



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BLDC
MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Göktürk KOÇAŞ

YÜKSEK LİSANS

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Göktürk Koçaş tarafından hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BLDC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI” adlı tez çalışması 22/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Hulusi Karaca

Danışman

Doç. Dr. Bayram Akdemir

Üye

Doç.Dr. Nurettin Çetinkaya

İmza

.....

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt Uyan
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Göktürk KOÇAŞ

Tarih:05.06.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN BLDC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

Göktürk KOÇAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bayram Akdemir

2023, 92 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Bayram Akdemir
Doç. Dr. Nurettin Çetinkaya
Doç. Dr. Hulusi Karaca

Bu tezin temel amacı, mikrodenetleyici aracılığıyla 6-step yöntemi kullanılarak alan etkili (Hall effect) sensör ile hız kontrolü gerçekleştirilen bir dış rotorlu HUB Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun, 0-10 volt aralığındaki izoleli analog sinyal girişini referans olarak bir elektrikli araca doğrudan tahrikli hız kontrolünü sağlamaktır.

Araştırma kapsamında, izoleli analog girişin güvenlik avantajları üzerinde durulacak, ayrıca analog girişte bulunan dirençlerin tolerans değeri sebebiyle oluşan hata payı bir öğrenme algoritması ile minimize edilecektir. Bu algoritma, ilk çalıştırıldığında kartın maksimum ve minimum değerleri öğrenmesini ve her farklı kart için çıkış sinyal denklemini yeniden hesaplamasını içerir. Bu sayede donanımsal farklılıklar göz ardı edilir ve tüm kartlar aynı gerilim seviyesinde eşdeğer tepkiler sağlar. Bu yaklaşım, daha keskin ve kararlı bir hız kontrolünü mümkün kılar.

Çalışma, anahtarlamalı (SMPS) güç beslemesi ve Akıllı Güç Modülü (IPM) kullanımı ile basit, etkin, ekonomik, hızlı ve güvenli bir motor kontrol sistemi tasarlamayı hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşmak için, ilk olarak derinlemesine bir literatür araştırması yapılacak ve benzer çalışmalar incelenerek alanın güncel durumu belirlenecektir. Ardından, mikrodenetleyici tabanlı bir kontrol sistemi tasarlanacak ve baskı devre üzerine uygulanacaktır.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen deneyler ve simülasyonlarla tasarlanan baskı devre kontrol sisteminin performansı değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlar, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrolü alanında pratik bir uygulama sunarken, benzer uygulamalar için de temel bir referans oluşturmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Analog İzolasyon, Direnç Tolerans Analizi, FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru), Hız Kontrolü, IPM (Akıllı Güç Modülü), Öğrenme Algoritmaları, STM32

ABSTRACT

MS

BLDC MOTOR DRIVER DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLES

Göktürk KOÇAŞ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering
Advisor: Assoc .Prof. Dr . Bayram Akdemir

2023, 92 Pages

Jury
Assoc .Prof. Dr . Bayram Akdemir
Assoc .Prof. Dr . Nurettin Çetinkaya
Assoc .Prof. Dr . Hulusi Karaca

The main objective of this thesis is to enable direct drive speed control of electric vehicles by utilizing an external rotor Hub Brushless Direct Current (BLDC) motor, which is controlled using the 6-step method through a microcontroller and an area-effective (Hall effect) sensor. This control is achieved by referencing the isolated analog signal input in the range of 0-10 volts, allowing for precise speed control of the electric vehicles.

The study will emphasize the safety advantages of isolated analog input and minimize the margin of error caused by the tolerance value of resistors in the analog input via a learning algorithm. This algorithm entails the learning of maximum and minimum values by the card upon initial operation and recalculating the output signal equation for every distinct card. As a result, hardware discrepancies are disregarded, and all cards provide equivalent responses at the same voltage level. This approach enables sharper and more stable speed control.

The project aims to design a simple, efficient, economical, quick, and secure motor control system using Switched-Mode Power Supply (SMPS) and IPM (Intelligent Power Module). To reach this goal, an in-depth literature review will be conducted initially to determine the current state of the field by examining similar studies. Following this, a microcontroller-based control system will be designed and implemented on the printed circuit board.

In conclusion, the performance of the designed printed circuit board control system will be evaluated through experiments and simulations. The results obtained aim to provide a practical application in the field of Brushless Direct Current (BLDC) motor control while serving as a fundamental reference for similar applications.

Keywords: Analog Isolation, BLDC (Brushless Direct Current), IPM (Intelligent Power Module), Learning Algorithms, Resistance Tolerance Analysis, Speed Control, STM32

ÖNSÖZ

Teknolojik ilerlemeler, günlük hayatımızı şekillendirmeye devam ederken, bu ilerlemelerin en çok hissedildiği alanlardan biri ulaşım sektörüdür. Özellikle elektrikli araçlar, geleceğin ulaşımını tanımlayan teknolojilerin başında gelmektedir. Bu teknolojik dönüşüm, çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra, enerji verimliliği, sürüş deneyimi ve araç emniyeti gibi pek çok alanı da yeniden şekillendirmektedir.

Bu çalışma, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları ve bunların kontrol stratejileri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu motorların elektrikli araçlarda ve daha geniş bir yelpazede, otomasyon ve hareket kontrolü gerektiren uygulamalarda önemli bir rol oynadığı bilinmektedir.

Çalışmanın amacı, BLDC motor teknolojisinin farklı yönlerini ayrıntılı bir şekilde ele almak, bu motorların nasıl çalıştığını ve kontrol edildiğini anlamak ve bu teknolojilerin elektrikli araçlardaki emniyetli sürüşü nasıl etkilediğini keşfetmektir.

Bu çalışmanın, konuyla ilgilenen okuyuculara derinlemesine bir bakış açısı sağlamasını ve elektrikli araçların gelecekteki gelişimine katkıda bulunmasını umuyorum.

Saygılarımla,

Göktürk KOÇAŞ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. BLDC Motorların Önemi ve Kullanım Alanları.....	3
1.2 Motor Teknolojilerinin Karşılaştırılması	5
1.2.1. Asenkron ve Senkron motorların özellikleri ve karşılaştırılması	5
1.2.2. BLDC ve PMSM motorların özellikleri ve karşılaştırılması	7
1.3. BLDC Motor Tiplerinin Rotor ve Stator Tasarımlarına Göre İncelenmesi.....	9
1.3.1. İç rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları	10
1.3.2. Dış rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları.....	10
1.3.2.1 HUB BLDC motorlar.....	10
1.4. Kontrol ve Sürüş Stratejileri	11
1.4.1. Dijital kontrol stratejileri	12
1.4.2. Analog kontrol stratejileri.....	12
1.4.3. PWM ile hız kontrolü	13
1.5. Sensörlü ve Sensörsüz Sürüş Tekniklerinin Karşılaştırılması	14
1.5.1. Sensörsüz sürüş teknikleri	14
1.5.2. Enkoderli sürüş teknikleri.....	15
1.5.3. Hall effect sensörlü sürüş teknikleri	16
1.6. Güç Kontrol Elemanları ve Teknolojileri	19
1.6.1. MOSFET.....	20
1.6.2. Discrete IGBT	21
1.6.3. IGBT blok	21
1.6.4. IPM (Akıllı Güç Modülleri).....	21
1.7. PWM Sinyalinin Üretilmesi.....	23
1.7.1. Komparatör temelli teknikler.....	23
1.7.2. Sayısal sinyal işleme tabanlı teknikler	25
1.7.3. Mikrodenetleyici tabanlı teknikler.....	25
1.8. Güç Kaynakları ve Dönüştürücülerin İncelenmesi	26
1.8.1. Lineer güç kaynakları	26
1.8.2. SMPS güç kaynakları.....	26
1.8.3. H-Köprüsü	28
1.8.4. 3 Faz PWM inverter.....	29
1.9. Elektrikli Araçlarda Emniyetli Sürüş.....	30
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1 Kullanılan Sistem ve Bileşenlerin Genel Tanımları	40

3.1.1 STM32 mikrodenetleyici	41
3.1.2 Dıştan rotorlu HUB motor	44
3.1.3 Hall effect sensörlü sürüş sistemi	46
3.1.3.1 US1881 Hall effect sensör	47
3.1.3.2 Hall effect sensörlerin uygun açıyla pcb üzerine yerleştirilmesi	48
3.1.4 İzoleli 0-10 Volt analog kontrol sistemi	50
3.1.5 6MBP20XSF Serisi IPM (Akıllı Güç Modülü)	51
3.1.6 MP9488 entegreli güç kaynağı	52
3.2 Donanım Tasarımı ve Yapılandırılması	54
3.2.1 Şematiklerin Oluşturulması	54
3.2.2 PCB tasarımı ve üretimi	58
3.3 Yazılım Tasarımı ve Yapılandırılması	59
3.3.1 Mikrodenetleyicinin bacak yapılandırması	59
3.3.2 Kontrol algoritmasının tasarlanması ve akış diyagramı	63
3.4. Devrenin Gerçekleştirilmesi	64
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	70
4.1 Sistem Entegrasyonunun Değerlendirilmesi	70
4.2 Kontrol Algoritması Performansı	71
4.3 Sensörler ve Sinyal İşleme Sonuçları	71
4.4 Güç Modülü ve Sürüş Sistemi Analizi	72
4.5 Testler ve Validasyon Sonuçları	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
5.1 Sonuçlar	74
5.2 Öneriler	74
KAYNAKLAR	76
EKLER	79

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EV), 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanan bir tarihe sahiptir. O zamanlarda, hızlı bir şekilde gelişen otomobil sektörü hem elektrikli hem de içten yanmalı motorlar arasında bir rekabete sahne oldu. Ancak, içten yanmalı motorlar hızlı bir şekilde popülerlik kazandı ve yaklaşık bir yüzyıl boyunca otomobil endüstrisini domine etti.

Elektrikli araçların ilk örnekleri 1830'ların başlarında ortaya çıktı. Bu dönemde, İskoçyalı mucit Robert Anderson ilk elektrikli araba tasarımını gerçekleştirdi. Ancak, bu ilk modeller, sınırlı pil teknolojisi ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle, içten yanmalı motorlarla rekabet etmekte zorlandılar.

20. yüzyılın başında, elektrikli araçlar yerel ulaşım için popüler bir seçenektir. Sessiz, düşük bakım gereksinimleri ve kolay kullanımı, elektrikli araçları cazip bir seçenek haline getirdi. Ancak, içten yanmalı motor teknolojisinin gelişmesi ve petrolün geniş ölçekte kullanılabilirliği, bu dönemde elektrikli araçların büyümesini sınırladı.

1970'lerin petrol krizinden sonra, elektrikli araçlar yeniden ilgi görmeye başladı. Bu dönemde, enerji verimliliği ve çevresel etki konularına odaklanma, elektrikli araçlara yeniden ilgi gösterilmesine neden oldu. Ancak, sınırlı sürüş menzili ve yüksek maliyet, bu araçların geniş çapta benimsenmesini engelledi.

21. yüzyılın başında, teknolojik ilerlemeler ve artan çevresel bilinç, elektrikli araçların büyümesine ivme kazandı. Lithium-ion batarya teknolojisinin gelişmesi, elektrikli araçların sürüş menzilini büyük ölçüde artırdı ve maliyetlerini düşürdü. Ayrıca, hükümetlerin karbon emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerini teşvik etme çabaları, elektrikli araçların benimsenmesini hızlandırdı.

Günümüzde, elektrikli araçlar otomobil endüstrisinde hızla büyümekte ve gelecekteki taşımacılığın çehresini şekillendirmektedirler. Elektrikli araçların genel yapısı, batarya yönetim sistemleri (BMS), güç elektronikleri, elektrik motorları ve diğer bileşenleri içerir. Bu bileşenler, bir elektrikli aracın genel işleyişini ve performansını belirler. Teknolojinin ilerlemesi ve çevresel kaygıların artmasıyla birlikte, elektrikli araçlar gelecekteki ulaşımında daha da büyük bir rol oynaması öngörülmektedir.

Bununla birlikte Dünya genelinde, enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve yeni enerji kaynakları bulmaya yönelik araştırmaların artması sebebiyle, elektrik motorlarının verimlerinin artırılması ve bu motorların kontrolünde minimum enerji tüketiminin sağlanması büyük bir öneme sahip olmuştur. Kısacası, elektrik motorlarının ve sürücülerinin yapısal evrimi son derece önemli bir konu haline gelmiştir. İstatistiklere göre, tüm dünyada üretilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmı elektrik motorları

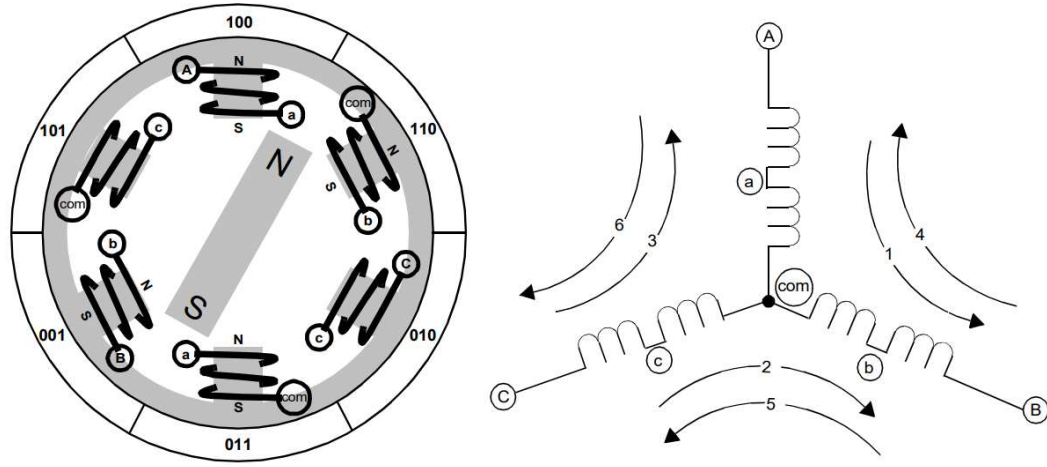
tarafından tüketilmekte olup, bu güç kaybının optimize edilmesi açısından güncel motor kontrol uygulamalarında elektronik hız kontrollü sürücüler kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında, birçok ülke enerji tasarrufu programları çerçevesinde, elektrik motor ve sürücülerinin geliştirilmesi ve değişken hızlı sürücülerin yaygınlaştırılması için destek vermektedir.

Son yıllarda, elektrik motorlarının üretiminde kullanılan manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler ve motor sürücü sistemlerinde kullanılan elektronik elemanların yeterli yüksek hızlara ulaşması, bununla birlikte maliyetlerinin düşmesi, sabit mıknatıslı elektronik komütasyonlu özel elektrik motorlarının geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu durum, kullanımı hızla artan Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların yaygınlaşmasına yol açmıştır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, yüksek moment, yüksek güç/ağırlık oranı, yüksek verim, sessiz çalışma, yoğun sargı yapısı, güvenilirlik ve düşük bakım maliyetleri gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu özellikler, bu tür motorların bilgisayarlar, uzay araçları, askeri ekipmanlar, otomotiv sektörü, endüstri ve ev gereçlerinde geniş çapta kullanılmasını sağlamaktadır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işlemi sırasında rotor pozisyon bilgisine ihtiyaç duyarlar. Bu sürecin karmaşıklığı, modern elektrik motor sürücülerinin, otomatik kontrol, elektrik makineleri, güç elektroniği, sinyal işleme ve mikroişlemciler gibi farklı elektrik mühendisliği disiplinlerini içine alacak şekilde karmaşık ve sürekli gelişmeye açık bir yapı haline gelmesine neden olmuştur.

Bu genel bakışın ardından, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların hem avantajlarını hem de dezavantajlarını göz önünde bulundurmak önemlidir. Bu motorlar, hız kontrolü, yüksek verim, yüksek moment üretme kapasitesi, güvenilir çalışma ortamı ve sessiz çalışma gibi birçok avantaja sahipken, kontrol devrelerinin karmaşıklığı, pozisyon sensörlerine duyulan ihtiyaç ve yüksek maliyetleri gibi dezavantajlara da sahiptirler.



Şekil 1.1. Fırçasız Doğru Akım motorunun temel yapısı.

Sonuç olarak, bu tez, enerji tasarrufu çerçevesinde Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların gelişimini, kontrol stratejilerini ve teknolojik ilerlemeleri geniş bir perspektiften ele almayı amaçlamaktadır. Bu alandaki teknik bilgiyi artırmak ve Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor teknolojisinin çeşitli yönlerini detaylandırmak amacıyla tasarlanan bu çalışma, bir mikrodenetleyici vasıtasıyla Hall effect sensörlerden gelen verileri değerlendirerek pozisyon ve hız kontrolü yapmayı, bu kontrolü sağlamak için ise bir elektronik kart tasarlayıp üretmeyi ayrıca bunun yanında bir gömülü yazılım oluşturmayı hedeflemektedir. İzolasyonlu olarak tasarlanan bu elektronik baskı devre kartı gömülü yazılımla beraber analog okuma kısmında kullanılan komponentlerin hata tolerans değerlerini elimine ederek üretilen bütün baskı devre elektronik kartlarında aynı tepki ve kararlılığı sağlayacaktır. Gömülü sistem üzerinde yapılan bu öğrenme algoritması düşük hata paylarına sahip yüksek maliyetli komponentlerin yerine daha ulaşılabilir olan komponentlerle çalışmayı sağlamayı hedefler. Yaygın kullanılan komponentleri daha kararlı şekilde kullanmak hem üretim hızını hem de maliyetleri düşürerek verimliliği maksimize edecektir.

1.1. BLDC Motorların Önemi ve Kullanım Alanları

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, son yıllarda enerji verimliliği, yüksek hız kapasitesi, kompakt boyutları ve uzun ömürleri nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılan motor tipi haline gelmiştir. Geleneksel DC motorlara kıyasla, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları daha düşük bakım gereksinimleri ve daha geniş hız ayar aralığı sunarlar. Fırçaların ve komütatörün yokluğu, bu motorların mekaniksel

sürtünmeyi azaltmasına, daha yüksek hızlara ulaşabilmesine ve daha az ısınmasına olanak sağlar.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları genellikle yüksek verimli ve hassas kontrol gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu uygulamalar şu şekilde listelenebilir;

- Otomotiv
- Havacılık
- İnsansız Hava Araçları
- Endüstriyel Otomasyon
- Elektrikli Araçlar
- Hava Durumu Kontrol Sistemleri
- Elektrikli Pompalar
- Fanlar
- Konveyör Sistemleri
- Medikal Cihazlar
- Robotik
- Cerrahi

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, maksimum hızlarına bağlı olarak tasarlanır ve bu hızlar tipik olarak 10.000 ila 50.000 RPM arasında değişir. Ancak bu hızlar, motorun tasarımına, kullanılan malzemelere ve kontrol algoritmalarına bağlı olarak değişebilir.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının enerji verimliliği önemli bir avantajdır. BLDC motorları, çoğunlukla %85 ile %95 arasında bir enerji verimliliğine sahiptir. Bu yüksek verimlilik, enerji tasarrufu ve daha az ısı üretimi sağlar, bu da bu motorların daha uzun süre ve daha yüksek hızlarda çalışmasını mümkün kılar.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, gücünü sabit mıknatlara dayanarak oluşturduğu için nadir toprak elementlerinden yapılan kalıcı mıknatıslar kullanır. Neodimyum, demir ve borun (NdFeB) alaşımı, modern Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarında en yaygın kullanılan mıknatıs malzemesidir. Bu mıknatıslar, yüksek enerji üretme kapasitesi ve sıcaklık kararlılığı ile bilinir. Ancak, nadir toprak elementlerinin temini ve geri dönüşümü, çevresel ve ekonomik zorluklar sunmaktadır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının sargıları, motorun verimliliğini ve performansını etkileyen önemli bir unsurdur. Sargılar, tercihen bakır tel kullanılarak

oluşturulur ve motorun statoruna sarılır. Sargıların kalitesi ve sarım şekli, motorun moment üretme kapasitesi ve hız limitini belirler (Şekil 1.1.).

Bu motorların çalışma prensiplerini anlamak, onların optimal şekilde kullanılabilmesi için kritik önem taşır. Kutup sayısı ve sargı sayısı, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının işleyişi ve performansı üzerinde belirleyici etkiye sahip temel parametrelerdir.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar, genellikle stator sargılarına ve rotor mıknatıslarına bağlı kutupları olan döner elektrik makineleridir. Motorun kutup sayısı, genellikle rotor mıknatıslarının sayısına eşittir ve motorun hızı ve torku üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Kutup sayısı arttıkça motorun hızı genellikle azalır, ancak tork kapasitesi artar.

Motorun sargı sayısı ise, stator çekirdeği üzerinde yer alan bobin çiftlerinin sayısıdır. Her sargı, motorun elektriksel performansını ve enerji verimliliğini etkileyen belirli bir mıknatıs alanını oluşturur. Sargı sayısı arttıkça, motorun güç çıkışı ve verimliliği artar ancak bu aynı zamanda motorun maliyetini ve karmaşıklığını da artırır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların kutup sayısı ve sargı sayısı, motorun çalışma karakteristiklerini ve uygulama gereksinimlerini karşılama kabiliyetini belirler. Bu nedenle, motor seçiminde ve tasarımında bu parametrelerin doğru bir şekilde dikkate alınması önemlidir. Bu, motorun gereksinimleri en iyi şekilde karşılayacak şekilde optimize edilmesini sağlar ve böylece enerji verimliliği ve performansı artırır.

Son olarak, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları tipik olarak üç fazlıdır, yani statoru çevreleyen üç bağımsız sargı seti bulunur. Bu üç fazlı yapı, motor kontrolünü karmaşıklaştırırsa da daha yüksek moment ve daha düzgün çalışma sağlar.

1.2 Motor Teknolojilerinin Karşılaştırılması

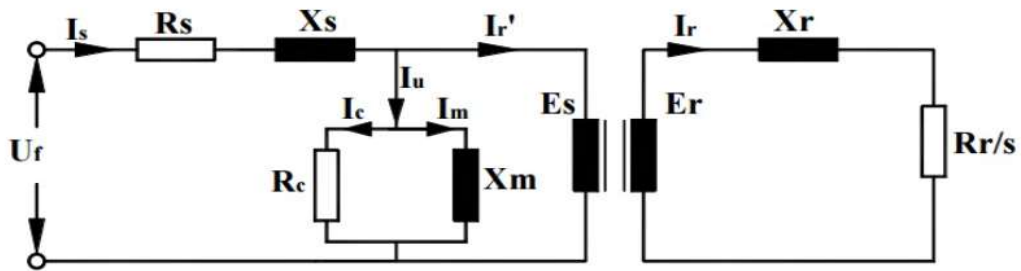
Bu kısımda Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların diğer 3 fazlı motorlara göre benzerlikleri ve farklılıkları incelenecektir. Öncelikle Asenkron ve Senkron makineler. Ardından yine bir Senkron Makine olan Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (PMSM) ve tez konusu olan Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları karşılaştırılacaktır.

1.2.1. Asenkron ve Senkron motorların özellikleri ve karşılaştırılması

Asenkron ve senkron motorlar, endüstride en yaygın kullanılan iki elektrik motoru tipidir. Her iki motor tipinin de belirgin özellikleri ve kullanım alanları vardır. Ancak,

performans özellikleri, üretim maliyetleri, kontrol kolaylığı, verimlilik ve enerji tüketimi açısından önemli farklılıklar bulunur.

Asenkron motorlar, AC motorların en yaygın ve en basit tipidir. Motor, rotorun senkron hızından daha düşük bir hızda döndüğü zamanlarda en verimli şekilde çalışır. Bu aradaki farka kayma açısı denir. İsimleri, rotor hızının senkron hızla tam olarak eşleşmemesinden gelir. Bu motorlar, kolay üretilebilir yapısı, düşük üretim maliyeti ve bakım gerektirmeyen yapılarından dolayı geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilir. Ancak, asenkron motorların kontrolü, özellikle hız ve tork kontrolü, karmaşıktır. Ayrıca, bu motorların enerji verimliliği yapısından kaynaklı düşük olup, boşa çalışma sırasında önemli miktarda enerji tüketirler. Birçok Asenkron motorun miline akuple edilmiş olan soğutma pervaneleri göz önünde bulundurulursa Senkron tip motorlar bu konuda oldukça avantajlı konumdadır.



$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad E_s = E'_r = a \cdot E_{r0}$$

$$X'_{rl} = a^2 \cdot X'_{r10} \quad R'_r = a^2 \cdot R_r \quad I'_r = \frac{I_r}{a}$$

Şekil 1.2. Asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi.

Senkron motorlar, rotor hızının stator alanının hızına eşit olduğu motorlardır. Bu motorlar, genellikle büyük ölçekli uygulamalarda kullanılır ve daha yüksek verimlilik, daha yüksek güç yoğunluğu ve daha iyi hız kontrolü sunarlar. Senkron motorlar, hız ve tork kontrolünün kolaylığı ve daha yüksek enerji verimliliği nedeniyle özellikle büyük endüstriyel uygulamalar için tercih edilir. Ancak, Senkron makineler genellikle Asenkron motorlara göre daha karmaşık ve daha pahalıdır ve eski tip Senkron motorlar düzenli bakım gerektirir.

Senkron motor dendiğinde akla ilk gelen eski tip olan komütatörlü yapıdaki motor olsa da tür olarak Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları da Daimi Mıknatıslı Senkron

Motorlar da (PMSM), Senkron tip motorlardandır. Öncelikle, Senkron motorlar çok daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir, genellikle %85 ile %95 arasında değişir. Bu, daha düşük enerji tüketimi ve daha az ısı üretimi anlamına gelir, sonuç olarak motorların daha uzun süre ve daha yüksek hızlarda çalışmasını sağlar. Senkron motorlar ayrıca daha kompakt bir boyuta sahip olabilir ve daha yüksek hızlara ulaşabilir. Bunun yanında, bu motorlar yapısı gereği daha yüksek torka sahiptirler.

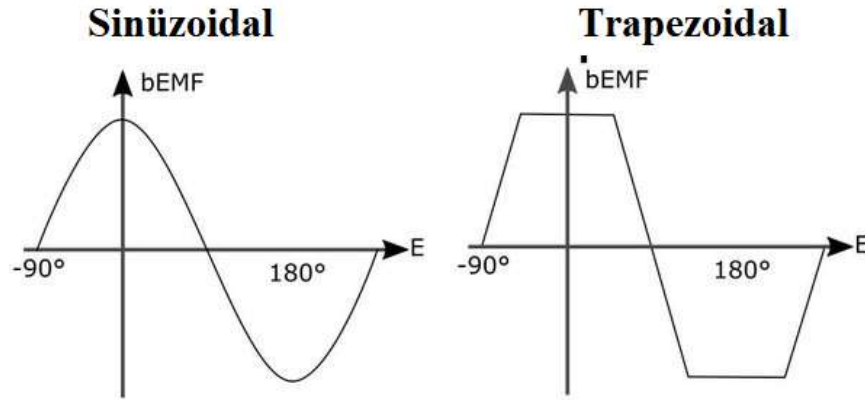
Bununla birlikte, Senkron motorlar çoğunlukla daha karmaşık bir kontrol devresine ihtiyaç duyar ve daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir. Ancak, daha az bakım gerektirdikleri ve genellikle daha uzun ömürlü oldukları için, yaşam döngüsü boyunca daha düşük toplam sahip olma maliyetine sahip olarak ekosisteme olumlu katkı sağlarlar.

. Güç elektroniğinin gelişmesiyle zor olan kontrol metotları artık erişilebilir hale gelmiştir. Bu nedenle, birçok modern uygulamada Senkron motorlar, Asenkron motorların yerini almaktadır. Özetle, Asenkron motorlara göre Senkron motorlar, enerji verimliliği, tork, hız ve kontrol kolaylığı gibi birçok alanda üstün performans sağlar.

1.2.2. BLDC ve PMSM motorların özellikleri ve karşılaştırılması

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları ve Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM) genellikle birbirine çok yakın motorlardır. Çünkü her iki motor tipi de daimî mıknatıslar ile güçlendirilir ve benzer özelliklere sahiptirler. Ancak, elektriksel ve mekaniksel yapısı, kontrol stratejisi ve performans karakteristikleri açısından önemli farklılıklar vardır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar generatör modunda çalıştığında trapezoidal zıt emk sinyalleri üretirler. Sargı yapısı ve mıknatıs yerleşimi gibi tasarımsal sebeplerden dolayı motorun köşeli bir grafiğe sahip akıma ihtiyaç duyduğunu anlayabiliriz (Şekil 1.3.). Altı adet durdurma ve başlatma anahtarı tarafından kontrol edilir. Bu, tipik olarak genişletilmiş bir mikrodenetleyici, konum bilgisi ve bir sürüş algoritması gerektirir. Trapezoidal bir zıt emk profili, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının daha yüksek hızlara ulaşmasını sağlar ancak bu, motorun genellikle daha yüksek gürültü ve titreşim seviyelerine sahip olması anlamına gelir. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları ayrıca, Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlara (PMSM) kıyasla sürme sinyallerinden ötürü biraz daha düşük torka sahip olacaktır.



Şekil 1.3. Sinüzoidal ve trapezoidal zıt emk sinyali.

Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (PMSM) ise generatör modunda çalıştırıldığında sinüzoidal bir zıt emk profili oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum da yine motorun sargı ve mıknatıs yerleşiminden dolayı oluşur ve sinüzoidal bir akıma ihtiyaç duyduğu anlamına gelir. Dijital sistemlerle sinüs sinyali oluşturmak daha karmaşık bir sürücü elektroniği gerektirir. Bununla birlikte, sinüzoidal bir zıt emk profili Daimi Mıknatıslı Senkron Motorların (PMSM) yapısından dolayı daha düşük gürültü ve titreşim seviyelerine sahip olması ve daha yüksek tork sağlaması anlamına gelir. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorları (PMSM) Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarına göre daha karmaşık bir kontrol algoritması, yüksek matematik bilgisi ve yazılım bilgisi gerektirir.

Her iki motor tipinin de kendine özgü kontrol stratejileri vardır. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının kontrolü, bir altı adımlı(6-Step) komütasyon stratejisi gerektirir. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM) ise vektör kontrolü veya alan yönlendirmesi olarak adlandırılan daha karmaşık bir kontrol stratejisi gerektirir. Bu, genellikle daha karmaşık bir sürücü elektroniği ve daha yüksek bir başlangıç maliyeti gerektirir. Ancak, bu kontrol stratejisi zorlukların sonucunda daha iyi tork kontrolü ve daha yüksek verimlilik sağlar. Aralarındaki en büyük farklardan birisi Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarda aynı anda en fazla iki faz enerjilendirilirken Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlarda (PMSM) aynı anda üç fazda da enerji olabilir.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, basit, düşük maliyetli uygulamalar için tercih edilir. Bu, tipik olarak taşınabilir araçlar, ev aletleri ve daha düşük tork gereksinimlerine sahip diğer uygulamaları içerir.

Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM), genellikle daha karmaşık ve yüksek tork gereksinimlerine sahip uygulamalar için tercih edilir. Bu, tipik olarak elektrikli

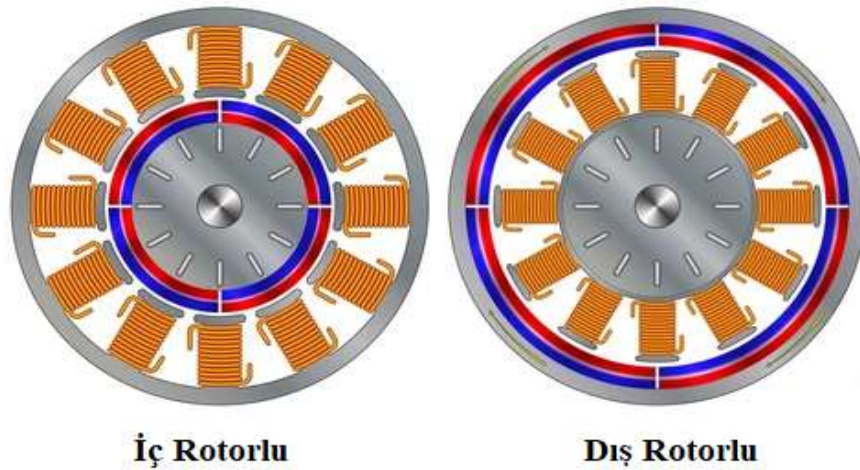
otomobiller, endüstriyel robotlar, asansörler ve diğer yüksek tork gereksinimlerine sahip diğer uygulamaları içerir.

Bu çalışmanın en can alıcı noktalarından birisi bu iki motor arasındaki farkların incelenmesidir. Benzer yapıları ve bilgi kirlilikleri sebebiyle sıklıkla karıştırılırlar. Motoru tanımak kontrol etmek için en önemli gereksinimdir. Örneğin bir Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunu Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM) için tasarlanmış bir sürücüyle kontrol etmeniz mümkündür. Her ne kadar kontrol ediliyormuş gibi görünse de motor kapasitesi olan tork ve güç değerlerini veremez. Tam tersi durumda da sonuç aynı olacaktır.

Sonuç olarak, Fırçasız Doğru Akımı (BLDC) motorları ve Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM) arasındaki seçim, özel uygulamanın gereksinimlerine ve maliyetlere bağlıdır. Her iki motor tipinin de kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve en iyi seçim, uygulamanın özel gereksinimlerine bağlı olacaktır.

1.3. BLDC Motor Tiplerinin Rotor ve Stator Tasarımlarına Göre İncelenmesi

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, uygulamalarının çeşitliliğini yansıtan bir dizi tasarıma sahiptir. Bu motorların performansı, özellikleri ve işlevselliği, önemli ölçüde rotor ve stator bileşenlerinin fiziksel konumlandırılmasına bağlıdır. İki temel konfigürasyon, iç rotorlu ve dış rotorlu tasarımlardır.



Şekil 1.4. İç ve dış rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru

1.3.1. İç rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları

İç rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar, rotor bileşeninin motorun geometrik merkezinde konumlandırıldığı bir tasarıma sahiptir. Bu durum rotorun döndürülmesiyle ortaya çıkan termal enerjinin etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Motorun merkezinde bulunan rotor, genel termal yönetimi kolaylaştırır ve rotorun dönmesiyle oluşan ısıyı hızla dağıtabilir. Sonuç olarak, iç rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, yüksek hızlı uygulamalarda üstün performans gösterirler.

Bu tasarımın bir diğer önemli avantajı da atalet momentinin azalmasıdır. Rotorun merkezi konumu, motorun hızlandırılması ve yavaşlatılması süreçlerinde daha hızlı yanıt verme yeteneği sağlar. Bu durum iç rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları yüksek hızlı uygulamalar için ideal bir seçim haline getirir.

1.3.2. Dış rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları

Dış rotorlu Fırçasız Doğru Akımı (BLDC) motorları, rotor bileşeninin motorun dış kabuğunda konumlandırıldığı ve statorun merkezi konumlandırıldığı yani tam tersi bir yapıya sahiptir. Bu tasarım, rotorun çapını artırır, sonucunda da tork üretim kapasitesini artırır (Şekil 1.4.). Genişletilmiş rotor yüzeyi, bu motor türünün düşük hızlı, yüksek tork gerektiren uygulamalar için mükemmel bir seçenek olmasını sağlar.

Ancak, dış rotorlu motorlar, iç rotorlu muadillerine kıyasla termal yönetim açısından daha fazla zorluk sunabilir. Rotorun dış konumu ısının stator bileşenine ve sonuç olarak motor gövdesine iletilmesini zorlaştırır. Bu, daha karmaşık bir termal yönetim stratejisi gerektirebilir.

1.3.2.1 HUB BLDC motorlar

HUB motorlar, dış rotorlu Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların belirli bir alt sınıfını oluşturur. Bu motorlar, tekerlek içinde doğrudan tahrik unsuru olarak yerleştirilen rotor bileşenine sahiptirler (Şekil 1.5.). Bahsedilen yapı güç aktarma organlarına (şanzıman, diferansiyel vb.) olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve böylece araç uygulamalarında mekanik kayıpları büyük ölçüde elimine ederek verimliliği artırır.

HUB motorlar, genellikle elektrikli araçlar ve hafif elektrikli araçlar gibi hareketlilik uygulamalarında kullanılır. Bu tür motorların etkinliği, hızlı yanıt süresi ve yüksek tork üretimi nedeniyle, dış rotorlu motorların etkinliğini artırmada özellikle etkilidirler. Bununla birlikte, termal yönetim ve hizmete alınabilirlik gibi bazı zorluklarla

karşılaşabilirler. Tıpkı araçların fren disklerinde olduğu gibi havayı kanalize ederek etkin bir soğutmaya ihtiyaç duyabilirler.

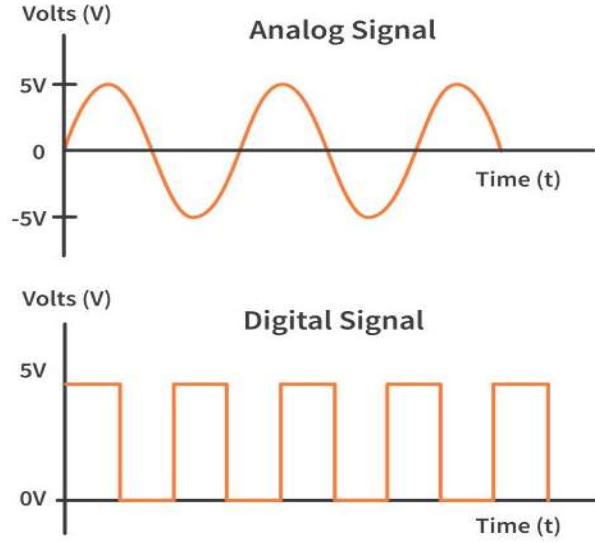


Şekil 1.5. HUB motor fotoğrafı

Her iki Fırçasız Doğru Akımı (BLDC) motoru tipi de iç rotorlu veya dış rotorlu olsun, farklı uygulama gereksinimlerini karşılamak için birbirinden farklı avantajlara sahiptir. İç rotorlu motorlar, hızlı yanıt süreleri ve etkin termal yönetimleri ile genellikle yüksek hızlı, yüksek dinamik uygulamalarda kullanılırken, dış rotorlu motorlar, geniş rotor yüzeyleri ve yüksek tork üretim yetenekleri nedeniyle düşük hızlı, yüksek tork gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. HUB motorlar, özellikle elektrikli araçlarda kullanılan dış rotorlu motorların belirli bir alt sınıfıdır ve burada daha yüksek mekanik verimlilik elde etmek için kullanılırlar. İdeal motor seçimi, uygulamanın spesifik gereksinimlerine bağlı olacaktır. Sonuç her ne olursa olsun bu tip motorların avantajları eski tip motorları saf dışı bırakmaktadır.

1.4. Kontrol ve Sürüş Stratejileri

Hız kontrolü cihazları istenen hız bilgisinin girdi olarak farklı yollardan sürücüyeye iletilmesi ve sürücünün gerekli çıkış sinyallerini ayarlayarak motoru hedef hıza ayarlaması esasına dayanır. Bu stratejiler aşağıda işlenmiştir.



Şekil 1.6. Dijital analog sinyal grafikleri.

1.4.1. Dijital kontrol stratejileri

Dijital kontrol stratejileri, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların kontrolünde vazgeçilmez bir rol oynar. Bu yaklaşımda, motorun hızı giriş sinyalleriyle doğru veya ters orantılı olarak ayarlanabilir. Bir kontrolör, çeşitli dijital sinyal formatlarını kullanabilir ve bu sinyaller genellikle bir mikroişlemci veya dijital sinyal işlemci tarafından üretilir. Dijital kontrol stratejileri, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlar, bu da bu teknolojinin belirlenen hız, konum ve tork kontrolü için özellikle uygulanabilir olduğunu gösterir. Örneğin asansörlerde kullanılan hız kontrolleri dijital sinyaller vasıtasıyla belirli referans hız değerlerinde çalışır. Bunlar kısaca revizyon hızı, ara hız, yüksek hız, düşük hız gibi ayarlanabilir referans hızlardır. Seçeneğin artırılması çözünürlüğü artırarak konforu artırmakta etkili bir faktör olacaktır.

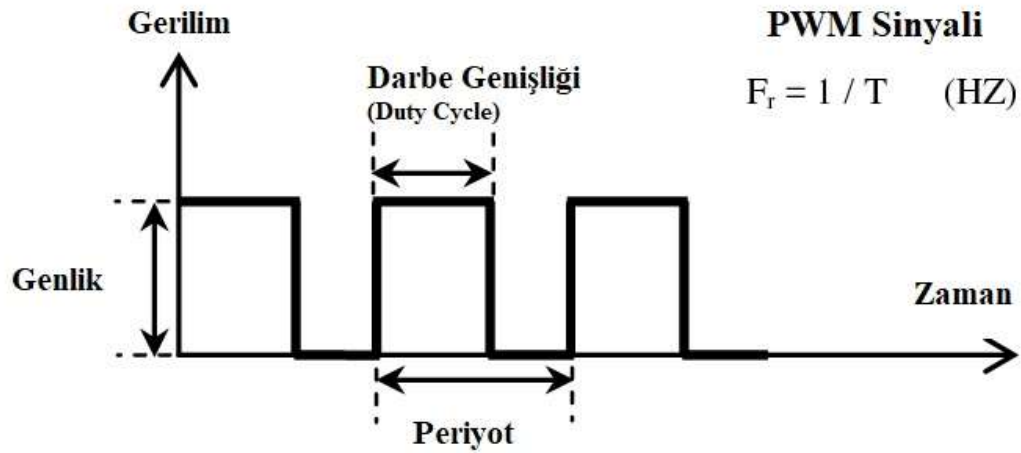
1.4.2. Analog kontrol stratejileri

Analog kontrol stratejileri, genellikle hızı kontrol etmek için belirli bir gerilim aralığını (0-10V veya 0-5V) kullanan eski kontrol sistemlerinde daha yaygın olmuştur. Analog kontrol teknikleri, kontrol sinyali ve çıkış arasında doğrudan bir ilişki sağlar. Bununla birlikte, analog sistemler çevresel gürültülerden etkilenmeye dijital sistemlere kıyasla daha açıktır. Ayrıca daha yüksek bir çözünürlük sağlaması açısından konforu artırır. Analog sistemde oluşacak parazitleri engellemek ve yüksek gerilimle çalışan sistemlerde sistemin analog sinyallerini güç kısmından izole etmek önemlidir. Uygun

şekilde filtrelenmiş ve kitaba uygun oluşturulmuş bir analog kontrol sistemi kendinden beklenen eylemleri başarılı bir şekilde yerine getirebilir.

1.4.3. PWM ile hız kontrolü

PWM (Pulse Width Modulation) ile hız kontrolü hem analog hem de dijital kontrol tekniklerinde hızı kontrol etmek için kullanılan bir çıkış sinyalidir. PWM teknikleri, bir kontrol sinyalinin genlik yerine genişliğini değiştirerek bir motorun hızını kontrol eder. Bu, bir motorun hızını hassas bir şekilde kontrol etmek için kullanılır.



Şekil 1.7. PWM sinyalinin grafiği

PWM sinyallerinin hız kontrolüne etkisi motor sürücülerinde bulunan anahtarlama elemanlarını yüksek hızlarda açıp kapama stratejisine dayanır. Bu gönderilen sinyal darbesinin genişliğine göre hız kontrol edilir. PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyali adını buradan alır. Darbe genişliği (duty cycle), çıkış geriliminin etkin değerini kontrol eder (Şekil 1.7.). Yani, bir PWM sinyali, dijital veya analog bir giriş sinyaline bağlı olarak, farklı hızlarda çalışan bir motorun hızını kontrol etmek için kullanılmalıdır.

PWM kontrol stratejisi, ayrıca bir rampalama fonksiyonu kullanarak hız isteğini gecikmeli olarak PWM çıkışına aktarabilir. Bu, motorun hızını aniden değiştirmek yerine, belirli bir süre boyunca hızı artırarak veya azaltarak motorun daha yumuşak bir şekilde başlamasını ve durmasını sağlar. Bu, motor üzerindeki ani yük değişimlerini ve potansiyel zararları azaltabilir. Hız tepkisinin ani olması istenen durumlarda ise kullanılan

kontrolcünün tepki hızına göre minimum gecikmeyle sistem cevabı sağlanabilir. Bu uygulamaya ve gereksinimlere göre optimize edilmesi gereken bir opsiyondur.

Yukarıda belirtilen kontrol stratejileri, farklı uygulama gereksinimlerine göre farklı avantajlar ve dezavantajlar sunar. Bu nedenle, belirli bir uygulama için en uygun kontrol stratejisini seçmek, çeşitli faktörlere, özellikle motor tipine, kontrol hassasiyetine, maliyetlere ve sistem karmaşıklığına bağlıdır.

1.5. Sensörlü ve Sensörsüz Sürüş Tekniklerinin Karşılaştırılması

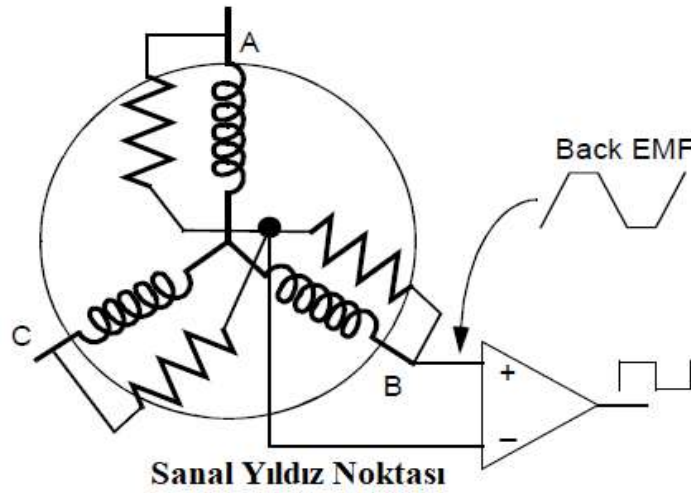
Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların kontrolünde, rotor pozisyonunun ve stator akımının senkronize edilmesi gerekmektedir. Bu senkronizasyon, motorun sabit bir moment üretebilmesi için elzemdir. Bu bağlamda, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun kontrolünde rotor pozisyon bilgisinin temel öneme sahip olduğunu görürüz.

Pozisyon bilgisini elde etmek için genellikle Hall effect tabanlı pozisyon sensörleri kullanılır. Daha yüksek çözünürlüğe ve performansa ihtiyaç duyan durumlarda ise, optik enkoderler veya resolverler tercih edilebilir. Ancak mekanik pozisyon sensörleri bazı sorunlara yol açabilir. Bunlar; yüksek maliyet, zorlu çevre koşullarında azalan güvenilirlik ve motor içinde ya da çevresinde ilave alan rezerve etmek ve bunun oluşturduğu tasarım ve üretim zorlukları gibi sorunlardır.

Bu tür sorunlar, sensörsüz kontrol tekniklerinin geliştirilmesini gerektirse de bu tekniklerin de kendi zorlukları vardır. Sensörsüz kontrol teknikleri temelde zıt emk tabanlı yöntemler, akı tahmin yöntemleri ve diğer özel yöntemler olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır. Ancak, sensörsüz kontrol tekniklerinin de tork dalgalılığı ve tork düşüklüğü gibi problemleri olabilir.

1.5.1. Sensörsüz sürüş teknikleri

Sensörsüz sürüş teknikleri, rotorun pozisyon ve hız bilgisini doğrudan motorun elektriksel parametrelerinden, genellikle gerilim ve akım ölçümlerinden elde eder. Sensörsüz sürüş tekniklerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem, rotorun zıt emk sinyalini (elektromotor kuvvetinin) takip edilmesidir. Bu teknik, genellikle sensörsüz kontrol yöntemlerinin en yaygınıdır ve motorun konumunu ve hızını tahmin etmekte oldukça etkilidir. Sanal bir yıldız noktası oluşturulup bu nokta üzerinden sinyaller mikrodenetleyiciye iletilir (Şekil 1.8.). Mikrodenetleyici motorun konumunu gelen trapez sinyallerin durumundan analiz eder. Her ne kadar üretimde kolaylık sağlasa da kalkışta tork gerektiren uygulamalarda bazen kararsızlığa neden olabilir.



Şekil 1.8. Sensörsüz sürüş sanal yıldız noktası .

Sensörsüz kontrol tekniklerinin başlıca avantajlarından biri, mekanik sensörlerin gereksinimini ortadan kaldırarak motor tasarımını ve uygulamalarını daha basit ve daha dayanıklı hale getirmesidir. Ancak, motor hızının düşük olduğu durumlarda veya motor durma noktasında, zıt emk tabanlı yöntemler genellikle başarısız olur. Bu durum bu kontrol yönteminin en zayıf noktalarından birisidir.

Sensörsüz kontrol, motorun mekanik yapısını basitleştirebilir ve maliyetleri düşürebilir, ancak tork dalgalılığına olur. Bu, motorun istenmeyen titreşimler yapmasına ve genel performansında düşüğe sebep olabilir. Ayrıca, sensörsüz kontrol teknikleri genellikle torkun düşük hızlarda azalmasına sebep olur. Bu durum, düşük hızlarda hassas kontrol gerektiren uygulamalar için büyük bir dezavantaj olabilir.

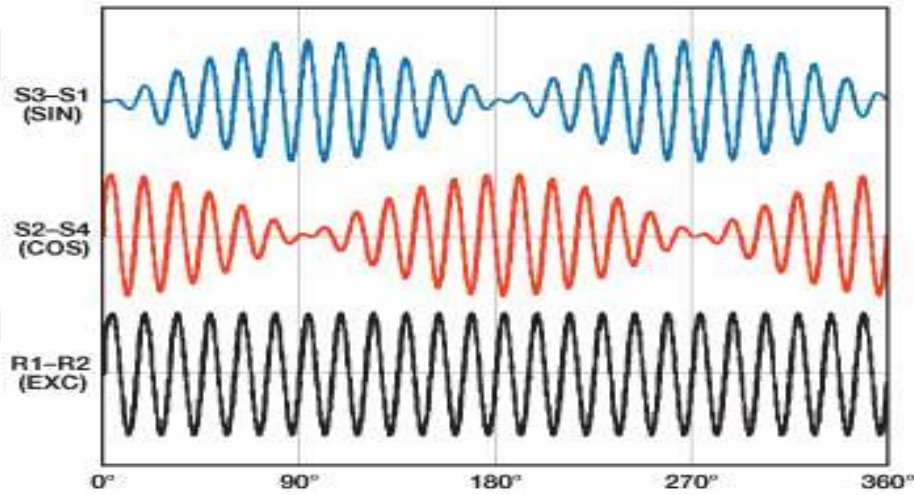
Bu noktada, Hall effect pozisyon sensörleri, bu tür sorunları önleme kapasitesine sahip oldukları için önem kazanır. Sonuç olarak, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının kontrolünde en uygun çözüm, belirlenen gereksinimler ve kısıtlamalar doğrultusunda seçilmeli ve her iki teknolojinin de avantajları ve dezavantajları dikkatlice değerlendirilmelidir.

1.5.2. Enkoderli sürüş teknikleri

Enkoderli sürüş teknikleri, rotorun mekanik pozisyonunu direkt olarak ölçmek için bir enkoder kullanır. En yaygın kullanılan enkoder türleri, sin-cos enkoderler, resolverler ve EnDat enkoderlerdir (Şekil 1.9). Enkoderler, yüksek pozisyon hassasiyeti

sağlar ve genellikle yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilir. Enkoderden alınan bilgiler Clarke-Park dönüşümleri gibi matematiksel işlemlerden geçirildikten sonra motorun konumu tespit edilir. Bunlar mutlak enkoderlerdir ve tam konum bilgisi elde edilir.

Encoder tabanlı kontrol yöntemlerinin dezavantajları arasında ek maliyet, artan karmaşıklık ve mekanik aşınma bulunmaktadır. Ancak, enkoderlerin sağladığı yüksek hassasiyet ve güvenilirlik, bu dezavantajları gölgede bırakabilir, özellikle de servo kontrolü gibi hassas pozisyon kontrolünün kritik olduğu uygulamalar söz konusu olduğu ve maliyetin daha az önemli olduğu durumlarda enkoderli kontrol kaçınılmazdır.



Şekil 1.9 Resolver tipi kodlayıcının çıkış sinyalleri.

1.5.3. Hall effect sensörlü sürüş teknikleri

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları genelde rotorun konumunu belirlemek için Hall effect sensörler kullanılır. Hall effect tabanlı sensörler, entegre ve silisyum temelli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Entegre sensörlerde, elektronik arabirim devresi, silisyum sensörle aynı tabakada üretilmiştir. Bu entegre devre, Hall effect sensörünün zayıf çıkışını az kayıpla alır ve dijital bir çıktı sağlar. Ayrıca devre bir eşik değeri içerir; uygulanan manyetik alan, bu eşik değerinin altında ise çıkış düşük seviyede, eşik değerinin üstünde ise çıkış yüksek seviyede olur.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların kontrolü için üç Hall effect sensörü kullanılır ve bu sensörler, rotorun çevresinde birbirlerine göre elektriksel olarak 120 derece açıyla yerleştirilirler. Bu açının mekanik değil elektriksel olduğunu belirtmek önemlidir çünkü burada bahsedilen, fazın elektriksel döngüsüdür. Bu düzenleme, rotorun

tam bir dönüşü boyunca altı farklı pozisyonun tespit edilmesini sağlar ve bu da motor kontrolünün hassasiyetini artırır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların işleyişi, stator sargılarına uygulanan voltaj sekansına dayanır. Bu voltaj sekansı, stator sargılarının kutuplarının dönen mıknatıs alanıyla senkronizasyonunu sağlar. Bu sekansın belirlenmesinde, stator sargılarının (N) ve kutup sayısının (P) göz önünde bulundurulması esastır.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar, üç fazlıdır ve daha önce de bahsedildiği gibi aynı anda en fazla iki faz enerjilendirilir. Bu durumda, bir döngü (elektriksel 360 derece), sargıların enerjilendirilme sürecini ifade eder ve altı adımda tamamlanır (her biri elektriksel 60 derece). Bu açının mekanik açı ile orantısı motorun kutup ve sargı sayısı ile orantılıdır.

Motorun kutup sayısı, statora bağlı her bir bobin çifti için iki olacak şekildedir. Bu nedenle, bir Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun bir adımının açısı genellikle bobin sayısının (N) ve kutup sayısının (P) en küçük ortak katının (ekok) 360'a bölünmesi ile hesaplanır:

$$\text{Adım açısı} = 360/\text{ekok}(N, P).$$

Mekanik açı ve elektriksel açı arasındaki farkın iyi anlaşılması önemlidir ve Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların çalışmasını anlamak için bu ayrımın farkında olunması gerekmektedir. Mekanik açı, motorun rotorunun fiziksel dönüşünü temsil ederken, elektriksel açı, stator sargılarında akımın dögüsel değişimini temsil eder.

Her bir Hall effect sensörü, rotorun belirli bir pozisyonuna karşılık gelen spesifik bir çıkış sinyali üretir. Kontrol sistemi bu sinyalleri analiz eder ve bu bilgilerden motorun tam konumunu ve hızını hesaplar.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde, Hall effect sensörlü kontrol, motorun rotor konumunu belirlemek için Hall effect sensörlerinin kullanıldığı bir yöntemdir. Bu kontrol yönteminde, motorun doğru şekilde dönmesi ve istenen hız ve tork değerlerine ulaşması için uygun zamanlarda doğru sargıları etkinleştirmek ve devre akımlarını kontrol etmek önemlidir. Bu doğru zamanda doğru fazları etkinleştirmekle ilgili yöntem 6 adımdan oluştuğundan 6-Step adı verilmiştir.

6-Step yöntemi, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorun üç fazlı sargılarını sırayla ve dönüşümlü olarak etkinleştirerek motorun dönmesini sağlayan bir kontrol stratejisidir.

İşlem adımı, motorun rotorunun konumunu takip eden Hall effect sensörlerinin sinyallerine dayanır.

İşleyiş adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Hall effect sensörlerinden gelen sinyallere göre, motorun başlangıç konumu belirlenir. Bu başlangıç konumu, uygun sargıların etkinleştirilmesi için referans olarak kullanılır.

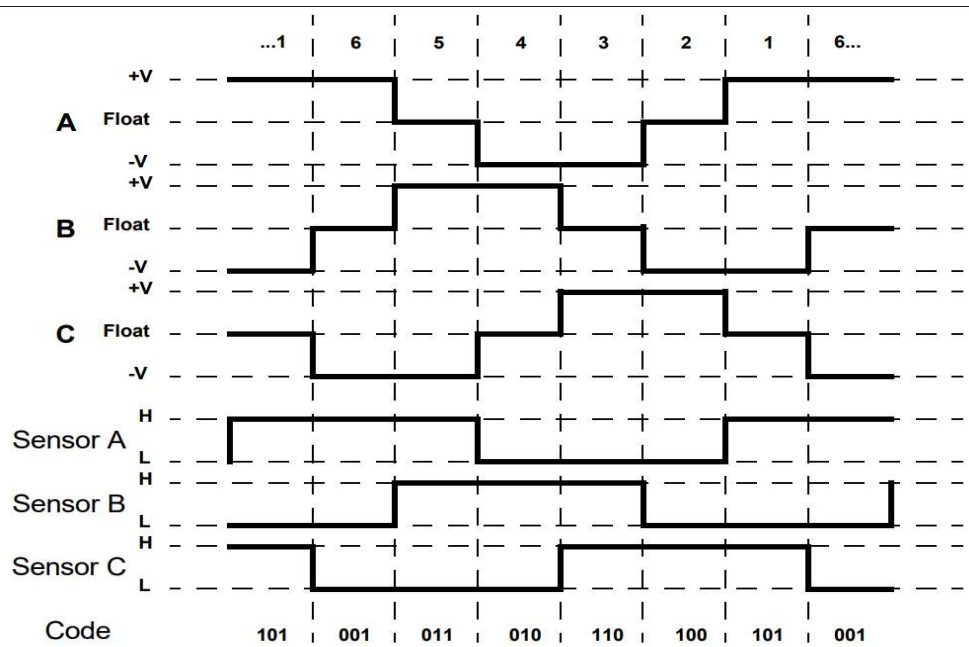
Adım 2: Başlangıç konumu referans alınarak, uygun sargılar etkinleştirilir. Bu adımda, bir faz etkinleştirilirken diğer iki faz devre dışı bırakılır.

Adım 3: Motorun rotoru, etkinleştirilen fazın manyetik alan etkisiyle bir sonraki pozisyona doğru döner. Hall effect sensörleri, rotorun bu yeni konumunu algılar.

Adım 4: Rotorun yeni konumu temel alınarak, uygun sargılar etkinleştirilir. Bu adımda, bir önceki faz devre dışı bırakılır ve diğer iki faz etkin hale getirilir.

Adım 5: Motorun rotoru, etkinleştirilen yeni fazın manyetik alan etkisiyle bir sonraki pozisyona doğru döner. Hall effect sensörleri, rotorun bu yeni konumunu algılar.

Adım 6: Rotorun yeni konumu temel alınarak, uygun sargılar etkinleştirilir. Bu adımda, bir önceki faz devre dışı bırakılır ve diğer iki faz etkin hale getirilir.



Şekil 1.10. Hall effect sensörlerinin pozisyonuna göre anahtarlama sinyallerinin durumu.

Bu altı adım, sürekli olarak tekrarlanarak motorun dönmesin devamlılığı sağlanır. 6-Step yöntemi, Hall effect sensörlerinin rotor konumunu algılamasına dayandığı için motorun doğru şekilde dönmesini ve istenen hız ve tork değerlerine ulaşmasını sağlar.

Bu yöntem, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların kontrolünde genellikle kullanılan ve yaygın olarak kabul edilen bir stratejidir. Hall effect sensörleri ile rotor konumunun izlenmesi, doğru sargıların etkinleştirilmesi ve devre akımlarının kontrolü ile birlikte motorun verimli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlar. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde Hall effect etkili kontrolde 6-Step yöntemi, motorun kontrolünde doğruluk, güvenilirlik ve performans sağlamak için bilimsel bir temele dayanan etkili bir yöntemdir.

Bu sistem, her bir fazın motorun tam bir devir boyunca doğru zamanlamasını sağlar, böylece Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmasını garanti eder. Hall effect sensörlerinin nispeten düşük maliyeti ve kolay kullanılabilirliği, onları geniş bir uygulama yelpazesinde popüler hale getirir.

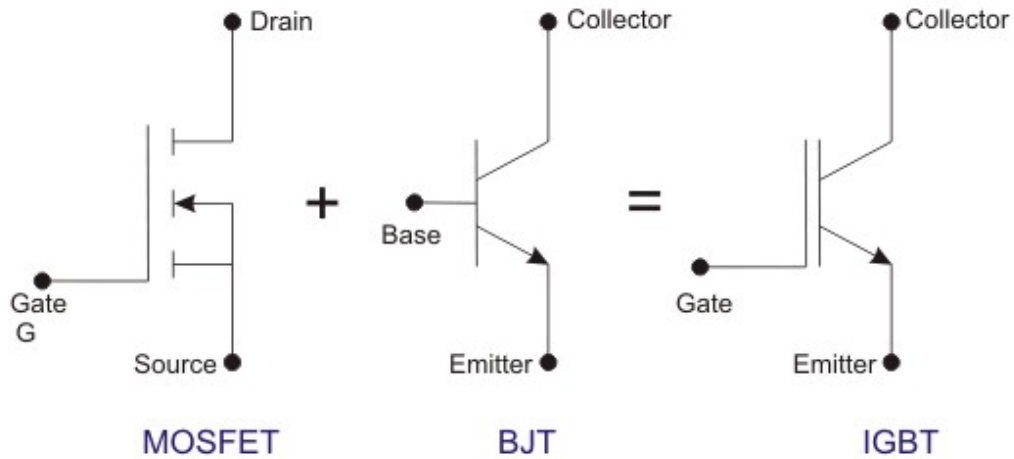
1.6. Güç Kontrol Elemanları ve Teknolojileri

Güç kontrol elemanları, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde motorun güçlendirilmesi ve kontrol edilmesi için kullanılan temel bileşenlerdir. Bu elemanlar arasında yaygın olarak kullanılan bazıları şunlardır: transistörler, MOSFET (Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistör), IGBT (İzole Kapılı Bipolar Transistör) ve OFBT (Optik Fiber Bağlantılı Transistör).

Transistörler, yüksek güç uygulamalarında DC akımının kontrol edilmesi için kullanılan yarıiletken cihazlardır. DC motor sürücülerinde güç kontrolü için NPN ve PNP tipi bipolar transistörler veya MOSFET gibi alan etkili transistörler tercih edilir. Transistörler, yüksek anahtarlama hızı ve düşük geçiş kaybı avantajlarına sahiptir.

MOSFET'ler, yüksek hızlı anahtarlama ve düşük güç kaybı sağlamak üzere tasarlanmış olan alan etkili transistörlerdir. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde güç kontrol elemanı olarak sıklıkla kullanılırlar. MOSFET'ler, ihmal edilen seviyelerde düşük giriş akımı gerektirir ve yüksek enerji verimliliği sağlar.

IGBT'ler, MOSFET ve bipolar transistörün birleşimi olan bir güç yarıiletken cihazdır. Yüksek gerilim ve yüksek akım uygulamalarında kullanılır. IGBT'ler, yüksek anahtarlama hızı ve düşük geçiş kaybı avantajlarına sahiptir (Şekil 1.11). Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde güç kontrol elemanı olarak kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.11. MOSFET BJT ve IGBT sembolleri

OFBT'ler, güç anahtarlama için optik fiber ile kontrol sinyallerinin iletimini sağlayan bir güç kontrol elemanıdır. Yüksek gerilim ve yüksek akım uygulamalarında kullanılır. OFBT'ler, yalıtımlı sürücü ve güvenlik avantajları sunar. İzolasyon gerektiren durumlarda tercih edilebilirler.

Bu güç kontrol elemanları, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor sürücülerinde motorun güçlendirilmesi ve kontrol edilmesi için temel bileşenler olarak kullanılmaktadır. Seçim, uygulama gereksinimleri ve performans hedefleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Her bir elemanın farklı özellikleri ve avantajları vardır ve bilimsel bir perspektifle ele alındığında, bu elemanlar motor sürücülerinin güç verimliliği, performansı ve güvenilirliği üzerinde önemli etkilere sahiptir.

1.6.1. MOSFET

Metal-Oksit-Yarıiletken Alan-Etkili-Transistör (MOSFET), diğer transistör türlerine kıyasla daha yüksek anahtarlama hızları ve daha düşük çıkış kapasitanslarına sahiptir. Bu, yüksek frekanslı uygulamalar için idealdir. Düşük dirençli kanalları sayesinde, güç kayıpları düşer ve bununla birlikte daha verimli bir enerji dönüşümüne izin verir. Bununla birlikte, gerilim derecelendirmeleri özel durumlar hariç diğer transistör türlerine göre daha düşüktür.

1.6.2. Discrete IGBT

Bipolar bir transistör ve MOSFET'in birleşimini temsil eden İzole Kapılı Bipolar Transistörler (IGBT), yüksek akım ve yüksek gerilim kapasitelerine sahip olabilirler. MOSFET'lerden farklı olarak, IGBT'ler daha yüksek gerilimler için derecelendirilmiştir ve bu, onları daha büyük enerji uygulamaları için ideal hale getirir. Ancak, bu üstün gerilim yetenekleri, daha yüksek dirence ve daha düşük anahtarlama hızlarına mal olur.

1.6.3. IGBT blok

IGBT blokları, yüksek akımlı uygulamalar için vezgeçilmezdir. Discrete IGBT den farkı birden çok IGBT'nin paketlenmiş bir biçimidir. IGBT blokları, birden fazla IGBT'nin akım kapasitesini ve genel performansını artırmak için bir araya getirilmiştir. Ancak, maliyet ve karmaşıklık bakımından genellikle daha yüksek olan bu sistemler, ayrıca ısı dağılımını da yönetmek zorundadır. Kendi içerisinde dahili koruma veya akım takipçisi gibi sistemler bulundurmadığından anahtarlama sinyalleri verilirken dikkatli olunması önemlidir. Araştırma ve geliştirme çalışmaları esnasında çakışan sinyallerin ortaya çıkma ihtimali yüksek olduğundan özellikle bu aşamada dikkatli davranılır. Görece yüksek güçler altında çalıştığı için patlaması gibi sonuçlarda ortaya çıkacak zarara karşı önlem alınmalıdır.

1.6.4. IPM (Akıllı Güç Modülleri)

Akıllı Güç Modülleri (IPM), genellikle bir IGBT ve MOSFET dahil olmak üzere bir grup güç yarıiletkenini, ayrıca genellikle bir sürücü devresi, koruma devresi ve diğer işlevsel bileşenleri entegre eden bir çözümdür. Bu modüller, bir dizi çeşitli avantaj sunar. İlk olarak, kompakt boyutları sayesinde hem yer hem de karmaşıklığı azaltırken bunun yanında sistem tasarımını hızlandırabilirler. İkincisi, entegre koruma ve kontrol devreleri çok daha güvenli ve daha güvenilir bir işlem sağlar. Üçüncüsü, Akıllı Güç Modülleri (IPM) daha hızlı ve daha hassas bir kontrol sağlar. Bu nedenle, Akıllı Güç Modülleri (IPM) yüksek performans, güvenlik ve karmaşıklığın azaltılması gereksinimlerini karşılamak için birçok modern güç elektroniği uygulamasında tercih edilir.

Akıllı Güç Modülleri (IPM), sıkı bir koruma devresine sahiptir ve bu devreler, bileşenlerin işlem sırasında güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar.

Aşağıda Akıllı Güç Modüllerindeki (IPM) tipik koruma devreleri hakkında daha fazla bilgi verilmiştir:

- **Aşırı Akım Koruması:** Bu koruma devresi, akımın belirlenen sınırın üzerine çıkmasını önlemek için tasarlanmıştır. Aşırı akım, bileşenlerin zarar görmesine veya ısınmasına neden olabilir, bu da devre üzerinde potansiyel bir hasara neden olabilir. Aşırı akım koruma devresi, belirlenen sınırın üzerinde bir akımı tespit eder etmez devreyi keser veya sınırlar.
- **Aşırı Gerilim Koruması:** Bu koruma devresi, devre üzerindeki voltajın belirlenen sınırın üzerine çıkmasını önlemek için tasarlanmıştır. Aşırı voltaj, devrenin veya bileşenlerin zarar görmesine neden olabilir. Aşırı voltaj koruma devresi, belirlenen sınırın üzerinde bir voltajı tespit eder etmez devreyi keser veya sınırlar.
- **Aşırı Sıcaklık Koruması:** Bu koruma devresi, bileşenlerin sıcaklığının belirlenen sınırın üzerine çıkmasını önlemek için tasarlanmıştır. Aşırı sıcaklık, bileşenlerin ömrünün azalmasına veya hatta zarar görmesine neden olabilir. Aşırı sıcaklık koruma devresi, belirlenen sınırın üzerinde bir sıcaklık tespit ettiğinde devreyi keser veya sınırlar.
- **Kısa Devre Koruması:** Bu koruma devresi, bir kısa devre durumunda bileşenleri ve devreyi korur. Kısa devre, bileşenler üzerinde büyük bir akımın aniden akmasına ve potansiyel olarak hasara neden olabilir. Kısa devre koruma devresi, bir kısa devre tespit ettiğinde devreyi hemen keser.

Yukarıdaki koruma devreleri, her bir Akıllı Güç Modülünün (IPM) işlem sırasında güvenli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu, bileşenlerin ömrünün uzatılmasına ve genel sistem güvenilirliğinin artırılmasına yardımcı olur. Bu nedenle, Akıllı Güç Modülleri (IPM), yüksek güvenilirlik ve güvenlik gereksinimlerine sahip güç elektroniği uygulamaları için ideal bir seçimdir.

Buna ek olarak, Akıllı Güç Modülleri (IPM) genellikle yüksek hızlı ve düşük dirençli MOSFET'ler veya IGBT'ler kullanır, bu da daha yüksek verimlilik ve daha iyi sıcaklık performansı sağlar. Bu özellikler, Akıllı Güç Modüllerinin (IPM) daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını mümkün kılar, özellikle de alanında lider teknolojik uygulamalar ve enerji tasarrufu gerektiren durumlar için idealdirler.

Sonuç olarak, Akıllı Güç Modüllerinin (IPM) sunduğu entegrasyon seviyesi, koruma özellikleri ve performans, onları diğer güç kontrol elemanlarına kıyasla

yadsınamaz bir avantajla donatılmışlardır. Bu nedenle, çeşitli güç elektroniği uygulamalarında tercih edilen bir seçenek haline gelmişlerdir

1.7. PWM Sinyalinin Üretilmesi

PWM sinyalinin üretilmesi, güç elektroniği uygulamalarında çok yaygın bir ihtiyaçtır. PWM sinyalleri motor sürücülerinden anahtarlama güç kaynaklarına ve diğer benzer uygulamalara kadar çok çeşitli sistemlerde kullanılır. PWM sinyallerinin üretilmesi için genellikle üç farklı teknik kullanılır: Komparatör tabanlı teknikler, mikrodenetleyici tabanlı teknikler ve sayısal sinyal işleme tabanlı teknikler.

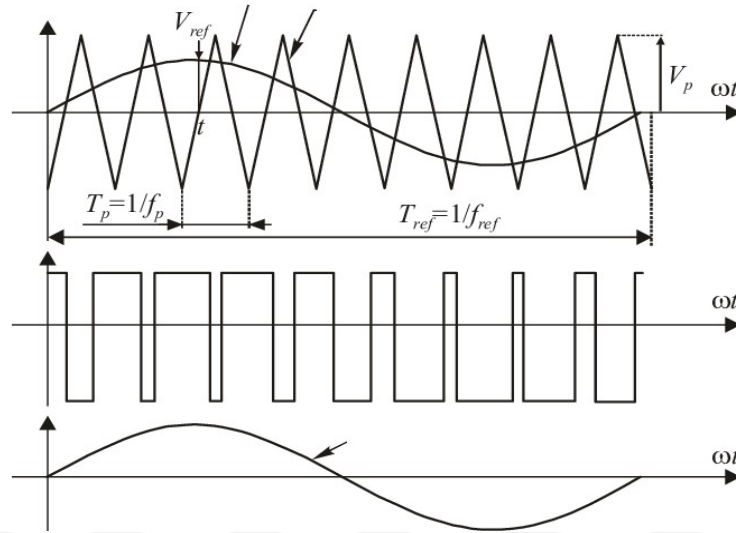
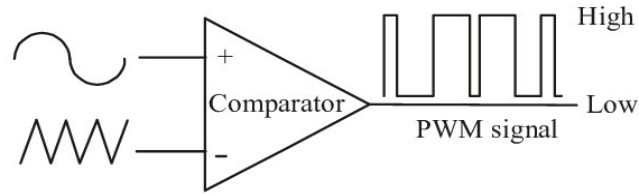
1.7.1. Komparatör temelli teknikler

Komparatör tabanlı teknikler bir op-amp (operasyonel amplifikatör) ve bir testere dişi osilatör kullanılarak PWM sinyalleri üretir. Bu teknik, testere dişi dalga formu ve bir kontrol sinyalini karşılaştırarak PWM sinyalini üretir (Şekil 1.12.).

Testere dişi dalga formu bir osilatör devresi tarafından üretilir ve bu dalganın sürekli olarak artan ve sonra ani bir şekilde düşen bir voltaj seviyesi vardır. Bu dalga formu, komparatör devresine beslenir.

Kontrol sinyali, bir DC voltaj kaynağından veya bir başka sinyal kaynağından alınır ve bu da komparatör devresine beslenir. Kontrol sinyali, PWM sinyalinin darbe genişliğini (duty cycle) kontrol eder.

Komparatör devresi, testere dişi dalga formu ve kontrol sinyalini karşılaştırır. Testere dişi dalga formunun voltajı kontrol sinyalinin voltajından yüksek olduğunda, komparatörün çıkışı yüksektir ve bunun sonucunda PWM sinyalinin bir darbesi üretilir. Testere dişi dalga formunun voltajı kontrol sinyalinin voltajından düşük olduğunda, komparatörün çıkışı düşer ve PWM darbesi sona erer.



Şekil 1.12. Komparatör yardımı ile üretilen PWM sinyali giriş çıkış grafikleri.

Bu teknik matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

- Testere dişi dalga formu:

$$V_t = V_{max} \cdot (t/T)$$

Burada V_t , testere dişi voltajı, V_{max} , testere dişi voltajının maksimum değeri, t , zaman ve T , testere dişi dalga formunun periyodudur.

- PWM sinyali:

$$PWM = (V_c > V_t)$$

Burada ise V_c , kontrol sinyali voltajı ve ">" büyüktür işlemidir. PWM sinyali, kontrol voltajı, testere dişi voltajından büyük olduğunda yüksektir ve aksi halde düşüktür.

Bu teknik eski ve kurulumu ve yürütmesi zor olduğundan günümüzde daha çok DSP veya mikrodenetleyici tabanlı sistemler yaygındır.

1.7.2. Sayısal sinyal işleme tabanlı teknikler

Sayısal sinyal işleme tabanlı teknikler bir sayısal sinyal işlemcisi (DSP) ile bir sayısal-analog dönüştürücü (DAC) kullanılarak PWM sinyalleri üretir. Bu teknik, bir yazılım algoritması kullanarak örneklenmiş bir kontrol sinyalini alır ve bir dizi sayısal işlem kullanarak bir PWM sinyali üretir. Bu teknik çok yüksek hızlı, hassas veya karmaşık kontrol uygulamalarında kullanılır. Maliyetleri ve kullanım zorluğu göz önüne alındığında standart endüstriyel kullanımlar için tercih edilmez.

1.7.3. Mikrodenetleyici tabanlı teknikler

Mikrodenetleyici tabanlı PWM üretimi, genellikle belirli donanım timerları ve kontrol yazılımları kullanılarak gerçekleştirilir. Mikrodenetleyici, zamanlayıcı sayacını kullanarak periyodik olarak bir kesme (interrupt) oluşturur ve bu kesme işleyicisi, çıkış pininin durumunu değiştirerek bir PWM sinyali oluşturur.

Mikrodenetleyicinin çevre birimleri arasında bulunan donanım, PWM sinyalinin genişliğini ve frekansını ayarlamak için özel özelliklere sahiptir. Bu yetenekler PWM sinyalinin özelliklerini uygulama için uygun hale getirme yeteneği sağlar.

Mikrodenetleyici tabanlı teknikler, gömülü sistemler ve hızlı kontrol ihtiyaçları için oldukça uygun seçeneklerdir. Bu yöntem, donanım maliyetlerinin azaltılması, daha hızlı yanıt sürelerinin elde edilmesi ve özel kontrol gereksinimlerinin karşılanması gibi avantajları beraberinde getirir.

Mikrodenetleyiciler, üretim sürecini basitleştirir ve genel maliyetleri düşürür, çünkü genelde tek bir yonga içerisinde birçok işlevi entegre ederler. Bu entegrasyon, çeşitli özellikleri barındıran, karmaşık elektronik cihazları daha ekonomik ve hızlı bir şekilde üretme olanağı sunar.

Ayrıca, mikrodenetleyiciler hızlı kontrol işlemlerini kolaylıkla gerçekleştirebilir. Donanım tabanlı zamanlayıcılar ve kesmeler, yanıt sürelerini minimize eder ve hızlı dinamikler gerektiren uygulamalarda mükemmel performans sağlar. Bu özellik, motor kontrol gibi hızlı ve hassas kontrolün kritik olduğu uygulamalarda önemli bir avantajdır.

Sonuç olarak, mikrodenetleyici tabanlı PWM üretim teknikleri, birçok uygulama için hem ekonomik hem de teknik açıdan çekici bir çözüm sunar.

1.8. Güç Kaynakları ve Dönüştürücülerin İncelenmesi

Güç kaynakları ve dönüştürücüler, elektrik enerjisinin bir formunu başka bir formuna dönüştürürler. Bu enerjiyi daha kullanışlı bir forma dönüştürmek veya belirli bir uygulama için gerekli enerji özelliklerini sağlamak için gereklidir. Güç dönüştürücüler ana başlıklar olarak AC-AC, AC-DC, DC-AC ve DC-DC dönüştürücüler olarak sınıflandırılır. Bu dönüştürücülerin özele indirgenmiş farklı versiyonlarını ele alalım:

1.8.1. Lineer güç kaynakları

Lineer DC-DC dönüştürücüler basitlikleri ve düşük gürültü çıkışları nedeniyle özellikle hassas elektronik cihazlarda tercih edilir. Bir lineer dönüştürücü, bir giriş voltajını belirli bir çıkış voltajına düşürmek için bir voltaj düşürme (drop) elementi kullanır. Bu bir transistör veya bir diğer lineer aktif elementtir ve giriş ve çıkış voltajları arasındaki farkı tüketir.

Bu tip dönüştürücülerin bir dezavantajı, verimliliğinin düşük olmasıdır. Çünkü voltaj düşürme elementi, giriş ve çıkış voltajları arasındaki farkı ısı olarak dağıtır. Bu, özellikle giriş ve çıkış voltajları arasındaki farkın büyük olduğu durumlarda sorun olabilir.

Lineer DC-DC dönüştürücüler, giriş voltajını (V_{in}) çıkış voltajına (V_{out}) dönüştürür. Bu dönüştürme lineer regülatörler aracılığıyla gerçekleşir. Basit bir lineer regülatör için, çıkış voltajı ise belirli bir referans voltajına (V_{ref}) eşittir:

$$V_{out} = V_{ref}$$

Bununla birlikte, çıkış voltajı bir feedback direnç bölücüsü aracılığıyla ayarlanır:

$$V_{out} = V_{ref} * (1 + R2/R1)$$

Burada $R1$ ve $R2$ feedback direnç bölücüsünün dirençleridir.

1.8.2. SMPS güç kaynakları

SMPS güç kaynakları, enerji dönüştürme sürecinde çok daha yüksek verimlilik elde edebilen ve daha karmaşık elektronik tasarımları gerektiren bir teknolojidir. Anahtarlama modu güç kaynakları, enerjiyi düşük frekansta (tipik olarak 50 Hz veya 60 Hz) bir transformatörden yüksek frekansa (kilohertz veya megahertz aralığı)

dönüştürerek transfer eder. Bu, güç kaynağının boyutunu ve ağırlığını büyük ölçüde azaltır.

SMPS tasarımları buck, boost, buck-boost ve flyback gibi çeşitli topolojilere sahiptir. Bu topolojiler, giriş voltajının çıkış voltajına göre nasıl dönüştürüldüğünü belirler. Örneğin, bir buck dönüştürücü giriş voltajını düşürür, bir boost dönüştürücü giriş voltajını yükseltir.

Örneğin "Step-Down Regülatör" veya "Buck Dönüştürücü", yüksek bir DC giriş gerilimini daha düşük bir DC çıkış gerilimine dönüştüren bir DC-DC dönüştürücüdür.

Dönüştürücünün temel bileşenleri arasında bir transistör, bir diyot, bir endüktör ve bir kondansatör bulunur. Transistör, dönüştürücünün anahtarlama elemanıdır ve bir PWM sinyali tarafından kontrol edilir.

Buck dönüştürücünün çalışması, transistörün açılıp kapanması ve bu sayede enerjinin endüktör ve kondansatörde birikmesi ve sonra çıkışa aktarılması prensibine dayanır. Bu işlem, giriş geriliminin düşürülmesini ve çıkış geriliminin istenen seviyede düzenlenmesini sağlar.

Buck dönüştürücülerin en önemli özelliklerinden biri yüksek verimlilik olup, bu özellikleri, özellikle batarya beslemeli uygulamalar ve geniş giriş gerilimi aralığına sahip sistemler için ideal kılar.

Buck dönüştürücünün temel çalışma denklemi şu şekildedir:

$$V_{out} = V_{in} * D$$

Bu denklemde;

V_{out} , dönüştürücünün çıkış gerilimidir.

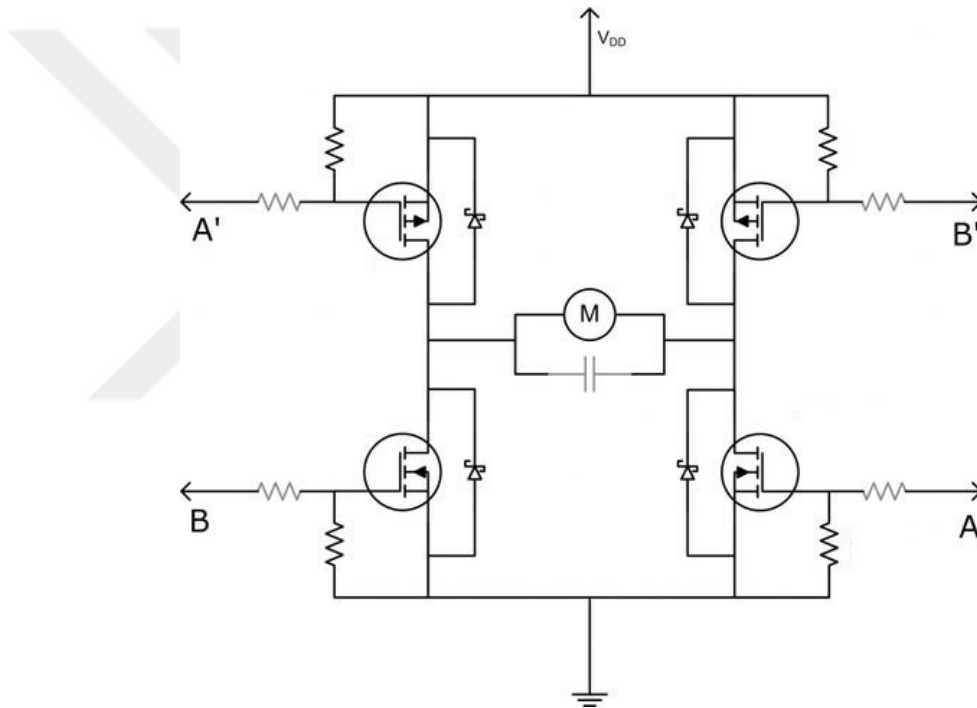
V_{in} , dönüştürücünün giriş gerilimidir.

D , dönüştürücünün çalışma siklusudur (duty cycle) ve bu, transistörün ON olduğu sürenin toplam periyoda oranını ifade eder. D , 0 ile 1 arasında bir değerdir.

Bu denklem, yüksek bir giriş gerilimini (V_{in}), düşük bir çıkış gerilimine (V_{out}) dönüştüren buck dönüştürücünün temel işlevini özetler. Çalışma siklusu D , çıkış geriliminin giriş gerilimine oranını kontrol eder. Her iki tip güç kaynağının da kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Lineer güç kaynakları genellikle daha basit ve daha az gürültülü, ancak daha az verimliken, SMPS güç kaynakları daha karmaşık, potansiyel olarak daha gürültülü, ancak çok daha verimlidir. Uygulamanın özel gereksinimlerine göre bir tip seçilir.

1.8.3. H-Köprüsü

H-Köprüsü, motor kontrol veya inverter uygulamalarında kullanılan bir elektronik devredir. Bu devre, bir DC enerji kaynağından alınan enerjiyi, iki yönde AC çıktıya dönüştürebilir ya da bir DC Motor için hız kontrolü sağlayabilir. H-köprüsü dört adet anahtarlama elemanı kullanılarak elde edilir. Anahtarlar MOSFET veya IGBT gibi yüksek hızlı, düşük dirençli bileşenlerdir. Küçük güçlü uygulamalar için BJT tip anahtarlar da kullanılabilir.



Şekil 1.13. H-köprüsü şematik bağlantısı.

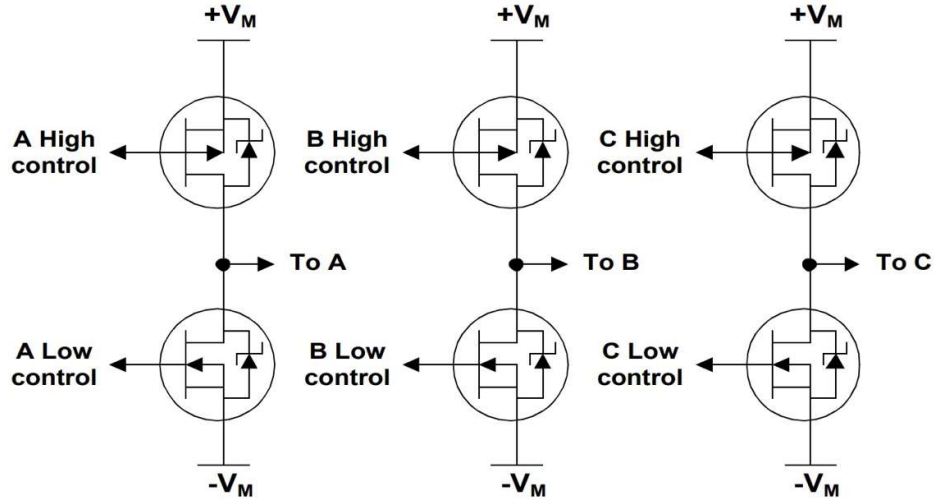
Her bir anahtar bir köşede bulunur ve devre, anahtarların açılıp kapanma düzenine bağlı olarak farklı voltaj ve akım profilleri oluşturur. H-Köprüsü devresi, motorun dönme yönünü değiştirmek için voltajın polaritesini değiştirebilir. Bu, anahtarların farklı konfigürasyonlarıyla elde edilir. Anahtarlar, hız kontrolü, yön kontrolü ve frenleme gibi çeşitli motor kontrol işlevlerini gerçekleştirmek için özellikle uygundur. H-Köprüsü 3 Fazlı PWM inverterlere temel oluşturan bir devredir ve konuyu anlamak açısından önemlidir.

1.8.4. 3 Faz PWM inverter

3 fazlı PWM inverterler, genellikle AC motor sürücülerinde kullanılır. Bu inverterler, bir DC girişi alır ve üç adet AC çıkışı oluşturur. Bu çıkışların frekansı ve genliği, PWM tekniklerinin uygulanmasıyla kontrol edilir.

Üç fazlı inverterler DC enerjiyi AC enerjiye dönüştürmek için altı adet anahtarlama elemanına ihtiyaç duyarlar. Bu durumda, Akıllı Güç Modülleri (IPM) ideal bir çözüm sağlar. Akıllı Güç Modülleri (IPM), altı anahtarlama elemanını içerir ve ayrıca sürücü devreleri, izolasyon ve koruma devreleri gibi ek özelliklere de sahiptirler. Bu dahili özellikler sistem tasarımını basitleştirir ve aynı zamanda güvenilirliği artırır.

3 fazlı PWM inverterlerin çalışma prensibi şu şekildedir: Her bir faz için, bir üst anahtar ve bir alt anahtar bulunur. Üst anahtar kapatıldığında ve alt anahtar açıldığında, faz voltajı pozitif DC kaynak voltajına eşittir. Üst anahtar açıldığında ve alt anahtar kapatıldığında, faz voltajı negatif DC kaynak voltajına eşittir. Anahtarların her ikisi de açıldığında veya kapandığında, faz voltajı sıfırdır.



Şekil 1.14. Üç faz PWM inverter devresi.

Bu anahtarlama durumları, her bir fazın voltajının istenen bir referans ile kontrol edilecek veya sürülecek elemanın ihtiyacına göre şekillendirilir. Farklı sonuçlar etmek için farklı PWM sinyallerine ihtiyaç vardır. PWM anahtarlama teknikleri gün geçtikçe gelişmekte ve yenilenmektedir. Örneğin bir sinüs PWM ile sinüzoidal dalgaya oldukça yakın sonuçlar elde edilebilir.

Matematiksel modelleme, üç fazlı bir inverterin çıkışını tanımlamak için kullanılabilir. Örneğin, inverterin her bir fazının voltajını tanımlamak için aşağıdaki denklemler kullanılabilir:

$$v_A = V_{dc} * (S1 - S4)$$

$$v_B = V_{dc} * (S3 - S6)$$

$$v_C = V_{dc} * (S5 - S2)$$

Bu denklemlerde, V_{dc} DC kaynak voltajını, S1'den S6'ya kadar olan S terimleri ise anahtarlama durumlarını temsil eder. S1 ve S4, faz A için üst ve alt anahtarları temsil eder, S3 ve S6, faz B için, ve S5 ve S2, faz C için üst ve alt anahtarları temsil eder. S terimleri, anahtar kapalıysa 1'e, açıksa 0'a eşittir.

Bu şekilde, üç fazlı PWM inverterin çıkış voltajları matematiksel olarak ifade edilebilir. Bu voltajlar, daha sonra bir 3 fazlı motoru sürmek veya başka bir uygulama için kullanılabilir.

1.9. Elektrikli Araçlarda Emniyetli Sürüş

Elektrikli araçlar, çevresel etkileri ve enerji verimliliği nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Bu popülerite bu araçların konu olduğu yarışlar ve el yapımı araçların sayısı gün geçtikçe artıyor ancak, bu yeni teknolojilerle birlikte, özellikle güvenlikle ilgili bir dizi yeni zorluk da ortaya çıkıyor. Bu bölümde, elektrikli araçlarda güvenliği sağlamak için uygulanan bazı stratejiler ve protokoller üzerinde durulacaktır.

Arabanın başlatılması, geleneksel bir araçta olduğundan biraz farklıdır. Elektrikli araçlarda güvenlik nedeniyle, aracın sadece frene basıldığında çalıştırılması için bir sistem vardır. Bu, aracın kontrolsüz bir şekilde hareket etme riskini önler ve bir güvenlik özelliği olarak hizmet eder.

Gaza basılıyken, aracın başlatılmaması durumu ile birlikte ekstra durumlar vardır. Bu durumların bir kısmı, batarya ve motorun aşırı ısınmasıdır. Bu nedenle, batarya sıcaklık sensörleri, aşırı ısınmayı algılamak ve bu durumda gücü otomatik olarak kesmek için kullanılır. Bu, aracın ve yolcuların güvenliğini sağlamak için hayati bir önlemdir.

Elektrikli araçlarda bir başka önemli güvenlik önlemi de, araç hareket halindeyken vites değiştirmenin önlenmesidir. Bu, aracın zarar görmesini veya kontrolün kaybedilmesini önler.

Ayrıca, elektrikli araçlarda, frenleme sırasında motorun döngüsünün otomatik olarak kesilmesi gereklidir. Bu genellikle, frene basıldığında PWM (Pulse Width Modulation) sinyalinin otomatik olarak kesilmesi ile gerçekleştirilir. Bu, aracın kontrolünün korunmasına yardımcı olur ve potansiyel bir kazayı önler.

Bu ve diğer güvenlik önlemleri, elektrikli araçların kullanımını hem güvenli hem de verimli hale getirmekte kritik bir rol oynar. Elektrikli araç teknolojisi ilerledikçe, bu güvenlik protokollerinin ve yönetmeliklerinin de ilerlemesi ve gelişmesi beklenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

“Jufer, M., (1985), BLDC motorun pozisyon sensörsüz kendinden anahtarlama çalışması ile alakalı bilgilendirilme yapılmıştır.”

"M. Nagata, 1987 yılında fırçasız doğru akım motorunda endüklenen gerilimin trapezoidal formuna bağlı olarak, endüklenen gerilim ve hava aralığındaki akımda üçüncü harmonik bileşenlerin belirgin olarak ortaya çıktığını belirtmiştir. Statorun üçüncü harmonik gerilim bileşeninin pozisyon algılamada kullanıldığı bir yöntem, Nagata tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde patentlenmiştir."

"Pillay ve Krishnan, 1989 yılında sürekli mıknatıslı senkron motorları incelenmiş ve bu motorların ürettikleri akımlar ve karşı elektro-motor güçleri temel alarak bir sınıflandırma yapmışlardır. Onların çalışmaları, karşı elektro-motor güçleri trapezoidal formda olan motorları FDAM olarak adlandırmışlar, karşı elektro-motor güçleri sinüzoidal formda olan motorlara ise sürekli mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) terimini kullanmışlardır."

"Matsui ve Shigyo, 1992'deki çalışmalarında fırçasız DC motorların sensörsüz kontrolünü ele almaktadırlar. Rotor pozisyon sensörünün, bu tür motorların işletilmesi ve tork kontrolü için neden önemli olduğunu detaylıca ifade etmişlerdir. Ayrıca, pratik uygulamalarda karşılaşılan pozisyon sensörlerinin eksikliklerine de değinmişlerdir. Araştırmalarında, fırçasız DC motorların sensörsüz kontrolüne dair yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, rotor pozisyonunun belirlenmesi, gerçek bir motorla önerilen model arasındaki akım farkından yola çıkılarak yapılmıştır. Bu akım farkı iki bileşene ayrılarak, bunlardan biri pozisyon, diğeryse hız tahmini için kullanılmıştır. Yeni metodun işleyişi, önce bir simülasyon üzerinde, ardından da gerçek bir devre üzerinde test edilmiştir. Deneysel bulgular, metodun hem geçici durum hem de sürekli durum koşullarında arzu edilen kontrol karakteristiklerini sağladığını göstermektedir."

"Matsui'nin 1993 tarihli çalışması, motor kontrol uygulamalarında sensör kullanmanın belirli eksikliklerine odaklanmış ve özellikle fırçasız DC motor sürücülerinde sensör bileşeninin neden ortadan kaldırılması gerektiğini ayrıntılı olarak incelemiştir. Çalışmasında, motorun gerilim ve akım modellerinin kullanılmasıyla, sinüsoidal akı dağılımında üst düzey tork kontrolünün nasıl sağlandığını göstermiştir. Uygulanan metod, fırçasız DC motorun geçici ve sürekli çalışma durumlarının izlenmesi ve karşılaştırılmasıyla desteklenmiştir."

"Shinkawa ve ekibi (1993), evirici güç anahtarlarına ters yönde paralel şekilde bağlanan serbest geçiş diyotlarının iletim sürelerinin belirlenmesine dayanan bir pozisyon algılama metodu önermişlerdir. Bu metod, önerilen bir başlatma teknikleriyle birlikte iç rotorlu, sürekli mıknatıslı bir motor üzerinde uygulanmıştır. İki rastgele fazın aktif hale getirilmesiyle, belirli bir yönde başlatılan motorun, başlangıçta 120°'lik anahtarlama işaretiyle açık döngü kontrolü gerçekleştirilmiştir."

"Ertuğrul ve Acarnley (1994), bir motorun başlatılması ile ilgili bir çalışma yapmışlar ve belirli bir kalkış metodolojisi sunmuşlardır. Rotorun A fazı ile aynı hizaya gelebilmesi için evirici anahtarlara özgü bir PWM teknikleri uygulanmıştır. T1 üst katman, T2 ve T6 alt katman anahtarlarına 200 mikrosaniye sürelik dönemler boyunca PWM uygulanmış ve bu durum rotor A fazı ile aynı eksen konumuna gelene kadar devam etmiştir. Faz endüktanslarının algılanmasına dayalı metotta, statorun doyma etkisi sebebiyle faz endüktanslarının rotor konumuna bağlı olarak değişimi başlatma işlemi için kullanılmıştır. Doğrudan endüktans ölçümüne dayanan başka bir metotta ise, kalkış esnasında yüksek performans elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu yaklaşımın temel prensibi, d ve q eksen takımlarındaki geometrik ve doyma ile ilgili endüktans değişikliklerinin algılanması ve bu bilginin konumun belirlenmesi için kullanılmasıdır. Bu yöntemin temel zorluğu, algoritmasının eksen takımı dönüşümlerini ve endüktans ölçümünü içermesi ve bu sebeple yüksek düzeyde dijital sinyal işlemcisi ihtiyacı duymasındır. Bu, araştırmacıların bu çalışma sonucunda çıkan önemli sonuçlarıdır."

"Luk ve Lee'nin (1994) "Fırçasız DC Motor Sürücülerinde Etkin Modelleme" adlı çalışmalarında, MATLAB çerçevesinde yeni bir simülasyon modeli önermişlerdir. Fırçasız DC motor ve sürücü sistemini etkin bir şekilde modelliyor bu model. Bu yenilikçi modelin, tasarım sürecinin maliyetlerini düşürdüğü ve MATLAB ortamında geliştirildiği için kullanımının son derece kullanıcı dostu olduğu ifade edilmiştir."

"Ohnishi ve ekip arkadaşları (1994), hareket sistemlerinin elektrik motorları tarafından nasıl sürüldüğünü ve kontrol değişkenlerinin ve parametrelerin tanımlanmasını ve tahmin edilmesini ayrıntılı bir şekilde ele almışlardır. Çalışmalarında, modern elektrikli sürüş sistemlerinde mekanik ve elektriksel unsurların ayrı ayrı incelendiğini ve bunların bütünsel sistem içindeki önemine vurgu yapmışlardır. Ayrıca, AC sürücüler için kontrol değişkenleri ve parametrelerinin tanımlanması ve tahmin edilmesi için önemli teknikler sunmuşlardır. İleri kontrol tekniklerinin kullanımı ile daha doğru ve etkili parametre tanımlama ve tahmin süreçleri gerçekleştirildiği belirtilmiştir."

"Seog-Joo Kang ve Seung-Ki Sul'ün 1995 tarihli çalışması, mükemmel olmayan trapez geri elektromotor kuvvet kullanılarak fırçasız doğru akım motorunun direkt tork kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır."

"M. Tomita ve ekibi 1996'da, sürekli mıknatısların yüzeylerine minik alüminyum parçalar ekleyerek yapay dışbükey kutuplar oluşturmuşlardır. Bu alüminyum parçalar üzerinde oluşan eddy akımları nedeniyle, statorun manyetik akı yolu relüktansı artar ve bu, rotor pozisyonuna bağlı olarak stator endüktansında değişikliklere yol açar. Maksimum akım değerlerinin belirlenmesi ile rotorun pozisyonunu tahmin etmek mümkün hale gelmiştir. Ancak, eklenen alüminyum parçaların hava aralığını genişletmesi, motorun verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır."

"P. Schmidt ve takımı (1996), rotor pozisyonunu belirlemek için durağan haldeyken motor sargılarına uygulanacak bir ölçüm akımı temelli yeni bir teknik sunmuşlardır. Bu metod, rotor mıknatıs akısı işareti temelli doyma farkını belirlemeyi amaçlar. Bu amaçla, önceden belirlenen zaman aralıklarında ters yönlerdeki voltaj darbeleri uygulanır. Pozitif ve negatif yönlerdeki maksimum akım değerleri arasındaki fark hesaplanır ve kaydedilir. Aynı işlem diğer fazlar için de tekrarlanır. Elde edilen bu üç işaret, anahtarların sürülmesinde kullanılır."

"Paul Kettle ve ekibi (1998), motorun beslenmediği fazdaki indüklenmiş gerilimi referans olarak genişletilmiş Kalman filtreleme tekniğiyle fırçasız DC motorun sensörsüz kontrolünü gerçekleştirmiştir. Bu algoritma, klasik sıfır geçiş yaklaşımından farklı olarak anlık pozisyon ve hız, rahatsızlık verici moment bilgilerini sağlar. Algoritmaların uygulanması hızlı ve düşük maliyetli bir dijital işaret işlemci (DSP) motor kontrolörüyle sağlanabilir."

"Bonvin ve Perriard (2000), çalışmalarında, fırçasız DC motorların sinüzoidal olmayan ters elektromotor kuvvetinden (EMF) kaynaklanan düzensizlikleri gidermek için yeni bir metod önermişlerdir. Bunun için, fırçasız DC motorlarının d-q modellerini kullanarak vektör kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Yeni regülatör yapıları, geleneksel regülatör yapılarıyla karşılaştırılmıştır."

"Batzel T. D. ve Lee, K. Y. (2000), yüksek çözünürlükte bir rotor açısı sensörüne ihtiyaç duymadan, sensörsüz bir sürekli mıknatıslı senkron motor sürme uygulamasını başarıyla gerçekleştirmişlerdir."

"Mukherjee ve takımı (2001), yük çevirici tabanlı motor sürücüsü için sensörsüz kontrol uygulamasına yönelik bir teknik önermişlerdir. Bu teknikte, sürücünün ilk dört-beş periyotunu kodlayıcı ile başlatıp daha sonra sensörsüz bir şekilde devam etmesi

durumları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Kodlayıcı ve sensörsüz çalışma dalgaları bir arada değerlendirilmiştir. Neticede, sensörsüz kontrol uygulamasının önemli özellikleri üzerinde durulmuş ve ani yük değişiklikleri ve değişken giriş voltajı durumlarında sağlıklı bir kontrol sürecinin mümkün olduğu deneysel olarak gösterilmiştir."

"Şen (2001), referans kitapta bulanık mantık önerileri ve çıkarımlarını, en uygun karar alma ve modelleme tekniklerini, bulanık mantık sistemlerini ve kontrol mekanizmalarını, belirsiz ifadelerin en etkin şekilde modellenmesini ve bulanık mantık sisteminin temel yapısını ve kontrol tekniklerini ele almıştır."

"Toliyat ve Gopalarathnam (2002), güç elektroniği el kitabı için bir bölüm hazırlamışlar, bu bölümde fırçasız DC motorların yapılarını, kalıcı mıknatıslarını, stator sargılarını, motor özelliklerini, matematiksel modellerini, güç elektroniği dönüştürücülerini, motorun sensörlü ve sensörsüz pozisyon ölçümlerini, hız-tork özelliklerini ve çeşitli uygulamalarını ele almışlardır."

"Jang, G. H., Park, J. H., ve Chang, J. H. (2002), indüktans değişikliği kullanılarak sensörsüz bir FDAM motorun başlatma algoritması ve pozisyon tespiti üzerine bilgiler sunmuşlardır."

"Yedemale (2003), fırçasız DC motorların temel yapısı hakkında detaylı bir uygulama notu hazırlamıştır. Yazar, fırçasız motorların yapı ve çalışma prensiplerini, stator sargılarını, rotorun kalıcı mıknatıslarını, oluşan ters EMF gerilimlerini, hall sensörlerini, hız-tork özelliklerini, fırçasız DC motorların diğer motorlarla karşılaştırmasını, kapalı döngü kontrolünü, sensörsüz kontrolünü, tipik uygulamalarını ve motorun teknik özelliklerini ele almıştır."

"Lee ve Ehsani (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, fırçasız DC motor sürücüler için gelişmiş simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modelde, PWM inverter elemanlarının akım ve voltajları gibi, hız ve torkun dinamik özellikleri etkin bir şekilde gözlemlenebilmekte ve analiz edilebilmektedir. Bu sebeple, geliştirilen simülasyon modelinin fırçasız DC motor kontrol algoritmalarının geliştirilmesini kolaylaştıracağı ve hesaplama süresini ve hafıza boyutunu azaltacağı belirtilmiştir."

"Singh ve Jain (2003), kalıcı mıknatıs özellikli fırçasız DC motorlar için DSP temelli bir dijital hız kontrolörü konulu çalışmalarında, sundukları sürücü sisteminin performansının analizini yapmışlar. Fırçasız DC motor sürücü sistemini en az eleman sayısı ile oluşturmayı başarmışlardır. Geliştirdikleri sistem; bir güç devresi, kontrol donanımı ve yazılım bölümlerinden meydana gelmiştir. Sistem performansını başlangıç,

sürekli çalışma ve yük değişikliklerinde analiz etmişler ve uygulama güvenilirliğini teyit etmişlerdir."

"Kim (2003), çok düşük hızlardan nominal hıza kadar olan aralıkta fırçasız DC motorların sensörsüz kontrolü üzerine doktora tezi yazmıştır. Fırçasız DC motorlar için yeni bir sensörsüz kontrol yöntemi sunmuştur. Fırçasız DC motor sürücülerin çalışma prensibini analiz ederek, önceki sensörsüz kontrol tekniklerini de ortaya koymuştur. Yeni sunulan sensörsüz kontrol tekniği, motor hızından bağımsız ve akı dağılımına bağımlı şekilde belirtilmiş, simülasyon ve deneysel uygulama ile doğrulanmıştır."

"Jionwen Shao, Lizuka ve diğerleri (2003), motor nötr voltajına ihtiyaç duyulmayan bir yöntem önermişlerdir. Uygun bir PWM metodu ve algılamayla, uç voltajından indüklenen voltaj direkt ve düzgün bir şekilde elde edilmektedir. PWM sinyalleri, inverterin üst kolundaki anahtarlamalar sırasında uygulanırken, indüklenen voltajlar PWM sinyalinin olmadığı periyotlarda tespit edilmektedir. Bu sayede, yapay bir nötr noktaya, voltaj bölücüye veya filtre gereksinim duyulmaksızın geniş bir hız bölgesinde sensörsüz kontrol sağlanmaktadır."

"Jianwen Shao, Nolan, D., Teissier, M., Swanson, D. (2003), otomobillerde kullanılan benzin pompaları için sensörsüz fırçasız doğru akım motorlarının mikrokontrolör temelli kontrolü hakkında bilgi paylaşmışlardır."

"Su ve McKeever (2004), fırçasız DC motorlar için ekonomik bir pozisyon sensörsüz kontrol yöntemi önermişlerdir. Üç fazlı bir motor için, sadece bir motor faz voltajından dolayı olarak alınan ters EMK ile rotor pozisyonu belirlenmiştir. Ters EMK'nın hattı üzerinde tespit edildiği noktaya göre bir filtre seçilmiş ve pozisyon tespit devresi basitleştirilmiştir. Bu, daha ekonomik bir işlemci kullanımına olanak sağlamıştır. Ters EMK'nın tespiti düşük hızlarda zor olabildiğinden, hatalı pozisyon bilgilerini düzeltmek ve filtrenin neden olduğu ideal olmayan faz gecikmelerini düzeltmek için bir tablo sunulmuştur. Yazarlar, bu yaklaşımın motorun çalışma aralığını ve verimliliğini artırdığını ve deneysel sonuçların bunu onayladığını belirtmişlerdir.

"Yılmaz, M., Tuncay, R. N., Ustun, O., (2004) fırçasız DC motorun dalgacık teorisi ile sensörsüz kontrolüne ilişkin yeni bir metot üzerine bir hız kontrol prototip uygulaması konusundaki bilgileri sunmuşlardır."

"Aydoğdu ve Akkaya (2005), fırçasız DC motorların pozisyon sensörsüz dijital işaret işlemci (DSP) tabanlı bulanık kontrolünü konu alan çalışmalarında; trapezoidal ters EMK voltajlarından motor pozisyonunun tespit edilip hız kontrolü için kullanıldığını

belirtmişlerdir. DSP platformunda uygulanan bulanık mantık kontrol algoritması ile sistem pratiğe dökülmüştür."

"Yılmaz M. (2005), fırçasız doğru akım motorunun (FDAM) dalgacık teorisi ile sensörsüz kontrolüne dair yeni bir yöntem geliştirme amacını taşımaktadır. Konum belirleme amacıyla iki metot kullanılmıştır. İlk metotta, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile faz sargılarının öz endüktansları belirlenmiştir. İkinci metotta ise, sargılarda endüklenen voltajların sıfır geçiş noktalarının tahmini yapılmıştır. Başlangıç problemi, ilk yöntemde faz öz endüktansları işlevi $L=L(9)$ yardımıyla, ikinci yöntemde ise her dönüş yönü için hazırlanan ve belirli bir eğimle artan frekans profiline dayanan tablo ile çözülmüştür. Başlangıçta FDAM'nin Hall Effect sensörleri ile çalışması sağlanmıştır. Fırçasız DA motorunun MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi yapılmış ve simülasyon performansları elde edilmiştir. PID ve Bulanık mantık kontrol algoritmaları geliştirilmiş, akım ve hız kontrolü yapılarak performans sonuçları elde edilmiştir. Sonrasında FDAM'nin PWM darbeleri, DS2201 çoklu I/O kartı ve DS1005 işlemci kartının kullanıldığı dSPACE dijital işaret işleme hızlı kontrol prototipleme setinde deneysel olarak üretilmiştir. Zaman domenindeki giriş faz akımları ve endüklenen voltajlar kaydedilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarından elde edilen dalga şekillerine Daubechies ayrık dalgacık analizinin uygulanması ile sensörsüz kontrol için kritik olan komutasyon aralıklarının tespiti amaçlanmıştır."

"Aydoğdu Ö., (2006), Fırçasız DC motorların genetik algoritma temelli bulanık denetleyici ile sensörsüz hız kontrolünün hem simülasyonunu gerçekleştirmiş hem de pratiğe aktarmıştır. Fırçasız DC motor, trapezoidal ters EMK dalga formuna göre yeniden yapılandırılmış ve simülasyon süreçlerindeki hesaplama hatalarını minimize etmek için dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu tercih edilmiştir. Başlangıçta, fırçasız DC motor hız kontrol sistemi için bir uzmanın bilgi ve yeteneklerine dayalı bir bulanık denetleyici tasarlanmıştır. Ancak bu tür bir tasarımda, sistematik bir yaklaşım olmadığı için denetleyicinin başarısı, bilgi tabanı ile sınırlıdır ve optimum çözümün garantisi yoktur. Bu durum, bulanık denetleyicilerin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu sorunları çözmek amacıyla, bilgi tabanı yerine, denetleyici parametrelerinin gerçek kodlu genetik algoritma ile optimize edildiği yeni bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Kontrol sisteminin optimizasyonunu sağlamak için, çok amaçlı bir performans indeksi belirlenmiş ve genetik algoritmada minimize edilmesi gereken hedef fonksiyon olarak kullanılmıştır. Performans indeksi baz alınarak, denetleyici parametrelerinin genetik algoritma ile optimizasyonunda iki farklı strateji geliştirilmiştir. Bu stratejilerden birincisi, çoklu

bulanık denetleyici parametrelerinin uygun şekilde gruplandırılması ve her bir grup parametresinin genetik algoritma ile belirlendiği ardışık yaklaşımdır. İkincisi ise, bulanık denetleyicinin tüm parametrelerinin genetik algoritma ile aynı zamanda belirlendiği eş zamanlı yaklaşımdır. Optimal bulanık denetleyicilerin geliştirilmesi ile fırçasız DC motorun hız kontrolü simüle edilmiş ve geleneksel bulanık denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, eş zamanlı yaklaşımın diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sistem yanıtı sağladığı tespit edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında başarıyla uygulanan geleneksel ve optimal bulanık denetleyici algoritmaları, uygun format ve kod yapısına çevrildikten sonra ADSP-21992 dijital işaret işlemcisine (DSP) yüklendi ve fırçasız DC motorun sensörsüz hız kontrolü deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur."

"Kadjoudj ve Golea'nın (2007) yayınladığı çalışmada, sabit mıknatıslı motor sürücülerinin denetiminde bulanık model referans adaptif kontrol metodunun uygulanması incelenmiştir. Bu konuyla ilgili simülasyonlar yapılmış ve bu simülasyonların sonuçları da makalede detaylıca ele alınmıştır."

"Yılmaz'ın (2007) yayınladığı çalışmada, DC motor denetimi, hidrolik servo sistem denetimi, çamaşır makinelerinde döngü ve yıkama zamanı denetimi, boru içerisindeki topun denge kontrolü ve DC servo motor konum kontrolü gibi mühendislik uygulamalarının bulanık mantık temelli simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, Matlab'ın Simulink ve FIS (Fuzzy Inference System) modülleri kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca bulanık sistemlerin yapısına ve bu konuyla ilgili terimlere kitapta ayrıntılı bir şekilde değinilmiştir."

"Sarıtış İ. (2008), endüstriyel sıvılarda bulunan mikron büyüklüğünde manyetik parçacıkların temizlenmesi için bir manyetik filtre tasarladı ve gerçekleştirdi. Bu işlem için düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir otomatik kontrol sistemi kullanıldı. Filtre gövdesi, filtre matrisi ve filtre bobini, mevcut teorinin öngördüğü sonuçlara dayanarak oluşturuldu."

"Karabacak, Y. ve Uysal, A. (2017) çalışmalarında, bulanık kontrollü bir FDAM sürücüsünün tasarımı ve hız kontrolörü olarak kullanımı incelenmiştir. Sistem, STM32F4 mikrokontrolörü kullanarak, elektrikli araçların rejeneratif frenleme uygulamaları için tasarlandı. Tahrik motor devresi, her fazda 1200 fark ile 3 fazlı akım üretebiliyor. Donanım üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar ve uygulamalar iyi bir uyum sağladı. Sistem, motor hızını belirlenen değere ayarlama yeteneğine sahiptir."

"Jaya, A., Purwanto, E., Fauziah ve ark. (2017), Elektrikli araçların kararlı hal tepkilerini ve dinamik yükler altında güvenilirliğini artırmak adına, PID-Fuzzy algoritmasına dayalı PAM (Darbe Genlik Modülasyonu) kullanan bir FDAM hız kontrol sistemi tasarladılar. PID-Fuzzy, çeşitli ayar noktalarında ve dinamik yük durumlarında FDAM hızını optimize edebilir."

"Apribowo, Chico Hermanu Brillianto ve ark. (2021), Fırçasız DC motorlarının birçok avantajı olmasına rağmen, genellikle elektrikli araçlarda optimal seviyenin altında kullanıldığı belirtildi. Geleneksel bir kontrol sistemi olan orantısız integral türev (PID) kullanımının, özellikle yük ve yol durumlarında değişikliklere yanıt olarak hala bazı zayıf noktaları bulunmaktadır. Bu çalışmada, Fuzzy ve PID yöntemlerinin birleştirilmesiyle BLDC motor hızının kontrolü için bir sistem tasarlanmıştır. Yapılan denemeler sonucunda, Fuzzy-PID kontrolünün, geleneksel PI kontrolüne kıyasla daha iyi ve daha stabil bir performans sergilediği tespit edilmiştir."

Sonuç olarak, fırçasız DC motorların kontrolüne yönelik yapılan çalışmalar, bir dizi farklı yöntem ve teknolojiyi içeriyor. Entegre kontrol sistemlerinden, dahili sensörler ve makine öğrenmesi algoritmalarına kadar çeşitli yaklaşımlar, bu alandaki teknolojik ilerlemeyi ve yenilikleri gösteriyor. Ayrıca, bulut tabanlı kontrol sistemlerinin ve adaptif kontrol stratejilerinin ortaya çıkışı, fırçasız DC motorların kontrol tekniklerinin ve enerji verimliliğinin sürekli olarak geliştirildiğini göstermektedir. Bu tür araştırmalar, özellikle enerji verimliliği ve performans iyileştirmeleri için önemli bir rol oynayacak ve fırçasız DC motor teknolojisinin gelecekteki uygulamalarına şekil verecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, araştırmamızın gerçekleştirilmesinde kullanılan materyallerin ve uygulanan yöntemlerin detaylı bir sunumunu içermektedir. Araştırmanın hedeflerine ulaşmak için ne tür bir yaklaşım izlendiğini ve bu süreçte hangi donanım ve yazılım bileşenlerinin kullanıldığını açıklayacağız.

İlk olarak, kullanılan sistem ve bileşenlerin genel tanımlarını ele alacağız. Bu, her bileşenin işlevini ve sistemin genel işleyişine olan katkısını anlamak için hayati öneme sahiptir. Burada STM32 mikrodenetleyici, Hall effect sensörleri, HUB motor, analog kontrol sistemi ve daha pek çok bileşenin detaylı bir açıklamasını sunacağız.

Ardından, bu bileşenlerin bir araya getirilerek belirli bir sistem oluşturma sürecini inceliyoruz. Bu kısım, sistem tasarımı ve yapılandırma süreçlerini içerir. Sistemin fiziksel bileşenleri arasındaki ilişkiyi ve etkileşimleri derinlemesine anlama ihtiyacını vurgular.

Yazılım geliştirme süreci, bilgisayar tabanlı bir araştırmada merkezi bir role sahiptir. Yazılım gereksinimlerini belirleme, kontrol algoritmasının tasarlanması ve uygulanması ve mikrodenetleyici üzerinde yazılımın yüklenmesi ve ayarlanması süreçlerini kapsar..

Donanım geliştirme süreci, fiziksel bileşenlerin tasarlanması, üretilmesi ve bir araya getirilmesini içerir. Bu, PCB tasarımı ve üretim süreçlerini, sistem montajını ve entegrasyonu süreçlerini içerir.

Son olarak, sistemin bileşenlerinin bir araya getirilmesi ve entegrasyon sürecini inceliyoruz. Bu süreç, bir araştırma projesinin başarılı bir şekilde tamamlanmasında çok önemli bir role sahiptir, çünkü tüm bileşenlerin birlikte düzgün bir şekilde çalışması gerekmektedir. Burada her bileşenin sistemin genel işleyişine olan katkısını ve bileşenler arasındaki etkileşimleri daha da detaylı bir şekilde ele alacağız.

Sonuç olarak, bu bölüm, araştırmamızın her aşamasında ne tür bir yaklaşım izlediğimizi ve hangi materyalleri ve teknikleri kullandığımızı anlamanız için gereklidir. Bu bilgiler, araştırma sürecimizi daha iyi anlamanıza ve belki de kendi çalışmalarınıza uyarlamak üzere kullanmanıza yardımcı olabilir.

3.1 Kullanılan Sistem ve Bileşenlerin Genel Tanımları

İlk olarak, projemizin mikrodenetleyici teknolojisi olan STM32'ye değinmekteyiz. STM32, bilinen bir mikrodenetleyici ailesi olup yüksek performansı ve

etkin işlem kapasitesi ile dikkat çeker. Genellikle elektronik kontrol sistemlerinin ve özellikle de motor kontrol uygulamalarının merkezinde bulunur.

Sonraki adım, Hall effect sensörlerini içeren sürüş sistemidir. Bu sensörler, motor kontrolünde hayati bir rol oynar ve motorun mevcut durumunu belirlemek için kullanılır. İlgili alt bölümler, sensörlerin konumlandırılması ve US1881 Hall efect sensörünün kullanımını tartışmaktadır.

Dış rotorlu HUB motor, projemizin bir diğer önemli parçasıdır. Bu tip motorlar, elektrikli araçlar ve elektrikli bisikletler dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılır ve aracın genel performansına büyük ölçüde katkı sağlar.

İzole 0-10 Volt analog kontrol sistemi, kontrol sinyallerini işlemek ve doğru kontrol tepkisini elde etmek için kullanılır. Ayrıca, bu bölüm, 6MBP20XSF Serisi Akıllı Güç Modülünün (IPM) kullanımını ve özelliklerini ele alır. Bu modül, güç dağıtımının etkin ve güvenli bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Bunun dışında DC Bara kapasitörlerinin seçimi, MP9488 entegreli güç kaynağı ve LR9102 LDO regülatörü gibi diğer önemli bileşenleri de inceler. Bu bileşenlerin her biri, genel sistemin performansını ve etkinliğini etkileyen kritik görevler üstlenir.

Sonuç olarak, bu bölüm, projede kullanılan bileşenlerin ve sistemlerin genel özelliklerini ve uygulamalarını derinlemesine inceler. Bu bilgiler, projenin sonraki bölümlerinde daha detaylı olarak ele alınacaktır.

3.1.1 STM32 mikrodnetleyici

STM32 mikrodnetleyici serisi, ARM tabanlı bir çözüm olarak dikkat çeker ve geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. ARM Cortex-M çekirdekleri üzerine inşa edilmiş olan bu serinin yüksek performansı ve işlem kapasitesi, elektronik kontrol sistemlerinin karmaşık ihtiyaçlarını karşılamak için idealdir.

STM32, genellikle motor kontrolü, IoT (Internet of Things) cihazları ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar için kullanılır. ARM tabanlı olmasının getirdiği avantajlar, öncelikle düşük enerji tüketimi ve yüksek işlem hızıdır. Ayrıca, geniş çevre birimleri yelpazesi ve hızlı işlem süreleri, daha karmaşık ve talepkar uygulamalar için yeterli olanak sağlar.

ARM Cortex-M çekirdekleri, STM32 mikrodnetleyicilerinde farklı özellikler ve yetenekler sunar. Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4 ve Cortex-M7 gibi çeşitli çekirdeklerle, STM32, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre çeşitli performans ve özellikler sunar.

STM32'nin donanım ve yazılım hatalarına karşı dayanıklı olması, bir diğer önemli avantajdır. Buna ek olarak, STM32 serisi mikrodenetleyiciler, uygulamaları için yazılım geliştirme ve hata ayıklama süreçlerini basitleştiren kapsamlı bir yazılım ve donanım ekosistemi tarafından desteklenir.

Öte yandan, STM32'nin geniş GPIO (General Purpose Input/Output) özellikleri, birçok farklı türdeki sensör ve ekipmanı kontrol etmek için gereken esnekliği sunar. Bu, kullanıcıların çeşitli uygulamalar için farklı çözümler geliştirebilmesine olanak sağlar.

Sonuç olarak, STM32 serisi ARM tabanlı mikrodenetleyiciler, geniş bir yelpazede uygulamalara etkileyici performans ve esneklik sunar. Bu özellikler, onları elektronik kontrol sistemlerinde önemli bir rol oynayan, endüstri standartlarından biri haline getirir.

STM32 mikrodenetleyicilerin 3 fazlı motorları sürme konusunda sunduğu kolaylık sebebiyle bu projede özellikle tercih edilmiştir. Giriş çıkış bağlantı pin sayısı, sistem frekansı ve piyasada bulunabilirlik sebebiyle STM32F103C8T6 kodlu mikrodenetleyici tercih edilmiştir.



Şekil 3.1. STM32F103C8T6 kodlu mikrodenetleyici.

STM32F103C8T6 mikrodenetleyicinin isimlendirmesinde geçen harf ve sayıların anlamı şu şekildedir:

- STM32- STMicroelectronics tarafından üretilen mikrodenetleyici serisinin ismi. Burada 'STM' STMicroelectronics'in kısaltması, '32' ise bu serinin 32 bitlik mikrodenetleyicilerden oluştuğunu ifade eder.
- F- Mikrodenetleyicinin ürün hattını belirtir. Bu durumda 'F' serisi, genel amaçlı mikrodenetleyicilere işaret eder.
- 103- Serinin alt grubunu belirtir. '103', bu mikrodenetleyicinin özelliklerine ve donanım kapasitesine işaret eder.
- C- Mikrodenetleyicinin pin sayısını belirtir. 'C' modeli genellikle 48 pinli paketlere işaret eder.
- 8- Mikrodenetleyicinin Flash hafıza boyutunu belirtir. Bu durumda '8', mikrodenetleyicinin 64 Kbytes Flash hafızaya sahip olduğunu belirtir.
- T- Mikrodenetleyicinin paket tipini belirtir. 'T' genellikle LQFP (Low-profile Quad Flat Package) tipini belirtir.
- 6- Mikrodenetleyicinin çeşitli özelliklerini belirten bir diğer gösterge. '6' bu durumda mikrodenetleyicinin endüstriyel (-40 ila +85°C) sıcaklık aralığında çalışabileceğini belirtir.

Bu mikrodenetleyici, geniş bir zamanlama ve olay yönetimi kabiliyetine sahiptir. Donanımında genel amaçlı timerlar, ileri saymalı timerlar ve PWM modunda çalışabilen ileri saymalı timerlar dahil olmak üzere bir dizi farklı timer türü bulunur. Bu timerlar, periyodik kesmelerin oluşturulması, olay zamanlaması ve hızı kontrol edilen bir motora PWM sinyali oluşturmak gibi çeşitli görevler için kullanılabilir.

STM32F103C8T6, 72 MHz'e kadar hızda çalışabilen bir ARM Cortex-M3 çekirdeği içerir. İç saat kaynağı, hassas zamanlama gerektiren uygulamalar için mükemmel bir seçimdir. Ayrıca, harici bir saat kaynağına bağlanabilme özelliği vardır.

Mikrodenetleyici ayrıca çeşitli genel amaçlı giriş/çıkış (GPIO) pinlerine sahiptir. Bu pinler, dijital girişler veya çıkışlar olarak yapılandırılabilir ve çeşitli cihazlarla haberleşmek için kullanılabilir. GPIO pinlerinin her biri, kesme oluşturabilme yeteneğine de sahiptir.

Bu mikrodenetleyici, çeşitli haberleşme arabirimlerini destekler, bunlar arasında I2C, SPI, USART ve USB yer alır. Bu arabirimler, mikrodenetleyicinin diğer cihazlarla veri alışverişinde bulunmasını sağlar.

Son olarak, STM32F103C8T6, analog-dijital dönüştürücüler (ADC) ve dijital-analog dönüştürücüler (DAC) dahil olmak üzere bir dizi analog özellik sunar. Bu özellikler, voltaj ölçme ve kontrol sinyalleri oluşturma gibi işlemler için kullanılabilir. Bu geniş özellik yelpazesi, endüstriyel otomasyondan tıbbi cihazlara ve tüketici elektroniği ürünlerine kadar bir dizi farklı uygulamada kullanım imkanı sunar. İlerleyen bölümlerde yukarıda da görüntüsü, detayları ve tercih sebebi verilen STM32F103C8T6 serisi işlemci kullanılacak ve sistem bunun üzerine inşa edilecektir (Şekil3.1.).

3.1.2 Dıştan rotorlu HUB motor

Bu proje için 250W gücünde dıştan rotorlu bir HUB motor kullanılmıştır. Bu HUB motor 4 kutuplu ve 6 adet sargıdan oluşur.

İlk olarak, bu tip motorların en önemli avantajı tümleşik tasarımlarıdır. HUB motorları, genellikle aracın tekerleğinin merkezine yerleştirilir ve doğrudan çekiş sağlar. Bu, güç aktarma organlarına, şanzımana veya diferansiyele ihtiyaç duymaz, bu da sistem karmaşıklığını ve ağırlığını azaltır (Şekil3.2.).

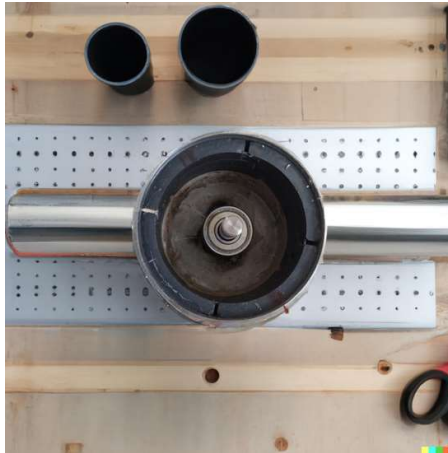


Şekil 3.2. Seçilen HUB motorun lastiğe akuple edilmiş hali.

İkinci olarak, bu motorlar yüksek tork sunarlar ve bu tork, düşük hızlardan itibaren elde edilebilir. Bu, özellikle elektrikli araçların hızlanma performansını artırır ve yokuş tırmanma kabiliyetini iyileştirir.

Üçüncü olarak, dıştan rotorlu HUB motorların enerji verimliliği oldukça yüksektir. Bu motorlar, enerjiyi doğrudan tekerleklere aktardıklarından, mekanik enerji kayıplarını önemli ölçüde azaltır.

Dördüncü olarak, 250W güç değeri, özellikle hafif elektrikli araçlar (örneğin e-bisikletler, e-scooterlar vb.) için yeterli bir performans sağlar. Bu motorlar, düşük enerji tüketimine sahip olmalarına rağmen yeterli hız ve tork sağlar.



Şekil 3.2. Seçilen HUB motorun rotor ve mıknatis görüntüsü.

Son olarak, bu motorlar genellikle bakım gerektirmez ve uzun bir ömre sahiptirler. HUB motorlar, sızdırmaz bir birim olarak tasarlandığından, iç bileşenlere zarar verebilecek dış etkenlere karşı dayanıklıdır.

Tüm bu avantajlar, dıştan rotorlu HUB motorlarının elektrikli araç projelerinde sıkça tercih edilmesine yol açmaktadır.

3.1.3 Hall effect sensörlü sürüş sistemi

Hall effect sensörlü sürüşle alakalı genel bilgi Giriş kısmında daha önce işlenmişti (Bölüm 1.5.3). Bu kısımda projenin gerçekleştirilmesine yönelik sensör seçimi yapılacak ve bu sensörlerin motor kutup ve sargı sayılarına göre yerleştirilmesi işlemiyle alakalı bilgiler verilecektir.

Adım	Sensör C	Sensör B	Sensör A	C High	C Low	B High	B Low	A High	A Low
1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	1	0

Şekil 3.3. 6-Adım sürüş için doğruluk tablosu.

Daha sonraki kısımlarda algoritma oluşturulurken sensörlerin pozisyonlarına göre oluşacak anahtarlama sinyali şekil olarak verilmiştir (Şekil3.3). Bu anahtarlama sinyallerinin sırası değiştirilerek motor saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde çevrilebilir. 6-Step sürme yönteminde anahtarlama sinyallerinin sırası ve yapısı tüm Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar için aynıdır. 6 adımın tamamlanması elektriksel olarak 360 derecenin tamamlanması anlamına gelir. Bu açının mekanik olarak kaç dereceye denk geleceği ile ilgili hesaplamalar yine bahsi geçen bölümde işlenmiştir (Bölüm 1.5.3). Bir önceki bölümde motorumuzun kutup sayısı (P) 4 olarak belirlenmiş ve toplamda 6 adet sargıya sahip olduğu görülmüştür. Bu bilgilere göre motorumuzun adım açısı mekanik olarak 30 dereceye tekabül etmektedir. Elektriksel olarak 360 derece tamamlandığında mekanik olarak 180 derece taranmış olacak ve toplam 12 adımda tam tur elde edilecek.

3.1.3.1 US1881 Hall effect sensör

US1881, Melexis tarafından üretilen bir manyetik latching Hall Effect sensörüdür. Bu sensör, belirli bir manyetik alan sınırını aştığında çıkış durumunu değiştirir ve bu durum, manyetik alanın sınırın altına düşmesine rağmen korunur. Bu özelliği, manyetik alanın sürekli izlenmesi gereken uygulamalar için ideal kılar.

US1881, sürekli bir manyetik alanın varlığını tespit etmek ve bu bilgiyi dijital bir sinyal olarak çıktıya dönüştürmek için tasarlanmış bir dijital Hall Effect sensörüdür. Sensör, tek bir tedarik voltajı ile çalışır ve genellikle düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda kullanılır. Çıkış durumu, bir manyetik alanın varlığına veya yokluğuna göre değişir

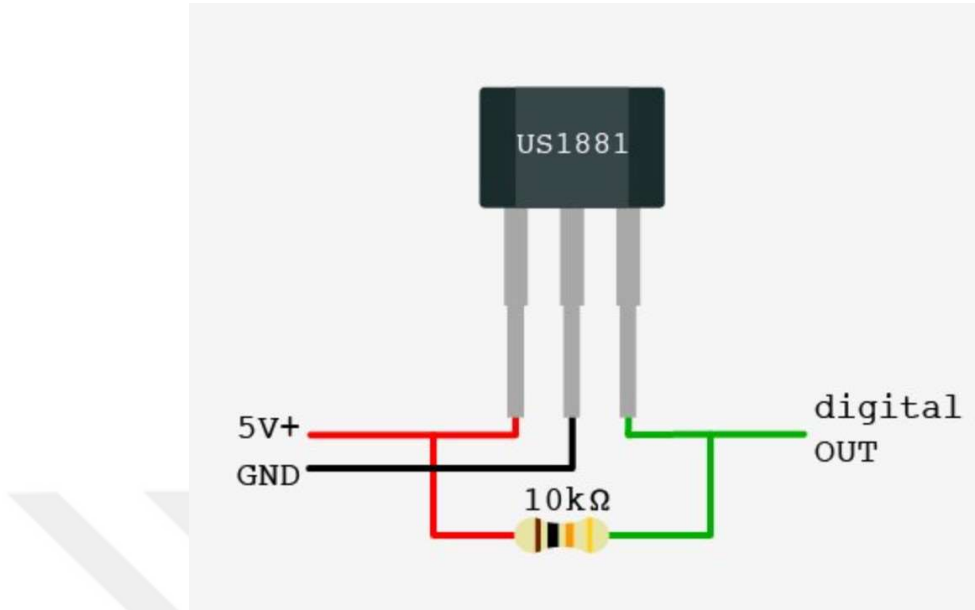
Bu sensör, düşük enerji tüketimi ve geniş çalışma sıcaklık aralığı gibi avantajlara sahiptir. Bu, enerji tasarrufu sağlar ve çeşitli çevre koşullarında güvenilir performans sunar. Ayrıca, US1881, 3.5V ila 24V arasında geniş bir besleme voltajı aralığına sahip olduğu için farklı uygulamalar için uygundur. Üstelik, yüksek güvenilirlik ve uzun hizmet ömrü için tasarlanmıştır.

US1881'in muadilleri arasında A3144 ve OH090U gibi Hall Effect sensörleri bulunur. Bu sensörler, US1881 ile benzer şekilde çalışır, ancak belirli uygulamalar için daha uygun olabilirler. Örneğin, bazıları daha düşük veya daha yüksek sıcaklık aralıklarında çalışabilir veya farklı manyetik hassasiyet seviyelerine sahip olabilir.

Her Hall Effect sensörünün kendine özgü özellikleri ve avantajları vardır, bu yüzden hangi sensörün seçileceği, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine bağlıdır. Genel olarak, Hall Effect sensörler, motor kontrolü, konum tespiti, hız tespiti ve manyetik alan tespiti gibi birçok uygulamada kullanılır.

US1881 Hall Effect sensörünün bu projede tercih edilmesinin sebeplerinden biri, motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasıdır. Örneğin, US1881 sensörü, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının kontrolünde sıklıkla kullanılır. US1881, bu tür uygulamalar için yüksek güvenilirlik ve hassasiyet sunar.

US1881 Hall Effect sensörünün doğru bir şekilde çalışabilmesi için, genellikle bir 'pull-up' direncine ihtiyacı vardır. Bu direnç, genellikle sensörün çıkış pinine ve pozitif besleme voltajına (Vcc) bağlanır.(Şekil3.4.)



Şekil 3.3. US1881 Hall effect sensör için örnek bağlantı şeması.

Hall Effect sensörleri genellikle 'açık drenaj' ya da 'açık kolektör' çıkış konfigürasyonlarında gelir, bu da sensörün çıkışının aktif olmadığı zamanlarda bir 'yüksek empedans' durumunda olduğu anlamına gelir. Yani sensör, bir manyetik alan algılandığında düşük (0V) bir çıkış sağlar, ancak bir manyetik alan algılanmadığında, çıkış ne yüksek ne de düşük bir durumdadır. İşte bu durumda pull-up direnci devreye girer.

Pull-up direnci, çıkışın yüksek empedans durumunda olduğu zamanlarda çıkış voltajını Vcc'ye çeker, bu da sensör çıkışını mantıksal 'yüksek' duruma getirir. Bu şekilde, sensörün çıkışı her zaman belirgin bir durumda olur: ya mantıksal 'düşük' (manyetik alan algılandığında) ya da mantıksal 'yüksek' (manyetik alan algılanmadığında).

Bu, mikrodenetleyiciler gibi dijital sistemlerle arayüz oluştururken önemlidir, çünkü bu sistemler genellikle belirli bir giriş durumunu bekler: ya yüksek, ya düşük. Yüksek empedans durumu genellikle bir 'belirsiz' durum olarak kabul edilir ve genellikle istenmeyen davranışlara neden olabilir. Bu yüzden, US1881 gibi Hall Effect sensörleriyle çalışırken pull-up dirençlerini kullanmak genellikle iyi bir uygulamadır.

3.1.3.2 Hall effect sensörlerin uygun açıyla pcb üzerine yerleştirilmesi

Hall effect sensörlerin, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarda sargıların arasına uygun açıyla yerleştirilmesi, motor kontrol stratejilerinin kritik bir bileşenidir. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların karakteristikleri ve çalışma prensipleri göz

önüne alındığında, Hall effect sensörlerinin optimal konumlandırılması, motorun verimli ve doğru bir şekilde çalışması için önemlidir.

Hall effect sensörler, manyetik alanlardan etkilenerek elektriksel çıkış sinyalleri üreten cihazlardır. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlar, genellikle dönen rotorun manyetik alanından kaynaklanan sinyalleri tespit etmek için Hall effect sensörlerini kullanır. Bu sinyaller, motor kontrol ünitesine, rotorun tam olarak hangi konumda olduğu konusunda geri bildirim sağlar. Bu geri bildirim, rotorun konumuna göre sargılara uygulanacak elektrik akımını zamanlamak ve kontrol etmek için kullanılır.

Hall effect sensörlerinin sargıların arasına yerleştirilmesi, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında sensörlerin fiziksel boyutları, motorun tasarımı ve boyutları, sensörlerin çalışma sıcaklığı ve sensörlerin özellikleri bulunmaktadır.

Hall effect sensörlerinin konumlandırılması, genellikle sensörlerin rotorun manyetik alanına maksimum hassasiyetle yanıt vermesini sağlayacak şekilde gerçekleştirilir. Bu genellikle, sensörlerin sargıların arasında, rotorun manyetik alanının en güçlü olduğu konumda yerleştirilmesi ile sağlanır.

Optimal konumlandırma, genellikle simülasyon yazılımları ve deneysel veriler kullanılarak belirlenir. Simülasyon yazılımları, çeşitli sensör konumlandırmalarının motor performansına etkisini tahmin etmek için kullanılır. Deneysel veriler, bu tahminleri doğrulamak ve rafine etmek için kullanılır.

Optimal konumlandırma, motorun maksimum verimliliğini sağlarken, aynı zamanda motor kontrol ünitesinin motorun konumunu doğru bir şekilde tespit etmesini sağlar. Bu, motorun doğru zamanlamayla ve optimal enerji verimliliğiyle çalışmasını sağlar.

Sonuç olarak, Hall effect sensörlerinin optimal konumlandırılması, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorların etkin ve güvenilir bir şekilde kontrol edilmesinde kritik bir rol oynar. Bu, motor kontrol stratejilerinin kritik bir bileşeni olup, motorun performansı, verimliliği ve güvenilirliği üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 3.4. US1881 Hall effect sensörlerin fazların konumuna göre yerleşimi.

Bu etki göz önünde bulundurularak tavsiye edilen noktalarda maksimum güç elde etmek üzere Hall effect sensörler yerleştirilmiştir (Şekil3.4).

3.1.4 İzoleli 0-10 Volt analog kontrol sistemi

Elektrikli araçlarda sürücü komutlarının motor kontrol sistemine aktarılması kritik bir rol oynar. Gaz kontrolünün hassas ve güvenilir olması, aracın performansını ve kullanıcı deneyimini doğrudan etkiler. Bu noktada izoleli 0-10 Volt analog kontrol sistemi devreye girer.

Bu sistem, sürücünün gaz pedalı komutlarını analog bir sinyal halinde alır ve bu bilgiyi motor kontrolörüne iletir. Genellikle 0-10 Volt arasında değişen bir voltaj aralığı kullanılır, bu da genellikle "kapalı" (0 Volt) ve "tam gaz" (10 Volt) durumlarına karşılık gelir. İzolasyon özelliği, giriş ve çıkış arasında elektriksel bir ayırım sağlar, bu da sistemde oluşabilecek olası gürültü ve parazitlerden kaynaklanan hataların önüne geçer.

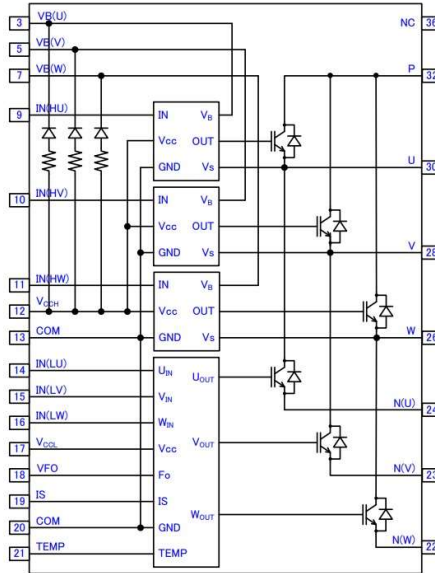
Bu projede, izoleli 0-10 Volt analog kontrol sistemi 555 entegresi ile birlikte farklı bir yaklaşım sunar. Gaz kontrolünün hassas bir şekilde yönetilmesi için gelen analog sinyal, 555 entegresi yardımıyla belirli bir frekansa dönüştürülür. Bu yöntemle, bir gaz pedalı veya başka bir analog kontrol cihazı aracılığıyla alınan gerilim değeri, belirli bir osilasyon frekansına çevrilir.

555 entegresi, stabil modda bir osilatör olarak kullanılır ve gelen voltaj değerlerini frekans değerlerine çevirir. Bu dönüştürme işlemi, 555 entegresinin kontrol voltajı pini (FM) üzerinden yapılır. Kontrol voltajı pinine uygulanan voltaj, osilasyon frekansını doğrudan etkiler. Dolayısıyla, analog kontrol sisteminden alınan voltaj ne kadar yüksekse, üretilen frekans da o kadar düşük olur.

İzoleli 0-10 Volt analog kontrol sistemi, doğrudan kullanıcı girdilerinin hassas bir şekilde aktarılmasını sağlar, bu sayede araçta daha yumuşak ve daha hassas bir hız kontrolü sağlanabilir. Elektrikli araçların motor kontrolünde doğruluk ve hızlı tepki süreleri çok önemli olduğu için, bu sistemler genellikle gaz kontrol mekanizmalarında tercih edilir. Ayrıca, sistem, potansiyel elektriksel interferanslardan korunarak daha güvenilir bir performans sağlar. Komponentlerin tolerans değerlerinden dolayı oluşacak fark yazılım aşamasında bir öğrenme algoritması ile giderilecektir.

3.1.5 6MBP20XSF Serisi IPM (Akıllı Güç Modülü)

6MBP20XSF serisi, Fuji Electric tarafından üretilen Intelligent Power Module (IPM) serisinden biridir. IPM'ler, motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan güç yarıiletken cihazlardır. Bu modüller, bir motor sürücü devresinin önemli bileşenlerini tek bir pakette birleştirirler.



Şekil 3.5 6MBP20XSF serisi IPM iç yapısı.

6MBP20XSF, bir altı IGBT (İzole Edilmiş Çift Kutuplu Transistör) anahtarlama elemanı ve bunların sürülmesi ile ilgili gate sürücü devreleri ve ayrıca koruma devreleri içerir. Bunun dışında bir frekans dönüştürücü ve diğer güç elektroniği uygulamalarında kullanılabilen bir termistör içerir.

6MBP20XSF'nin gelişmiş özelliklerinden biri dahili güç devrelerine göre daha hızlı ve daha doğru bir termal koruma sağlayabilen bir dahili termistördür. Bu, yüksek güç uygulamalarında aşırı ısınmayı önlemek için hayati öneme sahiptir.

Diğer önemli bir özellik, bu modülün her IGBT'nin gate sürücüsünü kontrol etmek için ayrı bir kontrol kanalına sahip olmasıdır. Bu sayede kullanıcıya her IGBT'yi ayrı ayrı kontrol etme ve böylece motor hızını ve torkunu daha hassas bir şekilde yönetme yeteneği sağlar.



Şekil 3.6 6MBP20XSF serisi IPM.

6MBP20XSF modülünün kullanılmasının başlıca sebeplerinden biri, motor kontrol devrelerinin karmaşıklığını ve boyutunu azaltma yeteneğidir. Dahili gate sürücü devreleri ve koruma devreleri sayesinde genel güvenilirliği ve performansı artırır. Genel olarak, 6MBP20XSF modülü, bu tarz motor kontrol uygulamalarında mükemmel bir seçimdir.

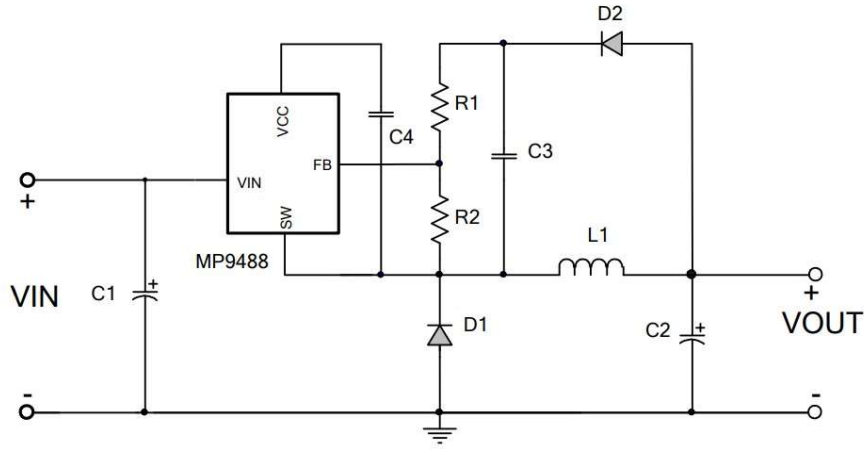
3.1.6 MP9488 entegreli güç kaynağı

MP9488 entegresi, genellikle çeşitli elektronik cihazların güç tedarik birimlerinde kullanılan bir dönüştürücüdür. Bu tür cihazlar genellikle enerjiyi, doğrudan kullanılmak üzere daha düşük bir gerilime dönüştürme ihtiyacı duyarlar. MP9488 entegresi, bu gereksinimi karşılayan bir çözüm sunar.

MP9488, entegre bir yüksek gerilimli MOSFET ile birlikte çalışan bir yüksek frekanslı, sabit frekanslı, akım modlu step-down dönüştürücüdür. Bu entegre, gelişmiş

enerji dönüştürme verimliliği ve dar alanlarda çalışabilme kabiliyeti nedeniyle birçok uygulamada tercih edilir.

Bu entegre, geniş bir giriş voltajı aralığına sahiptir ve çok çeşitli yükleri destekleyebilir. Dahili MOSFET, yüksek anahtarlama frekansları sağlar, bu da daha küçük, daha hafif ve daha ucuz endüktör ve kondansatörlerin kullanılmasını sağlar. Ayrıca, dönüştürücü çipinde dahili bir kompanzasyon devresi bulunur, bu da harici bileşen sayısını azaltır ve genel maliyeti düşürür.



Şekil 3.7 MP9488 tipik bağlantı şeması

MP9488 entegresi, genellikle taşınabilir elektronik cihazlar, telekomünikasyon ekipmanları ve endüstriyel uygulamalar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Dahili termal koruma ve kısa devre koruması gibi özelliklere sahip olması, güvenlik ve dayanıklılık açısından bu entegreyi mükemmel bir seçenek haline getirir.

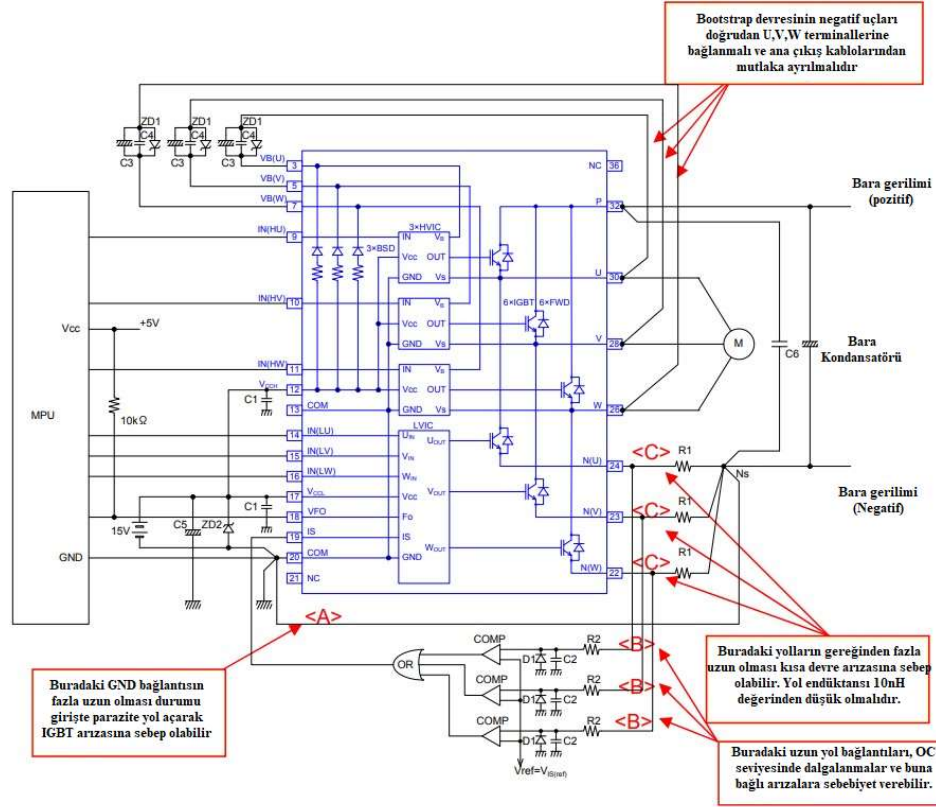
Bu projede MP9488 entegresi, enerji verimliliği, güvenlik özellikleri ve maliyet etkinliği bakımından diğer seçeneklere üstünlük sağlar. Bu entegrenin yüksek derecede entegrasyonu ve dahili koruma özellikleri, tasarım sürecinin karmaşıklığını azaltırken aynı zamanda sistem güvenliğini artırır. MP9488'in yüksek frekansta çalışabilme özelliği, daha küçük bileşenlerin kullanılmasına imkan verir. Bu, hem daha düşük maliyetli bir çözüm sunar hem de bileşen boyutlarının küçülmesine yardımcı olur. Dolayısıyla, MP9488'in bu benzersiz özellikleri, projenin genel maliyetinin düşürülmesinde önemli bir rol oynar.

tekniktir. Bu teknik, genellikle high-side sürücülerini bir dizi yüksek gerilim seviyesine çıkarabilmek için kullanılır.

Özünde, bootstrap devresi, high-side sürücünün gereksinim duyduğu gerilimi sağlamak için enerji depolama özelliğine sahip bir bootstrap kondansatörü kullanır. Bootstrap devresi, low-side (düşük taraf) sürücü aktif olduğunda enerji depolar ve bu enerjiyi low-side sürücü kapalıyken ve high-side sürücü aktif olduğunda kullanır.

Bootstrap kondansatörünün seçimi kritiktir, çünkü doğru kapasitans değerinin seçilmesi devrenin beklenen performansını sağlar. Kapasitans değeri çok düşük seçilirse, kondansatör, gereken gerilimi sağlamak için yeterince enerji depolayamaz ve bu durum high-side sürücünün istenen şekilde çalışmamasına neden olabilir. Öte yandan, çok yüksek bir kapasitans değeri gereksiz büyüklükte bir kondansatör kullanımına yol açar ve bu durum maliyeti artırabilir.

Bir diğer önemli bileşen ise bootstrap diyotudur. Bootstrap diyotu, low-side sürücü aktif olduğunda bootstrap kondansatörünün şarj olmasını sağlar. Diyotun ters gerilim değeri, high-side sürücünün çalışma gerilimine göre belirlenmelidir. Yüksek bir invers gerilim değeri, diyotun düşük frekansta çalışmasına olanak sağlar ve aynı zamanda, diyot üzerinde oluşacak potansiyel hasar riskini de azaltır. Bu bileşenlerin doğru bir şekilde seçilmesi ve tasarlanması, devrenin genel performansını ve güvenilirliğini belirler. Bu nedenle, bootstrap devresinin düzgün bir şekilde çalışması için kondansatör ve diyot seçiminin doğru yapılması çok önemlidir (Şekil3.9.).

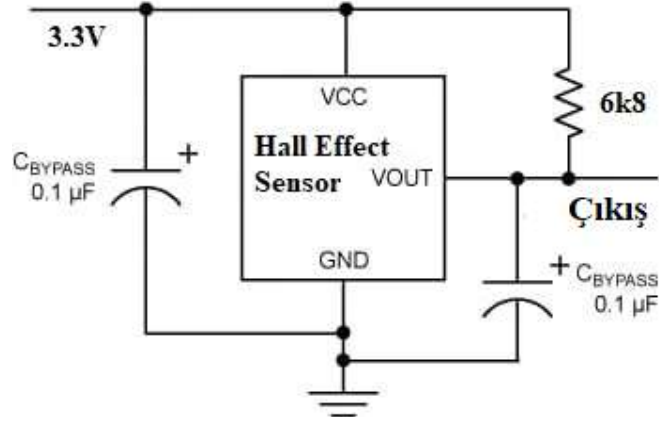


Şekil 3.9. 6MBP20XSF tipik bağlantı şeması.

Bootstrap komponentleri yerleştirildikten sonra akım koruma işlevi çalıştırılmak istiyorsa yine şekilde gösterildiği gibi bağlanmalı ve bunlar yapılırken kablo ve yol uzunluklarına özellikle dikkat edilmelidir hassas bir devre olduğu için hat empedanslarından etkilenmesi söz konusudur.

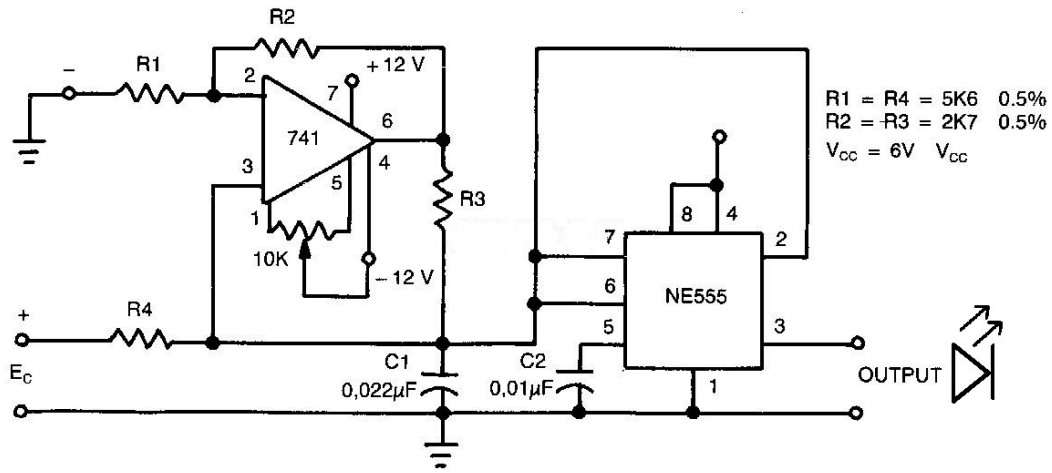
Besleme ünitesinden elde ettiğimiz 15V gerilim 6MBP20XSF modülün besleme girişlerine bağlanmalı. Motoru besleyeceğimiz kısım ise direkt baraya bağlı olmalıdır. Ardından Hall effect sensörünün bağlantı şemasına geçebiliriz.

Hall effect sensörleri basit bir bağlantı şeması içerir. Kullanılacak mikrodenetleyici ile aynı gerilim ile beslenmesi sensörden okunan verinin okunmasını kolaylaştırır. Aksi durumda çıkış sinyalinin gerilim seviyesini mikrodenetleyicinin seviyesine göre kanalize etmek gerebilir. Bir kondansatörle filtreleme yapmak olası parazit sinyallerin devrenin çalışmasını olumsuz etkilemesini engeller (Şekil 3.10.).



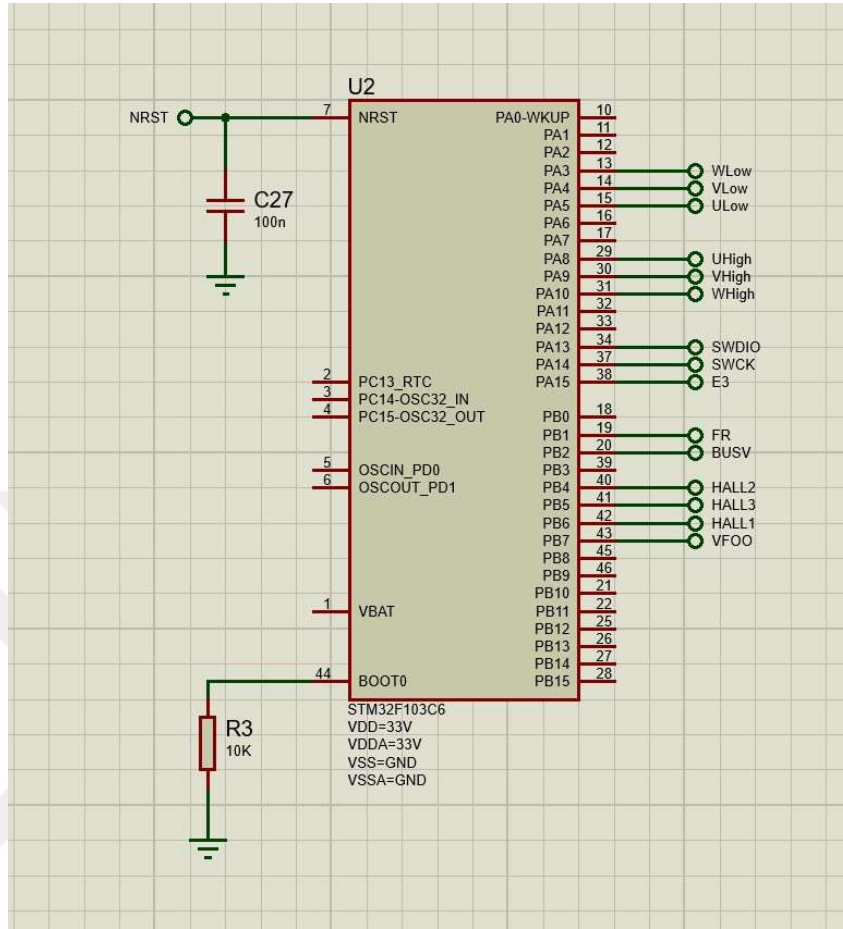
Şekil 3.10. Hall effect sensör bağlantı şeması.

Bu devrede kullanılan 0-10V analog okuma sistemi için gerilimden frekansa dönüştürme işlemi yapılmış ve oluşan frekansa göre gerilim anlamlandırılmıştır. Bu devrede oluşan çıkış frekansı gerilime göre ters orantılı olacaktır (Şekil3.11.). Bu dönüşüme göre uygun denklem mikrodenetleyici yazılımına eklenmeli ve giriş gerilimine göre PWM sinyalinin çıkış sinyalinin grafiği oluşturulmalıdır.



Şekil 3.11. 0-10 Volt analog okuma ve frekans çıkışı veren devre şeması.

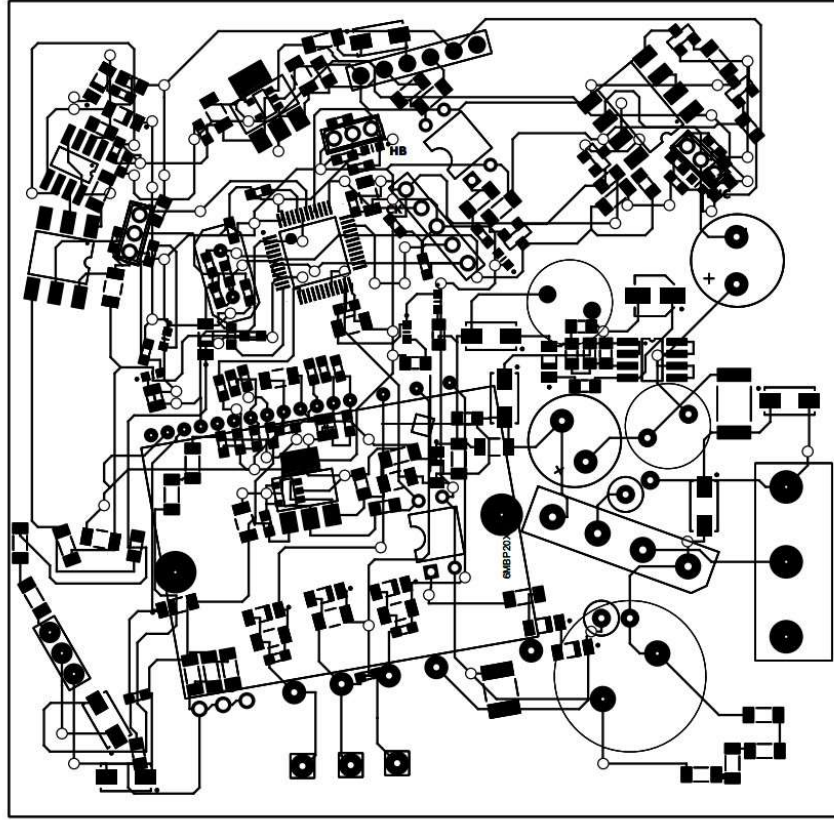
Tüm bu devre elemanları oluşturulduktan sonra seçtiğimiz mikrodenetleyici olan STM32F103C8T6 serisi mikrodenetleyicinin bağlantıları bacakların işlevlerine göre yapılandırılmalıdır (Şekil3.12.).



Şekil 3.12. STM32F103C8T6 mikrodeneleyici için bağlantı şeması.

3.2.2 PCB tasarımı ve üretimi

Oluşturulan şematikler birbiriyle bağdaştırıldıktan sonra baskı devre çizimini oluşturup üretim aşamasına geçilmelidir. Devre çiziminde yüksek gerilim ve düşük gerilim seviyesine sahip yollar birbirinden uzak tutulmalıdır. Bununla birlikte sensör ve hız kontrol sinyalleri de yüksek gerilimden uzak konumlandırılmalı ve olası gürültülerin önüne geçilmelidir. Yol çizimlerinde yüksek frekanslı yolların uzunluklarına ve şekillerine dikkat edilmeli mümkünse gerekli yerlerde empedans eşitlemesi yapılmalıdır. Entegrelerin beslemelerine yakın şekilde besleme çökmelerini engelleyecek şekilde kondansatörler yerleştirilmeli ve bunun yanında 100nF kondansatörler de beslemeye paralel eklenmelidir. Bu devrenin daha pürüzsüz ve düzgün çalışmasına olanak sağlar. Aşağıda bu çalışma için oluşturulmuş devre tasarımı paylaşılmıştır.



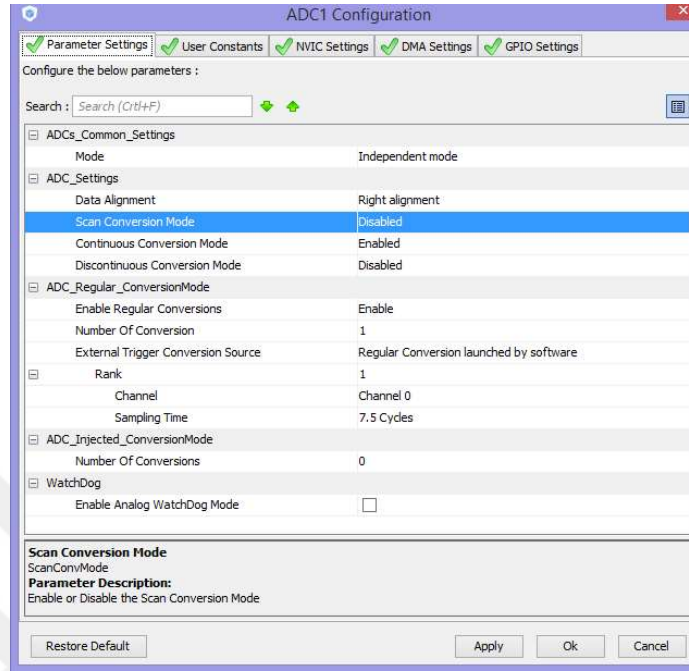
Şekil 3.13. Baskı devre kartının çizimi.

3.3 Yazılım Tasarımı ve Yapılandırılması

Tasarlanan donanım üzerinde yürütülmesi için seçtiğimiz STM32F103C8T6 serisi işlemcinin yapılandırma ayarları bu başlık altında incelenmiştir.

3.3.1 Mikrodenetleyicinin bacak yapılandırması

Bu çalışmada rotor pozisyon bilgisi 3 adet Hall effect sensörle sağlanacağından denetleyiciye 3 adet dijital giriş bacağı tanımlanmıştır. Bunun yanında hız kontrolünün sağlanması amacıyla bacaklardan birisi analog okuma yapmak için bir adet ADC girişi ayarlanmıştır (Şekil3.14.).



Şekil 3.15. Mikrodenetleyici ADC ayarları.

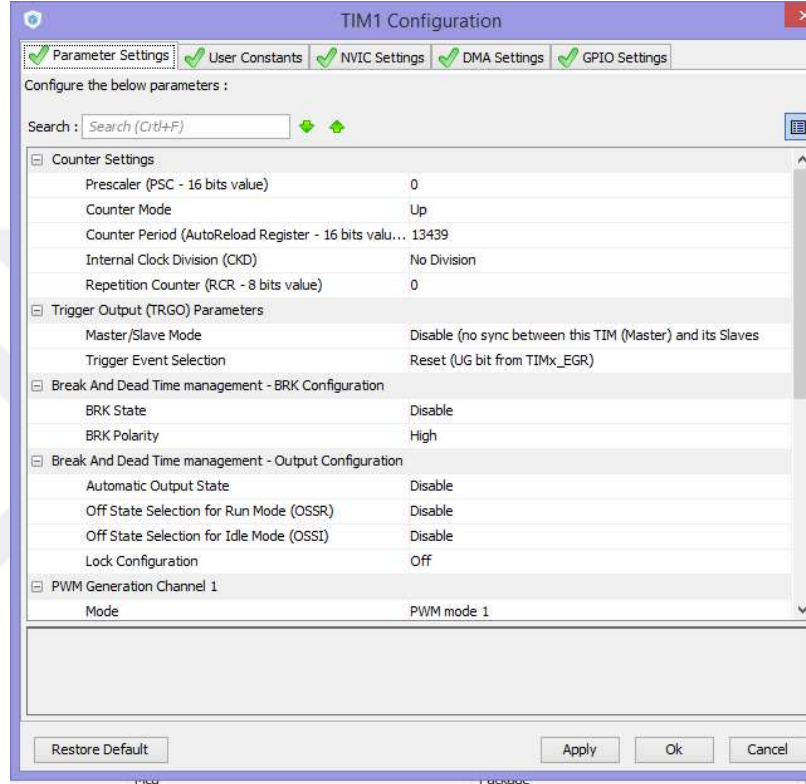
Pulse Width Modulation (PWM) özelliği olan birçok mikrodenetleyici, döngü periyodu ve görev döngüsü için Counter Period (Sayıcı Periyodu) ve Prescaler (Ön ölçekleyici) değerlerini kullanır. Bu değerlerin ayarlanması, istenen PWM çıkış sinyalinin frekansını ve genliğini belirler.

Sayıcı periyodu, bir PWM döngüsünün süresini belirler ve genellikle belirli bir çıkış frekansına ulaşmak için kullanılır. Prescaler ise mikrodenetleyicinin saat frekansını azaltmak için kullanılır. Bu iki değer, çıkış PWM sinyalinin frekansını ve genliğini ayarlamak için birlikte kullanılır.

Örneğin, bir mikrodenetleyici 72 MHz'de çalışıyorsa ve bir Prescaler değeri 72 olarak ayarlanırsa, o zaman gerçek Timer frekansı 1 MHz olur ($72\text{MHz}/72 = 1\text{MHz}$). Daha sonra, eğer Counter Period değeri 1000 olarak ayarlanırsa, PWM frekansı 1 kHz olur ($1\text{MHz}/1000 = 1\text{kHz}$).

Görev döngüsü, PWM sinyalinin yüksek (ON) durumda kalma süresinin, toplam periyot süresine oranıdır ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilir. Görev döngüsü, belirli bir PWM döngüsü sırasında sinyalin yüksek (ON) durumda kalma süresini ayarlar. Counter Period değeri 1000 ve görev döngüsü %50 olarak ayarlanırsa, PWM sinyali her bir döngüsünde 500 mikrosaniye boyunca yüksek durumda kalır ve ardından 500 mikrosaniye boyunca düşük durumda kalır.

Sonuç olarak, mikrodenetleyici tarafından oluşturulan PWM sinyallerinin frekansı ve genliği, prescaler ve sayıcı periyodu ayarlarına bağlıdır. Bu ayarlar, çeşitli uygulamalar için gerekli olan farklı çıkış frekansları ve genliklerine izin verir. Aşağıda bu mikrodenetleyici için yapılmış ayarlamalar görülebilir.



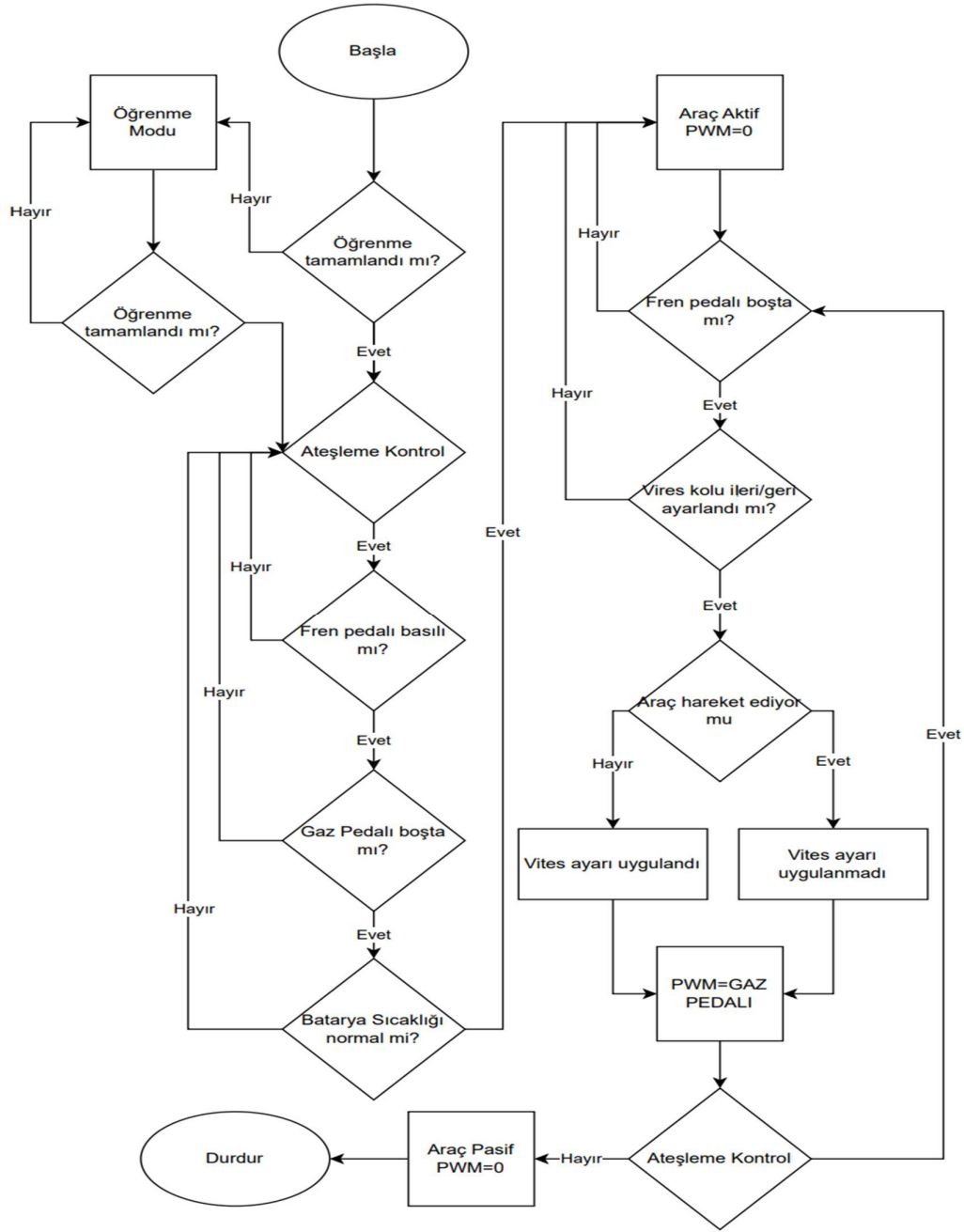
Şekil 3.15. Mikrodenetleyici PWM ayarları.

3.3.2 Kontrol algoritmasının tasarlanması ve akış diyagramı

Algoritma oluşturmanın ve bu algoritmaları bir akış diyagramına dökmek, karmaşık bir sistemi anlamak ve yönetmek için çok önemli araçlardır. Bu süreçlerin çeşitli avantajları vardır.

Bir algoritma, belirli bir problemi çözmek veya belirli bir hedefe ulaşmak için adım adım bir dizi prosedür sağlar. Algoritmalar genellikle bir işlemi ya da problemi çözmek için kullanılır ve bu çözümü oluşturan her bir adımın net ve anlaşılır olmasını gerektirir. Algoritma tasarımı, problemleri daha yönetilebilir ve anlaşılır hale getirir. Her bir adımı analiz ederek, işlemi veya süreci daha iyi anlama ve bu süreçteki her adımı en iyi şekilde yönetme imkanı sağlar.

Yukarıda bahsettiğimiz sistem üzerinde çalışacak olan yazılımın akış diyagramı aşağıda verilmiştir (Şekil3.16.).



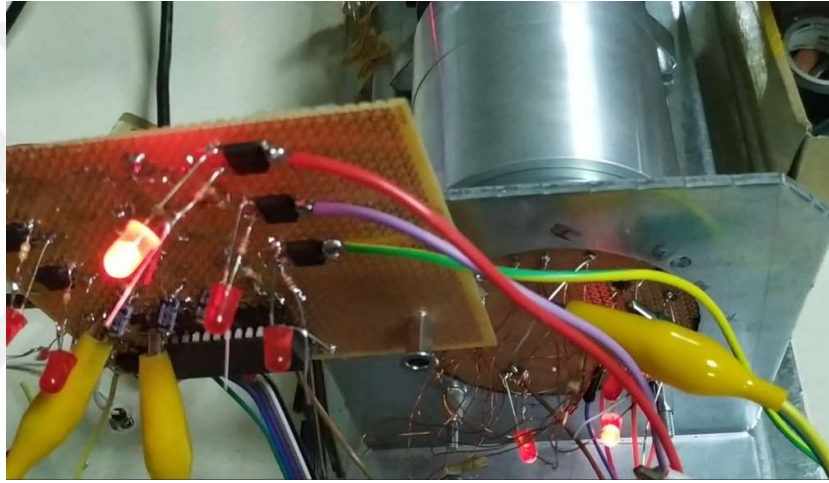
Şekil 3.16. Sistem akış diyagramı.

3.4. Devrenin Gerçekleştirilmesi

Baskı devresinin ve yazılımın entegrasyonu, projenin bu evresinde gerçekleştirilecektir. Bu kritik adımda, devre üzerine yerleştirilmiş olan bileşenlerin titizlikle lehimlenmesi ile fiziksel montaj süreci tamamlanacaktır. Montaj sürecini

gelmesi için hayati öneme sahiptir ve ilk testlerin başlatılmasına izin verir. Bu işlemlerin tamamlanması, sistemin başarılı bir şekilde çalışmasına yönelik ilk adımı oluşturur.

Sistem içinde gaz kolu olarak hizmet veren potansiyometre, bu süreçte sistem içerisine entegre edilmiştir. Bu bileşenin sisteme öğretilmesi sonucunda, motorun dönme hareketini başarıyla gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu gözlem, potansiyometrenin başarılı bir şekilde sistem içerisine entegre edildiğini ve motorun dönme hareketinin başarılı bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, projenin başarılı bir şekilde ilerlediğine işaret etmektedir.



Şekil 3.18. Motor ve sürücünün birleştirilmesi

Motor ve sürücünün başarılı bir şekilde birleştirilmesinin ardından, devam eden testler için bir Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motoru, bir DC (Direct Current) motor ile birleştirmek suretiyle kupaajlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu, sistemin genel performansını değerlendirebilmek için zorunlu olan önemli bir adımdır.

Gelecek aşamalarda, DC motoruna farklı dirençler bağlanarak geniş bir değerler yelpazesi üzerinde testler gerçekleştirilecektir. Bu, motorun performansını farklı yük ve direnç koşulları altında değerlendirmek ve oluşturulan tork ve güç gibi önemli parametrelerin ne şekilde etkilendiğini anlamak için gereklidir.

Başlangıç testleri sırasında, DC motor, herhangi bir yüklemeye veya ek direnç olmaksızın boşa çalıştırılmıştır. Bu, motorun temel işlevselliğini ve operasyonel bütünlüğünü doğrulamak için öneme sahip olan bir adımdır. Bu testler, daha karmaşık ve ayrıntılı testlerin başlatılması için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motoru çalışma parametrelerini analiz etmek ve bu bilgileri kullanarak performansını en üst düzeye çıkarmak için bir dizi deney gerçekleştirildi. Başlangıçta, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motoru çeşitli çalışma durumlarında test edildi ve bu deneylerin sonuçları belgelendi.

Deneylerin birincil odak noktası, motora uygulanan voltajın motor hızı üzerindeki etkisini anlamaktı. Bu deneyler, belirli bir voltaj değeri altında motorun nasıl bir performans gösterdiğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu, doğru akım motorlarının karakteristik özelliklerini ve belirli bir çalışma noktasındaki performansını anlamamızı sağlar.

Motor boşa çalıştırıldığında, bara gerilimi DC 300V değerindeyken analog giriş sinyalinin değiştiği durumlar altında dönme hızını ölçtük. Her bir voltaj değeri için motor hızını belirledik ve bu bilgileri daha sonra analiz için kaydettik. Bu çalışma, motorun voltaj değişimlerine nasıl tepki verdiğini ve voltajla hız arasındaki ilişkinin doğasını anlamamızı sağladı. Bunun yanında çıkış PWM değeri ölçülerek girişe uygun duty cycle değerleri elde edilip edilmediği değerlendirildi.

Sonuçları özetlemek gerekirse, aşağıdaki tablo voltaj değerleri ile karşılık gelen hız değerlerini göstermektedir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Giriş sinyaline göre PWM ve hız verileri

Analog Giriş	Duty Cycle	Hız d/d
0V	%0	0
1V	%11	320
2V	%18	630
3V	%31	940
4V	%42	1260
5V	%50	1580
6V	%61	1900
7V	%71	2220
8V	%82	2560
9V	%89	2920
10V	%100	3650

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının performansını analiz etmek oldukça kritik bir öneme sahiptir. Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarından elde edilen çıktının niteliği, uygulanan kontrol stratejilerine, donanıma ve kullanılan enerjiye bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterebilir. Bu analiz, farklı durumda nasıl performans gösterdiğini belirlememize yardımcı olur ve bu bilgileri kullanarak motorun çalışmasını daha etkili ve verimli hale getirmemizi sağlar.

Bu durumda, motorun hızının voltajla doğru orantılı olarak arttığına dikkat çekmekte fayda var. İdeal durumda, voltajla lineer bir şekilde artan bir motor hızı beklenir. Bu, motorun verimliliği ve performansının anahtar bir göstergesidir ve motorun enerjiyi nasıl kullandığını ve bunu ne kadar etkili bir şekilde dönüştürdüğünü gösterir.



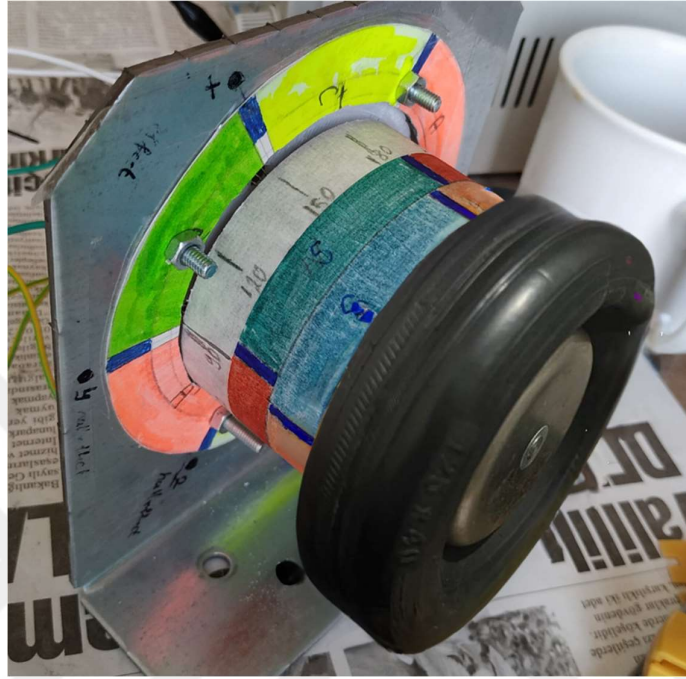
Şekil 3.19. BLDC motorun DC motor kuplajlı hali

Deneyisel sonuçlarımız, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun maksimum hızının 3600 devir/dakika olduğunu göstermektedir. DC motorla kuplajlı olan motorda DC motor boşa olsa bile küçük kayıplar oluşacaktır (Şekil3.19.). Bu kayıplara rağmen motorun 3550 devir/dakika hıza ulaştığı görülmüştür. Bu, motorun verimliliğinin ve performansının, belirlenen hız limitine ulaşabildiğini ve bu hızda bile kararlı bir performans sağlayabildiğini gösterir.

Ayrıca, giriş ve çıkış değerleri ile duty cycle değerlerinin beklentilere uygun olduğu görülmüştür. Bu, motor kontrol sisteminin gereklilikleri karşıladığını ve kontrol stratejilerinin başarılı bir şekilde uygulandığını gösterir.

Sonuç olarak, bu sonuçlar Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun enerji verimli bir şekilde çalıştığını ve belirlenen kontrol stratejilerinin, motorun hızını başarılı bir şekilde yönetmeye yardımcı olduğunu göstermektedir. Bu, Fırçasız Doğru Akım (BLDC)

motorlarının daha farklı uygulamada etkili ve güvenilir bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

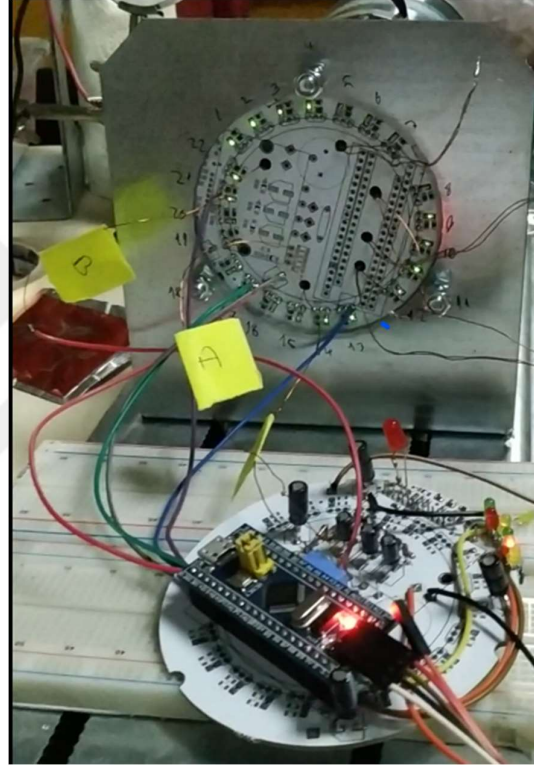


Şekil 3.20. Hub motor ve lastiğin birlikte görüntüsü.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Sistem Entegrasyonunun Değerlendirilmesi

Entegrasyonda en zorlayıcı safha Hall effect sensörlerinin yerleştirilmesi bölümü oldu. Sensörlerin küçük açılarla da olsa uzaklaşması tork ve güç değerlerini büyük ölçüde olumsuz etkiledi. Bu etkileri gidermek adına denemeler yapmak için 15 derecelik farklı açılarla duran birden fazla Hall effect sensörü ile durum test edildi.



Şekil 4.1. Motorun farklı sensör açılarında verdiği tepkinin testi

Sistem entegrasyonu aşaması, tüm bileşenlerin bir araya getirilip birbirleriyle doğru bir şekilde çalıştığından emin olma sürecini içerir. Bu çalışmada, farklı teknolojilerin ve komponentlerin bir araya getirilmesi ve bir Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sisteminin başarılı bir şekilde oluşturulması gerçekleştirildi. Sistem entegrasyonunun süreci boyunca, her bir komponentin birlikte çalışabilirliği değerlendirildi ve sistemin genel performansı kontrol edildi. Sonuçlar, bütün sistemin başarılı bir şekilde çalıştığını ve beklentilere uygun bir performans gösterdiğini göstermiştir.

4.2 Kontrol Algoritması Performansı

Kontrol algoritması, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorunun performansını ve enerji verimliliğini optimize etme kapasitesi açısından hayati bir öneme sahip. Bu araştırmada kullanılan kontrol algoritması, motorun hızını ve torkunu etkili bir şekilde kontrol etmeyi başardı. Ayrıca, kontrol algoritması, belirlenen hız limitine ulaşabildiği ve bu hızda bile kararlı bir performans sağlayabildiği için motorun maksimum hızının 3600 devir/dakika olduğunu göstermiştir. Ayrıca sensörsüz kontrol metoduna göre yüzde 10 daha fazla tork elde edilerek elektrikli araçlar için kullanıma daha uygun hale getirilmiştir. Bu çalışmada hedef daha çok hafif elektrikli araçlar olduğundan diğer pahalı sensörlere gerek kalmadan istenen başarıya ulaşılmıştır.

4.3 Sensörler ve Sinyal İşleme Sonuçları

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sisteminin etkin bir biçimde işleyişini sağlamak, beraberinde bir dizi kritik unsuru da gerektirir. Bu unsurların başında ise hiç şüphesiz sinyal işleme ve sensör verileri gelir.

Sensörler, özellikle hız ve tork gibi temel işlem parametrelerinin sürekli ve güvenilir ölçümünü sağlamak adına oldukça hayati bir role sahiptir. Farklı sensör türleri, motorun farklı yönlerinin izlenmesi ve kontrol edilmesi için kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, motorun hız ve tork kontrolünü etkin bir şekilde sağlamada, sensörlerin ve sinyal işleme tekniklerinin ne denli mühim bir rol oynadığına dair ciddi veriler elde edilmiştir.

Sinyal işleme ise, toplanan sensör verilerinin kullanışlı bilgilere dönüştürülmesi ve motor kontrol algoritmasının bu bilgileri kullanarak motorun hız ve torkunu uygun bir şekilde ayarlaması için gereklidir. Sinyal işleme tekniklerinin doğru ve etkin bir şekilde kullanılması, sistemin genel verimliliği ve motor kontrolünün hassasiyeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur.

Dahası bu araştırma hem sensörlerin hem de sinyal işleme tekniklerinin, etkin bir BLDC motor kontrol sisteminin temel yapı taşlarından olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Her iki unsuru birleştiren yaklaşım, yüksek hassasiyetli motor kontrolünü mümkün kılar ve enerji verimliliği ile sistem performansını ciddi anlamda iyileştirir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmaların bu alanlarda daha da derinlemesine gitmesi ve bu teknolojilerin daha da geliştirilmesi önemli bir gereklilik haline gelmiştir.

4.4 Güç Modülü ve Sürüş Sistemi Analizi

Motor kontrol sistemlerinin çekirdeğini oluşturan güç modülü ve sürüş sistemi, sistemlerin enerji verimliliği ve genel performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. İşleyişin merkezinde yer alan bu iki unsur, sistem verimliliğini ve motor kontrolünün genel uygulanabilirliğini büyük ölçüde belirler.

Bu bağlamda güç modülü, sistem verimliliğinde merkezi bir rol oynar. Güç dönüşümünün ana kaynağı olarak, genel enerji verimliliği ve kontrol hassasiyeti üzerinde doğrudan bir etkisi bulunur. İdeal bir güç modülü, enerjiyi hızla ve doğru bir şekilde işler, böylece motorun gereksinimlerini anında karşılar ve yüksek verimlilik oranlarına ulaşır. Bu çalışmada tasarlanan ve kullanılan güç modülünün, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorun enerji verimliliğini ve genel performansını belirgin ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Diğer yandan sürüş sistemi, motorun hız ve tork kontrolüne doğrudan etki eder. Sürüş sistemi, motorun hareket kabiliyetini etkin bir şekilde kontrol ederken, enerji verimliliği ve performansın optimize edilmesi de dahil olmak üzere çeşitli hedeflere ulaşmayı mümkün kılar. Sürüş sistemi ve güç modülü arasındaki etkin koordinasyon, motorun genel performansını önemli ölçüde artırabilir ve enerji verimliliğini maksimize edebilir. Bu çalışmada, kullanılan sürüş sisteminin, BLDC motorun hız ve tork kontrolünü etkin bir şekilde yönettiği ve genel enerji verimliliğini artırdığı belirlenmiştir.

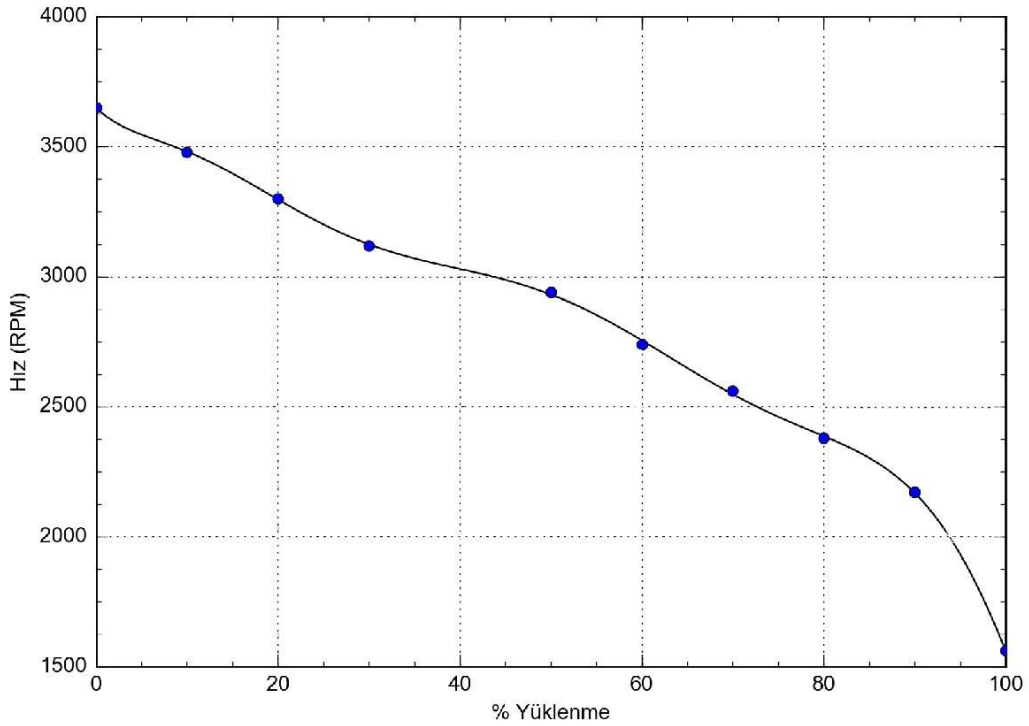
Sonuç olarak, güç modülü ve sürüş sisteminin etkin bir şekilde koordine edilmesi ve optimize edilmesi, BLDC motor kontrol sistemlerinin genel performansını ve enerji verimliliğini artırmada kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalarda bu iki unsura daha fazla odaklanılması önerilir.

4.5 Testler ve Validasyon Sonuçları

Testler ve validasyon süreçleri, bu araştırma dahilindeki Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sistemlerinin tasarımının ve işleyişinin ne ölçüde başarılı olduğunu gösteren temel belirleyicilerdir. Test süreçleri, sistem elemanlarının uygulanabilirliğini, kullanılabilirliğini ve performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, testler ve validasyon süreçleri kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Motor kontrol sistemi, çeşitli yük koşulları ve operasyonel durumlar altında test edilmiştir. Bu testler sırasında, güç modülü, sürüş sistemi, kontrol algoritması

ve sensörlerin performansı ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, sistemin genel enerji verimliliği ve yük altında hız kontrol performansı da test edilmiştir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. BLDC Motorun akuple edilmiş DC motorla yüklenme grafiği

Test sonuçları, motor kontrol sisteminin genel verimliliği ve güvenilirliği konusunda bize değerli bilgiler vermiştir. Güç modülünün ve sürüş sisteminin, motorun enerji verimliliği ve genel performansını büyük ölçüde artırdığı görülmüştür. Kontrol algoritmasının etkin bir şekilde motor hızını ve torkunu kontrol ettiği ve sensörlerin gerekli geri bildirimleri sağlayabildiği belirlenmiştir.

Validasyon süreçleri de benzer bir şekilde başarılı olmuştur. Test sonuçları, tasarlanan kontrol sistemlerinin teorik modellerle ve beklentilerle uyumlu olduğunu doğrulamıştır. Bu durum, tasarlanan kontrol sisteminin pratikte uygulanabilir ve etkin olduğunu gösterir.

Sonuç olarak, test ve validasyon süreçlerinin sonuçları, tasarlanan BLDC motor kontrol sistemlerinin başarılı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, BLDC motor kontrol sistemlerinin tasarımı ve uygulanması konusunda değerli bilgiler sağlar ve gelecekteki çalışmalar için yararlı bir temel oluşturur. Bu çerçevede, bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ışığında, test ve validasyon süreçlerinin, motor kontrol sistemlerinin tasarımı ve uygulanması süreçlerinde kritik bir rol oynadığı vurgulanabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

. Bu araştırmanın sonuçlarına bakıldığında, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorlarının kontrolünde kullanılan sistem entegrasyonu, kontrol algoritması, sensör ve sinyal işleme teknikleri, güç modülü ve sürüş sistemi hakkında önemli bulgular elde edildi. Bu bileşenlerin her biri, motor kontrol sisteminin genel performansı ve enerji verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görüldü.

Sistem entegrasyonu süreci, farklı komponentlerin ve teknolojilerin bir araya getirilmesi ve bir Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sisteminin başarılı bir şekilde oluşturulması ile sonuçlandı. Bu, komponentlerin birbirleriyle etkin bir şekilde çalışabilme yeteneklerini ve genel sistem performansını değerlendirme fırsatı sağladı.

Kontrol algoritması, motorun hızını ve torkunu etkin bir şekilde kontrol ederek motorun performansını ve enerji verimliliğini optimize etti. Sensörler ve sinyal işleme teknikleri de motor kontrolünün önemli bir parçasıydı, hız ve tork kontrolüne katkıda bulunarak performansın genel kalitesini yükselttiler.

Güç modülü ve sürüş sistemi, motor kontrol sisteminin enerji verimliliği ve performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip oldu. Güç modülünün ve sürüş sisteminin, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorun enerji verimliliğini ve genel performansını artırdığı gözlemlendi.

5.2 Öneriler

Araştırmamızın sonuçlarına dayanarak, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sistemleri için bir dizi öneri geliştirdik. İlk olarak, sistem entegrasyonu sürecinde, tüm bileşenlerin birlikte çalışabilirliğinin düzenli olarak kontrol edilmesi ve test edilmesi önemlidir. Bu, olası sorunların erken tespiti ve hızlı çözümü için kritik bir adımdır.

İkinci olarak, kontrol algoritması, motorun hızını ve torkunu etkin bir şekilde kontrol etme yeteneği açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle, bu algoritmaların sürekli olarak güncellenmesi ve iyileştirilmesi gerekmektedir.

Üçüncü olarak, sensörler ve sinyal işleme tekniklerinin motorun hız ve tork kontrolünü sağlamada önemli bir rol oynadığı bulundu. Bu nedenle, bu tekniklerin ve sensörlerin kullanımı ve uygulanması üzerinde daha fazla çalışılması önerilir.

Dördüncü olarak, güç modülü ve sürüş sistemi, enerji verimliliği ve performansı açısından kritik öneme sahip olduğu için, bu sistemlerin sürekli olarak iyileştirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Son olarak, gelecekteki araştırmaların, daha sofistike kontrol algoritmaları ve enerji verimli güç modülleri ve sürüş sistemlerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşması önerilir. Bu, Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motor kontrol sistemlerinin performansını ve enerji verimliliğini daha da artırabilir ve bu tür sistemlerin geniş bir dizi uygulamada daha yaygın olarak kullanılmasını sağlayabilir.



KAYNAKLAR

- Koçaş, G., & Akdemir, B. (2023). BLDC Motor Controller Design For Light Cars Aiming Safety Driving. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(4), 415-419.
- Sarıtaş İ. 2008, Elektromanyetik Filtre Tasarımı ve Yapay Zeka Yöntemler ile Adaptif Kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya 2008.
- Yılmaz S., 2007, Bulanık Mantık ve Mühendislik Uygulamaları, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, No:289, Kocaeli
- Aydoğdu Ö., 2006, Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici ile Sensörsüz Kontrolü, Doktora Tezi , Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yılmaz M., 2005, Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aydogdu Ö., Akkaya R. 2005, DSP Based Fuzzy Control of a Brushless DC Motor Without Position and Speed Sensors. *Proc. of 4th Int. Advanced Technologies Symposium*, pp.182-187 Konya, September 28-30.
- Yılmaz, M., Tuncay, R. N., Ustun, O., 2004, A wavelet study of sensorless control of brushless DC motor through rapid prototyping approach, *IEEE International Conference on Mechatronics*, Haziran 2004.
- Su G.J., McKeever J.W., 2004, Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors With Improved Speed Range. *IEEE Transactions on Power Electronics* 19: 296-302.
- Jianwen Shao, Nolan, D., Teissier, M., Swanson, D., 2003, A novel microcontrollerbased sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39, Issue: 6, 1734 - 1740,.Publication Date: Nov.-Dec.2003. Jianwen Shao; Nolan, D.; Teissier, M.; Swanson, D., 2002, A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps, *Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Conference Record*, 4, 2386- 2392.
- Shao, J., 2003, Direct back EMF detection method for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives, Master of science, Virginia Polytechnic Institute and the State University, September 2003
- Kim, T., 2003, Sensorless control of the BLDC motors from near-zero to full speed, Doctor of Philosophy, Texas A&M University, USA.

- Sing B., Jain K., 2003, Implementation of DSP Based Digital Speed Controller for Permanent Magnet Brushless DC Motor. *IE(I) Journal-EL*. 84: 16-21.
- Lee B., Ehsani M. 2003, Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives. *Electric Power Component and Systems* 31: 841-868.
- Yedamale, P. ,2003, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc. App. Note, USA.
- Jang, G. H., Park, J. H., Chang, J. H., 2002, Position detection and start-up algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductance variation, *Electric Power Applications*, IEE Proceedings, 149, Issue 2, 137 - 142, March 2002.
- Toliyat H.A., Gopalarathnam T. ,2002, AC Machines Controlled as DC Machines (Brushless DC Machines/Electronics). *The Power Electronic Handbook*. Skvarenina T. L. (ed) pp.78-100, CRC Press LLC, New York.
- Şen Z., 2001, Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Sanat Yapım Yayınları, İstanbul
- Mukherjee K., Sengupta S., Bhattacharya T.K., Bhadra S.N. and Chattopadhyay A.K., 2001, Sensorless Operation of a Thyristorized Commutatorless Series Motor Drive, *Electrical Machines and Systems*, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Volume 2, 18-20 Aug. 2001 Page(s): 950- 953 vol.2.
- Batzel T. D., Lee, K. Y., 2000, Slotless permanent magnet synchronous motor operation without a high resolution rotor angle sensor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15, No. 4, December 2000.
- Bonvin, F., Perriard, Y., 2000., BLDC Motor Control in Multiple dq Axes. Paper no.475 Proc. of the IEE Int. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, September 18-19.
- Paul Kettle, Aengus Murray, Moynihan, F., 1998, Sensorless control of a brushless DC motor using an extended Kalman estimator, *PCIM'98 Intelligent Motion* May 1998 Proceedings, 385 - 392.
- Schmidt, P., Wijenayake, A. H., 1997, Sensorless control of a permanent magnet synchronous machine down to near zero speed applied to position motion control, *Proc. IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 21-28.
- Tomita, M., Satoh, M. H., Yamaguchi, S. D., Okuma, S., 1996, Sensorless estimation of rotor position of cylindrical brushless DC motors using eddy current, 4. *International Workshop on Advanced Motion Control Proceedings*, 1-2, 24 - 28, 1996.
- Seog-Joo Kang, Seung-Ki Sul, 1995, Direct torque control of brushless DC motor with nonideal trapezoidal back EMF, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10, Issue

6, 796 – 802, Nov. 1995. Seog-Joo Kang, Seung-Ki Sul, 1995, Direct torque control of the brushless DC motor with nonideal trapezoidal back EMF, Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC '95. Conference Proceedings, 1 Tenth Annual Issue 0, 392 – 398, 5-9 March 1995.

Ohnishi K., Matsui N. and Hori Y., 1994, Estimation, Identification and Sensorless Control in Motion Control System, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 8, August 1994.

Luk, P.C.K., Lee, C.K. 1994, Efficient Modelling for a Brushless DC Motor Drive. Proc. of the 20th. Int. Conf. on IEEE Industrial Electronics Society, Vol.1, pp.188–191 Bologna, September 5-9.

Ertugrul, N., Acarnley, P. P., 1994, A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors, IEEE Transactions on Industry applications, 30, No:1, 126-133, January/February 1994.

Shinkawa, O., Tabata, K., 1993, Wide operation of a sensorless brushless DC motor having an interior permanent magnet motor, Proceedings of Power Conversion Conference, 364-370, Yokohama 1993.

Matsui, N., 1993, Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drives. Proc. of the 19th. Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Vol.2, pp.739-744 Hawaii, November 15-19.

Pillay, P., Krishnan, R., 1989, “Modeling Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives, IEEE Trans. Indst. App. , 25 (2): 24-29 (1989).

Nagata, M., 1987, Control apparatus for brushless motor, US patent, 1987.

Jufer, M., 1985, Self-Commutation of brushless DC motors without encoders, Proceedings of the First European Power Conference, 275-280, Brussels 1985.

EKLER

EK-1 MP9488 entegresi datasheet



MP9488

450V, 300mA, Wide Input,
Step-Down Regulator

DESCRIPTION

The MP9488 is a 7.5V to 450V, wide input, 300mA, step-down converter. The MP9488 is typically used in buck topology, but it can also support buck boost, boost, and flyback topology applications, even if the power supply range is very wide.

The MP9488 employs peak-current and variable-off-time control modes to regulate the output voltage. It integrates a high-voltage start-up circuit and one 500V MOSFET. The very simple structure helps achieve low cost and high input voltage. In light-load condition, the MP9488 peak current and switching frequency decrease as the load decreases, achieving high efficiency. This makes the MP9488 ideal for scooters, E-bikes, and other civil applications.

Full protection features include thermal shutdown, VCC under-voltage lockout (UVLO), overload protection (OLP), short-circuit protection (SCP), and open-loop protection.

The MP9488 is available in a SOIC-8 package.

FEATURES

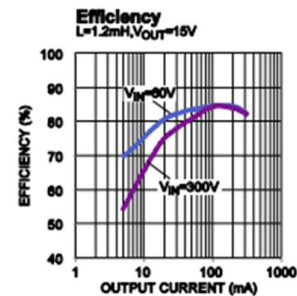
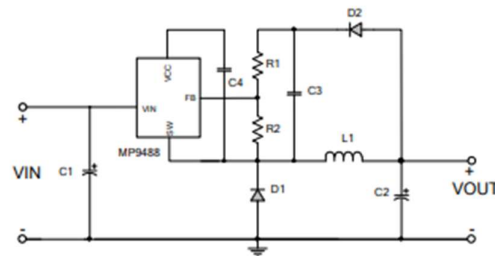
- 7.5V to 450V Wide Input Range
- Integrated 500V MOSFET
- >500mA Switching Current Limit
- Peak-Current and Variable Off-Time Control
- Low VCC Operating Current
- Frequency Foldback
- Limited Maximum Frequency
- Peak Current Compression in Light Load
- Internal High-Voltage Current Source
- Thermal Shutdown (Auto-Restart)
- VCC Under-Voltage Lockout (UVLO) with Hysteresis
- Timer-Based Overload Protection (OLP)
- Short-Circuit Protection (SCP)
- Open-Loop Protection

APPLICATIONS

- Scooter and E-Bike Control Power Supplies
- Solar Energy Systems
- Automotive System Power
- Industrial Power Supplies

All MPS parts are lead-free, halogen-free, and adhere to the RoHS directive. For MPS green status, please visit the MPS website under Quality Assurance. "MPS" and "The Future of Analog IC Technology" are registered trademarks of Monolithic Power Systems, Inc.

TYPICAL APPLICATION





<http://www.fujielectric.com/products/semiconductor/>

6MBP20VSC060-50

IGBT Modules

IGBT MODULE (V series)

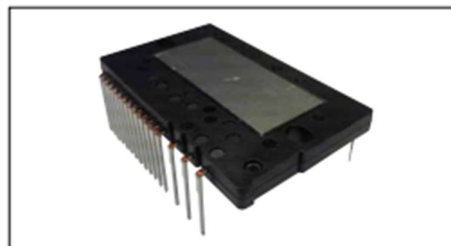
600V / 20A / IPM

■ Features

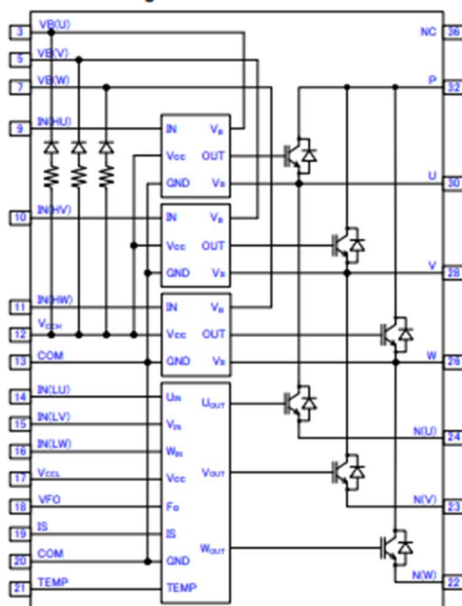
- Low-side IGBTs are separate emitter type
- Short circuit protection
- Temperature sensor output function
- Under voltage protection
- Fault signal output function
- Input interface : TTL (3.3V/5V) Active high logic

■ Applications

AC 100 ~ 240V three phase inverter drive for small power
 AC motor drives (such as compressor motor drive for air conditioner, compressor motor drive for heat pump applications, fan motor drive, ventilator motor drive)



■ Terminal assign and Internal circuit



Pin No.	Pin Name	Pin Description
3	VB (U)	High-side bias voltage for U-phase IGBT driving
5	VB (V)	High-side bias voltage for V-phase IGBT driving
7	VB (W)	High-side bias voltage for W-phase IGBT driving
9	IN (HU)	Signal input for high side U-phase
10	IN (HV)	Signal input for high side V-phase
11	IN (HW)	Signal input for high side W-phase
12	V _{CSH}	High-side control supply
13	COM	Common supply ground
14	IN (LU)	Signal input for low side U-phase
15	IN (LV)	Signal input for low side V-phase
16	IN (LW)	Signal input for low side W-phase
17	V _{CSL}	Low-side control supply
18	VFO	Fault output
19	IS	Over current sensing voltage input
20	COM	Common supply ground
21	TEMP	Temperature sensor output
22	N (W)	Negative bus voltage input for W-phase
23	N (V)	Negative bus voltage input for V-phase
24	N (U)	Negative bus voltage input for U-phase
26	W	Motor W-phase output
28	V	Motor V-phase output
30	U	Motor U-phase output
32	P	Positive bus voltage input
36	NC	No Connection

EK-3 STM32F103 mikrodenetleyici datasheet



STM32F103x8 STM32F103xB

Medium-density performance line Arm[®]-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces

Datasheet - production data

Features

- Arm[®] 32-bit Cortex[®]-M3 CPU core
 - 72 MHz maximum frequency, 1.25 DMIPS / MHz (Dhrystone 2.1) performance at 0 wait state memory access
 - Single-cycle multiplication and hardware division
 - Memories
 - 64 or 128 Kbytes of Flash memory
 - 20 Kbytes of SRAM
 - Clock, reset and supply management
 - 2.0 to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, and programmable voltage detector (PVD)
 - 4 to 16 MHz crystal oscillator
 - Internal 8 MHz factory-trimmed RC
 - Internal 40 kHz RC
 - PLL for CPU clock
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Low-power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC and backup registers
 - 2x 12-bit, 1 μs A/D converters (up to 16 channels)
 - Conversion range: 0 to 3.6 V
 - Dual-sample and hold capability
 - Temperature sensor
 - DMA
 - 7-channel DMA controller
 - Peripherals supported: timers, ADC, SPIs, I²Cs and USARTs
 - Up to 80 fast I/O ports
 - 26/37/51/80 I/Os, all mappable on 16 external interrupt vectors and almost all 5 V-tolerant
- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) and JTAG interfaces
 - Seven timers
 - Three 16-bit timers, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
 - 16-bit, motor control PWM timer with dead-time generation and emergency stop
 - Two watchdog timers (independent and window)
 - SysTick timer 24-bit downcounter
 - Up to nine communication interfaces
 - Up to two I²C interfaces (SMBus/PMBus[®])
 - Up to three USARTs (ISO 7816 interface, LIN, IrDA capability, modem control)
 - Up to two SPIs (18 Mbit/s)
 - CAN interface (2.0B Active)
 - USB 2.0 full-speed interface
 - CRC calculation unit, 96-bit unique ID
 - Packages are ECOPACK[®]

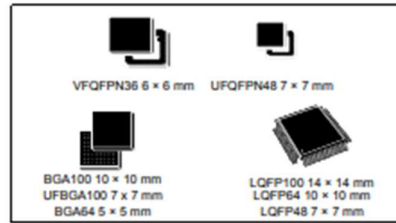


Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F103x8	STM32F103C8, STM32F103R8 STM32F103V8, STM32F103T8
STM32F103xB	STM32F103RB, STM32F103VB, STM32F103CB, STM32F103TB

EK-4 NE555 entegresi datasheet



NA555, NE555, SA555, SE555

SLFS022I – SEPTEMBER 1973 – REVISED SEPTEMBER 2014

xx555 Precision Timers

1 Features

- Timing From Microseconds to Hours
- Astable or Monostable Operation
- Adjustable Duty Cycle
- TTL-Compatible Output Can Sink or Source Up to 200 mA
- On Products Compliant to MIL-PRF-38535, All Parameters Are Tested Unless Otherwise Noted. On All Other Products, Production Processing Does Not Necessarily Include Testing of All Parameters.

2 Applications

- Fingerprint Biometrics
- Iris Biometrics
- RFID Reader

3 Description

These devices are precision timing circuits capable of producing accurate time delays or oscillation. In the time-delay or mono-stable mode of operation, the timed interval is controlled by a single external resistor and capacitor network. In the a-stable mode of operation, the frequency and duty cycle can be controlled independently with two external resistors and a single external capacitor.

The threshold and trigger levels normally are two-thirds and one-third, respectively, of V_{CC} . These levels can be altered by use of the control-voltage terminal. When the trigger input falls below the trigger level, the flip-flop is set, and the output goes high. If the trigger input is above the trigger level and the threshold input is above the threshold level, the flip-flop is reset and the output is low. The reset (RESET) input can override all other inputs and can be used to initiate a new timing cycle. When RESET goes low, the flip-flop is reset, and the output goes low. When the output is low, a low-impedance path is provided between discharge (DISCH) and ground.

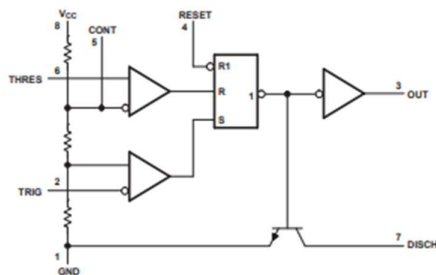
The output circuit is capable of sinking or sourcing current up to 200 mA. Operation is specified for supplies of 5 V to 15 V. With a 5-V supply, output levels are compatible with TTL inputs.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
xx555	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm
	SOP (8)	6.20 mm × 5.30 mm
	TSSOP (8)	3.00 mm × 4.40 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.91 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

4 Simplified Schematic



EK-5 Systeme ait yazılım

```

/**

*****
*****
* File Name      : main.c
* Description    : Main program body

*****
*****
*
* COPYRIGHT(c) 2017 STMicroelectronics
*
* Redistribution and use in source and binary forms, with or without
modification,
* are permitted provided that the following conditions are met:
* 1. Redistributions of source code must retain the above copyright notice,
*   this list of conditions and the following disclaimer.
* 2. Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice,
*   this list of conditions and the following disclaimer in the documentation
*   and/or other materials provided with the distribution.
* 3. Neither the name of STMicroelectronics nor the names of its contributors
*   may be used to endorse or promote products derived from this software
*   without specific prior written permission.
*
* THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND
CONTRIBUTORS "AS IS"
* AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT
NOT LIMITED TO, THE
* IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR
A PARTICULAR PURPOSE ARE
* DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT HOLDER OR
CONTRIBUTORS BE LIABLE
* FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY,
OR CONSEQUENTIAL
* DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF
SUBSTITUTE GOODS OR
* SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS
INTERRUPTION) HOWEVER
* CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN
CONTRACT, STRICT LIABILITY,
* OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN
ANY WAY OUT OF THE USE
* OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF
SUCH DAMAGE.
*

```

```

*****
*****
    */
    /* Includes -----*/
    #include "main.h"
    #include "stm32f1xx_hal.h"

    /* USER CODE BEGIN Includes */

    #define HALL_A HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,GPIO_PIN_6)
    #define HALL_B HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,GPIO_PIN_7)
    #define HALL_C HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,GPIO_PIN_8)

    #define L1_ON HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_6,1)
    #define L2_ON HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_7,1)
    #define L3_ON HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_0,1)

    #define L1_OFF HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_6,0)
    #define L2_OFF HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_7,0)
    #define L3_OFF HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_0,0)

    #define H1_PWM_ON TIM1->CCR1=throttle
    #define H2_PWM_ON TIM1->CCR2=throttle
    #define H3_PWM_ON TIM1->CCR3=throttle

    #define H1_PWM_OFF TIM1->CCR1=0
    #define H2_PWM_OFF TIM1->CCR2=0
    #define H3_PWM_OFF TIM1->CCR3=0

    /* USER CODE END Includes */

    /* Private variables -----*/
    ADC_HandleTypeDef hadc1;

    TIM_HandleTypeDef htim1;

    /* USER CODE BEGIN PV */
    /* Private variables -----*/

    /* USER CODE END PV */

    /* Private function prototypes -----*/
    void SystemClock_Config(void);
    void Error_Handler(void);
    static void MX_GPIO_Init(void);
    static void MX_ADC1_Init(void);
    static void MX_TIM1_Init(void);

    void HAL_TIM_MspPostInit(TIM_HandleTypeDef *htim);

```

```

/* USER CODE BEGIN PFP */
/* Private function prototypes -----*/

/* USER CODE END PFP */

/* USER CODE BEGIN 0 */

int throttle, adc;

void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
//      HAL_ADC_Start(&hadc1);
//      HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1,6);
//      HAL_ADC_Start(&hadc1);
//      HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1,1);
//      adc=HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
//      throttle=adc*(13439/4095);

//      throttle=HAL_ADC_GetValue(&hadc1)*13439/4095;
//      if(htim->Instance==TIM1) //Fungsi Interrupt Timer
//      {
//STEP 1          if(HALL_A==1&&HALL_B==0&&HALL_C==1)
//      {
//                  H1_PWM_ON;
//                  L1_OFF;

//                  H2_PWM_OFF;
//                  L2_OFF;

//                  H3_PWM_OFF;
//                  L3_ON;
//      }
//      else if(HALL_A==1&&HALL_B==0&&HALL_C==0)
//STEP 2
//      {
//                  H1_PWM_OFF;
//                  L1_OFF;

//                  H2_PWM_ON;
//                  L2_OFF;

//                  H3_PWM_OFF;
//                  L3_ON;
//      }
//      else if(HALL_A==1&&HALL_B==1&&HALL_C==0)
//STEP 3
//      {

```

```

        H1_PWM_OFF;
        L1_ON;

        H2_PWM_ON;
        L2_OFF;

        H3_PWM_OFF;
        L3_OFF;
    }
    else if(HALL_A==0&&HALL_B==1&&HALL_C==0)
//STEP 4
    {
        H1_PWM_OFF;
        L1_ON;

        H2_PWM_OFF;
        L2_OFF;

        H3_PWM_ON;
        L3_OFF;
    }
    else if(HALL_A==0&&HALL_B==1&&HALL_C==1)
//STEP 5
    {
        H1_PWM_OFF;
        L1_OFF;

        H2_PWM_OFF;
        L2_ON;

        H3_PWM_ON;
        L3_OFF;
    }
    else if(HALL_A==0&&HALL_B==0&&HALL_C==1)
//STEP 6
    {
        H1_PWM_ON;
        L1_OFF;

        H2_PWM_OFF;
        L2_ON;

        H3_PWM_OFF;
        L3_OFF;
    }
    }
}

/* USER CODE END 0 */

```

```

int main(void)
{

    /* USER CODE BEGIN 1 */

    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration-----*/

    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
    HAL_Init();

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_TIM1_Init();

    /* USER CODE BEGIN 2 */
    //INISIALISASI TIMER DAN MEMANGGIL
        HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim1);
        HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
        HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
        HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
    //    HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*) &Nilai_ADC, 1);

    /* USER CODE END 2 */

    /* Infinite loop */
    /* USER CODE BEGIN WHILE */
    while (1)
    {
        /* USER CODE END WHILE */

        /* USER CODE BEGIN 3 */

    }
    /* USER CODE END 3 */

}

/** System Clock Configuration
*/
void SystemClock_Config(void)
{

```

```

RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct;
RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct;
RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit;

/**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
*/
RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
RCC_OscInitStruct.HSEPredivValue = RCC_HSE_PREDIV_DIV1;
RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
*/
RCC_ClkInitStruct.ClockType =
RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYCLK
|RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) !=
HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_ADC;
PeriphClkInit.AdcClockSelection = RCC_ADCPCLK2_DIV6;
if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}

/**Configure the SysTick interrupt time
*/
HAL_SYSTICK_Config(HAL_RCC_GetHCLKFreq()/1000);

/**Configure the SysTick
*/
HAL_SYSTICK_CLKSourceConfig(SYSTICK_CLKSOURCE_HCLK);

/* SysTick_IRQn interrupt configuration */

```



```

    HAL_NVIC_SetPriority(SysTick_IRQn, 0, 0);
}

/* ADC1 init function */
static void MX_ADC1_Init(void)
{
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig;

    /**Common config
    */
    hadc1.Instance = ADC1;
    hadc1.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
    hadc1.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
    hadc1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
    hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc1.Init.NbrOfConversion = 1;
    if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    /**Configure Regular Channel
    */
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;
    sConfig.Rank = 1;
    sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_7CYCLES_5;
    if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

/* TIM1 init function */
static void MX_TIM1_Init(void)
{
    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig;
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC;
    TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig;

    htim1.Instance = TIM1;
    htim1.Init.Prescaler = 0;
    htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim1.Init.Period = 13439;
    htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
    if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)

```

```

    {
        Error_Handler();
    }

    sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
    sMasterConfig.MasterSlaveMode =
TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
    if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig) !=
HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC.Pulse = 0;
    sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
    sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
    sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
    sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
    sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
    if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC,
TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC,
TIM_CHANNEL_2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC,
TIM_CHANNEL_3) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
    sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
    sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
    sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 0;
    sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
    sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
    sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput =
TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
    if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig)
!= HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

```

```

    }

    HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);

}

/** Configure pins as
    * Analog
    * Input
    * Output
    * EVENT_OUT
    * EXTI
*/
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOD_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,      GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_7,
GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pins : PA5 PA6 PA7 */
    GPIO_InitStructure.Pin = GPIO_PIN_5|GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_7;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

    /*Configure GPIO pins : PB6 PB7 PB8 */
    GPIO_InitStructure.Pin = GPIO_PIN_6|GPIO_PIN_7|GPIO_PIN_8;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

}

/* USER CODE BEGIN 4 */

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief This function is executed in case of error occurrence.
 * @param None
 * @retval None
 */

```

```

void Error_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN Error_Handler */
    /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
    while(1)
    {
    }
    /* USER CODE END Error_Handler */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT

/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 * where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t* file, uint32_t line)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
    /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
    ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
    /* USER CODE END 6 */

}

#endif

/**
 * @}
 */

/**
 * @}
 */

/***** (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****/
FILE*****/

```