

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNALARININ KONTROLÜ VE BİR
UYGULAMA DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

NAZİF HAKAN YENİAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. M. HADİ SARUL**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNALARININ KONTROLÜ VE BİR
UYGULAMA DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Nazif Hakan YENİAY tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. M. Hadi SARUL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. M. Hadi SARUL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hacı BODUR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR
Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yüksek verimlilik, maliyet ve kontrol edilebilirlik açısından büyük avantajları olan ve son yıllarda gittikçe kullanımı ve üzerine çalışmaların arttığı daimî mıknatıslı makineler incelenmiş olup bu makinelerin sınıfa giren fırçasız DC motorlar uygulama konusu seçilmiştir. Fırçasız DC motorların sensörlü ve sensörsüz sürücü yapıları üzerine çalışılmış olup sensörsüz sürücü devresi uygulama olarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı ve her konuda verdiği destekle kariyerimi yönlendirmemde yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. M. Hadi SARUL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2018

Nazif Hakan YENİAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
FIRÇASIZ DAİMİ MIKNATISLI MAKİNALAR	5
2.1 Fırçasız DC Motorlar	8
2.2 Fırçasız DC Motor Yapısı	9
2.2.1 Stator Yapısı	9
2.2.2 Rotor Yapısı	10
2.3 Çalışma Prensibi	13
2.4 Kare Dalga Sürücü ile İdeal Tork-Hız Karakteristiği	18
2.5 Matematiksel Modeli	19
BÖLÜM 3	
SÜRÜCÜ TASARIMI	22
3.1 Fırçasız DC Motor Sürücüleri	22
3.2 Fırçasız DC Motor Sensörlü Sürücüsü.....	26

3.2.1	Fırçasız DC Motor Sensörlü Sürücü Çalışma Prensibi.....	26
3.2.2	Fırçasız DC Motor Sensörlü Hız Kontrolü	28
3.2.2.1	Açık Çevrim Hız Kontrolü	29
3.2.2.2	Kapalı Çevrim Hız Kontrolü	29
3.2.2.3	PI Kontrolü	30
3.2.3	TMS320F28335 DSP Özellikleri	32
3.2.4	PWM Modülü	34
3.2.4.1	Zaman-Taban Altmodülü	35
3.2.4.2	Sayıcı Karşılaştırıcı Altmodülü	36
3.2.4.3	İşlem Niteleyicisi Altmodülü	36
3.2.4.4	Ölü zaman Altmodülü	36
3.2.4.5	PWM-kıyıcı Altmodülü	36
3.2.4.6	Trip-zone Altmodülü	37
3.2.4.7	Olay Tetikleyici Altmodülü	37
3.2.5	ADC Modülü	37
3.3	Fırçasız DC Motor Sensörsüz Sürücüsü	39
3.3.1	Fırçasız DC Motor Sensörsüz Sürücü Çalışma Prensibi	39
3.3.2	Zıt EMK Algılama Yöntemi	41
3.3.3	Zıt EMK Algılama Devresi.....	47
3.3.4	Sensörsüz Sürücü Kontrolü.....	48
3.3.4.1	Hizalama.....	53
3.3.4.2	Koşu	53
3.3.4.3	Başlangıç	53
3.3.5	Sensörsüz Sürücü Gerçeklenmesi	57
3.3.6	Deneysel Sonuçlar	63

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGE LİSTESİ

β_M	Rotor üzerindeki mıknatısın açısız olarak yaptığı yay
ψ	Bobin akı-bağlantısı
e	İndüklenen Elektro Motor Kuvvet
θ	Radyan olarak mekanik rotor pozisyonu
ω_m	Mekanik açısız hız (rad / s)
γ	İki bobin arasındaki açısız mesafe
T_c	Bobin tur sayısı
i	Faz akımı
T_e	Elektromanyetik tork
B_g	Ortalama akı yoğunluğu
ϕ_g	Hava boşluğu akısı
r	Stator delik yarıçapı
L_{stk}	Yığın uzunluğu
p	Kutup çiftlerinin sayısı
T_{ph}	Faz başına bobin tur sayısı
k_E	Zıt Elektro Motor Kuvvet sabiti (Vs/rad)
k_T	Tork sabiti (Nm/A)
e_{LL}	Fazlararası Elektro Motor Kuvvet
m	Faz sayısı
T_{avg}	Ortalama elektromanyetik tork
R	Direnç
I	DC akım
ω_o	Boştaki hız
T_o	Kilitlenme (stall) torku
I_o	Durma akımı veya kilitli rotor akımı
T_n	Anahtar
L_s	Stator sargılarındaki eşdeğer endüktans
V_{nn}	Faz voltajı
R_s	Faz direnci
L_s	Stator sargılarındaki eşdeğer endüktans
L_m	Karşılıklı endüktans
L_{ss}	Her faz endüktansı

Q	Anahtar (Mosfet)
K_i	İntegral Kazancı
K_p	Orantılı Kazanç
I_p	Primer akım
I_s	Sekonder akım
R_M	Ölçüm direnci
N_p	Primer tur sayısı
N_s	Sekonder tur sayısı
K_N	Transdüser dönüştürme oranı
f_c	Kesim Frekansı
G	Kazanç
v_P	Pozitif DC baranın terminal gerilimi
v_N	Negatif DC baranın terminal gerilimi
v_O	Boştaki fazın terminal gerilimi
i_P	Pozitif baraya bağlı fazın akımı
i_N	Negatif baraya bağlı fazın akımı
i_O	Boştaki fazın akımı
e_P	Pozitif baraya bağlı fazda indüklenen Elektro Motor Kuvvet
e_N	Negatif baraya bağlı fazda indüklenen Elektro Motor Kuvvet
e_O	Boştaki fazda indüklenen Elektro Motor Kuvvet

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
ADC	Analog Dijital Çevirici
BLDC	Fırçasız Doğru Akım
DC	Doğru Akım
DSP	Sayısal İşaret İşleyici
Elec	Elektriki
EMI	Elektromanyetik Girişim
EMK	Elektro Motor Kuvvet
EPWM	Gelişmiş Darbe Genişlik Modülasyonu
FOC	Alan Odaklı Kontrol
GND	Toprak
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
LDO	Düşük Gerilim Düşümlü
PCB	Baskı Devre Kartı
PI	Oransal İntegral Denetleyici
PID	Oransal İntegral Türevsel Denetleyici
PM	Daimî Mıknatıslı
PMSM	Daimî Mıknatıslı Senkron Makine
PWM	Darbe Genişlik Modülasyon
Zıt EMK	Zıt Elektro Motor Kuvvet

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Fırçasız Daimî Mıknatıslı Motor6
Şekil 2. 2	İç Rotorlu Daimî mıknatıslı fırçasız AC motor7
Şekil 2. 3	Yara alanlı senkron AC motor7
Şekil 2. 4	Tek fazlı fırçasız daimî mıknatıslı motor8
Şekil 2. 5	BLDC Motor Kesiti9
Şekil 2. 6	BLDC Stator Yapısı ve Sargıları10
Şekil 2. 7	Farklı türde BLDC Rotor Kesitleri.....11
Şekil 2. 8	İç ve Dış Rotorlu BLDC13
Şekil 2. 9	Zıt EMK Oluşumu.....14
Şekil 2. 10	BLDC motor için Akı, EMK ve Akım Dalga formları17
Şekil 2. 11	Tork-Hız Karakteristiği18
Şekil 2. 12	PWM inverteri ve BLDC motorun eşdeğer devresi19
Şekil 3. 1	Fazlararası Trapazeoidal Zıt-EMK23
Şekil 3. 2	Yıldız bağlı Fırçasız Dc Motor için Sürücü Devresi.....24
Şekil 3. 3	Faz akımları i_1, i_2, i_3 , Faz EMK'leri e_1, e_2, e_3 , Faz torkları T_1, T_2, T_3 için ideal dalga şekilleri ve Yıldız bağlı BLDC motorun toplam elektromanyetik torku 25
Şekil 3. 4	BLDC sensörlü kontrolü blok diyagramı27
Şekil 3. 5	Açık Çevrim BLDC hız kontrol şeması29
Şekil 3. 6	Kapalı Çevrim BLDC hız kontrol şeması29
Şekil 3. 7	PI kontrolcüsü fonksiyonel gösterimi30
Şekil 3. 8	PI kontrolcüsüyle hız kontrol sistemi31
Şekil 3. 9	F28335'in fonksiyonel blok diyagramı.....33
Şekil 3. 10	ePWM Alt Modülleri ve İç Sinyal Bağlantıları35
Şekil 3. 11	ADC modülünün blok diyagramı38
Şekil 3. 12	Hall sensörü sinyali, zıt EMK, çıkış torku ve faz akımı40
Şekil 3. 13	BLDC sensörsüz kontrol blok diyagramı41
Şekil 3. 14	Yüksek taraf ve alçak taraf PWM kontrol sinyalleri42
Şekil 3. 15	Sargı enerjilenme sırasına göre enerji akışı43
Şekil 3. 16	BLDC motorun sargıların terminal voltajları44
Şekil 3. 17	PWM kontrol sinyalleri45
Şekil 3. 18	Ölçülen sonuçlar, terminal voltajı45
Şekil 3. 19	Terminal gerilimi. (a) Yükselen kenar (b) Düşen kenar46
Şekil 3. 20	Zıt EMK Algılama Devre Şeması47

Şekil 3. 21	Sensörsüz BLDC sürücü konsepti	48
Şekil 3. 22	Komütasyon Kontrol Aşamaları	50
Şekil 3. 23	Sensörsüz Kontrol Akış Diyagramı.....	51
Şekil 3. 24	Zıt EMK sıfır geçişi tespitiyle BLDC komütasyon akış diyagramı	52
Şekil 3. 25	Fırçasız Dc Motor için Sürücü Devresi	54
Şekil 3. 26	BLDC başlangıç algoritmasının akış diyagramı	56
Şekil 3. 27	BLDC Motoru.....	57
Şekil 3. 28	BLDC Sürücü Devre Şeması.....	58
Şekil 3. 29	BLDC Sürücü PCB Assembly	59
Şekil 3. 30	BLDC Sürücü PCB Üst Katman Çizimi.....	59
Şekil 3. 31	BLDC Sürücü PCB Alt Katman Çizimi	60
Şekil 3. 32	BLDC Sürücü PCB Üst Katman.....	61
Şekil 3. 33	BLDC Sürücü PCB Alt Katman.....	61
Şekil 3. 34	BLDC Sürücü PCB Dizgisi Yapılmış Halde	62
Şekil 3. 35	BLDC Sürücü ve Motor	62
Şekil 3. 36	BLDC Motor, Sürücü ve 24V Güç Kaynağı	63
Şekil 3. 37	Faz Gerilimi	64
Şekil 3. 38	Faz gerilimi Pozitif	64
Şekil 3. 39	Faz gerilimi Negatif.....	65
Şekil 3. 40	Faz gerilimi Düşen Kenar	65
Şekil 3. 41	Faz gerilimi Yükselen Kenar	66
Şekil 3. 42	Faz Gerilimi A	66
Şekil 3. 43	Faz Gerilimi B	67
Şekil 3. 44	Deneysel sonuç, Doluluk oranı hız grafiği.....	67

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	BLDC motor sürücüsü için komütasyon çizelgesi24
Çizelge 3. 2	BLDC motor sürücüsü için saat yönü döndürme komütasyon çizelgesi..28
Çizelge 3. 3	Anahtarlama Sırası.....55
Çizelge 3. 4	Motor özellikleri57

DAİMİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNALARININ KONTROLÜ VE BİR UYGULAMA DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Nazif Hakan YENİAY

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Hadi SARUL

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları daha iyi tork-hız karakteristiği, yüksek dinamik tepki, yüksek verim, uzun çalışma ömrü, sessiz çalışma, daha yüksek hız aralıkları gibi özelliklerinden dolayı hızla popülerlik kazanan motor tiplerinden biridir. BLDC motorları, Otomotiv, Havacılık, Tıp, Endüstriyel Otomasyon Ekipmanları ve Enstrümantasyon gibi sektörlerde kullanılmaktadır.

Fırçasız DC motorların çalıştırılabilmesi için, bir kontrol sistemine ve rotor pozisyonunu belirleyen sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. BLDC'ler için, rotor pozisyonunu tespit etmek için yaygın olarak stator Hall Effect cihazı bulunur. Ancak, sensörlerin maliyet, yer ve kararsızlık gibi dezavantajlarından dolayı, son yıllarda sensörsüz hız kontrolü önem kazanmıştır. Ayrıca sınırlı montaj alanı ve şiddetli titreşim ve / veya yüksek sıcaklığa sahip katı çalışma ortamı nedeniyle bir konum sensörü takmak ve muhafaza etmek zor olabilir. BLDC'ler üç fazlı bir güç yarı iletken köprüsüne anahtarlama için sinyal üreten ve geri besleme sinyallerini işleyen bir mikrokontroller tarafından kontrol edilir. Bu yarı iletken üç fazlı köprü, kontrol algoritmasına dayalı olarak stator bobinlerine güç sağlar.

Sensörlü sürücüler hall effect cihazlarından gelen rotor pozisyon bilgisinin kontrolcü tarafından çözümlenmesiyle komutasyon sinyalleri üretilerek motorun kontrolü gerçekleştirilir. Sensörsüz sürücüler; Zıt Elektromotor Kuvveti (BackEMF), Dolaylı Zıt EMK

Entegrasyonu ve Alan Odaklı Kontrol (FOC) gibi kontrol tekniklerini kullanılarak motorun kontrolü gerçekleştirilebilir. Zıt EMK'nin sıfır geçişi tespiti en popöler yöntemdir.

Bu çalışmada fırçasız daimî mıknatıslı motorlarla ilgili temel kavramlar incelenmiş, motorların yapısı ve çalışma prensibi hakkında bilgiler verilmiştir. Özel olarak fırçasız daimî mıknatıslı motor sınıfına giren fırçasız DC motorunun incelenmesi yapılmıştır. Fırçasız DC motorun sürücüsü sensörlü ve sensörsüz olmak üzere incelenmiştir. Sensörsüz sürücü tasarlanarak sürücünün gerçeklenmesi yapılmış ve deneysel sonuçları incelenmiştir. Fırçasız doğru akım motorunun sensörsüz sürücü tasarımı kapsamında trapezoidal zıt EMK sıfır geçişi yöntemi incelenmiş ve kontrol yöntemi olarak uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Dc motor(BLDC), Sensörlü kontrol, Sensörsüz kontrol, Zıt Emk



**CONTROL OF PERMANENT MAGNETIC SYNCHRONOUS MACHINES AND
PERFORMING AN APPLICATION CIRCUIT**

Nazif Hakan YENİAY

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. M. Hadi SARUL

Brushless Direct Current (BLDC) motors are among the fastest-growing motor types due to their better torque-speed characteristics, high dynamic response, high efficiency, long operating life, quiet operation, higher speed ranges and more. BLDC motors are used in sectors such as Automotive, Aerospace, Medical, Industrial Automation Equipment and Instrumentation.

In order to operate brushless DC motors, a control system and sensors that determine rotor position are needed. For BLDCs, Hall Effect device is commonly used to determine the rotor position. However, due to the disadvantages of sensors such as cost, location and instability, sensorless speed control has gained importance in recent years. It may also be difficult to install and maintain a position sensor due to limited mounting space and a rigid working environment with severe vibration and / or high temperature. BLDCs are controlled by a microcontroller that generates signals for switching to a three-phase power semiconductor bridge and processes the feedback signals. This semiconductor three-phase bridge provides power to the stator windings based on the control algorithm.

Motor position control is performed by analyzing the rotor position information from sensor driven motor hall effect devices. Sensorless drivers; Motor control can be performed using control techniques such as Back Electromotive Force (BackEMF),

Indirect Inverse EMF Integration, and Field Focused Control (FOC). The zero crossing detection of the inverse EMF is the most popular method.

In this study, basic concepts related to brushless permanent magnet motors are examined, and the structure and working principle of motors are given. Particularly, brushless DC motor which belongs to brushless permanent magnet motor class has been examined. The brushless DC motor has been examined for its sensor with sensor and without sensor. Sensorless driver is designed and realization of the driver is done and its experimental results are examined. In the context of sensorless drive design of brushless direct current motor, trapezoidal back EMF zero transfer method is investigated and applied as a control method.

Keywords: Brushless DC motor (BLDC), Sensor control, Sensorless control, Back EMF



1.1 Literatür Özeti

Elektrik motorları alternatif akım(AC) ve doğru akım(DC) olarak besleme gerilimlerinin türlerine göre sınıflandırılırlar. AC motorlar daimî mıknatıslar kullanarak bir rotor alanı oluşturan senkron motorlar ve indüksiyon yoluyla bir rotor alanı oluşturan asenkron motorlar olarak sınıflandırılırlar. DC motorlar, motorun dönmesini sağlamak için fırçalar ile akım yönünün değiştirilmesini fırçalar ile yapar. Fırçasız doğru akım (BLDC) motorları senkron bir makinenin bir türüdür ancak, fırçalı DC motora benzer özelliklere sahip olduğunu vurgulamak için DC'yi adında barındırmaktadır.

DC motorların avantajları, yüksek tork çıkışı ve kompakt boyutta üretilebilmeleridir. Bununla beraber senkron motorların çalıştırılabilmesi için kontrol donanımına ihtiyacı vardır. Elektronik sürücüler daha ucuz ve daha küçük hale geldiğinden elektrikli motorlarla kombinasyon halinde birçok iş alanında kullanımı artmaktadır. Ayrıca elektrik motorlarının içten yanmalı motorlara kıyasla, daha iyi verim ve doğal kaynakların daha sürdürülebilir kullanımı nedeniyle taşıt endüstrisinde ana tahrik sistemini devralması öngörülmüyor [1]. Ayrıca fırçasız DC motorları el aletleri, otomotiv, havacılık, tıp, otomatik endüstriyel ekipman ve enstrümantasyon gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

BLDC motoru, fırçalar yerine güç anahtarlarıyla elektrikli olarak komütasyonludur. Fırçalı DC motor veya bir endüksiyon motoruyla karşılaştırıldığında, BLDC motorunun pek çok avantajı vardır: Daha yüksek verimlilik ve güvenilirlik, daha düşük gürültü, daha küçük ve daha hafif, daha yüksek dinamik tepki, daha iyi tork-hız karakteristiklerine,

daha yüksek hız aralığına ve daha uzun kullanma ömrüne sahiptir [2].

BLDC motorların çalıştırabilmesi için rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Genel olarak, rotor konumu, konum sensörleri ile elde edilir. Motorun konumunu tespit etmek için farklı tipte sensörler bulunmasına rağmen, en yaygın kullanılan yöntem Hall Effect sensörlerinin kullanılmasıdır. Hall sensörleri, rotorun konum bilgisini elde etmek için BLDC motorda statora yerleştirilir. Motor yapısındaki sensörlü bu tip BLDC motorlara sensörlü BLDC denir. Bununla birlikte, sensörlerin konumlandırılmasında yüksek maliyetler, sensörleri motorda konumlandırmada zorluk gibi bazı dezavantajlar vardır. Ek bileşenler ve kablolama, sistem güvenilirliğini azaltabilir. Sensörsüz kontrol gerektiren uygulamalar da vardır. Sensörü motora sokmadan rotor konumunu belirlemek bazı yollarla mümkündür. Zıt Elektromotor Kuvveti (Back EMF), Dolaylı Zıt EMK Entegrasyonu ve Alan Odaklı Kontrol (FOC) gibi kontrol teknikleri, sensörsüz BLDC motor kontrolü için kullanılan tekniklerdir. Bununla birlikte, son yıllarda, zıt EMK'nin sıfır geçiş noktasının saptanması tekniği en yaygın kontroldür [2]. Birçok araştırma, BLDC motorları için çeşitli sensörsüz tahrik şemaları sunmuştur. Zıt EMK'nin sıfır geçiş noktalarını (ZCP) algılamak için terminal voltajı ile algılayan sensörsüz yöntemler [3] ve [4] 'te tanımlanmıştır. Bir yaklaşım, zıt EMK'yı [5] 'deki hat voltaj farkından algılayan sensörsüz bir sürücüdür. [6] 'da önerilen terminal voltaj farkına dayanan bir başka yöntemdir. Bu yöntemde, ortadaki faz gecikmesini ortadan kaldırarak zıt EMK farkını tespit etmek için üç ek karşılaştırma devresi kullanılır. Bazı çalışmalarda, dolaylı zıt EMK tespit yöntemlerinin neden olduğu faz gecikmesi nedeniyle motor hız kontrol aralığının dar olduğu belirtilmiştir. Zıt EMK farklılıkları algılama yöntemi, [7]'de önerilen bozukluk gözlemcisine (DOB) dayanmaktadır.

Zıt EMK algılama tekniği, rotor konumunun bir sensör olmadan tespit edilmesini sağlar, ancak sürücünün ilk önce bu geri bildirim olmadan başlatılması gerekir. Bunun nedeni, indüklenen voltajın genliğinin motor hızıyla orantılı olmasıdır. Bu nedenle zıt EMK çok düşük bir hızda algılanamaz ve özel bir başlangıç algoritması uygulanmalıdır [8].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki ayrı BLDC motor sürücüsünün tasarımları yapılmıştır. Bu kontrolcü tasarımında; sürücü sistem tasarımı, kontrol

algoritmalarının ve yazılımlarının oluşturulması, sürücü sisteminin baskı devre kartı tasarımı ve deney düzeneği ile bir BLDC nin tasarlanan sürücü ile çalıştırılarak sonuçların gözlemlenmiştir.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasının ilk bölümünde daimî mıknatıslı makineler ve fırçasız daimî mıknatıslı DC makinelerin sürücüleri ile ilgili yapılan literatür çalışması ve tezin amacı açıklanmıştır.

İkinci bölümde fırçasız daimî mıknatıslı motorlar ve çeşitleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Özel olarak BLDC motorlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. BLDC motorların yapısı, rotor ve stator yapıları, çalışma prensibi, matematiksel modeli ve tork – hız karakteristikleri hakkında bilgi verilmiştir. Tork – hız karakteristiği BLDC motorların sürücüleri kare dalga sürücü olduğundan kare dalga sürücü esas alınarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde BLDC sürücüleri hakkında bilgi verilirken sensörlü BLDC sürücüleri ve sensörsüz BLDC sürücü hakkında teorik inceleme yapılmıştır. Bu bölümde sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki ayrı sürücünün araştırması yapılmıştır. İlk olarak sıkça kullanılan sensörlü sürücü modeli incelenmiştir. Sensörlü sürücünün temel prensipleri ve sensörlü sürücüyle hız kontrolünün açık ve kapalı çevrim olarak incelenmiştir. Ayrıca bir PI kontrolcü kullanılarak sensörlü sürücüde hız kontrolünün nasıl gerçekleştirileceği açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca kontrol sistemi için gerekli sayısal sinyal işleyicinin(DSP) bir modeli olan TMS320F28335 DSP si hakkında bilgi verilmiş, motor kontrolünde sık kullanılan iki modülü olan ADC ve PWM modülleri açıklanmıştır. Bu bölümün ikinci aşamasında tezin asıl çalışma konusu olan sensörsüz sürücü araştırması ve tasarımı yapılmıştır. Bu bölümde sensörsüz sürücülerin temel çalışma prensipleri ile başlayıp sensörsüz kontrolün gerçekleştirildiği aşamalar ve algoritmalar verilmiştir. Ayrıca sensörsüz sürücünün kalbi olan rotor pozisyonunu belirlemek için kullanılan zıt EMK'nın sıfır geçiş noktalarının tespiti ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sensörsüz sürücülerde ortaya çıkan başlangıç durumunda ayrıca açıklanmıştır. Sürücünün gerçekleşmesi noktasında PCB devre şeması ve PCB çizimleri yapılmıştır. Son olarak gerçekleştirilen sensörsüz sürücü bir fırçasız dc motora uygulanarak deneysel sonuçlar verilmiştir.

Dördüncü bölümde tasarlanan sürücü ilgili elde edilen deneysel çıktılar karşılaştırılarak

sensörlü ve sensörsüz sürücü avantajları, dezavantajları ve karşılaştırmaları yapılmıştır.



FIRÇASIZ DAİMİ MIKNATISLI MAKİNELER

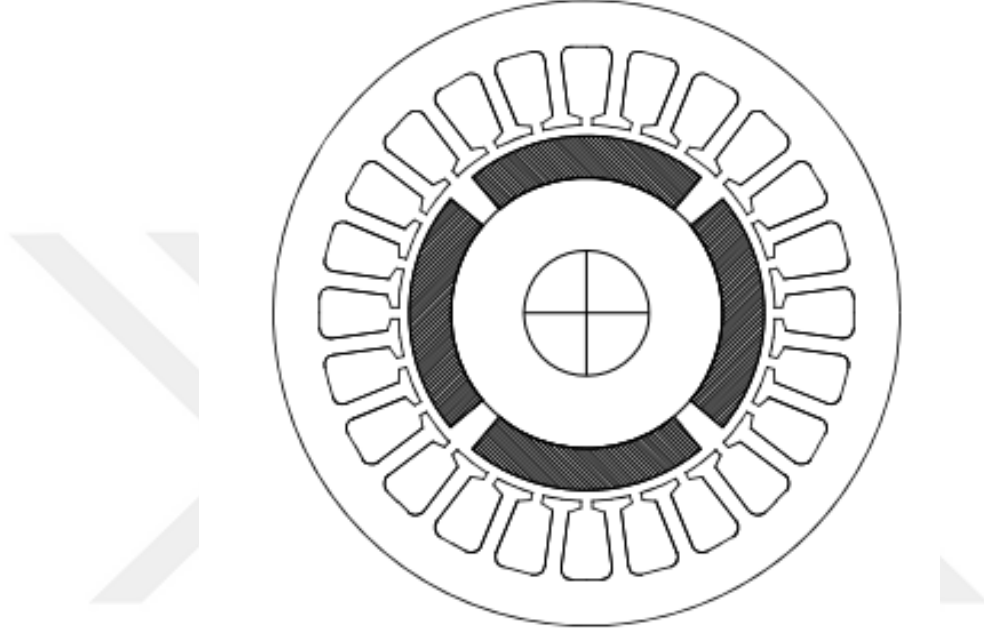
"Fırçasız" elektrikli makineleri, kayan kontaklarla ilişkili tüm bileşenlerin ortadan kaldırıldığı makinelerdir. Bu bileşenler, rotora akım sağlamak için kullanılan fırçaları, komütatörleri içerir. Fırçalı motorlar hala yaygın olarak kullanılmasına rağmen, dezavantajları fırçasız makinelerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu duruma aşağıdaki örnekler verilebilir:

- Bilgisayar disk sürücülerinde fırça kalıntılarının istenmemesi,
- Üfleyici ve fanlarda düşük gürültü, yüksek verim ve hız kontrolü ihtiyacından dolayı,
- Fabrika otomasyonu için hassas servo motorlarda arıza süresinin en aza indirilmesi gerekliliğinden dolayı,
- Çekici uygulamalarında fırça bakımı maliyetinden ve yüksek verim ihtiyacından dolayı fırçasız elektrik makinelerine ilgi artmıştır.

Fırçasız makinelerin geliştirilmesi, bazı uygun teknolojilerin gelişimiyle paraleldir. Özellikle, güç transistörleri, mikroişlemci, sensörler ve daimî manyetik malzemelerin gelişimi fırçasız makinelerinde kullanım alanını artırmıştır. Bu bileşenlerin gelişimiyle elektrik motorlarının uygulama alanlarda özellikle değişken hızın ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda birçok fırsat açıldı [3].

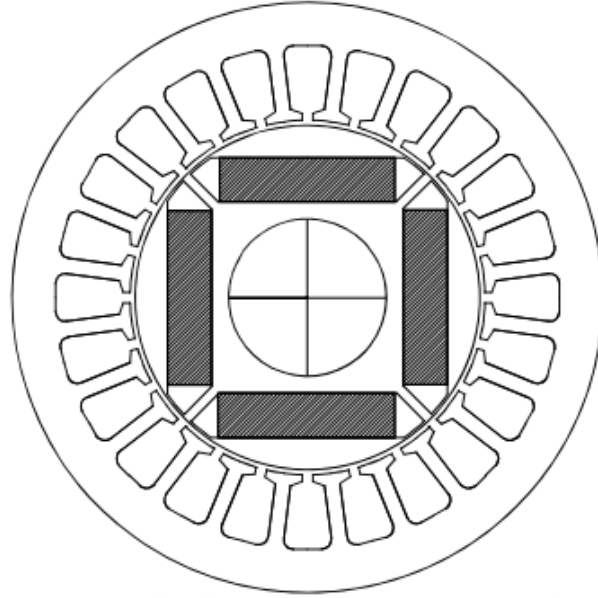
Fırçasız elektrik makinelerinin birçok çeşidi vardır, bunları sınıflandırmak zordur, ancak dört ana kategori tanımlayabiliriz:

Fırçasız DC Makineleri, komütatör ve fırçalar yerine elektronik güç kaynağı kullanılarak klasik DC makineden doğrudan elde edilir. Motor genellikle trapezoidal bir zıt EMK dalga formuna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve akım dalga formları, değişken polarite ile dikdörtgen şeklindedir. Akım polaritesi, akımı regüle etmek için kullanılan güç yarı iletkenleri vasıtasıyla rotor pozisyonu ile senkronize edilir. Şekil 2. 1'de fırçasız dc makinenin tipik bir görüntüsü verilmiştir.



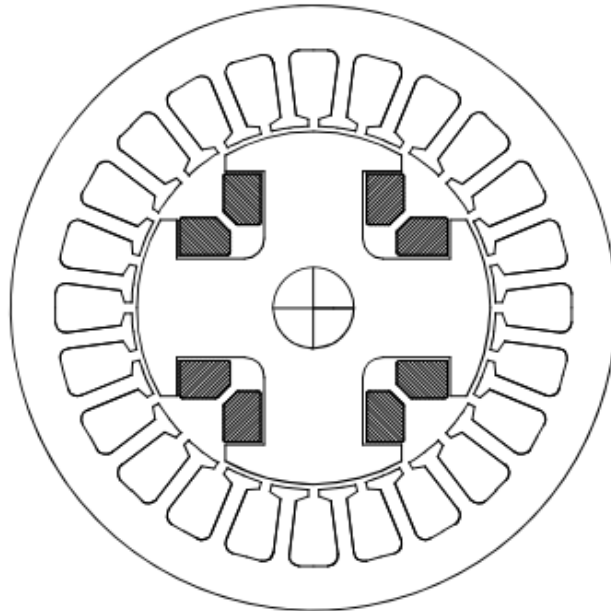
Şekil 2. 1 Fırçasız Daimî Mıknatıslı Motor [3]

AC fırçasız makineler fırçasız DC makinelere benzer, ancak zıt EMK dalga şekli sinüzoidal olacak şekilde tasarlanmıştır ve akım dalga şekli de sinüzoidal olarak kontrol edilir. Pürüzsüz tork kontrolünün gerekli olduğu servo sistemlerde kullanılırlar. Bazı durumlarda, Şekil 2. 2'de gösterildiği gibi, kalıcı mıknatıslar rotorun içine monte edilir.



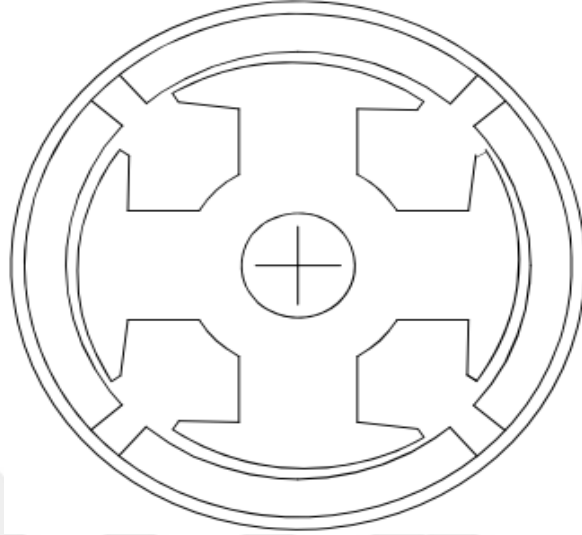
Şekil 2. 2 İç Rotorlu Daimî mıknatıslı fırçasız AC motor [3]

Kendinden senkron AC fırçasız makineler, rotorda sarılı olan DC alanının dönen bir doğrultucudan beslendiği ve aynı mil üzerine monte edilmiş bir döner AC uyarıcısından beslenen motor türüdür. Bu kategoride bazı büyük makineler (birkaç MW) ve uçak jeneratörü gibi yüksek hızlı AC makineler yer alır. Şekil 2. 3'te doğrultucu veya uyarıcının yer almadığı bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 Yara alanlı senkron AC motor [3]

Özel fırçasız makineler klasik DC veya AC makinelerin türevlerinden elde edilemezler. Bu kategori, çok farklı çeşitlerde üfleyici motorları (Şekil 2. 4), zamanlama motorları ve diğer türleri dahil olmak üzere çok çeşitli farklı tasarımları kapsamaktadır. Çoğu zaman bu motorların üretim miktarları milyonlardır.



Şekil 2. 4 Tek fazlı fırçasız daimî mıknatıslı motor [3]

2.1 Fırçasız DC Motor

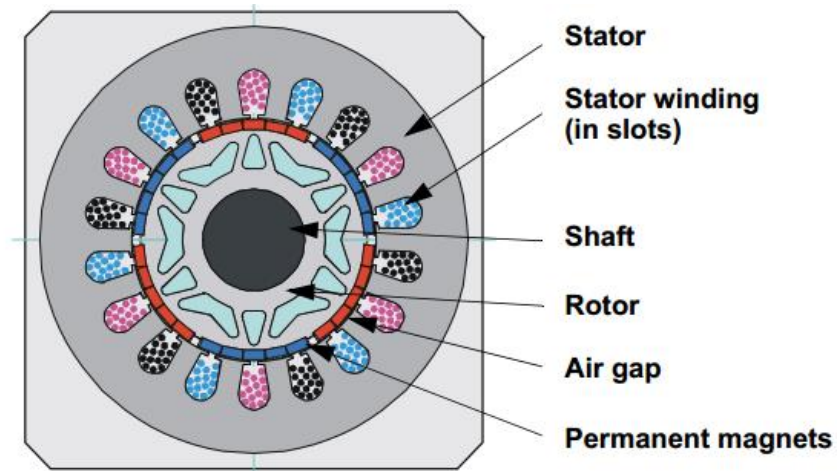
Daimî mıknatıslı (PM) motorlar, daha yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu nedeniyle endüstriyel otomasyon ve tüketici cihazlarındaki çeşitli uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. PM motorlar zıt-EMK dalga şekillerine göre sinüzoidal zıt EMK'ya sahip olan PM AC senkron motorlar ve trapezoidal zıt-EMK ya sahip olan BLDC motorlar olarak iki ana sınıfı ayrılırlar. Bir PMSM motoru genellikle üç fazlı sinüzoidal akımla uyarılırken, bir BLDC motoru üç fazlı dikdörtgen akım tarafından uyarılır. PM motorlar genellikle üç fazlı gerilim kaynağı inverter ile beslenirler [4].

Trapezoidal zıt-EMK dalga şekline sahip BLDC motorlarında faz akımlarının düzgün şekilde değiştirilmesi için, rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Genellikle rotor konumu pozisyon sensörleri tarafından elde edilmektedir. Burada motorun pozisyonunu tespit edebilmek için farklı sensör tipleri bulunsa da en yaygın olarak kullanılan yöntem Hall Effect sensörlerinin kullanımınıdır. Hall sensörleri BLDC motorlarda statora yerleştirilerek rotorun konum bilgisi elde edilir. Motor yapısının içinde sensör içeren bu tarz BLDC motorlara sensörlü BLDC adı verilir. Bununla birlikte, yüksek maliyet, sensörlerin

motorun içine yerleştirilme zorluğu gibi pozisyon sensörleri için bazı dezavantajları vardır. İlave bileşenler ve kablolama nedeniyle sistem güvenilirliğini düşürebilirler. Ayrıca sensörsüz kontrol gerektiren uygulamalar vardır. Motor içine sensör yerleştirilmeden rotor pozisyonun tespit edilmesi bazı yöntemlerle mümkündür [5]. Zıt Elektromotor Kuvveti (BackEMF), Dolaylı zıt EMK Entegrasyonu ve Alan Odaklı Kontrol (FOC) gibi sensörsüz kontrol teknikleri sensörsüz BLDC motor kontrolü için kullanılan tekniklerdir. Ancak son yıllarda en popüler teknik zıt-EMK sıfır geçiş noktasının tespiti ile yapılan kontroldür. Bu çalışmada sensörsüz sürücü tasarımı için kullanılan yöntemde zıt-EMK sıfır geçiş noktasının tespiti kullanılmaktadır.

2.2 BLDC Yapısı

BLDC motor, rotor üzerinde daimî mıknatıslar ve stator üzerinde sargılar bulunan bir senkron motordur. Yani stator tarafından üretilen manyetik alan ile rotor tarafından üretilen manyetik alan aynı frekansta dönme hareketi yapar [6]. BLDC motorlar tek fazlı, 2 fazlı veya 3 fazlı konfigürasyonlarda olabilirler. Türüne uygun olarak, stator aynı sayıda sargıya sahiptir. Üç fazlı BLDC motorlar en popüler ve yaygın olarak kullanılan motor tipidir [7]. Sürücüsü tasarlanan ve üzerinde çalışma yapılan BLDC motor üç fazlı olduğundan bu bölümde üç fazlı bir BLDC motorun stator ve rotor yapıları incelenmiştir.

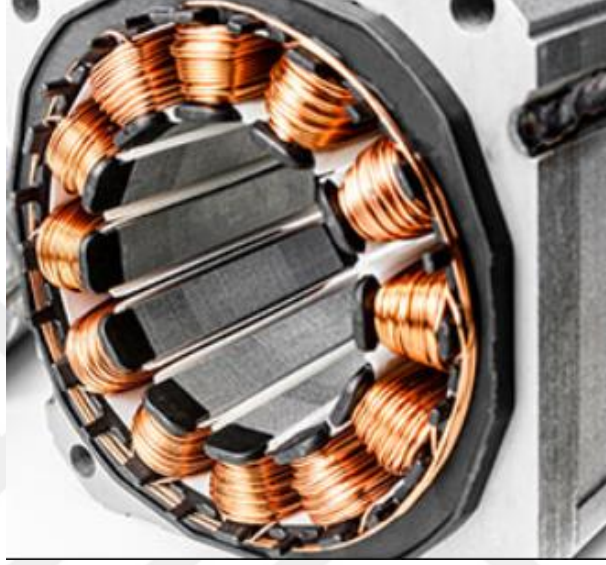


Şekil 2. 5 BLDC Motor Kesiti [8]

2.2.1 Stator Yapısı

BLDC motorun stator yapısında bir AC motor benzeri nüve ve sargılar vardır. BLDC motorun statoru preslenmiş çelik saçlar ve yuvalara yerleştirilmiş sargılardan oluşur.

Stator yapısı asenkron motora benzerdir ancak sargıların dağılımı farklı şekilde yapılır. Fırçasız DC motor sargıları, yıldız veya üçgen bağlanabilir. Genellikle BLDC motorların yıldız bağlı üç stator sargısı vardır. Şekil 2. 6'de 3 fazlı bir BLDC'nin statoru görülmektedir. 48 volt veya daha düşük voltajlı BLDC motorlar otomotiv, robotik, kol hareketleri vb. uygulamalarda kullanılırken 100 volt veya daha yüksek gerilim değerli BLDC motorlar otomasyon ve endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar [7].



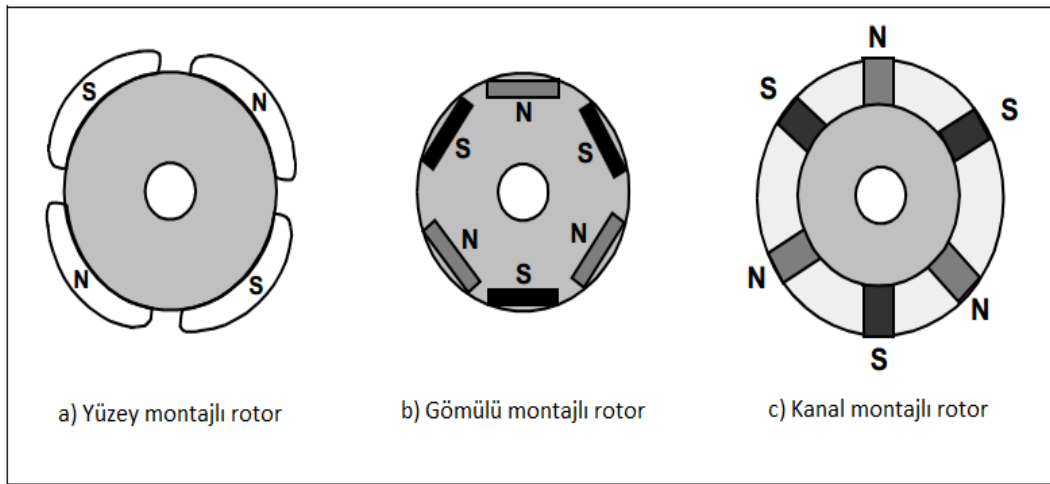
Şekil 2. 6 BLDC Stator Yapısı ve Sargıları [9]

2.2.2 Rotor Yapısı

Rotor daimî mıknatıslardan oluşur ve motorun dönen kısmıdır. Fırçasız DC motorların rotorları iki veya daha fazla daimî mıknatıstan meydana gelir. Rotordaki kutup sayısının artırılması daha iyi bir tork elde edilmesini sağlar ancak maksimum hızda düşme meydana gelir. Rotorda gerekli manyetik alan yoğunluğuna baz alınarak, rotoru yapmak için uygun manyetik malzeme seçilir. Daimî mıknatıslar yapmak için genellikle Ferrit mıknatıslar kullanılır. Teknoloji ilerledikçe, nadir toprak metal alaşımli mıknatıslar popülerlik kazanmaktadır. Ferrit mıknatıslar daha ucuzdur, ancak dezavantajı belirli bir hacim için düşük akı yoğunluğu sahip olmalarıdır. Aksine, alaşım malzemesi hacim başına yüksek manyetik yoğunluğa sahiptir ve rotorun aynı tork için daha da küçük elde edilmesini sağlar. Ayrıca, bu alaşımli mıknatıslar, ferrit mıknatısları kullanan aynı boyuttaki motor için boyut / ağırlık oranını iyileştirir ve daha yüksek bir tork verir.

Samarium Cobalt (SmCo) ve Neodymium, Ferrite ve Boron'un alaşımı (NdFeB) nadir toprak metal alaşımli mıknatısların bazı örnekleridir [7].

Fırçasız DC motorlar, Şekil 2. 7'de görüldüğü gibi, daimî mıknatısların rotor üzerine yerleştirilme şekline göre üçe ayrılırlar. Bunlar; daimî mıknatısları rotor yüzeyine monte edilmiş motorlar Şekil 2. 7.a, dikdörtgen kesitli daimî mıknatısları rotor içerisine gömülü monte edilen motorlar Şekil 2. 7 b ve Şekil 2. 7 c'de olduğu gibi dikdörtgen kesitli daimî mıknatısları rotor kanallarına yerleştirilen motorlardır.



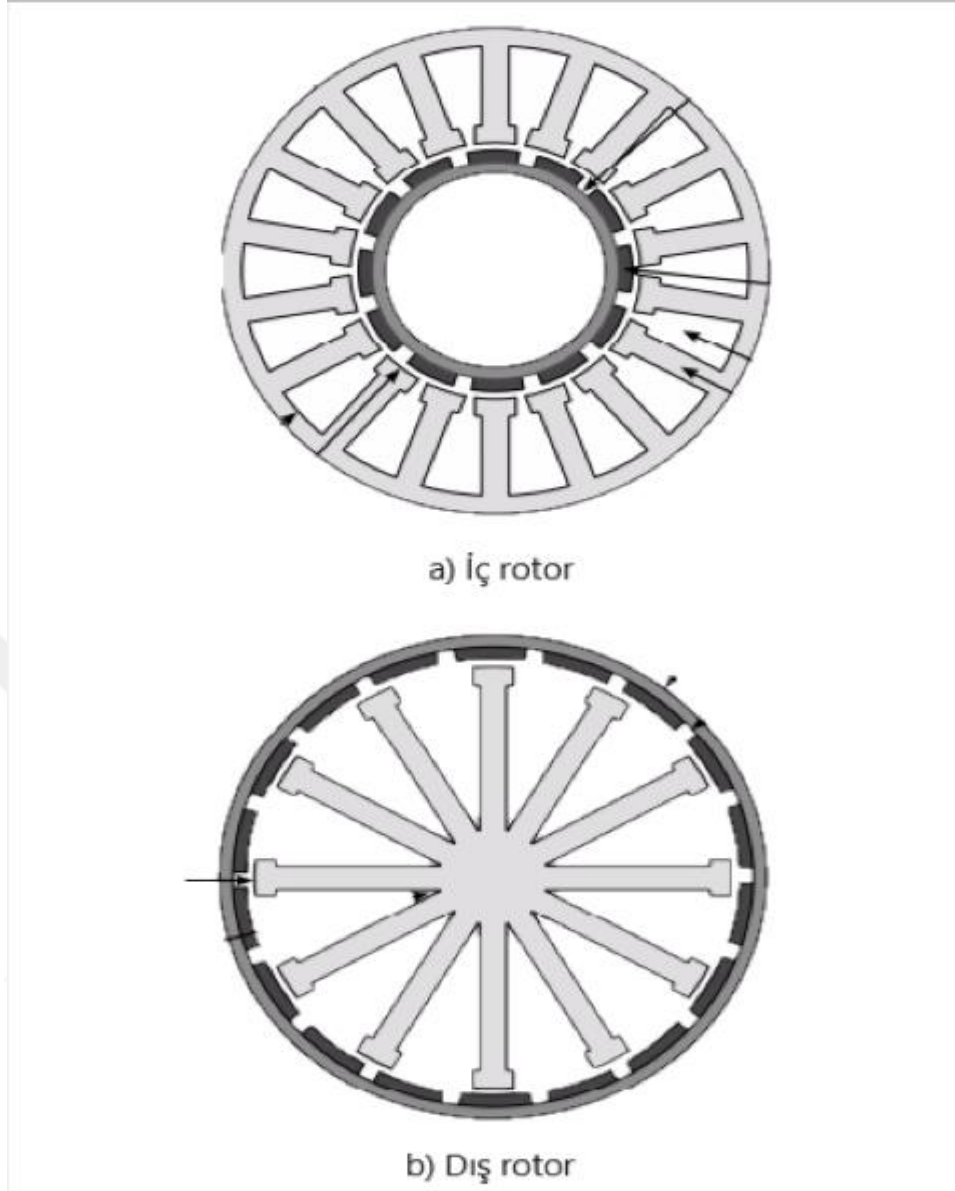
Şekil 2. 7 Farklı türde BLDC Rotor Kesitleri [7]

Şekil 2. 7 (a)'da görüldüğü gibi, daimî mıknatısları rotor yüzeyine monte edilmiş motorlarda her bir mıknatıs, rotorun yüzeyine yerleştirilmiştir. Motor üretimi açısından bu tip rotorlu makinaları üretmek daha kolaydır ve mıknatıslar, stator kutuplarına daha yakın olduğu için cogging momenti daha küçüktür. Ancak yüksek devirli fırçasız DC motorlarda, yüzeye tutturulmuş sabit mıknatısların parçalanma ihtimali vardır. Bu motorlarda efektif hava boşluğu, rotorun konumuna göre değiştiği için bir endüktans değişimi meydana gelmektedir. Şekil 2. 7 (b)'de görüldüğü gibi, daimi mıknatısları rotorun içerisine monte edilmiş motorlarda her bir daimi mıknatıs, rotor çekirdeğinin iç tarafına yerleştirilmiştir. Daimi mıknatısı içerisine monte edilmiş rotorun kullanımı, yüzey monteli tip kadar yaygın değildir. Ancak, bu tip rotorlar, yüksek hızlı çalışmalar için uygundur. Genellikle bu tip motorlarda, rotor pozisyonu ile endüktans değişimi önemsenmeyecek kadar küçüktür. Şekil 2. 7 (c)'de görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli daimi mıknatısları rotor kanallarına monte edilmiş motorlarda, her bir mıknatıs rotor

yüzeyine açılan kanallara yerleştirilmiştir. Bu tip rotorlarda, önceki rotor tiplerinin iyi özellikleri sağlanmaya çalışılmıştır [10].

Fırçasız dc motorlar rotorun statorun içinde veya dışında olmasına göre iç rotorlu fırçasız dc motorlar ve dış rotorlu fırçasız dc motorlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. İç rotorlu fırçasız DC motorlar, AC senkron ve asenkron motorlara benzer bir yapıya sahiptir. Stator dış kısımda endüvi sargılarını içerir ve rotor iç kısımda üzerinde daimî mıknatısları içerir. Dış rotorlu yapıda ise stator iç kısımda kalır ve daimî mıknatısları içeren rotor dışıdır ve serbest olarak döner. İç rotorlu ve dış rotorlu yapı Şekil 2. 8'te gösterilmiştir.

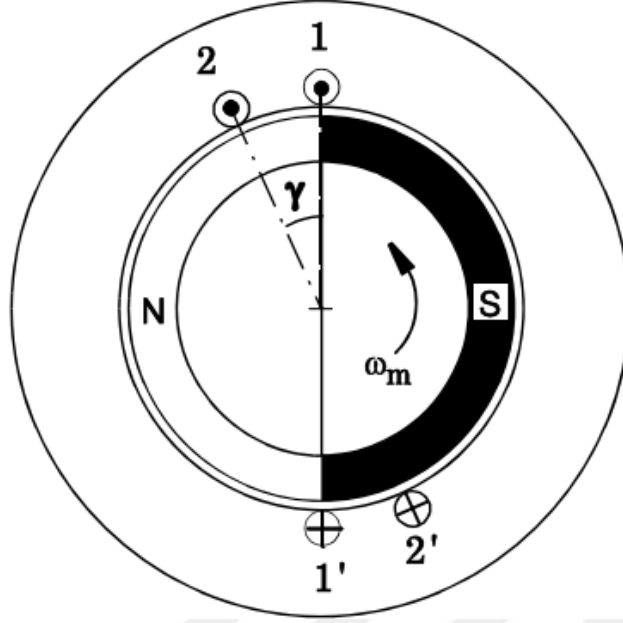
Dış rotorlu motorlar daha yüksek motor sabitleri ve verimliliğe, ancak iç rotorlu motorlara kıyasla daha düşük nominal güç değerlerine sahiptir. Dış rotorlu fırçasız dc motorlar fanlar, hard diskler ve diğer birçok seri üretimli cihazda kullanılır. Son zamanlarda hobi uzaktan kumandalı uçaklarda uygulama alanı bulmuşlardır [11]. İç rotorlu fırçasız dc motorun yapısı mekanik olarak daha sağlamdır ve bu nedenle yüksek hızlı uygulamalar için uygundur. Bu düzenlemenin imalatı dış rotorludan daha karmaşıktır. Dış rotorlu yapıdaki statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi daha kolay ve maliyeti daha azdır [12].



Şekil 2. 8 İç ve Dış Rotorlu BLDC [11]

2.3 Çalışma Prensibi

Şekil 2. 9, saatin tersi yönünde dönen bir mıknatısın sahip 2 kutuplu bir motoru göstermektedir. Sargı 1' deki akı bağlantısı negatif olarak maksimumdur. Mıknatıs, bir $\beta_M = 180^\circ$ ile gösterilmektedir ve bobin eğimi de 180° 'dir, böylece her bir bobin akı-bağlantısı ψ_1 , rotor dönerken bir üçgen dalga şekline göre değişir. Şekil 2. 10'da görülmektedir.



Şekil 2. 9 Zıt EMK Oluşumu [13]

Faraday Kanununa göre bobin 1'de indüklenen EMK;

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \omega_m \frac{d\psi_1}{d\theta} \quad (2.1)$$

Burada ω_m , mekanik rad / s açısal hızdır ve θ , radyan olarak mekanik rotor pozisyonudur. Akı-bağıntısı rotor pozisyonu ile doğrusal olarak değiştiği sürece, indüklenen EMK sabittir. Akı-bağıntısı maksimum değere ulaştığında aynı mutlak hızda azalmaya başlar ve EMK polariteyi değiştirir. Sonuç olarak kare dalga EMK (e_1) üretilir. İkinci bobin birinci bobinden belirli bir γ açısı kadar yer değiştirir. Birinci bobin ile ikinci bobinin tur sayıları T_c kadardır ve aynıdır. EMK dalga formu, ilk bobininkiyle aynıdır, ancak γ elektrik radyanı kadar faz gecikmesi vardır. İki bobin seri olarak bağlanırsa, EMK'leri eklenerek, EMK'nin tepe değerinin iki katı bir EMK dalga formu verir. Her faz seri olarak bağlanmış iki bobinden oluşuyorsa, bu EMK faz EMK'sıdır. Dalga formu, birinci ve ikinci bobinler arasındaki faz farkı nedeniyle basamak şeklinde olur. Pratikte, mıknatısın kenarlarındaki akının saçılması nedeniyle, EMK dalga formunun kenarları keskin bir şekilde basamak olarak değil, Şekil 2. 10'da noktalı olarak gösterildiği gibi yumuşatılmış olarak görünmektedir. Oluşan bu dalga şekli sebebiyle fırçasız DC motorların karakteristiği olan trapezoidal EMK olarak isimlendirilir [13].

3 fazlı fırçasız bir DC motor genellikle, faz zıt EMK dalga formunun düz üst kısmı 120 derece genişliğinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra her bir faz 120 derece

genişlikte sabit akım bloklarından oluşan bir akım ile beslenir. T_e Elektromanyetik tork olmak üzere, her 120 derecelik periyod boyunca, elektromanyetik güç dönüşümü $e_1 i_1 = T_e \omega_m$ olur. Eğer bu süre zarfında EMK ve akım dalga formları yeterince düzse ve hız sabit ise, T_e de sabittir.

EMK hava boşluğundaki akı dağılımından hesaplanabilir. Bir kutup sahası üzerindeki ortalama akı yoğunluğu B_g , hava boşluğu akısı ϕ_g aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\phi_g = \int_0^{\pi/p} B(\theta) r d\theta L_{stk} = B_g x \frac{\pi D L_{stk}}{2p} \quad (2.2)$$

Burada r , stator delik yarıçapıdır, L_{stk} yığın uzunluğudur ve p kutup çiftlerinin sayısıdır. Bobin 1'in akı bağıntısının maksimum değeri $\psi_{1max} = T_c \phi_g$ ve ψ_1 'in θ ile doğrusal değişimi ise,

$$\psi_1(\theta) = \frac{p\theta}{\pi} \psi_{1max} \quad (2.3)$$

Denklem (2.1) ve (2.3) bobinin EMK 'sının tepe değeri;

$$e_1 = \omega_m x \frac{2p}{2} x T_c \phi_g \quad (2.4)$$

Faz başına T_{ph} tur seri bağlı bir makinede, tepe EKM/faz aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$e_{1(pk)} = \omega_m x \frac{2p}{2} x T_{ph} \phi_g \quad (2.5)$$

Kare dalga çalışma durumunda aynı anda iki faz iletimde olabilir (Şekil 2. 10). Motor yıldız bağlıysa her 60 derece aralık boyunca fazlar arası EMK;

$$e_{LL(pk)} = 2e_{1(pk)} = k_E \omega_m \quad (2.6)$$

Burada k_E zıt EMK sabitidir ve Vs/rad birimidir;

$$k_E = \frac{4pT_{ph}\phi_g}{\pi} \quad (2.7)$$

Elektromanyetik güç $e_{LL(pk)}I$ ve elektromanyetik tork;

$$T_e = \frac{e_{LL(pk)}I}{\omega_m} = k_T I \quad (2.8)$$

Burada $k_T = k_E$ birimi Nm/A olan tork sabitidir. Bu şekilde "iki faz açık" iletimde çalıştırıldığında, motor daimî mıknatıslı DC komütatör motoru gibi davranır.

Denklem (2.8) anlık elektrik gücünü anlık mekanik güce, kayıp ya da depolama olmaksızın dönüştüren ideal bir elektromekanik cihazın bir örneğidir. m Sayıda faza sahip bir fırçasız daimî mıknatıslı makinede elde edilen elektromanyetik güç, tüm faz akımları i_1, i_2, \dots, i_m ve mıknatısların dönüşü tarafından üretilen ilgili EMK'lar e_1, e_2, \dots, e_m arasındaki etkileşimin bir sonucudur. Buradan;

$$T_e \omega_m = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 + \dots + e_m i_m \quad (2.9)$$

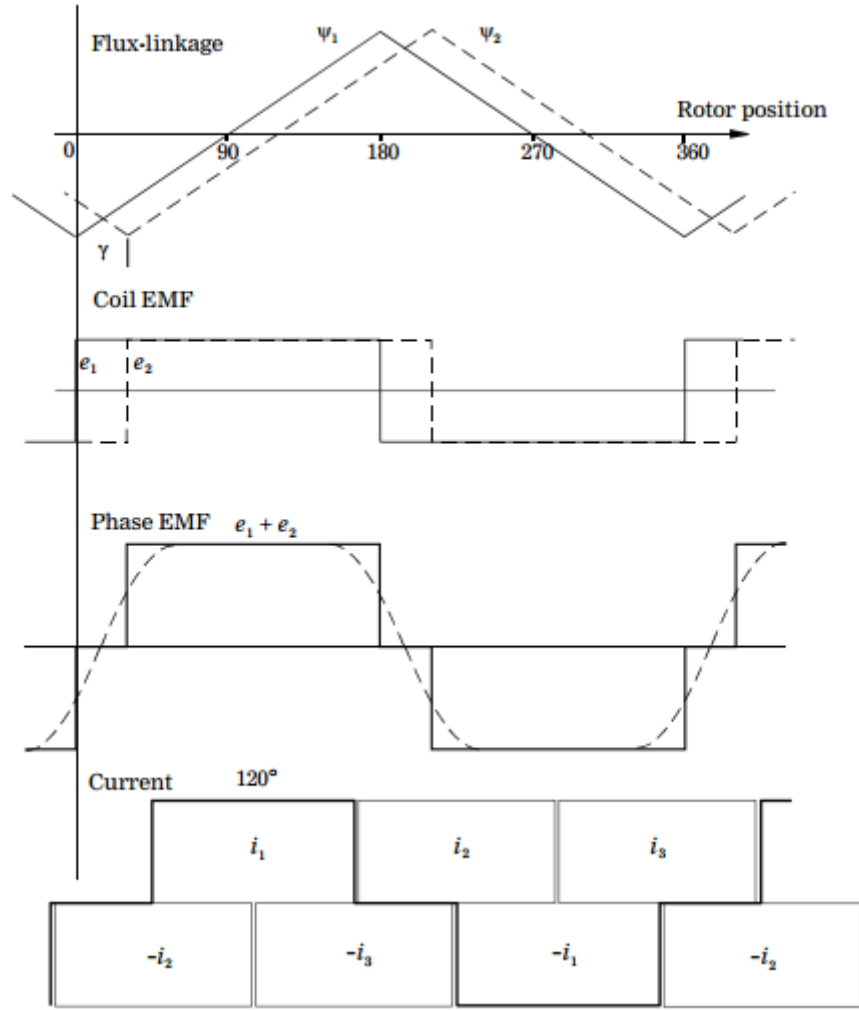
3 fazlı bir daimî mıknatıslı motorda kare dalga çalışma durumunda her zaman sadece iki faz enerjilendirilir, $i_3 = 0$ olduğunda $i_1 = I = -i_2$ iken 60° lik bir iletim aralığı vardır. Bu yüzden;

$$T_e \omega_m = e_1 I - e_2 I = (e_1 - e_2) I = e_{LL} I \quad (2.10)$$

Burada e_{LL} faz 1 ve faz 2 arasındaki fazlararası EMK'dır. 60° lik bir iletim aralığı bitmesiyle yeni iletim aralığına girilir ve $i_1 = I = -i_3$ olur ve bu aralıktan sonraki aralıktada benzer şekilde $i_2 = I = -i_3$ olur ve diğer iletim aralıklarında da benzer şekilde I akımı komüte edilir.

Burada T_e , ortalama tork değil anlık torktur. Ortalama elektromanyetik tork;

$$T_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_e(\theta) d\theta \quad (2.11)$$



Şekil 2. 10 BLDC motor için Akı, EMK ve Akım Dalga formları [14]

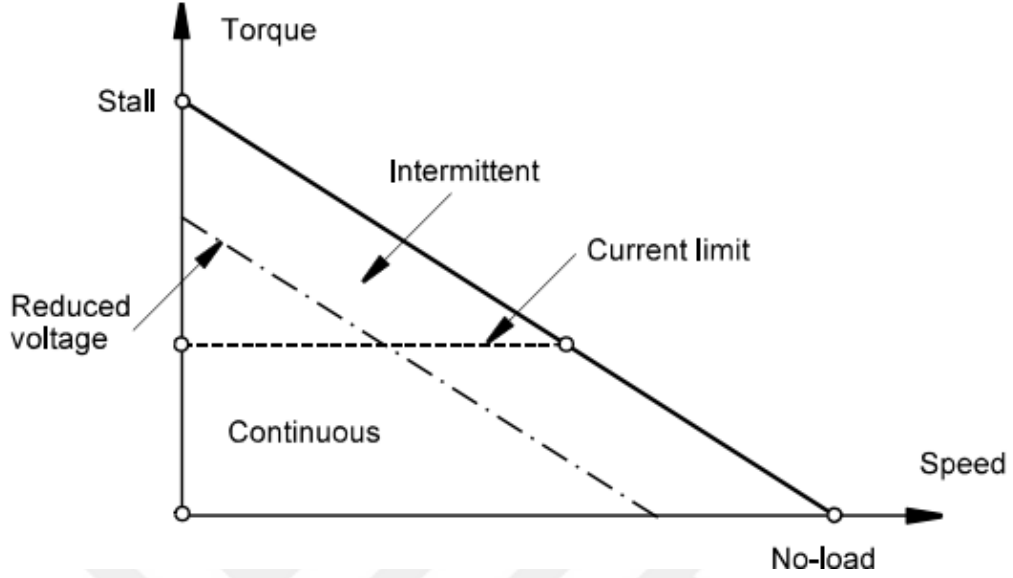
EMK'nın yatay üst genişliğinin sağlanabilmesi için, slot / kutup kombinasyonu, mıknatıs yayı ve sargı dağılımının dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirir. Düz tepeli trapezoidal EMK dalga formunda bile, akım dalga biçimi, sürücüdeki PWM kırıyıcı ve komütasyondan dolayı ideal 120° kare dalgadan formundan çıkabilir. Üstelik yüksek hızlarda, EMK'nın mevcut besleme voltajına göre büyümesi nedeniyle ideal 120° kare dalga akımı dalga formuna ulaşamamaktadır. İdeal durumdan tüm bu sapmalar tork dalgalanmasıyla sonuçlanır. Benzer hususlar sinüs dalga motorları için de geçerlidir [15].

Fırçasız daimî mıknatıslı motorlarda tork dalga kaynağı olarak iki ana husus tanımlanabilir:

- e ve i dalga formlarındaki kusurlardan kaynaklanan elektromanyetik tork dalgalanması;

- Mıknatıslar ve stator slotları arasındaki etkileşimin neden olduğu cogging torku [15];

2.4 Kare Dalga Sürücü ile İdeal Tork – Hız Karakteristiği



Şekil 2. 11 Tork-Hız Karakteristiği [16]

Şekil 2. 11’de fırçasız bir daimî mıknatıslı dc motorun tork-hız karakteristiği verilmiştir. İki fazın iletimde olduğu çalışma için, eğer E , fazlararası EMK ise ve R , seri bağlı iki fazın direnci ise, o zaman herhangi bir 60° periyodu boyunca aşağıdaki ifadeler yazılabilir;

$$V_s = E + RI \quad (2.12)$$

Burada I Dc akım. Denklem (6) ve (8) kullanılarak ve kayıplar ihmal ederek, tork-hız karakteristiği aşağıdaki formda elde edilebilir;

$$\frac{\omega}{\omega_o} = \left[1 - \frac{T}{T_o}\right] = \left[1 - \frac{I}{I_o}\right] \quad (2.13)$$

Burada boştaki hız;

$$\omega_o = \frac{V_s}{k_E} \text{ rad/s} \quad (2.14)$$

Kilitlenme(stall) torku;

$$T_o = k_T I_o \quad (2.15)$$

Ve durma akımı veya kilitli rotor akımı;

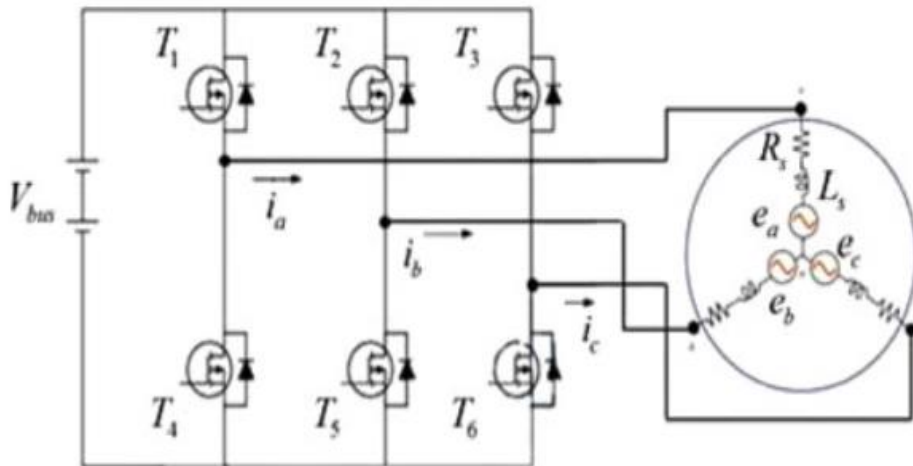
$$I_o = V_s/R \quad (2.16)$$

Bu ifade ile verilen durma akımı, mıknatısları demanyetize etmek için yeterince büyük olabilir, ancak genellikle bu akım, sürücüdeki güç transistörlerinin kabiliyetinin çok ötesindedir. Bu nedenle, akım kısıyıcı ile normalde "demanyetizasyon" akımının oldukça altında olan güvenli bir değerde sınırlandırılır. Fırçalı DC motorunda olduğu gibi, hız, gerilim tarafından kontrol edilir ve Şekil 2. 11'de, gerilimi düşürmenin etkisi görülebilir. Gerilim, güç transistörlerinin belirli bir çalışma döngüsü D ile kısılmasıyla değiştirilir veya aktif çalışma döngüsünün, motorun gerçek hızına karşılık gelen doğru değerde otomatik olarak sabit akımı tutulması şeklinde gerçekleştirilebilir [16].

Şekil 2. 11'de ayrıca torku sınırlayan bir akım sınırının uygulanmasının etkisini göstermektedir. Kısa bir süre için normal sınırdan daha yüksek akımlarda çalışmasına izin verilebilir. Buna göre Şekil 2. 11'de motorun çalışması akım sınırına göre geçici çalışma ve sürekli çalışma bölgelerine ayrılmıştır.

2.5 Matematiksel Modeli

BLDC motorunun ve üç fazlı inverterin eşdeğer devresi Şekil 2. 12'de gösterilmektedir. Inverterin üst tarafında bulunan T1, T2 ve T3 (IGBT veya mosfet olabilir), yüksek taraflı transistörler, diğer üç yarı iletken anahtara ise düşük taraflı transistörler denir. Yapılan matematiksel analizde daimî mıknatıslar rotor üzerine monte edilmiş ve statoru yıldız bağlı bir BLDC motor, üç sargıdaki stator öz endüktansları ve dirençleri aynı ve karşılıklı endüktanslar sabit kabul edilmiştir.



Şekil 2. 12 PWM inverteri ve BLDC motorun eşdeğer devresi [17]

Üç fazlı stator sargılarının terminal gerilimi denklemleri statorun yıldız noktasına göre aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{an} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (2.17)$$

$$V_{bn} = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2.18)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (2.19)$$

Burada daha önce belirtilen kabuller uygulanırsa R_a, R_b, R_c aynı ve R_s olarak L_a, L_b, L_c de L_s olarak ifade edildiğinde yukarıdaki terminal gerilimi denklemleri matris şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{pmatrix} \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$L_s = L_{ss} - L_m \quad (2.21)$$

Burada, V_{an}, V_{bn} ve V_{cn} faz voltajlarıdır, e_a, e_b ve e_c her fazın zıt-EMK'larını, R_s , faz direncini, L_s , stator sargılarındaki eşdeğer endüktansı, L_{ss} ve L_m , sırasıyla her faz endüktansını ve karşılıklı endüktansı ifade eder.

Üç hat gerilimi de şu şekilde tanımlanır:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (2.22)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (2.23)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (2.24)$$

(2.20) ve (2.22), (2.23), (2.24) 'den, hat gerilimi denklemleri aşağıdaki gibi verilir:

$$V_{ab} = R_s i_{ab} + L_s \frac{d(i_{ab})}{dt} + e_{ab} \quad (2.25)$$

$$V_{bc} = R_s i_{bc} + L_s \frac{d(i_{bc})}{dt} + e_{bc} \quad (2.26)$$

$$V_{ca} = R_s i_{ca} + L_s \frac{d(i_{ca})}{dt} + e_{ca} \quad (2.27)$$

Hat gerilimleri, nötr gerilim dalgalanmasının etkisini ortadan kaldırmak için kullanılır, çünkü nötr gerilimi PWM anahtarlama sinyaliyle değişir buda faz gerilimine ve terminal gerilimine dayanan yöntemleri daha karmaşık yapar [17].

(2.25), (2.26), (2.27) denklemlerinin Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$V_{ab}(s) = R_s i_{ab}(s) + L_s s i_{ab}(s) + e_{ab}(s) \quad (2.28)$$

$$V_{bc}(s) = R_s i_{bc}(s) + L_s s i_{bc}(s) + e_{bc}(s) \quad (2.29)$$

$$V_{ca}(s) = R_s i_{ca}(s) + L_s s i_{ca}(s) + e_{ca}(s) \quad (2.30)$$

elde edilir.



SÜRÜCÜ TASARIMI

3.1 Fırçasız DC Motor Sürücüleri

BLDC motoru, fırçalar yerine güç anahtarlarıyla elektriksel olarak komütasyonludur. Fırçasız DC motor, elektronik komütasyon için rotor pozisyonu bilinmesi gereken senkron bir motordur. BLDC'ler üç fazlı bir güç yarı iletken köprüsüne güç sağlayan bir mikrokontrolör kullanılarak kontrol edilir. Bu yarı iletken köprü, kontrol algoritmasına dayalı olarak stator bobinlerine güç sağlar. Rotor pozisyonunun sensörlü veya sensörsüz bir yöntemle tespit edildiği varsayılacak olursa üç fazlı bir BLDC motorda her komütasyon sırasında, pozitif enerjiyle enerjilenen sargılardan birine sahiptir, ikinci sargı negatif enerjilidir ve üçüncü sargıya enerji verilmemiştir.

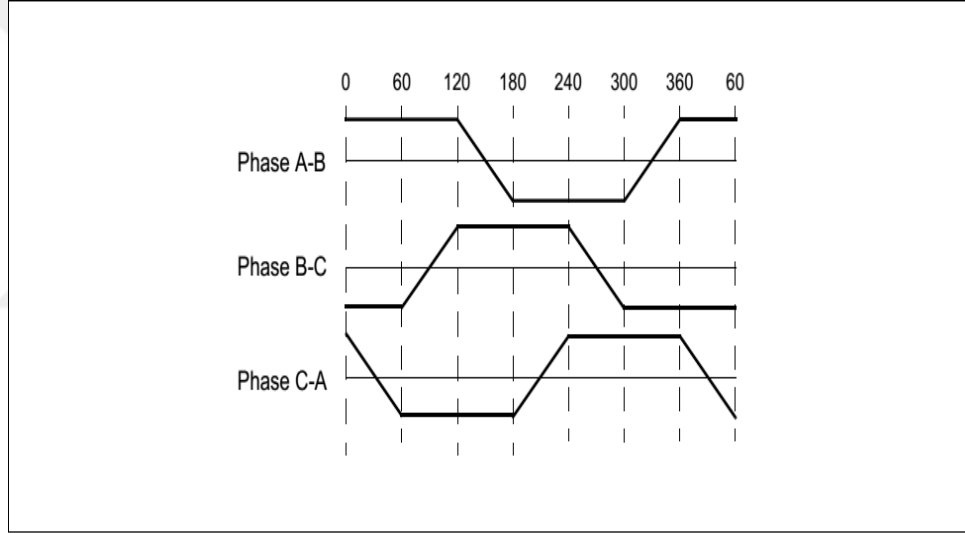
Tork, stator bobinleri tarafından üretilen manyetik alan ile rotordaki daimî mıknatıslar arasındaki etkileşim nedeniyle üretilir. Rotor statorun oluşturduğu döner manyetik alanla aynı hızda döner. Dönme hareketi sonucu rotorun konumu değişir. Yeni konumun tespit edilmesiyle o konuma uygun fazlara enerji verilerek rotorun sürekli dönmesi sağlanır.

Fırçasız DC motorlar, trapezoidal zıt EMK'ya sahiptir ve sabit moment üretmek amacıyla kare dalga akımla çalışacak biçimde tasarlanırlar. Bu tip motorlar;

- Hava boşluğunda dikdörtgen dağılımlı mıknatıs akısı,
- Dikdörtgen akım şekli,
- Yoğunlaştırılmış stator sargıları,

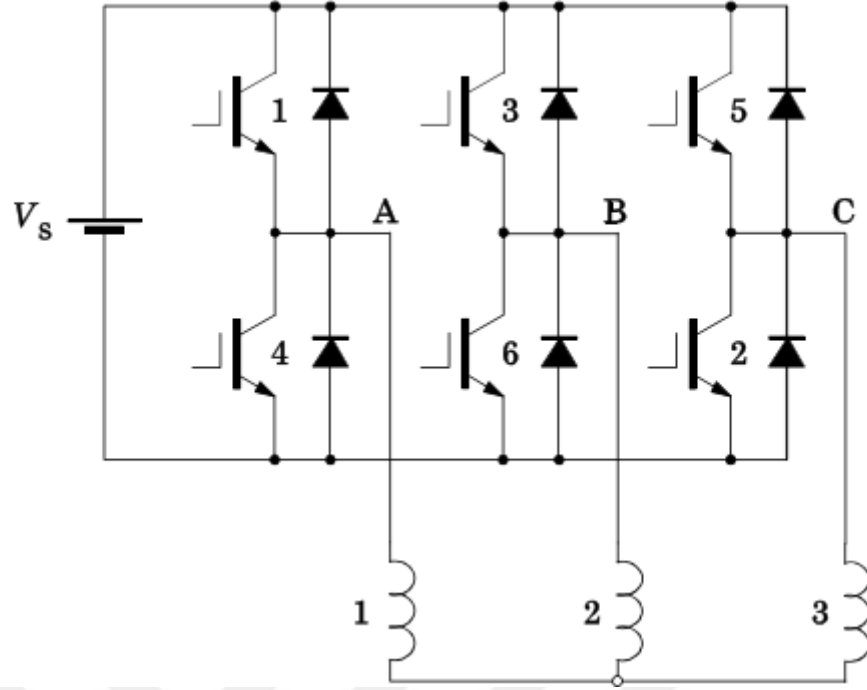
- Sinüzoidal zıt EMK'lı motorlara göre daha düşük üretim maliyeti,
- Sinüzoidal zıt EMK'lı motorlara göre daha basit kontrol yapısı,
- Bir elektriksel çevrim için altı farklı komütasyon noktası,
- Komütasyon anlarında moment dalgalanması,

gibi özelliklere sahiptir. Bu tip fırçasız DC motorların uyarım akımı, kare dalga şeklindedir. Bu kare dalga akım, her faz sargısından bir periyot içerisinde 120° süreyle iki defa geçer. Trapezoidal zıt EMK'lı fırçasız DC motorlar, sinüzoidal zıt EMK'lı motorlarla karşılaştırıldığında, bazı önemli sistem basitleştirmeleri sağlar. Özellikle bir elektriksel çevrimde sadece altı komütasyon anı gerektiği için, rotor pozisyon sensörlerinin kararlılık gereksinimleri çok daha azdır [10].



Şekil 3. 1 Fazlararası Trapezoidal Zıt-EMK [7]

Elektronik güç kaynağına sürücü adı verilir. Düşük güçlü sürücülerde, MOSFET'ler popülerdir çünkü kontrol edilmesi kolaydır ve yüksek frekansta anahtarlanabilirler. MOSFET'ler düşük gerilim düşümlerinden dolayı düşük voltajlı sürücüler için idealdir. Daha yüksek güç ve voltajlarda IGBT'ler kullanılır [14]. Şekil 3. 1'de bir BLDC ait fazlararası Zıt EMK'nın değişimi verilmiştir.

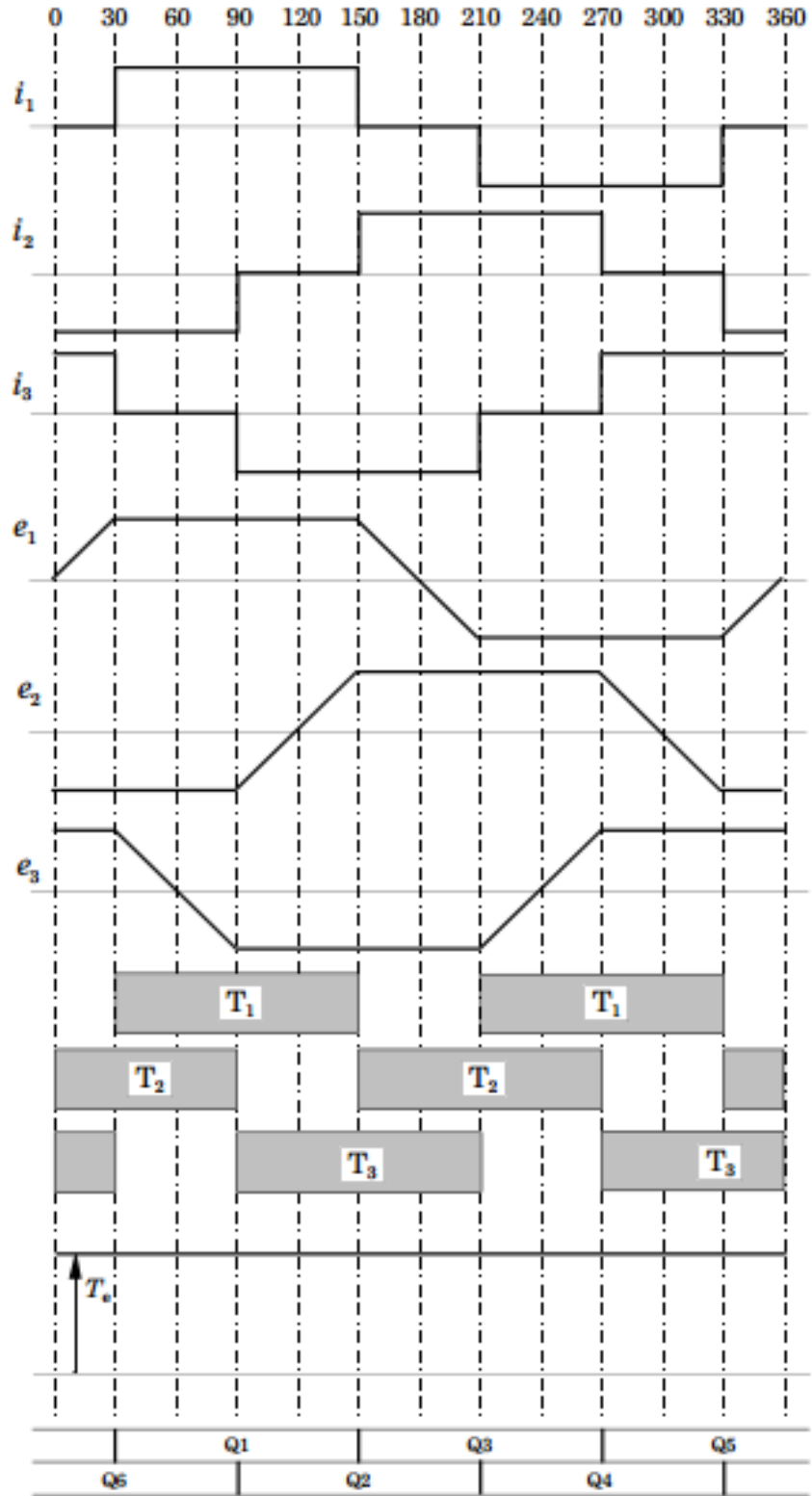


Şekil 3. 2 Yıldız bağlı Fırçasız DC Motor için Sürücü Devresi [14]

Yıldız bağlı motor için akım ve EMK dalga şekilleri Şek. 2. 6, Şekil 3. 1 ve 3. 3'te gösterilmiştir. Çizelge 3. 1'de anahtarların komütasyon çizelgesi verilmiştir. Şekil 2. 10 ve 3. 3'te görüldüğü üzere BLDC motorun akım dalga şekli kare dalga formunda, EMK dalga şekli trapezoidal formdadır. BLDC nin toplam elektromanyetik torku sabittir. 120 derece kare dalga BLDC sürücüsü için Çizelge 3. 1 komütasyon çizelgesi üç fazlı inverterin kaplarına uygulanırsa uygulanırsa BLDC motorun sürme işlemi gerçekleştirilir.

Çizelge 3. 1 BLDC motor sürücüsü için komütasyon çizelgesi [14]

Rotor position [°elec]	Line			Phaseleg A		Phaseleg B		Phaseleg C	
	A	B	C	Q1	Q4	Q3	Q6	Q5	Q2
330-30	0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
30-90	+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
90-150	+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
150-210	0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
210-270	-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
270-330	-1	0	+1	0	1	0	0	1	0



Şekil 3. 3 Faz akımları i_1, i_2, i_3 , Faz EMK'leri e_1, e_2, e_3 , Faz torqları T_1, T_2, T_3 için ideal dalga şekilleri ve Yıldız bağlı BLDC motorun toplam elektromanyetik torku T_e [14]

3.2 Fırçasız DC Motor Sensörlü Sürücüleri

3.2.1 Fırçasız DC Motor Sensörlü Sürücü Genel Yapısı

3 fazlı BLDC motorlarında endüvi bobinlerinin durumunu etkileyen altı komütasyon durumu vardır. Üç adet Hall sensörü tipik olarak döner daimî mıknatısların rotor üzerindeki geçişine cevap veren alternatif stator bobinlerine yerleştirilir. Hall sensörlerinin çıkışı, anahtarlama zamanlamasını belirleyen mantık devresini çalıştırır; mantık devresinde üretilen sinyaller kapı sürücüleri ile güç transistörlerine uygulanarak motorun sürme işlemi gerçekleştirilir [18].

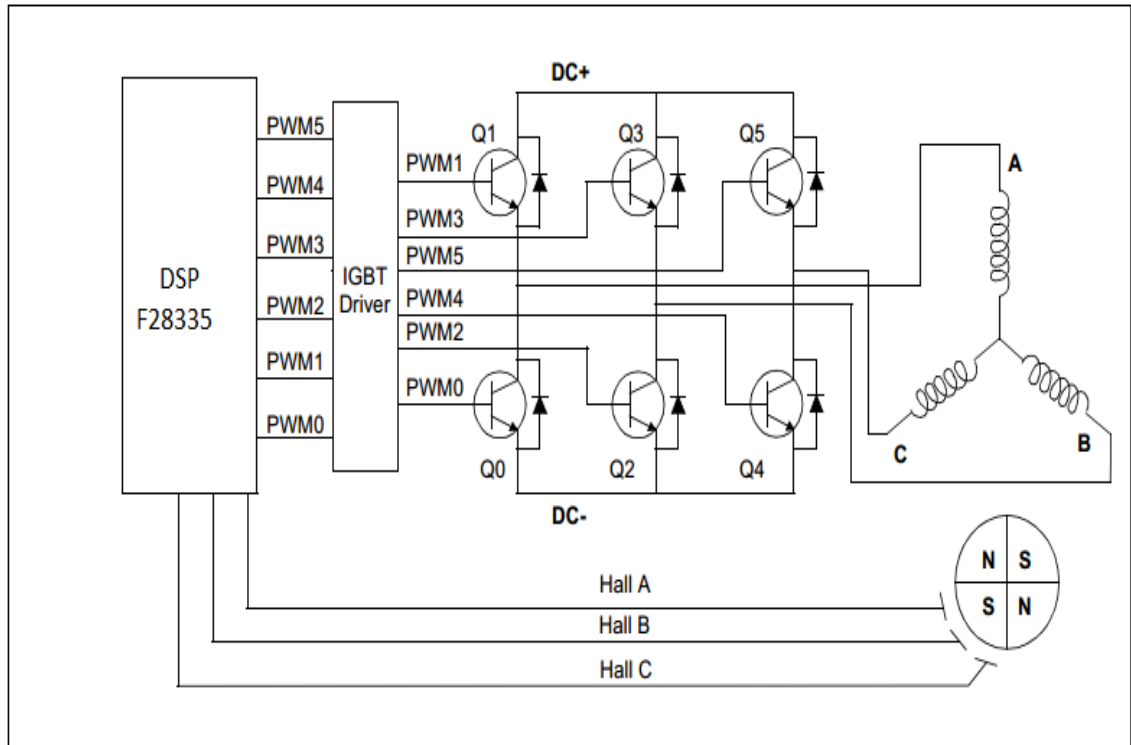
BLDC motorda hız kontrolü için stator sargılarına uygulanan gerilimin ortalama değeri değiştirilerek hız kontrol edilebilir. Bunun için inverter girişindeki DC gerilim değeri değiştirilebilir veya inverter girişindeki sabit olan DC gerilim rotor konumuna göre iletimde olan iki anahtardan birinin doluluk oranı değiştirilerek çıkış gerilimin değeri ayarlanabilir. Hız kontrolü gerekli olan ortalama gerilim değiştirilmesini sağlayan inverterin PWM doluluk oranının kontrolü için PI, PID, Fuzzy Logic gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada PI yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 3. 3'te geri EMK'ye ve faz akımına göre Hall sinyallerinin bir örneğini gösterilmiştir. Her 60 elektriksel devir derecesinde, Hall sensörlerinden biri durumunu değiştirir. Bir elektrik devrini tamamlamak altı adım alır. Senkron olarak, her 60 elektrik derecesinde faz akım anahtarlamasının güncellenmesi gerekir. Ancak, bir elektriksel devri rotorun tam bir mekanik devrine karşılık gelmeyebilir. Mekanik dönüşü tamamlamak için tekrarlanacak elektriksel çevrim sayısı rotor kutup çiftleri tarafından belirlenir. Her rotor kutup çifti için bir elektrik devresi tamamlanır. Dolayısıyla, elektriksel döngü / dönüş sayısı rotor kutup çiftlerine eşittir.

Şekil 3. 4, BLDC motoru sürmek için kullanılan kontrol cihazının blok diyagramını göstermektedir. Q0-Q5, TMS320F28335 sayısal sinyal işlemcisi tarafından kontrol edilen altı tane güç anahtarlarıdır. Motor gerilim ve akım değerleri baz alınarak, bu anahtarlar MOSFET'ler veya IGBT'ler olabilir. Bu çalışmada güç anahtarı olarak MOSFET kullanılmıştır. Çizelge 3. 2, güç anahtarlarının Hall sensör girişlerine (A, B ve C) dayalı olarak anahtarlama sırasını göstermektedir. Hall sensörleri birbirlerine 60 ° veya 120 °

faz kayması olabilir. Bu anahtarlama sırası, birbirine göre 60 derecelik bir faz kayması olan Hall sensör sinyallerine bir örnektir. Her PWMx sinyali, çizelgedeki sıraya göre AÇIK veya KAPALI durumdaysa, motor nominal hızda çalışacaktır. Motorun hızını değiştirmek için uygulanacak PWM sinyallerinin hızı motorun hızının çalışma frekansından daha yüksek bir frekansta olmalıdır. Genellikle, PWM frekansı motorun maksimum frekansının en az 10 katı olacak şekilde üretilir.

PWM'in doluluk oranı değiştirilerek statora verilen ortalama gerilim azalır ve böylece hız azaltılır. PWM ile kontrolün bir diğer avantajı, DC bara gerilimi motor nominal gerilimden çok daha yüksekse, motorun nominal voltajına karşılık gelen PWM doluluk oranını seçilerek motorun kontrol edilebilmesidir [7]. Böylece farklı nominal gerilimlere sahip motorların PWM doluluk oranı değiştirilerek ortalama çıkış gerilimini motorların nominal gerilimlerine ayarlanması sağlanarak kontrolcüye çalışma esnekliği sağlanır. Burada ortalama gerilimin ayarlanmasıyla ilgili pek çok farklı yaklaşım vardır. Eğer PWM sinyallerinin sayısı mikroişlemcide kısıtlıysa üst anahtarlar ilgili sırada tüm süre boyunca açılabilir ve ilgili alt anahtar PWM de gereken doluluk oranı ile kontrol edilebilir.



Şekil 3.4 BLDC sensörlü kontrolü blok diyagramı

Çizelge 3.2 BLDC motor sürücüsü için saat yönü döndürme komütasyon çizelgesi [14]

Sıra	Hall Sensör Girişi			Aktif PWM'ler		Faz Akımı		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	YOK	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	YOK
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	YOK	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	YOK	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	YOK
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	YOK	DC+	DC-

3.2.2 Fırçasız DC Motorun Hız Kontrolü

Motorun hızı, uygulanan voltajla doğru orantılıdır. Önceki bölümde de anlatıldığı gibi Darbe Genişlik Modülasyonunu (PWM) kullanarak transistörleri sürme yoluyla, motora değişken bir ortalama voltaj uygulanabilir. Bu ortalama DC gerilimi motor hızını belirler. Hem yüksek taraf hem de alçak taraflı transistörler %100 doluluk oranında sürekli olarak çalıştıklarında, nominal dc geriliminin sağlanması koşuluyla motor nominal devirde çalışacaktır. Motoru nominal hızın altında istenen bir hızda çalıştırmak için, yüksek taraftan veya düşük taraftan uygulanan komütasyon, darbe genişliği ile modüle edilmelidir.

İki kontrol şeması mümkündür:

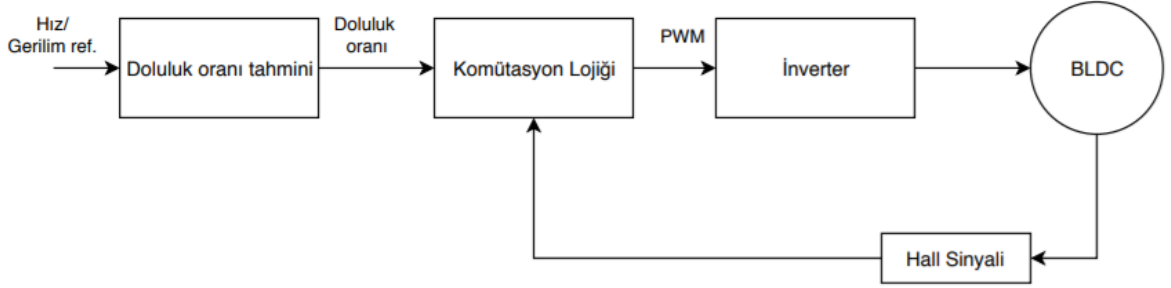
1. Açık çevrim hız kontrolü
2. Kapalı çevrim hız kontrolü

3.2.2.1 Açık Çevrim Hız Kontrolü

Açık çevrim hız kontrolünde, doluluk oranı, belirlenen referans hızına göre hesaplanır. Kapalı çevrim hız kontrolü durumunda, gerçek hız ölçülür ve hata farkını bulmak için

referans hız ile karşılaştırılır. Bu çalışmada kapalı çevrim hız kontrolü kullanılmış olup PI kontrolcüsü kullanılmıştır. Hata farkı, PI denetleyicisine verilmiştir. PI denetleyicisinin çıktısı istenen doluluk oranını verir.

Şekil 3. 5'te BLDC motorun açık çevrim hız kontrolü blok diyagramıyla gösterilmiştir. Ayarlanmış bir referans hız için doluluk oranı, motorun nominal hızına göre tahmin edilir.



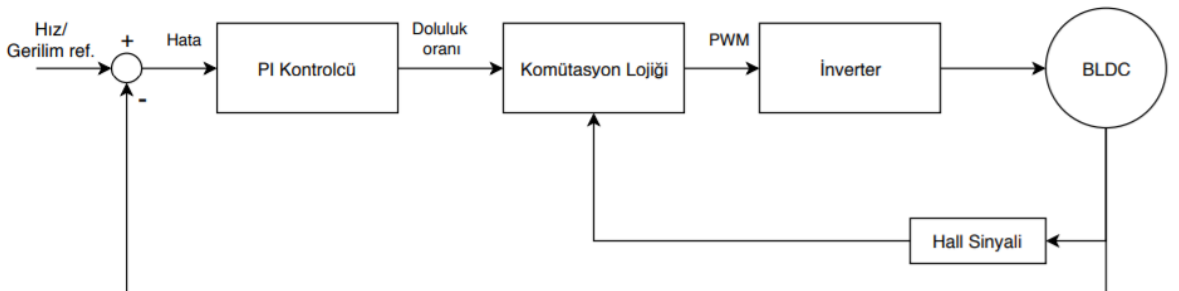
Şekil 3. 5 Açık Çevrim BLDC hız kontrol şeması

3.2.2.2 Kapalı Çevrim Hız Kontrolü

Düşük maliyetli, düşük çözünürlüklü hız gereksinimleri için, Hall sinyalleri hız geri bildirimini ölçmek için kullanılabilir. F28335'den bir zamanlayıcı, iki Hall geçişleri arasında sayım yapmak için kullanılabilir. Bu sayıcı ile motorun gerçek hızı hesaplanabilir.

Yüksek çözünürlüklü hız ölçümleri için motora 90 derece faz farkı ile iki sinyal veren bir optik kodlayıcı takılabilir. Bu sinyalleri kullanarak hem hız hem de dönüş yönü belirlenebilir. Ayrıca enkoderların çoğunda bir her devirde bir darbe üreten üçüncü bir sinyal verir, bu sinyal konumlandırma uygulamaları içinde kullanılabilir [7].

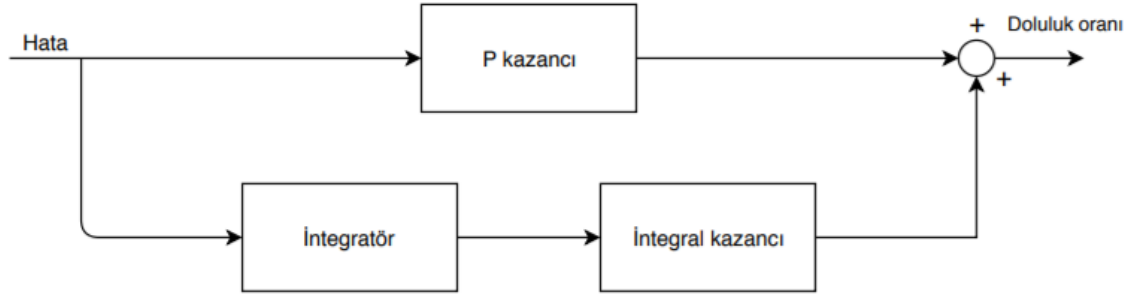
Şekil 3. 6, BLDC motorunun kapalı çevrim hız kontrolünün blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3. 6 Kapalı Çevrim BLDC hız kontrol şeması

3.2.2.3 PI Kontrolcüsü

PID denetleyicisi, modern mühendislik sisteminde geribildirim kullanmanın en yaygın yoludur. Türev işlemi kullanılmadığında PI kontrolcüsü olarak isimlendirilir. Gerçek ve istenen hız arasındaki fark PI denetleyicisine girilir ve bu farka göre PWM işaretlerinin doluluk oranı, istenilen hızı korumak için gereken voltaj genliğine karşılık gelecek şekilde üretilir. Şekil 3. 7'de PI kontrolcüsünün fonksiyonel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3. 7 PI kontrolcüsü fonksiyonel gösterimi

Sürekli zaman domeninde, PWM doluluk oranı çıkışı aşağıda verilmiştir;

$$Duty Cycle = K_p * error + K_i * \int error * dt \quad (3.1)$$

Ayrık zaman domeninde, PI kontrolcüsü aşağıdaki denklemlerle açıklandığı şekilde uygulanır;

$$y_n(k+1) = y_n(k) + K_i * e(k) \quad (3.2)$$

$$y(k+1) = y_n(k+1) + K * e(k) \quad (3.3)$$

Burada,

$K_i = \text{İntegral Kazancı}$

$K_p = \text{Orantılı Kazancı}$

$e(k) = \text{Hata değeri}$

$y(k+1) = \text{Sonraki hesaplanan doluluk oranı}$

$y_n(k) = \text{Son hesaplamaya kadar entegre hata değeri}$

$y_n(k+1) = \text{Geçerli tümleşik hata değeri}$

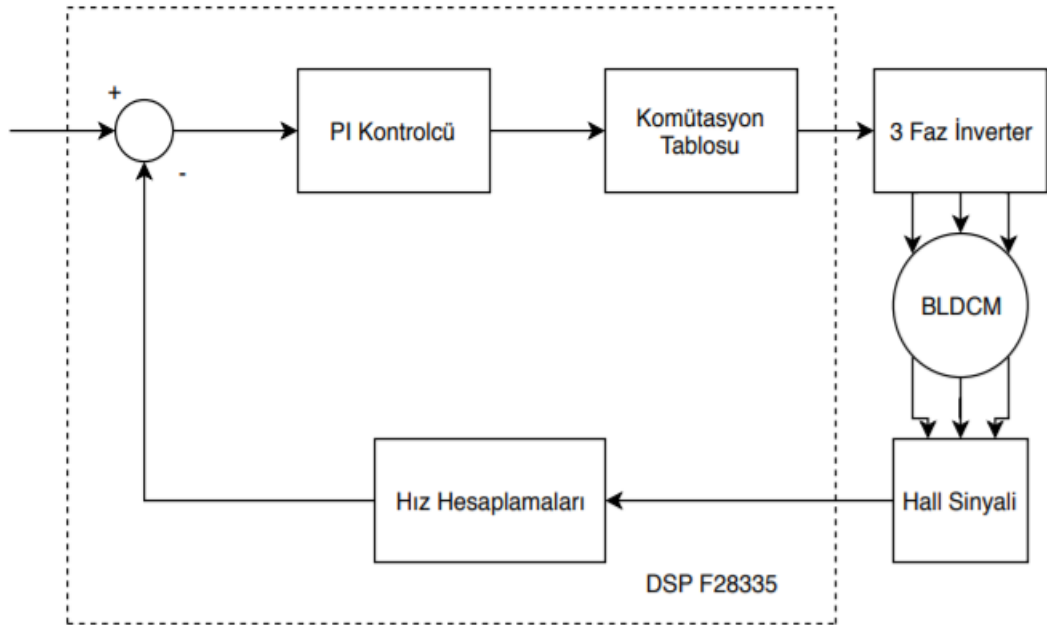
Gerçek K_p ve K_i değerleri ölçümlenilerek aşağıdaki gibi kullanılır;

$$k_p = K_p * 2^{15} / 64 \quad (3.4)$$

$$k_i = K_i * 2^{15} \quad (3.5)$$

Burada, K_p ve K_i , yazılımda kullanılan Ölçekli Orantı ve İntegral Kazanç değerleridir.

Yüksek doğruluk elde etmek için, mümkün olduğunca hem giriş hem de çıkış değerleri 16 biti dolduracak şekilde ölçeklendirilerek küçük yuvarlama hataları kullanılabilir. Doğruluk nedenlerinden ötürü ölçeklendirilen K_p ve K_i 'nin gerçek değerleri son olarak PWM doluluk oranı hesaplaması için fiili değerlere ölçeklendirilmiştir. PI kontrolcüsünün yürütülmesi sırasında, doluluk oranının güncelleştirmesi için gerçek değerler yeniden hesaplanır. PI kontrolcüsünün uygulaması ve PWM sinyallerinin üretilmesi DSP F28335 tarafından yapılmıştır. Şekil 3. 8'de PI kontrolcüsüyle hız kontrol sisteminin yapısı gösterilmiştir. Burada hall sensörleri ile daha önce belirtildiği gibi F28335 in bir sayıcısı kullanılarak elde edilen hız bilgisi referans değerlere karşılaştırılarak hata bilgisi elde edilir. PI kontrolcüsünün uygulanması ve PWM işaretlerinin üretilerek 3 fazlı invertere verilmesi DSP F28335 ile sağlanır.



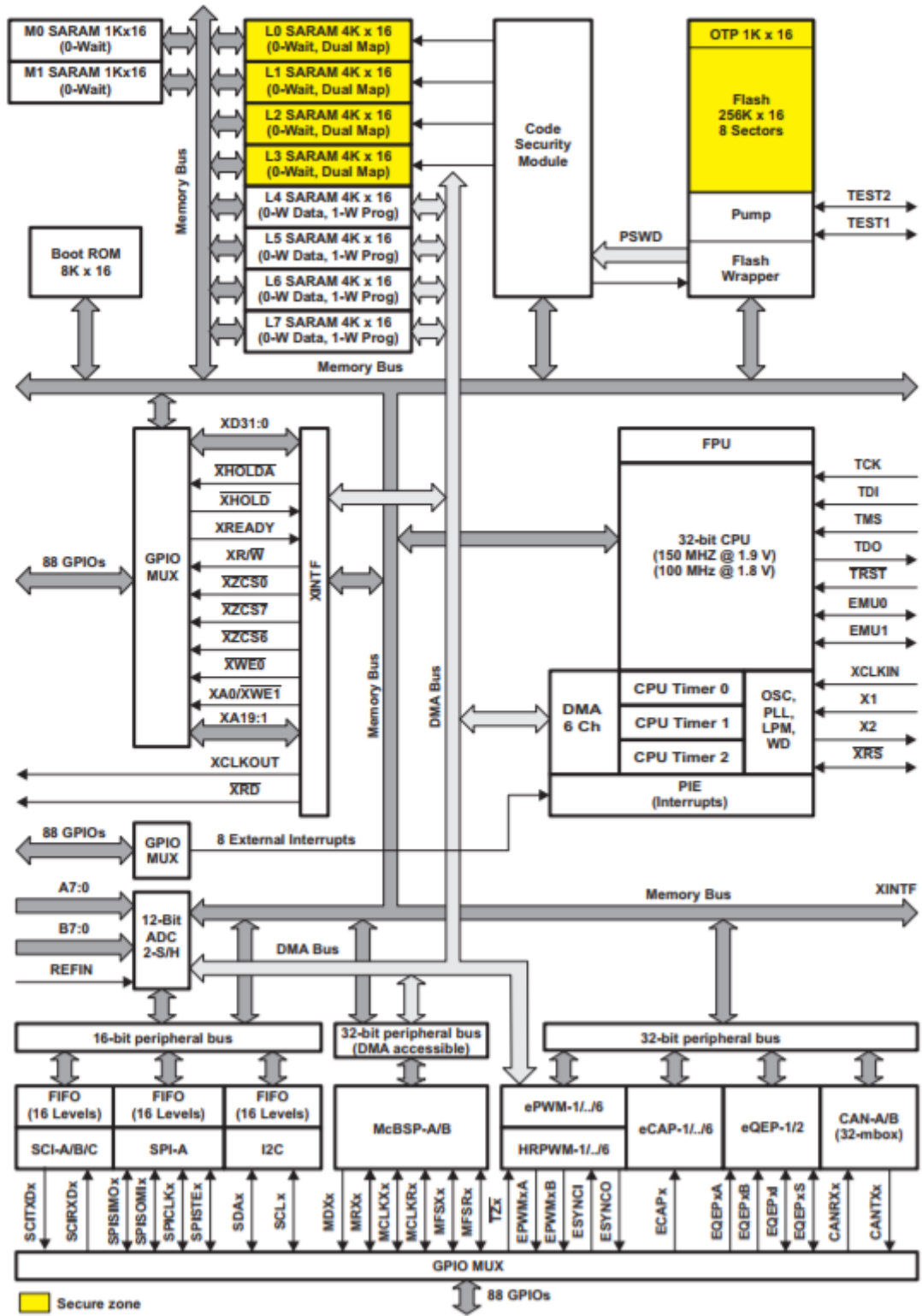
Şekil 3. 8 PI kontrolcüsüyle hız kontrol sistemi

3.2.3 TMS320F28335 DSP Özellikleri

Mikroişlemcili denetleyicilerin performansı ve kapasitelerinin gelişimine bağlı olarak elektrik makinalarının hız, konum ve moment gibi dinamiklerin denetiminde de daha karmaşık yöntemler başarıyla uygulanabilmektedir. Özellikle vektör tabanlı denetim sistemler yüksek hızlı ve doğrulukta işlem başarımına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle günümüzde sayısal işaret işleyiciler(DSP's) elektrik makinalarının vektör tabanlı denetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [19]. TMS320F2833x serisi, Texas Instruments tarafından zorlu kontrol uygulamaları için yüksek entegreli, yüksek performanslı olarak üretilen bir DSP serisidir [20]. Bu çalışmada kontrol yöntemlerinin uygulanması ve motor sürücülerinin kontrolünde TMS320F28335 DSP si kullanılmıştır. TMS320F28335, Endüstriyel AC İnverter Sürücüleri, Endüstriyel Servo Yükselteçler ve Kontrol Cihazları, Bilgisayar Nümerik Kontrollü (CNC) İmalat, Kesintisiz ve Sunucu Güç Kaynakları, Telekomünikasyon Ekipmanları Gücü, Güneş Enerjisi Cihazları gibi birçok güç elektroniği ve kontrol uygulamalarında kullanıla bir DSP türüdür [21].

Bu bölümde önce F28335 DSP'nin kısa tanıtımı ve ardından F28335 DSP'nin kullanılmış modülleri ve özellikleri ayrıntılı bir açıklaması verilmiştir. ADC ve PWM modülleri motor kontrol uygulamalarında sık kullanılan modüller olduğu için ayrıntılı açıklamaları yapılmıştır. PWM modülünün bu projede, üç fazlı sinyallerinin invertere gönderilmesi, kontrol döngüsü süresinin belirlenmesi ve analog-dijital dönüşümlerin senkronize edilmesi gibi önemli bir rol oynaması nedeniyle, PWM modülü bu bölümün büyük bir bölümünü alacaktır.

TMS320F28335 DSP, kayan noktalı işlem yapan 32-bit 150Mhz bir işlemci olup, 18-kanal 6.67ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlı programlanabilir PWM çıkışı, 16 kanal 12-bit 80ns dönüşüm zamanlı A/D çevirici, 6 adet sayısal yakalama girişi ve 2 adet kare dalga kodlayıcı girişi, Giriş Filtreleme özelliğine sahip 88'e kadar Bireysel Olarak Programlanabilir Sayısal giriş-çıkış , ANSI C / C ++ Derleyicisi / Assembler / Linker, Code Composer Studio™ IDE, DSP / BIOS™ ve SYS / BIOS, Dijital Motor Kontrol ve Dijital Güç Yazılım Kütüphaneleri geliştirme desteği içerir [21].

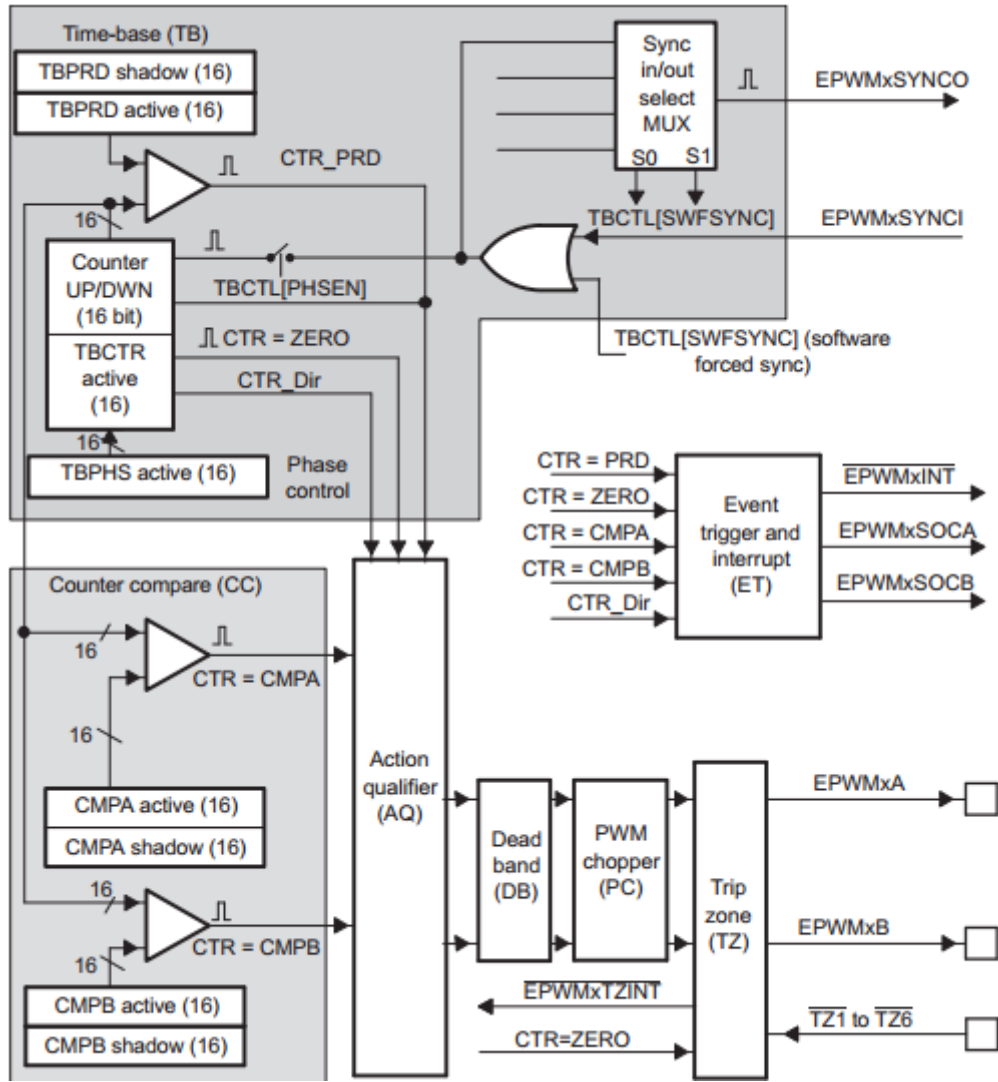


Şekil 3.9 F28335'in fonksiyonel blok diyagramı [21]

3.2.4 PWM Modülü

Geliştirilmiş darbe genişlik modülatörü (ePWM), hem ticari hem de endüstriyel ekipmanlarda bulunan birçok güç elektronik sisteminin kontrolünde kilit bir unsurdur. Bu sistemler, dijital motor kontrolü, anahtarlı güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve diğer güç dönüştürme biçimlerini içerebilir. EPWM çevrebirimi, bir dijital-analog (DAC) işlevi gerçekleştirir; buradaki görev döngüsü bir DAC analog değerine eşdeğerdir. TMS320F28335, altı bağımsız gelişmiş PWM (ePWM) modülüne sahiptir. Burada gelişmiş PWM ifadesiyle kastedilen efektif bir PWM çevrebirimi, minimum CPU yükü veya müdahalesi ile karmaşık darbe genişliği dalga formları üretebilmesidir [22].

EPWM modülünün her biri, ePWMxA ve ePWMxB olmak üzere ePWMx modülüne ait iki çıkış kanalına sahiptir. Her ePWM modülü, PWM dalga formlarının üretilmesinde farklı işlevleri yerine getirebilen yedi alt modül içerir. Bunlar time-base(TB) altmodülü, counter-compare(CC) altmodülü, action qualifier(AQ) altmodül, dead-band generator(DB) altmodülü, PWM-chopper(PC) altmodülü, trip-zone(TZ) altmodülü ve event-trigger(ET) altmodülleridir. Her alt modül ile birlikte bir ePWM modülünün yapısı ve alt bölümleri arasındaki sinyal bağlantıları Şekil 3. 10'da gösterilmiştir [22].



Şekil 3. 10 ePWM Alt Modülleri ve İç Sinyal Bağlantıları [22]

3.2.4.1 Zaman – Taban Altmodülü

Her bir ePWM modülündeki en temel alt modül olan zaman-taban altmodülü, kendi ePWM modülü için olay zamanlamasını üstlenir. PWM zaman-taban saati, PWM modülündeki tüm olayların zamanlamasını düzenlemek için kullanılır. PWM modülü için zaman-taban saati T_{TBCLK} 'nın periyodu, sistem saati $T_{SYSCLKOUT}$ 'ın periyodunun ölçeklendirilmesiyle aşağıda ifade edildiği gibi belirlenir [22];

$$T_{TBCLK} = T_{SYSCLKOUT} * CLKDIV * HSPCLKDIV \quad (3.6)$$

Burada CLKDIV ve HSPCLKDIV zaman-taban kontrol yazmacında (TBCTL) bitlerdir.

İstenilen PWM frekansını elde etmek için, zaman-taban dönem kaydı (TBPRD) belirlenmesi gerekiyor. Yukarı sayım modu için, TBPRD ile PWM frekansı (f_{PWM}) arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir:

$$T_{PWM} = 2 \times TBPRD \times T_{TBCLK} \quad (3.7)$$

$$f_{PWM} = 1/T_{PWM} \quad (3.8)$$

3.2.4.2 Sayıcı Karşılaştırıcı Altmodülü

EPWMxA çıkışı ve / veya EPWMxB çıkışı için PWM doluluk oranını belirler. Aynı zamanda EPWMxA veya EPWMxB çıkışlarında geçiş olaylarının meydana gelme zamanı belirler [22].

3.2.4.3 İşlem Niteleyicisi Altmodülü

Zaman-taban veya karşı-karşılaştırmalı bir alt modül olayı meydana geldiğinde uygulanacak eylem türünü belirler. Bu eylemler;

- Eylem yok
- EPWMxA ve / veya EPWMxB çıkışı high olarak değiştirilir,
- EPWMxA ve / veya EPWMxB çıkışı low olarak değiştirilir,
- EPWMxA ve / veya EPWMxB çıkışı geçilir.

Ayrıca bu alt modül yazılım kontrolüyle PWM çıkış durumunu zorlamak, PWM ölü bandı yazılım yoluyla yapılandırma ve kontrol etme eylemlerini gerçekleştirebilir [22].

3.2.4.4 Ölü zaman Altmodülü

Üst ve alt anahtarlar arasındaki bütünüleyici ölü bant ilişkisinin kontrolünü gerçekleştirir [22].

3.2.4.5 PWM-kıyıcı Altmodülü

Kıyıcı (taşıyıcı) frekansı oluşturur. PWM-kıyıcı alt modülü, yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyalin eylem-niteleyici ve ölü bantlı alt modüller tarafından üretilen PWM dalga biçimini modüle etmesine olanak tanır. Güç anahtarlama elemanlarını kontrol etmek

için darbe transformatörü tabanlı kapı sürücülerine ihtiyaç varsa bu özellik önemlidir [22].

3.2.4.6 Trip-zone Altmodülü

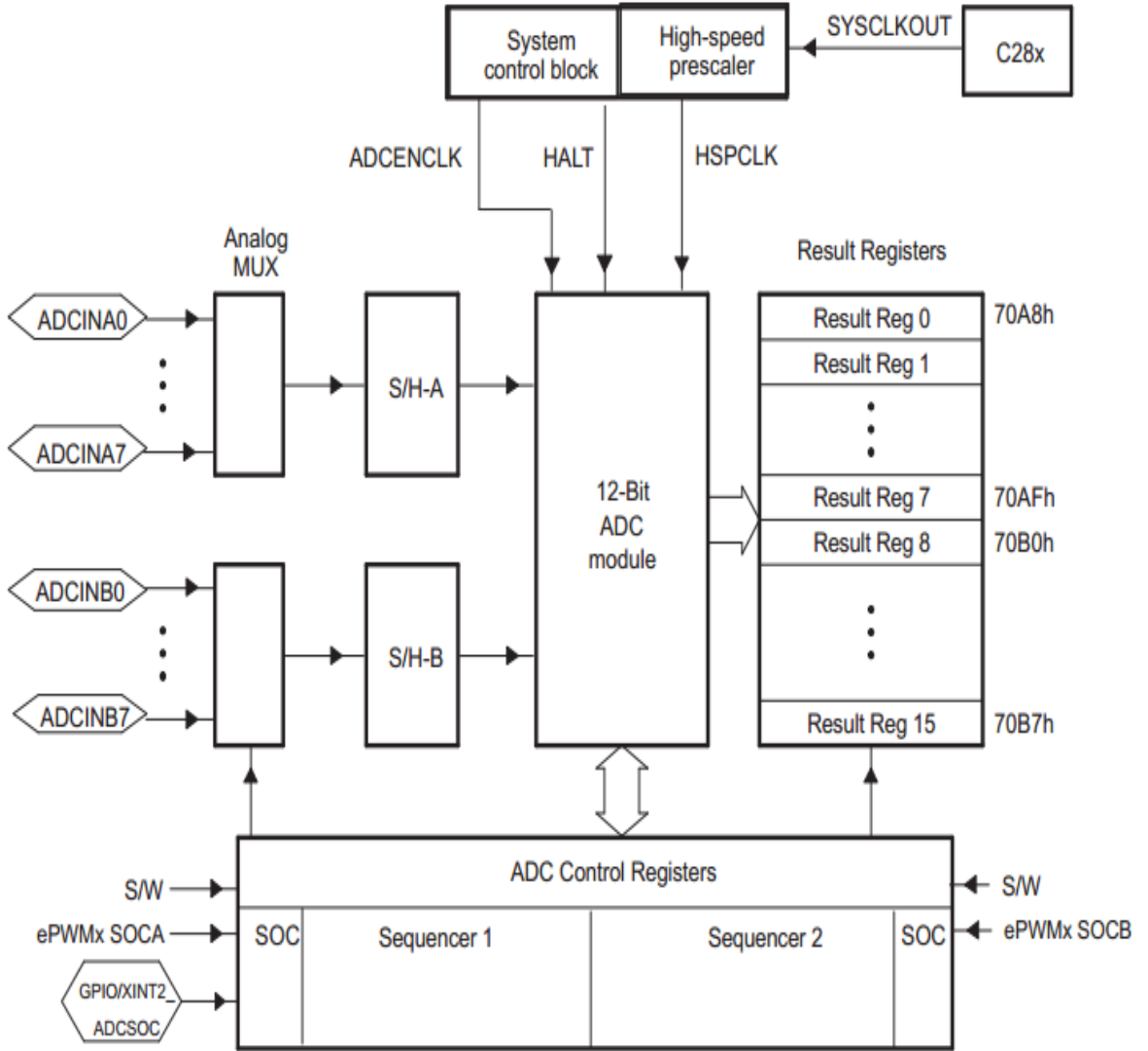
EPWM modülünü, trip-zone pimlerinin birine, tümüne veya hiçbirine tepki verecek şekilde yapılandırmaya olanak verir. Bu sinyaller harici arıza veya açma koşullarını gösterir ve ePWM çıkışları arızalar oluştuğunda buna göre cevap verecek şekilde programlanabilir [22].

3.2.4.7 Olay Tetikleyicisi Altmodülü

Bir örnekleme süresi boyunca önce Analog-Dijital Dönüşüm (ADC) yürütülür, daha sonra örneklenen veriler PWM çıkışını hesaplamak için kullanılır. Bu nedenle, ADC ve PWM'in aynı hızda çalışması için senkronize edilmesi gerekir. EPWM'deki olay tetikleyici modülü, olay girişlerini aldıktan sonra kesme isteği veya ADC dönüşümü yapmaktır. Akım dalgalanmaları sebebiyle oluşabilecek örtüşmeyi önlemek için, taşıyıcı dalga tepeleri her zaman örnekleme zamanı olarak seçilir [22].

3.2.5 ADC Modülü

TMS320x2833x ADC modülü 12 bitlik bir hatlı analogdan dijitale çeviricidir (ADC). F28335'in ADC modülünün blok diyagramı Şekil 3. 11'te gösterilmektedir. ADC modülü, ePWM modüllerine hizmet etmek için iki bağımsız 8 kanal modülü olarak yapılandırılabilen 16 kanala sahiptir. İki bağımsız 8 kanal modülü, 16 kanallı bir modül oluşturmak için kaskad edilebilir. Örneklenecek olan kanal, kendisine karşılık gelen 4-bit adresini MUX'a gönderilerek seçilebilir. Birden çok giriş kanalı ve iki sıralayıcı olmasına rağmen, ADC modülünde yalnızca bir dönüştürücü bulunur. Her bir sıralayıcıda, dönüşüm tamamlandığında, seçilen kanal değeri ilgili ADCRESULT kaydında saklanır [23]. 16 adet ADCRESULT yazmacı vardır 16 ADC kanalından her birinin dönüşüm değeri keyfi olarak istenilen ADCRESULT yazmacında kayda alınabilir. Burada işlemci yükünü azaltmak ve sistem performansını artırmak için genellikle her ADC kanalının aktif edilmesinden ziyade DSP de dönüşüm yapacak ADC sayısı kadar kanal aktif edilir ve dönüşüm işlemi yapan kanal sayısı kadar ADCRESULT kaydı tutulur.



Şekil 3.11 ADC modülünün blok diyagramı [23]

ADC modülünün işlevleri şunları içerir:

- Yerleşik çift örnekleme-ve-tutma (S / H) özelliğine sahip 12 bit ADC çekirdeği
- Eşzamanlı örnekleme veya ardışık örnekleme modu
- Analog giriş: 0 V ila 3V
- Hızlı dönüştürme süresi 12.5 MHz
- Sıralayıcı iki bağımsız 8-durumlu sıralayıcı veya kaskad bağlı 16-durumlu sıralayıcı
- Dönüşüm değerini depolamak için 16 sonuç kayıtçları (ayrı ayrı adreslenebilir) [23]

Burada önemli bir noktada F28335'in ADC modülünün analog giriş gerilim değerinin 0 ila 3V arasında olmasıdır. Bu yüzden ADC girişine gelen analog sinyal 3V'u hiçbir zaman geçmeyecek şekilde bir ADC giriş yapısı tasarlanmalıdır.

ADC modülü 12 bitlik olduğu için okuyabileceği maksimum değer 4096 dır. Buna göre giriş analog voltajının dijital değeri,

$$\text{Digital Değer } 0, \text{ giriş} \leq 0V \quad (3.9)$$

$$\text{Dijital Değer} = 4096x \frac{\text{Analog Giriş Değeri} - ADCL0}{3}, 0V < \text{giriş} < 3V \quad (3.10)$$

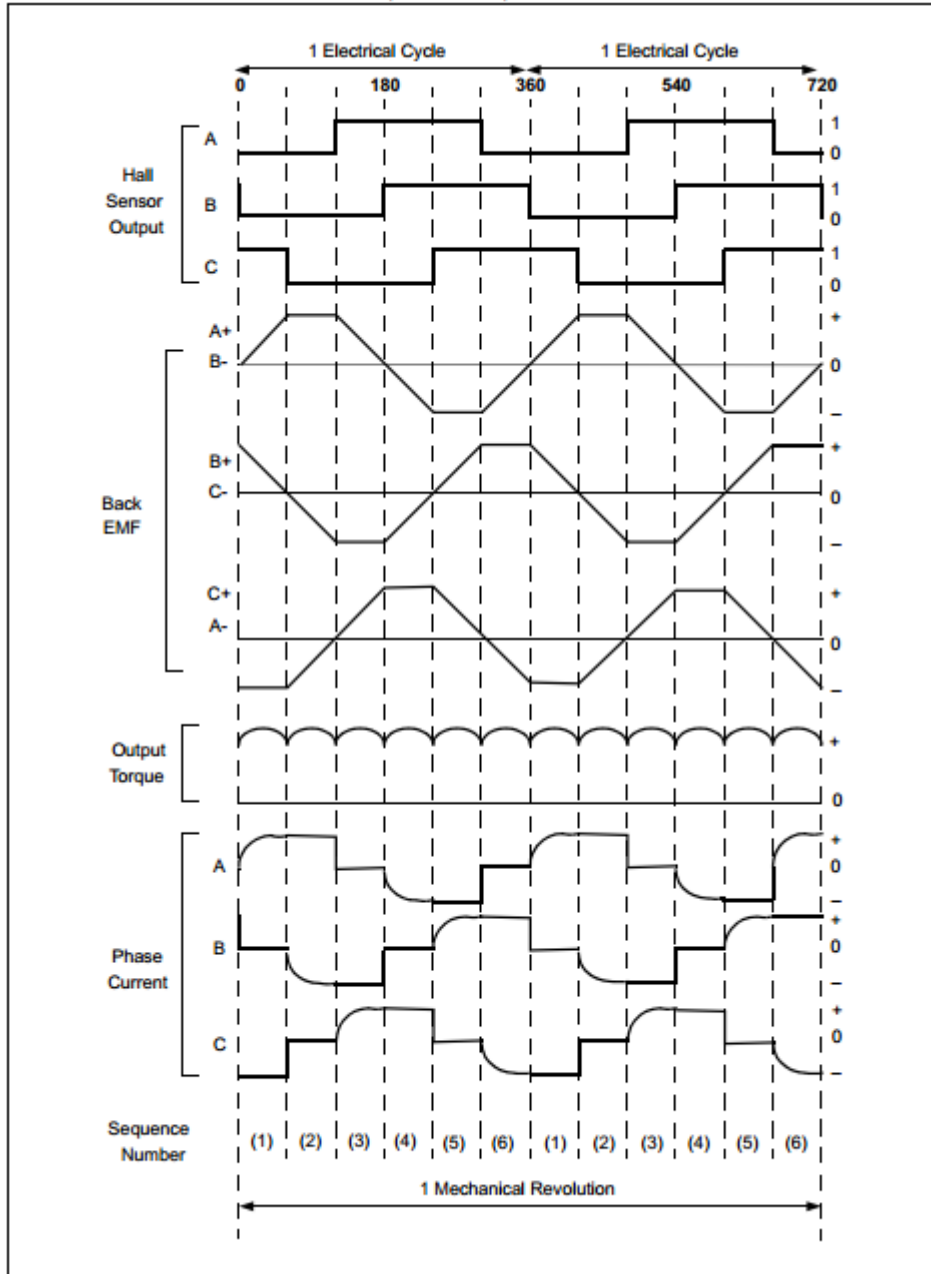
$$\text{Digital Değer } 4096, \text{ giriş} = 3V \quad (3.11)$$

Eğer ADC modülü ile okunacak işaret negatif bileşenlerde içeriyorsa ve bu negatif değerlerde okunmak istiyorsa örneğin sinüzoidal bir işaret ADC'den okunması için örneklenecek işaretler en fazla 1.5V genlikli olacak şekilde ayarlanmalı ve negatif maksimum işaret 0V pozitif maksimum işaret 3V olacak şekilde bir analog işaret bindirme devresinden geçirilmelidir.

3.3 Fırçasız DC Motor Sensörsüz Sürücüleri

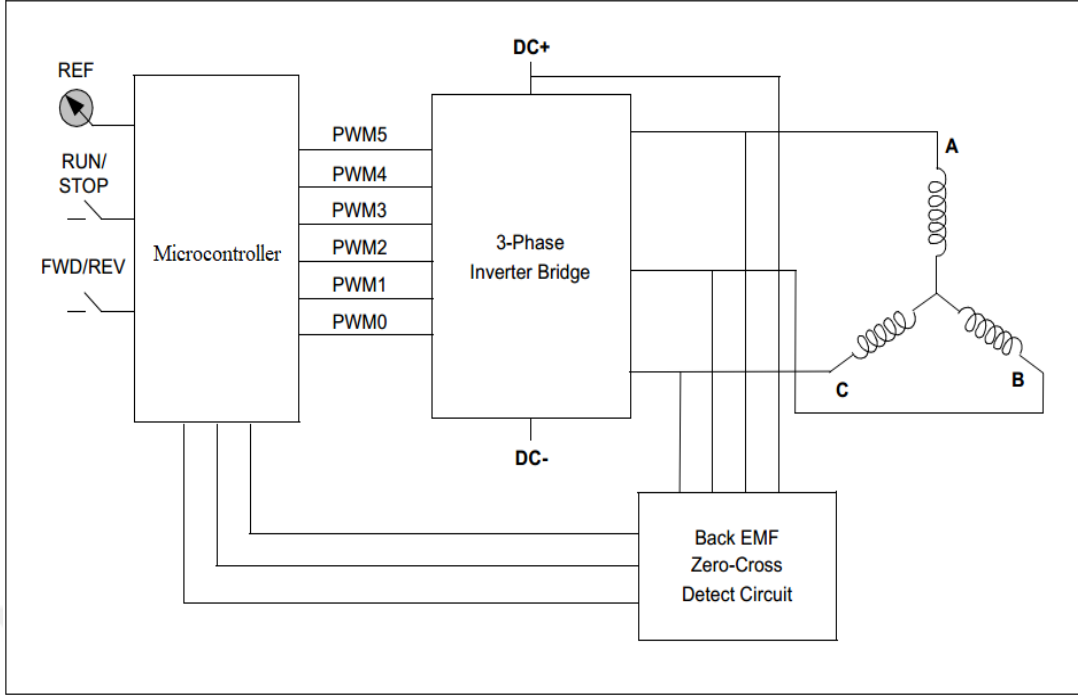
3.3.1 Fırçasız DC Motor Sensörsüz Sürücüleri Genel Yapısı

BLDC sürücüsünde, inverter köprüsündeki güç anahtarlarına uygun komütasyon dizisini sağlamak için bir konum sensörü gerekir. Pozisyon sensörü sadece genel sürücü sisteminin maliyetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda kontrol sağlamlığını ve güvenilirliğini de azaltır. Ayrıca, sınırlı montaj alanı ve şiddetli titreşim veya yüksek sıcaklığa sahip zor çalışma ortamı nedeniyle bir konum sensörünün monte edilmesi ve muhafaza edilmesi zor olabilir. Bu nedenle rotor konumunun ve hızının tahmini için çeşitli sensörsüz kontrol şemaları geliştirilmiştir [28]. Sensörsüz sürücünün bir yaklaşımı, uyarılmış faz zıt EMK bilgisinin kullanılmasıdır. Motor çalışırken, stator bobinlerinde zıt EMK oluşur ve rotorun konumunu tahmin etmek için kullanılabilir.



Şekil 3. 12 Hall sensörü sinyali, zıt EMK, çıkış torku ve faz akımı [7]

Şekil 3. 12'de gösterildiği gibi, Hall sensör sinyali, zıt EMK'nın voltaj polaritesi pozitiften negatife veya negatiften pozitifte geçtiğinde durumunu değiştirir. İdeal durumda, bu olay zıt EMK sıfır geçişinde olur, ancak pratik olarak, sarım özellikleri nedeniyle bir gecikme olacaktır. Bu gecikme mikrodenetleyici tarafından telafi edilmelidir. Şekil 3. 13'te, bir BLDC motorunun sensörsüz kontrolü için bir blok diyagramını gösterilmektedir.

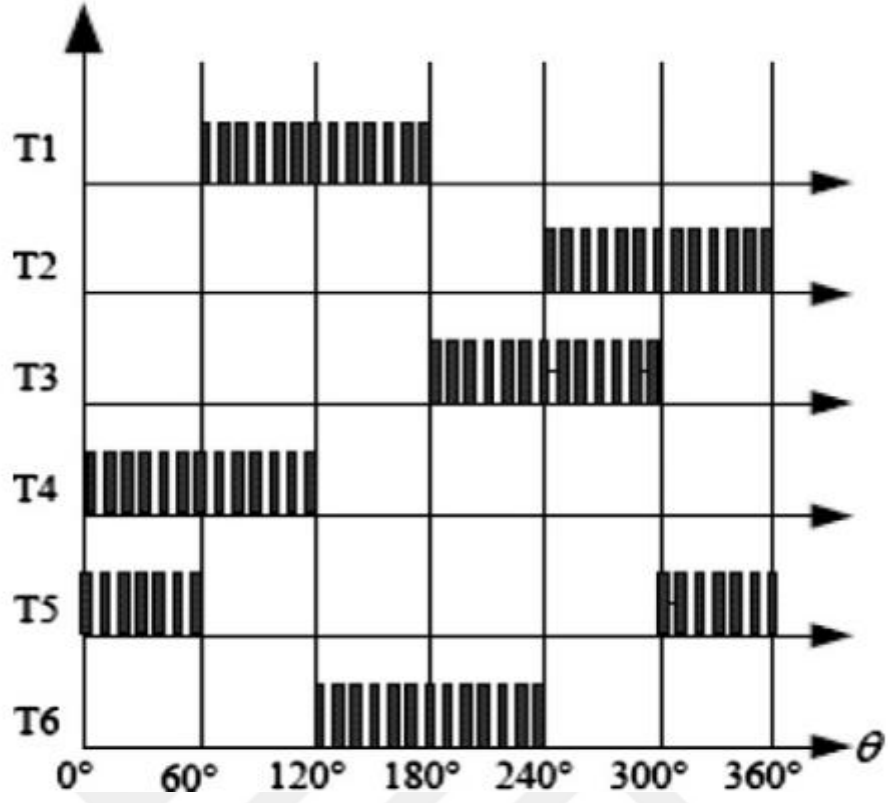


Şekil 3. 13 BLDC sensörsüz kontrol blok diyagramı [7]

Burada dikkate alınması gereken bir hususta çok düşük hızlardır. Zıt EMK dönme hızı ile orantılı olduğundan, çok düşük bir hızda, zıt EMK sıfır geçişi de çok düşük bir genlikte olacaktır. Motor, açık döngüde, durma noktasından başlatılmalı ve sıfır geçiş noktasını tespit etmek için yeterli zıt EMK oluşturulduğunda kontrol sistemi, zıt EMK algılamasına geçiş yapmalıdır.

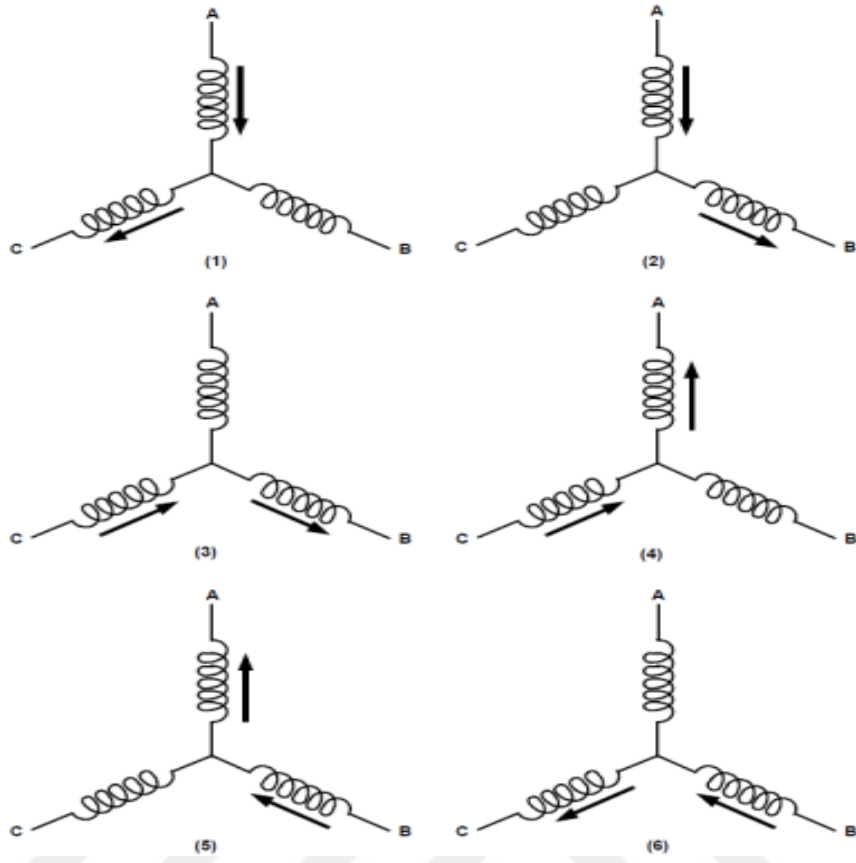
3.3.2 Zıt Emk Algılama Yöntemi

Şekil 3. 14'de PWM kontrol sinyallerini göstermektedir. Yüksek taraf güç cihazı, bir temel periyotta her ardışık 120° 'de kıyıcı sinyali ile kontrol edilir. İlgili düşük taraf kontrol sinyali yüksek taraf kontrol sinyalinin 180° faz kaydırılmasıyla elde edilir. Bu PWM tekniği, düşük güç MOSFET tabanlı BLDC motor sürücüleri için çok popülerdir, çünkü bootstrap sürücü devresi kabul edilebilir. Bu PWM kontrol tekniği, özellikle bootstrap sürücü devreli inverter kullanılan düşük güç BLDC motor sürücüleri için çok faydalıdır. Bu sürücü yaklaşımı, endüstri uygulamaları için uygun maliyetli bir çözüm sunar [29].



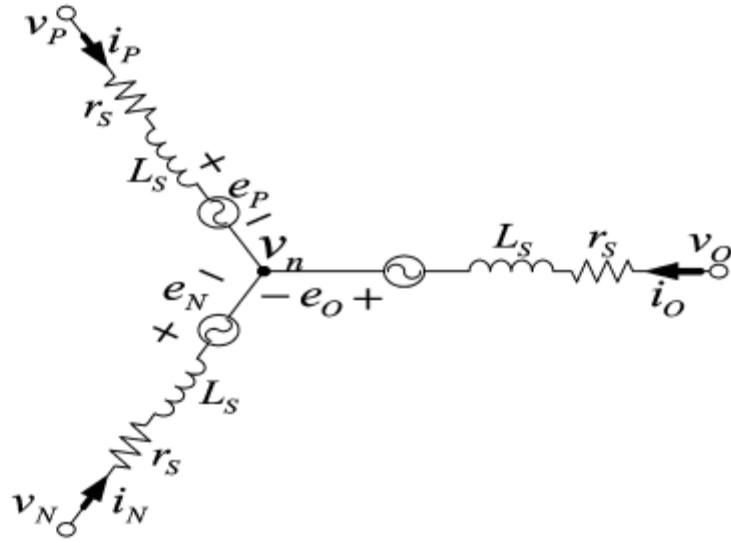
Şekil 3. 14 Yüksek taraf ve alçak taraf PWM kontrol sinyalleri

Şekil 3.16'te, üç fazlı sargıların terminal voltajları gösterilmiştir. Şekil 3. 16'te gösterildiği gibi, " v_p ", PWM kontrol periyodu sırasında pozitif dc baraya bağlı faz için terminal voltajını gösterir. " v_N " negatif dc baraya bağlı fazın terminal voltajını gösterir. " v_o " boştaki fazın terminal voltajıdır. Zıt EMK voltajı, boştaki fazın terminal voltajı ile tespit edilir.



Şekil 3. 15 Sargı enerjilenme sırasına göre enerji akışı

Şekil 3. 15'te BLDC motorun fazlarının enerjilenme sırası gösterilmiştir. Bu gösterimde Şekil 3. 14 ve Şekil 3. 12'de gösterildiği üzere her 60° de olan faz enerjilenme sırası değişimleri motorun bir elektriksel döngüsü için 6 farklı durumda olacaktır. Bu 6 farklı durumdan oluşan enerjilenme ve anahtarlama çizelgesi daha önce Çizelge 3. 1 de verilmiştir.



Şekil 3. 16 BLDC motorun sargıların terminal voltajları [29]

Zıt EMK boştaki fazın terminal voltajından tespit edildiğinden, aşağıdaki denklemler türetilebilir:

$$i_P = -i_N \text{ ve } i_O = 0 \quad (3.12)$$

Şekil 3. 16'da Kirchoff'un Voltaj Yasası uygulanırsa,

$$\begin{aligned} v_n &= v_P - \left(i_P r_s + L_s \frac{di_P}{dt} \right) - e_P \\ &= v_N + \left(i_P r_s + L_s \frac{di_P}{dt} \right) - e_N \end{aligned} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) ten aşağıdaki ifade elde edilebilir,

$$v_n = \frac{v_P + v_N}{2} - \frac{e_P + e_N}{2} \quad (3.14)$$

Şekil 3. 16'dan ve (3.12) den boştaki fazın terminal voltajı,

$$v_O = v_n + e_O = \frac{v_P + v_N}{2} - \frac{e_P + e_N}{2} + e_O \quad (3.15)$$

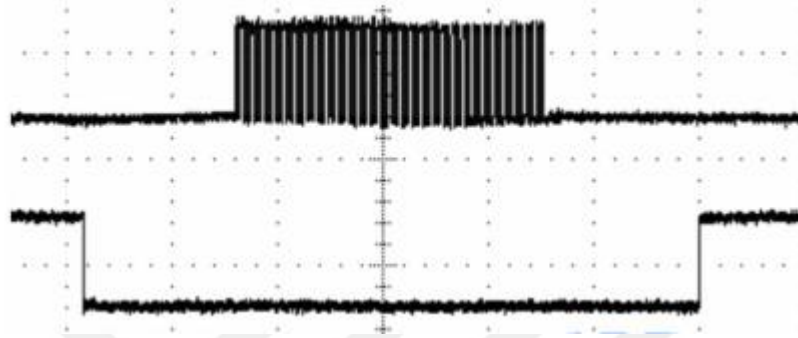
Burada,

$$e_P + e_N = 0 \quad (3.16)$$

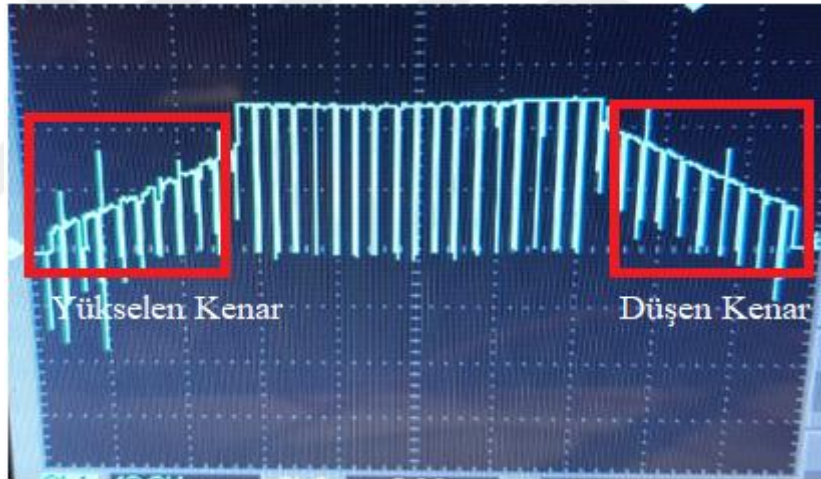
Buradan denklem (3.15) yeniden düzenlenirse,

$$v_O = \frac{v_P + v_N}{2} + e_O \quad (3.17)$$

(3.17)'da görüldüğü üzere, boştaki fazın terminal voltajı, PWM kontrol periyodu sırasında pozitif ve negatif dc baralarındaki faza uygulanan voltaja bağlıdır. Şekil 3. 17 ve Şekil 3. 18, PWM kontrol sinyallerini ve terminal voltajını göstermektedir. Şekil 3. 18'te gösterildiği gibi, boştaki fazın terminal voltajı ya yükselen kenara ya da düşen kenara sahiptir. Her ikisi içinde, terminal voltajı sıfıra ulaştığında sıfır geçiş noktası oluşur.

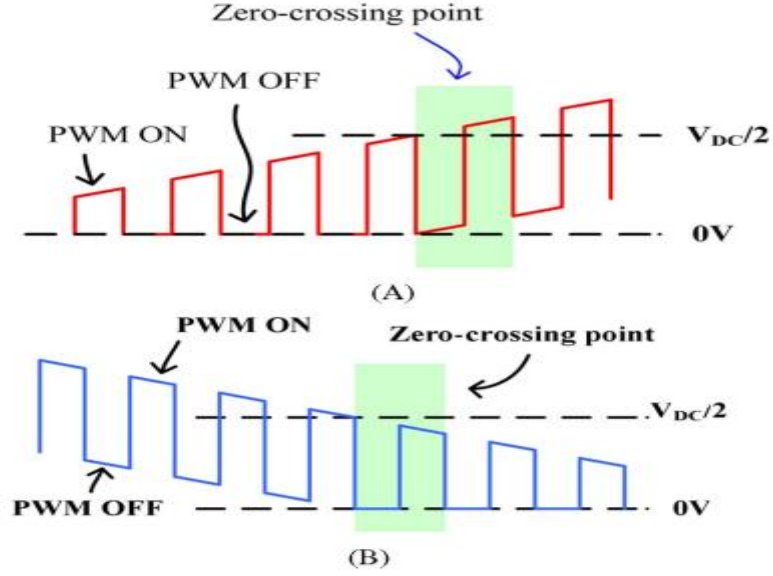


Şekil 3. 17 PWM kontrol sinyalleri



Şekil 3. 18 Ölçülen sonuçlar, terminal voltajı

Şekil 3. 19 (a) 'da gösterilen yükselen kenar için, kıyıcı sinyali "ON" ve "OFF" olduğunda, boştaki fazın terminal voltajı analiz edilir. "PWM Açık" periyodunda, "pozitif faz" pozitif dc baraya ve "negatif" faz negatif dc baraya bağlıdır.



Şekil 3. 19 Terminal gerilimi. (a) Yükselen kenar (b) Düşen kenar [29]

Boştaki faz için terminal voltajı (3.17) ile türetilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_o = \frac{V_{DC}}{2} + e_o \quad (3.18)$$

Bu durumda, sıfır geçiş noktası algılama koşulu:

$$v_o = \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.19)$$

PWM tekniği için “PWM Off” periyodunda “pozitif faz” ve “negatif faz” negatif dc baraya bağlanır. Boştaki faz için terminal voltajı (3.17) ile türetilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_o = e_o \quad (3.20)$$

Şekil 3. 19 (b), düşen kenar durumunda boştaki fazın terminal voltajını göstermektedir. PWM tekniği için “PWM On” periyodunda “pozitif faz” pozitif dc baraya ve “negatif” faz negatif dc baraya bağlanır.

Boştaki faz için terminal voltajı (3.17) ile türetilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_o = \frac{V_{DC}}{2} + e_o \quad (3.21)$$

Bu durumda, sıfır geçiş noktası algılama koşulu:

$$v_o = \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.22)$$

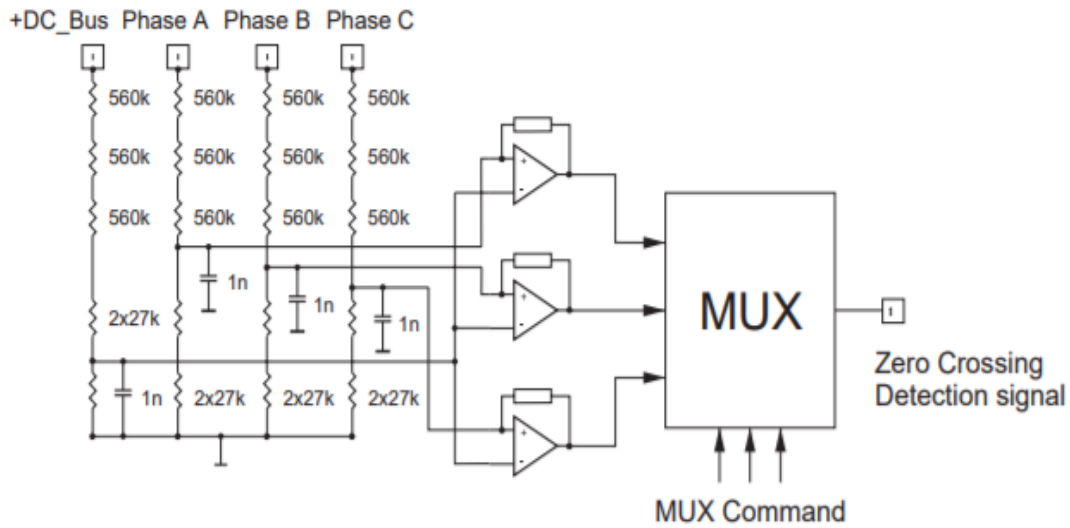
Şekil 3. 28 (b) de görüldüğü gibi PWM tekniği için “PWM Off” periyodunda “pozitif faz” ve “negatif faz” negatif dc baraya bağlanır. Boştaki faz için terminal voltajı (3.17) ile türetilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_o = e_o \quad (3.23)$$

Bu nedenle, sıfır geçiş meydana geldiğinde boştaki fazın terminal gerilimi “0” dır. Bu yüzden, sıfır geçiş noktası algılama koşulları, PWM kontrol teknikleri ve PWM kontrol durumu “PWM Açık” veya “PWM Kapalı” tarafından belirlenir.

3.3.3 Zıt EMK Algılama Devresi

Zıt EMK algılama devresinin uygulanması, Şekil 3. 20'da gösterilmektedir.

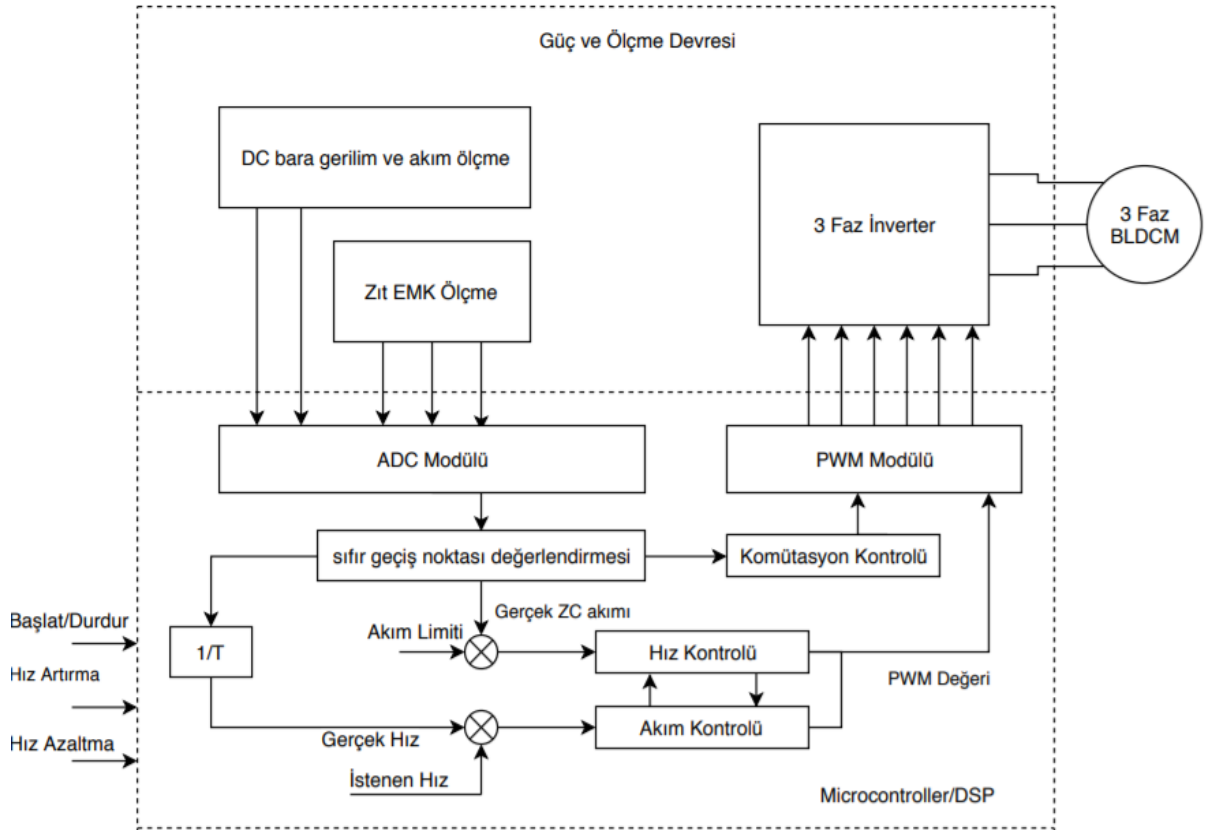


Şekil 3. 20 Zıt EMK Algılama Devre Şeması

Önceki bölümler de değinildiği üzere fazın sıfır geçişini, terminal voltajının (boştaki fazın) yarım DC-bara voltajı seviyesini geçtiği an tespit edilebilir. Direnç ağı, algılanan voltajları 0-15V'luk bir voltaj seviyesine bölmek için kullanılır. Karşılaştırıcılar, giriş sinyalinin sıfır voltaj farkını algılar. Basit bir RC filtresi, karşılaştırıcıların MOSFET anahtarlaması esnasında üretilen gerilim piklerinden rahatsız edilmesini önler. MUX, komütasyon sırasına karşılık gelen faz karşılaştırıcı çıkışını seçer. Bu Sıfır Geçiş Algılama sinyali, zamanlayıcı giriş pinine aktarılır. Shunt direnci DC bara akımını ölçmek için kullanılır. Elde edilen sinyal doğrultulur ve yükseltilir (1.65V offset ile 0-3.3V). Kontrolcünün A/D dönüştürücüsü ve Sıfır Geçiş algılaması PWM sinyali ile senkronize edilir [8].

3.3.4 Sensörsüz Sürücü Kontrolü

Sensörsüz rotor pozisyonunu algılama tekniği ile, motor sargılarında indüklenen zıt EMK'nın sıfır geçiş noktalarını tespit edilerek BLDC motorun kontrol edilmesini sağlayan sürücü konsepti Şekil 3. 21' de verilmiştir. Üç faz sargılarından enerjilendirilmeyen faz ile faz Zıt EMK Sıfır Geçiş noktaları algılanır. Elde edilen bilgi, enerji verilmiş faz çiftini değiştirmek ve Darbe Genişliği Modülasyonunu kullanarak faz voltajını kontrol etmek için işlenir. Zıt EMK sıfır geçişi algılama ile konum tespit edilir. Direnç ağı, algılanan voltajları 0-3.3V'luk bir voltaj seviyesine bölmek için kullanılır. Sıfır Geçiş algılama, MOSFET'lerin anahtarlanmasıyla üretilen yüksek voltaj artışlarını filtrelemek için yazılım ile PWM sinyalinin merkezi ile senkronize edilir [8].



Şekil 3.21 Sensörsüz BLDC sürücü konsepti

BLDC motorunu başlatmak ve çalıştırmak için kontrol algoritması aşağıdaki durumları içermelidir:

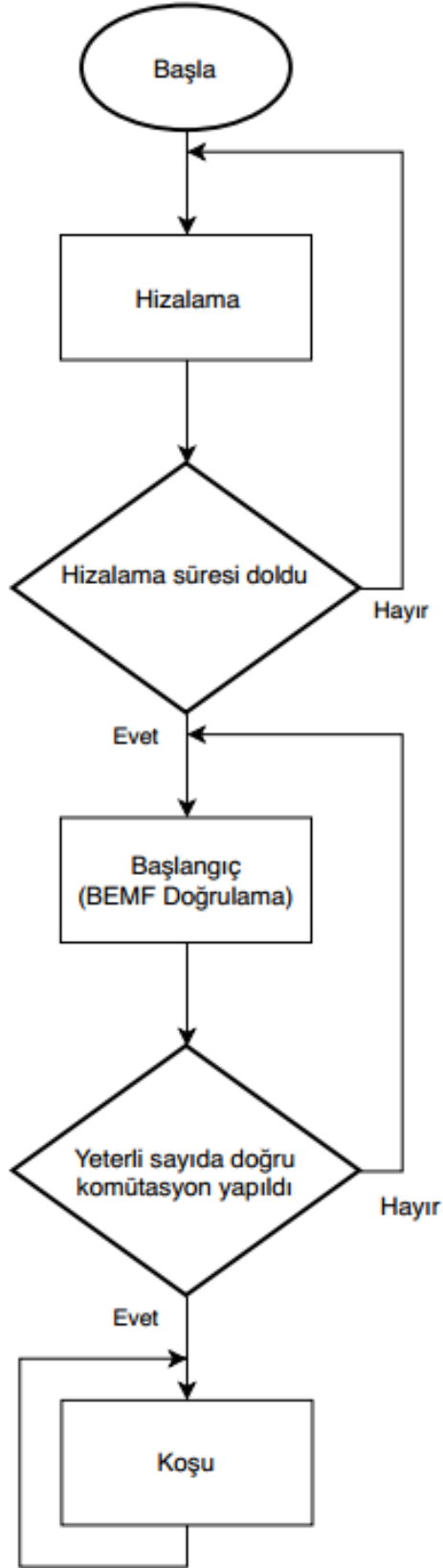
- Hizalama
- Başlangıç (Back-EMF Toplama)

- Koşu

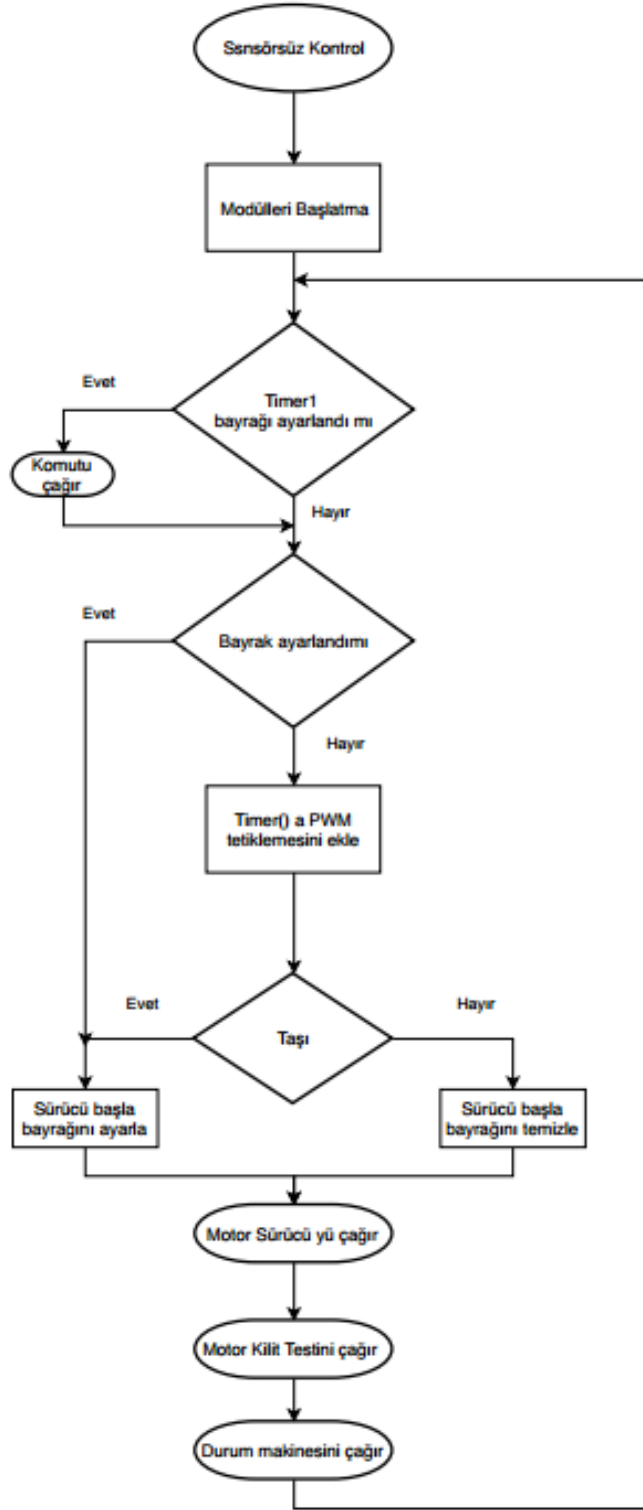
Şekil 3.22, durumlar arasındaki geçişleri göstermektedir. İlk olarak rotor bilinen bir pozisyona hizalanır; daha sonra rotasyon konum geri bildirimi olmadan başlatılır. Rotor hareket ettiğinde, Zıt-EMK elde edilir, minimum sayıda doğru komütasyon elde edildikten sonra komütasyon şemasına göre normal çalışma moduna yani koşu aşamasına geçilir ve normal çalışma algoritmaları koşulur. Minimum sayıda doğru komütasyon elde edilmezse Zıt EMK doğrulama algoritmasına dönülür ve yeterli koşul elde edilene kadar bu döngü sürer.

Şekil 3.23’de sensörsüz kontrolün mikroişlemcide yürütülecek algoritması verilmiştir. Sensörsüz algoritmanın çalışmaya başlatılmasının ardından mikroişlemci/dsp’nin ADC, PWM vb. modülleri initialize olarak adlandırılan aşamayla başlatılır. Akış diyagramında da görünen timer bayrak işlemlerinin tamamlanmasıyla akışta motor sürücü yazılımı çağırılır, sürücü yazılımı çalışmaya başladıktan sonra rotor kilit testi çağırılır ve testin durum makinesi yazılımının çağırılmasıyla sensörsüz kontrol algoritması tamamlanmış olur.

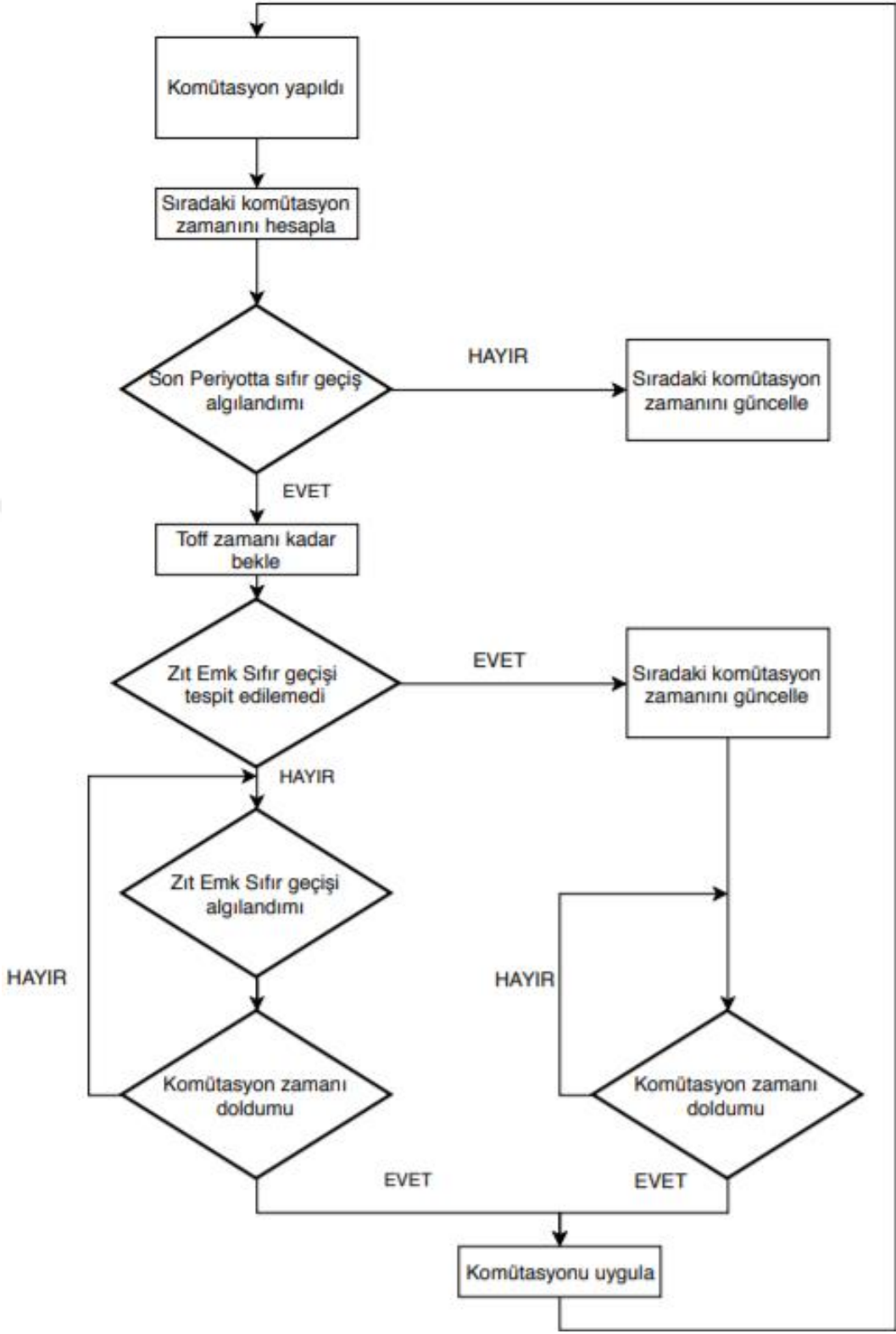
Şekil 3.24 Zıt EMK sıfır geçişleri ile komütasyon arasındaki içeren algoritmanın akış diyagramıdır. Bu diyagramda sıfır geçişinin tespit edilmesi ve edilememesi durumunda yapılacak işlemler yer almaktadır.



Şekil 3. 22 Komütasyon Kontrol Aşamaları



Şekil 3. 23 Sensörsüz Kontrol Akış Diyagramı



Şekil 3. 24 Zıt EMK sıfır geçişi tespitiyle BLDC komütasyon akış diyagramı

3.3.4.1 Hizalama

Motor durağan haldeyken, sadece iki motor fazına PWM sinyalleri uygulanarak (komütasyon olmadan) rotor konumu stabilize edildiğinde kısa bir süre (motorun elektrik zaman sabitine bağlı olarak) vardır. Akım Denetleyici akımı önceden tanımlanmış sınırlar içinde tutar. Bu durum, yüksek bir başlangıç torku oluşturmak için gereklidir. Önceden ayarlanmış zaman aşımı süresi dolduğunda, bu durum biter.

PI regülatörlü Current Controller alt rölesi DC Bara akımını kontrol etmek için çağrılır. Gerekli akım için doğru PWM oranını ayarlar.

Akım PI denetleyicisi, PWM frekansı tarafından belirlenen sürekli yürütme (örnekleme) periyoduyla çalışır: Akım Denetleyici süresi = $1 / \text{PWM frekansı}$.

3.3.4.2 Koşu

Komütasyon süreci, Zıt EMK sıfır geçişinin başarılı bir şekilde yakalanmasını sağlayan yeni seridir, yeni komütasyon zamanı hesaplanır ve son olarak, komütasyon gerçekleştirilir. Komütasyon sırası doğru şekilde gerçekleştirildiği sürece bu aşama devam eder. Rotorun kilitlenmesinden dolayı motorun sonraki komütasyonlara geçmemesi durumunda belirlenen süre kadar beklenilir ve rotorun kilitli olduğu tespit edilirse enerji kesilir.

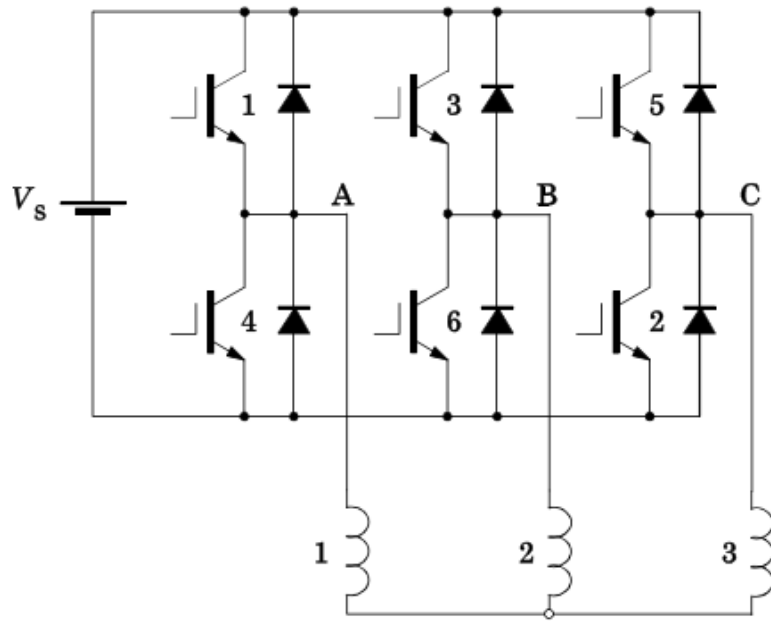
3.3.4.3 Başlangıç

Back-EMF algılama tekniği, rotor konumunun sensörsüz bir şekilde algılanmasını sağlar, ancak sürücünün bu geri bildirim olmadan ilk başlatılması gerekir. Bu, indüklenen voltajın genliğinin motor hızıyla orantılı olmasından kaynaklanır. Bu nedenle Zıt EMK çok düşük bir hızda algılanamaz ve özel bir başlatma algoritması gerçekleştirilmelidir [8].

Bu çalışmada BLDC motorun başlangıçta çalıştırılabilmesi için uygulanan açık çevrim kontrol algoritması aşağıda açıklanmıştır. Rotor ilk önce bir ön ayar adımı ile bilinen bir konuma getirilir. Rotorun müteakip rotasyonu 120 derecelik bir elektriksel tetikleme ve ardından Zıt EMK'nin sıfır geçişlerine dayanan cihazların sıralı bir tetiklemesi ile elde edilir. Önerilen başlangıç yöntemi için akış şeması Şekil 3. 26'de gösterilmektedir. Prosedür, önceden belirlenen iki fazın enerjilendirilmesiyle başlar. Her uyarma adımı,

iletimde olan inverter cihazlarının kapı sinyalleriyle gösterilir. Üç fazın herhangi ikisi ile başlanılabilir [4].

Örnek olarak, B ve C fazları, rotoru önceden konumlandırmak için önceden belirlenmiş fazlar olarak alınır. Motorun faz B'si, DC güç kaynağının + terminaline ve faz C'si beslemenin – terminaline sürücünün 3 ve 2 anahtarlarını iletime sokarak (Şekil 3. 2, Şekil 3. 12) bağlanır. Şekil 3. 2'de verilen Fırçasız DC Motor için Sürücü Devresi görseli algoritmayı daha kolay takip edebilmek için aşağıda tekrar verilmiştir.



Şekil 3. 25 Fırçasız DC Motor için Sürücü Devresi [14]

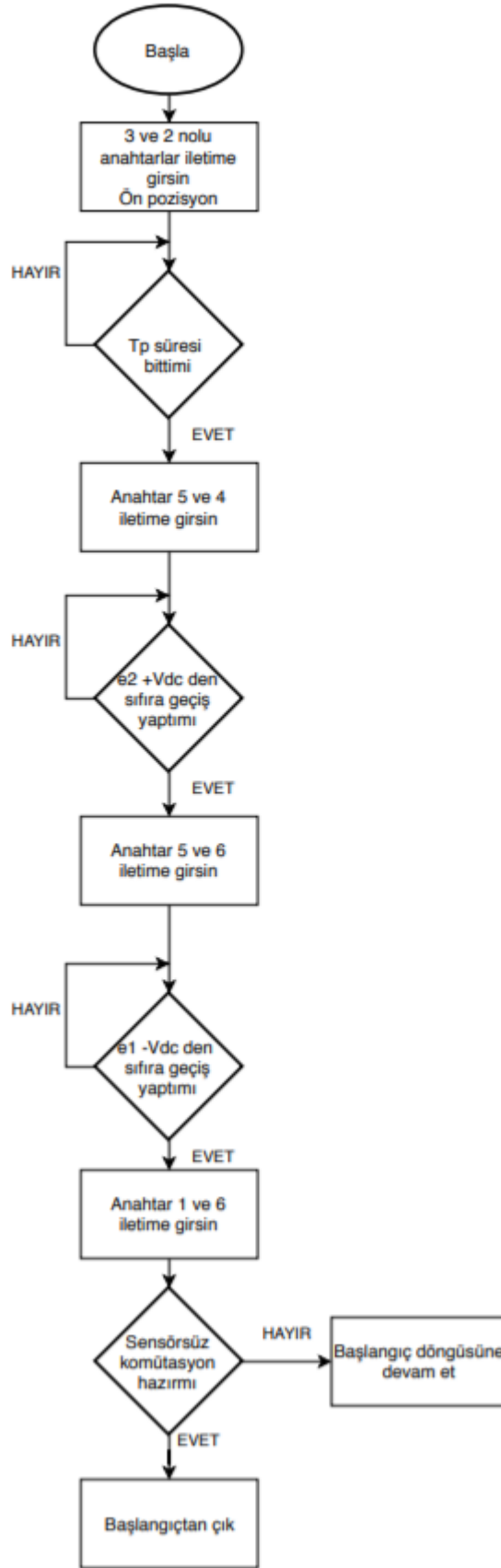
Bu anahtarlar, motorun eylemsizliğine ve yük kapasitesine bağlı olarak sabitlenebilen, belirlenmiş bir zaman süresi (T_p) boyunca uyarılmaktadır. T_p aralığının sonunda, rotor bilinmeyen bir pozisyondan bilinen pozisyona hareket eder. Daha sonra, C ve A fazları, maksimum torku elde etmek için enerjilendirilir. C ve A fazlarının enerjilendirilmesinin, önceden belirlenmiş başlangıç uyarma fazları B ve C'den iki anahtarlama sırası sonra olduğuna dikkat çekilebilir (Çizelge 3. 3). Bu, faz B'nin zıt EMK'sinde sıfır geçiş anı ile sonuçlanacak kadar 120° rotor hareketini mümkün kılar.

B fazının zıt EMK'nın sıfır geçiş anı tespit edildikten sonra, bir sonraki komutasyona (5 ve 6 nolu anahtarlar) gerçekleştirilir. Bu işlem, rotorun rotasyonunun ileri yönünde pozitif bir tork üretimi sağlar. Bu şekilde faz uyarımları Çizelge 3. 3'de verilen sıfır geçiş anları sensörsüz kontrol için doğru komütasyon sırasında tahmin edilene kadar sürer.

Çizelge 3. 3 Anahtarlama Sırası

İletimdeki Anahtarlar	Enerjilenmemiş Faz	EMK Sıfır Geçişi	Sıfır Geçiş Tipi
1, 6	C	e_3	+Vdc
1, 2	B	e_2	-Vdc
3, 2	A	e_1	+Vdc
3, 4	C	e_3	-Vdc
5, 4	B	e_2	+Vdc
5, 6	A	e_1	-Vdc

Sensörsüz bir BLDC çalışmaya başlangıç algoritmasının akış diyagramı Şekil 3. 26'da verilmiştir.



Şekil 3. 26 BLDC başlangıç algoritmasının akış diyagramı

3.3.5 Sensörsüz BLDC Sürücü Gerçeklenmesi

Bu çalışmada bir BLDC motorunun sensörsüz sürücü ile kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu kontrolcü tasarımında sürücü sistem tasarımı, kontrol algoritmalarının ve yazılımlarının oluşturulması, sürücü sisteminin baskı devre kartı tasarımı ve deney düzeneği ile bir BLDC nin tasarlanan sürücü ile çalıştırılarak sonuçların gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan motorun özellikleri Çizelge 3. 4'te, görseli Şekil 3. 27'de verilmiştir.

Çizelge 3. 4 Motor özellikleri

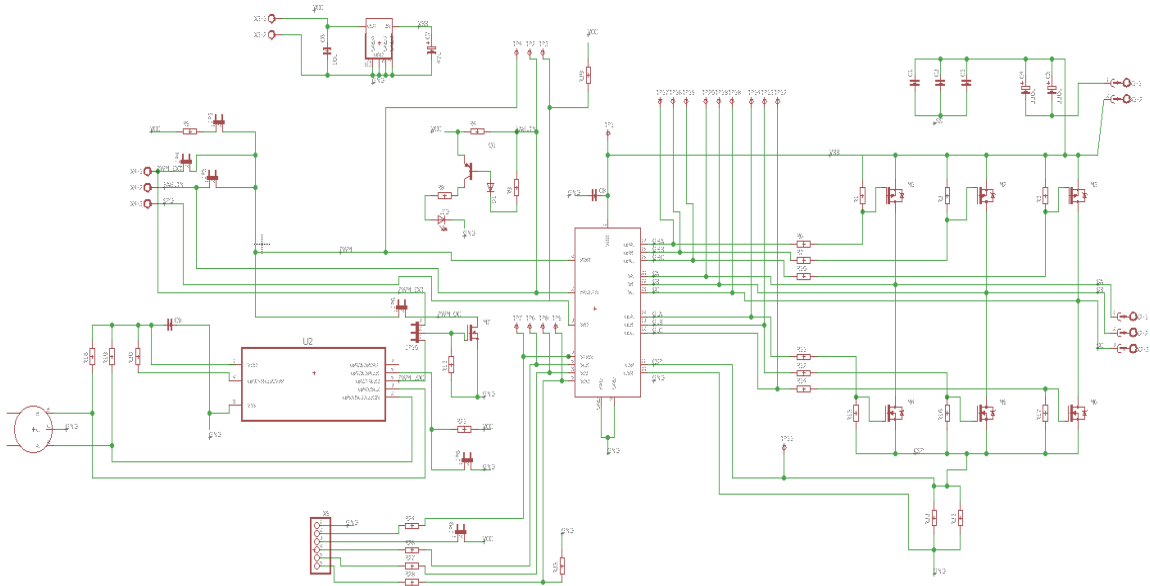
Parametre	Değer
Motor Tipi	BLDC
Güç	80 W
Nominal Gerilimi	24 V
Nominal Hız	3000 d/d



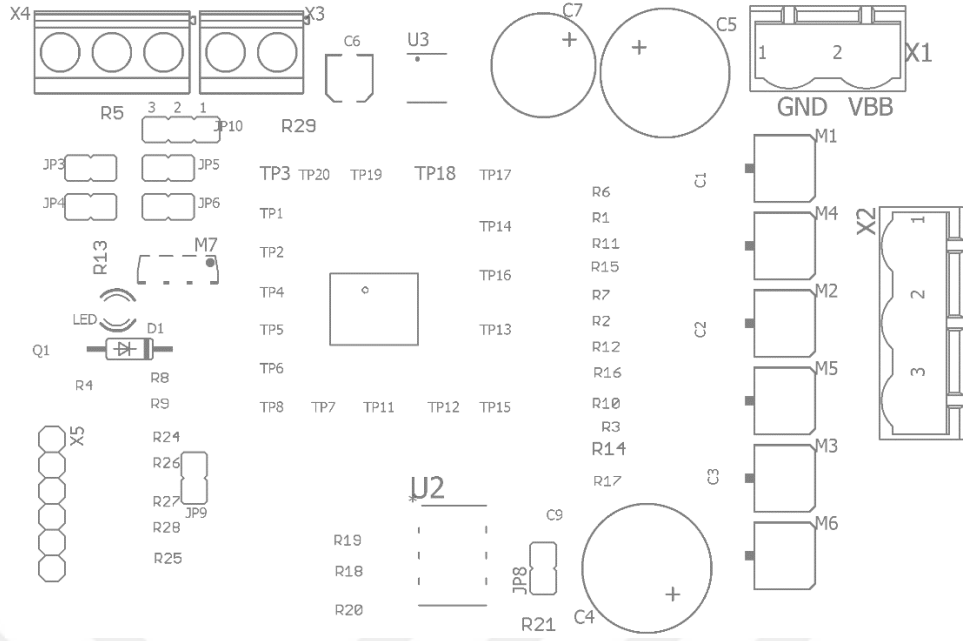
Şekil 3. 27 BLDC Motoru

Resimde görüldüğü üzere deneyde kullanılan motor sensörü de bulunan bir BLDC motoru olmasına rağmen Hall sensor kabloları boşa bırakılarak motorun sensörsüz sürücü ile çalıştırılması sağlanmıştır.

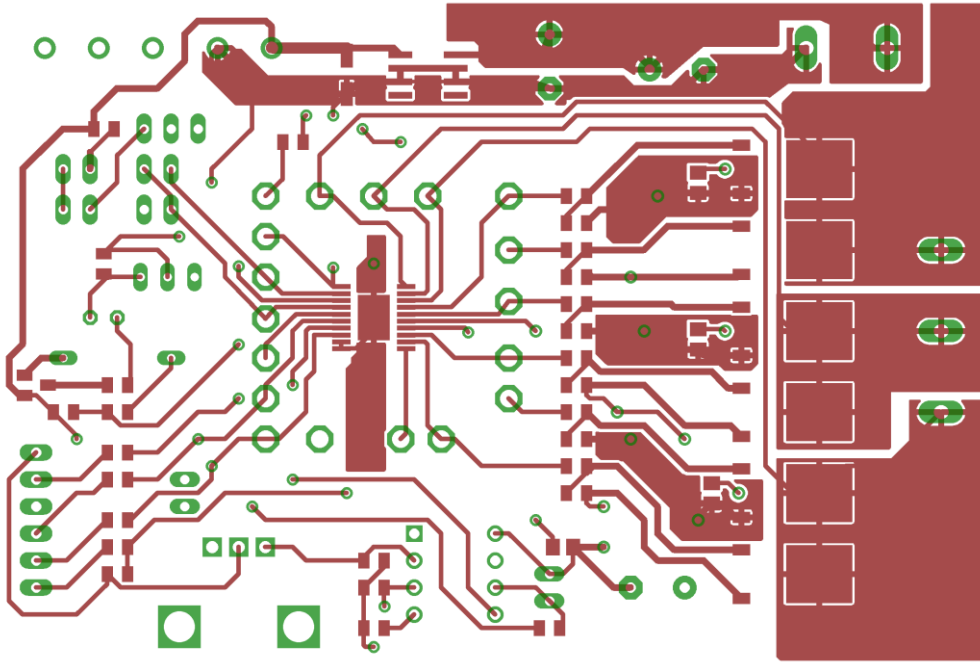
Aşağıdaki görsellerde sürücü sisteminin baskı devre çizim programı ile oluşturulan devre şeması ve PCB çizim çıktıları verilmiştir.



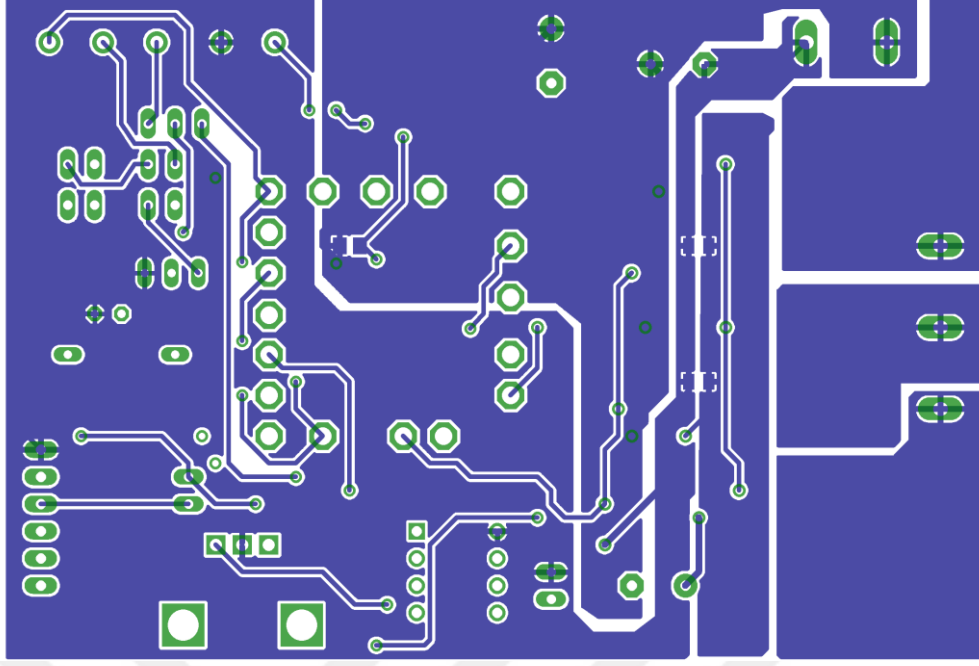
Şekil 3. 28 BLDC Sürücü Devre Şeması



Şekil 3. 29 BLDC Sürücü PCB Assembly

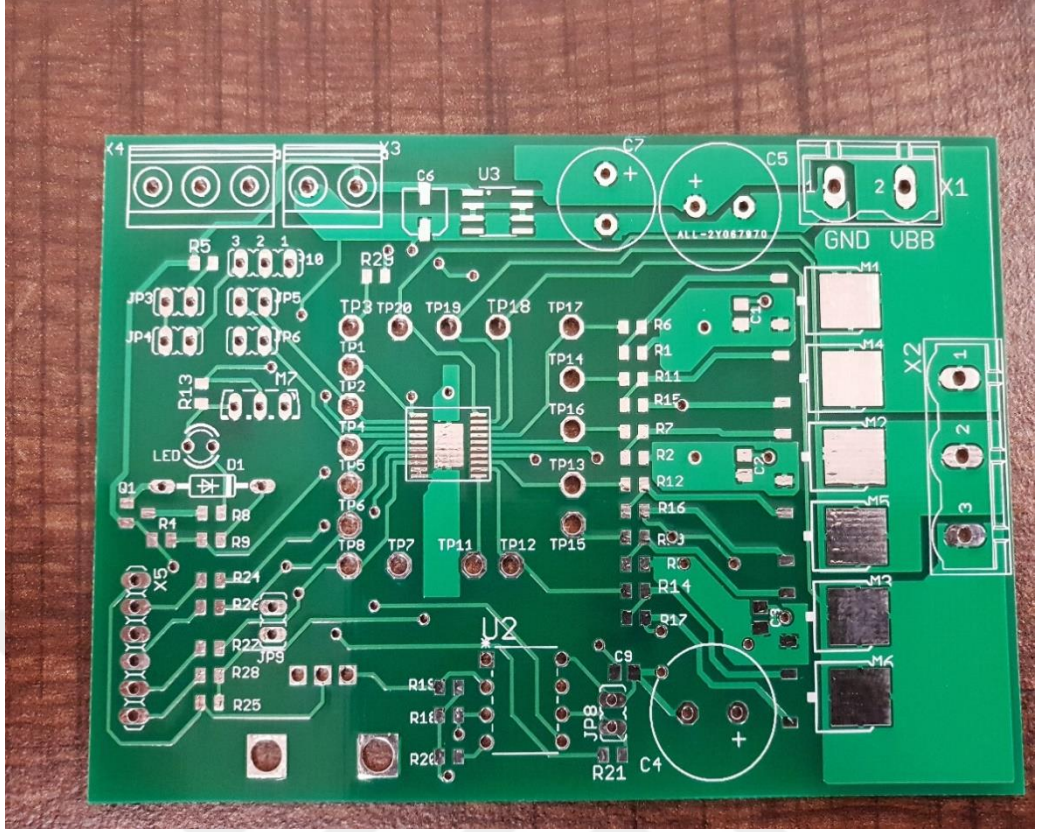


Şekil 3. 30 BLDC Sürücü PCB Üst Katman Çizimi

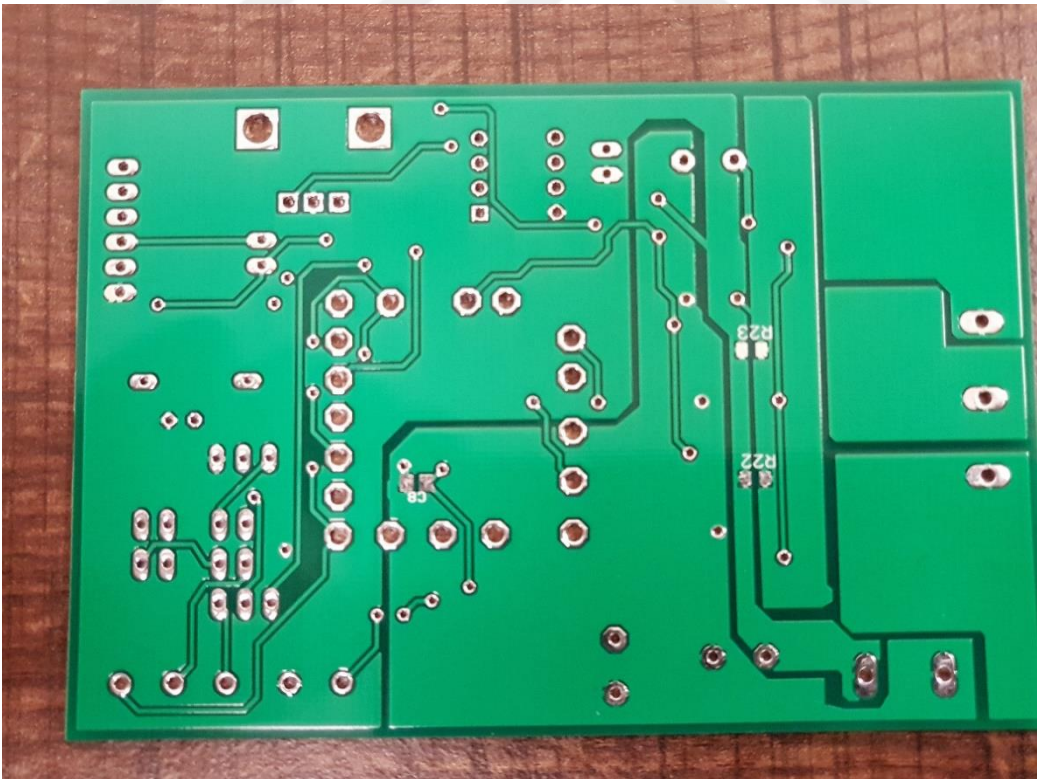


Şekil 3. 31 BLDC Sürücü PCB Alt Katman Çizimi

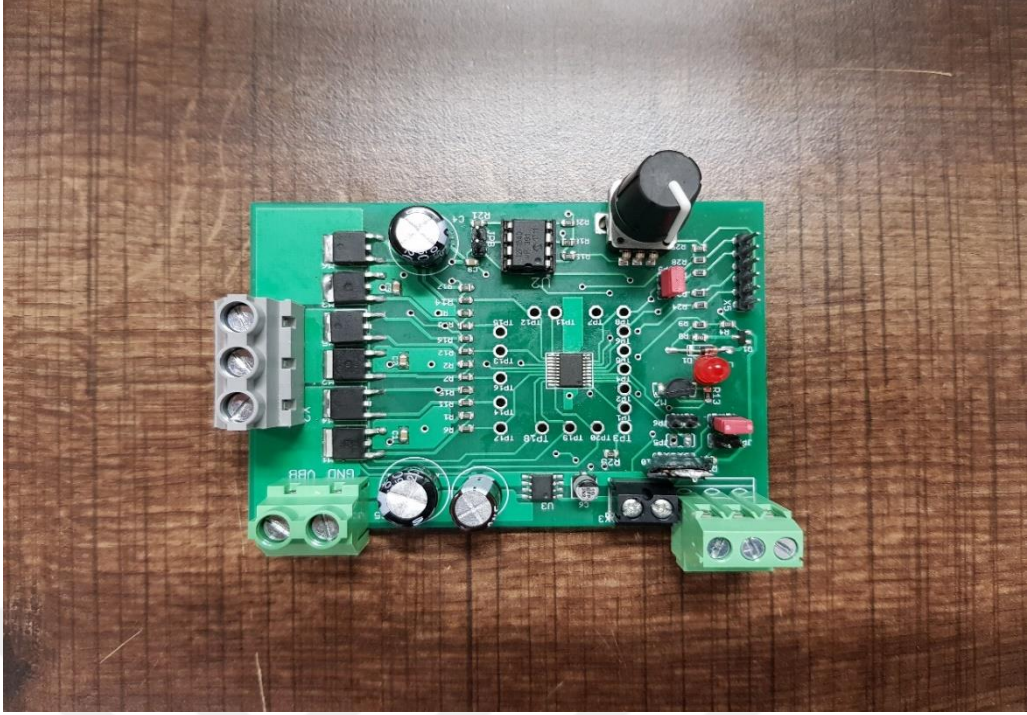
Eleman seçimi ve PCB özellikleri kullanılan motor 80W olmasına rağmen 500W lık bir motoru sürebilecek şekilde tasarım yapılmıştır. Burada PCB kart malzemesi FR4, kalınlığı 1.6 mm belirlenmiştir. Bu standart bir PCB kartının özellikleridir. Sürücü elektronik kartının boyutları 94mmx69mm, bakır kalınlığı 2 oz ve yüzey sonlandırması HASL lead free olarak belirlenmiştir. Sürücü kartının üretildikten sonraki çıplak ve dizgi yapılmış görselleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 32 BLDC Sürücü PCB Üst Katman



Şekil 3. 33 BLDC Sürücü PCB Alt Katman

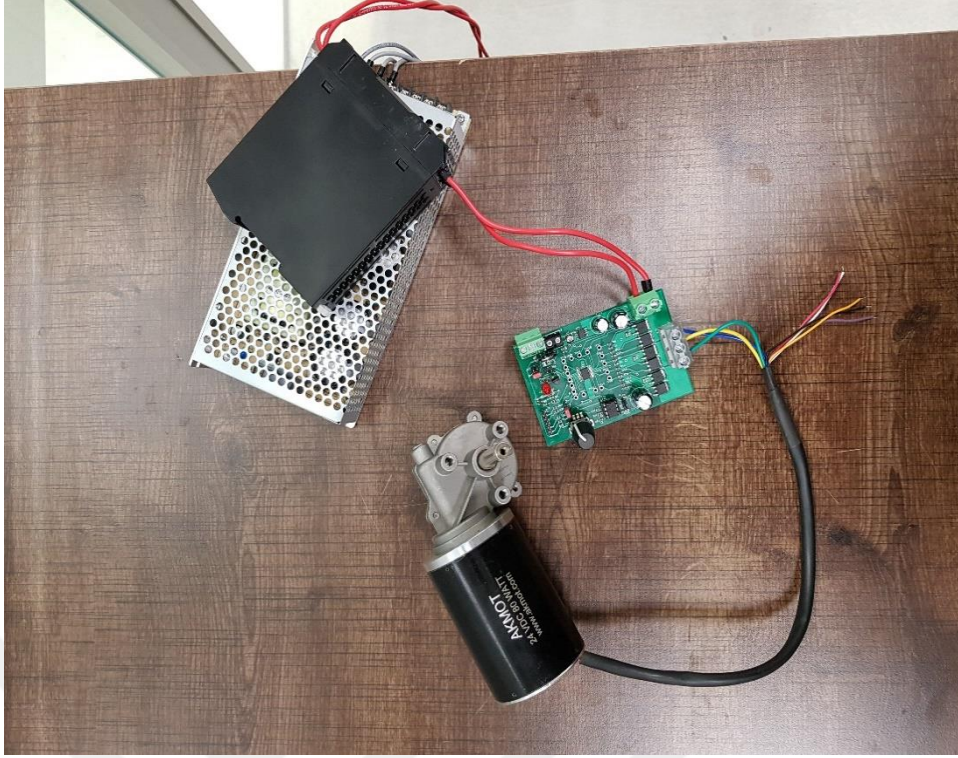


Şekil 3. 34 BLDC Sürücü PCB Dizgisi Yapılmış Halde

Aşağıda BLDC motor ve çalışmaya hazır sürücü kartı ile birlikte görselde verilmiştir. Ayrıca motor, sürücü ve güç kaynağı bağlantıları yapılarak deney düzeneğinin nihai halinin görseli verilmiştir.



Şekil 3. 35 BLDC Sürücü ve Motor

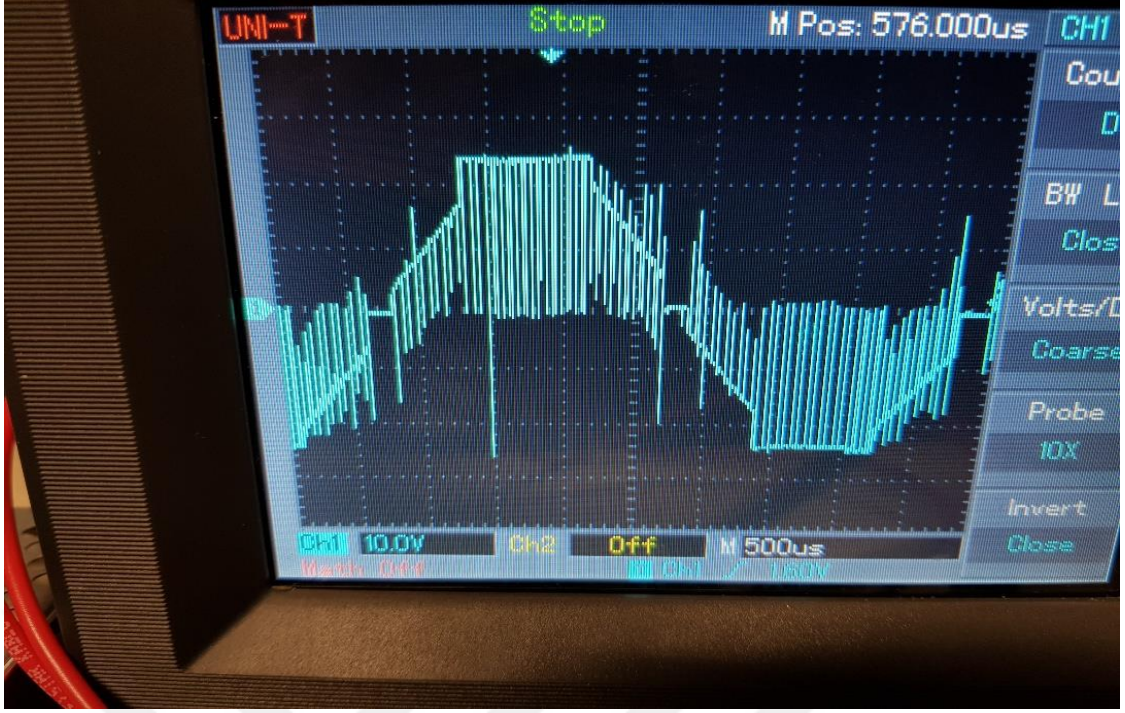


Şekil 3. 36 BLDC Motor, Sürücü ve 24V Güç Kaynağı

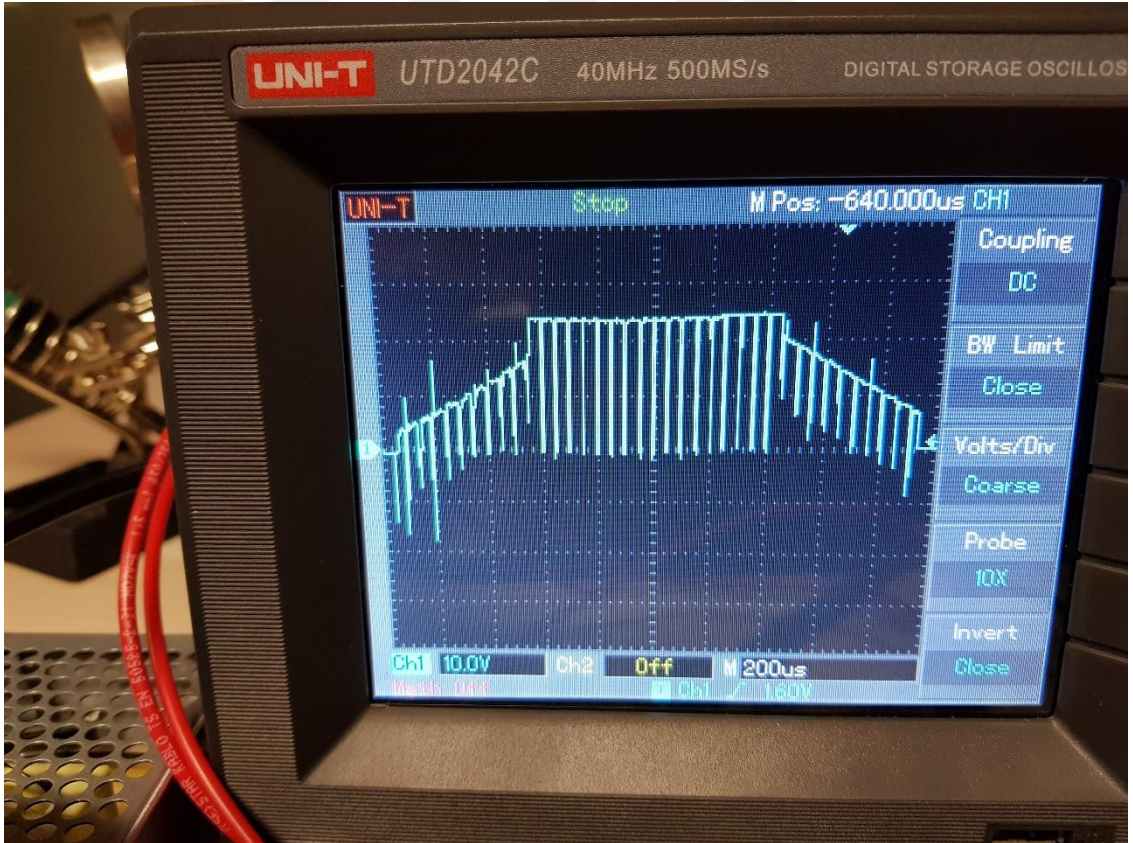
3.3.6 Deneysel Sonuçlar

Tasarlanan BLDC sürücü ve önceki bölümde özellikleri ve görselleri verilen deney devresi kullanılarak sürücü üzerinde bırakılan test point noktaları yardımıyla elde edilen osiloskop çıktıları aşağıda verilmiştir.

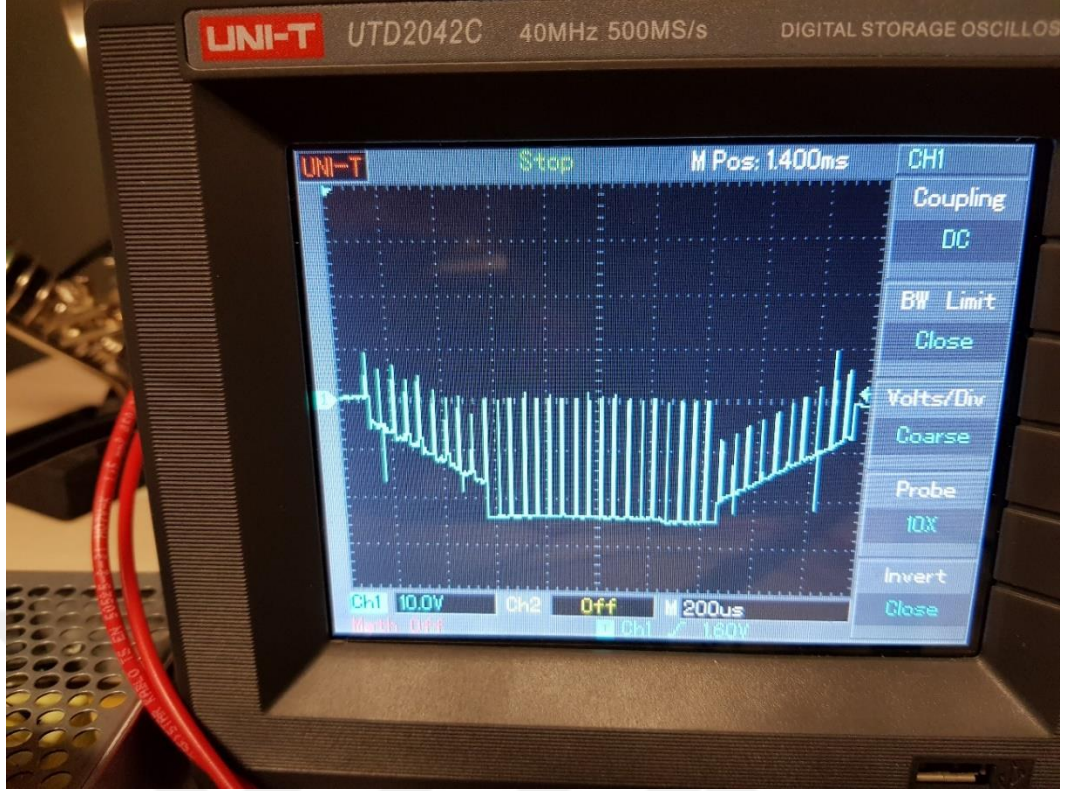
Aşağıda verilen dalga şekilleri Şekil 3. 37, Şekil 3. 38, Şekil 3. 39, Şekil 3. 40, Şekil 3. 41, Şekil 3. 42 ve Şekil 3. 43 kıyıcının PWM doluluk oranı %50 olduğu durumda elde edilmiştir.



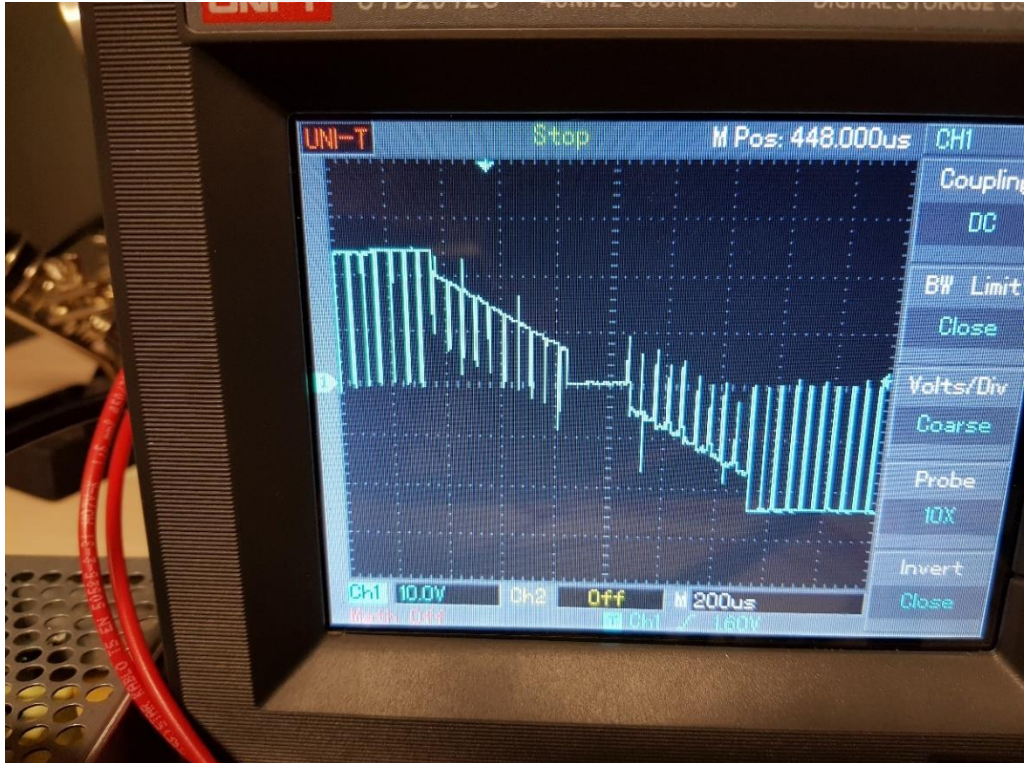
Şekil 3. 37 Faz Gerilimi



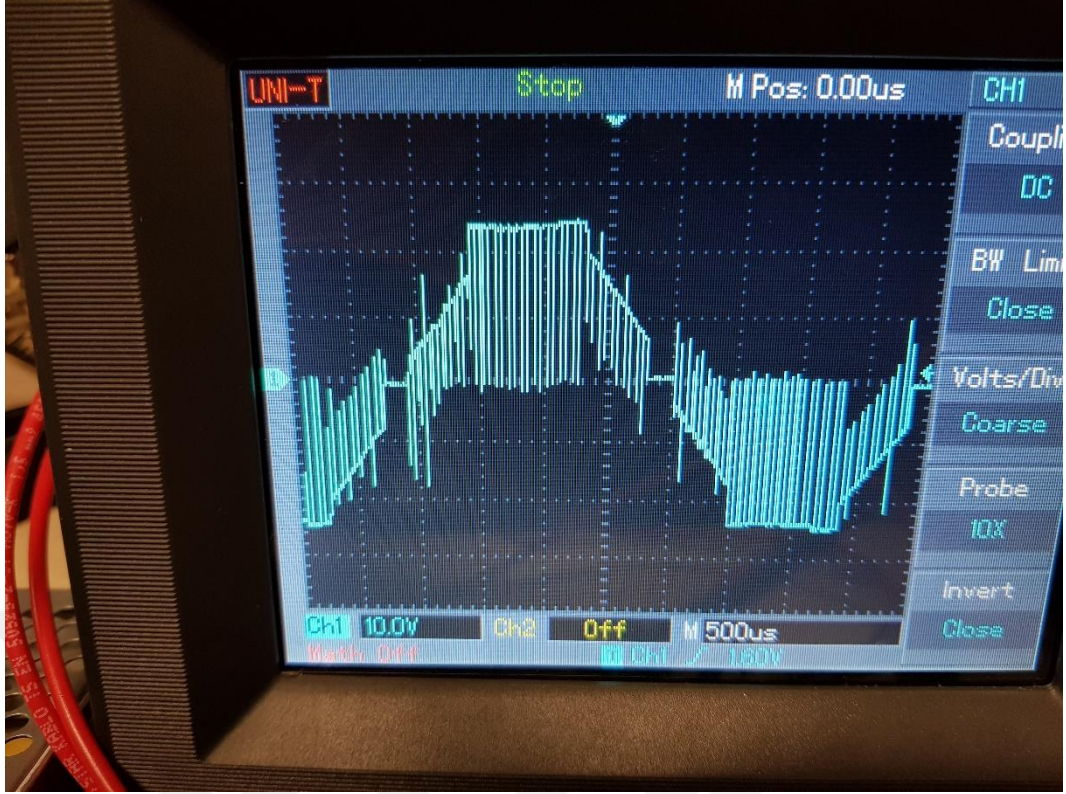
Şekil 3. 38 Faz gerilimi Pozitif



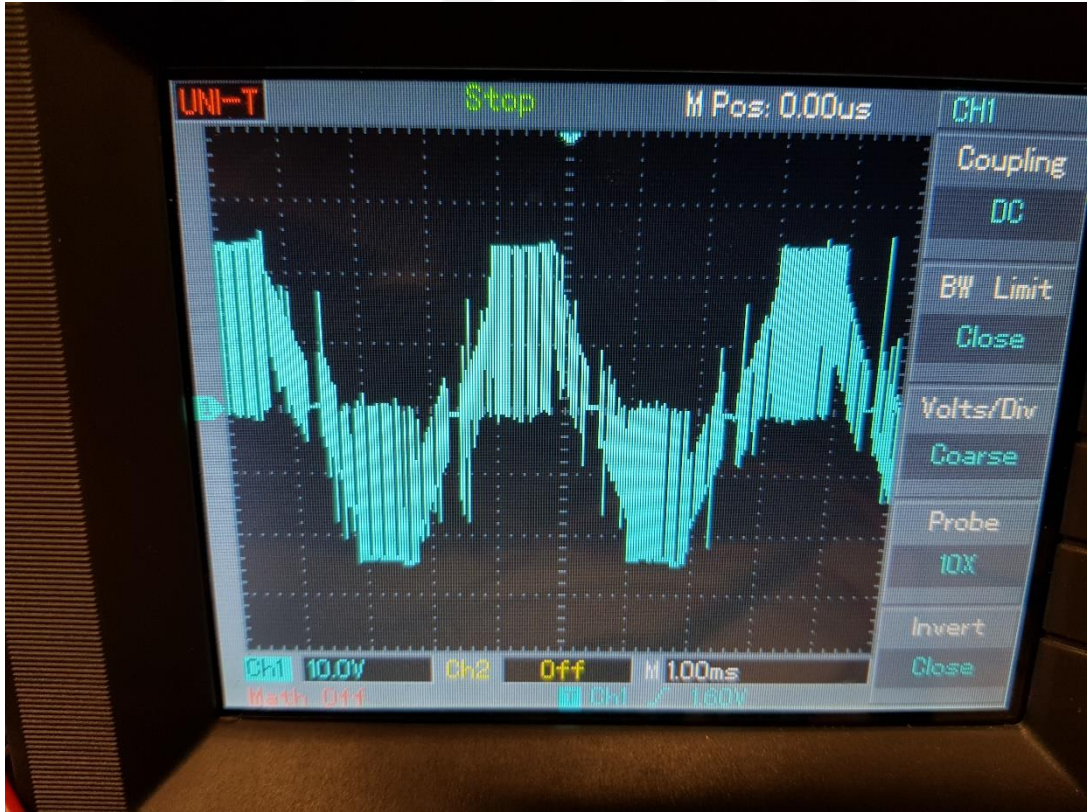
Şekil 3.39 Faz gerilimi Negatif



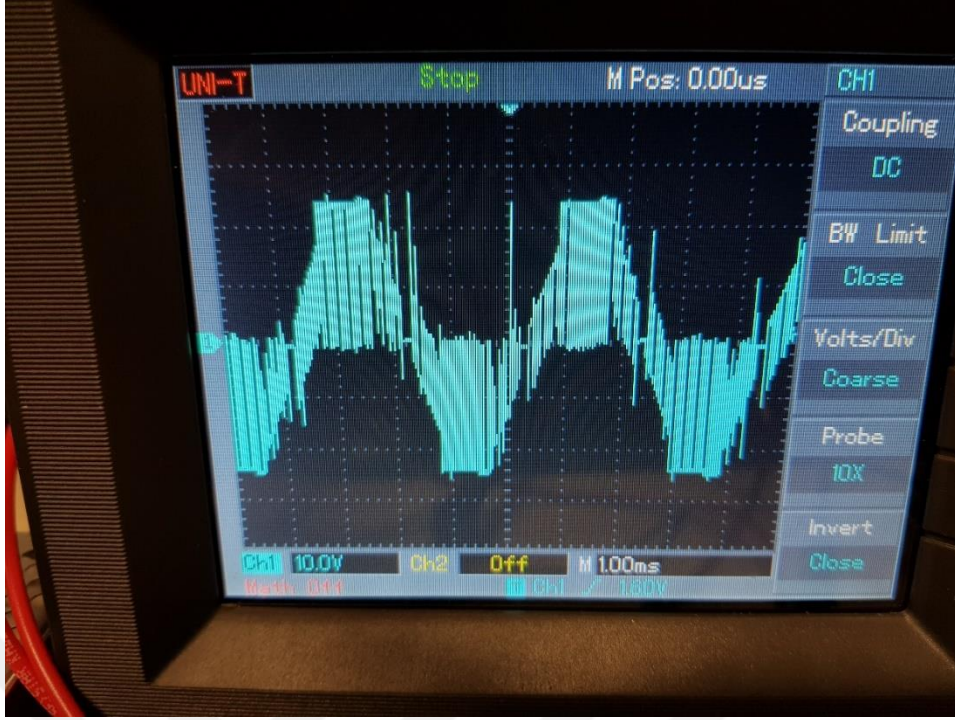
Şekil 3.40 Faz gerilimi Düşen Kenar



Şekil 3. 41 Faz gerilimi Yükselen Kenar

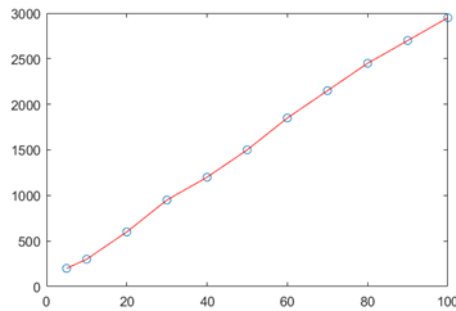


Şekil 3. 42 Faz Gerilimi A



Şekil 3. 43 Faz Gerilimi B

Şekil 3. 23, Şekil 3. 28 ve Şekil 3. 29 gözlemlendiği üzere BLDC nin terminal gerilimleri sensörsüz kontrol yöntemi olarak uygulanan trapezoidal zıt EMK dalga şekline uygun olarak trapezoidal şeklindedir. Şekil 3. 24 ve Şekil 3. 25 de bir terminale ait zıt-EMK nın pozitif ve negatif dalga şekilleri verilmiştir burada hem pozitif durumdan negatife geçerken hem de negatiften pozitif duruma geçerkenki yükselen kenar ve düşen kenarları görmek mümkündür. Burada daha önce teorik olarak açıklandığı üzere boştaki fazın terminal voltajı ya yükselen kenara ya da düşen kenara sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3. 26 ve Şekil 3. 27 da yakınlştırılarak gösterildiği üzere sıfır geçiş meydana geldiğinde boştaki fazın terminal gerilimi "0" dır ayrıca kıyıcı sinyali "ON" ve "OFF" olduğu durumlarda şekillerde açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 3. 44 Deneysel sonuç, Doluluk oranı hız grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında daimî mıknatıslı senkron motorların yapısı, çalışma prensipleri incelenmiştir. Daimî mıknatıslı senkron makinaların özel bir türü olan Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları daha iyi tork-hız karakteristiği, yüksek dinamik tepki, yüksek verim, uzun çalışma ömrü, sessiz çalışma, daha yüksek hız aralıkları gibi özelliklerinden dolayı hızla popülerlik kazanan motor tiplerinden biridir. BLDC motorları, Otomotiv, Havacılık, Tıp, Endüstriyel Otomasyon Ekipmanları ve Enstrümantasyon gibi sektörlerde kullanılmaktadır.

Fırçasız DC motorlar (BLDC) uygulama olarak seçilmiş olup fırçasız dc motorun özellikleri, yapısı, çeşitleri ve teorisi incelenerek açıklanmıştır. BLDC'ler için, rotor pozisyonunu tespit etmek için yaygın olarak statorda Hall Effect cihazı bulunur. Ancak, sensörlerin maliyet, yer ve kararsızlık gibi dezavantajlarından dolayı, son yıllarda sensörsüz hız kontrolü önem kazanmıştır. Ayrıca sınırlı montaj alanı ve şiddetli titreşim ve / veya yüksek sıcaklığa sahip katı çalışma ortamı nedeniyle bir konum sensörü takmak ve muhafaza etmek zor olabilir.

Bu çalışmada Fırçasız dc motorların kontrolü incelenerek burada sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki farklı sürücü yapısı açıklanmıştır. Sensörsüz kontrol yöntemleri, operasyonun güvenilirliğini, fırçasız makinelerin maliyetini ve BLDC'lerin kompakt boyutunu korumak için geliştirilmiştir.

Tezin temel amacı, BLDC motorunu sensör kullanmadan geniş bir aralıkta hız kontrol edebilmek için bir yaklaşım aramaktır. Önerilen yaklaşım, motorda enerji verilmeyen boştaki fazın terminal geriliminin okunarak ilgili fazın Zıt-EMK sınırın sıfır geçişlerinin saptanmasına dayanır.

Hız kontrolü için uygulanan PWM kıyıcı tekniği ile enerjilenen faza uygulanan gerilim değerinin PWM doluluk oranı değiştirilerek ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca motorun ilk çalışma durumunda sürücünün zıt EMK geri bildirim olmadan ilk başlatılması gerekir. Motorun kalkış anında zıt EMK bildirimının sıfır olması ile ortaya çıkan başlangıç problemini ortadan kaldıran algoritma geliştirilmiştir.

Sensörsüz ve sensörlü sürücü tasarımları yapılmış olup sensörsüz sürücü tasarımı uygulamaya dönüştürülmüştür. BLDC sensörsüz hız kontrol sürücüsü, 24 V, 500W, 3000 rpm (nominal hız) parametrelerine sahip fırçasız bir motor için tasarlanmış, üretilmiş, analiz edilmiş ve test edilmiştir.

Tasarlanan sürücünün devre şeması Şekil 3. 28'de, elektronik kart çizim görselleri Şekil 3. 29, Şekil 3. 30 ve Şekil 3. 31'ta verilmiştir. Üretimden sonra ortaya çıkan elektronik kartın üst ve alt yüzlerinin görüntüsü Şekil 3. 32 ve 3. 33'te, elemanların dizgi yapılması ile sürücü elektronik kartının kullanıma hazır halinin görüntüsü Şekil 3. 34'de verilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3. 45'de verilmiştir. Yapılan deney ile tasarlanan sensörsüz sürücü ile BLDC motorunun kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sürücünün temelini oluşturan Zıt EMK nin sıfır geçiş noktalarının algılanmasında kullanılan terminal gerilimleri Şekil 3. 27, 3. 38, 3. 39, 3. 40, 3. 41, 3. 42 ve 3. 43'de verilmiştir. Burada elde edilen sinyaller BLDC motor teorisinin önceki bölümlerde açıklanan dalga şekilleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Üretilen sürücü ile 500W a kadar BLDC motorları sürülebilme olup motorun hızı 150 rpm ile 3000 rpm arasında bir döner enkoder ile değiştirilebilmektedir. PWM kıyıcı doluluk oranı ile hız arasındaki deneysel çalışma ile elde edilen bağıntı Şekil 3. 44'te verilmiştir.

Yapılan teorik çalışma, tasarım ve uygulanan deney düzeneği ile BLDC motorların sensörsüz sürücüleri ile ilgili bazı yargılara varılmıştır. Sensörsüz fırçasız dc motor kontrolünde dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar vardır bunlar;

- a. Motor, algılanacak yeterli Zıt EMK'yı üretmek için minimum hızda hareket etmelidir.
- b. Motor yükündeki ani değişiklikler, BEMF sürücü döngüsünün kilitli kalmasına neden olabilir.

- c. BEMF voltajı, sadece motor hızı uygulanan voltajın ideal değiştirme oranının sınırlı bir aralığında olduğunda ölçülebilir.
- d. İdeal orandan daha hızlı oranlarda komütasyon, kesintili bir motor tepkisi ile sonuçlanacaktır.

Tüm bu özellikler dikkate alındığında düşük maliyet öncelikli haldeyse ve düşük hızda motor çalışması gerekli değilse ve motor yükünün ani değişmesi beklenmiyorsa, sensörsüz kontrol uygulaması fırçasız DC motorlar için daha iyi bir seçenek olabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Kliman, G.B. ve Toliyat, H.A., (2004). Handbook of Electric Motors, Second Edition, Taylor & Francis Group LLC., Ohio.
- [2] Jian, Z. ve Yangwei, Y., (2011). Brushless DC Motor Fundamentals Application Note, First Edition, MonolithicPower, Seattle.
- [3] Hendershot, J.R. ve Miller, T.J.E., (2010). Design of Brushless Permanent-Magnet Machines, Second Edition, Motor Design Books LLC., Florida.
- [4] Damodharan, P., Sandeep, R. ve Vasudevan, K., (2008). "Simple position sensorless starting method for brushless DC motor", IET Electronics on Power Applications, 1:49-55.
- [5] Gang, L., Chenjun, C., Wang, K., Han, B. ve Zheng, S., (2016). "Sensorless Control for High-Speed Brushless DC Motor Based on the Line-to-Line Back EMF", IEEE Transactions on Power Electronics, 31:69-83.
- [6] Akin, B. ve Bhardwaj, M., (2015). Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors, Second Edition, Texas Instruments Incorporated, Dallas.
- [7] Yedamale, P., (2003). Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, First Edition, Microchip Technology Incorporated, Atlanta.
- [8] Prokop, L. ve Chalupa, L., (2015). 3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x, First Edition, Freescale Semiconductor, Arizona.
- [9] RS Components, BLDC Motor Control <http://ph.rsonline.com/web/generalDisplay.html?id=i/motor-control>, 25 Aralık 2017.
- [10] Aydođdu, Ö. (2006). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici ile Sensörsüz Kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [11] Sensinger, J.W., Clark, S.D. ve Schorsch, J.F., (2011). "Exterior vs. Interior Rotors in Robotic Brushless Motors", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 9-13 Mart 2011, Shanghai.
- [12] Krishnan, R., (2010). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, First Edition, Taylor and Francis Group LLC., Virginia.

- [13] Murphy, J.M.D. ve Turnbull, F.G., (1988). Power Electronic Control of AC Motors, First Edition, Pergamon Press., New York.
- [14] Miller, TJE., (2014). SPEED's Electric Machines, First Edition, Motor Design Books LLC., Florida.
- [15] Mohan, N., Undeland, T.M. ve Robbins, W.P., (1995). Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Third Edition, John Wiley & Sons., New York.
- [16] Jahns, T.M., (1984). "Torque Production in PM Synchronous Motor Drives with Rectangular Current Excitation", IEEE Transactions, 20:803-813.
- [17] Lee, W., Samuel ve Chen., (2015). "A 12-Step Sensorless Drive for Brushless DC Motors Based on Back-EMF Differences", IEEE Transactions on Energy Conversion, 30:646-654.
- [18] ON Semiconductor, (2014). DC Motor Driver Fundamentals, Yayın No:6041, Denver.
- [19] Kesler, S., (2008). "Elektrik Makinaları Denetim Sistemlerinde TMS320F2812 DSP Kullanımı", Akademik Bilişim Dergisi, 21(1):71-83.
- [20] Texas Instruments, TMS320F28335 DSP, <http://www.ti.com/product/tms320f28335>, 27 Aralık 2017.
- [21] Texas Instruments, (2016). TMS320F28335/28334/28333/28332/28235/28234 Digital Signal Controllers datasheet, Yayın No:439, Dallas.
- [22] Texas Instruments, (2009). TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module, Yayın No:SPRUG04A, Dallas .
- [23] Texas Instruments, (2007). TMS320x2833x Analog-to-Digital Converter (ADC) Module, Yayın No: SPRU812A, Dallas.
- [24] Wang, H.B. ve Liu, H.P., (2008). "A novel sensorless control method for brushless DC motor", IET Electric Power Applications, 3:240-246.
- [25] Lai, Y.S. ve Lin, Y.K., (2008). "Novel Back-EMF Detection Technique of Brushless DC Motor Drives for Wide Range Control Without Using Current and Position Sensors", IEEE Transactions on Power Electronics, 23:934 - 940.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nazif Hakan YENİAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.04.1993 - İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : nazifhakanyeniay@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Çift Lisans	Elektronik ve Hab. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Eyüp Anadolu Lisesi	2011

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017	WIENERGY A.Ş.	ARGE MÜHENDİSİ

