

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR SÜRÜCÜ DEVRELERİNDE VERİM
ARTIRMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Berkant ECEVİT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güven KIRIŞ KÖMÜRGÖZ

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR SÜRÜCÜ DEVRELERİNDE VERİM
ARTIRMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Berkant ECEVİT
(504131001)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güven KIRIŞ KÖMÜRGÖZ

04 MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504131001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Berkant ECEVİT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR SÜRÜCÜ DEVRELERİNDE VERİM ARTIRMA YÖNTEMLERİ** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Güven KIRIŞ KÖMÜRGÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erkan MEŞE**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat YILMAZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin fikir aşamalarından sonuç aşamasına kadar kıymetli bilgileriyle yardımına koşan, en zorlandığım anda önümü açıp yol gösteren Reyhan TÜRK, EMRAH SALMAN ve Hakan Süleyman YARDİBİ'ye,
Bugüne kadar beraber olmaktan mutluluk duyduğum, bu tezin oluşması için yardımını esirgemeyen arkadaşım Serhat GÜNERİ'ye,
Bana muhteşem bir çalışma ortamı sağladıkları için Arçelik Ar-Ge Merkezi Güç Elektronik Teknoloji Ailesi'ne,
Tez devrelerinin basılması konusunda yardımlarını esirgemedikleri için Arçelik Ar-Ge Merkezi Elektronik Donanım Tasarımı Ailesi'ne,
Uygulama anında sürekli yanımda olarak ihtiyacım olan tüm desteği veren Safder KAYALI'ya,
Beni kabul ettiği ve her anlamda desteklediği için, değerli tez danışmanım, sevgili hocam Doç. Dr. Güven KIRIŞ KÖMÜRGÖZ'e,
Ve son olarak bugüne ulaşmamı sağlayan, her şartta arkamda duran, önüme ışık tutan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Siz olmasaydınız daha zor bir hayatım olurdu.

Mayıs 2015

Ahmet Berkant ECEVİT
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	5
2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNDE KULLANILAN YARI İLETKEN VE MANYETİK ELEMANLAR.....	7
2.1 Yarı İletkenler	7
2.2 Diyot.....	8
2.3 Bipolar Jonksiyonlu Transistör	9
2.4 MOSFET	10
2.5 IGBT.....	12
2.6 GaN Tabanlı Anahtar Elemanlar	13
2.7 Manyetik Elemanlar	14
3. TEMEL GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR KONTROL DEVRELERİ	15
3.1 Alçaltıcı Çevirici	15
3.2 Yükseltici Çevirici.....	16
3.3 Alçaltıcı - Yükseltici Çevirici	18
3.4 Köprü Çeviriciler.....	19
3.4.1 Yarım Köprü Çeviriciler	20
3.4.2 Tam Köprü Çeviriciler	21
3.4.3 Altı Anahtarlı Köprü Çeviriciler	23
4. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNDEKİ ANAHTAR ELEMANLARIN KAYIPLARININ AZALTILMASI	25
4.1 Güç Elektroniği Anahtar Elemanları İçin Kapı Sürüş Devreleri.....	29
4.2 Geciktirme(Delay) Devreleri ve Kapı Sürüş Devrelerinin Paralel Anahtarlama Yöntemine Uygun Hale Getirilmesi	31
4.2.1 Kapı Sürüş İşaretlerini İstene Şekilde Geciktiren Devre Tasarımı	32
5. PARALEL ANAHTARLAMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN DEVRELERLE VE GaN TABANLI ANAHTARLAMA ELEMANLARIYLA YAPILAN SİMÜLASYON VE DENEY SONUÇLARI.....	35
5.1 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanlarıyla Yapılan Çalışmalar	35
5.1.1 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanları İçin Yapılan Teorik Hesaplamalar ..	35
5.1.2 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanları İle Yapılan Deney Sonuçları	36
5.2 Paralel Anahtarlama Yöntemi İçin Geliştirilen Gecikme Devresi ile İlgili Çalışmalar.....	39

5.2.1 Tasarlanan Gecikme Devrelerinin Teorik Hesaplamaları	39
5.2.2 Tasarlanan Gecikme Devrelerinin Simülasyonu	40
5.2.3 Tasarlanan Gecikme Devresinin Pratik Uygulaması ve Sonuçları.....	42
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR.....	56
EKLER.....	58
ÖZGEÇMİŞ	60

KISALTMALAR ve SEMBOLLER

IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineers
ASIC	: Application Specific Integrated Circuit
FPGA	: Field Programmable Gate Array
PWM	: Pulse Width Modulation
I_L	: Endüktans akımı
I_Q	: Anahtar akımı
I_o	: Yük akımı
V_o	: Çıkış gerilimi
V_d	: Giriş gerilimi
D	: Çalışma oranı
P_d	: Gecikme kaybı
P_T	: Yükselme kaybı
P_c	: İletim kaybı
P_s	: Saklama kaybı
P_f	: Düşme kaybı
P_t	: Toplam kayıp
T_j	: Jonksiyon sıcaklığı
$R_{\theta jc}$	: Jonksiyon-kılıf arası termal direnç
$R_{\theta cs}$	: Kılıf-soğutucu arası termal direnç
$R_{\theta sa}$	: Soğutucu-hava arası termal direnç
T_a	: Ortam sıcaklığı
f_s	: Anahtarlama frekansı
t_s	: Saklama süresi
t_c	: İletim süresi
t_d	: Gecikme süresi
t_r	: Yükselme süresi
t_f	: Düşme süresi
R_{DSon}	: İletim direnci
V_{DSon}	: İletim gerilim düşümü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Anahtar elemanların karşılaştırılması.....	13
Çizelge 4.1: Paralel anahtarlama kapı sürüş yöntemlerinin karşılaştırması.....	28
Çizelge 5.1: Si ve GaN elemanlarla yapılan çalışmaların sonuçları.....	39
Çizelge 5.2: Geciktirme devresi için yapılan çalışmaların sonuçları.....	47
Çizelge 5.3: Tüm elemanların kayıp hesaplarının karşılaştırılması.....	48
Çizelge 5.4: 20 kHz anahtarlama frekansı ve 30 Ohm yük için ölçüm sonuçları.....	53
Çizelge 5.5: 50 kHz anahtarlama frekansı ve 20 Ohm yük için ölçüm sonuçları.....	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2010’lu yılların sonundan itibaren güç yarı iletkenlerinin kullanımıyla ilgili bir öngörü.....	4
Şekil 2.1 : Diyot karakteristiği.....	8
Şekil 2.2 : BJT’nin enine kesiti ve modeli.....	9
Şekil 2.3 : BJT’nin çalışma bölgeleri	10
Şekil 2.4 : MOSFET devre şekli ve temsili kondansatörler	10
Şekil 2.5 : MOSFET enine kesiti.....	11
Şekil 2.6 : IGBT’nin MOSFET ve BJT’li modeli	12
Şekil 2.7 : Güç-frekans değişiminde eleman kullanım şeması.....	13
Şekil 3.1 : Alçaltıcı çevirici	16
Şekil 3.2 : Alçaltıcı çevirici dalga şekilleri.....	16
Şekil 3.3 : Yükseltici çevirici.....	17
Şekil 3.4 : Yükseltici çevirici dalga şekilleri	17
Şekil 3.5 : Alçaltıcı – yükseltici çevirici.....	18
Şekil 3.6 : Alçaltıcı – yükseltici çevirici dalga şekilleri	19
Şekil 3.7 : Yarım köprü çevirici	20
Şekil 3.8 : Yarım köprü çevirici dalga şekilleri	21
Şekil 3.9 : Tam köprü çevirici	22
Şekil 3.10 : Tam köprü çevirici dalga şekilleri.....	22
Şekil 3.11 : Üç fazlı RL yükünü sürebilecek bir altı anahtarlı köprü çevirici yapısı .	24
Şekil 4.1 : Anahtar eleman için iletim eğrileri ve kayıpları.....	26
Şekil 4.2 : Totem pole MOSFET sürücü devresi.....	30
Şekil 4.3 : MOSFET kapanma işareti geciktirme devresi	33
Şekil 4.4 : IGBT açılma işareti geciktirme devresi.....	33
Şekil 5.1 : Fan yüklü deney düzeneği.....	37
Şekil 5.2 : Standart IGBTler için sıcaklık ölçümü.....	37
Şekil 5.3 : GaN tabanlı anahtarlama elemanları için sıcaklık ölçümü.....	38
Şekil 5.4 : Silikon tabanlı IGBT için güç ölçümü	38
Şekil 5.5 : GaN tabanlı anahtarlama elemanları için güç ölçümü	39
Şekil 5.6 : Geciktirme devresinin simülasyonu için kurulan PSpice devresi	41
Şekil 5.7 : Gecikme işaretlerini gösteren simülasyon sonucu	42
Şekil 5.8 : Baskı devre için hazırlanan devre şeması	43
Şekil 5.9 : Altium Designer’da yapılan PCB tasarımı.....	44
Şekil 5.10 : Elemanları dizilmiş sürücü devre ve mikrokontrolör.....	44
Şekil 5.11 : Deney düzeneği	45
Şekil 5.12 : İşaretlerin tamamını gösteren osiloskop görüntüsü.....	45
Şekil 5.13 : Açılma anına yaklaşılmış osiloskop görüntüsü	46
Şekil 5.14 : Kapanma anına yaklaşılmış osiloskop görüntüsü	46
Şekil 5.15 : Yüklü durumda açılma işaretleri	49
Şekil 5.16 : Yüklü durumda kapanma işaretleri	49
Şekil 5.17 : İki anahtarlı durum için giriş büyüklükleri.....	50

Şekil 5.18 : İki anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri	50
Şekil 5.19 : Tek (hızlı) anahtarlı durum için giriş büyüklükleri	51
Şekil 5.20 : Tek (hızlı) anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri.....	51
Şekil 5.21 : Tek (yavaş) anahtarlı durum için giriş büyüklükleri	52
Şekil 5.22 : Tek (yavaş) anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri.....	52

GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR SÜRÜCÜ DEVRELERİNDE VERİM ARTIRMA YÖNTEMLERİ

ÖZET

Bu tez kapsamında öncelikle temel güç elektroniği elemanları, devreleri ve bunların sürüşü için gerekli devreler incelenmektedir. Sonrasında bir adet yeni yarı iletken teknoloji elemanın güç elektroniği devrelerindeki kayıplara etkisi gösterilmekte ve verimi artırdığı bilinen paralel anahtarlama yöntemine yeni bir bakış getirilmektedir.

Yeni yarı iletken teknolojisi olarak günümüzde yavaş yavaş seri üretimine başlanan Galyum Nitrit tabanlı anahtarlama elemanları kullanılmıştır. Bir motor kontrol devresinde Silikon ve GaN elemanlar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yük olarak bir fan yükü kullanılmıştır. Ortam şartları eşitlenerek şebekeden çekilen güç ölçümü yapılmış ve ölçümler alınmıştır. Sonuç olarak GaN tabanlı anahtarların verim avantajı açıkça görülmüştür.

Paralel anahtarlama için ise anahtarlama işaretlerinin değiştirilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Yapı gereği verimin artması için yavaş anahtar elemanın sonra açılıp önce kapanması gerekmektedir. Dolayısıyla anahtarlama işaretinde bir takım manipülasyonların yapılması gerekmektedir. Konu hakkında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması sonucu, açma ve kapama işaretini aynı anda değiştiren devrelerin ya oldukça pahalı olduğu ya da fazladan mikroişlemci çıkışı gerektirdiği görülmüştür. Bu sorunun çözümü için, basit yapılı bir devre tasarımı yapılmıştır. Temel olarak RC devresinin zaman sabiti hesabıyla çalışan bir tasarım yapılarak simülasyon ve uygulaması yapılarak sonuçları verilmiştir. Devre ile ilgili hesaplamalar yapılmış ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

METHODS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF POWER ELECTRONIC AND MOTOR DRIVE CIRCUITS

SUMMARY

Power electronics is one of the most popular topics in electrical engineering. Today's world, power converters, motor drivers, voltage regulators are have a very wide usage. From defence industry to home appliances, from automotive to medical electronics, power electronic circuits are everywhere.

Since power electronic devices have this popularity, their parameters like lifetime or efficiency become more important. Most of the people working on this field try to focus on improving the lifetime or efficiency of the power electronic circuits rather than inventing a new topology. Especially for home appliances industry, lifetime and efficiency of the system is very important because of the government regulations. For example, compressor motor and motor control circuit for a refrigerator should have a very high efficiency like more than 90% to classify the system as a high-end product.

For the reasons above, brushless DC motors or permanent magnet synchronous motors are getting popular everyday. Since they have a good efficiency-torque-speed relationship, their usage in all industries are increasing rapidly. Although these motors are very efficient, they can not work directly with the AC mains. These kind of motors need a motor control circuit to operate and efficiency of this controller is also becomes important. Usually, BLDC or PMSM motors are produced as 3-phase motors and so, they are controlled with a 3-phase inverter circuit.

A 3-phase inverter circuit for controlling a motor usually has a harmonic eliminating circuit to obey the regulations. Then an AC to DC converter is used for gathering DC voltage from mains. After that, a six switch inverter is used for controlling the motor. Also there is a low voltage side for the microcontroller, integrated circuits and other peripheral components which is needed to gather the information from the motor and decide the next signal for inverter.

It is important to know the basic power electronics circuits topologies to understand how a six switch inverter controls the motor in terms of speed or torque or both of them. Everything starts with a buck converter, which is used for decreasing the voltage value of the input and gives to the output. Buck circuit is a very simple circuit, just has one switch, one diode, one inductance and one capacitor.

Also boost converter is a main converter type, which increases the voltage of the input for the output. Boost converter is again very simple, has the same components with buck, just connected in a different way.

In today's power electronics world, most of the circuits derived from buck converter and boost converter. The most obvious example of that is the buck-boost converter. This converter type is used to increase or decrease the voltage, which is needed.

Bridge type converters are the basics of motor control circuits. Simply, one can use a buck converter to drive a brushed DC motor, but only operates in one direction since

the current flows only one direction. But in a bridge converter, current path can be changed so the direction of the rotation can be changed. That is the reason why the bridge type converters are important in motor control. These converters are based on buck converter, which means they decrease the input voltage for the output.

A half bridge converter includes two switches and two capacitors, whereas a full bridge converter includes four switches to have a perfect control on the current direction.

A six switch inverter is based on the half bridge topology. Actually, it is nothing more than three half bridge converters. The middle points of the half bridge converters are connected to the load.

In a six switch inverter circuit which is used for a motor control, switches are the most important elements in terms of efficiency. Basically, one can say that switches decide the efficiency level of the circuit. That is the reason why most of the scientists are working to increase the switching elements performance. There are a few ways to increase the switching performance, like using a new semiconductor technology or parallel switching.

Superior semiconductors are the new era for electronics. Silicon Carbide (SiC) and Gallium Nitride (GaN) are the most important technologies for today. Most of the semiconductor companies are trying to produce a new, cheap and better superior semiconductors.

GaN is the main focus point of the companies. SiC technologies are complicated and expensive, but GaN production is easy and cheap. People in the industry say that the procedure for production of the GaN may be cheaper than standard Silicon. Many of the market predictors state that by the end of 2010's GaN will replace the Si in semiconductors.

A GaN switch has very good switching and conducting performance. To show this in this thesis, a Si based circuit and a GaN based circuit compared in terms of losses in calculation. After that, a motor control circuit is modified for GaN and new switches implemented. Then comparison re-done in the same load conditions, in terms of heating and losses. Results are given.

Parallel switching is another way for increasing the efficiency of the circuit. Researchers are working on this technology since the early 90's. Yirming Jiang, Guichao Hua and Fred C. Lee are the founders of the concept with their publication" which shows that it is possible to work with parallel switches. After this work, a lot of researchers worked on this topic and published their job.

Sakhon Woothipatanapan, Anuwat Jangwanitlert and Phop Cancharoensook, show that a parallel switching method increases the efficiency on motor drives in their publication. This publication is the first in this field for 3-phase implementation of the parallel switching method.

Parallel switching needs a very good gate driving circuit in terms of timing. Since a bad gate signal may cause a short circuit, designer must be very careful. For gate driving of parallel switches, there are not many offers. People usually use two microcontroller outputs for this. But it is not an efficient way for gate driving.

An ASIC can be a solution for gate drive timing. H.P.Yee, and Dean Liu published “An ASIC to Control the Paralleling of an IGBT with a MOSFET” article and designed an IC for closing time delay.

There are some other methods like FPGA based design. But common problem is the high costs of new gate driving circuits. Cheap solutions can not provide opening delay which is important for switching losses.

In this thesis, two RC based delay circuits are offered for opening delay and closing delay. Opening delay is for IGBT opening signal and closing delay is for MOSFET closing signal. By this way, IGBT never produces a switching loss ideally since it is under soft switching conditions. Also MOSFET never produces a conduction loss if it is selected correctly.

At first, concept design of the circuits are made and explained. After that, switching elements are selected and delay times are desired. Then some calculation for delay times are done and values of the components are given.

Simulations are done on these designs via PSpice. It is shown that calculations and simulations are supporting each other. After that, a schematic of the circuit has designed and PCB has drawn.

With the real circuit, timing tests are done. A 200 kHz PWM is generated from a microcontroller and given to the delay circuits. Results are measured with a high speed-high resolution oscilloscope.

In the end, it can be stated that, future of the power electronics lies in superior semiconductors. But since that time, parallel switching method is a good alternative for increasing the efficiency.

1. GİRİŞ

Güç elektroniği, günümüzde teknolojinin her alanında kullanılan ve önemi her geçen gün artan bir elektrik mühendisliği konusudur. Bilgisayarlardan uzay araçlarına her alanda güç elektroniği uygulamaları mevcuttur. Bu durum, güç elektroniği devrelerinin çeşitlenmesine sebep olmuştur. Anahtarlama güç kaynakları, motor kontrol devreleri, statik VAR üreteçleri gibi pek çok güç elektroniği uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamaların önceki sistemlere göre en önemli artısı, verimlerinin yüksek olmasıdır.

Güç elektroniğinin en önemli uygulama alanlarının başında, motor kontrol uygulamaları gelmektedir. Beyaz eşya, otomotiv, savunma gibi alanlarda çokça kullanılan motor kontrol devreleri sayesinde yüksek verimli sistemler tasarlanmaktadır.

Elektrik makinelerinin motor ve generatör çalışma şekline bağlı olarak elektrik enerjisi mekanik enerjiye ya da mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Bu çevrim rotor ile stator üzerinde bulunan sargılarının veya mıknatısların meydana getirdiği manyetik alanların birbirleri üzerine etkisiyle oluşur. Günümüzde dönüş hareketi sağlayacak şekilde farklı rotor-stator sistemleri olan birçok çeşit elektrik makinesi mevcuttur. Elektrik makinelerinde manyetik alan, sargılardan akan akımlarla ya da sabit mıknatıslarla meydana getirilir. Döner hareketin sağlanması için sargılardan akan akımın şiddeti ve yönü değiştirilir, bu sayede oluşturulan farklı yönlerdeki kuvvet rotor hareketini sağlar.

Doğru akım makinelerinde stator sargılarında sabit bir manyetik alan oluşturulur, bu manyetik alan stator sargılarının doğru akımla beslenmesiyle ya da sabit mıknatıslarla meydana getirilir. Rotor sargılarından ise akım akıtılarak sabit manyetik alan altında kuvvet meydana getirilir ve rotor hareket etmeye başlar. Dönme hareketinin meydana getirilmesi için bu kuvvetinin yönün aksettirilmesi gerekir. Sabit manyetik alan altında kuvvetin aksettirilmesi akımın değiştirilmesiyle mümkündür. Bu akım doğru akım makinelerinde fırça-kollektör düzenleriyle

değiştirilir, akımın rotor sargılarında yön değiştirmesi olayına komutasyon denir. Fırça- kollektör düzeni sürekli temas halindedir ve dönme hareketinin etkisiyle fırça ve kollektör aşınır, sürekli arıza yapar ve makine bakım gerektirir. Doğru akım makinesinin bu durumu ve güç elektroniği devre elemanlarının yanında elektronik kontrol sistemlerinin gelişmesi farklı çözümler bulmayı gerektirmiştir. Fırça- kollektör düzeneği bulunmayan ve doğru akım makinesi karakteristiklerine sahip fırçasız doğru akım makinesi bu duruma çözüm olacak niteliktedir ve piyasada kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Malzeme biliminin gelişmesiyle, akı yoğunluğu yüksek mıknatısların çoğalması, mıknatısların rotor sargılarının yerine kullanılmasına olanak sağlamıştır, bu sayede fırça-kollektör düzeneğinin kullanılmasına gerek kalmamıştır, fakat dönme hareketinin sağlanması için stator sargılarında döner alan yaratılması gerekmektedir, bu durum ise güç elektroniği elemanları ve kontrol düzenleriyle sağlanmıştır. Bu şekilde oluşturulmuş bir makine endüvi ve uyarması yer değiştirmiş sabit mıknatıslı doğru akım makinesi olarak düşünülebilir.

Bu makineler otomotiv sektöründe, uzay uygulamalarında, tıp elektroniğinde, bilgisayar teknolojilerinde, endüstriyel otomasyonda sıkça kullanılmaktadır. Boyutlarına göre üretebildikleri moment miktarı yüksektir. Ayrıca boyutlarının küçük olması dinamik cevaplarının hızlı olmasını sağlar.

Fırçasız doğru akım makinasının avantajlarını ve dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

Avantajları;

- Küçük boyutlarda yüksek güç ve moment üretebilirler.
- Yüksek hızlara kadar çıkabilirler.
- Hız ve moment kontrol olanağına sahiptirler.
- Farklı hızlarda anma momentlerinde çalıştırılabilirler.
- Verimleri yüksektir.
- Fırçasız olduklarından, makine içerisinde ark oluşturmazlar ve fırçalardan çıkan karbon tozlarının meydana gelme durumu yoktur.

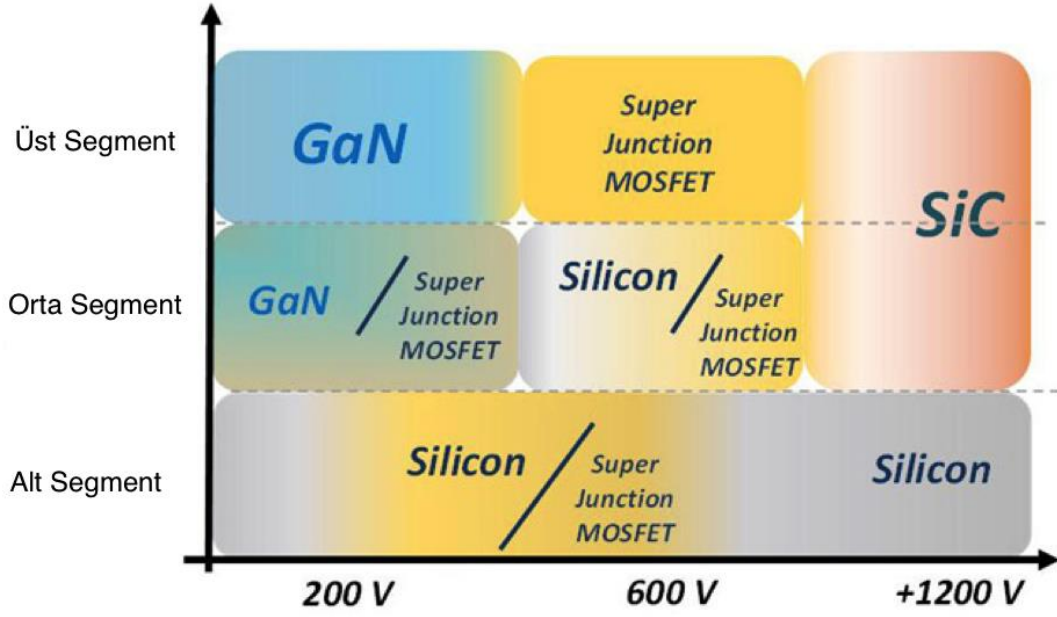
- Uyarmayı sabit mıknatıslarla sağlarlar, bu yüzden uyarma akımına ihtiyaç duymazlar, dönen parçalara elektrik iletimi sorunu ortadan kaldırılmış olur.
- Fırçaları olmadığından sürekli bakım gerektirmezler.
- Uzun ömürlüdürler.
- Elektriksel gürültü üretmezler.
- Sessiz çalışırlar.
- Boyutları küçüktür.
- Moment hız karakteristikleri düzgündür.

Dezavantajları:

- Sabit mıknatısların pahalı olmasından dolayı, üretim maliyetleri yüksektir. Bu yüzden yüksek güçlü olarak üretilmeleri ekonomik değildir.
- Elektronik komutasyon için pozisyon algılayıcıları, mikrodeneleyici gibi kontrol cihazları gerektirirler.

Avantajları bu kadar çok olan fırçasız doğru akım makinalarının kullanım oranının artmasıyla, bu motorların sürülmesi amacıyla kullanılan elektronik devrelerin önemi de artmaktadır. Genellikle bir fırçasız doğru akım motoru, üç fazlıdır ve üç fazlı evirici sistemiyle kontrol edilir. Bu güç elektroniği devrelerindeki en önemli hususlardan birisi eviricinin verimidir. Üç fazlı evirici sistemde altı adet anahtarlama elemanı bulunduğu düşünüldüğünde, evirici sisteminin verimini en çok etkileyen elemanın bu anahtar elemanlar olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar elemanlar, yarı iletken malzemelerin farklı katkılanma ve jonksiyonlanma şekilleriyle üretilen ve akım, gerilim gibi elektriksel büyüklüklerle ilettime geçen ya da kesime geçen devre elemanlarıdır. Günümüzde yaygın olarak Silisyum tabanlı anahtar elemanlar kullanılmaktadır. Bunun yanında yeni yarı iletken teknolojilerinin geliştirilmesiyle anahtarlama elemanları da hızla gelişmektedir. Yakın gelecekte çok daha verimli anahtarlama elemanlarının piyasayı domine etmesi beklenmektedir.



Şekil 1.1: 2010’lu yılların sonundan itibaren güç yarıiletkenlerinin kullanımıyla ilgili bir öngörü [1].

Şekilde de görüldüğü gibi önümüzdeki yıllar içerisinde “Silikon Karbür (SiC)” ve “Galyum Nitrit (GaN)” tabanlı anahtarlama elemanları, orta ve üst segmenti ele geçirecektir. Daha sonra bu teknolojilerin iyice ucuzlamasıyla artık Silisyum tabanlı yarı iletkenlerin yavaş yavaş kullanım dışı kalacağı öngörülmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde, güç elektroniği ve motor kontrol devrelerinin verimini artırmak üzerine kullanılabilecek iki adet yöntem incelenecektir. Bu yöntemlerden birisi, yeni nesil yarı iletkenlerin kullanılmasıyla verimin artışı yöntemidir. GaN tabanlı anahtar elemanlar kullanılarak devrenin verim sonucu gösterilecektir.

Tez kapsamında yapılacak bir diğer çalışma ise, güç devrelerinde verim artışı sağladığı bilinen paralel anahtarlama yöntemi için yeni bir konsept önermektir. Bu amaçla literatürde gerekli araştırmalar yapılmış ve paralel anahtarlama kapı sürüş devreleri üzerine bir çalışma yapılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımla ilgili hesaplamalar, simülasyon sonuçları ve deney sonuçları tezin içinde gösterilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Paralel anahtarlama ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve bulunan bildiriler ve makaleler incelenerek iki ana grupta toplanmıştır. Temel olarak literatürde bulunan araştırmalar, anahtar elemanların paralellenmesinin çeşitli durum ve devre yapıları için incelemesini yapmakta ya da paralel anahtarlama için kapı sürüş devrelerinin özellikleri üzerinde incelemeleri içermektedir.

İlk grupta yer alan araştırmaların başında, Yirming Jiang, Guichao Hua ve Fred C. Lee tarafından yapılan çalışma gelmektedir. Araştırmacılar bu çalışma ile anahtar elemanların paralellenmesi konseptini oluşturarak güç elektroniği çalışmalarına yeni bir yol çizmişlerdir [2]. Bu makalenin devamı olan çalışmada ise köprü tipi çeviricilerde anahtar paralelleme konsepti incelenmiştir [3].

Bu çalışmalarla açılan yoldan ilerleyen Chong Ho Yang ve Yung C. Liang, çalışmalarında paralel bağlı anahtarlama elemanlarının dc ve küçük işaret analizlerini yaparak devrelerin geçici ve sürekli hal sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Ayrıca eleman parametrelerine bağlı bir algoritma ile bu analizlerin kolaylaştırılmasını sağlamışlardır [4].

Jody J. Nelson, Giri Venkataramanan ve Bruce C. Beihoff tarafından yayınlanan makalede araştırmacılar, beş farklı IGBT elemanının birbirleriyle paralelleyerek eleman parametrelerinin uygunluğunun önemini ortaya koymaya çalışmışlardır [5].

Jonathan W. Kimball ve Patrick L. Chapman, araştırmalarında paralel anahtarlama yapılan devrelerde iletim kayıplarının hesabı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın önemi, kaybı inceleyen ilk çalışmalardan biri olmasıdır [6]. Sonrasında Xuesong Wang, Zhengminig Zhao ve Liqiang Yuan tarafından yayınlanan makalede termal dirençleri eş olmayan iki elemanın akımı nasıl paylaşacakları üzerine bir çalışma yapılmış, iletim kayıplarının daha gerçekçi hesaplanması sağlanmıştır [7].

Sakhon Woothipatanapan, Anuwat Jangwanitlert ve Phop Cancharoensook, çalışmalarında 3 fazlı bir anahtarlama relüktans motorunun sürücü devresinde paralelleme metodunu kullanarak sağlanan verim artışını göstermişlerdir [8].

İkinci grupta yer alan araştırmaların ilki H.P.Yee, ve Dean Liu tarafından yayınlanan araştırmadır. Yazarlar bu çalışmalarında anahtar elemanların kapı sürüş işaretlerinin paralel anahtarlama için uygun hale getirilmesi için bir ASIC (Application Specific

Integrateg Circuit- Uygulamaya Özgü Tümdevre) tasarımı önermişlerdir. Tezin ilerleyen kısmında bu araştırma daha ayrıntılı anlatılacaktır [9].

D. Bortis, P. Steiner, J.Biela ve J.W. Kolar makalelerinde çok katmanlı bir kapı sürüş devresiyle kapı sürüş önermişlerdir [10].

Rodrigo Alvarez ve Steffen Bernet, çalışmalarında kapı sürüş devreleri için FPGA (Field Programmable Gate Array) tabanlı bir algoritma önererek oldukça iyi bir anahtarlama sonucu elde etmişlerdir. Bu çalışmanın özelliği, kapı işaretlerini manipüle ederek olumlu sonuçlara ulaşılabileceğini göstermiş olmasıdır [11].

Heeral P. Sheth ve Ankit M. Adesara tarafından yapılan çalışmada farklı kapı sürüş teknikleri kullanılarak yapılan devre simülasyonlarıyla verim açısından yöntemlerin analizi yapılmaya çalışılmıştır [12].

2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNDE KULLANILAN YARI İLETKEN VE MANYETİK ELEMANLAR

2.1 Yarı İletkenler

Yarı iletkenler, elektrik akımını geçirmek açısından iletkenler ile yalıtkanlar arasında bulunan malzemelerdir. Bu maddelerin elektrik iletkenliği, ışık, ısı, elektromanyetik etki gibi sebeplerden ötürü değişir. Silisyum ve Germanyum, yarı iletken malzemelerin en önemli örnekleridir.

Yarı iletken maddeler, saf olarak kullanılmazlar. Başka malzemelerle katkılandırılırlar. Bu katkılandırma sonucu P ve N tipi yarı iletken malzemeler ortaya çıkar. P tipi malzemede boşluklar çoğunlukta iken N tipi malzemede ise bu boşlukları dolduracak olan elektronlar çoğunluktadır. Elektronların boşlukları doldurması ile devreden akım geçer ve yarı iletken eleman iletken hale gelmiş olur.

Günümüzde yarı iletken malzemelerle üretilen elektronik eleman sayısı oldukça fazladır. Diyotlar, tristörler, bipolar jonksiyonlu transistörler, alan etkili transistörler ve benzeri birçok eleman N ve P tipi maddelerin doğru kombinasyonu ile oluşturulmuştur. N ve P tipi maddelerin birleştirildiği noktalara jonksiyon adı verilir.

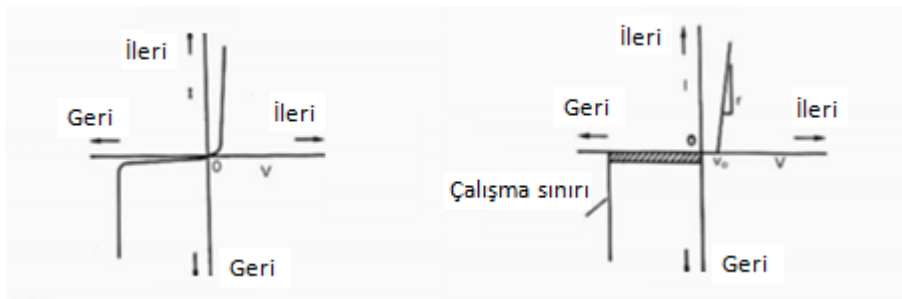
Teknolojinin ilerlemesiyle mikro elektronik alanında büyük atılımlar gerçekleşmiş ve jonksiyonlar müthiş derecede küçültülmüştür. Örneğin bilgisayarların kalbi olan işlemcilerde milyarlarca tranzistör bulunmaktadır. Bir bilgisayar işlemcisinin boyutu düşünüldüğünde, milyarlarca tranzistörün o boyuta sığmasının tek yolunun mikrometreler mertebesinde küçük olmaları olduğu görülecektir.

Bu bölümde güç elektroniği devrelerinde kullanılan yarı iletken elemanlar tanıtılacaktır.

2.2 Diyot

Diyotlar, güç elektroniği devrelerinde kullanılan en basit yarı iletken elemanlardır. Anot ve katot olmak üzere iki uçları vardır. İdeal diyotta anot tarafına katot tarafından daha yüksek bir gerilim uygulandığında diyot ileri yönde iletme geçer. Bunun sağlanması için eleman içerisinde bir adet P-N jonksiyonu bulunmaktadır. İdeal diyot kayıpsız bir eleman olarak gözükmemektedir. Ancak jonksiyonun elektriksel direnci ve diyot içinden akan akım sebebiyle diyot üzerinde Ohm Kanunu'na göre bir gerilim düşümü yaşanır [13]. Bu gerilim düşümü diyotun kayıplı bir eleman olmasına sebep olur.

Diyotlar ile ilgili bazı temel parametreler vardır. Bunların ilki ileri gerilim düşümüdür. Diyot iletimdeyken üzerine düşen gerilimi ifade eder. Bozulma (breakdown) gerilimi, diyota ters yönde uygulandığında, elemanı iş görmez hale getiren gerilimdir. Ters akım, pratikte diyotun ters yönde akıttığı akımdır ve 10^{-14} A mertebesindedir. Ayrıca diyotun anahtarlama hızını belirleyen ve düzelme (recovery) zamanı olarak belirtilen bir diğer parametre daha vardır. Bu parametre, anahtarlama güç kaynağı uygulamalarında seçilecek diyotların belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bir diyotun tipik davranışı aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.1: Diyot karakteristiği (gerçek solda ideal sağda) [13].

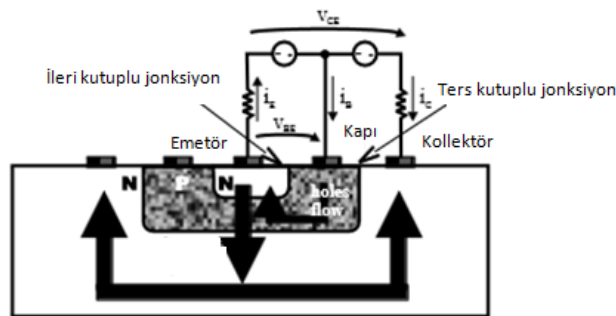
Şu anda piyasada farklı amaçlar için üretilen diyotlar bulunmaktadır. Küçük işaretler için kullanılan diyotlar, güneş pillerinde kullanılan fotodiyotlar, çeşitli amaçlarla kullanılabilen ışık yayan diyotlar (LED) bunlara örnektir. Bu çalışmayı güç diyotları ve aşağıda daha ayrıntılı olarak bahsedilecek olan zener diyotlar ilgilendirmektedir.

2.3 Bipolar Jonksiyonlu Tranzistör (BJT)

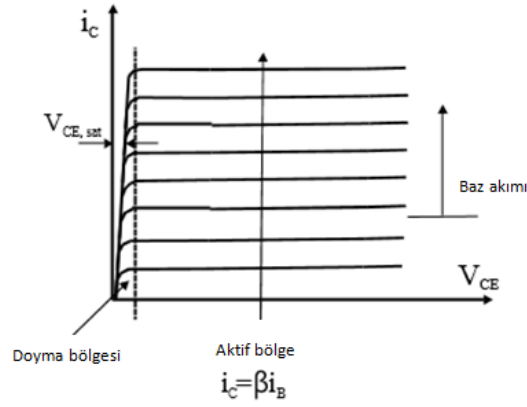
Bipolar jonksiyonlu tranzistörler, tam kontrollü ve 3 bacaklı elemanlardır. Bacakları baz, kollektör ve emetör olarak adlandırılırlar. N ve P tipi maddenin 2 jonksiyon oluşturmasıyla üretilir. Üretim tarzına göre NPN ya da PNP olarak adlandırılır.

En basit şekilde transistörün bazından küçük bir akım akıtıldığında transistör iletme geçer ve tipine göre kollektörden emetöre ya da emetörden kollektöre doğru akım akar. İletim durumu baz akımıyla kontrol edildiğinden bu eleman akım kontrollü eleman olarak da anılır. İletim durumunda transistör üzerine bir miktar gerilim düşümü olur.

BJTlerin MOSFETlere göre en büyük avantajı düşük anahtarlama frekanslarında iletim kayıplarının daha az olmasıdır. Ancak N-P jonksiyonlarının yapısı sebebiyle iletim-kesim geçişleri yavaştır. Dolayısıyla yüksek hızda anahtarlama yapamazlar. Bu çıkış dalgalılığını etkileyen önemli bir faktördür. Düşük anahtarlama frekanslarında çıkış filtresinin kapasite değeri çok artmaktadır. Bu önemli bir dezavantajdır. Ayrıca akım kontrollü elemanlar oldukları için sürücü devreleri MOSFET ve IGBTlere göre çok karmaşıktır ve bu yüzden günümüzde çok fazla tercih edilmezler. Kullanılabildikleri maksimum güç değerleri de güç elektroniği uygulamaları için yetersizdir. Bunların dışında elemanın ileteceği akımın miktarını belirleyen katsayı, çevresel faktörlere karşı çok hassastır[13]. Daha çok analog işaret kuvvetlendiriciler içeren bazı haberleşme uygulamalarında kullanılırlar.



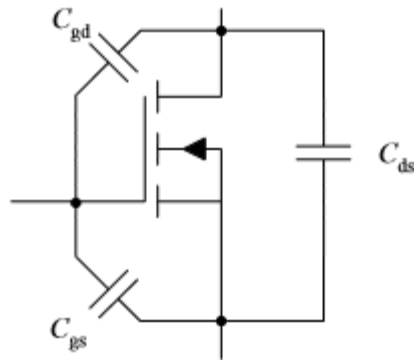
Şekil 2.2: BJT enine kesiti ve modeli [13].



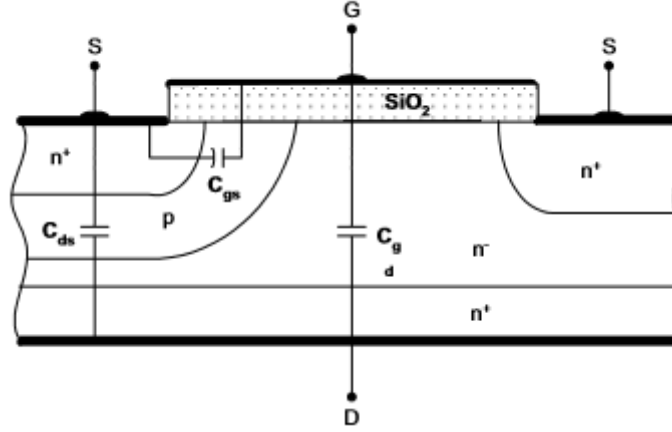
Şekil 2.3: BJT çalışma bölgeleri [13].

2.4 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Yetmişli yıllarda alan etkisinin yarı iletken cihazlara uygulanmasıyla birlikte Alan Etkili Transistörler (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor- MOSFET) kullanılmaya başlandı. MOSFETler adlarından da anlaşılacağı gibi elektrik alan etkisiyle ilettime geçen anahtarlama elemanlarıdır. Elektrik alanının oluşması için bir gerilim uygulanması gerekir. Bu sebeple MOSFETler gerilim kontrollü elemanlar olarak anılırlar. İletime geçmeleri için gereken akım miktarı ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



Şekil 2.4: MOSFET devre şekli ve temsili kondansatörler[13].



Şekil 2.5: MOSFET enine kesiti[13].

MOSFETler, kapı ile kaynak arasındaki gerilim ile kontrol edilirler. Bu gerilim bir elektrik alan oluşturduğu için kapı – kaynak arası yapı bir kondansatör ile temsil edilebilir. Dolayısıyla kontrolün sağlanması, bu kondansatörün doldurulup boşaltılmasıyla alakalıdır denilebilir. Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi MOSFETler N kanallı ve P kanallı olarak adlandırılırlar. Uygulanan elektrik alanın büyüklüğü ile bu kanalların genişliği kontrol edilir. Kanalların genişliği elektronların akmasıyla direkt ilgili olduğu için bu sayede iletim kontrol edilmiş olur.

MOSFETlerin, kanallarının yapısına göre iki modu vardır: Enhancement channel (genişleyen kanal) ve depletion channel (daralan kanal). Genişleyen kanallı MOSFETler, gate-source arasına bir gerilim uygulanınca ilettime geçerler. Daralan kanallı MOSFETlerde ise durum tam tersidir. Günümüzde yaygın kullanım şekli genişleyen tiptir.

Bir MOSFET’te kanal oluşması için öncelikle kapı ile kaynak arasına bir gerilim uygulanır. Uygulanan bu gerilim sayesinde C_{gs} ile gösterilen MOSFETin enine kesitinde görülen SiO_2 tabakada bir kutuplanma oluşur. Metal oksit tabakada oluşan bu gerilim, elemanın içinde bir elektrik alan meydana getirir. Meydana gelen bu elektrik alan sayesinde yarı iletken malzemenin içindeki elektronlar harekete geçerler. Bu sayede kanal açılır ya da kapatılır.

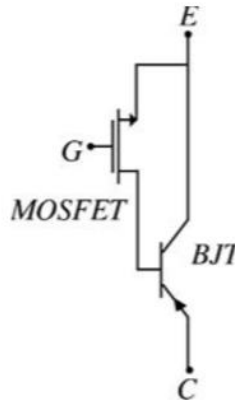
MOSFETlerin kullanım alanlarına göre bir çok farklı konfigürasyonu vardır. Örneğin çift kapılı MOSFETler, radyo frekansındaki uygulamalarda sıkça kullanılır. Sayısal uygulamalar için geliştirilen düşük güçlü lojik MOSFETlerin yanında, anahtarlamalı güç kaynaklarında da kullanılan ve birkaç kilowatta kadar olan güçleri

anahtarlayabilen Power MOSFETler de bulunmaktadır. Bu yapıları birbirinden ayıran temel fark jonksiyon geometrilerinin farklı olmasıdır.

MOSFETler iletim sırasında bir direnç olarak modellenenebilir. Dolayısıyla eleman üzerinde akımın karesi ile doğru orantılı olan bir kayıp güç ortaya çıkar. Bu nedenle BJTLere göre iletim kayıpları daha yüksektir. Ancak BJTLer en çok 10kHz mertebesindeki frekanslarda çalışabilirken MOSFETler rahatlıkla MHz mertebelerinde çalışabilmektedir. Bu nedenle güç elektroniği uygulamalarında BJTLere göre çok daha fazla kullanılırlar. IGBTlere karşı ise hız açısından büyük üstünlükleri bulunmaktadır. Ancak 10kW'ın üstü güçler için MOSFET kullanımı uygun değildir [14].

2.5 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

MOSFETlerin yüksek iletim kaybına sahip olması, üreticileri değişik uygulamalar aramaya itmiştir. Bu arayışların sonucu olarak 80'li yılların başında IGBTler (Insulated Gate Bipolar Transistor) bulunmuştur. IGBTler en basit anlamda bir MOSFET ile bir BJTnin Darlington bağlanmasıyla modellenirler.



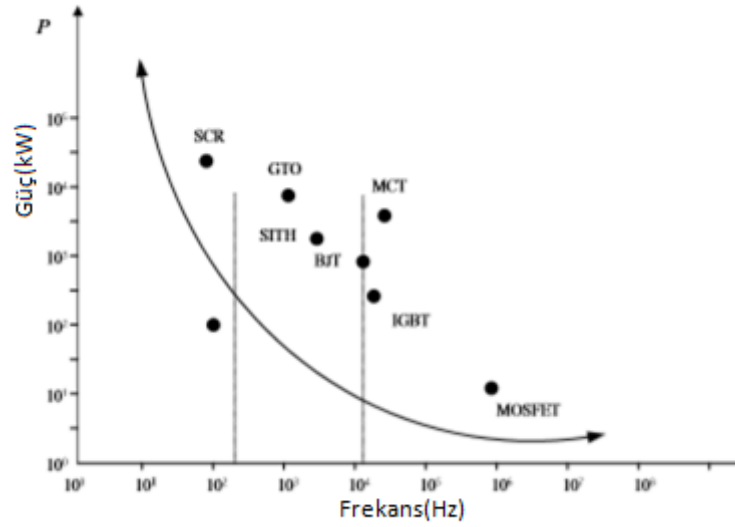
Şekil 2.6: IGBT'nin MOSFET ve BJT'li modeli[13]

IGBTler MOSFET ve BJTLerin avantajlarını birleştirirler. BJTLerin düşük iletim kayıpları ile MOSFETlerin kolay sürülme özelliği, IGBTlerde bir aradadır. Ayrıca yüksek güçlerde kullanılmak için uygun elemanlardır. Ancak hala MOSFETlerin kullanımda olmasının sebepleri olarak ucuz IGBTlerin hız olarak henüz MOSFETleri yakalayamaması ve hızlı IGBTlerin yüksek maliyetleri gösterilebilir.

Aşağıdaki 2 şekilde anahtar elemanların karşılaştırmaları ve kullanılabilecekleri güç aralıkları gösterilmektedir.

Çizelge 2.1: Anahtar elemanların karşılaştırılması [13].

Eleman	Yıl	V _{maks.}	I _{maks.}	f _{maks.}	P _{maks.}	Ger. Düş.
Tristor	1957	6 kV	3,5kA	500 Hz	100 MW	1,5 – 2,5 V
Triyak	1958	1 kV	100A	500 Hz	100 kW	1,5 – 2 V
GTO	1962	4,5 kV	3 kA	2 kHz	10 MW	3 – 4 V
BJT	1960	1,2 kV	800 A	10 kHz	1 MW	1,5 – 3 V
MOSFET	1976	500 V	50 A	1 MHz	100 kW	1– 2 V
IGBT	1983	1,2 kV	400 A	20 kHz	100 kW	1 – 2 V
GaN	1990	600 V	50 A	>10 MHz	100 kW	0 – 1 V



Şekil 2.7: Güç-frekans değişiminde eleman kullanım şeması [13].

2.6 GaN Tabanlı Anahtar Elemanlar

Galyum Nitrat ya da kısa adıyla GaN anahtarlar, Silisyum tabanlı yarı iletkenlerin yukarıda belirtilen hız, maliyet, dayanım, verim gibi dezavantajlarının giderilmesi üzerine geliştirilmeye başlanan bir yarı iletken teknolojisidir. Açılma kapanma süreleri, iletim kayıpları ve tahmini üretim maliyetleri oldukça düşük olan bu teknoloji, günümüzde ilk meyvelerini vermiştir. Şu anda GaN tabanlı anahtar elemanlar –oldukça yüksek fiyatlı olsa da- piyasada yer almaya başlamıştır. Üretim miktarlarının artmasıyla bu elemanların fiyatları düşecek ve güç elektroniği alanındaki yeni yönelim bu elemanların kullanılması olacaktır. Fiyatlarının düşeceği konusundaki iddiaların en önemli sebeplerinden birisi de GaN tabanlı yarı iletken üretim prosesinin Silikon tabanlı yarı iletkenlere göre oldukça kolay olmasıdır.

2.7 Manyetik Elemanlar

Manyetik elemanlar, bir demir çekirdeğin üzerine sarılan sarımlardan oluşan devre elemanlarıdır. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan manyetik elemanlar, genel olarak enerji depolama ve çevirici çıkışlarında filtre amacıyla kullanılırlar.

Temelde iki çeşit manyetik eleman vardır: Endüktans ve transformatör. Endüktanslar, demir çekirdeğin etrafında tek bir sarımdan oluşan yapılardır. Bir endüktansın sarımlarından akım akıtıldığında çekirdeğinde bir akı oluşur. Uygun malzemeden yapılmış bir çekirdek, bu akıyı muhafaza eder ve gerektiği zaman kullanılmak üzere yüke verir. Bu şekilde devrede akımın kesintisiz olarak akması sağlanır.

Motor kontrol devrelerinde, genelde, işlemci, kapı sürüş devresi gibi elemanların beslenmesi için bir anahtarlama gücü kaynağı kullanılır. Anahtarlama gücü kaynakları için kullanılan transformatörler, normal transformatörlere göre oldukça farklıdır. Normalde kullanılan güç ve dağıtım transformatörleri, 50 Hz ya da 60 Hz frekansa göre tasarlanırlar ve üretilirler. Anahtarlama gücü kaynaklarındaki transformatörler ise oldukça yüksek frekanslarda çalışabilmelidir. Dolayısıyla farklı çekirdek malzemelerinden üretilirler. Normal transformatörler ile anahtarlama gücü kaynağı transformatörlerinin bir diğer farkı mıknatıslanma endüktansıdır. Mıknatıslanma endüktansları, anahtarlama gücü kaynağı trafolarının enerji depolamasını sağlar. Normal transformatör uygulamalarında bu istenmeyeceğinden çekirdek malzemesinin manyetik geçirgenliği anahtarlama gücü kaynağı trafolarının kine oranla yüksek olmalıdır.

3. TEMEL GÜÇ ELEKTRONİĞİ VE MOTOR KONTROL DEVRELERİ

3.1 Alçaltıcı Çevirici

Buck çeviriciler, en basit anahtarlama güç kaynağı yapısıdır. Bu tip devrelerin yapısı oldukça basittir. Güç kaynağına seri olarak bağlanan bir anahtarlama elemanı ile yük gücü değeri düşürülür (Şekil 3.1). Bu sebepten dolayı bu tip devrelere alçaltıcı devreler de denir.

Çeviricilerde gerilim çevirme fonksiyonu hesaplanırken kullanılması gereken iki adet kural vardır. Bu kurallar çeviricinin kararlı olması için sağlanması gereken kurallardır. İlk olarak kararlı çalışma durumunda bir çeviricide, endüktansın bir periyot sonundaki net gerilimi sıfır olmalıdır. Buna endüktansın amper-saniye dengesi denir. Benzer şekilde çeviricinin kapasitesinin bir periyot sonundaki net akımı yine sıfır olmalıdır. Buna kapasitenin gerilim-saniye dengesi denir. Bu kuralların uygulaması şu şekildedir:

$$V_{LD T_s} * DT_s + V_{LD' T_s} * D' T_s = 0 \quad (3.1)$$

$$I_{CD T_s} * DT_s + I_{CD' T_s} * D' T_s = 0 \quad (3.2)$$

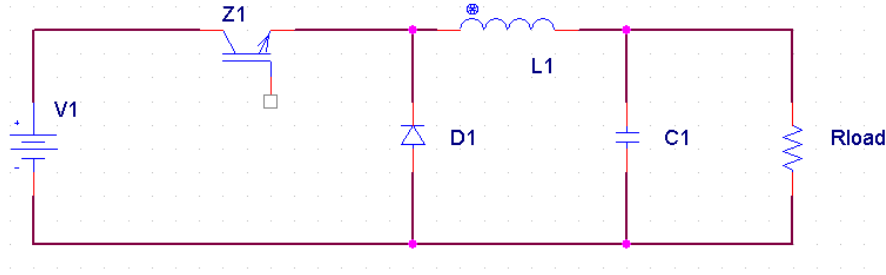
Çıkış akım ve geriliminin dalgalılığı ise akım ve gerilim grafiklerinin eğimleri üzerinden hesaplanır.

Buck çevirici için sürekli akım modu durumundaki gerilim değiştirme ve dalgalılık (Şekil 3.2) formüllerini yazmak gerekirse:

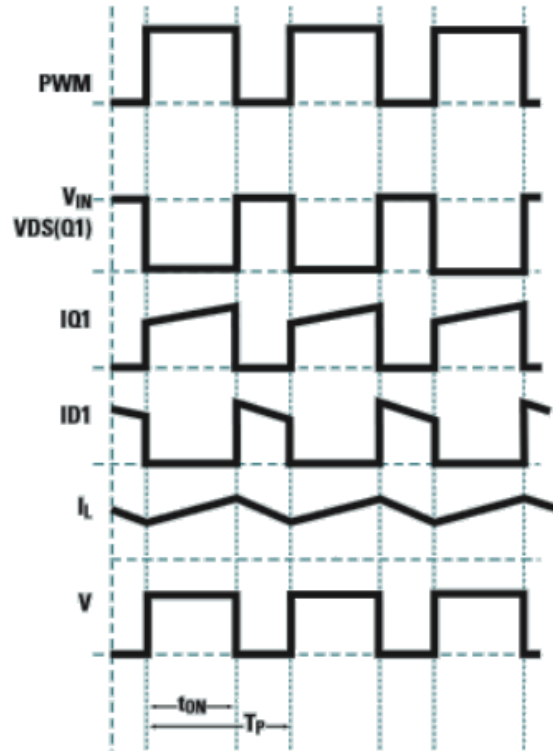
$$V_o = D * V_d \quad (3.3)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_o * (1-D)}{L * f_s} \quad (3.4)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o * (1-D)}{8 * L * C * f_s^2} \quad (3.5)$$



Şekil 3.1: Alçaltıcı çevirici.



Şekil 3.2: Alçaltıcı çevirici dalga şekilleri [15].

3.2 Yükseltici Çevirici

Boost çeviriciler, girişlerine uygulanan gerilimi yükselterek çıkışa veren çevirici yapılarıdır. Anahtar kapalıyken endüktansın akımı doğrusal olarak artar. Bunun yanında ters kutuplanmış olan diyot kesimde kalır. Anahtar açıldığı zaman diyot ilettime geçer ve endüktansın içinde depolanan enerji yüke aktarılır.

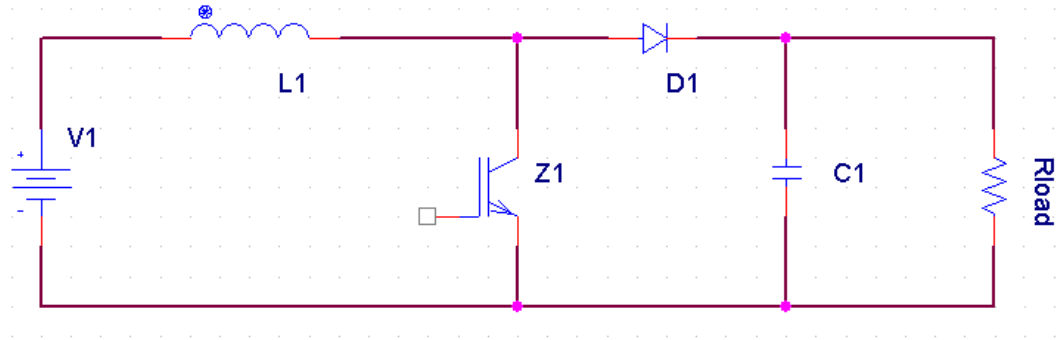
Yükseltici çevirici için devre denklemleri şu şekildedir:

$$V_o = \frac{V_d}{(1-D)} \quad (3.6)$$

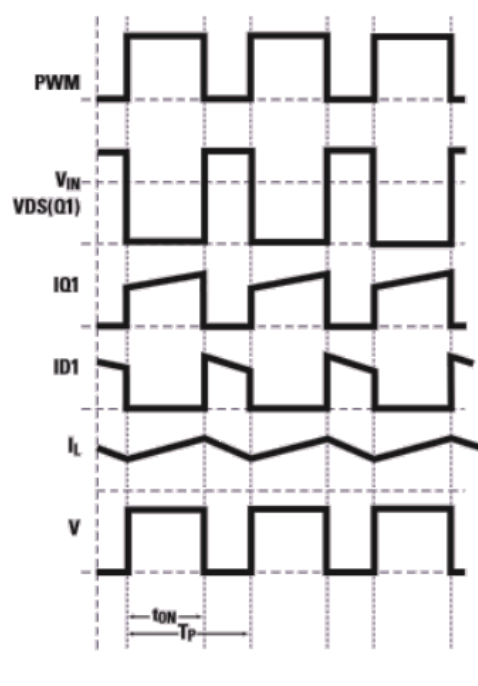
$$\Delta i_L = \frac{V_d * D}{L * f_s} \quad (3.7)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o * D}{R * C * f_s} \quad (3.8)$$

Devre yapısı ve dalga şekilleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.3: Yükseltici çevirici.



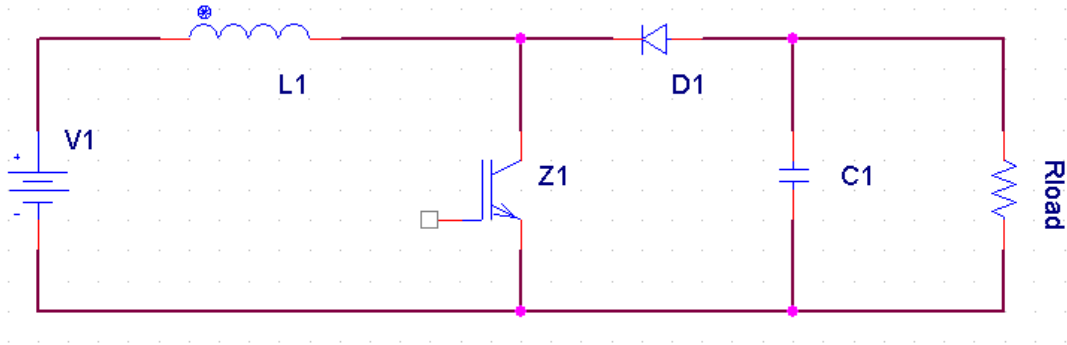
Şekil 3.4: Yükseltici çevirici dalga şekilleri [15].

3.3 Alçaltıcı – Yükseltici Çevirici

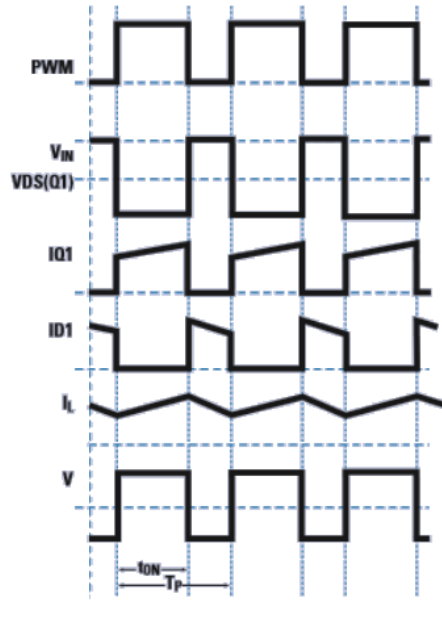
Adından da anlaşılacağı üzere buck boost çeviriciler hem alçaltıcı hem de yükseltici yönden çalışabilen çeviricilerdir. Bu durum, çeviricinin transfer fonksiyonu yazıldığında çalışma oranının hem payda hem de paydada görülmesinden kaynaklanır.

Alçaltıcı – yükseltici çeviricilerde anahtar açıkken endüktans, içinden akan akım sayesinde enerji depolar. Bu sırada diyot ters kutuplu olduğundan yüke doğru bir güç akışı olmaz. Anahtar kapalıyken ise diyot doğru kutuplanır ve üzerinden akım akıtır. Burada dikkat edilmesi gereken şey diyotun doğru kutuplandığı durumda yükün üzerindeki gerilimin kaynak gerilimine göre negatif değerde olacağıdır.

Alçaltıcı – yükseltici çeviriciler çift yönlü çalışabildikleri için oldukça faydalı çeviricilerdir. Ancak boost işletmesi sırasında çok yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğu için endüktansın değeri oldukça yüksek boyutlara çıkar. Bu sebepten ötürü çok geniş kullanım aralıkları sunamazlar.



Şekil 3.5: Alçaltıcı – yükseltici çevirici.



Şekil 3.6: Alçaltan – yükselten çevirici dalga şekilleri [15].

Alçaltıcı – yükseltici çeviricinin gerilim çevirme ve dalgalılık formülleri aşağıdaki gibidir:

$$V_o = \frac{V_d * D}{(1-D)} \quad (3.9)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_d * D}{L * f_s} \quad (3.10)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o * D}{R * C * f_s} \quad (3.11)$$

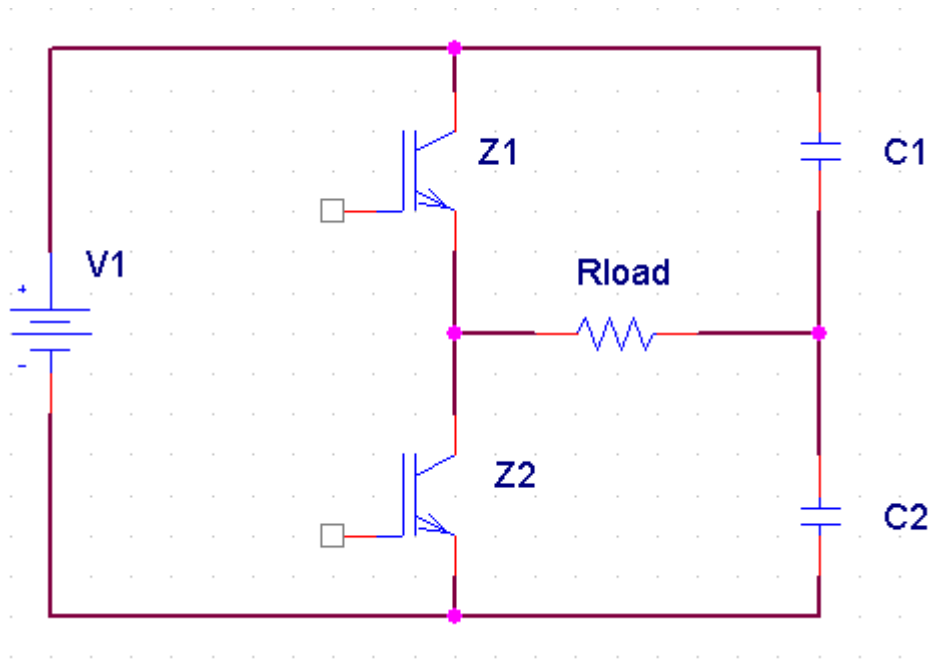
3.4 Köprü Çeviriciler

Köprü çeviriciler, uygulanan gerilimin yönünü değiştirebilen çevirici yapılarıdır. Akım yolunu değiştirerek, yük üzerinde gerilim farkları yaratabilirler. Bu özellikleri dolayısıyla motor kontrol devreleri için en uygun çevirici tipi, köprü çeviricilerdir. Motor kontrol devreleri dışında bir diğer popüler uygulama olan rezonans tabanlı güç çeviricileri için de köprü çeviriciler oldukça uygun yapılardır.

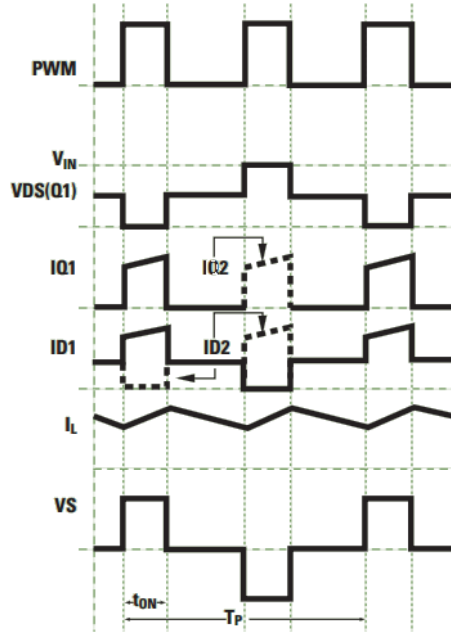
Köprü çeviriciler, yarım köprü ve tam köprü olarak ikiye ayrılırlar.

3.4.1 Yarım Köprü Çeviriciler

Yarım köprü çevirici topolojisi, en basit köprü evirici topolojisidir. 2 anahtar eleman ve 2 kondansatör vasıtasıyla gerilimin yönü ve ortalama değeri değiştirilerek yüke uygulanır. Yön değiştirme imkanı sayesinde, evirici olarak kullanılmaları mümkündür. Devre şeması, dalga şekilleri ve gerilim çevirme denklemi aşağıdaki gibidir. Devre şemasında kondansatörlerin ve anahtar elemanların orta uçlarından çıkarılan kısım yüke gidebileceği gibi, buradaki şemada olana benzer biçimde bir transformatörden geçirilerek gerilim-akım büyüklükleriyle oynanabilir. Köprü çeviricilerin yön değişikliğine izin veren yapısı, transformatör kullanımını da mümkün kılmakta ve devre yapısının kolaylaşmasını sağlamaktadır. Transformatör çıkışı doğrultulup filtrelenerek yüke ihtiyacı olan düzgün akım ve gerilim dalga formunun uygulanması için diyot, endüktans ve kondansatör kullanılmıştır.



Şekil 3.7: Yarım köprü çevirici devre şeması.



Şekil 3.8: Yarı köprü çevirici dalga şekilleri [15].

$$V_o = D * V_d \quad (3.12)$$

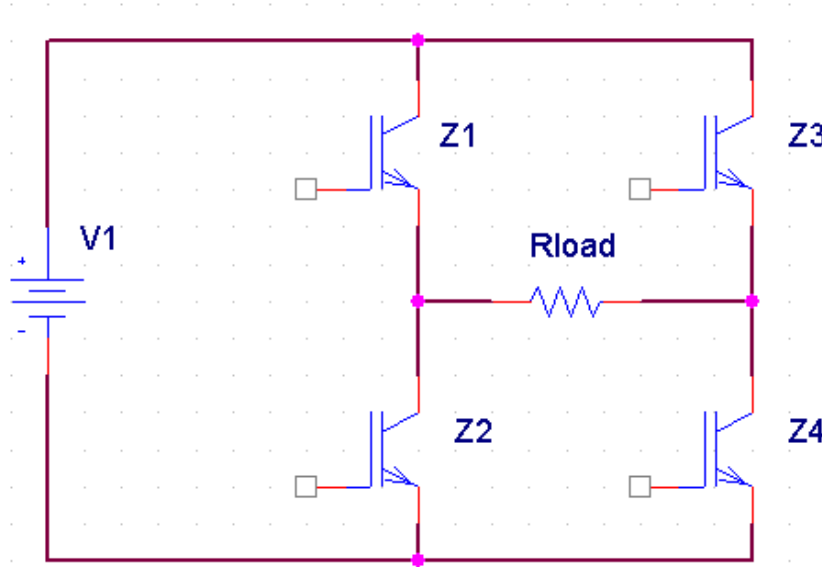
Görüldüğü gibi yarı köprü çeviricinin gerilim çevirme oranı, alçaltıcı çevirici ile aynıdır. Yük akım ve geriliminin dalgalılığı ise yükün ne olduğuyla doğrudan ilgilidir. Örneğin yukarıdaki şemada yarı köprü çevirici için yük bir transformatör ve doğrultucu iken başka bir uygulamada direk olarak motor olabilir. Dolayısıyla sabit bir yük akım ve gerilim dalgalılığı fonksiyonlarından bahsetmek mümkün değildir.

3.4.2 Tam Köprü Çeviriciler

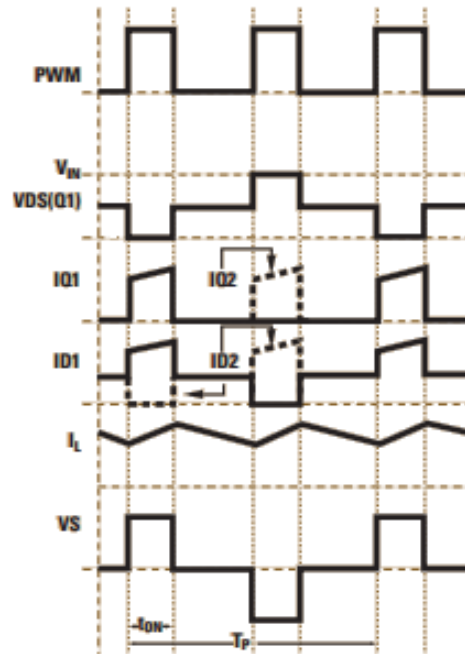
Tam köprü çeviriciler, 4 anahtar eleman içeren devre yapılarıdır. Anahtar sayısının ikiden dörde çıkması sayesinde akım ve gerilimin faz ve dalga formu üzerindeki kontrol olanağı daha fazladır. Yarı köprü çevirici yapısına ek olarak yük üzerinden güç alımı gibi avantajlar barındırırlar. Bu yapılar sayesinde günümüzün popüler konularından olan motorların hem motor hem generatör olarak kullanılması ilk defa mümkün olmuştur. Örnek vermek gerekirse çoğu otomotiv şirketi, konu üzerinde araştırma-geliştirme çabaları yürüterek günümüz otomobillerinde bu teknolojinin kullanılmasına çalışmaktadır. Bu sayede hem ana fren sistemine destek olacak bir yardımcı frenleme olarak rejeneratif frenleme kullanılabilir, hem de otomobil içi elektrik-elektronik sistemlerin ihtiyaç duyduğu gücü sağlayan akü rejeneratif frenden

elde edilen enerjiyle şarj edilerek bir miktar yakıt tasarrufu sağlanır. Uygulama alanlarının sayısını artırmak mümkündür.

Tam köprü çeviricilerin devre şeması, dalga şekilleri ve gerilim çevirme fonksiyonu aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.9: Tam köprü çevirici devre şeması.



Şekil 3.10: Tam köprü çevirici dalga şekilleri[15]

$$V_o = 2 * D * V_d \quad (3.13)$$

Görüldüğü gibi gerilim çevirme oranının yarım köprü çeviriciden farkı, yüke bir periyotta yarım köprünün tam 2 katı gerilim uygulamasıdır. Yarım köprü çeviricideki benzer bir sebeple tam köprü çeviricide de sabit bir yük akım ve gerilim dalgalılığı fonksiyonlarından bahsetmek mümkün değildir.

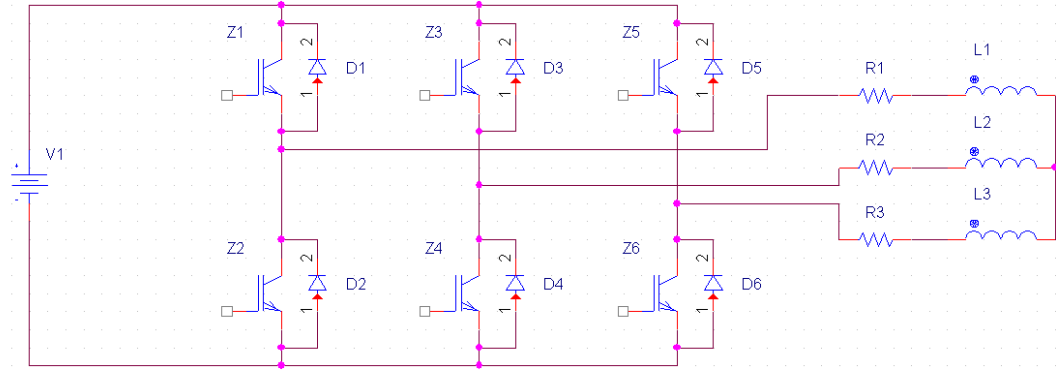
3.4.3 Altı Anahtarlı Köprü Çeviriciler

Üç fazlı motorların sürülebilmesi için üç fazlı akım üretebilen devreler gereklidir. Bu konuda yarım ve ya tam köprü çeviriciler yetersiz kalmaktadır. Bu açığın giderilmesi için altı anahtarlı köprü çeviriciler oluşturulmuştur. Altı anahtarlı köprü çeviriciler, özellikle fırçasız doğru akım motoru ve asenkron motor sürücüsü olarak sıkça kullanılan devrelerdir. Yüksek gerilim iletim uygulamalarında, solar uygulamalarda, kesintisiz güç kaynaklarında da sıkça kullanılırlar.

Altı anahtarlı çeviriciler temel olarak anahtar elemanların sırayla anahtarlanarak köprünün kollarından istenen anlarda akım akıtılmasını sağlarlar. Yük fazlarına giden akımın şekli ve fazı tamamen anahtarlama ile ilgili olarak değiştirilebilir. Bu sayede yük harmoniklerinin azaltılması da mümkün olmaktadır. Anahtarlamanın ayarlanmasıyla motorun istenen fazları ateşlenerek hız denetimi, akımın değeri kontrol edilerek ise moment denetimi yapılması mümkündür.

Motor akımının dalga şekli, anahtar elemanların kapı işaretleriyle ayarlanabilir. Standart PWM metodu kullanıldığında motora akan faz akımları kare dalga şeklinde oluşur. Sinüzoidal PWM kullanıldığında ise motor akımları sinüzoidal şekilde olacaktır. Uygulamanın isterine göre anahtarlama yöntemi seçilebilir.

Şekil 3.11’de motor sürüş amaçlı kullanılabilecek bir altı anahtarlı köprü çevirici yapısı ve motoru temsilen üç fazlı bir RL yükü görülebilir. IGBTlere paralel diyotlar sayesinde akımın patikası tamamlanabilmektedir. Motor sürücüler için özel geliştirilen IGBTlerde bu diyot, paket içinde de bulunabilmektedir.



Şekil 3.11: Üç fazlı RL yükünü sürebilecek bir altı anahtarlı köprü çevirici yapısı

4. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNDEKİ ANAHTAR ELEMANLARIN KAYIPLARININ AZALTILMASI

Bir önceki bölümde gösterildiği gibi, güç elektroniği devrelerinin tamamında anahtarlama elemanları, yüksek frekanslı açma kapama yapmak amacıyla kullanılırlar. Aynı zamanda iletimde kaldıkları süre boyunca üzerlerinden ciddi miktarlarda akım geçirirler. Bu durum, anahtar elemanların güç elektroniği devrelerindeki kayıpların en büyük yüzdesini oluşturmalarına neden olur.

Anahtarlama güç kaynaklarında kullanılan anahtar elemanlar, her eleman gibi, kayıplı elemanlardır. Bu elemanların kayıpları, devredeki kayıpların büyük kısmını oluşturdıkları için verim bakımından önemli yer tutarlar. Anahtarlama ve iletimin çeşitli anlarında kayıp ifadeleri aşağıdaki gibidir:

Gecikme süresince oluşan kayıp:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^{t_d} P(t) dt = I_{DS} * V_{CC} * t_d * f_s \quad (4.1)$$

Yükselme süresince oluşan kayıp:

$$P_r = \frac{1}{T} \int_0^{t_r} P(t) dt = \left(\frac{V_{CC}}{2} + \frac{V_{DSon} - V_{CC}}{3} \right) * I_o * t_r * f_s \quad (4.2)$$

İletim süresince oluşan kayıp:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^{t_c} P(t) dt = I_o^2 * R_{DSon} * t_c * f_s \quad (4.3)$$

Saklama süresince oluşan kayıp:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^{t_s} P(t) dt = I_o^2 * R_{DSon} * t_s * f_s \quad (4.4)$$

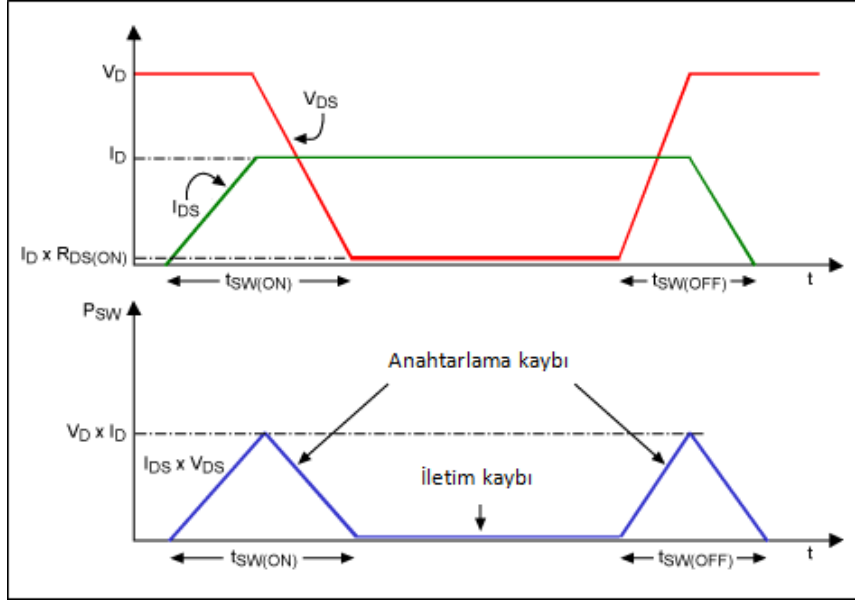
Düşme süresince oluşan kayıp:

$$P_f = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} P(t) dt = \frac{V_{CC} * I_o}{6} * t_f * f_s \quad (4.5)$$

Toplam kayıp:

$$P_t = P_d + P_r + P_c + P_s + P_f \quad (4.6)$$

Gecikme ve saklama süreleri çok çok kısa olduğu için kayıplar hesaplanırken ihmal edilebilirler. Bu süreler ihmal edildiğinde bir MOSFET'in akım, gerilim ve kayıp grafiği aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.1: Anahtar eleman için iletim eğrileri ve kayıpları [16].

Tüm bu kayıplar eleman üzerinde ısı olarak ortaya çıkar ve bu ısı, elemanın bozulmasına yol açabilir. Bunu engellemek için soğutucu tasarımı yapılır. Soğutucular boyutlandırılırken elemanın dayanabileceği en yüksek sıcaklık ve ortam sıcaklığı göz önüne alınır.

$$T_j = P_t * (R_{\sigma jc} + R_{\sigma cs} + R_{\sigma sa}) + T_a \quad (4.7)$$

Soğutucu tasarlanırken aslında $R_{\sigma sa}$ değişkeni değiştirilmiş olur. Bu sayede jonksiyon sıcaklığı düşürülebilir.

Güç elektroniği devrelerindeki anahtar kayıplarını azaltmak için farklı yollar mevcuttur. Günümüzdeki en popüler uygulamalardan biri rezonans yapılarıdır. Rezonans yapıları, yüksek güç iletimi gerektiren uygulamalarda kayıpları minimize etmek için kullanılan, karmaşık ve büyük boyutlu devreler içeren maliyetli bir yöntemdir.

Bir başka kayıp azaltıcı yöntem ise anahtar elemanın yeni nesil yarı iletken malzemelerden seçilmesidir. Tezin önceki kısımlarında bahsedilen GaN, bunun için iyi bir örnektir. Silikon Karbür (SiC) tabanlı yarı iletkenler de anahtar kayıpları

açısından üstün elemanlardır. Ancak GaN ve SiC malzemenin endüstride kullanılabilmesi için maliyetlerinin uygun seviyeye gelmesi beklenmektedir.

Anahtar kayıplarını azaltmanın bir diğerk yolu da paralel anahtarlama yöntemidir. IGBTlerin iletim avantajlarının MOSFETlerin anahtarlama avantajlarıyla birleştirilmesi fikri, IGBT elemanının keşfinden sonra uzun süredir araştırılıp uygulanan bir konudur. Anahtar paralelleme yöntemi, yeni bir yarı iletken malzeme ya da katkılama teknolojisi geliştirmeden bu avantajları kullanmanın en kolay yollarından biridir.

Anahtar elemanların paralellenmesi yöntemi, bir adet MOSFET ve bir adet IGBT'nin paralel bağlanarak aynı anda anahtarlanması üzerine temellendirilmiştir [2]. Kapı açma işareti geldiği zaman MOSFET elemanı, IGBT elemanına göre çok daha hızlı açılarak akımı üzerine alır. Bu sayede IGBT elemanı, akımsız açılır. IGBT elemanının akımsız açılması sayesinde, yavaş açılıp kapanan bu elemanın üzerinde oluşacak ilettime geçme kaybı neredeyse sıfır olacaktır. IGBT elemanı ilettime geçtikten sonra ise, düşük gerilim düşümü sayesinde akımın akma yolu MOSFET üzerinden değil IGBT üzerinden olacaktır. Dolayısıyla iletim kayıpları tek bir MOSFET kullanıldığı senaryoya göre azalacaktır.

Uygulamaya bakıldığında aslında bu tür bir yöntem, IGBT için sıfır akımda anahtarlama anlamına gelmektedir. Rezonans eviricilerin karmaşık ve pahalı yapısına gerek kalmaksızın basit bir paralelleme mantığıyla anahtar kayıpları azaltılmaktadır. Uygulamanın tek dezavantajı eklenen yeni elemanların oluşturduğu boyut ve maliyet artışlarıdır. Ancak kısa vadede bu yöntem, yeni nesil yarı iletken teknolojilerinden çok daha ucuza gelmektedir.

zerinde düşünüldüğünde görülebileceği gibi bu yöntem, açılma anı için bir çözüm önermekle beraber kapanma anı için bir çözüm belirtmemektedir. Bu noktada kapı sinyali kesildiğinde hızlı olan MOSFET önce kapanacağından kapanma kaybı sanki sadece IGBT varmış gibi olacak ve bu nokta için sistemin bir avantajı olmayacaktır. Aynı zamanda, açılma anında, MOSFET tam olarak ilettime geçene kadar IGBT üzerinden de akım akacağı için kayıplar istenildiği kadar dşrlememektedir.

Bu problemi çözmenin yolu, ilettime geçerken IGBT'nin, kesime geçerken ise MOSFET'in gereken süre kadar geciktirilmesidir. Bu sayede açılma anında önce MOSFET'in tamamen açılması sağlanacak, sonrasında IGBT açılacaktır. Kapanma

anında ise önce IGBT kapanacak sonra MOSFET kapanacaktır. Dolayısıyla anahtarlama kaybının tamamını MOSFET üzerine alacaktır. İletim kaybını ise IGBT üstlenecektir. Dolayısıyla tam anlamıyla istenen durum gerçekleştirilecektir.

MOSFET ve IGBT'nin istenen zamanlamalarda anahtarlama yapabilmesini sağlamanın bazı yöntemleri vardır. Basit bir geciktirici devre yapısı, birden fazla anahtarlama çıkışı ya da bu iş için kullanılabilecek bir entegre devre, bu yöntemlerden bazılarıdır.

Mikroişlemciden alınabilecek birden fazla anahtarlama çıkışı, bu iş için en kolay yöntem olarak gözükmektedir. Küçük bir yazılımsal farkla mikroişlemcinin çıkışlarının birbirine göre durumları kolayca ayarlanabilir ve bu sayede anahtar elemanların istenen davranışı göstermesi sağlanabilir. Ancak bu yöntemin dezavantajı, anahtar elemanları sürmek için kullanılan işlemci bacağı sayısının iki katına çıkarılmasıdır.

Anahtarlama zamanlarının ayarlanabilmesi için, bir entegre devre kullanımı da mümkündür [9]. Sayısal olarak kapı sürüş işaretini çoklayıp modifiye eden bu entegre devre sayesinde istenen açma kapama zamanları elde edilebilir ancak bu tarz bir entegre devrenin tasarlanıp üretilmesi oldukça zor ve maliyetli olacaktır.

Anahtarlama zamanlamalarının ayarlanabilmesi için üçüncü bir yöntem de, aktif ve pasif devre elemanlarının kullanılmasıyla anahtarlama zamanlamalarının ayarlanmasıdır. Bu yöntemde geciktirici devreler yardımıyla anahtar elemanların kapı sürüş işaretleri modifiye edilir ve istenen açma kapama anları ayarlanır. Bu tez çerçevesinde bu yöntemi kullanabilmek için bir devre tasarlanacaktır.

Çizelge 4.1: Paralel anahtarlama kapı sürüş yöntemlerinin karşılaştırması

Yöntem	Maliyet	Boyut	Devre Yapısı
Mikroişlemci	Yüksek	Küçük	Basit
ASIC	Yüksek	Küçük	Kompleks
Pasif Elemanlar	Düşük	Küçük	Basit

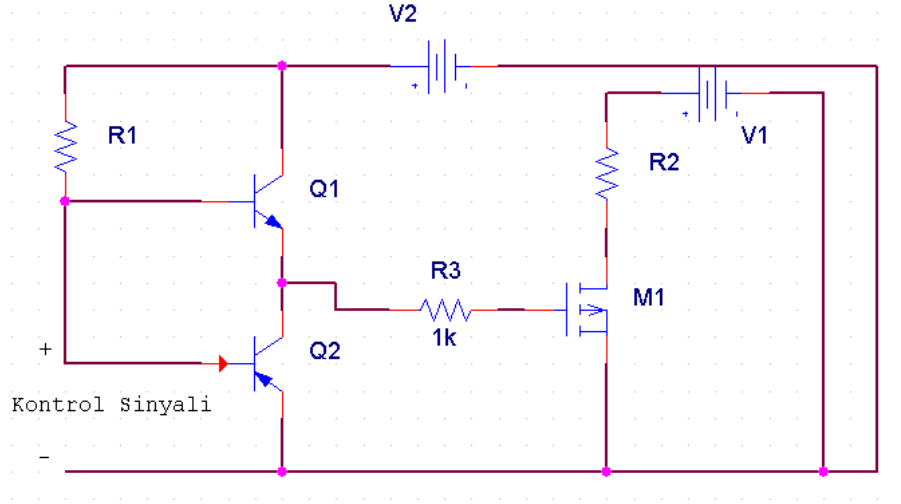
4.1 Güç Elektroniği Anahtar Elemanları İçin Kapı Sürüş Devreleri

Anahtarlama elemanları, kapı ya da baz denilen bacakları ile kaynak ya da emetör bacakları arasına uygulanan bir işaret ile açılıp kapanırlar. Bu işarete kapı sürüş işareti denir ve analog olarak ve ya mikrokontrolörler yardımıyla üretilirler. Sıradan elektronik devrelerde kullanılan transistör ve benzeri elemanların aksine, güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları, genelde belirli bir gerilim seviyesindeki işaretlerle açılıp kapanabilirler. Bu seviye, 15V olarak neredeyse standartlaşmıştır.

Günümüzde güç elektroniği ve motor kontrol uygulamalarında mikrokontrolör kullanımı oldukça yaygındır. Mikrokontrolörler sayesinde devre yapısı oldukça sadeleşmekte, geri besleme yapıları kolaylaşmakta, sürüş işaretinin üretilmesi basitleşmektedir. Ancak mikrokontrolörler, en çok besleme gerilimleri kadar çıkış gerilimi üretebilirler. Genellikle piyasada bulunan mikrokontrolörlerin 5V ya da 3,3V beslemeyle çalıştığı düşünüldüğünde, bu kontrolörlerle üretilecek bir sürüş işaretinin anahtar elemanları tetiklemek için yeterli olamayacağı görülmektedir. Bu durum, bir kapı sürüş devresine olan ihtiyacı göstermektedir.

Güç elektroniği devrelerinde yaygın olarak kullanılan MOSFET ve IGBT elemanları, kapıları açısından birbirine çok benzeyen yapılardır. İki elemanın da kapısı, kapasitif karakterlidir. Dolayısıyla kapı sürüş devrelerinin yapıları da benzerdir. Anahtar kapısının kondansatörünün doldurulup boşaltılmasıyla elemanın açma kapama yapması sağlanır. Kapı sürüş devresinin empedansı, bu kondansatörün dolup boşalma hızını ve dolayısıyla anahtarlama hızını etkileyen önemli bir faktördür. Anahtara optimize edilmiş bir sürüş devresi sayesinde açılmama-açık kalma, gürültülü açılıp kapanma ve dolayısıyla EMI-EMC problemleri gibi sorunlar aşılabilir.

MOSFET ve IGBTler için en sık kullanılan kapı sürücü yapısı “Totem Pole” adı verilen devredir. Totem pole sayesinde MOSFET’in kapı-kaynak kondansatörü süratle dolup boşalabilir, dolayısıyla eleman hızla açılıp kapanır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Totem Pole MOSFET sürücü devresi.

Günümüzde kapı sürüş amaçlı olarak üretilmiş pek çok entegre devre bulunmaktadır. Artık ayrıık elemanlarla sürüş devreleri kurmak yerine, bu entegre devreler kullanılmaktadır. Bu devreler sayesinde tasarımcı kapı sürüş deresiyle ayrıca uğraşmak yerine basit çevresel eleman ayarlamalarıyla istediği kapı sürüş performansını kolaylıkla alabilmektedir. Ayrıca bu devrelerin kapladığı alan düşünüldüğünde, kapı sürücü entegre devrelerinin kullanılması maliyet anlamında da önemli katkılar sağlamaktadır. MOSFET ve IGBT sürücü entegre devrelerin önemli çoğunluğu “Totem Pole” yapısı bulundurmakla beraber ek olarak kısa devre koruması, açık kalma koruması, sıcaklık koruması gibi pek çok özelliği de barındırmaktadır. Tüm bu sebepler göz önüne alındığında, entegre devre kullanımının avantajları görülebilmektedir.

Bazı güç elektroniği devrelerinde anahtarlama elemanı, akımı direk olarak toprağa akıtmaz. Yani anahtarlama elemanının bir ayağı toprakta değil, başka bir elemandır. Dolayısıyla toprağa göre bir potansiyeli bulunmaktadır. Sürüş işareti üreten devreler ise doğaları gereği bu sinyali toprağı referans alarak üretirler. Dolayısıyla kapı-kaynak gerilimi, istenen düzeyde olamaz. Bu tür durumlarda kullanılan devrelere bootstrap devresi ve bu yapıya üst kol sürüş (high-side drive) adı verilir. Bootstrap devreleri, ihtiyaca göre hesaplanmış bir kondansatör, gerekirse bir direnç ve bir diyottan oluşur. Bootstrap kapasitesi öncelikle diyot üzerinden normal besleme gerilimi uygulanarak doldurulur. Bu durumda bootstrap kapasitesinin üzerindeki gerilim, diyot ideal olarak kabul edilirse, besleme gerilimi kadardır. Üst taraftaki anahtarlama elemanı ilettime sokulmak istendiğinde kaynak ve kapı arasına

seri olarak bağlanmış kapasite sayesinde, kapı gerilimi, kaynak ve kapasite gerilimin toplamı kadar olur ve anahtar iletime sokulur. Kapasite gerilimi kapı sürücüsünün besleme gerilimi kadar olduğu için, anahtar elemanın kapısına yük gerilim ve kapı sürücü besleme gerilimi kadar gerilim uygulanmış olur.

Motor kontrol devrelerinde, üst kol sürüşü gerekli bir özelliktir. 2 ya da 3 fazlı bir evirici kullanıldığında üst taraftaki anahtar elemanlar, toprağa göre motorun zıt EMK'sı kadar yüksek potansiyelde olacağı için, anahtarlama elemanının bootstrap yapısıyla sürülmesi şarttır.

4.2 Geciktirme(Delay) Devreleri ve Kapı Sürüş Devrelerinin Paralel Anahtarlama Yöntemine Uygun Hale Getirilmesi

Elektronik devrelerinde gecikme, bir işaretin gerçek zamanlı olarak geciktirilmesi anlamına gelmektedir. Örneğin bir kare dalganın, bir işlemden geçirilerek yaratıldığından daha geç iletilmesi, gecikmeye bir örnektir. Normal dilde gecikme olumsuz bir kavram olarak kullanılsa da, elektronikte kullanım alanına göre faydalı bir işlev olarak görülebilmektedir.

Geciktirme devreleri, idealde, uygulanan bir sinyalin formunu, frekansını, ve değerini değiştirmeden, sadece geciktirilmesini sağlayan yapılardır. Literatürde “delay” olarak bilinen gecikmeler, sinyal kaynağında üretilebileceği gibi, sinyalin taşınması süresince de uygulanabilir.

Geciktirme devrelerinin çok basit ve çok karmaşık tipleri vardır. En basitinden örnek vermek gerekirse bir dirence seri bağlanan bir endüktans, gerilimin fazını değiştirecek ve gecikmesini sağlayacaktır. Ya da yüksek işlem güçleriyle bilinen FPGA yapıları kullanılarak bir işaret milyonlarca defa örneklenip bire bir aynısı sadece gecikme eklenerek tekrar üretilebilir [11]. Bu tür uygulamaların akademik ve endüstriyel alanda önemli kullanımları bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında incelenen paralel anahtarlama yöntemi için de kapı sürüş işaretlerinde gecikme uygulamaları gerekmektedir. Daha önce de açıklandığı gibi hızlı anahtar elemanın önce açılması –yani yavaş elemanın açılma işaretinin geciktirilmesi ve yavaş elemanın önce kapanması –yani hızlı elemanın kapanma işaretinin geciktirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir geciktirici devre tasarlanmıştır.

4.2.1 Kapı Sürüş İşaretlerini İstenen Şekilde Geciktiren Devre Tasarımı

Kapı sürüş işaretlerinin istenen şekilde manipülasyonu için, RC devrelerinin karakteristiklerinden faydalanan 2 adet devre tasarlanmıştır. Bu kısımda bu devrelerin tasarımlarıyla ilgili teorik detaylar verilecektir.

RC devreleri, temel olarak bir kapasitif bir de rezistif elemandan oluşan temel elektronik devrelerindendir. R ve C elemanlarının paralel, seri ve karma şekilde bağlanmalarıyla oluşturulurlar ve üzerlerine uygulanan işaretin genliğini ve-ve ya formunu değiştirip istenen yeni işareti oluşturmak amacıyla kullanılırlar.

RC devrelerinde, rezistife ek olarak bulunan bir eleman olduğu için bir zaman sabit mevcuttur. Devre zaman sabiti, τ ile gösterilir. Bu zaman sabiti, aslında kondansatörün karakteristiği kaynaklıdır. Benzer bir durum, endüktif (RL) devre yapılarında endüktans elemanının karakteristiği sebebiyle de oluşur. Zaman sabiti, devrenin geçici halden sürekli hale geçişi için bir ölçüdür. 3 zaman sabiti kadar süre geçtikten sonra, devrenin yaklaşık olarak kararlı duruma geçtiği varsayılır. Kararlı hale geçen devre, yeni bir işaret uygulanmadığı müddetçe durumunu korur, yeni bir sinyal uygulandığında ise kararlılık durumu bozularak tekrar geçici hal geçerli olur.

τ zaman sabiti, RL ve RC devrelerinde farklı hesaplanır. Endüktif bir devre için zaman sabiti:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4.7)$$

Kapasitif bir devrede ise zaman sabiti:

$$\tau = R * C \quad (4.8)$$

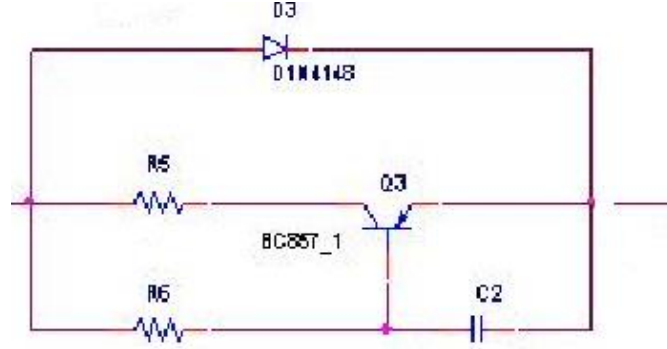
formülüyle hesaplanır.

Kondansatörler, lineer olmayan devre elemanlarıdır. Yani karakteristik denklemleri, basit doğrusal bir denklem değildir. Aynı durum endüktanslar için de geçerlidir. Belirli bir işaret uygulanırken kondansatör uçlarında görülecek gerilimin zamana bağlı ifadesi:

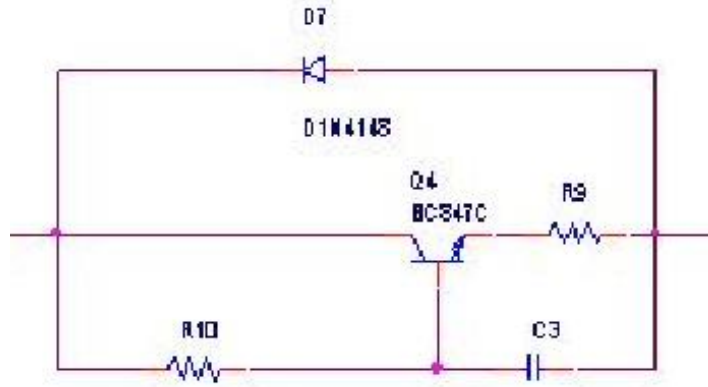
$$V_c = V_s * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.9)$$

şeklindedir. Burada V_c kondansatörün uç gerilimini, V_s ise kondansatöre uygulanan gerilimi ifade etmektedir. Görüldüğü kondansatör uçlarındaki gerilimin istenen seviyeye gelmesi için, logaritmik işlemler gerekmektedir.

Kondansatör elemanın bu özelliğinden faydalanarak, bir gecikme devresi kurulmuştur. Kurulan devrelerin şemaları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.3: MOSFET kapanma işareti geciktirme devresi.



Şekil 4.4: IGBT açılma işareti geciktirme devresi.

Yukarıda görülen iki devre de, kapı sürücü devrenin çıkışına bağlanır. Şekil 4.3 ile gösterilen MOSFET kapanma işaretini yavaşlatma devresinde, eğer kapı sürüş işaretinin seviyesi “high” yani anahtar elemanı iletime geçirmek için olan haldeyse işaret diyot üzerinden değişikliğe uğramadan devam ederek anahtarlama elemanını iletime sokar. Bu sırada Şekil 4.4 ile gösterilen IGBT açılma işaretinin geciktirme devresindeki diyot ters yönlü olduğu için akım akıtmaz. BJT ise iletim moduna geçmediği için akımı iletmez. Dolayısıyla akım RC devresi üzerinden akma eğilimindedir. Kondansatörün uçlarındaki gerilim 0,7V değerine ulaştığı zaman BJT iletime geçecek ve IGBT elemanını iletime sokacaktır. RC devresinin zaman sabiti, bu noktada devreye girer. Zaman sabitinin ayarlanmasıyla BJT’nin ne zaman iletime geçeceği ayarlanabilir. Dolayısıyla IGBT’nin ne zaman iletime geçeceği belirlenebilir.

Kapı sürüş işaretinin seviyesi “low” yani anahtar elemanı kesime geçirme durumuna geldiğinde ise, IGBT’nin gate-emitter kondansatörü (C_{GE}) diyot üzerinden hızlıca boşalır. Bu sayede IGBT elemanı normal karakteristiğiyle kapanır. Ancak bu durumda MOSFET’in kapı kondansatörünü boşaltmak için önce C_2 elemanının uçlarındaki gerilimin 0,7V mertebesine ulaşması gerekir. Bu gerilime ne zaman ulaşacağı da yine RC devresinin zaman sabitine bağlıdır. MOSFET elemanının kapı kondansatörü C_2 elemanını şarj ederken boşalmaya başlar ancak bu boşalma-şarj süreci normal bir boşalma sürecine göre daha uzun sürer. Dolayısıyla MOSFET elemanının kapı kondansatörünün depoladığı gerilimin, elemanın kapanma geriliminin altına düşme süresi, RC devresinin zaman sabitiyle ayarlanmış olur ve istenen tasarım tamamlanır.

Görüldüğü gibi burada önemli olan, tasarımın fikir kısmının ardından, RC devresinin zaman sabitinin ayarlanmasıdır. Zaman sabiti direk olarak elemanların değerlerine bağlı olduğundan kolaylıkla ayarlanabilir.

RC devresinin zaman sabitini ayarlarken önemli olan kriter, kullanılan elemanların kataloglarında belirtilen açılma ve kapanma süreleridir. İlgili sürelerle dikkat edilerek direnç ve kondansatör değerleri seçildiğinde, anahtarlama kayıplarını hızlı elemanın üstlenmesi sağlanacak ve yavaş eleman sıfır akımda açılıp sıfır gerilimde kapanacaktır. Bu sayede bir nevi yumuşak anahtarlama uygulaması mümkün olacaktır.

5. PARALEL ANAHTARLAMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN DEVRELERLE VE GaN TABANLI ANAHTARLAMA ELEMANLARIYLA YAPILAN SİMÜLASYON VE DENEY SONUÇLARI

Normal anahtar elemanlarla karşılaştırmak üzere tezin daha önceki kısımlarında bahsedilen GaN tabanlı yarı iletkenlerden temin edilmiştir. GaN anahtarlar seçilirken Si elemanların da kullanılabileceği devreye kolayca entegre edilebilir olmaları önemsenmiştir. Bu sayede devre yapısının geri kalanı hiç değiştirilmeden, sadece anahtarlama elemanları değiştirilerek testler yapılmış, sadece anahtar elemanlarındaki değişikliğin etkileri gözlenmiştir.

Tezin bir önceki bölümünde önerilen paralel anahtarlama için gecikmeyi sağlayan devre, PSpice ortamında kurulmuş ve sonuçları alınmıştır. Daha sonra aynı devre prototip olarak kurulmuş, baskı devresi çizilmiş ve gerekli ölçümler alınmıştır.

Tüm bu çalışmalar bu bölümde toplu şekilde anlatılacaktır.

5.1 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanlarıyla Yapılan Çalışmalar

5.1.1 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanları İçin Yapılan Teorik Hesaplamalar

Anahtarlama süreleri çok kısa olan ve iletim dirençleri nispeten düşük olan GaN tabanlı anahtarların, verim üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve teorik sonuçlarla pratiğin uyumunun görülmesi adına öncelikle anahtarlama elemanların kayıpları hesaplanacaktır. Si tabanlı anahtarlama elemanlarının kayıpları da bulunarak sonuçlar ortaya koyulacaktır.

Kayıp hesaplarının sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılabilir olması açısından, yük durumları, anahtarlama frekansları gibi verimi değiştirebilecek tüm etkenler aynı olmalıdır. Tüm bu şartlar göz önüne alınarak aynı kart üzerinde karşılaştırma için Infineon Technologies firmasının ürettiği 20 kHz için optimize edilmiş bir IGBT seçilmiştir. Seçilen ürün, standart jonksiyon yapılı IKD06N60R[Ek A] kodlu

modelidir. Pek çok seri üretim güç elektroniği devresinde kullanılan, güvenilir ve verimli bir IGBT'dir. Üreticinin verdiği datasheet verilerine göre yükselme zamanı t_r 8ns düşme zamanı t_f 22ns'dir. Ayrıca ileri yöndeki gerilim düşümü V_{CEsat} 'ın test koşulu olan 700mA RMS akım için değeri yaklaşık 900mV'tur.

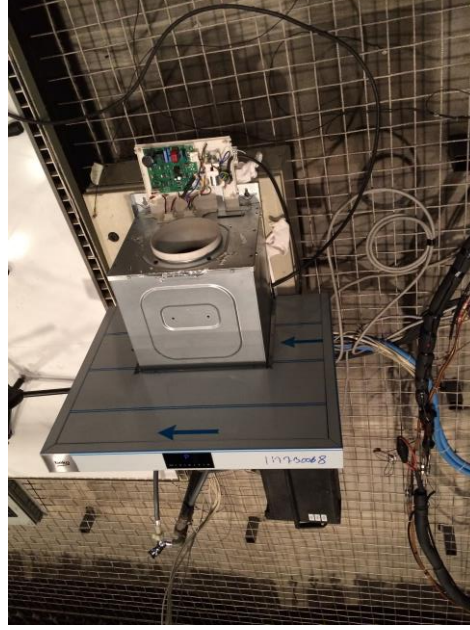
GaN tabanlı transistör ise Transphorm isimli şirketten temin edilmiştir. Testlerde kullanılan model TPH3006LD'dir [Ek A]. Bahsi geçen modelin şu anda seri üretimde olması ve istendiği takdirde piyasadan satın alınıp devre üzerinde büyük değişiklikler yapılmadan kullanılabilir olması, bu seçimde etkili olmuştur. Transphorm'un verilerine göre yükselme zamanı t_r 4ns düşme zamanı t_f 4ns'dir. Ayrıca ileri yöndeki direnç R_{DSon} 'un test koşulu olan 700mA RMS akım için değeri yaklaşık 0,33m Ω 'dur.

Bu değerler kullanılarak hesap yapılabileceği gibi, datasheetlerde verilen açma kapanma enerjileri kullanılarak da anahtarlama kayıpları hesaplanabilir. Özellikle IGBTler için bu yöntem, elle hesaplamaya göre oldukça kolaydır. Ters diyot üzerinde oluşan reverse recovery kaybının belirli bir formu olmadığı için hesaplanması çok zordur. Bu nedenle datasheetlerdeki enerji değerlerinin kullanılması daha anlamlıdır. Bu verilere iletim kaybı da eklenerek bir periyottaki anahtar kaybı bulunabilir. Infineon IGBT datasheetine göre 300 V DC ve 700 mA RMS akım için anahtarlama kaybı 370 mW ve iletim kaybı 215 mW olarak bulunmaktadır. Anahtar elemanda oluşan toplam kayıp yaklaşık 585 mW'tır.

Transphorm'un ürettiği TPH3006LD ise MOSFET şeklinde davranan bir elemandır ve anahtarlama kayıpları klasik yöntemle rahatlıkla hesaplanabilir. 300 V DC ve 700 mA RMS değerleri göz önüne alınarak hesap yapılırsa, anahtarlama ve iletim kayıplarının toplamının yaklaşık 300 mW olduğu görülmektedir.

5.1.2 GaN Tabanlı Anahtarlama Elemanları İle Yapılan Deney Sonuçları

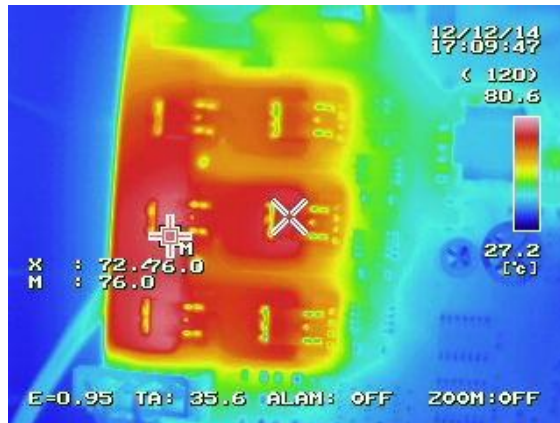
Teorik olarak görülmektedir ki GaN tabanlı anahtarlama elemanları, yaklaşık %50 daha az enerji harcamaktadır. Önceki bölümde de bahsedildiği gibi, bu hesapların doğrulanması amacıyla sabit kart şartları altında deney gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.1'te verilmiştir. Fan yükü olarak bir davlumbaz kullanılmıştır ve çeşitli ölçümler alınmıştır.



Şekil 5.1 : Fan yüklü deney düzeneği.

Fan yükünün değişkenliğinin az olması için, iklimi kontrollü bir odada deney yapılmıştır. Nem seviyesi, toz miktarı gibi performansı etkileyebilecek etkenlerin mümkün olduğunca sabitlenmesi sayesinde deney koşullarının her iki deneme için de aynı olduğu kabul edilmiştir.

Düzenek ilk olarak Silikon tabanlı IGBTlerden oluşan kartla bir saat süreyle çalıştırıldıktan sonra sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Kartın evirici katının sıcaklık sonuçları aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.2: Standart IGBTler için sıcaklık ölçümü.

Şekilde görüldüğü gibi, kartın evirici katının sıcaklıkları, 72,4°C ile 76°C arasında değişmektedir. Aynı ölçüm, motorun soğuması beklenip tekrar bir saat çalışmayla

GaN tabanlı anahtarlama elemanları için tekrarlanmıştır. Evirici katının sıcaklığının 43°C civarı olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3: GaN tabanlı anahtarlama elemanları için sıcaklık ölçümü.

Aynı zamanda kartların şebekeden çektiği güçler de ölçülmüştür. Sonuçlar aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.4: Silikon tabanlı IGBT İçin güç ölçümü.



Şekil 5.5: GaN tabanlı anahtarlama elemanları için güç ölçümü.

Deney sonuçlarında görüldüğü gibi GaN tabanlı anahtar elemanların bulunduğu kart, hem daha az ısınmış, hem de şebekeden daha az güç çekmiştir. Teorik sonuçlar ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Si ve GaN elemanlarla yapılan çalışmaların sonuçları

Eleman	Tek Eleman Kaybı(W)	Teorik Evirici Kaybı(W)	Güç Ölçümü Sonucu(W)	Sıcaklık Ölçümü(C)
Si tabanlı	0,585	3,51	107	76
GaN tabanlı	0,3	1,8	103,6	43

5.2 Paralel Anahtarlama Yöntemi İçin Geliştirilen Gecikme Devresi ile İlgili Çalışmalar

5.2.1 Tasarlanan Gecikme Devrelerinin Teorik Hesaplamaları

Tezin 4. bölümünde bahsedilen kapı işareti geciktirme devrelerinin teorik olarak istenen gecikmeyi sağlayabilmesi için, RC zaman sabitiyle oynanarak bir tasarım yapılmıştır. Gerekli R ve C değerleri, iterasyonla bulunarak hesaplar doğrulanmıştır.

MOSFET elemanının kapanışı için 200 ns'lik bir gecikme istenmektedir. 0,7 V ile anahtarlanan bir BJT, 47 kohmluk bir direnç ve 100 pF'lık bir kondansatör kullanıldığında MOSFET elemanının kapanma gecikmesi, denklem (4.9) dan aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$0,7 = 18 * (1 - e^{\frac{-t}{47*10^3*100*10^{-12}}}) \quad (5.1)$$

$$t = 198 \text{ ns} \quad (5.2)$$

Görüldüğü gibi verilen elemanların kullanımıyla istenen gecikmeye oldukça yakın bir sonuç elde edilmiştir.

IGBT elemanının açılma işareti için ise 300 ns'lik bir gecikme uygun görülmüştür. Yine 0,7 V ile anahtarlanan bir BJT, 75 kohmluk bir direnç ve 100 pF'lık bir kondansatör kullanılarak hesaplamalar yapıldığında:

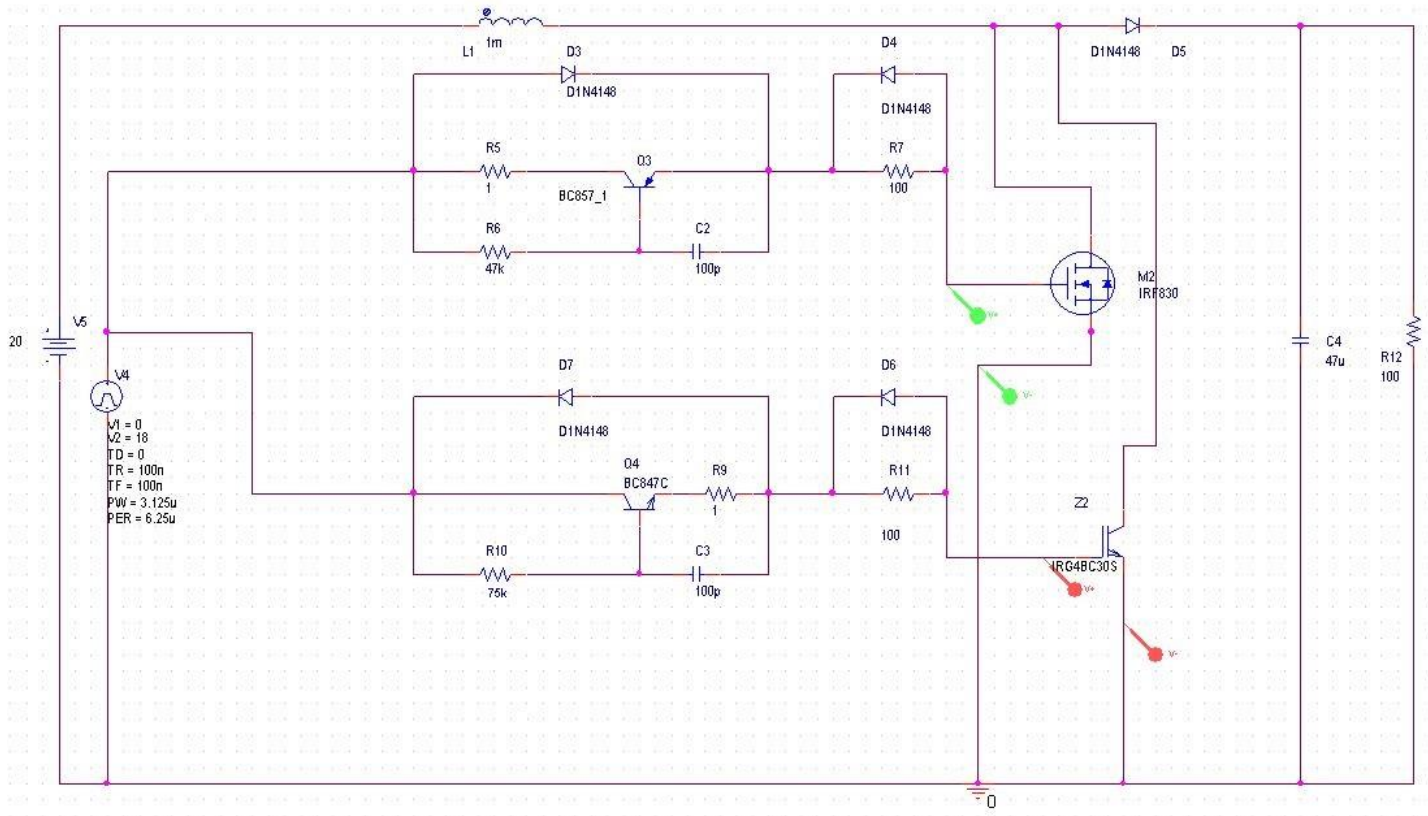
$$0,7 = 18 * (1 - e^{\frac{-t}{75*10^3*100*10^{-12}}}) \quad (5.3)$$

$$t = 298 \text{ ns} \quad (5.4)$$

298 ns'lik süre, istenen 300 ns değerine oldukça yakındır. Dolayısıyla gecikme devresi uygulamasında kullanılması uygundur.

5.2.2 Tasarlanan Gecikme Devrelerinin Simülasyonu

Bulunan değerler kullanılarak, gecikme devrelerinin simülasyonla doğrulanması yapılmıştır. Yük olarak anahtar elemanlar yükseltici çevirici ile yüklenmiştir. Çevirici, sürekli iletim modunda kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı 200 kHz'dir. Kapı sürüş işaretlerinin ölçümleri alınmıştır. Simülasyon programı olarak PSpice seçilmiştir. Bu programın seçilmesinin sebebi, eleman düzeyinde simülasyon yapan bir program olduğu için, küçük işaretlerin üretilmesi ve ölçülmesinde, elemanların sinyaller üzerindeki etkilerinin görülmesinde rakiplerine göre daha başarılı olmasıdır. Simülasyon devresi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6: Gecikme devresinin simülasyonu için kurulan PSpice devresi.

Bir PWM üreticiyle kapı işaretleri üretilmiş ve gecikme devrelerine verilmiştir. Gecikme devrelerinin çıkışı ölçülmüştür. PWM sinyali ve gecikme işaretleri Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7: Gecikme işaretlerini gösteren simülasyon sonucu.

Grafikte görüldüğü gibi, anahtar elemanlara uygulanan kapı işaretleri birbirinden farklıdır. Grafikteki yeşil işaret MOSFET kapısına, kırmızı işaret IGBT kapısına uygulanan işaretlerdir. Anahtar elemanların açılma-kapanma seviyesi olan 8 V seviyesindeki gecikme değerleri ölçüldüğünde, açılma anındaki gecikme yaklaşık 260 ns, kapanma anındaki gecikme ise yaklaşık 300 ns olarak ölçülmektedir.

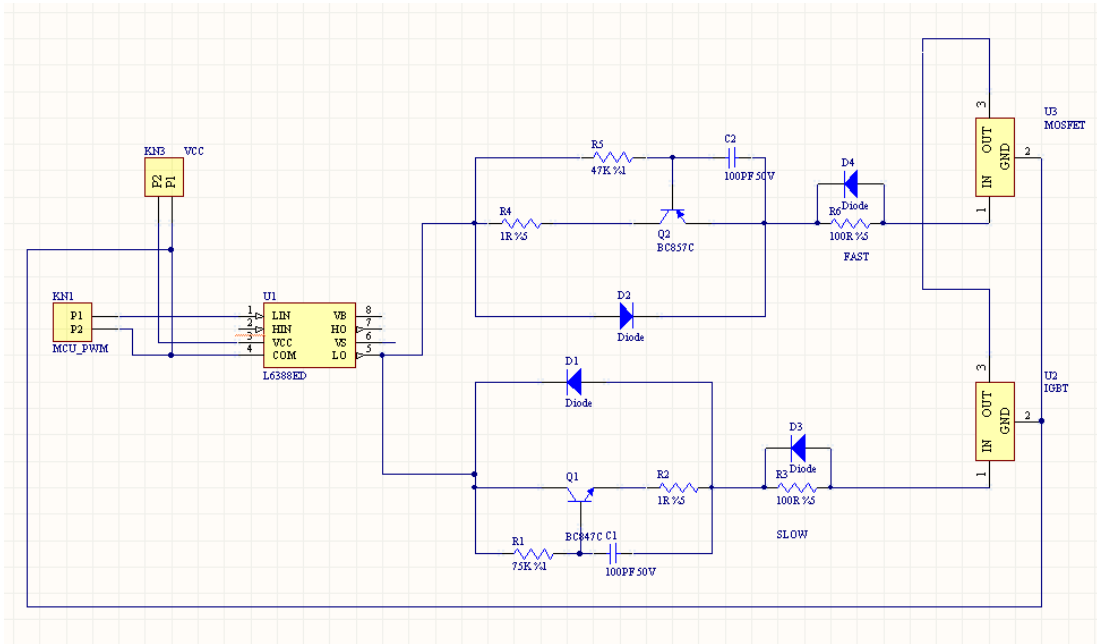
Sonuçlardan görülebileceği gibi hesaplarla elde edilen sonuçlar ile simülasyonda oluşan sonuçlar arasında uyum mevcuttur. Aradaki farklar, simülasyonda kullanılan elemanların ideal olmamasından kaynaklanmaktadır.

5.2.3 Tasarlanan Gecikme Devresinin Pratik Uygulaması ve Sonuçları

Teorik hesaplamaların simülasyon sonuçlarıyla doğrulanmasının ardından, tasarlanan devrenin gerçekleşmesi yapılmıştır. İlk olarak devre direk mikrokontrolörden beslenecek şekilde kurularak çalıştığı teyit edilmiştir. Sonrasında kapı işaretinin kuvvetlendirilip anahtar elemanlara uygun seviyelere çıkarılabilmesi için kapı sürücüsü koyularak mikroişlemci çıkışı kuvvetlendirilmiştir. Uygulamada kullanılan kapı sürücü devresi, ST Microelectronics tarafından üretilen L6388 serisi kapı sürücü

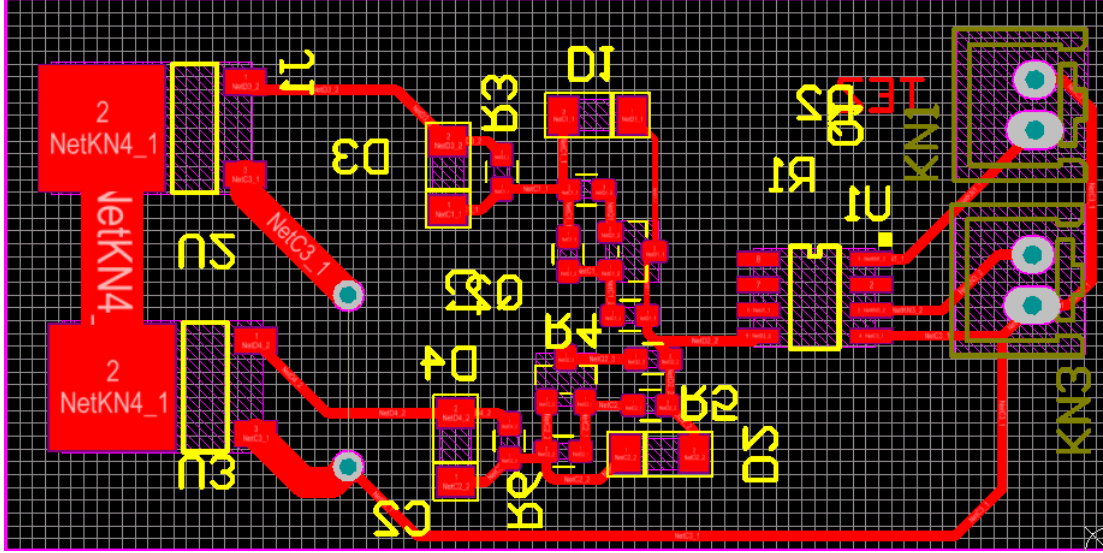
entegresidir. Totem pole tabanlı bu sürücü yarı köprü yapıları sürebilmek için alt ve üst anahtarlara özel çıkış üretebilmektedir. Bu uygulamada sadece tek çıkış kullanılmıştır.

Devre yapısının karmaşık olması nedeniyle breadboard ya da pertinaks üzerine kurulması çok uygun değildir. Ayrıca elemanlar arasındaki mesafenin de mümkün olan en az seviyede olması gerekmektedir. Uygulamayı devre yollarındaki endüktif etkilerden ve yollar arasındaki kapasitif etkilerden korunacak şekilde yapmanın en kolay yolu baskı devre yapmaktır. Baskı devre sayesinde yüzeye monte edilen eleman kullanımı da mümkündür. Bu da parazitik etkilerin azaltılması açısından önemlidir. Altium Designer programında çizilen devre şeması Şekil 5.8’de verilmektedir.



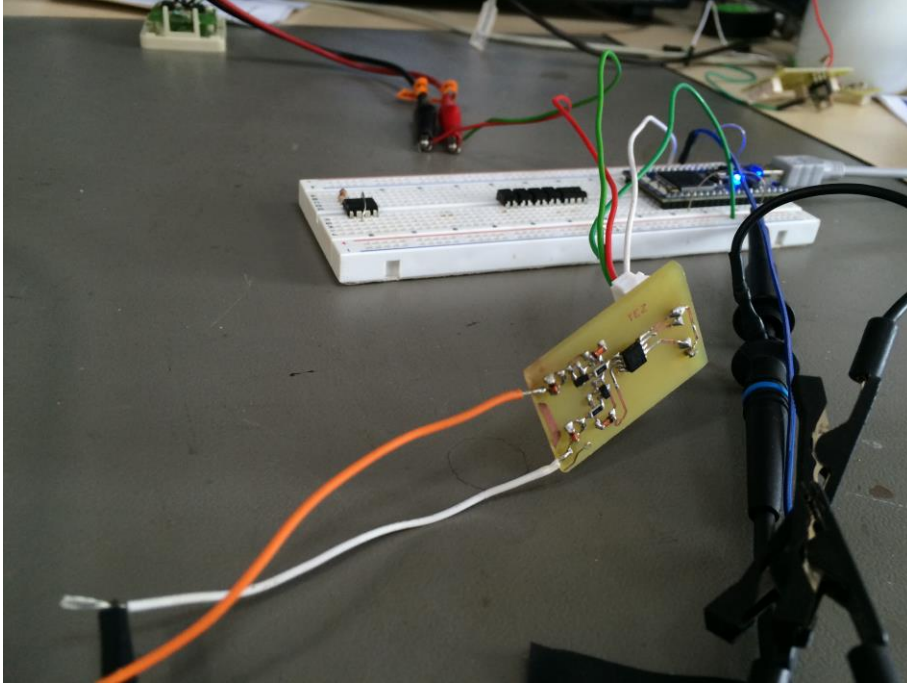
Şekil 5.8: Baskı devre için hazırlanan devre şeması.

Devre şemasının hazırlanmasının ardından, PCB üzerine basılacak olan devrenin tasarımı yapılmıştır. Elemanların yerleşimine ve sinyal yollarının birbirine etki etmemesine dikkat edilmiştir. Devrenin mümkün olduğunca simetrik olması için çalışılmıştır. Devrenin simetrik olması, işaretlerin birinin diğerinden daha farklı yol katetmesini engeller ve parazitik etkilerin azaltılmasına yardımcı olur. 200 kHz’lik anahtarlama işareti bir mikrokontrolör yardımıyla üretilmiştir. PCB tasarımı Şekil 5.9’da verilmiştir.



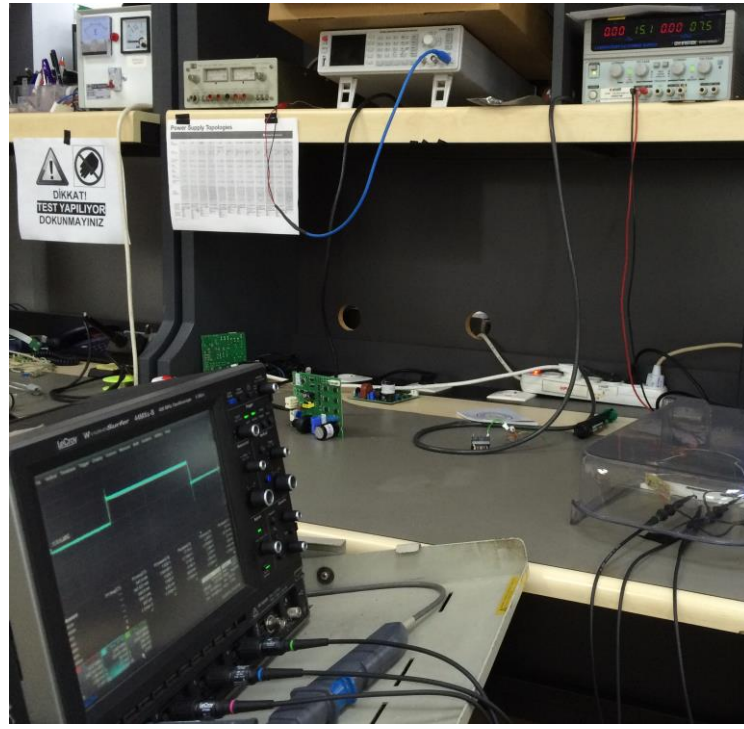
Şekil 5.9: Altium Designer’da yapılan PCB tasarımı.

Tasarım yapıldıktan sonra, devre elemanları lehimlenerek düzeneğe teste hazır hale getirilmiştir. Sürücü devre ve mikroişlemci Şekil 5.10’da verilmiştir.



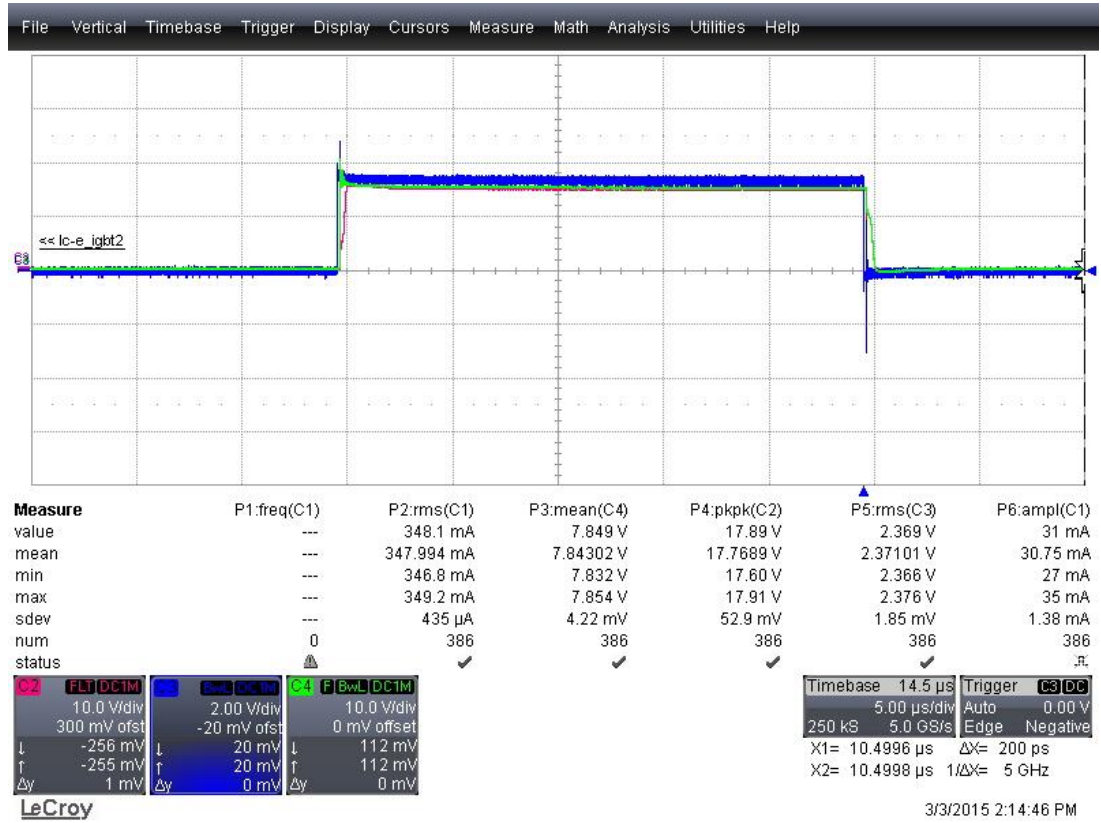
Şekil 5.10: Elemanları dizilmiş sürücü devre ve mikrokontrolör.

Bu aşamadan sonra ölçümlerin alınması için deney düzeneği kurulmuştur. Bir osiloskop ile işaretler ölçülmüştür. Deney düzeneği Şekil 5.11’deki gibidir:

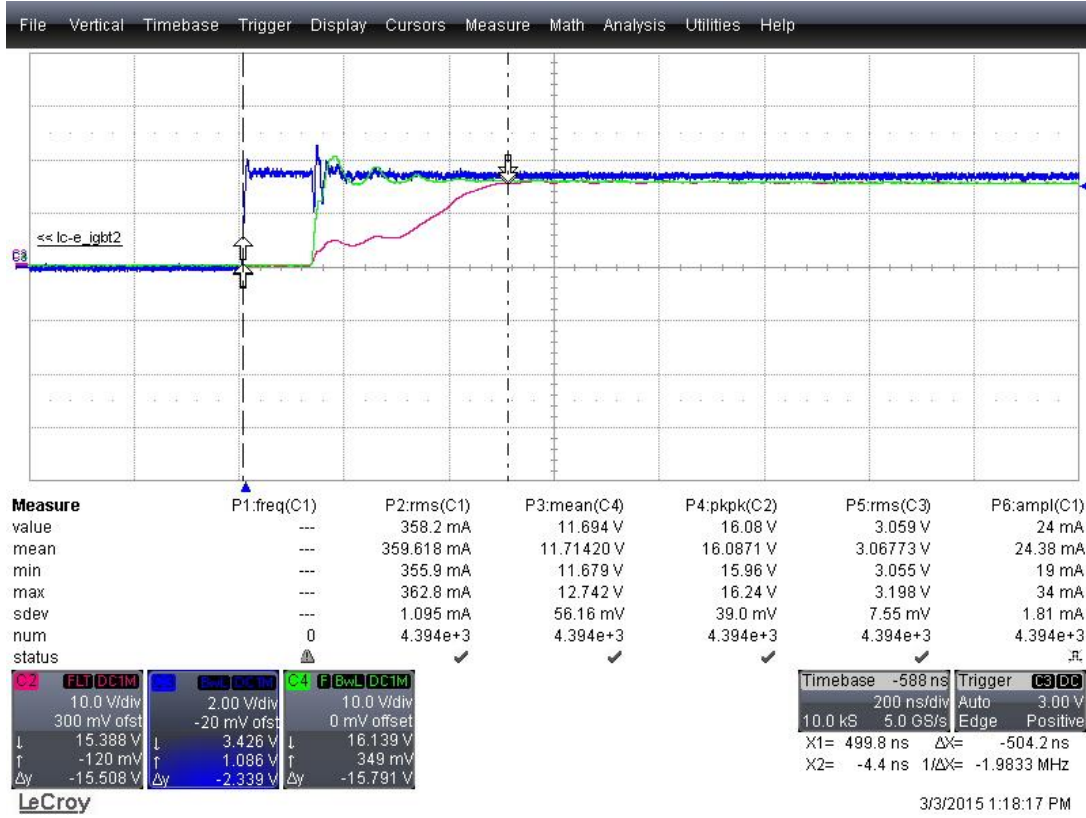


Şekil 5.11: Deney düzeneği.

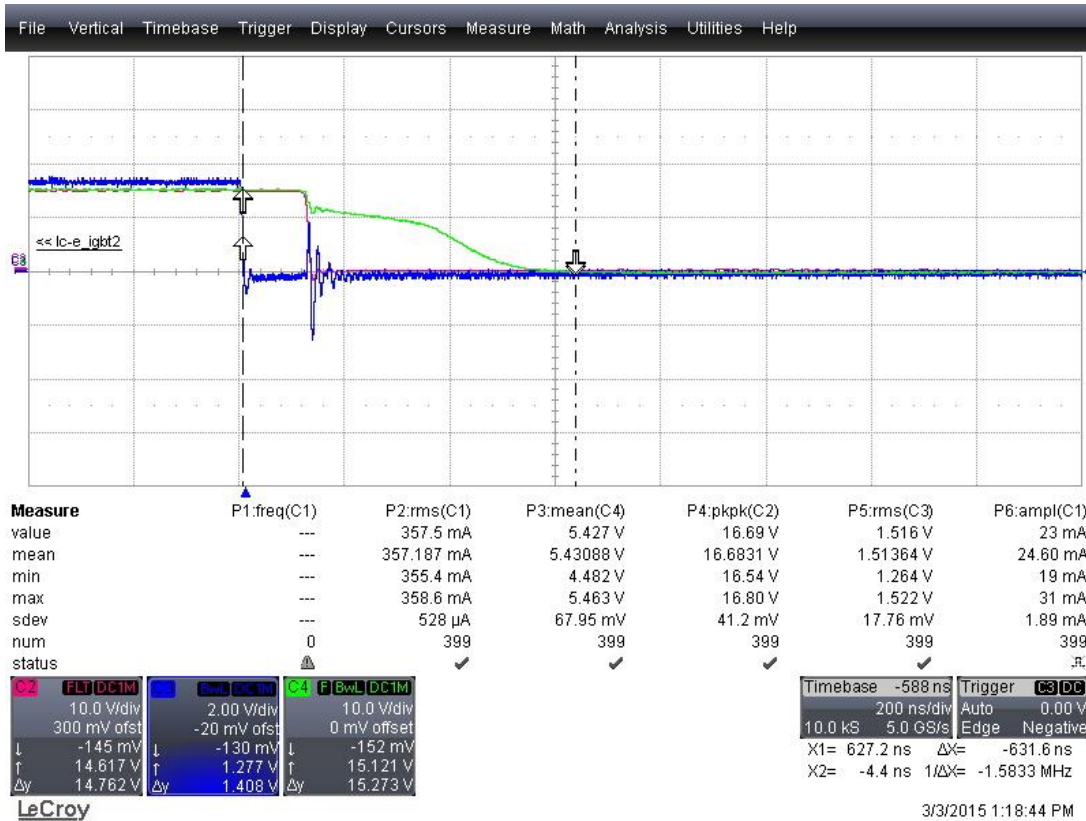
Osiloskop ile alınan ölçüm sonuçları Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'tedir.



Şekil 5.12: İşaretlerin tamamının osiloskop görüntüsü.



Şekil 5.13: Açılma anına yaklaşılmış osiloskop görüntüsü.



Şekil 5.14: Kapanma anına yaklaşılmış osiloskop görüntüsü.

Osiloskop görüntülerinde mavi işaret mikrokontrolör çıkışını, kırmızı işaret IGBT kapı işaretini, Yeşil işaret ise MOSFET kapı işaretini göstermektedir.

Şekillerde görüldüğü gibi, mikroişlemciden gelen işaret yaklaşık 150 ns'lik bir gecikmeyle kapı işaretlerine yansımaktadır. Bu gecikmenin sebebi kapı sürücünün iç yapısından kaynaklanmaktadır. Tasarlanan devreyle bir alakası yoktur. Bunun dışında açılma anı için IGBT işaretinin yaklaşık 260 ns geciktiği görülmektedir. Benzer şekilde MOSFET işaretinin kapanma anı incelendiğinde gecikmenin 280 ns olduğu gözlemlenmiştir.

Hesaplamalar, simülasyonlar ve pratik uygulama devresinin sonuçları birbiriyle uyumlu olarak görülmektedir. Tasarlanan devre ile ilgili istenen sonuçlar alınmıştır. Aradaki küçük farklar, devre elemanlarının toleranslarından ve ne kadar önlem alınsa da oluşan parazitik etkilerden kaynaklanmaktadır. Sonuçlar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Geciktirme devresi için yapılan çalışmaların sonuçları.

	Açılma İşareti Gecikmesi(ns)	Kapanma İşareti Gecikmesi(ns)
Hesap Sonucu	298	198
Simülasyon Sonucu	260	300
Deney Sonucu	260	280

Paralel anahtarlama yöntemi gereği oluşacak olan anahtarlama kayıplarını MOSFET, iletim kayıplarını ise IGBT üstlenecektir. Standart IGBT ve GaN tabanlı anahtarlar yapılan hesaplamalarla karşılaştırmak adına, yukarıdaki devrenin kullanılması sayesinde paralel anahtarlama elemanların kayıplarını hesaplamak gerekir.

Karşılaştırmanın adil olması açısından ilk hesaplamalarda kullanılan Silikon tabanlı Infineon IGBT burada da kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı yine 20 kHz'dir. Ona ek olarak yüksek frekans için tasarlanmış bir MOSFET seçilmelidir. International Rectifier tarafından üretilen IRFB812 bu amaca uygundur. Bu MOSFET'in datasheet verilerine göre [Ek A] 300 V DC ve 700 mA RMS akım için anahtarlama kaybı, 240 mW olarak ölçülmektedir. İletim kaybı, daha önce verildiği üzere 215 mW'tır.

Aynı zamanda iletim kayıplarının daha düşük olabilmesi açısından kullanılan IGBT'ye göre daha düşük frekansa optimize edilmiş bir IGBT kullanılıp verim artışı sağlanabilir. Bu amaç için IRG4BC30S elemanı seçilmiştir. Bu elemanın seçilmesinin sebebi ileri gerilim düşümünün çok düşük olması ve dolayısıyla iletim kayıplarının çok az olmasıdır. Kataloğunda verilen kayıp eğrilerine göre 300 V DC ve 700 mA RMS değerleri için elemanın iletim kaybı 0,2 W mertebesinde görülmektedir.

Tüm yapılan hesaplar Çizelge 5.3 ile toplanmıştır.

Çizelge 5.3: Tüm elemanların kayıp hesaplarının karşılaştırılması.

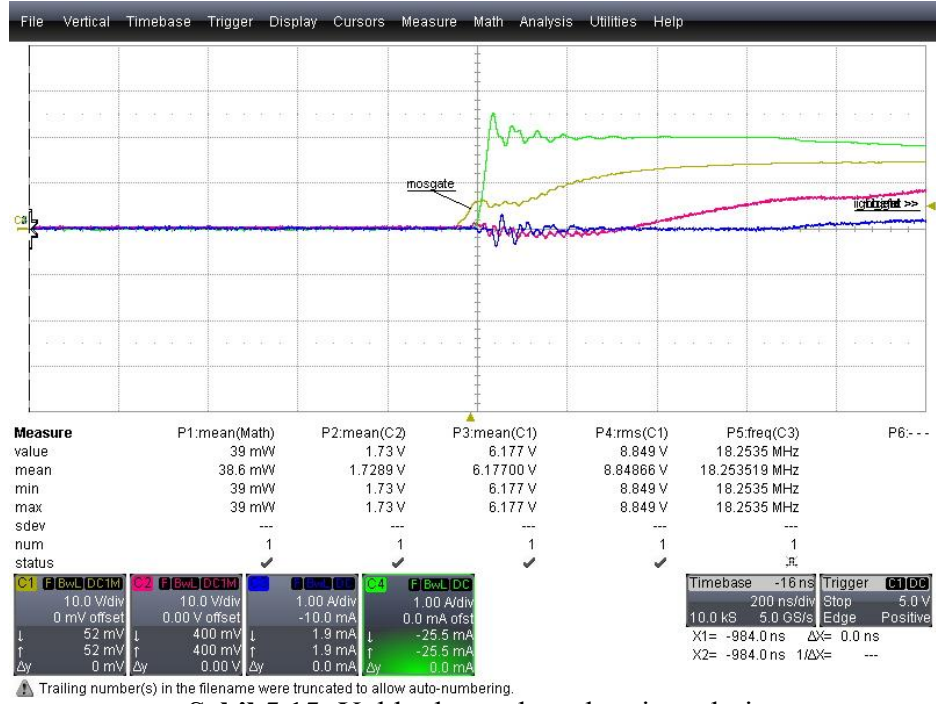
	Anahtarlama Kaybı[W]	İletim Kaybı(W)	Toplam Kayıp[W]
Standart IGBT	0,37	0,215	0,585
GaN Anahtar	0,16	0,14	0,3
Paralel Anahtarlar (MOSFET+Infineon IGBT)	0,24	0,215	0,455
Paralel Anahtarlar (MOSFET+IR IGBT)	0,24	0,2	0,44

Sonuçlardan da görüleceği gibi en verimli yöntem, GaN tabanlı yeni nesil yarı iletken kullanımıdır. Paralel anahtarlama yöntemiyle elde edilen verim artışı da Çizelge 5.3'te görülebilmektedir. Paralel anahtarlama sayesinde eleman başına 0,13-0,14 W; üstün yarı iletkenler sayesinde ise eleman başına 0,285 W düşük güç tüketilmektedir.

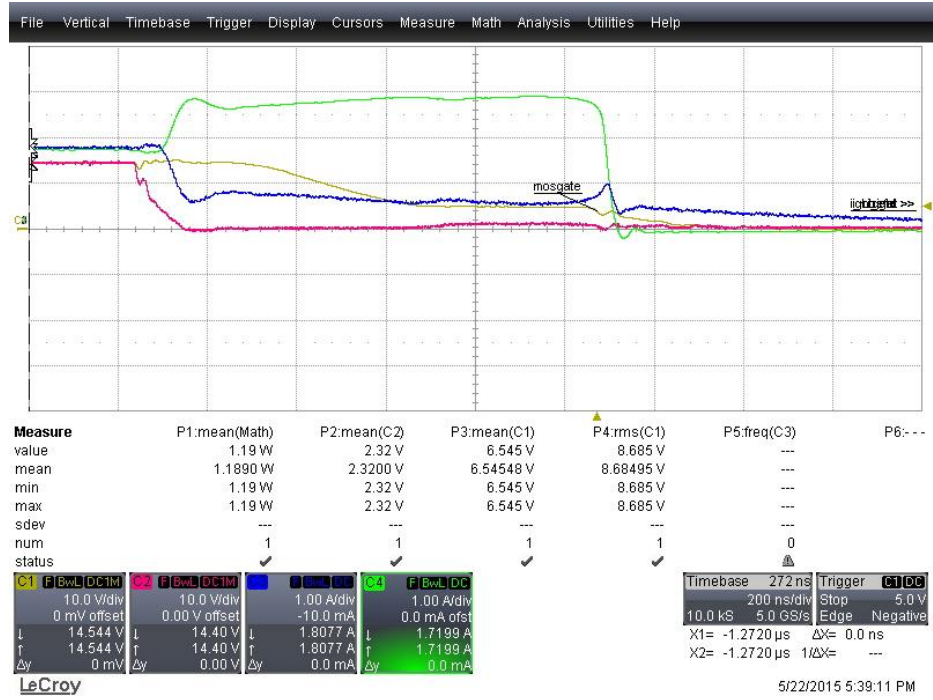
Devrede kullanılan akım ve gerilim seviyeleri ya da anahtarlama frekansı arttıkça fark daha da büyüyecektir.

Gecikme devrelerinin yüklü durumdaki çalışmalarının görülmesi amacı ile bir yükseltici çevirici devresi kurulmuştur. Bu devre üzerinden farklı yük ve anahtarlama

frekansları için ölçümler alınmıştır. Kırmızı işaret IGBT kapı gerilimi, sarı işaret IGBT akımı, mavi işaret MOSFET kapı gerilimi ve yeşil işaret MOSFET akımıdır.

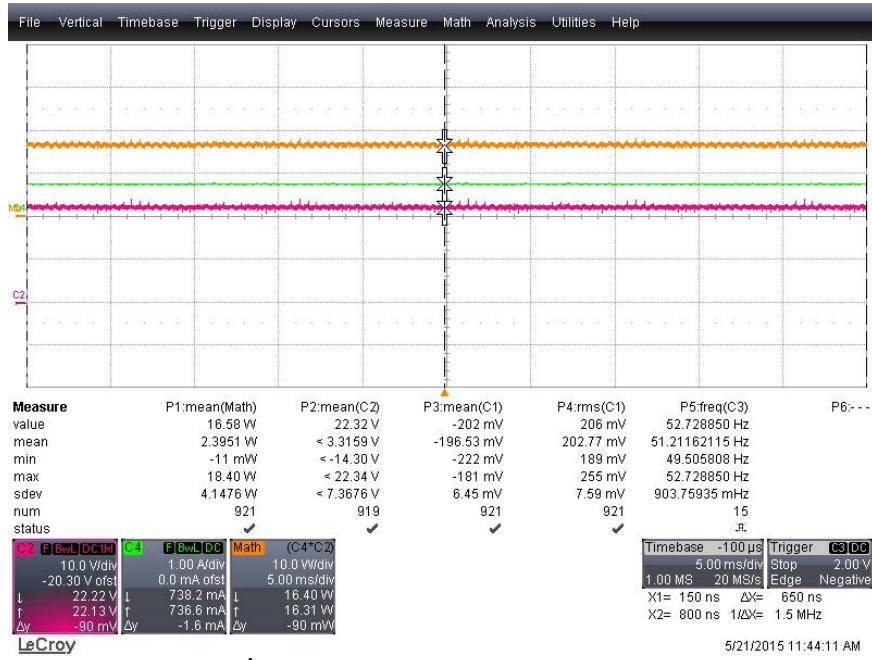


Şekil 5.15: Yüklü durumda açılma işaretleri.

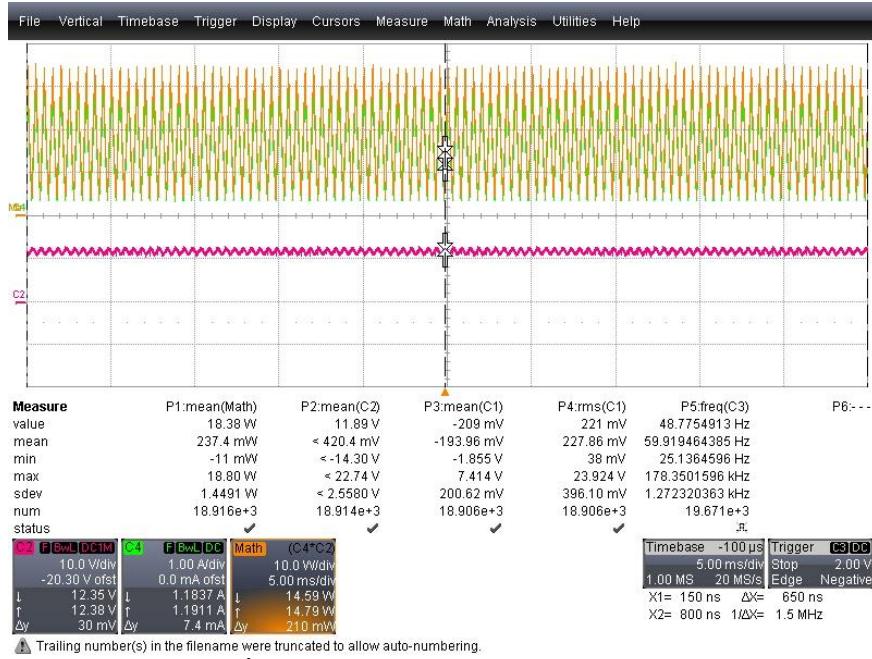


Şekil 5.16: Yüklü durumda kapanma işaretleri.

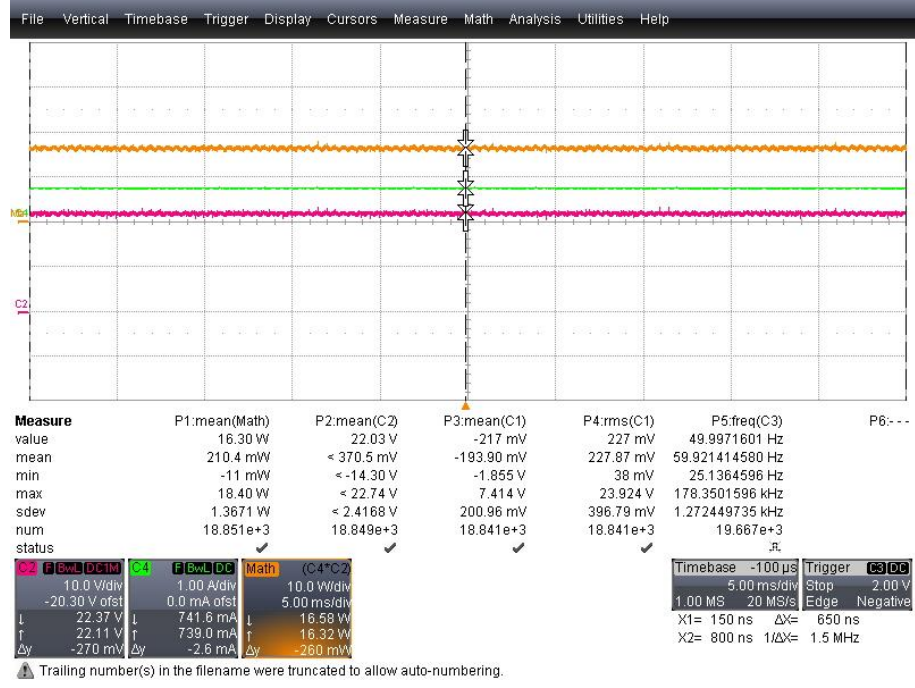
Kurulan devre kullanılarak verim ölçümleri yapılmıştır. Osiloskop görüntüleri aşağıdaki gibidir.



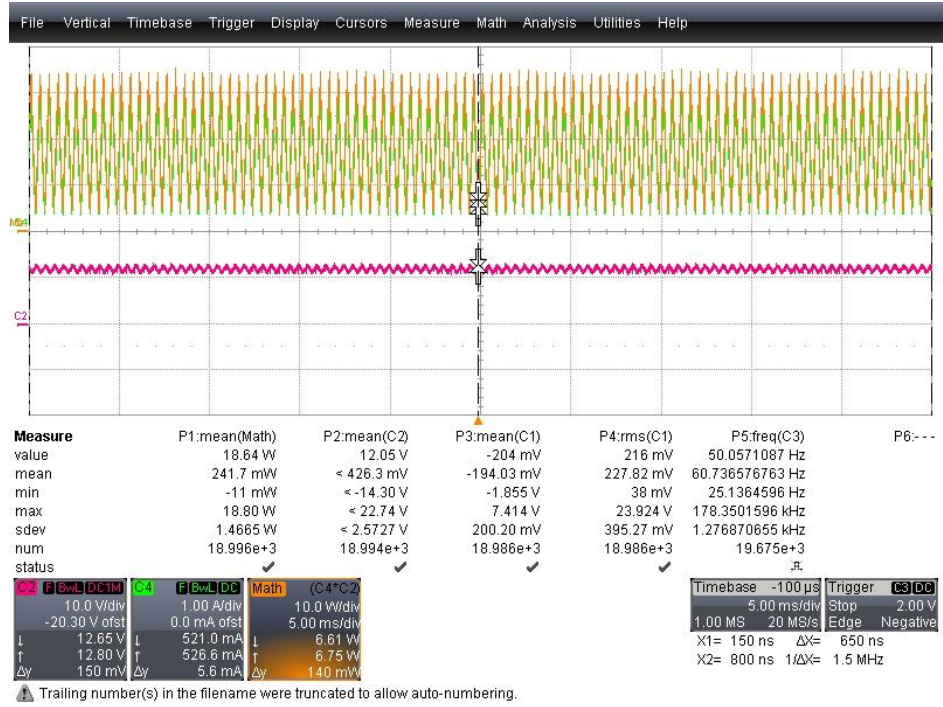
Şekil 5.17: İki anahtarlı durum için giriş büyüklükleri.



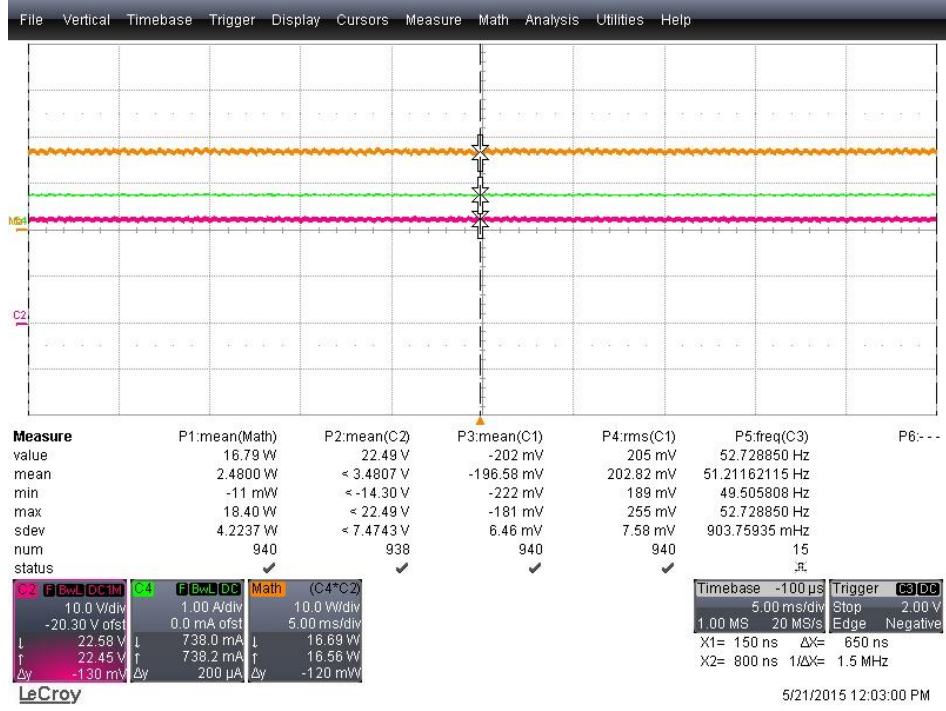
Şekil 5.18: İki anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri.



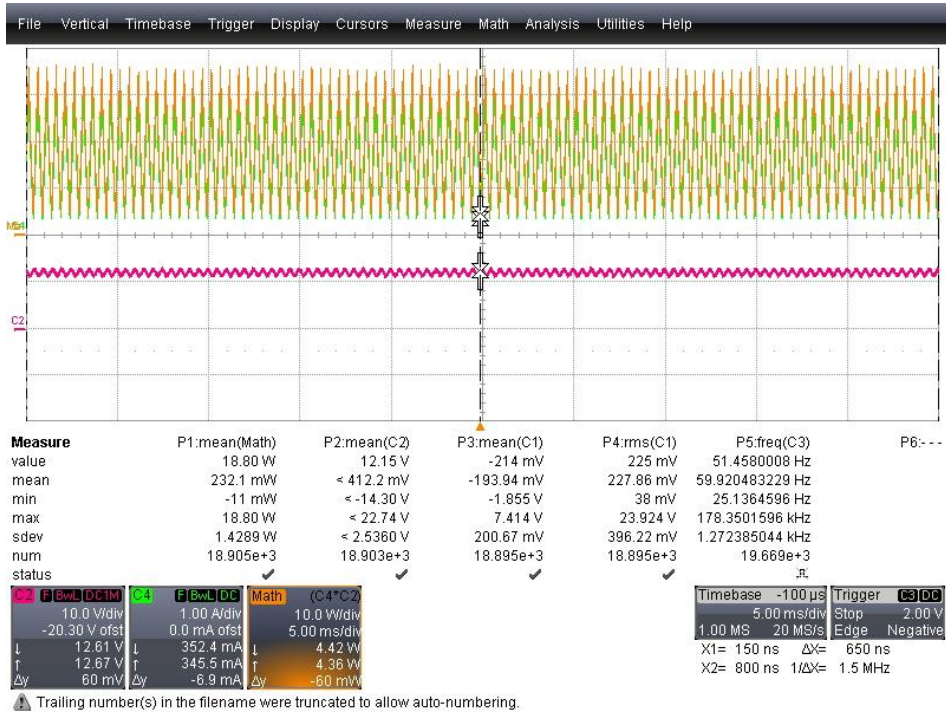
Şekil 5.19: Tek (hızlı) anahtarlı durum için giriş büyüklükleri.



Şekil 5.20: Tek (hızlı) anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri.



Şekil 5.21: Tek (yavaş) anahtarlı durum için giriş büyüklükleri.



Şekil 5.22: Tek (yavaş) anahtarlı durum için çıkış büyüklükleri.

Osiloskop çıktıları değerlendirilerek Çizelge 5.4 oluşturulmuştur. Benzer ölçümler farklı yük ve anahtarlama frekansı için tekrarlanarak Çizelge 5.5 oluşturulmuştur.

Çizelge 5.4: 20 kHz anahtarlama frekansı ve 30 Ohm yük için ölçüm sonuçları.

Devre Tipi	Giriş Gücü[W]	Çıkış Gerilimi[V]	Çıkış Gücü[W]	% Verim
İki Anahtarlı	18,38	22,3	16,58	90,2
Tek Hızlı Anahtar	18,64	22,03	16,3	87,44
Tek Yavaş Anahtar	18,8	22,49	16,79	89,3

Çizelge 5.5: 50 kHz anahtarlama frekansı ve 20 Ohm yük için ölçüm sonuçları.

Devre Tipi	Giriş Gücü[W]	Çıkış Gerilimi[V]	Çıkış Gücü[W]	% Verim
İki Anahtarlı	39,6	26,57	34,44	86,96
Tek Hızlı Anahtar	38,85	26,027	32,87	84,95
Tek Yavaş Anahtar	42,4	26,183	33,43	78,85

Çizelge 5.4 ve 5.5’te görüldüğü gibi paralel anahtarlama yöntemi, sistem verimini önemli ölçüde artırmaktadır. Daha optimize anahtarların seçilmesiyle verim artış miktarı daha da yüksek olacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında öncelikle temel güç elektroniği elemanları, devreleri ve bunların sürüşü için gerekli devreler incelenmiştir. Sonrasında ise ilk olarak bir adet yeni yarı iletken teknolojisi tabanlı güç elektroniği elemanının var olan bir devre üzerinde gerçekleştirdiği verim artışı incelenmiştir. İkinci olarak ise verimi artırdığı bilinen paralel anahtarlama yönteminin zamanlamalarıyla alakalı var olandan daha ucuz ve kolay bir çözüm önerilerek hesaplamaları, simülasyonları ve uygulaması yapılmıştır.

GaN tabanlı anahtarlama elemanlarının kullanıldığı eviricinin getirdiği verim artışı gözlemlenerek teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elemanlar üzerinde ciddi anlamda daha az kaybın olduğu görülmüştür. Hem şebekeden çekilen güç açısından hem de elemanların ısınması açısından oldukça önemli iyileşmelerin sağlandığı belirlenmiş ve deney sonuçları paylaşılmıştır. GaN tabanlı anahtarlama elemanlarının ucuzlaşmasının ardından silikon tabanlı elemanların yavaş yavaş piyasadan silineceği, bunun yanında güç elektroniği devreleri için MHz düzeyinde anahtarlama frekanslarının standart hale geleceğini öngörmek zor değildir. Anahtarlama frekanslarının artmasıyla devrelerdeki manyetik depolama elemanlarının ve kondansatörlerin boyutları küçülecek, devrelerin boyutları ve dolayısıyla toplam maliyetleri daha da azalacaktır.

Paralel anahtarlama metodu ise GaN tabanlı elemanlar yerleşene kadar verimin istenen düzeylere çıkarılabilmesi açısından önemli bir yöntemdir. Literatürde konu üzerinde pek çok araştırma ve uygulama mevcuttur.

Bu uygulamalar incelendiğinde, paralel anahtarlama zamanlamalarının ayarlanması için pek çok farklı yöntem görülmektedir. Bu yöntemlerden bazıları istenen özellikte gecikme sağlayamamakta, bazıları ise karmaşık metotlar ile sağlayabilmektedir. Bu tez kapsamında tasarlanan yöntem hem oldukça düşük maliyetlidir, hem de istenen zamanlamaları sağlamaktadır. Bu sayede endüstriyel devrelerde anahtar paralelleme uygulamalarının yaygınlaşması yönünde bir adım atılmış olmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda GaN tabanlı elemanların ucuzlatılması yönünde araştırma-geliştirme çalışmalarına destek verilmesi için bilgilendirmeler yapılabilir. Paralel anahtarlama metodu için bir evirici tasarlanıp sürüş özellikleri, parazitik etkiler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <http://electronicdesign.com/blog/so-you-think-power-electronics-are-tr-s-chic>, alındığı tarih Şubat 2015
- [2] **Y. Jiang , G. C. Hua and F. C. Lee** "*Soft-Switching of IGBTs with the Help of MOSFET's*", Invention Disclosure, 1992
- [3] **Jiang, Y. Hua, G. ve Lee, C. F.** "*Soft-switching of IGBTs with the help of MOSFETs in bridge-type converters,*" Power Electronics Specialists Conference, 1993. PESC '93 Record., 24th Annual IEEE , pp.151,157, 20-24 Jun 1993
- [4] **Chorng, H. Y. ve Yung C. Liang,** "*Investigation on parallel operations of IGBTs,*" Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, vol.2, pp.1005,1010, 5-10 Aug 1996
- [5] **Nelson, J. J. Venkataramanan, G. ve Beihoff B. C.** "*Investigation of parallel operation of IGBTs,*" Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , vol.4, pp.2585,2591 13-18 Oct. 2002
- [6] **Kimball J. W. ve Chapman, P. L.** "*Evaluating conduction loss of a parallel IGBT-MOSFET combination,*" Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE , vol.2, pp.1233,1237, 3-7 Oct. 2004
- [7] **Wang, X. Zhao, Z. ve Yuan, L.** "*Current sharing of IGBT modules in parallel with thermal imbalance,*" Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , pp.2101,2108, 12-16 Sept. 2010

- [8] **Woothipatanapan, S. Jangwanitlert, A. ve Cancharoensook, P.** *"Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed parallel operation of IGBT and MOSFET,"* TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference, pp.1841,1846, 21-24 Nov. 2010
- [9] **Yee, H. P. ve Liu D.** Yee, H.P.; Liu, D., *"An ASIC to control the paralleling of an IGBT with a MOSFET,"* Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual , vol.1, pp.151,155 vol.1, 23-27 Feb 1997
- [10] **Bortis, D. Steiner, P. Biela, J. ve Kolar, J.W.** *"Double-Stage Gate Drive Circuit for Parallel Connected IGBT Modules,"* IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, Proceedings of the 2008, pp.388,391, 27-31 May 2008
- [11] **Alvarez, R. ve Bernet, S.** *"A new delay time compensation principle for parallel connected IGBTs,"* Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, pp.3000,3007, 17-22 Sept. 2011
- [12] **Sheth, H. P. ve Adesara, A. M.** (2012) *"Paralleling of IGBT and MOSFET for High Power Applications"* International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2, Issue 12, December
- [13] **Rashid H. M.** "Power Electronics Handbook", Pensacola, Florida, Academic Press, 2001
- [14] **Ramshaw R. S.**, "Power Electronics Semiconductor Switches", London : Chapman & Hall, 1993
- [15] **Texas Instruments**, "Power Supply Topologies Poster",
<http://www.ti.com/lit/sg/sluw001e/sluw001e.pdf>
- [16] **Url-2** <<http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/4266>>, alındığı tarih Mart 2015

EKLER

EK A: Kullanılan anahtar elemanların ve kapı sürücünün datasheetleri

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ahmet Berkant ECEVİT

Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa, 1991

E-Posta : ecevita@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Bölümü