

**SİLİSYUM (Si) VE SİLİSYUM KARBÜR (SiC) YARI İLETKENLERİN
YÜKSELTİCİ TİP (BOOST) DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMASINDA
PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman OKAY

Danışman

Doç. Dr. Emre AKARSLAN

İkinci Danışman

Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Kasım 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİLİSYUM (Si) VE SİLİSYUM KARBÜR (SiC) YARI
İLETKENLERİN YÜKSELTİCİ TİP (BOOST) DÖNÜŞTÜRÜCÜ
UYGULAMASINDA PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI

Osman OKAY

Danışman

Doç. Dr. Emre AKARSLAN

İkinci Danışman

Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Kasım 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Osman OKAY tarafından hazırlanan “Silisyum (Si) ve Silisyum Karbür (SiC) Yarı iletkenlerin Yükseltici Tip (Boost) Dönüştürücü Uygulamasında Performans Karşılaştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18 / 11 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Emre AKARSLAN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

Başkan : Doç. Dr. Kadir VARDAR

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Emre AKARSLAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih SERTTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18 / 11 / 2024

İmza

Osman OKAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİLİSYUM (Si) VE SİLİSYUM KARBÜR (SiC) YARI İLETKENLERİN YÜKSELTİCİ TİP (BOOST) DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMASINDA PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI

Osman OKAY

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Emre AKARSLAN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

Güç elektroniği devrelerinde anahtarlama elemanı olarak Silisyum (Si) tabanlı yarı iletkenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, Si tabanlı yarı iletkenler teorik sınırlarına çok yaklaşmış ve bu alandaki ilerlemeler yavaşlamıştır. Son dönemde geliştirilen geniş bant aralıklı Silisyum Karbür (SiC) yarı iletkenler, düşük kayıp, yüksek elektrik dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı özellikleri ile Si yarı iletkenlerin yerini almaya başlamıştır. Bu çalışmada, 1kW gücündeki bir boost dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücüde eşit akım ve gerilim seviyelerine sahip Si ve SiC tabanlı yarı iletken anahtarlar kullanılarak 10-60 kHz anahtarlama frekansı aralığında verim değerleri alınmıştır. Elde edilen deneysel değerler, LtSpice benzetim programı ile karşılaştırılmış ve sonuçların örtüştüğü görüldükten sonra LtSpice benzetim programı üzerinde 10-200 kHz anahtarlama frekansı aralığında verim ve yarı iletken kayıpları ölçülmüştür. Yapılan ölçümler ile verim, boyut ve maliyet karşılaştırması yapılmıştır. SiC yarı iletkenlerin yüksek maliyetine rağmen, toplam dönüştürücü maliyetinin daha düşük, daha verimli ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür.

2024, ix + 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Boost dönüştürücü, Silisyum Karbür, Geniş bant aralıklı malzemeler, DC/DC dönüştürücü

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PERFORMANCE COMPARISON OF SILICON (Si) AND SILICON CARBIDE (SiC) SEMICONDUCTORS IN BOOST CONVERTER APPLICATION

Osman OKAY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Emre AKARSLAN

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Said Mahmut ÇINAR

Silicon (Si) based semiconductors are commonly used as switching elements in power electronics circuits. However, Si based semiconductors have approached their theoretical limits, and advancements in this field have slowed down. Recently developed wide-bandgap Silicon Carbide (SiC) semiconductors have started to replace Silicon (Si) semiconductors due to their characteristics of low losses, high electrical breakdown strength, and high-temperature tolerance. In this study, a 1kW boost converter was designed. Efficiency values were obtained in the 10-60 kHz switching frequency range using Si and SiC-based semiconductor switches with equal current and voltage ratings in the designed converter. The experimental values were compared with simulations in LtSpice, and after confirming that the results matched, efficiency and semiconductor losses were measured in the 10-200 kHz switching frequency range using LtSpice. The measurements were used to compare efficiency, size, and cost. Despite the high cost of SiC semiconductors, the overall converter cost was found to be lower, with higher efficiency and energy density.

2024, ix + 63 pages

Keywords: Boost converter, Silicon Carbide, Wide bandgap devices, DC-DC converter

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Emre AKARSLAN'a, ve ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR'a araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Osman OKAY
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	4
2.1. Yarı İletkenlerin Tarihçesi.....	4
2.2. Yarı İletkenlerin Önemi.....	4
2.3. Gelecekteki Yönelimler.....	5
2.4. Silisyum Karbürün Güç Elektroniği Uygulamaları.....	6
3. MATERYAL ve METOT.....	11
3.1. Silisyum ve Silisyum Karbürün Temel Özellikleri	11
3.2. Boost Dönüştürücü	18
3.3. Simülasyon Yazılımı (LtSpice).....	27
3.4. Deney Düzeneği	29
3.5. DC/DC Dönüştürücü	30
3.5.1. IGBT ve MOSFET Sürücü Devresi.....	31
3.5.2. Kontrol Sistemi	32
3.5.3. Bobin, Filtre Kapasitörleri ve Anahtarlama Elemanları	34
3.5.4. Muhtelif Sinyal Koşullandırma Devreleri	34

3.6. Giriş Beslemesi, Yardımcı Besleme ve Çıkış Yüğü.....	34
3.7. Veri Toplama Birimi	35
4. BULGULAR.....	38
4.1. Veri Toplama ve Analiz	38
4.2. Karşılaştırma Kriterleri.....	39
4.3. SiC Yarı İletkenlerin Verime Etkisi	44
4.4. SiC Yarı İletkenlerin Toplam Maliyete Etkisi	46
4.5. SiC Yarı İletkenlerin Soğutucu Boyutlarına Etkisi	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	51
6. KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	58
EKLER	59
EK 1. Boost Dönüştürücü Güç Katı	59
EK 2. Gerilim, Akım Ölçme ve Ölçeklendirme Devresi.....	60
EK 3. Mikrodenetleyici Bağlantı Devre Şeması	61
EK 4. Boost Dönüştürücü PCB Şeması.....	62
EK 5. LtSpice Devre Modeli.....	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

V	Volt
A	Amper
Hz	Hertz
kHz	Kilo hertz
W	Watt
kW	Kilo Watt
kVA	Kilo Volt Amper
eV	Elektron Volt
MV	Mega Volt
mV	Mili Volt
μ H	Mikro Henry
μ F	Mikro Farat
Ω	Ohm

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
ARM	Gelişmiş Risk İşlemci
CCM	Sürekli Çalışma Modu
DC	Doğru Akım
DCM	Kesikli Çalışma Modu
DMM	Dijital Multi Metre
FRD	Hızlı doğrultma diyodu
G/Ç	Giriş/Çıkış
GaN	Galyum Nitrat
GPIO	Genel Amaçlı Giriş Çıkış portu
HVDC	Yüksek Gerilim Doğru Akım
IC	Tümleşik Devre
IGBT	İzole kapılı bibolar transistör
Mosfet	Metal Oksit Alan Etkili Transistör
OFF	Kapalı
ON	İletimde
PFC	Güç Faktörü Düzeltme
PV	Fotovoltaik
PWM	Darbe Genişlik Modulasyonu
SBD	Schottky bariyer diodyu
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
SMPS	Anahtarlamalı Güç Kaynağı
VSC	Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü
WBG	Geniş Bant Aralığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Si, SiC ve Gan için teknolojik limitler	2
Şekil 2.1 Si ve SiC yarı iletkenlerin termal ve elektriksel özellikleri	6
Şekil 2.2 Si ve SiC yarı iletkenlerde uygulama alanları	6
Şekil 3.1 Bant aralığı	14
Şekil 3.2 Silisyum ve Silisyum karbür yarı iletkenlerde kalınlık	15
Şekil 3.3 Si ve SiC yarı iletkenlerde ters toparlanma süreleri	17
Şekil 3.4 Boost dönüştürücü devresi	19
Şekil 3.5 Boost dönüştürüşü S anahtarı ON konumunda	22
Şekil 3.6 Boost dönüştürüşü S anahtarı OFF konumunda.....	23
Şekil 3.7 Mod I ve Mod II için bobin akım ve gerilim dalga şekilleri	25
Şekil 3.8 Kapasitör akım dalga şekli	26
Şekil 3.9 LtSpice devre modellemesi	29
Şekil 3.10 Deney düzeneği şeması	30
Şekil 4.1 Si ve SiC malzemeler için anahtarlama frekansına göre verim değişimi.....	45
Şekil 4.2 Si ve SiC malzemeler için anahtarlama frekansına göre yarı iletken kayıpları değişimi	46
Şekil 4.3 Anahtarlama frekansına göre filtre bobini maliyeti değişimi.....	47
Şekil 4.4 Anahtarlama frekansına göre ve çıkış kapasitörü maliyeti değişimi.....	48
Şekil 4.5 Anahtarlama frekansına göre toplam maliyet değişimi.....	49
Şekil 4.6 Anahtarlama frekansına göre soğutucu hacmi değişimi	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Yarı iletken malzemeler için bant aralığı değerleri	14
Çizelge 3.2 Yarı iletken malzemeler için elektrik alan dayanımı değerleri	15
Çizelge 3.3 Yarı iletken malzemeler için elektron hareketliği ve doyumluk hızları	16
Çizelge 3.4 Yarı iletken malzemeler için termal iletkenlik değerleri.....	17
Çizelge 3.5 Boost dönüştürücüde kullanılan yarı iletken malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri.....	27
Çizelge 4.1 Boost dönüştürücüde kullanılan pasif komponentler ve değerleri	38
Çizelge 4.2 Boost dönüştürücüde deneysel verim değerleri.....	38
Çizelge 4.3 Dönüştürücüde simülasyon sonucu verim değerleri	39
Çizelge 4.4 Hacimsel termal direnç değerleri	40
Çizelge 4.5 Anahtarlama frekansına göre bobin, sargı direnci, çıkış kapasite değeri ve yaklaşık maliyetleri.....	42
Çizelge 4.6 Boost dönüştürücü anahtarlama frekansına göre verim değerleri ve maliyetleri	42
Çizelge 4.7 Boost dönüştürücü anahtarlama frekansına göre kayıp ve soğutucu hacimleri	43

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Yarı iletken malzemelerin kullanım alanları.....	5
Resim 3.1 DC/DC yükselten dönüştürücü ve kontrol birimi.....	31
Resim 3.2 IGBT ve MOSFET sürücü	32
Resim 3.3 Anahtarlamaalı güç kaynağı.....	35
Resim 3.4 34970A veri toplama cihazı	36
Resim 3.5 50A 60mV Şönt direnç.....	37



1. GİRİŞ

Artan nüfus, yaşam kalitesinin yükselmesi ve küresel sanayileşmeye bağlı olarak küresel enerji ihtiyaçları önemli ölçüde artmaya devam etmektedir (Narbel ve Hansen 2014). Enerji, ağırlıklı olarak enerji santrallerinde fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilmektedir. Bu durum, çevre üzerinde karbon salınımı, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır (Silva vd. 2019, Ye vd. 2017).

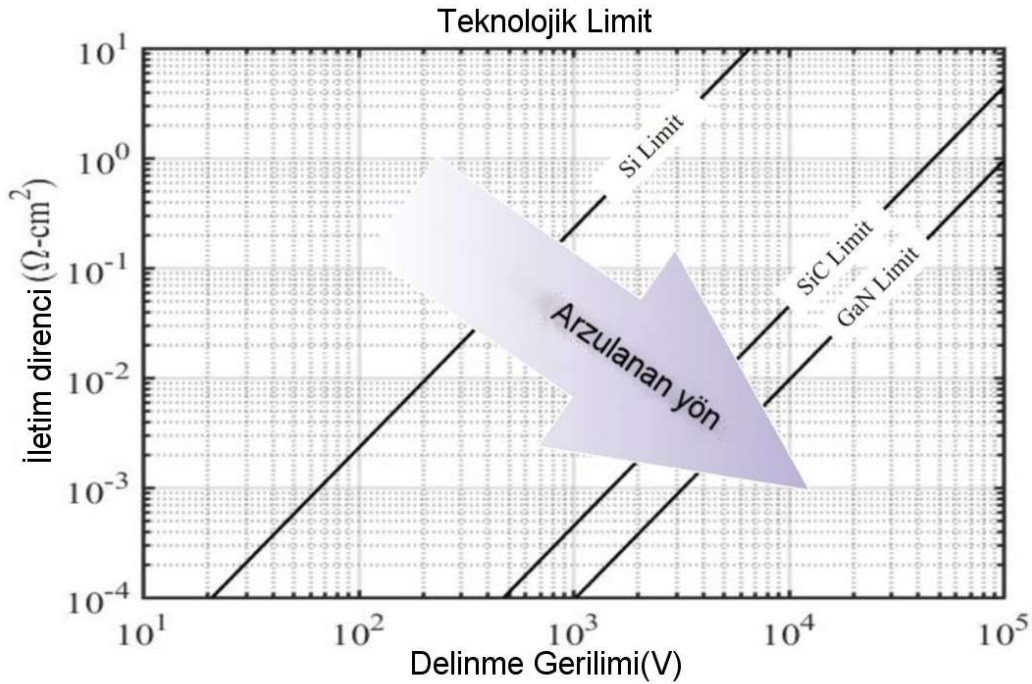
Karbon salınımı etkisini azaltmak ve küresel ısınmayla mücadele etmek için çeşitli etkili yaklaşımlar kullanılabilir. Bunlardan biri, elektrik üretiminde ve talep tarafında enerji verimliliğinin hayata geçirilmesidir (Craig ve Feng 2017). Enerji verimliliği, karbon salınımını azaltmanın ve küresel enerji güvenliğini iyileştirmenin en hızlı, en sürdürülebilir ve uygun maliyetli yoludur (Sperberg vd. 2018). Enerji verimliliği sağlayan teknolojiler, ekonomik ilerlemeden ödün vermeden enerji tasarrufu sağlayabilir ve çevresel etkileri azaltabilir (Zeng vd. 2018).

Ayrıca, yenilenebilir enerji (YE) kaynakları kullanılarak elektrik üretimi, enerji depolama ve ulaştırma sektörünün elektrifikasyonu, küresel ısınma sorunlarının çözümüne önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Bose 2013). Rüzgâr ve güneş gibi güvenilir ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları, ticari olgunluğa ulaşmış olup küresel ısınma sorunlarının azaltılmasında etkili çözümler sunmaktadır (Kusumadewi 2017).

Güç elektroniği, iletim, dağıtım ve yük tarafı için en uygun koşulları sağlamak amacıyla elektrik gücünün kontrol edilmesi ve dönüştürülmesi için kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve yüksek gerilim doğru akımda (DC) enerji iletimi gibi birçok uygulamada güç elektroniği dönüştürücüleri, enerji verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Güç elektroniğinde, anahtar kayıplarının azaltılması, elektronik cihazların verimliliğinin artırılması açısından çok önemlidir. Günümüzde Silisyum (Si), güç cihazlarında en yaygın kullanılan yarı iletken malzemedir. Ancak, Silisyumun kendine özgü fiziksel özellikleri, bazı alanlarda Si malzemesine dayalı cihazların güç elektroniğinin geleceği

için ideal olmasını engelleyen sınırlamalara sahiptir. Si tabanlı güç cihazları malzeme sınırlarına yaklaştıkça, mühendisler ve araştırmacılar daha iyi performans için Si tabanlı güç cihazlarına alternatifler aramaktadır (Palmour 2014). Silisyumun sınırlamalarına bir çözüm arayışı, Silisyum Karbür (SiC) ve Galyum Nitrat (GaN) güç cihazları gibi geniş bant aralıklı (WBG) yarı iletkenlerin araştırılmasına yol açmıştır. Şekil 1.1’de Si, SiC ve GaN için teknolojik limitler görülmektedir (Dalla vd. 2019). Si ile karşılaştırıldığında, bu malzemeler geniş sıcaklık çalışma aralığı, yüksek elektrik dayanımı ve yüksek doygunluk sürüklenme hızına sahiptirler. Bu malzemelerden SiC, yüksek gerilim ve yüksek güç uygulamaları için, GaN ise düşük güç ve düşük gerilim uygulamaları için Si malzemesine alternatif oluşturmaktadır. Bu malzemelerin anahtarlama kayıpları Si’ye göre çok daha düşük, sıcaklık dayanımları daha yüksek ve iletim dirençleri daha azdır. Bu sayede, daha yüksek frekanslarda anahtarlama yapılarak boyutlar küçültülebilir ve daha az kayıplar ile verimlilik artırılabilir.



Şekil 1.1 Si, SiC ve GaN için teknolojik limitler (Dalla vd. 2019).

Günümüzde en çok kullanılan DC/DC dönüştürücülerden bir tanesi de yükseltici tip (Boost) dönüştürücüdür. Boost dönüştürücü, girişine uygulanan DC gerilimi giriş geriliminden daha yüksek bir gerilime dönüştüren bir cihazdır. Uygulama alanlarından bazıları Fotovoltaik Enerji Sistemleri (PV), Güç Faktörü Düzeltme devreleri (PFC), elektrikli araçlar (EV) ve DC gerilimin yükseltilmesi gereken diğer uygulamalardır.

Bu tez çalışmasında, yaklaşık 1 kW gücünde dijital kontrollü bir Boost dönüştürücü, Si ve SiC yarı iletken anahtarlar kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan dönüştürücü üzerinde, eşit akım ve gerilim seviyelerine sahip Si ve SiC tabanlı anahtarlar kullanılarak 10-60 kHz anahtarlama frekansı aralığında verim değerleri ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar, LtSpice simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görüldükten sonra, LtSpice programı üzerinde 10-200 kHz frekans aralığında giriş akım ve çıkış gerilim dalgalanmaları sabit tutularak, pasif bileşen değerleri değiştirilip verim ve yarı iletken kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere göre Si ve SiC yarı iletkenler için elde edilen en yüksek verim değerleri kullanılarak, verim, boyut ve maliyet değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, SiC yarı iletkenlerin yüksek maliyetine rağmen, toplam dönüştürücü maliyetinin Si yarı iletken kullanan dönüştürücülerden daha düşük, daha verimli ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğunu göstermiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Yarı iletken teknolojisi, modern elektronik cihazların temelini oluşturan ve teknolojik ilerlemenin önemli bir parçası olan bir alandır. Yarı iletken malzemeler, elektrik iletkenliği özellikleri bakımından yalıtkanlar ve iletkenler arasında yer alır. Bu özellikleri sayesinde, çeşitli elektronik bileşenlerin ve cihazların tasarımında ve üretiminde kritik bir rol oynarlar.

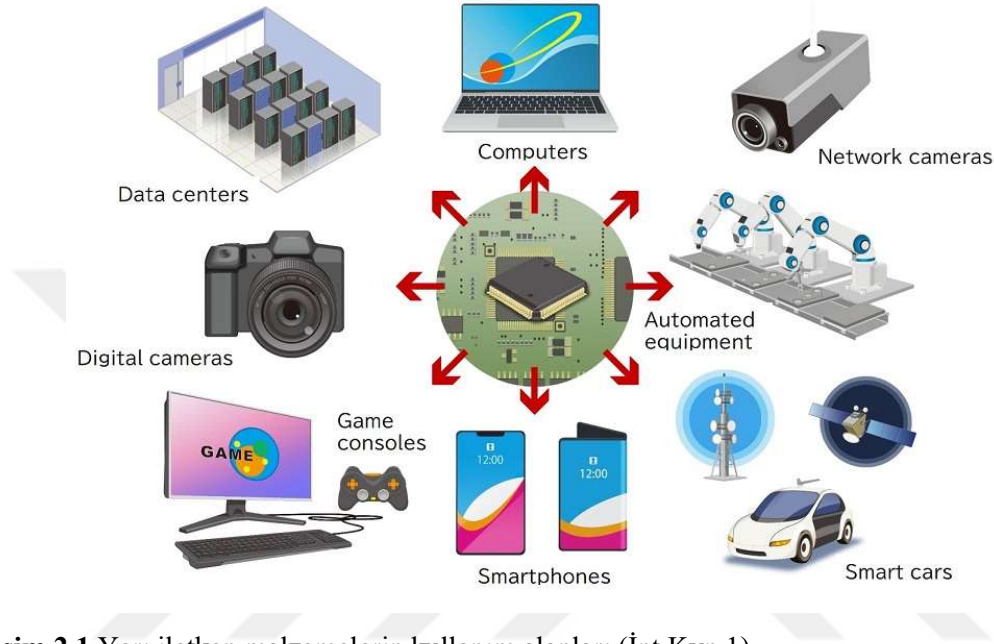
2.1.Yarı İletkenlerin Tarihçesi

Yarı iletken teknolojisinin kökenleri, 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanır. İlk yarı iletken malzeme olan selenyumun fotoelektrik etkisi, 1874 yılında Willoughby Smith tarafından keşfedilmiştir (Smith 2016). Ancak, yarı iletkenlerin elektronik uygulamalarda kullanılmaya başlanması, 20. yüzyılın ortalarına kadar gerçekleşmemiştir. 1947 yılında, Bell Laboratuvarları'nda çalışan John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley, ilk transistörü icat etmişlerdir (Riordan ve Hoddeson 1998). Bu buluş, yarı iletken malzemelerin elektronik devrelerde kullanılmasının önünü açmış ve elektronik endüstrisinde devrim yaratmıştır. Transistörün icadı, daha küçük, daha hızlı ve daha güvenilir elektronik cihazların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. (Millman ve Grabel 1987). 1960'larda, Silisyum (Si) yarı iletken malzemesi, elektronik endüstrisinde standart hale gelmiştir (Sze ve Ng 2006). Silisyumun bolluğu, işlenebilirliği ve uygun maliyeti, onu yarı iletken üretiminde ideal bir malzeme yapmıştır. Aynı dönemde, entegre devrelerin (IC) geliştirilmesi, elektronik cihazların boyutlarının küçülmesine ve performanslarının artmasına katkıda bulunmuştur (Kilby 2000).

2.2.Yarı İletkenlerin Önemi

Yarı iletken malzemeler, modern teknolojinin temel yapı taşlarından biridir. Mikroişlemeçiler, hafıza birimleri, sensörler ve güç elektroniği cihazları gibi birçok elektronik bileşen, yarı iletken malzemelerden üretilir (Neamen 2012). Bu malzemelerin özellikleri, elektronik cihazların performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkiler.

Silisyum (Si) ve Silisyum Karbür (SiC) gibi yarı iletken malzemeler, farklı özellikleri ve avantajları ile öne çıkarlar. Silisyum, düşük maliyeti ve geniş uygulama alanı ile yaygın olarak kullanılırken, Silisyum Karbür, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek frekansta verimliliği ile özellikle güç elektroniği uygulamalarında tercih edilir (Casady ve Johnson 2016). Resim 2.1’ de yarı iletkenlerin kullanım alanlarından örnekler görülmektedir.



Resim 2.1 Yarı iletken malzemelerin kullanım alanları (İnt.Kyn.1).

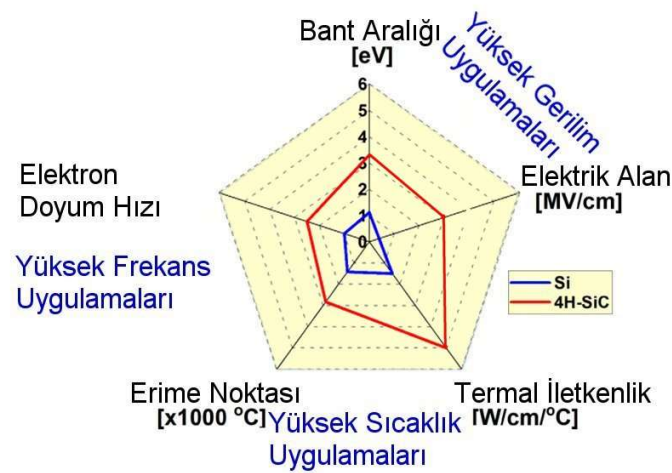
2.3. Gelecekteki Yönelimler

Gelecekte, yarı iletken teknolojisinde daha ileri malzemelerin ve üretim tekniklerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Galyum Nitrat (GaN) ve Grafen gibi yeni nesil yarı iletken malzemeler, elektronik cihazların performansını daha da artırabilir ve yeni uygulama alanları yaratabilir (Pearton 2018, Schwierz 2010). Ayrıca, nanoteknoloji ve kuantum hesaplama gibi alanlardaki ilerlemeler, yarı iletken teknolojisinin sınırlarını zorlamaktadır (Ferry 2020).

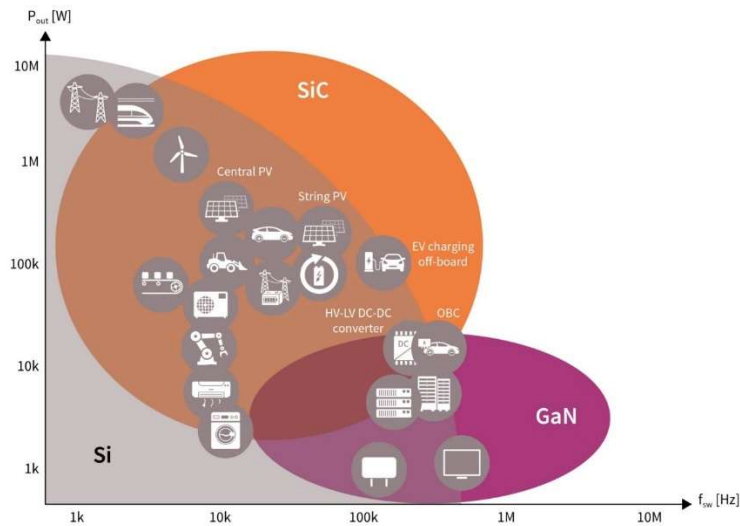
Sonuç olarak, yarı iletken teknolojisinin gelişimi, elektronik endüstrisinin temelini oluşturmuş ve modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Yarı iletken malzemeler, gelecekte de teknolojik ilerlemelerin ve yeniliklerin merkezinde yer alacaklardır.

2.4. Silisyum Karbürün Güç Elektroniği Uygulamaları

Silisyum Karbür, güç elektroniği alanında giderek daha fazla kullanılmaktadır. SiC'nin geniş bant aralığı, yüksek termal iletkenlik ve yüksek kırılma elektrik alanı gibi üstün özellikleri, onu yüksek gerilim, yüksek frekans, yüksek sıcaklık ve yüksek güç uygulamaları için ideal hale getirir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 'te görüldüğü gibi bu özellikler, SiC cihazlarının daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlar, enerji kayıplarını azaltır ve sistemlerin daha kompakt ve hafif olmasına olanak tanır.



Şekil 2.1 Si ve SiC yarı iletkenlerin termal ve elektriksel özellikleri (Lauenstein 2020).



Şekil 2.2 Si ve SiC yarı iletkenlerde uygulama alanları (İnt.Kyn.2).

Bu literatür taramasında, farklı çalışmalarda Si tabanlı yarı iletkenlerin SiC tabanlı yarı iletkenlerle değiştirilmesi sonucu elde edilen verim artışları ve diğer performans iyileştirmeleri özetlenmiştir.

Mikro şebekeler, yüksek enerji verimliliği, güvenilirlik, esneklik, hızlı tepki süreleri ve düşük işletme maliyetleri gibi önemli gereksinimlere sahiptir. Bu gereksinimlere yanıt olarak SiC teknolojisi, çeşitli avantajlar sunar. SiC tabanlı güç elektroniği bileşenleri, düşük enerji kayıpları ve yüksek anahtarlama hızlarıyla çalışarak mikro şebekelerin genel enerji verimliliğini artırır, bu da özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda önemlidir. SiC cihazları, yüksek sıcaklık ve zorlu çalışma koşullarında güvenilir performans sunarak mikro şebekelerin kesintisiz çalışmasını ve uzun ömürlü olmasını sağlar. SiC'nin yüksek frekanslarda çalışabilme yeteneği, daha esnek ve hızlı tepki verebilen güç dönüştürücülerin tasarlanmasını mümkün kılar. Bu da mikro şebekelerin farklı enerji kaynakları ve yüklerle etkin bir şekilde çalışmasına olanak sağlar. Ayrıca, SiC malzemelerin verimliliği, ve dayanıklılığı, bakım ve işletme maliyetlerini azaltır. Daha az soğutma gereksinimi ile enerji tasarrufu sağlayarak maliyetleri düşürür. Bu nedenle, SiC teknolojisi, mikro şebekelerin performansını ve sürdürülebilirliğini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Xiaofeng ve arkadaşları (2016), düşük gerilimli mikro şebekelerde kullanılan invertörlerde, Si IGBT'ler ile SiC MOSFET'lerin güç kalitesi ve verimlilik üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. SiC MOSFET'lerin yüksek anahtarlama hızlarında çalışmaya olanak sağlaması sayesinde, güç kalitesinde önemli artışlar elde edilmiştir. Çalışmalarında, 200V DC girişli, 3 fazlı şebeke bağlantılı bir mikro invertörde, Si tabanlı IGBT'ler SiC tabanlı MOSFET'lerle değiştirilerek anahtarlama kayıplarında %64, toplam akım harmoniklerinde (THDI) %65 ve toplam gerilim harmoniklerinde (THDV) %45 azalma sağlamışlardır.

PV invertörleri, güneş panellerinden gelen DC enerjiyi alternatif akım (AC) enerjisine dönüştürürken yüksek enerji verimliliği, güvenilirlik, düşük ısı kayıpları ve kompakt tasarım gibi gereksinimlere sahiptir. SiC teknolojisi, bu gereksinimlere önemli katkılarda bulunur. SiC tabanlı güç elektroniği bileşenleri, düşük enerji kayıpları ve yüksek anahtarlama hızları sayesinde PV invertörlerin enerji verimliliğini artırır, böylece güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Ayrıca, SiC'nin yüksek

sıcaklıklarda çalışma yeteneği, invertörlerin daha az soğutma gereksinimiyle çalışmasını sağlar ve ısıl yönetimi iyileştirir. Bu, invertörlerin daha kompakt tasarlanmasını ve uzun ömürlü olmasını mümkün kılar. SiC'nin yüksek güç yoğunluğu, daha küçük ve hafif invertör tasarımlarına olanak tanır. Böylelikle yerleşim alanını azaltılır ve sistemin genel maliyetini düşürölür. Burger ve arkadaşları (2009), SiC MOSFET'lerin verimlilik üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, yalnızca Si tabanlı IGBT yarı iletken anahtarları SiC tabanlı MOSFET'lerle değiştirerek önemli sonuçlar elde etmişlerdir. 350V DC girişli, 230V AC çıkışlı, 5kW gücündeki nötr kilitlemeli tek fazlı invertörde %0,89 oranında verim artışı sağlamışlardır. Ayrıca, 650V DC girişli, 400V AC çıkışlı, üç fazlı tam köprü invertörde benzer bir değişiklikle %2,82 verim artışı ve soğutucu sıcaklıklarında 43°C azalma elde etmişlerdir.

Elektrikli araç tahrik sistemleri, elektrik motorları, güç elektroniği, bataryalar ve diğer bileşenler aracılığıyla aracın hareketini sağlayan mekanizmalardır. Bu sistemler, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek tekerlekleri döndürür ve aracı hareket ettirir. Xiaofeng ve arkadaşları (2016), elektrikli araç tahrik sistemleri üzerine yaptıkları çalışmada, 270V DC girişli bir invertör ve 30kW sabit mıknatıslı senkron motor yükü ile gerçekleştirdikleri denemelerde, Si tabanlı IGBT'lerin SiC tabanlı MOSFET'lerle değiştirilmesiyle invertör verimini %99'a çıkararak %3'lük bir verim artışı sağlamışlardır.

Güç faktörü düzeltme (PFC) devreleri doğrultucularının verimliliğini artırmak, motor sürücöleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve elektrikli araçların (EV) batarya şarj cihazları gibi geniş uygulama alanları nedeniyle giderek daha önemli hale gelmiştir. Şebekeye enjekte edilen harmonikler ve güç kalitesi konusunda daha katı hale gelen standartlar ile PFC'lere olan ilgi daha da artmıştır. Mao ve arkadaşları (2016), SiC yarı iletkenlerin güç faktörü düzeltme devrelerinde verime etkisini ölçmek için yaptıkları çalışmada 380Vac giriş 800VDC çıkışlı 5kW gücündeki doğrultucuda bulunan Si yarı iletken malzemeleri SiC yarı iletken malzeme ile değiştirerek %1,2 verim artışı elde etmişlerdir.

Güç elektroniğinde güç yoğunluğu, birim hacimde ya da birim kütlede ne kadar güç aktarılabileceğini ifade eder ve oldukça önemli bir kavramdır. Yüksek güç yoğunluğu,

daha kompakt, hafif ve verimli güç dönüştürme sistemlerinin tasarlanmasına olanak tanır. Bu, özellikle elektrikli araçlar, taşınabilir cihazlar ve uzay uygulamaları gibi alanlarda kritik bir rol oynar, çünkü bu alanlarda hem alan hem de ağırlık kısıtlamaları bulunur. Nielsen ve arkadaşları(2020), SiC yarı iletkenlerin boyutlara etkilerini incelemek için yaptıkları çalışmada 10kW gücündeki üç fazlı iki seviyeli invertörde bulunan Si yarı iletken malzemeleri SiC tabanlı MOSFET'ler ile değiştirerek %98,8 verim, %30 hacim küçülmesi ve %10 filtre elemanlarında ağırlık azalması elde etmişlerdir.

Elektrikli araç (EV) şarj sistemleri, bataryaları AC (Alternatif Akım) veya DC (Doğru Akım) ile şarj ederek elektrikli araçların çalışmasını sağlar. Bu sistemlerin verimliliği, batarya ömrü ve araç performansı açısından kritik öneme sahiptir. SiC teknolojisi, EV şarj sistemlerinde önemli avantajlar sunar. SiC tabanlı bileşenler, yüksek anahtarlama hızları ve düşük enerji kayıpları sayesinde şarj sistemlerinin daha verimli çalışmasını ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, SiC'nin yüksek güç yoğunluğu, şarj cihazlarının daha kompakt ve hafif tasarımlarını mümkün kılar, bu da yer tasarrufu sağlar. SiC'nin yüksek sıcaklıklarda çalışma yeteneği, şarj cihazlarının daha iyi ısı yönetim ve soğutma özellikleri sunarak sistemlerin güvenilirliğini artırır. SiC'nin zorlu koşullarda bile yüksek güvenilirlik sunması, şarj cihazlarının uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren sistemler olmasını sağlar. Ramachandran ve arkadaşlarının (2018), yaptığı çalışmada, SiC tabanlı yarı iletkenler kullanarak 20kW gücündeki izole edilmiş hızlı şarj ünitesinde %98,54 verim elde edilmiştir. Bu bulgular, SiC'nin EV şarj sistemlerinde yüksek verimlilik ve performans sağladığını göstermektedir

Veri merkezleri, dünya genelinde hızla artan veri işleme ve depolama ihtiyaçları nedeniyle büyük enerji tüketicileri haline gelmiştir. Bu merkezlerde kullanılan güç elektroniği sistemlerinin verimliliği, enerji maliyetlerini azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. SiC yarı iletkenler, veri merkezlerinin enerji verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Xu ve arkadaşları (2013), veri merkezleri için tasarladıkları 7,5kW gücünde üç fazlı alçaltıcı tip AC/DC dönüştürücü devresi ile %98,5 verim, %2,9 THDI ve 0,99 güç faktörü elde etmişlerdir.

Gerilim kaynaklı dönüştürücüler (VSC), DC gerilimi AC gerilime dönüştüren bir güç elektroniği cihazıdır. VSC'ler, aktif ve reaktif gücü bağımsız olarak kontrol edebilme, düşük harmonik distorsiyon, hızlı tepki süresi ve kompakt tasarım gibi avantajlar sunar. Yenilenebilir enerji sistemleri, HVDC iletim, motor sürücüler ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle, enerji verimliliğini artırmak ve güç kalitesini iyileştirmek için kritik bir teknolojidir. Hazra ve arkadaşları (2013), gerilim kaynaklı dönüştürücülerde Si yarı iletkenler ile SiC yarı iletkenleri karşılaştırmışlardır. 800V DC girişli, 480V AC çıkışlı, 35kVA gücündeki gerilim kaynaklı dönüştürücüde Si yarı iletken kullanarak 10kHz anahtarlama frekansında elde ettikleri verim değerini SiC yarı iletkenlerle 50kHz anahtarlama frekansında elde etmişlerdir. Yüksek anahtarlama frekansının kullanılması filtre elemanlarının boyutunun düşmesine olanak sağlamıştır.

Elektrikli hava araçları, yüksek enerji verimliliği, düşük ağırlık, güvenilirlik, ısıl yönetim ve kompakt tasarım gibi kritik gereksinimlere sahiptir. Bu gereksinimlere yanıt olarak Silisyum Karbür teknolojisi, önemli avantajlar sunar. SiC, daha düşük enerji kayıplarıyla çalışarak bataryaların verimini ve hava aracının uçuş menzilini artırır. Ayrıca, yüksek güç yoğunluğu sayesinde daha hafif ve kompakt bir güç elektroniği sistemi sunar, bu da uçak ağırlığını azaltarak performansı iyileştirir. SiC'nin yüksek sıcaklıklarda çalışma yeteneği, soğutma gereksinimini azaltarak enerji tasarrufuna katkıda bulunur. Aynı zamanda, zorlu koşullarda dahi yüksek güvenilirlik sunarak elektrikli hava araçlarının uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren sistemler kullanmasını sağlar. SiC, bu kritik gereksinimlere etkin bir şekilde yanıt vererek, elektrikli hava araçlarının performansını ve verimliliğini artırır. Yin ve arkadaşları (2017), hava araçları için yaptıkları çalışmada 750V DC girişli, 230V AC faz-nötr, 400Hz çıkışlı ve 100kHz anahtarlama frekansında çalışan üç faz tam köprü invertörde SiC yarı iletkenler kullanarak %97,91 verim ve 26,7kW/kg güç yoğunluğu elde etmişlerdir.

Bu çalışmalarda, SiC tabanlı yarı iletkenlerin, Si tabanlı yarı iletkenlere kıyasla daha yüksek verimlilik, daha düşük kayıplar ve daha kompakt sistem tasarımları sağladığı gösterilmiştir. Bu nedenle, güç elektroniği uygulamalarında SiC'nin Si'ye potansiyel bir alternatif olduğu vurgulanmaktadır.

3. MATERYAL ve METOT

Günümüzde enerji verimliliği hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan büyük bir önem taşımaktadır. Artan enerji talebi ve sınırlı doğal kaynaklar, enerji verimliliğinin öncelikli bir konu haline gelmesine neden olmuştur. Verimli enerji kullanımı, aynı miktarda iş veya hizmet için daha az enerji tüketilmesini sağlar, bu da karbon salınımını azaltarak çevreye olumlu katkı sunar. Bu bağlamda, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte temiz enerjiye geçişte kritik bir rol oynamaktadır.

Elektrik enerjisi dönüşümünde enerji verimliliği, enerjinin bir formdan diğerine dönüştürülürken kayıpların en aza indirilmesi anlamına gelir. Elektrik enerjisi dönüşümünde kullanılan cihazlar ve sistemlerin verimliliği, kullanılan malzemelerin özelliklerine ve teknolojik tasarımlarına bağlıdır. Örneğin, dönüştürücülerde Si yerine SiC gibi daha verimli yarı iletken malzemeler kullanmak, kayıpları düşürür ve yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Bu bölümde Si ve SiC yarı iletkenler, Boost dönüştürücü ve SiC yarı iletkenlerin Boost dönüştürücüde enerji verimliliği, maliyet ve boyut bakımından etkilerini araştırmak için kullanılan materyaller hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1. Silisyum ve Silisyum Karbürün Temel Özellikleri

Silisyum (Si) ve Silisyum Karbür (SiC), güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan iki önemli yarı iletken malzemedir. Her iki malzeme de benzersiz özelliklere sahip olup, belirli uygulamalarda farklı avantajlar sunar. Bu bölümde, Si ve SiC malzemelerinin güç elektroniği uygulamalarındaki temel özellikleri ve kullanım alanları incelenecektir.

Silisyum, elektronik endüstrisinde en yaygın kullanılan yarı iletken malzemedir. Elektriksel özellikleri ve maliyeti nedeniyle, çoğu güç elektroniği cihazında tercih edilmektedir. Silisyumun bazı temel özellikleri şunlardır;

- Elektriksel Özellikler: Silisyum, geniş bir iletkenlik aralığına sahiptir ve farklı katkılama seviyeleriyle iletkenliği ayarlanabilir. Bu özellik, transistörler ve diyotlar gibi çeşitli yarı iletken cihazların tasarımında esneklik sağlar (Neudeck 1989).
- Isı Yönetimi: Silisyum, orta derecede ısıya dayanıklıdır ve 150°C'ye kadar olan sıcaklıklarda güvenilir bir şekilde çalışabilir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda performansı düşer (Sze ve Ng 2006).
- Maliyet: Silisyum, bol bulunan bir elementtir ve işlenmesi görece ucuzdur. Bu nedenle, geniş çapta üretilen elektronik cihazlarda ekonomik bir seçenek olarak öne çıkar (Shur 1990).
- Uygulama Alanları: Silisyum, güç transistörleri, entegre devreler (IC'ler), güneş panelleri ve sensörler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır (Baliga 1996).

Silisyum karbür son yıllarda güç elektroniği uygulamalarında önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. SiC'nin üstün özellikleri, özellikle yüksek güçlü ve yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. SiC'nin bazı temel özellikleri şunlardır;

- Elektriksel Özellikler: SiC, geniş bir bant aralığına sahiptir (3.26 eV). Bu özellik, daha yüksek gerilimlerde ve sıcaklıklarda çalışmasına olanak tanır (Casady ve Johnson 1996).
- Isı Yönetimi: SiC, yüksek ısı iletkenlik ve termal dayanıklılık sunar. 600°C'ye kadar olan sıcaklıklarda performansını koruyabilir, bu da onu yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal kılar (Baliga, 2005).
- Anahtarlama Hızı: SiC, daha hızlı anahtarlama hızlarına ve daha düşük anahtarlama kayıplarına sahiptir. Bu, yüksek frekanslı güç dönüştürücü devrelerinde enerji verimliliğini artırır (Palmour vd.2010).

- Maliyet: SiC'nin üretim maliyetleri, silisyuma kıyasla daha yüksektir. Ancak, teknolojiadaki ilerlemeler ve artan üretim hacmi ile bu maliyetler giderek azalmaktadır (Kimoto ve Cooper 2014).
- Uygulama Alanları: SiC, elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri, havacılık ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır (Roccaforte vd. 2018).

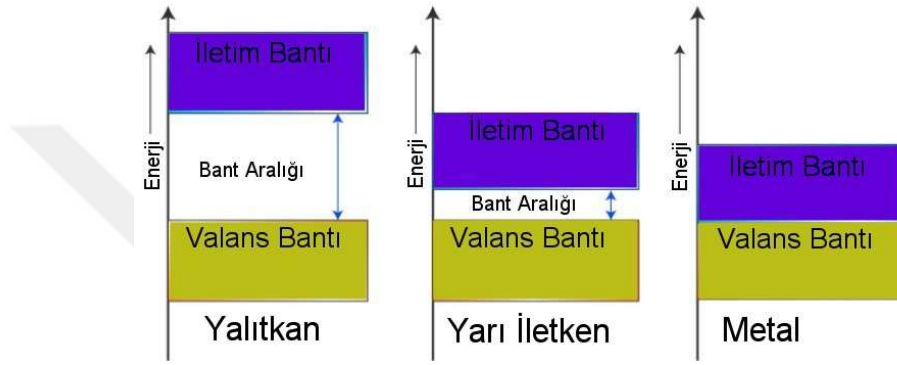
Silisyum Karbür günümüzde geniş bant aralıklı yarı iletkenler arasında önemli bir yer tutmaktadır. İlk kez 1890 yılında Edward Goodrich Acheson tarafından keşfedilmiştir. Acheson, kil (alüminyum silikat) ve karbonu ısıtarak yapay elmas üretmeye çalışırken, bu deney sırasında SiC kristallerini keşfetmiştir. Bu kristalleri "carborundum" olarak adlandırmıştır. Bu buluş, SiC'nin aşındırıcı olarak kullanılmasına yol açmış ve 1893 yılında Acheson, bu malzemeyi ticari olarak üretmek için Carborundum Company'yi kurmuştur (İnt.Kyn.3).

SiC'nin doğada bulunması oldukça nadirdir, ancak 1907 yılında Henry Joseph Round, SiC kristaline gerilim uygulayarak ilk LED'i üretmiştir. Bu, SiC'nin yarı iletken özelliklerinin keşfedilmesinde önemli bir adımdır. 20. yüzyılın sonlarına doğru, özellikle MOSFET teknolojisinde SiC kullanımı artmıştır (İnt.Kyn.3).

Son yıllarda, SiC'nin ticari olarak kullanımı yaygınlaşmış ve SiC bazlı MOSFET'ler ve diyotlar yüksek sıcaklıklarda ve zorlu çevre koşullarında çalışabilme yetenekleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Özellikle, 1200 V SiC MOSFET'ler, yüksek kanal mobilitesi ve uzun ömürlü oksit katmanları ile dikkat çekmektedir (İnt.Kyn.1). SiC'nin üstün termal, elektriksel ve mekanik özellikleri, onu geleceğin enerji ve elektronik sistemlerinde vazgeçilmez bir malzeme yapmaktadır.

Elektriksel ve termal özellikleri açısından farklılık gösteren Si ve SiC malzemeler, çeşitli uygulama alanlarında farklı performans avantajları sunmaktadır.

- Bant aralığı bir yarı iletkenin valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji farkını ifade eder. Yani, bir elektronun bir atomun bağ yapıcı bandından iletim bandına geçebilmesi için gerekli minimum enerji miktarıdır. Yalıtkanlarda bu enerji miktarı 7eV seviyesine kadar çıkabilirken yarı iletkenlerde 0,7-5,5eV seviyesindedir. Şekil 3.1’de metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanlar için bant aralığı görseli bulunmaktadır. Bant aralığı, yarı iletken malzemelerin sıcaklık, basınç veya katkılanma seviyeleri gibi çevresel değişkenlere nasıl tepki vereceğini de etkiler. Bu nedenle, elektronik ve optoelektronik cihazların tasarımında ve performansında kritik bir parametredir (Neudeck vd 2002).



Şekil 3.1 Bant aralığı.

Si'nin bant aralığı yaklaşık 1.1 eV iken, SiC'nin bant aralığı yaklaşık 3.3 eV'dir. Geniş bant aralığı, SiC'nin yüksek sıcaklıklarda ve yüksek gerilimlerde daha iyi performans göstermesine olanak tanır (Baliga 2018). Çizelge 3.1’de bazı yarı iletkenler için bant aralığı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Yarı iletken malzemeler için bant aralığı değerleri

	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAS	Elmas
Bant Aralığı (eV)	1,12	3,26	3,03	3,45	1,43	5,45

- Elektrik alan dayanımı yarı iletken malzemelerin uygulanan elektrik alanına karşı dayanıklılığını ifade eder ve malzemenin dielektrik özelliklerini kaybetmeden önce dayanabileceği maksimum elektrik alanı tanımlar. Bu nitelik, özellikle yüksek gerilim ve güç uygulamalarında önemlidir. Elektrik alan dayanımı, genellikle birim uzunluk başına gerilim (V/m) cinsinden ifade edilir.

Silisyum için elektrik alan dayanımı, yaklaşık olarak 0,3 MV/cm civarındadır. Bu değer

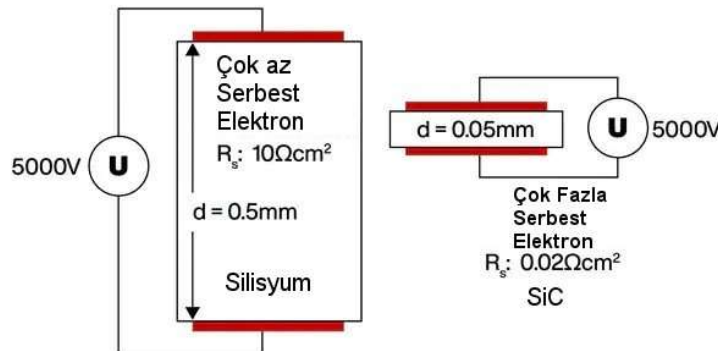
altında, Silisyum malzemesi dielektrik özelliklerini koruyabilir ve güvenle çalışabilir. Silisyum, yaygın bir yarı iletken olmasına rağmen, yüksek gerilim uygulamalarında sınırlamaları bulunmaktadır (İnt.Kyn.5).

Silisyum Karbür için ise elektrik alan dayanımı yaklaşık 3 MV/cm civarındadır. SiC, geniş bant aralığına sahip bir malzeme olduğu için daha yüksek elektrik alan dayanımına sahiptir. Bu özellik, SiC'nin yüksek sıcaklık ve yüksek gerilim uygulamalarında Silisyumun yerine kullanılmasına olanak tanır. Örneğin, SiC bazlı cihazlar daha küçük boyutlarda ve daha yüksek verimlilikte güç cihazları üretmeyi mümkün kılar (İnt.Kyn.5). Çizelge 3.2 de görüldüğü gibi SiC'nin elektrik alan dayanımı, Si'ye kıyasla yaklaşık on kat daha yüksektir. Bu, SiC cihazların daha ince ve daha kompakt yapılmasına olanak tanır ve yüksek gerilim uygulamalarında önemli bir avantaj sağlar (Neudeck 2002).

Çizelge 3.2 Yarı iletken malzemeler için elektrik alan dayanımı değerleri

	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAS	Elmas
Elektrik Alan Dayanımı (MV/cm)	0,3	3	2,5	3,5	0,4	10

Elektrik alan dayanımının yüksek olması Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yarı iletken aygıtların daha ince, iletim dirençlerin az ve dolayısıyla daha az kayıplı, daha küçük boyutlarda yapılabilmesine olanak sağlar.



Şekil 3.2 Silisyum ve Silisyum karbür yarı iletkenlerde kalınlık.

- Taşıyıcı hareketliliği yarı iletken malzemelerdeki elektronların ve boşlukların (pozitif yük taşıyıcıları) bir elektrik alanı altında ne kadar hızlı hareket edebileceğini ifade eder. Bu parametre, bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliğini belirleyen önemli bir faktördür. Yüksek taşıyıcı hareketliliği, daha hızlı anahtarlama hızlarına ve daha düşük enerji kayıplarına olanak tanır.

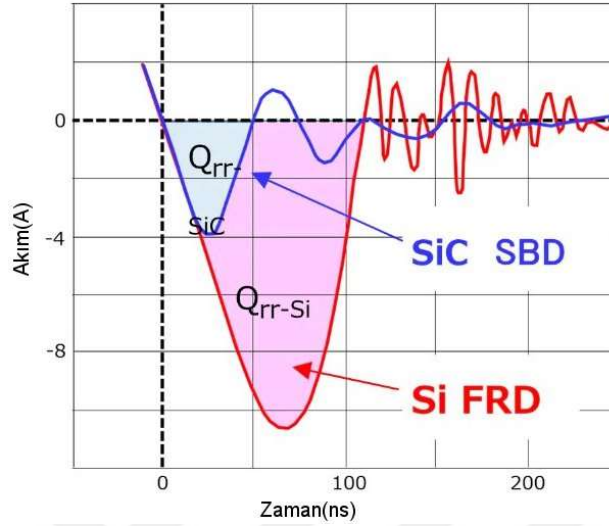
Yarı iletken endüstrisinde en yaygın kullanılan malzeme olan Silisyum, nispeten yüksek bir taşıyıcı hareketliliğine sahiptir. Elektron hareketliliği, tipik olarak yaklaşık $1400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ civarındadır. Delik hareketliliği ise daha düşüktür ve yaklaşık $450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ seviyesindedir. Silisyumun bu hareketlilik değerleri, onu birçok uygulama için uygun kılmaktadır. Ancak, yüksek frekans ve yüksek sıcaklık koşullarında sınırlamaları bulunmaktadır. Silisyum karbür, geniş bant aralığı ve yüksek elektrik alan dayanımı gibi üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, taşıyıcı hareketliliği Silisyum kadar yüksek değildir. SiC'deki elektron hareketliliği yaklaşık $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, delik hareketliliği ise yaklaşık $120 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ civarındadır (Sze ve Ng 2006). Bu değerler, SiC'nin yüksek güç ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilmesi için yeterlidir, fakat düşük frekanslı uygulamalarda Silisyumun performansını tam olarak karşılayamayabilir. Çizelge 3.3'te bazı yarı iletkenler için elektron hareketliliği ve doyumluk hızları verilmiştir.

Çizelge 3.3 Yarı iletken malzemeler için elektron hareketliliği ve doyumluk hızları

	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAs	Elmas
Elektron Hareketliliği ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1400	1000	450	900-2000	8500	2200
Doyumluk hızı ($\times 10^7 \text{ cm/s}$)	1	2,2	1,9	2,7	2	2,7

SiC'nin elektron hareketliliği Si'den düşüktür. Bu nedenle SiC cihazları, yüksek gerilimlerde düşük kayıplar ve daha yüksek verimlilik sağlar (Dimitrijević 2002). Yüksek anahtarlama frekansı, elektron hareketliliği ve elektron sürüklenme hızı ile doğru orantılıdır. Yüksek elektron sürüklenme hızı diyot gibi yarı iletkenlerde ters toparlanma

akımlarının ve sürelerinin kısılmasına neden olur. Şekil 3.3'te Si ve SiC diyotların ters toparlanma hızları görülmektedir.



Şekil 3.3 Si ve SiC yarı iletkenlerde ters toparlanma süreleri (İnt.Kyn.6).

- Termal iletkenlik bir malzemenin ısıyı iletme yeteneğini göstermektedir ve özellikle elektronik cihazların soğutma ve termal yönetimi açısından kritik bir parametredir. Yüksek termal iletkenlik, bir malzemenin üretilen ısıyı etkili bir şekilde yayabilmesini sağlamaktadır, bu da cihazların daha yüksek güç yoğunluklarında çalışmasına olanak tanır.

Silisyumun termal iletkenliği, oda sıcaklığında yaklaşık 150 W/m·K civarındadır. Bu değer, birçok elektronik uygulama için yeterli olsa da, yüksek güç uygulamaları için sınırlandırıcı olabilir. Silisyum karbür, çok daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. SiC'nin termal iletkenliği oda sıcaklığında yaklaşık 490 W/m·K civarındadır. Bu, SiC'nin ısıyı çok daha hızlı yayabildiği ve yüksek güç uygulamalarında, özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında bile termal kararlılığı koruyabildiği anlamına gelmektedir. Bu özellik, SiC'nin güç elektroniği cihazlarında ve yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilmesinin nedenlerinden biridir. SiC'nin termal iletkenliği Si'ye göre yaklaşık üç kat daha yüksektir. Bu, SiC cihazların daha iyi ısı yayılımı sağlamasına ve yüksek güç yoğunluklarında çalışmasına olanak tanır (Morvan 2004). SiC'nin yüksek termal iletkenliği, elektronik cihazlarda daha küçük soğutma çözümlerine olanak tanır.

Çizelge 3.4 Yarı iletken malzemeler için termal iletkenlik değerleri

	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAs	Elmas
Termal iletkenlik (W/cmK)	1,5	4,9	4,9	1,3	0,5	20

- Sıcaklık dayanımı, yarı iletken malzemelerin yüksek sıcaklıklarda elektriksel ve yapısal olarak güvenli çalışabilme kapasitesini ifade etmektedir. Bu parametre, özellikle yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda kullanımı ve yüksek güç uygulamalarında çalışan cihazların güvenliği ve verimliliği için kritik önem arz etmektedir.

Silisyum, geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilen bir yarı iletken malzemedir. Ancak, Silisyumun performansı 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda düşmeye başlar. Bu, taşıyıcı yoğunluğunun artması ve malzemenin elektriksel özelliklerinin bozulması nedeniyle oluşmaktadır. Silisyumun maksimum çalışma sıcaklığı genellikle 150°C civarındadır. Bu sıcaklık aralığı, birçok düşük ve orta güç uygulamaları için yeterlidir, ancak daha yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı olabilir.

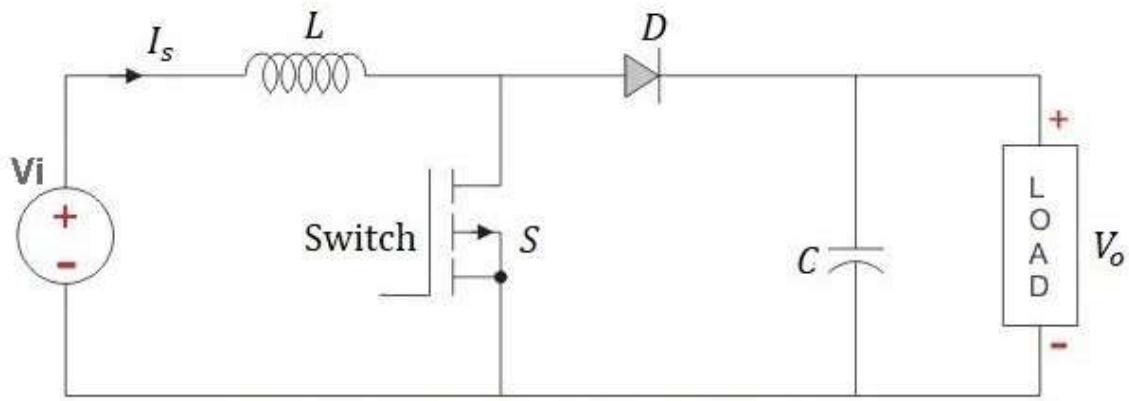
Silisyum karbür, yüksek sıcaklık dayanımı ile bilinen bir yarı iletkenidir. SiC, geniş bant aralığı ve yüksek termal iletkenliği sayesinde 600°C'ye kadar olan sıcaklıklarda etkin bir şekilde çalışabilir. Bu, SiC'nin yüksek sıcaklık dayanımı, elektron hareketliliğinin yüksek sıcaklıklarda bile kararlı kalmasını sağlar. Bu özellik, SiC'nin yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir (Cooper 2002).

3.2. Boost Dönüştürücü

Boost dönüştürücü, uygulanan DC giriş gerilimini yükseltme işlemini gerçekleştiren bir DC-DC dönüştürücüdür. Boost dönüştürücüde, sabit DC giriş gerilimi yükseltilerek ayarlanabilir bir DC çıkış gerilimi elde edilir. Yani, boost dönüştürücünün çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha yüksektir. Bu nedenle, boost dönüştürücüye "yükseltici dönüştürücü" veya "yükseltici kıyıcı" da denir. "Boost" adı, elde edilen çıkış geriliminin sağlanan giriş geriliminden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Boost dönüştürücüde yükseltme işlemi, bobinde depolanan enerjinin yüke aktarılmasıyla

gerçekleştirilir. Bilindiği üzere, gerilim ve akımın çarpımı gücü vermektedir. Boost dönüştürücünün çıkışındaki gerilim artışı, devre boyunca çıkış akımının azalması anlamına gelir. Devrede, en az iki yarı iletken (örneğin, bir diyot ve transistör) ve en az bir enerji depolama elemanı (örneğin, bir bobin veya kapasitör veya her ikisi) bulunmaktadır. Boost dönüştürücü devrelerinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET, BJT, IGBT gibi yarı iletken anahtarlar kullanılmaktadır.

Boost dönüştürücünün çalışma prensibi, bobinde enerji depolama ilkesine dayanır. Dönüştürücü, yük üzerindeki DC çıkış gerilimini düzenlemeye ve artırmaya yardımcı olacak şekilde çalışır. Tipik bir boost dönüştürücü için devre şeması Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Boost dönüştürücü devresi.

Boost dönüştürücünün temel devre topolojisi aşağıdaki temel bileşenlerden oluşur:

- İndüktör (L) anahtarlama döngüleri boyunca enerjiyi depolayan ve serbest bırakan bobin, boost dönüştürücünün temel bir parçasıdır. Başlıca görevi, akım akışını kontrol ederken dönüşüm sırasında enerji depolamasını sağlamaktır.
- Anahtar (S), bobini yüke bağlayıp ayırarak, giriş ve çıkış arasındaki enerji transferini yönetmede önemli bir rol oynar.
- Diyot (D) kapanma süresi boyunca diyot, devrede akımın yalnızca bir yönde, yani

çıkışa doğru akmasına izin verir. Anahtar açık olduğunda, akımın giriş tarafına geri dönmesini durdurur.

- Çıkış kapasitörü (C) yük boyunca gerilimi sabitlemekten ve çıkış gerilimini düzeltmekten sorumludur. Yük için sabit bir çıkış gerilimi garanti eder ve yüksek frekanslı gerilim dalgalanmalarını filtreler.

- Yük direnci (R), boost dönüştürücü tarafından bağlanan ve çalıştırılan elektrik yükünü sembolize eder. Dönüştürücünün bu yüke gerekli gerilimi ve akımı verecek şekilde inşa edilmesi gerekir.

Bu devrede, anahtar olarak çalışan yarı iletken bir cihaz olan MOSFET kaynak üzerine bobin üzerinden bağlanmaktadır. İkinci bir anahtar olarak kullanılan Diyot, kapasitör ve yüke bağlanmaktadır. Kapasitör ve yük, yukarıdaki devre şemasında gösterildiği gibi paralel olarak bağlanmaktadır.

Kontrollü anahtar S, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) kullanılarak açılıp kapatılır. Uygulanan PWM sinyali, zaman tabanlı veya frekans tabanlı olabilir. Boost dönüştürücülerde genellikle basit ve kullanımı kolay olduğu için zaman tabanlı modülasyon tercih edilir. Bu tür PWM modülasyonunda frekans sabit tutmaktadır. Buna karşın, frekans tabanlı modülasyonda, anahtarı istenen şekilde kontrol etmek için geniş bir frekans aralığına sahip olup, alçak geçiren LC filtre tasarımı açısından karmaşık bir yapıya sahip olduğu için tercih edilmemektedir. Boost dönüştürücülerin analizinde ve tasarımında, iki farklı iletim modu bulunmaktadır. Bu modlar; sürekli iletim modu (CCM) ve kesikli iletim modu (DCM) olarak bilinir. Her iki mod da dönüştürücünün performansını, verimliliğini ve tasarım kriterlerini etkileyen bobin akımının davranışında farklılık gösterir.

CCM çalışma modunda, bobin akımı pozitif kalır ve anahtarlama döngüsü boyunca asla sıfıra ulaşmaz. Bobin akımı, anahtarlama fazı sırasında büyür ve manyetik alanında enerji depolar. Bobin akımı, anahtar kapatıldığında depolanan enerjisini çıkışa aktarırken düşer. CCM'deki akım dalga formu üçgen şeklindedir ve yük akımı, akımın ortalama değerine

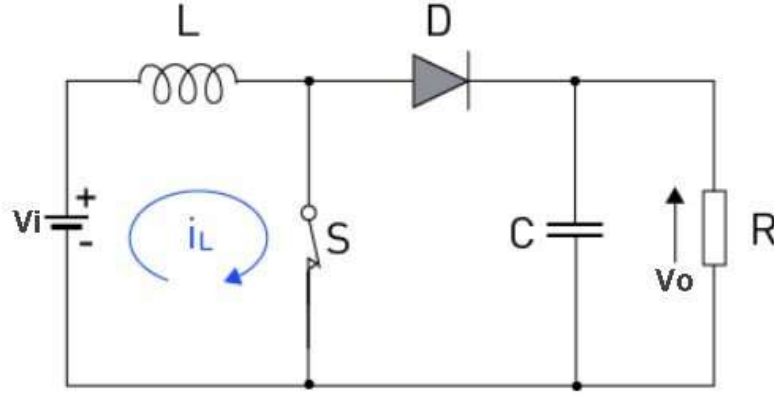
eşittir. CCM çalışmasıyla daha düşük tepe akımları ve çıkış gerilimi dalgalanması üretilir. Bu da verimliliği artırır ve dönüştürücünün parçaları üzerindeki zorlanmayı azaltır. Sürekli akım akışını sürdürmek için daha büyük bobin değerleri gereklidir. Bundan dolayı da dönüştürücünün boyutunda ve fiyatında artışa neden olabilir.

DCM çalışma modunda, anahtarlama döngüsünün bir bölümünde, bobin akımı sıfıra düşer. Bu, çıkışa enerji transferinin sonraki açma periyodunun başlangıcından önce bittiğini gösterir. Kapatma ve sonraki açma periyotları arasında sıfır akım aralığı vardır. Bu da, DCM'deki bobin akımı dalga biçimine yamuk bir şekil verir. DCM çalışmasıyla daha küçük bobin değerleri mümkündür, Böylelikle, daha kompakt ve uygun fiyatlı dönüştürücü tasarımına imkan sağlamaktadır. CCM'nin aksine, daha büyük tepe akımlarına, artan çıkış gerilimi dalgalanmasına ve daha düşük verimliliğe de yol açar. DCM, çok çeşitli yük koşulları veya hafif yükler içeren uygulamalarda daha çok tercih edilir. Bu tez kapsamında, CCM moda göre tasarım ve analiz yapılacaktır.

Boost dönüştürücünün iki çalışma modu vardır. Bunlar; Mod I: S Anahtarı Açık (ON) ve D Diyotu Kapalı (OFF) ve Mod II: S Anahtarı Kapalı (OFF) ve D Diyotu Açık (ON) şeklindedir. Aşağıda bu çalışma modları detaylarıyla verilmektedir.

Mod I: S Anahtarı Açık (ON) ve D Diyotu Kapalı (OFF)

Bu çalışma modunda, S anahtarı ON konumundadır ve D diyotu OFF konumundadır. Bu nedenle, S anahtarı üzerinden akım akışına izin verilir. Tüm akım, kapalı bir yol üzerinden L bobini, S anahtarı ve V_i DC giriş kaynağı boyunca akar. Bu modun devre diyagramı aşağıdaki Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Boost dönüştürüşü S anahtarı ON konumunda.

Bu durumda, bobinin kutuplanması, akımın akış yönüne göre olacaktır. Bu çalışma modunda, D diyotu ters polarmalı olduğundan, diyot üzerinden devreye akım geçmesine izin verilmez. C kapasitörü üzerindeki gerilim, bir başka deyişle çıkış gerilimi, yük direnci üzerinde görülecektir. S anahtarının Ton süresi boyunca açık(ON) ve Toff süresi boyunca kapalı(OFF) olduğunu varsayarsak, bir anahtarlama periyodunun toplam süresi T, Ton ve Toff sürelerinin toplamıdır.

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (3.1)$$

Dolayısıyla anahtarlama frekansı:

$$f_{sw} = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

ve görev döngüsü D:

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (3.3)$$

olacaktır. S anahtarının ideal anahtar olduğu ve gerilim düşümüne sebep olmadığı varsayılır ve Kirchhoff'un Gerilim Yasası uygulanırsa kaynak gerilimi Vin ve bobin gerilimi VL birbirine eşit olacaktır.

$$V_i = V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.4a)$$

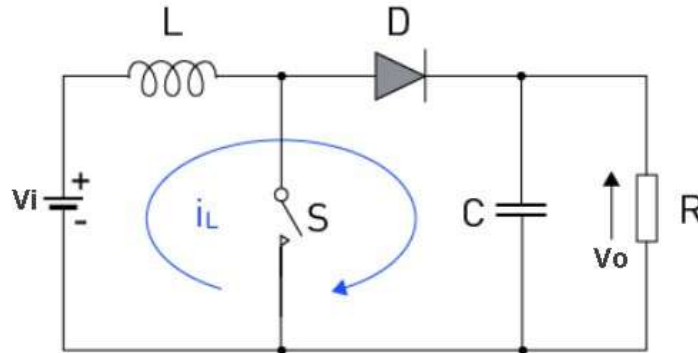
$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_i}{L} \quad (3.4b)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_i}{L} T_{on} = \frac{V_i}{L} DT \quad (3.4c)$$

Denklem 3.4c S anahtarı ON iken bobin akımındaki değişimi ifade etmektedir.

Mod II: S Anahtarı Kapalı (OFF) ve D Diyotu Açık (ON)

Bu modda, D diyotu üzerinden akım geçişine izin verilirken, S anahtarı üzerinden akımın geçişini engellenir. Bu modun devre şeması Şekil 3.6’te gösterilmiştir



Şekil 3.6 Boost dönüştürüşü S anahtarı OFF konumda.

Devredeki bobin enerjiyi manyetik alanda depolar ve S anahtarı kapalı olduğunda enerji kaynağı gibi davranır. Bu nedenle, D diyotu açık duruma gelir. Bu modda, bobin bir önceki modda depoladığı enerjiyi serbest bırakır. Bobinde depolanan enerjinin serbest bırakılması sırasında bobinin polaritesi tersine döner ve bu da D diyotunun iletme geçmesine neden olur. Böylece, D diyotu üzerinden devrede akım akışına izin verilir. Akım akış yönü Şekil 3.6’te gösterilmiştir. Serbest bırakılan enerji, yük direncine ve çıkış kapasitörüne aktarılır. Bu da çıkış gerilimini yükseltir. Bobin üzerinden geçen akım azalma eğiliminde olur. Şekil 3.6’daki devreye Kirchhoff’un gerilim yasası uygulandığında (KVL):

$$V_L = V_i - V_o, \quad V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.5)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (3.6)$$

Denklem 3.1 ve 3.3'ten yola çıkarak,

$$T_{OFF} = T - T_{ON}, T_{ON} = DT, \Delta t = T_{OFF} = (1 - D)T \quad (3.7)$$

Denklem 3.7 denklem 3.6 yerine yazılırsa S anahtarı OFF konumunda iken bobin akımı dalgalanma miktarı,

$$\Delta_{IL} = \frac{V_{in} - V_o}{L} (1 - D)T \quad (3.8)$$

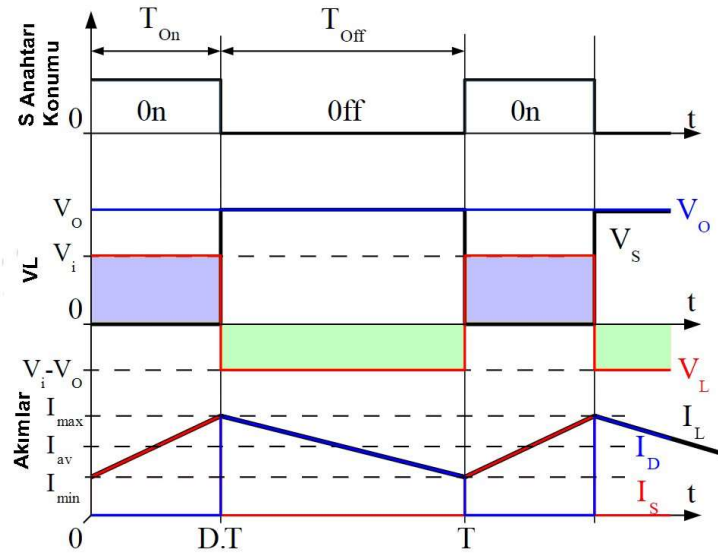
bulunur.

Şekil 3.7'te S anahtarının ON olduğu Mod I ve S anahtarının OFF olduğu Mod II için bobin gerilimleri ve akımları görülmektedir. Bobin zaman gerilim değerinin ortalaması sıfır olması gerektiğinden Şekil 3.7 görüldüğü gibi Ton zamanı ve Toff zamanı için bobin gerilimlerini toplarsak

$$V_i DT - (V_o - V_i)(1 - D)T = 0 \quad (3.9)$$

Çıkış gerilimi değeri denklem 3.10'daki gibi elde edilir.

$$V_o = V_i \frac{1}{1 - D} \quad (3.10)$$



Şekil 3.7 Mod I ve Mod II için bobin akım ve gerilim dalga şekilleri.

D değeri 0-1 arasında değer alabilmektedir. Denklem 3.10 da görüldüğü gibi $D=1$ için çıkış gerilimi sonsuza gitmektedir, bu fiziksel olarak mümkün değildir. D değeri pratikte 0,8'e kadar değer alabilmektedir. Bu da çıkış gerilimini, giriş geriliminin 5 katına kadar çıkarabilmektedir.

Tüm devre elemanları kayıpsız kabul ettiğimiz için giriş ve çıkış akımları arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$V_i I_i = V_o I_o \quad (3.11)$$

Denklem 3.10 denklem 3.11'de yerine yazılırsa

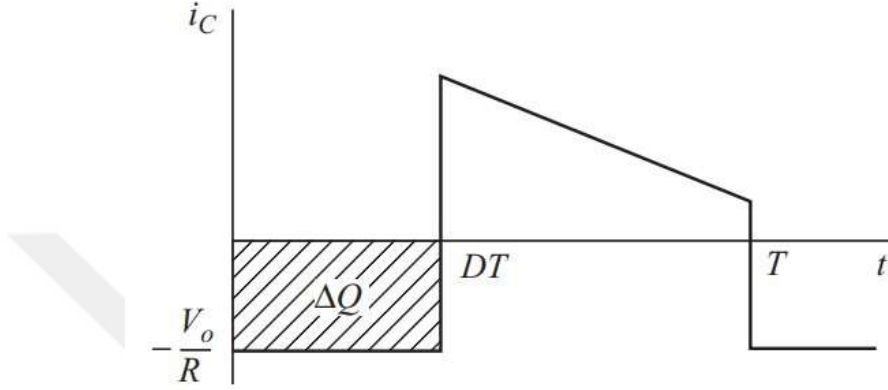
$$I_i = \frac{I_o}{1-D} \quad (3.12)$$

elde edilir.

Bobin değerini belirlemek için denklem 3.4c veya 3.8 kullanılabilir. Burada bobin akım dalgalanması seçimi genellikle giriş akımının %10-%30'u arasında değişmektedir.

$$L = \frac{V_i D}{\Delta i_l f_{sw}} \quad (3.13)$$

Çıkış kapasitörü değerini hesaplamak için Şekil 3.8’te görülen kapasitör akım dalga şekline yararlanılabilir.



Şekil 3.8 Kapasitör akım dalga şekli.

$$\Delta Q = C \Delta V_o = I_o D T = \frac{I_o D}{f_{sw}} \quad (3.14)$$

$$C = \frac{I_o D}{\Delta V_o f_{sw}} \quad (3.15)$$

Burada, ΔV_o çıkış gerilim dalgalanma miktarını ifade etmektedir.

Bu tez kapsamında, Si ve SiC gibi belirli yarı iletken malzemelerin performansını ve bu malzemelerin boost dönüştürücüye etkileri incelenecektir. Boost dönüştürücünün güç katında bir adet kontrollü anahtarlama elemanı ve bir adet de diyot kullanılmaktadır. Kullanılan yarı iletkenlerin akım ve gerilim değerleri eşit tutulmaya çalışılmıştır. Kontrollü anahtarlama elemanı olarak Onsemi marka FGHL40T65MQDT parça kodlu Si IGBT ve NTHL045N065SC1 parça kodlu SiC Mosfet kullanılmıştır. Diyot için Onsemi marka RHRG3060 parça kodlu Si diyot ve FFSH3065B parça kodlu SiC diyot seçilmiştir. Kullanılan yarı iletkenlerin genel elektriksel ve termal özellikleri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir. Ayrıntılı veriler İnt.Kyn.7, İnt.Kyn.8, İnt.Kyn.9 ve İnt.Kyn.10 bulunmaktadır.

Çizelge 3.5 Boost dönüştürücüde kullanılan yarı iletken malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri

	FGHL40T65MQDT	NTHL045N065SC1	RHRG3060	FFSH3065B
Gerilim dayanımı (V)	650	650	600	650
İletim akımı(A)	40	46	30	30
Maksimum çalışma sıcaklığı(°C)	175	175	175	175
Termal direnç jonksiyon-yüzey (°C/W)	0,63	0,52	1,2	0,56

3.3. Simülasyon Yazılımı (LtSpice)

Güç elektroniği uygulamalarında simülasyon yazılımları tasarım ve geliştirme süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Güç elektroniği devreleri genellikle karmaşık yapılar içerir ve yüksek gerilim, akım gibi değişkenlerle çalışırlar. Bu tür sistemlerin doğrudan test edilmesi maliyetli, zaman alıcı ve riskli olabilir. Simülasyon yazılımları, bu devrelerin gerçek dünya koşullarında nasıl davranacağını analiz etmeye olanak tanıyarak güvenli, hızlı ve düşük maliyetli bir alternatif sunar. Simülasyon yazılımlarının başlıca avantajları şunlardır:

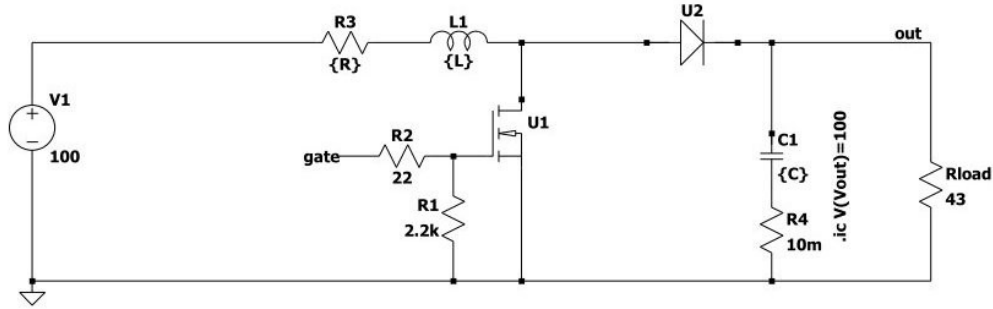
- Tasarım Hatalarını Erken Aşamada Tespit Etme: Simülasyonlar, tasarım sürecinde olası hataları önceden tespit etmeyi ve düzeltmeyi sağlar. Gerçek bir devre oluşturmadan önce simülasyonlar yaparak bileşenlerin uygunluğunu, performansını analiz etmek mümkündür.
- Maliyet ve Zaman Tasarrufu: Fiziksel prototip üretimi yerine, simülasyon kullanarak birçok farklı senaryo üzerinde hızlıca testler gerçekleştirilebilir. Bu, tasarım döngüsünü hızlandırarak maliyetleri düşürür.
- Performans ve Verim Analizi: Simülasyon yazılımları, devrenin verimliliğini, enerji kayıplarını, termal performansını ve diğer kritik parametreleri detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanır.

- Risk Azaltma: Yüksek güçlerde çalışan devrelerde, doğrudan test yapmak güvenlik riskleri doğurabilir. Simülasyonlar, devrelerin güvenliğini ve dayanıklılığını test etmek için güvenli bir ortam sunar.
- Gerçek Dünya Koşullarını Simüle Etme: Güç elektroniği devreleri, ani yük değişimleri, sıcaklık dalgalanmaları ve diğer zorlu koşullar altında test edilebilir. Simülasyon yazılımları bu senaryoları sanal ortamda gerçekleştirebilir.

Tasarlanan dönüştürücünün(Şekil 3.9) tasarım, doğrulama ve veri analizi çalışmalarında LTspice programı kullanılmıştır. LTspice, elektronik devrelerin simülasyonunu yapmak için kullanılan güçlü bir yazılım aracıdır. Analog Devices tarafından geliştirilmiş olan bu yazılım, özellikle analog devre tasarımı ve analizinde yaygın olarak kullanılır. LTspice, doğrusal olmayan devre elemanlarını ve zamanla değişen devreleri modelleyebilme yeteneği ile öne çıkar.

- LTspice, zaman domeni (transient), frekans domeni (AC analizi), ve DC çalışma noktası gibi çeşitli analiz türlerini destekler. Bu, kullanıcıların devrelerinin zaman içindeki davranışlarını, frekans tepkilerini ve doğru akım (DC) çalışma noktalarını incelemelerini sağlar.
- Yazılım, geniş bir transistör, diyot, op-amp ve diğer devre elemanları kitaplığına sahiptir. Ayrıca, kullanıcılar kendi özel eleman modellerini de ekleyebilirler.
- LTspice, hızlı simülasyon yetenekleriyle bilinir, bu da büyük ve karmaşık devrelerin bile etkili bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.
- Programın grafik ara yüzü, kullanıcıların devrelerini kolayca tasarlamalarına, düzenlemelerine ve simüle etmelerine yardımcı olur. Elemanlar sürükle-bırak yöntemiyle yerleştirilebilir ve devre bağlantıları basitçe oluşturulabilir.
- LTspice, simülasyon sonuçlarını grafiksel olarak gösterir ve bu sonuçlar üzerinde analiz yapılmasına imkân tanır. Gerilim, akım ve güç değerlerini ölçebilir.

Şekil 3.9’da LtSpice simülasyon programı ile bu tez için oluşturulan devre modeli gösterilmiştir. Bu devre modeli üzerinde yarı iletkenler ve pasif komponentler anahtarlar frekansına göre değiştirilerek 100ms’lik transient analizi gerçekleştirilmiştir. Devre kararlı çalışma durumuna geldikten sonra 5ms’lik süre boyunca ölçümler alınmış ve analiz edilmiştir.

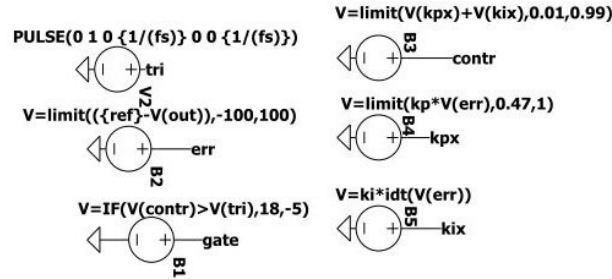


```
.tran 0 {ST} 25m uic
.param fs= 150k
.param mt=if(fs>=60k,3m,5m)
.param ST=if(fs>=60k,30m,100m)
.lib "C:\Users\enel\AppData\Local\LTspice\lib\Yeni klasör\ONSEMI_SiCMOSFET_650_Itspice.txt"
.lib "C:\Users\enel\AppData\Local\LTspice\lib\Yeni klasör\ONSEMI_FRD_600_HYPERFAST_REV1P2_Itspice.txt"
.options cshunt = 10e-13

.param ref=200
.param kp=1/200
.param ki= if (fs>=30k,0.5,0.2)

.param L=53.76*0.5/fs C=4.7*0.5/fs
.param R=sqrt(L/1e-3)*200e-3

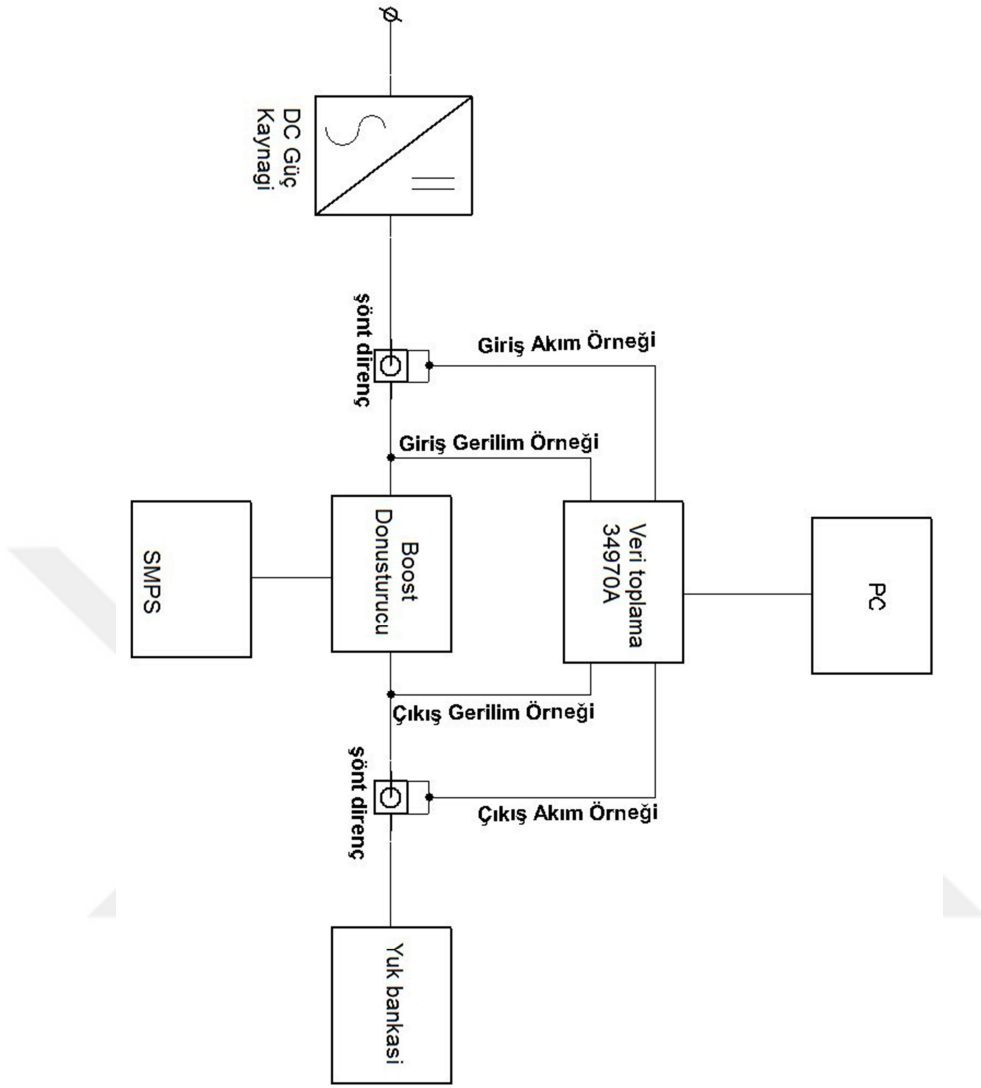
.meas tran Vout avg V(out) trig at={mt}
.meas tran Pq avg V(N003)*Ix(U1:D) trig at={mt}
.meas tran Pdt avg V(N003)*Ix(U2:A)+V(out)*Ix(U2:C) trig at={mt}
.meas tran Pin avg V(N001)*I(V1) trig at={mt}
.meas tran Pout avg V(out)*I(Rload) trig at={mt}
.meas tran Vr avg V(N001,N002) trig at={mt}
.meas tran Iin avg I(R3) trig at={mt}
```



Şekil 3.9 LtSpice devre modellemesi.

3.4. Deney Düzenegi

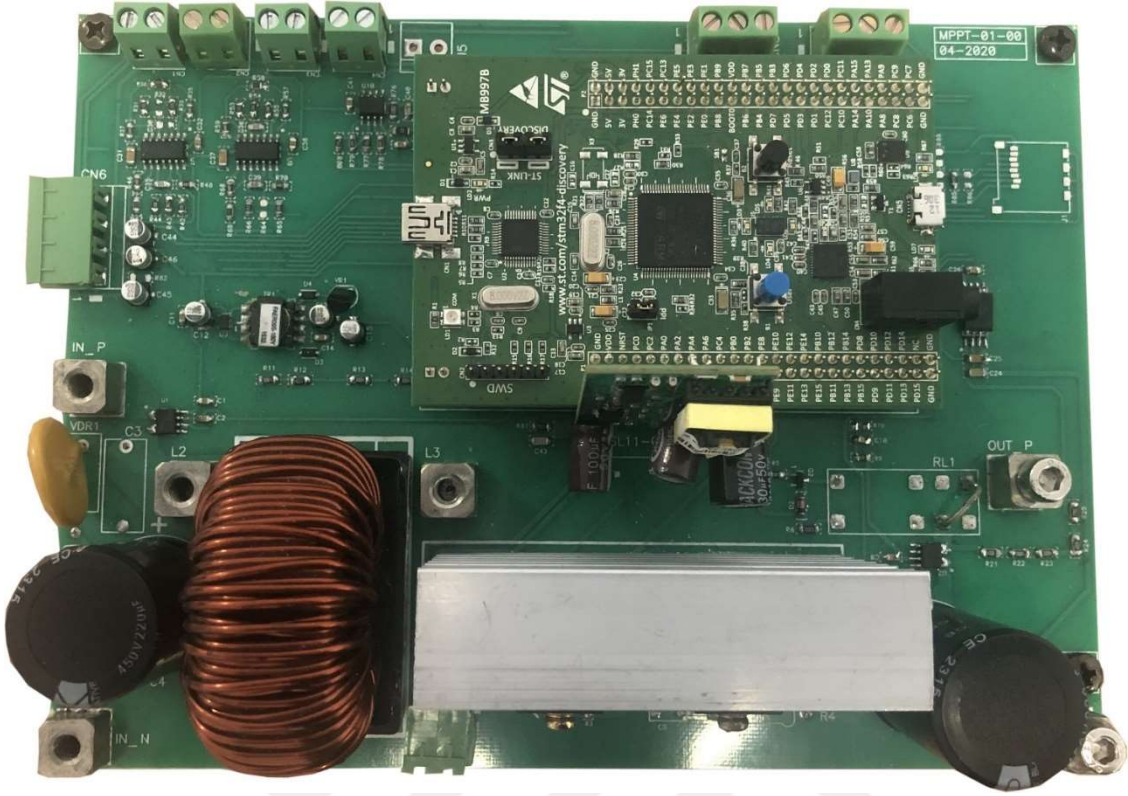
Tez çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanan deney düzeneği bir boost dönüştürücü, güç kaynağı, yük bankası, yardımcı besleme ünitesi (SMPS olarak belirtilen kutu), veri toplama birimi ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 3.10). Aşağıda deney düzeneğini oluşturan söz konusu bileşenler detaylı olarak ayrı başlıklar altında incelenecektir.



Şekil 3.10 Deney düzeneği şeması.

3.5. DC/DC Dönüştürücü

Tez kapsamında ihtiyaç duyulan deneyleri gerçekleştirebilmek için 1kW gücünde, STM32 Discovery geliştirme kartı ile kontrol edilebilen DC/DC yükselten tip bir dönüştürücü tasarlanmış ve imal edilmiştir (Resim 3.1). Tasarlanan DC/DC dönüştürücü kartı üzerinde; bobin, filtre kapasitörleri, anahtarlama elemanları ve sürücü devresi, kontrol kartı ve muhtelif sinyal koşullandırma devreleri yer almaktadır.



Resim 3.1 DC/DC yükselten dönüştürücü ve kontrol birimi.

3.5.1. IGBT ve MOSFET Sürücü Devresi

IGBT ve MOSFET sürücü devreleri, kontrollü anahtarlama elemanını kontrol etmek için tasarlanmış devrelerdir. Bu devreler güç elektroniğinde IGBT ve MOSFET'lerin anahtarlama işlemlerini hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirmek için kullanılır. Sürme işlemi anahtarlama elemanının kapısına (Gate ucuna) uygulanan gerilim sinyalleri aracılığıyla yapılır. IGBT ve MOSFET sürücü devreleri genellikle kontrol devresi ile güç devresi arasında elektriksel izolasyon da sağlar. Bu izolasyon, kontrol devresindeki hassas mikrodenetleyici pinlerini yüksek gerilim seviyelerinden korunmak ve güvenilir bir kontrol sağlamak için gereklidir. Optoizolatörler veya transformatörler izolasyon sağlamak için sürücü devrelerinde yaygın olarak kullanılır.

Bu devreler, düşük güçlü kontrol sinyallerini, IGBT veya MOSFET'in etkin bir şekilde anahtarlabilmesi için gerekli olan daha yüksek güçlü sinyallere dönüştürür. IGBT ve MOSFET sürücü devreleri, aşırı akım, aşırı gerilim ve aşırı ısı gibi durumlara karşı koruma sağlayacak özelliklerle donatılmıştır. Bu özellikler, sürücü devrelerinin ve

anahtarlama elemanlarının güvenli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu sürücü devreleri, yüksek frekansta çalışarak anahtarlama kayıplarını minimize eder ve böylece sistemin genel verimliliğini artırır. Aynı zamanda, güvenilirlik açısından, IGBT ve MOSFET'in hızlı anahtarlama yapabilmesini ve termal stresin minimuma indirilmesini sağlarlar. Bu ortak özellikler, IGBT ve MOSFET sürücü devrelerini güç elektroniği sistemlerinde kritik bileşenler haline getirir. Bu devreler, anahtarlama elemanlarının performansını optimize ederek, güç dönüşüm sistemlerinin daha verimli ve güvenilir olmasına katkıda bulunur.

Sürücü devreleri, kontrol ünitesinden aldıkları PWM sinyallerini uygun seviyeye getirdikten sonra, bu sinyalleri kontrollü anahtarlara uygulayarak anahtarların açılıp kapanmasını sağlar. Sürücü devrelerinin giriş sinyali genellikle mikrodenetleyici ünitesinden gelen düşük gerilimli (3.3V veya 5V) sinyallerdir. Çıkış gerilimleri ise kullanılan yarıiletken anahtar türüne göre değişmekle birlikte, genellikle -5V ve +15V seviyelerindedir. -5V, anahtarı kapalı konumda tutmak için kullanılırken, +15V anahtarı iletme geçirmek için kullanılır. Bu tez kapsamında kullanılan sürücü devresi görüntüsü Resim 3.2'te gösterilmiştir.



Resim 3.2 IGBT ve MOSFET sürücü.

3.5.2. Kontrol Sistemi

DC/DC dönüştürücülerde kontrol sistemleri, dönüştürücünün verimli ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için büyük önem taşımaktadır. Bu sistemler, çıkış gerilimini, akımını veya her ikisini de düzenleyerek istenilen seviyede tutar. DC/DC dönüştürücülerde kullanılan başlıca kontrol yöntemleri arasında geri besleme kontrolü,

PWM tabanlı kontrol yer alır. Geri besleme kontrolü, çıkış gerilimini sürekli izler ve istenilen değerde tutmak için giriş gerilimi, yük değişiklikleri veya diğer dış etkenlerden kaynaklanan sapmaları düzelterek şekilde düzenlemeler yapar. En yaygın kullanılan geri besleme teknikleri arasında gerilim modu kontrolü ve akım modu kontrolü bulunur.

- Gerilim Modu Kontrolü: Çıkış gerilimini referans bir gerilimle karşılaştırarak hata sinyali oluşturulur ve bu sinyal, PWM jeneratörüne giriş olarak verilir, PWM jeneratöründen elde edilen sinyaller ile anahtarlama elemanların çalışma döngüsünü kontrol edilir.
- Akım Modu Kontrolü: Hem çıkış gerilimini hem de bobin akımını izleyerek daha hızlı tepki verir ve daha yüksek kararlılık sağlar.

Kontrol sistemlerinde kullanılan mikrodnetleyiciler, DC/DC dönüştürücülerde kontrol sistemlerinin uygulanmasında önemli bir rol oynar. STM32F4 gibi mikrodnetleyicisi, PWM sinyalleri üretmek, geri besleme döngülerini izlemek ve dönüştürücü performansını optimize etmek için kullanılır. Bu tür mikrodnetleyicisi, yüksek hızda işlem yapabilme yetenekleri sayesinde düşük gecikme süreleri ve yüksek doğruluk sunarlar.

Bu tez çalışmasında PWM darbeleri üretmek için ST firmasının STM32F4 Discovery kartı kullanılmıştır. STM32F4 Discovery, üstünde ARM Cortex-M4 çekirdeğine sahip 32-bit STM32F407VGT6 mikrodnetleyicisi bulunan bir geliştirme kartıdır. Bu geliştirme kartı, özellikle mikrodnetleyicisi eğitimi, prototip geliştirme ve gömülü sistem tasarımı için oldukça kullanışlıdır. Kartın öne çıkan bazı özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Mikrodnetleyicisi: STM32F407VG; 168 MHz hızında çalışan bir ARM Cortex-M4 çekirdeği bulunur. 1 MB Flash bellek ve 192 KB RAM sunar.
- G/Ç Pinleri: 82 adet genel amaçlı giriş/çıkış (GPIO) pinine sahiptir ve bu pinler PWM, I2C, SPI, USART, CAN, ADC gibi farklı çevresel birimlere bağlanabilir.

3.5.3. Bobin, Filtre Kapasitörleri ve Anahtarlama Elemanları

Dönüştürücünün istenilen güç ve anahtarlama frekans aralığında çalışabilmesi için 1mH endüktanslı bir toroid nüveli bobin kullanılmıştır. Çıkış kapasitörü olarak 220 μ F 450Vdc alüminyum elektrolitik kapasitör belirlenmiştir. Anahtarlama elemanı olarak 40A 650V Si igbt ve SiC mosfet yarı iletken anahtar, diyot içinde 30A 600V Si diyot ve 30A 650V SiC diyot kullanılmıştır.

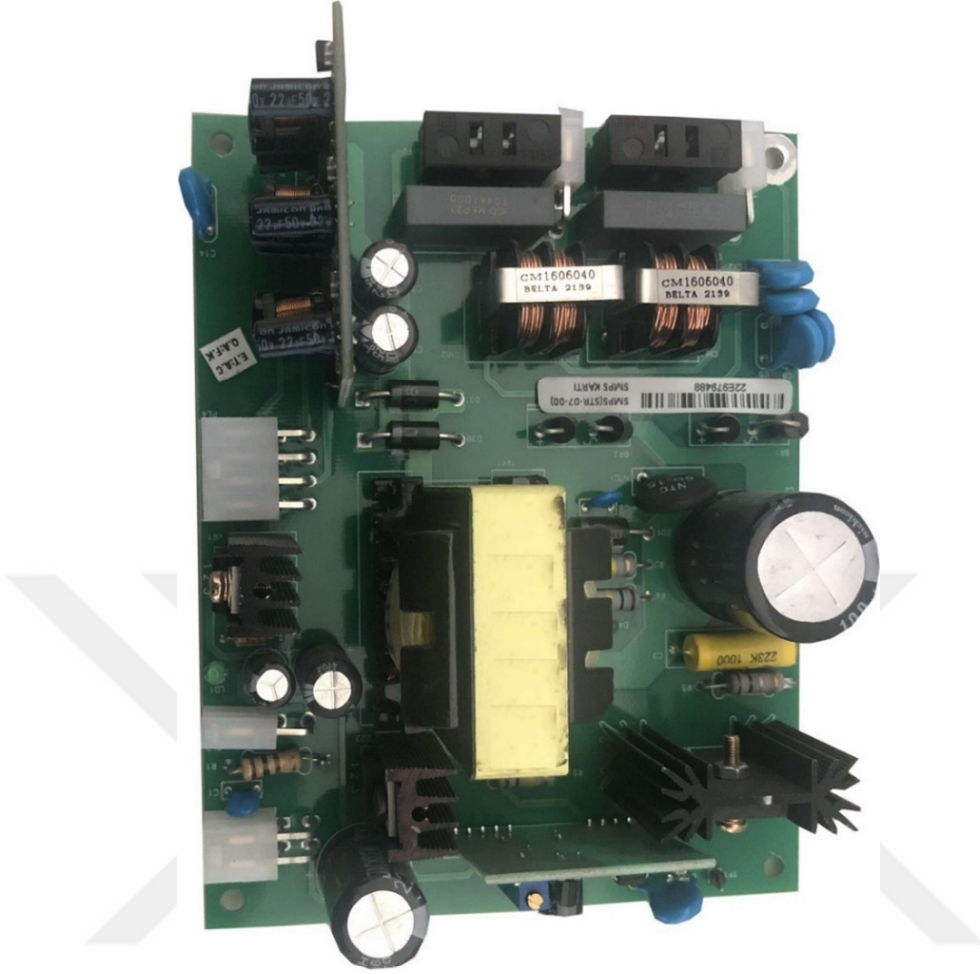
3.5.4. Muhtelif Sinyal Koşullandırma Devreleri

Sinyal koşullandırma devreleri akım, gerilim, ısıtım ve sıcaklık ölçümlerinde kullanılan sensör çıkışlarını mikrodenetleyici girişlerine uygun seviyelere dönüştürmek için kart üzerine eklenmiştir. Tasarlanan kart üzerinde dönüştürücü giriş ve çıkış akım ve gerilim sensörleri, PT100 sensörleri ve ısıtım ölçer için toplam dokuz sinyal koşullandırma devresi bulunmakla birlikte bu çalışmada bu devreler kullanılmadığı için detaylarına değinilmeyecektir.

3.6. Giriş Beslemesi, Yardımcı Besleme ve Çıkış Yüğü

Dönüştürücü girişı 5kW gücünde, çıkış gerilimi 50-130V aralığında, çıkış akımı 10-50A arasında ayarlanabilen akım sınırlama özelliğı olan bir güç kaynağıyla beslenmiştir. Dönüştürücü çıkışı ise değeri 43 Ω olan 1.5W gücünde bir direnç ile yüklenmiştir.

Yardımcı besleme ünitesi bu çalışmaya özel olarak tasarlanmıştır. Dönüştürücü kartı üzerinde bulunan devrelerin ihtiyaç duyduğu gücü sağlamak üzere anahtarlama (SMPS) teknolojiye sahip olarak üretilmiştir (Resim 3.3). Güç kaynağının girişı 110-270Vac ve çıkışları +24Vdc, $\pm$ 12Vdc ve +5Vdc'dir. +24Vdc devrede kullanılan kontrollü yarı iletken anahtarı sürmede kullanılan sürücü devresinin beslemesinde kullanılmıştır. $\pm$ 12Vdc ile devrede ölçme ve sinyal koşullandırma devrelerinde kullanılan OPAMP entegrelerinin beslemesi gerçekleştirilmiştir. +5Vdc ile devrede giriş ve çıkış gerilim ölçümlerinde kullanılan izoleli hassas gerilim ölçme amplifikatörü AMC1311 beslenmiştir.



Resim 3.3 Anahtarlamalı güç kaynağı.

3.7. Veri Toplama Birimi

Veri toplama sistemleri (Data Acquisition Systems, DAQ), fiziksel olayları (örneğin, sıcaklık, basınç, hız) ölçmek ve bu ölçümleri sayısal verilere dönüştürmek için kullanılan elektronik sistemlerdir. Bu sistemler, sensörler aracılığıyla topladıkları analog sinyalleri dijital forma çevirir ve analiz için bir bilgisayara veya kontrol cihazına iletir. DAQ sistemleri, endüstriyel otomasyon, araştırma laboratuvarları, otomotiv testleri, medikal cihazlar gibi pek çok alanda kullanılır. Bu sistemler sayesinde, fiziksel dünya ile dijital sistemler arasında etkili bir köprü kurulmuş olur, böylece veriler analiz edilebilir ve süreçler optimize edilebilir. Bu tez çalışmasında tasarlanan Boost dönüştürücünün giriş, çıkış gerilim ve akım bilgilerini ölçebilmek için Resim 3.4’de gösterilen Agilent firmasının 34970A kodlu veri toplama cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.4 34970A veri toplama cihazı.

Agilent 34970A, esnek bir veri toplama ve anahtarlama cihazıdır. Bu cihaz, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır ve çeşitli sinyalleri ölçmek için çok yönlü bir çözüm sunmaktadır. 34970A, 6,5 basamaklı (22-bit) bir ölçüm çözünürlüğüne sahip bir dijital multimetre (DMM) ile entegre edilmiştir ve 20'ye kadar farklı ölçüm türünü desteklemektedir.

- Agilent 34970A, üç adet çoklayıcı veya kontrol modülü takılabilen modüler bir platforma sahiptir. Bu sayede, cihazın özellikleri ve yetenekleri, kullanıcı gereksinimlerine göre genişletilebilir.
- Cihaz, en fazla 60 ölçüm kanalını (veya 120'e kadar iki telli direnç ölçüm kanalını) destekleyebilir.
- 34970A, sıcaklık, gerilim, akım, direnç, frekans ve periyot gibi parametreleri ölçebilir.
- Bu cihaz, ölçüm verilerini kaydetmek ve analiz etmek için yerleşik bir veri kaydedici olarak kullanılabilir.
- GPIB, RS-232 veya USB ara yüzleri aracılığıyla bilgisayara bağlanarak, uzaktan kontrol edilebilir ve veri transferi yapılabilir.

Bu çalışmada, dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimleri veri toplama cihazına doğrudan bağlanmıştır. Giriş/çıkış akım değerlerini ölçmek amacıyla da Resim 3.5'te gösterilen 50A 60mV şönt direnç kullanılmıştır. Şönt dirençler, doğrusal bir şekilde akımı ölçmektedirler ve sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmezler. Bundan dolayı, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Ancak, şönt dirençlerin düşük empedansları nedeniyle ölçülen sinyalin küçük gerilim değerlerinde olması, hassas ölçüm cihazları gerektirebilir. Bunun yanı sıra, şönt direncin devreye eklediği ek direnç, sistemin verimliliğini çok az da olsa düşürebilir. Şönt dirençlerin avantajları arasında basitlik, düşük maliyet ve geniş akım aralıklarında güvenilir ölçüm yapabilme kapasitesi bulunmaktadır. Dezavantajları ise, üzerlerindeki küçük gerilimi düşümleri ölçüldüğü için hassas ölçüm cihazları gerektirmesi ve direnç nedeniyle sistemde küçük de olsa bir güç kaybına neden olmasıdır.



Resim 3.5 50A 60mV Şönt direnç.

4. BULGULAR

LtSpice programı ile SiC yarı iletkenlerin Boost dönüştürücü üzerindeki etkileri incelemek için öncelikli olarak model doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Model doğrulama işleminden sonra simülasyon programı ile çeşitli çalışma koşullarında verim, maliyet ve boyut için analizler yapılmıştır.

4.1. Veri Toplama ve Analiz

Resim 3.1’de gösterilen Boost dönüştürücü 100Vdc giriş gerilimi, 200Vdc çıkış gerilimi ve 43Ω yük direnci ile yüklenilmiştir. Devrenin çalışması kararlı hale geldikten sonra veri toplama cihazı ile devre giriş/çıkış akımları, giriş/çıkış gerilimleri 10 saniye aralıkla ölçülmüştür. Alınan değerlerin ortalaması alınarak verim değerleri hesaplanmıştır. Ölçümler esnasında devre üzerinde bağlı bulunan pasif komponent değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Boost dönüştürücüde kullanılan pasif komponentler ve değerleri

L(μ H)	Lr(m Ω)	C(μ F)	Cr (m Ω)
1000	200	220	10

Çizelge 4.1’de verilen pasif komponent değerleri sabit kalmak koşuluyla yarı iletken anahtarlar değiştirilerek devrenin verimi 10-60kHz anahtarlama frekansı aralığında 10kHz’lik artışlarla ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 Boost dönüştürücüde deneysel verim değerleri

Anahtarlama Frekansı Fsw(kHz)	SiCQ SiCD Verim(%) (NTHL045N065SC 1 ve FFSH3065B)	SiCQ SiD Verim(%) (NTHL045N065SC1 ve RHRG3060)	SiQ SiCD Verim(%) (FGHL40T65MQDT ve RHRG3060)	SiQ SiD Verim(%) (FGHL40T65MQDT ve RHRG3060)
10	97,53	97,28	96,92	96,8
20	97,56	97,4	97,01	96,79
30	97,56	97,36	96,82	96,57
40	97,48	97,22	96,63	96,33
50	97,46	97,07	96,29	95,83
60	97,45	97,02	95,96	95,64

Çizelge 4.2’te belirtilen SiCQ terimi SiC kontrollü anahtarlama elemanını Mosfet’i, SiCD, SiC kontrolsüz anahtarlama elemanını diyotu, SiQ, Si kontrollü anahtarlama elemanını IGBT’yi ve SiD, Si kontrolsüz anahtarlama elemanı diyotu ifade etmektedir. Simülasyon doğrulama işlemi için Çizelge3.5 ‘de verilen yarı iletkenler için üretici firmanın hazırladığı LtSpice modelleri ve Çizelge 4.1’de verilen pasif komponent değerleri ile Şekil 3.9’ta gösterilen devre modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model devrede anahtarlama frekansı 10-60kHz aralığında 10kHz’lik artışlar ile değiştirilerek her bir anahtarlama frekansı için devre verimi ölçülmüştür. Deneysel ve simülasyon ile yapılan verim ölçüm sonuçlarının kabul edilebilir ölçüler içerisinde örtüştüğü görülmüştür. Çizelge 4.3’te simülasyon sonucu elde edilen verim değerleri ve deney düzeneği üzerinde yapılan verim ölçümlerinin farkı gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Dönüştürücüde simülasyon sonucu verim değerleri

Anahtarlama Frekansı Fsw(kHz)	SiQ ve SiD (FGHL40T65MQDT ve RHRG3060)		SiCQ ve SiCD (NTHL045N065SC1 ve FFSH3065B)		SiCQ ve SiD (NTHL045N065SC1 ve RHRG3060)		SiQ ve SiCD (FGHL40T65MQDT ve RHRG3060)	
	Similasyon Verim	Fark	Similasyon Verim	Fark	Similasyon Verim	Fark	Similasyon Verim	Fark
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
10	96,63	-0,17	97,10	-0,43	97,05	-0,23	96,71	-0,21
20	96,45	-0,34	97,20	-0,36	97,08	-0,32	96,50	-0,51
30	96,19	-0,38	96,93	-0,63	97,04	-0,32	96,31	-0,51
40	95,96	-0,37	96,94	-0,54	96,95	-0,27	96,05	-0,58
50	95,76	-0,07	96,96	-0,50	96,90	-0,17	95,85	-0,44
60	95,51	-0,13	96,88	-0,57	96,76	-0,26	95,62	-0,34

4.2. Karşılaştırma Kriterleri

Karşılaştırma kriterleri olarak verim, maliyet ve soğutucu hacmi değerleri alınmıştır.

Verimlilik: çıkış gücünün giriş gücüne yüzdesel oranı olarak hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} 100 \quad (4.1)$$

Burada η verim değeri

P_o Çıkış gücü (W)

P_i Giriş gücü (W)

V_o Çıkış gerilimi (V)

V_i Giriş gerilimi (V)

I_o Çıkış akımı (A)

I_i Giriş akımı (A) ifade etmektedir.

Maliyet Analizi: her bir anahtarlama frekansı için kullanılan yarı iletken malzemelerin ve pasif komponentlerin maliyeti olarak hesaplanmıştır.

Boyut Analizi: 40°C ortam sıcaklığında yarı iletken anahtarların jonksiyon sıcaklığını 125°C tutacak soğutucu hacmi esas alınmıştır. Soğutucu hacim hesabında denklem 4.2'dan yararlanılmıştır.

$$V_h = \frac{Q R_v}{\Delta T} \quad (4.2)$$

Burada V_h Soğutucu hacmi (cm³)

R_v Hacimcel termal direnç

ΔT Soğutucu ve ortam arasındaki sıcaklık farkını (°C) ifade etmektedir.

R_v değeri için Çizelge 4.4'deki katsayılar kullanılabilir. (İnt.Kyn.4)

Çizelge 4.4 Hacimsel termal direnç değerleri

Hava Akışı	Özellikler	Hacimsel Termal direnç
Doğal soğutma	Esinti yok	500-800
1 m/s	Hafif esinti	150-250
2.5 m/s	Ortalama esinti	80-150
5 m/s	Kuvvetli esinti	50-80

ΔT değeri hesaplamasında denklem 4.3'den yararlanılmıştır.

$$\Delta T = T_j - T_{amb} - R_{thjt} * Q \quad (4.3)$$

Burada R_{thjt} yarı iletkenlerin termal dirençlerini ve izolasyon için kullanılan termal yalıtkanların termal dirençlerinin toplamını ifade etmektedir. Kullanılan termal yalıtkanın termal direnci $0,4^\circ\text{C/W}$ 'dır. Kullanılan yarı iletken malzemelerin termal dirençleri Çizelge 3.5' de verilmiştir.

Simülasyon ve ölçüm değerleri birbirini karşıladığı görüldükten sonra 10-200kHz anahtarlama frekansı aralığında Si ve SiC yarı iletken malzemeler için 10kHz'lik anahtarlama frekansı artışları ile simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda giriş akım dalgalanması giriş ortalama akımının %20 'sinde sabit kalacak şekilde (L) giriş bobini değeri her bir anahtarla frekansı için değiştirilmiştir. Bobin değeri değiştikçe bobin sargı direnci değeri (L_r) de değişmektedir. Çizelge 4.5'de verilen L_r değeri L bobininin değeri değiştikçe sarım sayısının da değişeceğinden dolayı aşağıdaki Denklem 4.4'e göre her anahtarlama frekansı için değiştirilmiştir. Referans olarak deneysel düzenekte kullanılan 1mH toroid bobinin L_r değeri olan $200\text{m}\Omega$ alınmıştır ve bu değere göre yeniden ölçeklendirilmiştir.

$$L_r = \sqrt{\frac{L}{1.10^{-3}}} * 200.10^{-3} \quad (4.4)$$

Burada, L anahtarlama frekansına göre kullanılacak bobin değerini ve L_r kullanılan bobinin sargı direncini ifade etmektedir.

Çıkış kapasitör değeri, çıkış gerilim dalgalanması çıkış geriliminin %0,47'de sabit kalacak şekilde denklem 3.15'e göre her bir anahtarlama frekansı için değiştirilmiştir.

Alüminyum elektrolitik kapasitörlerin iç direnç(ESR) değerleri frekans yükseldikçe değiştiği için çıkış kapasitörü olarak metalize polipropilen film kapasitör kullanılmıştır. Bu tip kapasitörlerin iç dirençleri çok düşük ve frekans ile değişimi az olduğu için iç direnç değeri $10\text{m}\Omega$ değerinde sabit kabul edilmiştir.

Hesaplanan değerlere göre internetten üzerinden bobin ve kapasitör değerleri için maliyet araştırılması yapılmıştır. Çizelge 4.5’de hesaplanan bobin değerleri, bobin sargı dirençleri değeri, çıkış kapasitör değerleri ve maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 Anahtarlama frekansına göre bobin, sargı direnci, çıkış kapasite değeri ve yaklaşık maliyetleri

Fsw (kHz)	L			C	
	(μH)	L_r (Ω)	L maliyet(\$)	(μF)	C maliyet(\$)
10	2688	0,3279	48	244	40,0
20	1344	0,2319	41	122	21,9
30	896	0,1893	32,8	81	18,1
40	672	0,1640	23,7	61	12,5
50	537,6	0,1466	16	49	10,1
60	448	0,1339	14	41	9,1
80	336	0,1159	10	31	7,6
100	268,8	0,1037	6,15	24	7,2
150	179,2	0,0847	5,33	16	4,7
200	134,4	0,0733	4,1	12	3,9

Çizelge 4.5’de verilen anahtarlama frekanslarına ve pasif komponent değerlerine göre LTSpice programı ile Si ve SiC yarı iletken malzeme modelleri kullanılarak devre simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan komponentlere göre maliyetler hesaplanmıştır. Simülasyonlar sonucu elde edilen verim değerleri ve toplam maliyet hesapları Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Boost dönüştürücü anahtarlama frekansına göre verim değerleri ve maliyetleri

Fsw (kHz)	SiQ_SiD		SiQ_SiCD		SiCQ_SiD		SiCQ_SiCD	
	Verim	Toplam maliyet	Verim	Toplam maliyet	Verim	Toplam maliyet	Verim	Toplam maliyet
	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)
10	95,35	91,49	95,42	93,34	95,89	96,33	95,96	98,18
20	96,10	66,41	96,20	68,26	96,80	71,25	96,94	73,10
30	96,28	54,46	96,42	56,31	97,15	59,30	97,22	61,15
40	96,31	39,74	96,41	41,59	97,32	44,58	97,44	46,43
50	96,24	29,64	96,37	31,49	97,41	34,48	97,61	36,33
60	96,11	26,60	96,27	28,45	97,43	31,44	97,59	33,29
80	95,83	21,10	96,02	22,95	97,48	25,94	97,53	27,79
100	95,54	16,93	95,71	18,78	97,45	21,77	97,72	23,62
150	94,63	13,57	94,90	15,42	97,26	18,41	97,51	20,26
200	93,70	11,51	94,04	13,36	96,96	16,35	97,30	18,20

Çizelge 4.6 ‘da görüldüğü gibi Silisyum tabanlı yarı iletkenler kullanılarak yapılan dönüştürücülerde en yüksek verim 40kHz anahtarlama frekansında elde edilmiştir. Silisyum karbür tabanlı yarı iletkenler kullanılarak yapılan dönüştürücülerde en yüksek verimin ise 100kHz anahtarlama frekansında olduğu görülmüştür.

Soğutucu boyut hesabında yarı iletken kayıpları etkili olmaktadır. Yarı iletken kayıpları azaldıkça soğutucu ihtiyacı azalmaktadır. Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 yardımı ile yarı iletken malzemelerin jonksiyon sıcaklığını 40°C ortam sıcaklığında 125°C ‘de tutacak soğutucu hacimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan soğutucu hacimleri ve yarı iletken kayıpları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Boost dönüştürücü anahtarlama frekansına göre kayıp ve soğutucu hacimleri

Fsw (kHz)	SiQ_SiD		SiQ_SiCD		SiCQ_SiD		SiCQ_SiCD	
	Yarı iletken kayıp(W)	Soğutucu Hacmi (cm ³)	Yarı iletken kayıp(W)	Soğutucu Hacmi (cm ³)	Yarı iletken kayıp(W)	Soğutucu Hacmi (cm ³)	Yarı iletken kayıp(W)	Soğutucu Hacmi (cm ³)
10	13,41	44,48	12,64	40,80	8,20	26,77	7,43	23,24
20	15,57	51,74	14,68	48,75	8,85	28,91	7,73	24,23
30	17,80	60,94	16,82	57,52	9,54	31,17	8,82	27,70
40	19,99	70,55	18,87	66,45	10,25	33,45	9,12	28,52
50	22,23	81,00	21,02	76,40	10,95	35,76	9,88	30,94
60	24,43	91,90	23,09	86,63	11,65	38,03	10,28	32,15
80	28,83	116,07	27,16	108,72	13,07	42,68	11,72	36,98
100	33,23	143,83	31,28	134,34	14,51	47,38	12,63	40,36
150	44,04	233,72	41,42	216,71	18,13	59,20	15,61	51,70
200	54,68	373,15	51,37	342,03	21,78	71,15	18,60	63,93

Çizelge 4.6’de görüldüğü gibi bu uygulama için silisyum tabanlı yarı iletkenler kullanılarak elde edilen en yüksek verim değeri %96,31’dir. Bu değere karşılık gelen soğutucu hacmi değeri Çizelge 4.7’te görüldüğü gibi 70,55cm³’dür. Si yarı iletkenler silisyum karbür yarı iletkenler ile değiştirildiğinde en yüksek verim değeri %97,72’dir ve bu değer için soğutucu hacmi 40,36cm³’tür.

4.3. SiC Yarı İletkenlerin Verime Etkisi

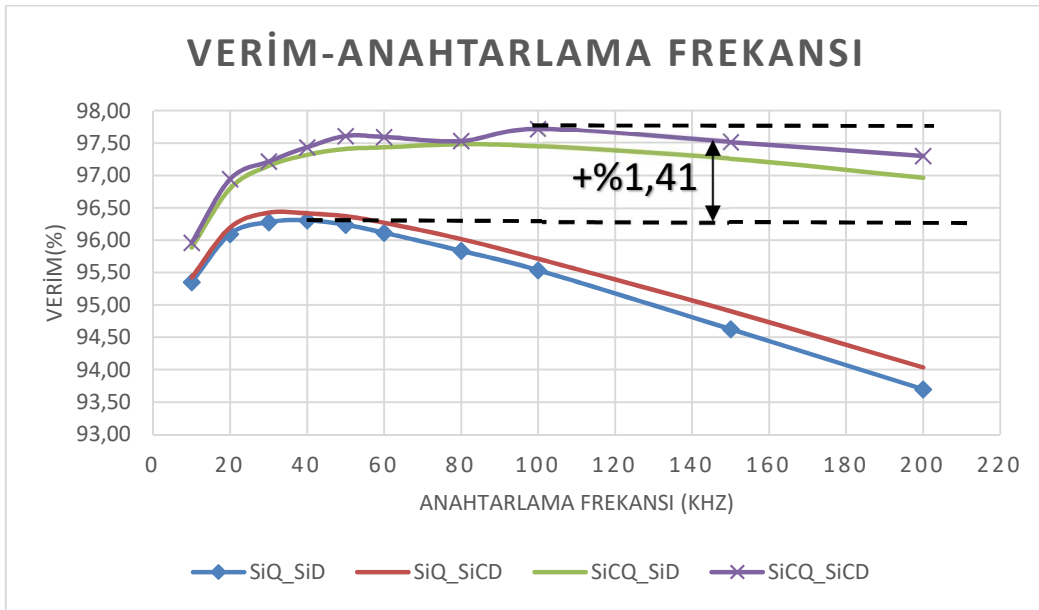
Verim, bir devrenin ne kadar etkili enerji dönüştürebildiğini gösterir. DC-DC dönüştürücülerde verim, cihazın giriş enerjisinin ne kadarının çıkışta kullanılabilir enerjiye dönüştüğünü ifade eden önemli bir performans ölçüsüdür. Verim, hem güç kayıplarını azaltmak hem de enerji maliyetlerini düşürmek açısından kritik bir rol oynar. Yüksek verim, dönüştürücünün daha az ısınmasına, dolayısıyla daha az soğutma ihtiyacına ve daha uzun bir ömre sahip olmasına olanak tanır. Taşınabilir ve batarya ile çalışan cihazlarda, yüksek verimli dönüştürücüler bataryanın daha uzun süre dayanmasını sağlar. Güç elektroniği devrelerinde verim ise enerji tasarrufu ve ısıl yönetim açısından kritik bir faktördür. Yüksek verimli devreler, daha az enerji kaybı ile çalışır ve bu da hem maliyet tasarrufu sağlar hem de çevresel etkileri azaltır.

Verimin düşük olması, giriş enerjisinin büyük bir kısmının ısı olarak kaybedilmesine neden olur. Bu durum, özellikle yüksek güç uygulamalarında, cihazın genel performansını olumsuz etkiler. Aynı zamanda, düşük verimlilik, enerji israfını artırır ve bu da hem çevresel hem de ekonomik açıdan olumsuz sonuçlara yol açar. Verimlilik, tasarımın kalitesi ve kullanılan bileşenlerin seçimi ile doğrudan ilişkilidir; bu nedenle, yüksek verim elde edebilmek için ileri düzey malzeme bilimi ve mühendislik teknikleri kullanılır.

Si yarı iletkenlerin SiC yarı iletkenlerle değiştirilmesi sonucunda devre veriminde %1,41'lik bir artış sağlanmıştır. Bu verim artışı, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.1'de, anahtarlama frekansına göre verim değişimleri gösterilmektedir. Si yarı iletkenler kullanarak 40kHz anahtarlama frekansında %96,31 verim değeri elde edilirken SiC yarı iletkenler ile 100kHz anahtarlama frekansında %97,72 verim elde edilmiştir.

Yarı iletken kayıpları, özellikle güç elektroniği devrelerinde, enerji dönüşümü sırasında meydana gelen istenmeyen enerji kayıplarıdır. Bu kayıplar, çoğunlukla anahtarlama kayıpları ve iletim kayıpları olarak iki ana başlıkta toplanabilir.

- Anahtarlama kayıpları, yarı iletken cihazların açılıp kapanması sırasında oluşan enerji kayıplarıdır. Bu kayıplar, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda önemlidir çünkü anahtarlama frekansı arttıkça bu kayıplar da artar.
- İletim kayıpları, yarı iletkenin iletim modunda olduğu sürede meydana gelir. Bu kayıplar, yarı iletken üzerinden geçen akım ve yarı iletkenin iç direnci nedeniyle oluşan enerji kaybıdır. DC kayıplar olarak da ifade edilmektedir.

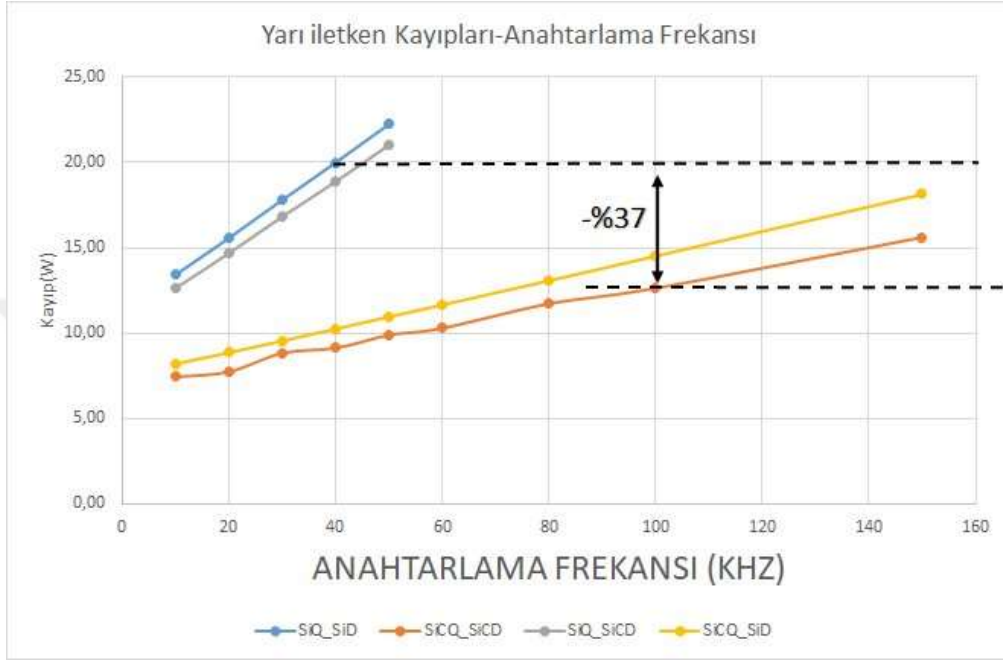


Şekil 4.1 Si ve SiC malzemeler için anahtarlama frekansına göre verim değişimi.

Yarı iletken kayıpları, devre verimini doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek güçlü uygulamalarda yarı iletkenlerin Si'den SiC'ye geçişi, verim üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. SiC yarı iletkenler, daha yüksek anahtarlama frekanslarında daha düşük anahtarlama kayıpları sunmaktadır, bu da özellikle yüksek güçlü uygulamalarda verimin artmasına yol açar. SiC'nin daha yüksek sıcaklık dayanımı ve daha düşük enerji kayıpları, bu tür uygulamalarda enerji verimliliğini artırmaktadır.

Si yarı iletkenler SiC yarı iletkenler ile değiştirildiğinde Çizelge 4.7'te görüldüğü gibi yarı iletken kayıplarında %37'lik bir azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.2'de anahtarlama frekansına göre yarı iletken anahtar kayıplarındaki değişim gösterilmiştir. Si yarı iletkenler ile 40kHz anahtarlama frekansında Si IGBT için toplam kayıp 13,74W ve Si

diyot için toplam kayıp 6,25W ölçülmüştür. SiC yarı iletkenler ile 100kHz anahtarlama frekansında SiC Mosfet kayıplarının 7,37W ve SiC diyot kayıplarının 5,26W olduğu görülmüştür. Si yarı iletkenlerin toplam kaybı 19,99W iken SiC yarı iletkenlerde bu kayıp 12,63W’ta düşmüştür.



Şekil 4.2 Si ve SiC malzemeler için anahtarlama frekansına göre yarı iletken kayıpları değişimi.

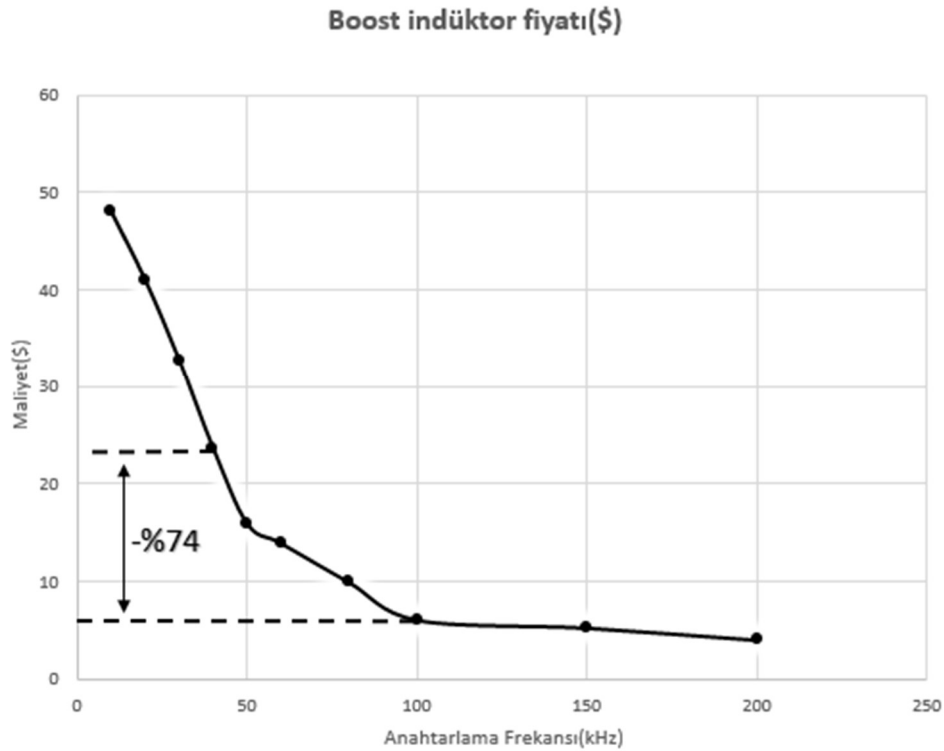
4.4. SiC Yarı İletkenlerin Toplam Maliyete Etkisi

Anahtarlama frekansının artırılması, pasif komponentlerin boyutlarını küçültürken maliyetlerin düşmesini sağlayabilir. Yüksek frekanslarda çalışan devrelerde, bobin ve kapasitör gibi pasif elemanlar daha az enerji depolamak zorunda kaldıkları için daha küçük boyutlarda tasarlanabilirler. Bu durum, malzeme kullanımını ve üretim maliyetlerini azaltabilir. Ayrıca, küçük boyutlu pasif komponentlerin üretimi genellikle daha az hammadde gerektirir ve daha hızlı üretim süreçlerine olanak tanır, bu da maliyetlerin düşmesine katkıda bulunur.

Anahtarlama frekansının artmasıyla birlikte, pasif komponentlerin boyutları küçülürken, maliyetlerin de düşme eğilimi gösterdiği söylenebilir. Bu durum, özellikle yüksek hacimli

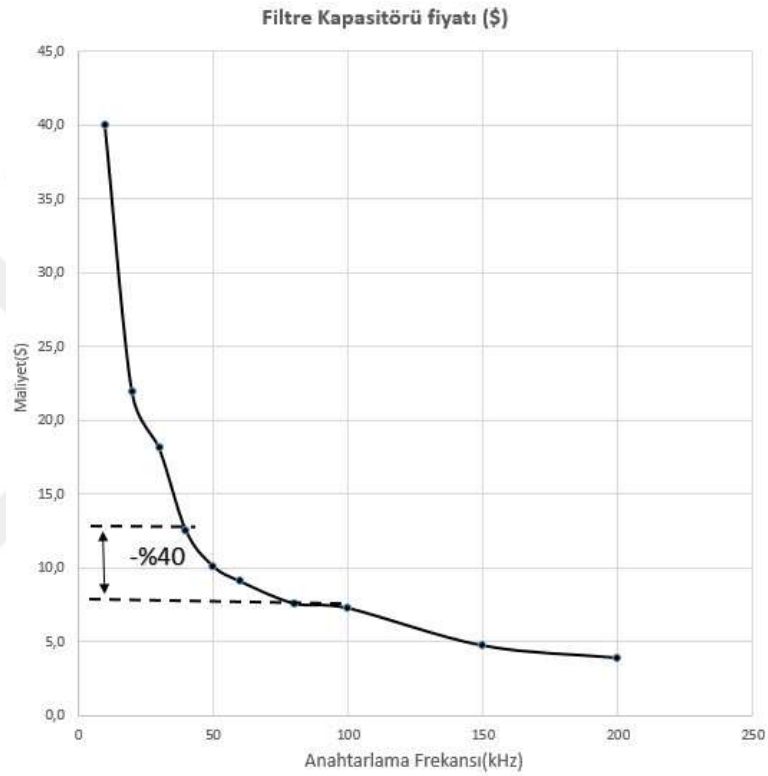
üretimlerde maliyet avantajları sağlamaktadır. SiC yarı iletkenler başlangıçta yüksek maliyetli olsa da, bu malzemelerin kullanılmasıyla devre verimliliğinde sağlanan artışlar, toplam devre maliyetini azaltmaktadır. SiC'nin yüksek anahtarlama hızları ve düşük kayıplar sunması, daha küçük ve daha ucuz pasif komponentler kullanılarak devrelerin daha verimli ve ekonomik olarak uygulanabilmesine olanak tanır. Sonuç olarak, SiC malzemelerin başlangıç fiyatlarının yüksek olmasına rağmen, bu malzemelerin sunduğu verim artışı ve daha düşük boyutlu pasif komponentlerle birlikte toplam devre maliyetinde düşüşler görülmektedir.

Şekil 4.3'te anahtarlama frekansının artışının filtre bobini maliyetine etkisi gösterilmiştir. 40kHz anahtarlama frekansında 670 μ H'lik bobin değerine ihtiyaç duyulurken 100kHz anahtarlama frekansında 270 μ H'lik bobin değeri yeterli gelmektedir. 670 μ H bobinin maliyeti 23,7\$ iken 270 μ H bobinin maliyeti 6,15\$'dir. Filtre bobininin maliyetinde 40kHz anahtarlama frekansından 100kHz anahtarlama frekansına çıkınca %74'lük bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.3 Anahtarlama frekansına göre filtre bobini maliyeti değişimi.

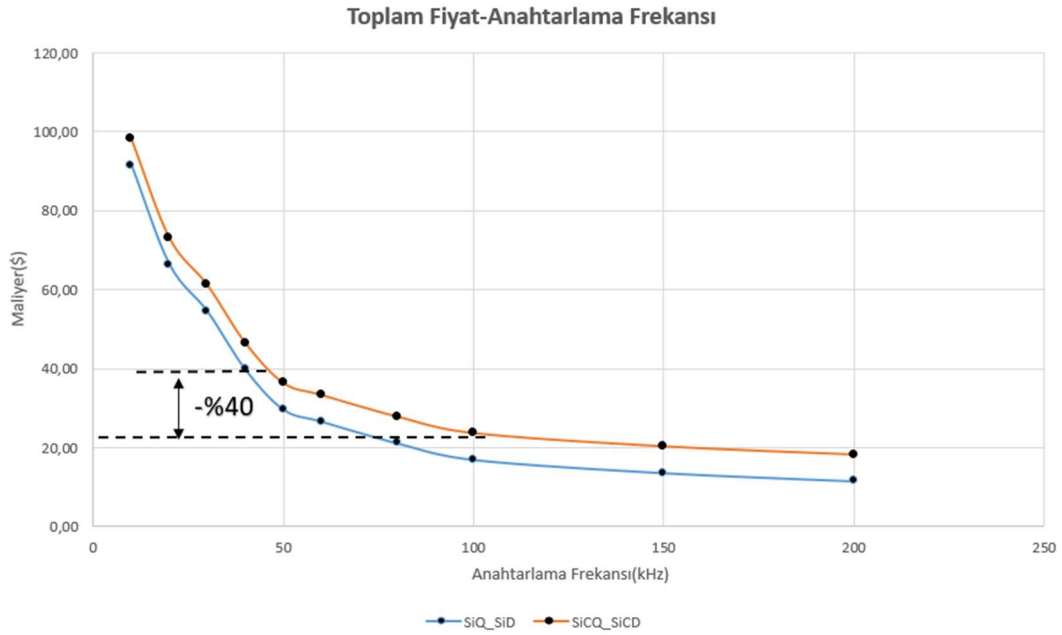
Anahtarlama frekansı filtre kapasitörü maliyeti değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Anahtarlama frekansı artıkça gerekli çıkış filtre kapasitörünün de değeri azalmaktadır. 40kHz anahtarlama frekansında 60 μ F'lık kapasitör değerine ihtiyaç duyulurken 100kHz anahtarlama frekansında 24 μ F'lık kapasitör değeri yeterli gelmektedir. 60 μ F kapasitörün maliyeti 12,5\$ iken 24 μ F kapasitörün maliyeti 7,2\$'dır. Filtre kapasitörü maliyeti 40kHz anahtarlama frekansından 100kHz anahtarlama frekansına çıkınca %40'lık bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.4 Anahtarlama frekansına göre ve çıkış kapasitörü maliyeti değişimi.

Anahtarlama frekansının toplam maliyete etkisi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Si yarı iletkenler kullanılarak gerçekleştirilen dönüştürücünün verimi en yüksek değerine 40kHz anahtarlama frekansında ulaşmıştır. 40kHz anahtarlama frekansında kullanılan yarı iletkenler ve pasif komponent maliyetleri toplamı 39,74\$'dır, bu maliyetin 3,54\$'lık kısmı yarı iletken maliyeti kalan 36,2\$'lık kısmı pasif komponent maliyetleridir. SiC yarı iletkenler kullanılarak gerçekleştirilen dönüştürücünün verimi en yüksek değerine 100kHz anahtarlama frekansında ulaşmıştır. 100kHz anahtarlama frekansında kullanılan yarı iletkenler ve pasif komponent maliyetleri toplamı 23,62\$'dır, bu maliyetin 10,27\$'lık kısmı yarı iletken maliyeti kalan 13,35\$'lık kısmı pasif komponent maliyetleridir. Toplam

dönüştürücü maliyetinde 40kHz anahtarlama frekansından 100kHz anahtarlama frekansına çıkınca %40'lık bir azalma meydana gelmiştir.

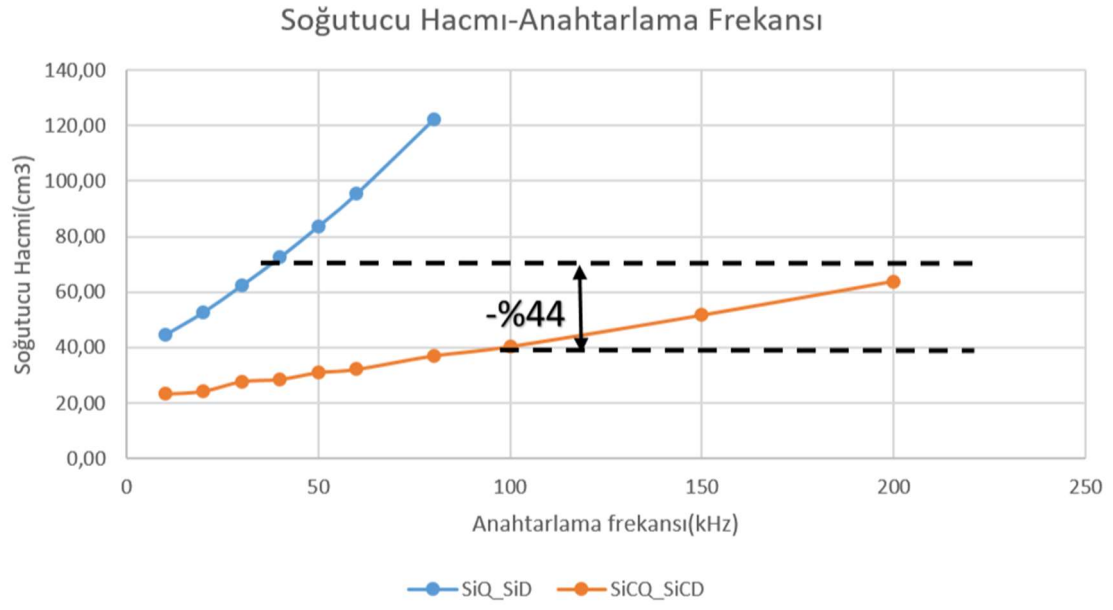


Şekil 4.5 Anahtarlama frekansına göre toplam maliyet değişimi.

4.5. SiC Yarı İletkenlerin Soğutucu Boyutlarına Etkisi

SiC yarı iletkenler, yüksek güç yoğunluğu ve düşük enerji kaybı özellikleri ile Si yarı iletkenlere göre önemli avantajlar sunar. Bu avantajlar, devrelerin daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlar ve aynı zamanda soğutma gereksinimini azaltır. SiC yarı iletkenler, daha düşük enerji kaybına neden oldukları için, üretilen ısı miktarı da azalır. Bu da SiC yarı iletkenler ile kullanılan soğutucuların boyutlarının küçülmesine olanak sağlar. Daha az ısı üretimi, daha küçük ve hafif soğutucularla yeterli soğutma sağlanabilmesi anlamına gelir. Bu durum, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda, sistemin toplam ağırlığını ve maliyetini azaltmaktadır.

Si yarı iletkenler yerine SiC yarı iletkenler kullanıldığında kayıplar azaldığı için soğutma için gerekli soğutucu hacmi de azalmaktadır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi gerekli soğutucu hacminde %44'lük bir azalma sağlanabilmektedir. 40kHz anahtarlama frekansında çalışan Si yarı iletkenlerin toplam kaybı 19,99W ilen 100kHz anahtarlama frekansında çalışan SiC yarı iletkenlerin toplam kaybı 12,63W'tır, kayıplardaki bu azalma soğutma gereksinimlerini de azaltmaktadır.



Şekil 4.6 Anahtarlama frekansına göre soğutucu hacmi değişimi.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu günümüz koşullarında var olan kaynaklar en verimli şekilde kullanılmak zorundadır. Özellikle elektrik enerjisi günümüzde yaşamın her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi ile çalışan cihazların verimli şekilde kullanılabilmesi elektrik enerjisi dönüşüm işlemlerinde kullanılan dönüştürücülerin en verimli şekilde kullanılmasıyla mümkündür. AC/DC, DC/DC, DC/AC ve AC/AC dönüşüm işlemleri endüstri, ev uygulamaları, medikal uygulamalar vb. birçok alanda yapılmaktadır. Günümüzde dönüşüm işlemleri esnasında Si yarı iletken anahtar kullanımı oldukça yaygındır. Fakat Si yarı iletkenler teorik sınır değerlerine oldukça yaklaşmışlardır. Bu teorik sınırlamalar Si yarı iletkenlere alternatif çalışmaların oluşmasına neden olmuştur. Bu kapsamda geniş bant aralıklı (WBG) yarı iletkenler üzerine yapılan araştırmalar oldukça artmıştır. Geniş bant aralıklı yarı iletkenler yüksek elektrik dayanımı, düşük kayıpları, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek frekanslarda çalışabilme yetenekleri ile Si yarı iletkenlerin alternatifi olmuşlardır. WBG yarı iletkenler düşük üretim kapasiteleri nedeniyle Si yarı iletkenlere göre oldukça pahalıdır. Fakat sahip oldukları özellikler ile toplam sistem maliyetlerinde ve sistem kayıplarında etkin bir azalmaya olanak sağlamaktadırlar. WBG yarı iletkenlerden SiC, özellikle yüksek güç, yüksek sıcaklık koşullarında çalışma gerektiren uygulamalarda Si'nin alternatifi olacaktır.

Bu çalışmada, geleneksel Si yarı iletkenler kullanılarak gerçekleştirilen yükseltici tip DC/DC dönüştürücüde, anahtarlama elemanı olarak daha yüksek performans sağlayan SiC yarı iletkenlerin kullanılması durumundaki etkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, SiC yarı iletkenlerin verimlilik ve maliyet açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Si yarı iletkenlerin SiC yarı iletkenlerle değiştirilmesi sonucunda devre veriminde %1,41'lik bir artış sağlanmıştır. Bu artış, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda enerji verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bunun yanı sıra, anahtarlama frekansının artmasıyla kullanılacak pasif komponent değerinin azalması, pasif komponent maliyetlerin de azaltılmasına olanak sağlamıştır. 40kHz anahtarlama frekansında ihtiyaç duyulan 670µH'lik bobin değeri, 100kHz

frekansında 270 μ H'ye düşmekte ve bu da filtre bobini maliyetinde %74'lük bir azalmaya yol açmaktadır. 40kHz anahtarlama frekansında 60 μ F'lik kapasitör değerine ihtiyaç duyulurken 100kHz anahtarlama frekansında 24 μ F'lik kapasitör değeri yeterli gelmekte, bu da filtre kapasitörü maliyetinde %40 bir azalma sağlamaktadır. Bu durum, yüksek frekanslı uygulamalarda SiC yarı iletkenlerin satın alma maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen toplam sistem maliyeti açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Özellikle yüksek güçlü dönüştürücülerde soğutucular yarı iletken anahtarların güvenli sınırlar içerisinde çalışabilmesi için gereken önemli parçalardan birisidir. Soğutucu boyutları dönüştürücü boyutlarının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. SiC yarı iletken kullanımının kayıpları azaltması, soğutma gereksinimlerini de önemli ölçüde düşürmektedir. Bu çalışmada Si yarı iletkenler SiC yarı iletkenler ile değiştirilerek soğutucu hacminde %44'lük bir azalma sağlanmıştır. SiC yarı iletkenler daha kompakt ve hafif sistem tasarımlara imkân vermektedir.

Sonuç olarak, Si yarı iletkenlerin SiC yarı iletkenlerle değiştirilmesi hem verimlilik, hem maliyet hem de boyut açısından avantajlar sağlamaktadır. Bu bulgular, özellikle yüksek güçlü ve yüksek frekanslı uygulamalarda SiC yarı iletkenlerin gelecekte daha yaygın olarak kullanılacağını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- Narbel, Patrick André & Hansen, Jan Petter, 2014, Estimating the cost of future global energy supply, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 34(C), pages 91-97.
- Diego Silva Herran, Kaoru Tachiiri, Ken'ichi Matsumoto, 2019, Global energy system transformations in mitigation scenarios considering climate uncertainties, Applied Energy, Volume 243, Pages 119-131
- Ye, Bin & Jiang, JingJing & Li, Changsheng & Miao, Lixin & Tang, Jie, 2017. Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China, Applied Energy, Elsevier, vol. 198(C), pages 223-238.
- Craig CA, Feng S. 2017, Exploring utility organization electricity generation, residential electricity consumption, and energy efficiency: A climatic approach. Appl Energy Volume 185, Pages 779–90
- Sperberg R, Kniss R, Ruegg T, 2018, Energy efficiency in California cement plants: energy savings potential realized by accessing utility energy-efficiency program resources. IEEE Ind Appl Mag sayı 24, sayfa 12–6.
- Bose BK. 2013, Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century. IEEE Trans Ind Electron, Vol. 60, pages 2638–51.
- Zhiqiang Zeng, Mengna Hong, Jigeng Li, Yi Man, Huanbin Liu, Zeeman Li, Huanhuan Zhang, Integrating process optimization with energy-efficiency scheduling to save energy for paper mills, Applied Energy, Volume 225, 2018, Pages 542-558
- Kusumadewi TV, Winyuchakrit P, Limmeechokchai B. Long-term CO2 emission reduction from renewable energy in power sector: the case of Thailand in 2050. Energy Procedia 2017;138:961–6.
- J. W. Palmour, "Silicon carbide power device development for industrial markets," 2014 IEEE International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, 2014, pp. 1.1.1-1.1.8
- Dalla Vecchia, M.; Ravyts, S.; Van den Broeck, G.; Driesen, J. Gallium-Nitride Semiconductor Technology and Its Practical Design Challenges in Power

- Electronics Applications: An Overview. *Energies* 2019, 12, 2663. <https://doi.org/10.3390/en12142663>
- Smith, W. 2016, The Discovery of Selenium's Photoelectric Effect. *Journal of Applied Physics*, Vol. 45(3), pages 210-217.
- Kilby, J. S. The Invention of the Integrated Circuit. *IEEE Transactions on Electron Devices*, (2000). 47(9), 1871-1873.
- Casady, J. B., & Johnson, R. W. Status of Silicon Carbide (SiC) as a Wide-Bandgap Semiconductor for High-Temperature Applications: A Review. *Solid-State Electronics*, (2016). 39(10), 1409-1422.
- Pearton, S. J., Ren, F., & Zolper, J. C. GaN: Processing, Defects, and Devices. *Journal of Applied Physics*, (2018). 86(1), 1-78.
- Schwierz F. Graphene transistors. *Nat Nanotechnol.* 2010 Jul;5(7):487-96
- Lauenstein, J.-M. Wide-bandgap-power-SiC and GaN-radiation reliability. In *Proceedings of the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, Santa Fe, NM, USA, 29 November–30 December 2020
- Xiaofeng Ding, Feida Chen , Min Du, Hong Guo, Suping Ren. Effects of silicon carbide MOSFETs on the efficiency and power quality of a microgrid-connected inverter *Applied Energy* Volume 201, 1 September 2017, Pages 270-283
- Burger, Bruno;Kranzer, Dirk;Stalter, Olivier *Silicon Carbide and Related Materials* 2007, 28 Feb 2009, Vol. 600-603, pages 1231 - 1234
- Xiaofeng Ding, Min Du, Tong Zhou, Hong Guo, Chengming Zhang, Feida Chen,Comprehensive Comparison between Sic-mosfets and Si-igbts Based Electric Vehicle Traction Systems under Low Speed and Light Load,*Energy Procedia*,Volume 88,2016,Pages 991-997
- Mao, Saijun et al. “Three-phase active front-end rectifier efficiency improvement with silicon carbide power semiconductor devices.” 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (2016): 1-8.
- Nielsen, A.B., Davari, P., Blaabjerg, F., & Nielsen, B.V. Power Density and Loss Optimization Design Methodology of a 10 kW 2-Level 3-Phase SiC

- Inverter. 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), (2020). 1-7.
- R. Ramachandran, M. Nymand, C. Østergaard, C. Kjeldsen and G. Kapino, "High efficiency 20kW SiC based Isolated DC-DC Converter for Battery Charger Applications," 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Riga, Latvia, 2018, pp. P.1-P.9
- Xu, F., Guo, B., Tolbert, L.M., Wang, F.F., & Blalock, B.J. An All-SiC Three-Phase Buck Rectifier for High-Efficiency Data Center Power Supplies. IEEE Transactions on Industry Applications, (2013). 49, 2662-2673.
- Hazra, S., Madhusoodhanan, S., Bhattacharya, S., Moghaddam, G.K., & Hatua, K. Design considerations and performance evaluation of 1200 V, 100 a SiC MOSFET based converter for high power density application. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, (2013). 4278-4285.
- Yin, S., Tseng, K.J., Simanjorang, R., Liu, Y., & Pou, J. A 50-kW High-Frequency and High-Efficiency SiC Voltage Source Inverter for More Electric Aircraft. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (2017). 64, 9124-9134.
- J.B. Casady, R.W. Johnson, Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review, Solid-State Electronics, Volume 39, Issue 10, 1996, Pages 1409-1422,
- Palmour, J. W., et al. Silicon Carbide Power Devices. IEEE Transactions on Electron Devices, (2010). 48(3), 466-473.
- Kimoto, T., & Cooper, J. A. (2014). Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices, and Applications. Wiley-IEEE Press.
- Roccaforte, F., et al. Emerging Trends in Wide Bandgap Semiconductors (SiC and GaN) Technology for Power Devices. Microelectronic Engineering, (2018). 187-188, 66-77.
- Neudeck, P. G., Okojie, R. S., & Chen, L.-Y. "High-temperature electronics - a role for wide-bandgap semiconductors." IEEE Proceedings, (2002). 90(6), 1065-1076.

J. Baliga, "Silicon Carbide Power Devices: A 35 Year Journey from Conception to Commercialization," 2018 76th Device Research Conference (DRC), Santa Barbara, CA, USA, 2018, pp. 1-2

Dimitrijević, S., Cheong, K. Y., Han, J., & Harrison, H. B. Charge retention in metal–oxide–semiconductor capacitors on SiC used as nonvolatile-memory elements. *Applied Physics Letters*, (2002). 80(18), 3421.

Morvan, E., Kerlain, A., Dua, C., & Brylinski, C. Development of SiC devices for microwave and RF power amplifiers. *Silicon Carbide*, Springer, (2004). pp 839–868.

Kitaplar

Riordan, M., & Hoddeson, L. (1998). *Crystal Fire: The Birth of the Information Age*. W.W. Norton & Company. - 424 pages.

Millman, J., & Grabel, A. (1987). *Microelectronics*. McGraw-Hill. - 1001 pages.

Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Wiley-Interscience. - 832 pages.

Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* (4th ed.). McGraw-Hill. - 784 pages.

Ferry, D. K. (2020). *Nanotechnology: The Science of Small*. CRC Press. - 350 pages.

Neudeck, G. W. (1989). *The PN Junction Diode*. Addison-Wesley. - 224 pages.

Shur, M. S. (1990). *SiC Materials and Devices*. Academic Press. - 400 pages.

Baliga, B. J. (1996). *Power Semiconductor Devices*. PWS Publishing.

Baliga, B. J. (2005). *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer.

İnternet Kaynakları

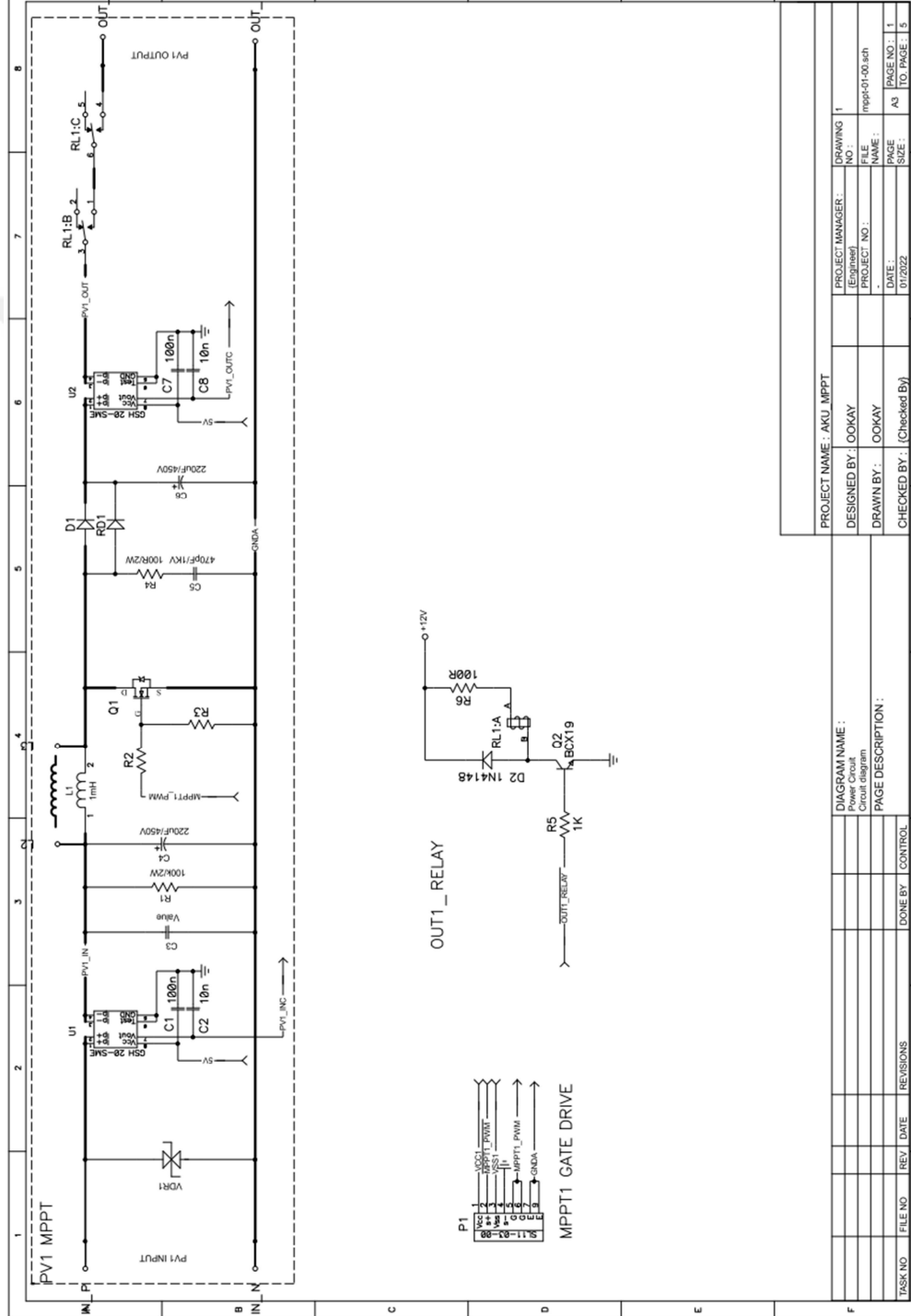
1- <https://global.canon/en/technology/semicon2021s.html>, (20.05.2024)

2- <https://www.powerelectronicsnews.com/how-power-electronics-is-revolutionizing-the-ev-ecosystem/>, (20.05.2024)

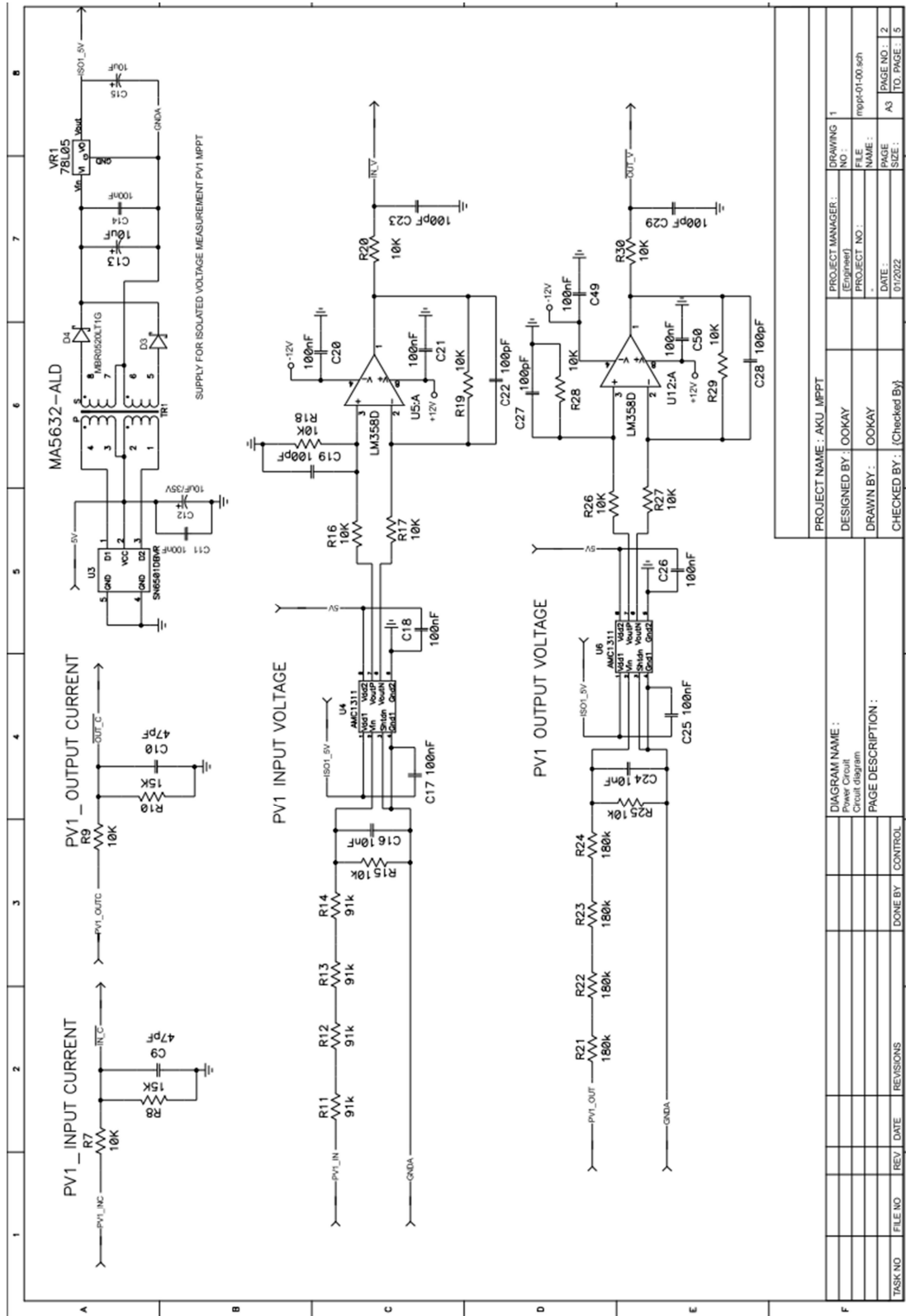
- 3-<https://hub.qmplus.qmul.ac.uk/group/silicon-carbide-sic/long-literature-review>, (24.07.2024)
- 4-<https://eepower.com/technical-articles/state-of-the-sic-mosfet-device-evolution-technology-merit-and-commercial-prospects/>, (24.07.2024)
- 5-<https://pubs.aip.org/aip/adv/article/10/2/025003/21825/A-formula-to-calculate-solid-dielectric-breakdown>, (24.07.2024)
- 6- <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/diodes/sic-schottky-barrier-diodes/articles/sic-schottky-barrier-diodes-sbds-with-low-switching-loss.html>, (25.05.2024)
- 7- <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fghl40t65mqdt-d.pdf>, (20.09.2024)
- 8- <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nthl045n065sc1-d.pdf> (20.09.2024)
- 9- <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/rhrg3060-d.pdf>, (20.09.2024)
- 10- <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ffsh3065b-f085-d.pdf>, (20.09.2024)
- 11-[https://celsiainc.com/heat-sink-blog/heat-sink-size-calculator-use-instructions/#:~:text=Volumetric%20Thermal%20Resistance%20\(Rv\)%20%E2%80%933,Q*Rv\)%2FDelta%20T](https://celsiainc.com/heat-sink-blog/heat-sink-size-calculator-use-instructions/#:~:text=Volumetric%20Thermal%20Resistance%20(Rv)%20%E2%80%933,Q*Rv)%2FDelta%20T), (10.09.2024)

EKLER

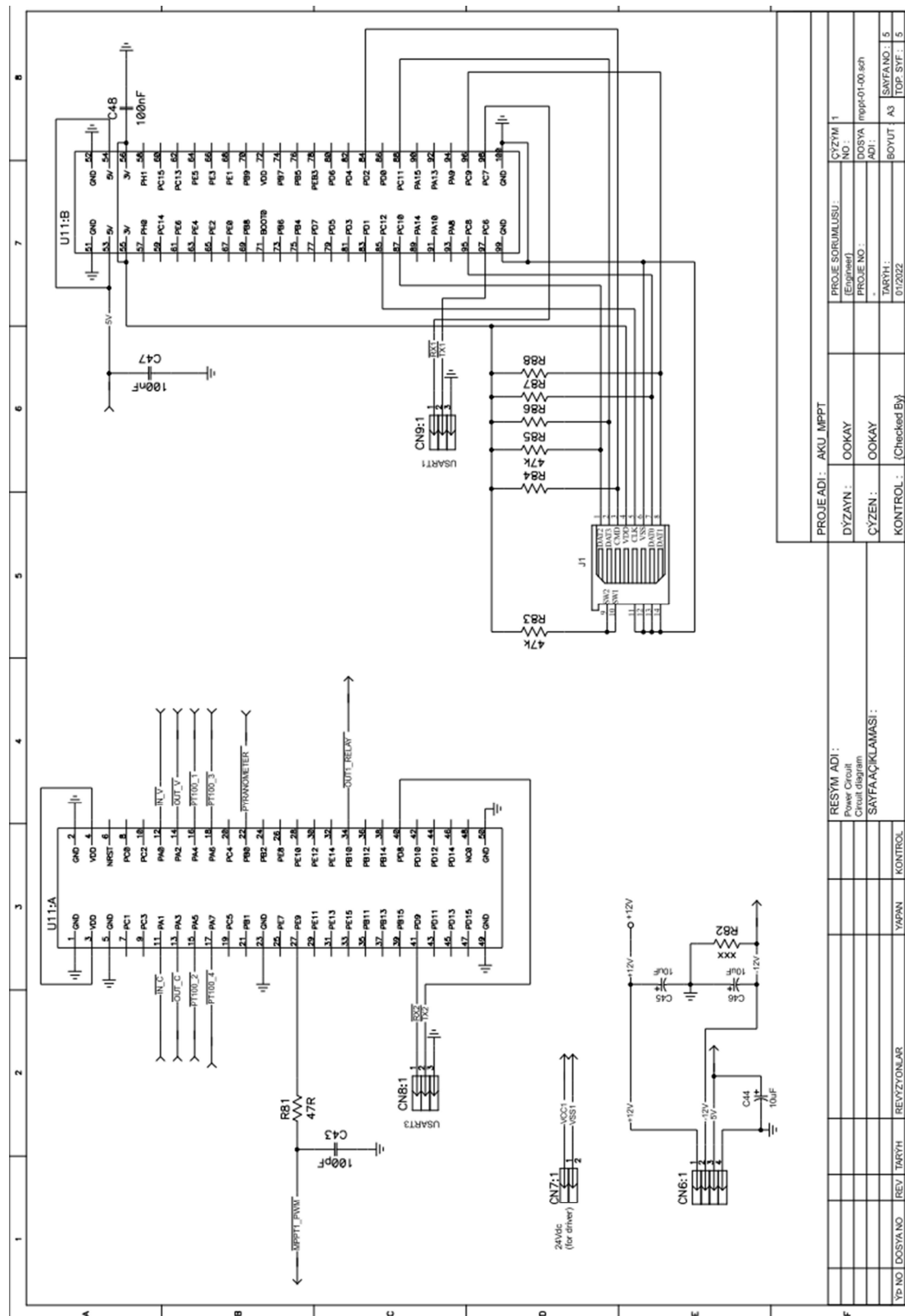
EK 1. Boost Dönüştürücü Güç Katı



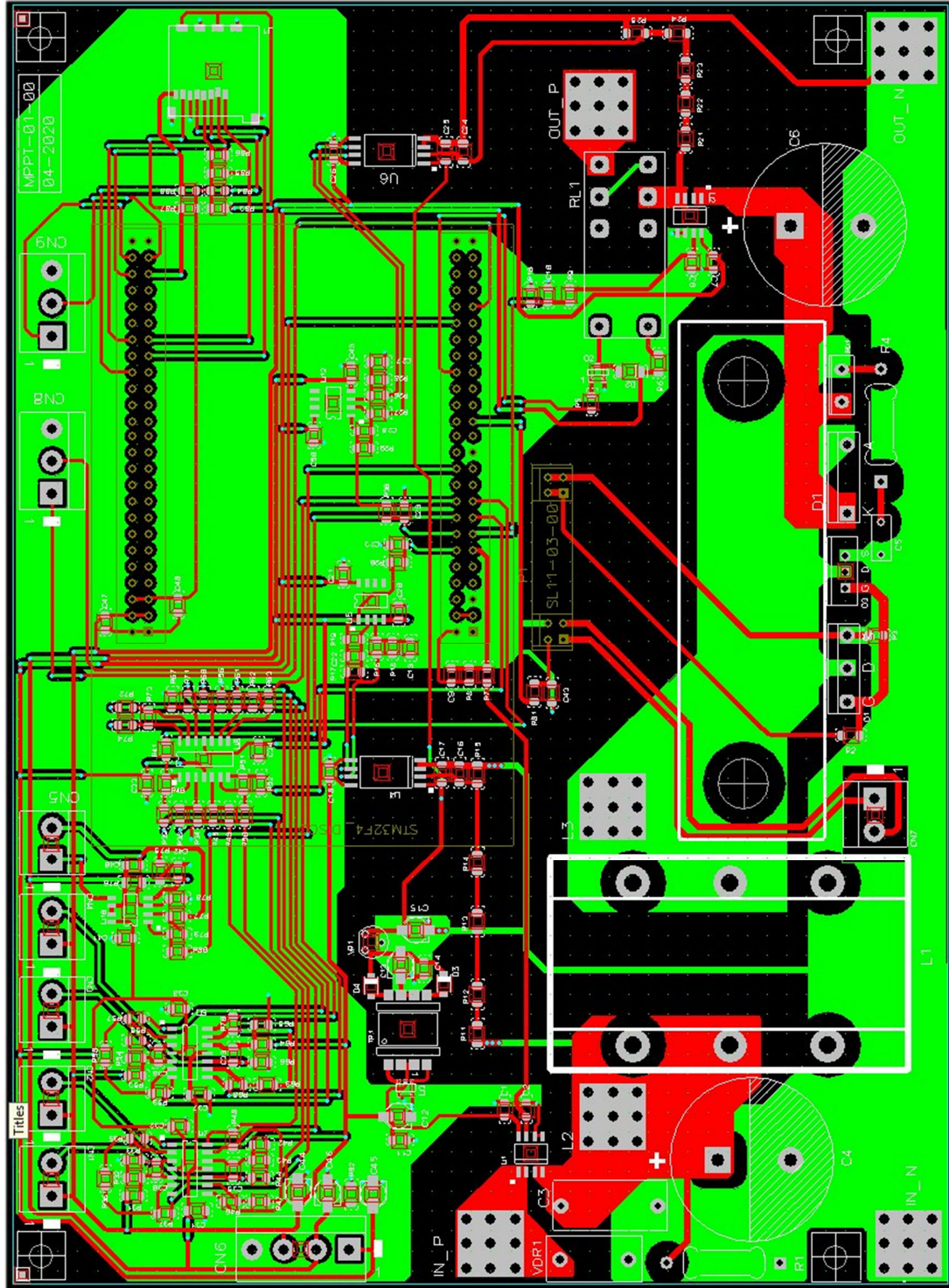
EK 2. Gerilim, Akım Ölçme ve Ölçeklendirme Devresi



EK 3. Mikrodenetleyici Bağlantı Devre Şeması



EK 4. Boost Dönüştürücü PCB Şeması



EK 5. LtSpice Devre Modeli

