MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SiC TEMELLİ YÜKSEK VERİMLİ MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

YASİN MERT YALÇİ

(523121008)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. İsmail Kıyak

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Haziran, 2024
İstanbul

Bu çalışmada büyük payı olan, değerli hocam Prof. Dr. İsmail Kıyak'a ve bünyesinde çalıştığım Armelsan'a desteklerinden ötürü sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Yasin Mert YALÇİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
YENİLİK BEYANI vi
SEMBOLLER xiv
KISALTMALAR xvi
ŞEKİL LİSTESİ xvii
TABLO LİSTESİ xviii
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Konusu 1
1.2. Literatür Çalışması 1
1.3. Tezin Amacı 3
2. Silisyum Karbür 4
2.1. Giriş 4
2.2. SiC Yapısı 4
2.3. SiC Malzeme Özellikleri 5
2.4. SiC ve Si Verimlilik Karşılaştırması 7
2.4.1. İletim Kayıpları 7
2.4.2. Anahtarlama Kayıpları 8
2.4.3. Gate Şarj Kayıpları 9
2.4.4. Kayıpların Verimliliğe Etkisi 10
3. MOTOR SÜRÜCÜLER VE YÜKSELTEÇLER 11
3.1. Giriş 11
3.2. Mantığı ve Sınıfları 11
3.2.1. A-Sınıfı Yükselteçler 11
3.2.2. B-Sınıfı Yükselteçler 12
3.2.3. AB-Sınıfı Yükselteçler 13
3.2.4. D-Sınıfı Yükselteçler 13
4. SÜRÜCÜ TASARIM SÜRECİ 16
4.1. Giriş 16
4.2. Donanın Gereksinim Özellikleri 16
4.3. Donanım Tasarım Aşamaları 17
4.3.1. H-Köprüsü 18
4.3.2. Kontrol Sinyalleri 18

4.3.3. Gate Sürücü 19
4.3.4. Ölçümler ve Korumalar 19
4.3.5. Enerji Beslemeleri 19
5. BENZETİM VE TEORİK SONUÇLAR 20
5.1. Giriş 20
5.2. Benzetim Şematiği Tasarımı 20
5.3. İletim Kayıpları 21
5.4. Anahtarlama Kayıpları 23
5.5. Verimlilik Sonucu 27
6. DENEYSEL TESTLER VE SONUÇLAR 28
6.1. Giriş 28
6.2. Test Ortamı Bileşenleri 28
6.3. Deneysel Sonuçlar 29
7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ 31
KAYNAKLAR 33
ÖZGEÇMİŞ 38

ÖZET

SiC TEMELLİ YÜKSEK VERİMLİ MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu çalışma, motor sürücü uygulamaları için yüksek verimli bir yükselteç tasarımını konu almaktadır. Tasarımın en öncelikli gereksinim özelliği yüksek verimli bir topoloji ile kurgulanmasıdır. Bu bağlamda Silisyum Karbür (SiC) temelli bir yapı adım adım ele alınarak tasarlanmıştır ve akabinde uygulaması gerçeklenerek işlevsellik testleri tamamlanmıştır. SiC yarı iletkenlerinin verimlilik açısından kritik faydaları, geleneksel Silikon (Si) yarı iletkenlerle kıyaslanarak ortaya konmuştur. SiC malzemeden ötürü sağlanan çok daha düşük kayıplar ve yüksek elektriksel dayanım, verimlilik açısından elde edilen bu önemli kazanımı getirmiş ve daha küçük boyutlardaki tasarımın önünü açmıştır. Sürücülerin ve yükselteçlerin çalışma mantıkları irdelenerek bu araştırmadaki tasarımın işlevselliğinde önemli rol alan H-köprüsü yapısı benzetim ve analizlerle birlikte incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışma; benzetim ve teorik sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslanmasıyla ve akabinde donanım gereksinim özelliklerinde ister olarak belirlenen yüksek verim detaylarının, deneysel olarak elde edilen >2kW çıkış gücünde ~%98.5 verimin elde edilmesiyle sağlandığı gözlenerek tamamlanmıştır.

ABSTRACT

SiC BASED HIGH EFFICIENCY MOTOR DRIVE DESIGN

This study is about the design of a high efficiency amplifier for motor driver applications. The most primary requirement of the design is that it be constructed with a highly efficient topology. In this context, a Silicon Carbide (SiC) based structure was designed step by step and then its application was implemented and functionality tests were completed. The critical benefits of SiC semiconductors in terms of efficiency have been demonstrated by comparing them with conventional Silicon (Si) semiconductors. The much lower losses and high electrical strength provided by the SiC material have brought this significant gain in terms of efficiency and paved the way for smaller sized designs. The operating logic of the drivers and amplifiers was examined and the H-bridge structure, which plays an important role in the functionality of the design in this research, was examined and evaluated with simulations and analyses. Study was completed by comparing the simulation and theoretical results with the experimental results and then observing that the high efficiency details determined in the hardware requirement specifications were achieved by obtaining ~98.5% efficiency at the experimentally obtained >2kW output power.

YENİLİK BEYANI

1. Literatürde sayılı örneklerde yer verilen SiC temelli uygulamalara referans olabilecek bir güç yükselteci tasarımı bu çalışmada adım adım incelenerek ortaya koyulmuştur.
2. Tasarım, teorik hesaplar ve benzetim ölçümleriyle birlikte adım adım irdelenerek gerçeklenmiştir. Çalışmanın devamında deneysel sonuçlar elde edilerek tüm veriler kıyaslanmıştır.

SEMBOLLER

E_g: Bant genişliği enerjisi, eV

E_B: Elektrik alan dayanımı, MV/cm

n_i: İçsel taşıyıcı konsantrasyonu, cm^{-3}

μ_n: Elektron hareketliliği, cm^2/Vs

μ_h: Delik hareketliliği, cm^2/Vs

v_s: Doymuş elektron hızı, $10^7 cm/s$

K: Termal iletkenlik, W/cmK

e: Dielektrik sabiti

X_s: Elektron ilgisi, eV

V_{DS}: Drain-Source gerilim düşümü, mV

V_{DSmax}: Drain-Source anahtarlama gerilim dayanımı, V

V_{CE}: Collecor-Emitter gerilim düşümü, mV

V_{CEmax}: Collecor-Emitter anahtarlama gerilim dayanımı, V

I_D: Drain akımı, A

I_C: Collector akımı, A

R_{DSon}: Drain-Source iletim iç direnci, mOhm

R_{CE}: Collecor-Emitter iletim iç direnci, mOhm

V_{CEsat}: Collecor-Emitter doyum gerilimi, V

P_{ON}: İletim kaybı, W

P_{SW}: Anahtarlama kaybı, W

P_G: Gate doldurma kaybı, W

V_{DD}: YVGK seviyesi, V

V_{IN}: Giriş Gerilimi, V

V_{OUT}: Çıkış/yük gerilimi, V

I_{IN}: Giriş/bara akımı, A

I_{OUT}: Çıkış/yük akımı, A

P_{IN}: Giriş gücü, W

P_{OUT}: Çıkış Gücü, W

Eff: Verim, %

+D: Pozitif darbe periyot oranı, %

-D: Negatif darbe periyot oranı, %

$\mathbf{f_{SW}}$: Anahtarlama frekansı, Hz

$\mathbf{t_r}$: Açılma yükselme süresi, ns

$\mathbf{t_{d(on)}}$: Açılma gecikme süresi, ns

$\mathbf{t_{on}}$: Açılma toplam süresi, ns

$\mathbf{E_{on}}$: Açılma için gerekli enerji, µJ

$\mathbf{t_f}$: Kapanma yükselme süresi, ns

$\mathbf{t_{d(off)}}$: Kapanma gecikme süresi, ns

$\mathbf{t_{off}}$: Kapanma toplam süresi, ns

$\mathbf{E_{off}}$: Kapanma için gerekli enerji, µJ

$\mathbf{V_{GSop}}$: Gate sürme gerilimi, V

$\mathbf{Q_G}$: Gate kapasitans şarj değeri, nC

$\mathbf{T_J}$: Bağlantı noktası sıcaklığı, °C

$\mathbf{R_G}$: Dış Sürme Direnci, ohm

KISALTMALAR

SiC: Silicon Carbide

GaN: Gallium Nitride

BJT: Bipolar Junction Transistor

MOSFET: Metal-oxide semiconductor Field-Efect Transistor

MCU: Microcontroller Unit

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor

BJT: Bipolar Junction Transistor

NPN: Negative-Positive-Negative transistors

PNP: Positive-Negative-Positive transistors

AC: Alternating Current

DC: Direct Current

PWM: Pulse Width Modulation

SPWM: Sinusoidal Pulse Width Modulation

SPICE: Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

EN: Enable

BDK: Baskı Devre Kartı

DVGK: Düşük Voltaj Güç Kaynağı

YVGK: Yüksek Voltaj Güç Kaynağı

DTT: Donanım Tasarım Tanımı

DGÖ: Donanım Gereksinim Özellikleri

Num: Numara

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Yarı iletken teknolojilerinin kullanım alanları 4
Şekil 2.2. Si ve SiC elektrik alan dayanımı kıyası 6
Şekil 2.3. Anahtarlama ve iletim kayıpları ilişkisi 7
Şekil 3.1. A-Sınıfı yükselteç yapısı 11
Şekil 3.2. B-Sınıfı yükselteç yapısı 12
Şekil 3.3. AB-Sınıfı yükselteç yapısı. 13
Şekil 3.4. D-Sınıfı yükselteç yapısı 14
Şekil 3.5. AB-Sınıfı yükselteçler ile D-Sınıfı yükselteçlerin verimlilik kıyası. 14
Şekil 4.1. Güç yükselteci tasarımının blok diyagramı 17
Şekil 5.1. SiC temelli güç yükselteci benzetimi şematiği 20
Şekil 5.2. Çıkış yükü gerilimi benzetim ölçümü 21
Şekil 5.3. Çıkış yükü gerilimi benzetim ölçümü (yakından). 22
Şekil 5.4. SiC MOSFET I_{DS}-R_{DSon} üretici grafiği 23
Şekil 5.5. Çıkış yükü sinyalleri benzetim ölçümü. 24
Şekil 5.6. Çıkış yükü sinyalleri iletim anı benzetim ölçümü. 24
Şekil 5.7. Çıkış yükü sinyalleri kesim anı benzetim ölçümü. 25
Şekil 5.8. SiC MOSFET R_{GS} ve anahtarlama süreleri üretici grafiği 26
Şekil 6.1. Test ortamı kurgusu 28
Şekil 6.2. Uygulama ölçümleri güç analizörü verileri 29
Şekil 6.3. Uygulama test ortamı osiloskop ölçümleri 30

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. SiC ve Si bileşiklerinin malzeme özellikleri karşılaştırması 5
Tablo 2.2. SiC MOSFET ve Si IGBT elektriksel karşılaştırması 7
Tablo 2.3. SiC ve Si iletim kayıpları karşılaştırması. 8
Tablo 2.4. SiC ve Si anahtarlama kayıpları karşılaştırması 9
Tablo 2.5. SiC ve Si Gate şarj kayıpları karşılaştırması 9
Tablo 3.1. Yükselteçlerin nitelik karşılaştırması 15
Tablo 4.1. Donanım gereksinim özellikleri 17
Tablo 5.1. İletim kaybının benzetim ve teorik karşılaştırması 23
Tablo 5.2. Anahtarlama kaybının benzetim ve teorik karşılaştırması 26
Tablo 5.3. Toplam verimin benzetim ve teorik karşılaştırması 27
Tablo 6.1. Test kurgusunda kullanılan ekipmanlar 28
Tablo 6.2. Test koşulları 29
Tablo 6.3. Uygulama test ölçüm sonuçları 30
Tablo 7.1. SiC ve Si kayıpların karşılaştırması 31
Tablo 7.2. Güç ve verim sonuçları 31

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu

Bu çalışmada motor sürücü uygulamaları için SiC temelli yüksek verimli bir güç yükselteci tasarımı ve uygulaması adım adım ele alınmıştır. Yüksek verim elde etme amacı güdülerek tasarlanacak yapının başlıca özelliği, Silisyum Karbür (Silicon Carbide - SiC) katkı teknolojisini kullanan anahtarlama elemanlarını kullanmak olacaktır.

1.2. Literatür Çalışması

Günümüzde elektrikli araçlar, içten yanmalı araçların yerini almaya başlamıştır [1-9]. Bunun beraberinde daha uzun menzilli elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik yoğun çalışmalar yürütülmektedir [10-17]. Pil teknolojilerinin geliştirilmesi ve daha verimli motor sürücülerin tasarlanması bu bağlamda yapılan çalışmaların başında gösterilir. Mruzek ve arkadaşları, "Elektrikli Araç Menzilini Artırma Olanakları" adlı çalışmasında sürüş asistanı yardımıyla sürücünün daha az enerji tüketimi yaparak aracı kullanılması amaçlanmıştır. Bu asistan, sürücünün pildeki enerjiyi en verimli şekilde kullanmasını sağlamak için ortam şartlarına uygun sürüş düzeni belirleyecektir [10]. Gebremichael ve arkadaşı," Elektrikli Araçlar için Menzil Arttırıcılar" adlı çalışmasında menzil genişleticilerin tamamen elektrikli bir araca uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Elektrikli araçlara yönelik hafif ve verimli bir menzil genişleticinin tahrik bileşenlerinin boyutlandırılmasını ve enerji gereksinimlerini de ele almayı amaçlamıştır [11]. Ostroverkhov ve arkadaşı, "Güç Kaynağındaki Süper Kapasitörlerle Elektrikli Araç Sürücülerinin Verimliliğinin Artırılması" adlı çalışması ile güç kaynağına paralel bağlanan süperkapasitörlerin elektrikli araçlardaki kayıpları düşürmesini amaçlamıştır. Bu makale, böyle bir bağlantının verimliliğinin süperkapasitör kapasitansına bağlı olduğunu ve kapasitansın minimum enerji tüketimini sağlayan rasyonel değerinin var olduğunu göstermektedir [12]. Stevic ve arkadaşının, "Yeni Nesil Elektrikli Araçlar" adlı kitabının 4 numaralı "Elektrikli Araçlarda Enerji Verimliliği" bölümünde elektrikli araçlarda enerji verimliliğini yükseltmenin yolları; frenleme sırasında enerjinin kullanılması, atık ısı enerjisinin kullanılması, güneş pilleri ile ek besleme, geliştirilmiş mekanik enerji iletim sistemi, geliştirilmiş araba kabuk tasarımı, güç dönüştürücülerinin verimliliğinin arttırılması, özel tasarım elektrik motorları, süper kapasitörler, yakıt hücreleri ve yeni nesil pillerin kullanılması, gerçek zamanlı minimum tüketim kriterine göre rota seçimi, araç içi ve dışı parametre izleme ve enerji tüketiminin optimizasyonu ile bilgisayarlı sistem kontrolü adlı başlıklar altında

incelenerek derlenmiştir [13]. Martyushev ve arkadaşlarının, "Pil Tüketiminin Optimize Edilmesi Yoluyla Elektrikli Kara Taşımacılığında Enerji Verimliliğinin Artırılmasına Yönelik Yöntemlerin Gözden Geçirilmesi" adlı çalışması ile enerji depolama kaynağını arttırma yöntemlerini analiz edip inceleyerek elektrikli taşımacılığın enerji verimliliğini artırmaya yönelik mevcut yöntemler gözden geçirilmiştir [14]. Wei ve arkadaşlarının, "Şanzıman Sıcaklığı Dikkatine Alındığında Elektrikli Araçların Enerji Verimliliğini İyileştirme Potansiyeli" adlı çalışması ile soğuk çalıştırmanın elektrikli araçların enerji tüketimi üzerindeki etkisini optimum kontrol perspektifinden ölçmek için entegre bir enerji ve iletim termal yönetim sistemi sunulmuştur [15]. Laitinen, "İki Vitesli Şanzımanla Elektrikli Araç Enerji Verimliliğinin Artırılması" adlı tezinde elektrikli araçların enerji verimliliğinin iki vitesli şanzımanla artırılma olasılığını araştırmıştır. Çalışma, iki vitesli dişli kutusuyla enerji verimliliğini artırmanın mümkün olduğunu ancak bunun büyük ölçüde motor verimlilik haritasına ve dolayısıyla elektrik motor tipine bağlı olduğunu ortaya koyuyor. İki vitesli şanzımanın yüksek hızlı sürüş çevrimlerinde daha iyi olduğu ortaya çıkıyor [16]. Daha uzun menzilli elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalardan enerji depolama tarafında olanlar ise pil teknolojilerinin malzeme özellikleri ve güç yönetimi gibi geliştirmeleri içermektedir [21-26]. Çetin ve arkadaşı, "Elektrikli Araçlar İçin 3 Fazlı Fırçasız DC Motor Sürücülerinde Kullanılan SiC ve Si MOSFETlerin Performans Karşılaştırması" adlı çalışmasında motor sürücü uygulamalarında kullanılan SiC ve Si MOSFETlerin elektrikli araçlardaki verimliliğe etkisini, performans kıyaslaması gerçekleyerek incelemiştir. Çalışma sonucunda SiC MOSFETlerin Si MOSFETlere göre daha az ısındığı ve daha az güç kaybı olduğu gözlemlendi. Mekanik yük fazla olduğunda SiC MOSFETlerin hızı etkilenmese de Si MOSFETlerin anahtarlama hızının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda motor sürücü devresinde kullanılan SiC MOSFETlerin elektrikli araçlar için Si MOSFETlere göre daha verimli çalıştığı gözlemlenmiştir [18]. Tiwari ve arkadaşlarının "Gelecekteki motor sürücü uygulamaları için SiC MOSFETler" adlı çalışması, motor sürücü uygulamaları için SiC MOSFET ve Si IGBT modüllerinin anahtarlama performansını araştırmaktadır. Bu çalışma, avantajların daha yüksek frekanslarda ve sıcaklıklarda daha belirgin hale gelmesiyle SiC MOSFET'in tüm anahtarlama frekans aralıklarında Si IGBT'den nasıl daha iyi performans gösterdiğine dair bir fikir veriyor [19]. Chang ve arkadaşlarının, "Silisyum Karbür (SiC) Tabanlı Motor Sürücüsünün Gösterimi" adlı çalışması ile kompakt güç dönüşümü elde etmek için kullanılan yeni bir SiC tabanlı motor sürücü teknolojisini açıklanmaktadır ve SiC teknolojisinin gelecekteki uygulamaları açısından değerlendirmeler yapılmaktadır [20].

1.3. Tezin Amacı

Tezin amacı, elektrikli araçlar için başta olmak üzere motor sürücü uygulamalarındaki kayıpların azaltılmasına çözüm sunabilen SiC yarı iletkenlerin kullanıldığı yüksek verimli (%99.5'e kadar) bir güç yükselteci (DC/AC evirici) tasarımının deneysel olarak ortaya konmasıdır. Bu çalışmada gerçeklenecek olan SiC temelli yükselteç tasarımı, teorik hesaplar ve benzetim sonuçlarıyla birlikte kıyaslanarak irdelenecektir.

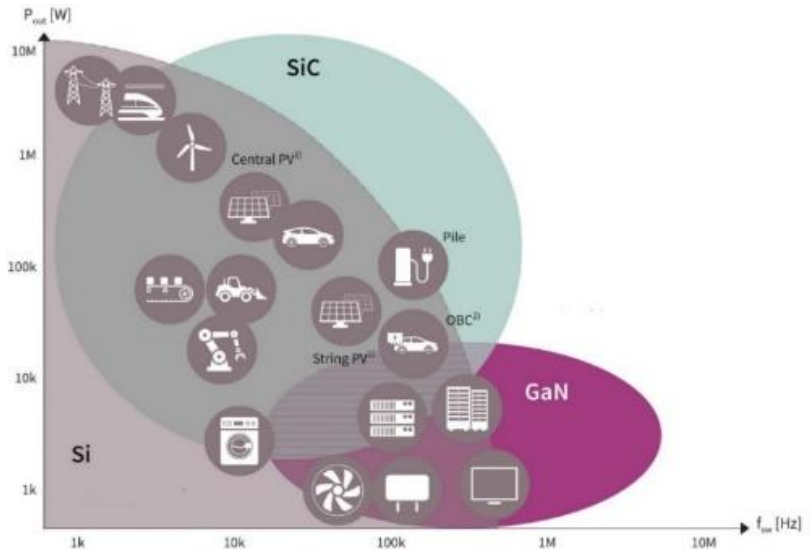
2. Silisyum Karbür

2.1. Giriş

SiC anahtarların tarihçesi, malzeme özellikleri ve bu çalışmada kullanılacak SiC MOSFET'in muadil bir Si anahtarla verimlilik açısından kıyaslanması bu bölümde incelenerek yüksek verimli bir yükselteç tasarımında kullanılmasının faydaları ortaya konacaktır.

2.2. SiC Yapısı

Yarı iletkenlerin gelişmeye başladığı zamanlardan günümüze kadar ilk olarak Germanyum (Ge) devamında ise Silisyum (Si), yarı iletken elektronik teknolojilerinin temelini oluşturmuştur. İlerleyen teknolojiyle birlikte artan enerji tüketimi, özellikle MOSFET ve IGBT gibi anahtarlama elemanlarında olmak üzere, silikon yarı iletkenlerde yeni gelişmelere olan ihtiyacı arttırmıştır. Günümüzde Silikon yarı iletken teknolojisinin kullanılarak geliştirildiği 6. ve 7. jenerasyon IGBTler ve MOSFETler, ilk jenerasyon üyelerine kıyasla çok ileride konumlanmış olsalar da endüstrinin asıl beklentilerinden hala epey uzaktalar. Yüksek frekanslarındaki anahtarlama kayıplarının azaltıldığı, iletim kayıplarının düşük olması sayesinde yüksek iletim akımlarının mümkün olduğu ve buna karşın ısı iletiminin de iyileştiği bir yarı iletken gereksinimine yönelik çalışmalar sonucunda SiC temelli ilk ticari MOSFET Cree firması tarafından 2011 yılında duyurulmuştur. Bu duyurunun akabinde SiC elemanların gelişimi hızla arttı ve günümüzde fiyat iyileştirmeleriyle birlikte daha kullanılabilir düzeylere inerek kullanıcıların rahatça ulaşma imkanı sağlayabileceği bir anahtarlama elemanı teknolojisi haline gelmiştir [27-29].



Şekil 2.1. Yarı iletken teknolojilerinin kullanım alanları [29, 30].

MOSFETler ve IGBTler gibi yarı iletken malzemeler, modern elektroniğin temel yapı taşıdır ve geçen yüzyılın en önemli icatlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, MOSFETlerde Silikondan Silisyum Karbüre geçiş de dahil olmak üzere performanslarını önemli ölçüde artıran gelişmeler olmuştur [31]. MOSFET ve IGBT gibi SiC anahtarlar, geleneksel Si anahtarlara göre eşit güçte daha yüksek verimlilik sağlar. SiC anahtarlar Şekil 2.1'de [30] gösterildiği gibi kayıpları daha az olduğundan daha yüksek güç ve frekanslarda çalışabilirler. Bu nedenle motor sürücü uygulamalarındaki güç yükselteci tasarımlarında Si yerine SiC kullanılması daha az güç tüketimi ve daha fazla verim sağlar.

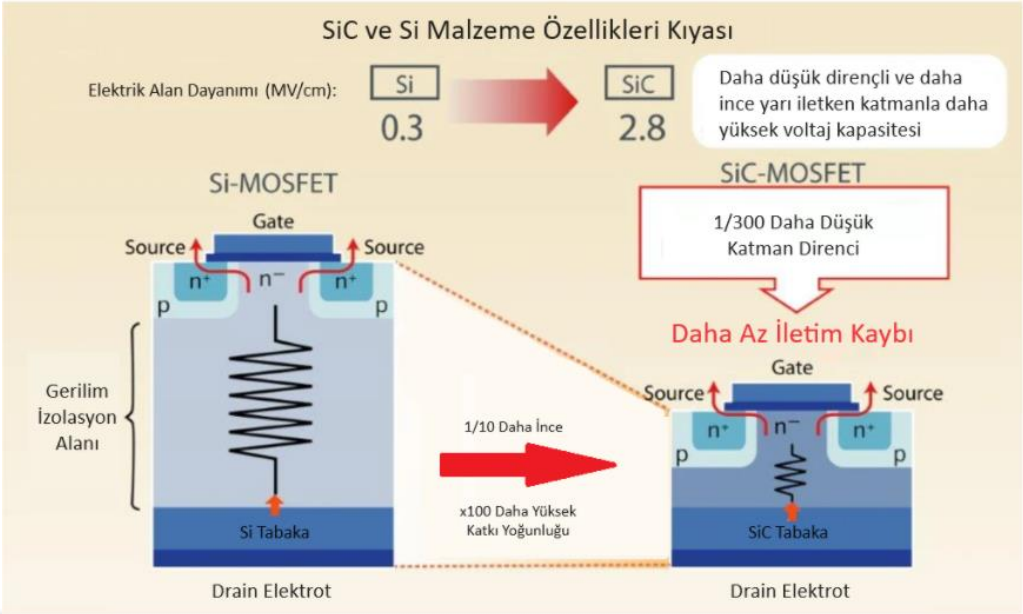
2.3. SiC Malzeme Özellikleri

Geniş bant aralığı, yüksek elektriksel dayanım, yüksek ısıl iletkenlik ve düşük ısıl genleşme, SiC bileşiğini yüksek sıcaklık ve yüksek frekanslı elektronikler için çok özel bir malzeme haline getirmektedir [31, 32]. Önemli malzeme özellikleri açısından Silisyumun ve Silisyum Karbürün iki farkı altıgen politipi arasındaki kıyaslama Tablo 2.1'de görülmektedir. [33-35]. Motor sürücü uygulamaları için tasarlanacak yüksek verimli güç yükselteci tasarımı Silisyum Karbürün bu üstün malzeme özelliklerinden yararlanacaktır.

Tablo 2.1. SiC ve Si bileşiklerinin malzeme özellikleri karşılaştırması [34].

Malzeme Özelliği	Si	6H-SiC	4H-SiC
Bant genişliği enerjisi, E_g (eV)	1.12	3.08	3.28
Elektrik Alan Dayanımı E_B, (MV/cm) (at N_D=5x10^{15}cm^{-3})	0.3	2.2	2.3
İçsel taşıyıcı konsantrasyonu, n_i (cm^{-3}) (at T=300K)	1x10^{10}	1.6x10^{-6}	5x10^{-9}
Elektron hareketliliği, μ_n (cm^2/Vs)	1350	370	800
Delik hareketliliği, μ_h (cm^2/Vs)	480	80	120
Doymuş elektron hızı, v_s (10^7 cm/s)	1	2	2
Termal iletkenlik, K (W/cmK)	1.5	4.9	4.9
Dielektrik sabiti, e	11.8	9.7	9.7
Elektron ilgisi, X_s (eV)	4.05	3.3	3.1

SiC yarı iletkeninin en önemli özelliklerinden biri Bandgap enerjisinin çok yüksek (Si ile kıyasla x3 kadar) olmasıdır. Bu da yarı iletkenin yırtılması (yasaklı alana elektron kaçması olarak tanımlanan ve istenmeyen bir durum) için gerekli sıcaklığın çok yüksek olması demektir. Bu sıcaklık değeri Silikon elemanlarda 250-300 °C seviyelerinde kalırken SiC için ise bu 600-800 °C aralığındadır. Bu da Silikon yarı iletkenlere göre SiC yarı iletkenlerin çok daha yüksek sıcaklıklarda güvenle çalışabilmesinin önünü açar [28].



Şekil 2.2. Si ve SiC elektrik alan dayanımı kıyası [30].

SiC yarı iletkeninin elektrik alan dayanımı Si tarafından 10 kata kadar daha iyidir ve bu da Şekil 2.2'de görülebileceği üzere daha ince (10'da 1'i kadar) katmanlar oluşturmayı mümkün kılar. Bu da yüksek gerilimlerde dahi MOSFETler için R_{DSon} denen iletim direncinin oldukça düşük olması ve dolayısıyla yüksek iletim verimliliği demektir. Bu nedenle SiC MOSFETler 10 kV aralığında dahi kullanıma sunulduğunda seri bağlı Si IGBTlerin yerini alabilir ve böylece tasarımın ağırlığı, hacmi ve kayıpları azalacaktır [19]. SiC, madde özelliğinden kaynaklı olarak ısıl iletkenliği Silikon yarı iletkenlere göre 3 kata kadar daha iyidir. Bu da tasarımların daha yüksek bir anahtar sıcaklığında [37, 38] çalıştırılabileceği ve daha iyi bir ısı dağılımına sahip olabileceği anlamına gelir, sonuçta daha az termal yönetim ve soğutma ihtiyacının önünü açar ve böylelikle daha kompakt tasarımlar sağlanır. SiC yüksek bant genişliği sayesinde yüksek frekanslardaki anahtarlamalara oldukça uygundur. Bu da daha küçük pasif devre elemanları demektir. Bu oran günümüzde öyle seviyelere gelmiştir ki pasif elemanlardaki maliyet kazancı SiC anahtarlama elemanı kullanımına aktarılarak, neredeyse maliyet farkı olmaksızın daha küçük cihazların yapımı mümkün olmaya başlamıştır [28, 39, 40].

Bu çalışmanın devamında motor sürücü uygulamaları için tasarlanacak güç yükselteci yapısının temelini oluşturacak SiC MOSFET'in muadil bir Si IGBT ile kayıplar ve verimlilik açısından kıyaslanması da irdelenecek olup teorik hesaplar yer alacaktır.

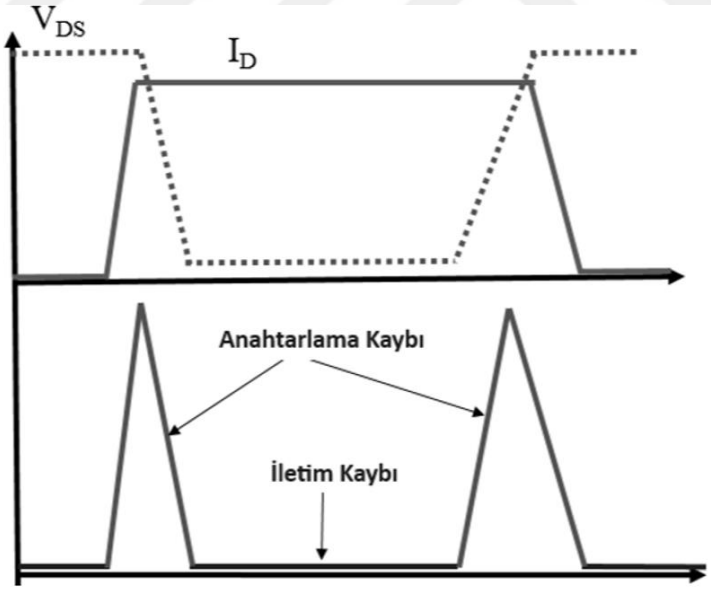
2.4. SiC ve Si Verimlilik Karşılaştırması

Bu çalışmada kullanılacak SiC MOSFET'in muadil bir Si IGBT ile olan performans ve işlevsellik kıyaslaması bu bölümde incelenecektir. İki teknoloji arasında kıyaslamanın uygun şartlarda yapılması için hem SiC MOSFET hem de Si IGBT modülleri benzer güç değeri ve paket yapılarına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Tablo 2.2, üreticilerin teknik veri sayfasından alınan SiC MOSFET ile Si IGBT'nin temel elektriksel parametrelerini göstermektedir.

Tablo 2.2. SiC MOSFET ve Si IGBT elektriksel karşılaştırması.

Elektriksel Özellikler	SiC	Si
Gerilim derecesi, V_{DS} ya da V_{CE}	900 V	600 V
Sürekli Akım derecesi, I_D ya da I_C	73 A	80 A
Darbeli Akım derecesi, I_D ya da I_C	200 A	150 A
İletim İç Direnci (I_D=25A), R_{DS} ya da R_{CE}	27 mΩ	52 mΩ

Anahtarlama elemanının kayıpları; anahtarlama, iletim ve gate şarj kayıpları olarak 3 temel başlığa ayrılmıştır. Verimliliği etkileyen ve etkisi en yüksek olan iletim ve anahtarlama kayıplarının birbirleriyle ilişkisi Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil. 2.3. Anahtarlama ve iletim kayıpları ilişkisi.

2.4.1. İletim Kayıpları

İletim kayıpları, anahtar tamamen kapalıyken (iletimdeyken) MOSFETler için drain-source, BTJ ve IGBT tipleri için ise collector-source arasında meydana gelen kayıpları temsil eder. Ohmic bölgede (BJTler için doyum bölgesinde) bu anahtar uçları arasındaki iç direnç değerleri

SiC anahtarlarda çok daha düşük olduğu için iletim kayıpları da aynı oranda düşük olacaktır. İletim kayıpları Eşitlik (1) ile hesaplanabilir [41-43].

$$P_{ON} = I_{0UT}^2 * R_{DS_{ON}} * D \quad (1)$$

SiC ve Si anahtarların iletim kayıplarını kıyaslamak için iki muadil anahtarlama elemanının elektriksel iç direnç değerleri teknik dokümanlarından alınarak Tablo 2.3'teki güç kayıp sonuçları Eşitlik (1) ile elde edilmiştir.

Tablo 2.3. SiC ve Si iletim kayıpları karşılaştırması.

İletim Değişkenleri	**SiC**	**Si**
İletim İç Direnci, R_{DSon}	27 mΩ	52 mΩ
İletim Kaybı (I_{OUT}=25A, +D:50%)	8.44 W	16.25 W

Tablo 2.3'te görüldüğü üzere SiC temelli anahtarlama elemanının Si temelli anahtarlama elemanına göre daha düşük iç dirence sahip olduğu ve dolayısıyla daha verimli iletim imkânı sağladığı çıkarımı yapılmıştır.

2.4.2. Anahtarlama Kayıpları

Anahtarlama kayıpları, anahtar tamamen açık değilken bir diğer ifadeyle ise anahtarın açılma ve kapanma anlarında oluşan kayıpları temsil eder. Açılma ve kapanma anlarında iletim iç direnci artacaktır ve bunun sonucunda anahtar üzerinde düşen gerilim de artacaktır. Açılma ve kapanma süreleri SiC anahtarlarda çok daha düşük olduğu için iç direncin yüksek olduğu bu anlardaki anahtarlama kayıpları da aynı oranda düşük olacaktır. Anahtarlama kayıpları Eşitlik (2) ile hesaplanabilir [41-44].

$$P_{SW} = \left({}^{1}/_{2}\right) * V_{DD} * I_{OUT} * \left(t_r + t_f\right) * f_{SW} \quad (2)$$

Anahtarlama kayıpları için iki muadil SiC ve Si anahtarlama elemanının açma-kapama özellikleri teknik dokümanlarından alınarak Tablo 2.4'teki güç kayıp sonuçları Eşitlik (2) ile elde edilmiştir.

Tablo 2.4. SiC ve Si anahtarlama kayıpları karşılaştırması.

Anahtarlama Değişkenleri		**SiC**	**Si**
Açılma Süreleri	Gecikme Süresi, $t_{d(on)}$	9 ns	27 ns
	Yükselme Süresi, t_r	15 ns	35 ns
	Toplam Süre, t_{on}	24 ns	62 ns
	Gerekli Enerji, E_{on}	133 uJ	1200 uJ
Kapanma Süreleri	Gecikme Süresi, $t_{d(off)}$	24 ns	350 ns
	İniş Süresi, t_f	9 ns	50 ns
	Toplam Süre, t_{off}	33 ns	400 ns
	Gerekli Enerji, E_{off}	111 uJ	1400 uJ
V_{DD}=500V I_{OUT}=2A	Anahtarlama Kaybı (10 kHz için)	120 mW	425 mW
	Anahtarlama Kaybı (1 MHz için)	12 W	42.5 W

Tablo 2.4'te görüldüğü üzere SiC temelli anahtarlama elemanının Si temelli anahtarlama elemanına göre daha düşük açılma-kapanma sürelerine sahip olduğu ve dolayısıyla da daha verimli anahtarlama imkanı sağladığı çıkarımı yapılmıştır.

2.4.3. Gate Şarj Kayıpları

Gate doldurma kayıpları, anahtarların yarı iletken yapıları nedeniyle sahip oldukları parasitik kapasitanslarından ötürü şarj olarak açılması sırasındaki enerji tüketiminin neden olduğu kayıpları temsil eder. Bu parasitik kapasitelerin sığa değeri SiC anahtarlarda çok daha düşük olduğu ve anahtarlar daha düşük enerji ile açılabileceği için gate doldurma kayıpları da aynı oranda düşük olacaktır. Gate doldurma kayıpları Eşitlik (3) ile hesaplanabilir [41, 42].

$$P_G = (1/2) * Q_G * V_{GS} * f_{SW} \tag{3}$$

Gate şarj kayıpları için iki muadil SiC ve Si anahtarlama elemanının içsel parasitik kapasitans sığa değerleri teknik dokümanlarından alınarak Tablo 2.5'teki güç kayıp sonuçları Eşitlik (3) ile elde edilmiştir.

Tablo 2.5. SiC ve Si Gate şarj kayıpları karşılaştırması.

Gate Şarjı Değişkenleri	**SiC**	**Si**
Gate Kapasitesi Şarj Değeri, Q_G	74 nC	310 nC
Gate Şarj Kaybı (10kHz ve 15V_{GS} için)	5.55 mW	23.23 mW
Gate Şarj Kaybı (1MHz ve 15V_{GS} için)	555 mW	2.323 W

Tablo 2.5'te bu iki eleman, anahtarlamanın yapılması için harcadıkları gate şarj güçleri açısından kıyaslanmıştır ve SiC temelli elemanın daha düşük güç tüketerek açılabildiği ispatlanmıştır.

2.4.4. Kayıpların Verimliliğe Etkisi

Anahtarlama ve iletim kayıpları, bara gerilimi denen anahtarlanacak olan yüksek gerilim girişinden çekilen gücü arttırır ve verimlilik hesabı için bu kayıp değerleri kullanılırken, gate doldurma kayıpları ise bu verimi etkilemez. Bu çalışmada SiC temelli anahtarlar kullanılacağı için gate doldurma kayıpları da Si anahtarlara göre oldukça düşüktür ve "Kelvin Source" bağlantı arayüzüne sahip MOSFETler bu çalışmada kullanılarak doldurma kayıpları düşürülmüştür. SiC anahtarların Si anahtarlara göre çok daha kolay açılabilmesi daha düşük kontrol gücü tüketimi sağlarken daha az yaygın bir sürme yapısı tasarımı gerektirir, bu çalışmada ileriki bölümlerde SiC anahtarlar için gerekli bu sürme mantığı da irdelenecektir.

3. MOTOR SÜRÜCÜLER VE YÜKSELTEÇLER

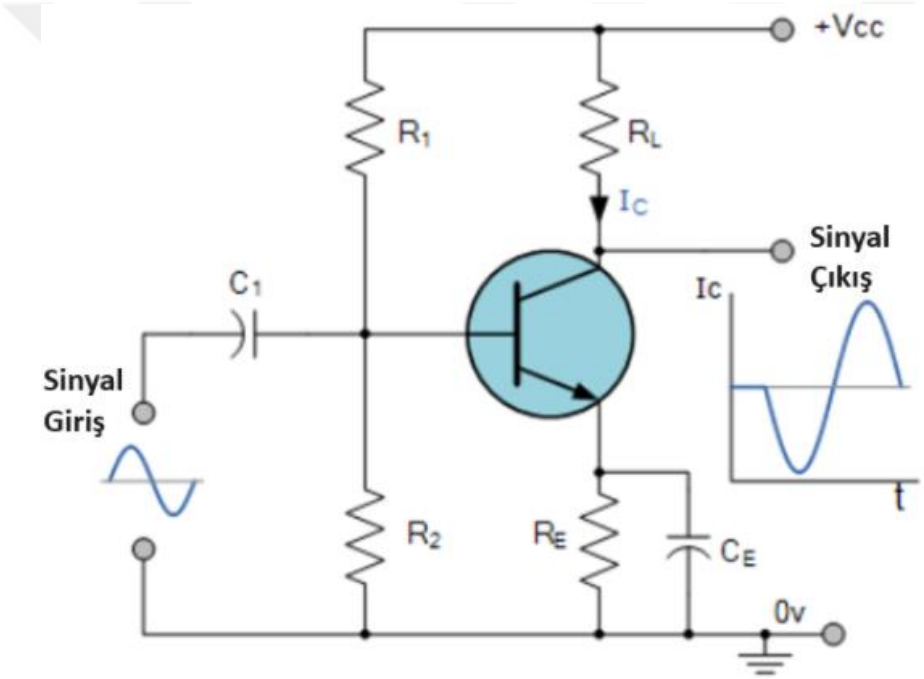
3.1. Giriş

Bu bölümde yükselteç tipleri ve özellikleri hakkında kıyaslamalar yapılarak motor sürücü uygulamaları için gerçeklenebilecek en uygun güç yükselteci yapısı ortaya konacaktır.

3.2. Mantığı ve Sınıfları

Yükselteçler, kullanılan anahtarlama elemanlarının sayısına, tipine, hangi kurguda ve nasıl sürüldüklerine göre sınıflara ayrılır. A, B, AB ve D sınıfları en yaygın olanlardır.

3.2.1. A-Sınıfı Yükselteçler

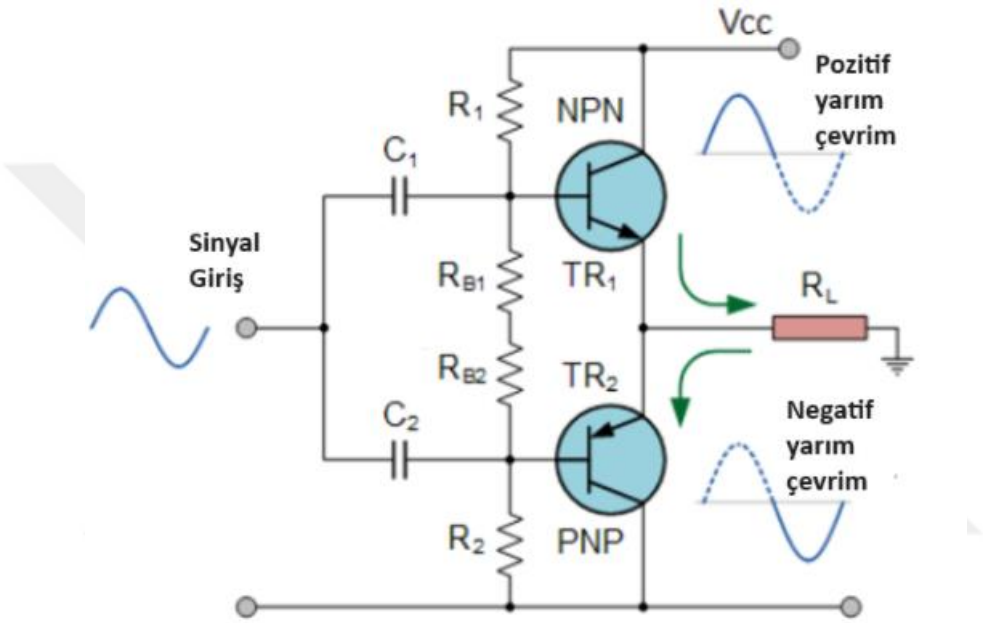


Şekil 3.1. A-Sınıfı yükselteç yapısı [45].

Genele bakıldığında en yaygın kullanılan güç yükselteci konfigürasyonu olan A-Sınıfı yükseltecin yapısı Şekil 3.1'de görülmektedir. A-Sınıfı yükselteçler, ters çevrilmiş bir çıkış üretmek için standart ortak emitör devre konfigürasyonunda tek bir anahtarlama transistörü kullanan güç yükselteçlerinin en basit şeklidir. Transistör her zaman iletim konumundadır, böylece giriş sinyali dalga biçiminin bir tam döngüsü boyunca iletilir ve böylece dalga formunda bozulma (distorsiyon) olmadan çıkış en yüksek genlikte üretilir. Bu, A-Sınıfı yükselteç konfigürasyonunun ideal çalışma şekli olduğu anlamına gelir, çünkü döngünün negatif yarısı sırasında dahi çıkış dalga biçiminde herhangi bir geçiş veya kapanma bozulması

olmaz. A-Sınıfı güç yükselteci çıkış aşamaları, tek bir güç transistörü veya yüksek yük akımını paylaşmak için birbirine bağlı transistör çiftleri kullanabilir. A-Sınıfı yükselteç devreleri DC güç kaynağından çekilen yüksek akımların karşılığında küçük çıkış genlikleri sağlar ve hiçbir giriş sinyali uygulanmadığında dahi aynı yük akımını çeker. Dolayısıyla verimliliği çok düşüktür. (%30'dan az) [45] Genellikle radyo alıcıları gibi düşük sinyal uygulamalarında kullanılırlar.

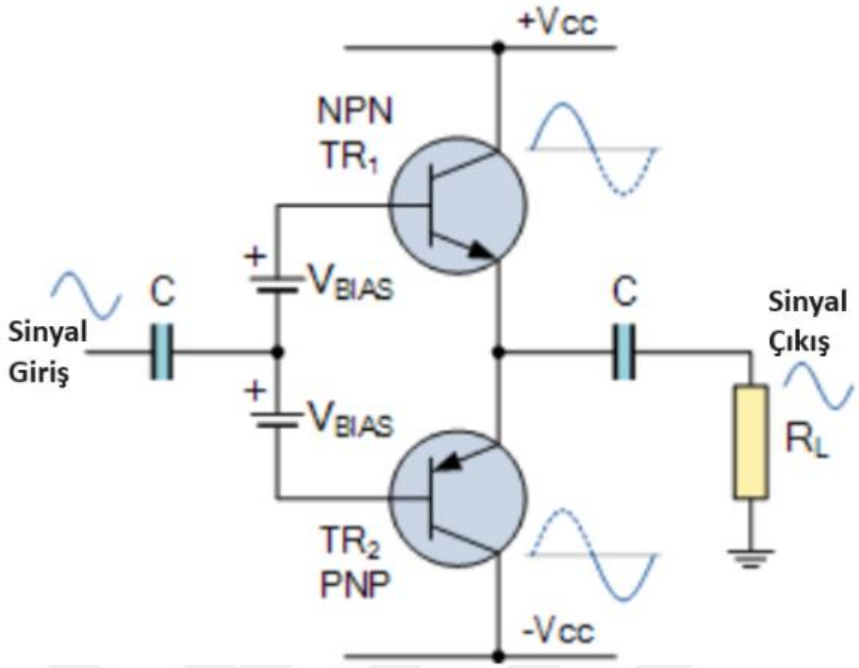
3.2.2. B-Sınıfı Yükselteçler



Şekil 3.2. B-Sınıfı yükselteç yapısı [46].

Önceki A-Sınıfı yükselteçlerdeki tam güç verimliliğini artırmak için ısı şeklinde boşa harcanan gücü azaltarak güç amplifikatörü devresini çıkış aşamasında iki transistörle tasarlamak mümkündür. Bu, genellikle B-Sınıfı yükselteç olarak adlandırılan ve aynı zamanda "push-pull" yükselteç konfigürasyonu olarak da bilinen yapıyı oluşturur. B-Sınıfı yükselteçler, buradaki tek transistörü "push-pull" düzeni olarak adlandırılan iki transistörle değiştirerek her çıkış aşamasının iş yükünü hafifletir. Bir transistör, sinyalin AC dalga formunun negatif alternansını güçlendirir, diğeri ise pozitif voltajla ilgilenir ve ardından ikisi birleşik bir çıkışta birleştirilir. Her transistör zamanın yarısında açık, diğer yarısında kapalıdır. B Sınıfı yükselteçler, A Sınıfı yükselteçlerden çok daha verimlidir, (%50'den fazla) ancak iki transistör açılıp kapandıkça sinyalde bozulma üretilir. Bu çapraz bozulma o kadar kötü ki, herhangi bir üreticinin saf B-Sınıfı tasarımlı bir yükselteç sunması veya üretmesi çok zordur [47]. B-sınıfı yükselteç devre yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir.

3.2.3. AB-Sınıfı Yükselteçler

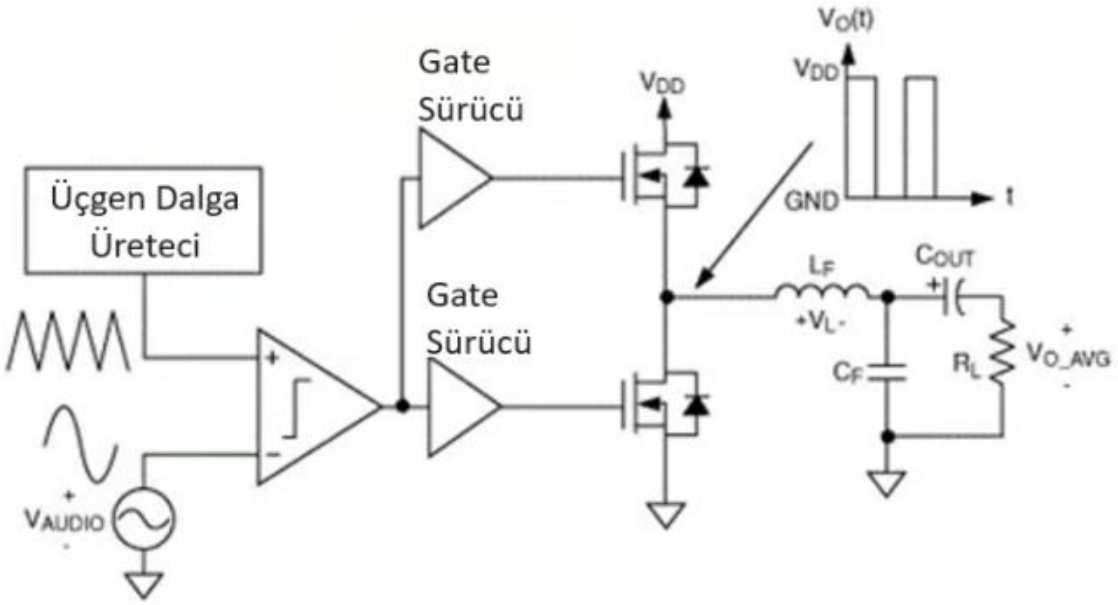


Şekil 3.3. AB-Sınıfı yükselteç yapısı [48].

AB-Sınıfı bir yükselteçlerdeki "push-pull" çıkış transistör çiftinin her biri zamanın yarısından fazlasında açıktır (A-Sınıfında periyodun tamamında veya B-Sınıfında periyodun yarısında olduğu gibi değil) ve aniden açılıp kapanmazlar. Bu, yükselteçteki sinyal düşük güçte olduğunda ve her iki transistör üzerinden iletildiğinde A-Sınıfı yükseltecin ve güç yüksek olduğunda ise B-Sınıfı yükseltecin özelliklerini verir. Şekil 3.3'te temel yapısı görülebilen bu tasarımın sonucu, AB-Sınıfı yükselteçlerin A-Sınıfı yükselteçlerden çok daha yüksek verime (%60'a kadar) ve B-Sınıfı yükselteçlerden ise çok daha az bozulmaya sahip olmasıdır. Çoğu ev-araba ses sistemlerindeki ses yükselteci AB-sınıfıdır. Son yıllara kadar yüksek kaliteli, tam aralıklı yükseltme işlemi elde etmek için AB-Sınıfı yükselteçleri kullanmak tek pratik seçimdi, ancak şimdi D-Sınıfı yükselteçler üretiliyor [47].

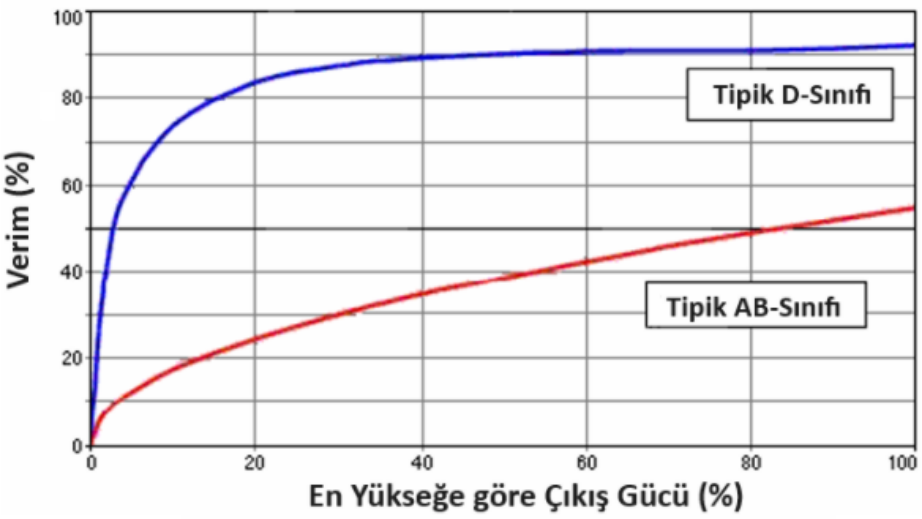
3.2.4. D-Sınıfı Yükselteçler

D-Sınıfı yükselteç veya anahtarlama yükselteci, diğer yükselteçlerdeki gibi doğrusal kazanç olarak değil, elektronik anahtarlar olarak çalıştığı bir yükselteç tipidir. Darbe genişliği modülasyonu teknikleri kullanarak bir darbe dizisi çıkışı üretmek için besleme hatları arasında hızlı bir şekilde ileri-geri geçiş yaparak çalışırlar. Ses yükselteci uygulamalarında analog çıkışı üretmek amacıyla yüksek frekans içeriğini azaltmak için basit bir alçak geçiren filtre kullanılabilir. Bu yapı Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. D-Sınıfı yükselteç yapısı [49].

Yükseltme işleminde kullanılacak anahtarlama elemanlarında çok düşük enerji harcanır çünkü bunlar her zaman tamamen açık veya tamamen kapalıdır, dolayısıyla verimlilik çok yüksektir. (%99 üstüne kadar) D-Sınıfı yükselteçlerin, önceki bölümde işlenen AB-sınıfı yükselteçlerle olan bir verimlilik kıyası grafi Şekil 3.5'te görülmektedir. Bu tip yükselteçlerdeki anahtarlama elemanlarında harcanan gücün detayları bölüm-2.4'te incelenmişti ve SiC anahtarların üstünlükleri ortaya konmuştu. Bu çalışmada SiC temelli bir D-Sınıfı güç yükselteci H-Köprüsü yapısıyla kullanılacaktır. Bu bölümde işlenen yükselteçler hakkındaki kıyaslama ise Tablo 3.1'e eklenmiştir.



Şekil 3.5. AB-Sınıfı yükselteçler ile D-Sınıfı yükselteçlerin verimlilik kıyası [50].

Tablo 3.1. Yükselteçlerin nitelik karşılaştırması.

Yükselteç Sınıfı	Nitelik
A-Sınıfı	Çok düşük verim, çok yüksek doğruluk
B-Sınıfı	Yüksek verim, düşük doğruluk
AB-Sınıfı	Yüksek verim, yüksek doğruluk
D-Sınıfı	Çok yüksek verim, çok yüksek doğruluk

4. SÜRÜCÜ TASARIM SÜRECİ

4.1. Giriş

Güç yükselteci temelde, DC baradan (elektrik araçlar için pilden) aldığı yüksek gerilimi kontrol yapısıyla birlikte anahtarlayarak istenilen güçte yüke (elektrik araçlar için motora) aktarmak için kullanılır. Bu işlemin gerçeklendiği devre katları ve diğer tüm alt devre yapıları bu bölümde incelenecektir.

4.2. Donanın Gereksinim Özellikleri

SiC katkı teknolojisini kullanan anahtarlama elamanı olarak kullanılacak MOSFET'in verimlilik açısından üstünlükleri ve kullanılacağı D-Sınıfı yükselteç yapısının diğer sınıflarla kıyaslanması önceki bölümlerde incelendikten sonra, motor sürücü uygulamaları için uygun yüksek verimli güç yükselteci tasarımı bu bölümde adım adım işlenecektir. H-köprüsü topolojisi kullanarak tasarlanacak bu devre yapısı, direkt olarak motor sürücüsü olarak adlandırılabileceği gibi güç yükselteci ya da DC/AC evirici olarak da adlandırabilir. Bu çalışmada bu yapı güç yükselteci olarak adlandırılacaktır.

Tablo 4.1. Donanım gereksinim özellikleri.

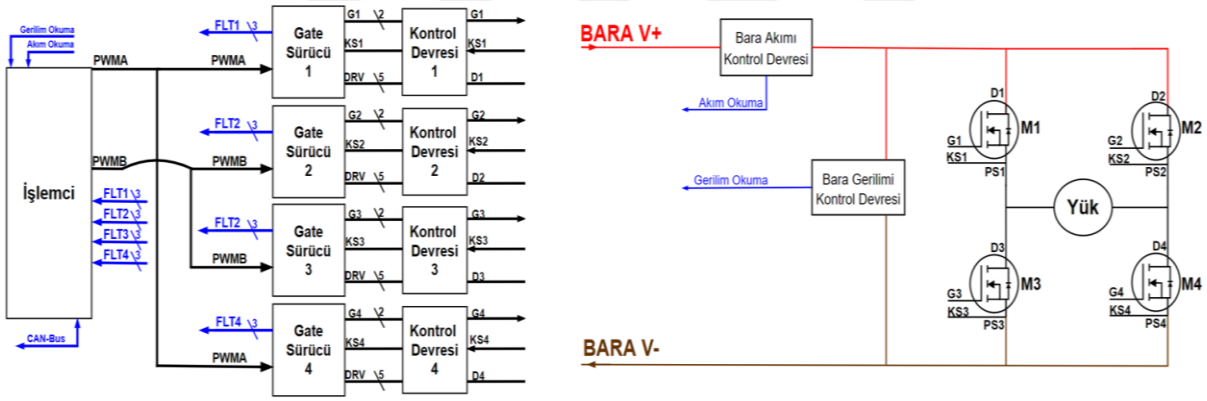
Donanım Gereksinim Özelliği	**Nitelik**
Uygulama	Güç yükselteci
Çevrim türü	DC/AC
Kullanım	Motor sürücüler
Yükselteç sınıfı	D-Sınıfı
Devre topolojisi	H-köprüsü
Faz sayısı	Tek faz
Yarı iletken teknolojisi	SiC
Anahtarlama gerilim dayanımı	$900V_{DSmax}$
İletim akım dayanımı	73A I_D
Verim	>%98
Sürme gerilimi	-4/+15 V_{GSop}
Besleme sayısı	2 ($24V_{DC}$, 0-$500V_{DC}$)
Kontrolcü tipi	32 bit MCU
Soğutma tipi	Pasif

Bu çalışmada tek fazlı bir motor sürücünün tasarımı hedeflenmiştir. Mikrodenetleyici (MCU) ile üretilen kontrol sinyalleri (ya da haricen dışarıdan uygulanabilen) ile yüksek bara gerilimi H-köprüsünde sürülerek yüke aktarılır. Anahtarlama sırasındaki bara akım ve gerilim seviyeleri aynı denetleyici ile okunarak üst birimlere iletilir. Benzer şekilde, anahtarlama sırasında

oluşabilecek hatalar, kontrol yapısı ile yakalanarak denetleyici ile okunur. Bu çalışmada, hedeflenen yüksek verimli güç yükseltecinin tüm tasarım adımları ele alınacaktır. İlk olarak devre yapısının tüm donanım gereksinim özellikleri (DGÖ) belirlenecek olup akabinde ise bu doğrultuda ortaya çıkartılacak ürünün tüm donanım tasarım tanımı (DTT) detaylıca ortaya konulacaktır. İsterlerin doğrulanması benzetimler, teorik hesaplar ve deneysel ölçümler üzerinden kıyaslanarak sağlanacak ve tüm yapı üretime hazır hale getirilecektir. Tasarımı gerçekleştirilecek güç yükselteci yapısının tüm temel donanın gereksinim özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

4.3. Donanım Tasarım Aşamaları

Donanım gereksinim özellikleri belirlenen güç yükselteci yapısının donanım tasarım tanımı ise bu bölümde ele alınmıştır. Baskı devre kartı (BDK) üretimi yapılacak tüm yapının blok diyagramı Şekil 4.1'deki gibidir. Blok diyagramda alt devre olarak görülen kontrol ve sürme yapılarının detayları bu bölümde irdelenecektir.



Şekil 4.1. Güç yükselteci tasarımının blok diyagramı.

Üretimi yapılacak olan güç yükselteci yapısı, aldığı kontrol sinyaliyle aldığı yüksek voltaj bara gerilimini yüksek verimle modüle ederek yüke aktarmak üzerine kurgulanmıştır. Bu DC/AC evirme çevrimi, D-sınıfı ve tek fazlı H-köprüsü devre topolojisi kullanılarak gerçeklenmiştir. Bara gerilimi $0V_{DC}$-$500V_{DC}$ arasında yüksek voltaj güç kaynağından (YVGK) sağlanarak değiştirilebilmektedir. YVGK'den sağlanan bu seviye, motor sürücü uygulamalarındaki pil çıkış genliğinin bu çalışmadaki benzetimi için kullanılır. Kontrol ve sürücü katlarındaki devre yapılarının besleme gerilimlerini ise sabit $24V_{DC}$ düşük voltaj güç kaynağı (DVGK) sağlamaktadır.

Kart üzerinde temel olarak bulunan alt devreler; Analog sinyal üretme yapıları, Gate sürücü devreleri, H-köprüsü, kontrol yapıları ve MCU temelli ölçüm devreleridir. D-Sınıfı yükselteç yapısını oluşturmak için 4 adet SiC MOSFET ile H-köprüsü tasarlanmıştır. Kelvin Source bağlantısına sahip bu MOSFETler izoleli şekilde 4 adet Gate sürücü tüm devresi ile sürülmektedir. Aşırı akım ve sürme hatası gibi bildirimler üretebilen bu Gate sürücüler ise kart üzerindeki mikrodenetleyici tarafından üretilen ya da opsiyonel olarak dışarıdan verilebilen kontrol sinyalleriyle sürülmektedir. Ayrıca, analog olarak SPWM kontrol sinyali üretimi sağlanabilmekte ve bu modülasyonla birlikte de H-köprüsü sürülebilmektedir. Eviriciyi sürme işlemini gerçekleştirecek modülasyon sinyalleri haricinde çıkışın üretilmesini sağlayan bir de aktifleştirme sinyali (EN sinyali) güvenlik ve ek bir kontrol amacıyla kullanılacaktır. Kart üzerindeki MCU, Gate sürücülerden aldığı bildirimleri ve bara akım-gerilim ölçümlerini yapan alt devrelerden aldığı çıkışları kontrol etmektedir. MCU yazılımıyla sağlanan hata durumu kontrolleri dışında sigortalar ile de koruma sağlanmıştır. $500V_{DC}$ YVGK ve $24V_{DC}$ DVGK çıkışı için birer adet hızlı koruma sigortası kart üzerinde bulunmaktadır.

4.3.1. H-Köprüsü

Güç yükselteci kartındaki yüksek gerilim modülasyonun sağlanacağı anahtarlama katı bu bölümdür ve tüm kayıplar (bu makaleye konu olan kayıplar: iletim ve anahtarlama kayıpları) bu blokta oluşacaktır. Tek fazlı olarak kullanılacak H-köprüsü bloğundaki bu anahtarlama elemanları 4 adet olarak, yüksek güçlerde ve hızlarda yüksek verim kaygısıyla belirlenen gereksinimler sonucunda Cree firmasına ait SiC MOSFETlerden seçilmiştir. $900V_{DC}$'ye kadar anahtarlama yapabilen ve 200A'ya kadar darbeli akım sürebilen bu anahtarların iletim iç direnci 27mΩ seviyelerine kadar düşebilmektedir. Kelvin Source bağlantısına da sahip bu elemanlar bu çalışmadaki yüksek verimli yükselteç tasarımının temelini oluşturmaktadır.

4.3.2. Kontrol Sinyalleri

H-köprüsü yapısının tüm elektriksel kontrollerini sağlayacak blok bu bölümdedir. Kontrol sinyalleri anahtarlamanın seviyelerini ve hızını belirlemekle birlikte çıkış gücünde ve kayıpların yönetiminde doğrudan etkilidir. Bu sinyaller kart üzerindeki 32-bitlik denetleyici ile üretilmekte veya yine kart üzerinde analog olarak üretilebilen SPWM sinyalleri ile H-köprüsü kontrol edilebilmekle birlikte, dışarıdan harici olarak birbirinin tamamlayanı iki PWM (complementary PWM) şeklinde de sağlanabilmektedir.

4.3.3. Gate Sürücü

H-köprüsü ile kontrol sinyalleri arasındaki yapıyı oluşturur. Kontrol sinyallerini izoleli şekilde köprüdeki anahtarlara iletir ve MOSFETlerin Gate kontrollerini sağlar. Optokuplör prensibiyle çalışan bu sürücüler, Gate şarjı için zayıf olan kontrol sinyallerini akım yükselteci işleviyle yükseltmiş de olur. Piyasadaki en işlevli Gate sürücülerden birisi olarak seçilen bu entegre devre, dahili olarak aşırı akım ve Gate korumaları gibi ölçümler de alarak çıkış üretebilmektedir ve bu çıkışlar kart üzerindeki denetleyici ile okunmaktadır.

4.3.4. Ölçümler ve Korumalar

Güç yükselteci kartında bulunan denetleyici ile ölçümler yapılarak korumalar sağlanmaktadır. Bu ölçümler; analog olarak yapılan yük gerilimi-akımı, sayısal olarak yapılan bara gerilimi-akımı, Gate düşük gerilim, Gate durum kontrolü ve anahtar aşırı akımı ölçümleri şeklindedir. Bu okumalar sonucunda kontrol sinyalleri modülasyonu kontrol edilmekte ve güç yönetimi sağlanmaktadır.

4.3.5. Enerji Beslemeleri

H-köprüsü yapısının bara anahtarlama gerilimini sağlayacak olan YVGK $0V_{DC}$-$500V_{DC}$ arasındadır ve diğer devre katlarındaki besleme sinyallerini oluşturacak dönüştürücülerin kaynağını ise sabit $24V_{DC}$ DVGK sağlamaktadır. DVGK'den alınan $24V_{DC}$ besleme, kart üzerinde $3.3V_{DC}$, $5V_{DC}$, $-5V_{DC}$ ve izoleli-$3.3V_{DC}$ ile $15V_{DC}$ seviyelerinin oluşturulması için kullanılır.

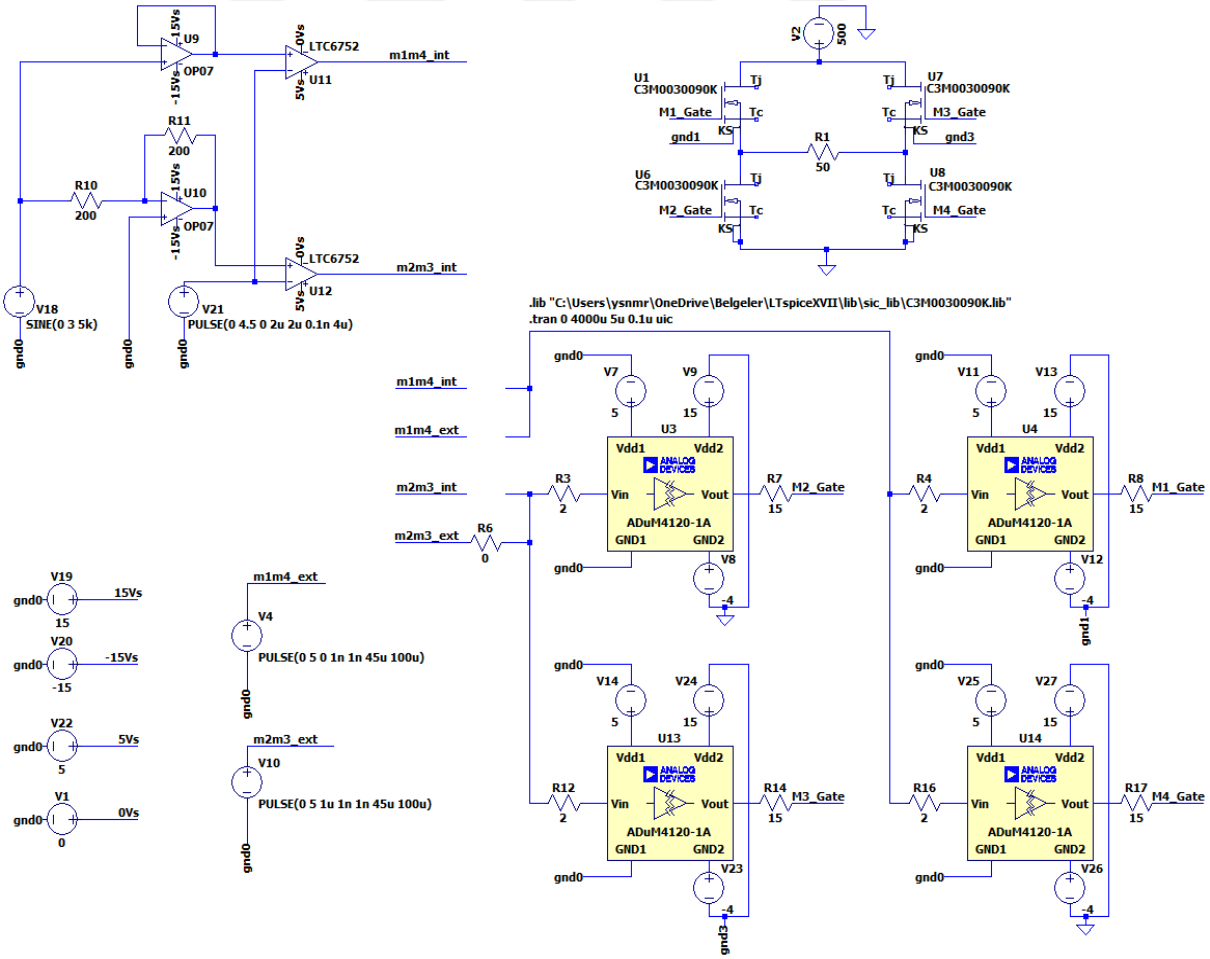
5. BENZETİM VE TEORİK SONUÇLAR

5.1. Giriş

Bu bölümde güç yükselteç yapısının LTSpice ortamında simülasyonu ve analizi gerçekleştirilecektir. Benzetim şematiğinin tasarımı, nihai tasarımı bire bir uygulamak yerine verimlilik hesaplarının yapılabilmesini sağlamak ve Spice işlemlerini hızlandırmak maksadıyla genelleştirilerek uygulanmıştır.

5.2. Benzetim Şematiği Tasarımı

Verimlilik hesaplarının yapılacağı H-köprüsü katındaki SiC MOSFET anahtarlar birebir Spice modelleri alınarak benzetim ortamına girilirken, Gate sürücü ve kontrol katları genelleştirilmiştir. Bu gereksinimler neticesinde ortaya çıkan benzetim şematiği Şekil 5.1'de verilmiştir.



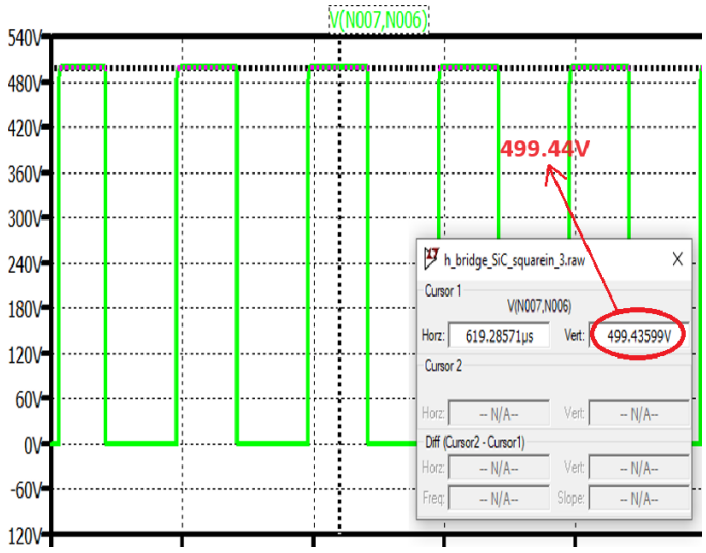
Şekil 5.1. SiC temelli güç yükselteci benzetimi şematiği.

H-köprüsündeki her bir anahtar (U1, U6, U7 ve U8) izole şekilde Gate sürücüler (U3, U4, U13 ve U14) tarafından sürülmektedir. Gate sürücülerin kontrol sinyalleri analog SPWM olarak kart üzerinden dahili olarak ya da denetleyici çıkışlarından sağlanabilmekle birlikte, dışarıdan harici olarak birbirinin tamamlayanı iki PWM (complementary PWM) şeklinde de uygulanabilmektedir. Pratikteki deneysel testlerde birbirini tamamlayan iki PWM %45 pozitif çevrim oranıyla dışarıdan uygulanarak anahtarlama yapılacağı için benzetimde de bu koşullar izlenmiştir.

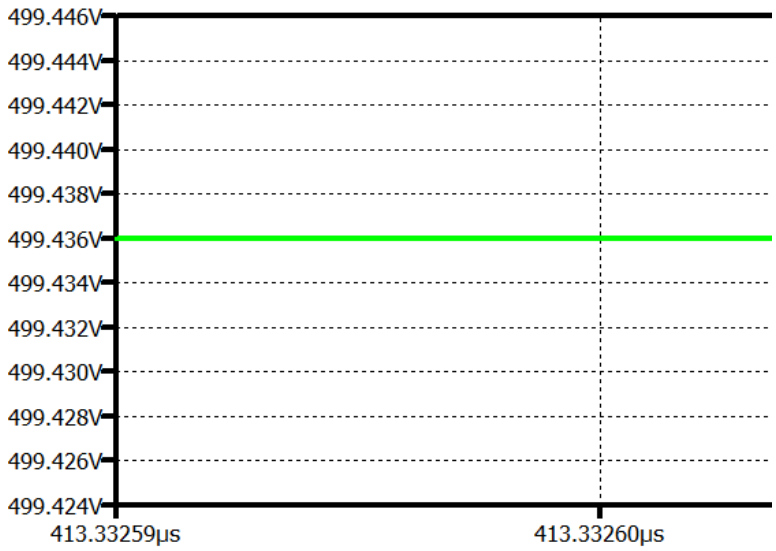
Gate sürücülere 0-5V lojik seviyelerinde PWM uygulanırken, Gate sürücü çıkışları ise -4V ve 15V seviyelerinde PWM şeklindedir. Benzetim şematiğinin tüm tasarım detayları Donanım Tasarım Tanımı başlığı altında verilmişti, bu bölümde ise benzetimi yapılan güç yükseltecinin kayıpları için Spice ölçümleri ve teorik hesapları kıyaslanacaktır. Tüm bu benzetim ve teorik kıyaslamalar ve ileriki bölümde paylaşılacak olan deneysel ölçümler 50Ω rezistif yük ile $500V_{DC}$ bara gerilimi kullanılarak tamamlanmıştır. Anahtarlama frekansı 10kHz ve pozitif darbe periyot oranı ise %45'tir.

5.3. İletim Kayıpları

İletim kayıpları konusunda anahtarın iç direnci kritik öneme sahiptir ve bu noktadaki potansiyel düşüm, iletim sırasındaki güç kaybını veriyordu. Yük üzerinden (şematikte R1 uçları) alınan potansiyelin iletim sırasındaki seviyesinin $499.44V_{DC}$ olduğu Şekil 5.2'de ve yakından olarak ise Şekil 5.3'te görülmektedir. Tüm LTSpice çıktı görsellerinin en boy oranlarında okunabilirliği arttırmak maksadıyla düzenleme yapılmıştır.



Şekil 5.2. Çıkış yükü gerilimi benzetim ölçümü.

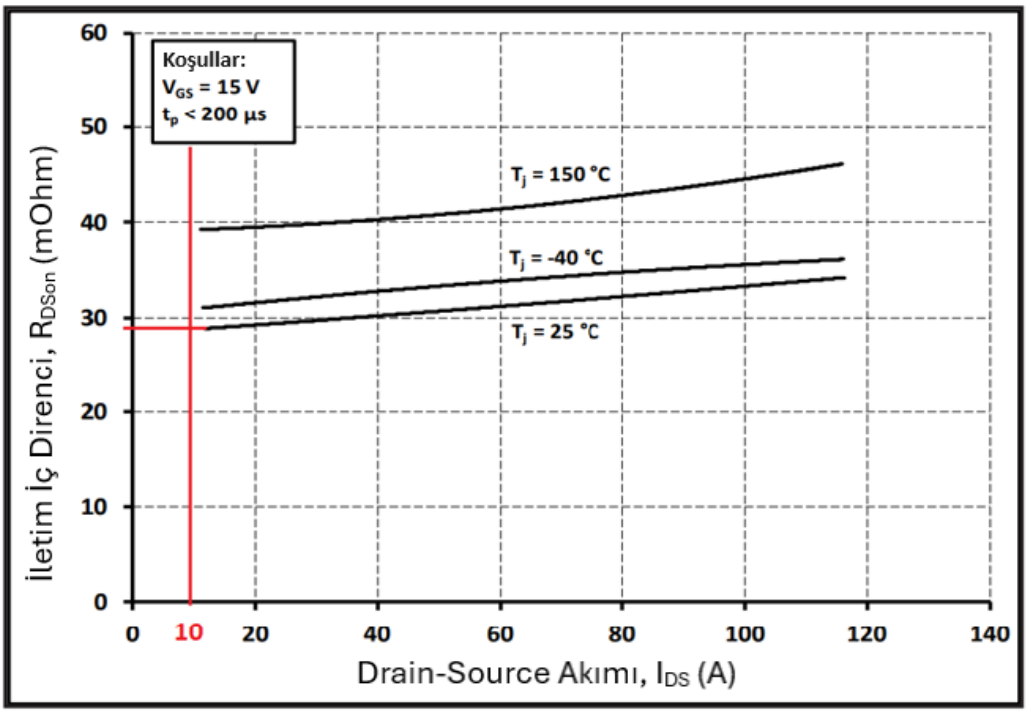


Şekil. 5.3. Çıkış yükü gerilimi benzetim ölçümü (yakından).

İletim sırasında yükten ve anahtarlardan geçen (bu benzetimde barayı sağlayan YVGK'den de çekilen) akımın seviyesi ise 9.99A olarak ölçülmüş olup 10A olarak alınacaktır. Bu bağlamda, anahtarlarlar üzerinde düşen gerilim 0.56V (500V-499.44V) olarak ve dolayısıyla tek bir MOSFET'in iç direnci (R_{DSon}) ise 28mΩ ((0.56V/2)/10A) olarak hesaplanır. Bölüm-2.A'da da verilmiş olan Eşitlik (4) ile iletim kayıpları hesaplanabilir. Bu eşitlikte farklı olarak "2" çarpanı, iletim sırasında H-köprüsündeki 2 adet anahtarın toplam kaybını hesaplamak için eklenmiştir.

$$P_{ON} = I_{OUT}^2 * R_{DS_{ON}} * D * 2 \quad (4)$$

Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere (şematikte V10 sinyal üreteci) Gate sürücü darbe periyot oranının 0.45 olarak alındığı durumda ve Spice ölçümleri sonucunda iletim kaybı 2.52W olarak hesaplanır. Aynı kaybın bir de teorik verilerle hesaplanması için gerekli olan R_{DSon} iç direnci, kullanılan SiC MOSFET'in Şekil 5.4'te gözüken grafiği teknik bilgi dokümanından referans alınarak 29mΩ olarak belirlenmiştir. Spice kurgusuyla uyumlanması için teknik bilgi kağıdındaki ilgili grafikte 25 °C T_J sıcaklığı koşulu izlenmiştir. Bu bağlamda iletim kaybı değeri yine Eşitlik (4) kullanılarak 2.61W olarak hesaplanmıştır.



Şekil. 5.4. SiC MOSFET I_{DS}-R_{DSon} üretici grafiği.

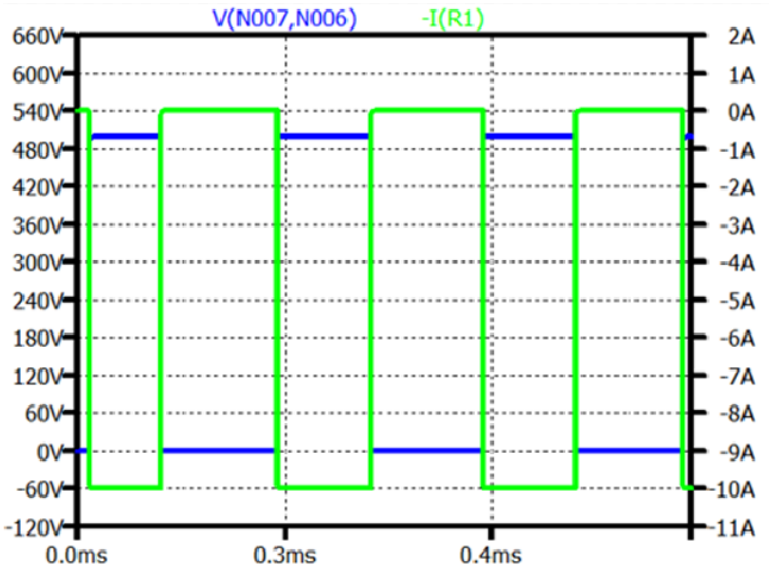
LTspice benzetim ortamında ölçülen iç direnç değeri ve MOSFET üretici dokümanından alınan aynı parametre ile bu değerlerin ayrı ayrı kullanılarak hesaplandığı iletim kayıp değerleri Tablo 5.1.'de paylaşılmıştır. Ölçülen ve referans alınan iç direnç değerlerinin ve bunun sonucunda iletim kayıplarının da uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.1. İletim kaybının benzetim ve teorik karşılaştırması.

	Benzetim	**Teorik**
V_{DS} Düşümü	280 mV	290 mV
İç Direnç	28 mΩ	29 mΩ
İletim Kaybı	2.52 W	2.61 W
Çalışma Koşulları (R_{DSon} için)	500V V_{DD}, 10A I_{DS}, 15V V_{GS}, 25 °C T_J	

5.4. Anahtarlama Kayıpları

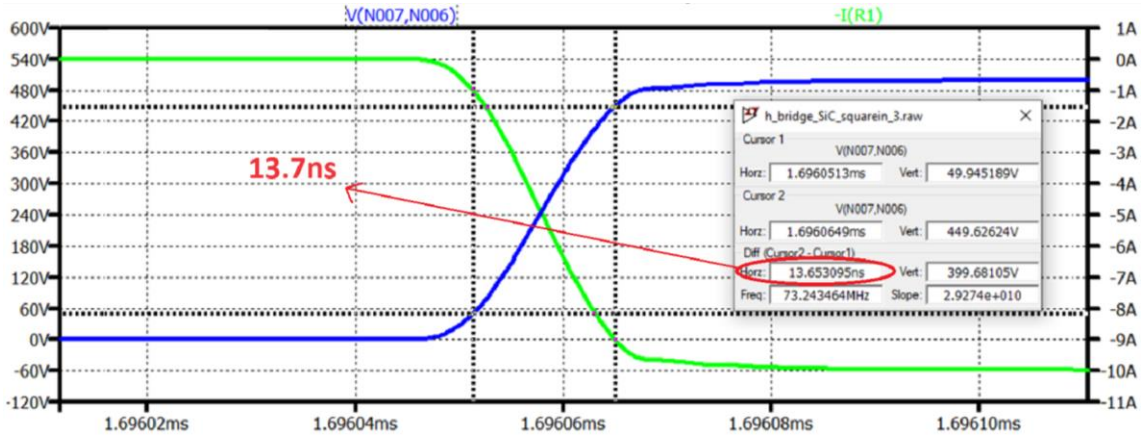
Anahtarlama kayıpları konusunda ise anahtarın açılma/kapanma süreleri kritik öneme sahiptir ve bu anlardaki iletim direncinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu yüzden anahtarın açılma kapanma anlarındaki iletim kaybı, anahtarlama kaybı olarak adlandırılır. Anahtarlama sırasında çıkış sinyalinin gerilim ve akım seviyeleri Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5. Çıkış yükü sinyalleri benzetim ölçümü.

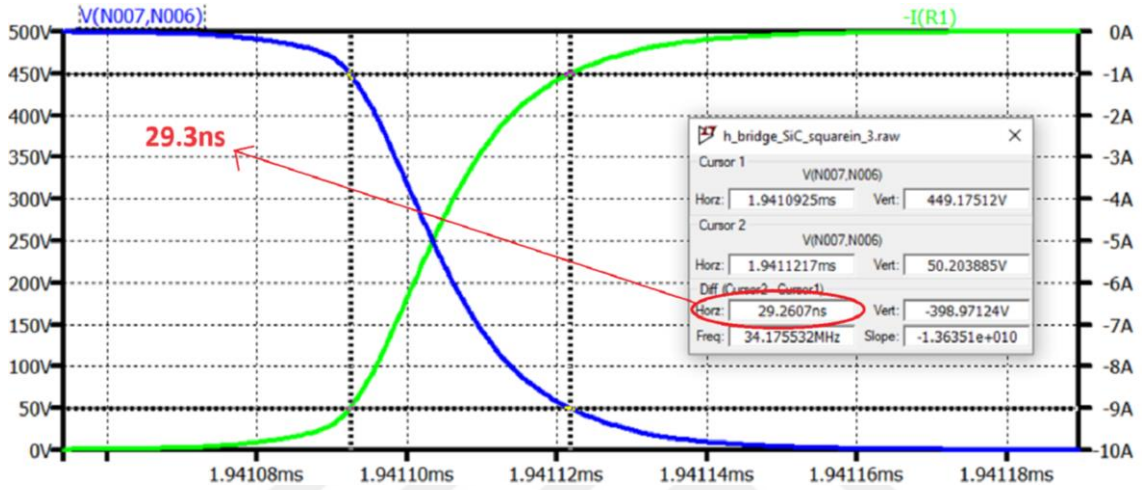
Bu çalışmada anahtarlama elemanı olarak kullanılan SiC MOSFET'in açılma ve kapanma süreleri oldukça düşük olduğu için bu anların Spice değerlerinin yakalanabilmesi için düşük zaman skalasında da (20ns) ölçüm alınmıştır ve Şekil 5.6. ile paylaşılmıştır. Şekildeki mavi sinyal yük üzerindeki gerilimi, yeşil sinyal ise anahtarlardan ve yükten geçen akımı göstermektedir.

Anahtarlar üzerine düşen potansiyelin düştüğü, yük üzerindeki akımın ve gerilim ise yükseldiği anlar iletim anlarıdır ve bunların sürelerini MOSFET'in yükselme (t_r) zamanı doğrudan belirler. Spice ölçümünde okunabilirliğin artması maksadıyla akım ters yönlü ölçülmüştür. Şekil 5.6 ile yakalanan anın, ters yük akımının (-I(R1)) düşmesinden veya yük geriliminin artmasından yükselme ya da iletim anı olduğu anlaşılmaktadır ve bu süre 13.7ns olarak ölçülmüştür. Ölçülen t_r zamanı, yükseliş anının başlangıç seviyesinin %10'undan bitiş seviyesinin ise %90'ına kadar olan süreyi kapsar.



Şekil 5.6. Çıkış yükü sinyalleri iletim anı benzetim ölçümü.

Anahtarlar üzerine düşen potansiyelin arttığı, yük üzerindeki akımın ve gerilim ise düştüğü anlar kesim anlarıdır ve bunların sürelerini MOSFET'in düşme (t_f) zamanı doğrudan belirler. Şekil 5.7. ile yakalanan anın, ters yük akımının (-I(R1)) artmasından veya yük geriliminin düşmesinden iniş ya da kesim anı olduğu anlaşılmaktadır ve bu süre 29.3ns olarak ölçülmüştür. Ölçülen t_f zamanı, iniş anının başlangıç seviyesinin %90'ından bitiş seviyesinin ise %10'una kadar olan süreyi kapsar.

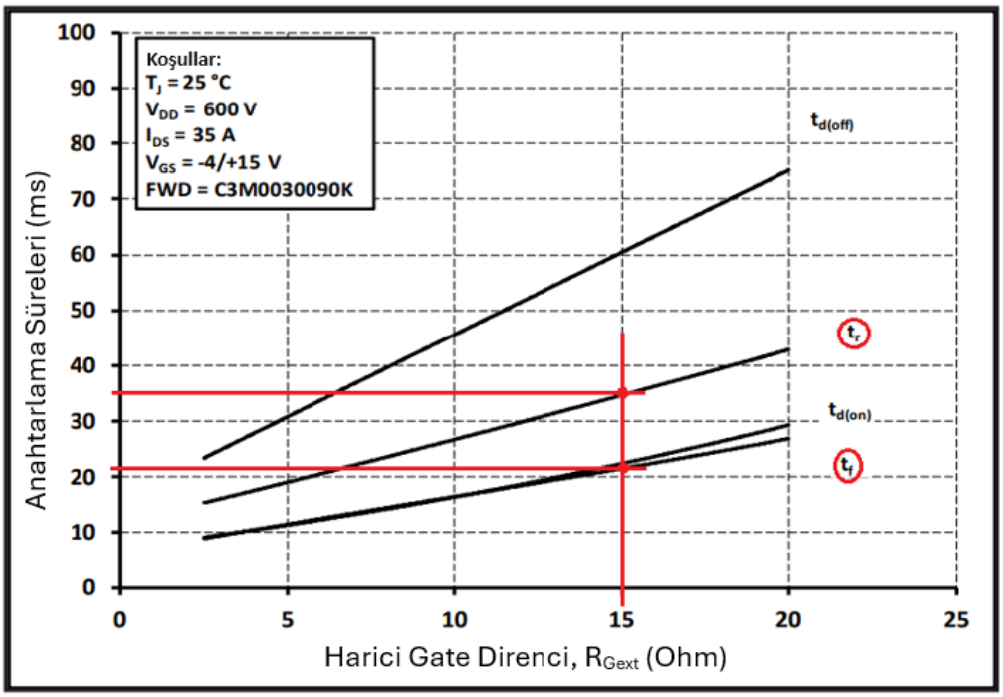


Şekil 5.7. Çıkış yükü sinyalleri kesim anı benzetim ölçümü.

Bölüm-2.B'de de verilmiş olan Eşitlik (5) ile benzetim sonuçlarından alınan süreler kullanılarak anahtarlama kayıpları hesaplanabilir. Bu eşitlikte farklı olarak "2" çarpanı, anahtarlama sırasında H-köprüsündeki 2 adet anahtarın toplam kaybını hesaplamak için eklenmiştir. Bu eşitlikte V_{IN} YVGK bara gerilimi $500V_{DC}$ ve 50Ω yük sonucunda I_{OUT} yük akımı 10A, f_{SW} anahtarlama frekansı ise 10 kHz'dir. MOSFET açma-kapama süreleri olan t_r ve t_f ise benzetim sonuçları olan Şekil 5.6. ve Şekil 5.7. ile belirlenmiştir.

$$P_{SW} = \left({}^{1}/_{2}\right) * V_{DD} * I_{OUT} * \left(t_r + t_f\right) * f_{SW} * 2 \qquad (5)$$

Şekil 5.1'de de görüldüğü üzere (şematikte V10 sinyal üreteci) Gate sürücü kontrol sinyalinin 10 kHz olarak alındığı durumda ve Spice ölçümleri sonucunda anahtarlama kaybı 2.15W olarak hesaplanır. Aynı kaybın bir de teorik verilerle hesaplanması için gerekli olan açma-kapama süreleri t_r ve t_f, kullanılan SiC MOSFET'in Şekil 5.8'de gözüken grafiği teknik bilgi dokümanından referans alınarak sırasıyla 35ns ve 21ns olarak belirlenmiştir ve bu bağlamda anahtarlama kaybı değeri yine Eşitlik (5) kullanılarak 2.8W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8. SiC MOSFET R_{GS} ve anahtarlama süreleri üretici grafiği.

LTspice benzetim ortamında ölçülen açılma ve kapanma süreleri ve MOSFET üretici dokümanından alınan aynı süreler ile bu değerlerin ayrı ayrı kullanılarak hesaplandığı anahtarlama kayıp değerleri Tablo 5.2'de paylaşılmıştır. Anahtarlama kayıplarının uyumlu olduğu gözlenmesine rağmen açılma ve kapanma sürelerinin oldukça farklı sonuçlarda olmasının sebebinin, MOSFET üretici bilgi kağıdında bu ilgili sürelerin bu çalışmadaki koşullardan farklı ortamda ölçülmüş/hesaplanmış olması olarak değerlendirilmiştir. Anahtar üreticisinin test koşulları Şekil 5.8'de gözüküyorken, bu değerlerin bu çalışmadaki yükselteç tasarımının test koşulları ile kıyası ise Tablo 5.2'ye eklenmiştir. Bu çalışmada Gate dış sürme direnci R_G (şematikte R7, R8, R14 ve R17 olarak görülmekte) 15Ω olarak seçildiğinden ötürü teknik bilgi kağıdındaki ilgili grafikte de 15Ω için verilen t_r ve t_f süreleri kullanılarak 2.8W değeri hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. Anahtarlama kaybının benzetim ve teorik karşılaştırması.

	Benzetim	**Teorik**
Açılma Süresi	13.7 ns	35 ns
Kapanma Süresi	29.3 ns	21 ns
Anahtarlama Kaybı	2.15 W	2.8 W
Çalışma Koşulları (Süre değerleri için)	500V V_{DD}, 10A I_{DS}	600V V_{DD}, 35A I_{DS}

5.5. Verimlilik Analizi

Bu makalenin konusunun temeli olan yüksek verimin tüm yapı üzerindeki hesabı yapılmak istendiğinde Eşitlik (6) kullanılabilir. Bu eşitlik, yük üzerinde harcanan gücün kaynaktan çekilen güce oranının hesabından elde edilir. Kaynaktan çekilen güç ile anahtarlar üzerinde harcanan gücün farkı yük üzerindeki gücü verir ve anahtarlar üzerinde harcanan güçler toplamı ise önceki kısımlarda irdelediğimiz iletim ve anahtarlama kayıpları toplamıdır.

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{OUT} * I_{OUT}}{V_{IN} * I_{IN}} = \frac{V_{OUT} * I_{OUT}}{V_{DD} * \sqrt{D} * I_{IN}} \quad (6)$$

Eşitlik (6) için kullanılacak değişkenlerin LTSpice benzetim ortamında elde edilen değerleri (V_{OUT}: 333.44V_{RMS}, I_{OUT}: 6.6888A_{RMS}, I_{IN}: 6.6892A_{RMS}) yerine koyulduğunda, verim %99.406 olarak hesaplanır. Bu verimin bir de teorik verilerle hesaplanması istendiğinde yine bu bölümde hesaplanmış olan ve Tablo 5.2. ile Tablo 5.3.'te görülebilen kayıp değerleri kullanılabilir. Bu değerler toplamı anahtarlar üzerinde harcanan gücü ve yine bu değerlerin YVGK'den çekilen güçten farkı ise çıkış gücünü verir. Sonucun giriş gücüne bölümü ise Eşitlik (6)'daki gibi verimi hesaplatmış olur. Bu bağlamda toplam verim değeri yine Eşitlik (6) kullanılarak %99.760 olarak hesaplanmıştır. LTspice benzetim ortamında ölçülen giriş/çıkış güçleri ve MOSFET üretici dokümanından alınan değerler üzerinden hesaplanan kayıplar ile bu sonuçların ayrı ayrı kullanılarak hesaplandığı verim değerleri Tablo 5.3'te paylaşılmıştır. Ölçülen ve referans alınan değerlerin ve bunun sonucunda verimin de uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.3. Toplam verimin benzetim ve teorik karşılaştırması.

	Benzetim	**Teorik**
Giriş Gücü	2243.63 W	2250 W
Çıkış Gücü	2230.31 W	2244.59 W
Verim	%99.406	%99.760

6. DENEYSEL TESTLER VE SONUÇLAR

6.1. Giriş

Teorik hesapları ve benzetim sonuçları önceki bölümde adım adım irdelenen yüksek verimli yükselteç tasarımının bu bölümde ise tasarımı gerçekleştirilen kartın deneysel testleri yapılmış ve işlevsellik sonuçları değerlendirilmiştir.

6.2. Test Ortamı Bileşenleri

Tasarımı gerçekleştirilen kartın tüm testleri Şekil 6.1'de görülen ortam kurgusunda sağlanacak olup kullanılan malzemeler ve yardımcı cihazlar şekildeki numaralarıyla birlikte Tablo 6.1'de sunulmuştur. Tasarımın konusunun temelini oluşturan SiC MOSFETler ve diğer tüm alt devreleri ise SiC geliştirme deney kartında testler için kullanılıyor olup işlevsellik sonuçlarının akabinde nihai üretim gerçeklenecektir.



Şekil 6.1. Test ortamı kurgusu.

Tablo 6.1. Test sisteminde kullanılan ekipmanlar.

Num.	İsim	Açıklama
1	SiC Yükselteç	Deney kartı olarak kullanılır
2	Yük	Çıkış gücünü harcamak için kullanılır
3	DVGK	Kartın beslemelerini sağlar
4	YVGK	Bara gerilimini sağlar
5	Sinyal Üreteci	Kontrol sinyallerini sağlar
6	Güç Analizörü	Verim ve kayıpları ölçer
7	Osiloskop	Çıkış formlarını izlemeye yarar

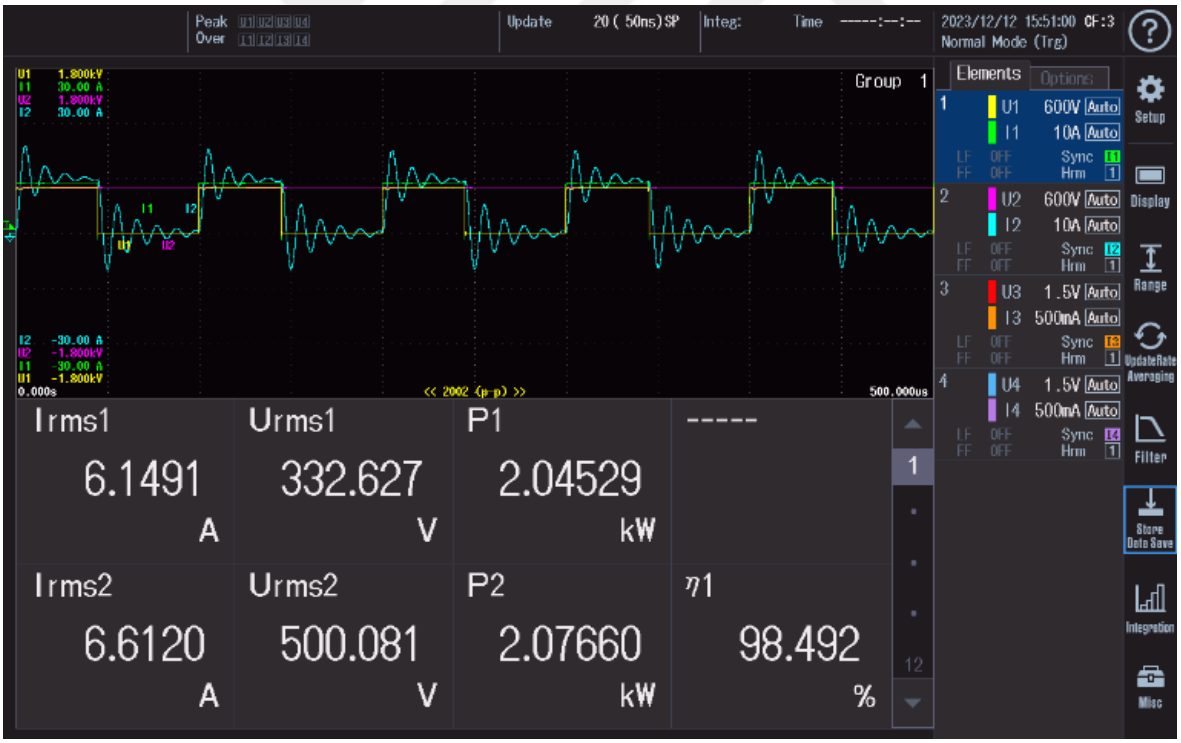
Teorik hesapların yapıldığı ve benzetim sonuçlarının alındığı şartları aynı şekilde sağlaması hedeflenen test kurgusunda kullanılan değişkenlerin değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Test koşulları.

Çıkış Yükü, R_L	50±5 Ω
Bara Gerilimi, V_{DD}	500 V_{DC}
Anahtarlama Frekansı, f_{SW}	10 kHz
Pozitif Darbe Periyot Oranı, D+	%45
Sürme Gerilimi, V_{GSop}	-4/+15 V
Harici Sürme Direnci, R_G	15 Ω

6.3. Deneysel Sonuçlar

Benzetim ortamında ve teorik hesaplarda kullanılan Tablo 6.2'deki değerler ile gerçeklenen test kurgusunda, yüksek verimli yükselteç tasarımının giriş ve çıkış güçleri ile verimlilik ölçümleri alınmıştır. Güç analizörü ile yapılan ölçümler Şekil 6.2'deki verilmiştir. Ayrıca bu değerler hesaplanarak Tablo 6.3'e de eklenmiştir.

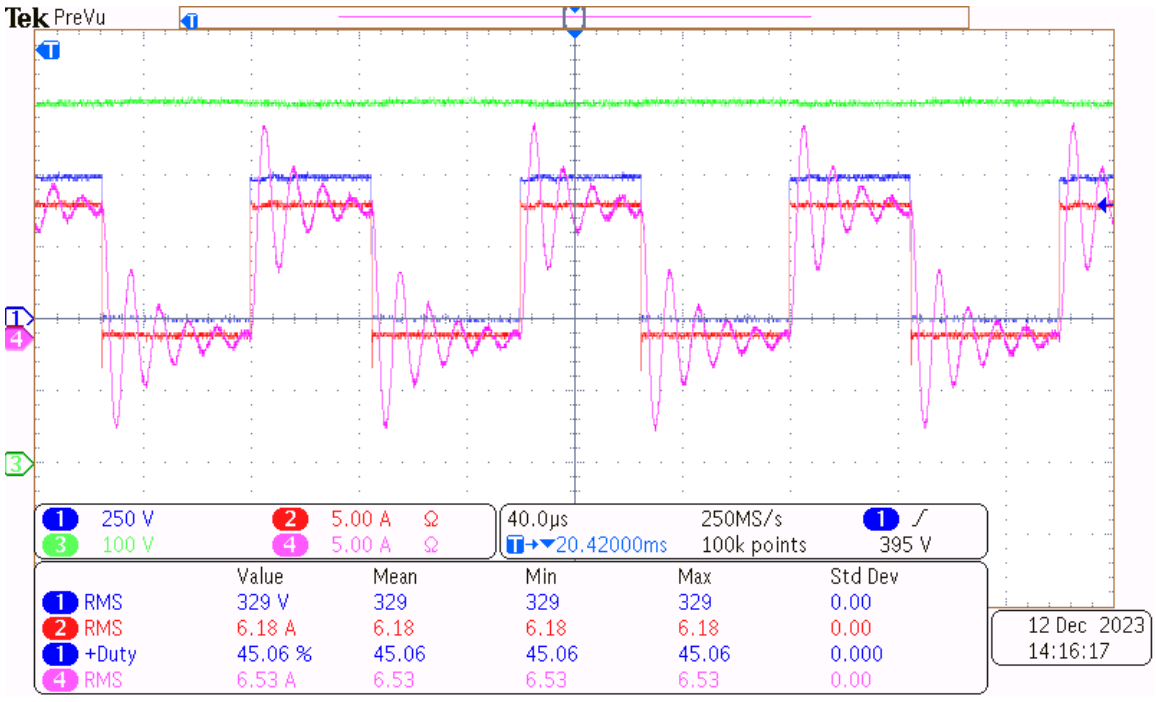


Şekil 6.2. Uygulama ölçümleri güç analizörü verileri.

Tablo 6.3. Uygulama test ölçüm sonuçları.

Analizördeki İsim	**Ölçümler**	
Irms2	Giriş Akımı	6.612 A
Vrms2	Giriş Gerilimi	500.081 V
P2	Giriş Gücü (PF=0.63)	2076.60 W
Irms1	Çıkış Akımı	6.1491 A
Vrms1	Çıkış Gerilimi	332.627 V
P1	Çıkış Gücü (PF=1)	2045.29 W
η1	**Verim**	**%98.492**

SiC tabanlı güç yükselteç kartının giriş ve çıkışlarından güç analizörü ile alınan ölçümler sonucunda verimin %98.492 olduğu görülmektedir. Şekil 6.3'teki osiloskop ekran alıntısında ise hem giriş için hem de çıkış için alınan akım ve gerilim sinyal formları görülmektedir. Ekran görüntüsündeki 1 numaralı kanal çıkış gerilimini, 2 numaralı kanal çıkış akımını, 3 numaralı kanal giriş gerilimini ve 4 numaralı kanal ise giriş akımını gösterir. Bu çalışmada, özellikle giriş gücünün hesabındaki doğruluğu arttırmak için verim ve kayıp hesapları güç analizörüne hesaplatılmıştır. Bu sayede, Şekil 6.2'de "P2" olarak görülen giriş gerçek gücü doğru şekilde hesaplatılabilmiştir. "Irms2" ve "Vrms2" değerlerinin çarpımı görünür giriş gücünü veriyorken bu değer gerçek giriş gücünü verir. Çıkış tarafında saf rezistif yük kullanıldığı için "Irms1" ve "Vrms1" değerlerinin doğrudan çarpımı ise aynı zamanda gerçek çıkış gücünü verir. Analizörden izlenen sinyal formları ise osiloskop ile iki taraflı kontrol edilerek doğrulanmıştır.



Şekil 6.3. Uygulama test ortamı osiloskop ölçümleri.

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

SiC temelli yüksek verimli güç yükselteç yapısının LTSpice ortamında simülasyonu ve analizi gerçekleştirilmiş, anahtarlama elemanı olarak kullanılan SiC MOSFET'in açılma ve kapanma süreleri oldukça düşük olduğu için bu anların Spice değerlerinin yakalanabilmesi için düşük zaman skalasında da (20ns) ölçümü alınmıştır. Tasarım ve uygulama fikrinin temelini oluşturan SiC MOSFETler ve diğer tüm alt devreleri ise SiC geliştirme deney kartında testler için kullanılmakta olup işlevsellik sonuçlarının devamında nihai üretim gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada, özellikle giriş gücünün deneysel hesabındaki doğruluğu arttırmak için verim ve kayıp hesapları güç analizörüne hesaplatılmıştır.

Motor sürücü uygulamaları için gerçeklenen yüksek verimli yükselteç tasarımında SiC temelli MOSFETlerin kullanım sebebi, bu anahtarların muadil bir Si anahtar ile teknik kıyaslaması yapılarak ortaya konulmuştur. Tablo 7.1'de SiC ve Si anahtar kayıplarının bu kıyaslaması oransal ifadelerle eklenmiştir.

Tablo 7.1. SiC ve Si kayıpların karşılaştırması.

	SiC	**Si**
İletim Kaybı	1x	2x
Anahtarlama Kaybı	1y	3.5y
Gate Doldurma Kaybı	1z	4.2z

SiC katkı teknolojisine sahip MOSFETlerin bu çalışmadaki güç yükselteci tasarımının temelini oluşturacağının ispatının devamında, sürücünün hangi yükselteç topolojini kullanacağı incelenmiş ve D-Sınıfı yükselteçlerin avantajları diğer yükselteç tipleriyle kıyaslanmıştır. Sonraki bölümde H-köprüsü yapısında SiC temelli D-Sınıf yükselteç tasarımının donanım gereksinim özellikleri belirlenerek tüm alt devreleriyle birlikte donanım tasarım aşamaları açıklanmıştır. Projenin ilerleyen süreçlerinde, teorik hesapları ve benzetim sonuçları adım adım irdelenen yüksek verimli yükselteç tasarımının deneysel uygulama sonuçları da alınmış olup karşılaştırmalı analiz verileri Tablo 7.2'de görülmektedir.

Tablo 7.2. Güç ve verim sonuçları.

	Benzetim Sonucu	**Teorik Sonuç**	**Deneysel Sonuç**
Giriş Gücü	2243.63 W	2250 W	2076.6 W
Çıkış Gücü	2230.31 W	2244.59 W	2045.3 W
Verim	%99.406	%99.760	%98.492

Tablo 7.2 incelendiğinde uygulama test ortamında gerçekleştirilen ölçümlerde, %98.492 oranında gerçekleşen verim sonucunun benzetim ve teorik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlardan yaklaşık %1 seviyelerinde daha düşük çıktığı saptanmıştır. Bu durumun sebepleri olarak;

1) ortam kurgusundaki kablaj temas noktalarının oluşturduğu kaçak endüktans,

2) parasitik kapasitans etkileri,

3) hatlarda gerçekleşen kayıplar

şeklinde açıklanabileceği yönünde değerlendirmeler yapılmıştır. Deneysel sonuçlardaki hem giriş hem de çıkış gücünün benzetim ve teorik sonuçlardakilere kıyasla %10 seviyelerinde daha düşük olmasının sebebi ise çıkış yük empedansının %10 toleransı dahilinde değişmesidir. Bu bağlamda benzetim, teorik ve deneysel sonuçlarının uyumlu olduğu gözlenmiş, bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturan ve donanım gereksinim özelliklerinde ister olarak belirtilen %98 üzerinde yüksek verimli SiC temelli güç yükselteci tasarımı uygulanmıştır.

Tez çalışması; benzetim ve teorik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ve devamında donanım gereksinim özelliklerinde ister olarak belirlenen yüksek verim detaylarının, deneysel olarak elde edilen >2kW çıkış gücünde ~%98,5 verimin elde edilmesiyle başarılı bir tasarım sonucunun sağlandığı ortaya konularak tamamlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. D. D. Wolf, Y. Smeers, “Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles,” World Electric Vehicle Journal, 14(262):1-13, September 2023, DOI:10.3390/wevj14090262.
2. P. Sun, H. Niu, X. Huang, R. Bisschop, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," Fire Technology, January 2020, DOI:10.1007/s10694-019-00944-3.
3. D. D. Wolf, N. D. Diop, M. Kilani, "Environmental impacts of enlarging the market share of electric vehicles," Environmental Economics and Policy Studies, August 2022, DOI:10.1007/s10018-022-00350-0.
4. A. M. Andwari, A. Pesyridis, S. Rajoo, M. Ricardo, "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78:414-430, October 2017, DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.138.
5. T. Nogueira, Ezequiel Sousa, G. R. Alves, "Electric vehicles growth until 2030: Impact on the distribution network power," The 8th International Conference on Energy and Environment Research ICEER 2021, 13–17 September, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.106.
6. F. K. Alanazi, "Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation," Applied Sciences 13(10):6016, May 2023 DOI:10.3390/app13106016.
7. T. Nogueira, E. Sousa, G. R. Alves, "Electric vehicles growth until 2030: Impact on the distribution network power," The 8th International Conference on Energy and Environment Research ICEER 2021, 13–17 September, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.106.
8. Y. Shi, D. Feng, S. Yu, C. Fang, H. Li, Y. Zhou, "The projection of electric vehicle population growth considering scrappage and technology competition: A case study in Shanghai," Journal of Cleaner Production Volume 365, 10 September 2022, 132673, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132673.
9. A. Skuza,R. S. Jurecki, "Analysis of factors affecting the energy consumption of an EV vehicle - a literature study," 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1247 012001, DOI 10.1088/1757-899X/1247/1/012001.
10. M. Mruzek, I. Gajdáč, L. Kucera, T. Gajdošík, "The Possibilities of Increasing the Electric Vehicle Range," Procedia Engineering 192:621-625, December 2017, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.107.

11. M. G. Gebremichael, A. V. Bossche, "Range Extenders for Electric Vehicles," Conference: Emerging Technologies' Contributions in Promoting Defence and Industry Capabilities NCETCPDIC-2015At: Bishoftu, Ethiopia, July 2015.
12. M. Ostroverkhov, D. Trinchuk, "Increasing the Efficiency of Electric Vehicle Drives with Supercapacitors in Power Supply," IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) Date of Conference: 12-14 May 2020, DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160291.
13. Z. Stevic, I. Radovanovic, "Energy Efficiency of Electric Vehicles," In book: New Generation of Electric Vehicles, December 2012, DOI:10.5772/55237.
14. N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov, I. H. Khalikov, V. A. Kukartsev, V. V. Kukartsev, V. S. Tynchenko, Y. A. Tynchenko, M. Qi, "Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption," Energies 2023, 16(2), 729; https://doi.org/10.3390/en16020729.
15. C. Wei, T. Hofman, E. I. Caarls, R. van Iperen, "Energy-Efficiency Improvement Potential of Electric Vehicles Considering Transmission Temperature," IFAC-PapersOnLine Volume 52, Issue 15, 2019, Pages 211-216, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.676.
16. H. Laitinen, "Improving electric vehicle energy efficiency with two-speed gearbox" Espoo, May 29, 2017, [Online]. Available: https://core.ac.uk/download/pdf/84757619.pdf. [13 Ocak 2024 tarihinde erişildi].
17. P. Kadav and Z. D. Asher, "Improving the Range of Electric Vehicles," 2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EV.2019.8892929.
18. E. Sevim, E. Çetin, "The Performance Comparison of the SiC and Si Mosfets Used in the 3-Phase Brushless DC Motor Drives for Electric Vehicles," International Journal of Automotive Science and Technology, VOL. 6, NO:4, 331-339, 2022.
19. S. Tiwari, O.-M. Midtgård, T. M. Undeland, "SiC MOSFETs for future motor drive applications," European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-2, 2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7695382.
20. H.-R. Chang, E. Hanna, A.V. Radun, "Demonstration of Silicon Carbide (SiC)-Based Motor Drive," Conference: Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE Volume: 2.
21. P. N. Halimah, S. Rahardian, B. A. Budiman, "Battery Cells for Electric Vehicles" International Journal of Sustainable Transportation Technology, Vol.2, Np. 2, 54-57, October 2019, DOI:10.31427/IJSTT.2019.2.2.3.

22. V. K. B. Raja, I. Raja, R. Kavvampally, "Advancements in Battery Technologies of Electric Vehicle," Journal of Physics: Conference Series, Volume 2129, 1st International Conference on Material Processing and Technology (ICMProTech 2021) 14th-15th July 2021, Perlis, Malaysia, DOI 10.1088/1742-6596/2129/1/012011.
23. P. Mohseni, O. Husev, D. Vinnikov, R. Strzelecki, E. Romero-Cadaval and I. Tokarski, "Battery Technologies in Electric Vehicles: Improvements in Electric Battery Packs," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 17, no. 4, pp. 55-65, Dec. 2023, doi: 10.1109/MIE.2023.3252265.
24. Miao Y, Hynan P, von Jouanne A, Yokochi A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. Energies. 2019; 12(6):1074. https://doi.org/10.3390/en12061074.
25. G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, "Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management," iScience Volume 25, Issue 2, 18 February 2022, https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744.
26. Developing the next generation of batteries for electric vehicles [Online]. Available: https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/projects/success-stories/all/developing-next-generation-batteries-electric-vehicles. [13 Ocak 2024 tarihinde erişildi].
27. Wolfspeed. Comparing Silicon Carbide MOSFETs to Si MOSFETs. [Online]. Available: https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/basics-of-sic-series-comparing-sic-mosfets-to-si-mosfets (20 Ağustos 2023 tarihinde erişildi).
28. Fırat Deveci, "Güç Elektroniğinde SiC (Silicon Carbide) Cağı." Firatdeveci. [Online]. Available: https://www.firatdeveci.com/guc-elektroniginde-sic-silicon-carbide-cagi/ (20 Ağustos 2023 tarihinde erişildi).
29. Farnell. Wide-Bandgap Semiconductor: The Future of SiC and GaN Technology" [Online]. Available: https://nl.farnell.com/wide-bandgap-semiconductor-the-future-of-sic-and-gan-technology (20 Ağustos 2023 tarihinde erişildi).
30. The Difference Between GaN and SiC Transistors, TND6299/D Rev. 1, Semiconductor Components Industries, 2019, pp. 2.
31. Wolfspeed. Comparing Silicon Carbide MOSFETs to Si MOSFETs. [Online]. Available: https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/basics-of-sic-series-comparing-sic-mosfets-to-si-mosfets (4 Aralık 2021 tarihinde erişildi).

32. J. Stęszewski, A. Jakubowski, and M. L. Korwin-Pawlowski, ”Comparison of 4H-SiC and 6H-SiC MOSFET I-V characteristics simulated with Silvaco Atlas and Crosslight Apsys,” pp 1. Jan 2007.
33. F. Roccaforte, F. Giannazzo, and V. Raineri, “Nanoscale transport properties at silicon carbide interfaces,” Journal of Physics D Applied Physics, vol. 43, no. 22, pp. 18, May 2019, doi: 10.1088/0022-3727/43/22/223001.
34. M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, and M. S. Shur, Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe, Eds. New York: Wiley, 2001, pp. 31–47.
35. M. Ruff, H. Mitlehner, and R. Helbig, “SiC devices: physics and numerical simulation,” IEEE Trans. Electron Dev., vol. 41, pp. 1040–1053, 1994.
36. A. Mashaly. The Creation and Potential Cell Structures of SiC Devices [Online]. Available: https://eepower.com/technical-articles/the-creation-and-potential-cell-structures-of-sic-devices/# (20 Ağustos 2023 tarihinde erişildi).
37. P. C. Zuk and B. Odekirk, ”SiC Impacts Greening of Power - Understanding the Differences between Silicon Carbide (SiC) and Silicon (Si) for Power Electronics,” in Power Systems Design Europe, ed, 2008, pp. 3436.
38. B. Wrzecionko, J. Biela and J. W. Kolar, ”SiC power semiconductors in HEVs: Influence of junction temperature on power density, chip utilization and efficiency,” Industrial Electronics, 2009. IECON ’09. 35th Annual Conference of IEEE, Porto, 2009, pp. 3834-3841.
39. Wolfspeed, The Importance of Silicon Carbide’s Wide Bandgap. [Online]. Available: https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/importance-of-silicon-carbide-wide-bandgap (20 Ağustos 2023 tarihinde erişildi).
40. Ralf Siemieniec et al., “A SiC Trench MOSFET concept offering improved channel mobility and high reliability,” 19th European Conference on Power Electronics and Applications, Sept 2017, pp. 4-5, doi: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8098928.
41. Switching Regulator IC Series Calculation of Power Loss (Synchronous) No. AEK59-D1-0065-2.
42. Analog Applications Journal, Enterprise Systems, MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency, By George Lakkas Product Marketing Manager, Power Management, AAJ1Q2016, [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf?ts=1705173977497.

43. MOSFET Power Losses Calculation Using the DataSheet Parameters by Dr. Dušan Graovac, Marco Pürschel, Andreas Kiep, Application Note, V 1.1, July 2006.
44. Z. J. Shen, Y. Xiong, X. Cheng, Y. Fu and P. Kumar, "Power MOSFET Switching Loss Analysis: A New Insight," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006, pp. 1438-1442, doi: 10.1109/IAS.2006.256719.
45. Electronics Tutorials. Class A Amplifier [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_5.html (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).
46. Electronics Tutorials. Class B Amplifier [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_6.html (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).
47. B. Pomerantz. How Class D amplifier technology differs from Class A and AB [Online]. Available: https://www.crutchfield.com/S-0D8qq3rf0wF/learn/which-amplifier-class-is-best.html#:~:text=Class%20A%20design%20is%20the,highest%20efficiency%20and%20smallest%20footprint (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).
48. Electronics Tutorials. Class AB Amplifier [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/class-ab-amplifier.html (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).
49. N. Sliunchenko. (20.08.2021). Class D Power Amplifier [Online]. Available: https://www.powerelectronicsnews.com/class-d-power-amplifier/ (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).
50. S. S. Moreno. (04.06.2005). Class D Audio Amplifiers - Theory and Design [Online]. Available: https://sound-au.com/articles/pwm.htm (14 Nisan 2024 tarihinde erişildi).

ÖZGEÇMİŞ

Ad: Yasin Mert

Soyad: YALÇİ

Uyruk: T.C.

Doğum Tarihi:

Doğum Yeri:

İletişim:

Eğitim Bilgileri

2021-Halen, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

2014-2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Lisans Programı, İstanbul.

Akademik Yayınlar

Y. M. Yalci, I. Kiyak, “SiC Based High Efficiency Power Amplifier Design for Motor Driver Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics Journal, May. 2024, (Durumu: Değerlendirme sürecinde).