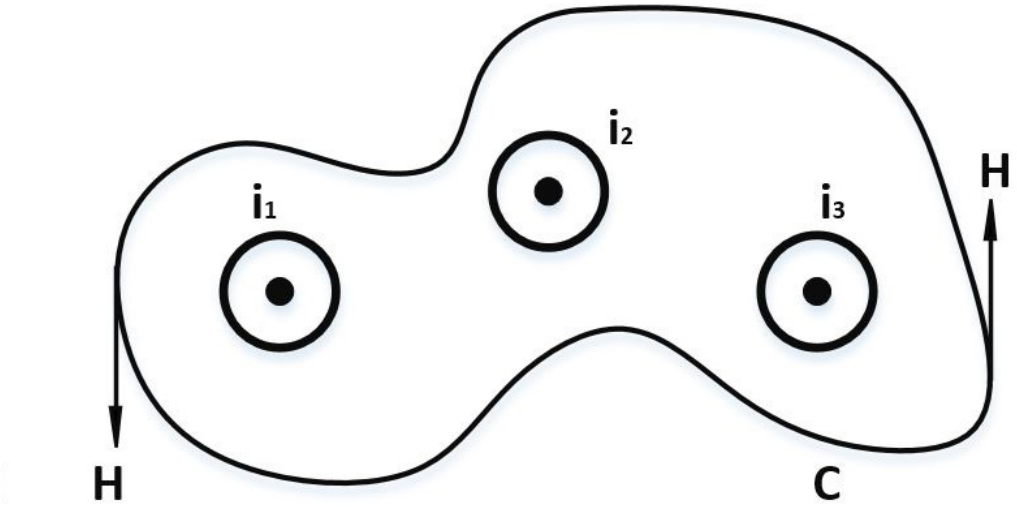
Faraday Kanunu, Kapalı ve sabit bir çevrimden, örneğin bobin sargısı, zamana bağlı değişen manyetik akıya ϕ(t) maruz kalırsa çevrim üzerinde bir gerilim v(t) endüklenir.

Bu durum bir bobin için şu şekilde ifade edilebilir [30]:

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d(N\phi)}{dt} = N\frac{d\phi}{dt} = N\frac{d(AB)}{dt} = NA\frac{dB}{dt} = NA\mu\frac{dH}{dt} = \frac{\mu AN^2}{l}\frac{di}{dt} \\ &= N\frac{d}{dt}\left(\frac{F}{R}\right) = N\frac{d}{dt}\left(\frac{Ni}{R}\right) = \frac{N^2}{R}\frac{di}{dt} = PN^2\frac{di}{dt} = L\frac{di}{dt} \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.1.2 Amper Kanunu

İletken bir telden akım akması ile tel etrafında manyetik alan çizgileri oluşur. Akım miktarı ile oluşan manyetik alan şiddeti doğru orantılıdır. Manyetik alan şiddeti H üzerinde kapalı bir yol C olarak integral işlemi yaparsak aldığımız sonuç o kapalı alan içerisindeki toplam akıma i_{enc} eşittir. [30] [31]:

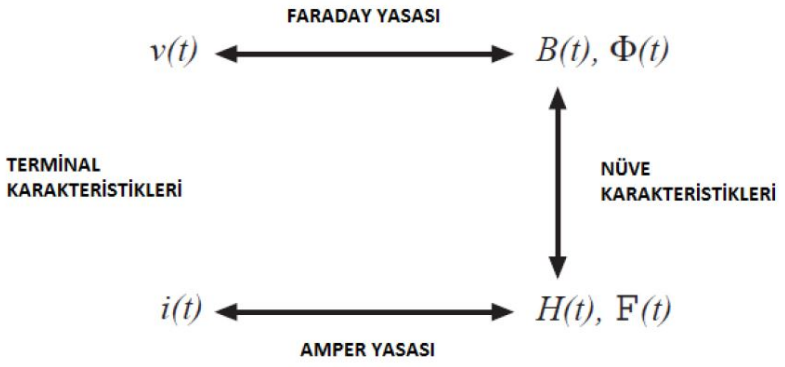


Şekil 3.1 Amper kanunu benzetimi [30]

$$\oint_C Hdl = \sum_{n=1}^{N} i_n = i_1 + i_2 + ... + i_N = i_{enc} \tag{3.2}$$

3.2 Çalışma Prensibi

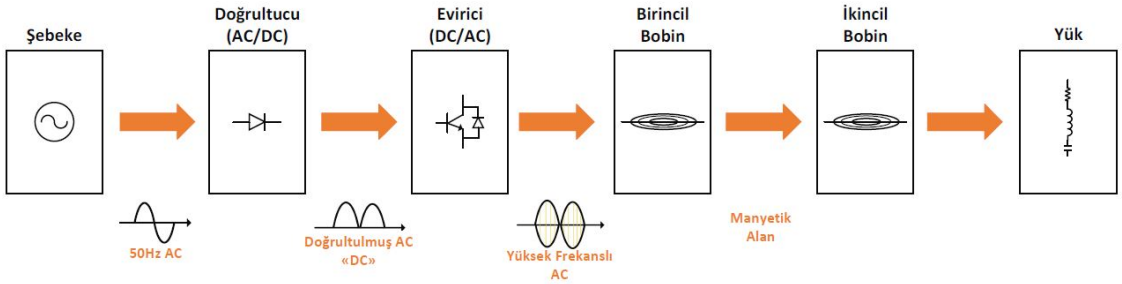
Kablosuz güç transferi sisteminin çalışma prensibi temel elektromanyetik kanunlara dayanır. Bu kanunlar arası enerji dönüşümü Şekil 3.2' de verilmiştir. İlk olarak birincil bobinde zamanla değişken akım oluşturulur. Oluşan bu akım değişken manyetik alan şiddetini oluşturur. İkincil tarafta bulunan bobin bu değişken manyetik alana mahruz kaldığında Faraday kanununa göre iletken üzerinde gerilim endüklenir. Bu sayede güç aktarımı yapılmış olur.



Şekil 3.2 Elektromanyetik yasalar arası ilişkiyi gösteren diyagram [31]

Şekil 3.4'deki sistem modelinden de görüldüğü gibi, Kablosuz Güç Transferi sistemini oluşturan bloklar AC-DC dönüştürücü, DC-AC evirici, manyetik sistem ve

yüktür. [32] Kablosuz enerji transferi, verici bobin (birincil) sargılarından geçen akımın oluşturduğu manyetik alana maruz kalan alıcı bobinin (ikincil) sargılarında gerilim endüklenmesi ve akım akması prensibi ile gerçekleşir. Birincil sargıda sürekli olarak yönü değişen bir akım akıtabilmek için şebekenin öncelikle doğrultulması (AC-DC) ve oluşturulan doğru gerilimin yüksek frekansta anahtarlanması (DC-AC) ile gerçekleştirilir. Oluşan yüksek frekanslı gerilim manyetik sistem ile ikincil bobine aktarılır. Aktarılan gerilim yüke bağlı olarak ikincil sargıda bir akım oluşmasını sağlar.



Şekil 3.3 Endüktif kablosuz güç transferi sistemi genel blok diyagramı

Birincil ve ikincil bobinlerin endüktans olarak gösterildiği Kablosuz Güç Transferi sistemi basit devre şeması Şekil 3.4'de gösterilmektedir. L_1, R_1 birincil, L_2, R_2 ikincil bobin parametreleri, M mutual endüktans, R_L rezistif yük, V_1, I_1 kaynak gerilim ve akım değeri, I_2 ise yük üstünden akan akımdır. Denklem 3.5 ve 3.6 işlemleri basitleştirmek için kabul edilmiş ifadelerdir.

$$V_1 = I_1(j\omega L_1 + R_1) - j\omega M I_2 \tag{3.3}$$

$$j\omega M I_1 = I_2(j\omega L_2 + R_2 + R_L) \tag{3.4}$$

$$Z_1 = j\omega L_1 + R_1 \tag{3.5}$$

$$Z_2 = j\omega L_2 + R_2 + R_L \tag{3.6}$$

$$V_1 = I_1(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)/Z_2 \tag{3.7}$$

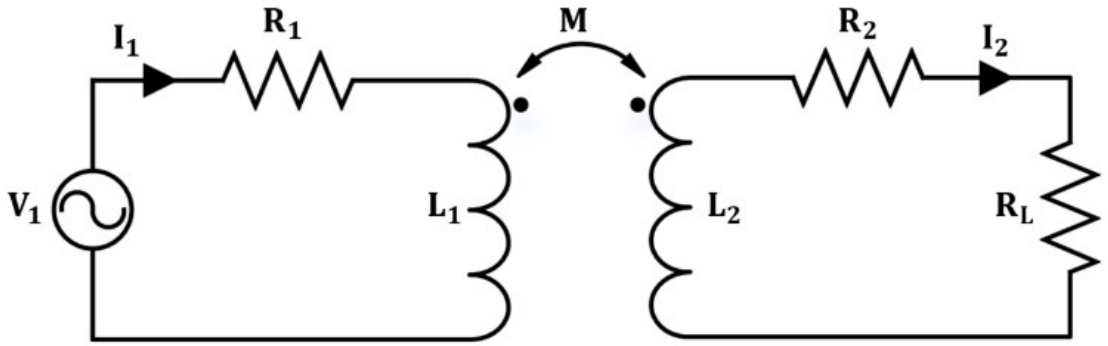
$$P_{in} = V_1 I_1 = {I_1}^2(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)Z_2 \tag{3.8}$$

$$P_{out} = {I_2}^2 R_L = {I_1}^2(j\omega M)^2 R_L / {Z_2}^2 \tag{3.9}$$

$$\eta = P_{out}/P_{in} = (j\omega M)^2 R_L / Z_2(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2) \tag{3.10}$$

Denklem 3.10 Kablosuz Güç Transferi sisteminin verimini göstermektedir. Bu ifadeye göre sistem veriminin mutual endüktans, birincil ve ikincil bobin parametreleri ve yük empedansı ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Sistem verimi giriş akım ve geriliminden bağımsızdır.

Bobinler arası transfer edilecek enerjinin miktarı, bobinlerin arasındaki mutual (ortak) endüktansın büyüklüğüyle doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3.4 Basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer devre [28]

3.3 Kullanılan Devre Topolojileri

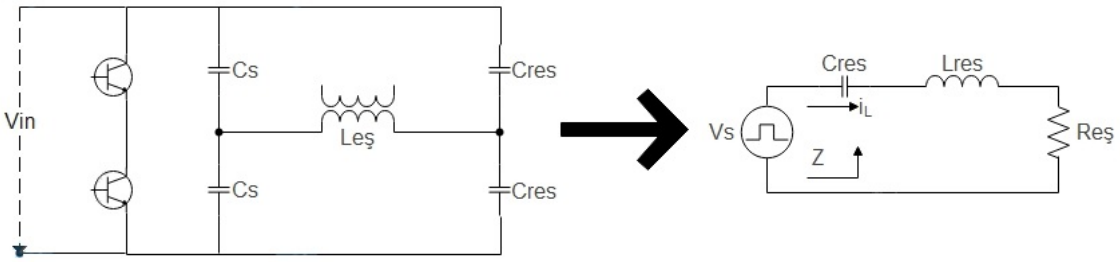
Kablosuz Güç Transferin'de kullanılan güç devrelerinin sınıflandırılması Tablo 3.1'de verilmiştir. Buradaki topolojilerin taşıması gereken en önemli özellik sürekli kuplaj sağlamasıdır. Bu nedenle on-time ve off-time çalışma döngüsünde birbirini tamamlayan anahtarlar bulunan topolojiler tercih edilir. Bu çalışmada aktarılmak istenen güç seviyeleri, maliyet, güç yoğunluğu ve boyut kriterleri göz önünde bulundurulduğunda Yarım-Köprü Seri Rezonanslı Topoloji kullanılmasına karar verilmiştir.

3.4 Yarım-Köprü Seri Rezonanslı Topoloji ile Kablosuz Güç Transferinin İncelenmesi

Bobin direnci ve diğer dirençlerin etkisi ile her güç aktarımında belirli bir miktar enerji kaybolur. Dolayısı ile depolanan enerji tamamen sabit kalamaz. Sistemin rezonans frekansı ise enerji aktarım çevrimi içinde yer alan kondansatör (C_{res}) ve eşdeğer bobin endüktansı(L_{res}) tarafından Denklem 3.11 ile belirlenir.

Tablo 3.1 Kablosuz güç transferi için topolojilerin karşılaştırılması [33]

Topoloji	**Frekans [kHz]**	**Çıkış Gücü[kW]**	**Uygulama Alanı**
Tam-Köprü Mosfet/IGBT	20-100	1-150	Batarya Şarj
Tam-Köprü Mosfet	1000	1	Biyomedikal
Tam-Köprü IGBT	20-40	10-60	Robotlar
Yarım-Köprü Mosfet	100-400	0.03-0.3	Sabit veya Mobil Cihazlar (laptop, telefon)
Yarım-Köprü IGBT	20-100	0.4-3	Küçük Ev Aletleri



Şekil 3.5 Yarım-Köprü seri rezonanslı devresi ve eşdeğer devresi

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{res}C_{res}}} \tag{3.11}$$

Şekil 3.5' deki seri RLC devresini t-domeninde analiz edersek,

$$V_s = i(t)R + L\frac{di(t)}{dt} + V_c(t) \tag{3.12}$$

$$I_c(t) = i(t) \tag{3.13}$$

$$I_c(t) = C\frac{dV_c(t)}{dt} \tag{3.14}$$

Kapasitenin akımı, seri RLC devresinin akımına eşittir. Bu sayede Denklem 3.12' deki akım ifadelerini gerilim türünden yazabiliriz.

$$V_s = RC\frac{dV_c(t)}{dt} + LC\frac{d^2V_c(t)}{dt^2} + V_c(t) \tag{3.15}$$

Şekil 3.5' deki seri RLC devresini s-domeninde analiz edersek,

$$\frac{d^2V_c(t)}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{1}{LC} = \frac{V_s}{LC} \tag{3.16}$$

Sönümlenme katsayısı:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \tag{3.17}$$

Açısal rezonans frekansı:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.18}$$

Sönümlü açısal rezonans frekansı:

$$\omega_d = \sqrt{{\omega_0}^2 - \alpha^2} \tag{3.19}$$

$$s^2 + 2\alpha s + {\omega_0}^2 = {\omega_0}^2 V_s \tag{3.20}$$

$\omega_0 > \alpha$ olduğundan denklemin çözümü karmaşık köklüdür. Bu durumda çözüm:

$$V_c = e^{-\alpha t}(A\sin(\omega_d t) + B\cos(\omega_d t)) + V_s \tag{3.21}$$

$V_c(0) = V_{c0}$, $\left.\frac{dV_c}{dt}\right|_0 = V_{c0}$ olduğuna göre,

$$V_c = (V_{c0} - V_s)e^{-\alpha t}(A\sin(\omega_d t) + B\cos(\omega_d t)) + V_s \tag{3.22}$$

$$V_c = (V_{c0} - V_s)\frac{\omega_0}{\omega_d}e^{-\alpha t}\cos(\omega_d t - \phi) + V_s \tag{3.23}$$

Devrenin ve aynı zamanda bobin akımının ifadesi şu şekildedir:

$$i(t) = C\frac{dV_c(t)}{dt} \tag{3.24}$$

Bu denklemdeki $V_c(t)$ yerine Denklem 3.23 yazılırsa,

$$i(t) = \frac{1}{\omega_d L}(V_{c0} - V_s)e^{-\alpha t}\sin(\omega_d t) \tag{3.25}$$

$$i(t) = \frac{1}{\omega_d L}V_{cmax}e^{-\alpha t}\sin(\omega_d t) \tag{3.26}$$

elde edilir. Denklem 3.26 bobin akımını ifade eder. İncelenen seri RLC devresindeki V_s gerilimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$v = \begin{cases} V_s & 0 < \omega t \leq \pi \\ 0 & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \tag{3.27}$$

Bu ifade Fourier serisi olarak ifade edilebilir.

$$v = \frac{V_s}{2} + \frac{2V_s}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-(-1)^n}{2n}\sin(n\omega t) \tag{3.28}$$

$$v = V_s\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sin(\omega t) + \frac{2}{3\pi}\sin(3\omega t) + \frac{2}{5\pi}\sin(5\omega t) + \ldots\right) \tag{3.29}$$

Bu seri açılımındaki temel bileşen,

$$v_{s1} = V_m \sin(\omega t) \tag{3.30}$$

$$V_m = \frac{2V_s}{\pi} \cong 0.637V_s \tag{3.31}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \cong 0.45V_s \tag{3.32}$$

Çalışma frekansı f, rezonans frekansı olan f_0'a yakınsa, rezonans devresinin empedansı daha yüksek harmonikler için çok yüksek olduğundan akım temel bileşene eşit ve sinüsoidal akar.

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi) \tag{3.33}$$

$$I_{max} = \frac{V_m}{Z} = \frac{2V_s}{\pi Z} = \frac{2V_s \cos\phi}{\pi R} \tag{3.34}$$

Bobin üzerinden akan akımın rms değeri:

$$I_{res} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} (I_m \sin(\omega t - \phi))^2 \, d(\omega t)} \tag{3.35}$$

Yarım köprü rezonans eviricinin alternatif şebeke bağlantısı öncesinde şebeke gerilimi köprü doğrultucu ile doğrultulur. Daha sonra yarım köprü rezonans evirici ile bobin üzerinde sinüsoidal akım üretilir. V_s ifadesinin şebeke geriliminin maksimum değeri olduğu yerde (şebeke gerilimi $230V_{AC}$ ise tepe gerilimi V_s ise 325V'dur.) gerilimin etkin değeri $V_s/\sqrt{2}$ olarak alınır. Bu durumda şebekenin bir periyodu boyunca bobin akımının rms değeri,

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos\phi}{\pi R\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} (I_m \sin(\omega t - \phi))^2 \, d(\omega t)} \tag{3.36}$$

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos\phi}{\pi R\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi}\frac{\pi}{2}} \tag{3.37}$$

$$I_{res} = \frac{2V_s \cos\phi}{\pi R} \tag{3.38}$$

$$I_{res} = \frac{I_{max}}{2} \tag{3.39}$$

Şebekenin bir periyodu boyunca bobinden akan akımın rms değeri bobin akımının maksimum değerinin yarısı kadardır. Sistemi kayıpsız kabul edip giriş ve çıkış gücünün eşitliğinden yola çıkarak sistem rezonans frekansında çalıştığında şebekeden çekilen akımın rms değeri ile bobin akımı maksimum değeri arasındaki ilişki;

$$P_{in} = P_{out} \tag{3.40}$$

$$I_{rms}\frac{V_s}{\sqrt{2}} = \frac{I_{max}}{2}\frac{\sqrt{2}V_s}{\pi}\frac{1}{\sqrt{2}} \tag{3.41}$$

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{4.443} \tag{3.42}$$

Bu duruma göre bobin akımı maksimum değeri, şebeke akımı rms değerinin 4.44 katı, bobin akımı rms değerinin ise 2 katıdır.

Yarım köprü seri rezonans devresindeki iki IGBT'nin iletim süreleri arasında güvenlik açısından bir pay vardır. Bu süre ölü zaman(dead-time) olarak adlandırılır. IGBT kesime girdiğinde bobin akımı snubber kapasiteleri üzerinden akmaya başlar. Bu işlem IGBT'lerden birinin gerilimi DC bara gerilimine diğeri ise 0V'a ulaştığında sona erer. Snubber kapasiteleri şarj/deşarj olduktan sonra bobin akımı diyot üzerinden akar. Bu durumda snubber kapasitelerinin şarj/deşarj süresi:

$i(t) = I_m \sin(\omega t - \phi)$, $i_c(0) = I_m \sin\phi$,

$$t_c = \frac{CV_s}{I_m \sin\phi} \leq t_d \tag{3.43}$$

Sıfır gerilimde anahtarlama için ölü zaman t_d şarj süresi t_c'den büyük olmalıdır.

4
TASARIM KRİTERLERİ

Tez kapsamında önerilen sistemin tasarım kriterleri iki başlık altında incelenebilir. İkincil tarafta bulunan ve sistem yükü olarak tanımlanan Küçük Ev Aletleri için sağlanması gereken kriterler, Birincil taraf olan güç aktarımı sistemi için gerekli kriterler şeklinde.

4.1 Küçük Ev Aletleri Kriterleri

Yapılan çalışmada Küçük Ev Aletlerinin kullanım alışkanlıklarını değiştirmeyecek ve performans kaybı yaşanmayacak bir sistem tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede alışılagelmiş ürünleri aynı şekilde kullanmaya devam ettirmek sağlanabilir.

Ürünler üzerinde yapılacak değişiklikler ürün karakteristiğine etki etmeden yapılmalıdır. Bu nedenle tasarımda sadece uyumlaştırma için çalışmalar yapılmıştır.

Kablosuz güç transferi uyumlaştırılması için seçilecek bobin çapı ürünlerin gövdelerini göze batacak boyutta büyütmemelilerdir. 145mm' yi geçmeyecek şekilde bobin seçilmelidir.

Su Isıtıcısı tasarımı için kritik nokta suyun kaynama süresinde değişiklik olmaması gerektiğidir. Bu nedenle 2200W(230V) güç değerine sahip olan ürünün aynı güç değerine çıkabilmesi gereklidir. Bununla birlikte sıcak tutma fonksiyonu esnasında düşük güçlü aktarımları da sağlamalıdır.

Blender tasarımı için kritik nokta gerekli torku sağlayabilmesidir. 400W(230V) etiket değerine sahip olan bu ürün nominal çalışma esnasında 100-200W mertebelerinde güç çekmektedir. Motor mili sıkışması veya zorlanması durumlarında 300W değerleri görülmektedir.

4.2 Kablosuz Güç Transferi Kriterleri

Tasarlanacak güç aktarım sistemi Türkiye şebekesine uygun olarak 230V 50Hz gerilim şartlarında çalışabilmelidir. Şebekedeki gerilim düşümlerini 200V'a kadar performans kaybı yaşamadan, 150V'a kadar güç düşüşü ile tolere edebilmelidir. 260V seviyesine kadar çalışmasını sürdürebilmelidir.

Tezgah üzerinde çok fazla yer kaplamayacak şekilde yüzey alanı mümkün olduğunca küçük bir tasarım yapılmalıdır.

2200W güç aktarım kapasitesine sahip olmalıdır. Bununla birlikte 100W gibi değerlerde de kararlı halde çalışabilmelidir.

Genel sistemde kullanıcı alışkanlıkları büyük oranda değiştirilmek istenmediği için ikincil taraftaki yükün güç taleplerine hızlı bir şekilde cevap vermesi gerekmektedir.

Gerçekleştirilen güç aktarımı esnasında küçük ev aletlerinin şebekeden çalışması durumuna en yakın çalışma tarzında tasarlanması gereklidir. Bu tasarımın veriminin yüksek olması önem arz etmektedir. Şebekeden direkt çalışma durumuna göre verim değerlerinde büyük değişiklikler olmamalıdır.

5
TASARIM

Bu tez çalışması kapsamında öne sürülen sistemin tasarımı birkaç başlık altında incelenebilir. Bobin sisteminin tasarımı, kablosuz güç sistemi tasarımı, ikincil tarafta bulunan küçük ev aletleri için yapılacak uyumlaştırma tasarımları şeklinde.

5.1 Bobin Tasarımı

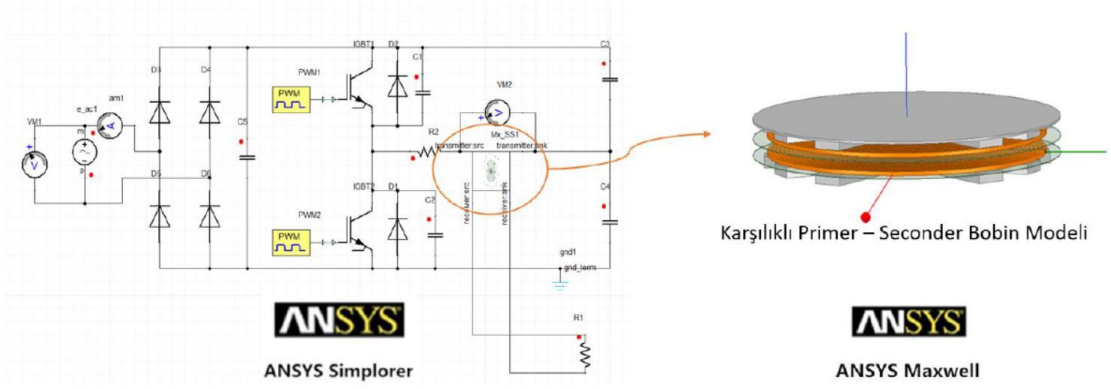
Bobin tasarımı için gerekli isterler şu şekildedir.

- Endüktans [uH]
- Dış çap [mm]
- İç çap [mm]
- Yükseklik [mm]
- Bobin rms akım değeri [A]
- Çalışma frekansı [kHz]
- Max çalışma sıcaklığı [°C]
- Min-max hava aralığı [mm]

Bobin tasarım çalışmalarına, kablosuz güç transferi özellikleri doğrultusunda, bobin isterlerinin oluşturulması ile başlanır. İsterlerin içinde endüktans değerinin (L) yanı sıra, dış ve iç çaplar, bobine uygulanacak olan rms akım değeri ve bobinin hangi frekansta çalışılacağı bilgisi yer almalıdır. Dış ve iç çaplar geometri ile ilgilidir, endüktans değeri ise geometriye bağlılık göstermektedir. RMS akım değeri ise akım yoğunluğunu, yani 1 mm^2 den geçen akım değerini, etkiler. Akım yoğunluğunun değerine göre kullanılacak olan litz telinin tel sayısı artırılabilir ya da bobinin soğutulması sağlanabilir. Frekans ise girme derinliğini etkiler, litz telinde kullanılacak

olan tel çapı, girme derinliği düşünülerek seçilmelidir. Maksimum çalışma sıcaklığı değeri ise kullanılacak olan ferritlerin doyuma gidip gitmeyeceğinin öngörülmesi için önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında 145mm'lik çapa sahip bir prototip bobin kullanılmıştır. Kullanılan bobinin öncesinde modellenerek sisteme uyumluluğu incelenmiştir. İlk olarak 145mm bobin kablosuz güç aktarımına uygun olarak Maxwell 3D aracılığı ile manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Elektronik devre Ansys Simplorer kullanılarak modellenmiştir. Bobin manyetik modeli, Simplorer devre modeli içine komponent olarak aktarılarak dinamik bir devre modeli elde edilmiştir. Bu sayede değişen hava aralığı ve frekansa göre aktarılan güç ve sistem verimi modellenebilmektedir.



Şekil 5.1 Kablosuz güç aktarımı sistem modeli [28]

Şekil 5.1 tez kapsamında tasarlanan sistemin ANSYS programlar ailesinde Maxwell ve Simplorer ortamlarını göstermektedir.

5.1.1 145mm Tekil Bobin Analizi

İlk olarak 145mm bobin tekil olarak modellenmiştir. Boşta analiz sonucuna göre 30kHz frekans için endüktans değeri 64.27μH, direnç değeri ise 71$m\Omega$ olarak elde edilmiştir. LCR metre ile alınan 30kHz boşta bobin ölçümünde ise endüktans değeri 64.93μH, direnç değeri 174$m\Omega$ olarak elde edilmiştir. Endüktans değeri açısından LCR metre ile alınan ölçüm ile analiz sonucunun benzer olduğu görülmektedir.

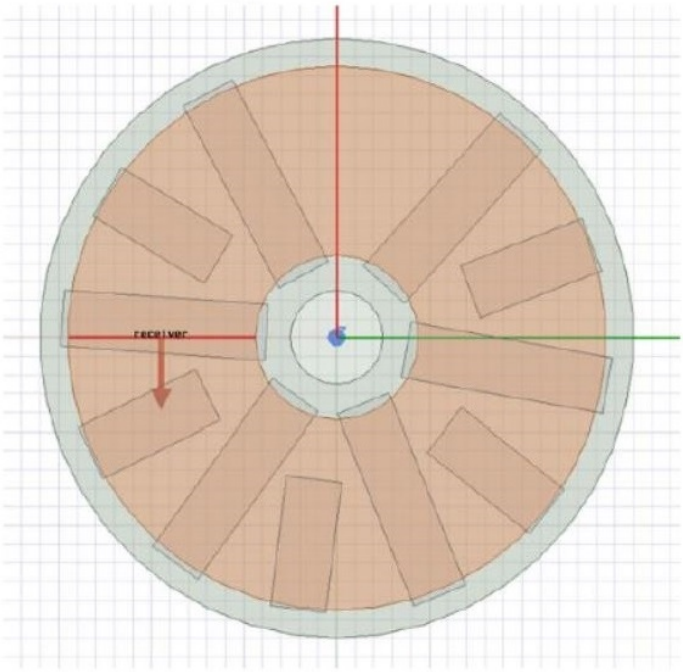
5.1.2 Karşılıklı İki Adet 145mm'lik Bobinin Analizi

İki bobinin karşılıklı olarak belirli bir hava aralığı ile yerleştirildiği kablosuz güç transferi sistemi Maxwell yazılımı ile modellenmiştir. İki bobinin birlikte çözümlenmesinden ötürü gelen kompleksiteden dolayı mevcut bobin analiz yöntemi ile çözüm süresi çok yükselmiştir. Bu nedenle alternatif analiz yöntemleri

incelenmiştir. Analizde frekans değeri 30kHz olarak alınmıştır. Akım tepe değeri 64A' dir. Karşılıklı iki sargı arası mesafe 7mm'dir.

Bu yöntemde sargı solid olarak çizilir. Sargı kesitine 64*23 A değerinde akım atanır. Matris oluşturulur ve sargı için matrisin içine 23 adet iletken tanımlanır. Bu yöntem kullanılarak yapılan analiz sonucunda, Lself:93.9μH, R:102$m\Omega$, Lmutual: 79.5μH, Coupling coef: 0.846, olarak hesaplanmıştır.

Karşılıklı bobinler arası faz farkı 90° ve 20° için tekrarladığında sonucun değişmediği görülmüştür.



Şekil 5.2 Solid sargılı bobin modeli

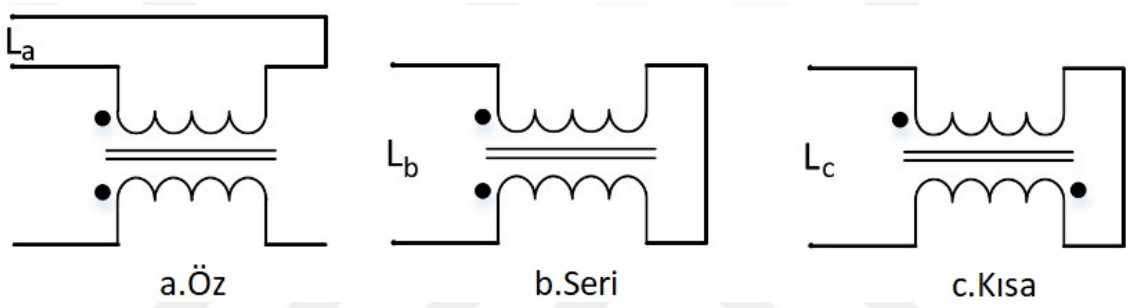
5.1.3 Bobin LCR Metre Ölçümleri

Mutual Endüktans değeri direkt olarak ölçülemez. Ölçümler sonucu matematiksel olarak bulunabilir. Şekil 5.3 (a-c)'de; self, serial ve short inductance değerlerinin bobin üzerindeki ölçüm noktaları gösterilmiştir. Burada L_a self inductance, L_b serial inductance, L_c short inductance ve M mutual inductance değerini göstermektedir. Mutual inductance değerini bulmak için iki farklı yöntem kullanılabilir. İlk yöntemde, bobinler seri bağlanarak (primerin çıkışı sekonderin girişine bağlanarak) L_b değeri ölçülür. Ardından bobinlerin çıkışları kısa devre edilerek girişten endüktans(L_c) ölçümü alınır. Primer ve sekonder bobin eşleniktir ve 1:1 oranına sahip bir trafo olarak

düşünülebilir. 5.1 formülü yalnızca eşlenik bobinler için uygundur. Diğer bir yöntem 5.2'de görüldüğü gibi, L_a ölçülerek bu değerden L_c değerinin yarısını çıkarmaktır. Seri endüktans değerinin içinde iki bobinin self endüktansları ve kaçak endüktans değeri bulunmaktadır. Kısa devre ölçümü ile bu kaçak endüktans değeri ölçülmektedir. Böylece M hesabı için formül 5.2'ye indirgenebilir, böylece sadece iki ölçüm alınarak hem self hem mutual endüktans değeri elde edilmiş olur.

$$M = (L_b - L_c)/4 \tag{5.1}$$

$$M = L_a - (L_c/2) \tag{5.2}$$



Şekil 5.3 LCR metre ile bobin ölçüm yöntemleri şeması [28]

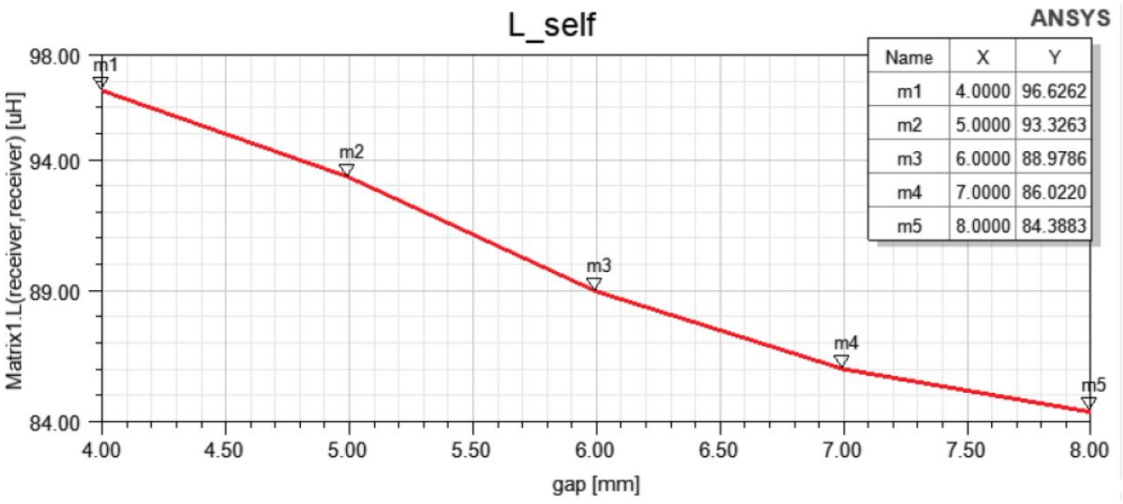
Bobin endüktans değerleri ölçülmüş ve kuplaj faktörü hesabında kullanılmıştır. Kuplaj (Coupling) faktörü k ile gösterilir ve 0-1 arasında bir değerdir. Kuplaj faktörü birincil ve ikincil özendüktanslarının eşit olduğunu kabul edildiğinde 5.3'deki gibi hesaplanabilir.

$$k = M/L_a \tag{5.3}$$

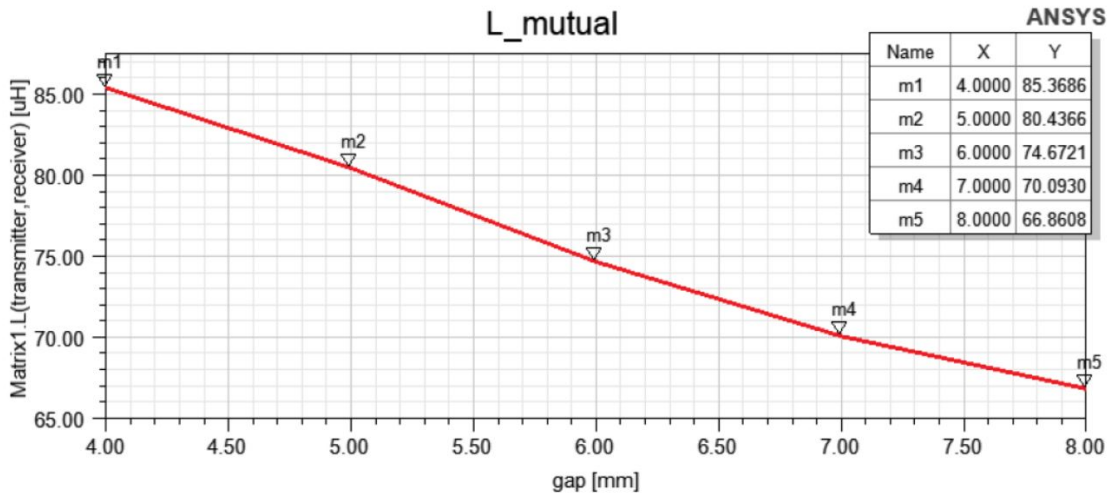
5.1.4 Bobinler Arası Hava Aralığının Etkisinin İncelenmesi

Bobinler arası mesafe artışı ile kaçaklar artmaktadır, mutual endüktans, özendüktans ve kuplaj faktörünün azaldığı görülmektedir.Sırasıyla Şekil 5.4, 5.5, 5.6' de bu durum grafikler üzerinde gösterilmiştir.

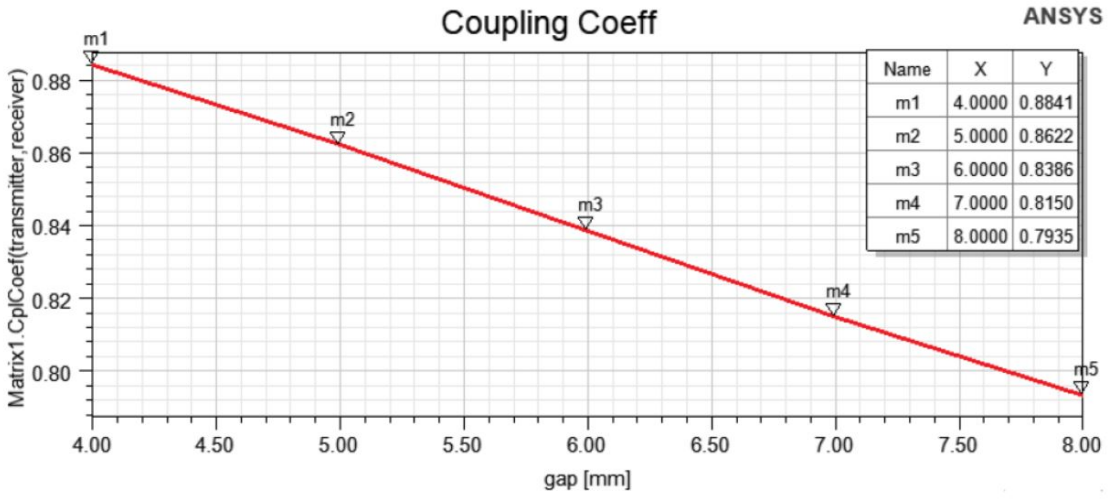
Grafiklerde görülen eğrilerin seçilen noktaları için Tablo 5.1 oluşturulmuştur. Farklı hava aralıkları için değişen değerler tablosu daha sonra testler ile karşılaştırılmalı olarak da sunulacaktır.



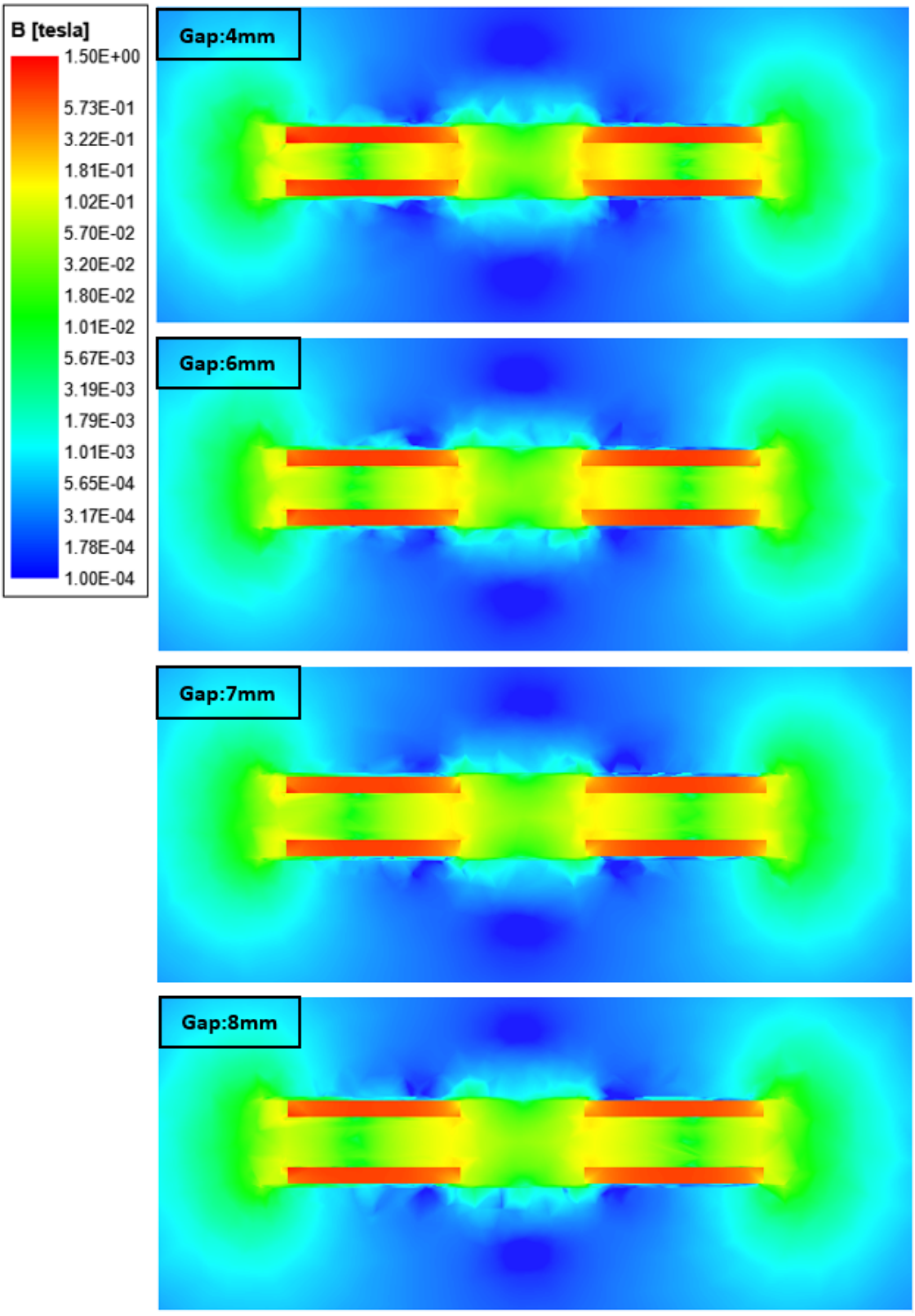
Şekil 5.4 4-8mm hava aralığı için özendüktansın değişimi



Şekil 5.5 4-8mm hava aralığı için mutual endüktansın değişimi



Şekil 5.6 4-8mm hava aralığı için kuplaj faktörü değişimi



Şekil 5.7 Değişen hava aralığına bağlı olarak manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

Tablo 5.1 Değişen hava aralığı için endüktans değerlerinin karşılaştırılması

Hava Aralığı[mm]	**4**	**6**	**7**	**8**
$L_{oz}[uH]$	96.62	88.97	86.02	84.38
$L_{mutual}[uH]$	85.36	74.67	70.09	66.86
$L_{leakage}[uH]$	22.52	28.60	31.86	35.04

5.2 Kablosuz Güç Sistemi Tasarımı

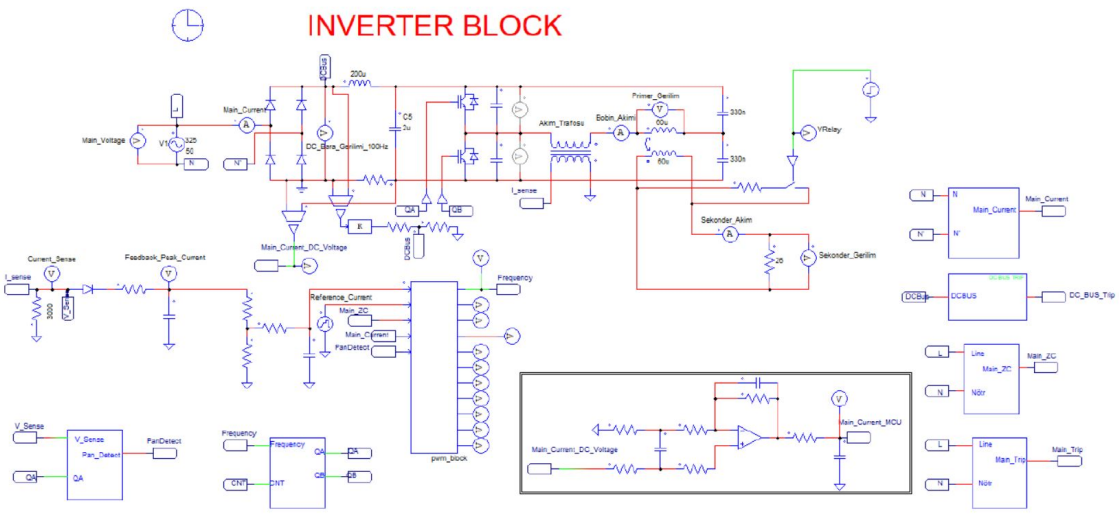
Tez kapsamında tasarlanan sistemin güç aktarımı tasarımı için öncelikle gereklilikler ortaya konulmuştur. 2200W'a kadar güç aktarımı yapabilen, 145mm çap değerine sahip modellenen bobin ile uyumlu çalışabilen, 230V 50Hz Türkiye şebekesinde çalışabilen, şebekedeki gerilim düşümlerini 200V'a kadar performans kaybı yaşamadan, 150V'a kadar güç düşüşü ile tolere edebilen, 260V gerilim değerine kadar çalışmaya devam edebilen bir güç sistemi tasarrımı yapılmalıdır.

Bu tasarım çalışmasının ilk adımı olarak bobin analizlerinden gelen çıktıları PSIM programı üzerinde parametre değerleri olarak kullanarak bir simülasyon gerçekleştirmek oldu. Simülasyondan alınan çıktılara göre elektronik kart tasarımı için şema çizimleri yapıldı ve ardından PCB tasarımı gerçekleştirildi. Tasarlanan PCB'de testlere kolaylık olması açısından boyut sınırlandırılması yapılmadı ve alternatif komponentlerin test edilebilmesi için alternatif montaj pinleri ve sinyal yolları eklendi.

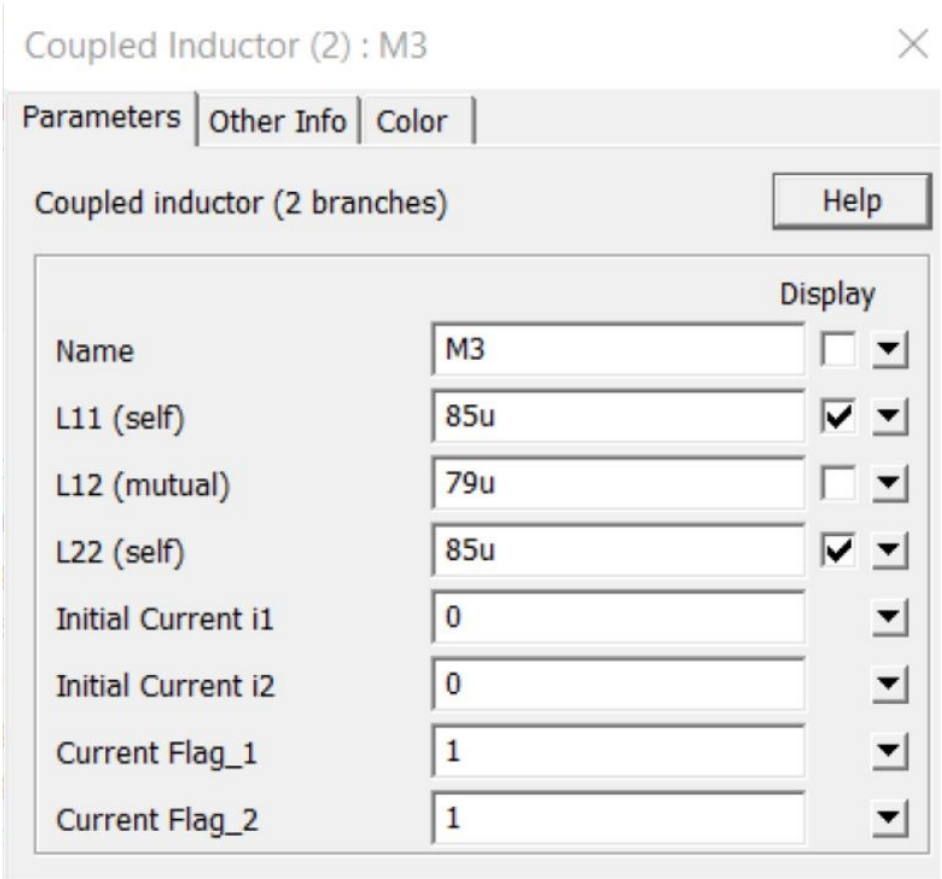
5.2.1 Elektronik Devre Simülasyon Çalışmaları

Küçük ev aletlerine kablosuz güç transferi sistemi iki temel üründen oluşmaktadır. Prototip tasarımı yapılan bir güç katı (enerji aktarımı sağlayan birincil bobini içeren) ve kablosuz enerji aktarımına uyumlaştırılmış (aktrılan enerjiyi alabilen ikincil bobin içeren) ürünler şeklinde tariflenmektedir. Bu simülasyon çalışmasında güç kartı ve birincil ile ikincil bobinlerden oluşan manyetik yapı modellenmiştir. İkincil tarafta bulunan küçük ev aletinin karakteristik değişimleri olabileceği için direnç modeli, endüktans ve direnç modeli gibi farklı çıkış yükleri bağlanmıştır.

Ürün elektronik sistem isterleri doğrultusunda, elektronik ve manyetik devre simülasyonu PSIM ortamında oluşturulmuştur. Gerçek sistemde karşılıklı olarak modellenen birincil ve ikincil bobinler, Şekil 5.8 de görüleceği gibi PSIM programında manyetik kuplajlı endüktans olarak tanımlanmıştır. Ortak endüktans değeri parametrik olarak girilmektedir. Şekil 5.9' de görüleceği gibi L_{11} primer self endüktansı , L_{12} mutual endüktansı ve L_{22} de sekonder self endüktansı ifade etmektedir. Karşılıklı bobin modeli PSIM üzerinde bu şekilde modellenebilmektedir.



Şekil 5.8 Sistemin PSIM programındaki modeli



Şekil 5.9 PSIM programı üzerinde kuplajlı endüktans modelleme

Bu simülasyon modeli ile;

- 100W-2200W Kablosuz Güç Aktarım Simülasyonu
- Su Isıtıcısı ve Blender Yüklerinin Analizi
- Farklı Şebeke Gerilimlerinin Etkisinin Analizi yapılmıştır.

Simülasyon modeli üzerinde sistemin elektriksel davranışları ve C programlama dili fonksiyonlarını kullanılmasıyla geliştirme ortamında tasarlanan yazılımların bu model üzerinde çalışması sağlanmıştır. Böylece kapalı çevrim güç kontrolü yapılabilen bir simülasyon modeli elde edilmiştir. Şekil 5.10' de ekran görüntüsü olan kodların tamamı ekler bölümünde bulunmaktadır.Kodlardan görüleceği üzere sistemdeki donanımsal bloklar yardımıyla elde edilen veriler C blok fonksiyonları ile işlenerek PI kontrol algoritması çalıştırılmaktadır. Bu sayede sistem davranışı simülasyon modeli üzerinden daha da detaylı gözlemlenerek prototip kart şemasına girdi oluşturulması sağlanmaktadır. Prototip kart şemasındaki oluşabilecek eksiklikleri ön analizlerle simüle ederek azaltılmasına ön ayak olmaktadır.

Tam simülasyon modeli (elektronik + manyetik) oluşturmak adına PSIM simülasyon modeli ANSYS Simplorer'a aktarılmak istendiğinde uyumlu olmadığı görüldüğünden Yarım Köprü Seri rezonans devresi Simplorer programında tekrar oluşturulmuştur.

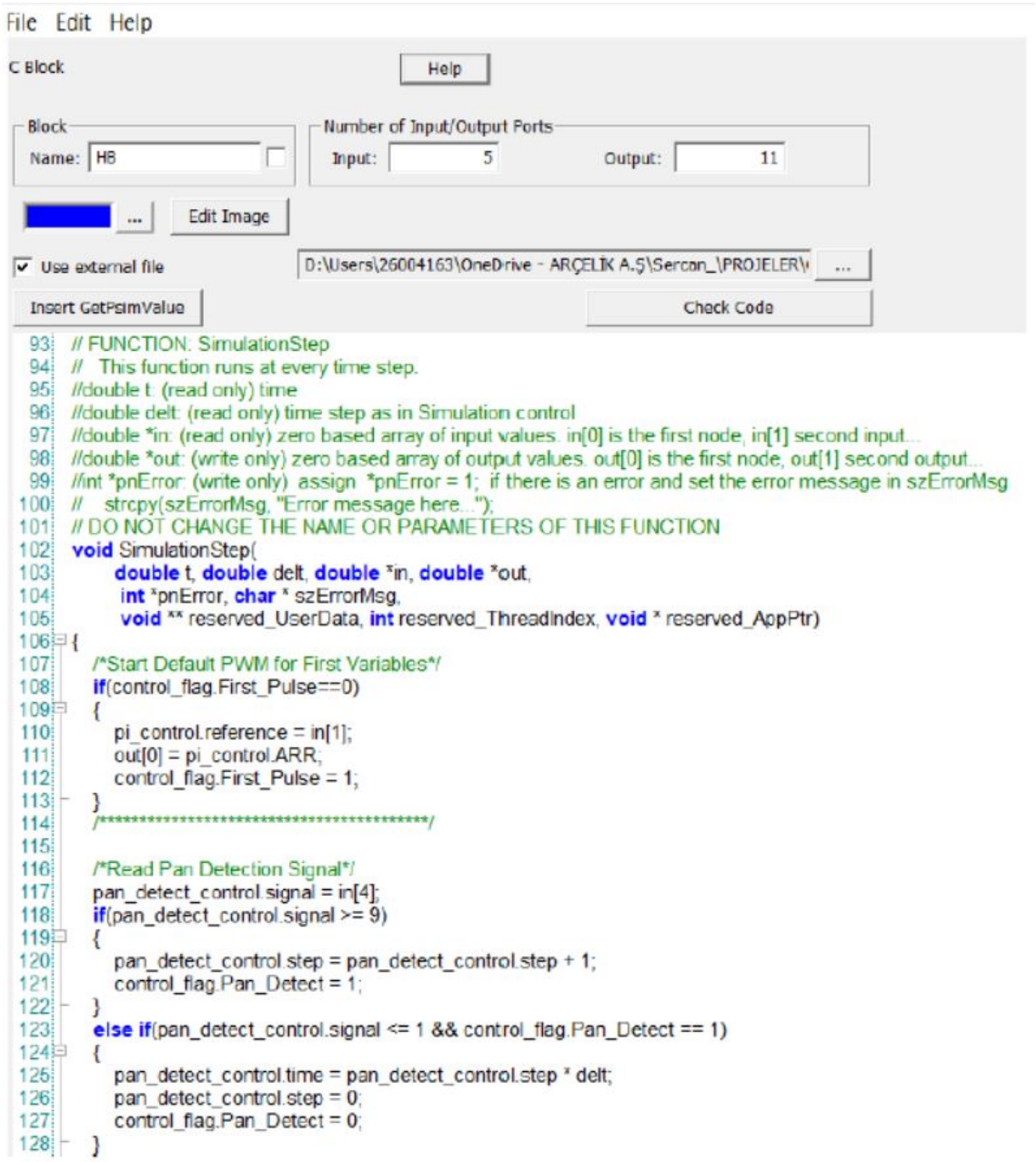
Bu oluşturulan devre modelinde, daha önce PSIM modelindeki manyetik kuplajlı endüktans yerine gerçek ANSYS modeli eklenerek tam sistem modeli oluşturulmuştur. Bunun için Şekil 5.12' de görüldüğü gibi modeldeki bobinler üzerinde değişiklik yapılarak dört bağlantı ucuna sahip karşılıklı bobin modellenmesi sonucu oluşturulan spesifik model yerleştirilmiştir. Bu değişiklik ile birlikte Şekil 5.13' deki tam devre modeli elde edilmiştir.

Elde edilen ANSYS Simplorer Tam Devre Modeli ile çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların grafikleri Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16 de görülmektedir.

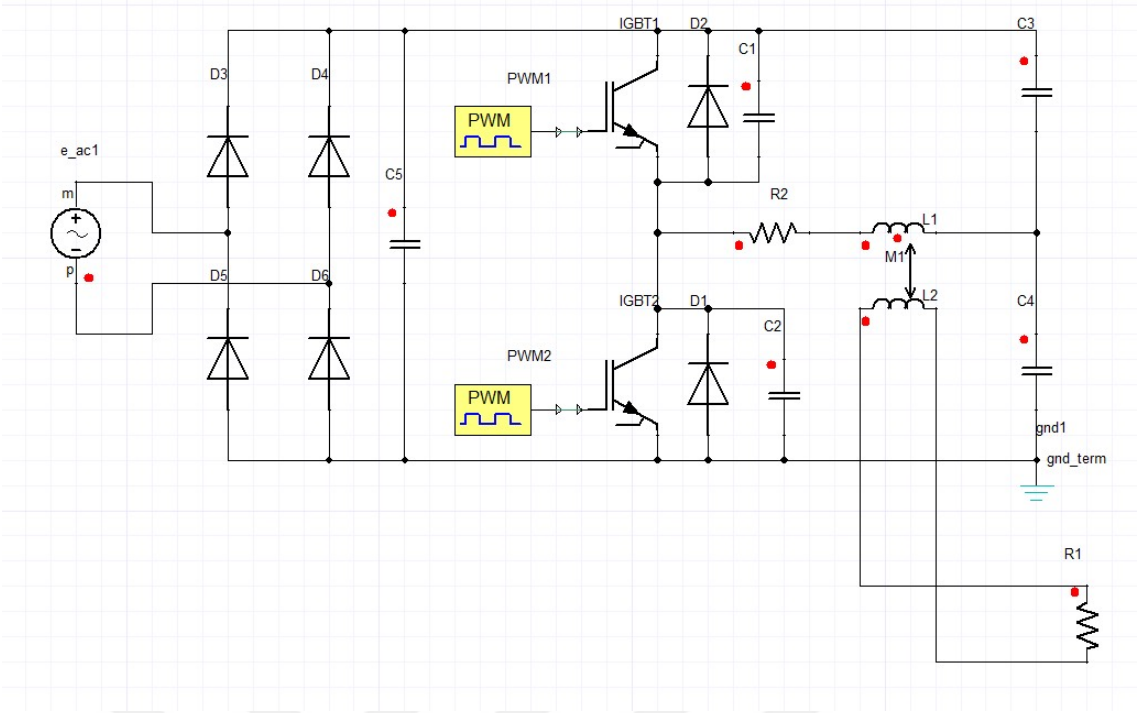
5.2.2 Güç Kartı Elektronik Devre Şeması Tasarımı

Şema tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulan temel kriterlere baktığımızda;

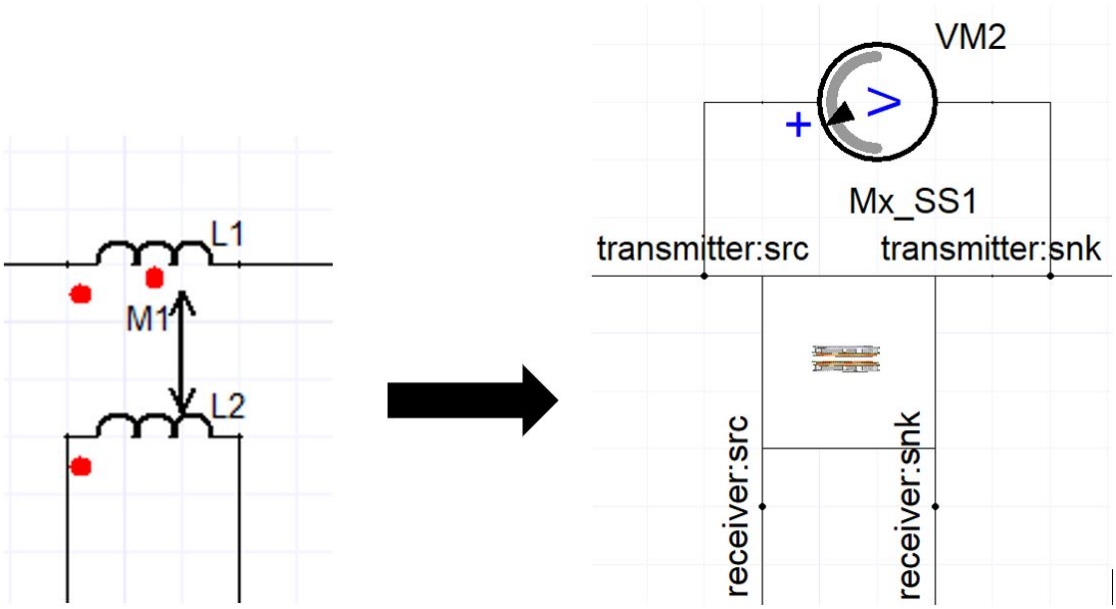
- Giriş Gerilim Aralığı : 90VAC – 290VAC RMS
- Şebekeden Çekilecek Maksimum Güç : 2200W
- Şebekeden Çekilecek Maksimum Akım: 16A RMS olarak görülmektedir.



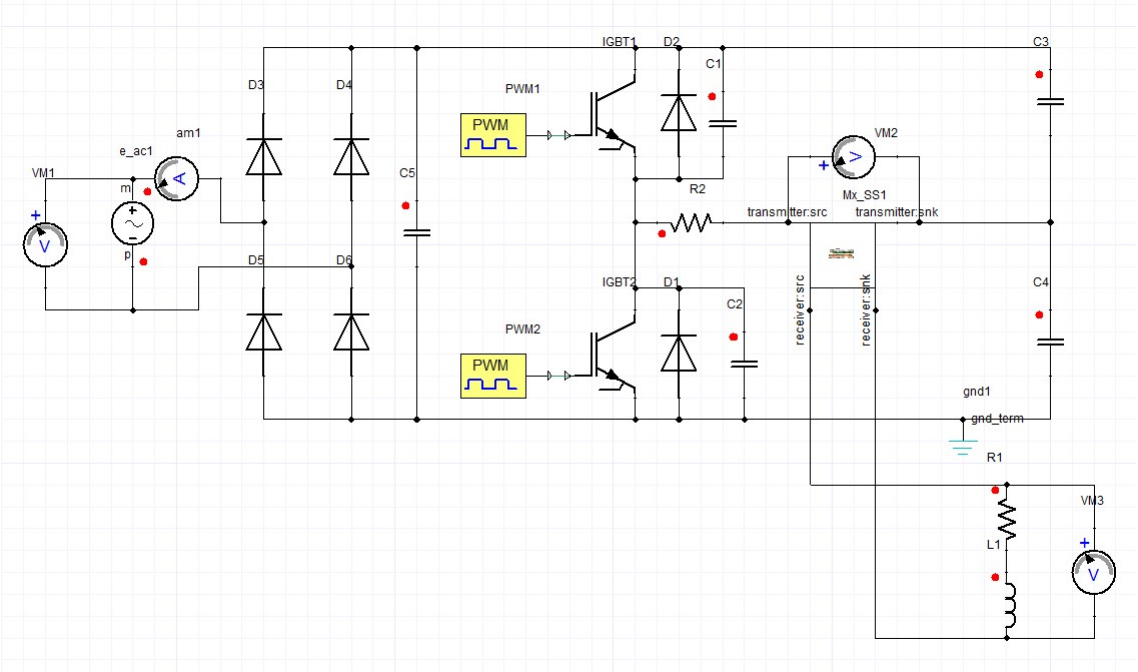
Şekil 5.10 PSIM programı üzerinde C blok fonksiyon örnek görseli



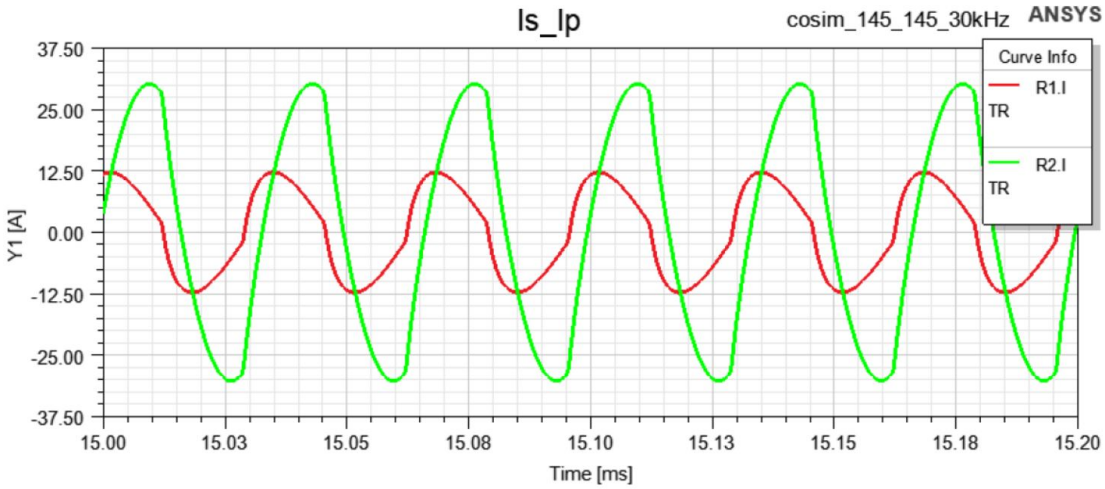
Şekil 5.11 ANSYS simplorer üzerinde oluşturulan devre modeli



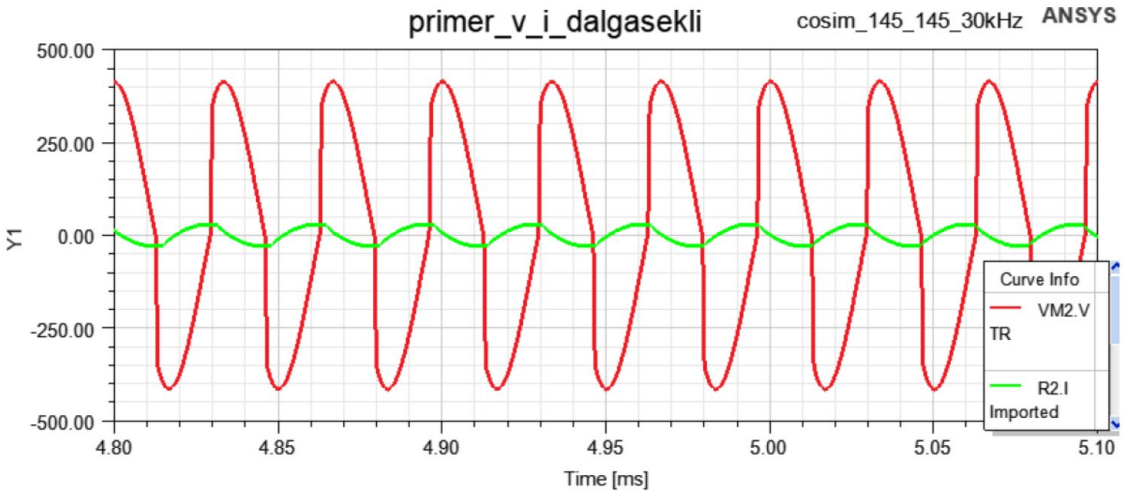
Şekil 5.12 ANSYS simplorer üzerinde bobin modelinin dönüşümü



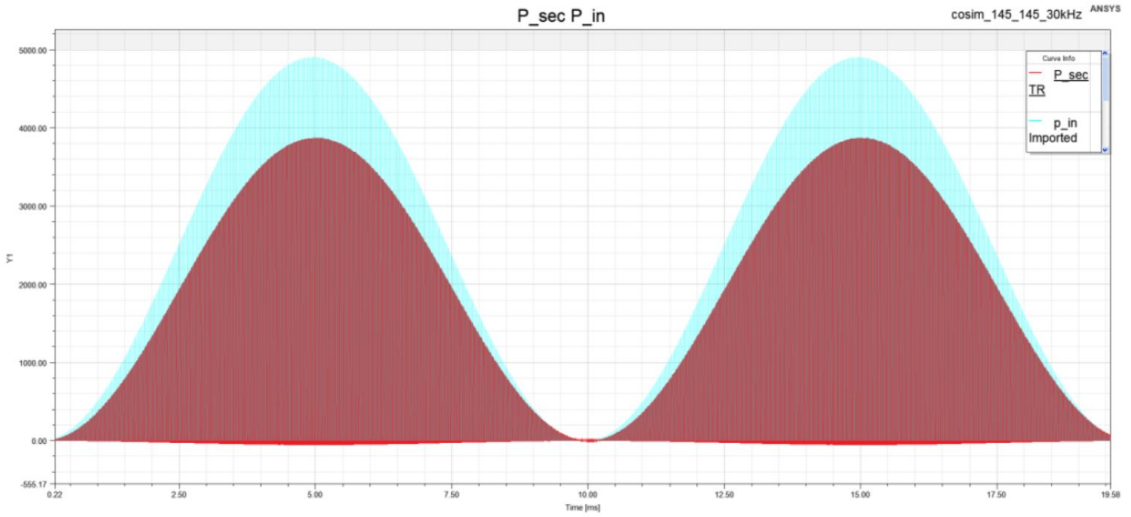
Şekil 5.13 ANSYS simplorer üzerinde oluşturulan tam devre modeli



Şekil 5.14 145mm/145mm - birincil/ikincil bobinler akım dalga şekli



Şekil 5.15 145mm/145mm durumunda birincil bobin çıkış gerilim-akım dalga şekli



Şekil 5.16 145mm/145mm - birincil/ikincil bobinler aktarılan ve alınan güçlerin grafiği

5.2.2.1 Güç Devresi Şema Tasarımı

Devre komponentlerinin tasarımı için gerekli olan girişler, max giriş gücü P, Şebeke minimum giriş gerilimi V, Rezonans frekansıdır (f_{res}). Bu değerlerden hareketle daha önce Tasarım Bölüm Başlığı altında bahsedilen hesaplamalar kullanılarak Tablo 5.2'deki değerler elde edilir. Hesaplamalar ve simülasyonlar sonucunda Şekil 5.17'deki devre şeması elde edilir.

Tablo 5.2 Yarım köprü seri rezonans eviricide tasarım parametreleri

V_{AC}(V)	230
P_{in}(W)	2300
L_{res}(μH)	77
C_{res}(nF)	600
R_s(Ω)	4.87
C_{snub}(nF)	22
$I_{peakmax}$(A)	42.18
F_{sw}(kHz)	26

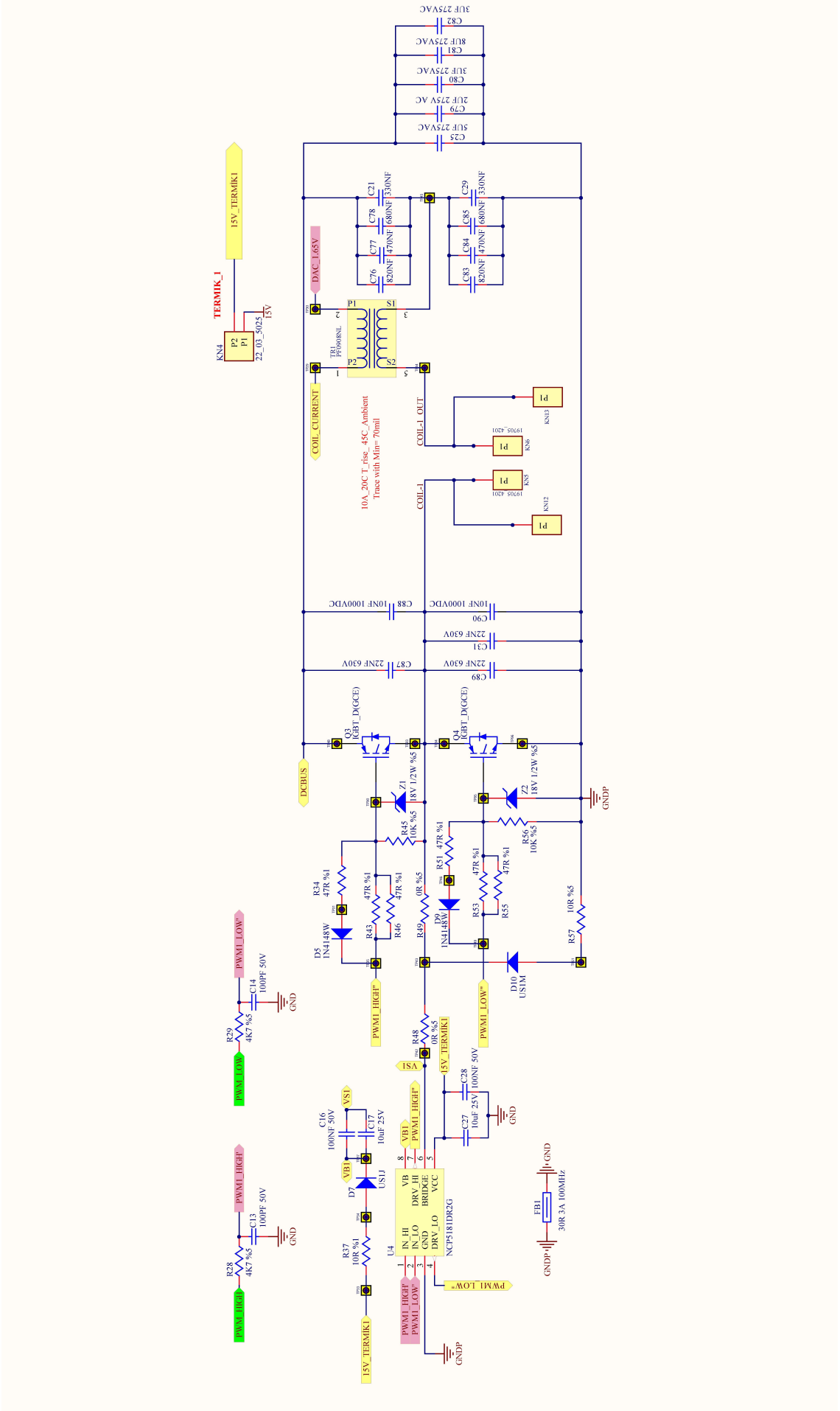
5.2.2.2 Şebeke Sıfır Geçiş ve DC Bara Okuma Devreleri Şema Tasarımı

Tez kapsamında tasarlanan güç sisteminin kontrol altyapısı şebeke sıfır geçişine senkron olarak belirlenmiştir. Bu nedenle şebekenin sıfır geçiş anını algılamak gereklidir. Şekil 5.18' de görülen şematikte TS331 Düşük Ofsetli Gerilim Karşılaştırıcı kullanılarak bir karşılaştırma devresi kurulmuştur. Şebekenin pozitif alternansında 3.3V, negatif alternansında 0V çıkış vererek bir kare dalga oluşturur. Oluşturulan bu kare dalga mikroişlemci'ye iletilir. Mikroişlemci tarafında zamanlayıcı birimi yardımıyla bu kare dalganın genişliği ve buna bağlı olarak frekansı, sıfır geçiş anları algılanır.

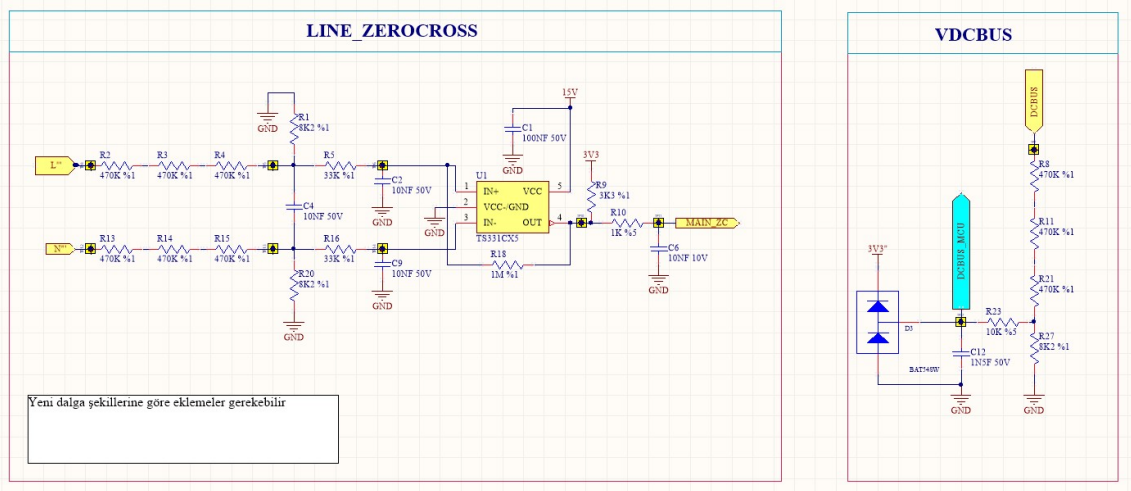
Ayrıca DC Bara geriliminin değerini dikkate alarak çalışmak gerektiğinden Şekil 5.18' de görülen gerilim bölücü yardımıyla DC Bara gerilimi mikroişlemci gerilim seviyesine uygun olarak mikroişlemciye iletilir.

5.3 Küçük Ev Aleti Tarafının Uyumlaştırma Tasarımı

Küçük ev aletleri ile kablosuz güç transferi yapılmak istendiğinde küçük ev aleti tarafında (İkincil tarafta) uyumlaştırma yapılması gerekir. Bu uyumlaştırma kullanılan küçük ev aletine göre farklılar gösterir.



Şekil 5.17 Güç devresi şema gösterimi



Şekil 5.18 Şebeke sıfır geçişi algılama devresi ve DC bara gerilimi okuma devresi şema gösterimi

5.3.1 Su Isıtıcısı Uyumlaştırma Tasarımı

Su ısıtıcısı içerisinde rezistans bulunduran bir küçük ev aletidir. Bu rezistansa elektrik enerjisi uygulanması sonucu rezistans ısı yaymaya başlar ve ısı transferi ile su ısıtılır. Rezistansın karakteristiği sayesinde doğru gerilim veya alternatif gerilim rahatlıkla uygulanabilir. Uygulanan gerilimin frekansına bağlı olarak rezistans üzerindeki deri etkisi farklılar gösterebilir. Bu durum göz edilerek yapılan tasarımda ikincil tarafa eklenen bobin sadece bir kontrol rölesine bağlanarak rezistans ile direkt etkileşime geçebilir. Bu sayede oldukça basit bir uyumlaştırma devresi elde edilmiş olur.

5.3.2 Blender Uyumlaştırma Tasarımı

Blender için yapılan uyumlaştırma tasarımı su ısıtıcısına göre biraz daha karmaşıktır. Blender içerisinde bulunan elektrik motoruna doğru gerilim uygulanması gerektiği için aktarılan yüksek frekanslı alternatif gerilimin doğrultulması gerekmektedir. Doğrultulan bu gerilim öncesinde blender içerisinde bulunan sürme kartına aktarılır ve böylece motor sürme gerçekleştirilir. İkincil taraftaki indüksiyon bobinin çıkışı direkt olarak köprü doğrultucuya bağlanır. Köprü doğrultucu çıkışı sürme kartına ve kontrol kartına bağlanır. Sürme kartı çıkış terminallerine motor bağlanarak tasarım tamamlanır.

Bu uyumlaştırma devresindeki kritik tasarım köprü doğrultucudur. Burada yüksek frekanslı alternatif gerilimi doğrultmak gerektiği için kullanılan diyotların reverse recovery zamanının değeri önem taşımaktadır. Ayrıca çıkış gerilimi anlık olarak köprü diyotların üzerine düşebileceği durumlar olması nedeniyle 650V dayanıma sahip SiC hızlı diyot seçilmesi uygun görülmüştür. Onsemi firmasının FFSH2065B-F085 numaralı ürünü kullanılmıştır.

Kullanılan hızlı diyodun bilgi kitapçığından alınan başlıca özelliklere ait veriler aşağıdaki gibidir.

- Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı 175°C
- Yüksek Darbe Akım Kapasitesi
- Pozitif Sıcaklık Katsayısı
- Kolay paralellenebilirlik
- Reverse Recovery Yok/ Forward Recovery Yok

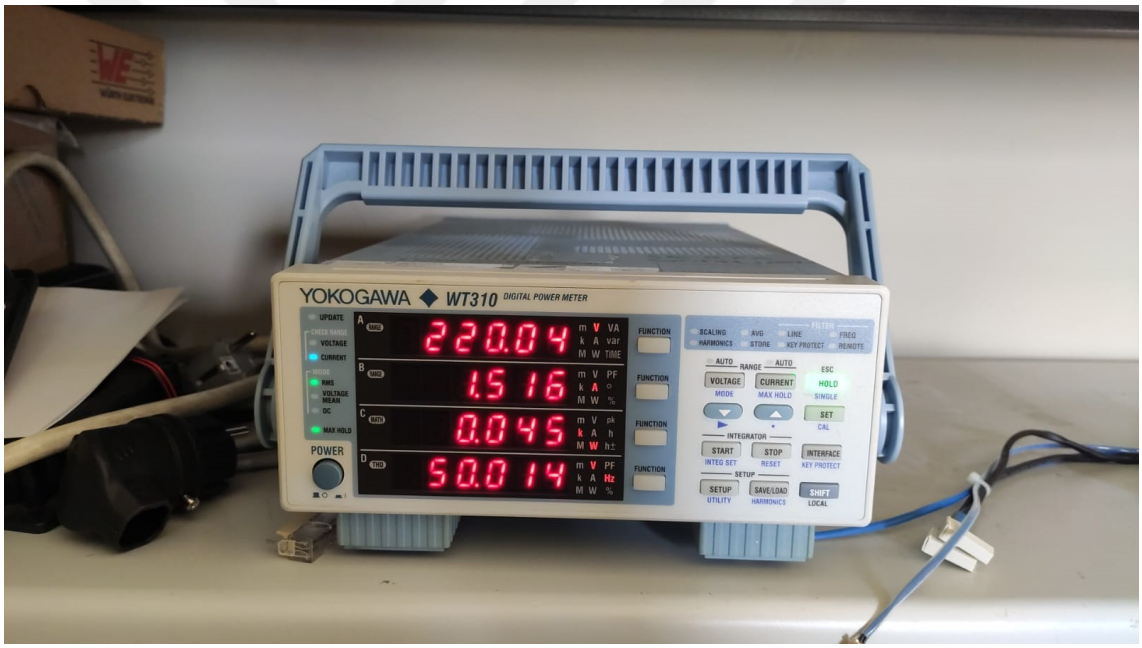
Ayrıca Şekil 5.19' de kullanılan diyodun bilgi kitapçığından alınan dayanma gerilimi ve sürekli taşıyabileceği akımı gösteren tablo bulunmaktadır. [34]

Symbol	Parameter	Unit	Ratings	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage		650	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (Note 1)		94	mJ
I_F	Continuous Rectified Forward Current	@ T_C < 141°C	20	A
		@ T_C < 135°C	22.3	
$I_{F, Max}$	Non−Repetitive Peak Forward Surge Current	T_C = 25°C, 10 μs	889	A
		T_C = 150°C, 10 μs	861	
$I_{F, SM}$	Non−Repetitive Forward Surge Current T_C = 25°C	Half−Sine Pulse, t_p = 8.3 ms	84	A

Şekil 5.19 FFSH2065B-F085 diyodunun özellikleri

6
DENEY VE ÖLÇÜMLER

Tez kapsamında tasarlanan sistemin gerekli testlerini yapabilmek için temel olarak kullanılan iki ekipman bulunmaktadır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2' de görülen YOKOGAWA firmasının WT310 numaralı Güç Analizörü ile Teledyne LeCroy firmasının HDO6054 modeli olan osiloskop kullanılmıştır.

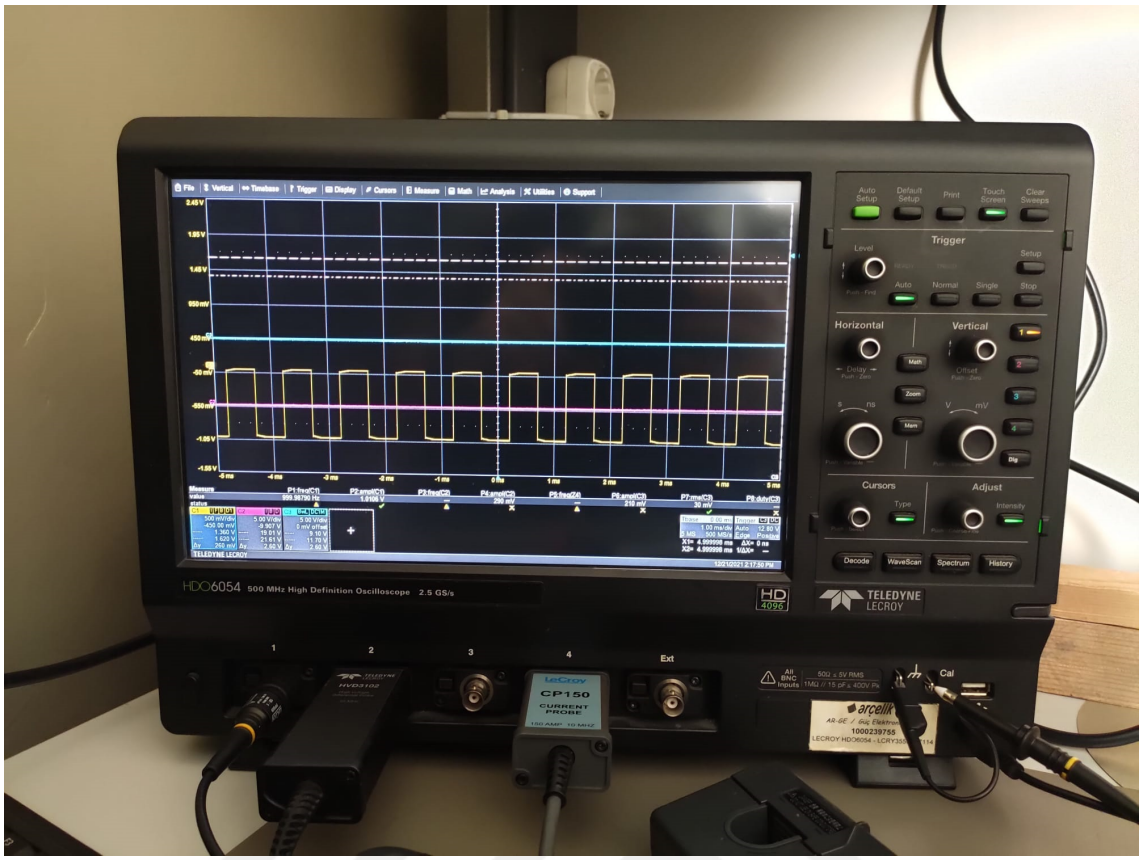


Şekil 6.1 Kullanılan güç analizörü

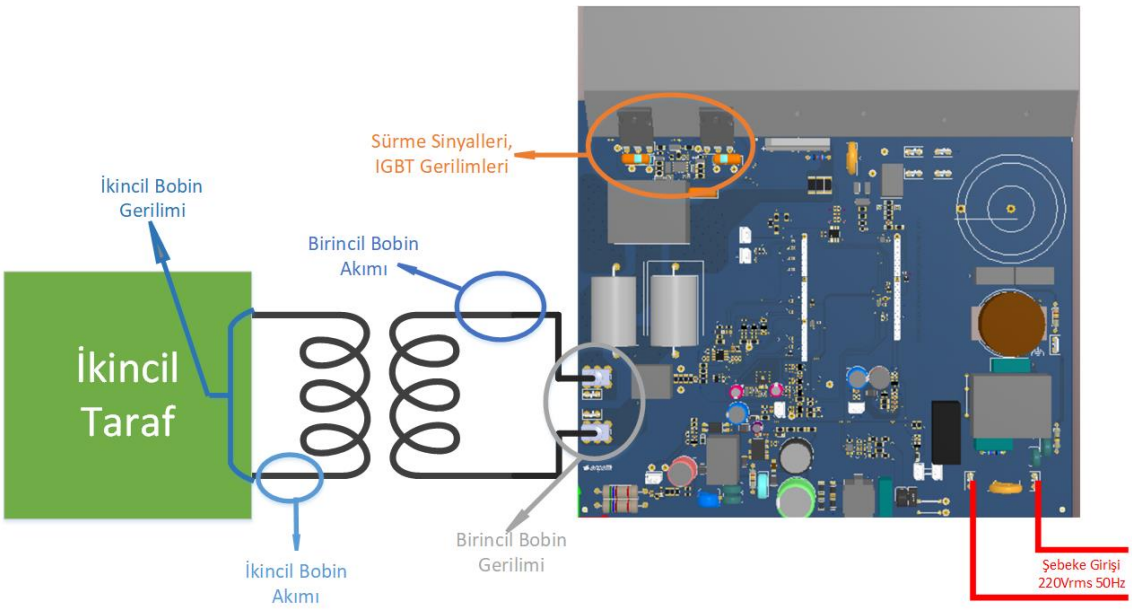
Şekil 6.3' de Tez kapsamında kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere sistemin ölçüm alınan noktaları belirtilmiştir.

Şekil 6.4' de Kurulan deney düzeneği görülmektedir. Burada Güç Analizörü bağlantısı birincil tarafta bulunan şebeke girişindedir. Osiloskop bağlantıları test ihtiyaçlarına göre farklı noktalardan yapılmaktadır. Sistemden ölçüm alan probların ve kablolar ile sistemin daha düzenli gözüken hali Şekil 6.5'dedir.

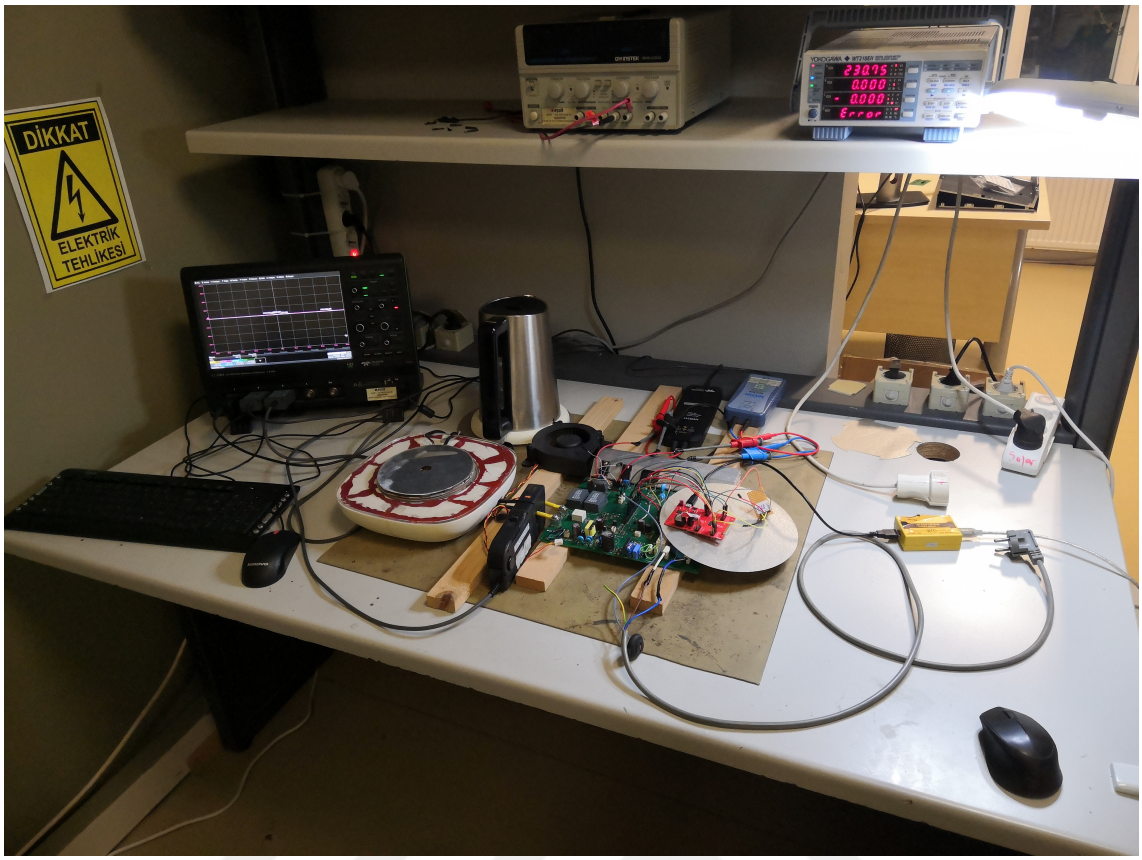
Ayrıca testlerin daha efektif yapılabilmesi amacıyla bir arayüz geliştirilmiştir.



Şekil 6.2 Kullanılan osiloskop



Şekil 6.3 Deney düzeneği blok diyagramı



Şekil 6.4 Kurulan deney düzeneği ölçümler için açık hali

Geliştirilen bu arayüzden mikroişlemci içindeki kritik değerler ve sistemin testlerde takibini kolaylaştıracak değerleri okunmaktadır. Bununla birlikte sistemin güç kontrolü bu arayüzden istenildiği şekilde yapılabilmektedir. Şekil 6.6' de bu arayüzün ekran görüntüsü bulunmaktadır.

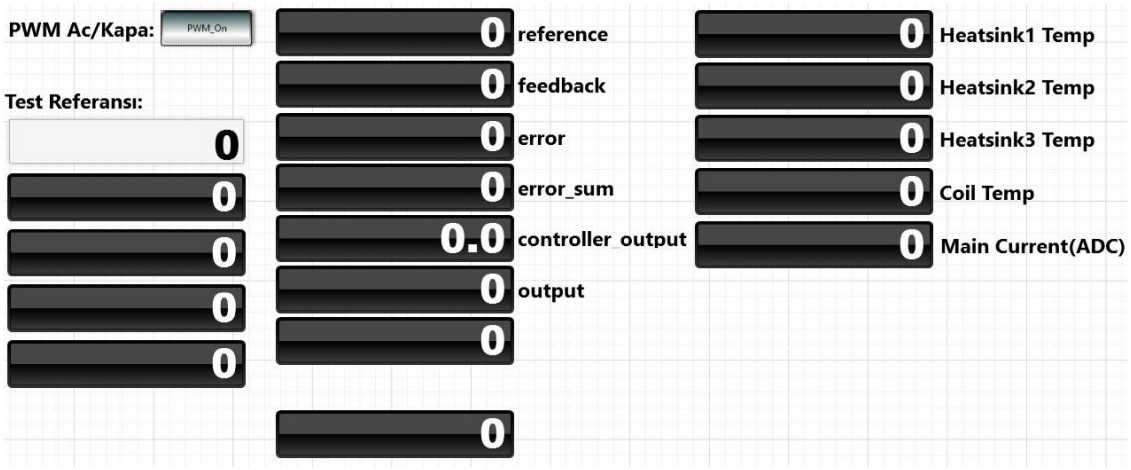
6.1 Bobin Kuplajının Ölçülmesi

Kablosuz Güç Transferi sistemi için bobin tasarımında dikkat edilen özendüktans, mutual endüktans ve kaçak endüktans değerlerinin prototipler üzerinden ölçümü gerçekleştirilerek tasarım doğrulama yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan ölçümler bobinler arası hava aralığının farklı mesafeleri için gerçekleştirilmiştir. Analiz ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırma tablosu Şekil 6.7' de görülmektedir. Prototiplemeden gelen bazı farklar olduğu düşünülse de hava aralığı ile endüktans ilişkisi test ve analiz açısından tutarlıdır. Hava aralığı arttıkça self ve mutual endüktans azalmakta, kaçak endüktans artmaktadır.

Şekil 6.7'de bulunan değerler [28]'den alınmıştır.

Şekil 6.7' de L_self olarak özendüktans, L_mutual olarak karşılıklı endüktans ve

Şekil 6.5 Kurulan deney düzeneği kapalı hali



Şekil 6.6 Testler için geliştirilen arayüz

L_leakage olarak kaçak endüktans referans gösterilmiştir.

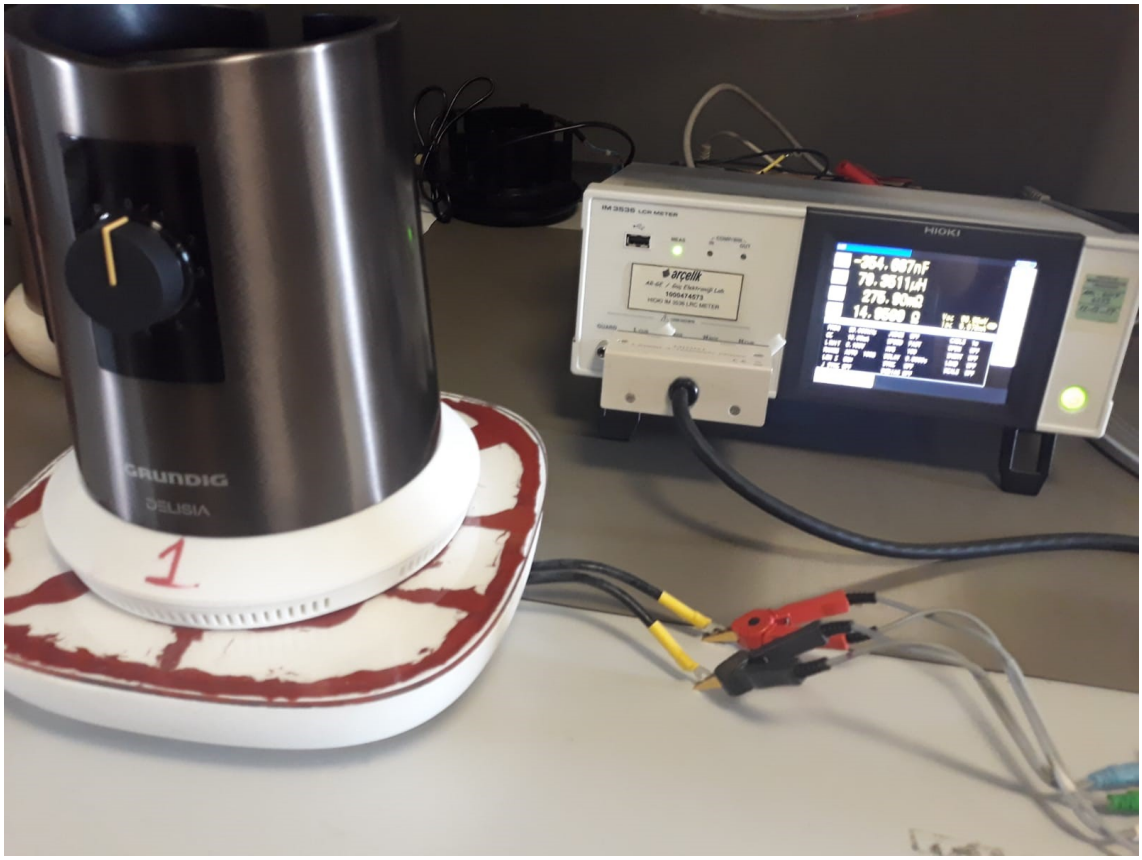
Hava Aralığı [mm]	4	6	7	8
Analiz L_self [uH]	96,62	88,97	86,02	84,38
Ölçüm L_self [uH]	86,8	80,4	79,3	78,1
Self endüktans fark [%]	10%	10%	8%	7%
Analiz L_mutual [uH]	85,36	74,67	70,09	66,86
Ölçüm L_mutual [uH]	72,65	63,4	60,8	58,6
Mutual endüktans fark [%]	15%	15%	13%	12%
Analiz L_leakage[uH]	22,52	28,6	31,86	35,04
Ölçüm L_leakage [uH]	28,3	34	37	39
Leakage endüktans fark [%]	26%	19%	16%	11%

Şekil 6.7 Değişen hava aralığı için endüktans değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 6.8, Kablosuz Güç Transferi için tasarlanan sistemde iki bobinin planlanan şekilde Su ısıtıcısı ile yerleştirilmesi sonucu Birincil Bobin Terminallerinden ölçüm alınan sistemi ve sonuçları göstermektedir.

Şekil 6.8 Su ısıtıcısı ile birlikte birincil bobin endüktans ölçümü

Şekil 6.9, Kablosuz Güç Transferi için tasarlanan sistemde iki bobinin planlanan şekilde Blender ile yerleştirilmesi sonucu Birincil Bobin Terminallerinden ölçüm alınan sistemi ve sonuçları göstermektedir.



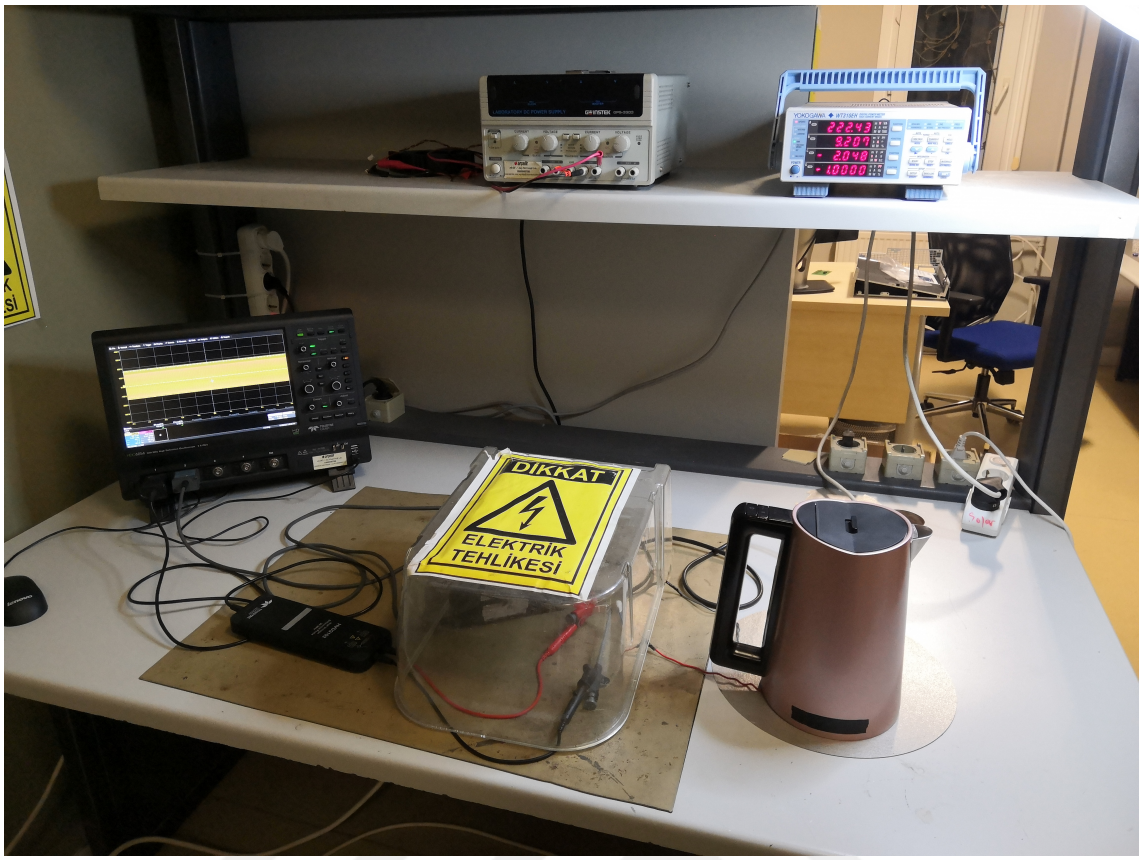
Şekil 6.9 Blender ile birlikte birincil bobin endüktans ölçümü

6.2 Şebekeden Çalışan Su Isıtıcısı

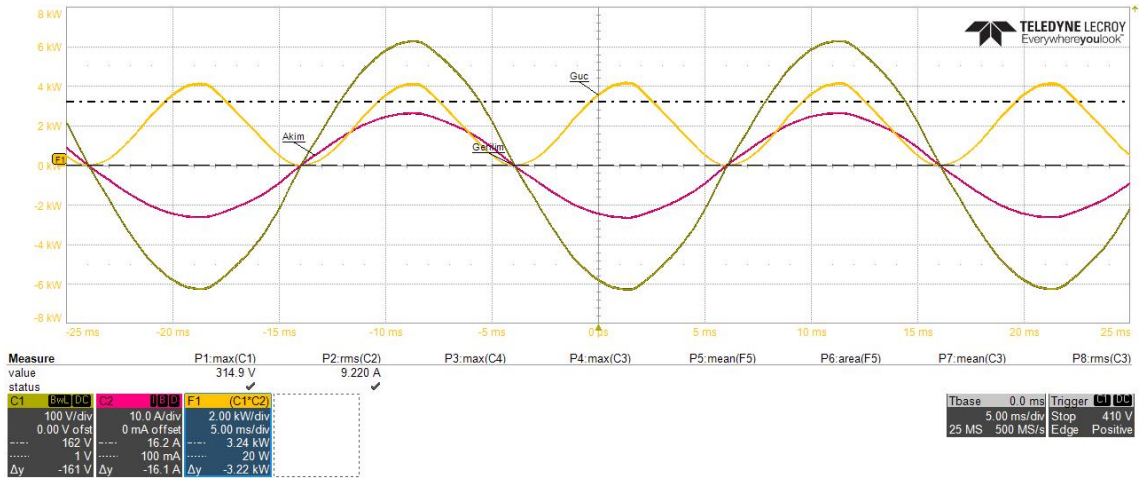
Tez kapsamında seçilen Küçük Ev Aletlerinden birisi olan su ısıtıcısının önerilen sisteme dönüştürülmeden önceki durumunu saptayabilmek için testler yapılıp ölçümler alınmıştır. Bu sayede yük karakteristiği ve güç değerleri teyit edilmiştir.

Şekil 6.10' de Su ısıtıcısının şebekeye direkt bağlanması durumu için alınacak ölçümlere göre hazırlanmış test düzeneğini göstermektedir.

Şekil 6.11' de Su ısıtıcısının şebekeye direkt bağlanması durumunda terminallerinden alınan ölçümleri göstermektedir. Burada, yeşil renkli sinyal Şebeke Gerilimini, pembe renkli sinyal Şebekeden Çekilen Akımı, sarı renkli sinyal diğer sinyallerin matematiksel yolla hesaplanması sonucu ortaya çıkan Şebekeden Çekilen Gücü göstermektedirler. Buradaki matematiksel yöntem, osiloskop üzerindeki matematik fonksiyonu kullanılarak hesaplanan değeridir.



Şekil 6.10 Su ısıtıcısının şebekeye direkt bağlanması için hazırlanan test düzeneği



Şekil 6.11 Su ısıtıcısının şebeke bağlantısındaki gerilim-akım-güç durumu

6.3 Şebekeden Çalışan Blender

Tez kapsamında seçilen diğer Küçük Ev Aleti Blenderdır. Bu yükün dinamik olması nedeniyle ölçümlerde stabil bir durum yaratmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ürünü zorlayarak çekilebilecek en yüksek güç değeri gözlenilmiştir. Ayrıca ölçümler için gerekli koşullar sabit sıvıların motor milini zorlayacağı kadar olacak şekilde karar verilmiştir. Ürünün kullanım alışkanlıkları bu kararın doğruluğunu desteklemektedir.

Şekil 6.12' de Blender'ın şebekeye direkt bağlanması durumu için alınacak ölçümlere göre hazırlanmış test düzeneğini göstermektedir.

Şekil 6.13' de Blender'ın şebekeye direkt bağlanması durumunda terminallerinden alınan ölçümleri göstermektedir. Burada, yeşil renkli sinyal Şebeke Gerilimini, pembe renkli sinyal Şebekeden Çekilen Akımı, sarı renkli sinyal diğer sinyallerin matematiksel yolla hesaplanması sonucu ortaya çıkan Şebekeden Çekilen Gücü göstermektedirler.

6.4 Kablosuz Güç Transferi Sistemi

Tez kapsamında birincil taraf için tasarlanan elektronik kart ve bobin grubunun ikincil taraf olmadan çalıştırılması durumu için testler yapılmıştır. İkincil tarafın sisteme dahil olmaması durumunda elektronik kontrol sistemi Yarım-Köprü Devresindeki sürme sinyallerinin seçilen en yüksek frekans 75kHz'de uygulanmasını sağlamaktadır.

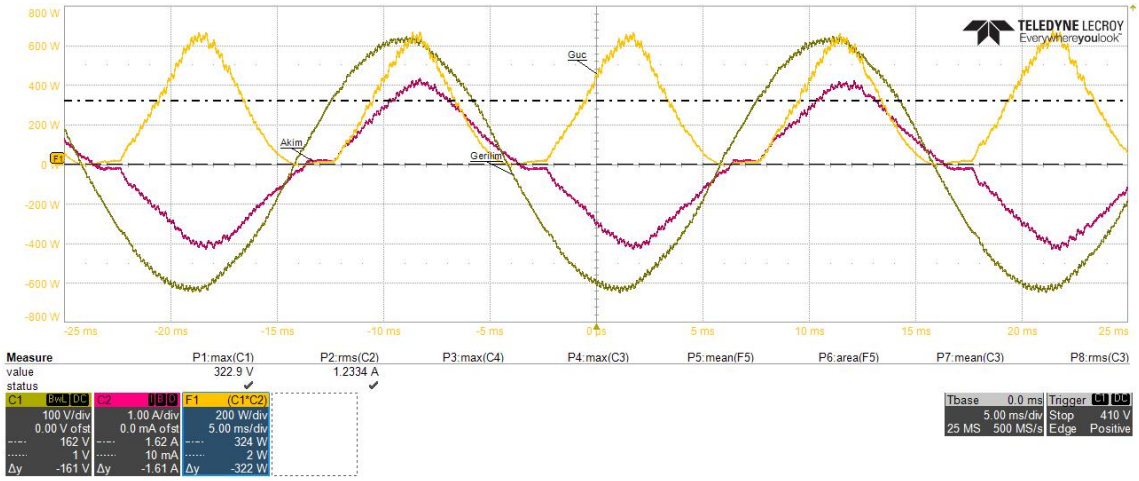
Ayrıca sürme sinyallerinin düşük seviyede tutularak kart üzerinde sadece iç besleme devresinin aktif olduğu durum da bulunmaktadır. Bu durumda sistem bekleme modu olarak tanımlanan durumdadır. Kullanıcı tarafından çalışma moduna geçirilmek istendiğinde yukarıda bahsedilen 75kHz çalışma koşuluna geçilir. Bu esnada ikincil tarafın algılanması ve eşleşmesi durumunda güç arttırımı durumuna geçilebilir.

Şekil 6.14' de tez kapsamında tasarlanan birincil taraf için tüm sistemin çizimi görülmektedir. Buradaki konsept tasarımda bobin yerleşimi, elektronik kart ve fan konumu belirtilmiştir.

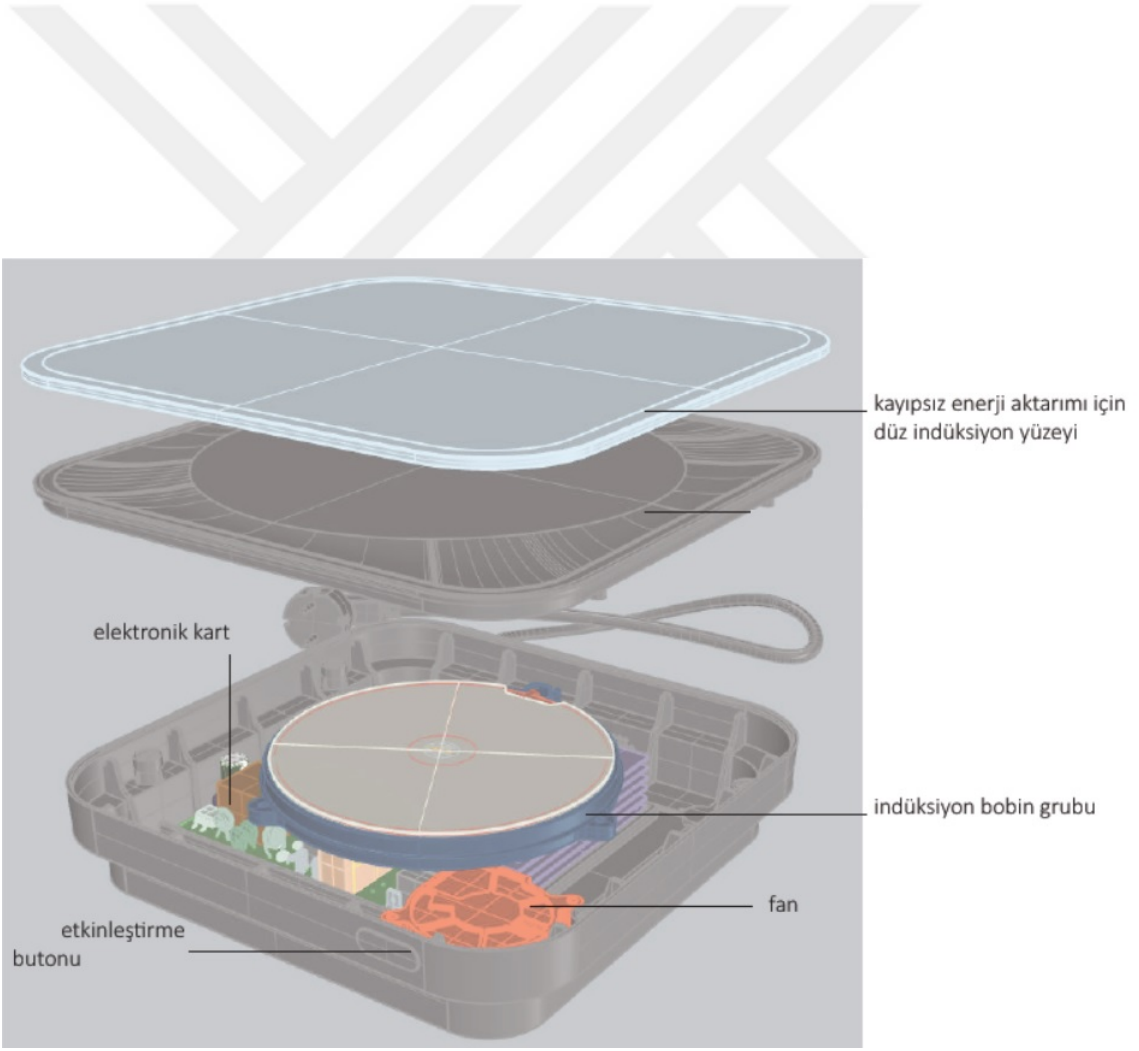
Şekil 6.15' de tez için yapılan demo ürünün görseli bulunmaktadır. İlk prototip için elektronik kart boyutları sınırlandırılmadan ölçümler için ideal olacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. Bu nedenle Şekil 6.14' de görülen çizim ile uyumlu boyutlarda değildir. Ancak bobin yerleşimi çizimi yapılan plastik gövde üzerine yapılmıştır. Böylece doğrulanan kart tasarımı sonrasında yeni boyutlarda bir elektronik kart çizilerek plastik gövdeye yerleştirilebilir.

Şekil 6.16' de ikincil tarafın bulunmadığı sadece birincil tarafın 75kHz sürme sinyali ile

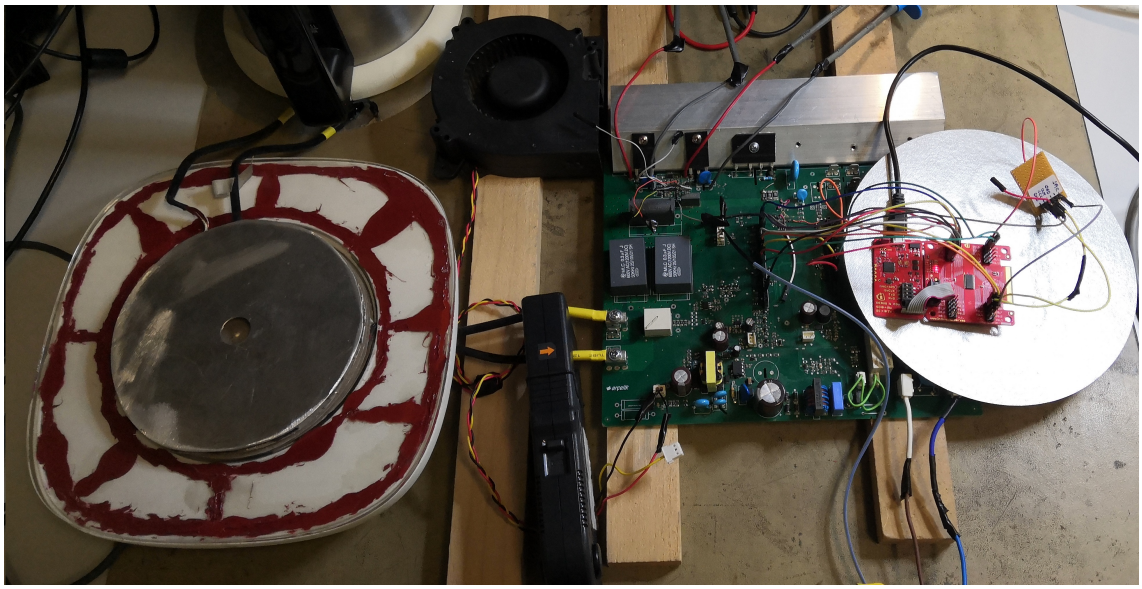
Şekil 6.12 Blender şebekeye direkt bağlanması için hazırlanan test düzeneği



Şekil 6.13 Blender'ın şebeke bağlantısındaki gerilim-akım-güç durumu

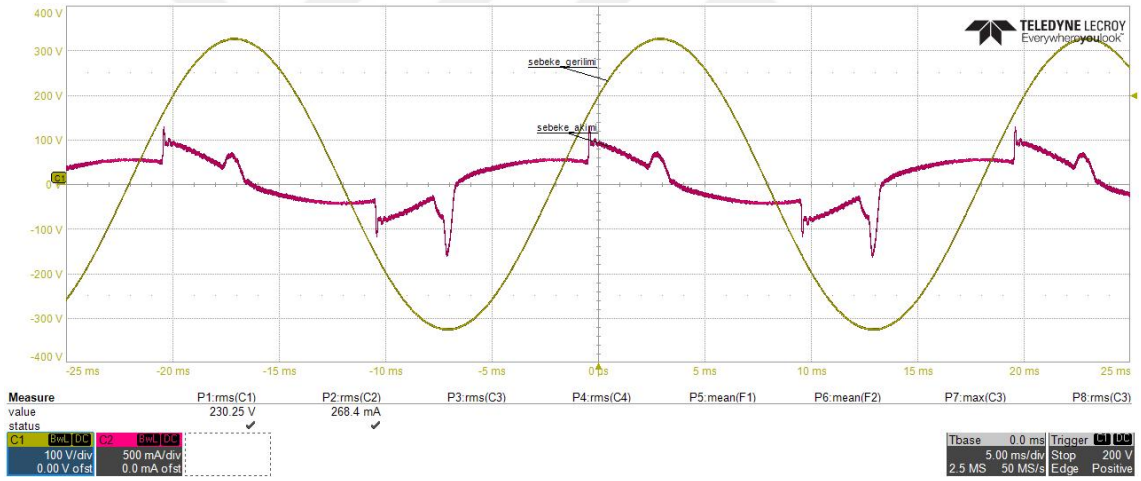


Şekil 6.14 Birincil taraf için tasarlanan sistemin CAD çizimi



Şekil 6.15 Birincil tarafın prototip görseli

çalıştığı durumda şebeke girişinden ölçülen Gerilim ve Akım dalga şekli görülmektedir.

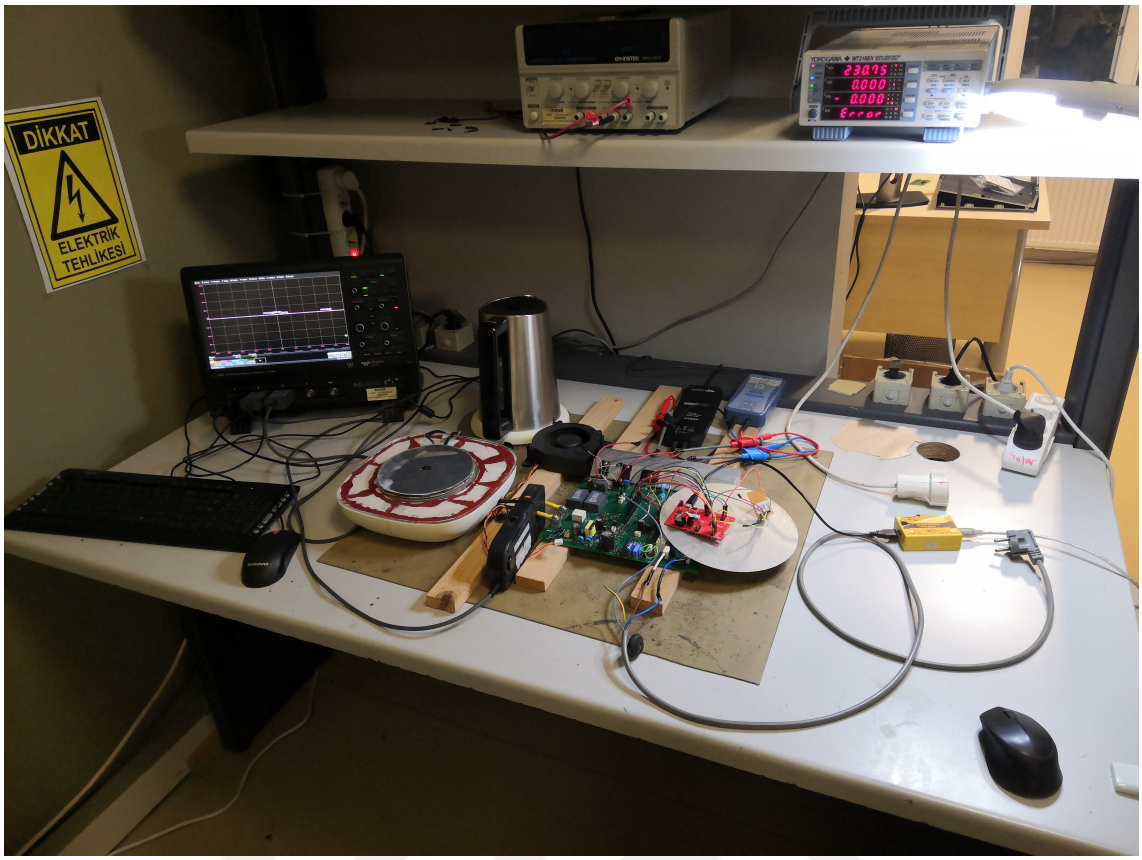


Şekil 6.16 Sistem tarama durumundayken şebekeden ölçülen gerilim-akım değerleri

6.5 Kablosuz Güç Transferi Sistemi ile Su Isıtıcısı

Tez kapsamında yapılan tasarımın testleri için kurulan sistem Şekil 6.17' de görülmektedir. Bu test düzeneği üzerinde bobinler arası hava aralığı sabit tutularak farklı güç değerleri için sistemin farklı noktalarından ölçümler alınmıştır.

Öngörülen tasarımda kullanıcı tarafından hava aralığını değiştirecek bir sistem müdahalesi bulunmamaktadır. Bu nedenle plastik gövdeler ile sabitlenen hava aralığı ölçümler boyunca korunmuştur.



Şekil 6.17 Su ısıtıcısı yükü ile kurulan test sistemi

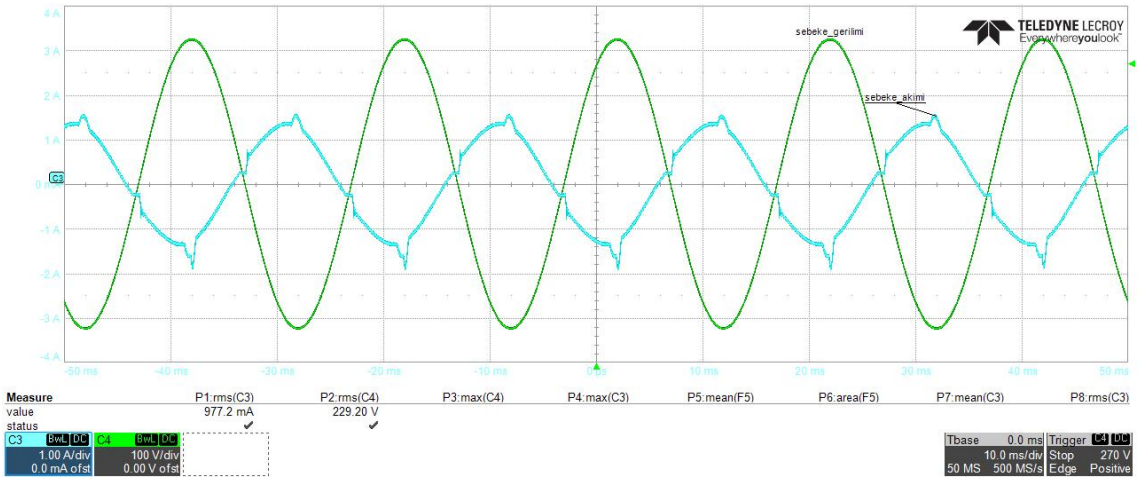
6.5.1 Şebeke Girişinden Alınan Ölçümler

Sistemin şebeke bağlantısından alınan Gerilim ve Akım ölçümleri için Su Isıtıcısının farklı güç değerlerinde durumlar oluşturulmuştur.

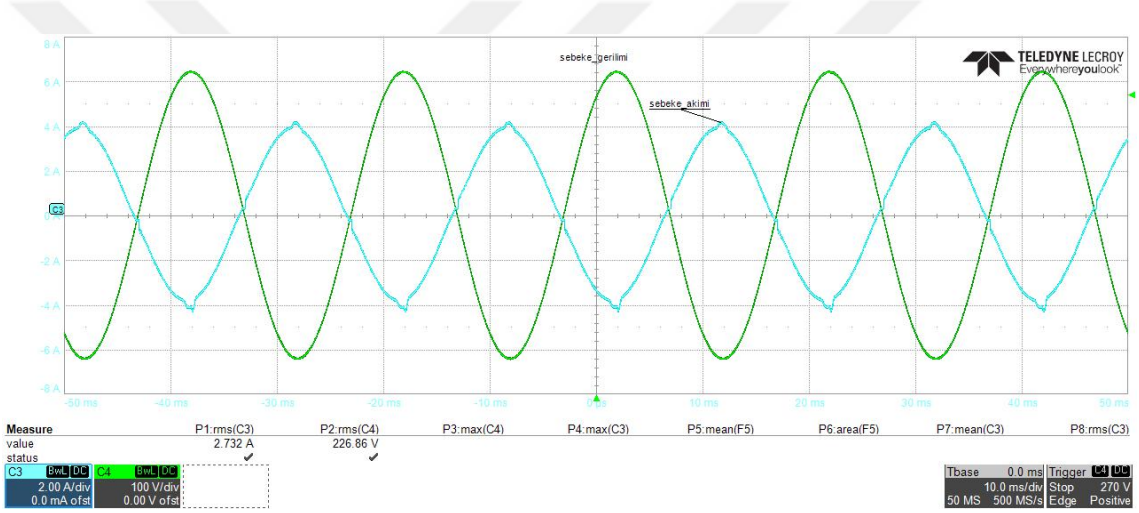
Şekil 6.18, 6.19, 6.20 ve 6.21' da görülen grafikler elektronik kartın şebeke girişindeki Gerilim-Akım değerlerini göstermektedir. Yeşil renk Şebeke Gerilimini, mavi renk şebekeden çekilen Akımı belirtmektedirler. Burada şekillerin birbirini kapatmaması için Akım ölçüm sinyali ters çevrilmiştir. Böylece 180° faz farkı ile rahatlıkla yorumlanabilmektedir.

Anahtarlama frekansı düştükçe yani endüktif bölge içerisinde rezonans frekansına doğru yaklaşıldıkça doğal olarak aktarılan güç değeri artmaktadır. Görüleceği üzere giriş gerilimi doğrultulduktan sonra ihmal edilebilecek düzeyde küçük giriş kapasitesi kullanıldığı için giriş akımının sinusoidale yakın karakterde olduğu dalga formlarından da gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle PFC(Güç faktörü düzeltme) ihtiyacı oluşmamaktadır.

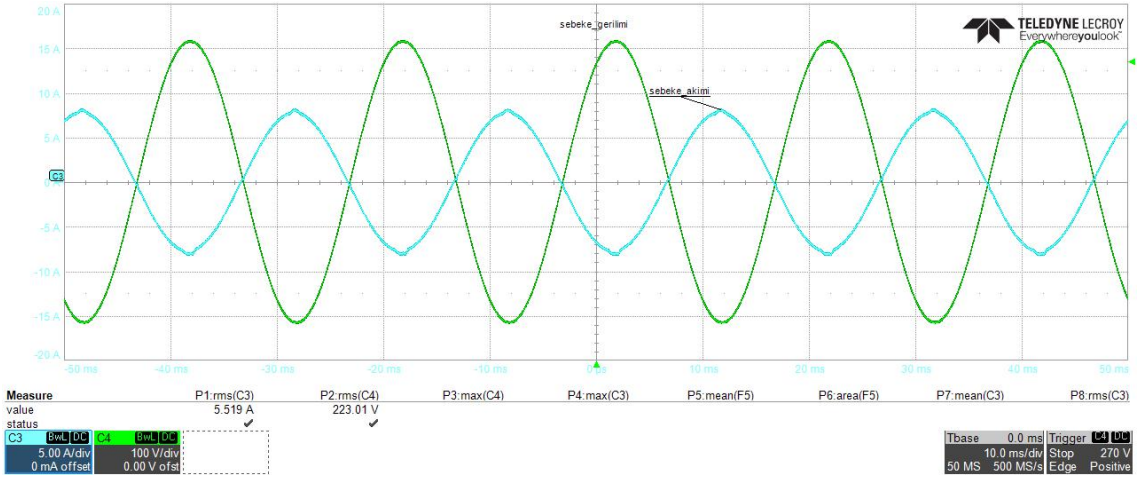
Şekil 6.18' de dalga formları birbirini kapatmaması için Akım ölçüm sinyali ters çevrilmiştir. Böylece 180° faz farkı ile rahatlıkla yorumlanabilmektedir.



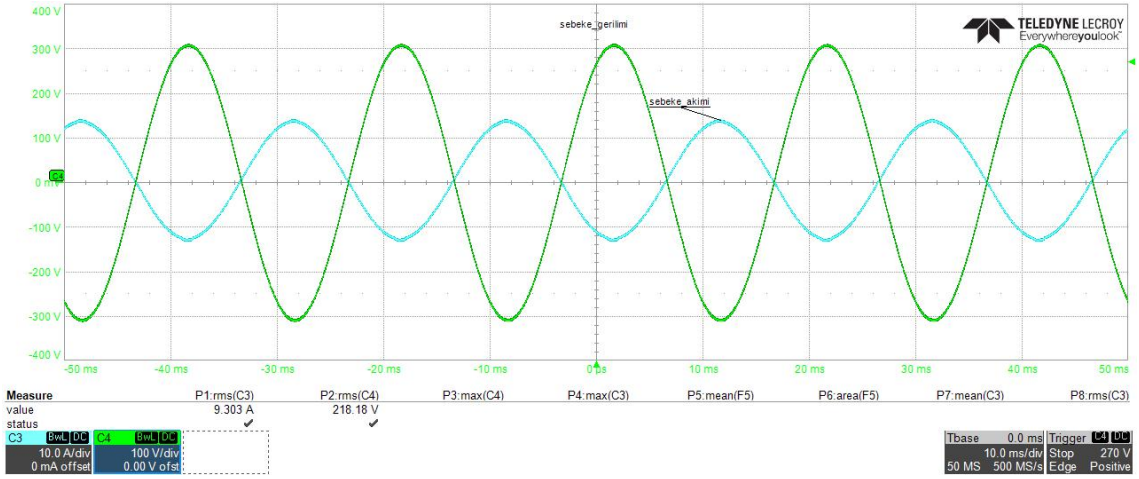
Şekil 6.18 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği



Şekil 6.19 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği



Şekil 6.20 Su ısıtıcısı ile 30kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği



Şekil 6.21 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği

6.5.2 Birincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler

Şekil 6.17' de görülen sistem üzerinde Birincil bobine ait ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler için hava aralığı sabit tutulmuş ve Su Isıtıcısının farklı güç değerleri için ölçümler alınmıştır. Böylece Bobin Gerilimi ve Akımı arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

Şekil 6.22, 6.23, 6.24 ve 6.25' da görülen grafikler birincil taraftaki elektronik kartın bobin terminallerinden alınan Gerilim-Akım dalga şekillerini göstermektedir. Yeşil renk Bobin Gerilimini, mavi renk Bobin Akımını belirtmektedirler.

Görüleceği üzere bobin akımı endüktif bir karakteristik göstermektedir. Güç artışıyla birklikte akım sinusodial forma yaklaşmıştır. Bunun sebebi rezonans frekansına yaklaşınca omik karakteristiğin baskın hale gelmesidir.

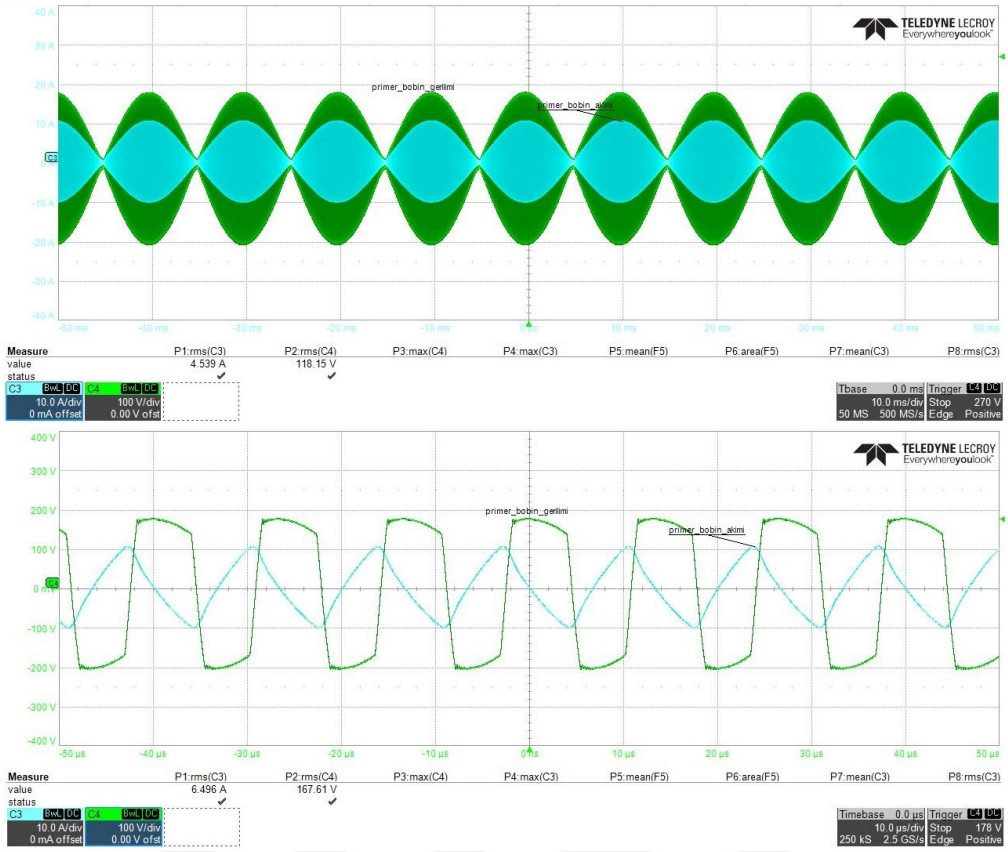
6.5.3 İkincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler

Tez kapsamında tasarlanan sistemde ikincil tarafta Su Isıtıcısı bulunması durumunda ikincil taraf bobin gerilimi ve akımı incelenmiştir. Su ısıtıcısı sabit direnç yükü olması nedeniyle omik karakteristikte grafikler elde edilmiştir. Hava aralığı sabit tutularak farklı güç değerleri için ölçümler alınmıştır.

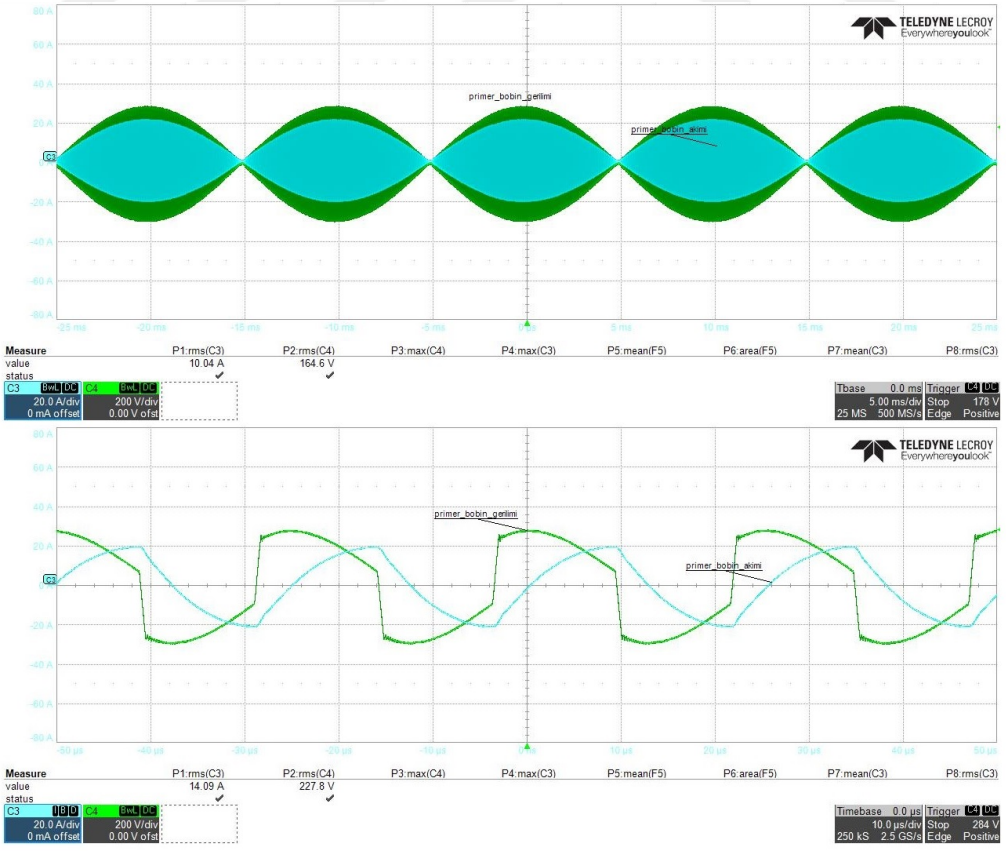
Şekil 6.26, 6.27, 6.28 ve 6.29' da görülen grafikler ikincil taraftaki elektronik kartın bobin terminallerinden alınan Gerilim-Akım dalga formlarını göstermektedir. Yeşil renk Bobin Gerilimini, pembe renk Bobin Akımını belirtmektedirler.

6.5.4 IGBT Üzerinden ve Birincil Bobin Kablosundan Alınan Ölçümler

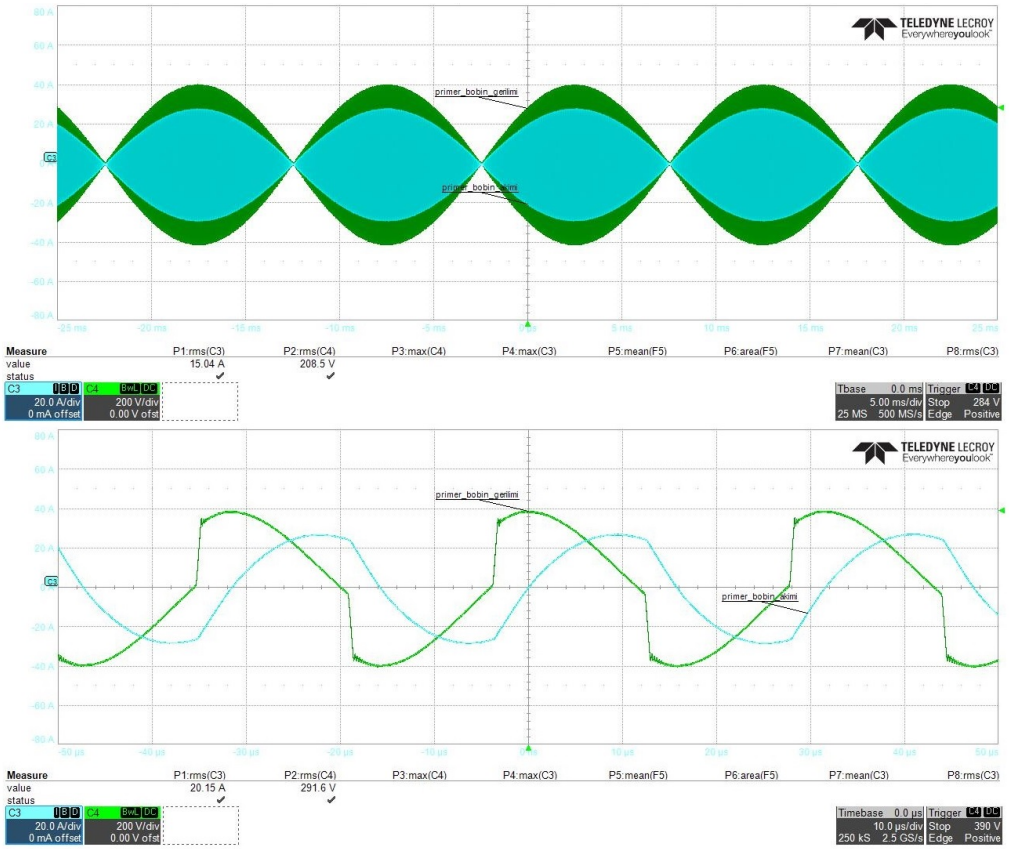
Şekil 6.17' de görülen sistem üzerinde bulunan anahtarlama elemanı IGBT'den ölçümler alınmıştır. Bu sayede sürme sinyali frekansı, ölü-zaman ile birlikte bobin



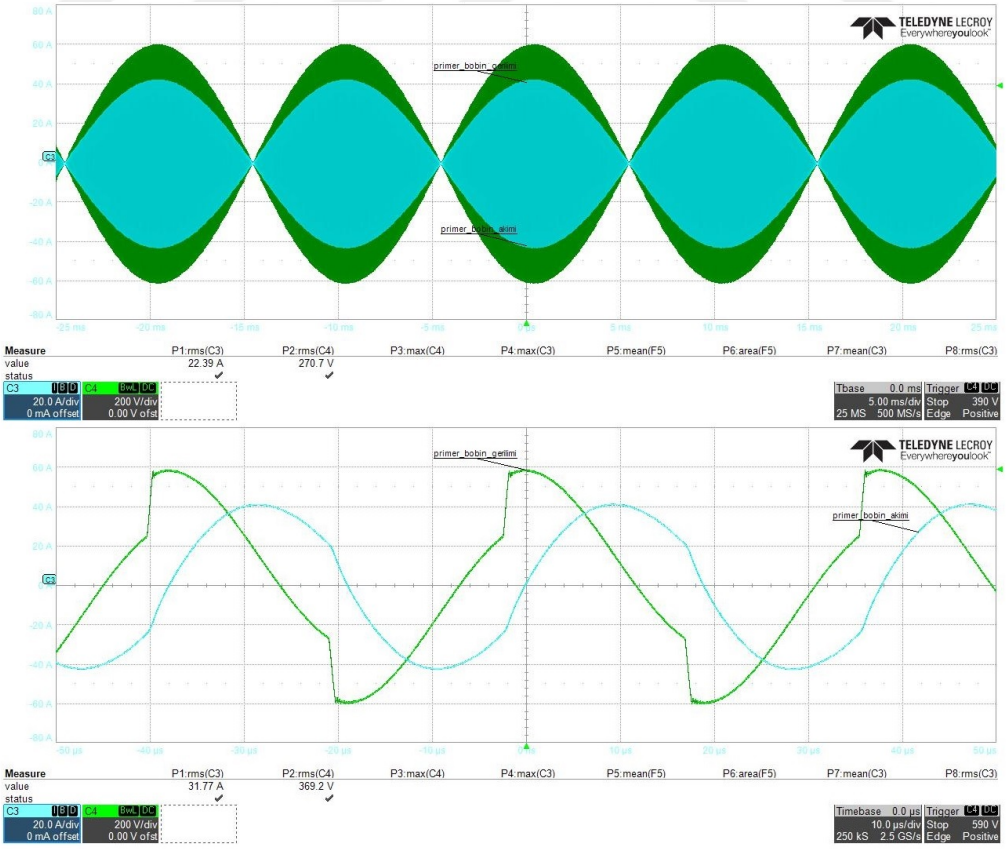
Şekil 6.22 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği



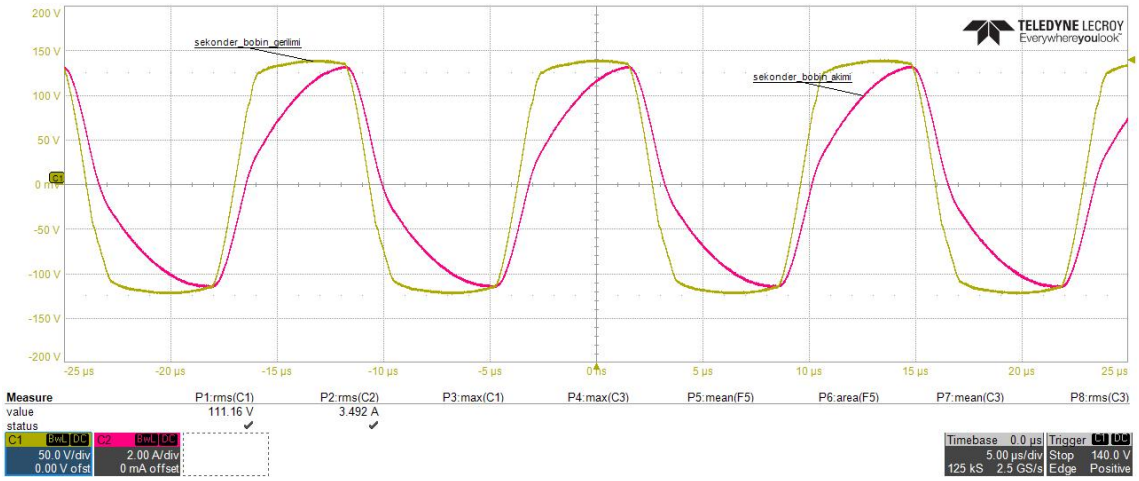
Şekil 6.23 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği



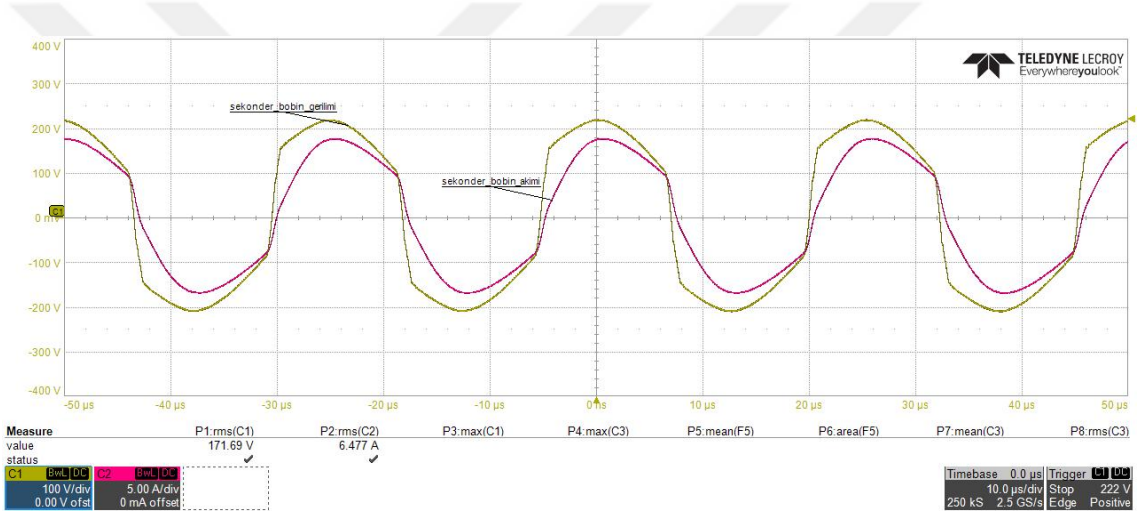
Şekil 6.24 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği



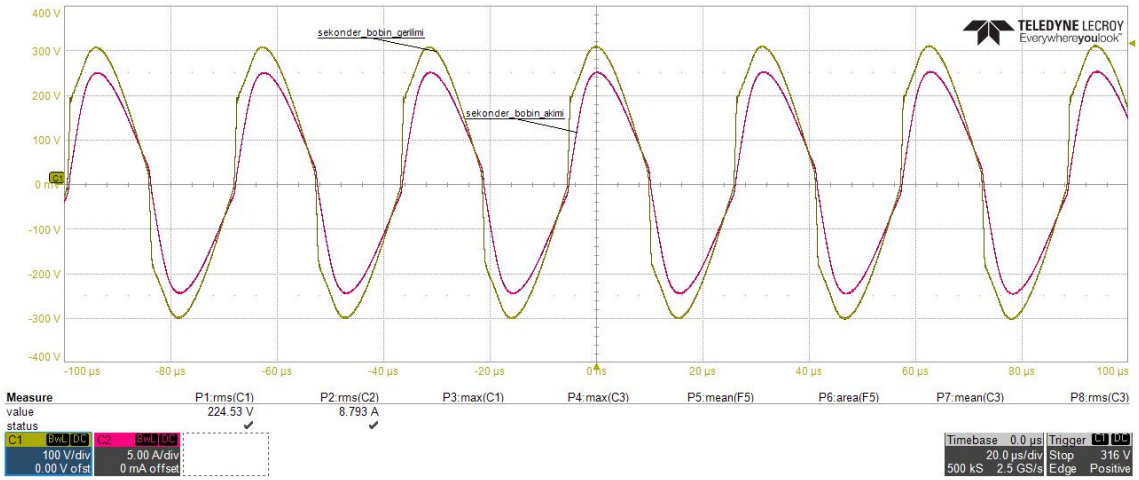
Şekil 6.25 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği



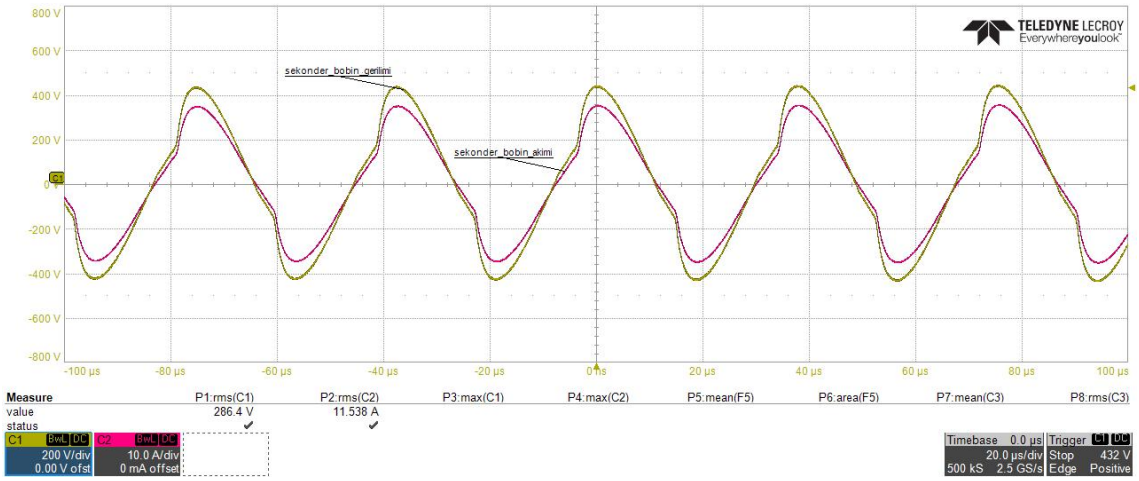
Şekil 6.26 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği



Şekil 6.27 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği



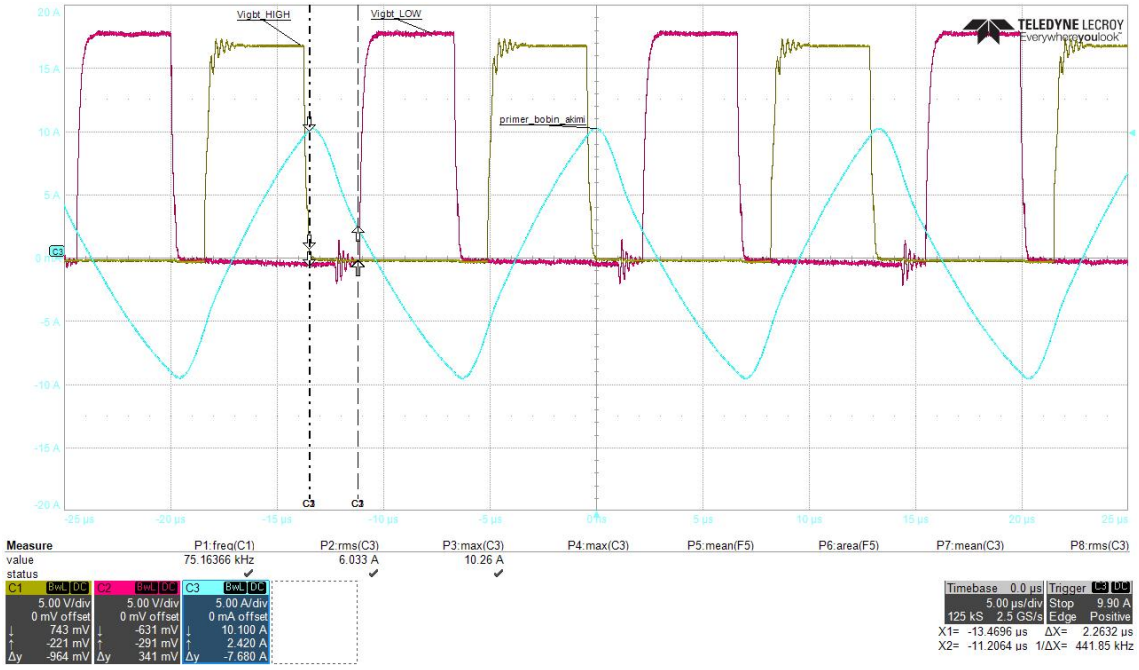
Şekil 6.28 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği



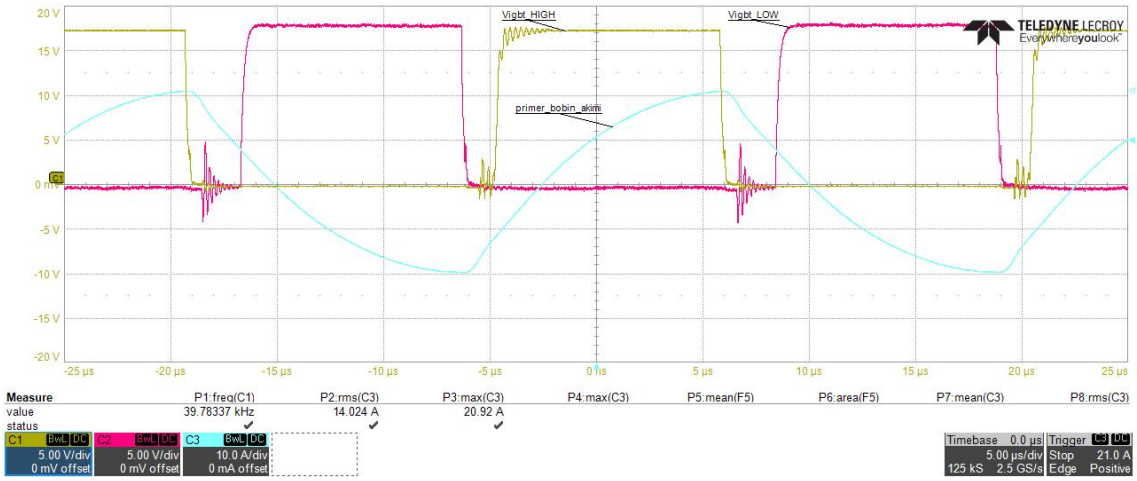
Şekil 6.29 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği

akımının senkronize değişimi gözlemlenmiştir.

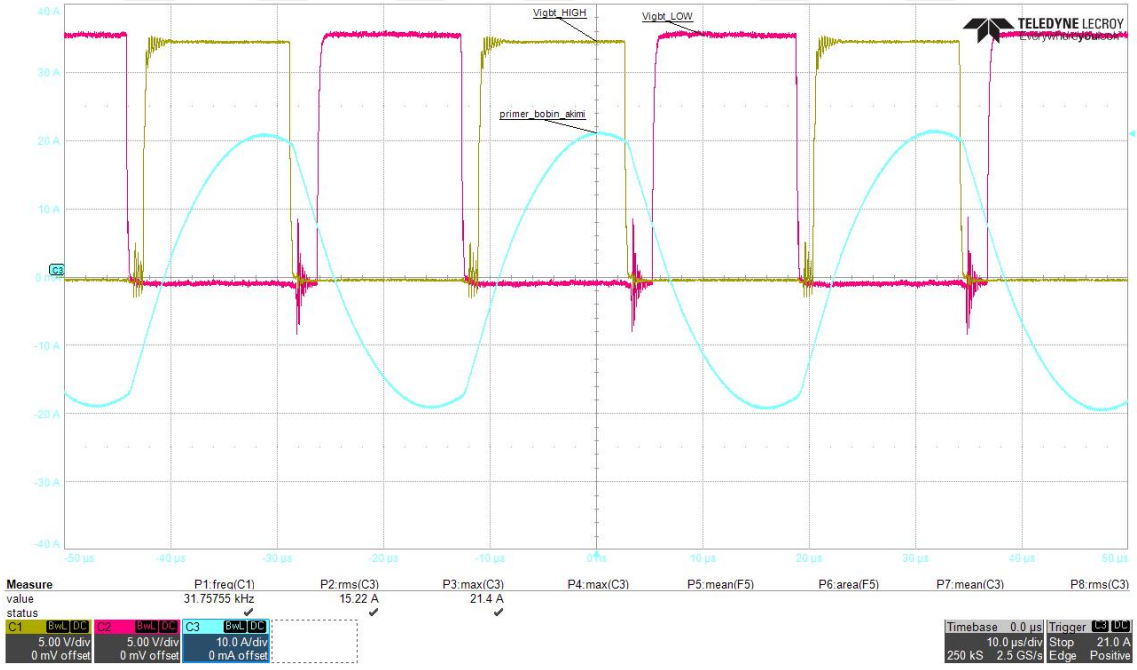
Şekil 6.30, 6.31, 6.32 ve 6.33' da görülen grafikler Yarım-Köprü Seri Rezonanslı Evirici üzerinde bulunan IGBT'lerin Gate-Emitter bağlantı noktalarından ve Birincil bobin kablosundan alınmıştır. yeşil renk Üst anahtar olarak kabul edilen IGBT'nin Gate-Emitter arası Gerilimi, pembe renk alt anahtar olarak kabul edilen IGBT'nin Gate-Emitter arası Gerilimi, mavi renk Birincil Bobin Akımını göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere alt ve üst anahtar sürme sinyalleri arasında $2\mu s$ ölü zaman süresi bırakılmıştır.



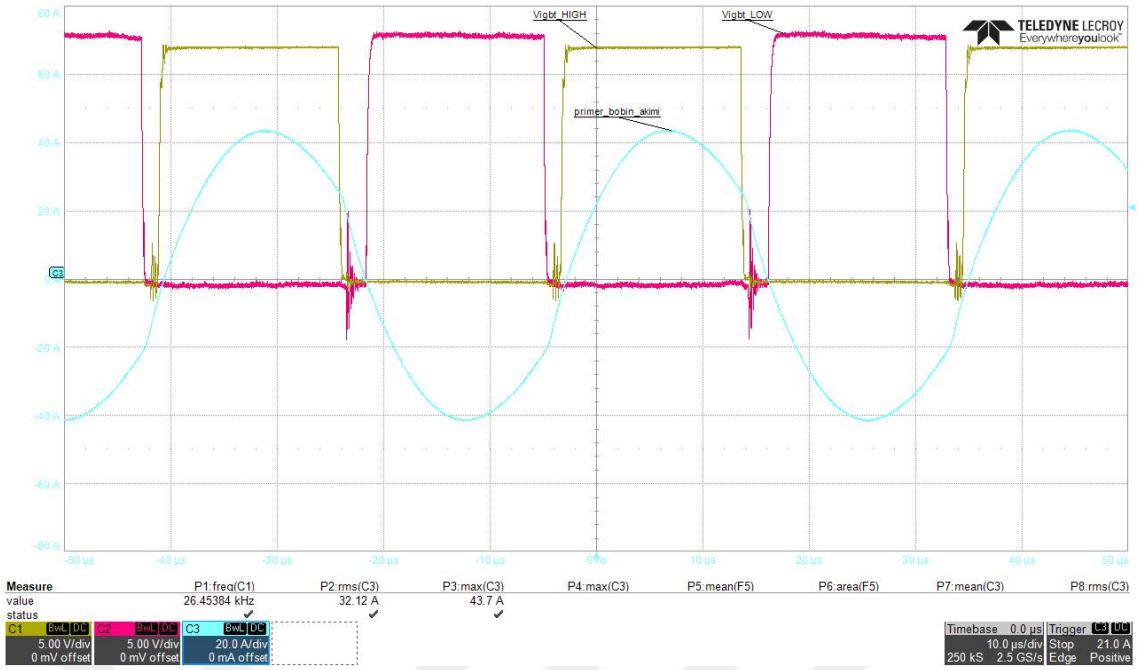
Şekil 6.30 Su ısıtıcısı ile 75kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği



Şekil 6.31 Su ısıtıcısı ile 39kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği



Şekil 6.32 Su ısıtıcısı ile 31kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği



Şekil 6.33 Su ısıtıcısı ile 26kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği

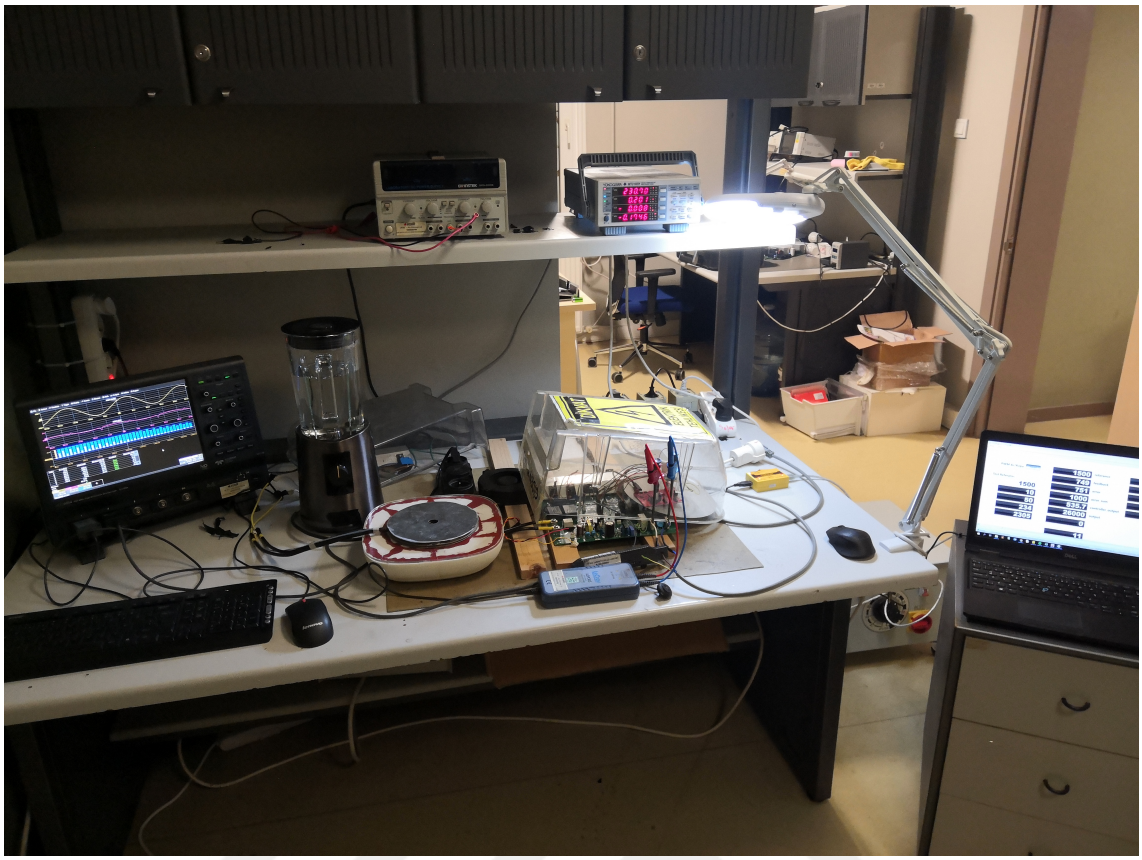
6.6 Kablosuz Güç Transferi Sistemi ile Blender

Tez kapsamında yapılan tasarımın testleri için kurulan sistem 6.34' de görülmektedir. Blender ile sistemde dinamik yük modellenmiştir. Bununla birlikte kullanılan blender düşük güçlü çalışma seyrinde bulunmaktadır. Motor milinin sıkışması durumunda anlık olarak yüksek akım çekme formuna girerek mili döndürmeye çalışmaktadır. Kullanım alışkanlıkları ve bıçak tasarımı sayesinde bu zorlanma durumları ivedilikle ortadan kalkabilmektedir. Zorlanma periyodu içerisindeki yüksek güç isteğini tasarlanan sistem tolere edebilmektedir.

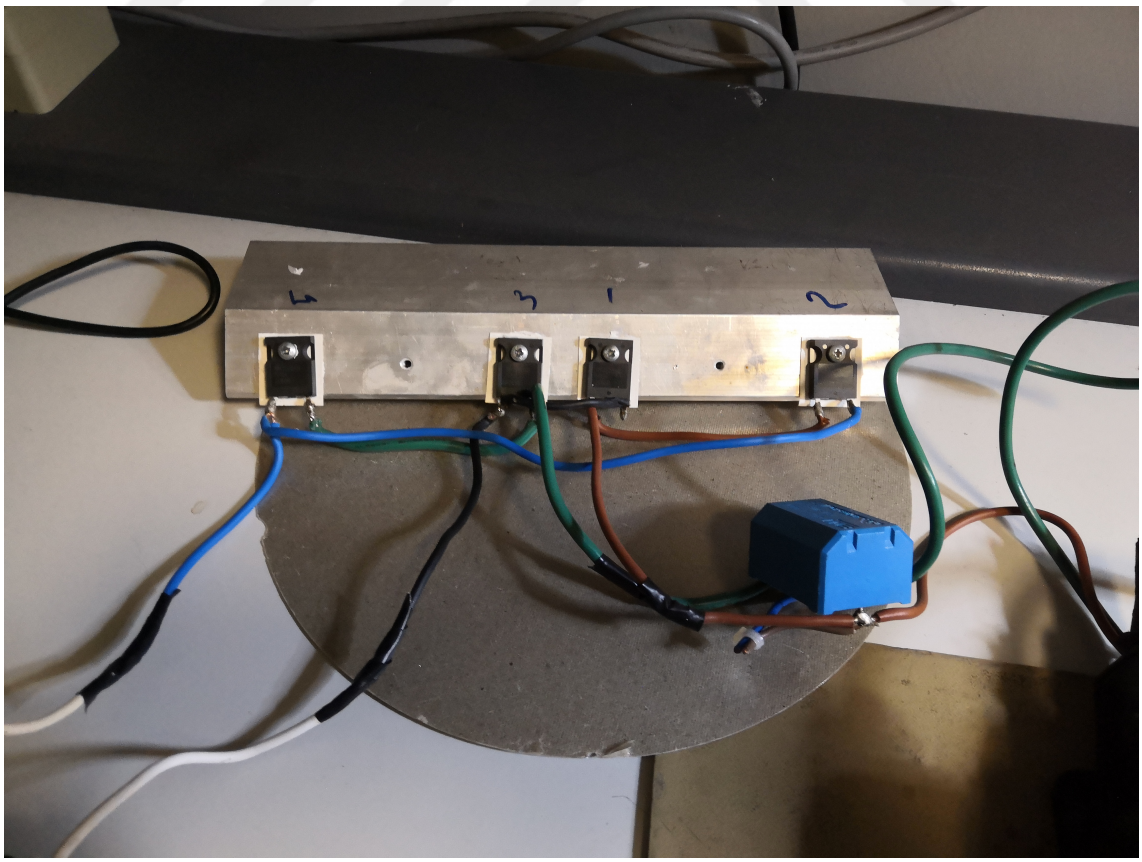
Sistemin testlerinin tekrarlanabilir olması ve genel ürün kullanımına daha uygun testler yapabilmek için üründe yük olarak sıvılar ile çalıştırılmasına karar verilmiştir. Bu sayede daha güvenilir test sonuçlarına erişilmiştir.

Tasarım konu başlığı altında bahsedilen SiC Diyotlar ile tasarlanan köprü diyot montajı Şekil 6.35' de görülmektedir. Testler esnasında ölçümlerin kolay alınabilmesi ve düzenli bir sistem olması için tek bir soğutucu üzerinde montajları yapılmıştır. Ancak ürün içerisinde kapalı plastik gövdeye yerleştirilirken ayrık ve daha küçük boyutlu soğutucular üzerine montajları yapılmıştır.

Buradaki kablolu bağlantıda kablolar olabildiğince yüksek kesitli seçilerek diyotlar arasındaki yol endüktans değeri azaltılmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.34 Blender yükü ile kurulan test sistemi

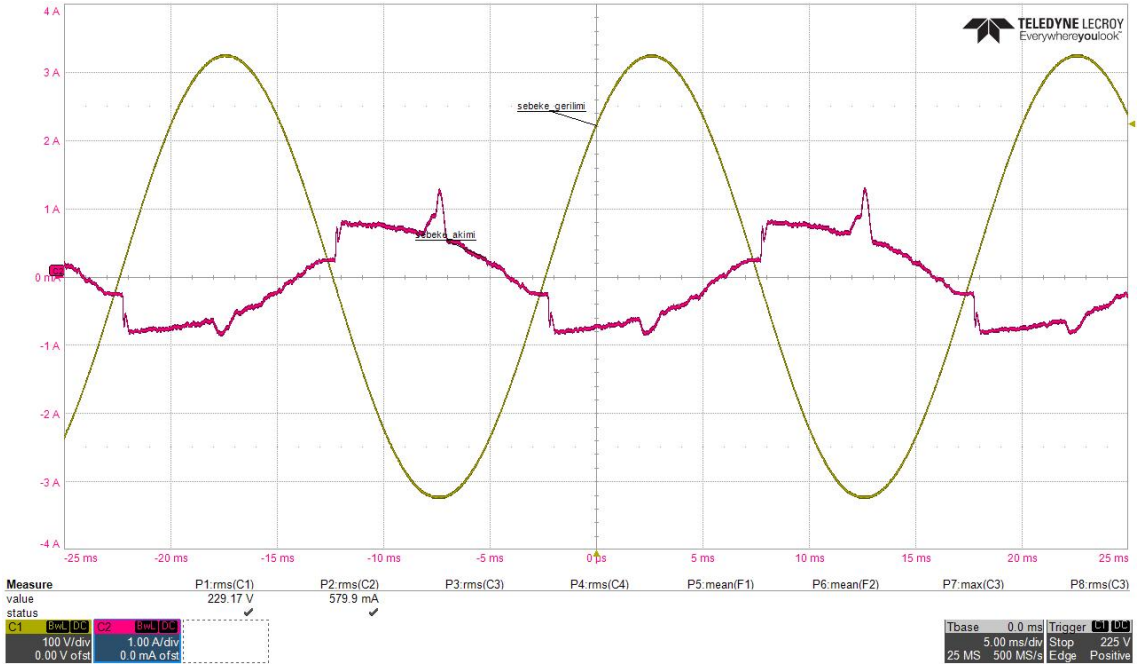


Şekil 6.35 İkincil taraf için kurulan köprü diyot devresi

6.6.1 Şebeke Girişinden Alınan Ölçümler

Sistemin motor yükü ile çalışması durumunda şebeke girişinden alınan ölçümler ile şebekeden çekilen akımın formu incelenebilmektedir. Motorun ihtiyaç duyduğu gerilimi ikincil bobinden alınan gerilimin yüksek hızlı doğrultucu ile doğrultularak motor terminallerine uygulanması ile sağlanır.

Şekil 6.36' de sistemin 75kHz sürme sinyali ve motor yükü ile çalışması esnasında şebeke girişinden alınan gerilim ve akım dalga formlarını göstermektedir. Yeşil renk şebeke gerilimini, pembe renk şebeke akımını ifade eder.

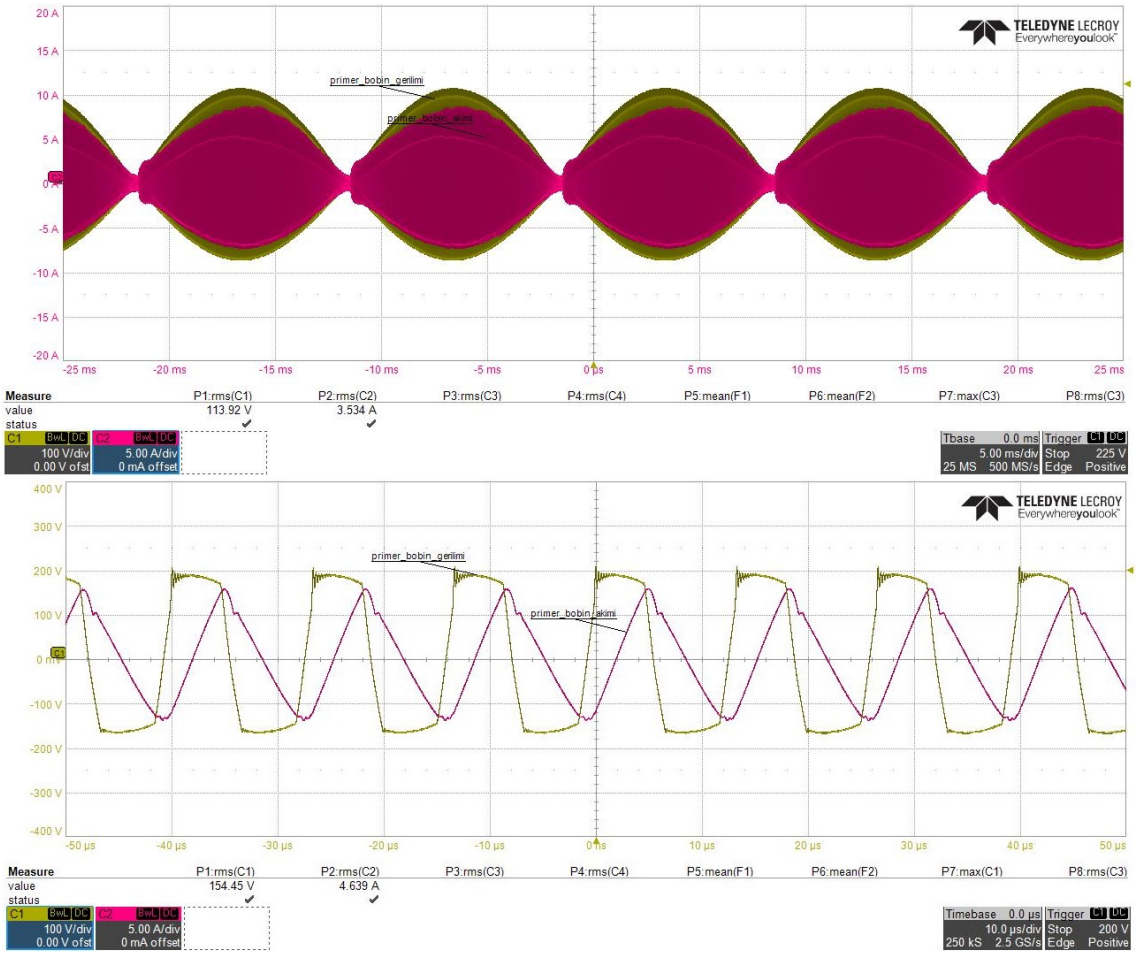


Şekil 6.36 Blender ile 75kHz çalışma şebeke girişi gerilim-akım grafiği

6.6.2 Birincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler

Birincil taraf bobin gerilimi ve akımı zarf görüntüsü incelendiğinde sistemin şebekenin doğrultulmuş halini takip ettiği görülebilir. Detaylı olarak zaman ölçeği küçültülürse yarım-köprü rezonans devresindeki bobin gerilim karakteristiği ve buna bağlı olarak bobinin endüktif karakteristiği görülebilir.

Şekil 6.37' de yeşil renk Birincil Bobin Gerilimini, pembe renk Birincil Bobin Akımını göstermektedir. Burada bobin akımı karakteristiğine bakılarak rezonans noktasından uzak bir noktada çalışma yapıldığı saptanır. Ancak Blender'ın çalışması esnasında ihtiyaç duyduğu güç miktarının düşük olması ve bu sistemin su ısıtıcısı gibi yüksek güçlü bir ürünü de çalıştırmaya uygun olacak şekilde tasarlanması nedeniyle bu tarz bir çalışma gerektirir.

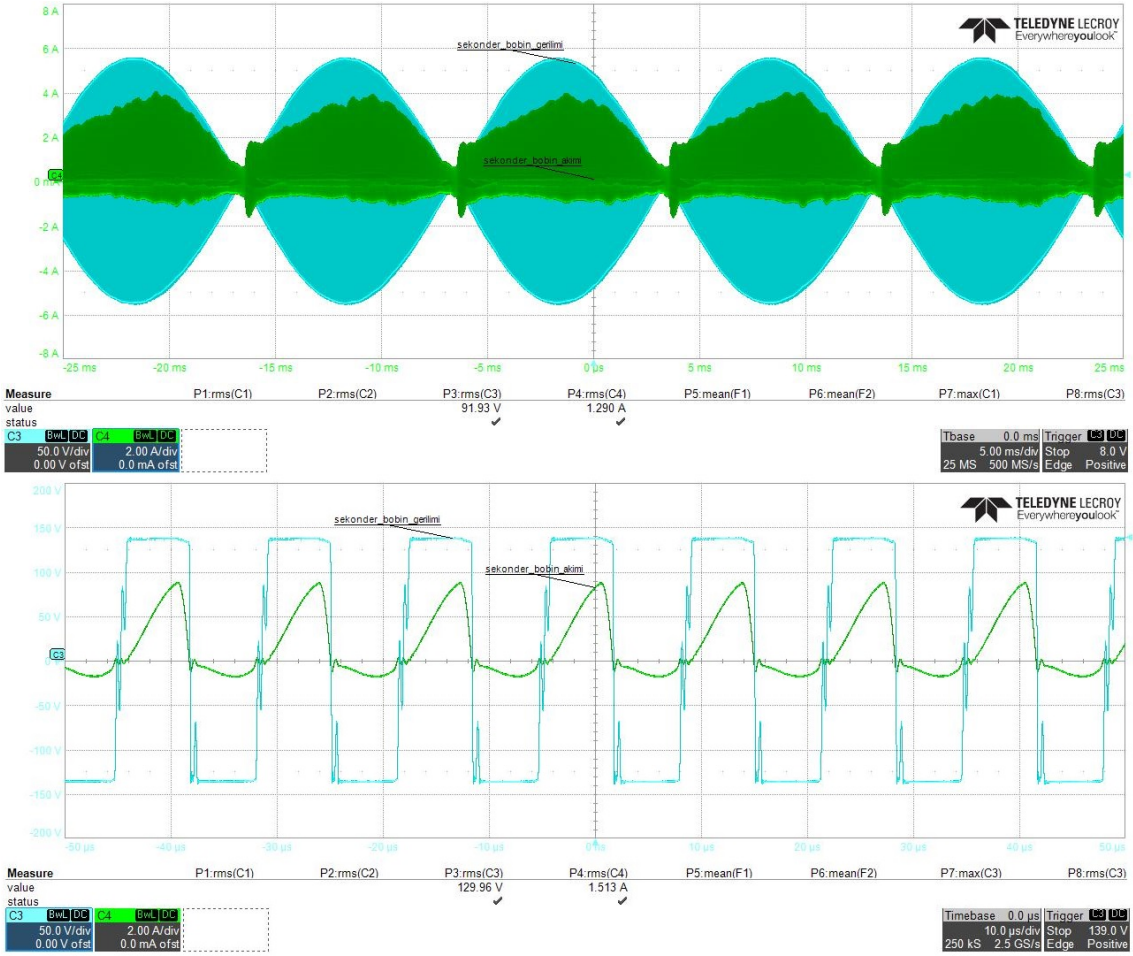


Şekil 6.37 Blender ile 75kHz çalışma birincil bobin gerilim-akım grafiği

6.6.3 İkincil Taraf Bobin Terminallerinden Alınan Ölçümler

Şekil 6.38' de mavi renk İkincil Bobin Gerilimini, yeşil renk İkincil Bobin Akımını göstermektedir.

Bu çalışmada yük akımının şeklini motor akımı belirlemektedir.



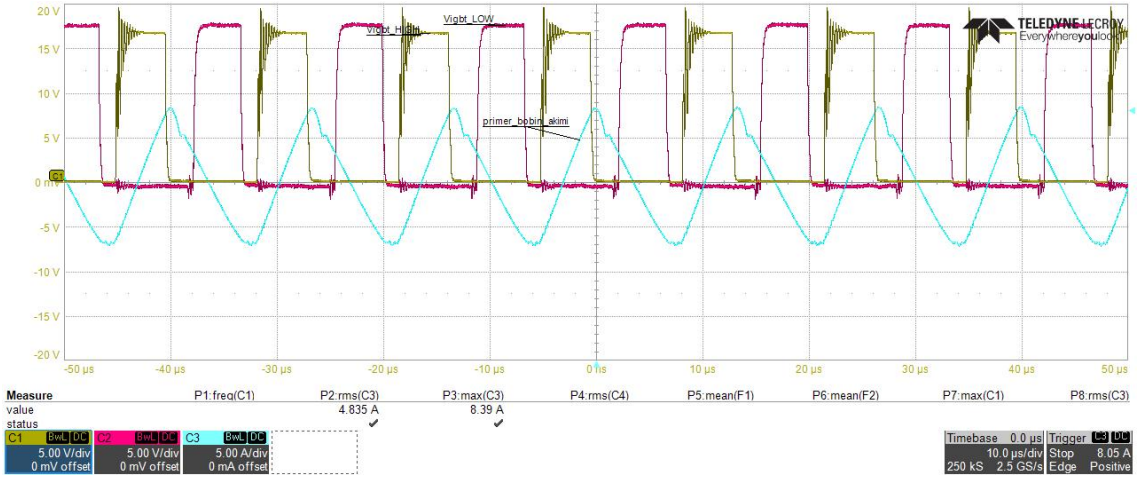
Şekil 6.38 Blender ile 75kHz çalışma ikincil bobin gerilim-akım grafiği

6.6.4 IGBT Üzerinden ve Birincil Bobin Kablosundan Alınan Ölçümler

Şekil 6.39' de yeşil renk Üst IGBT Gate-Emitter Gerilimini, pembe renk Alt IGBT Gate-Emitter Gerilimini, mavi renk birincil bobin akımını göstermektedir.

6.7 Şebeke Giriş Akım Harmoniklerinin Ölçümü ve Analizi

Tez kapsamında tasarlanan sistemin harmoniklerini incelemek ve güç faktörünü teyit etmek amaçlı şebeke girişine bağlanan osiloskop probları ile ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler su ısıtıcısı yükü ile sistemin çalışabileceği en yüksek güç değeri olan

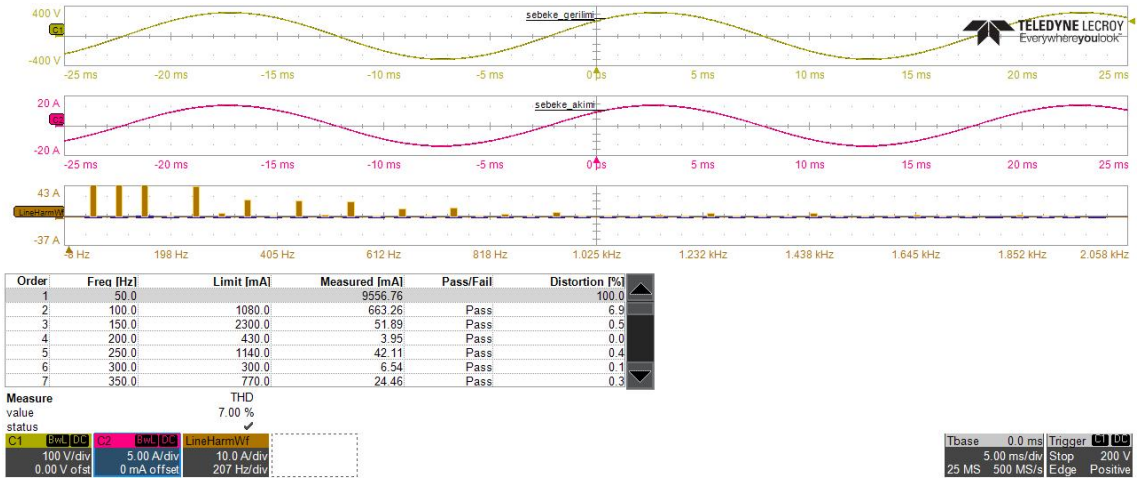


Şekil 6.39 Blender ile 75kHz çalışma IGBT gate-emitter ve bobin akımı grafiği

2200W'da ve blender yükü ile sistemin çalışabileceği en düşük güç olan 100W'da alınmıştır.

Kullanılan osiloskopta bulunan güç analizi eklentisi yardımı ile harmonik ölçümlerinde EN 61000-3-2 standartı kapsamında sınıf A, B, C veya D için limitler ile karşılaştırmalar yapılabilmektedir. Tasarlanan sistem belirtilen standartın D sınıfı içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle ölçüm değerlendirmeleri bu limitlere göre yapılmıştır.

Şekil 6.40' de görülen yeşil renk Şebeke Gerilimini, pembe renk Şebeke Akımını, sütunlar halinde gözüken üçüncü ölçüm alanı karşılaştırmalı olarak harmonik değerlerini göstermektedir. Ayrıca farklı frekans değerleri için anlık değerleri ve limitleri gösteren tablo bulunmaktadır. Bu tablonun detaylı hali Tablo 6.1' dedir.



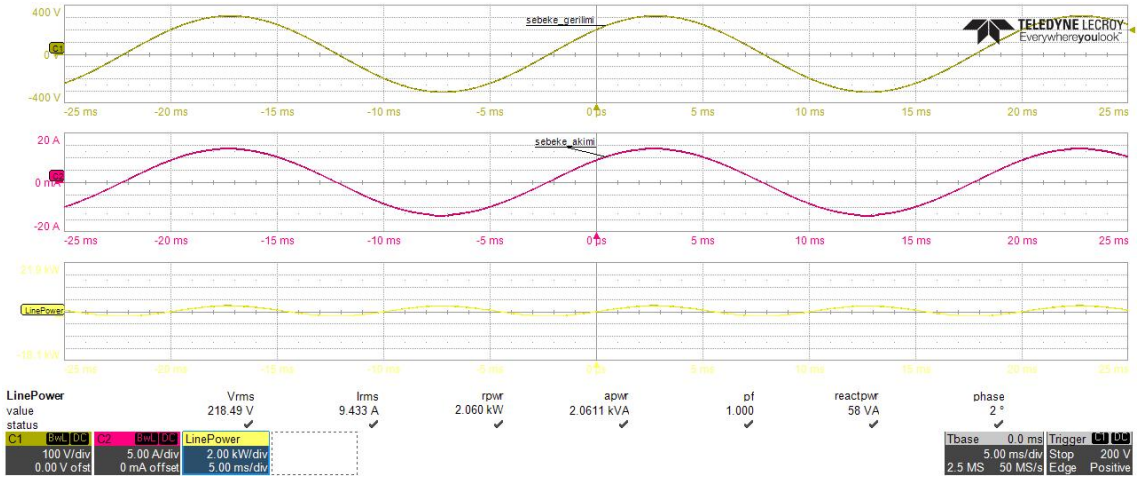
Şekil 6.40 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma şebeke giriş akım harmoniği ölçüm grafiği

Şekil 6.41' de görülen yeşil renk Şebeke Gerilimini, pembe renk Şebeke Akımını, sarı renk Şebekeden Çekilen Gücün matematiksel yöntemler ile elde edilmiş halini göstermektedir. Ayrıca dalga şekillerinin altında bulunan değerler tablosunda güç

Tablo 6.1 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma harmonik ölçüm tablosu

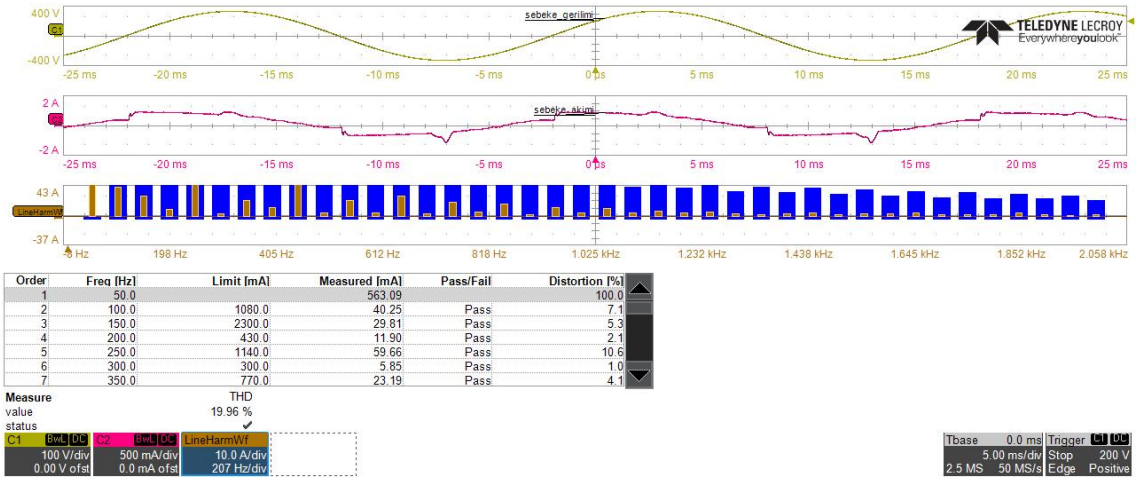
Order	Freq [Hz]	Limit [mA]	Measured [mA]	Pass/Fail	Distortion [%]
1	50	0	9556.76		100
2	100	1080	663.26	Pass	6.9
3	150	2300	51.89	Pass	0.5
4	200	430	3.95	Pass	0
5	250	1140	42.11	Pass	0.4
6	300	300	6.54	Pass	0.1
7	350	770	24.46	Pass	0.3
8	400	230	3.06	Pass	0
9	450	400	23.91	Pass	0.3
10	500	184	4.37	Pass	0
11	550	330	22.68	Pass	0.2
12	600	153.3	1.91	Pass	0
13	650	210	12.84	Pass	0.1
14	700	131.4	3.04	Pass	0
15	750	150	14.62	Pass	0.2
16	800	115	1.62	Pass	0
17	850	132.4	5.81	Pass	0.1
18	900	102.2	4	Pass	0
19	950	118.4	8.29	Pass	0.1
20	1000	92	2.78	Pass	0

faktörü değeri 1 olarak gözükmektedir.



Şekil 6.41 Su ısıtıcısı 26kHz çalışma güç faktörü ölçüm grafiği

Şekil 6.42' de görülen Blender ile çalışma esnasında yeşil renk Şebeke Gerilimini, pembe renk Şebeke Akımını, sütunlar halinde gözüken üçüncü ölçüm alanı karşılaştırmalı olarak harmonik değerlerini göstermektedir. Ayrıca farklı frekans değerleri için anlık değerleri ve limitleri gösteren tablo bulunmaktadır. Bu tablonun detaylı hali Tablo 6.2' dedir.

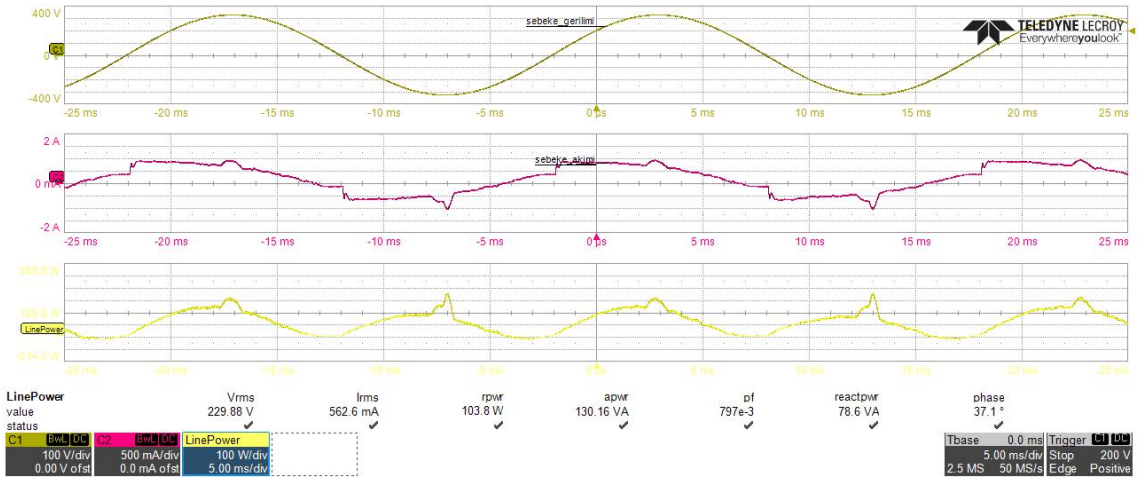


Şekil 6.42 Blender 75kHz çalışma şebeke giriş akım harmoniği ölçüm grafiği

Tablo 6.2 Blender 75kHz çalışma harmonik ölçüm tablosu

Order	Freq [Hz]	Limit [mA]	Measured [mA]	Pass/Fail	Distortion [%]
1	50	0	563.09		100
2	100	1080	40.25	Pass	7.1
3	150	2300	29.81	Pass	5.3
4	200	430	11.9	Pass	2.1
5	250	1140	59.66	Pass	10.6
6	300	300	5.85	Pass	1
7	350	770	23.19	Pass	4.1
8	400	230	14.18	Pass	2.5
9	450	400	46.38	Pass	8.2
10	500	184	6.48	Pass	1.2
11	550	330	23.26	Pass	4.1
12	600	153.3	6.74	Pass	1.2
13	650	210	29.86	Pass	5.3
14	700	131.4	5.1	Pass	0.9
15	750	150	20.7	Pass	3.7
16	800	115	8.45	Pass	1.5
17	850	132.4	18.66	Pass	3.3
18	900	102.2	4.78	Pass	0.8
19	950	118.4	13.4	Pass	2.4
20	1000	92	6.55	Pass	1.2

Şekil 6.43' de görülen yeşil renk Şebeke Gerilimini, pembe renk Şebeke Akımını, sarı renk Şebekeden Çekilen Gücün matematiksel yöntemler ile elde edilmiş halini göstermektedir. Ayrıca dalga şekillerinin altında bulunan değerler tablosunda güç faktörü değeri 0.797 olarak gözükmektedir.



Şekil 6.43 Blender 75kHz çalışma güç faktörü ölçüm grafiği

6.8 Verim Ölçümü

Devre çalışmalarında dikkat edilen önemli olan bir diğer konu ise devre veriminin belirlenmesi ve simülasyon ortamındaki verim sonuçları ile karşılaştırılmasıdır.

Verim ölçümleri hem devrenin tüm kayıplarını ölçebilmek için devrenin giriş ve çıkış güçlerinden, hem de sadece güç aktarma kısmında bobin verimlerini ölçebilmek amacıyla birincil ve ikincil bobin güçlerinden iki ayrı ölçüm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu iki testte de ikincil taraftaki yük su ısıtcısı olup, su ısıtıcısının iki ayrı test sistemiyle yapılmıştır. Şekil 6.44' de bu iki duruma ait test sistemi görseli görünmektedir.

Şekil 6.44 Verim ölçümü için su ısıtıcısının iki farklı test düzeneği

İlk durumda yük tarafındaki ikincil bobinin su ısıtıcısı bağlantısı dışarıdan olacak şekilde 4mm kalınlığındaki cam üzerine konularak, diğer sistem ise yine aynı cam kalınlığındaki plastik baskı parçasının üzerine ikincil bobinin kapalı bir şekilde su ısıtıcısının içinde bulunduğu konfigürasyonda gerçekleştirilmiştir. Burada ilk durumda kapalı olmayan bir sistem ile ikinci durumda kapalı olan bir sistem karşılaştırılarak

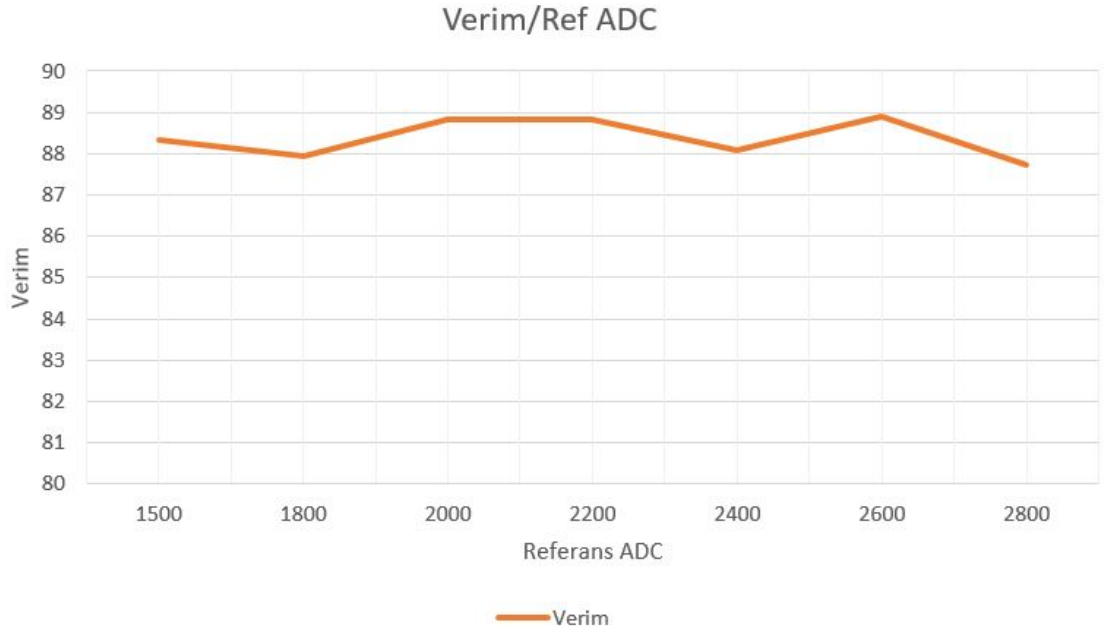
hava aralığı ve buna bağlı olarak verimde büyük bir değişim olup olmayacağı gözlenmek istenmiştir. Tablo 6.3' deki ölçümler referans su ısıtıcısı yükünün ikincil bobininin dışarıdan bağlı olduğu durum için alınmıştır.

Tablo 6.3 İkincil bobin dışarıdayken sistem çalışma değerleri

Bobin Akımı Referans Değeri [ADC]	**Frekans [kHz]**	**Şebeke Akımı [A]**	**Şebekeden Çekilen Güç[W]**	**İkincil Taraftaki Çıkış Gücü [W]**	**Verim [%]**
1500	40	2.60	600	530	**88.33**
1800	34.7	3.85	880	774	**87.95**
2000	32	4.88	1092	970	**88.83**
2200	30.3	5.92	1340	1190	**88.81**
2400	29	7.10	1612	1420	**88.09**
2600	27.8	8.40	1890	1680	**88.89**
2800	26.7	9.50	2143	1880	**87.73**

Tablo 6.3' de çeşitli akım referans değerleri için 230VAC giriş geriliminde, şebekeden çekilen akım, PI kapalı çevirimiyle devrenin oturduğu frekans, şebekeden çekilen güç ve ikincil yükü su ısıtıcısının direnci ucundan okunan, gerilim ve akım bilgisinin osiloskop üzerinden matematik fonksiyonları ile çarptırılarak hesaplanması ile belirlenen çıkış gücü bilgisi bulunmaktadır.

Şekil 6.45' de farklı çalışma anları için verimdeki değişim görülmektedir.



Şekil 6.45 İkincil bobin dışarıdayken sistem verim değerleri grafiği

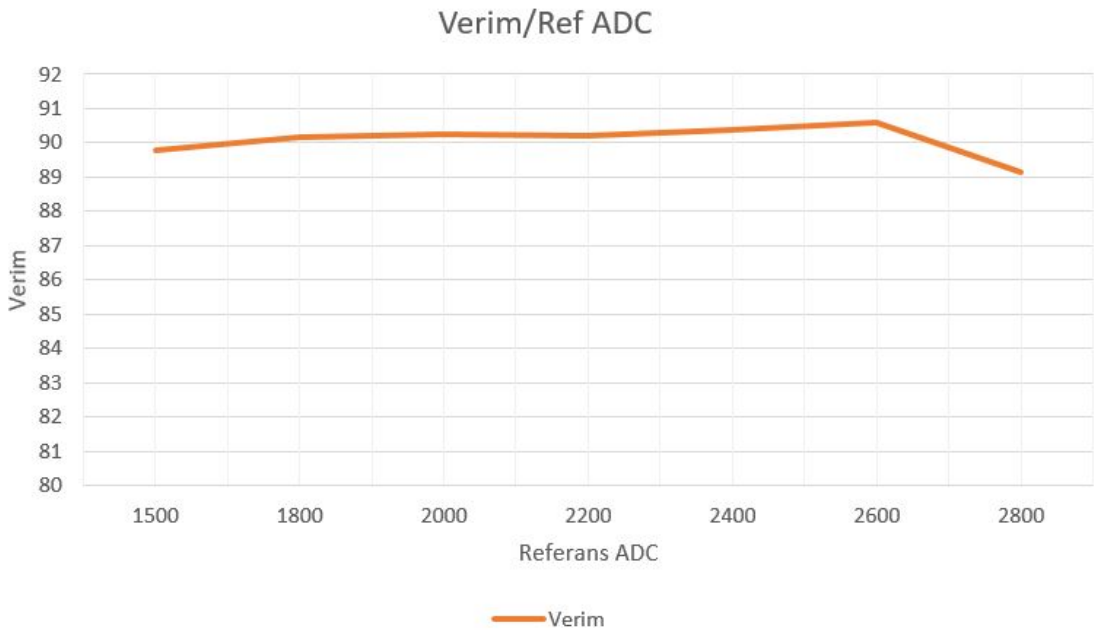
Bir sonraki test Şekil 6.44' de görülen aynı verim ölçümünün ikincil bobini su ısıtıcısı içindeki durumu için yapılmıştır. Buradan alınan sonuçlar Tablo 6.4' de

bulunmaktadır.

Tablo 6.4 İkincil bobin içerideyken sistem çalışma değerleri

Bobin Akımı Referans Değeri [ADC]	**Frekans [kHz]**	**Şebeke Akımı [A]**	**Şebekeden Çekilen Güç[W]**	**İkincil Taraftaki Çıkış Gücü [W]**	**Verim [%]**
1500	39.8	2.60	587	527	**89.78**
1800	34.5	3.77	853	769	**90.15**
2000	32.1	4.70	1064	960	**90.23**
2200	30.4	5.80	1308	1180	**90.21**
2400	29	6.93	1560	1410	**90.38**
2600	27.8	8.26	1855	1680	**90.57**
2800	26.7	9.45	2120	1890	**89.15**

Tablo 6.4' deki verim değerlerinin farklı çalışma durumlarına göre değişim grafiği Şekil 6.46' de görülmektedir.



Şekil 6.46 İkincil bobin içerideyken sistem verim değerleri grafiği

İkincil bobininin su ısıtıcısına dışarıdan bağlı cam üzerinden alınan verim ölçümleri ile ikincil bobininin su ısıtıcısının içinde kapalı bir sistem halindeki verim ölçümleri karşılaştırıldığında, aynı referans değerleri için kapalı sistemin verim değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Kapalı sistemde manyetik kuplajın daha yüksek olacağı ve hava aralığının açık sisteme göre daha az değişeceğinden dolayı bu beklenen bir sonuçtur.

Devrenin verimi iki ayrı durum için ölçüldükten sonra, güç aktarımındaki verimi ölçebilmek ve analizlerle karşılaştırabilmek için birincil ve ikincil bobinlerinin güçleri

ölçülmüş ve güç aktarım verimi bulunmuştur. Testler 145mm'lik çaptaki bobinler ile yapılmıştır. Ölçümler birincil ve ikincil bobinlerinin gerilim ve akım ölçümlerinin osiloskop üzerinde matematiksel kütüphaneler yardımıyla çarptırılıp ortalamasının alınmasıyla bulunmuş ve verim değerleri çıkartılmıştır.

Tablo 6.5 İkincil bobin dışarıdayken bobinler arası güç aktarım değerleri

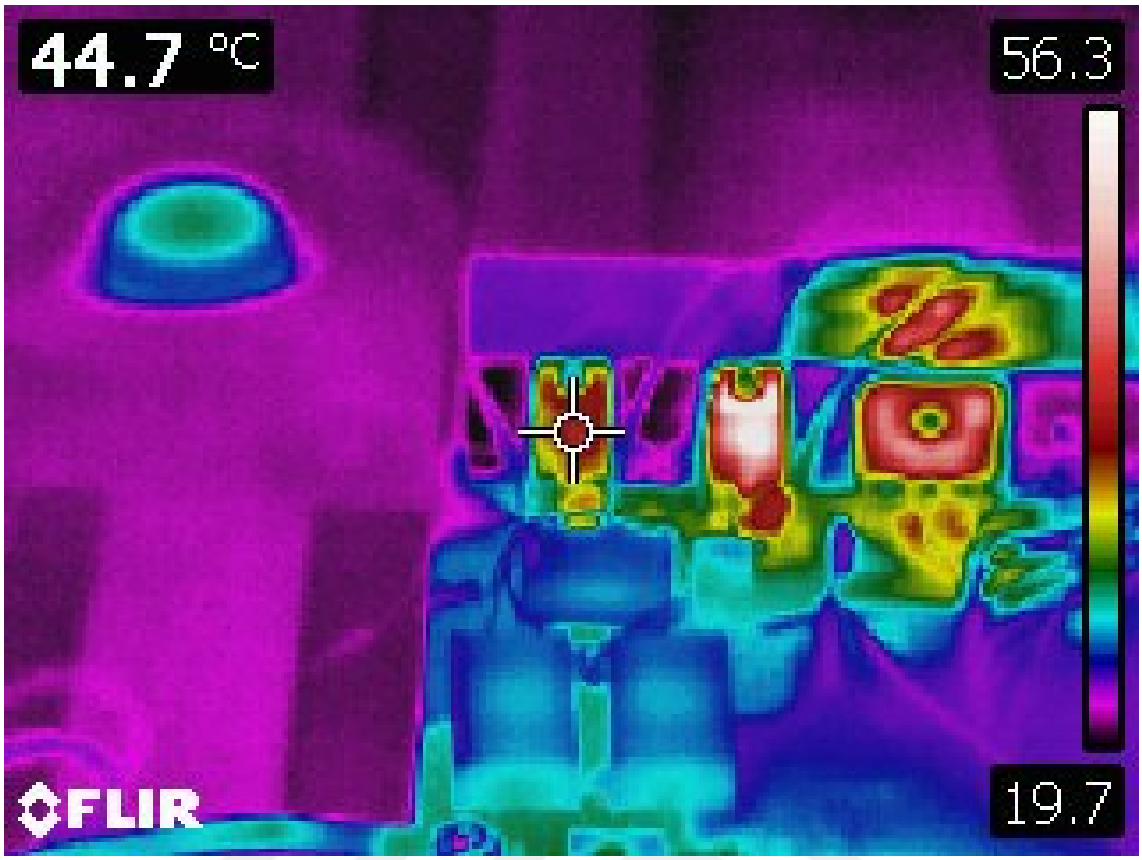
Bobin Akımı Referans Değeri [ADC]	**Frekans [kHz]**	**Şebekeden Çekilen Güç[W]**	**Birincil Taraftaki Bobin Gücü [W]**	**İkincil Taraftaki Bobin Gücü [W]**	**Verim [%]**
1500	40	600	570	530	**92.98**
1800	34.7	880	836	775	**92.70**
2000	32	1092	1043	973	**93.29**
2200	30.3	1340	1277	1190	**93.19**
2400	29	1600	1532	1430	**93.34**
2600	27.8	1883	1762	1670	**94.78**
2800	26.7	2143	1923	1870	**97.24**

Tablo 6.6 İkincil bobin içerideyken bobinler arası güç aktarım değerleri

Bobin Akımı Referans Değeri [ADC]	**Frekans [kHz]**	**Şebekeden Çekilen Güç[W]**	**Birincil Taraftaki Bobin Gücü [W]**	**İkincil Taraftaki Bobin Gücü [W]**	**Verim [%]**
1500	40	583	540	510	**94.44**
1800	34.5	850	792	740	**93.43**
2000	32.2	1056	995	922	**92.66**
2200	30.5	1300	1220	1200	**98.36**
2400	29	1560	1460	1350	**92.47**
2600	27.8	1850	1710	1610	**94.15**
2800	26.7	2100	1840	1790	**97.28**

6.9 Termal Ölçüm

Ortam sıcaklığının 25°C olduğu bir durumda sistemin en yüksek güç değerinde bir su kaynatma süresinin üç katı boyunca çalışması sonucunda yarı-iletken elemanlar üzerinden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Böylelikle en zorlu çalışma şartlarında sıcaklık değerleri ne olacağı gözlemlenmiştir. Sistemin çalışması esnasında fan tam devirli çalışmasına devam etmektedir. Ayrıca fan ile yaşanacak herhangi bir soruna karşılık soğutucu üzerine yerleştirilen NTC'ler ile sıcaklık takibi düzenli olarak yapılmaktadır. Bu takibe istinaden güç kısma veya gücü tamamen kapatma gibi senaryolar devreye girebilirler.



Şekil 6.47 Üst IGBT termal ölçüm görüntüsü

Şekil 6.48 Alt IGBT termal ölçüm görüntüsü

Şekil 6.49 Köprü diyot termal ölçüm görüntüsü

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kablosuz güç transferi konsepti küçük ev aletlerine uygulanmış ve farklı çalışma durumlarındaki davranışları gerçeklenerek deneysel sonuçlar ortaya konulmuştur.

Tezin ikinci bölümünde küçük ev aletleri tanımlanmış ve tanıtılmıştır. Bununla birlikte teknolojik altyapıları ve içlerindeki elektronik temel yapılardan bahsedilmiştir. Bu devrelerin kablosuz güç transferi konseptine uygun hale getirilmesi için gereken uyumlaştırılma adımları anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde temel elektromanyetik kanunları anlatılmıştır. Faraday Kanunu ve Amper Kanunundan bahsedilmiştir. Kablosuz güç transferi teknolojisinin bu kanunlara dayalı olarak çalışma prensibi açıklanmıştır. Bu teknolojide kullanılan topolojilerden ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında incelenen Yarım-Köprü Seri Rezonans Evirici detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde tasarlanan sistemin tasarım kriterlerinden bahsedilmiş önemli parametrelere dikkat çekilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde kablosuz güç transfer sisteminin temelini oluşturan bileşenlerin tasarımında izlenen adımlardan bahsedilmiştir. Bobin tasarımı için gerekli parametreler anlatılmış ve bu parametreler kullanılarak yapılan tasarımdan bahsedilmiştir. Elektronik sistem tasarımında kullanılan simülasyonlar için izlenen adımlar gösterilmiştir. Elektronik ve manyetik devrelerin bir arada bulunduğu simülasyon ortamından bahsedilmiştir. Baskılı devre kartı çizimi için gerekli tasarım parametreleri ve hesaplama sonuçları gösterilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde küçük ev aletlerinin var olan kablolu çalışma durumları test edilerek ölçümler alınmış ve gösterilmiştir. Gerçeklenen kablosuz güç aktarım sisteminin tekil testleri sunulmuştur. Tüm sistemin farklı kullanım koşulları için sistemdeki farklı yerlerden alınan ölçümler ortaya konulmuştur. Tasarlanan sistemin harmonikler açısından durumu incelenmiştir. Kablosuz güç transferi sisteminin

verim ölçümleri yapılmış ve karşılaştırılmalı tablo olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca sistemin çalışması esnasındaki termal ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

Kablosuz güç transferi sisteminin küçük ev aletleri ile birlikte uygulanabilir olmasını göstermek amacıyla küçük ev aletleri incelenmiş, güç devresi tasarımı gerçeklenmiş ve genel sistem olarak çalıştırılıp test edilmiştir. Oluşturulup sunulan bu yapının geleceğin teknolojilerine bir temel olacağı düşünülerek detaylı analizler aktarılmıştır. Kablolu veya ağır bataryalı ürünlerin yerini alması düşünülen kablosuz çalışan cihazlar mutfaklar için günlük insan yaşantısını kolaylaştırabilecek teknolojilerdir. Bununla birlikte verim değerlerinin yüksek güçlü (2200W) güç aktarımına nazaran oldukça iyi seyretmesi önerilen bu sistemin diğer avantajlarından birisidir.

Gelecekte indüksiyon ocaklar ile birlikte kullanılmaya başlanabileceği düşünülen bu konsept çalışmanın tezgah altına yerleştirilen indüksiyon ocak sistemi ile ortak çalışabilmesi neticesinde tüm küçük ev aletlerinin sadece tezgah üzerine konularak çalıştırabilmesi mümkün olacaktır. Böylelikle kablo karmaşasından ve ıslak zemine yakın yerlerdeki elektrik prizi veya elektriksel kontak noktalarından kaçınılabilecektir. Güvenlik ve konfor açısından sunulan bu konsept tasarımın gelecekteki tasarımlara temel oluşturması amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

[1] M. N. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, 2001.

[2] N. Tesla, *Apparatus for transmission of electrical energy.* U.S. Patent No. 649,621., Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. February 19, 1900.

[3] N. Tesla, *Means for increasing the intensity of electrical oscillations.* U.S. Patent No. 685,012., Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. October 22, 1901.

[4] N. Tesla, *Art of transmitting electrical energy through natural mediums.* U.S. Patent No. 787,412., Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. April 18, 1905.

[5] A. Esser, "Contactless charging and communication for electric vehicles," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 1, no. 6, pp. 4–11, 1995. DOI: 10.1109/2943.469997.

[6] R. Pudur, V. Hanumante, S. Shukla, K. Kumar, "Wireless power transmission: A survey," in *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICRAIE.2014.6909283.

[7] D. Pedder, A. Brown, J. Skinner, "A contactless electrical energy transmission system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp. 23–30, 1999. DOI: 10.1109/41.744372.

[8] G. A. Covic, J. T. Boys, "Inductive power transfer," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, 2013. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2244536.

[9] C. Qi, Z. Lang, L. Su, X. Chen, H. Miao, "Model predictive control for a bidirectional wireless power transfer system with maximum efficiency point tracking," in *2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PRECEDE.2019.8753203.

[10] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, P. T. Balsara, "Wireless power transfer for vehicular applications: Overview and challenges," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2018. DOI: 10.1109/TTE.2017.2780627.

[11] H. Abe, H. Sakamoto, K. Harada, "A noncontact charger using a resonant converter with parallel capacitor of the secondary coil," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 444–451, 2000. DOI: 10.1109/28.833760.

[12] S. Y. R. Hui, W. Zhong, C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2249670.

[13] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, C. Cecati, "Wireless power transfer—an overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.

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

[15] I. Mayordomo, T. Dräger, P. Spies, J. Bernhard, A. Pflaum, "An overview of technical challenges and advances of inductive wireless power transmission," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1302–1311, 2013. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2243691.

[16] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, Z. Han, "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, 2016. DOI: 10.1109/COMST.2015.2499783.

[17] S. Moon, B.-C. Kim, S.-Y. Cho, C.-H. Ahn, G.-W. Moon, "Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 5861–5870, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2014.2301762.

[18] W. X. Zhong, S. Y. R. Hui, "Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 4025–4034, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2351496.

[19] C.-S. Wang, G. Covic, O. Stielau, "Investigating an lcl load resonant inverter for inductive power transfer applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 995–1002, 2004. DOI: 10.1109/TPEL.2004.830098.

[20] S. Li, C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2015. DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.

[21] H. Hao, G. A. Covic, J. T. Boys, "A parallel topology for inductive power transfer power supplies," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1140–1151, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2262714.

[22] C. Zhang, D. Lin, S. Y. Hui, "Basic control principles of omnidirectional wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5215–5227, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2479246.

[23] Z.-H. Wang, Y.-P. Li, Y. Sun, C.-S. Tang, X. Lv, "Load detection model of voltage-fed inductive power transfer system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5233–5243, 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2243756.

[24] L. Wu, B. Zhang, Y. Jiang, J. Zhou, "A robust parity-time-symmetric wpt system with extended constant-power range for cordless kitchen appliances," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1–1, 2021. DOI: 10.1109/TIA.2021.3112946.

[25] M. Itraj, W. Ettes, "Topology study for an inductive power transmitter for cordless kitchen appliances," in *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*, 2018, pp. 1–8. DOI: 10.1109/WoW.2018.8450898.

[26] *Wireless power consortium white paper*. [Online]. Available: https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/2/3/7/5/ki-cordless-kitchen-white-paper-september-2019.pdf (visited on 2019).

[27] J. Tritschler, B. Goeldi, S. Reichert, G. Griepentrog, "Comparison of different control strategies for series-series compensated inductive power transmission systems," in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 2015, pp. 1–8. DOI: 10.1109/EPE.2015.7309309.

[28] C. Sezer, G. Odabas, S. Sinirlioglu, B. Kaya, N. Altintas, "Modeling of wpt system for small home appliances," in *2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, 2021, pp. 243–247. DOI: 10.1109/ICEEE52452.2021.9415933.

[29] T. Baumann, *An Industrial Strategy for the Household Electrical Durables Sector*. UCT Press (Pty) Ltd, 1995.

[30] M. Kazimierczuk, *High-Frequency Magnetic Components*. John Wiley Sons Ltd., 2014.

[31] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers, 2004.

[32] O. Stielau, G. Covic, "Design of loosely coupled inductive power transfer systems," in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, vol. 1, 2000, 85–90 vol.1. DOI: 10.1109/ICPST.2000.900036.

[33] B.M.Wilamowski, J.D.Irwin, *The Industrial Electronics Handbook Power Electronics and Motor Drives*. CRC Press Taylor and Francis Group, 2011.

[34] *Ffsh2065b-f085: Automotive silicon carbide (sic) schottky diode, 650v*. [Online]. Available: https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ffsh2065b-f085-d.pdf.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. C. Sezer, G. Odabas, S. Sinirlioglu, B. Kaya and N. Altintas, "Modeling of WPT System for Small Home Appliances," 2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2021, pp. 243-247, doi: 10.1109/ICEEE52452.2021.9415933.