

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (BLDC) VE
SÜRÜCÜSÜ TASARIMI**

Uğur DERELİ

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ**

Yozgat 2020

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (BLDC) VE
SÜRÜCÜSÜ TASARIMI**

Uğur DERELİ

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ**

Yozgat 2020



YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

TEZ ONAY FORMU

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans 70111714002 numaralı öğrencisi **Uğur DERELİ**'nin hazırladığı “**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (BLDC) VE SÜRÜCÜSÜ TASARIMI**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 29/01/2020 günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan : Dr.Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY

Jüri Üyesi (Danışman) : Dr.Öğr. Üyesi Mustafa YAZ

Jüri Üyesi : Dr.Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 27.102.2020 tarih ve 10... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

27.102.2020

Prof. Dr. Mustafa SAÇMACI
Müdür

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (BLDC) VE SÜRÜCÜSÜ TASARIMI

Uğur DERELİ

Yozgat Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

2020; sayfa: 71

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ

ÖZET

Bu tez çalışması, elektrikli araçlar, elektrikli ev aletleri vb. alanlarda sıklıkla kullanılan fırçasız doğru akım motorunun (BLDC) analizinin yapılması ve sürücüsünün tasarlanması üzerinedir. Analizi yapılan BLDC motorun genel özellikleri; besleme gerilimi 72 volt, oluk (slot) sayısı 45, kutup sayısı 50 ve 3 faz sargılı olup sargılar yıldız bağlıdır. Motorun analizi, tasarımı oluşturulmak istenen motor ve jeneratörün performansını doğru ve eksiksiz bir şekilde tahmin etmek için oluşturulmuş tasarım yazılımı olan MotorSolve BLDC ile yapılmıştır.

Elektrik motorları içerisinde nispeten yeni sayılabilecek fırçasız doğru akım motorlarının tasarımı kadar önemli olan bir başka konuda motorun sürülmesidir. Sürücü tasarımında elektronik anahtarlama elemanı olarak IXTQ50N20P mosfet ve mosfet sürücü olarak IR2110 kullanılmıştır. BLDC motorun sürülmesinde gerekli olan ve mosfetler ile yapılan 3 faz H köprüsü, Proteus'un alt programı olan ISIS'te simülasyonu gerçekleştirilmiş ve ARES'te baskı devresi oluşturulmuştur. Hall sensörlerden alınan rotor konum bilgilerine göre 3 faz H köprüsündeki mosfetlerin belirli sıra ile açılıp kapanmasını sağlamak için Atmel firmasının ATmega2560 mikrodenetleyicisini üzerinde bulunduran Arduino Mega 2560 kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BLDC, Motor Analizi, H Köprüsü, Sürücü Devresi

DESIGN OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR AND DRIVER

Uğur DERELİ

Yozgat Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering
Master of Science Thesis

2020; Page: 71

Thesis Supervisor: Dr. Mustafa YAZ

ABSTRACT

This thesis, electric vehicles, electrical appliances and so on. is to analyze and design the driver of the brushless direct current motor (BLDC), which is frequently used in fields. General characteristics of the BLDC motor analyzed; the supply voltage is 72 volts, the number of slots is 45, the number of poles is 50 and 3-phase windings and the windings are star-connected. The analysis of the engine was carried out with MotorSolve BLDC, a design software designed to accurately and accurately predict the performance of the engine and generator to be designed.

Another important aspect of the electric motors is to drive the motor in another aspect as important as the design of the relatively new brushless direct current motors. Use the IXTQ50N20P mosfet as the electronic switching element in the drive design and IR2110 as the mosfet drive. The 3-phase H-bridge with mosfet, required to drive the BLDC motor, can be used in the ISIS subprogram of Proteus and the print circuit is created in ARES. Arduino Mega 2560, which has ATmega2560 microcontroller of Atmel, is used to ensure that the mosfets in the 3 phase H bridge are switched on and off in a certain order according to the rotor position information obtained from hall sensors.

Keywords: BLDC, Motor Analysis, H Bridge, Driver Circuit

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusu seçimi ve çalışma sürecinde bilgi ve tecrübelerini paylaşan ve yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ'a, tez yazım süreci ve sonrasında yanımda olan değerli çalışma arkadaşım Erol BAĞCI'ya ve manevi desteğiyle güç aldığım biricik aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER LİSTESİ	xii
KISALTMALAR LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI (BLDC)	4
3.1. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı	4
3.1.1. Stator	5
3.1.2. Rotor.....	6
3.2. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi	8
3.3. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Üstün ve Zayıf Yönleri	10
3.4. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kullanım Alanları	11
3.5. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Mıknatıslar.....	12
3.5.1. Alnico Mıknatıslar (AlNiCo).....	12
3.5.2. Samaryum Kobalt Mıknatıslar (SmCo)	12
3.5.3. Neodyum Demir Bor Mıknatıslar (NdFeB).....	12
4. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR (BLDC) KONTROLÜ VE SÜRÜCÜ DEVRESİ TASARIMI	14
4.1. Alan Etkili Sensörler (Hall Effect Sensors).....	14
4.2. Sensörlü BLDC Motor Kontrolü	15

4.3.	Mosfetlerin Yapısı ve Karakteristiği	18
4.4.	Kanal Ayarlamalı (Deplation) Tip Mosfet	19
4.5.	Kanal Oluşturmalı (Enhancement) Tip Mosfet	20
4.6.	Sürücü Devresinde Kullanılan Mosfetin Yapısı ve Karakteristiği (IXTQ50N20P Mosfet)	22
4.7.	H Köprü (Bridge) Devreleri	23
4.8.	3 Faz İçin H Köprü Devresi	23
4.9.	Entegre Devre (IC) Mosfet Sürücüler ve H Köprü	26
4.10.	Entegre Devre (IC) Mosfet Sürücülerde Bootstrap Kondansatör Hesabı ...	28
4.11.	Sürücülerde Ölü Zaman Kavramı (Dead Time)	30
4.12.	Sürücü Devresinde Kullanılan Mikrodenetleyici ve Özellikleri	31
4.13.	ISIS-ARES Çizimleri	34
5.	REFERANS ALINAN BLDC MOTORUN MOTOR SOLVE BLDC MODÜLÜ İLE ANALİZİNİN YAPILMASI	39
5.1.	MotorSolve BLDC Yazılımı	39
5.2.	Yazılımda Motor Genel Ayarlarının Belirtilmesi.....	39
5.3.	Yazılımda Rotor Dizayn Ayarlarının Belirtilmesi	42
5.4.	Yazılımda Stator Dizayn Ayarlarının Belirtilmesi	44
5.5.	Yazılımda Stator Sargı Değerlerinin Belirtilmesi	46
5.6.	Yazılımda Rotor Mıknatıs Malzemesinin Seçilmesi.....	48
5.7.	Yazılımda Dış Gövde Dizayn Değerlerinin Belirtilmesi	49
5.8.	Belirtilen Değerlere Göre Sonuçların Analizi	51
5.8.1.	Dişli Tork (Cogging Torque)	51
5.8.2.	Hava Boşluğu Akısı (Air Gap Flux)	52
5.8.3.	Yüzey Kuvveti Yoğunluğu (Surface Force Density) (N/mm ²)	53
5.8.4.	Akı Yoğunluğu (Flux Density)	54
5.8.5.	Zıt Elektromotor Kuvvet (Back EMF).....	55

5.8.6. Tork-Rotor Hız (Torque-Rotor Speed).....	56
6. SONUÇ VE İRDELEME	58
KAYNAKLAR	61
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	71



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3. 1 Fırçasız Tip DC Motor Kesit Görünümü.....	4
Şekil 3. 2 Fırçasız Tip DC Motor Düzeni	5
Şekil 3. 3 BLDC Motor Statoru	6
Şekil 3. 4 Fırçasız Tip DC Motor (Dış Rotor ve Stator).....	7
Şekil 3. 5 Fırçasız Tip DC Motor (İç Rotor ve Stator)	7
Şekil 3. 6 Fleming'in Sol El Kuralı	8
Şekil 3. 7 DC Motor Dönüş Prensibi	8
Şekil 3. 8 BLDC Motor Temel Çalışma Prensibi	10
Şekil 3. 9 Saf Demir ve Fe ₃ O ₄ İçin Mıknatıslanma-Sıcaklık Değişimi Grafiği	13
Şekil 4. 1 Hall Eleman Çalışma Prensibi	14
Şekil 4. 2 Dijital Çıkış Hall Effect Sensörü Blok Diyagramı	15
Şekil 4. 3 Hall Sensör Sinyallerine Göre Faz Sargılarının Durumu	16
Şekil 4. 4 Hall Sensör Sinyallerine Göre Üç Fazlı BLDC Motor Sargılarının Enerjilendirilmesi	17
Şekil 4. 5 N kanal Depletion Tip (Kanal Ayarlamalı) Mosfet yapısı	18
Şekil 4. 6 Depletion Tip (Kanal Ayarlamalı) Mosfet Sembol ve Ohmic ve Saturation Bölgeleri.....	19
Şekil 4. 7 Enhancement Tip (Kanal Oluşturmalı) Mosfet Sembol, Ohmic, Saturation ve Cut-Off Bölgeleri	21
Şekil 4. 8 Genel H bridge devresi	23
Şekil 4. 9 3 Faz BLDC Kontrol Devresi	24
Şekil 4. 10 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri	24
Şekil 4. 11 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri	25
Şekil 4. 12 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri	26
Şekil 4. 13 Half Bridge Sürmek İçin Temel IR2110 devresi.....	27
Şekil 4. 14 Full Bridge Sürmek İçin Temel IR2110 devresi.....	27
Şekil 4. 15 Bootstrap Kapasitör Şeması.....	28
Şekil 4. 16 Arduino Mega 2560 Görünüm	31
Şekil 4. 17 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi ISIS Çizimi	35
Şekil 4. 18 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi ARES Çizimi.....	36
Şekil 4. 19 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi 3D Görünümü.....	37
Şekil 4. 20 BLDC Motor Hız Kontrol Baskı Devre Görüntüsü.....	37
Şekil 4. 21 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi Baskı Plaketi Üst Bakır Yolları.....	38
Şekil 4. 22 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi Baskı Plaketi Alt Bakır Yolları	38
Şekil 5. 1 MotorSolve BLDC Yazılım Genel Görünümü.....	39
Şekil 5. 2 MotorSolve BLDC Genel Ayarları.....	40
Şekil 5. 3 MotorSolve BLDC Genel Ayarlar Sonrası Oluşturulan Modelin Genel XY Görünümü	41

Şekil 5. 4 MotorSolve BLDC Genel Ayarlar Sonrası Oluşturulan Modelin Genel XYZ Görünümü	41
Şekil 5. 5 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Ayarları.....	42
Şekil 5. 6 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Rotor XY Görünümü	43
Şekil 5. 7 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Rotor XYZ Görünümü	43
Şekil 5. 8 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Ayarları	44
Şekil 5. 9 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Stator XY Görünümü	45
Şekil 5. 10 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Stator XYZ Görünümü.....	45
Şekil 5. 11 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni	46
Şekil 5. 12 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni Sonrası Stator XY Görünümü. 47	
Şekil 5. 13 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni Sonrası Stator XYZ Görünümü	48
Şekil 5. 14 MotorSolve BLDC Mıknatıs Malzeme Seçim Ayarı	48
Şekil 5. 15 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Ayarları	50
Şekil 5. 16 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Dış Gövde XY Görünümü.....	50
Şekil 5. 17 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Dış Gövde XYZ Görünümü	51
Şekil 5. 18 Referans Alınan Motorun Elektrik/Mekanik Açık-Dişli Tork Grafiği.....	52
Şekil 5. 19 Referans Alınan Motorun Elektrik/Mekanik Açık-Hava Boşluğu Akı Grafiği	53
Şekil 5. 20 Yüzey Kuvveti Yoğunluğu Ok Grafiği	54
Şekil 5. 21 Referans Alınan Motorun Akı Yoğunluğu Grafiği.....	55
Şekil 5. 22 Referans Alınan Motorun Zıt EMF Grafiği.....	56
Şekil 5. 23 Referans Alınan Motorun Tork-Rotor Hız Grafiği.....	57
Şekil 6. 1 MotorSolve BLDC Grafik ve Model Örneği.....	58
Şekil 6. 2 Yarım Köprü Konfigürasyonundaki Paralel Bağlı Mosfetlerin Şeması	59
Şekil 6. 3 Baskı Devre Kart Üzerindeki Akım Yollarının Kalınlaştırılması	60

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3. 1 BLDC Motorun Avantajları	10
Tablo 3. 2 BLDC Motor Genel Kullanım Alanları	11
Tablo 4. 1 BLDC Motorun Saat Yönü ve Saat Tersi Yönde Dönmesi İçin Mosfet Anahtarlarının On/Off Konumları.....	33
Tablo 5. 1 Motor Genel Ayarları.....	40
Tablo 5. 2 Rotor Dizayn Ayarları.....	42
Tablo 5. 3 Stator Dizayn Ayarları	44
Tablo 5. 4 Motor Dış Gövde Dizayn Ayarları.....	49



SİMGELER LİSTESİ

F	Kuvvet, N
B	Manyetik akı yoğunluğu, T
I	Akım, A
L	Manyetik alan içindeki kablo uzunluğu, m
μV	Gerilim, V
U	Motor birinci bobin ucu
V	Motor ikinci bobin ucu
W	Motor üçüncü bobin ucu
D	Mosfet drain ayağı
S	Mosfet source ayağı
G	Mosfet gate ayağı
R_g	Gate direnci, Ω
V_{gs}	Gate source gerilimi, V
I_d	Drain ayağından akabilecek sürekli akım, A
V_{DS}	Drain source gerilimi, V
V_{GS(th)}	Gate threshold gerilimi, V
I_{GSS}	Gate source sızıntı akımı, nA
R_{DS(on)}	Drain source iletim direnci, Ω
Q	Mosfet
R_{thJC}	Watt başına santigrad derece
BV_{DSS}	Drain source arası arıza gerilimi, V
V_{CC}	Entegre besleme gerilimi, V
H_{IN}	Mosfet sürücü yüksek taraf mantıksal giriş
L_{IN}	Mosfet sürücü düşük taraf mantıksal giriş
H_O	Mosfet sürücü yüksek taraf çıkış
L_O	Mosfet sürücü düşük taraf çıkış
SD	Mosfet sürücü kapatma kontrol ucu
C_{BOOT}	Bootstrap kondansatörü, nF
R_{BOOT}	Bootstrap direnci
D_{BOOT}	Bootstrap diyotu
V_{DD}	Mosfet sürücü devre gerilimi, V

V_F	Bootstrap diyot ileri yön gerilimi, V
Q_{TOTAL}	Kondansatör toplam yük miktarı, C
Q_{GATE}	Toplam kapı yükü, nC
I_{LKCAP}	Bootstrap kondansatör sızıntı akımı
I_{LKGS}	Mosfet gate source sızıntı akımı, nA
I_{QBS}	Bootstrap pasif devre akımı, μ A
I_{LK}	Bootstrap devre sızıntı akımı, μ A
I_{LKDIOD}	Bootstrap diyot sızıntı akımı, μ A
t_{ON}	Mosfet açma süresi, μ s
Q_{LS}	Dahili seviye değiştirici için gerekli yük, nC
t_{dead}	Kilitleme gecikme süresi
t_{d_off_max}	Maksimum kapanma gecikme süresi
t_{d_on_min}	Minimum açılma gecikme süresi
t_{pdd_max}	Sürücünün maksimum yayılma gecikme süresi
t_{pdd_min}	Sürücünün minimum yayılma gecikme süresi
H_A	A hall effet sensör
H_B	B hall effet sensör
H_C	C hall effet sensör

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
BLDC	: Brushless Direct Current, Fırçasız Doğru Akım
PWM	: Pulse Width Modulation, Sinyal Genişlik Modülasyonu
FEA	: Finite Element Analysis, Sonlu Elemanlar Analizi
NdFeB	: Neodymium Iron Boron, Neodyum Demir Bor
AlNiCo	: Aluminum Nickel Cobalt, Alüminyum Nikel Kobalt
SmCo	: Samarium Cobalt, Samaryum Kobalt
FET	: Field Effect Transistor, Alan Etkili Transistör
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor, İzole Kapılı Bipolar Transistör
TRIAC	: Triode for Alternating Current, Üç Elektrotlu Alternatif Akım Elemanı
CD ROM	: Compact Disc Read-Only Memory, Kompak Disk Sadece Okunabilir Bellek
Fe₃O₄	: Demir Oksit
SiO₂	: Silisyum Dioksit
IC	: Integrated Circuit, Entegre Devre
UART	: Universal Asynchronous Receiver Transmitter, Evrensel Asenkron Alıcı Verici
SRAM	: Static Random Access Memory, Durağan Rastgele Erişimli Bellek
EEPROM	: Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, Silinip Programlanabilir Salt Okunur Bellek
EMF	: Electro Motor Force, Elektromotor Kuvvet
MCU	: MicroController Unit, Mikrodenetleyici
PCB	: Printed Circuit Board, Baskı Devre Kartı

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve elektromekanik bir cihaz olan elektrik motorlarının icadı teknoloji ve mühendislik alanındaki en büyük lokomotiflerden biridir. Faraday içinden akım geçen bir iletkenin manyetik alan tarafından itildiğini keşfetmesiyle doğru akım makineleriyle ilgili ilk adımı atmıştır. İlk bulunan DC makineleri ile günümüzde kullanılan makineler arasında yapı ve çalışma ilkesi bakımından bir farklılık yoktur ve temelde hepsinin çalışma mantığı aynıdır. DC motorlarda endüviye uygulanacak gerilimin iletilmesini kolektörler, dış devredeki akımı endüviye iletebilmek için de fırçalar kullanılır. Ancak fırçasız doğru akım motorlarında (BLDC) kolektör ve fırçalar bulunmadığı için komütasyon elektronik olarak yapılmaktadır. BLDC motor, sensörlerden alınan rotorun konum bilgilerine göre stator sargılarının uygun sırayla enerjilendirilmesi yöntemi ile çalıştırılmaktadır.

BLDC motorların kontrolü bir uzmanlık alanı olup bu alandaki çalışmalar hızla devam etmektedir. Motor sürücü devrelerinde kullanılan Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM), BLDC motorların hız kontrolünde kullanılan yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Aslında dijital bir sinyal olan PWM ile analog bir sinyal oluşturup motor hız kontrol devrelerindeki güç elektroniği malzemeleri MOSFET, IGBT, TRIAC vb. elektronik anahtarlama elemanlarını kontrol ederek motorun hız kontrolünü gerçekleştiririz.

Doğru akım motorlarının yapısında bulunan kolektör ve fırçaların BLDC motorlarında olmayışı onları daha az bakım ve arıza ile avantajlı konuma getirmiştir. Aynı zamanda doğru akım motorlarına göre de daha uzun ömürlü olup, çok az ısınmaları, sessiz çalışmaları, sürtünme ve ark yapmamaları genel üstünlüklerindedir. BLDC motorların rotorlarında sabit mıknatıslar kullanılmaktadır. Burada kullanılan mıknatısların maliyetlerindeki azalma ve güç elektroniğinde kullanılan anahtarlama elemanlarının geliştirilmesi ile BLDC motorlar kendilerine daha çok uygulama alanı bulmuştur. Bunlar;

- Elektrikli taşıtlar
- Elektrikli ev aletleri
- Harddisk, CD-ROM motorları

- Robot endüstrisi
- Otomobil gaz kelebeği
- Yağ ve yakıt pompaları

gibi alanlar sayılabilir.

Gerçekleştirilen tez çalışması toplam 6 ana bölümden oluşmuş olup 2. bölümde BLDC motorların tasarlanması ve sürücülerini konusunda literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. 3. bölümde fırçasız doğru akım motorlarının yapısı, çalışma prensibi, üstün ve zayıf yönleri, kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiş ve rotordaki sabit manyetik alanı oluşturan mıknatışlar incelenmiştir. 4. bölümde BLDC motorun sürücü tasarımında kullanılan elektronik anahtarlama elemanları olan mosfetler ve mosfet sürücüler üzerinde durulmuştur. Yanlış anahtarlama zamanı ile mosfetlerin zarar görmelerini önlemek için önemli parametreler olan Bootstrap kondansatör hesabı ve Dead Time üzerinde durulmuş, mosfetlerin anahtarlama için gerekli algoritma oluşturulmuş ve Arduino Mega 2560 için kod düzenlenmiştir. BLDC motorun sürülmesi için oluşturulan 3 faz H köprüsünü de barındıran elektronik devre tasarlanmıştır. 5. bölümde referans alınan motorun bütün boyut ölçüleri ve teknik bilgileri MotorSolve BLDC modülüne işlenmiş ve elde edilen grafikler analiz edilmiştir. Son 6. bölümde ise tez çalışma sürecinde elde edilen bilgi ve tecrübeler aktarılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Ehsani, Gao ve Gay (2003), elektrikli ve hibrid elektrikli bir araç için indüksiyon motorları, fırçasız doğru akım motorları ve anahtarlama relüktans motorların araç performansına etkileri analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sabit mıknatıslı doğru akım motorunun diğer motorlara göre en yüksek torka sahip olduğu bildirilmiştir[15].

Jiixin, Youguang ve Jiangou (2006), manyetik alan sonlu elemanlar analizi (FEA) ile fırçasız doğru akım motorunun hava boşluğu akısı, zıt elektromotor kuvvet ve endüktans gibi parametreleri analiz etmişlerdir[16].

Ertuğrul ve Acarnley (1994), fırçasız doğru akım motorundan alınan gerilim ve akım sinyalleri ile sensör kullanmaksızın rotor konum bilgisinin elde edilebileceğini belirtmişlerdir[17].

Singh (1997), sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının tork dalgalanmasının azaltılması, yarı iletken güç elektroniği ve mikrodenetleyicilerin maliyet azaltma ve ileride kullanılacak muhtemel uygulamalar üzerindeki etkileri incelenmiştir[18].

Zhang, Cheng ve Hua (2010), sonlu elemanlar analizi (FEA) ile stator iç sabit mıknatıs makinesinin dişli torku (cogging torque) hesaplaması yapılmıştır[19].

Karakulak ve Yaz (2012), PIC16F877 mikrodenetleyici ve piyasada yaygın ve uygun fiyata bulunabilecek devre elemanları ile sabit hız ve yükte çalışan fırçasız DC motorun sürücü devresini tasarlamışlardır[20].

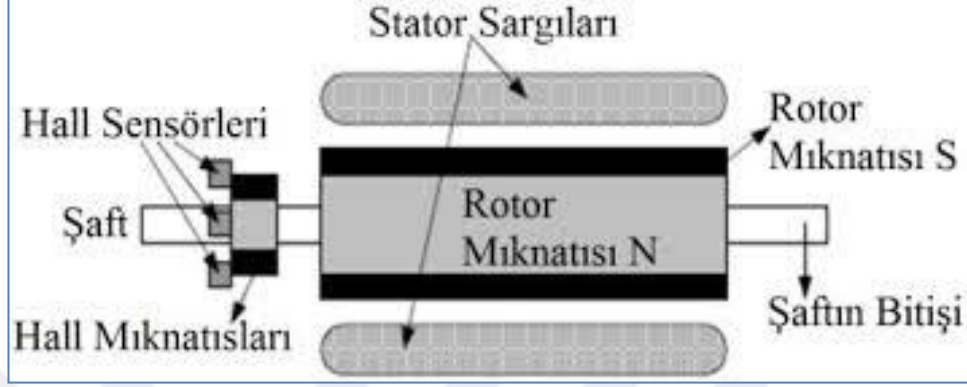
Bektaş ve Serteller (2011), fırçasız doğru akım motorunun Matlab® /Simulink® programı ile Histerisiz Bant Kontrolü ve PWM kontrol yönteminin moment, hız ve pozisyon yönünden karşılaştırılması bilgisayar ortamında yapmışlardır. Her iki yöntemde olumlu ve olumsuz yönlerinin üzerinde durmuşlardır[21].

Hasanusta ve Serteller (2015), fırçasız doğru akım motorlarında 60^0 ile 120^0 arasında olan hall sensör pozisyonunun motor yüklü çalışma durumunda sensör konumlarının değişiminin BLDC'nin parametrelerine etkisi incelemişlerdir[22].

Wu ve Tian (2012), fırçasız doğru akım motorunun kontrolünde kullandıkları dsPIC30F4012 mikrodenetleyicisi için kaynak kodu oluşturulmuş ve gerekli donanım devresi tasarlanmıştır[23].

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI (BLDC)

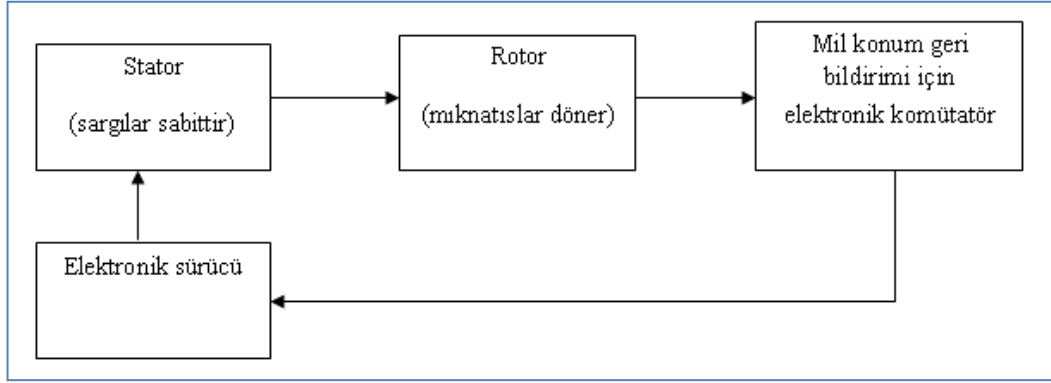
3.1. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı



Şekil 3. 1 Fırçasız Tip DC Motor Kesit Görünümü

Fırçasız Doğru Akım Motorları (BLDC), elektrikli ev aletleri, otomotiv, havacılık gibi alanlarda hem azalan maliyetler hem de işlevsellik yönleriyle kullanımı giderek artan ve nispeten yeni sayılabilecek bir motordur.

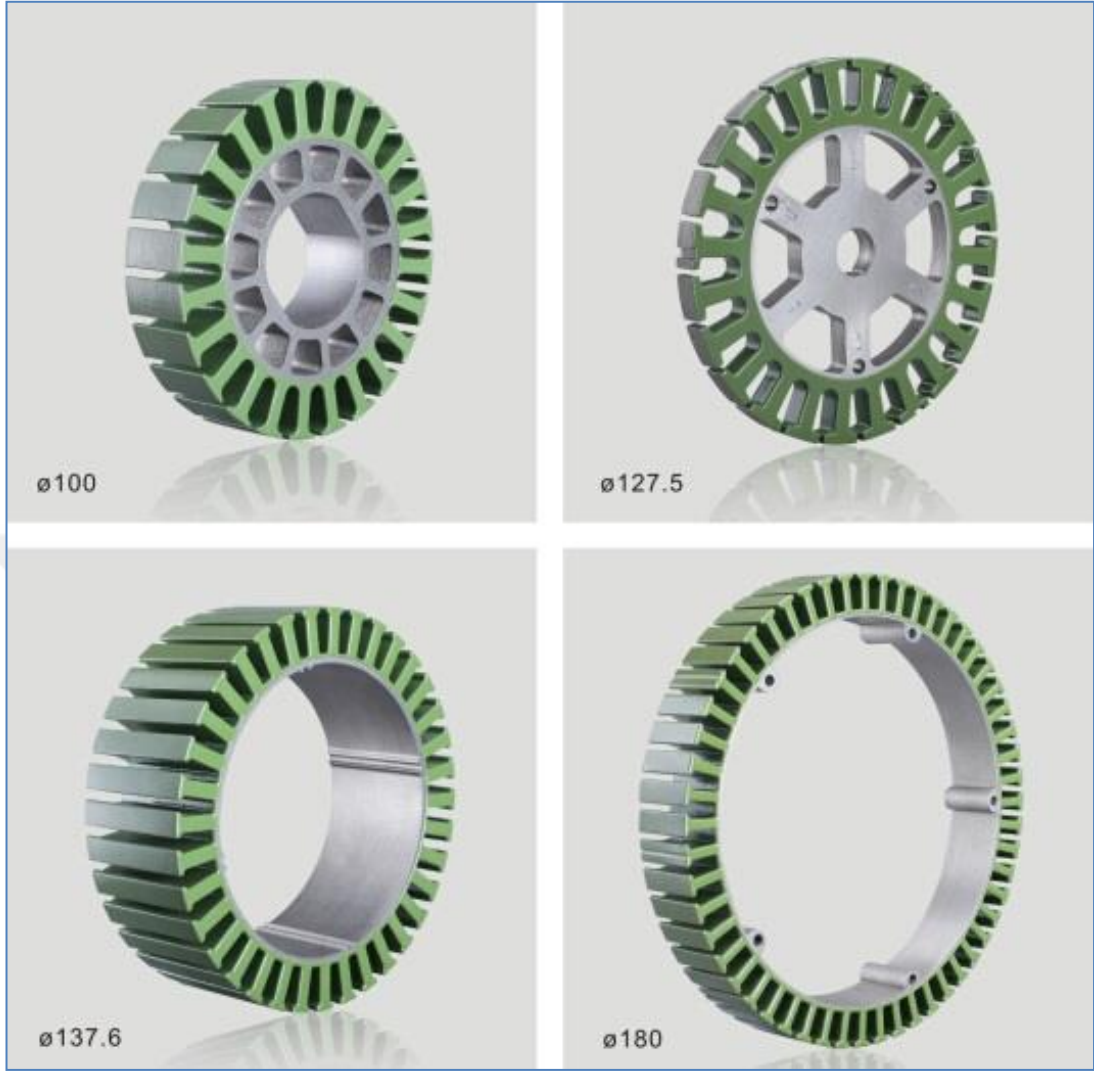
Şekil 3.1'de şaft üzerine konumlandırılmış hall sensör, iç rotor olan mıknatıs ve stator sargılarının konumlarına ait kesit görüntüsü verilmiştir. DC motorun endüvisindeki bir bobinde, akımın kolektör dilimleri ve fırçalar yardımıyla yön değiştirmesi olayına komütasyon denir ancak BLDC motorlarda kolektör ve fırçalar bulunmadığı için komütasyon elektronik olarak yapılmaktadır. Sensörler vasıta ile rotordan alınan konum bilgilerini elektronik sürücünün stator sargılarını uygun sırayla enerjilendirilmesinde kullandığı fırçasız tip DC motor düzeni Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Fırçasız Tip DC Motor Düzeni

3.1.1. Stator

Elektrik motorunun sabit kısmı olup sargıların sarıldığı ve barındırdığı silisyum sayesinde manyetik iletken kayıplarının minimum olduğu sac nüvelerden oluşur. Sac nüveler istenen oluk sayısında kalıplar belirlendikten sonra kesilip preslenir. Sargıların statora temasını ve kısa devreyi önlemek için toz kaplama veya plastik izolatörler kullanılır. Sargılar bağlama, vernikleme ve uç kablolarının konektörlerle dışarıya çıkarılmasıyla hazırlanmış olur. Şekil 3.3'te fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan farklı stator iç ve dış çap, kalıp tipi, oyuk (slot) sayısı vb. özellikleri olan statorlar görülmektedir.



Şekil 3. 3 BLDC Motor Statoru[26]

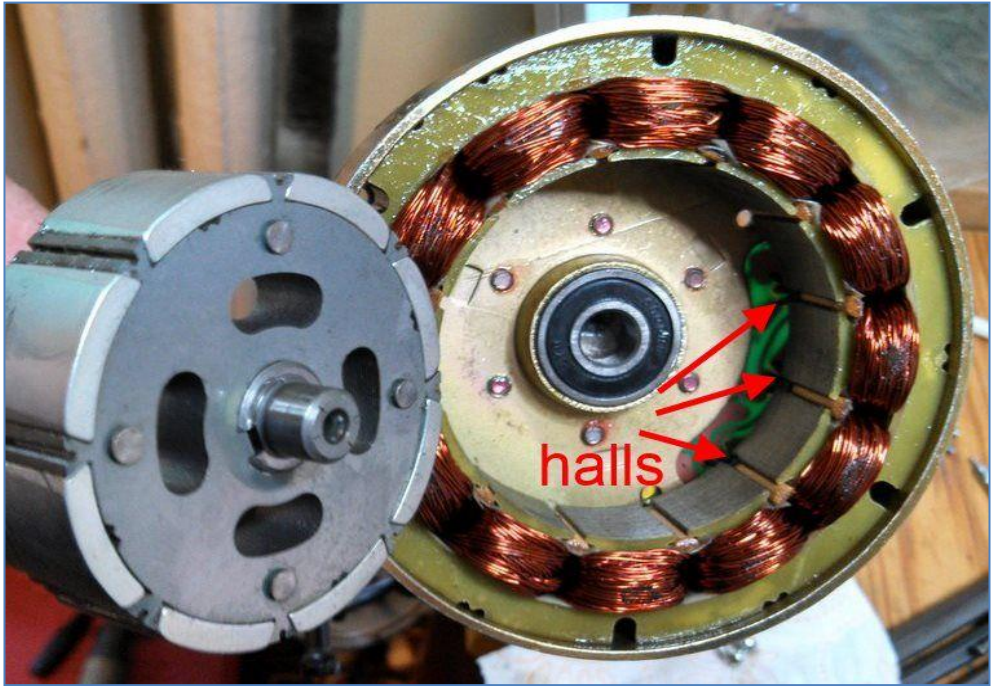
3.1.2. Rotor

BLDC motorun rotoru mıknatıslardan oluşur. BLDC motorları iç rotor (Inrunner) ve dış rotor (Outrunner) olarak iki şekilde tasarlamak mümkündür. Dış rotor tasarımı sabit mıknatıslar stator sargılarını, iç rotor tasarımında ise stator sargıları sabit mıknatısları sarmış şekildedir. Sabit mıknatıslar herhangi bir manyetomotor kuvvet olmadan manyetik alan oluşturmak için kullanılırlar. Mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler yaklaşık 30 yıl öncesine kadar kullanılan seramik mıknatısların yerini sıklıkla Neodyum mıknatıs olarak bilinen Neodyum-Demir-Bor (NdFeB)'a bırakmıştır. Motorun hız ve tork değerini doğrudan etkileyen rotordaki mıknatıs kutup sayısı ne kadar fazlaysa tork o kadar yüksek olur ancak hız da o kadar

düŖecektir. Ŗekil 3.4 ve Ŗekil 3.5'te sırasıyla 14 kutuplu dıŖ rotor ve 8 kutuplu i rotor BLDC motorlar gsterilmiŖtir.

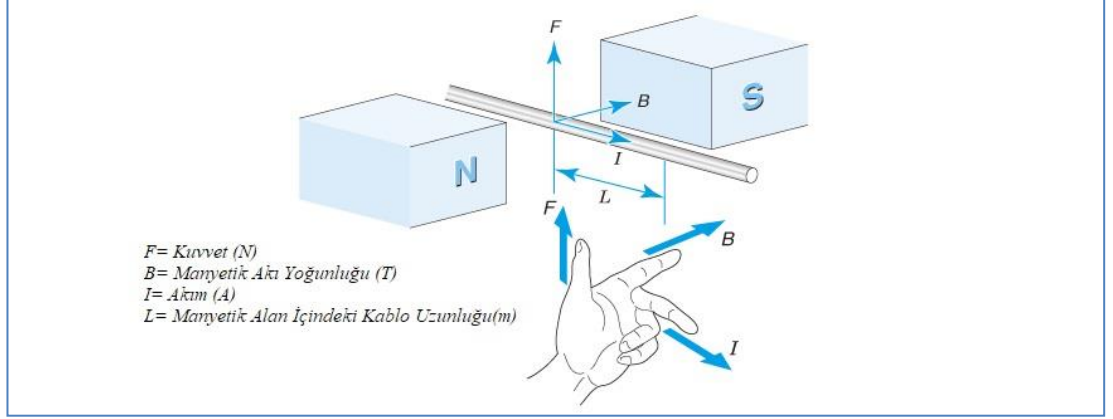


Ŗekil 3. 4 Fırçasız Tip DC Motor (DıŖ Rotor ve Stator)



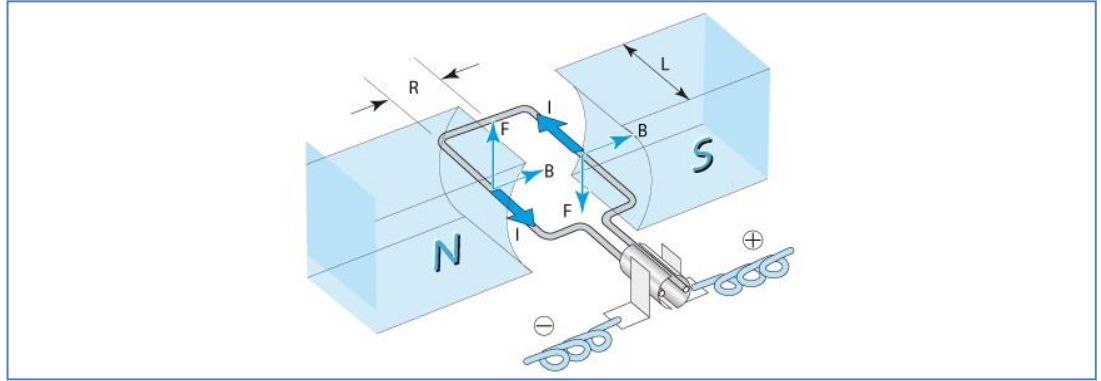
Ŗekil 3. 5 Fırçasız Tip DC Motor (İ Rotor ve Stator)

3.2. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi



Şekil 3. 6 Fleming'in Sol El Kuralı[4]

BLDC motorlarının nasıl çalıştığını anlamak için önce DC motorun çalışma prensibini bilmemiz gerekir. John Ambrose Fleming, bir elektrik motorunun hareket yönünü incelemek için basit bir yöntem olan sol el kuralını oluşturmuştur. Sol el kuralı; manyetik alan içerisindeki iletkenin itilme yönü manyetik alanın yönüne ve iletken içerisinde geçen akımın yönüne bağlı olarak değişir.



Şekil 3. 7 DC Motor Dönüş Prensibi[4]

Akım taşıyan bir iletken manyetik alanın içerisine yerleştirildiğinde iletken mekanik bir kuvvete maruz kalarak manyetik alanın dışına doğru itilir. Meydana gelen bu kuvvetin büyüklüğü ise;

$$F = B.L.I$$

[3.1]

denklemleri ile bulunur.

Burada;

F =Kuvvet (N)

B =Manyetik akı yoğunluğu(T)

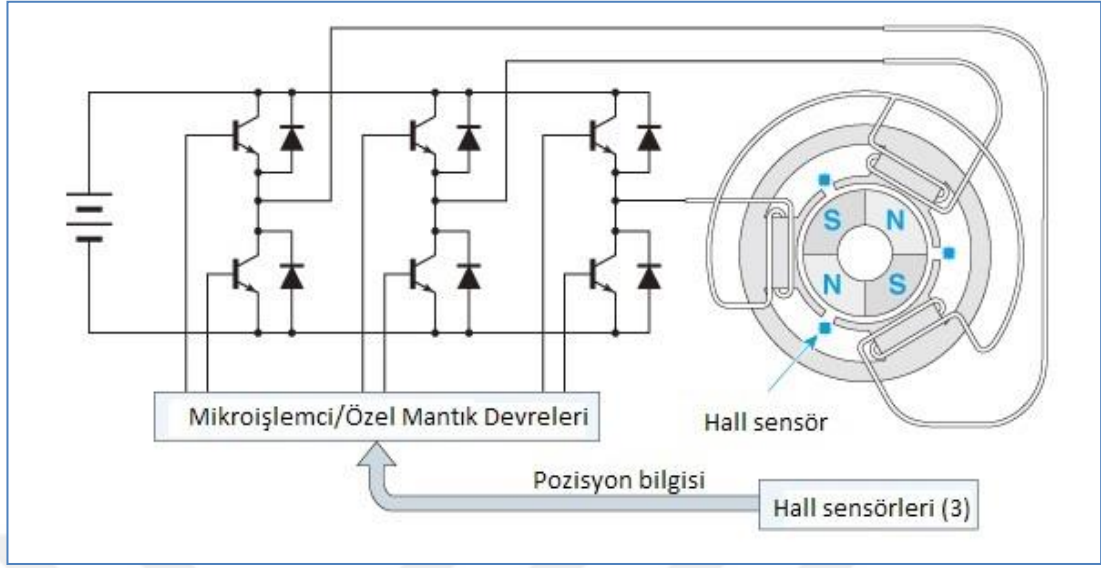
I =Akım (A)

L =Manyetik alan içindeki kablo uzunluğu (m)

belirtmektedir.

DC motor üzerindeki kolektör ve fırçalar yardımıyla yön değiştiren akım motorun sürekli olarak dönmesini sağlayacaktır. Fırçaların kolektöre sürekli temas halinde olması motordaki ısının artmasına, kıvılcımlara ve karbon tozunun oluşmasına sebep olacaktır.

BLDC motorlar, fırçalı DC motorların dezavantajlı olmasına sebep olan kolektör ve fırçaları motor gövdesinden çıkarmıştır. Diğer motorlarda olduğu gibi stator ve rotordan oluşan BLDC motorlar stator (sabit kısım) bobin ve rotor (dönen kısım) mıknatıslardan oluşur. Genel çalışma prensibi, stator bobinleri ile rotor mıknatısları arasındaki manyetik alan etkileşimi sonrasında motoru döndürecek torkun oluşmasıdır. Ancak bu döndürme torkunun sürekliliği için statordaki manyetik alanın da dönmesi gerekir. Manyetik alanın dönüşünün kontrolünde pozisyon bilgisi mikroişlemciye hall sensörleri ile gönderilir. Hall sensörlerden alınan konum bilgileri mikroişlemcide işlendikten sonra güç devresindeki anahtarlama elemanlarının uygun sırada tetiklenerek yıldız bağlı stator sargılarda sürekli döner manyetik alan oluşturması şeklinde olan temel çalışma prensibi Şekil 3.8'de görselleştirilmiştir.



Şekil 3. 8 BLDC Motor Temel Çalışma Prensibi

3.3. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Üstün ve Zayıf Yönleri

Tablo 3.1'de BLDC motorların diğer motorlara göre avantajları ve nedenleri açıklanmıştır[25].

Tablo 3. 1 BLDC Motorun Avantajları

BLDC Motor Avantajı	Sebebi
Daha küçük motor	Rotorda sabit mıknatısların kullanılması ve kayıp olmaması BLDC motorun aynı güçteki fırçalı DC motorlara ve AC indüksiyon motorlarına kıyasla daha küçük boyutlarda üretilmesine olanak sağlamaktadır.
Daha verimli motor	Rotorda bulunan sabit mıknatıslar sayesinde AC indüksiyon motorlarındaki rotor çekirdek kayıpları olmaz.
Daha hızlı motor	Fırçalı DC motorlarda motor hızını sınırlayan fırçalar BLDC motorlarında bulunmadığı için çok yüksek hızlarda çalışan motorlar üretilmektedir.
Bakım gerekmez	Fırçaların bulunmaması motorun bakım ve onarım masraflarının da olmayacağı anlamına gelir.

Hızlı tepki	Bir AC indüksiyon motoruna nazaran daha düşük rotor ataleti vardır.
Doğrusal hız-tork karakteristiği	BLDC motorlarının sabit mıknatıslar ve dahili sensörler sayesinde rotor konumunun bilinmesi motora doğrusal hız-tork karakteristiği kazandırır.
Ayarlanabilir hız	BLDC'nin çalışması için gerekli olan elektronik bileşenlerin haricinde ek maliyet olmaksızın hız ayarı yapılabilir.

BLDC motorlarının dezavantajı maliyettir. Maliyet bir fırçalı DC motordan veya bir asenkron motordan daha karmaşık olmayan yapısından değil sürücü elektroniği olmadan çalışmamasındandır. Disk sürücülerinden takım tezgahlarına kadar kullanılacak uygulamalarda ayarlanabilir hız ve pozisyon kontrolü vazgeçilmez önemde olduğu için dezavantaj görünümündeki sürücü elektroniği avantaj ve maliyette ucuzluk getirmektedir.

3.4. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kullanım Alanları

Tablo 3.2'de BLDC teknolojisinin kullanım alanlarına göre uygunluğu özetlenmiştir.

Tablo 3. 2 BLDC Motor Genel Kullanım Alanları

Kullanım Alanı	BLDC Teknolojisinin Uygunluğu
Tek hız	Tek hızlı uygulamalar için en uygun çözüm asenkron motorlardır denebilir. Ancak daha iyi verim, daha küçük boyut, daha hızlı tepki gibi avantajlar ve BLDC motor üretim maliyetlerinin zamanla azalıyor olması asenkron motorlara karşı bir alternatif sunmaktadır.
Ayarlanabilir hız	İnvertör elektroniğine sahip bir asenkron motora kıyasla daha ucuz bir çözümdür.
Pozisyon kontrol	Pozisyon kontrolünde hem teknik avantajlar hem de fiyat açısından BLDC motor öndedir.

3.5. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Mıknatıslar

BLDC motorlarda rotor yüzeyine yerleştirilen sabit mıknatıslar kullanılır. Rotor oluşturulurken seçilen mıknatısların uzun süreli manyetik alan sağlaması gerekir. Oluşturulacak manyetik alanın zaman içerisinde ve özellikle sıcaklığa bağlı olarak azalması rotorda kullanılacak mıknatısın seçiminde kritik önemdedir. Sabit mıknatıs olarak genelde Alnico(AlNiCo), Samaryum Kobalt (SmCo), Neodyum-Demir-Bor(NdFeB) kullanılır.

3.5.1. Alnico Mıknatıslar (AlNiCo)

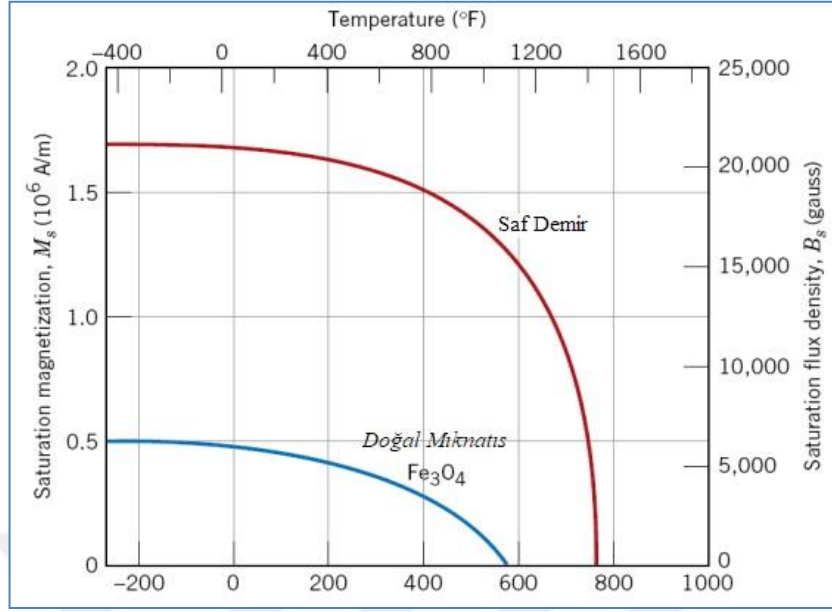
Alüminyum, Nikel ve Kobaltın çeşitli şekillerde metalik alaşımlarından elde edilen mıknatıslardır. Elektrik makinelerinin mıknatıslarla uyarılma uygulamalarında, ilk yüksek indüksiyonlu mıknatıslardan olan Alnico kullanılmıştır[2].

3.5.2. Samaryum Kobalt Mıknatıslar (SmCo)

Samaryum-Kobalt mıknatısları yüksek enerji değerleriyle "Nadir Toprak Element Mıknatısları" dönemini başlatmıştır. SmCo içinde en önemli dezavantaj Samaryum'un az bulunan bir element olması sebebiyle pahalılığıdır. Özellikle hacim ve ağırlığın çok önemli olduğu uzay araçlarında, uçaklarda ve robotikte gereksinim duyulan tahrik motorlarında vb. kullanılır[2].

3.5.3. Neodyum Demir Bor Mıknatıslar (NdFeB)

SmCo alaşımlarından sonra günümüze kadar üretilmiş olan mıknatıslar içerisinde en yüksek enerjiye ve kalıcı indüksiyona sahip olan NdFeB üretilmeye başlanmıştır. Neodyum-Demir-Bor mıknatısların en önemli dezavantajı Curie sıcaklığının düşüklüğüdür. Samaryum Kobalt mıknatıslar gibi hacim ve ağırlığın önemli olduğu noktalarda kullanılmaktadır[2]. Curie sıcaklığı; ferromanyetik malzemelerin mıknatıs tarafından çekilme özelliğini yitirdiği kritik sıcaklık değerine denir. Şekil 3.9'daki mıknatıslanma-sıcaklık değişimi grafiğinde, saf demir 770 °C ve doğal mıknatıs demir oksit 1120 °C üzerinde ısıtıldığında ferromanyetik özelliğini yitirdiğini görmekteyiz.

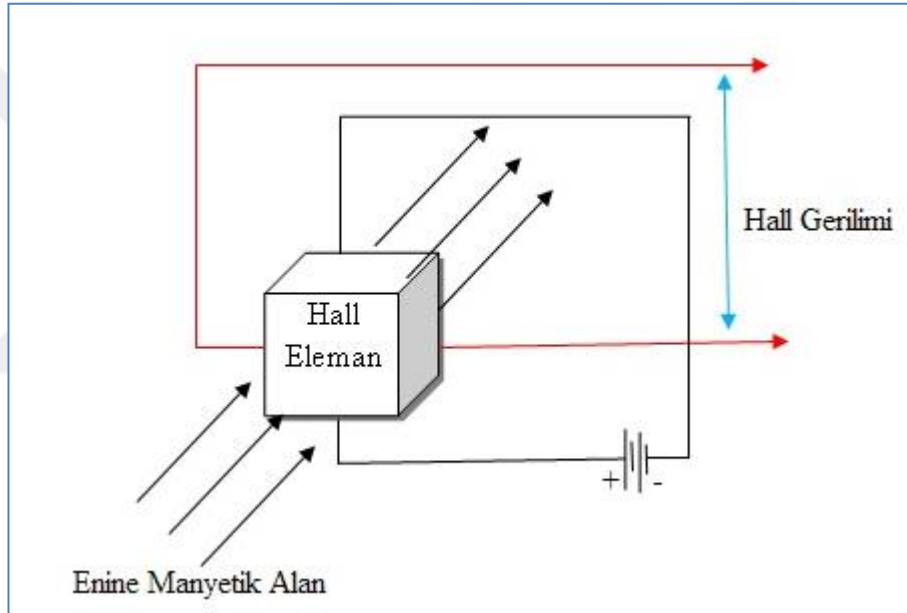


Şekil 3. 9 Saf Demir ve Fe_3O_4 İçin Mıknatıslanma-Sıcaklık Değişimi Grafiği[3]

4. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR (BLDC) KONTROLÜ VE SÜRÜCÜ DEVRESİ TASARIMI

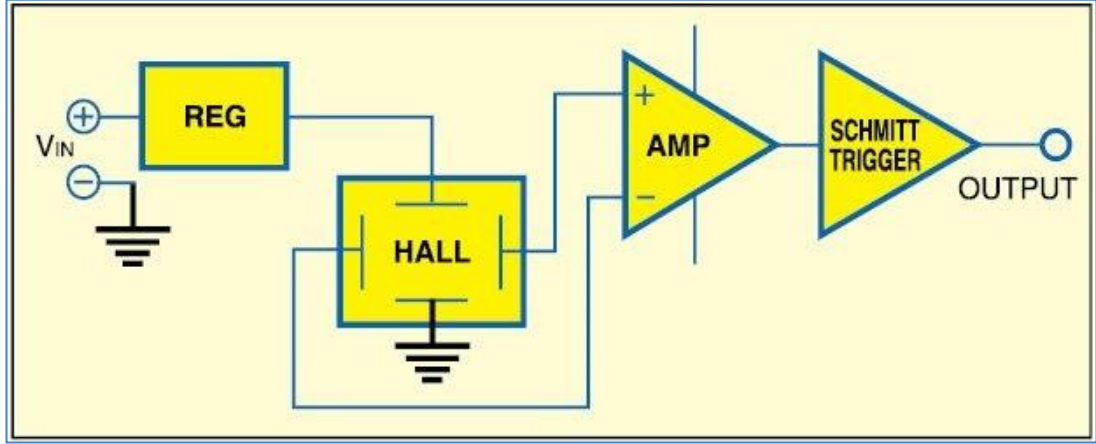
4.1. Alan Etkili Sensörler (Hall Effect Sensors)

Şekil 4.1'de çalışma prensibi gösterilen Hall eleman (metal şerit), akım akış yönüne dik çıkış bağlantıları olan ince bir iletken malzeme tabakasından yapılmıştır ve manyetik alana maruz kaldığında manyetik alan gücüyle doğru orantılı bir çıkış voltajı üretir.



Şekil 4. 1 Hall Eleman Çalışma Prensibi

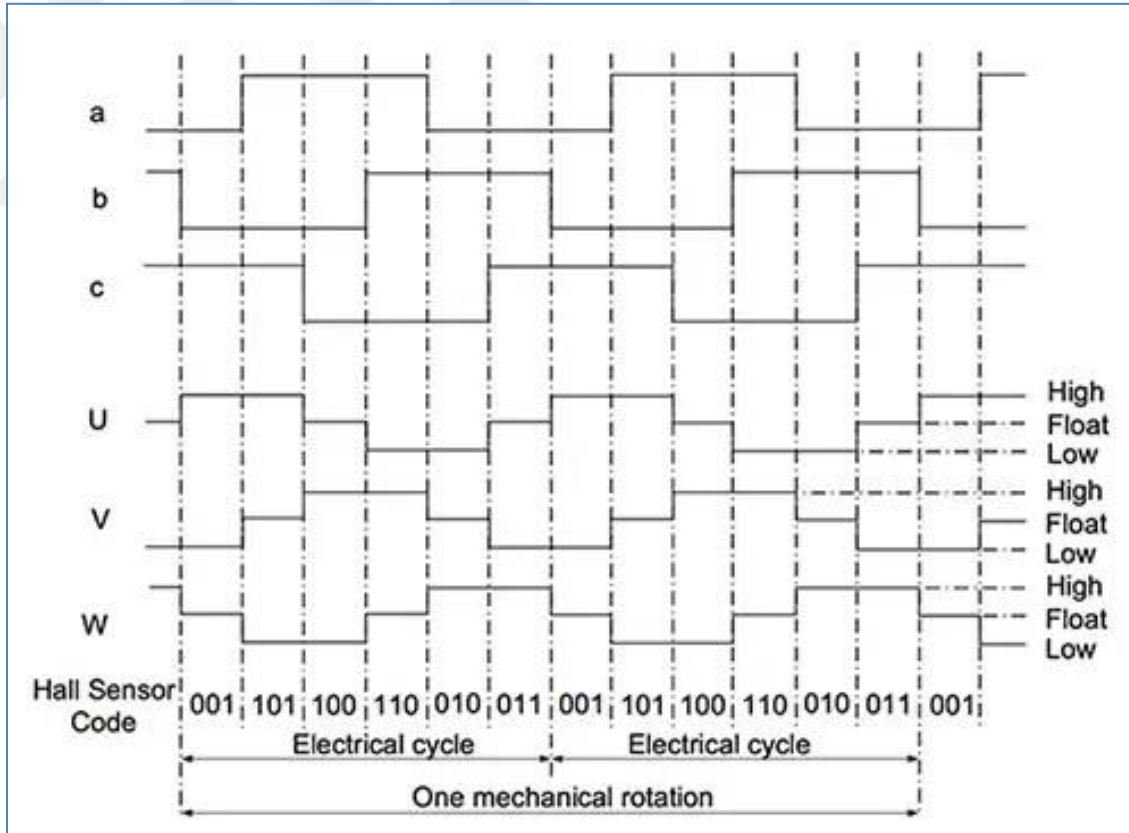
Hall voltaj çıkış gerilimi mikro-volt (μV) seviyelerindedir ve genliği sabit değildir. Üretilen Hall gerilimini anlamlı voltaj seviyelerine getirmek için sinyal güçlendirme (amplifikatör) devresine ihtiyaç vardır ve Schmitt Trigger devresi ile dijital sinyale dönüştürülmelidir. Şekil 4.2, Hall elemanı ile amplifikatör ve Schmitt Trigger devreleri birleştirildiğinde oluşan Hall effect sensör blok diyagramını göstermektedir[5].



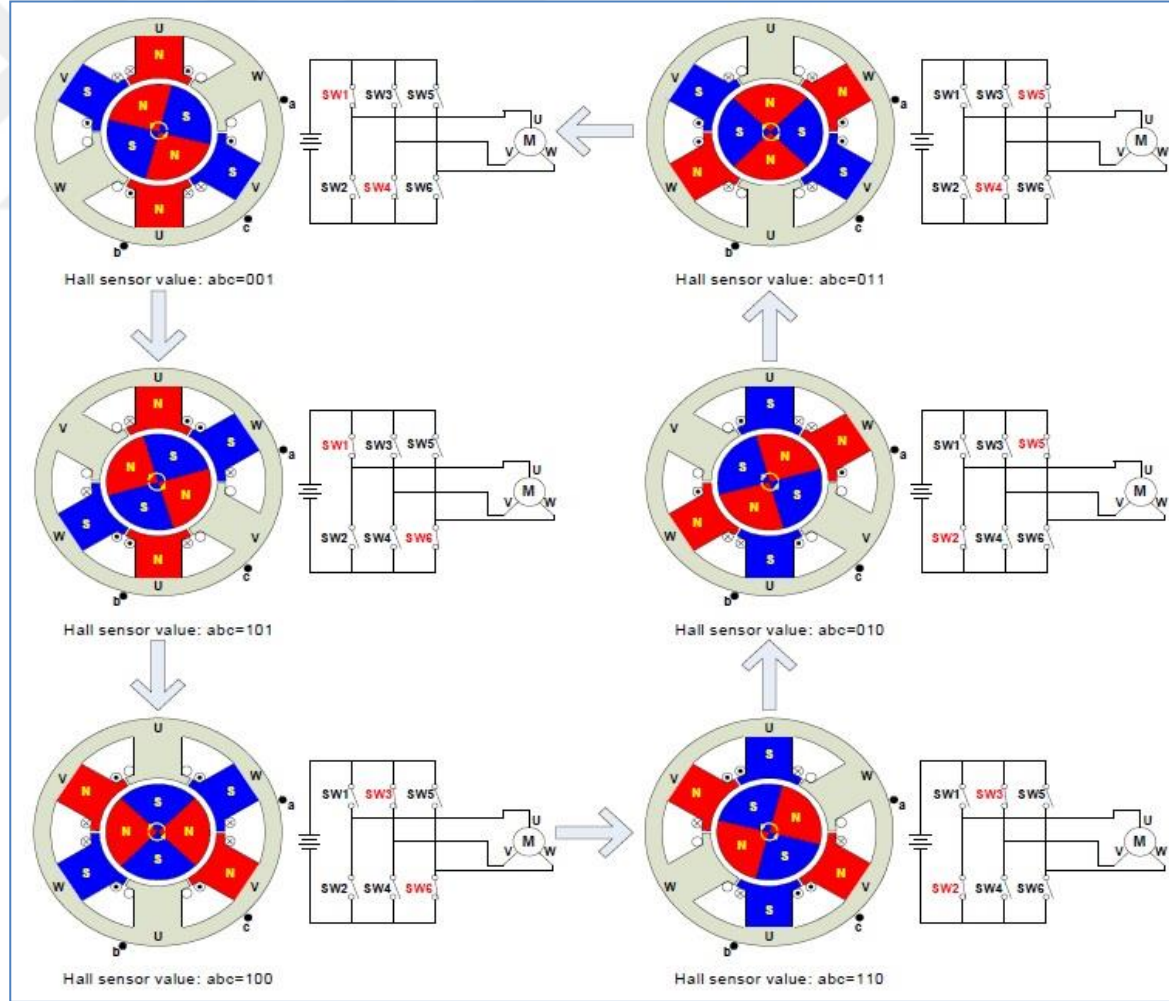
Şekil 4. 2 Dijital Çıkış Hall Effect Sensörü Blok Diyagramı[5]

4.2. Sensörlü BLDC Motor Kontrolü

Sensörlü BLDC motorlarda rotorun konumunu tespit etmek için genellikle Hall sensörler kullanılır. Üç fazlı BLDC motorunun kontrolünü, 60° açı kaydırmalı şekilde yerleştirilen Hall sensörlerden rotor konumunu bildiren sinyaller ve bu sinyalleri işleyen mikroişlemcilerin yariletken motor sürücü anahtarları belirli bir sıra ile tetiklemesi prensibine göre açıklamak uygun olacaktır. Hall sensörden gelen konum durumlarına göre fazlardan birine pozitif diğerine negatif gerilim uygulanacak ve üçüncü faza herhangi bir gerilim uygulanmayacaktır. Şekil 4.3'te altı adımda a, b ve c Hall sensörlerinden gelen sinyaller ve bu sinyallere karşılık U, V, W stator sargı giriş uçlarına uygulanacak gerilim gösterilmiştir. Şekil 4.4'te ise U, V ve W sargı uçlarının komütasyon faz enerjilendirme sırası Hall sensör sinyallerine göre altı adımda $U+$ ve $V-$, $U+$ ve $W-$, $V+$ ve $W-$, $W+$ ve $V-$, $W+$ ve $U-$, $V+$ ve $U-$ şeklinde olursa motorun bir tam tur döneceği gösterilmiştir.



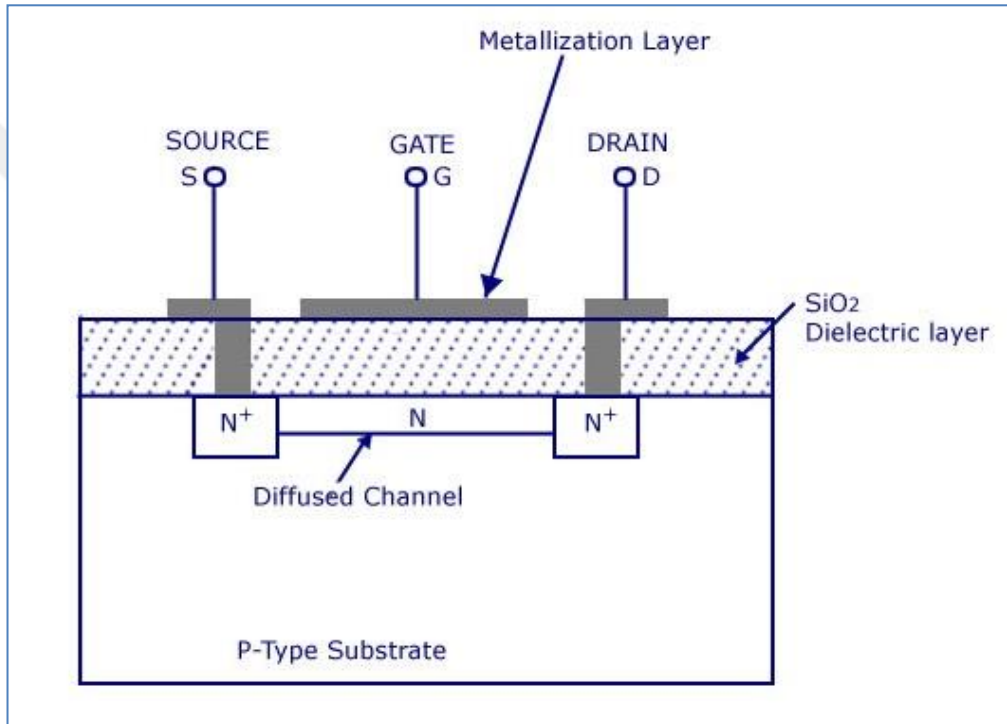
Şekil 4. 3 Hall Sensör Sinyallerine Göre Faz Sargılarının Durumu[6]



Şekil 4. 4 Hall Sensör Sinyallerine Göre Üç Fazlı BLDC Motor Sargılarının Enerjilendirilmesi[6]

4.3. Mosfetlerin Yapısı ve Karakteristiği

Metal-Oksit-Yarıiletken FET (MOSFET), diğer transistörler gibi anahtar veya yükselteç olarak çalıştırılabilirler. Mosfetler genel olarak kanal ayarlamalı mosfet veya kanal oluşturmali mosfet şeklinde iki türde üretilirler. Kanal ayarlamalı mosfetlerde kanal fiziksel olarak oluşturulur ve Drain - Source arasına uygulanan gerilim sonucu Drain - Source arasında bir akım akar. Kanal oluşturmali mosfetlerde ise kanal, üretim aşamasında değil Gate ayağına bir gerilim uygulayarak oluşturulur.

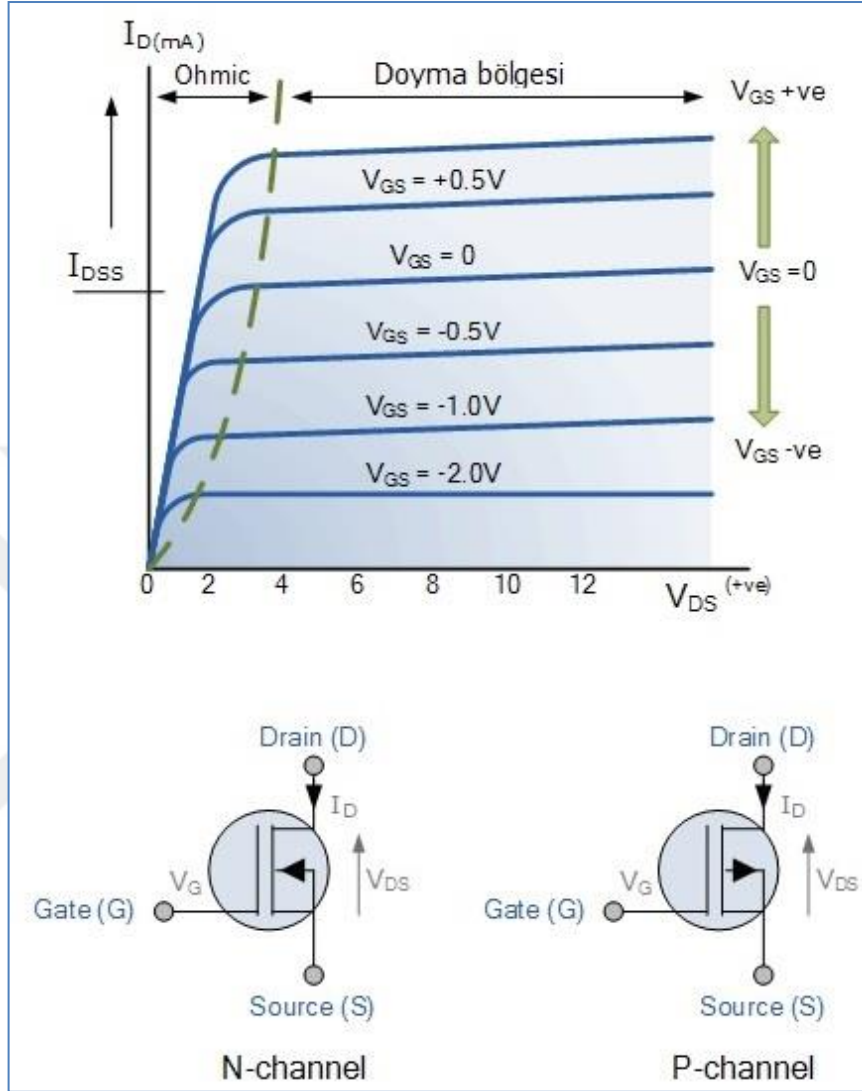


Şekil 4. 5 N kanal Depletion Tip (Kanal Ayarlamalı) Mosfet yapısı [7]

Şekil 4.5'te P tipi alt tabaka üzerinde N kanallı kanal ayarlamalı mosfet transistör yapısı görülmektedir. Drain ve Source uçları metal katman ile N katkılı bölgelere ve bu bölgeler de dahili N kanalla birbirlerine bağlanmıştır. N kanalın üzerine yalıtım görevi gören ince bir Silisyum Dioksit (SiO_2) katmanı yerleştirilmiş ve metal katman ile Gate ayağına bağlanarak kanal ayarlamalı tip mosfet oluşturulmuştur.

N kanal mosfette negatif kaynak gerilimleri kanal bölgesinden elektronları iterek kanalı boşaltır. Diğer taraftan pozitif kapı - kaynak gerilimi kanalı genişletecek (p-tipi taşıyıcıları itecek) ve böylece daha çok yük taşıyıcılarının geçmesine, yani kanal akımının artmasına yol açacaktır.

4.4. Kanal Ayarlamalı (Depletion) Tip Mosfet



Şekil 4. 6 Depletion Tip (Kanal Ayarlamalı) Mosfet Sembol ve Ohmic ve Saturation Bölgeleri[10]

Kanal ayarlamalı mosfetler normalde "ON" tipi mosfetlerdir. Şekil 4.6'daki grafik Gate ucuna uygulanan gerilimin değeri 0 volt iken Source ve Drain uçları arasında bir miktar akım geçtiğini ve bu akım mosfetin Gate bacağına uygulanan gerilim pozitif yönde arttıkça yükseldiğini negatif yönde arttıkça ise azaldığını göstermektedir. N kanallı Deplation Mosfetlerde akım mosfetin D ucundan S ucuna doğru N tipi maddenin içinden geçer. P kanallı Deplation Mosfetlerde ise akım tam

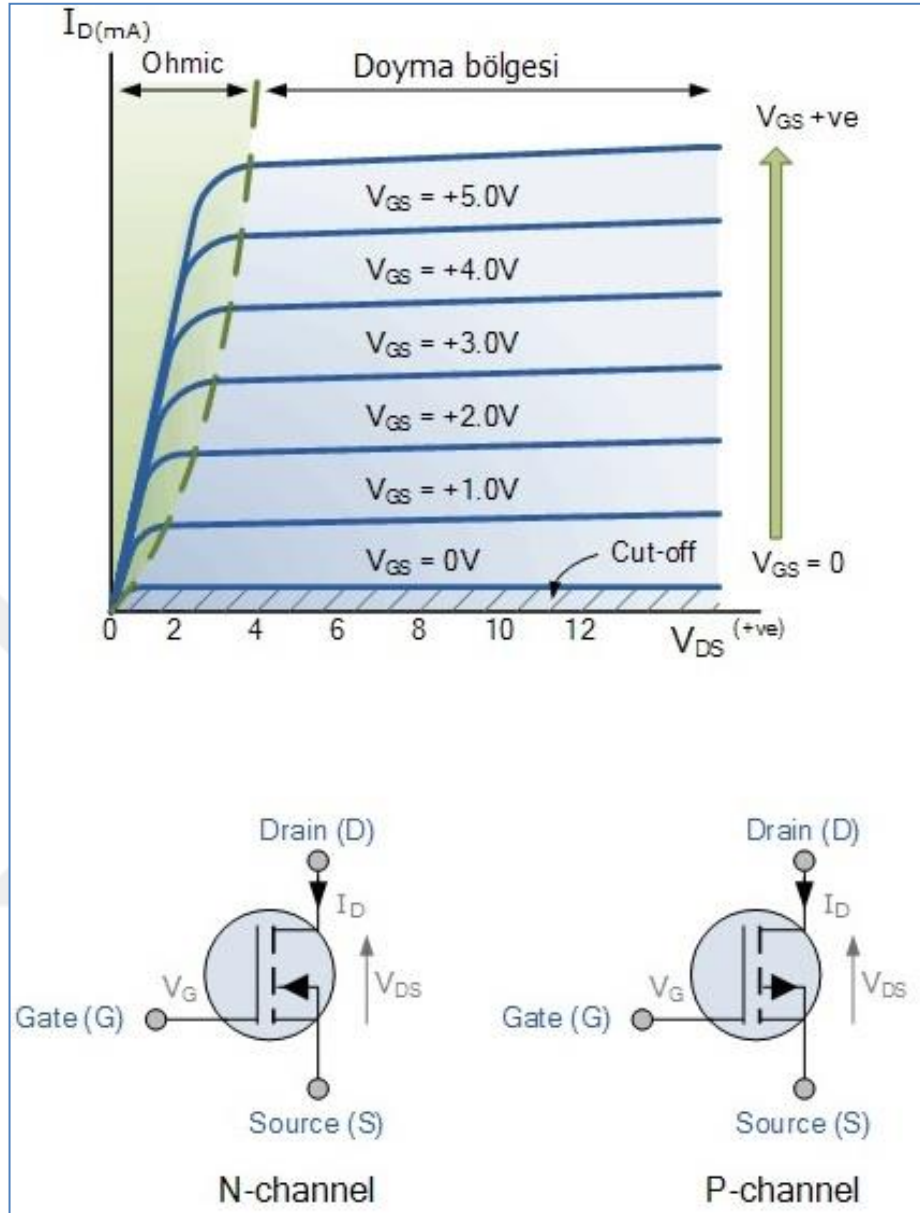
tersine mosfetin Source ucundan Drain ucuna doğru P tipi maddenin içinden geçer[10].

4.5. Kanal Oluşturmalı (Enhancement) Tip Mosfet

Enhancement mosfetler normalde "OFF" durumunda olan mosfetlerdir. Enhancement mosfetlerin Gate ayağına gerilim uygulanmadığı sürece Drain ve Source uçları arasından akım geçmez. Enhancement tipi mosfetlerde, mosfetin Drain ve Source uçları arasında fiziksel bir kanal yoktur. Bu nedenle Enhancement mosfetlerin Gate ayağına 0 volt gerilim uygulandığında Drain ve Source uçları arasından akım geçişi olmaz[10].

N kanallı Enhancement Mosfetlerin Gate ucuna +1 V gerilim uygulandığında, N tipi maddenin birleşim yüzeyine yakın olan kısmında (-) yüklü elektronlar toplanır. Bu elektronlar akım geçişi için kanal oluşturur ve böyle mosfetin Drain ve Source uçları arasında akım geçişi başlar. Gate ucuna uygulanan gerilim pozitif yönde arttırıldığında akım geçişinin olduğu kanal da genişler ve Drain ve Source uçları arasındaki akım miktarı artar[10].

P kanallı Enhancement mosfetlerde ise durum terstir. Bu tip çoğaltan kanallı mosfetlerde Gate ucuna uygulanan gerilim -1 V iken P tipi maddenin birleşim yüzeyine yakın olan kısmında (+) yükler toplanarak akım geçişi için kanal oluşturur, böylece mosfetin Drain ve Source uçları arasında akım geçişi olur. P kanallı Enhancement mosfetlerin Gate ucuna uygulanan gerilim negatif yönde arttırıldığında akım geçişinin sağlandığı kanal genişler ve Drain ve Source uçları arasından geçen akım artar[10].



Şekil 4. 7 Enhancement Tip (Kanal Oluşturmalı) Mosfet Sembol, Ohmic, Saturation ve Cut-Off Bölgeleri[10]

Mosfet voltaj kontrollü bir anahtarlama elemanıdır. Mosfeti sürebilmek için mosfetin, Saturation ve Cut-off yani doyum ve kesim alanlarında çalıştırılıyor olması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için mosfetin Gate-Source uçları arasında yeterli miktarda voltaj uygulanmalıdır. Gate-Source uçları arasındaki voltaj ile yani V_{gs} ile Drain'den geçen akım I_d arasındaki ilişkiye Transconductance yada iki yer arasındaki iletkenlik denir.

4.6. Sürücü Devresinde Kullanılan Mosfetin Yapısı ve Karakteristiği (IXTQ50N20P Mosfet)

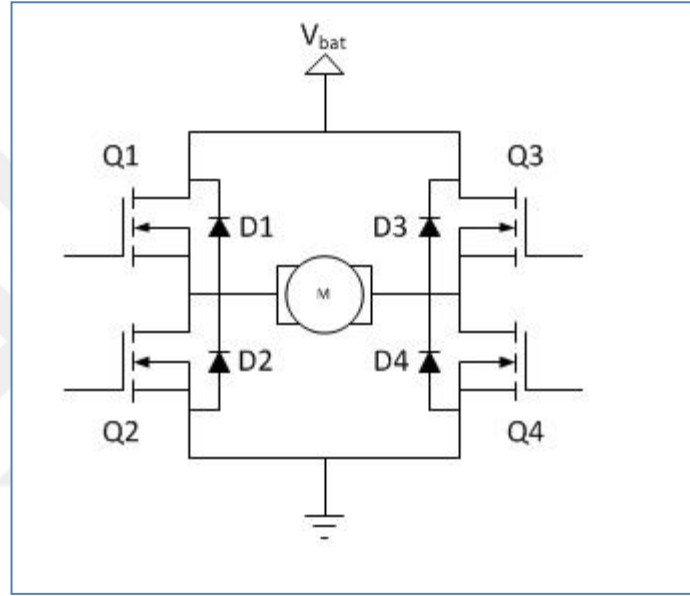
BLDC motorun sürücü devresinin tasarımında IR2110 Mosfet sürücü entegresi ve IXTQ50N20P Mosfet kullanılmıştır.

Sürücü devremizde kullanmış olduğumuz güç mosfeti olan IXTQ50N20P'nin katalog bilgileri incelendiğinde uygulama için hassas katalog değerleri[9];

- Drain - Source Gerilimi (V_{DS}); MOSFET'in aşılması gereken gerilim değeri=200V,
- Gate - Source Gerilimi(V_{GS}); MOSFET'in kontrol edildiği gerilim değeri= $\pm 20V$,
- Drain Ayağından Akabilecek Sürekli Akım Değeri(I_D); $25 \pm ^\circ C$ 'de sürekli akım değeri=50A,
- Drain Ayağından Akabilecek Anlık Akım Değeri(I_{DM}); $25 \pm ^\circ C$ 'de anlık çekilebilecek akımlar=120A
- Drain - Source Kırılma Gerilimi(V_{DS}); MOSFET'in zarar gördüğü maksimum dayanma gerilim olup, $V_{GS}=0V$ ve $I_D=250\mu A$ 'de=200V
- Gate Threshold Gerilimi($V_{GS(th)}$); MOSFET için en önemli parametrelerden biri olup, MOSFET'i iletme geçirebilmek için Gate ayağına uygulanması gereken minimum gerilim; 2.5V
- Gate - Source Sızıntı Akım(I_{GSS}); MOSFET sürüldüğünde Gate ile Source arasında bir sızıntı akımı akar; $\pm 100nA$
- Drain - Source İletim Direnci($R_{DS(on)}$); MOSFET iletimdeyken üzerinde oluşan maksimum direnç değeridir. Kayıp hesaplarında kullanılan en önemli değerlerden biridir=60m Ω

4.7. H Köprü (Bridge) Devreleri

Genel olarak H benzeri bir konfigürasyona benzediği için böyle anılan bu devreler yüke her iki yönde de voltaj uygulamamızı sağlayan basit bir elektronik devredir. İnvörtörlerde alternatif dalga formu üretmek için kullanıldığı gibi DC motorların yön ve hız kontrolünde de sıkça kullanılmaktadır. Yüksek voltajlı DC motor uygulamalarında anahtarlama hızları ve düşük dirençleri (R_{DS}) nedeniyle mosfetler kullanılır.



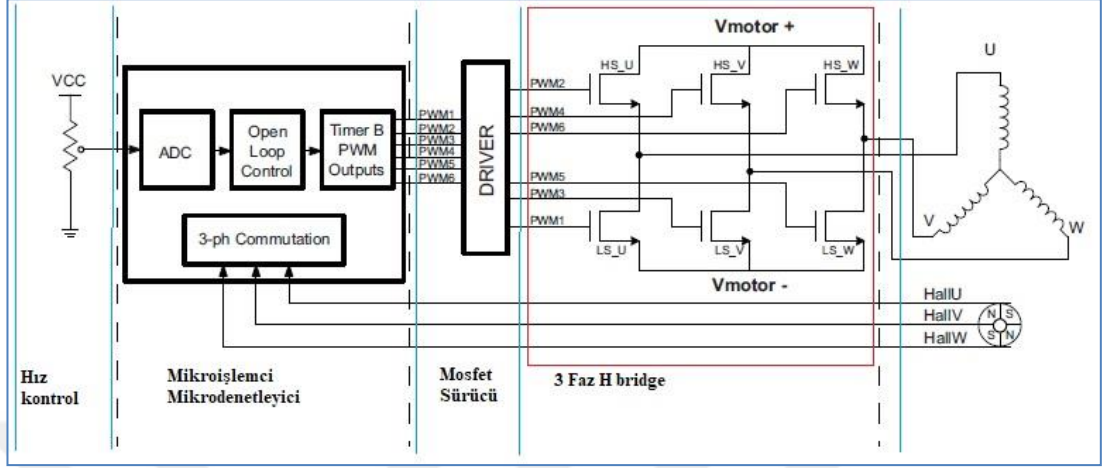
Şekil 4. 8 Genel H bridge devresi[12]

Bir H köprüsünün çalışma modu oldukça basit olup; Q_1 ve Q_4 anahtarlama elemanları iletimde ise motorun sol ucu güç kaynağına sağ ucu şaseye bağlı olacak ve motor bir yönde (ileri) dönecektir. Eğer Q_3 ve Q_2 iletimde ise tersi olacak ve motor diğer yönde (geri) dönecektir. H köprüsünde Q_1 ve Q_2 aynı anda iletimde (veya Q_3 ve Q_4) olursa kaynağın kutupları kısa devre olacak ve anahtarlama elemanları zarar görecektir.

4.8. 3 Faz İçin H Köprü Devresi

Bir motor kontrol ünitesinin 3 ana aşaması vardır. Bunlar mikroişlemci/mikrodenetleyici, mosfetler ve mosfet sürücülerdir. 3 fazlı bir BLDC için H köprüsü tasarlamak oldukça önemlidir. H köprüsü BLDC'yi döndürmek için

gerekli olan 3 faz AC'yi DC'den oluşturan devredir ve bu oluşum 6 adet mosfetin belirli bir şekilde tetiklenmesiyle gerçekleştirilir[13].



Şekil 4. 9 3 Faz BLDC Kontrol Devresi [11]

Şekil 4.9'daki devrede hız kontrol aşamasında potansiyometre üzerindeki gerilim mikrodnetleyiciye analog bir sinyal olarak verilir işlendikten sonra PWM sinyali olarak mosfet sürücülere gönderilir. Burada mosfet sürücüler kullanmak gerekmektedir çünkü mikrodnetleyicilerin çıkışları hem mosfetleri sürmek için yeterli akım veremezler hem de birbirinin aynısı olan mosfetlerin bile gate tetikleme gerilimlerinden sonra ns miktarında da olsa iletimde aksamalar yaşanması H köprü üzerinde kısa devrelere sebep olacaktır. 3 Fazlı H köprü PWM sinyali ile belirli sıralarda açılıp kapanarak motora gönderilecek olan 3 faz AC sinyali oluşturulur.

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
V_{DSS}	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to 175°C	200	V
V_{DGR}	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to 175°C , $R_{GS} = 1\text{M}\Omega$	200	V
V_{GSS}	Continuous	± 20	V
V_{GSM}	Transient	± 30	V
I_{D25}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	50	A
I_{DM}	$T_C = 25^\circ\text{C}$, pulse width limited by T_{JM}	120	A

Şekil 4. 10 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri [9]

H köprü tasarlarken mosfetlerin incelenmesi gereken bazı önemli parametreleri vardır. Bunlardan birisi I_D akımıdır çünkü motorun çekeceği akım mosfet üzerinden

gececektir. Katalogda iki farklı I_D değeri gözükmemektedir ve bu değerlerin mosfet sıcaklığına göre değişeceğini ifade etmektedir. Kullanacağımız mosfetin katalog bilgilerinden I_D akımının 25 °C sıcaklığa kadar 120A, 25 °C den sonra 50A olduğu görülmektedir. Diğer önemli bir parametre ise mosfet sürücüsünden gelen gerilimle doğrudan ilgili olan V_{GS} değeridir ve bu değer mosfet sürücüsü ile eşleşmelidir. Yine katalogdan bu gerilim değerinin ± 20 V olduğu görülmektedir.

Symbol	Test Conditions ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
g_{fs}	$V_{DS} = 10\text{V}, I_D = 0.5 \cdot I_{D25}$, Note 1	12	23	S
C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{V}, V_{DS} = 25\text{V}, f = 1\text{MHz}$		2720	pF
C_{oss}			490	pF
C_{rss}			105	pF
$t_{d(on)}$	Resistive Switching Times $V_{GS} = 10\text{V}, V_{DS} = 0.5 \cdot V_{DSS}, I_D = 0.5 \cdot I_{D25}$ $R_G = 10\Omega$ (External)		26	ns
t_r			35	ns
$t_{d(off)}$			70	ns
t_f			30	ns
$Q_{g(on)}$	$V_{GS} = 10\text{V}, V_{DS} = 0.5 \cdot V_{DSS}, I_D = 0.5 \cdot I_{D25}$		70	nC
Q_{gs}			17	nC
Q_{gd}			37	nC
R_{thJC}				0.42 °C/W
R_{thCS}	(TO-3P)		0.21	°C/W
	(TO-220)		0.25	°C/W

Şekil 4. 11 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri [9]

$R_{thJC} = 0,42$ °C değeri; watt başına santigrad derece olarak okunan bu değer ne kadar düşükse mosfet tarafından üretilen ısının soğutucuya daha iyi gönderileceği ve mosfetin daha soğuk tutulacağı anlamına gelir.

$C_{oss} = 490$ pF değeri; mosfetlerin anahtarlama kayıplarının hesaplanmasında önemli bir parametredir. Çıkış kapasitansını en aza indirmek anahtarlama kayıplarını da en aza indirir.

$Q_{g(on)} = 70$ nC değeri; mosfetin açılma süresini etkileyecek Gate kapasitansını hesaplamak için kullanılan değerdir.

Symbol	Test Conditions ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
BV_{DSS}	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu\text{A}$	200		V
$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu\text{A}$	2.5		5.0 V
I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20V, V_{DS} = 0V$			± 100 nA
I_{DSS}	$V_{DS} = V_{DSS}$ $V_{GS} = 0V$ $T_J = 150^\circ\text{C}$			25 μA 250 μA
$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 0.5 \cdot I_{D25}, \text{ Note 1}$			60 m Ω

Şekil 4. 12 IXTQ50N20P Power Mosfet Katalog Bilgileri [9]

$R_{DS(on)}=60$ m Ω değeri; $R_{DS(on)}$ değerinin az olması mosfetteki güç kaybını azaltmak için önemlidir.

$BV_{DSS}=200$ V değeri; Drain-Source arası arıza gerilimi olup bu değer aşıldığında mosfet patlayabilir. Bu yüzden mosfetin korunması için besleme geriliminden çok daha yüksek arıza gerilimi değerinde mosfetler seçilmelidir.

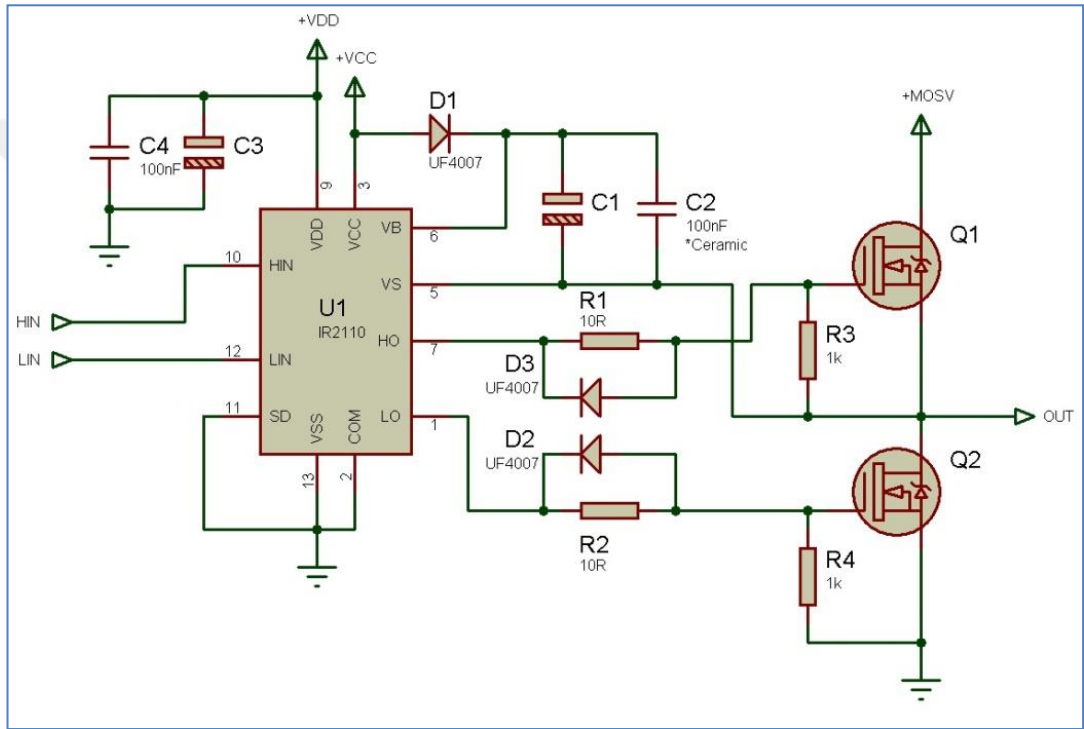
Yüksek güçlü motorlarda motorun çektiği akım değeri mosfetlerin akım değerlerinden çok daha fazla olabilmektedir. Bu gibi yüksek akım çekilen durumlarda mosfetler paralel bağlanarak akım mosfetler arasında paylaşılabilir.

4.9. Entegre Devre (IC) Mosfet Sürücüler ve H Köprü

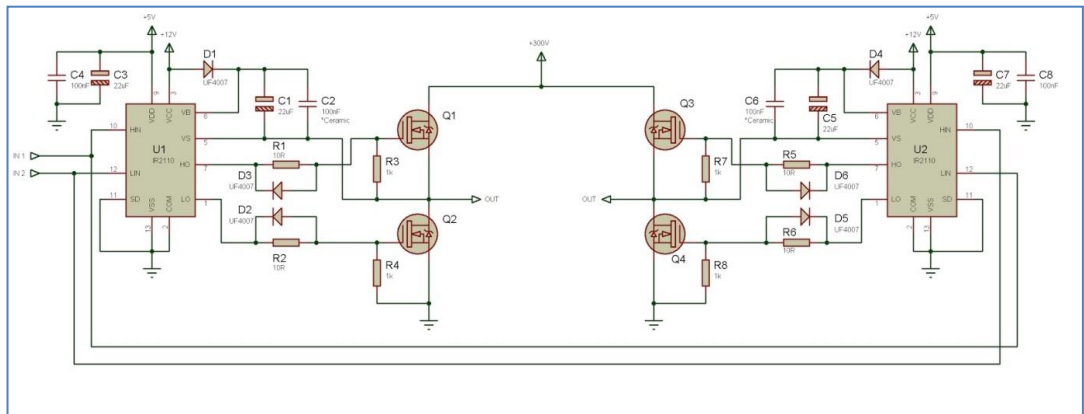
Half Bridge devrelerinde bir adet yüksek bir adette düşük, full bridge devrelerinde ise iki adet yüksek iki adette düşük mosfet vardır. DC motorları kontrol etmekte kullandığımız mosfetleri sürümek için en kullanışlı yöntemlerden biri entegre devre (IC) kullanmaktır ve piyasada en yaygın olarak kullanılanlardan biri de IR2110'dur.

IR2110 mosfet sürücü entegrenin V_{CC} düşük taraf sabit besleme gerilimidir ve 10V ile 20V arasında olmalıdır. V_{DD} , mantık beslemesidir ve V_{SS} 'ye göre +3V ila +20V arasında olabilir. Lojik 1 eşiği +3V'tan biraz daha fazladır. Bu nedenle uygulamalarda V_{DD} yaygın olarak +5V olarak kullanılmaktadır. IR2110 mosfet sürücünün fonksiyon blok diyagramı incelendiğinde V_{SS} ve COM uçlarının her ikisinin de şaseye bağlı olması gerekmektedir.

H_{IN} ve L_{IN} mantıksal girişlerin yapıldığı uçlardır. H_{IN} 'e lojik 1 sinyali verildiğinde yüksek taraf mosfetin iletimde olması için H_O lojik 1 olur. H_{IN} 'e verilen lojik 0 sinyali ise yüksek taraf mosfetin kesimde olması için H_O lojik 0 olacaktır. L_{IN} 'e lojik 1 sinyali verildiğinde düşük taraf mosfetin iletimde olması için L_O lojik 1 olur. L_{IN} 'e lojik 0 sinyali verildiğinde düşük taraf mosfetin kesimde olması için L_O lojik 0 olacaktır. SD sürücü entegrenin kapatma kontrol ucudur. Bu pim lojik 0 olduğunda IR2110 etkindir, lojik 1 olduğunda ise çıkışlar kapatılarak devre dışı bırakılır.

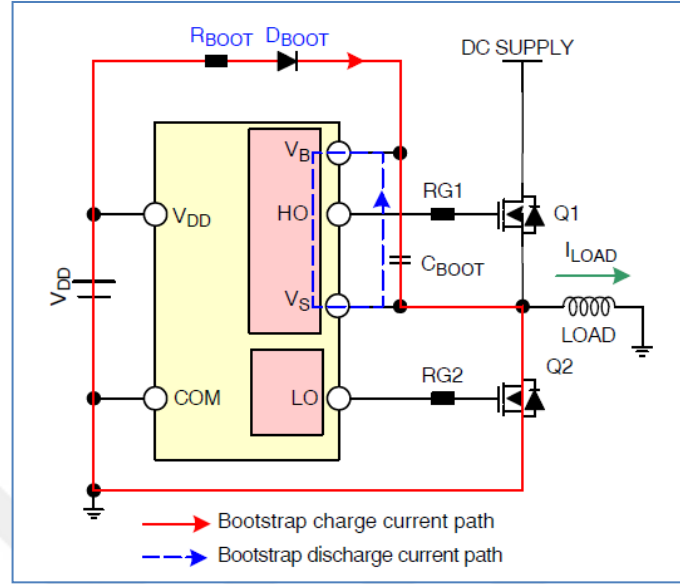


Şekil 4. 13 Half Bridge Sürmek İçin Temel IR2110 devresi[14]



Şekil 4. 14 Full Bridge Sürmek İçin Temel IR2110 devresi[14]

4.10. Entegre Devre (IC) Mosfet Sürücülerde Bootstrap Kondansatör Hesabı



Şekil 4. 15 Bootstrap Kapasitör Şeması

Bir diyot ve bir kapasitörden oluşan Bootstrap devresinin çalışma mantığı; Q₂ anahtarı iletimde olduğunda C_{BOOT} kondansatörü R_{BOOT} direnci ve D_{BOOT} diyotu üzerinden V_{DD} geriliminde şarj olur. Q₁ anahtarını iletime geçirebilmek için Source ayağına C_{BOOT} kapasitöründeki gerilimde eklenir ve bu durumda Q₁ anahtarının Gate ayağındaki gerilim Source ayağındaki gerilimden C_{BOOT} kondansatöründeki gerilim kadar fazla olur. C_{BOOT} şarj gerilimi Q₁ anahtarını iletime geçirir. D_{BOOT} diyotu V_S'den V_{DD}'ye akım geçişini engeller.

Bootstrap kondansatör seçimi[8];

$$V_{BOOT} = V_{DD} - V_F - V_{GSMIN} \quad [4.1]$$

V_{DD}=Mosfet sürücü devre besleme gerilimi (V)

V_F=Bootstrap diyot ileri yön gerilimi (V)

Bootstrap kondansatörünün değeri;

$$C_{BOOT} = \frac{Q_{TOTAL}}{\Delta V_{BOOT}} \quad [4.2]$$

Q_{TOTAL} = Kondansatörün toplam yük miktarı

$$Q_{TOTAL} = Q_{GATE} + (I_{LKCAP} + I_{LKGS} + I_{QBS} + I_{LK} + I_{LKDIOD}) \times t_{ON} + Q_{LS} \quad [4.3]$$

Q_{GATE} = Toplam kapı yükü

I_{LKCAP} = Bootstrap kondansatörü sızıntı akımı

I_{LKGS} = Mosfet Gate – Source sızıntı akımı

I_{QBS} = Bootstrap pasif devre akımı

I_{LK} = Bootstrap devre sızıntı akımı

I_{LKDIOD} = Bootstrap diyot sızıntı akımı

t_{ON} = Mosfet açma süresi

Q_{LS} = Dahili seviye değıştirici için gerekli yük (yüksek gerilim sürücülerinde 3nC olarak ayarlanmıştır.)

Bootstrap kondansatör sızıntı akımı yalnızca elektrolitik kondansatörlerde hesaba dahil edilir. Seramik kondansatörlerde önemsizdir. Motor sürücü devremizde kullanılan mosfetler ve mosfet sürücü entegre için Bootstrap kondansatör hesabı;

Mosfet sürücü entegre= IR2110

Mosfet= IXTQ50N20P [9]

Bootstrap diyot=UF4007[1]

V_{DD} =15V

Q_{GATE} =70nC (Maksimum)

I_{LKGS} =100nA(Maksimum)

I_{LKCAP} =0 (Seramik kondansatör)

$$I_{QBS}=230\mu A(\text{Maksimum})$$

$$I_{LK}=50\mu A(\text{Maksimum})$$

$$Q_{LS}=3nC$$

$$t_{ON}=25\mu s$$

$$I_{LKDIOD}=10\mu A$$

Yüksek taraf mosfet iletimde değilken Bootstrap kondansatör üzerine düşmesine izin verilen gerilim değeri 1 V olduğunda, kondansatörün toplam yük miktarı;

$$Q_{TOTAL} = 70 \times 10^{-9} + (100 \times 100^{-9} + 230 \times 10^{-6} + 50 \times 10^{-6} + 10 \times 10^{-6}) \times 25 \times 10^{-6} + 3 \times 10^{-9}$$

$$Q_{TOTAL} = 80,25 \times 10^{-9} \text{C olur.}$$

Bootstrap kondansatör kapasitesi ise;

$$C_{BOOT} = \frac{Q_{TOTAL}}{\Delta V_{BOOT}} = \frac{80,25 \times 10^{-9}}{1} \cong 80 \text{nF olur.}$$

4.11. Sürücülerde Ölü Zaman Kavramı (Dead Time)

Uygulamada mosfetler ideal olmadığı için açma ve kapanma zamanları aynı değildir. İki mosfetin aynı zamanda kapalı olması üzerinden kısa devre akımlarının geçmesine sebep olacak ve mosfetler zarar görecektir. Bu durumu önlemek için Dead Time (kilitleme gecikme süresi) eklenmelidir. Bu süre ile mosfetlerden biri her zaman önce kapatılır ve diğeri sonra açılır. Doğru ve ideal bir anahtarlama elde etmek için Dead Time mümkün olduğunca küçük seçilmelidir[24].

Dead Time hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır[24];

$$t_{dead} = [(t_{d_off_max} - t_{d_on_min}) + (t_{pdd_max} + t_{pdd_min}) \times 1.2] \quad [4.4]$$

$t_{d_off_max}$ = maksimum kapanma gecikme süresi

$t_{d_on_min}$ = minimum açılma gecikme süresi

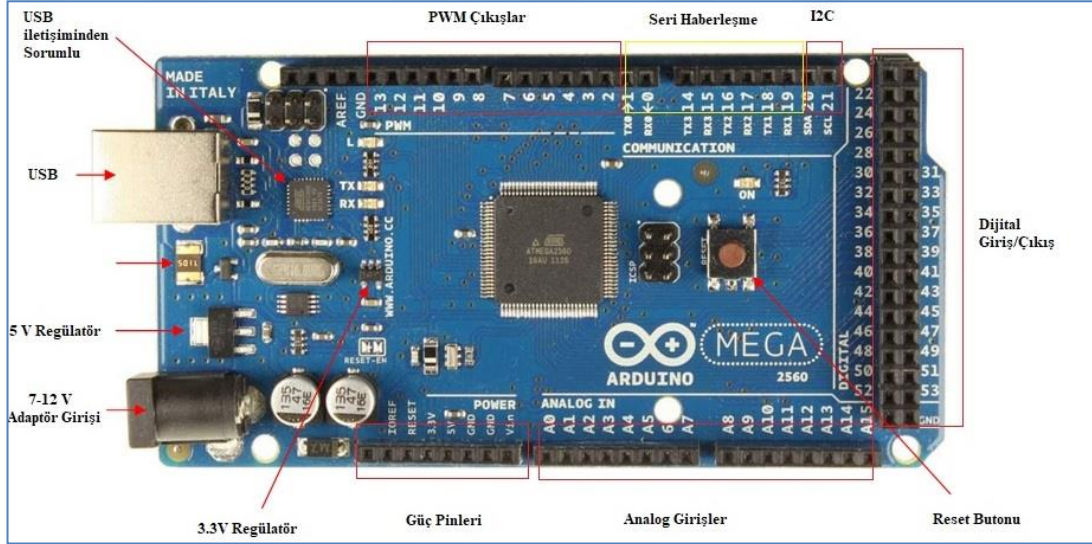
t_{pdd_max} = sürücünün maksimum yayılma gecikme süresi

t_{pdd_min} = sürücünün minimum yayılma gecikme süresi

1.2 = güvenlik marjı

4.12. Sürücü Devresinde Kullanılan Mikrodenetleyici ve Özellikleri

Sürücü devrede kullanılan Arduino Mega 2560, Atmel firmasının ATmega2560 mikrodenetleyicisini üzerinde bulunduran Arduino kartıdır. Arduino Mega 2560'ta 54 tane Giriş/Çıkış pini bulunmaktadır. Bu pinlerden 15 tanesi PWM çıkışı, 16 tanesi analog giriş, 4 tanesi UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) olarak kullanılabilir.



Şekil 4. 16 Arduino Mega 2560 Görünüm

Arduino Mega 2560 Özellikleri

- Mikrodenetleyici : ATmega2560
- Çalışma voltajı : 5V
- Giriş voltajı (önerilen) : 7-12V
- Giriş voltajı (limit değerler) : 6-20V
- Dijital I / O Pinleri : 54

- PWM Dijital I/O Pinleri : 15
- Analog Giriş Pinleri : 16
- I/O Pin Başına DC akım : 20 mA
- 3.3V Pin DC akımı : 50 mA
- Flash Bellek : 256 KB (8 KB bootloader için)
- SRAM : 8 KB
- EEPROM : 4 KB
- Saat Hızı : 16 MHz

Tablo 4.1'de hall sensörden gelen konum bilgilerine göre motorun saat yönü ve saat tersi yönünde dönmesi için mosfet anahtarların tetiklenmeleri dolayısıyla motor bobinlerine enerji verilmesi altı evrede gösterilmiştir.

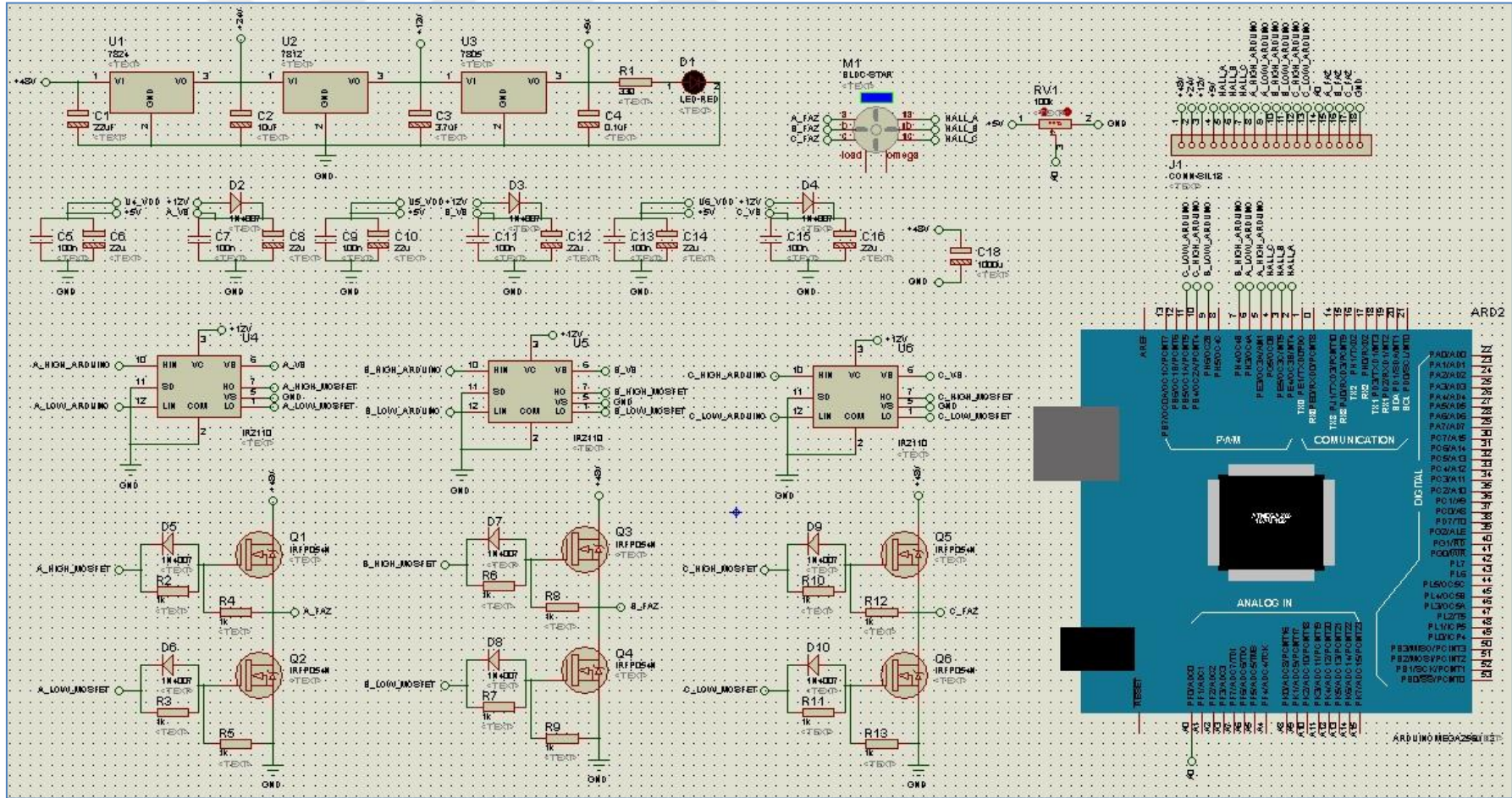
Tablo 4. 1 BLDC Motorun Saat Yönü ve Saat Tersi Yönde Dönmesi İçin Mosfet Anahtarlarının On/Off Konumları

Eyre	Hall Sensör			Motor Yön			Motor Yön			Mosfet Anahtar Durumu						Mosfet Anahtar Durumu					
	H _A	H _B	H _C	U	V	W	U	V	W	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆
1	1	0	0	-	+	0	+	-	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1	0	1	0	+	-	0	-	+	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
3	0	0	1	+	0	-	-	0	+	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	+	-	0	-	+	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
5	0	1	0	0	-	+	0	+	-	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
6	1	1	0	-	0	+	+	0	-	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

4.13. ISIS-ARES Çizimleri

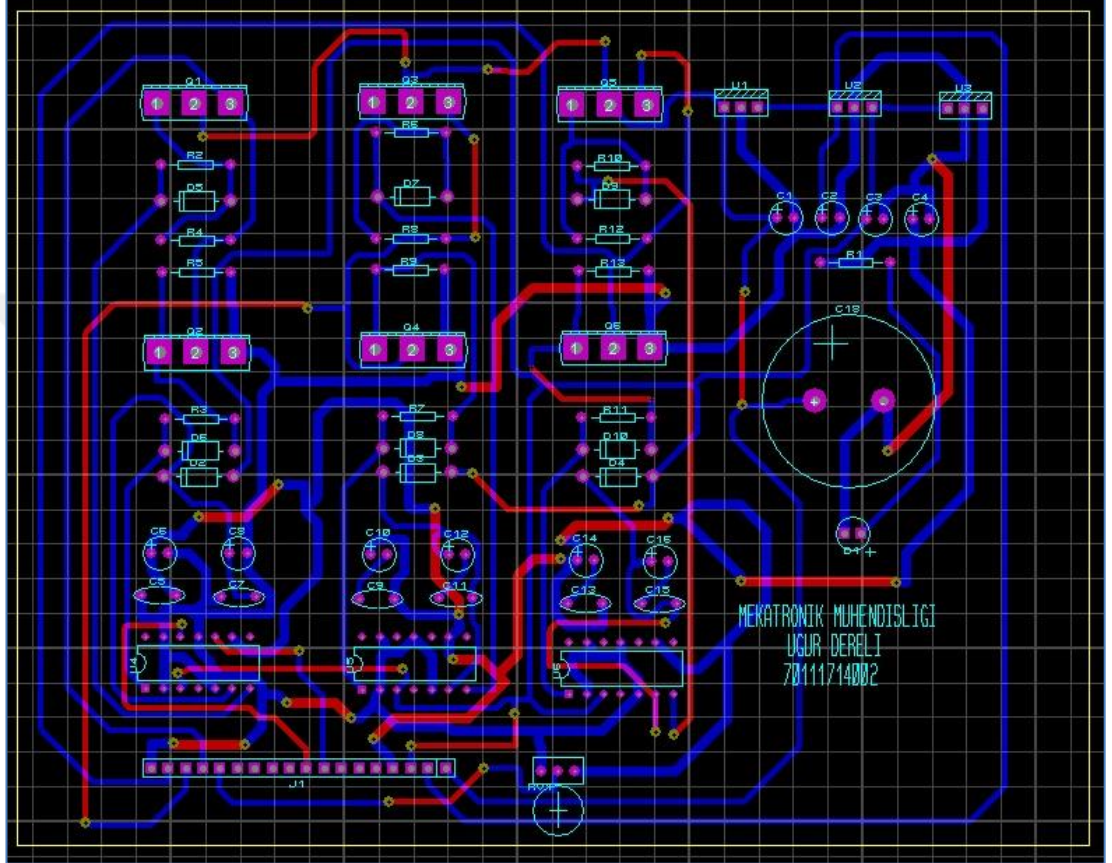
ISIS ve ARES olmak üzere iki alt programdan oluşan Proteus, Labcenter Electronics firmasının bir ürünüdür. ISIS programı ile çizimi hazırlanmış olan bir elektronik devrenin çalışıp çalışmadığı denenip analizi yapılabilmekte ve böylece kullanıcıya para ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Şekil 4.17'de ISIS programında çizilmiş olan BLDC motor hız kontrol devresi görülmektedir.





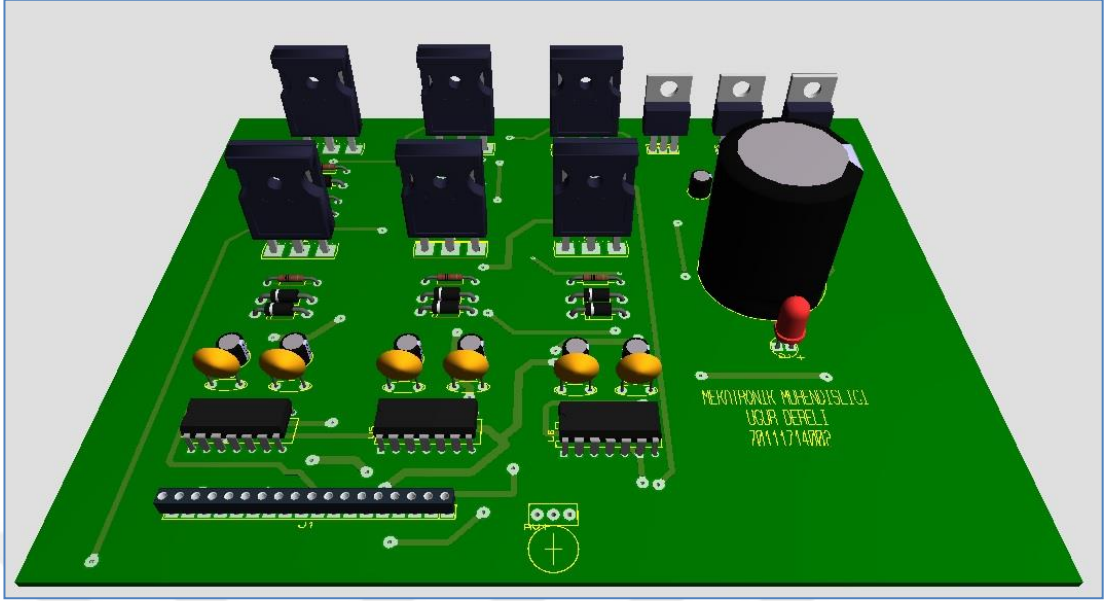
Şekil 4. 17 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi ISIS Çizimi

ISIS'te çizilmiş olan elektronik devreler ARES ortamına aktarılarak baskı devre çizimi gerçekleştirilebildiği gibi manüel olarak da baskı devre çizimi yapılabilmektedir. Şekil 4.18'da ISIS programında çizilen BLDC motor hız kontrol devresinin ARES çizimi görülmektedir.

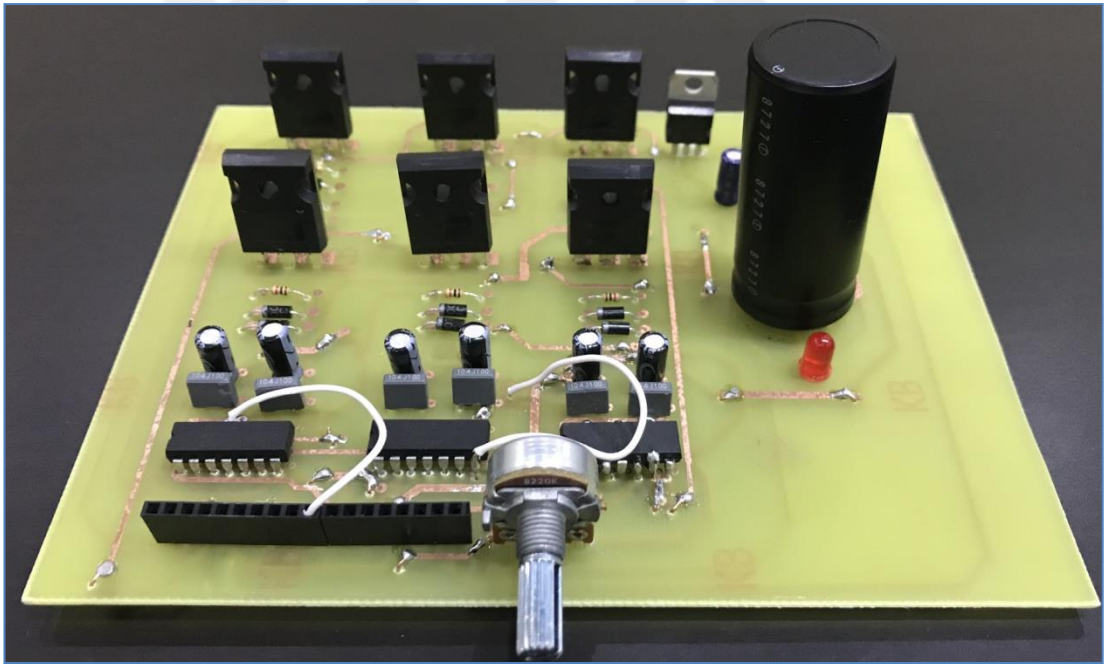


Şekil 4. 18 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi ARES Çizimi

ARES programı baskı devresi hazırlan elektronik devrenin üç boyutlu devre tasarımını görmemize olanak sağlar

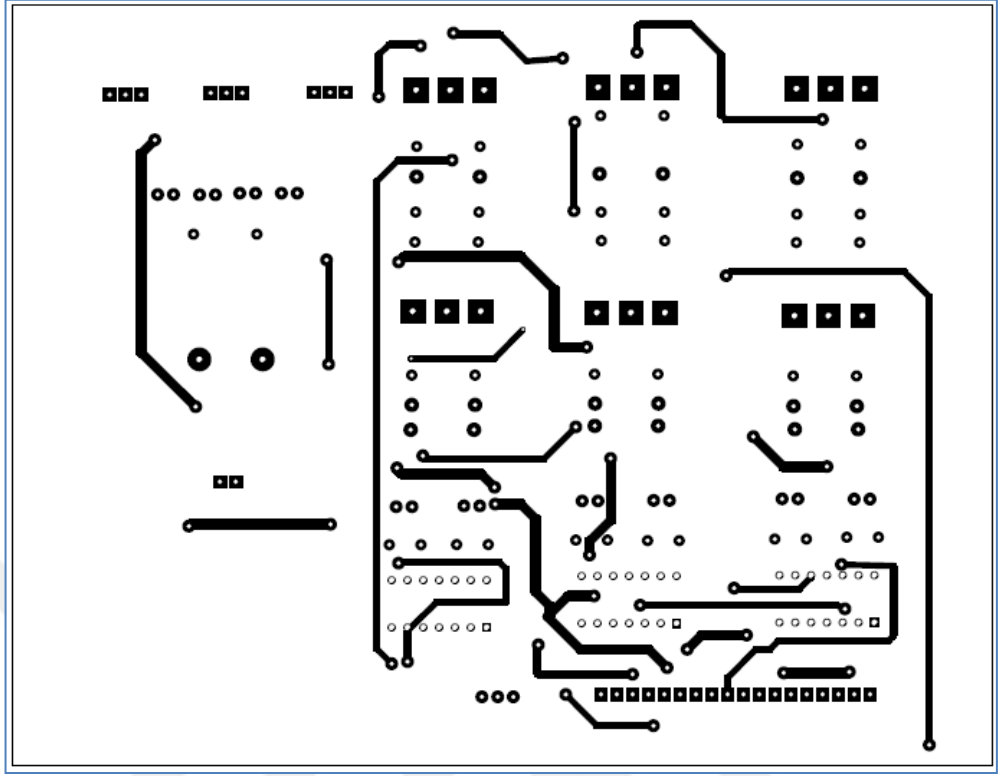


Şekil 4. 19 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi 3D Görünümü

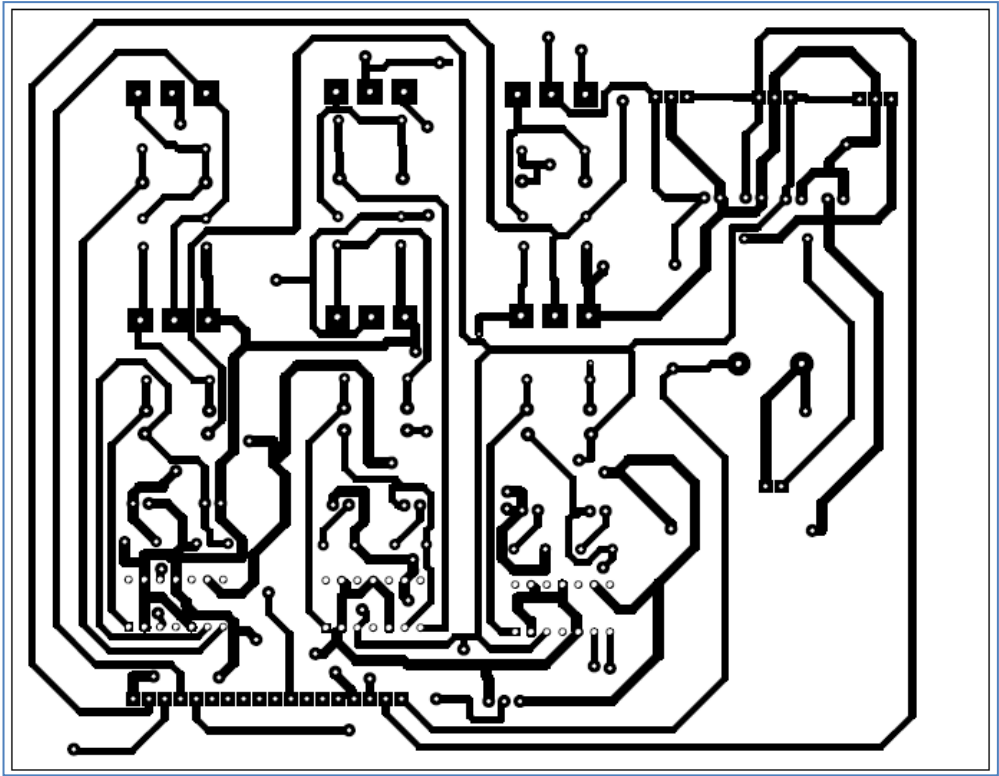


Şekil 4. 20 BLDC Motor Hız Kontrol Baskı Devre Görüntüsü

ARES'te baskı devresi hazırlanan elektronik devrenin üst ve alt bakır yolları lazer yazıcı ile kuşe kağıda çıktısı alınmış ve çift taraflı bakır plakete aktarılmıştır. Şekil 4.21 ve şekil 4.22'de baskı devresi hazırlanmış elektronik devrenin üst ve alt bakır yolları gözükmemektedir.



Şekil 4. 21 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi Baskı Plaketi Üst Bakır Yolları



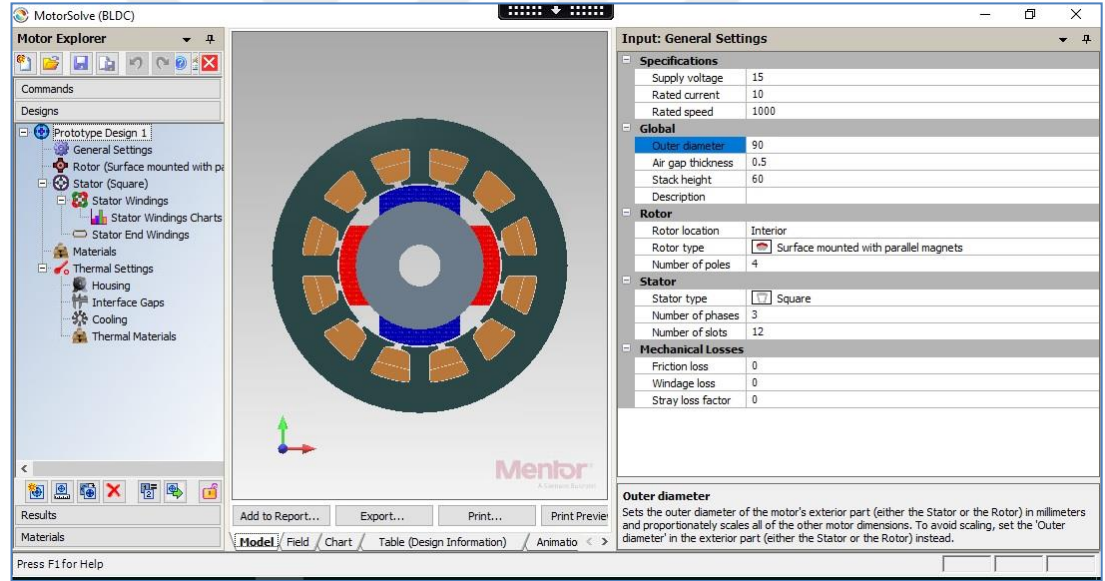
Şekil 4. 22 BLDC Motor Hız Kontrol Devresi Baskı Plaketi Alt Bakır Yolları

5. REFERANS ALINAN BLDC MOTORUN MOTORSOLVE BLDC MODÜLÜ İLE ANALİZİNİN YAPILMASI

MotorSolve BLDC, tasarımı oluşturulmak istenen motor ve jeneratörün performansını doğru ve eksiksiz bir şekilde tahmin etmek için oluşturulmuş tasarım yazılımıdır. MotorSolve bulut tabanlı deneme sanal laboratuvarı 14 günlük deneme sürümü ile referans alınan motorun analizi yapılmıştır.

5.1. MotorSolve BLDC Yazılımı

Yazılım çalıştırıldığında tasarımı yapılmak istenen makinenin genel ayarları, rotor ve stator dizaynı, stator sargı değerleri, rotor mıknatıs malzemesi ve motor dış gövde ölçülerinin girildiği Şekil 5.1'deki ekran karşılıktaır.



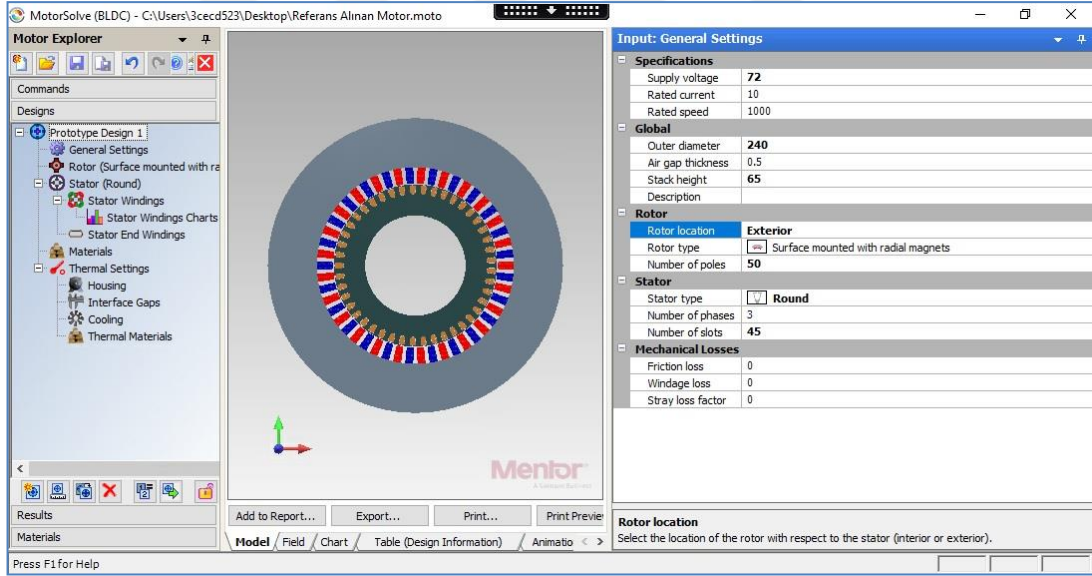
Şekil 5. 1 MotorSolve BLDC Yazılım Genel Görünümü

5.2. Yazılımda Motor Genel Ayarlarının Belirtilmesi

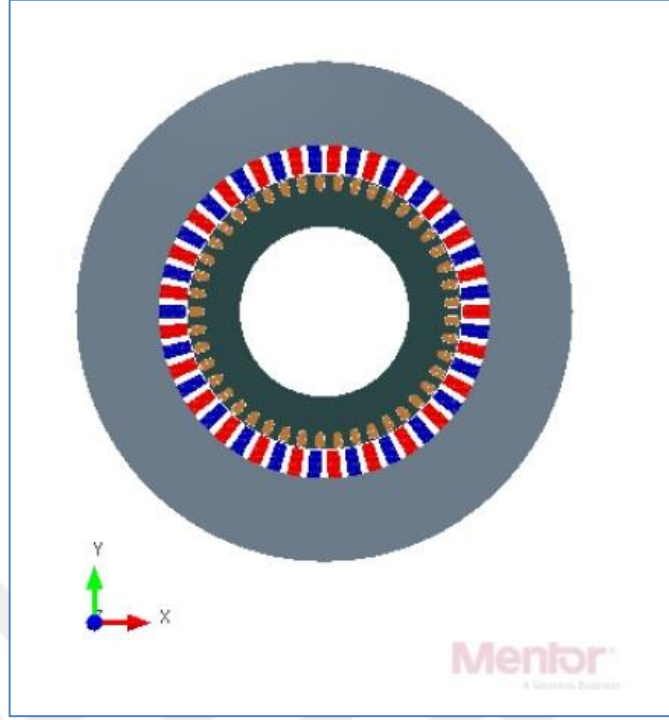
Referans alınan motorun Tablo 5.1'de verilen besleme gerilimi, rotor yeri-tipi ve kutup sayısı, stator tipi-faz sayısı ve oluk sayısı değerleri yazılıma girilmiş ve Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te görüntüleri verilen model oluşturulmuştur.

Tablo 5. 1 Motor Genel Ayarları

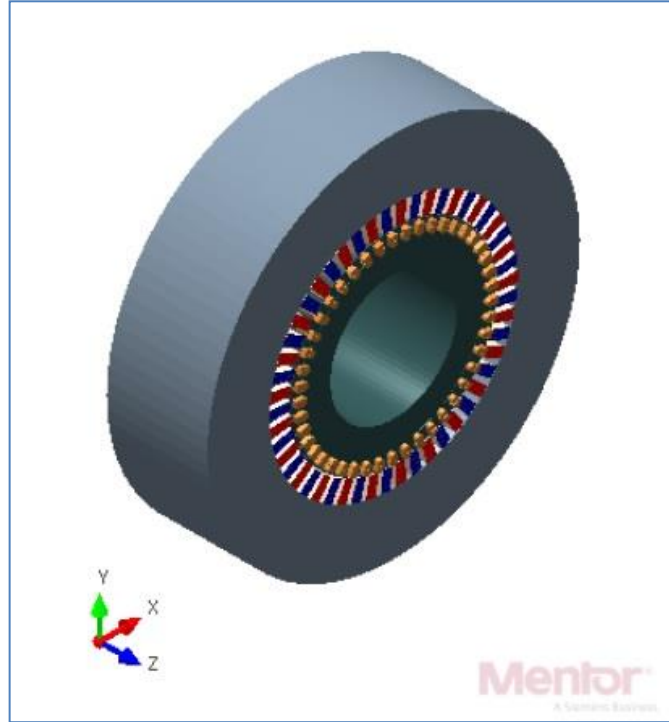
Bölüm	Parametre	Değer
Özellikler	Besleme Gerilimi	72 V
Genel	Dış Çap	240 mm
	Hava Aralığı	0.5 mm
	Yığın Yüksekliği	65
Rotor	Rotor Yeri	Dış
	Rotor Tipi	Radyal Mıknatıs Yüzeyle Montajlı
	Kutup Sayısı	50
Stator	Stator Tipi	Yuvarlak
	Faz Sayısı	3
	Oyuk (Slot) Sayısı	45



Şekil 5. 2 MotorSolve BLDC Genel Ayarları



Şekil 5. 3 MotorSolve BLDC Genel Ayarlar Sonrası Oluşturulan Modelin Genel XY Görünümü



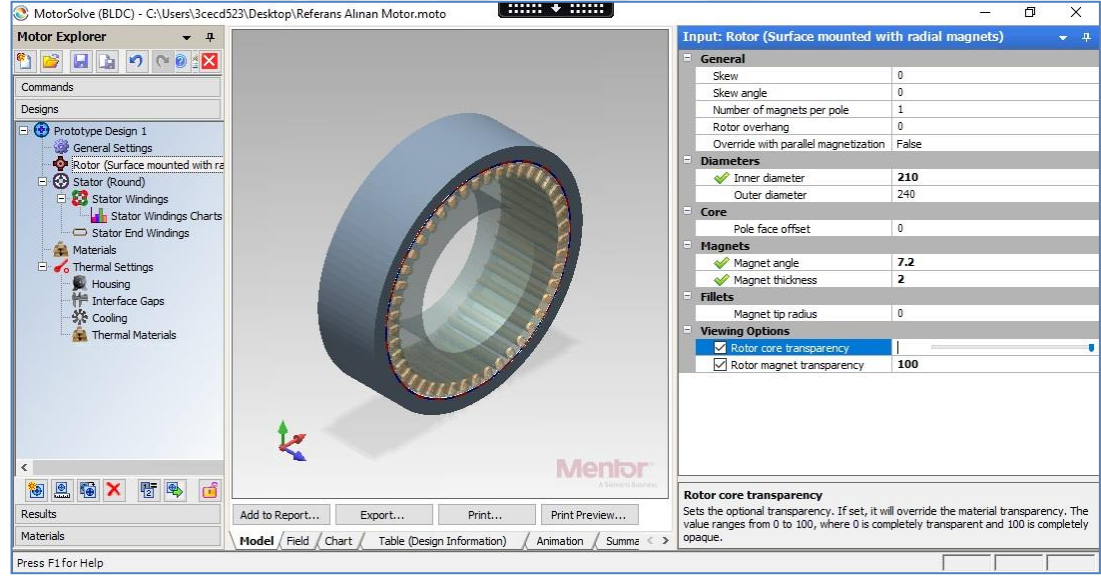
Şekil 5. 4 MotorSolve BLDC Genel Ayarlar Sonrası Oluşturulan Modelin Genel XYZ Görünümü

5.3. Yazılımda Rotor Dizayn Ayarlarının Belirtilmesi

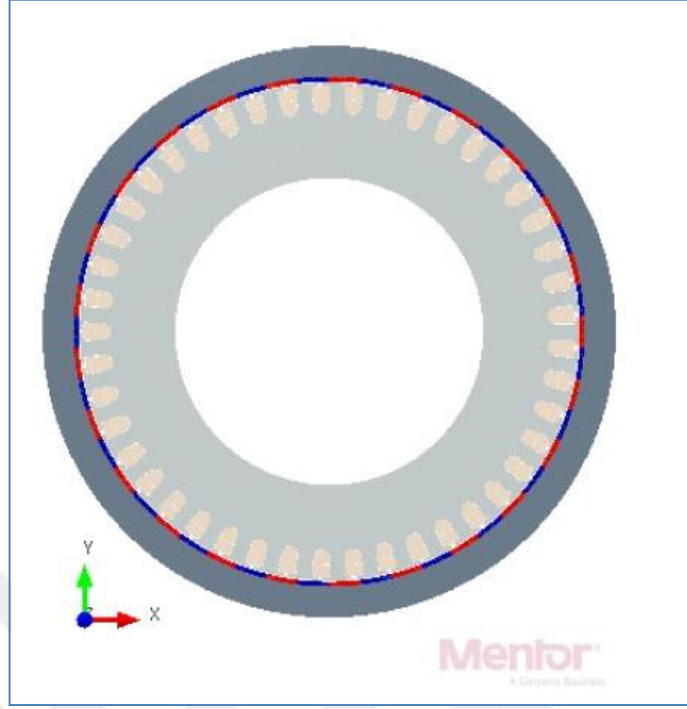
Referans alınan motorun Tablo 5.2'de verilen rotor iç-dış çap, mıknatıs açısı ve kalınlık değerleri yazılıma girilmiş ve Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de görüntüleri verilen model oluşturulmuştur.

Tablo 5. 2 Rotor Dizayn Ayarları

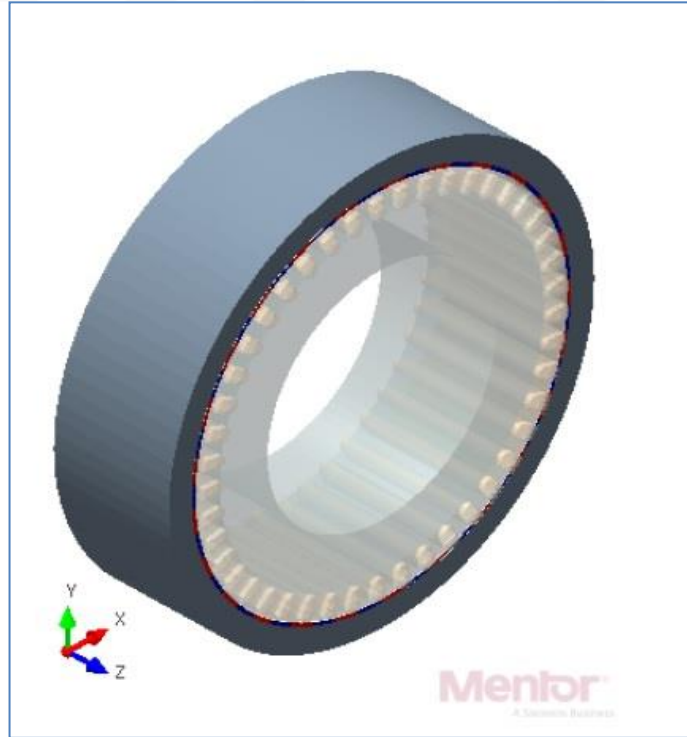
Rotor	İç Çap	210 mm
	Dış Çap	240 mm
	Mıknatıs Açısı	7.2 ⁰
	Mıknatıs Kalınlığı	2 mm



Şekil 5. 5 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Ayarları



Şekil 5. 6 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Rotor XY Görünümü



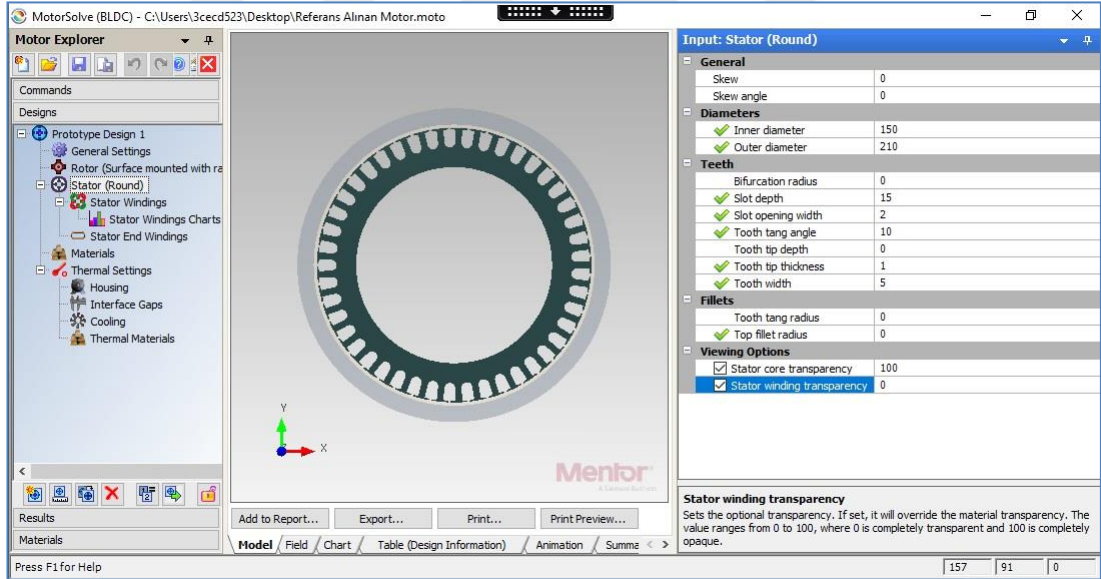
Şekil 5. 7 MotorSolve BLDC Rotor Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Rotor XYZ Görünümü

5.4. Yazılımda Stator Dizayn Ayarlarının Belirtilmesi

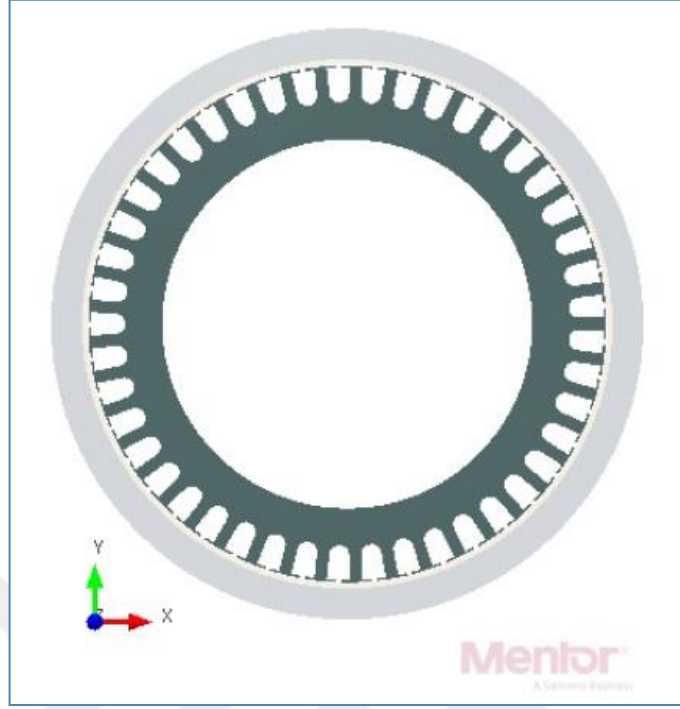
Referans alınan motorun Tablo 5.3'te verilen stator iç-dış çap, oyuk derinlik-genişlik, diş açı-kalınlık ve genişlik değerleri yazılıma girilmiş ve Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görüntüleri verilen model oluşturulmuştur.

Tablo 5. 3 Stator Dizayn Ayarları

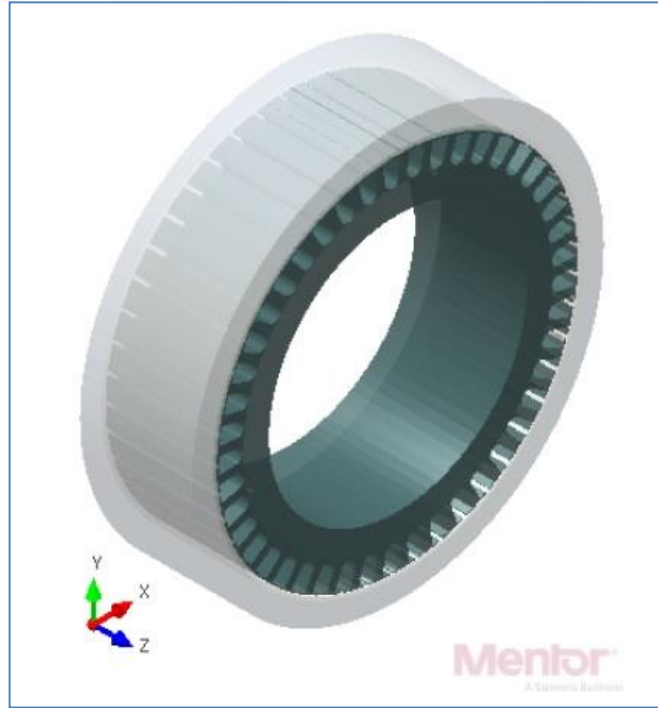
Stator	İç Çap	150 mm
	Dış Çap	210 mm
	Oyuk (Slot) Derinliği	15 mm
	Oyuk Ağız Genişliği	2 mm
	Diş Tang Açısı	10 ⁰
	Diş Ucu Kalınlığı	1 mm
	Diş Genişliği	5 mm



Şekil 5. 8 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Ayarları



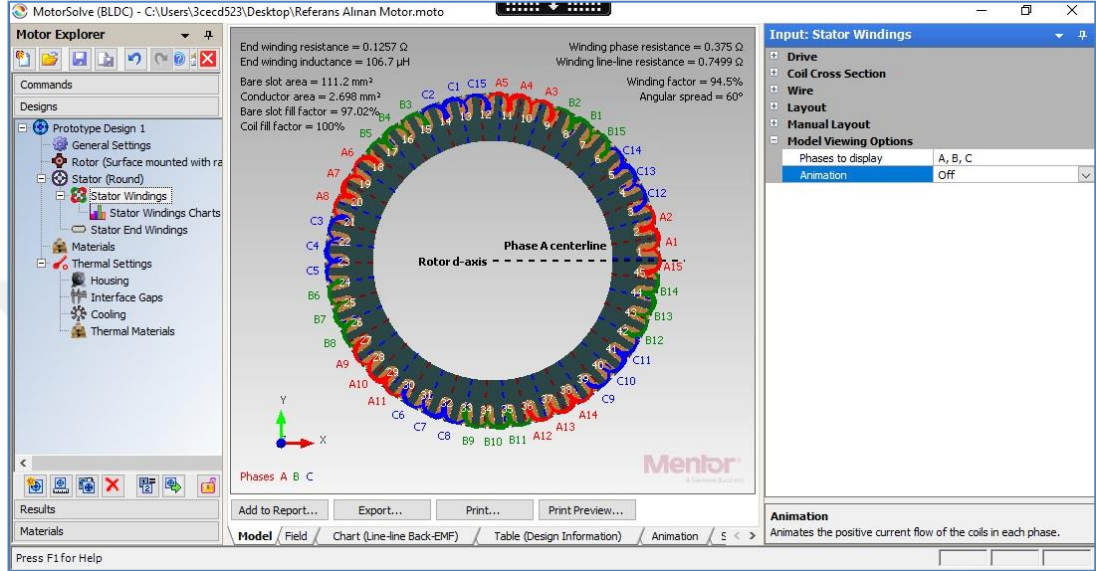
Şekil 5. 9 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Stator XY Görünümü



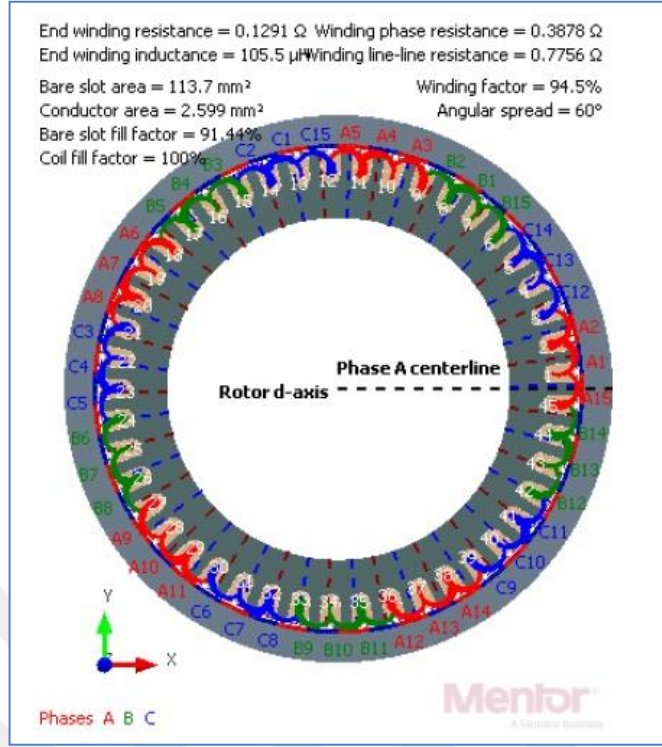
Şekil 5. 10 MotorSolve BLDC Stator Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Stator XYZ Görünümü

5.5. Yazılımda Stator Sargı Değerlerinin Belirtilmesi

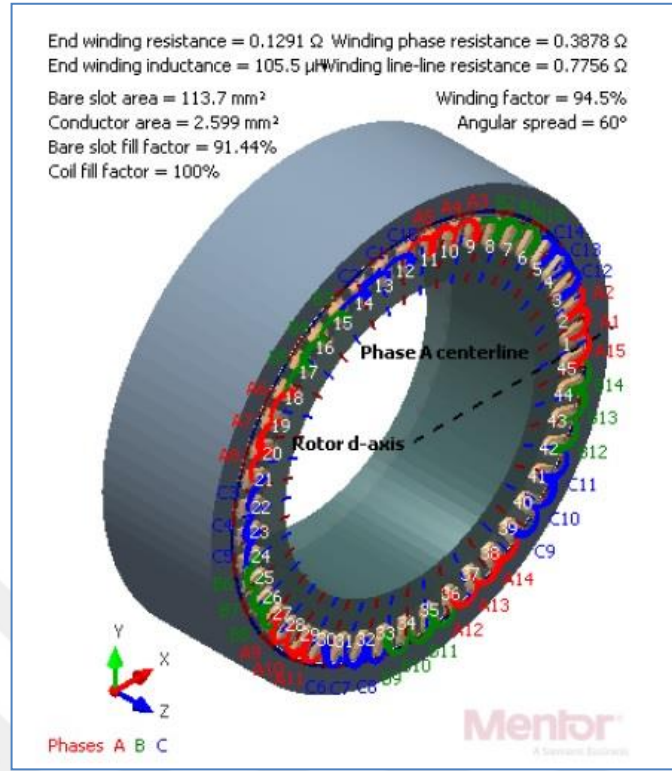
Stator sargılarındaki fazların bağlantı tipi yıldız ve fazların bobinleri seri olarak bağlanmışlardır. MotorSolve BLDC yazılımı sargı direnç ve endüktans değerlerini otomatik olarak hesaplar ve bu değerler sırasıyla; 0.1291Ω ve $105.5 \mu\text{H}$ 'dir.



Şekil 5. 11 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni



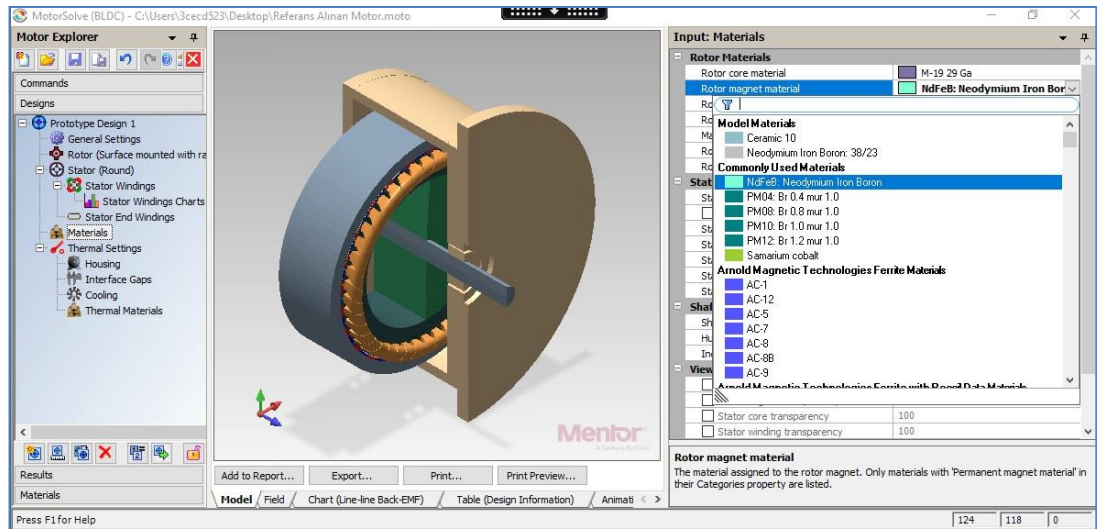
Şekil 5. 12 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni Sonrası Stator XY Görünümü



Şekil 5. 13 MotorSolve BLDC Motor Sargı Düzeni Sonrası Stator XYZ Görünümü

5.6. Yazılımda Rotor Mıknatıs Malzemesinin Seçilmesi

Referans alınan motor rotorundaki Neodyum-Demir-Bor (NdFeB) mıknatısı yazılımda seçiyoruz.



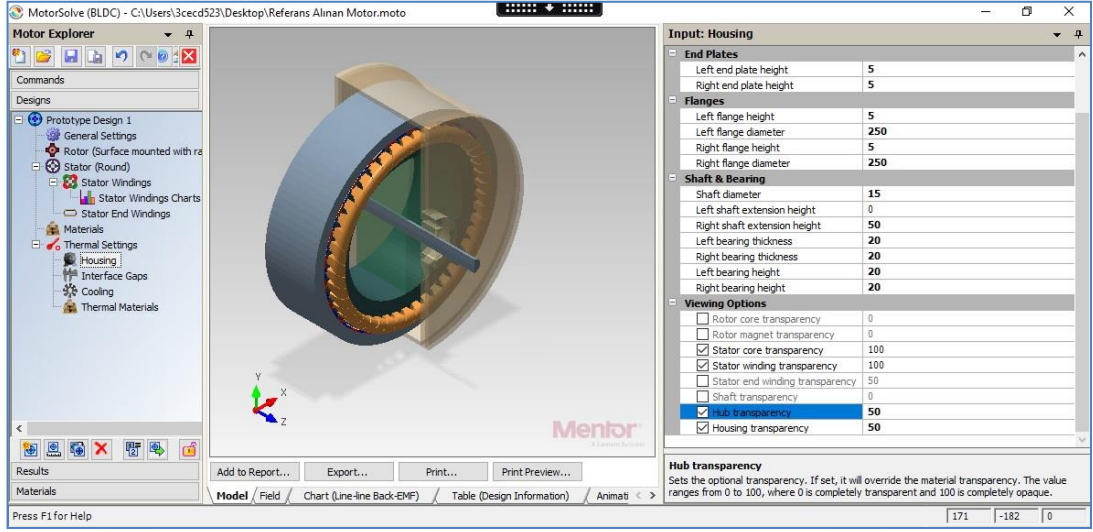
Şekil 5. 14 MotorSolve BLDC Mıknatıs Malzeme Seçim Ayarı

5.7. Yazılımda Dış Gövde Dizayn Değerlerinin Belirtilmesi

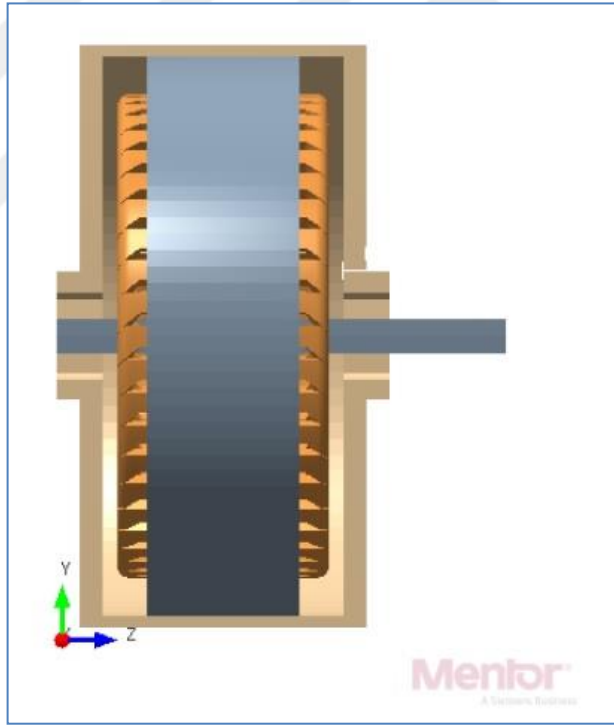
Referans alınan motorun Tablo 5.4'te verilen dış gövdesine ait değerler yazılımda belirtilmiş ve Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'deki görüntüleri verilen model oluşturulmuştur.

Tablo 5. 4 Motor Dış Gövde Dizayn Ayarları

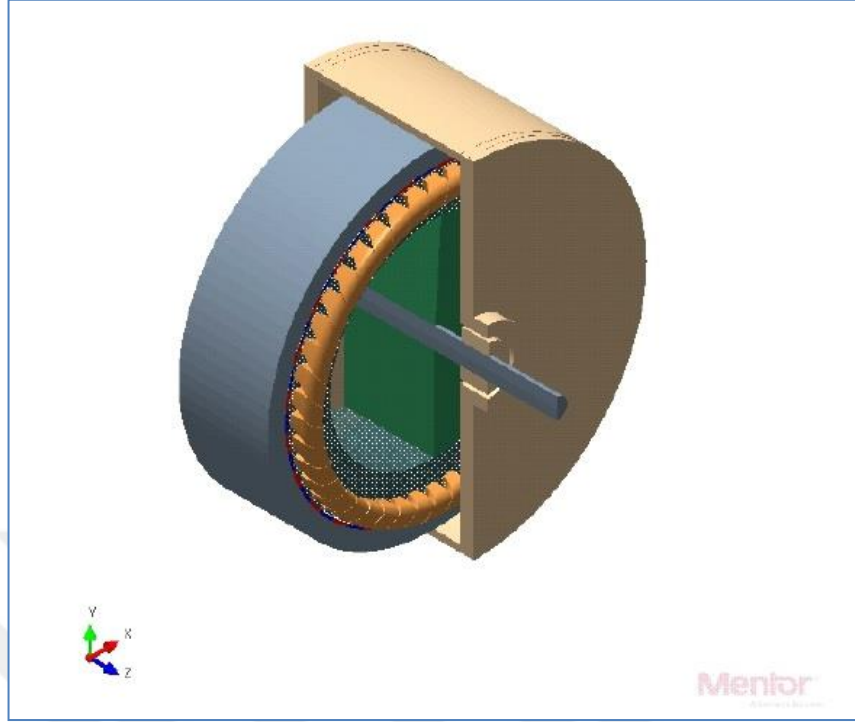
Dış Gövde	Gövde Kalınlığı	5 mm
	Sol Bölge Yüksekliği	6 mm
	Sağ Bölge Yüksekliği	6 mm
	Sol Bölge Plaka Kalınlığı	5 mm
	Sağ Bölge Plaka Kalınlığı	5 mm
	Sol Flanş Kalınlığı	5 mm
	Sağ Flanş Kalınlığı	5 mm
	Sol Flanş Çapı	250 mm
	Sağ Flanş Çapı	250 mm
	Şaft Çapı	15 mm
	Sağ Mil Uzatma Boyu	50 mm
	Sol Yatak Kalınlığı	20 mm
	Sağ Yatak Kalınlığı	20 mm
	Sol Yatak Uzunluğu	20 mm
	Sağ Yatak Uzunluğu	20 mm



Şekil 5. 15 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Ayarları



Şekil 5. 16 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Dış Gövde XY Görünümü



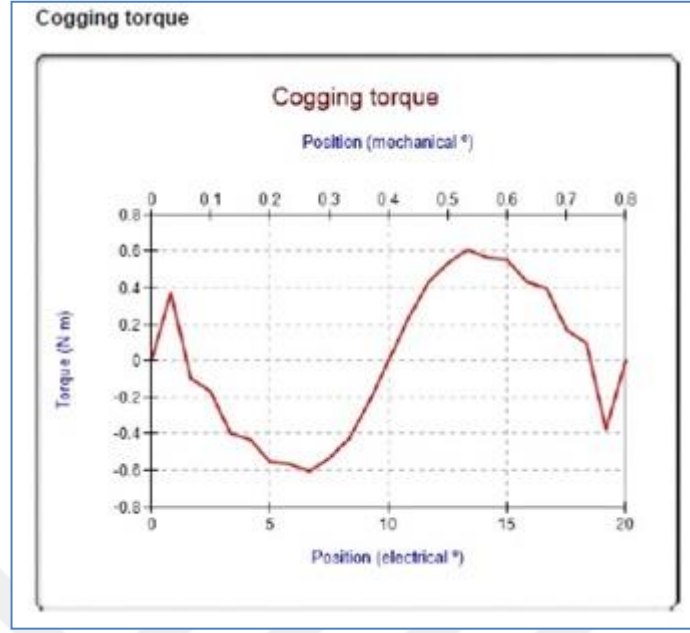
Şekil 5. 17 MotorSolve BLDC Dış Gövde Dizayn Değerleri Sonrası Oluşturulan Modelin Dış Gövde XYZ Görünümü

5.8. Belirtilen Değerlere Göre Sonuçların Analizi

5.8.1. Dişli Tork (Cogging Torque)

BLDC motorların en önemli dezavantajı durumundaki Cogging Torque (dişli torku), mıknatıs akısı ve stator dişlerinin etkileşimi sonucu rotordaki tork değişimine denir. Enerji verilmemiş bir BLDC motorun rotoru el ile döndürüldüğünde rotorun bir noktadan başka bir noktaya atladığını hissederiz. Bu atlamalarda oluşan tork, mevcut rotor/stator hizalamasından kopmak ve bir sonraki rotor/stator hizalamasına geçmek için gereken torktur. Oluşan bu tork yüksek hızlarda genellikle sistemin ataleti ile filtrelenir ancak özellikle düşük hızlarda çıkış torkunun dalgalanmasına neden olduğu için istenmeyen bir durum oluşturacaktır.

Şekil 5.18'deki grafik incelendiğinde dişli tork değerinin $0^0 - 20^0$ elektriksel açı değerlerinde maksimum ± 0.6 N.m olduğu görülmektedir.

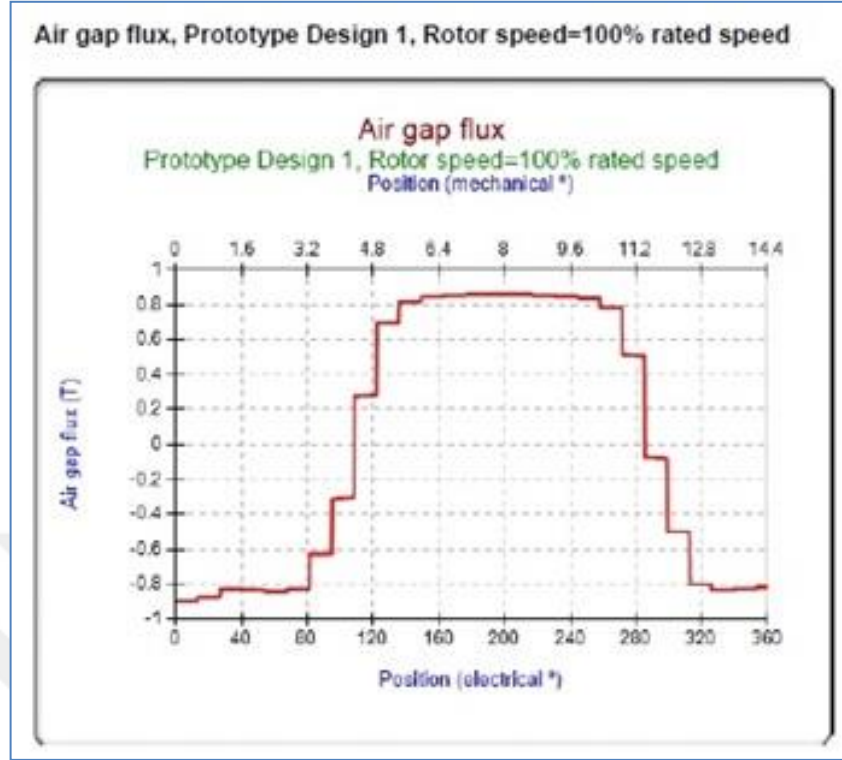


Şekil 5. 18 Referans Alınan Motorun Elektrik/Mekanik Açık-Dişli Tork Grafiği

5.8.2. Hava Boşluğu Akısı (Air Gap Flux)

Dönen rotoru statordan ayırmak için gerekli olan hava boşluğu, manyetik devredeki manyetik akıya karşı yüksek direnç oluşturduğu için bu boşluklar mıknatıslanma akımında ve buna bağlı elektrik kaybında istenmeyen artışlar meydana getirmektedir. Kaçınılmaz olan bu durum mıknatıslanma gücü gereksinimini azaltmak için olabildiğince küçük olmalı ancak üretim toleransları, mekanik sapma ve gevşeklikten kaynaklanan durumlara karşıda stator ve rotor temasını önleyecek kadar büyük olmalıdır.

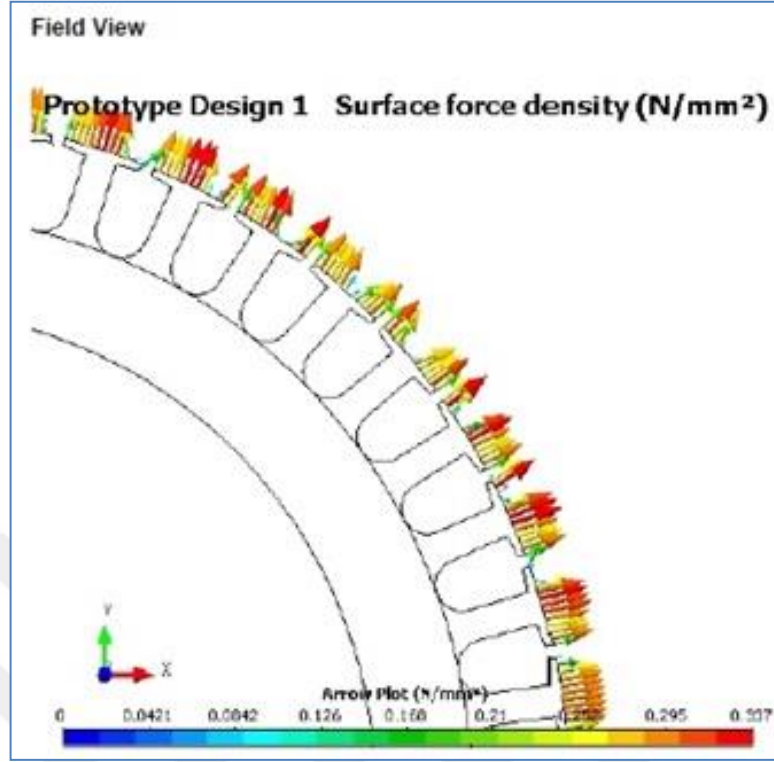
Şekil 5.19'deki grafik incelendiğinde hava boşluğu akı değerinin elektrik açı konum değerlerinin $120^0 - 280^0$ aralığında 0.8 Tesla olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 19 Referans Alınan Motorun Elektrik/Mekanik Açık-Hava Boşluğu Akı Grafiği

5.8.3. Yüzey Kuvveti Yoğunluğu (Surface Force Density) (N/mm²)

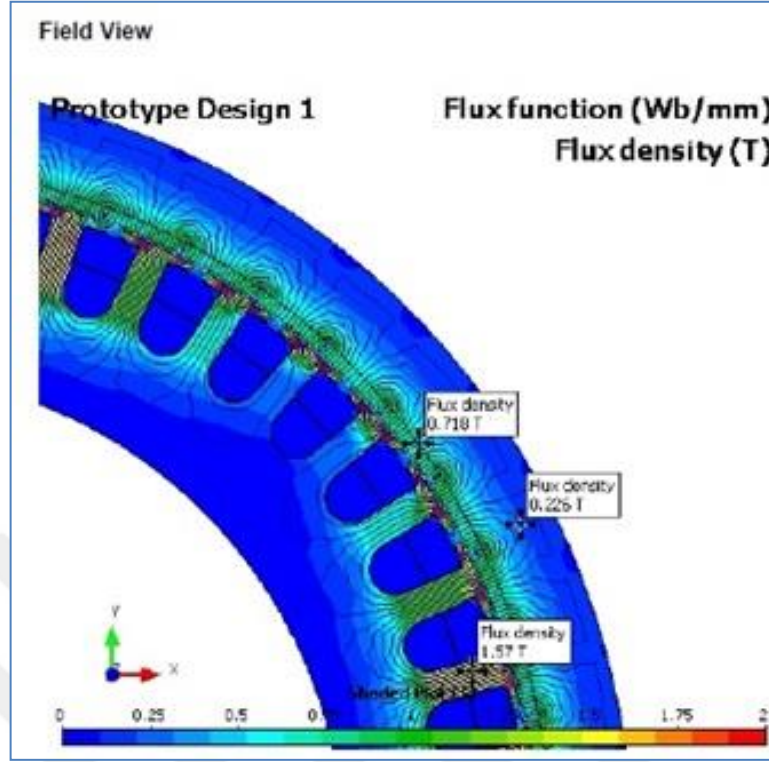
Şekil 5.20'de referans alınan BLDC motora ait yüzey kuvvet yoğunluğunun ok grafiği görülmektedir.



Şekil 5. 20 Yüzey Kuvveti Yoğunluğu Ok Grafiği

5.8.4. Akı Yoğunluğu (Flux Density)

Manyetik alana dik bir birim alandan geçen akı miktarına akı yoğunluğu denir ve elektrik makine tasarım hesaplamalarında kullanılan önemli bir büyüklüktür. B harfi ile gösterilir ve birimi Tesla'dır(T). MotorSolve BLDC yazılımı Şekil 5.21 de akı yoğunluğu dağılımının bazı noktalardaki değerleri gösterilmiştir.

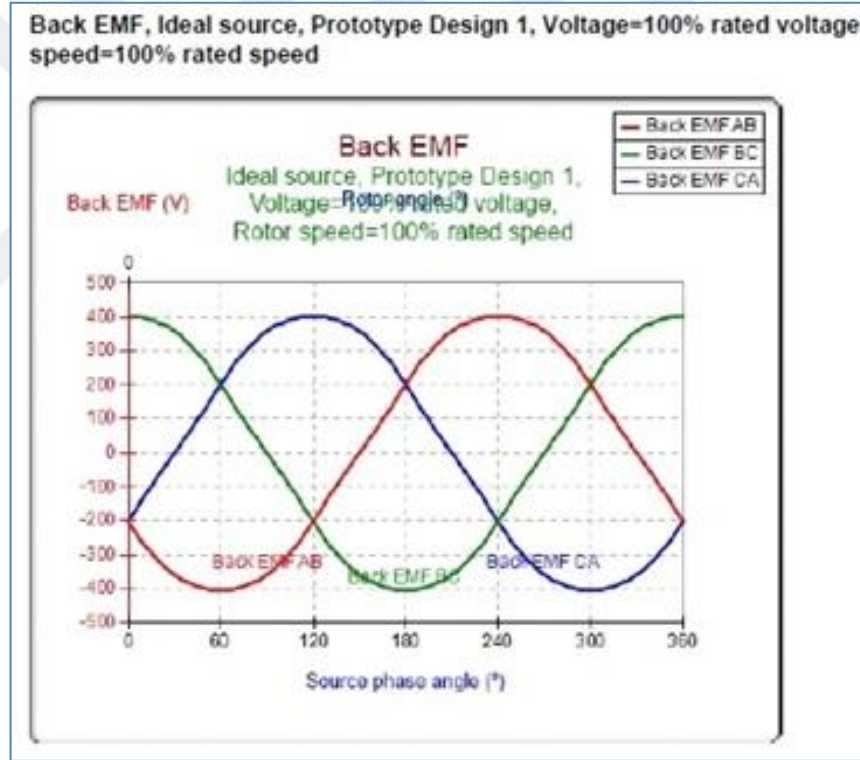


Şekil 5. 21 Referans Alınan Motorun Akı Yoğunluğu Grafiği

5.8.5. Zıt Elektromotor Kuvvet (Back EMF)

Bir elektrik motorunun sargıları, manyetik alan çizgilerini keserken bir jeneratör gibi davranır. Sargılarda, volt cinsinden ölçülen ve elektromotor kuvvet (EMF) adı verilen bir potansiyel üretilir. Lenz yasasına göre, bu EMF, motorun dönmesini sağlayan manyetik akıdaki orijinal değişikliğe karşı çıkan ikincil manyetik alana neden olur. Daha basit bir ifadeyle, EMF motorun doğal hareketine direnir ve “zıt” EMF olarak adlandırılır. BLDC motor üreticileri, belirli bir hız için EMF'yi tahmin etmek için kullanılabilen zıt EMF sabiti olarak bilinen bir parametre belirtir. Bir sarımdaki potansiyel, zıt EMF değerinin besleme voltajından çıkarılmasıyla hesaplanabilir. Motorlar, nominal hızda çalışırken, zıt EMF ve besleme voltajı arasındaki potansiyel fark, motorun nominal akımı çekmesine ve nominal torku vermesine neden olacak şekilde tasarlanmıştır. Motorun nominal hızın ötesine sürülmesi, zıt EMF'yi önemli ölçüde artırır, sargılar arasındaki potansiyel farkı azaltır ve daha sonra akımı azaltır ve torku düşürür.

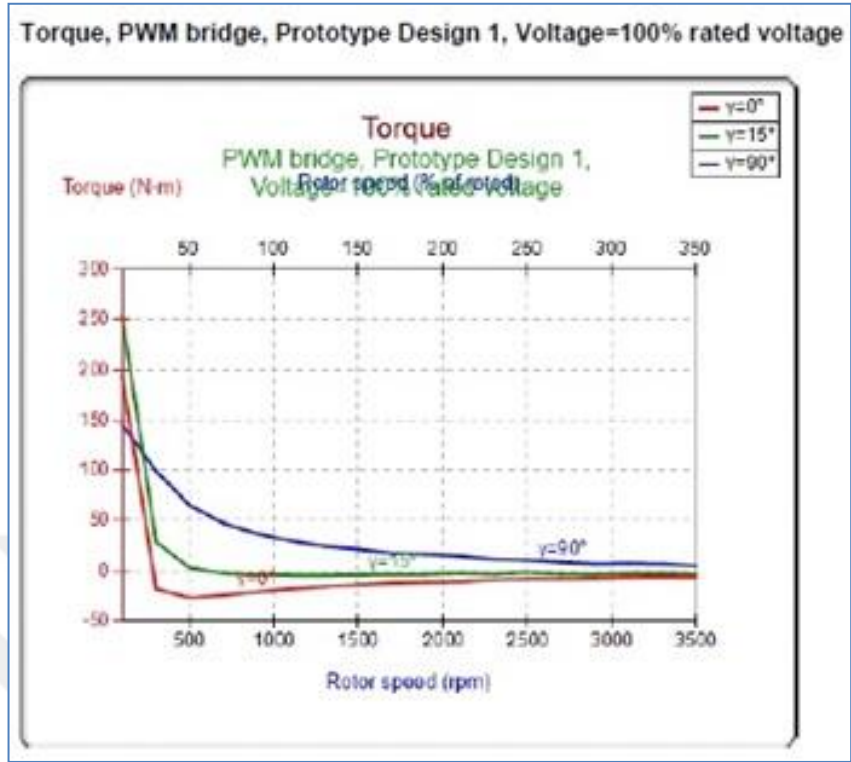
Sensörsüz BLDC motor kontrolünün büyük bir dezavantajı vardır; motor sabitken, MCU'ya stator ve rotor konumu hakkında bilgi veren EMF üretilmez. Çözüm ise, bobinlere önceden belirlenmiş bir sırayla enerji verilerek motoru açık döngü konfigürasyonunda başlatmaktır. Motorun verimli çalışması mümkün olmasa da dönmeye başlayacaktır. Sonunda hız, kontrol sisteminin normal (ve verimli) kapalı döngü çalışmasına geçmesi için yeterli zıt EMF üretmek için yeterli olacaktır. Zıt EMF dönme hızı ile orantılı olduğundan, sensörsüz BLDC motorlar çok düşük hızlar gerektiren uygulamalarda iyi bir seçenek olmayabilir. Şekil 5.22'de zıt elektromotor kuvvetin tepe değerlerinin ± 400 Volt olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 22 Referans Alınan Motorun Zıt EMF Grafiği

5.8.6. Tork-Rotor Hız (Torque-Rotor Speed)

BLDC motorun tork özellikleri, BLDC motor tahrik sisteminin tasarımında çok önemli bir faktördür. Şekil 5.23'teki grafikte motorun düşük hızlarda tork değerinin yüksek olduğu görülmektedir.

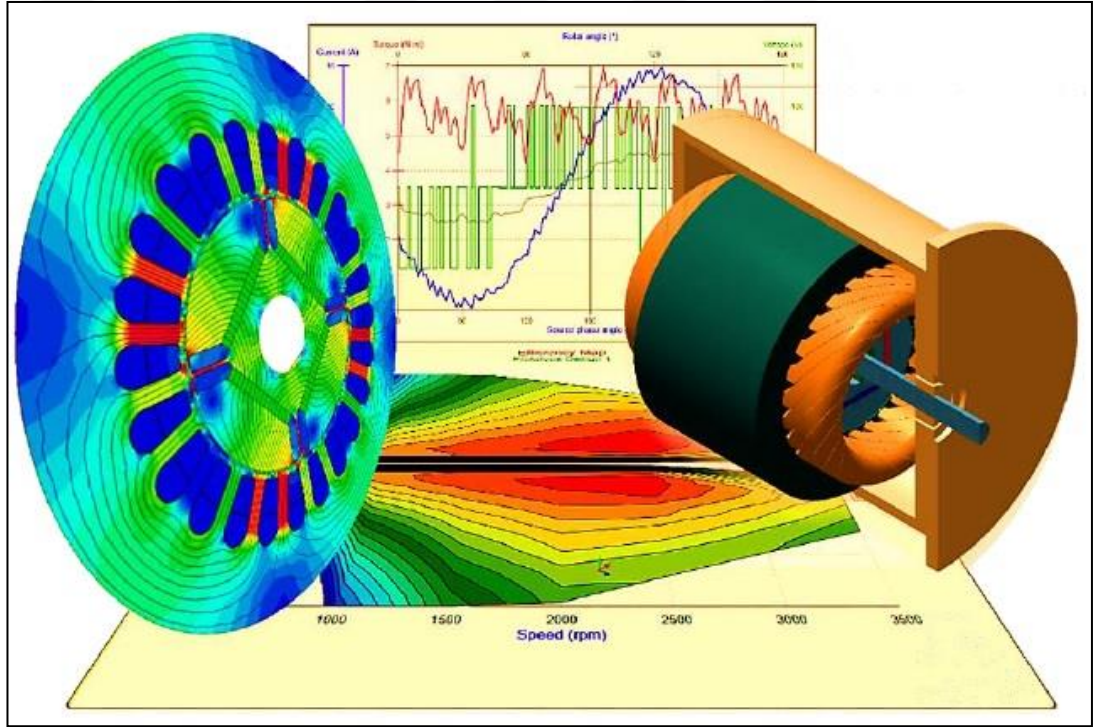


Şekil 5. 23 Referans Alınan Motorun Tork-Rotor Hız Grafiği

6. SONUÇ VE İRDELEME

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve elektrik motorları içerisinde özel bir yeri olan fırçasız doğru akım motoru elektrikli taşıtların popülerliğini sürekli artırdığı son dönemlerde yüksek verimlilik, düşük hız aralığında yüksek tork gibi nedenlerle en çok tercih edilen motor tipi olmuştur.

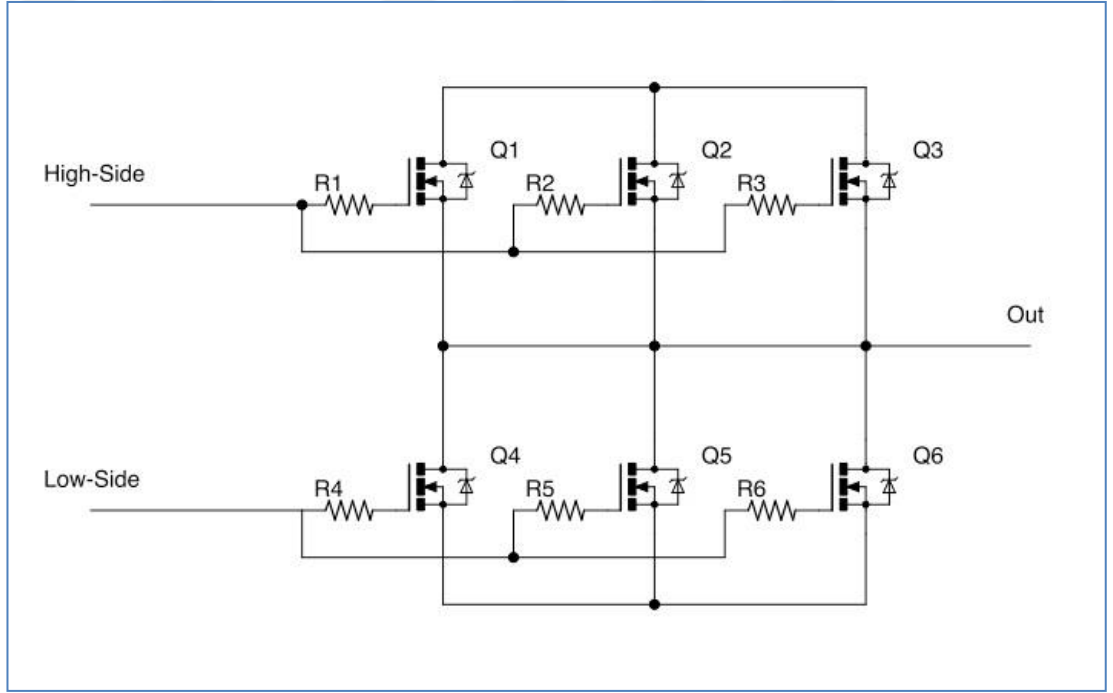
Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, MotorSolve BLDC yazılımı ile elektrikli bisikletlerde kullanılan bir BLDC motorun mekanik ve elektriksel değerleri yazılıma işlenerek tasarımı oluşturulmuş ve Tork-Rotor Hız Grafiği, Zıt EMF Grafiği, Akı Yoğunluğu Grafiği, Elektrik/Mekanik Açı-Dişli Tork Grafiği incelenmiştir.



Şekil 6. 1 MotorSolve BLDC Grafik ve Model Örneği

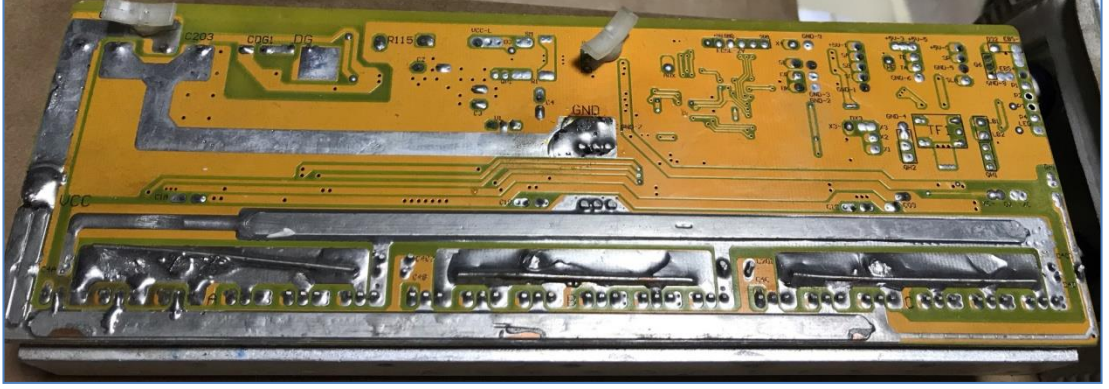
Sürücü devremizdeki mosfetler motora giden akımı kontrol eden anahtarlardır. 3 fazlı bir BLDC motor için H köprü tasarlamak ve motor kontrolü için uygun mosfetlerin nasıl seçileceğinin belirlemek motorun teknik özelliklerine ve güç kaynağına bağlı olarak değişmektedir. Mosfetlerde öncelikli bakılması gereken parametrelerden biri I_d olmuştur. Çünkü bu motora giden akımdır ve bu akım değeri motorun akım değerine eş veya daha büyük olmalıdır. Yapılan sürücü devresinde

motor boşta çalıştırıldığı için seçilen mosfetler motorun çektiği akımdan zarar gormemiştir. Ancak ykkl çalışmalarda nominal akımın çok daha üzerinde akım çekilmektedir. Mosfetler paralel bağlanarak motorun çektiği akımı paylaşırlar. Fakat paralel bağlanan mosfetlerin geyt tetiklenmesinde senkronizasyonun sağlanması gerekir. Aksi halde nanosaniye mertebesinde gecikmeler yaşanması dahi tüm akımın diğer mosfet üzerinden akmasına ve mosfetin zarar gormesine sebep olabilir. Ayrıca yüksek sıcaklık, yüksek voltaj, hızlı akım ve hızlı gerilim değişimleri mosfetin istem dışı iletime geçmesine sebep olabilir ve bu durumlar içinde gerekli tedbirler alınmalıdır. Şekil 6.2'de yarım köprü konfigürasyonundaki paralel bağlı mosfetlerin rnek Şeması gözükmektedir.



Şekil 6. 2 Yarım Köprü Konfigürasyonundaki Paralel Bağlı Mosfetlerin Şeması

Elektronik devre elemanlarını bir arada tutan ve elemanlar arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlayan baskı devre kart (PCB) zerindeki yolların akım taşıma kapasitesi bağlantı yolunun genişliği ve kalınlığına (bakır folyo kalınlığı) bağlıdır. 0,35 μm kalınlık ve 1 mm genişlikteki bir bakır yoldan 2,5 A akım akabilir[27]. Yüksek akımlı devrelerde standart üretilmiş PCB'nin akım taşıma kapasitesini artırmak için Şekil 6.3'deki gibi yolların üzeri bara ve lehimle kaplanabilir.



Şekil 6. 3 Baskı Devre Kart Üzerindeki Akım Yollarının Kalınlaştırılması

Sürücü devresinde stator sargıları yıldız bağlı BLDC motorun 3 fazına uygun zaman ve hızlarda enerji verilebilmesi için mosfetlerin tetiklenmesi görevini Arduino Mega 2560 yerine getirmiştir. Mosfetlerin sürülmesi için gerekli kontrol yazılımı oluşturulmuştur.

Sonuçta piyasada bu tür motorları sürmek için kullanılan sürücü devrelerinden daha uygun fiyata motor sürücü devresi oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

1. <http://www.vishay.com/docs/88755/uf4001.pdf>, 10.01.2020.
2. <http://www.miknatis.net/miknatis/katalog/katalog-2017.pdf>, 10.01.2020.
3. <https://malzemebilimi.net/curie-sicakligi-nedir-ferromanyetik-ve-paramanyetik-nedir.html>, 10.01.2020.
4. <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00012/>, 10.01.2020.
5. <https://electronicsforu.com/technology-trends/hall-effect-sensors-big-things-small-packages>, 10.01.2020.
6. **Zhao, J., Yu, Y.**, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note" MPS Proprietary Information, (2011).
7. <http://www.circuitstoday.com/demosfet-depletion-enhancement-mosfet>, 10.01.2020
8. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9674-D.PDF>, 13.01.2020
9. https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/discrete_mosfets/littelfuse_discrete_mosfets_n-channel_standard_ixt_50n20p_datasheet.pdf.pdf, 25.05.2019
10. <https://www.cnblogs.com/shangdawei/p/4828552.html>, 25.05.2020
11. **Nisarga, B., Torres, D.**, "Sensored 3-Phase BLDC Motor Control Using MSP430" Application Report, (2011).
12. <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>
13. **Sommer, C.**, "3-Phase H-Bridge Design and MOSFET Selection" Application Report, (2013).
14. <http://tahmidmc.blogspot.com/2013/01/using-high-low-side-driver-ir2110-with.html>
15. **Ehsani, M., Gao, Y. and Gay, S.**, "Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications", Industrial Electronics Society, IECON'03, The 29th Annual Conference of the IEEE, Montreal, 891-896 (2003).
16. **Jiixin, C., Youguang, G. and Jiangou, Z.**, "Design and Performance Simulation of a High Speed Brushless DC Motor for Embroidery Machine Application", Technology and Innovation Conference, London, 777-781 (2006).
17. **Ertugrul, N., Acarnley, P.**, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Inds. App., 30(1): 126-133 (1994).
18. **Singh, B.**, "Recent advances in Permanent Magnet Brushless DC Motors", Sâdhanâ Academy Proceedings in Engineering Sciences, 22(6): 837-353 (1997).

19. **Zhang, J., Cheng, M. and Hua, W.**, “Calculation of cogging torque for stator interior permanent magnet machine,” 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC’10, , Chicago, IL, 1 (2010).
20. **Karakulak, O., Yaz, O.**, “PIC Tabanlı Fırçasız DA Motor Sürücü Tasarımı”, 3.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir (2012).
21. **Bektaş Y., Serteller N.F.O.**, “Fırçasız Doğru Akım Motoru (FSDAM) ve Sürücü Devresi Eğitim Seti Analizi Geliştirilmesi ve Motorun Bilgisayar Ortamında İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul (2011).
22. **Hasanusta K., Serteller N.F.O.**, “Fırçasız Doğru Akım Motorlarında (FSDAM) Optimal Hall Sensör Yerinin İncelenmesi ve Motora Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 15(2015) 035201 (1-7) DOI:10.5578/fmbd.10173
23. **Wu, Q., Tian W.**, “Design of Permanent Magnet Brushless DA Motor Control System Based on dsPIC30F4012”, Procedia Engineering 29 (2012) 4223-4227.
24. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Deadtime_calculation_for_IGBT_modules-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011a5daefc41005b, 10.01.2020.
25. <https://www.pulseroller.com/files/NA/Sales%20Literature/Motorized%20Roller%20Primer.pdf>, 10.01.2020
26. <https://www.tradekorea.com/product/detail/P658475/silicon-steel-stamping---lamination-bl-dc-motor-stator--core.html>, 15.01.2020
27. https://antrak.org.tr/images/stories/pic_2011/haziran/PCB-oneri.pdf, 20.02.2020

EKLER

EK 1: Arduino Mega 2560 Kontrol Yazılımı

```
const int Potansiyometre = A0;
int pot_deger = 0;
int cikis_deger = 0;
int hall_sensor_a = 2;
int hall_sensor_b = 3;
int hall_sensor_c = 4;
float hiz_ver = 0.0;
boolean MotorDur = false;
float HZ = 0;
const int a_motor_lout = 6;
const int a_motor_pwm_hout = 5;
const int b_motor_lout = 9;
const int b_motor_pwm_hout = 7;
const int c_motor_lout = 11;
const int c_motor_pwm_hout = 10;
enum tekerlek_yonu {
  DIR_ILERI,
  DIR_GERI,
  DIR_DUR
}dir;
void Teker_Hareket(tekerlek_yonu (dir), float (speed))
{
  if (MotorDur) return;
  analogWrite(a_motor_pwm_hout, 0);
  analogWrite(b_motor_pwm_hout, 0);
  analogWrite(c_motor_pwm_hout, 0);
  digitalWrite(a_motor_lout, HIGH);
  digitalWrite(b_motor_lout, HIGH);
  digitalWrite(c_motor_lout, HIGH);
```

```

int hall_a = digitalRead(hall_sensor_a);
int hall_b = digitalRead(hall_sensor_b);
int hall_c = digitalRead(hall_sensor_c);
if (dir == DIR_ILERI) {
if (hall_a == 0 && hall_b == 0 && hall_c == 1)
{
analogWrite(b_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(c_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 0 && hall_c == 1)
{
analogWrite(b_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(a_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 0 && hall_c == 0)
{
analogWrite(c_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(a_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 1 && hall_c == 0)
{
analogWrite(c_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(b_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 0 && hall_b == 1 && hall_c == 0)
{
analogWrite(a_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(b_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 0 && hall_b == 1 && hall_c == 1)
{
analogWrite(a_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(c_motor_lout, LOW);
}
} else if (dir == DIR_GERI) {
if (hall_a == 0 && hall_b == 0 && hall_c == 1)
{

```



```

analogWrite(c_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(b_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 0 && hall_c == 1)
{
analogWrite(a_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(b_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 0 && hall_c == 0)
{
analogWrite(a_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(c_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 1 && hall_b == 1 && hall_c == 0)
{
analogWrite(b_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(c_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 0 && hall_b == 1 && hall_c == 0) {
analogWrite(b_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(a_motor_lout, LOW);
} else if (hall_a == 0 && hall_b == 1 && hall_c == 1)
{
analogWrite(c_motor_pwm_hout, speed);
digitalWrite(a_motor_lout, LOW);
}
}
delay(10);
}
void setup()
{
pinMode(a_motor_lout, OUTPUT);
pinMode(a_motor_pwm_hout, OUTPUT);
pinMode(b_motor_lout, OUTPUT);
pinMode(b_motor_pwm_hout, OUTPUT);
pinMode(c_motor_lout, OUTPUT);

```

```

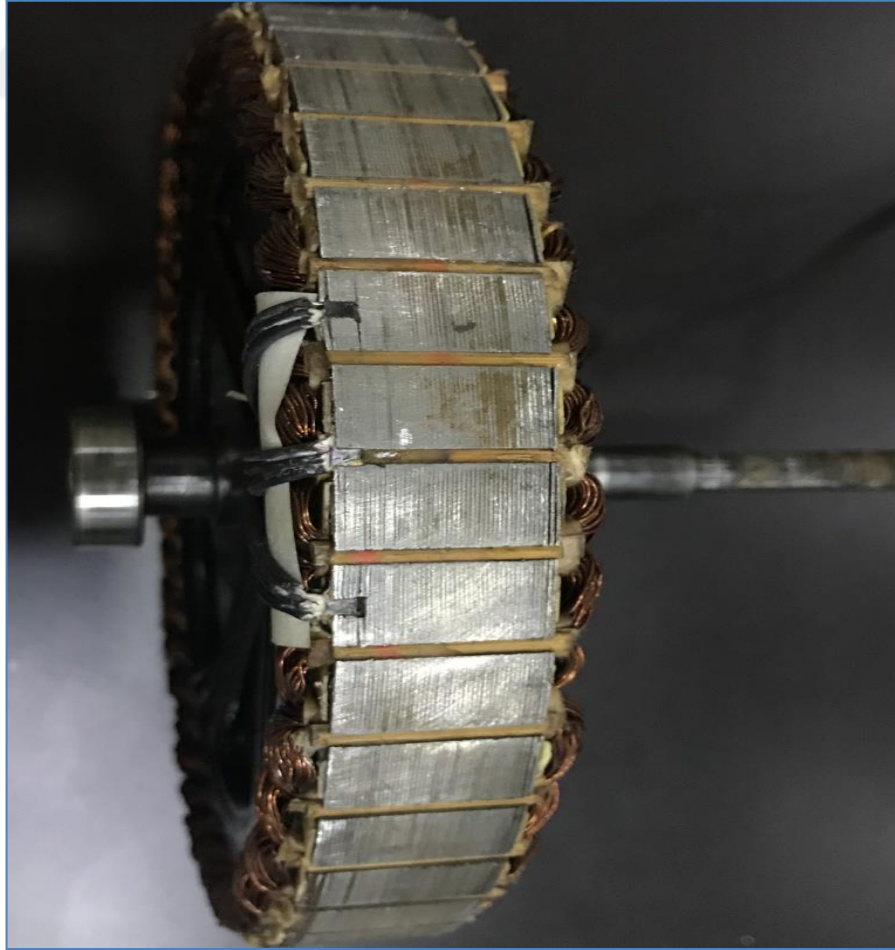
pinMode(c_motor_pwm_hout, OUTPUT);
pinMode(hall_sensor_a, INPUT);
pinMode(hall_sensor_b, INPUT);
pinMode(hall_sensor_c, INPUT);
analogWrite(a_motor_pwm_hout, 0);
analogWrite(b_motor_pwm_hout, 0);
analogWrite(c_motor_pwm_hout, 0);
digitalWrite(a_motor_lout, HIGH);
digitalWrite(b_motor_lout, HIGH);
digitalWrite(c_motor_lout, HIGH);
}
void loop()
{
for(int i=0;i<5;i++){ pot_deger += analogRead (Potansiyometre); }
pot_deger = pot_deger/5;
cikis_deger = map(pot_deger, 0, 1023, -90, 90);
HZ = cikis_deger;
tekerlek_yonu dir;
if (HZ > 0)
dir = DIR_ILERI;
if (HZ < -0) dir = DIR_GERI; else dir = DIR_DUR; hiz_ver = abs(HZ);
Teker_Hareket(dir, hiz_ver);}

```

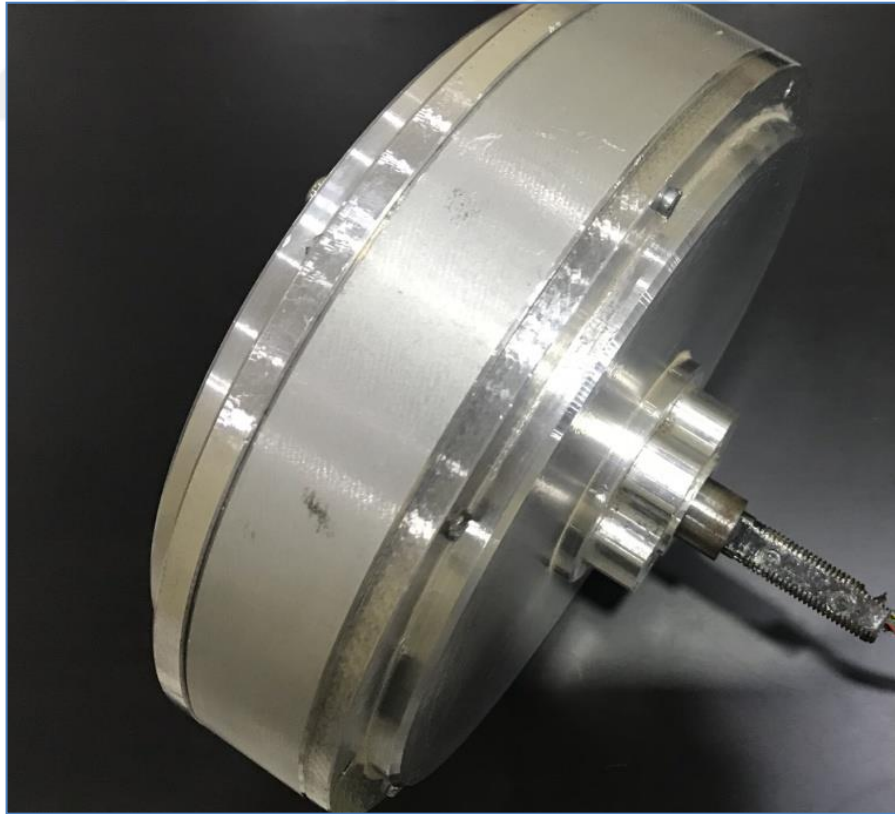
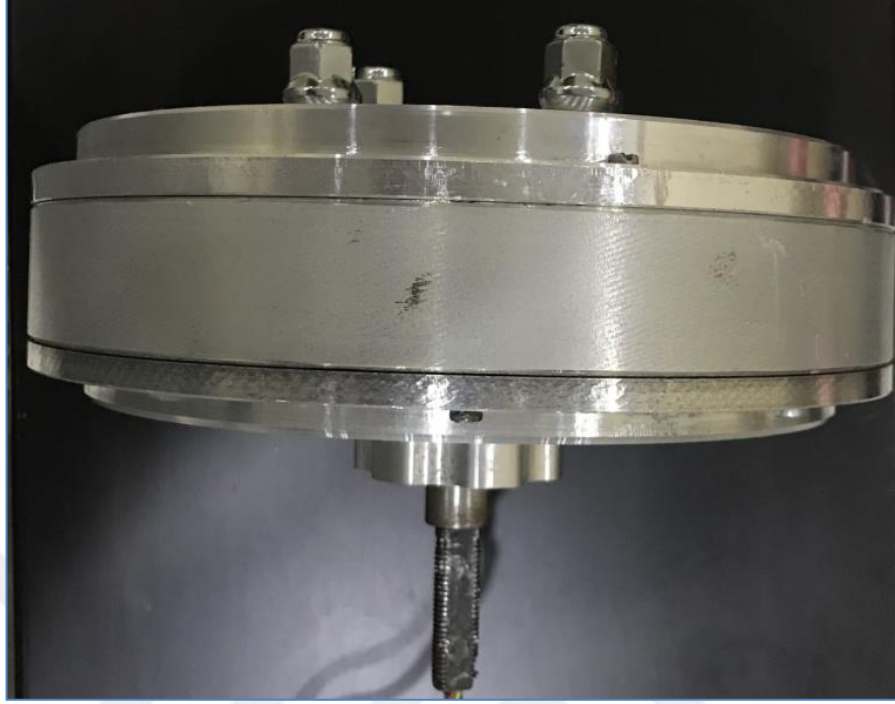
EK 2: Referans Alinan Motora Ait Rotor Resimleri



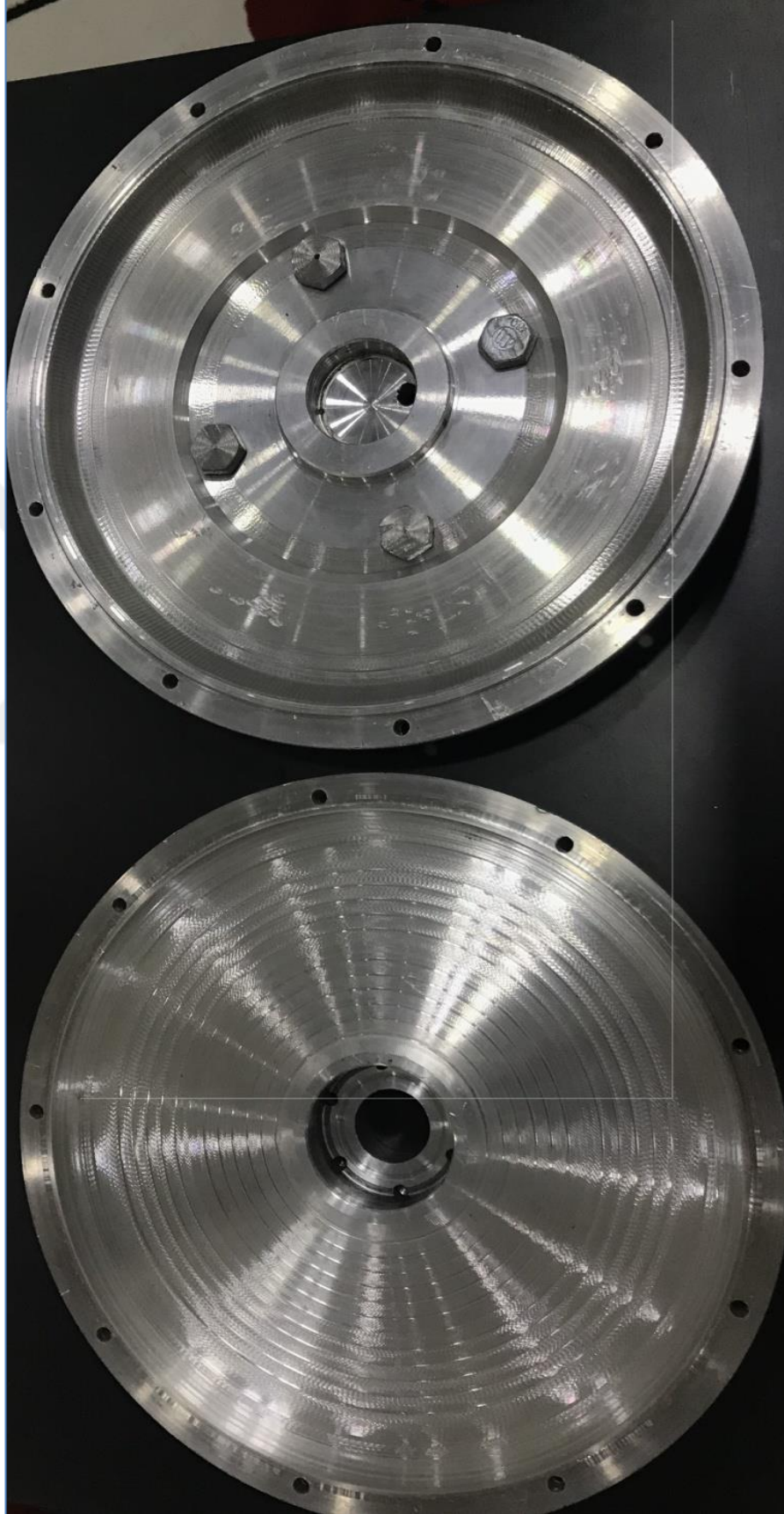
EK 3: Referans Alınan Motora Ait Stator Resimleri



EK 4: Referans Alinan Motora Ait Genel Resimler



EK 5: Referans Alınan Motora Ait Kapak Resimleri



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında doğan Uğur DERELİ, 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği programından mezun olmuştur. 2014 yılında Yozgat Bozok Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

İletişim Bilgileri

Adres : Cide Bayram Yusuf Aslan Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi

Cide/KASTAMONU

Telefon: 0 (543) 448 64 62

E-posta: ugurdereli2020@hotmail.com