

**ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ  
TRANSFER DEVRESİ PROTOTİP TASARIMI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Hazırlayan**

**Furkan ÖZTÜRK**

**Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz, 2017**

**ANKARA**

**ANKARA YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ  
TRANSFER DEVRESİ PROTOTİP TASARIMI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Hazırlayan**

**Furkan ÖZTÜRK**

**Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz, 2017**

**ANKARA**

# **ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER DEVRESİ PROTOTİP TASARIMI**

**A Thesis Submitted to**

**the Graduate School of Natural and Applied Sciences of**

**Ankara Yıldırım Beyazıt University**

**In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science  
in Electrical and Computer Engineering, Department of Electrical and  
Electronics Engineering**

**by**

**Furkan ÖZTÜRK**

**July, 2017**

**ANKARA**

## YÜKSEK LİSANS TEZ SINAVI TUTANAK FORMU

FURKAN ÖZTÜRK tarafından DOÇ. DR. SİNAN KIVRAK ve PROF. DR. MEHMET TİMUR AYDEMİR yönetiminde hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER DEVRESİ PROTOTİP TASARIMI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sinan KIVRAK

**1.Danışman**

Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR

**2.Danışman**

Prof. Dr. Şerafettin EREL

**Jüri Üyesi**

Prof. Dr. İres İSKENDER

**Jüri Üyesi**

Doç. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR

**Jüri Üyesi**

Prof. Dr. Fatih V. ÇELEBİ

**Müdür**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Tarih: 07.07.2017

İmza :

Ad & Soyad : Furkan Öztürk

## ÖNSÖZ

Öncelikle, yardımlarından ve desteğinden dolayı tez danışmanlarımdan Doç. Dr. Sinan KIVRAK' a teşekkür ederim.

Engin bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, yardımları ve güveniyle beni destekleyen tez danışmanlarımdan Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR' e teşekkürü bir borç bilirim. Kendisiyle çalışmak benim için bir onurdu.

Son olarak, bu yolda sabırla beni destekleyen canım aileme teşekkür ederim.

Saygı ve sevgilerimle,

Temmuz, 2017

Furkan Öztürk

# ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KABLOSUZ GÜÇ TRANSFER DEVRESİ PROTOTİP TASARIMI

## ÖZ

Ortaya atıldığı dönemde yeteri kadar ilgi görmese de günümüzde gelişen teknoloji ile yapılabilirliği kanıtlanan Kablosuz Güç Aktarımı konusu rağbet gören güncel bir konudur. Kablosuz Güç Aktarımı, kaynak ile yük arasında herhangi bir mekanik bağlantı olmadan enerjinin kaynaktan yüke aktarılmasıdır. Bu işlem için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, KGA teknolojisinde kullanılan temel dört topolojilerinden biri olan Seri-Seri Rezonans devresi ayrıntılı olarak incelenecektir.

Başlangıçta kapsamlı literatür çalışması yapılarak bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirildi. Yeterli bilgi seviyesine ulaşıldıktan sonra prototip devre hazırlamak için devrenin çalışma özellikleri belirlendi. Devre gücü olarak 100W , çalışma frekansı olarak 20 kHz ve sarımlar arası hava aralığı olarak 5 cm mesafe seçildi. Teorik çalışma Matlab programı ile birleştirilerek devrede kullanılan devre elemanlarının değerleri belirlendi. Bulunan değerler ile Orcad programında devre modeli oluşturuldu. Simülasyon sonuçları yeterli bulunduğu zaman devre kartı tasarımı Altium programında yapıldı ve prototip devre kurulumu gerçekleştirildi.

Bu çalışmada, 5 cm hava aralığına, 19.23 kHz çalışma frekansına, 20 V kaynak gerilimine ve yaklaşık 100 W güce sahip devre prototipi yaklaşık % 80 verimle çalıştırıldı. Prototip devre üzerinde gerekli test ve ölçümler yapılarak sonuçlar incelendi.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz güç aktarımı, seri-seri rezonans devresi

# WIRELESS POWER TRANSFER CIRCUIT PROTOTYPE DESIGN FOR ELECTRICAL VEHICLES

## ABSTRACT

Although it does not attract as much interest in the era when it was launched, Wireless Power Transmission, which is proved to be feasible with today's developing technology, is a current issue that is popular. Wireless Power Transfer is the transfer of energy from the source to the load without any mechanical connection between the source and the load. Various methods are used for this process. In this study, the Series-Series Resonance Circuit, one of the four basic topologies used in KGA technology, will be examined in detail.

At the outset, a comprehensive literature study was conducted to evaluate the work carried out in this area. After the level of sufficient knowledge was reached, the operating characteristics of the circuit were determined to prepare the prototype circuit. The circuit was chosen to be 100 W, operating frequency 20 kHz and 5 cm air gap between windings. Theoretical work was combined with Matlab program to determine the values of the circuit elements used in the circuit. A circuit model was created in the Orcad program with the values found. When the simulation results were satisfactory, circuit board design was done in Altium program and prototype circuit setup was done.

In this study, the circuit prototype with 5 cm air gap, 19.23 kHz operating frequency, 20 V source voltage and about 100 W power was operated with about 80% efficiency. The necessary test and measurements were made on the prototype circuit and the results were examined.

**Keywords:** Wireless power transfer, series-series resonance circuit



## İÇİNDEKİLER

<b>YÜKSEK LİSANS TEZ SINAVI TUTANAK FORMU .....</b>	<b>ii</b>
<b>ETİK BEYAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ÖNSÖZ.....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>TABLO DİZİNİ.....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ .....</b>	<b>x</b>
<b>TERMİNOLOJİ.....</b>	<b>xi</b>
<b>BÖLÜM 1 - GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kablosuz Güç Aktarımı .....	1
1.2 KGA Çalışma Prensibi .....	3
1.3 Tezin Amacı .....	4
<b>BÖLÜM 2 - LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Yüksek Çalışma Frekansına Sahip Çalışmalar .....	5
2.2 Orta Çalışma Frekansına Sahip Çalışmalar .....	6
<b>BÖLÜM 3 - KGA TOPOLOJİLERİ.....</b>	<b>8</b>
3.1 Genel Bakış .....	8
3.2 Seri-Seri Rezonans Devre Analizi.....	8
3.2.1 Devre Giriş Empedansı .....	10
3.2.2 Aktarılan Güç ve Çalışma Frekansı .....	11
3.2.3 Verim .....	13
3.2.4 Sarımların Hesaplanması .....	13
<b>BÖLÜM 4 - PROTOTİP DEVRE TASARIMI.....</b>	<b>15</b>
4.1 Kullanılan Programlar .....	15
4.1.1 Matlab .....	15
4.1.2 Orcad.....	16
4.1.3 Altium .....	26

4.2 Devre Parametreleri.....	29
4.3 Devre Kurulumu .....	29
<b>BÖLÜM 5 - PROTOTİP DEVRE TEST SONUÇLARI .....</b>	<b>33</b>
5.1 Tasarlanan Değerlerdeki Sonuçlar .....	33
5.1.1 Mosfetlerin Anahtarlama Sinyalleri.....	33
5.1.2 DA/AA Devre Çıkışı .....	36
5.1.3 Aktarılan Güç ve Kaynaktan Çekilen Güç .....	37
5.2 Çeşitli Kaynak Gerilimleri İçin Sonuçlar .....	40
5.3 Çeşitli Hava Aralıkları İçin Sonuçlar .....	41
<b>BÖLÜM 6 - SONUÇ .....</b>	<b>42</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>43</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>45</b>

## TABLO DİZİNİ

<b>Tablo 4.1</b> Tasarlanan devre parametreleri .....	15
<b>Tablo 4.2</b> Prototip devre parametreleri.....	29
<b>Tablo 5.1</b> Çeşitli kaynak gerilimleri için devre sonuçları .....	40
<b>Tablo 5.2</b> Çeşitli hava aralık değerleri için devre sonuçları .....	41



## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 3.1 Temel rezonans topolojileri, (a) SS, (b) SP, (c) PS, (d) PP .....	8
Şekil 3.2 Seri Seri Rezonans Devresi .....	9
Şekil 4.1 Orcad devre şeması.....	17
Şekil 4.2 Dönüştürücü devresi ölçüm sonucu.....	18
Şekil 4.3 Birincil taraf kapasitör ölçüm sonucu.....	19
Şekil 4.4 Birincil taraf bobin ölçüm sonucu .....	20
Şekil 4.5 İkincil taraf bobin ölçüm sonucu .....	21
Şekil 4.6 İkincil taraf kapasitör ölçüm sonucu.....	22
Şekil 4.7 Kaynak üzerindeki ölçüm sonucu.....	23
Şekil 4.8 Yük üzerindeki ölçüm sonucu .....	24
Şekil 4.9 Kaynak ve yük birlikte ölçüm sonucu .....	25
Şekil 4.10 Devre kartı şeması .....	26
Şekil 4.11 Devre kartı 3D görüntü (ön) .....	27
Şekil 4.12 Devre Kartı 3D görüntü (yan).....	27
Şekil 4.13 DA/AA dönüştürücü devre kartı.....	28
Şekil 4.14 KGA devresi sarımları.....	30
Şekil 4.15 DA/AA dönüştürücü devresi ile mikroişlemci kartı.....	30
Şekil 4.16 Yük direnci .....	31
Şekil 4.17 KGA devresi .....	31
Şekil 4.18 Devrede kullanılan mikroişlemci kartı .....	32
Şekil 5.1 Mikroişlemci yazılım akış şeması .....	34
Şekil 5.2 Anahtarlama sinyalleri.....	35
Şekil 5.3 DA/AA dönüştürücü devre çıkışı .....	36
Şekil 5.4 Yük üzerindeki gerilim, akım ve güç .....	37
Şekil 5.5 Kaynaktan çekilen gerilim, akım ve güç .....	38
Şekil 5.6 Dönüştürücü devre kartı çıkışı gerilim, akım ve güç.....	39

## TERMİNOLOJİ

C1	Birincil taraf kapasitör değeri
C2	İkincil taraf kapasitör değeri
h	Sarımlar arası hava boşluğu mesafe değeri
I1	Birincil taraf sarımı üzerindeki akım
I2	İkincil taraf sarımı üzerindeki akım
L1	Birincil taraf sarımı indüksiyon değeri
L2	İkincil taraf sarımı indüksiyon değeri
M	L1 ve L2 sarımlarının karşılıklı indüksiyon değeri
N1	Birincil taraf sarım sayısı
N2	İkincil taraf sarım sayısı
PL	Yük üzerindeki ortalama güç
Ps	Kaynaktan çekilen ortalama güç
PS	Paralel-seri rezonans devresi
PP	Paralel-paralel rezonans devresi
RL	Yük direnç değeri
SP	Seri-paralel rezonans devresi
SS	Seri-seri rezonans devresi
Vo	Yük üzerindeki gerilim
Vs	Kaynak gerilimi

$Z$  Devre giriş empedans değeri

$f$  çalışma frekansı

$\eta$  Devre verimi



# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Kablosuz Güç Aktarımı

Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) geçmişten günümüze merak uyandıran konular arasındadır. Tesla'nın ilk kez 1891 yılında ortaya attığı bu fikir, döneminde insanların ilgisini yeteri kadar çekemediyse de günümüzde dikkatleri üzerine çekmeyi başardı.

KGA, kaynak ile yük arasında herhangi bir mekanik bağlantı olmadan enerjinin kaynaktan yüke aktarılmasıdır. Mekanik bağlantılı (fiş ve kablo vb.) durumlarda karşılaşılan en önemli problemlerden bazıları, havadaki nemden ve tozdan dolayı oluşan korozyon, fiziksel hareketler sonucu oluşan aşınmadır. KGA sayesinde bu sorunların üstesinden kolaylıkla gelinebilir. Sualtı kullanımlar gibi sadece kuru ortamlardan başka çeşitli ortamlarda kullanılabilmesi sayesinde birçok sektörün ilgisini çekmektedir.

Gelişen teknoloji ile mobil cihazların kullanımı oldukça yaygınlaştı. Bunun neticesinde mobil cihazların ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılayabilecek batarya teknolojileri de bir o kadar geliştirildi. Her ne kadar batarya teknolojileriyle batarya kapasiteleri ve verimliliği artırıldıysa da kullanıma bağlı olarak kısa süre sonra mobil cihazlar şarj edilmelidir. Bu durum mobil cihazların temel özelliği olan mobillik özelliğini yani taşınabilir olma özelliğini kısıtlamaktadır. KGA teknolojisinin hedeflerinden biri de belli bir alandaki mobil cihazların herhangi bir mekanik bağlantıya ihtiyaç duymadan şarj olabilmelerini sağlamaktadır. Mesala bir evin içerisine kurulan KGA sistemi evdeki tüm mobil cihazları şarj ederek evde oluşan kablo dağınıklığını ve prizlerin yanında kalmak zorunda kalınan ya da kullanılmayan zamanları ortadan kaldırabilecek yeteneğe sahiptir.

Günümüzde Elektrikli Araçların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yaygınlaşmanın en önemli etkisi ise özellikle tek şarjda Elektrikli taşıtların uzun mesafe kat edebilmeleridir. Bunun en önemli nedeni ise batarya teknolojilerinde gerçekleşen gelişimdir. Ancak bu gelişim neticesinde bataryalar hassas hale gelmiştir. Sadece deşarj anının yanı sıra şarj esnasında da bataryaların kontrol edilmesi gerekmektedir. Uzun şarj sürelerini kısaltmak için yapılan çalışmalardan biri yüksek akımda şarj işlemini gerçekleştirmektir. Şarj işlemi kablolu olarak yapıldığında birkaç başlıca sorun beraberinde oluşabilmektedir. Bu sorunlardan ilki, güvenlik sorunudur. Hızlı şarj işlemi neticesinde araca bağlı iletimi gerçekleştiren bağlantı kablosundan yüksek akım geçmektedir. Araca bağlantı noktasında ya da bağlantı kablosunda oluşacak bir kaçak sonucu ciddi sorunlar gerçekleşebilir. İkinci sorunsu çevreden dolayı kaynaklanan aşınmalardır. Bağlantıların mekanik olarak yapılması sonucu dış ortamdaki kaynaklanan (nem, toz vb.) bağlantı elemanlarında meydana gelebilecek yıpranma, korozyon vb. olumsuzluklardır. Üçüncü sorun ise, uzun mesafeli yolculuklarda aracın şarj ihtiyacı için bekleme zorunluluğudur. Büyük gelişme göstermesine rağmen, kesintisiz yolculuğun kısıtlı olması nedeniyle elektrikli araçların belirli aralıklarla şarj işlemi için beklemesi gerekmektedir. KGA teknolojisi ile gerçekleştirilecek şarj işlemi bu sorunların üstesinden gelebilecek yeteneğe sahiptir. Hızlı şarj işlemi yapılırken yüksek akımla beslenen batarya, kaynağa mekanik bağlantı olmadan bağlantı kurabilmekte ve şarj işlemini güvenli bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. KGA'nın dış ortamla bağlantısı yoktur. Kapalı ve güvenli bir koruma kılıfı olduğu için dış ortamlardan etkilenmez ve böylece bağlantı noktalarında olumsuz bir durum gerçekleşmez. Elektrikli araçların uzun mesafeli kullanımını sağlamak için geliştirilen otoyol projelerinde, KGA teknolojisi yardımıyla araçların şarj ihtiyaçları araç seyir esnasında iken gerçekleştirilerek kesintisiz yolculuk süresi sağlamaktadır. Ayrıca uygulanan otoyol KGA şarj teknolojisinin yaygınlaşması ile araçlarda bulunan batarya kapasitesi düşürülebilir. Böylelikle pahalı batarya tedariki ve bakım ücretleri azaltılarak elektrikli araçların yaygınlaştırılması gerçekleştirilebilir.

Anlatılan tüm bu faydaların yanında KGA teknolojisinin de sorunları mevcuttur. Yüksek güçlerin aktarılması esnasında ve yüksek frekanslarda kaynağın ve yükün karşılıklı sarımları arasında yüksek değere sahip manyetik alan bulunmaktadır. Eğer



gerekli önlemler alınmaz ise bu fiziksel oluşum hem canlılar üzerinde hem de içerisinde iletken madde (metal vb.) bulunduran cihaz, gereç vb. cansızlarda ciddi olumsuzluklara neden olabilmektedir. KGA teknolojisinin henüz yeni gelişmesi nedeniyle oluşturabileceği problemlerin çözümü de zamanla gerçekleşmektedir.

Anlatılanların neticesinde çözülmeye başlanan olumsuz durumları da olmasına rağmen, olumlu yönleriyle KGA teknolojisi gelecekte hayatımızda büyük yer edecek bir alt yapıya sahiptir. Bizde bu çalışmada geleceğe yön verebilecek bir teknolojiyi araştırarak yapılan çalışmaları sizlere sunmaktayız. Bu çalışmada KGA teknolojisi tarihsel anlatım, bu alanda yapılan çalışmalar, çalışma ilkeleri ve teorik bilgilerle anlatılmaya çalışıldı. Teorik bilgilerin ışığında bilgisayar programları sayesinde testler yapıldı. Gerekli yeterliliğe ulaşan simülasyon değerlerinin ardından gerçek bir devre prototipi kurularak sonuçlar analiz edildi. Sonuçlar derlenerek faydalı olabilecek şekilde sunuldu.

## **1.2 KGA Çalışma Prensibi**

KGA konusunun basit olarak en iyi anlatımı transformatör konusu üzerinden olacaktır. Çünkü KGA sisteminde kullanılan sarımlar aslında demir ya da ferrit vb. nüve içermeyen bir transformatördür. Manyetik akı, nüve yerine havayı kullanarak ulaşımını sağlar.

Bilindiği gibi transformatörlerde verimin yüksek olması için kaçak endüktansın değerinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Kaçak endüktansın en aza indirilmesi demek manyetik akının birincil taraftan ikincil tarafa ulaşımının en yüksek değerde olması demektir. Manyetik akının en yüksek değerde olması birincil ve ikincil tarafta bulunan sarımların kublajlanma etkeninin en yüksek olması ile mümkündür. Günümüzde verimi yüksek transformatörlerin kublaj etkeni %99 değerlerine ulaşabilmektedir. Ancak KGA sisteminde kullanılan sarımların kublaj etkeni çok düşüktür (mesela çalışmamızdaki prototip devrede %13 civarındadır). Verimi doğrudan etkileyen kuplaj etkeninin KGA için artırılması konusu halen çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle sarımların tasarımı üzerinde durulmaktadır.

Çok küçük kuplaj etkenine rağmen yüksek verimde KGA uygulanabilmesini mümkün kılan ise rezonanstır. Sarımlara ilave olarak çalışma frekansında sarımlar ile rezonansa girecek kapasitörler devreye eklenir. Bu rezonans kapasitörleri sayesinde devredeki reaktif güç ortadan kaldırılarak yüksek verim ve güce sahip KGA sağlanabilmektedir.

### **1.3 Tezin Amacı**

KGA teknolojinde kullanılan temel dört topoloji olan Seri-Seri Rezonans devresi incelenecektir. Hava aralığı 5cm, 100W lık güce sahip 20kHz anahtarlama frekanslı Seri-Seri Rezonans devresi için gerekli sarımların parametreleri belirlenecektir. Sarımlar belirlendikten sonra devre elemanları değerleri hesaplanarak elde edilen değerlerle bilgisayar programında devre modeli oluşturulacaktır. Simülasyon sonuçları yeterli düzeye geldiğinde Seri-Seri Rezonans devre prototipi kurulacaktır. Prototip devre üzerinde testler yapılarak sonuçlar değerlendirilecektir.

# BÖLÜM 2

## LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 2.1 Yüksek Çalışma Frekansına Sahip Çalışmalar

Literatür çalışması esnasında yayınlar incelenirken yapılan çalışmaların iki gruba ayrılabilceği görüldü. Bu sınıflandırma işleminde çalışma frekansı baz alındı. Bu gruplara orta frekans ve yüksek frekans adlandırması yapılabilir. Yüksek frekansta yapılan çalışmalar düşük güçlere (100W – 300W) sahip olmasına karşın yüksek verime sahiptir. Orta frekansta yapılan çalışmalar ise çeşitli güç aralığındadır. Bazı uygulamalar 100W civarında iken bazı uygulamalar 1-MW (MegaWatt) gücüne ulaşabilmektedir. Ancak bu uygulamalardaki verim yüksek frekansa göre biraz düşüktür.

Alanson P. Sample, makalesinde hem teorik hem de deneysel çalışmasını ortaya koyarak kablosuz güç aktarımı teknolojisine öncü bir çalışmayı gerçekleştirmiştir [1]. Kullandığı model sayesinde 0 cm – 70 cm aralığına sahip %70'e kadar verimle çalışabilen bir sistem geliştirmiştir. Ve bu sistemin patentine sahiptir [2]. Bu modelde yükün değeri sabit tutularak çeşitli hava aralıklarında devrenin yüksek verimlilikte çalıştığını göstermiştir. Çalışma frekansı olarak ise 7.6 MHz değeri seçilmiştir. Bu değer seçilirken kritik kuplaj indeksi baz alınmıştır. Bu nokta frekansın bölünmeye başladığı noktadır. Çalışmasında aynı zamanda uyarlanabilir frekans kullanarak empedans dengelemesi yapılmaktadır.

Seung-Hwan Lee, makalesinde 3.7 MHz çalışma frekansını kullanmıştır [3]. Yapmış olduğu deneyde 30 cm hava aralığına sahip 220 W %95 verime sahip kablosuz güç aktarımını gerçekleştirmiştir. Makalesinde yer alan bir cümlesinde sarımların karakteristik uzunluğunun dalga boyundan yeterince küçük olması durumunda akım ve gerilimin uzaysal dağılımının devre elemanları üzerinde değişmeyeceğini söyler. Bu nedenle sarımların tasarımını gerçekleştirirken dalga boyunu hesaba katmıştır. Makalesinde geleneksel sarım yöntemleri ile deneyini gerçekleştirdikten sonra yeni sarım teknikleri geliştirerek sarımların sahip olduğu yüksek frekans, direnç

değerlerine yoğunlaşmıştır. Bu yeni teknikte sarımların yüksek frekanstaki iç direncini (ESR direncini) düşürmeyi başarmıştır.

Takehiro Imura, yüksek frekans çalışmasına örnek verilebilecek bu makalede çalışma frekansı olarak yaklaşık 13.5 MHz değeri alınmıştır [4]. Çeşitli hava aralıklarında (49 mm – 357 mm) frekans taraması yapılarak maksimum verimin olduğu nokta tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu hava aralıklarındaki sarımlar arasında kublaj değeri kaydedilerek yorumlandı.

## 2.2 Orta Çalışma Frekansına Sahip Çalışmalar

Jusus Sallan, bu yayın tez çalışmamızda etkin bir şekilde kullanılan bir kaynaktır [5]. Tezimizde yer alan deneysel çalışma ve öncesinde yapılan teorik çalışma bu makaleden yardım alınarak hazırlanmıştır. Makalede çalışma frekansı 20 kHz olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmasında 2 kW güce sahip sarımlar arası mesafe 15 cm olarak %82 verimle prototip devresi oluşturuldu. Makalede sarımlar hazırlanırken kullanılabilir bir tasarım algoritması yer almaktadır. Bu algoritmanın ilk aşamasında sarım geometrisi seçilmektedir. İstenilen güç, frekans ve sarımlar arası mesafe başlangıç değeri olarak algoritmaya kaydedilir. Ardından algoritma çalıştırılarak başlangıç değerlerine uygun tasarım tamamlanır. Algoritmanın çalışma prensibi detaylı olarak anlatılmaktadır. Algoritmanın sonunda yer alan ve uygun koşulların belirtildiği bölüm istenilen özelliklere uygun tasarımın gerçekleştirilmesinde büyük fayda sağlar. Makalede tasarım parametresi olarak kullanılabilir yeni bir tasarım faktörü “ $K_D$ ” sunulmuştur. Makalenin teorik çalışma bölümünde kablosuz güç aktarımı topolojileri incelendi. Bu inceleme sonucunda devre parametreleri formülize edildi ve bir tablo şeklinde sonuç olarak verildi.

Jun-Young Lee, bu makalede 6.6 kW güce sahip 12 cm – 20 cm hava aralığında kablosuz güç aktarımı gerçekleştirildi [6]. Çalışma frekansı olarak 20.3 kHz seçildi. Makalede kablosuz güç aktarımı elektrikli araçlarda kullanılabilir şarj cihazı için kullanıldı. Çift yönlü olma özelliğine sahip bu sistemde kaynak tarafı ve yük tarafı haberleşebilmekte. Bu haberleşme sistemi sayesinde self rezonans PWM (SR-PWM) olarak adlandırdığı frekans kontrolünü yapabilmektedir. Frekans kontrolü sayesinde

sarımların her zaman rezonansa olması sağlanmaktadır. Makalenin teorik çalışılan bölümünde Ac ve Dc yük formül olarak verilmiştir.

Boping Yang, makalede çalışma frekansı olarak 20 kHz ve 85 kHz değerleri ile çalışıldı [7]. Devre topoloji olarak seri-seri rezonans devresi seçildi. Devre oluşturulurken deneyde kullanılan devre elemanlarının parametreleri 20 kHz ve 85 kHz için verilmektedir.

Seung-Hwan Lee, makalede 300 kW'lık bir sistem anlatılmaktadır [8]. Hava aralığı olarak 7 cm çalışma frekansı olarak ise 60 kHz seçilmiştir. Bu uygulamanın amacı kablosuz güç aktarımı teknolojisini raylı sistem araçlarına uygulamaktır.

Jae Hee Kim, yakın zamanda yapılan en yüksek güce sahip kablosuz güç aktarımı devresi uygulanmıştır [9]. 1 MW'lık kaynak gücüne sahip sistem %82.7 verime sahiptir. Yani yük üzerinde yaklaşık olarak 818 kW'lık güç görülmektedir. Sarımlar arası hava aralığı 5 cm ve çalışma frekansı 60 kHz olarak belirlenmiştir. Bu sistem hızlı tren üzerinde denenmiştir. Alınan sonuçlar sayesinde kablosuz güç aktarımının yüksek güce sahip araçlar için kullanılabileceği görüldü.

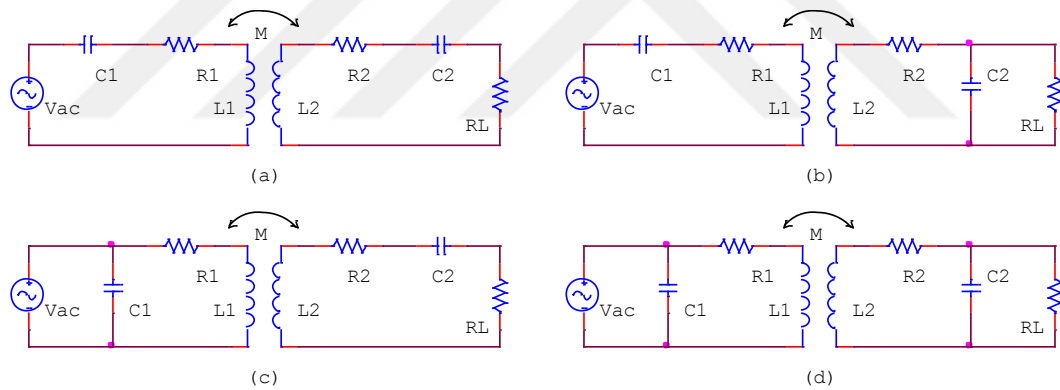
# BÖLÜM 3

## KGA TOPOLOJİLERİ

### 3.1 Genel Bakış

Başlıca dört temel KGA topolojisi bulunmaktadır. Bunlar, Seri-Seri Rezonans Devresi, Seri-Paralel Rezonans Devresi, Paralel-Seri Rezonans Devresi ve Paralel-Paralel Rezonans Devresidir. Topolojilerdeki adlandırma devrede bulunan rezonans kapasitörlerinin devreye bağlanma biçimine göre yapılır. Dört temel devre topolojisi Şekil 3.1 de görülmektedir.

Bu çalışmada devre topolojisi olarak Seri-Seri Rezonans Devresi seçildi. Detaylı olarak teorik çalışma yapıldıktan sonra devre tasarımı yapıldı.



Şekil 3.1 Temel rezonans topolojileri, (a) SS, (b) SP, (c) PS, (d) PP

### 3.2 Seri-Seri Rezonans Devre Analizi

Formüllerde kullanılan devre değerleri Şekil 3.2 verildiği gibidir. Devrede kaynağın olduğu tarafa birincil taraf, yükün bağlı olduğu tarafa ise ikincil taraf denilecektir.

Birincil tarafta ana koldan geçen akım  $I_1$  akım değeridir. İkincil tarafta ana koldan geçen akım  $I_2$  akım değeridir.

$V_s$  kaynak gerilimini,  $V_o$  yük üzerinde oluşan gerilimi ifade etmektedir.

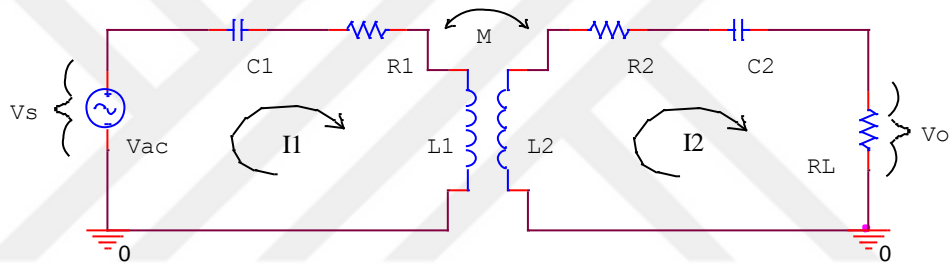
$C_1$  ve  $C_2$ , birincil ve ikincil tarafta yer alan seri rezonans kapasitörleri ifade eder.

$R_1$ , birincil tarafta yer alan sarımın direnç değeridir.  $R_2$ , ikincil tarafta yer alan sarımın direnç değeridir.

$L_1$  ve  $L_2$ , birincil ve ikincil taraftaki sarımların indüksiyon değerleridir.

$M$ , hava aralığı yardımı ile kuplaj olan  $L_1$  ve  $L_2$  sarımlarının karşılıklı indüksiyon değeridir.

$R_L$ , saf direnç olarak kabul edilerek modellenen yükün direnç değeridir.



Şekil 3.2 Seri Seri Rezonans Devresi

$I_1$  ve  $I_2$  akımlarının dolaşım yönleri Şekildeki gibi alınarak döngüler oluşturuldu.

Birincil taraftaki döngüye Kirchhoff Kanunu uygulandı:

$$V_s - I_1 \left( \frac{1}{j\omega C_1} \right) - I_1(R_1) - I_1(j\omega L_1) - I_2(j\omega M) = 0 \quad (1.1)$$

$$V_s - I_1 \left[ R_1 + j \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] - I_2(j\omega M) = 0 \quad (1.2)$$

İkincil taraftaki döngüye Kirchoff Kanunu uygulandı:

$$-I_1(j\omega M) + I_2(j\omega L_2) + I_2(R_2) + I_2\left(\frac{1}{j\omega C_2}\right) + I_2(R_L) = 0 \quad (1.3)$$

$$I_2\left[(R_2 + R_L) + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)\right] - I_1(j\omega M) = 0 \quad (1.4)$$

Denklem 1.4 de  $I_2$  akımının  $I_1$  akımı cinsinden değeri elde edildi:

$$I_2 = \frac{I_1(j\omega M)}{(R_2 + R_L) + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)} \quad (1.5)$$

1.5 denkleminde elde edilen  $I_2$  değeri, 1.2 denklemine yerine koyularak denklem düzenlendi.

$$V_s - I_1\left[R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right] - \left(\frac{I_1(j\omega M)}{(R_2 + R_L) + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}\right)(j\omega M) = 0 \quad (1.6)$$

$$V_s - I_1\left[R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_L) + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}\right] = 0 \quad (1.7)$$

### 3.2.1 Devre Giriş Empedansı

Devrenin kaynak tarafından görülen empedans değeri,

$$Z = \frac{V_s}{I_1} \quad (1.8)$$

1.7 denkleminde empedans değeri,



$$Z = R1 + j\left(wL1 - \frac{1}{wC1}\right) + \frac{w^2 M^2}{(R2 + RL) + j\left(wL2 - \frac{1}{wC2}\right)} \quad (1.9)$$

olarak bulunur.

### 3.2.2 Aktarılan Güç ve Çalışma Frekansı

Devrenin yüksek güç değerinde yüke aktarımda bulunabilmesi için kaynak tarafından görülen empedans değerindeki sanal (imajiner) değer ortadan kaldırılması gerekmektedir.

$$\text{Im}\{Z\} = \text{Im}\left\{R1 + j\left(wL1 - \frac{1}{wC1}\right) + \frac{w^2 M^2}{(R2 + RL) + j\left(wL2 - \frac{1}{wC2}\right)}\right\} \quad (1.10)$$

$$\text{Im}\{Z\} = \left(wL1 - \frac{1}{wC1}\right) + \frac{1}{\left(wL2 - \frac{1}{wC2}\right)} \quad (1.11)$$

1.11 denkleminde görüleceği gibi  $\text{Im}\{Z\}$  ifadesinin ortadan kaldırılması için en basit haliyle,

$$wL1 = \frac{1}{wC1} \quad (1.12)$$

ve

$$wL2 = \frac{1}{wC2} \quad (1.13)$$

şartı sağlanmalıdır.

Devrenin 1.12 ve 1.13 şartını sağlaması için uygulanabilecek en basit yöntem tek çalışma frekansı kullanmak ve  $L1=L2$ ,  $C1=C2$  koşullarını sağlamak olacaktır. Bu kabuller ile 1.12 denklemi çözüldüğünde,

$$\omega^2 = \frac{1}{L1C1} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L1C1}} \quad (1.14)$$

Açısal hız frekans ( $f$ ) cinsinden ifade edilir;

$$\omega = 2\pi f \quad (1.15)$$

Denklem 1.14 de 1.15 ifadesi uygulandığında,

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}} \quad (1.16)$$

elde edilir.

İstediğimiz çalışma frekansına bağlı olarak seçilen kapasitörler sayesinde devrenin giriş empedans değeri ortadan kaldırılarak reaktif güç engellenmeye çalışılabilir.

Giriş empedansında denklem 1.16 yer alan frekans değeri uygulandığında, giriş empedansının gerçel (reel) kısmı kalacaktır.

$$\text{Re}\{Z\} = \text{Re}\left\{R1 + j\left(\omega L1 - \frac{1}{\omega C1}\right) + \frac{\omega^2 M^2}{(R2 + RL) + j\left(\omega L2 - \frac{1}{\omega C2}\right)}\right\} \quad (1.17)$$

$$\text{Re}\{Z\} = R1 + \frac{4\pi^2 f^2 M^2}{R2 + RL} \quad (1.18)$$

Devredeki aktif güç,

$$P_a = I_1^2 \operatorname{Re}\{Z\} \quad (1.19)$$

olarak ifade edilebilir.

Denklem 1.18 de devredeki aktif gücün frekans ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Yükün üzerinde bulunan aktarılan güç,

$$PL = I_2^2 RL \quad (1.20)$$

olarak bulunur.

### 3.2.3 Verim

Verim hesabı en basit anlamda şöyledir;

$$\eta = \frac{PL}{P_s} = \frac{I_2^2 RL}{VsI_1} \quad (1.21)$$

### 3.2.4 Sarımların Hesaplanması

Devrede aktarılan güce ve çalışma frekansına karar verildikten sonra sarım değerleri hesaplandı. Sarımların boyutları ve sarım sayısının istenilen indüksiyon değerini karşılaması gerekmektedir. Sarımlar gerçekte hazırlanmadan önce Neumann'ın formülü (1.22) ile sarım değeri hesaplanarak istenilen indüksiyon değeri sağlanana dek bu işlem tekrarlandı.

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 \oint_{\gamma_1} \oint_{\gamma_2} \frac{dl \cdot dl'}{r} \quad (1.22)$$

Karşılıklı indüksiyon değeri de Neumann'ın formülü (1.23) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 N_2 \oint_{\gamma_1} \oint_{\gamma_2} \frac{dl \cdot dl'}{r} \quad (1.23)$$



# BÖLÜM 4

## PROTOTİP DEVRE TASARIMI

### 4.1 Kullanılan Programlar

Prototip devre kurulumu öncesinde teorik çalışma esnasında incelenen makalelerde yer alan devre formülleri MATLAB programında analiz edildi. Makalelerde yer alan devre şemaları ORCAD programında oluşturularak devre analizi yapıldı. ALTIUM programı ile prototip devrede kullanılacak devre kartı tasarımı yapıldı.

#### 4.1.1 Matlab

Matlab programında literatür çalışması esnasında incelenen yayınlarda yer alan formüller ve modeller incelendi. Böylelikle çalışmanın teorik alt yapısı daha iyi anlaşıldı. Prototip devre tasarım aşamasında uygun sarımların seçimi için bir model oluşturuldu. İstenilen özelliklere uygun sarım değerlerinin hesaplanması devre kurulumu öncesi büyük öneme sahiptir. Devre kurulmadan buradan alınan sonuçlar Orcad programına aktarılarak devrenin uygun çalışıp çalışmadığı kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Prototip devre için istenilen ve tasarım esnasında referans alınan değerler Tablo 4.1 de verildi.

**Tablo 4.1** Tasarlanan devre parametreleri

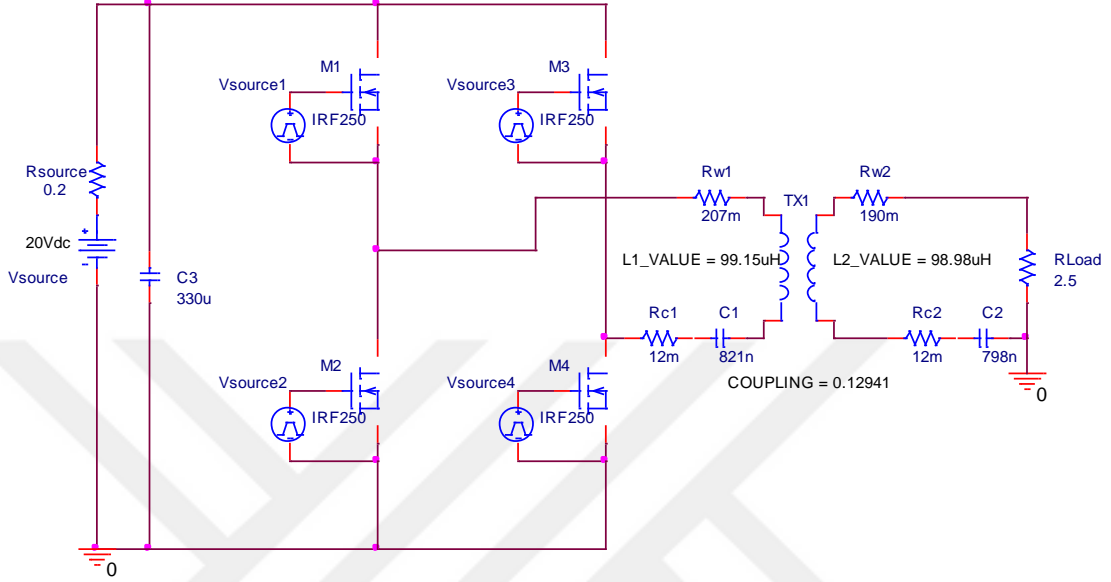
Parametreler	Değerler
Tasarlanan Güç (W)	100
Kaynak Gerilim (VDC)	20
Hava Aralığı (cm)	5
Çalışma Frekansı (kHz)	20

### 4.1.2 Orcad

Devre kurulumunu gerçekleştirmeden önce kurulacak devre Pspice programlarında modellenerek hem zaman hem de maddi olarak büyük kazançlar sağlanmaktadır. Tez çalışmasındaki prototip devre tasarımını modellemek için kullanılan Pspice programı Orcad oldu. Orcad programının analog modellemedeki başarısı sayesinde devreyi gerçekte kurmadan önce üzerinde testler yapılabilirdi. Bu testlerde gerekli görülen müdahaleler (değişmesi gereken devre elemanları vb.) yapılarak gerçekte yaşanabilecek sorunlar önleildi.

Orcad programında devre modeli oluşturma işlemi birkaç adımda gerçekleşti. İlk aşamada, Tabloda yer alan istenilen özellikler referans alınarak Matlab programında devrenin diğer değerleri hesaplanmaya çalışıldı. Bu aşamada Orcad modeli oluşturularak sonuçlar incelendi. Devre çalışma şekli kontrol edildi. Eğer devre sorunsuz çalışıyorsa ikinci aşamaya geçildi. İkinci aşamada ise, önceki çalışmada yer alan devre eleman değerlerine göre prototip devrede kullanılacak devre elemanları tedarik edildi. Tedarik edilen devre elemanlarının değerleri hesaplanan değerler ile bütünü aynı olmamaktadır. Bu yüzden tedarik edilen devre elemanları değerleri ölçülerek kaydedildi. Kaydedilen değerler ile yeni bir Orcad modeli oluşturuldu. Simülasyon yapıldı ve sonuçlar incelendi. Ayrıca sonuçlar, prototip devre test sonuçları ile karşılaştırılmak üzere kaydedildi.

Şekil 4.1 de Orcad devre şeması yer almaktadır. Devre şemasında kullanılan devre elemanları değerleri, prototip devrede kullanılacak devre elemanlarının değerleridir.



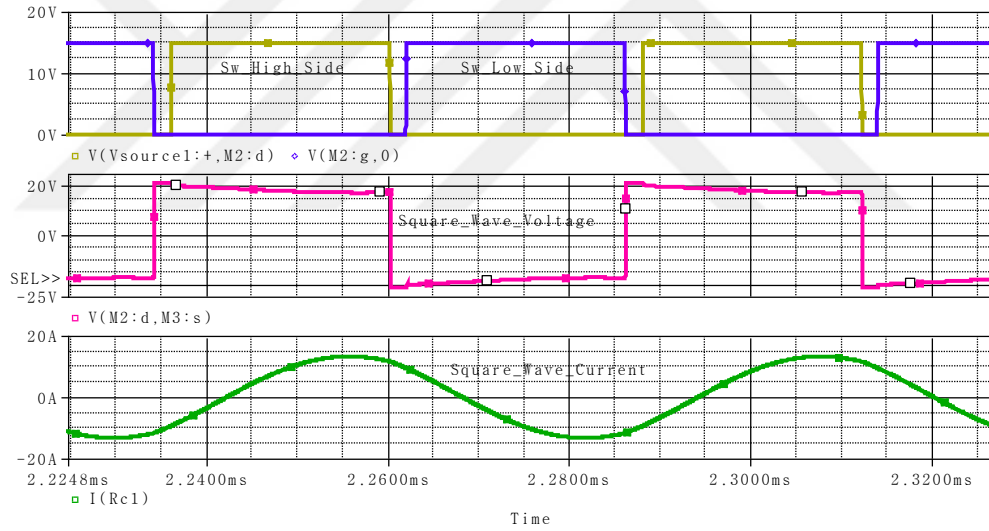
Parametreler	M1 Vsource1	M2 Vsource2	M3 Vsource3	M4 Vsource4
V1 (V)	0	0	0	0
V2 (V)	14.8	14.8	14.8	14.8
TD (u)	0.1	26	26	0.1
TR (n)	100	100	100	100
TF (n)	200	200	200	200
PW (u)	24	24	24	24
PER (u)	52	52	52	52

Şekil 4.1 Orcad devre şeması

Orcad devresi sonucu olarak ilk aşamada anahtarlama sinyalleri incelendi. Bu sinyallerin mosfetleri anahtarlamak için yeterli olduğu anda DA/AA dönüştürücü devresi ile birlikte simülasyon devresi sonucu kaydedildi. Şekil 4.2 de görüleceği gibi sabit akımlı bir kaynaktan kare dalga elde edildi.

Şekil 4.2 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal (pembe renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış gerilimi(kare dalga)
- 4.kanal (yeşil renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış akımı



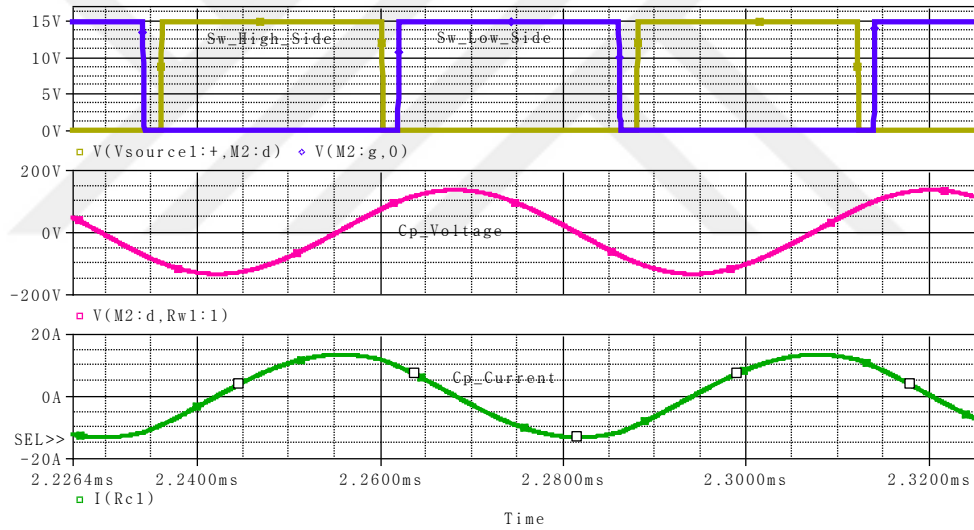
Şekil 4.2 Dönüştürücü devresi ölçüm sonucu



Kare dalga elde edildikten sonra birincil taraftaki ölçümler yapıldı. Şekil 4.3 de birincil tarafta bulunan kapasitör üzerindeki gerilim ve akım değerleri yer almaktadır. Buradan alınan ölçümlerin amacı, gerçek devrede kullanılacak olan kapasitör seçimi için bilgi sahibi olmaktır. Gerçek devrede çalışacak kapasitörün üzerinde oluşacak gerilim ve akım değerlerine uygun bir kapasitör seçimi yapmak gerekmektedir.

Şekil 4.3 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal ( pembe renk) : Birincil taraftaki kapasitör üzerindeki gerilim
- 4.kanal ( yeşil renk) : Birincil taraftaki kapasitör üzerindeki akım

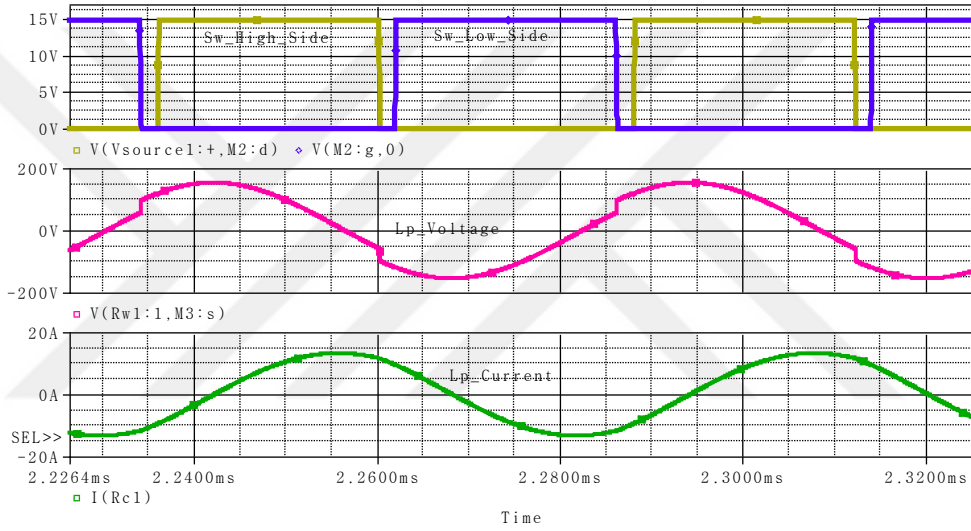


Şekil 4.3 Birincil taraf kapasitör ölçüm sonucu

Birincil tarafta yapılması gereken bir diğer ölçüm ise birincil sarım üzerindeki gerilim ve akımdır. Şekil 4.4 de bu değerlere ulaşılabilir.

Şekil 4.4 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal ( pembe renk) : Birincil taraftaki sarım üzerindeki gerilim
- 4.kanal ( yeşil renk) : Birincil taraftaki sarım üzerindeki akım

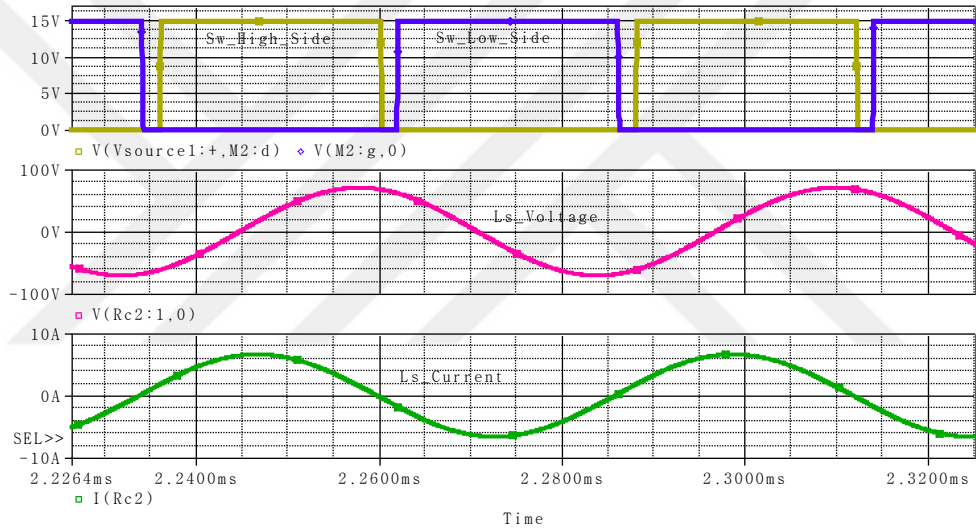


Şekil 4.4 Birincil taraf bobin ölçüm sonucu

Şekil 4.5 de ikincil tarafta yer alan sarım üzerindeki gerilim ve akım değerleri verilmektedir.

Şekil 4.5 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal ( pembe renk) : İkincil taraftaki sarım üzerindeki gerilim
- 4.kanal (yeşil renk) : İkincil taraftaki sarım üzerindeki akım

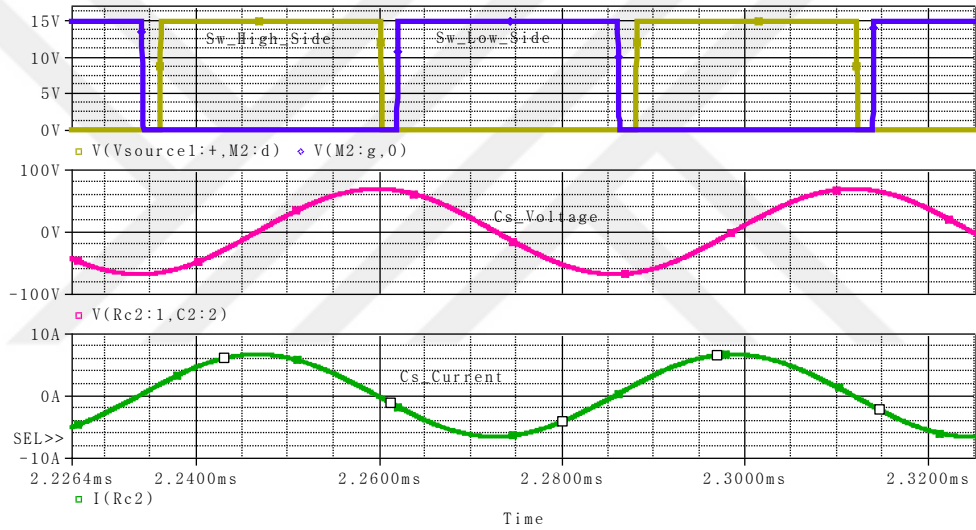


Şekil 4.5 İkincil taraf bobin ölçüm sonucu

İkincil tarafta yer alan kapasitör üzerindeki akım ve gerilim değerleri Şekil 4.6 da yer almaktadır. Buradan kapasitör seçimi için dikkat edilmesi gereken unsurlar tespit edilebilir.

Şekil 4.6 da simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal ( pembe renk) : İkincil taraftaki kapasitör üzerindeki gerilim
- 4.kanal ( yeşil renk) : İkincil taraftaki kapasitör üzerindeki akım

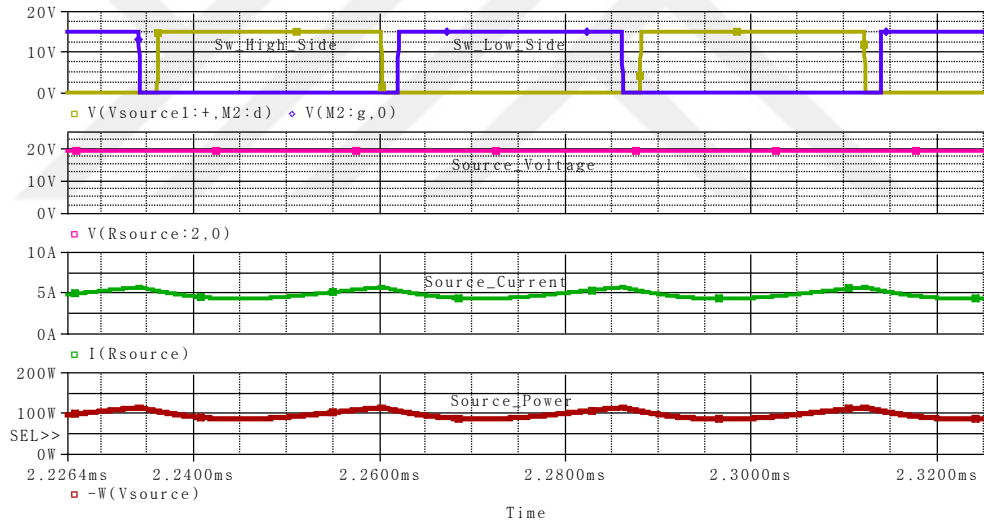


Şekil 4.6 İkincil taraf kapasitör ölçüm sonucu

Çalışmanın başında belirtildiği gibi kaynaktan çekilen gücün 100 W değerine sahip olması istenmekteydi. Şekil 4.7 de rahatlıkla görülebileceği gibi kaynaktan çekilen doğru akım yaklaşık 5 A ve gerilim 20 V değerine sahiptir. Ortalama güç ise yaklaşık 100 W değerine sahiptir.

Şekil 4.7 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal (pembe renk) : Kaynak gerilimi
- 4.kanal (yeşil renk) : Kaynak akımı
- 5.kanal(kırmızı renk) : Kaynaktan çekilen anlık güç

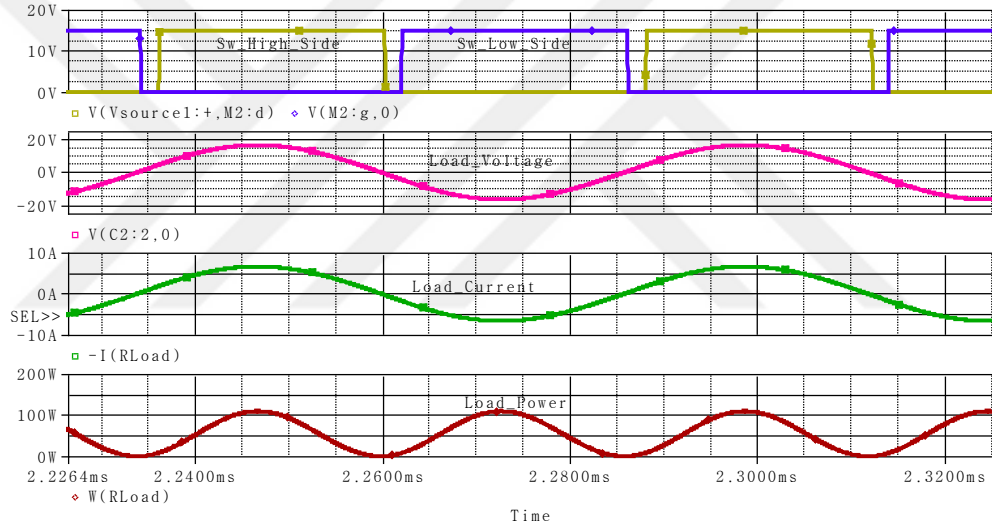


Şekil 4.7 Kaynak üzerindeki ölçüm sonucu

Şekil 4.8 de yük üzerinde yapılan ölçümler yer almaktadır. Burada yer alan gerilim ve akım değerleri daha sonra gerçek devre sonucu ile karşılaştırılmak için kaydedildi.

Şekil 4.8 de simülasyon sonucu şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal (pembe renk) : Yük üzerindeki gerilim
- 4.kanal (yeşil renk) : Yük üzerindeki akım
- 5.kanal(kırmızı renk) : Yük üzerindeki anlık güç

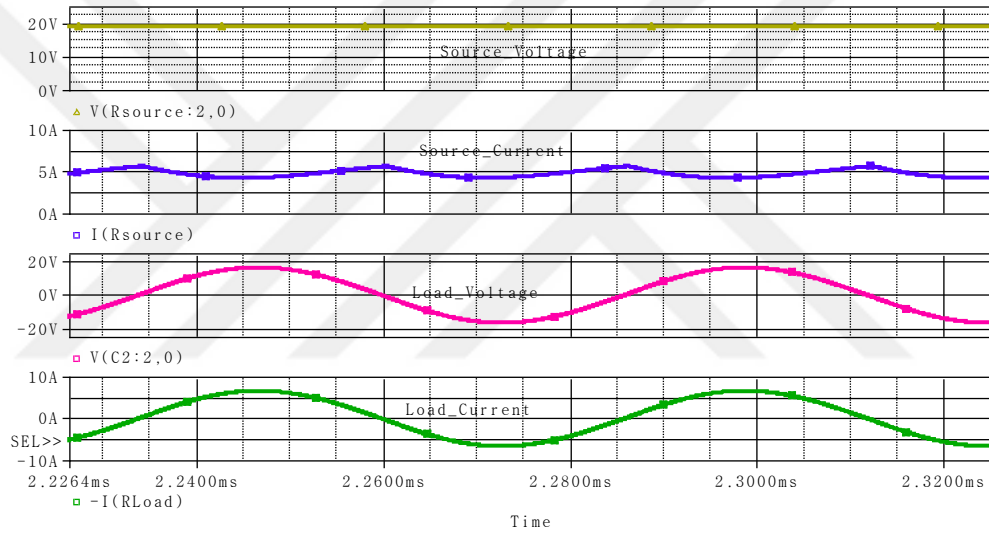


Şekil 4.8 Yük üzerindeki ölçüm sonucu

Kaynak gerilim ve akım ölçümlerini ve yük gerilim ve akım değerlerini birlikte inceleyebilmek için Şekil 4.9 oluşturuldu.

Şekil 4.9 da simülasyon sonucu şu şekildedir:

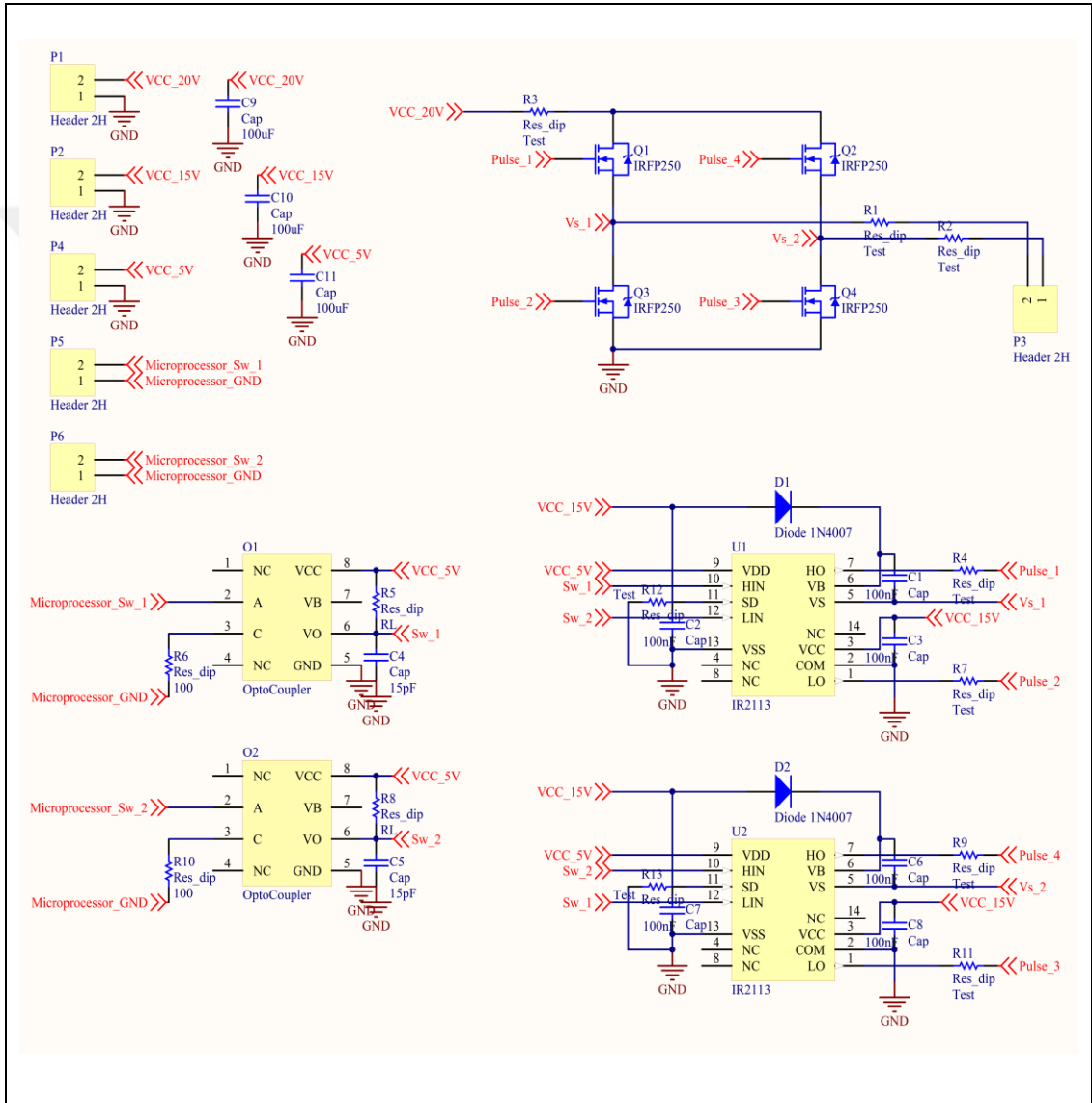
- 1.kanal (sarı renk) : Kaynak gerilimi
- 2.kanal (mavi renk) : Kaynak akımı
- 3.kanal (pembe renk) : Yük gerilimi
- 4.kanal (yeşil renk) : Yük akımı



Şekil 4.9 Kaynak ve yük birlikte ölçüm sonucu

### 4.1.3 Altium

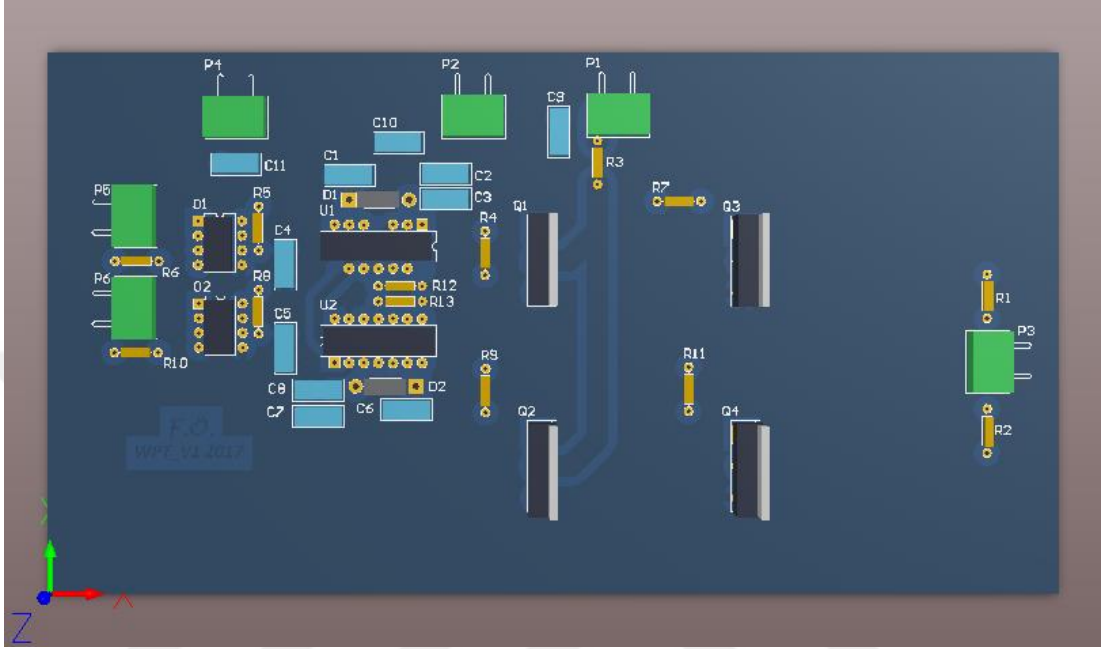
Prototip KGA devresini beleyecek kare dalga çıkışa sahip DA/AA dönüştürücü devresinin kartı Altium programı kullanılarak tasarlandı. Devre kartında kullanılacak tüm elemanların boyutları yani devre kartı için footprintleri düzenlendi. Ardından devre kartı çizildi. Şekil 4.10 da Altium devre şeması verildi.



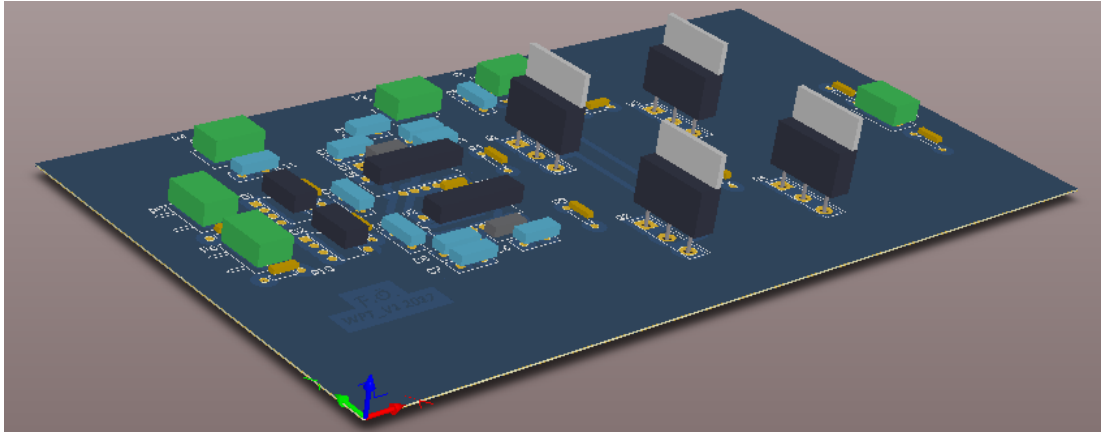
Şekil 4.10 Devre kartı şeması



Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 de Altium programında hazırlanan devrenin 3D görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4.11 Devre kartı 3D görüntü (ön)



Şekil 4.12 Devre Kartı 3D görüntü (yan)

Devre kartını hazırlarken önceden bahsi geçtiği gibi devre elemanları önceden test edilerek seçildi. Uygun değerlere sahip olduğu belirlenen devre elemanları devre kartı üzerine yerleştirildi.

Devre kartı hazırlandıktan sonra Şekil 4.13 deki halini aldı. Devre kartı hazırlandıktan sonra tekrardan testleri yapılarak çalışır durumda olduğu garantilendi.



**Şekil 4.13** DA/AA dönüştürücü devre kartı

## 4.2 Devre Parametreleri

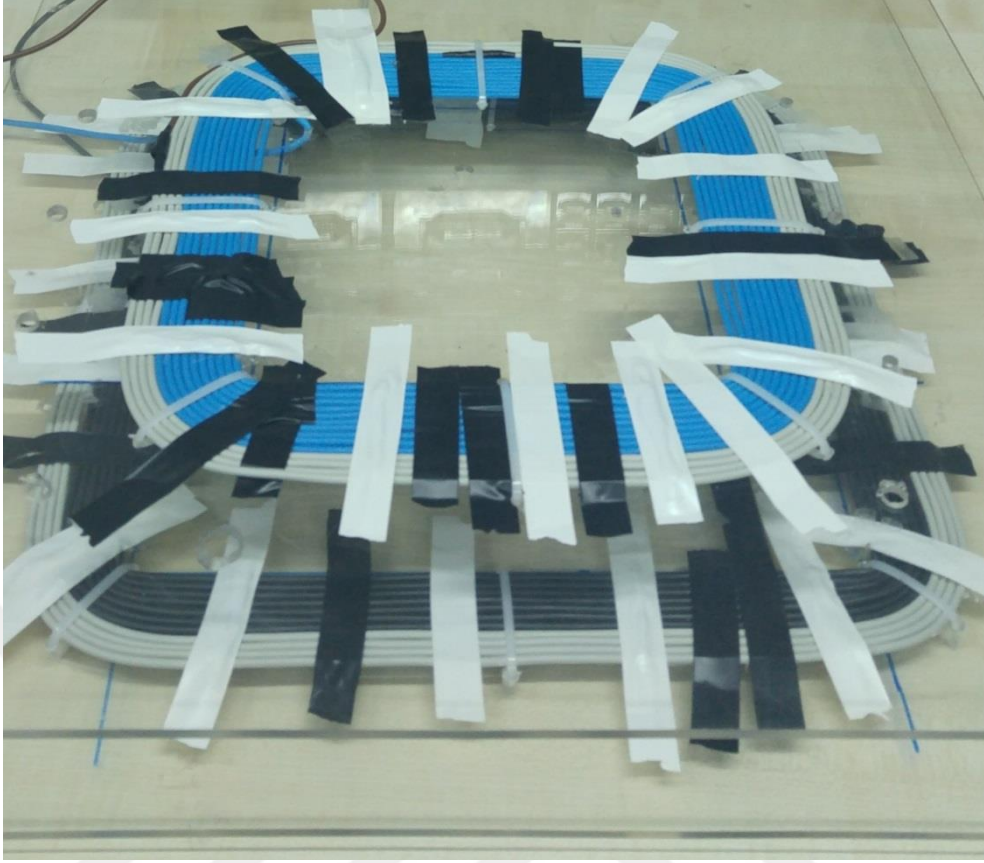
Matlab ve Orcad programında yapılan çalışmalar sonucu prototip devrede kullanılacak devre elemanları değerleri belirlendi. Tablo 4.2 de kurulacak devrede kullanılacak devre elemanları ve değerleri yer almaktadır.

**Tablo 4.2** Prototip devre parametreleri

Parametreler	Prototip Devre Değerleri
Kaynak Gerilimi (VDC)	20
Hava Aralığı (cm)	5
Çalışma Frekansı (kHz)	19.23
N1	11
N2	14
Birincil sarım en ve boy (m x m)	0.3 x 0.3
İkincil sarım en ve boy (m x m)	0.2 x 0.2
Kablo Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	2.5
L1(μH)	99.15
L2(μH)	98.98
C1(nF)	1000
C2(nF)	1000
RL(Ω)	2.5

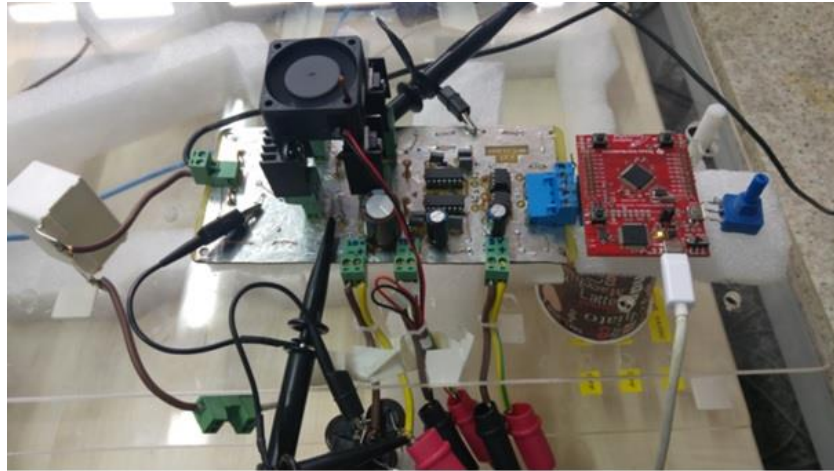
## 4.3 Devre Kurulumu

Devre kurulumunda öncelikle sarımlar hazırlandı. Şekil 4.14 da tamamlanan sarımların görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.14 KGA devresi sarımları

DA-AA dönüştürücü devre kartı hazırlanmaya başlandı. Değerleri netleşen devre elemanları tedarik edildi. Devreye entegre edilmeden önce devre elemanları tek tek kontrol edildi. Devre kartının tamamlanan hali Şekil 4.15 de yer almaktadır.



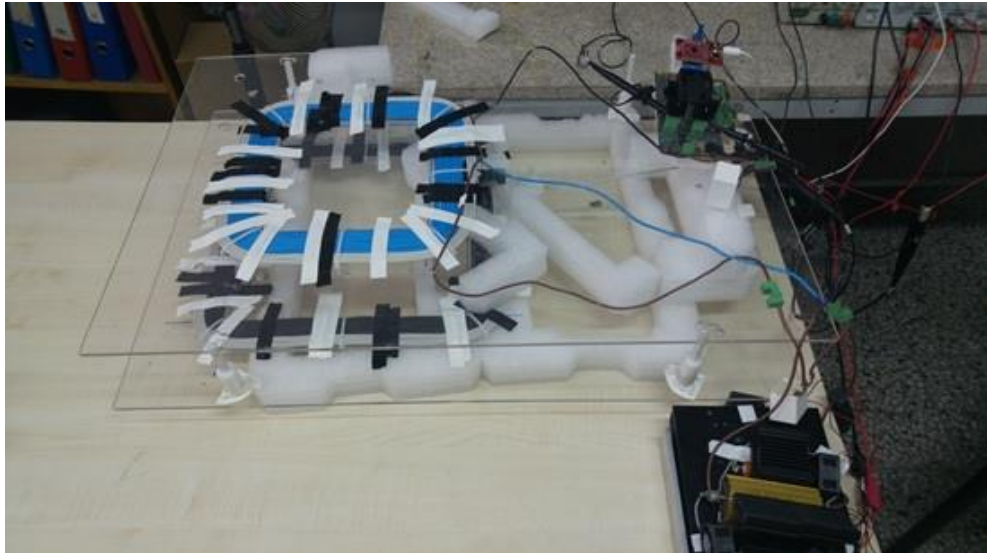
Şekil 4.15 DA/AA dönüştürücü devresi ile mikroişlemci kartı

Yük için metal dirençler kullanıldı. Birden çok direnç kullanılarak hem istenilen eşdeğer direnç değeri sağlandı hem de eşdeğer direncin dayanım gücü artırıldı. Şekil 4.16 de devrede kullanılan yükün görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.16 Yük direnci

Prototip devrede yer alan bütün elemanların bağlantısı yapıldı. Tamamlanan devre görüntüsü Şekil 4.17 de yer almaktadır.



Şekil 4.17 KGA devresi

Devre kurulumu yapıldıktan sonra devreyi test etmek için kullanılan laboratuvar cihazları şunlardır:

**LCR Metre** : LCR metre sayesinde hazırlanan sarımların parametreleri belirlendi. Sarımların bobin değerleri ve direnç değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerler teorik çalışma esnasında hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu cihaz ile kullanılan kapasitörler de ölçülmüştür. Çünkü nominal değerleri belirtilen kapasitörler frekansa bağlı olarak değişik değerler alabilmektedir. LCR metrede, kurulacak prototip devre frekansı ayarlanarak kullanılan kapasitörlerin bu frekanstaki değerleri ölçüldü.

**DA Kaynak** : Devre beslemesi olarak DA kaynak kullanıldı.

**Osiloskop** : Devre test edilirken gerekli noktalardan ölçümler alınarak sonuçlar daha sonra analiz edilmek için kaydedildi.

**Mikroişlemci** : Tam köprü DA- AA dönüştürücü (inverter) devresi için kullanılan mosfetlerin anahtarlama sinyalleri, Texas Ins. EK-TM4C123GXL LaunchPad kiti ile sağlandı. Şekil 4.18 de mikroişlemcinin bir görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.18 Devrede kullanılan mikroişlemci kartı

# BÖLÜM 5

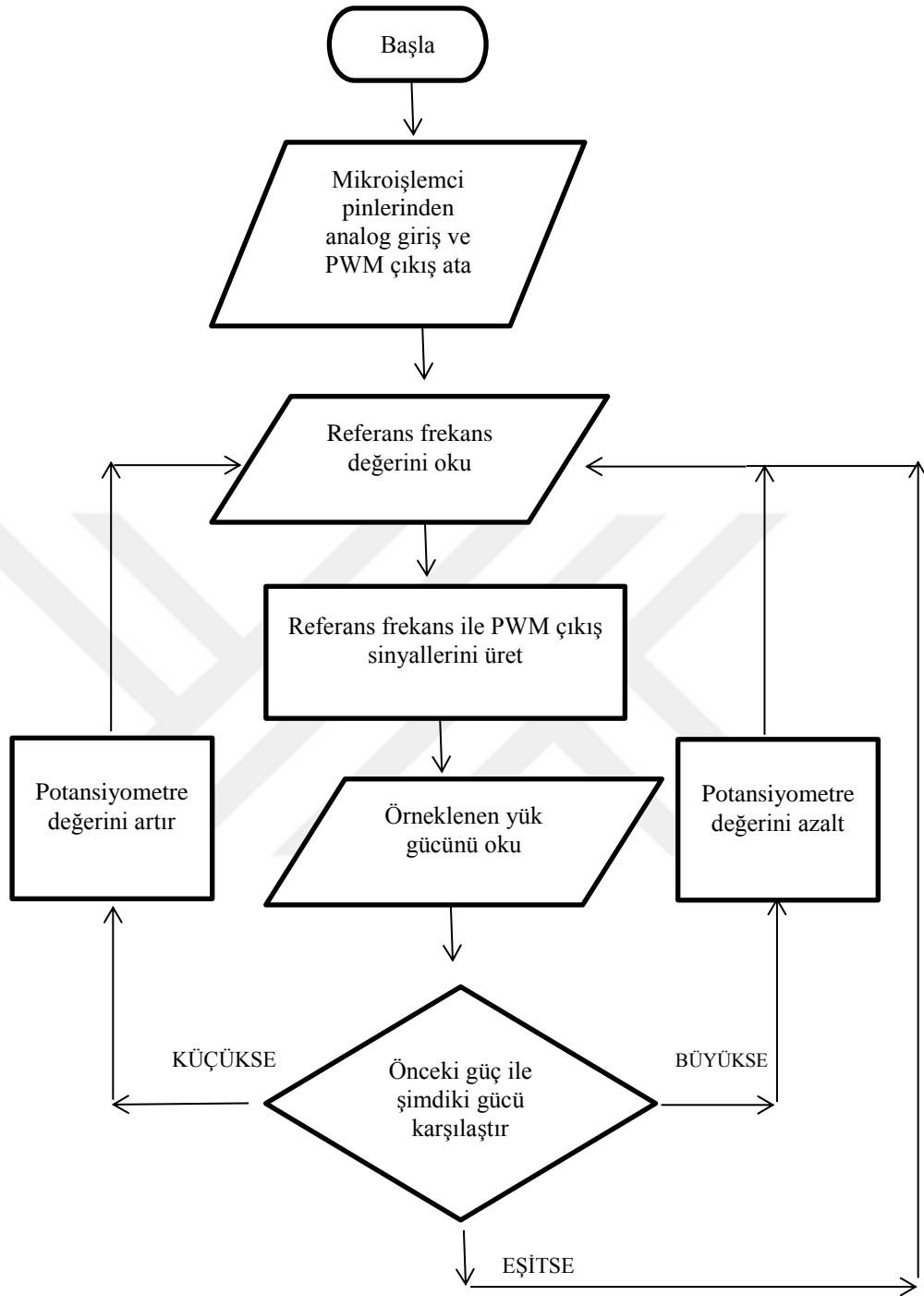
## PROTOTİP DEVRE TEST SONUÇLARI

### 5.1 Tasarlanan Değerlerdeki Sonuçlar

#### 5.1.1 Mosfetlerin Anahtarlama Sinyalleri

Mikroişlemciden verilen tetikleme sinyalleri ayarlanabilir özelliktedir. Şekil 5.1 de mikroişlemci ile yapılan işlemin akış şeması verildi. Mikroişlemciden iki adet pin PWM çıkışı olarak ayarlandı. Bir adet pin ise analog giriş pini seçildi. Analog giriş pinine ayarlı direnç (pot) bağlanarak gerilim örnekleme yapıldı. Örneklenen gerilim program girdisi olarak programa dahil oldu. Burada amaç ayarlı direnç ile örneklenen gerilim değeri değiştirilerek program çalışırken dinamik olarak devreye verilen çalışma frekansı değiştirildi. Maksimum gücün alındığı frekans noktası belirlenerek bu frekansta devre çalıştırıldı.

Mikroişlemciden verilen sinyaller ile beslenen tam köprü mosfet sürücü entegrelerinin çıkışı şekilde verildi. Mosfetleri tetiklemek için kullanılan sinyallerin üstüste gelerek çakışmalarını önlemek için tedbirler alındı. Devre her çalıştırıldığında ilk önce tetik sinyalleri kontrol edildi ve ardından yüke güç aktarımı başlatıldı.



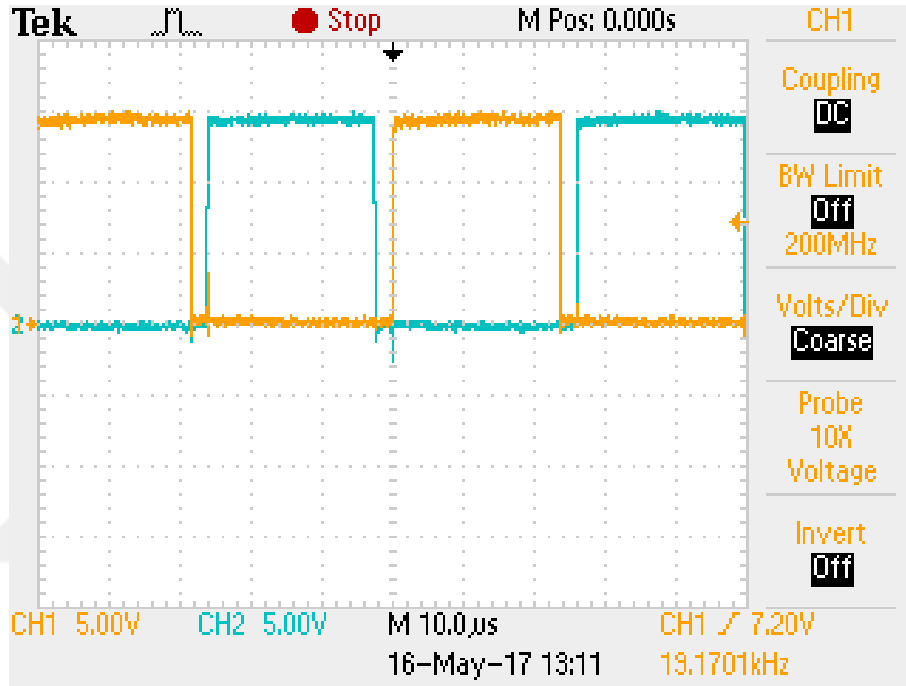
Şekil 5.1 Mikroişlemci yazılım akış şeması



Şekil 5.2 de yer alan osiloskop ekran görüntüsünün içeriği şu şekildedir :

-1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı

-2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı



Şekil 5.2 Anahtarlama sinyalleri

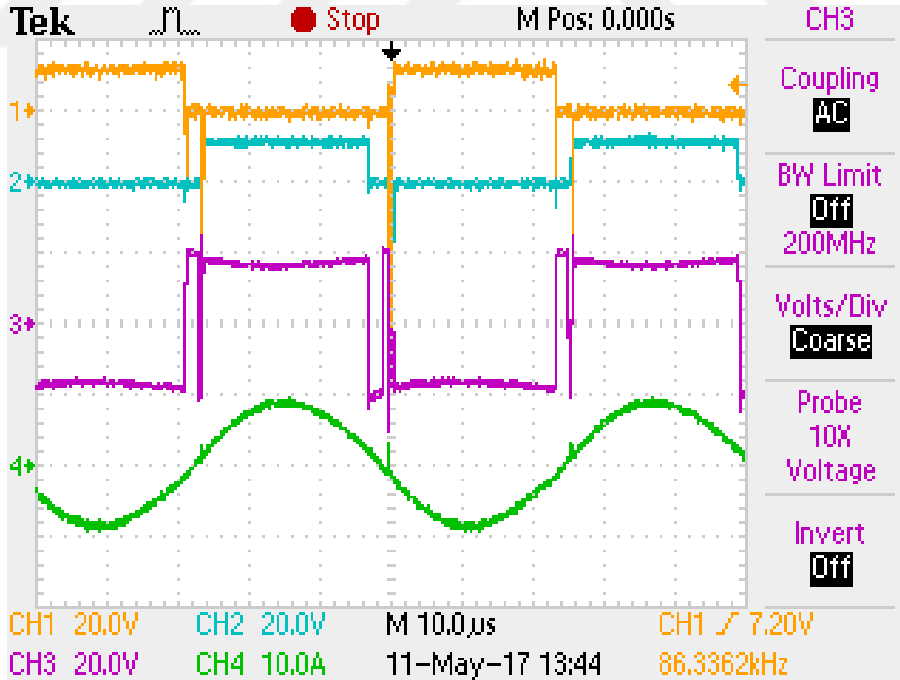
### 5.1.2 DA/AA Devre Çıkışı

Doğru akım kaynak geriliminden beslenen dönüştürücü devresi, çıkışında alternatif akım kare dalga üretmektedir.

Şekil 5.3 de yer alan Osiloskop ekran görüntüsünün içeriği şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal (mor renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış gerilimi (kare dalga)
- 4.kanal (yeşil renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış akımı

Resimde görülen kare dalgada bazı bozukluklar yer almaktadır. Anahtarlama esnasında kare dalgada görülen salınımlar mosfetler üzerinde kullanılacak snubber devreleri ile kolayca düzeltilebilmektedir. Ancak kurduğumuz devre prototip aşamasında olduğu ve amacımızın dönüştürücü devresinden ziyade kablosuz güç aktarımı yapabilmek olduğu nedeniyle bu tür konular üzerinde detaylı durulmadı.



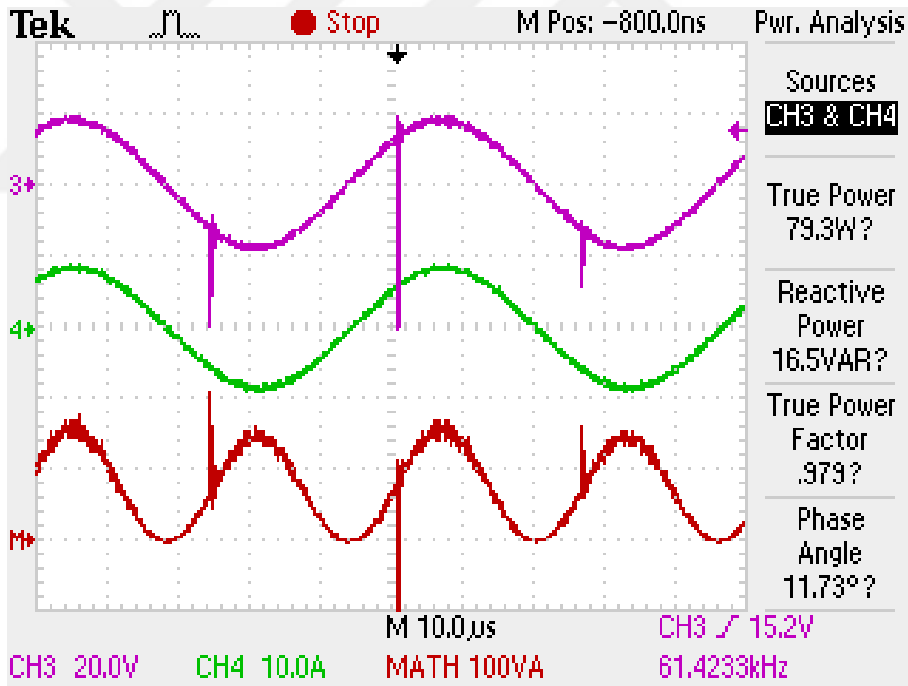
Şekil 5.3 DA/AA dönüştürücü devre çıkışı

### 5.1.3 Aktarılan Güç ve Kaynaktan Çekilen Güç

Devre parametreleri belirlenirken devrenin 100W lık bir güce sahip olması belirlendi. Öncelikli hedef yüksek verimde bu güç değerini aktarmak oldu. Şekilde görüleceği üzere yaklaşık %80 verime ulaşan testte büyük bir başarı elde edildi. DA-AA dönüştürücü devresinde gerçekleşen verim kaybı göz ardı edilerek, dönüştürücü çıkışına göre hesaplanan verim ise yaklaşık olarak %83 olmaktadır.

Şekil 5.4 de yer alan Osiloskop ekran görüntüsünün içeriği şu şekildedir :

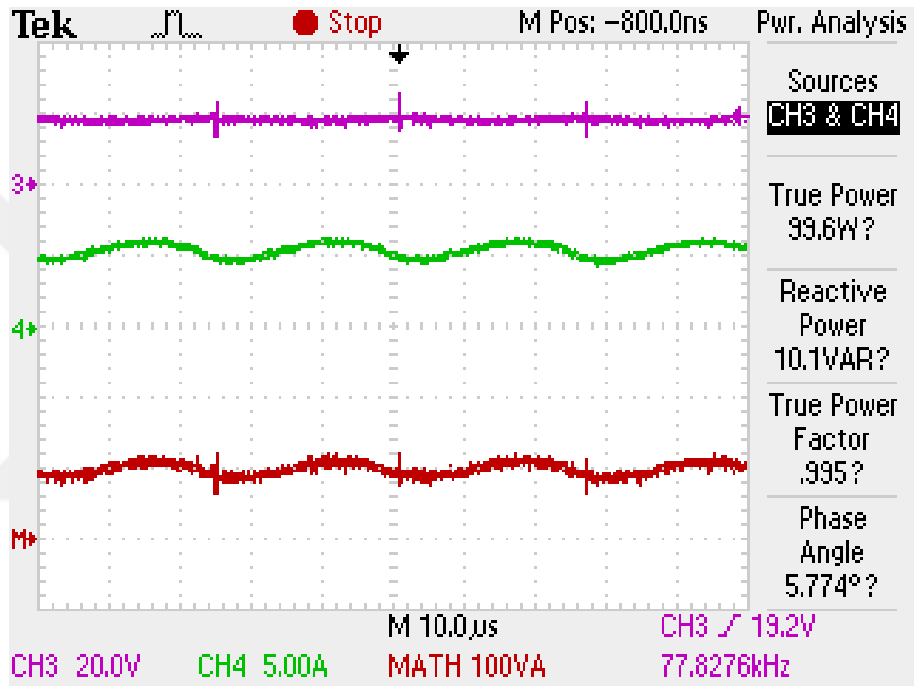
- 3.kanal (mor renk) : Yük üzerindeki gerilim
- 4.kanal (yeşil renk) : Yük üzerindeki akımı
- Math kanal (kırmızı renk) : Yük üzerindeki ortalama güç



Şekil 5.4 Yük üzerindeki gerilim, akım ve güç

Şekil 5.5 de yer alan Osiloskop ekran görüntüsünün içeriği şu şekildedir:

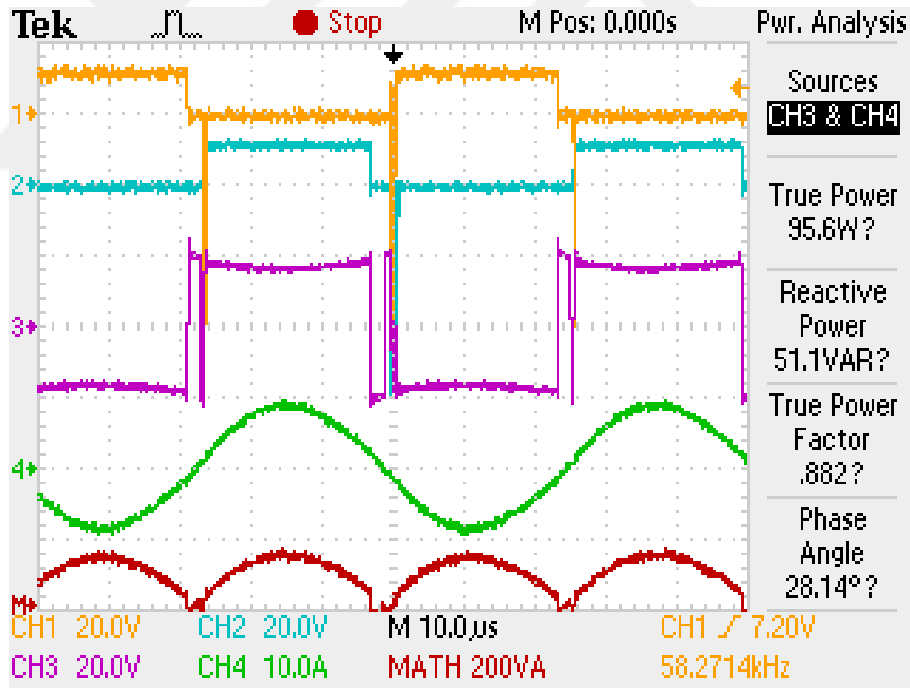
- 3.kanal (mor renk) : Kaynak gerilimi
- 4.kanal (yeşil renk) : Kaynaktan çekilen akım
- Math kanal (kırmızı renk) : Kaynaktan çekilen ortalama güç



Şekil 5.5 Kaynaktan çekilen gerilim, akım ve güç

Şekil 5.6 de yer alan Osiloskop ekran görüntüsünün içeriği şu şekildedir:

- 1.kanal (sarı renk) : Yüksek bölge (high side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 2.kanal (mavi renk) : Düşük bölge (low side) mosfet sürücü entegre çıkışı
- 3.kanal (mor renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış gerilimi (kare dalga)
- 4.kanal (yeşil renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış akımı
- Math kanal (kırmızı renk) : DA-AA dönüştürücü (inverter) devresi çıkış ortalama gücü



Şekil 5.6 Dönüştürücü devre kartı çıkışı gerilim, akım ve güç

## 5.2 Çeşitli Kaynak Gerilimleri İçin Sonuçlar

Tablo 5.1 de çeşitli kaynak gerilimi değerleri için devreden alınan sonuç verileri yer almaktadır. Genel itibariyle verim değeri birbirlerine yakındır. 20 volt kaynak geriliminde devrenin en yüksek verime sahip olmasındaki en önemli sebep, prototip devre tasarlanırken kaynak gerilimi değerinin 20V olarak belirlenmesinden kaynaklanmaktadır. Devre tasarımı teorik hesaplamaları yapılırken 20V kaynak gerilim değeri kabul alınması neticesinde en yüksek verimin yakalandığı diğer devre elemanları seçimi yapıldı. Bu nedenle kabul alınan bu değerle devre maksimum verim değerini sağladı.

**Tablo 5.1** Çeşitli kaynak gerilimleri için devre sonuçları

Kaynak Gerilimi (V)	Kaynaktan Çekilen Güç (W)	Yüke Aktarılan Güç (W)	Verim (%)
10,00	27,30	19,00	69,60
20,00	99,60	79,30	79,62
30,00	235,00	143,00	60,85
40,00	414,60	263,00	63,43

### 5.3 Çeşitli Hava Aralıkları İçin Sonuçlar

Kaynak Gerilimi 20 V için sabit 19.23 kHz lik frekansta sarımlar arası çeşitli hava aralığında ölçümler alındı. Tablo 5.2 de verilen değerlere göre verimin giderek düştüğü görülmektedir. Verimin düşmesindeki başlıca sebep tasarlanan devrenin 5cm hava aralığı için uyarlanmasıdır. Diğer bir sebep ise hava aralığının değişmesine karşılık frekansın sabit tutulmasıdır.

**Tablo 5.2** Çeşitli hava aralık değerleri için devre sonuçları

Hava Aralığı (cm)	Kaynaktan Çekilen Güç (W)	Yüke Aktarılan Güç (W)	Verim (%)
5,0	99,60	79,30	79,62
7,5	102,60	57,10	55,65
10,0	72,18	36,00	49,88
12,5	47,00	20,30	43,19

# BÖLÜM 6

## SONUÇ

Kablosuz Güç Aktarımı özellikle elektrikli araçlar açısından büyük öneme sahip bir teknolojidir. Elektrikli araçlardaki birçok probleme çözüm sağlayabilecek yeteneğe sahiptir.

Tamamladığımız bu tez çalışmasında elektrikli araçlar başta olmak üzere birçok alanda kullanılabilecek Kablosuz Güç Aktarımı özelliğine sahip sistem geliştirildi. Prototip devre hazırlanmadan önce konu teorik olarak çalışıldı ve bilgisayar programları üzerinde devre modellendi. Modelleme işlemi sayesinde prototip devrede gerçekleşmesi muhtemel hatalar önlendi. Böylece hem zamandan hem de maddi açıdan kazanç sağlandı.

Çalışmamızda, çalışma frekansı 19.23 kHz, sarımlar arası hava aralığı 5 cm, kaynaktan çekilen güç yaklaşık 100 W, yüke aktarılan yaklaşık 80 W özelliklerine sahip prototip devre kuruldu. Elde edilen verim yaklaşık olarak %80 oldu. Ayrıca farklı kaynak gerilimi ve hava aralıkları ile testler yapılarak sonuçlar kaydedildi.

Tüm anlatılan ve kaydedilen değerler ile bu çalışma Kablosuz Güç Aktarımı konusunda gelecek çalışmalara kaynak olabilecek yeteneğe sahiptir.



## KAYNAKLAR

- [1] Sample, A.P., Meyer, D.A., Smith, J.R., "Analysis Experimental Results and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer", *Industrial Electronics IEEE*, 58 (2), 544-554, 2011.
- [2] Sample, A.P., Smith, J.R., "Wireless Power Transfer Apparatus and Method Thereof", U.S. Patent US8299652B2, 2012.
- [3] Lee, S.H., Lorenz, R.D., "Development and Validation of Model for 95%-Efficiency 220-W Wireless Power Transfer Over a 30-cm Air Gap", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 47 (6), 2495-2504, 2011.
- [4] Imura, T., Hori, Y., "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula", *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 58 (10), 4746-4752, 2011.
- [5] Sallan, J., Villa, J.L., Llombart, A., Sanz, J.F., "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge", *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 56 (6), 2140-2149, 2009.
- [6] Lee, J.Y., "A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM", *IEEE Trans. On Power Electronics*, 30 (4) , 1784-1787, 2015.
- [7] Yang, B., Du, S., Chen, W., Deng, C., Xu, D., "Optimal parameters design for series-series resonant converter for wireless power transfer", *Proc. Int. Power Electron. Appl. Conf. Expo.*, 772-777, 2014.
- [8] Lee, S.H., Lee, B.S., Lee, J.H., Park, C.B., Lee, S.G., Jung, S.M., et al., "A New Design Methodology for a 300-kW, Low Flux Density, Large Air Gap, Online Wireless Power Transfer System", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (5), 4234-4242, 2016.

- [9] Kim, J.H., Lee, B.S., Lee, J.H., Lee, S.H., Park, C.B.; Jung, S.M., et al., "Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train", IEEE Trans. On Industrial Electronics, 62 (10), 6242-6250, 2015.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : FURKAN ÖZTÜRK  
Doğum Tarihi : 1993  
E-posta : fozturk.ybu@gmail.com

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Lise : Atatürk Anadolu Lisesi, Ankara  
Fen Bilimleri, 2007-2011

Lisans : Turgut Özal Üniversitesi, Ankara  
Elektrik Elektronik Mühendisliği, 2011-2015

### ÇALIŞMA KONULARI

- Kablosuz Güç Aktarımı
- Batarya Yönetim Sistemi