

STM32 MİKROİŞLEMCİ TABANLI MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

SEMİH ÇETİNKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. YUSUF ALTUN**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

STM32 MİKROİŞLEMCİ TABANLI MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Semih ÇETİNKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. YUSUF ALTUN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. YUSUF ALTUN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Veli BAYSAL

Bartın Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 11/07/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

11/07/2025

Semih ÇETİNKAYA

TEŐEKKÖR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Yusuf ALTUN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, değerli arkadaşlarıma ve VOLTA MOTOR A.Ő. 'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

11/07/2025

Semih ÇETİNKAYA



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. TASARIMDA KULLANILAN BİLEŞENLER	9
3.1.1. STM32F103C8T6TR Mikroişlemcisi	9
3.1.2. IR2110 MOSFET Sürücü	10
3.1.3. STB75NF75T4 MOSFET	10
3.1.4. 48V 750W BLDC Hub Motor	11
3.2. BİLEŞEN SEÇİMİ VE DEVRE TASARIMI	12
4. FIRÇASIZ (BLDC) DOĞRU AKIM MOTORLARI	14
4.1. BLDC MOTORLARININ YAPISI	14
4.1.1. Stator	14
4.1.1.1. Statorun Motor Performansına Etkisi	15
4.1.2. Rotor	16
4.2. INRUNNER VE OUTRUNNER MOTOR TİPLERİ	16
4.3. BLDC MOTORLARDA KULLANILAN MIKNATIS TÜRLERİ	17
4.3.1. Doğal Mıknatıslar.....	17
4.3.2. Yapay Mıknatıslar	17
4.3.2.1. Yapay Mıknatıs Türlerinin Kıyaslaması.....	18
4.4. BLDC MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE KULLANIM ALANLARI	19
5. BLDC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI	21
5.1. KONTROL VE SÜRÜŞ STRATEJİLERİ	21
5.1.1. Dijital Kontrol Stratejileri.....	21
5.1.2. Analog Kontrol Stratejileri	22
5.1.3. PWM ile Hız Kontrolü.....	22
5.2. SENSÖRLÜ VE SENSÖRSÜZ SÜRÜŞ TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ	24
5.2.1. Sensörsüz Sürüş Teknikleri.....	24
5.2.2. Hall Efekt Sensörlü Sürüş Teknikleri	25
5.2.3. Enkoderli Sürüş Teknikleri.....	26
5.3. MOSFETLERİN YAPISAL SINIFLANDIRILMASI	28

5.3.1. Kanalı Fiziksel Olarak Oluşturulan MOSFET'ler	28
5.3.2. Kanalı Elektriksel Olarak Oluşturulan MOSFET'ler.....	28
5.3.3. Tasarımda Kullanılan MOSFET'in Karakteristiği	29
5.4. POWER (GÜÇ BESLEME) KATININ KURULMASI	31
5.5. SİNYAL FİLTRELEME DEVRESİNİN KURULUMU	32
5.6. MOSFET SÜRÜCÜ VE H BRIGDE'IN KURULUMU.....	33
5.7. MİKROİŞLEMCİ GİRİŞLERİNİN BELİRLENMESİ.....	34
5.7.1. Motor Faz Kontrolü (PWM Çıkışları)	34
5.7.2. Hall Sensör Çıkışları	35
5.7.3. Haberleşme Arayüzü (CAN Bus).....	35
5.7.4. Güç ve Geri Besleme İzleme.....	36
5.7.5. Programlama ve Hata Ayıklama Arayüzü	37
5.7.6. Osilatör ve Saat Kaynağı	37
5.8. VOLTAJ OKUMA DEVRESİNİN KURULUMU	38
5.9. AKIM OKUMA DEVRESİNİN KURULUMU	38
5.10. BASKI DEVRE KARTININ (PCB) OLUŞTURULMASI	40
6. SÜRÜCÜ KODLARININ OLUŞTURULMASI	44
6.1. HALL SENSÖRÜ İLE KONUM TESPİTİ	45
6.2. ADC TABANLI AKIM ÖLÇÜM FONKSİYONU.....	46
6.3. ADC TABANLI VOLTAJ ÖLÇÜM FONKSİYONU.....	48
6.4. GAZ PEDAL (HIZ REFERANS) OKUMA FONKSİYONU.....	49
6.5. BLDC MOTOR SÜRÜŞ KONTROL FONKSİYONU	49
7. TEST VE UYGULAMA SONUÇLARI	53
7.1. PERFORMANS TESTLERİ	53
7.2. TASARIMI YAPILAN MOTOR SÜRÜCÜ KARTIN TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	54
7.3. BENZER ÇALIŞMALARLA KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME	57
8. SONUÇ	59
9. KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. STM32F103C8T6TR mikrodnetleyici[18]	9
Şekil 3.2. IR2110 mosfet sürücü[19]	10
Şekil 3.3. STB75NF75T4 mosfet[20]	11
Şekil 3.4. 12V/5V/3.3V converter devresi.....	13
Şekil 3.5. Sinyal filtreleme devresi	13
Şekil 4.1. Stator[21]	15
Şekil 4.2. Fırçasız motor statoru[22]	15
Şekil 4.3 Inrunner ve outrunner motor tipleri[24]	17
Şekil 4.4 Doğal mıknatıs[25]	17
Şekil 4.5. BLDC motor çalışma prensibi[30]	20
Şekil 5.1. Dijital ve analog sinyal grafiği[31]	21
Şekil 5.2. PWM sinyal grafiği[32]	23
Şekil 5.3. Alan odaklı kontrol kullanan bir BLDC kontrolörü[33]	25
Şekil 5.4. BLDC motor altı adımlı trapezoidal ve sinüzoidal tahrik dalga formlarının karşılaştırılması.[33]	26
Şekil 5.5. B Kodlayıcı çıkış sinyali[34]	27
Şekil 5.6 Artırımlı kodlayıcı disk yapısı ve çıkış sinyali[35]	27
Şekil 5.7 Depletion tipine ait mosfet yapısı[36]	28
Şekil 5.8 Enhancement tipine ait mosfet yapısı[37]	29
Şekil 5.9 STB75NF75T4 mosfete ait parametreler[38]	30
Şekil 5.10 Tasarımı yapılan giriş 36-60V çıkış 12V buck devresi	31
Şekil 5.11 5V ve 3.3V buck devresi	32
Şekil 5.12 Filtreleme kondansatörlerinin dizilimi	33
Şekil 5.13 Mikroişlemci bölümünün şematik dizaynı	37
Şekil 5.14 Voltaj ölçüm devresinin şematik dizaynı	38
Şekil 5.15 Akım ölçüm devresinin şematik dizaynı	40
Şekil 5.16 Top layer	41
Şekil 5.17 Top inner layer (GND)	41
Şekil 5.18 Bottom inner layer	42
Şekil 5.19 Bottom layer	42
Şekil 5.20 PCB'nin 3 boyutlu görüntüsü	43
Şekil 7.1. Performans testi yapılan setup	53
Şekil 7.2. Tasarımı yapılan motor sürücü ve 750W BLDC motorun performans testi sonuçları	54
Şekil 7.3. Test esnasında yapılan mosfet sıcaklık ölçümü	55
Şekil 7.4 Düşük yük koşullarında yapılan rpm ölçümü	55
Şekil 7.5. Performans testi sonuçları	56
Şekil 7.6. Faz farkının incelenmesi	57

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Mıknatıs türleri ve temel özellikleri	19
Tablo 5.1.Sensörlü, sensörsüz ve enkoderli sürüş tekniklerinin karşılaştırması	27



KISALTMALAR

ADC	Analog to Digital Converter
BLDC	Brushless DC Motor
CAN	Controller Area Network
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processing
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMF	Electromotive Force
EMI	Electromagnetic Interference
EMK	Elektro Motor Kuvvet
FOC	Field Oriented Control
FTC	Hata Toleranslı Kontrol
GPIO	General Purpose Input/Output
HAL	Hardware Abstraction Layer
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IR	Infrared
kW	Kilowatt
MCU	Microcontroller Unit
MMPT	Maximum Power Point Tracking
	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect
MOSFET	Transistor
PCB	Printed Circuit Board
PID	Proportional İntegral Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
QPLL	Quad Phase-Locked Loop
RC	Resistor-Capacitor
RPM	Revolutions Per Minute
SEPIC	Single-Ended Primary-Inductor Converter
SMD	Surface Mount Device
SMO	Sliding Mode Observer
SPI	Serial Peripheral Interface
TIM	Timer
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
YSA	Yapay Sinir Ağı

SİMGELER

%	Yüzde
D	Diyot
R	Direnç
C	Kapasitör
F	Farad
Ω	Ohm



ÖZET

STM32 MİKROİŞLEMCİ TABANLI MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Semih ÇETİNKAYA

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yusuf ALTUN

Temmuz 2025, 64 sayfa

Bu tez çalışmasında, 48V batarya ile çalışan bir fırçasız doğru akım (BLDC) motoru için STM32 mikroişlemci tabanlı özgün ve yerli bir motor sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, motor sürücü devresi Altium Designer yazılımı kullanılarak tasarlanmış, devre elemanlarının seçimi, yerleşimi ve baskı devre kartı (PCB) düzeni oluşturulmuştur. Tasarlanan devrenin performansını değerlendirmek amacıyla sanal ortamlarda (Proteus) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Gerçek değerler içinse motor test cihazı üzerinde denemeler yapılmıştır. BLDC motorlar, yüksek verimlilikleri ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle günümüzde elektrikli araçlardan endüstriyel otomasyona kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tasarlanan sürücü devresi, motorun hız ve konum kontrolünü sağlarken aynı zamanda enerji verimliliği açısından da optimize edilmiştir. STM32 mikroişlemcisi, motorun hız ve yön kontrolünü gerçekleştiren temel bileşen olarak kullanılmış ve sürücü algoritmaları mikroişlemciye entegre edilmiştir. Motorun doğru çalışmasını sağlamak amacıyla sinyallerin hassas bir şekilde yönetilmesi ve güç elektroniği devrelerinin etkin bir biçimde tasarlanması hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçları, tasarlanan devrenin belirlenen çalışma koşullarında güvenilir bir performans sergilediğini ve teorik analizlerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, BLDC motor sürücü devrelerinin tasarımında STM32 mikroişlemcilerin etkin kullanımını vurgulamakta ve gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için bir temel sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Mikroişlemci, BLDC, Tasarım, Altium, Sürücü

ABSTRACT

STM32 MICROCONTROLLER-BASED MOTOR DRIVER DESIGN

Semih CETINKAYA

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical and Electronics Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yusuf ALTUN

July 2025, 64 pages

In this thesis, the design of a motor driver for a brushless DC (BLDC) motor powered by a 48V battery, based on an STM32 microcontroller, has been carried out. The motor driver circuit was designed using Altium Designer software, where the layout of the circuit components and the printed circuit board (PCB) arrangement were created. To evaluate the performance of the designed circuit, simulations were conducted using Proteus simulation software. BLDC motors are widely used today in applications ranging from electric vehicles to industrial automation due to their high efficiency and low maintenance requirements. In this context, the designed driver circuit not only controls the speed and position of the motor but is also optimized for energy efficiency. The STM32 microcontroller serves as the core component responsible for controlling the speed and direction of the motor, with driver algorithms integrated into the microcontroller. The design aimed to ensure the precise management of signals and the effective design of power electronics circuits to guarantee the motor's proper operation. Simulation results demonstrated that the designed circuit performs reliably under the specified operating conditions and is consistent with theoretical analyses. This study highlights the effective use of STM32 microcontrollers in the design of BLDC motor driver circuits and provides a foundation for future work in similar applications.

Keywords: Microcontroller, BLDC, Design, Altium, Controller

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde enerji verimliliği ve performansın ön plana çıktığı uygulamalarda, fırçasız doğru akım (BLDC) motorlar yaygın olarak tercih edilmektedir. BLDC motorlar, özellikle elektrikli araçlar, endüstriyel otomasyon sistemleri ve robotik uygulamalarda, yüksek verimlilik, uzun ömür, düşük bakım maliyeti ve yüksek tork-hız performansı ile ön plana çıkmaktadır. Ancak bu motorların hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi için gelişmiş sürücü sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Motor sürücü devrelerinin tasarımında kullanılan mikroişlemciler, motor kontrol performansını doğrudan etkileyen en kritik bileşenler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, STM32 mikroişlemcisi kullanılarak bir BLDC motor sürücü devresi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

STM32 mikroişlemcisi, güçlü işlem kapasitesi, geniş çevresel birimleri ve düşük güç tüketimi gibi avantajlarıyla bu tez çalışmasında tercih edilmiştir. STM32, yüksek işlem hızı ve gerçek zamanlı motor kontrolü yapabilme kabiliyeti sayesinde, BLDC motorların hız, yön ve tork kontrolünü hassas bir şekilde gerçekleştirebilir. Ayrıca, çok sayıda PWM (Pulse Width Modulation) kanalı sunması ve faz akımlarını ölçebilme yeteneği, motor sürücüsünün doğru ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Bununla birlikte, STM32'nin gelişmiş ADC (Analog to Digital Converter) modülleri, motor faz gerilim ve akımlarının anlık olarak ölçülmesine ve bu verilerin işlenmesine olanak tanıyarak, motorun daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.

Bu çalışmada, BLDC motor sürücüsünün tasarımı, Altium Designer yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde 48V batarya ile çalışan bir BLDC motorun ihtiyaçlarına göre optimize edilmiş bir sürücü devresi geliştirilmiş ve motorun performansı Proteus simülasyon ortamında test edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, STM32 mikroişlemcisinin sunduğu avantajları kullanarak BLDC motorlar için enerji verimli ve yüksek performanslı bir sürücü devresi tasarlamaktır.

Bu tezde kullanılan STM32 mikroişlemcisinin sağladığı avantajlar, motorun daha hassas ve kararlı çalışmasını sağlarken, sistemin maliyetini düşürmekte ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, STM32'nin esnek yazılım ve donanım altyapısı, sürücü devresinin

farklı motor tiplerine veya uygulama senaryolarına uyarlanabilir olmasını mümkün kılmaktadır. Çalışmanın sonunda, teorik analizler ve simülasyon sonuçları değerlendirilerek, tasarlanan sistemin performansı ve enerji verimliliği ortaya konacaktır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

S. İn, M. Yahya ve H. Tiryaki, hibrit ve elektrikli araçlar için yüksek güç ve verimlilik sağlayan bir fırçasız doğru akım (BLDC) motor sürücüsünün tasarımını ele almaktadır. Çalışmada, 96V-150V aralığında çalışan bir motor sürücüsü tasarlanmış ve bu tasarım sırasında dikkate alınması gereken donanım yapıları vurgulanmıştır. Araştırmada kullanılan motor, hafif ticari bir araç için seçilmiş ve bu aracın ihtiyaç duyduğu parametreler (akım, voltaj vb.) referans alınarak sürücü tasarlanmıştır.

Makalenin ana odak noktalarından biri, yüksek güç değerlerinde anahtarlama yapan motor sürücülerinin elektromanyetik girişimlerden etkilenmesini en aza indirmek olmuştur. Bu amaçla uygun elektriksel elemanların seçimine dikkat edilmiştir. Ayrıca, modüler bir yapının kullanımı ile tasarımın izolasyon sağlaması ve entegrasyonunun kolaylaştırılması hedeflenmiştir. [1]

Haoran Jin, Xiang'e Sun yaptıkları çalışmada STM32 mikrodenetleyicisi tabanlı bir fırçasız doğru akım motoru (BLDC) sürücü sistemi tasarımı anlatılmaktadır. Sistem, STM32F103ZET6 çipi üzerine kurulu olup motorun pozisyon ve hız kontrolünü sağlamak için PID algoritması kullanılmıştır. Sistemin temel işlevleri arasında motorun başlatma ve durdurma kontrolü, pozisyon tespiti ve kapalı döngü hız ayarlaması yer almaktadır. Motor sürücü devresi, A4931 sürücü çipi ve FDS8949 MOSFET'ler üzerine kurulmuştur. PWM sinyali ile motorun hızı kontrol edilmektedir ve bu sinyaller STM32'nin zamanlayıcı modülleri ile üretilmektedir. Ayrıca, Hall sensörleri ve kadran kodlayıcılar motorun pozisyonunu ve hızını algılayarak kapalı döngü kontrolüne katkıda bulunmaktadır.[2]

Shi, Zhang, Li, Liu ve Cui, STM32 tabanlı hub motor kontrol sistemi geliştirerek, tekerlekli mobil robotların ileri-geri hareketlerini ve iki tekerleğin koordineli kontrolünü sağlamışlardır. Sistem, üç fazlı tam köprü invertör devresi, Hall sinyal algılama devresi ve PID destekli hız kontrol programı gibi bileşenlerden oluşmaktadır. [3]

Zhao (2013), STM32 mikrodenetleyicisi ve PID kontrol teorisi kullanarak bir motor kontrol uygulaması geliştirmiştir. Donanım kısmında STM32 tabanlı bir kontrol kartı tasarlanmış, yazılım kısmında ise üç döngülü bir kontrol yapısı uygulanmıştır. Bu yapı,

motorun açısai yer değiştirmesi ve hız kontrolünü sağlamaktadır.[4]

Wang, Guo ve Dun , STM32 mikrodeneleyicisi ve IR2136 sürücü çipi kullanarak fırçasız DC motor sürücü sistemi tasarlamışlardır. Sistem, konum kontrolü için PD kontrolörü ve açısai konum bilgi füzyon teknolojisi kullanmaktadır. Ayrıca, aşırı gerilim, aşırı akım ve aşırı ısınma gibi durumlar için koruma mekanizmaları içermektedir.[5]

Ajmal ve Ramachandaramurthy tarafından yapılan çalışmada BLDC motorlu elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme yöntemine odaklanılmıştır. Bu çalışma, frenleme anında oluşan kinetik enerjinin ek bir donanım gerektirmeksizin geri kazanılmasını amaçlamıştır. Yazarlar, BLDC sürücüsünün mevcut invertör devresini uygun anahtarlama ile jeneratör modunda çalıştırarak frenleme enerjisinin bataryaya yönlendirilebileceğini göstermişlerdir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimler, önerilen basit fakat etkili frenleme yönteminin başarılı olduğunu, motorun yavaşlama anında jeneratör gibi davranarak enerji depolamasını sağladığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, ekstra bir dönüştürücüye ihtiyaç duymayan bu rejeneratif frenleme tekniğinin, BLDC motorlu elektrikli araçların menzilini artırmada etkili olduğu vurgulanmıştır. [6]

Venkateswari, elektrikli araçlar için sensörsüz bir BLDC sürücü kontrol sistemi geliştirmiştir. Bu çalışmada, Hall etkili konum sensörleri olmaksızın rotor konum ve hız bilgisini elde etmek amacıyla kayan kip gözlemcisi (Sliding Mode Observer) tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Önerilen SMO, BLDC motorun trapezoidal elektromotor kuvvet (EMK) dalga şeklini gerçek zamanlı olarak hesaplayarak rotorun pozisyonunu ve açısai hızını kestirmektedir. Özellikle düşük hız ve değişken yük altında klasik sensörsüz yöntemlerin yaşadığı konum kestirim hatalarını azaltmak üzere SMO yapısını sağlamlaştırmış ve filtre ihtiyacını en aza indirecek bir tasarım yapılmıştır. MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim sonuçları, SMO tabanlı kontrolün kararlı çalıştığını, durgun halde yaklaşık 0° konum hatasıyla ve dinamik durumda 8°'nin altında bir hata ile doğru komütasyon sinyallerini üretebildiği gösterilmiştir. Ayrıca sistem, entegre bir rejeneratif fren mekanizmasıyla frenleme anında kinetik enerjiyi %30'dan fazla verimle geri kazanmıştır. Çalışma, otomotiv uygulamalarında sensörsüz BLDC sürücülerinin güvenilirliği için gelişmiş gözlemci tabanlı algoritmaların faydalı olduğunu vurgulayarak, sensörsüz kontrol ile yüksek verimli ve kararlı bir sürüş gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuştur. [7]

Ahmed Baba ve arkadaşları, elektrikli araçlara yönelik bir BLDC motor sürücüsünde hall sensörü arızalarını tolere edebilen bir kontrol stratejisi sunmuştur. Bu çalışmanın amacı, rotor konum geri beslemesi için yaygın olarak kullanılan hall sensörlerinden birinin arızalanması durumunda motorun kesintisiz ve güvenli çalışmasını sağlamaktır. Üç hall sensöründen birinin sinyalini kaybetmesi senaryosunu ele alarak, bozuk sensör sinyalini yeniden oluşturan bir hata teşhis ve kestirim algoritması geliştirmiştir. Bu kapsamda, bulanık mantık denetleyici ve yapay sinir ağı (YSA) tabanlı denetleyici gibi farklı sağlam kontrol yapıları tasarlanmış ve bu yapıların arıza durumundaki performansları MATLAB tabanlı benzetimlerle incelenmiştir. Üç farklı kontrol konfigürasyonu (Klasik PID, bulanık mantık ve YSA denetleyici) karşılaştırılmış, özellikle geçiş süreci ve kararlı durum hata büyüklükleri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Hall sensörü arızasının uygulanan hata toleranslı kontrol (FTC) sayesinde motorun çalışmasını etkilemediğini göstermiştir. Özellikle YSA tabanlı hız denetleyicinin, bulanık denetleyiciye kıyasla daha iyi bir hız regülasyonu sağladığı ve arıza anında dahi referans hızın korunduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, BLDC sürücülerinde sensör arızalarına karşı yazılım tabanlı önlemlerin etkinliğini kanıtlamakta ve elektrikli araçlarda güvenilirliği arttırmak için bu tür akıllı kontrol tekniklerinin önemini vurgulamaktadır. [8]

Bahadır ve arkadaşları, bir elektrikli binek araç için 75 kW gücünde bir BLDC tahrik sisteminin donanım tasarımı ve termal yönetimine odaklanmıştır. Çalışmada öncelikle hedef aracın teknik gereksinimleri belirlenmiş, bu doğrultuda 75 kW'lık bir BLDC motor ve onu sürececek üç fazlı bir invertör tasarlanmıştır. Tasarlanan sürücü devresi otomotiv standartlarına uygun şekilde 375 V DC baraya ve 200 A akıma göre boyutlandırılmıştır. IGBT yarıiletkenlerini kullanarak üç farklı güç katı topolojisi gerçekleştirmiş ve bu topolojilerin kayıp hesaplarını yapmıştır. İnvertörün ürettiği ısıyı etkin şekilde uzaklaştırmak için doğal hava soğutma, fan destekli hava soğutma ve sıvı soğutma olmak üzere üç farklı soğutma sistemi modeli tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sıvı soğutmalı sistemin güç devresi kayıplarını en düşük seviyede tutarak IGBT junction sıcaklıklarını en güvenli aralıkta tuttuğu, dolayısıyla en yüksek sürekli çıkış gücüne imkân verdiği görülmüştür. Fanlı hava soğutma ise doğal konveksiyona kıyasla belirgin bir iyileşme sağlamış ancak sıvı soğutmanın performansına erişememiştir. Bu çalışma, yüksek güçlü BLDC sürücü tasarımında kayıpların doğru hesaplanmasının ve uygun soğutma tekniğinin seçilmesinin önemini vurgulayarak, elektrikli araçlar için güvenilir ve uzun ömürlü bir BLDC motor sürücü sisteminin nasıl

geliştirilebileceğine dair bilgileri içermektedir.[9]

Saha ve arkadaşları, güneş enerjili hafif elektrikli araçlar için sensörsüz bir BLDC sürücü kontrolü ve entegre güç yönetim sistemi geliştirmiştir. Bu çalışmada, BLDC motorunun rotor konumunu sensörsüz olarak tahmin etmek için dörtlü faz kilitlemeli döngü (QPLL) tabanlı bir geri-EMK gözlemcisi tasarlanmıştır. Önerilen yöntem, literatürde yaygın kullanılan arctan tabanlı konum hesaplamasının yerine QPLL yapısını kullanarak düşük hız ve dinamik koşullardaki pozisyon kestirim hassasiyetini artırmaktadır. Bu sayede, geleneksel yöntemlerde gereken alçak geçiren filtreler elimine edilerek sistemin gecikmeleri azaltılmış ve hızlı tepki vermesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar, geliştirilen sensörsüz kontrolün komütasyon hatasını önemli ölçüde düşürdüğünü; motorun sabit hızda çalışırken neredeyse 0° konum hatası ile, ani yük değişimlerinde ise en fazla 8° hata ile çalıştığını ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, çalışma kapsamında bir de güneş paneli destekli enerji sistemi modeli entegre edilmiştir. Güneş panellerinden azami gücü çekmek için modifiye tek uçlu endüktörlü dönüştürücü (SEPIC) tabanlı bir MPPT (maksimum güç noktası izleme) devresi kullanılmıştır. Bu devre, akım dalgalanmalarını azaltarak BLDC motorun beslemesini düzenli hale getirmiş ve motorun kesintisiz güç almasını sağlamıştır. Sistem ayrıca rejeneratif frenleme özelliğini de içermiş, fren anında motorun jeneratör moduna geçerek bataryaya yaklaşık %30,6 verimle enerji geri kazanabildiği görülmüştür. Saha ve çalışma arkadaşlarının ortaya koyduğu sonuçlar, önerilen sensörsüz kontrol ve entegre güç elektroniği sisteminin geleneksel yaklaşımlara göre hem daha yüksek performans hem de sürdürülebilirlik sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, güneş enerjili BLDC motorlu elektrikli araç teknolojileri alanında verimli ve akıllı bir sürücü tasarımı için önemli bir katkı sunmuştur.[10]

Liu ve Zhang, elektrikli araçlarda BLDC motorların sensörsüz sürüşünü iyileştirmek amacıyla STM32 tabanlı bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Çalışmalarında STM32 mikrodenetleyici kullanarak geri-EMK'nin sıfır geçişi algılama yöntemine dayalı bir komütasyon stratejisi uygulamışlar ve Hall sensörü olmadan rotor pozisyonunu tespit etmeyi başarmışlardır. Bu sayede fırçasız motorun yüksek verim ve tork ile kararlı çalışması sağlanmış; önerilen sürücü, elektrikli araç BLDC motorunu sensörsüz olarak güvenilir biçimde kontrol edebilmiştir. Sonuçlar, STM32 tabanlı geri-EMK algılama yaklaşımının, elektrikli araçlarda BLDC motor sürüşünde başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir.[11]

Song Wang, yüksek performanslı bir BLDC sürücü sistemi için STM32 tabanlı bir tasarım sunmuştur. Bu çalışmada STM32 Cortex-M3 tabanlı bir mikrodenetleyici ve IR2136 entegre sürücü entegresi kullanılarak güç elektroniği katmanı oluşturulmuştur. Sistemin donanım, gömülü yazılım ve PC yazılımı bileşenleri bütünleşik şekilde geliştirilmiştir. Konum denetimi için açısal konum bilgisi füzyonuna dayalı oransal-türev (PD) kontrolör kullanılmış ve aşırı gerilim/akım, aşırı ısınma gibi çalışma koşulları için koruma mekanizmaları eklenmiştir. Prototip testlerinde sistemin konum takibi hedeflenen performansa ulaştığı ve yüksek güvenilirlik sergilediği raporlanmıştır.[12]

Ravigan, iki tekerlekli hafif bir elektrikli skuterin 250 W'lık BLDC tekerlek motorunu sürmek için entegre bir sistem içeren STSPIN32F0 çipini değerlendirmiştir. Bu çalışmada STMicroelectronics tarafından Kasım 2016'da tanıtılan STSPIN32F0 sistem-çip (içinde ARM Cortex-M0 tabanlı bir STM32F0 mikrodenetleyici ve üç faz gate sürücüler bulunur) kullanılarak bir motor sürücü tasarlanmış ve gerçek yük altında test edilmiştir. Donanım mimarisi, Hall etkili sensörlerden rotor pozisyon bilgisini alarak altı adımlı (trapezoidal) komütasyon gerçekleştirecek şekilde yapılandırılmıştır. STM32'nin gömülü zamanlayıcıları ile uygun PWM sinyalleri üretilmiştir. Yapılan deneylerde tasarlanan sistem farklı yük koşullarında kararlı çalışmış, yüksek performanslı hız kontrolü sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, entegre STM32 tabanlı bu çözümün küçük elektrikli araç motor sürücülerinde başarılı olduğunu ve gelecekte daha gelişmiş algoritmalar (ör. alan yönelimli kontrol) ile menzil ve dinamik performansın daha da artırılabilceğini ortaya koymaktadır [13]

Jin ve Sun, STM32F103ZET6 tabanlı bir BLDC sürücü sistemi tasarlamış ve kritik işlevleri uygulamıştır. Bu çalışmada STM32'nin GPIO, PWM ve zamanlayıcı modülleri kullanılarak motor için yumuşak başlat-durdur, konum algılama ve kapalı çevrim hız regülasyonu fonksiyonları gerçekleştirilmiştir. Verimli bir PID algoritmasıyla hız geribeslemeli kontrol sağlanmış ve deneylerde sistemin düşük maliyetle yüksek performans/hız oranına sahip şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Sonuçta önerilen sürücü sisteminin fırçasız motoru hızlı tepki ve kararlılıkla kontrol edebildiği, dolayısıyla küçük elektrikli taşıtlarda uygulanabilir bir çözüm olduğu belirtilmiştir [14]

Koçaş ve Akdemir, hafif elektrikli bir yarış aracının BLDC motor sürücüsünü tasarlarken sürüş güvenliğini ön plana çıkarmıştır. Çalışmalarında 2 kW gücünde bir göbek motorunu sürececek STM32F103 tabanlı bir kontrol birimi geliştirmişler; sistemde gaz ve fren pedallarının aynı anda basılması, vites geçişleri ve batarya ısınması gibi senaryolar için

emniyet algoritmaları uygulamışlardır. Sürücü devresi, yalıtılmış TLP250 gate sürücülerini ile MWI 75-06 A7 IGBT modülünü kontrol eden bir yapıda tasarlanmış ve motor Hall sensörleri ile konum geri bildirimi alınarak altı adım modunda sürüş sağlanmıştır. Akustik konfor için anahtarlama frekansı işleme bandı üzerine çıkarılmış, motor ve IGBT sıcaklıkları ile akım sürekli izlenerek güvenli çalışma aralıkları korunmuştur. Yapılan testlerde, geliştirdikleri sürücü ve gömülü güvenlik mekanizmalarının zorlu kullanım senaryolarında dahi aracı güvenli şekilde durdurabildiği ve batarya-motor sistemini koruduğu görülmüştür. Çalışma, elektrikli araçlarda güvenlik odaklı motor sürücü tasarımının önemini vurgulamakta ve gerçek sürüş koşullarında emniyeti artıran bir yaklaşım sunmaktadır.[15]

Shen ise elektrikli araç BLDC motorları için akım örnekleme tekniğine odaklanmıştır. Bu çalışmada geleneksel faz direnciyle örnekleme yönteminin yüksek akımlarda yarattığı sorunları aşmak üzere MOSFET'lerin iç direnci ile akım ölçümü yapan yenilikçi bir donanım tasarlanmıştır. STM32 serisi bir mikrodenetleyici etrafında geliştirilen kontrol kartı, güç kaynağında kısa devre korumasını iyileştirmek amacıyla MOSFET'in iç direnç üzerinden akım algılama devresini barındırmıştır. Alüminyum tabanlı özel PCB üzerine kurulan bu çözüm sayesinde yüksek akımlarda ölçüm doğruluğu artarken, ek shunt direnci ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Test sonuçları, tasarlanan devrenin güvenilir şekilde çalıştığını ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur. [16]

Rusli, STM32 tabanlı altı adımlı bir BLDC sürücü devresinin dijital benzetimini gerçekleştirerek PWM sinyal üretim tekniğini irdelemiştir. PSIM ortamında hazırlanan modelde, STM32 mikrodenetleyicinin programlanabilir C-blokları kullanılarak H_PWM_L_ON (yüksek kol PWM, alçak kol sürekli iletim) modunda üç fazlı inverter kontrolü uygulanmıştır. Bu sayede STM32'nin esnek PWM modülasyon kabiliyeti ile BLDC motor fazlarına doğrulukla darbe genişlikleri uygulanmış; FFT analizleri ile üretilen PWM sinyalinin spektral doğruluğu ve farklı görev döngülerinin motor üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, önerilen sayısal PWM uygulamasının hassas bir hız kontrolü sağladığı ve STM32 tabanlı BLDC sürücülerinde geçerli bir yöntem olduğu gösterilmiştir.[17]

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. TASARIMDA KULLANILAN BİLEŞENLER

Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan motor sürücü sistemi, 48V 750W özelliklere sahip BLDC motoru kontrol etmek için tasarlanmıştır. Bu tasarım için seçilen bileşenler, voltaj ve akım gereksinimlerini karşılamak, verimli çalışmayı sağlamak ve sağlam kontrol ve koruma özellikleri sağlamak için gereklidir. Tasarımın ana bileşenleri STM32 mikrodeneleyici, MOSFET'ler, MOSFET sürücü ve BLDC motorun kendisidir.

3.1.1. STM32F103C8T6TR Mikroişlemcisi

STM32F103C8T6TR, STMicroelectronics'in STM32F1 serisinden ARM Cortex-M3 çekirdeği etrafında inşa edilmiş bir mikrodeneleyicidir. Bu mikrodeneleyici, işlem gücü ve enerji verimliliği arasında bir denge kurarak motor kontrolü gibi uygulamalar için en iyi seçimdir. Motor kontrol algoritmalarını yürütmek ve BLDC motorun gerçek zamanlı işlemlerini yönetmek için yeterli olan 64 KB flash bellek ve 20 KB SRAM ile donatılmıştır.

STM32F103C8T6TR, motor kontrol sistemi için kritik olan zengin çevre birimleri seti nedeniyle seçilmiştir. Bu çevre birimleri arasında zamanlayıcılar, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) çıkışları, analog-dijital dönüştürücü (ADC) kanalları ve UART ve SPI gibi iletişim arayüzleri bulunmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. STM32F103C8T6TR mikrodeneleyici[18]

3.1.2. IR2110 MOSFET Sürücü

IR2110, STB75NF75T4 MOSFET'leri etkin bir şekilde sürmek için bu tasarımda seçilen yüksek voltajlı, yüksek hızlı bir MOSFET sürücüsüdür. Bu sürücü hem yüksek taraf hem de düşük taraf MOSFET'leri sürebildiği için BLDC motor kontrolünde kullanılan tam köprü konfigürasyonları için özellikle uygundur. IR2110, bu tasarımda kullanılan 48V güç kaynağı gibi daha yüksek voltajlarda çalışan sistemlerle uyumlu olmasını sağlayan dahili bir yüksek voltaj seviye kaydırma devresi ile donatılmıştır.

IR2110, MOSFET'lerin verimli bir şekilde anahtarlmasını sağlamak için gerekli olan 20 V'a kadar kapı sürücü voltajları sağlayabilir. Bu özellik, motor sürücüsünün performansını optimize etmeye yardımcı olarak güç kademesinin hızlı ve güvenilir çalışmasını sağlar. Ayrıca IR2110, shoot-through'u önlemek için tasarlanmış bir özellik olan yerleşik ölü zaman kontrolü içerir. Shoot-through, tamamlayıcı bir çiftteki her iki MOSFET aynı anda açıldığında meydana gelir, kısa devreye neden olur ve devreye potansiyel olarak zarar verir. IR2110, ölü zaman kontrolü sayesinde MOSFET'lerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak bileşenlere zarar verme riskini azaltır ve motor sürücü sisteminin genel güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artırır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. IR2110 mosfet sürücü[19]

3.1.3. STB75NF75T4 MOSFET

STB75NF75T4, STMicroelectronics tarafından üretilen N-kanal bir MOSFET olup, yüksek akım (80 A'ya kadar) ve yüksek gerilim (75 V'a kadar) kapasitesi sayesinde bu motor sürücü tasarımı için ideal bir seçimdir. Bu komponentin en belirgin avantajlarından biri, düşük iletim direnci ($R_{DS(on)}$) değeridir. Düşük açma direnci, anahtarlama sırasında oluşan iletim kayıplarını minimize ederek, çalışma esnasında oluşabilecek ısı miktarını azaltır ve böylece termal yönetimi kolaylaştırır. Bu özellikler,

yüksek verimlilik gerektiren motor kontrol uygulamaları için STB75NF75T4'ü uygun hale getirmektedir.

MOSFET'ler, yüksek hızlı ve verimli anahtarlama kapasiteleriyle motor sürücü devrelerinde birincil anahtarlama elemanı olarak görev yaparlar. STB75NF75T4, düşük geçiş kayıpları ve hızlı anahtarlama karakteristiği ile motorun ani yük değişimlerine karşı kararlı çalışmasını sağlar. Bu yapı, büyük soğutuculara olan ihtiyacı azaltırken, genel sistem boyutlarının ve maliyetlerinin düşürülmesine katkıda bulunur.

Özellikle fırçasız doğru akım (BLDC) motorların kontrolü gibi, yüksek akım ve gerilimlerin söz konusu olduğu uygulamalarda, STB75NF75T4, hem yüksek güvenilirlik hem de enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Termal performansının yüksek olması, uzun süreli çalışmalarda bile MOSFET'in güvenli sınırlar içinde kalmasına olanak tanır ve sistemin dayanıklılığını artırır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. STB75NF75T4 mosfet[20]

3.1.4. 48V 750W BLDC Hub Motor

48V 750W BLDC motor, güç kapasitesi ve sistemin 48V giriş voltajıyla uyumluluğu nedeniyle bu tasarım için seçilmiştir. Fırçasız DC motorlar (BLDC) bu kurulumda tercih edilmiştir çünkü yüksek verimlilik, düşük bakım ve yüksek tork yoğunluğunun bir kombinasyonunu sunarlar. Geleneksel fırçalı motorların aksine, BLDC motorlar fırça kullanmaz, bu da zaman içinde mekanik aşınma ve yıpranmayı en aza indirir. Bu da onları yüksek güvenilirlik ve uzun çalışma ömrü gerektiren uygulamalar için iyi hale getirir.

48V besleme gerilimine ve 750W gücüne sahip BLDC motor, geniş bir hız aralığında önemli tork sağlamak üzere tasarlanmıştır ve endüstriyel ve otomotiv sistemleri de dahil olmak üzere çok sayıda uygulama için oldukça çok yönlüdür. 48V DC besleme ile çalışan bu motor, 25A'e kadar tepe akımlarını idare edebilen bir motor sürücüsü gerektirir. Bu

yüksek akım talebi, motorun çalışması boyunca verimli güç yönetimi ve güvenilir performans sağlamak için MOSFET'lerin ve sürücülerin dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirir.

3.2. BİLEŞEN SEÇİMİ VE DEVRE TASARIMI

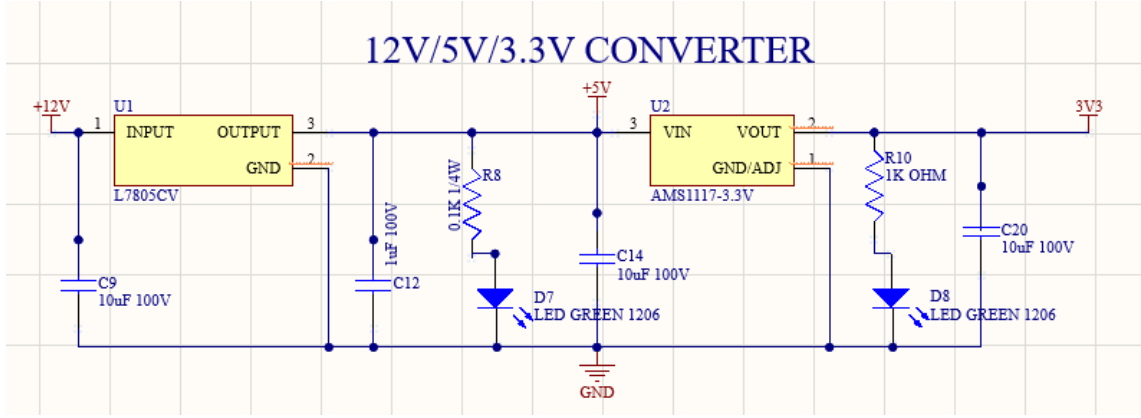
Tasarım sürecinin ilk aşaması, motor sürücüsü için uygun bileşenlerin seçimidir. Bu seçim sürecinde, her bir bileşenin teknik özellikleri, sistem gereksinimleri ve performans hedefleri dikkate alınarak, optimal uyum sağlanmaya çalışılmıştır.

İlk olarak, mikrodenetleyici seçiminde STM32F103C8T6TR modeline karar verilmiştir. Bu mikrodenetleyici, üstün hesaplama kapasitesi, kullanım kolaylığı ve motor kontrol algoritmalarıyla uyumluluğu nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, mikrodenetleyicinin sağladığı hızlı işlemci gücü, endüstriyel ve otomotiv uygulamalarındaki gereksinimleri karşılayacak düzeyde olup, sistemin verimli çalışmasına katkı sağlamaktadır. Motor sürücüsü tasarımında kullanılan STB75NF75T4 MOSFET, yüksek akım taşıma kapasitesi ve düşük açık direnç değerleri nedeniyle seçilmiştir. Bu özellikler, motor sürücüsünün enerji verimliliğini artırırken, aynı zamanda güç kayıplarını minimize etmektedir. Ayrıca, IR2110 MOSFET sürücüsü, entegre koruma fonksiyonları ve yüksek taraf ile düşük taraf anahtarlama yönetimindeki etkinliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu sürücü, motor kontrol sisteminin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Sistemde ayrıca, akım okuma ve voltaj okuma devreleri bulunmakta olup, bu devreler sistemin doğru çalışabilmesi için sürekli izleme ve geri bildirim sağlamaktadır. Bu sayede, sistemde oluşabilecek olası arızalar veya dengesizlikler tespit edilerek, gerekli önlemler alınabilmektedir.

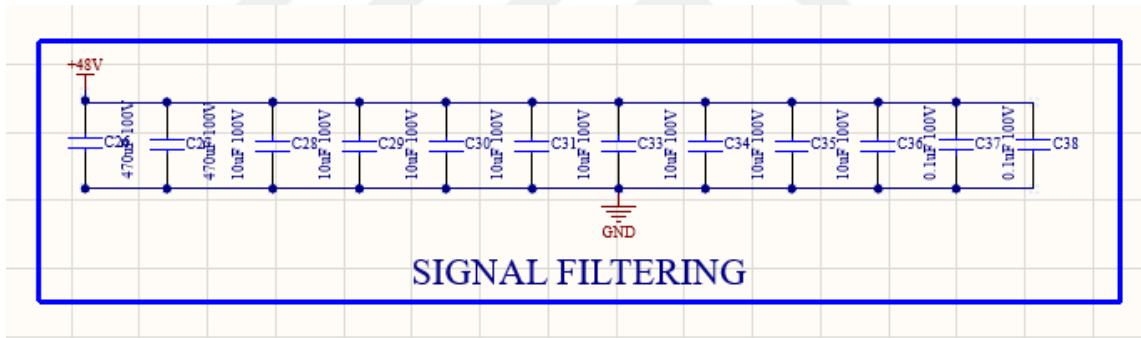
Sistem tasarımında, bileşenlerin doğru ve güvenilir çalışabilmesi için decoupling kapasitörleri kullanılmıştır. Bu kapasitörler, voltaj dalgalanmalarını engelleyerek, bileşenlerin stabil çalışmasını sağlamaktadır.

Güç yönetimi açısından, 36-60 V aralığındaki giriş voltajını 12V'a çeviren bir buck devresi kurulmuştur. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi 12V'tan mikroişlemci gibi çevre birimleri beslemesi için 5V ve 3V'ye düşüren regülatörler tasarıma dahil edilmiştir. Bu regülatörler, sistemin farklı bileşenlerine uygun gerilim seviyelerini sağlayarak, her bileşenin ihtiyaç duyduğu doğru beslemeyi temin etmektedir. Böylelikle, sistemin genel verimliliği ve güvenliği artırılmaktadır.



Şekil 3.4. 12V/5V/3.3V converter devresi

Son olarak, Şekil 3.5'teki sinyal filtreleme devresi de tasarıma entegre edilmiştir. Bu devre, sinyal gürültüsünü ve istenmeyen frekans bileşenlerini filtreleyerek, sistemin doğru ve temiz sinyal ile çalışmasını sağlamaktadır. Bu sayede, özellikle motor kontrolü gibi hassas işlemler daha güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.5. Sinyal filtreleme devresi

Sonuç olarak, sistemin her bir bileşeni, motor sürücüsünün yüksek verimlilik ve güvenlik hedefleri doğrultusunda dikkatlice seçilmiş ve uyum içinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

4. FIRÇASIZ (BLDC) DOĞRU AKIM MOTORLARI

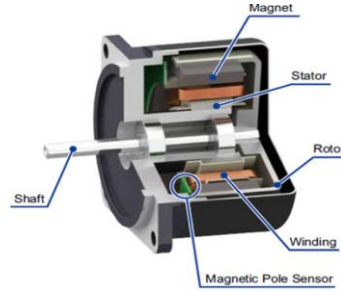
4.1. BLDC MOTORLARININ YAPISI

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, modern teknolojinin sunduğu yüksek verimlilik ve dayanıklılık gereksinimlerine yanıt vermesiyle endüstriyel ve tüketici elektroniği alanlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Geleneksel fırçalı DC motorlardan farklı olarak fırça ve kolektör sistemine ihtiyaç duymayan BLDC motorları, bu sayede sürtünme ve aşınma kaynaklı enerji kayıplarını en aza indirir ve bakım ihtiyacını büyük ölçüde azaltır. Elektronik bir sürücü devresiyle çalışan bu motorlar, stator sargılarına verilen sıralı akım ile rotorun sabit mıknatısları arasında oluşan manyetik alanı kontrol ederek yüksek hassasiyetle hareket eder. Sessiz çalışma, uzun ömür, yüksek hız kapasitesi ve enerji verimliliği gibi özellikleriyle öne çıkan BLDC motorları, özellikle elektrikli araçlar, ev aletleri, tıbbi cihazlar ve robotik sistemler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir.

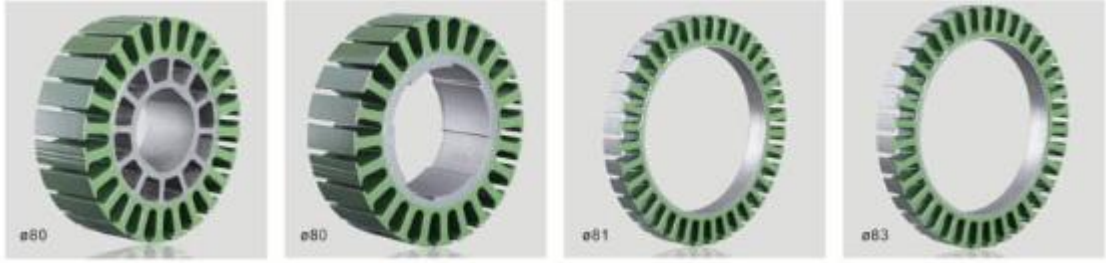
4.1.1. Stator

Elektrik motorunun sabit bir bileşeni olan stator, içerdiği silisyum sayesinde manyetik iletkenlik kayıplarını minimumda tutan ve üzerine sargıların sarıldığı ince sac çekirdeklerden oluşur. İstenilen oluk sayısına ve belirlenen motor parametrelerine göre kalıplar belirlenir ve bu sac çekirdekler kesilerek preslenir. Stator üzerine yerleştirilen sargıların birbirine temas edip kısa devre yapmasını önlemek için plastik yalıtkanlar veya toz boya kullanılır. Sargılar yerleştirilerek, verniklenerek ve uçlarına konnektörler eklenerek dış bağlantıya hazır hale getirilir. Fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan statorlar, iç ve dış çap, kalıp tipi, yuva sayısı gibi çeşitli özelliklere göre çeşitlilik gösterir; bu farklılıklar statorun farklı uygulamalara uyum sağlamasını sağlar.

Şekil 4.2'de, fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan farklı stator tipleri; iç ve dış çap, kalıp şekli, oyuk (slot) sayısı gibi özellikleriyle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Stator[21]



Şekil 4.2. Fırçasız motor statoru[22]

4.1.1.1. Statorun Motor Performansına Etkisi

Stator sargıları, elektrik akımının etkisiyle bir manyetik alan oluşturur ve bu manyetik alan, rotorun hareket etmesini sağlar. Stator sargılarının düzgün bir şekilde sarılması ve statorun manyetik geçirgenlik özelliği, motorun manyetik alan üretim verimliliğini ve dolayısıyla rotorun hareket etkinliğini belirleyen temel unsurlardır. Stator yapısında kullanılan sac nüveler ve silisyum gibi malzemeler, manyetik kayıpları azaltarak motorun enerji verimliliğini artırır. Manyetik kayıpların minimum seviyede tutulması, motorun daha az enerji harcayarak yüksek performans göstermesine katkıda bulunur. Verimli bir stator tasarımı, motorun aşırı ısınmasını önleyerek daha yüksek güç seviyelerinde stabil çalışmasını sağlar. Aksi takdirde, yetersiz bir stator tasarımı ısınma sorunlarına yol açabilir, bu da motorun ömrünü kısaltarak performansını olumsuz etkiler. Statorun sargı düzeni, bobin sayısı ve yerleşimi, motorun üretebileceği tork ve güç miktarını belirleyen kritik faktörlerdir. Daha fazla bobin sargısı ve uygun sarım teknikleri, motorun yüksek tork ve güç üretmesini sağlarken, aşırı sargı direnci enerji kaybına yol açabileceğinden, optimum bir denge kurulması gerekmektedir.

Y. Korkmaz'ın çalışmasında statorun motor performansına etkileri incelenmiştir. 36 oluklu, 4 kutuplu, 1,1 kW'lık iki adet asenkron motorun statorları farklı sargı yapılarıyla (biri tek tabakalı, diğeri iki tabakalı) sarılan motorları PWM invertörle besleyerek test etmiştir. Deneyler sonucunda, tek tabakalı sargılı motorun veriminin yüksek olduğu,

ancak harmonikler açısından iki tabakalı sargılı motorun daha iyi performans gösterdiği tespit etmiştir.[23]

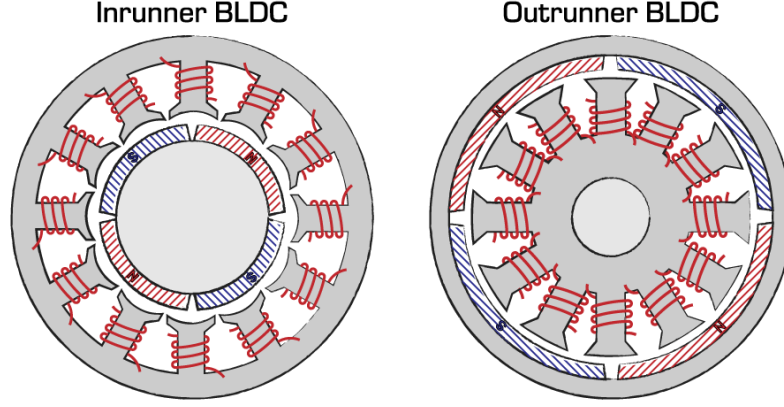
4.1.2. Rotor

Rotor, BLDC motorlarda statorun oluşturduğu manyetik alanla etkileşime girerek hareket eden döner parçadır. BLDC motorlarda rotor genellikle kalıcı mıknatıslarla donatılmıştır ve stator sargılarının manyetik alanına göre döner. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren temel bileşenlerden biridir. BLDC hub motorlarda rotor, motorun gövdesine sabitlenen stator etrafında döner ve bu yapı, motoru doğrudan tekerleğe monte ederek hareket sağlar.

4.2. INRUNNER VE OUTRUNNER MOTOR TİPLERİ

Inrunner (içten rotorlu) motorlarda rotor, statorun içinde bulunur. Rotor, statorun içinde döner ve manyetik alanı içeride oluşturur. Bu tip motorlarda rotor daha küçük bir çapa sahip olduğundan, daha yüksek devir hızlarına ulaşabilir ve bu nedenle hız gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Inrunner motorlarda rotorun statorun içinde konumlanması, motorun daha stabil çalışmasına katkı sağlar. Ancak, bu yapı düşük hızlarda outrunner motorlara göre daha düşük tork performansı sunar. Bu nedenle inrunner motorlar, düşük hızlarda yüksek tork gereksinimi olmayan, fakat hız avantajı gerektiren uygulamalarda kullanılır (Şekil 4.3).

Outrunner (dıştan rotorlu) motorlarda rotor, statorun dışında yer alır ve motorun dış gövdesi rotor olarak döner. Outrunner motorlar, rotor çapının daha büyük olması nedeniyle daha fazla tork üretebilir ve bu da düşük hızlarda yüksek tork gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar. Yüksek tork üretimi sayesinde, outrunner motorlar elektrikli bisikletler, scooterlar ve drone gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Düşük hızlarda yüksek çekiş gücüne sahip olmaları, tekerleğe doğrudan entegre edildiklerinde daha güçlü bir itiş gücü sağlamalarına olanak tanır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Inrunner ve outrunner motor tipleri[24]

4.3. BLDC MOTORLARDA KULLANILAN MIKNATIS TÜRLERİ

Mıknatıslar, çevrelerine uyguladıkları manyetik alan sayesinde demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik malzemeleri çekme özelliğine sahip cisimlerdir. Genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki grupta incelenirler.

4.3.1. Doğal Mıknatıslar

Doğada kendiliğinden oluşan ve kalıcı manyetik özellikler taşıyan maddelerdir. Bu tür mıknatısların en bilinen örneği, Fe_3O_4 (manyetit) mineralidir. Yeryüzünde bulunan bazı kayaçların, özellikle de manyetit içerenlerinin, yer kabuğunun manyetik etkisiyle doğal olarak mıknatıslanması sonucunda ortaya çıkarlar. Ancak doğal mıknatısların manyetik alan şiddetleri sınırlıdır ve teknolojik uygulamalarda yetersiz kalabilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Doğal mıknatıs[25]

4.3.2. Yapay Mıknatıslar

İnsan müdahalesiyle manyetik özellik kazandırılmış malzemelerdir. Yapay mıknatıslar, belirli elementlerin alaşımlarından oluşturularak kontrollü şekilde mıknatıslanırlar. Bu kategoride yer alan mıknatıslar arasında ferrit, alnico, samaryum-kobalt (SmCo) ve

neodimyum-demir-bor (NdFeB) gibi gelişmiş kalıcı mıknatıs türleri bulunur. Ferrit ve elastik mıknatıslar, düşük maliyetleri sayesinde basit uygulamalarda yaygın olarak tercih edilirken, neodimyum ve samaryum-kobalt gibi nadir toprak mıknatısları, yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için geliştirilmiştir. Özellikle NdFeB mıknatısları, günümüzde elektrikli araçlardan rüzgar türbinlerine kadar birçok yüksek verimlilik gerektiren alanda kullanılmaktadır. Alnico mıknatıslar, sıcaklığa dayanıklı yapıları sayesinde sensör ve ölçüm cihazlarında önem taşırken, SmCo mıknatıslar, yüksek sıcaklık ve korozyon riskinin olduğu askeri veya uzay uygulamaları gibi alanlarda tercih edilmektedir. Teknolojinin gün geçtikçe ilerlemesiyle birlikte doğal mıknatısların yerini büyük ölçüde yüksek performanslı yapay mıknatıslar almıştır.

4.3.2.1. Yapay Mıknatıs Türlerinin Kıyaslaması

M. Toren yaptığı çalışmada, NdFeB mıknatısların yüksek manyetik yoğunlukları sayesinde BLDC motor performansını artırdığı belirtmiştir. [26]

N. Magnetics şirketi tarafından yapılan çalışmada elektrikli araç motorlarında yaygın olarak kullanılan Neodimyum Demir Bor (NdFeB) ve Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatısları karşılaştırılmıştır. NdFeB mıknatısların yüksek tork ve düşük hızlarda üstün performans sağladığı, ayrıca motorların daha kompakt ve hafif olmasına katkı sağladığı belirtilmiştir.[27]

S. Magnets şirketi tarafından yapılan çalışmada Neodimyum Demir Bor (NdFeB) ve Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatıs tipi kullanılan elektrikli motorlar kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda SmCo mıknatısların yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direnci sayesinde zorlu ortamlar için uygun olduğu, ancak NdFeB'ye göre daha düşük manyetik enerjiye sahip olduğu belirtilmiştir.[28]

M.Coey yaptığı çalışmada Neodimyum Demir Bor (NdFeB) ve Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatıs tipi kullanılan elektrikli motorlar kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda NdFeB mıknatıslarının EV motorlarında lider konumda olduğu, SmCo bileşiklerinin ise yüksek performanslı ticari alternatifler sunduğu belirtilmiştir.[29]

Tablo 4.1. Mıknatıs türleri ve temel özellikleri

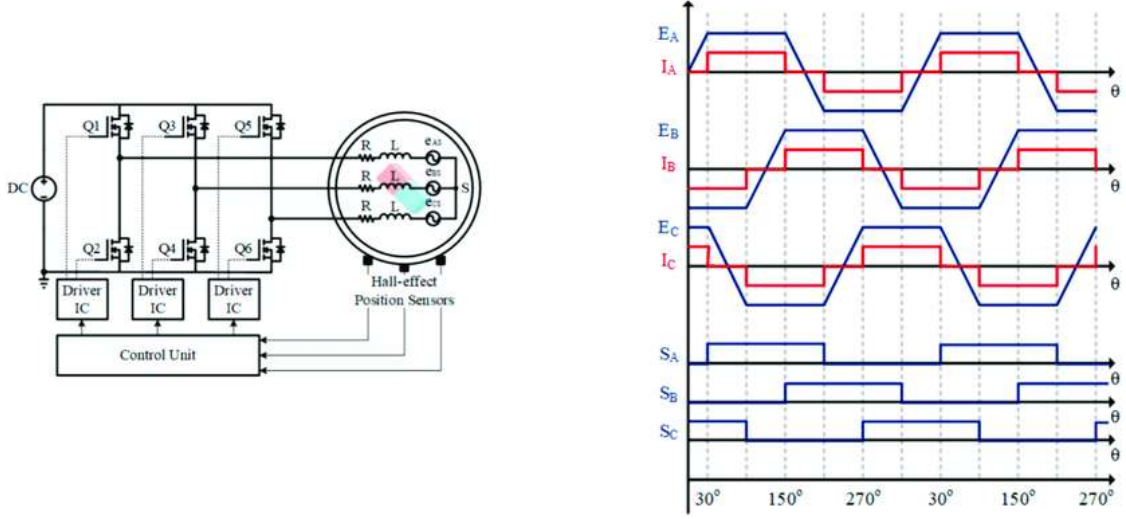
Mıknatıs Türü	Bileşimi	Temel Özellikleri
Ferrit (Seramik) Mıknatıslar	Fe_2O_3 + Sr/Ba karbonat	Düşük maliyetli, paslanmaz, zayıf manyetik alan yoğunluğu.
Alnico Mıknatıslar	Alüminyum (Al), Nikel (Ni), Kobalt (Co)	Yüksek sıcaklık dayanımı, orta düzeyde manyetik güç.
Neodimyum Demir Bor (NdFeB)	Neodimyum (Nd), Demir (Fe), Bor (B)	En güçlü kalıcı mıknatıs türü, kompakt yapıda yüksek manyetik alan üretimi.
Samaryum Kobalt (SmCo)	Samaryum (Sm), Kobalt (Co)	Yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı, pahalı ancak kararlı manyetizma.
Elastik (Esnek) Mıknatıslar	Ferrit tozu + plastik polimer	Bükülebilir yapıda, düşük manyetik yoğunluk, promosyon ve tanıtım alanlarında kullanılır.

4.4. BLDC MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE KULLANIM ALANLARI

BLDC motorların çalışma prensibi, stator ve rotor arasında meydana gelen etkileşimlere dayanır. Stator, içerisinde çok sayıda elektromıknatıs bulunduran bir yapıdadır ve genellikle üç fazlı bir düzenlemeyle tasarlanmıştır. Enerji akışı sağlandığında, stator bir elektromanyetik alan oluşturur ve bu alan, rotorun hareketini mümkün kılar. Rotor, motorun merkez kısmında yer alır ve üzerinde kalıcı mıknatıslar bulunur. Rotorun dönüşü, stator tarafından üretilen manyetik alana tepki vermesiyle gerçekleşir ve bu etkileşim sürekli bir hareket döngüsü yaratır.

BLDC motorlarının belirgin özelliklerinden biri, fırça ve komütatör gibi mekanik bileşenlerin bulunmamasıdır. Bunun yerine, motorun çalışma durumu bir elektronik kontrol devresi tarafından yönetilmektedir. Bu devre, rotorun konumunu sürekli olarak izleyerek hangi stator sargılarının akımla beslenmesi gerektiğini belirler. Elektronik komütasyon, motorun verimliliğini artırır ve ömrünü uzatır. Rotor pozisyonunu algılamak için sıklıkla Hall sensörleri kullanılır; bu sensörler Şekil 4.5’ te görüldüğü üzere, rotorun açısal konumunu belirleyerek kontrol devresine geri bildirimde bulunur. Böylece stator sargıları, doğru sırayla ve zamanlamayla enerjilendirilir, bu da rotorun manyetik alanı takip etmesini ve sürekli bir döngü oluşturmasını sağlar.

BLDC motorlarının sağladığı en önemli avantajlardan biri, hassas bir şekilde hız ve tork kontrolü yapabilme kapasitesidir. Elektronik kontrol devresi, motorun hızını ve torkunu anlık olarak ayarlayarak istenen performansı elde etmeye olanak tanır. Bu durum, motorun çeşitli yük koşullarına uyum sağlamasına ve gerektiğinde ani hızlanma veya yavaşlama yapmasına imkan verir.

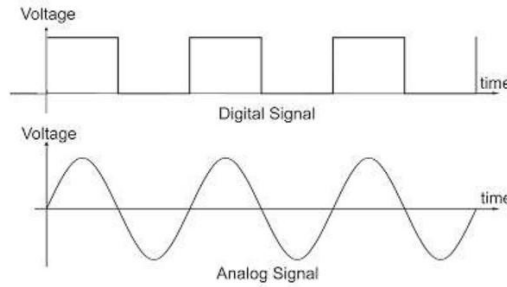


Şekil 4.5. BLDC motor çalışma prensibi[30]

5. BLDC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

5.1. KONTROL VE SÜRÜŞ STRATEJİLERİ

BLDC (Fırçasız DC) hub motorlarının tasarımında, motor kontrolü ve sürüş stratejileri, yüksek verimlilik ve doğru performans elde etmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Hub motorlar, özellikle elektrikli araçlar ve elektrikli bisikletler gibi taşımacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür motorların etkili bir şekilde sürülmesi, hem motorun performansını optimize etmek hem de genel verimliliği artırmak için uygun stratejilerin belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, motor kontrolünün başarısı, yalnızca motorun doğru bir şekilde çalışmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji tüketimini en aza indirmek, tork ve hız kontrolünü hassas bir biçimde gerçekleştirmek için de büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5.1. Dijital ve analog sinyal grafiği[31]

5.1.1. Dijital Kontrol Stratejileri

Dijital kontrol, geleneksel analog yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk, esneklik ve gelişmiş parametre ayarları sunar. Bu stratejiler, mikrodenetleyiciler veya dijital sinyal işleme (DSP) birimleri kullanılarak gerçekleştirilir. Dijital kontrolün temel avantajı, motor parametrelerinin ve sürüş algoritmalarının yazılım aracılığıyla kolayca güncellenebilmesi ve optimize edilebilmesidir. Örneğin, hız ve tork kontrolü için dijital PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyicileri sıklıkla kullanılır. Ayrıca, dijital kontrol sistemleri, motorun rotor pozisyonunun hassas bir şekilde izlenmesini sağlayan sensörlü veya sensörsüz kontrol yöntemlerini entegre edebilir. Bu, motorun her türlü

Çalışma koşulunda stabil bir performans sergilemesine olanak tanır. Dijital kontrolün sağladığı yüksek hızda işlem yapabilme yeteneği, motorun daha hızlı ve hassas tepki vermesini sağlayarak, özellikle dinamik yük değişimlerinde verimliliği artırır.

5.1.2. Analog Kontrol Stratejileri

Analog kontrol stratejileri, genellikle belirli bir gerilim aralığı (rneğin 0-10V veya 0-5V) kullanarak hızı kontrol etmek için tercih edilen eski teknolojiye dayalı yöntemlerdir. Bu stratejiler, kontrol sinyali ile çıkış arasında doğrudan bir ilişki kurarak sistemin basit ve anlaşılır bir şekilde çalışmasını sağlar. Ancak, analog sistemlerin dijital sistemlere kıyasla çevresel gürültüye daha duyarlı olması, sistemin hassasiyetini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, analog sinyallerin parazitlerden arındırılması ve yüksek gerilimle çalışan devrelerde analog sinyallerin g kısmından izole edilmesi büyük önem taşır. Filtreleme yöntemlerinin doğru kullanılması ve sistemin uygun şekilde tasarlanması, analog kontrolün verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu tür tasarımlar, analog sistemlerin sağladığı çözünürlük ve doğruluk avantajları ile beklenen işlevlerin yerine getirilmesini mümkün kılar.

5.1.3. PWM ile Hız Kontrolü

PWM (Pulse Width Modulation - Darbe Genişlik Modülasyonu), elektrikli motorların hızını düzenlemek için yaygın olarak kullanılan etkili bir kontrol yöntemidir. Bu teknik, motorun hızını kontrol etmek amacıyla besleme geriliminin genişliğini modüle eder. PWM sinyali, belirli bir frekansta üretilen dikdörtgen dalga sinyalleriyle çalışır ve motorun beslenme süresini bu sinyallerin darbe genişliği (duty cycle) ile ayarlar. Bu yöntem, özellikle BLDC (Fırçasız DC) motorlar ve DC motorlar gibi sistemlerde hız kontrolünü sağlamak için tercih edilmektedir.

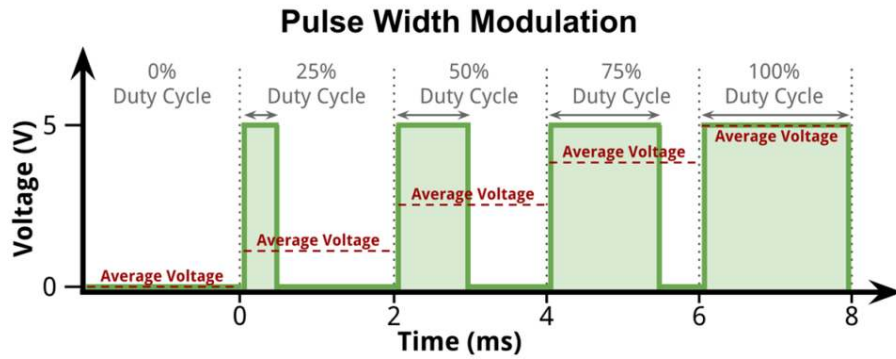
PWM ile hız kontrolünün temel prensibi, motorun besleme geriliminin belirli aralıklarla açılıp kapanmasıdır. Bu süreçte, sinyalin darbe genişliği (duty cycle) motorun beslenme süresini ve dolayısıyla hızını doğrudan etkiler. Duty cycle, PWM sinyalinin açık olduğu süreyi belirler; dolayısıyla, duty cycle oranı arttıkça motorun besleme voltajı da artar ve motor daha yüksek hızda çalışır. Tersine, duty cycle oranı düştükçe, motorun besleme gerilimi azalır ve hız düşer. Bu ilişki doğrusal olup, duty cycle oranı %100 olduğunda motor maksimum hızda çalışırken, %0 olduğunda motor durur.

PWM yöntemi, hız kontrolü açısından motorun hassas bir şekilde düzenlenmesine olanak

tanır. Bu özellik, motorun hızının ince ayarlarla ve yüksek doğrulukla kontrol edilmesine imkan verir. Ayrıca, PWM ile hız kontrolü, motoru aşırı yüklemelerden ve ani hız değişimlerinden koruyarak daha stabil bir çalışma sağlar. Motor hızının ani değişimlerinin önlenmesi, motor ömrünü uzatarak sistemin güvenilirliğini artırır (Şekil 5.2).

PWM kontrollü hız kontrolü sistemlerinde, hız değişiklikleri genellikle bir rampalama fonksiyonu ile yumuşatılabilir. Bu fonksiyon, motorun hızını ani bir şekilde değiştirmek yerine, belirli bir süre boyunca yavaşça artırarak veya azaltarak motorun daha yumuşak bir şekilde başlatılmasını ve durmasını sağlar. Bu tür bir kontrol, motor üzerindeki ani yük değişimlerini ve olası zararları minimize eder. Ancak, hızın hızlı bir şekilde değişmesi gerektiği durumlar için kontrolcü, düşük gecikme süreleriyle daha hızlı tepkiler verecek şekilde optimize edilebilir.

PWM yöntemi, özellikle motor tipine, uygulama gereksinimlerine ve sistem karmaşıklığına bağlı olarak çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunar. Dolayısıyla, en uygun kontrol stratejisi seçilirken motorun tipi, hız kontrol hassasiyeti, maliyet ve sistemin genel tasarımı gibi faktörler dikkate alınmalıdır.



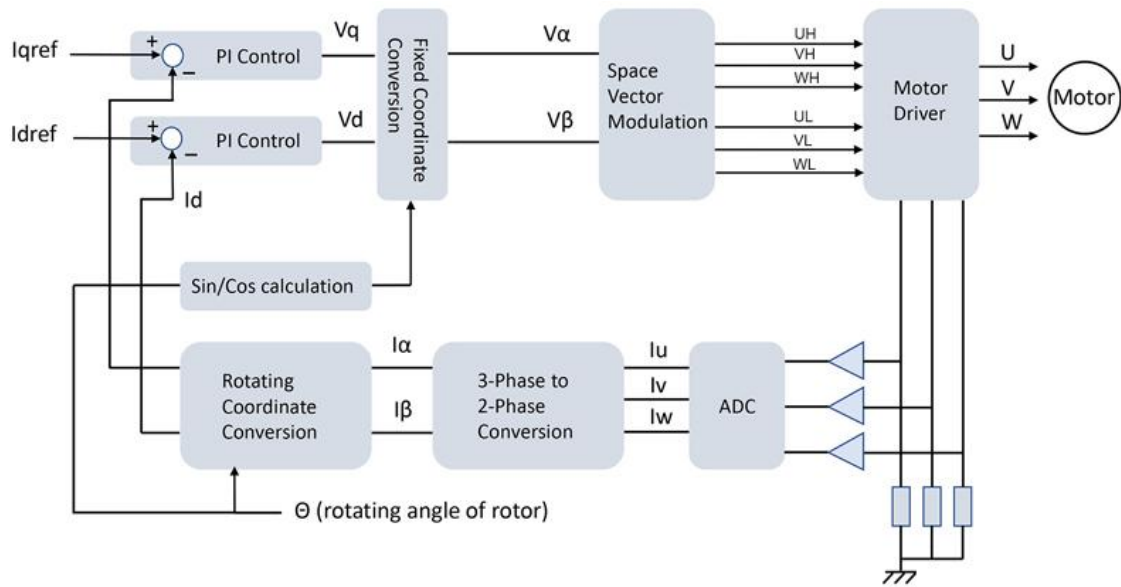
Şekil 5.2. PWM sinyal grafiği[32]

5.2. SENSÖRLÜ VE SENSÖRSÜZ SÜRÜŞ TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fırçasız DC (BLDC) motorlar, yüksek verimli motor türleridir. Bu motorların etkin bir şekilde kontrol edilmesi, rotor pozisyonunun ve hızının doğru bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Rotor pozisyonunu tespit etmek için kullanılan başlıca yöntemler sensörlü (Hall sensörlü), sensörsüz (geri-EMF tabanlı) ve enkoderli sürüş teknikleridir.

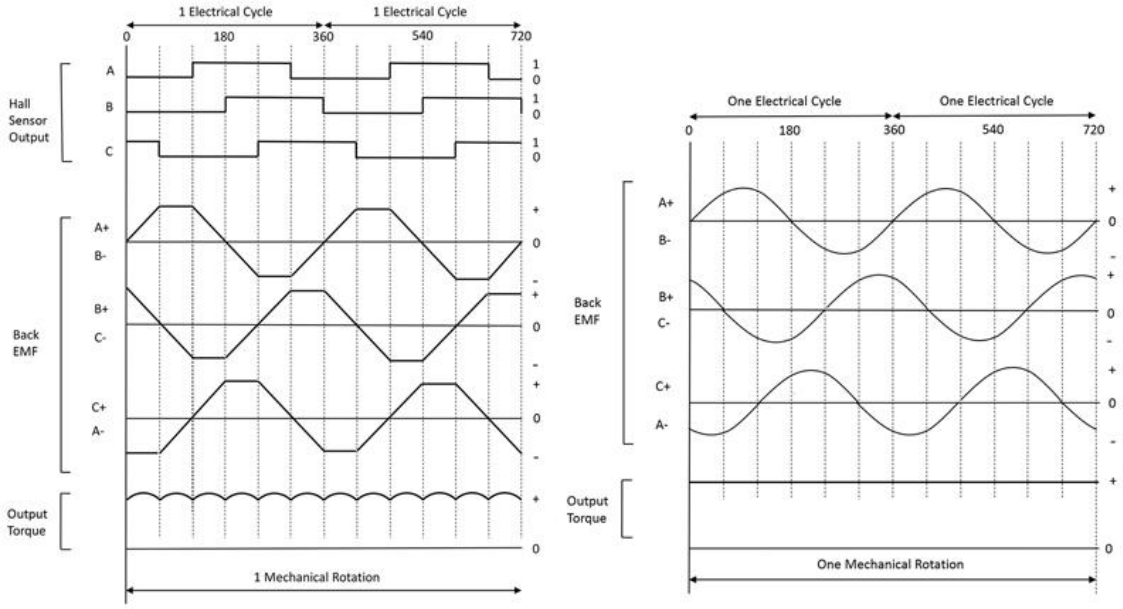
5.2.1. Sensörsüz Sürüş Teknikleri

Sensörsüz sürüş tekniği, rotor pozisyonunu belirlemek için fiziksel sensörler yerine motorun geri-EMF (elektromotor kuvvet) sinyallerini analiz eden bir yöntemdir. BLDC motor döndüğünde, stator sargılarında rotorun hareketine bağlı olarak geri-EMF gerilimi oluşur. Bu gerilim, rotor pozisyonuna bağlı olarak değişir ve sıfır geçiş noktaları (zero crossing) analiz edilerek rotor pozisyonu tahmin edilir. Ancak, motor başlangıçta hareketsizken geri-EMF sinyali oluşmaz. Bu nedenle, sensörsüz kontrol sistemleri başlangıçta bir hizalama (alignment) aşaması uygular. Motor, açık döngü kontrolle (open-loop) düşük hızda döndürülür ve geri-EMF sinyali ölçülebilir hale geldiğinde kapalı döngü kontrol (closed-loop) devreye girer. Sensörsüz kontrol genellikle trapezoidal komütasyonla uygulanır, ancak daha gelişmiş uygulamalarda FOC (Field-Oriented Control) ile de kullanılabilir (Şekil 5.3).



5.2.2. Hall Efekt Sensörlü Sürüş Teknikleri

Sensörlü sürüş tekniği, BLDC motorun rotor pozisyonunu belirlemek için Hall etkisi sensörlerinin kullanıldığı bir yöntemdir. Genellikle motorun stator kısmına 120 derecelik açılarla yerleştirilmiş üç adet Hall sensörü bulunur. Hall sensörleri, rotorun manyetik alanındaki değişimlere bağlı olarak dijital sinyaller (0 veya 1) üretir. Bu sinyaller, motor kontrol ünitesine (MCU) iletilerek rotorun pozisyonu belirlenir. Rotor pozisyon bilgisi, stator sargılarına uygulanacak akım sırasını (komütasyonu) kontrol etmek için kullanılır. Sensörlü kontrol genellikle trapezoidal (6 adımlı) komütasyon yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemde, her komütasyon adımı stator sargılarından yalnızca iki tanesi aktif hale getirilir. Böylece rotorun dönmesi için gerekli manyetik alan oluşturulur (Şekil 5.4).

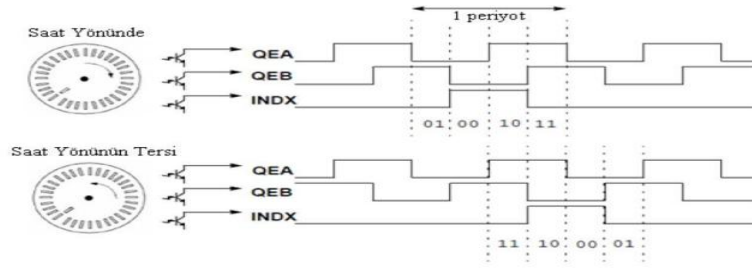


Şekil 5.4. BLDC motor altı adımlı trapezoidal ve sinüzoidal tahrik dalga formlarının karşılaştırılması.[33]

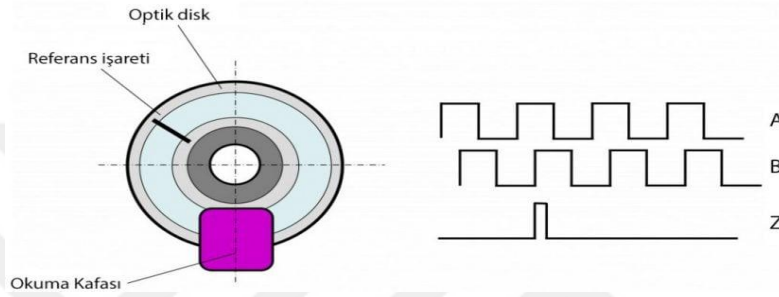
5.2.3. Enkoderli Sürüş Teknikleri

Enkoderli sürüş tekniği, rotor pozisyonunu ve hızını yüksek hassasiyetle ölçmek için optik veya manyetik enkoderlerin kullanıldığı bir yöntemdir. Enkoder, motor miline bağlı bir disk ve bu diskin hareketini algılayan bir sensör sisteminden oluşur (Şekil 5.5).

Enkoderler, rotorun açısal pozisyonunu ve dönüş hızını sürekli olarak ölçer ve bu verileri motor kontrol ünitesine iletir. Enkoder türleri arasında optik ve manyetik enkoderler ile artımlı (incremental) ve mutlak (absolute) enkoderler bulunur. Şekil 5.6'da görülen artımlı enkoderler, rotorun pozisyonunu adım adım ölçerken, mutlak enkoderler güç kesilse bile pozisyon bilgisini korur. Enkoderden gelen pozisyon bilgisi, genellikle FOC veya sinüzoidal komütasyon yöntemleriyle stator sargılarının kontrolünde kullanılır. Ayrıca, enkoder verileri, hız ve tork kontrolü için bir geri besleme döngüsünde değerlendirilir.



Şekil 5.5. B Kodlayıcı çıkış sinyali[34]



Şekil 5.6 Artırımlı kodlayıcı disk yapısı ve çıkış sinyali[35]

Tablo 5.1. Sensörlü, sensörsüz ve enkoderli sürüş tekniklerinin karşılaştırması

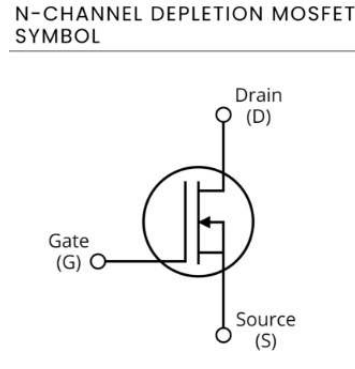
Parametre	Sensörlü Sürüş	Sensörsüz Sürüş	Enkoderli Sürüş
Rotor Pozisyon Tespiti	Hall sensörleriyle doğrudan ölçüm	Geri-EMF sinyaliyle tahmin	Enkoderle yüksek hassasiyet
Hassasiyet	Orta (6 adımda ölçüm)	Düşük-orta	Çok yüksek (örneğin, 4096 pulse/devir)
Başlangıç Performansı	Yüksek tork, stabil	Düşük tork, hizalama gerektirir	Yüksek tork, stabil
Düşük Hız Performansı	Çok iyi	Zayıf, kararsız olabilir	Mükemmel
Yüksek Hız Performansı	İyi	Çok iyi	Mükemmel
Maliyet	Orta (sensör maliyeti)	Düşük	Yüksek (enkoder maliyeti)
Güvenilirlik	Sensör arızasına duyarlı	Daha güvenilir (sensör yok)	Orta (çevresel faktörlere duyarlı)
Kontrol Karmaşıklığı	Daha basit	Daha karmaşık algoritmalar gerektirir	Yüksek (FOC veya sinüzoidal kontrol)

5.3. MOSFETLERİN YAPISAL SINIFLANDIRILMASI

Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistörler (MOSFET), hem anahtarlama hem de sinyal yükseltme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, giriş voltajıyla kontrol edilen yarıiletken elemanlardır. MOSFET'ler, çalışma prensiplerine göre kanal yapısı önceden tanımlanmış (depletion-type) ve kanal çalışma sırasında oluşturulan (enhancement-type) olmak üzere iki temel yapısal sınıfa ayrılır.

5.3.1. Kanalı Fiziksel Olarak Oluşturulan MOSFET'ler

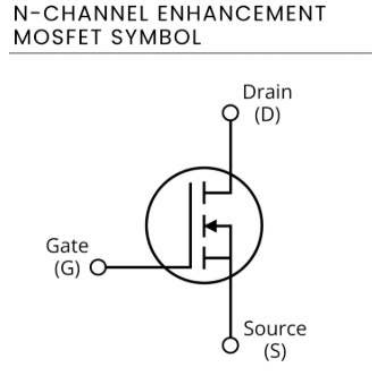
Depletion tipi MOSFET'lerde, kaynak (Source) ve boşaltım (Drain) terminalleri arasında üretim aşamasında fiziksel olarak oluşturulmuş bir kanal mevcuttur (Şekil 5.7). Bu kanal, cihazın gate terminaline hiçbir gerilim uygulanmasa bile elektron ya da delik taşıyıcıları sayesinde iletme hazır durumdadır. Drain–Source terminalleri arasına uygulanan gerilim ile cihazdan bir akım geçmesi mümkün hale gelir. Gate terminaline uygulanan voltaj ise bu mevcut kanalı daraltarak akım akışını sınırlar. Bu nedenle bu tür MOSFET'ler, varsayılan olarak iletimde olan cihazlardır.



Şekil 5.7 Depletion tipine ait mosfet yapısı[36]

5.3.2. Kanalı Elektriksel Olarak Oluşturulan MOSFET'ler

Enhancement tipi MOSFET'lerde ise üretim sürecinde fiziksel bir kanal oluşturulmaz (Şekil 5.8). Cihazın iletme geçebilmesi için gate terminaline belirli bir eşik değerinin üzerinde gerilim uygulanmalıdır. Uygulanan bu gate gerilimi, yarıiletken yüzeyde bir elektrik alan oluşturarak inversiyon bölgesi meydana getirir ve bu sayede Drain–Source terminalleri arasında bir iletken kanal oluşur. Bu yapı, MOSFET'in yalnızca dışsal bir sinyal ile etkinleştirilmesini mümkün kılar. Bu yönüyle enhancement tipi MOSFET'ler, dijital lojik devrelerde daha yaygın biçimde tercih edilir.



Şekil 5.8 Enhancement tipine ait mosfet yapısı[37]

5.3.3. Tasarımda Kullanılan MOSFET'in Karakteristiği

STB75NF75T4 MOSFET yüksek akım taşıma kapasitesi, düşük iletim direnci ve hızlı anahtarlama özellikleriyle, motor kontrol uygulamaları, güç kaynakları ve yüksek frekanslı dönüştürücüler gibi sürücü devrelerinde kullanım için oldukça uygundur.

Katalog değerleri incelendiğinde (Şekil 5.9.);

- **Drain - Source Gerilimi:** MOSFET'in aşılmaması gereken maksimum gerilim sınırıdır. STB75NF75T4 için bu değer 75V olarak belirlenmiştir.
- **Gate - Source Gerilimi:** MOSFET'in kontrol edildiği ve sürücü devre tarafından uygulanan maksimum pozitif veya negatif gerilim değeridir. STB75NF75T4, $\pm 20V$ gate gerilimine kadar güvenli çalışabilir.
- **Drain Sürekli Akım Kapasitesi:** MOSFET'in sürekli olarak taşıyabileceği maksimum akım değeridir. 25 °C ortam sıcaklığında bu değer 80A'dır. Bu değer, soğutma koşullarına bağlı olarak değişebilir.
Drain Anlık Akım Kapasitesi: MOSFET'in kısa süreli darbe (pulse) modunda taşıyabileceği anlık maksimum akımdır. STB75NF75T4 için bu değer 320A'ya kadar çıkabilmektedir.
- **Drain-Source Kırılma Gerilimi:** MOSFET'in zarar görmeden dayanabileceği maksimum drain-source gerilimidir. Gate terminali 0V'da tutulurken, drain'den source'a doğru uygulanan gerilimdir. Bu değer 75V olarak tanımlanmıştır ve $ID = 250 \mu A$ iken test edilmiştir.
- **Gate Threshold Gerilimi:** MOSFET'in iletme geçmeye başladığı minimum gate gerilimidir. Bu değer, STB75NF75T4 için 2V ile 4V aralığında değişmektedir. Bu parametre, MOSFET'in aktif hale gelmesini sağlayacak kontrol sinyalinin

belirlemek açısından oldukça kritiktir.

- **Gate - Source Sızıntı Akımı:** Gate ile source arasında, gate sürme gerilimi uygulandığında ortaya çıkan sızıntı akımıdır. STB75NF75T4 için bu değer $\pm 100\text{nA}$ mertebesinde. Bu düşük değer, MOSFET'in yüksek giriş empedansına sahip olduğunu gösterir.
- **Drain - Source İletim Direnci:** MOSFET iletimdeyken drain-source arasında oluşan iç dirençtir. Bu parametre, iletim kayıplarının hesaplanmasında kritik öneme sahiptir. STB75NF75T4 için bu değer, $0.0095\ \Omega$ olarak belirtilmiştir. Düşük R değeri sayesinde MOSFET, daha düşük ısı kayıplarıyla çalışır ve daha yüksek verim sunar.

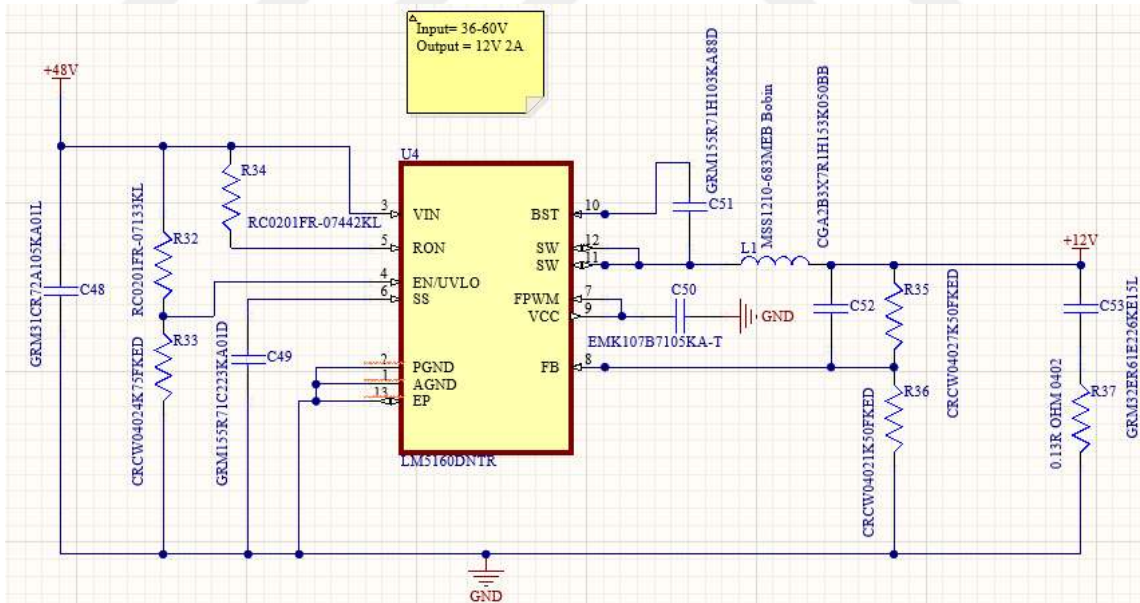
Symbol	Parameter	Value		Unit
		D ² PAK /TO-220	TO-220FP	
V_{DS}	Drain-source voltage ($V_{GS} = 0$)	75		V
V_{DGR}	Drain-gate voltage ($R_{GS} = 20\text{K}\Omega$)	75		V
V_{GS}	Gate-source voltage	± 20		V
$I_D^{(1)}$	Drain current (continuous) at $T_C = 25^\circ\text{C}$	80	80	A
$I_D^{(1)}$	Drain current (continuous) at $T_C = 100^\circ\text{C}$	70	70	A
$I_{DM}^{(2)}$	Drain current (pulsed)	320	320	A
P_{TOT}	Total dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	300	45	W
	Derating factor	2.0	0.3	W/ $^\circ\text{C}$
$dv/dt^{(3)}$	Peak diode recovery voltage slope	12		V/ns
$E_{AS}^{(4)}$	Single pulse avalanche energy	700		mJ
V_{ISO}	Insulation withstand voltage (RMS) from all three leads to external heat sink ($t=1\text{s}; T_C=25^\circ\text{C}$)	--	2000	V
T_J T_{stg}	Operating junction temperature Storage temperature	-55 to 175		$^\circ\text{C}$

1. Current limited by package
2. Pulse width limited by safe operating area
3. $I_{SD} \leq 80\text{A}$, $di/dt \leq 300\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq T_{JMAX}$
4. Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_D = 40\text{A}$, $V_{DD} = 37.5\text{V}$

Şekil 5.9 STB75NF75T4 mosfete ait parametreler[38]

5.4. POWER (GÜÇ BESLEME) KATININ KURULMASI

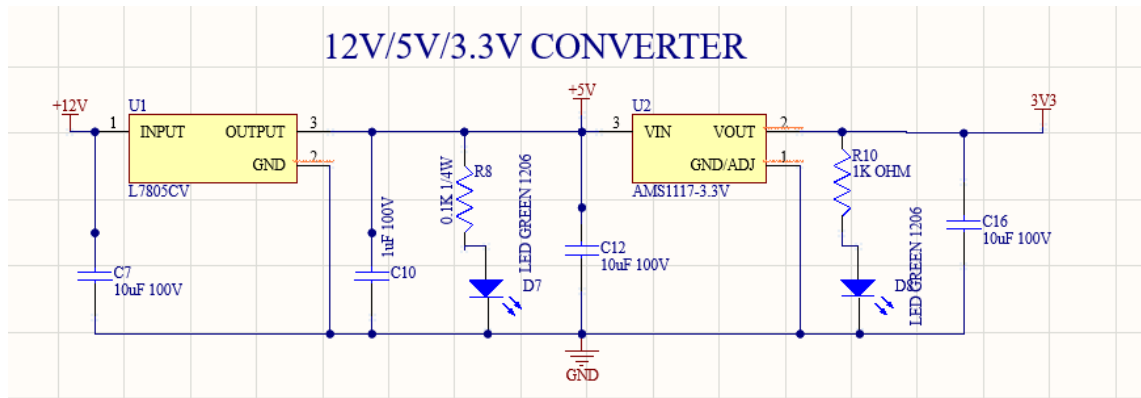
Tasarımı yapılan DC-DC dönüştürücü devresi, 36 ile 60 volt arasında değişen yüksek gerilim girişini, sabit 12 volt çıkış gerilimine dönüştüren bir buck tipi regülatördür (Şekil 5.10). Giriş gerilimin 36-60V tutulma sebebi 48V çalışma gerilimine sahip elektrikli scooterların batarya voltajı 42V-57.6V arasında değişmesidir. Devrenin temel bileşenini LM5160 senkron buck dönüştürücü entegresi oluşturmaktadır. Bu entegre, PWM (Pulse Width Modulation) prensibi ile çalışarak yüksek verimlilik ve kararlı çıkış voltajı sağlar. Giriş gerilim hattında yer alan 1uF 100V filtre kondansatörü (C48), giriş voltajındaki gürültü ve dalgalanmaları azaltır. Entegre üzerindeki EN/UVLO pini, düşük voltaj koruması sağlayarak devrenin güvenli çalışmasını sağlarken SS pini ile kontrol edilen soft-start fonksiyonu, başlangıç anında ani akım yükselmelerinin önüne geçer. Anahtarlama sırasında enerji depolayan ve aktarımını sağlayan 68uH endüktör (L1) devrenin verimini ve kararlılığını artırır. Çıkış hattında bulunan kondansatörler (C52, C53) ise yükte oluşabilecek voltaj dalgalanmalarını minimize eder. Ayrıca, çıkış voltajı, direnç bölücü ile oluşturulan geri besleme hattı üzerinden sürekli kontrol edilmekte ve PWM sinyali otomatik olarak ayarlanarak sabit tutulmaktadır.



Şekil 5.10 Tasarımı yapılan giriş 36-60V çıkış 12V buck devresi

Güç katının devamında 12V giriş gerilimini sırasıyla 5V ve 3.3V gerilim seviyelerine dönüştüren iki aşamalı doğrusal regülatör tabanlı entegreler bulunmaktadır (Şekil 5.11). İlk aşamada kullanılan regülatör, yaygın olarak bilinen L7805 entegresi olup, sabit 5 volt çıkış gerilimi sağlar. Bu 5V çıkış, bootstrap devresi, gaz kolu devresi ve hall sensörlerinin beslemesinde kullanılmaktadır. L7805 regülatörü, giriş hattındaki 10 μ F kapasitör (C7) ve çıkış hattındaki 1 μ F ve 10 μ F kapasitörlerle (C10, C12) stabilize edilerek, çıkış geriliminde oluşabilecek ani değişimler ve dalgalanmaların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bu kısımda ek olarak yeşil LED (D7) ve ona seri bağlı direnç (R8), çıkış geriliminin var olduğunu gösteren bir gösterge olarak görev yapmaktadır.

İkinci aşamada ise AMS1117-3.3V lineer regülatör entegresi kullanılarak 5 volt seviyesinden daha düşük olan 3.3 voltluk çıkış gerilimi elde edilir. AMS1117 entegresi, özellikle düşük voltaj ve düşük güç gereksinimleri olan elektronik devrelerde yaygın olarak tercih edilir. Bu 3.3V çıkışı mikroişlemci ve debug devresinin beslenmesinde kullanılmaktadır. Bu regülatörün giriş ve çıkış hattında 10 μ F'lık kondansatör (C12 ve C16) kullanılarak çıkış gerilimi stabil hale getirilir ve ani voltaj dalgalanmaları minimize edilir. Ayrıca çıkışta bulunan diğer yeşil LED (D8) ve seri direnç (R10) yine 5V regülatörde olduğu gibi gerilim çıkışının görsel olarak doğrulanmasını sağlar.

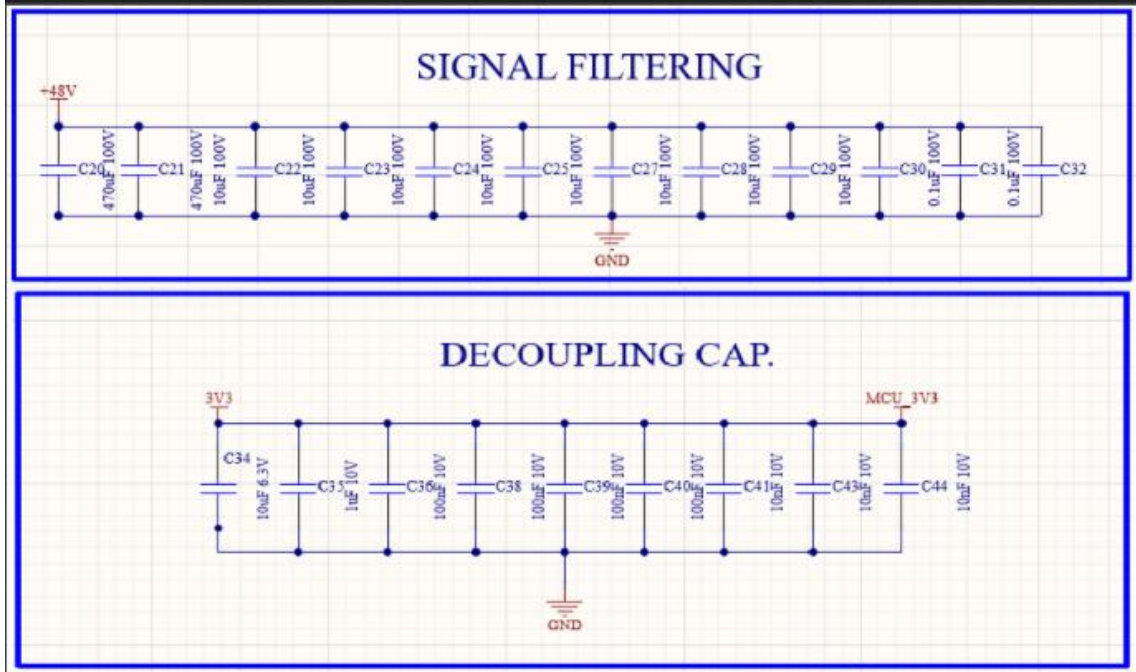


Şekil 5.11 5V ve 3.3V buck devresi

5.5. SİNYAL FİLTRELEME DEVRESİNİN KURULUMU

Motor sürücü devresinde bulunan sinyal filtreleme devreleri, sistemin farklı noktalarına yerleştirilerek elektromanyetik girişim (EMI), yüksek frekanslı gürültü ve ani voltaj dalgalanmalarını minimize etmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 5.12). Özellikle mikrodenetleyici girişleri, gaz kolu girişleri, Hall sensörü çıkışları ve diğer kritik ölçüm noktalarındaki hassas sinyaller, filtre devreleri aracılığıyla temizlenerek mikroişlemcinin

hatasız veri okuması sağlanmaktadır. Sinyal filtreleme devreleri genellikle RC (direnç-kapasitör) alçak geçiren filtre prensibine göre tasarlanarak yüksek frekanslı parazitleri zayıflatırken, sinyallerin kararlı ve güvenilir biçimde mikrodenetleyiciye iletilmesini sağlar. Filtreler sürücü devresinin genel kararlılığını artırır ve motor kontrol performansını iyileştirerek hassas ve güvenilir bir sistem performansına olanak sağlar.



Şekil 5.12 Filtreleme kondansatörlerinin dizilimi

5.6. MOSFET SÜRÜCÜ VE H BRIDGE'IN KURULUMU

Şematik üzerinde "DRIVER SECTION" olarak adlandırılan bölümde IR2110STRPBF model yüksek hızlı gate sürücü entegreleri kullanılmıştır. IR2110, yarım köprü (half-bridge) konfigürasyonuna uygun şekilde tasarlanmış olup, hem high-side hem de low-side MOSFET'lerin bağımsız olarak kontrol edilmesine imkân tanır. Bu entegre, 2A seviyelerinde çıkış akımı sağlayarak MOSFET'lerin hızlı anahtarlanmasına olanak tanır ve bu da sistemin genel verimliliğini artırır. Ayrıca IR2110'un bootstrap mekanizması, yüksek taraf MOSFET'lerin gate gerilimini, kaynak terminalinin üzerinde tutmak amacıyla gerekli olan voltajı sağlar. Bu işlev için her sürücü devresine bootstrap diyodu ve kapasitörü eklenmiş, böylece yüksek taraf MOSFET'ler güvenilir biçimde sürülebilmektedir. Her bir IR2110 entegresi bir faza ait iki MOSFET'i kontrol etmekte olup, üç faz için toplamda üç adet sürücü entegresi kullanılmıştır.

"MOSFET CIRCUIT" bölümünde ise STB75NF75T4 model N-kanal MOSFET'ler tercih

edilmiştir. Bu MOSFET’ler, 75V direnç-kaynak dayanımına ve düşük RDS(on) (yaklaşık 11 mΩ) değerine sahip olup, yüksek akım taşıma kapasitesi ile motor sürücü tasarımı uygulamaları için oldukça uygundur. Her bir faz için bir üst (high-side) ve bir alt (low-side) MOSFET’ten oluşan tam köprü (full-bridge) yapısı oluşturulmuştur. MOSFET’lerin gate uçlarına bağlanan dirençler, sürücü entegresinden gelen sinyallerin kontrollü bir şekilde iletilmesini sağlar ve kapasitif yükün ani şarj/deşarjından doğabilecek parazitleri sınırlandırarak EMI’yi azaltır. Ayrıca, her MOSFET için kullanılan pull-down dirençler, istenmeyen durumlarda gate’in toprak potansiyeline çekilmesini sağlayarak MOSFET’in yanlışlıkla ilettime geçmesini engeller.

5.7. MİKROİŞLEMCİ GİRİŞLERİNİN BELİRLENMESİ

Projede kullanılan STM32F103C8T6TR mikrodnetleyicisinin pin konfigürasyonu, motor kontrolü, haberleşme, geri besleme sinyali işleme ve sistem izleme işlevlerini yerine getirecek şekilde sistematik ve fonksiyonel olarak yapılandırılmıştır (Şekil 5.13). Pin seçimleri yapılırken, mikrodnetleyicinin alternatif fonksiyonları, zamanlayıcı (TIM) erişimleri, ADC modülleri, dijital giriş/çıkış yetenekleri ve kesme destekleri dikkate alınmıştır.

5.7.1. Motor Faz Kontrolü (PWM Çıkışları)

Motorun üç fazlı sürücü sisteminde her bir faz için yüksek(high side) ve alçak taraf (low side) MOSFET’ler ayrı ayrı kontrol edilmektedir:

- **PA0 (A0):** Bu pin, throttle (gaz kolu) girişi için analog sinyal okuma işleviyle atanmıştır. ADC özelliği sayesinde giriş voltajını dijitalleştirerek mikrodnetleyiciye aktarır.
- **PA7, PB0, PB1 (A_FAZ_LOW, B_FAZ_LOW, C_FAZ_LOW):** Her biri ilgili fazın alçak taraf MOSFET’ine bağlıdır. Bu pinler gelişmiş zamanlayıcıların (TIM2, TIM3) çıkış kanallarına atanmış olup, sabit frekansta PWM üretimi sağlar.
- **PA11, PA12, PA15 (A_FAZ_HIGH, B_FAZ_HIGH, C_FAZ_HIGH):** Yüksek taraf MOSFET’leri tetikleyen bu pinler, alternatif fonksiyon olarak PWM sinyallerine tahsis edilmiştir. Doğru zamanlama ile anahtarlama yapılmasını sağlar.

5.7.2. Hall Sensör Çıkışları

PB12, PB13 ve PB14 pinlerine atanan HALL_A, HALL_B ve HALL_C sinyalleri, üç fazlı BLDC (Brushless DC) motorun rotor konum bilgisini almak amacıyla kullanılan Hall sensörlerinin dijital çıkışlarıdır. Bu pin atamaları, hem donanımsal kesme desteği hem de dijital giriş olarak yapılandırılabilir olmaları sayesinde motor kontrol sisteminin hassasiyet ve tepki süresi açısından optimize edilmesine katkı sağlar.

- **PB12 (HALL_A):** Motorun ilk fazına karşılık gelen Hall sensöründen gelen dijital sinyali alır. Bu sinyal, rotorun belirli bir açısal pozisyona ulaştığını bildirir.
- **PB13 (HALL_B):** İkinci faza ait Hall sensör çıkışını okur. Bu bilgi, motor sürücü yazılımına yönelerek uygun faz geçişlerinin yapılmasını sağlar.
- **PB14 (HALL_C):** Üçüncü Hall sensöründen gelen dijital veri bu pin aracılığıyla alınır. Her üç sensör birlikte değerlendirildiğinde, rotorun anlık pozisyonu kesin olarak belirlenebilir.

Bu pinlerin seçilmesinin bir diğer önemli nedeni, harici kesme (EXTI) hatlarına atanabilir olmalarıdır.

5.7.3. Haberleşme Arayüzü (CAN Bus)

CAN haberleşmesi gibi kritik uygulamalarda düşük elektromanyetik girişim (EMI), yüksek güvenilirlik ve gerçek zamanlı veri alışverişi büyük önem taşır. Bu nedenle, CAN_RX ve CAN_TX pinlerinin doğrudan transceiver ile kısa ve düzgün yollarla bağlanması da şematikte dikkatle uygulanmıştır.

Bu yapı sayesinde sistem, motor sürücü kontrol parametrelerini hem alabilir hem de sistem durumunu dış birimlere raporlayabilir, böylece dağıtık kontrol yapılarında güvenli ve senkronize çalışmayı destekler.

- **PB9 (CAN_TX):** Bu pin, mikrodenetleyiciden dış dünyaya veri göndermek için kullanılır. CAN transceiver (MCP2551) entegresine bağlanarak fiziksel hattaki TX fonksiyonunu gerçekleştirir. Bu sayede sürücü, merkezi kontrol ünitesine (VCU) ya da başka bir CAN cihazına komut veya durum bilgisi iletebilir.
- **PB8 (CAN_RX):** Bu pin, fiziksel CAN hattından alınan verilerin mikrodenetleyiciye aktarılmasını sağlar. Transceiver'den gelen RX sinyali bu pine yönlendirilir ve mikrodenetleyici içindeki CAN modülü tarafından yorumlanır.

5.7.4. Güç ve Geri Besleme İzleme

- **PA2 (I_SENSE):** Motor faz akımlarını ölçmek amacıyla kullanılan bir analog giriş (ADC) pinidir. Motor akımı, akım sensörü (ACS770) üzerinden alınarak bu pine yönlendirilir. STM32 mikrodenetleyicisinin ADC modülü, bu sinyali dijital değerlere çevirerek motorun yük altındaki davranışını izlemeyi mümkün kılar. Bu veri:
 - Akım koruma (overcurrent protection),
 - Motor kontrol algoritmalarının hassasiyeti,
 - Verimlilik analizi gibi işlemlerde kullanılır.
- **PA1 (VOLTAGE_SNS):** ADC giriş olarak konfigüre edilmiştir ve sistemin besleme voltajını izlemek için kullanılır. Voltaj, direnç bölücü ile uygun seviyeye indirildikten sonra mikrodenetleyiciye ulaşır. Bu sinyal sayesinde sistem, aşağıdaki durumları izleyebilir:
 - Aşırı gerilim (overvoltage),
 - Düşük voltaj (undervoltage),
 - Güç kalitesi.

Gerilim geri beslemesi, sistemin güvenli çalışmasını garanti altına almak ve voltaj eşiklerine bağlı olarak MOSFET'leri devre dışı bırakmak gibi koruma işlemlerinde kritik rol oynar.

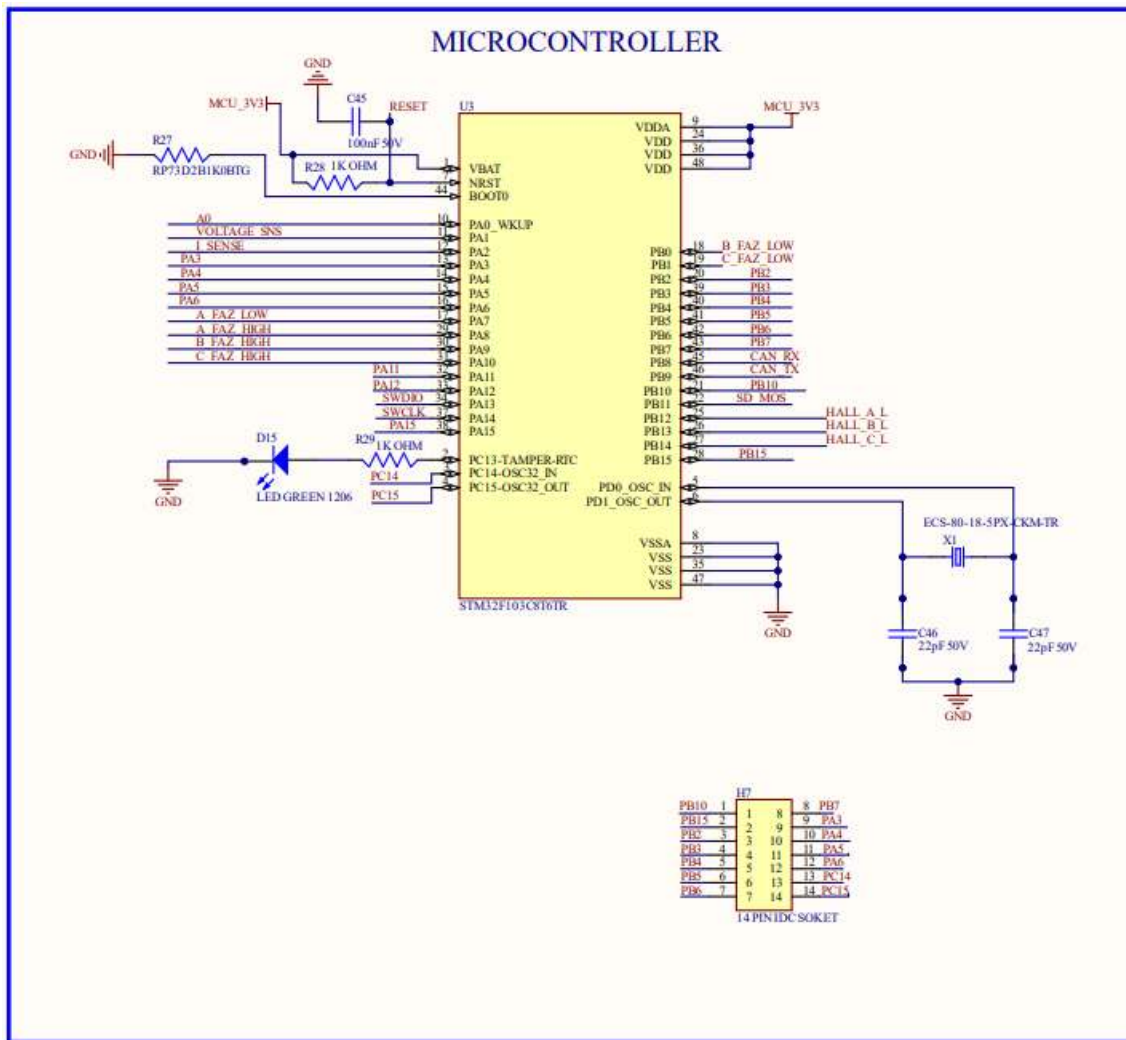
- **PB11 (SD_MOS):** MOSFET'lerin yazılımsal olarak devreden çıkarılmasını sağlayan bir dijital çıkış pinidir. "Shut Down MOSFET" anlamına gelen SD_MOS sinyali, IR2110 gate sürücü entegrelerinin "SD" (Shutdown) girişlerine bağlanarak tüm güç aşamasını devre dışı bırakır. Bu özellik:
 - Hata durumlarında motorun enerjisiz bırakılması,
 - Acil durdurma (emergency stop),
 - Enerji verimliliği için geçici durdurmalar gibi kontrol fonksiyonlarını yerine getirir.

5.7.5. Programlama ve Hata Ayıklama Arayüzü

- **PA13 (SWDIO) ve PA14 (SWCLK):** ST-LINK veya J-Link arayüzleri ile bağlantılı olarak yazılım yükleme ve hata ayıklama işlemlerini destekler.
- **NRST:** Harici reset girişidir; sistem sıfırlama işlemleri için doğrudan mikrodenetleyiciye bağlanmıştır.

5.7.6. Osilatör ve Saat Kaynağı

- **PD0, PD1:** Harici ana osilatör girişi olarak kullanılmıştır. Sistem saat frekansının doğruluğu için bu pinler üzerinden 8 MHz kristal bağlantısı yapılmıştır.

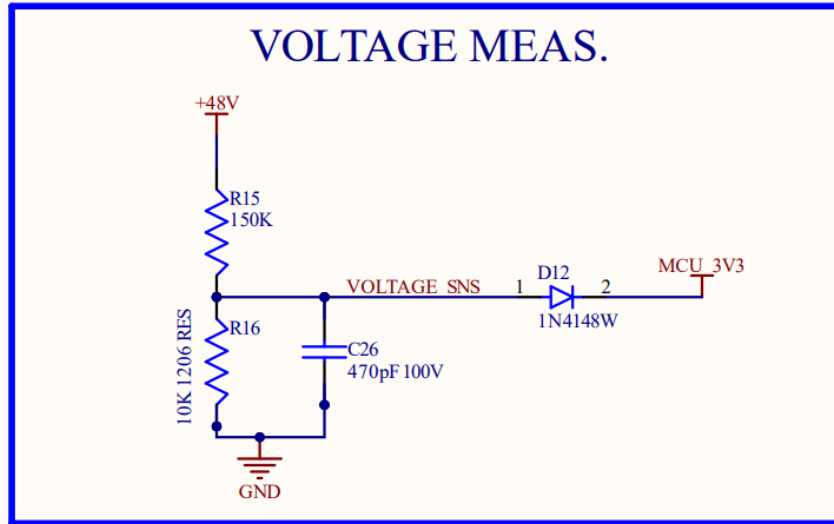


Şekil 5.13 Mikroişlemci bölümünün şematik dizaynı

5.8. VOLTAJ OKUMA DEVRESİNİN KURULUMU

Sistemde doğrudan ölçüm yapılamayacak kadar yüksek olan +48V'luk bir güç hattını, mikrodnetleyicinin ADC girişine uygun güvenli bir voltaj seviyesine indirger. Devrede R15 (150 k Ω) ve R16 (10 k Ω) dirençleri seri bağlanarak bir gerilim bölücü oluşturmaktadır. Bu bölücü, +48V seviyesini yaklaşık olarak 3.07V civarına düşürerek, STM32 mikrodnetleyicisinin ADC girişine doğrudan bağlanabilecek güvenli bir seviye üretir (Şekil 5.14).

Gerilim bölücü çıkışına paralel bağlanan C26 (470 pF) kapasitör, yüksek frekanslı gürültüyü filtrelemek amacıyla kullanılır. Bu sayede ADC'ye ulaşan sinyalin daha kararlı ve doğru olması sağlanır. Gürültü bastırma, özellikle motor kontrol devrelerinde önemli olup, ölçüm hassasiyetini artırır. Devre çıkışında yer alan D12 (1N4148W diyodu), ters voltaj koruması sağlar. Bu diyot, MCU_3V3 hattına doğru bağlı olup, gerilim bölücünün çıkışındaki beklenmeyen ani yükselmelerde mikrodnetleyiciye zarar gelmesini engeller. Diyotun yönü, yalnızca güvenli seviyedeki gerilimin ADC girişine iletilmesine olanak tanırken, olası geri besleme durumlarında MCU tarafını yalıtır.



Şekil 5.14 Voltaj ölçüm devresinin şematik dizaynı

5.9. AKIM OKUMA DEVRESİNİN KURULUMU

Üç fazlı BLDC motor sürücüsünün güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla geliştirilen akım koruma devresi, faz akımının gerçek zamanlı olarak izlenmesini ve sınır dışı durumlarda koruma mekanizmalarının devreye alınmasını sağlayan bir modüldür. Akım ölçümü için kullanılan entegre, ACS770-150A doğrusal Hall etkili akım sensörüdür. Bu

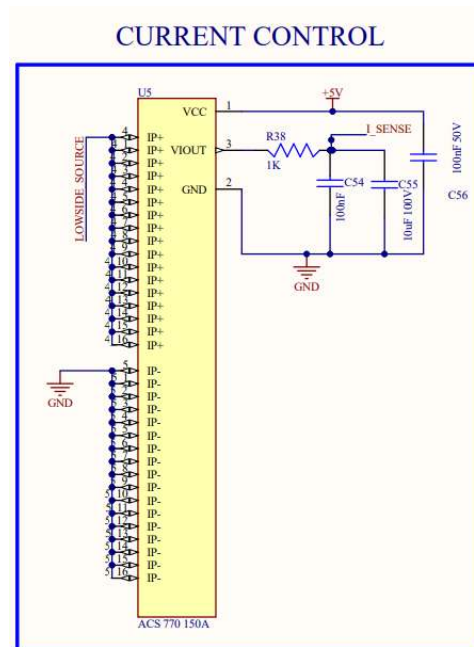
sensör, hem yüksek doğrulukla ölçüm yapabilmekte hem de galvanik izolasyon sağlayarak sistem güvenliğini artırmaktadır (Şekil 5.15).

ACS770 entegresi, üç ana pin grubundan oluşur:

- **IP+ / IP- terminalleri (Pin 4 ve Pin 5):** Bu terminaller, yük üzerinden geçen akımın sensör üzerinden geçirilerek Hall etkisi prensibiyle ölçülmesini sağlar. Bu terminaller yüksek akım taşıma kapasiteli olup, burada faz akımı ölçülür.
- **VCC (Pin 1):** 5V'luk sabit bir besleme gerilimi uygulanır.
- **GND (Pin 2):** Beslemenin referans noktasıdır.
- **VIOOUT (Pin 3):** Ölçülen akıma karşılık gelen analog gerilim çıkışıdır. Bu pin, sistemin mikrodenetleyicisine bağlı olup "I_SENSE" etiketi ile işaretlenmiştir.

Sensör çıkışındaki VIOOUT sinyali, doğrudan mikrodenetleyiciye uygulanmadan önce R38 direnci (1 k Ω) üzerinden geçirilir ve ardından C54 ile C55 kondansatörleri (10 nF ve 100 nF) yardımıyla filtrelenir. Bu yapı, bir alçak geçiren filtre (low-pass filter) oluşturarak yüksek frekanslı parazitleri bastırır ve ADC birimi tarafından daha doğru bir sinyalin örneklenmesini sağlar. Özellikle MOSFET anahtarlama parazitlerinin etkisini azaltmak için bu filtre yapısı gereklidir.

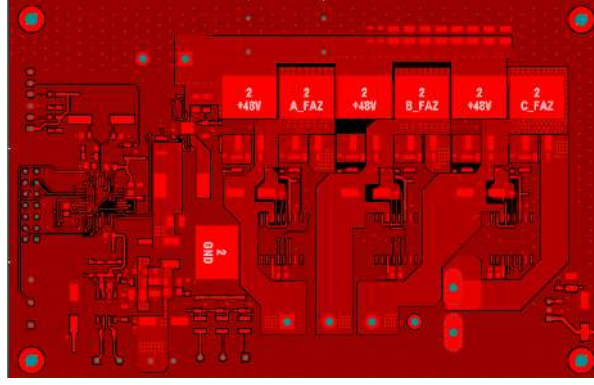
Mikroişlemcinin PA2 pini üzerinden alınan akım değerinin sistem sınırlarını aştığını algılayarak, MOSFET'leri süren gate sinyalleri kesilir ve sistem "shut down" moduna alınır. Böylece motor ve güç katmanı zarar görmeden sistem güvenli şekilde durdurulur.



5.10. BASKI DEVRE KARTININ (PCB) OLUŞTURULMASI

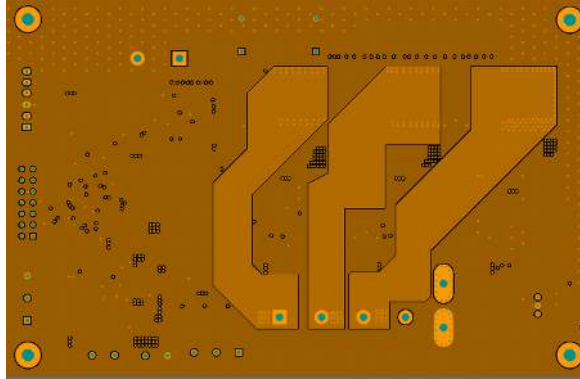
Tasarımı yapılan motor sürücü kartı, yüksek akım ve hassas kontrol gerektiren sistemlere yönelik olarak dört katmanlı bir baskı devre kartı (PCB) mimarisiyle tasarlanmıştır. Katman yapısı, hem sinyal bütünlüğü hem de termal yönetim açısından optimize edilmiştir. Yüksek güçlü uygulamalarda karşılaşılan elektriksel ve termal zorluklara yönelik çeşitli mühendislik çözümleri sistematik olarak uygulanmıştır. Öncelikle, iz genişlikleri güç hatlarında IPC-2221 standardına uygun biçimde belirlenmiş ve yüksek akım taşıma kapasitesine sahip 2 oz kalınlığında bakır kaplama kullanılarak, iletim kayıplarının ve sıcaklık artışının önüne geçilmiştir. Özellikle MOSFET'lerin yerleştirildiği bölgelerde, alt yüzeye entegre edilen termal pad'ler ve geniş alanlı GND dolgular, termal dirençleri minimize ederek etkin bir ısı yayılımı sağlamaktadır. Bu, sistemin uzun süreli ve kararlı çalışmasını destekleyen önemli bir termal yönetim stratejisidir. Tasarımda ayrıca, yüksek akım taşıyan güç bileşenleri ile düşük gerilimle çalışan lojik ve kontrol devrelerinin fiziksel olarak ayrılması, hem elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından hem de elektriksel güvenlik bakımından kritik bir tercih olmuştur. Katmanlar arası bağlantılarda ise, tekli geçişler yerine çoklu via (termal ve sinyal taşıyıcı delikler) kullanılarak, hem elektriksel iletkenlik artırılmış hem de termal iletim kapasitesi yükseltilmiştir. Son olarak, sistemin montaj ve entegrasyon süreçleri göz önünde bulundurularak, motor çıkışları, besleme girişleri ve haberleşme portları gibi konnektörler kartın kenarlarında konumlandırılmıştır. 4 katmanlı yapı daha detaylı incelenecek olursa:

Üst katman (Top Layer), bileşen yerleşiminin gerçekleştiği katmandır ve yüksek frekanslı kontrol sinyalleri, PWM hatları ile zamanlamaya duyarlı yollar bu katmanda yönlendirilmiştir. Aynı zamanda yüzey montaj (SMD) komponentlerinin lehimleme işlemi bu yüzeyde gerçekleşmektedir.



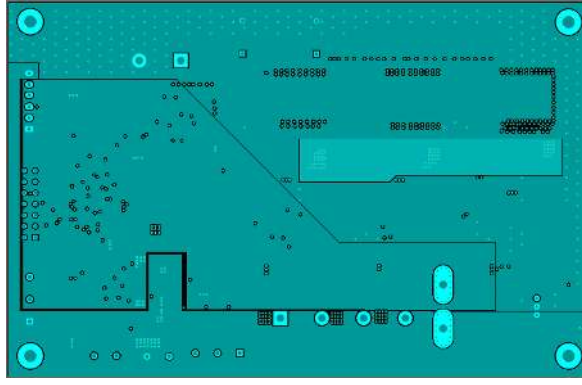
Şekil 5.16 Top layer

İkinci katman (Top Inner Layer), genellikle toprak düzlemi (GND Plane) olarak yapılandırılmış olup, düşük empedanslı dönüş yolları sağlayarak elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmakta ve sinyal iletiminde referans noktası olarak hizmet vermektedir. Bu katmanın bir diğer avantajı da, MOSFET gibi ısı üreten bileşenlerin altına yerleştirilerek pasif soğutmayı desteklemesidir.



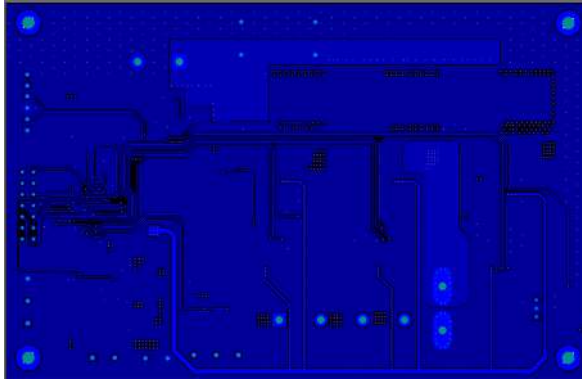
Şekil 5.17 Top inner layer (GND)

Üçüncü katman (Bottom Inner Layer), sabit güç hatlarının taşındığı güç düzlemi (Power Plane) olarak işlev görmektedir. Bu katmanda +48V gibi yüksek akım gerektiren yollar geniş izlerle ve kalın bakır ile işlenmiş, böylece voltaj düşümü ve ısı üretimi en aza indirgenmiştir.



Şekil 5.18 Bottom inner layer

Son olarak, alt katman (Bottom Layer), sinyal yollarının bir kısmının ve düşük güçlü analog gerilim/akım geri besleme hatlarının yer aldığı düzlemdir. Aynı zamanda alt katmana yerleştirilen bazı pasif bileşenler ve konnektör pinleri, yer tasarrufu sağlamakla birlikte EMI kaynaklarından izole edilmiş bölgede çalışacak şekilde konumlandırılmıştır.



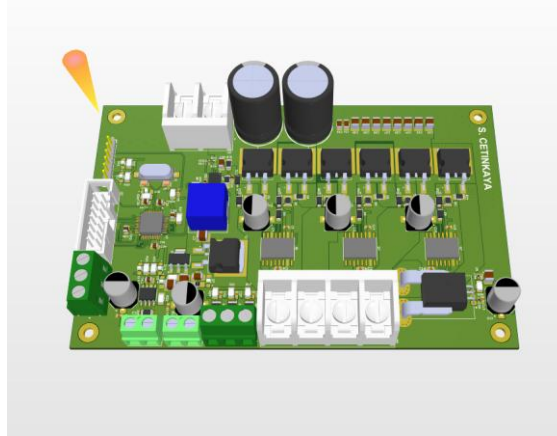
Şekil 5.19 Bottom layer

Şekil 5.20’de kartın sağ orta bölümünde yer alan altı adet MOSFET, üç fazlı motor sürücüsünün her fazı için iki adet high side ve low side (yüksek ve düşük taraf) olmak üzere gruplanmıştır. Bu MOSFET’lerin hemen yanında konumlanan IR2110 gate sürücü entegreleri, minimum yol uzunluğu sağlanarak hızlı ve senkronize anahtarlama performansı elde etmek amacıyla MOSFET’lere fiziksel olarak yakın yerleştirilmiştir. MOSFET’lerin üzerindeki büyük elektrolitik kondansatörler, güç hattı kararlılığını sağlamak ve ani akım taleplerini karşılamak için güç girişine mümkün olan en yakın konuma konumlandırılmıştır (Şekil 5.20).

Kartın alt sol köşesinde yer alan mikrodenetleyici (STM32F103C8T6TR serisi) ve çevresel devre elemanları düşük güçlü lojik işlemler ve sinyal işleme görevlerini

yürütmektedir. Bu bölge, yüksek güçlü MOSFET katmanından fiziksel olarak ayrılarak hem gürültü izolasyonu hem de termal korunma sağlanmıştır. Bu bölgenin yakınında yer alan akım ve gerilim geri besleme devreleri, ADC girişlerine doğrudan yönlendirilen filtrelenmiş sinyalleri üretmekte ve hassas ölçüm işlevini gerçekleştirmektedir.

Kartın sağ kenarına hizalanmış olan büyük beyaz konnektörler motor faz çıkışları (U, V, W) olarak yapılandırılmıştır. Bu konnektörlerin geniş hatlarla güç katmanına bağlandığı ve doğrudan MOSFET çıkışlarından beslendiği görülmektedir. Alt kenardaki yeşil terminal bloklar, güç giriş/çıkışı ve harici sinyal bağlantısı için ayrılmıştır. Bu konumlandırma, hem kullanıcı erişimini kolaylaştırmakta hem de dış kablolamayı düzenli ve mekanik olarak sağlam hale getirmektedir. Ayrıca CAN ve JLINK haberleşme arayüzlerinin bağlı olduğu konnektörler kartın sol kenarında yer alarak mikrodenetleyici ile aynı bölgede gruplandırılmıştır.



Şekil 5.20 PCB'nin 3 boyutlu görüntüsü

6. SÜRÜCÜ KODLARININ OLUŞTURULMASI

STM32 mikrodnetleyici tabanlı bir BLDC motor sürücü sisteminde, mikrodnetleyici üç fazlı invertörün MOSFET anahtarlarını sürmek üzere PWM sinyalleri üretmekte ve rotor konumunu belirlemek için Hall etkili sensörlerden geri besleme almaktadır. Tasarlanan sürücü, 48 V besleme ve 750 W gücünde bir içten rotorlu (hub) BLDC motoru çalıştırabilecek şekilde geliştirilmiştir. Yöntem olarak altı adımlı trapezoidal komütasyon (120° yöntem) tercih edilmiştir; bu yöntem, sensörsüz vektör kontrolüne (FOC) kıyasla daha basit olup BLDC motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Altı adımlı komütasyonda motorun bir elektrik çevrimi altı eşit konuma bölünür; her bir adımda üç faz sargıdan biri DC baraya, bir diğeri şasiye bağlanarak akım akışı sağlanır ve üçüncü faz açıkta bırakılır. Rotor pozisyonu, üç Hall sensörünün çıkış kombinasyonundan elde edilir. Rotor her 60° veya 120° elektrik açısı döndüğünde sensörlerden birinin durumu değişir ve böylece bir elektrik çevriminde altı defa faz anahtarlaması gerçekleşir. Hall sensörü kullanımı, motorun konum bilgisini doğrudan sağladığı için kontrol algoritmasını basitleştirir ve STM32 mikrodnetleyicinin özel Hall giriş modu sayesinde donanım entegrasyonu da kolaylaşmaktadır.

Geliştirilen sürücü yazılımında STM32'nin gelişmiş zamanlayıcı birimleri kullanılmaktadır. Bir zamanlayıcı modülü (örneğin TIM1), üç fazlı köprü devresinin MOSFET'leri için gerekli PWM sinyallerini üretirken, ikinci bir zamanlayıcı Hall sensörlerinden gelen dijital konum sinyallerini işlemek ve komütasyon anlarını belirlemek üzere yapılandırılmıştır. Bu iki zamanlayıcı donanım düzeyinde birbirine tetikleme ile bağlanarak, Hall sensörlerinden tetiklenen bir olayla PWM sinyallerinin uygun şekilde faz değiştirmesi sağlanır. Ayrıca sistem yazılımı kapalı çevrim hız kontrolü de içermektedir: İstenen hız ile ölçülen hız sürekli karşılaştırılarak bir hata sinyali üretilir ve PWM darbe genişliği, bir PID denetleyici algoritması ile ayarlanarak motor hızı kararlı hale getirilir. Yazılımda motorun güvenli çalışmasını sağlamak için çeşitli koruma mekanizmaları da yer almaktadır: Örneğin, geçersiz Hall sensörü durumu algılanması, belirli bir süre sensör sinyali gelmemesi (başlatma başarısızlığı), art arda beklenmedik komütasyonlar veya aşırı akım durumları hata olarak izlenmekte ve gerekli önlemler alınmaktadır.

Aşağıda, geliştirilen sürücü yazılımının kritik kısımlarına ait kod blokları ve bunların işlevleri açıklanmaktadır. Kod C dili ile yazılmış olup, STM32 mikrodenetleyicinin donanım soyutlama kütüphanesi (HAL) veya alçak seviye kayıt erişimleri kullanılarak oluşturulmuştur. Her kod bloğunun altında, ilgili ayarların ve işlemlerin amacı detaylı olarak ele alınmıştır.

6.1. HALL SENSÖRÜ İLE KONUM TESPİTİ

BLDC motorların verimli ve kararlı çalışabilmesi için rotorun anlık konumunun doğru bir şekilde tespit edilmesi gereklidir. Bu konum bilgisi, motor fazlarının doğru sırayla sürülmesi (komütasyon) için temel teşkil eder. Bu çalışmada, rotor konumu, motora entegre edilmiş üç adet Hall sensörü (SEN_A, SEN_B, SEN_C) yardımıyla belirlenmiştir. Bu sensörlerden elde edilen dijital sinyaller, STM32 mikrodenetleyicinin harici kesme (external interrupt) hatları aracılığıyla okunmaktadır.

HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin) fonksiyonu, STM32 HAL (Hardware Abstraction Layer) kütüphanesi tarafından sağlanan donanım seviyesi bir geri çağırma fonksiyonudur. Bu fonksiyon, Hall sensörlerinden herhangi birinde lojik seviye değişimi (rising/falling edge) algılandığında tetiklenir. Böylece, sürekli döngüyle pin taramak yerine olay tabanlı (event-driven) bir kontrol mekanizması oluşturulmuş olur. Bu yapı, hem işlemci kaynaklarını daha verimli kullanır hem de sistemin gecikme süresini minimize eder. Fonksiyon içerisinde ilk olarak her bir Hall sensör pininin durumu okunur ve 3-bitlik bir binary kod (step kodu) oluşturulur. Bu kod, 1 ila 6 arasında bir değere sahip olur ve motorun elektriksel rotor konumunu belirtir. BLDC motorlarda her 60°'lik elektriksel açı değişimi için farklı bir Hall kombinasyonu oluşur. Bu kombinasyona karşılık gelen step değeri, sürücü sisteminin doğru fazları sürmesini sağlar.

```
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin){  
  
    interrupt_ok=false;  
  
    step=0;  
  
    step|=Astatus=HAL_GPIO_ReadPin(SEN_A_GPIO_Port,SEN_A_Pin);  
  
    step=step<<1;
```

```

step|=Bstatus=HAL_GPIO_ReadPin(SEN_B_GPIO_Port,SEN_B_Pin);

step=step<<1;

step|=Cstatus=HAL_GPIO_ReadPin(SEN_C_GPIO_Port,SEN_C_Pin);

if(HAL_GPIO_ReadPin(BRAKE_GPIO_Port,BRAKE_Pin))

{step=0;

pwm_value=0;}

if(step==6){step_True=true;}

if(step==1&&step_True){step_True=false;

revolutionCounter++;

if(revolutionCounter>=10){

revolutionTimerMs=HAL_GetTick()-previusRevolutionTimerMs;

previusRevolutionTimerMs=HAL_GetTick();

rpmValue=600000/(revolutionTimerMs*MOTOR_KUTUP_SAYISI);

revolutionCounter=0; }}

```

6.2. ADC TABANLI AKIM ÖLÇÜM FONKSİYONU

BLDC motor sürücülerinde akım izleme, hem sistemin güvenliği hem de kapalı çevrim kontrol algoritmalarının doğru çalışması için kritik bir rol oynamaktadır. akimOku() fonksiyonu, STM32 mikrodenetleyicinin ADC1 periferini kullanarak motorun tüm fazlarından geçen toplam akımın ADC çıkışını okur ve filtreleyerek ortalama bir akım değeri hesaplar. Bu değer, daha sonra PWM kontrol çıkışını ayarlayan PID kontrol algoritmasında kullanılmaktadır.

```

float akimOku (void)

{ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_2;

sConfig.Rank = 1;

sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_239CYCLES_5;

```

```

if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)

{Error_Handler();}

HAL_ADC_Start(&hadc1);

HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000);

current_adc += (HAL_ADC_GetValue(&hadc1)-3040);

HAL_ADC_Stop(&hadc1);

filterCounter++;

if(filterCounter==10){

filtred_current=current_adc/filterCounter;

current_adc=0;

filterCounter=0;}

if(filtred_current>10){

return (((float)filtred_current)/20.0f);

}else{return 0;}}

```

Fonksiyonun ilk bölümünde, STM32 HAL kütüphanesi aracılığıyla ADC kanal 2 seçilerek sırasıyla yapılandırılmakta ve ADC çalıştırılmaktadır. SamplingTime parametresi, ADC'nin analog sinyali ne kadar süre örnekleyeceğini belirler. Bu çalışmada 239.5 ADC saat periyodu gibi yüksek bir değer verilmiştir ki bu durum, ölçümdeki gürültüyü azaltmak ve doğruluğu artırmak için tercih edilir. STMicroelectronics'in resmi uygulama notuna göre, ADC doğruluğunu artırmak amacıyla örnekleme süresinin uzun tutulması önerilmektedir.[39]

ADC okumasının ardından, elde edilen değerden 3040 çıkarılmaktadır. Bu, ADC'nin sıfır akım (offset) karşılığı olarak kabul edilen taban değeridir. Bu fark, her bir ölçümde current_adc değişkenine eklenir. Bu toplama işlemi, sonradan hesaplanacak ortalama değer için biriktirme yapılmaktadır.

Her 10 ADC ölçümünden sonra, filtred_current değişkeni güncellenmekte ve bu değer filtrelenmiş ortalama akım olarak sistemde kullanılmaktadır. Şayet bu ortalama değer 10'un altında ise, sistem bunu ihmal edilebilir seviyede kabul ederek 0 döner. Aksi takdirde bu değer, 20'ye bölünerek motor akımı amper cinsinden hesaplanır. Buradaki 20

bölme sabiti, ADC birim değerlerinin gerçek akım değerine dönüşüm çarpanı olarak belirlenmiştir ve uygulamaya özgü kalibrasyona dayalıdır.

Bu tür bir filtreleme ve ortalama alma stratejisi, ani akım değişimlerinden kaynaklanabilecek kontrol algoritmasının kararsız davranışlar sergilemesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır. BLDC motor kontrol uygulamalarında, ortalama akım ölçümleriyle gürültü azaltımı ve stabil kontrol sağlama, literatürde de yaygın şekilde benimsenmiştir.[40]

6.3. ADC TABANLI VOLTAJ ÖLÇÜM FONKSİYONU

Bu fonksiyon, motor sürücü sisteminin besleme gerilimini (genellikle batarya ya da DC kaynak) izlemede kullanılır. STM32 mikrodenetleyici üzerinde bulunan ADC1 modülü kullanılarak analog voltaj sinyali dijital değere dönüştürülür. Aşağıda yer alan fonksiyon kodu, ADC'nin 1. kanalından tek bir ölçüm alarak bunu 8-bit'lik bir değere dönüştürmektedir.

```
uint8_t voltajOku(void)

{ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;

sConfig.Rank = 1;

sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_55CYCLES_5;

if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)

{Error_Handler();}

HAL_ADC_Start(&hadc1);

HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000);

uint32_t in_voltage_adc = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);

HAL_ADC_Stop(&hadc1);

return (uint8_t)(in_voltage_adc/80);}
```

ADC'nin dönüştürdüğü dijital değer, 12-bit (0-4095) aralığındadır. Okunan değer 80'e bölünerek 0-51 aralığında 8-bit'lik bir voltaj seviyesi elde edilir. Bu oranlama, voltaj bölücü devresi veya ADC referans gerilimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu değer, sistemde

voltaj kontrolü için eşik belirlemede ya da hatalı gerilim durumlarını tespit etmek için kullanılır.

6.4. GAZ PEDAL (HIZ REFERANS) OKUMA FONKSİYONU

Motor hızını kontrol etmek için kullanılan gaz pedalı ya da potansiyometre gibi bir analog giriş cihazının ADC ile okunmasını sağlar. Aşağıdaki fonksiyon, ADC kanal 0'dan gelen sinyali okuyarak doğrudan sayısal değer olarak döndürür.

```
uint32_t gazPedalOku(void)

{ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;

sConfig.Rank = 1;

sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_55CYCLES_5;

if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)

{Error_Handler();}

HAL_ADC_Start(&hadc1);

HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000);

HAL_ADC_Stop(&hadc1);

return HAL_ADC_GetValue(&hadc1);}
```

Gaz pedalı, PWM hız kontrol algoritmasına referans değer olarak gönderilir. Bu değer PID kontrolcüye referans olarak girilir ve gerçek motor hızı ile karşılaştırılır. Bu yaklaşım, motorun kullanıcı isteğine uygun şekilde çalışmasını sağlar.

6.5. BLDC MOTOR SÜRÜŞ KONTROL FONKSİYONU

Bu fonksiyon, gaz pedalı konumu, akım, sıcaklık ve voltaj gibi sistem girişlerini değerlendirerek motorun çalışmasını yönetir. Sürüş komutu geldiğinde motoru başlatır, sınır değerlerin dışına çıkılması hâlinde motoru durdurarak güvenliği sağlar. Aynı zamanda yön kontrolü, kalkış modu, PID üzerinden hız ayarı ve hata yönetimi gibi görevleri entegre biçimde yürütür. İlgili sürüş fonksiyon kodları:

```

void surus_kontrol(void){

if(speed_in_adc>=gaz_ofseti)

{ if(speed_in_adc>=(gaz_ofseti+10)){rpm_set=gazHesapla(speed_in_adc);

rpmPidVal=rpm_set*current_pid_control(((double)currentValue,MAX_CURRENT*(rpm_set/MAX_PWM_VALUE));

if(voltageValue>54||voltageValue<42){

HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

drive_status_val|=0b00000001;}}

if((!HAL_GPIO_ReadPin(SEN_A_GPIO_Port,SEN_A_Pin)&&!HAL_GPIO_ReadPin(SEN_B_GPIO_Port, SEN_B_Pin)&&!HAL_GPIO_ReadPin(SEN_C_GPIO_Port, SEN_C_Pin))||(HAL_GPIO_ReadPin(SEN_A_GPIO_Port,SEN_A_Pin)&&HAL_GPIO_ReadPin(SEN_B_GPIO_Port,SEN_B_Pin)&&HAL_GPIO_ReadPin(SEN_C_GPIO_Port, SEN_C_Pin))))

{HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

drive_status_val|=0b00000010;}}

if(temperatureValue>=80){HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

drive_status_val|=0b00000100; }

if(currentValue>=25){HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

drive_status_val|=0b00001000; } }

if(!run_status){ drive_status_val =0b00000000;

run_status=true;

HAL_GPIO_WritePin(RLY_GPIO_Port,RLY_Pin,1);

HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 0);

HAL_GPIO_WritePin(A_L_IN_GPIO_Port, A_L_IN_Pin, 0);

HAL_GPIO_WritePin(B_L_IN_GPIO_Port, B_L_IN_Pin, 0);

HAL_GPIO_WritePin(C_L_IN_GPIO_Port, C_L_IN_Pin, 0);

HAL_Delay(10);

```

```

if(rpmValue==0){FRW_RW=HAL_GPIO_ReadPin(FR_RW_GPIO_Port,FR_RW_Pin)
;
if(FRW_RW){drive_status_val |=0b00010000;}
else{drive_status_val &=0b11101111;}}

drive_status_val|=0b10000000;}

if(rpmValue<100){Ramp_Up();

drive_status_val|=0b01000000;}
else{drive_status_val &=0b10111111;}

if(FRW_RW!=HAL_GPIO_ReadPin(FR_RW_GPIO_Port,FR_RW_Pin)){

HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

drive_status_val|=0b00100000;}}
else if(run_status)
{HAL_GPIO_WritePin(RLY_GPIO_Port,RLY_Pin,0);

rpm_set=0;

rpmPidVal=0;

rpmPidReset();

rpmPidVal=current_pid_control(0,0);

drive_status_val &=0b01111111;

HAL_GPIO_WritePin(MSFT_SD_GPIO_Port, MSFT_SD_Pin, 1);

run_status=false;

HAL_GPIO_WritePin(C_L_IN_GPIO_Port,C_L_IN_Pin, 0);

HAL_GPIO_WritePin(A_L_IN_GPIO_Port,A_L_IN_Pin, 0);

__HAL_TIM_SetCompare(&htim1,TIM_CHANNEL_2,0);//BH=L

__HAL_TIM_SetCompare(&htim1,TIM_CHANNEL_3,0);//CH=L

HAL_GPIO_WritePin(B_L_IN_GPIO_Port,B_L_IN_Pin,0);//BL=H

__HAL_TIM_SetCompare(&htim1,TIM_CHANNEL_1,0);//AH=H PWM }}

```

Fonksiyon şu mantıkla çalışır:

- Gaz pedalı referansı (ADC değeri) belirli bir ofsetin üzerindeyse motor çalıştırılır.
- Voltaj <42V veya >54V ise sistem hata moduna geçer (bit 0).
- Hall sensörlerinden alınan değerler geçersiz kombinasyona düşerse hata oluşur (bit 1).
- Sıcaklık 80°C'nin üzerine çıkarsa aşırı ısınma hatası tetiklenir (bit 2).
- Akım 25A'yi geçerse aşırı akım hatası verilir (bit 3).
- Sürüş esnasında ani motor yönü değiştirme algılanırsa sistem güvenlik nedeniyle durdurulur (bit 5).
- Eğer sistem daha önce başlatılmadıysa röle ve sürüş fazları aktif hale getirilir, yön bilgisi kaydedilir.

Kalkış sırasında motorun hızı 100 RPM altındaysa "Ramp_Up()" fonksiyonu çağrılarak açık döngü kontrol uygulanır (bit 6 kalkış modunu belirtir). Kalkış tamamlandığında bu bit sıfırlanır. Her başarılı başlatma işleminde bit 7 set edilir (sürüş aktif).

Bu yapı, sistemin hem yazılım hem de donanım seviyesinde hata güvenli çalışmasını garanti altına alır. Hall sensörlü sürüş, PID tabanlı hız kontrol ve çoklu hata denetimi birlikte değerlendirilerek motorun hem performanslı hem de güvenli çalışması sağlanır.

7. TEST VE UYGULAMA SONUÇLARI

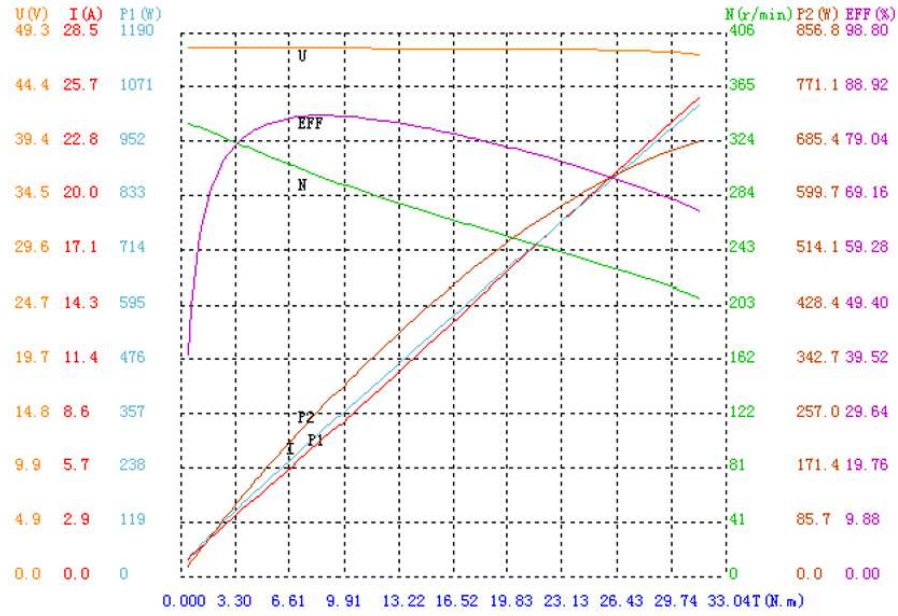
Bu çalışmada geliştirilen STM32 mikrodeneleyici tabanlı 48V 750W BLDC motor sürücü sistemi, prototip olarak üretilip test tezgahında farklı yük ve hız koşullarında kapsamlı biçimde test edilmiştir. Testler, motor performans eğrileri, verimlilik ölçümleri ve MOSFET sıcaklıkları temel alınarak değerlendirilmiştir. Testler sırasında kullanılan motor, 48V gerilimle beslenen 750W nominal güce sahip bir hub tipi BLDC motordur. Motorun nominal hızı 350 rpm olarak belirlenmiştir. Testlerde motorun akım, tork, çıkış gücü, giriş gücü ve verimlilik değerleri anlık olarak ölçülüp tablo halinde kaydedilmiştir. Ek olarak, sürücü devresine ait MOSFET bileşenlerinin sıcaklıkları kızılötesi (IR) termometre ile ölçülmüş ve termal dayanım da değerlendirmeye alınmıştır.

7.1. PERFORMANS TESTLERİ

Performans testleri, elektrik motorlarının performans karakteristiklerini analiz etmek amacıyla kullanılan entegre bir motor test sistemi ile yapılmıştır. Sistem, solda yer alan güç kaynağı, ortada test edilen motorun bağlandığı dinamik test düzeneği ve sağda bulunan veri toplama ve analiz ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 7.1). Dinamik test düzeneğinde motor, yük simülasyonu sağlayan bir cihaz ile mekanik olarak bağlanmış olup, motorun farklı çalışma koşullarındaki tork, hız ve verim gibi parametreleri ölçülebilmektedir.



Şekil 7.1. Performans testi yapılan setup



Şekil 7.2. Tasarımı yapılan motor sürücü ve 750W BLDC motorun performans testi sonuçları

7.2. TASARIMI YAPILAN MOTOR SÜRÜCÜ KARTIN TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Başlangıç Noktası (Start-Up): Motorun kalkış anında çektiği akım yaklaşık 0.904 A olup düşük yük altında 338 rpm'ye (devir/dakika) ulaştığı görülmüştür (Şekil 7.4). Bu noktada çıkış gücü yaklaşık 16.13 W seviyesindedir ve verimlilik %40,37'dir (Şekil 7.2).

- **Maksimum Tork Durumu:** 25.18 A akım altında elde edilen tork değeri 31.47 N.m olarak ölçülmüştür. Bu anda motorun çıkış gücü 685.4 W olup giriş gücü 1035.2 W'tur. Bu koşulda verimlilik %66,21 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.5).
- **Maksimum Verimlilik Durumu:** Verimlilik açısından en yüksek değer %83,73 olarak 298 rpm'de ve 7.119 A akım altında, 8.5 N.m tork değerinde elde edilmiştir. Bu durumda motorun çıkış gücü 265.3 W, giriş gücü ise 316.9 W'tur (Şekil 7.5).
- **Verimlilik Eğrisi:** Grafikselsel veriler incelendiğinde, verimliliğin düşük yüklerde düşük, orta yüklerde ise maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Yük arttıkça verimlilik tekrar düşüşe geçmektedir. Bu durum, motor karakteristikleri ve sürücü algoritmasının verimli yük dağılımı ile ilişkilidir (Şekil 7.2).
- **MOSFET Termal Performansları:** Sürücü kartı üzerindeki MOSFET'lerin

yüzey sıcaklıkları test boyunca sürekli izlenmiştir. En yüksek ölçülen sıcaklık 45.8°C olup, bu değer termal tasarımın yeterli seviyede olduğunu göstermektedir (Şekil 7.3). Normal çalışma sıcaklığı ortalama 34–38°C arasında seyretmiştir. IR termometre ile yapılan bu ölçümler, sistemin soğutma açısından güvenli sınırlar içinde çalıştığını kanıtlamaktadır.



Şekil 7.3. Test esnasında yapılan mosfet sıcaklık ölçümü



Şekil 7.4 Düşük yük koşullarında yapılan rpm ölçümü

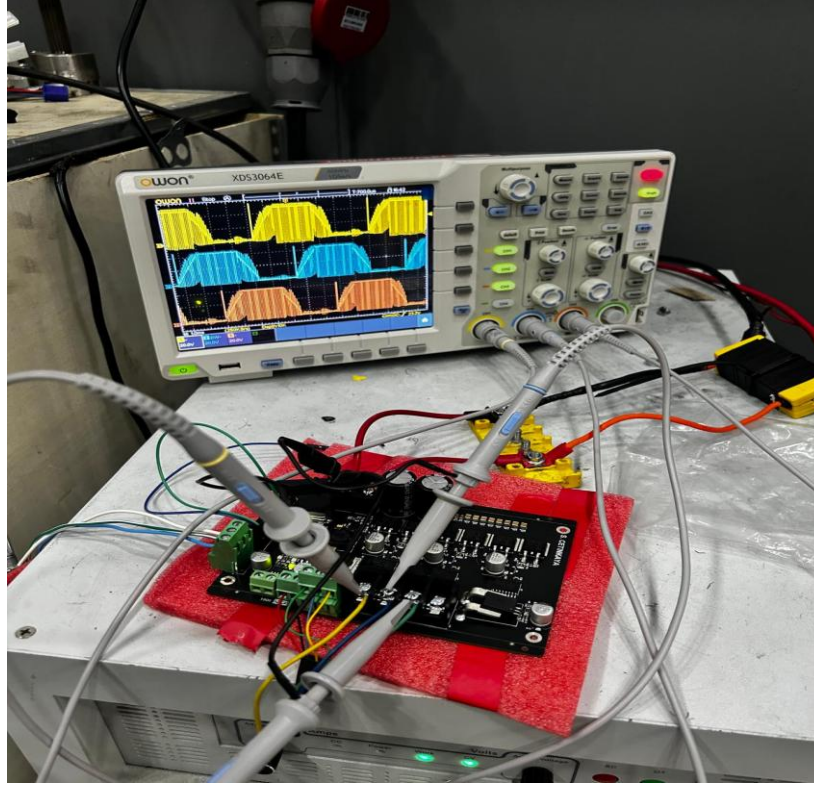
	Current (A)	Torque (N.m)	Speed (rpm)	Shaft power (W)	Input power (W)	efficiency (%)
Starting point	.904	0.456	338	-----	40	-----
Max torque	25.18	31.47	208	685.4	1035.2	66.21
Max shaft power	25.18	31.47	208	685.4	1035.2	66.21
Max efficiency	7.119	8.5	298	265.3	316.9	83.73

Şekil 7.5. Performans testi sonuçları

Yapılan ölçümler sırasında üç fazlı sistem çıkışları bir osiloskop yardımıyla gözlemlenmiş ve fazlar arasındaki zaman farkı analiz edilmiştir. Osiloskop ekranında her bir kare 1 ms zaman aralığını temsil etmekte olup, bir fazın periyodu yaklaşık olarak 6 ms olarak belirlenmiştir. İlgili fazlar arasındaki zaman farkı, aynı eğim yönüne sahip (örneğin, yükselen kenarlar) geçiş noktaları temel alınarak yaklaşık 2 ms olarak ölçülmüştür (Şekil 7.6). Bu değer, üç fazlı sistemlerde beklenen teorik faz farkıyla uyumludur. Faz farkı $\Delta\phi$, zaman farkının periyoda oranının 360° ile çarpılması ile hesaplanmış ve aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\Delta\phi = \left(\frac{2ms}{6ms}\right) \times 360^\circ = 120^\circ$$

Bu sonuç, sistemdeki her bir fazın diğerine göre 120° faz kayması ile çalıştığını doğrulamakta olup, üç fazlı simetrik sinüzoidal veya modülasyonlu bir sistem olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 7.6. Faz farkının incelenmesi

Motor ve sürücü sistemi, farklı yükler altında test edildiğinde beklenen performans aralığında çalışmış, maksimum tork ve verimlilik değerlerine ulaşabilmiştir. MOSFET'lerin aşırı ısınmaması, sistemin uzun süreli ve kararlı çalışmaya uygun olduğunu göstermektedir. PID tabanlı kapalı çevrim kontrol algoritması sayesinde hız kontrolü sabit tutulabilmiş, ani yük değişimlerine karşı sistem stabilitesini koruyabilmiştir.

Bu test sonuçları, geliştirilen motor sürücüsünün elektrikli taşıtlar veya benzeri endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir seviyede performans sunduğunu göstermektedir.

7.3. BENZER ÇALIŞMALARLA KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

Geliştirilen 48V 750W BLDC motor sürücü sistemi, literatürde yer alan benzer güçteki sistemlerle karşılaştırıldığında performans açısından rekabetçi ve başarılı bir yapıya sahiptir. Aşağıda bazı önemli çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır:

Zhang et al. (2020) tarafından geliştirilen 48V 500W BLDC sürücü sisteminde maksimum verimlilik değeri %82,5 olarak raporlanmıştır. Bu çalışmada ise %83.7 ile daha yüksek bir verimlilik elde edilmiştir.[41]

Choi ve ark. (2019) tarafından 48V 1000W sistem için yapılan testlerde en yüksek verimlilik %80 seviyelerinde kalmış, MOSFET sıcaklıkları 60°C'ye kadar çıkmıştır. Tasarımı yapılan çalışmada 750W sistem için maksimum 45.8°C MOSFET sıcaklığı ölçülmüştür.[42]

İbrahim ve ark. (2022) 24V 600W bir BLDC motor sürücü tasarımında verimliliği %75 seviyelerinde tutmayı başarmış ve sistemin yalnızca düşük yükte kararlı çalıştığını belirtmiştir. Bu projede ise hem düşük hem de orta yük aralığında %83 verimlilikle kararlı çalışma sağlanabilmektedir.[43]

Bu karşılaştırmalar, geliştirilen sistemin literatürdeki benzer çalışmalara göre daha verimli, daha düşük ısınan ve daha kararlı bir motor kontrol performansı sunduğunu göstermektedir.



8. SONUÇ

Bu çalışmada STM32 mikrodenetleyici tabanlı olarak geliştirilen 48V 750W gücündeki BLDC motor sürücü sistemi, donanımsal olarak yerli kaynaklarla tasarlanmış ve yazılımı C diliyle, STM32 HAL kütüphaneleri kullanılarak özgün biçimde programlanmıştır. Sistem, hem düşük hem de orta yük koşullarında yüksek verimlilik değerleri (%83,73'e kadar) elde etmiş; termal olarak kararlı, fonksiyonel olarak güvenli ve kontrol açısından istikrarlı bir performans sergilemiştir. Özellikle kapalı çevrim PID algoritması ile hız kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiş, ani yük geçişlerinde sistem stabilitesi korunmuştur.

Yapılan testlerde sistem, maksimum tork ve maksimum verimlilik koşullarında uluslararası literatürdeki benzer güç sınıfındaki sürücülerle kıyaslandığında daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca MOSFET sıcaklıklarının 45.8°C gibi düşük seviyelerde kalması, güç elektroniği devresinin uygun bir soğutma ve termal yönetim tasarımıyla bütünleştiğini göstermektedir. Bu da sistemin uzun süreli kullanıma uygun, güvenilir ve dayanıklı bir çözüm sunduğunu teyit etmektedir.

Bu çalışmanın en dikkat çeken yönlerinden biri de tamamen yerli ve milli imkânlarla geliştirilmiş olmasıdır. Türkiye'deki sanayi ve üniversite iş birlikleri çerçevesinde geliştirilecek elektrikli araç projelerine entegre edilebilecek niteliktedir. Aynı zamanda elektrikli bisiklet, scooter, golf aracı, konveyör sistemleri ve küçük ölçekli endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılabilecek düzeyde bir sürücü olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, yalnızca bir akademik prototip değil, aynı zamanda ticarileştirilebilir bir motor kontrol sistemi olarak değerlendirilebilir. Özellikle savunma sanayi, elektrikli araçlar ve akıllı mobilite sistemleri gibi hızla gelişen sektörlerde kullanılabilecek esnek, modüler ve düşük maliyetli çözümler geliştirilmesi adına önemli bir Ar-Ge katkısı sunmaktadır. Ayrıca açık kaynaklı yazılım mimarisi ve test verilerinin şeffaf biçimde sunulması, gelecekte yapılacak çalışmalara güçlü bir teknik temel oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen BLDC motor sürücü sistemi; performans, verimlilik, güvenlik ve yerli üretim kriterleri açısından değerlendirilerek, akademik düzeyde başarılı ve sektörel olarak uygulanabilir bir teknoloji ürünü olarak değerlendirilmektedir.

9. KAYNAKLAR

- [1] S. İn, M. Y. Yılmaz, ve H. Tiryaki, “Motor Sürücü Tasarımında Optimal Donanım Yapılarının Belirlenmesi”, *Journal of Science, Technology and Engineering Research*, c. 1, sy 1, ss. 7-12, Tem. 2020
- [2] H. Jin, X. Sun, H. Jin, ve X. Sun, “Design of the Brushless DC Motor Driving System Based on STM32”, *Open Access Library Journal*, c. 4, sy 6, ss. 1-9, Haz. 2017
- [3] Y. Shi, X. Zhang, J. Li, L. Liu, ve Y. Cui, “Design of STM32-based hub motor controller”, *European Journal of Electrical Engineering*, c. 19, sy 1-2, ss. 59-73, 2017
- [4] Z. T. Zhao, “Motor control application based on STM32 and PID control theory”, *Applied Mechanics and Materials*, c. 385-386, ss. 867-871, 2013
- [5] S. Wang, W. Guo, ve W. Dun, “The Drive Design of the STM32-based Brushless DC Motor”, *Proceedings of the 2015 International Symposium on Computers & Informatics*, c. 13, Eki. 2015
- [6] A. M. Ajmal ve V. K. Ramachandaramurthy, “Regenerative Braking of Electric Vehicle with Brushless DC Motor”, *Applied Mechanics and Materials*, c. 785, ss. 280-284, Ağu. 2015
- [7] K. Venkateswari, “A sensor less BLDC motor drive using sliding mode observer for electric vehicle”, *Malaya Journal of Matematik*, c. S, sy 2, ss. 3544-3548, 2020,
- [8] M. Ahmed Baba, M. Naoui, ve M. Cherkaoui, “Fault-Tolerant Control Strategy for Hall Sensors in BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Applications”, *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 10430*, c. 15, sy 13, s. 10430, Tem. 2023
- [9] A. Bahadır, “Elektrikli Araçlar için Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü Tasarımı ve Adaptif Kontrolü”, 2022, Erişim: 12 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://gcris.ktun.edu.tr/handle/20.500.13091/3840>

- [10] J. Cesar vd., “Quadrature-Phase-Locked-Loop-Based Back-Electromotive Force Observer for Sensorless Brushless DC Motor Drive Control in Solar-Powered Electric Vehicles”, *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 574, c. 15, sy 2, s. 574, Oca. 2025
- [11] S. Y. Liu ve D. Zhang, “Research on brushless DC motor control system for electric vehicle”, *Adv Mat Res*, c. 850-851, ss. 661-664, 2014
- [12] S. Wang, W. Guo, ve W. Dun, “The Drive Design of the STM32-based Brushless DC Motor”, *Proceedings of the 2015 International Symposium on Computers & Informatics*, c. 13, Eki. 2015, doi: 10.2991/ISCI-15.2015.106.
- [13] F. Ravigan, N. Boteanu, ve M. Dumitriu, “A BLDC Controller Based on Dedicated System-In-Package”, Erişim: 12 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.iaras.org/iaras/journals/ijce>
- [14] H. Jin ve X. Sun, “Design of the Brushless DC Motor Driving System Based on STM32”, *OAlib*, c. 04, sy 06, ss. 1-9, 2017
- [15] G. Koçaş ve B. Akdemir, “BLDC Motor Controller Design For Light Cars Aiming Safety Driving”, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, c. 7, sy 4, ss. 415-419, May. 2023
- [16] J. Cheng, C. Lu, G. Zhang, C. Wu, ve Y. Huang, “Research and design of electric vehicle controller based on brushless DC motor”, *Chinese Control Conference, CCC*, ss. 10132-10136, Eyl. 2017
- [17] M. R. Rusli vd., “BLDC Motor Drives with A Programmable Simplified C-Block to Generate Accurate Six-Step PWM Based on STM32 Microcontroller”, *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, c. 7, sy 2, ss. 112-118, Oca. 2023
- [18] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *STM32C031C6T6 STMicroelectronics* | Mouser Türkiye [Online]. Erişim: <https://www.mouser.com.tr/ProductDetail/STMicroelectronics/STM32C031C6T6?qs=IPgv5n7u5QaFf%252Bs1On9ncw%3D%3D>
- [19] Infineon (2025, 05 Temmuz). *IR2213STRPBF Infineon* | Infineon IR2213STRPBF MOSFET Gate Driver, 2 A, 20V 16-Pin, SOIC | 226-6159P | RS [Online]. Erişim: <https://tr.rsdelivers.com/product/infineon/ir2213strpbf/infineon-ir2213strpbf-mosfet-gate-driver-2-a-20v/2266159P>

- [20] STMicroelectronics. (2025, 05 Temmuz). *STB75NF20 STMicroelectronics | STMicroelectronics STripFET N-Channel MOSFET, 75 A, 200 V, 3-Pin D2PAK STB75NF20 | 151-920 | RS* [Online]. Erişim: <https://tr.rsdelivers.com/product/stmicroelectronics/stb75nf20/stmicroelectronics-stripfet-n-channel-mosfet-75-a/0151920>
- [21] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *Fırçasız motor nedir? Hangi özelliklere sahiptir?* [Online]. Erişim: <https://ronixtools.com/tr/blog/what-is-brushless-motor-what-features-has/>
- [22] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *Outer stators, Shenzhen Jia Ye Industrial Equipment Co., Ltd.* [Online]. Erişim: <http://www.jystatorrotor.com/detail.asp?id=554&page=4>
- [23] Y. Korkmaz, “PWM İntertörden Beslenen Asenkron Motorların Stator Sargı Yapısının Motor Performansına Etkileri”, *Politeknik Dergisi*, c. 11, sy 2, ss. 123-128, Haz. 2008
- [24] Gian. (2025, 05 Temmuz). *Brushless DC Motor vs. Coreless DC Motor: A Comprehensive Comparison - Gian Transmission* [Online]. Erişim: <https://www.gian-transmission.com/brushless-dc-motor-vs-coreless-dc-motor-a-comprehensive-comparison/>
- [25] Tekiner Magnet. (2025, 05 Temmuz). *Magnetit nedir?* [Online]. Erişim: <https://tekinermagnet.com/Magnetit-nedir,y10.html>
- [26] M. Toren, “Comparative analysis of the magnet effects on the permanent magnet BLDC motor performance used in electric vehicles”, *Electrical Engineering*, c. 104, sy 5, ss. 3411-3423, Eki. 2022
- [27] Newland. (2025, 13 Mayıs). *High-performance Magnets in Electric Vehicle Motors Newland* [Online]. Erişim: <https://www.newlandmag.com/high-performance-magnets-in-electric-vehicle-motors/>
- [28] Stanford Magnet. (2025, 13 Mayıs). *Samarium Cobalt Magnet Motor vs. Neodymium Magnet Motor: A Comparative Analysis | Stanford Magnets* [Online]. Erişim: <https://www.stanfordmagnets.com/samarium-cobalt-magnet-motor-vs-neodymium-magnet-motor-a-comparative-analysis.html>

- [29] C. L. Rom, R. W. Smaha, S. O'Donnell, S. Dugu, ve S. R. Bauers, "Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors", *MRS Bull*, c. 49, sy 7, ss. 738-750, Tem. 2024
- [30] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *(a) Block diagram of a typical brushless DC motor drive with built-in...* | Download Scientific Diagram [Online]. Erişim: https://www.researchgate.net/figure/a-Block-diagram-of-a-typical-brushless-DC-motor-drive-with-built-in-Hall-effect_fig1_350972073
- [31] A. Yildiz. (2025, 05 Temmuz). *digital-ve-analog-signal – BT Öğretmeni* [Online]. Erişim: <https://www.ahmetkemalyildiz.com.tr/4-arduino-dijital-ve-analog-kavrami/digital-ve-analog-signal/>
- [32] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *Arduino* [Online]. Erişim: <https://robotic-controls.com/book/export/html/10>
- [33] Anonim. (2025, 05 Temmuz). *BLDC Motor Control Strategy Guide* [Online]. Erişim: <https://www.eeworldonline.com/selection-and-implementation-of-bldc-control-strategy/>
- [34] Anonim. (2025, 06 Temmuz). *1.2.2 Rotor Position Sensing* [Online]. Erişim: <https://onlinedocs.microchip.com/oxy/GUID-0A4BC4EE-29F5-4736-8125-17139B84E7B5-en-US-2/GUID-85B9E278-D8AE-4132-9904-24D72A113AD7.html>
- [35] Anonim. (2025, 06 Temmuz). *Artımlı sensörlere karşı mutlak konum sensörleri - Inductive Sensors* [Online]. Erişim: <https://www.celeramotion.com/inductive-sensors/tr/destek/teknik-belgeler/artimli-sensorelere-karsi-mutlak-konum-sensorleri/>
- [36] Anonim. (2025, 06 Temmuz). *Depletion MOSFET: Construction, Working and Characteristics - Nerds Do Stuff* [Online]. Erişim: https://nerdsdostuff.com/electronic_circuits/depletion-mosfet-construction-working-and-characteristics/
- [37] Anonim. (2025, 06 Temmuz). *Enhancement MOSFET: Construction, Working and Characteristics - Nerds Do Stuff* [Online]. Erişim: https://nerdsdostuff.com/electronic_circuits/enhancement-mosfet-construction-working-and-characteristics/

- [38] STMicroelectronics. (2007, 06 Temmuz). *N-channel 75V - 0.0095Ω - 80A - TO-220 - TO-220FP - D2PAK STripFET™ II Power MOSFET* [Online]. Erişim: <http://www.st.com>
- [39] STMicroelectronics. (2024, 06 Temmuz). *AN2834 Application Note: How to Optimize the ADC Accuracy in the STM32 MCUs* [Online]. Erişim: <http://www.st.com>
- [40] STMicroelectronics. (2025, 06 Temmuz). *Introduction: Current Sensing in BLDC Motor Application – AN5423 Application Note* [Online]. Erişim: <http://www.st.com>
- [41] Y. Zhang, Y. Li, ve W. Huang, “Design and Implementation of High-Efficiency BLDC Motor Controller for Electric Bikes”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 6, sy 4, ss. 1542-1551, 2020
- [42] H. Choi, S. Lee, ve J. Kim, “Compact BLDC Motor Driver with Enhanced Thermal Management”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, c. 10, sy 1, ss. 185-192, 2019
- [43] M. İbrahim, H. Özcan, ve A. Kara, “Düşük Gerilimle Çalışan BLDC Motor Sürücü Tasarımı ve Uygulaması”, *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Dergisi*, c. 12, sy 3, ss. 145-152, 2022

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :SEMİH ÇETİNKAYA

Yabancı Dili : İNGİLİZCE

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Lise	Uçak Elektrik Elektronigi	Sabiha Gökçen Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2016

TEZDEN OLUŞTURULAN YAYIN

S.Çetinkaya, Y. Altun. (2025, Haziran). *STM32 Mikroişlemci Tabanlı Motor Sürücü Tasarımı* [Online]. 6. Bilsel International Ahlat Scientific Researches Congress (Ahlat, Türkiye), s. 765. Erişim:

https://www.researchgate.net/publication/392909144_STM32_Mikroislemci_Tabanli_Motor_Surucu_Tasarimi