

İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ★FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

SEMİNER TEZİ

Hüseyin Cem BAYRAKTAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Seminer Danışmanı: Prof. Dr. Hasan Hüseyin BALIK

MAYIS-2014

İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ★FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

SEMİNER TEZİ

**Hüseyin Cem BAYRAKTAR
(Y.1313.100001)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Seminer Danışmanı: Prof. Dr. Hasan Hüseyin BALIK

14 MAYIS 2014

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, bana yardımcı olup yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hasan Hüseyin Balık'a ve Aydın Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimim süresince bana emeği geçen tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Yaşamım ve yoğun çalışmalarımın geçtiği yüksek lisans eğitimi ile tez hazırlama sürecim içerisinde, bana her zaman destek olan, anlayış gösteren sevgili eşime, biricik kızıma ve beni seven tüm dostlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs-2014

Hüseyin Cem BAYRAKTAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması	4
1.3 Seminer Düzeni.....	6
2. FIRÇASIZ DC MOTORLARIN TANITIMI	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Tanımı ve Özellikleri	7
2.3 Kullanım Alanları.....	9
2.4 Motor ve Sürücü Sistemi Yapısı	9
2.4.1 Stator	10
2.4.2 Rotor.....	11
2.4.3 Geri Besleme Üniteleri.....	12
2.4.4 Evirici ve Sürücü Katmanı (Güç Dönüştürücüsü)	19
2.4.5 Denetleyici (Kontrolör).....	27
2.5 Fırçasız DC Motor Çeşitleri	27
2.5.1 Dış Rotorlu Fırçasız DC Motorlar	27
2.5.2 Disk Tipi Fırçasız DC Motorlar	28
2.5.3 İç Rotorlu Fırçasız DC Motorlar	29
2.6 Fırçasız DC Motorların Olumlu ve Olumsuz Yönleri.....	31
2.7 Fırçasız DC Motorların Çalışma Prensibi	32
2.8 Fırçasız DC Motorların Matematiksel Modeli.....	34
3. FIRÇASIZ DC MOTORLARIN KONTROLÜ	37
3.1 Giriş.....	37
3.2 Kontrol Tanımı.....	37
3.3 Fırçasız DC Motor Kontrol Yöntemleri.....	38
3.3.1 Klasik Kontrol Yöntemleri.....	38
3.3.2 Modern Kontrol Yöntemleri	39
4. SONUÇLAR	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

KISALTMALAR

BLDC	: Fırçasız Doğru Akım (Brushless Direct Current)
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (Permanent Magnet Synchronous Motor)
SMFDAM	:Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru (Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
PID	:Oransal-İntegral ve Türev Kontrol (Proportional-Integral and Derivative Control)
PI	: Oransal-İntegral Kontrol (Proportional-Integral Control)
PD	: Oransal-Türev Kontrol Proportional-Derivative Control)
LQR	: Lineer Karesel Kontrol (Linear Quadratic Control)
EMK	: Elektromotor kuvvet
MMK	: Mıknatıs Magnetik Gerilimi
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
DGA	: Darbe Genişlik Ayarı
PIC	: Giriş-Çıkış İşlemcisi (Pripheral Interface Controller)
MATLAB	:“Matris laboratuvarı” kelimelerinin ilk üç harfinden oluşan teknik bir programlama dili.
SIMULINK	:MATLAB içinde dinamik sistemleri modellemeye ve simülasyonunu gerçekleştirmeye yarayan bir yazılım ortamı.
H-BRIDGE	:H Köprüsü, DC Motorun yön kontrolünü gerçekleştirmek için geliştirilen yöntem.
CD	:“Compact Disc” , küçük, taşınabilir, yuvarlak boyutlarda, elektronik kayıt, yedekleme, ses, video ve bilgisayar verilerini sayısal bir formatta saklayan optik medya.
DVD	:“Digital Video Disc” CD’ye göre daha hızlı ve daha fazla veri barındıran yeni nesil optik depolama teknolojisi.
SCADA	:“Supervisory Control and Data Acquisition” kelimelerinin baş harflerinden oluşan Türkçesi “Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Sistemi”.
MOSFET	:Metal-Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
IGBT	:Kapı İzoleli Bipolar Transistör (Insulated-Gate Bipolar Transistor)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sensör bilgisine, rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları....34

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Fırçasız DC motor örnekleri.....	7
Şekil 2.2 : PIC16F876 ile gerçekleştirilen fırçasız dc motor sürücü sistemi.....	10
Şekil 2.3 : Fırçasız DC motor statoru ve alan sargıları.....	10
Şekil 2.4 : Farklı kutuplu stator yapıları.....	11
Şekil 2.5 : Alan etkili sensörün yapısı.....	14
Şekil 2.6 : İki ve dört kutuplu motorda alan etkili sensörlerin durumu.....	14
Şekil 2.7 : Alan etkili sensör şeması.....	15
Şekil 2.8 : Motor içindeki alan etkili sensörlerin konumu.....	15
Şekil 2.9 : Alan etkili sensörlerin yerleşim şekilleri.....	16
Şekil 2.10 : Artımlı (artırımsal) encoder.....	17
Şekil 2.11 : Mutlak encoder.....	17
Şekil 2.12 : Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı.....	19
Şekil 2.13 : Mosfet'lerle yapılmış sürücü devresi.....	20
Şekil 2.14 : Mosfet'lerin iç yapısı ve sembolü.....	21
Şekil 2.15 : Güç mosfetinin sembolü.....	21
Şekil 2.16 : Mosfetlerin karakteristik eğrisi.....	22
Şekil 2.17 : PNP ve NPN tipi transistörlerin sembolü ve iç yapısı.....	22
Şekil 2.18 : Transistörlerin karakteristik eğrisi.....	23
Şekil 2.19 : Tristörün sembolü, yapısı ve tristör eşdeğer devresi.....	23
Şekil 2.20 : IGBT'nin sembolü ve karakteristik eğrisi.....	24
Şekil 2.21 : BLDC motorunun sürücü devre ile bağlantısı.....	24
Şekil 2.22 : PWM yönteminin basit anahtar yapısı.....	25

Şekil 2.23 : Taşıyıcı sinyal ve kontrol sinyalinin değişimi.....	25
Şekil 2.24 : Taşıyıcı sinyal ile kontrol sinyalinin karşılaştırılması sonucu oluşan darbe sayısı.....	26
Şekil 2.25 : Dış rotorlu BLDC motor yapısı.....	27
Şekil 2.26 : Disk tipi BLDC motoru.....	28
Şekil 2.27 : İç rotorlu BLDC motorların yapısı.....	29
Şekil 2.28 : BLDC motorların rotor çeşitleri.....	30
Şekil 2.29 : Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin devre şeması.....	33
Şekil 2.30 : Sürücü anahtarların bağlanması.....	33
Şekil 3.1 : Bulanık denetleyici genel yapısı.....	39
Şekil 3.2 : Genetik algorithmadaki işlem sırası.....	40
Şekil 3.3 : Bir çok katlı perseptron modeli.....	41

SEMBOL LİSTESİ

B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
H	: Manyetik Alan Şiddeti
w	: Açısal hız
T	: Örnekleme periyodu
n	: Örnekleme periyodunda sayılan darbe sayısı
N	: Diskteki (optik sensörlerde) ızgara sayısı
f	: Frekans
D	: PWM yönteminde çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasında oran görev periyodu
V_{ϕ}	: Çıkış gerilimi
V_g	: Giriş gerilimi
t_{on}	: Yarı iletken anahtarın iletimde kalma süresi
t_{off}	: Yarı iletken anahtarın kesimde kalma süresi
V_C	: PWM yönteminde kontrol sinyali gerilimi
V_T	: PWM yönteminde taşıyıcı sinyal gerilimi
$V_{T \max}$	: PWM yönteminde taşıyıcı sinyal maksimum gerilimi
$V_{T \min}$	: PWM yönteminde taşıyıcı sinyal minimum gerilimi
V_a	: a fazı faz gerilimi
V_b	: b fazı faz gerilimi

V_c	: c fazı faz gerilimi
i_a	: a fazından geçen akım
i_b	: b fazından geçen akım
i_c	: c fazından geçen akım
e_a	: a fazında endüklenen zıt elektromotor kuvveti
e_b	: b fazında endüklenen zıt elektromotor kuvveti
e_c	: c fazında endüklenen zıt elektromotor kuvveti
R	: Faz direnci
L	: Faz endüktansı
M	: Karşılıklı (ortak) endüktans
T_e	: Elektromanyetik tork (dönme momenti) (motorun ürettiği)
T_L	: Yük torku (dönme momenti)
ω_m	: Rotorun mekanik hızı
B	: Sürtünme katsayısı
J	: Eylemsizlik (atalet) momenti
ω_e	: Elektriksel frekans
P	: Rotor kutupları sayısı

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

ÖZET

Fırçasız doğru akım motorları (BLDC motorlar), sahip oldukları avantajları dolayısıyla günümüzde daha çok tercih edilir duruma gelmiştir. Avantajlarının başlıcaları; yüksek verim, güvenilir çalışma ortamı, daha az bakım, sessiz çalışma, kolay soğutma, uzun ömür ve kolay kontrol edilebilme şeklinde belirtilebilir. Bununla beraber; karmaşık bir kontrol yapısına sahip olmaları, pahalı bir sistem oluşu, rotor pozisyonunun algılanabilmesi için pozisyon sensörlerine ihtiyaç duyması gibi dezavantajlara da sahiptir. Pozisyon sensörlerinin kullanılmadığı durumlarda ilave algoritmalar gerekir. Ancak günümüzde geline noktada geliştirilen yöntemlerle, bu motorların dezavantajları önemsiz duruma gelmeye başlamış ve kullanımları artmıştır.

Otomotiv sektörü, uzay ve bilgisayar teknolojileri, tıp elektroniği, askeri alanlar, robotik uygulamalar ve ev ürünlerinde sıkça kullanılmakta ve kullanım alanları gittikçe genişlemektedir.

Bir BLDC motor, üç faz sargılı stator, sabit mıknatıslı rotor, geri besleme üniteleri (Hall sensörleri v.b.), evirici ve sürücü katmanı ile denetleyici yapılarından oluşmaktadır. Stator sargılarının enerjilendirilmesi rotor pozisyonuna göre yapılır. Rotor konumu algılayıcılar ile belirlenir. Bunun dışında, sürücü için akım veya gerilim

bilgileri de ölçülerek kullanılmalıdır. Hız ve konum denetimi için en çok Hall ya da optik sensörler kullanılır. Rotor pozisyonunun sensörsüz olarak belirlendiği teknikler de giderek yaygınlaşmaktadır. Sensörsüz motorlar, sensörlü motorlar kadar yüksek hızlara ve ivmelere ulaşamazlar.

Fırçasız DC motorunun elektromanyetik yapısı, sürekli mıknatıslı senkron motorlara benzemekle birlikte; stator hava aralığında endüklenen zıt-emk, sinüzoidal olmayıp trapezoidal (yamuk) şeklindedir.

Fırçasız DC motorlar, rotorun yapısına göre üçe ayrılır. Bunlar dış rotorlu, disk tipi ve iç rotorlu yapılardır. Bunun dışında BLDC motorlar sensörlü ve sensörsüz olarak da ikiye ayrılır.

Fırçasız DC motorlarda motorun akımı, torku, rotor konumu ve hızı gibi parametreler çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak kontrol edilir. Bu kontrol şu şekilde olmaktadır; denetleyicinin ürettiği kontrol sinyali, seçilen kontrol algoritmasına göre PWM sinyallerinin durumunu kontrol eder. Bu şekilde denetleyici tarafından motor parametreleri kontrol edilir ki, denetleyici hem yazılım, hem de donanım yapılarından oluşur.

BLDC motorların kontrolünde yapılarının basitliği nedeniyle ve birçok uygulamalarda yeterli verimi karşılaması nedeniyle klasik denetleyiciler (PI ve PD tipi) kullanılır. Ancak denetlenecek sistemin modeline ihtiyaç duymaları ve en uygun kazanç değerlerinin deneme yanılmayla belirlenmesi dezavantaj oluşturmakta; sinüzoidal ve ani değişimlerdeki performansları yetersiz olmaktadır. Dolayısıyla, PI ve PD tipi denetleyiciler hassasiyet aranmayan uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Çok hassas denetim gerektiren uygulamalarda ise modern denetim teknikleri tercih edilmektedir. Günümüzde modern denetim tekniklerine, bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma, sinirsel bulanık denetleyiciler örnek verilebilir.

Bu tezde, BLDC motorların temel yapısı, özellikleri, çeşitleri, çalışması, kontrol mantığı ve kullanılan başlıca kontrol yöntemlerinden bahsedilerek BLDC motorlara ve kontrolüne ait genel bir bilgi verilmiştir.

THE CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTORS

SUMMARY

Nowadays, brushless DC motors have been preferred more than the other electric motors because of their advantages. Principal advantages; high efficiency, high reliability, less maintenance, silent operation, being easily cooled, long life (no brush and commutator erosion) and being easily controlled. Unfortunately, BLDC motors have disadvantages that have a control system more complexity, expensive system and require position sensors to sensing rotor position. Sensorless control contains higher requirements for control algorithms and more complicated electronics. But, nowadays, the disadvantages of BLDC motors have arrived not important because of the development of BLDC control methods.

Nowadays, especially automotive sector and all industries are needed precise and at the same time low cost, reliable and low maintenance velocity variables. Accordingly, in order to provide for the desired specifications, selection of motor becomes important. Classical (brush) DC motors have start up moment, high efficiency and linear characteristic of speed-moment. These characteristics are desired for servo systems. However, friction and arc formed due to brush and collectors, efficiency of motor is negatively affected. Also, due to abrasion and heating, frequent failures occur. DC motors eliminated from the disadvantages mentioned above are made almost ideal designs that require less maintenance with higher

efficiency. BLDC motors designed with this idea have linear speed-moment relation. Start up moment being directly with the motor current, makes control easier compared to other motors. High moments can be produced at small sizes. Which means they have high moment-volume ratio (require less copper for BLDC motors). They require less maintenance because of no brush and collector, they can be used in danger zones.

These motors have been widely used in a variety of applications in automobile industry (hybrid vehicles), space and computer technology, medical electronic, military areas, industrial automation, robotic applications and household products.

The BLDC motor is an AC synchronous motor with permanent magnets on the rotor (moving part) and windings on the stator (fixed part). Permanent magnets create the rotor flux and energized stator windings create electromagnet poles. The rotor is attracted by the energized stator phase. By using the appropriate sequence to supply the stator phases, a rotating field on the stator is created and maintained. This action of the rotor, chasing after the electromagnet poles on the stator, is the fundamental action used in synchronous permanent magnet motors. The lead between the rotor and the rotating field must be controlled to produce torque and this synchronization implies knowledge of the rotor position.

BLDC motor is defined the shape of the back-EMF of the synchronous motor. Both BLDC and PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) have permanent magnets on the rotor, but differ in the flux distributions and back-EMF profiles. The back-EMF is trapezoidal in BLDC motor case and sinusoidal in the PMSM motor case.

BLDC motor is composed of a permanent magnetic rotor and three stator coils. Besides, It's used to operate inverter and driver circuit and controller. The rotor position must be known to energized stator coils. The rotor position is determined by the sensors. Generally, the Hall effect position sensors are used to detect rotor position. Sometimes, optic sensors are used too. Besides, for driver, current and phase informations are also measured to controlled the motor. The rotor position is usually sensed by sensors, but there are applications that require sensorless control. Benefits of the sensorless solution are elimination of the position sensor and its connections between the control unit and the motor. The sensorless rotor position technique detects the zero crossing points of back-EMF induced in the motor windings. Using sensorless control have been widely increased recently. Sensorless control of BLDC motors can't achieve high speed and acceleration according to motor control with sensors.

No sensor studies, Kalman Filter Theory is used as a stronger method. In this method, a mathematical model that contains position, speed and back-EMF values is used. In prediction stage, the change in the motor status at any point in time is predicted by using this method. The predicted back-EMF is compared with measured value and the difference is used for optimizing the motor operation. By using Kalman Method, position and speed of motor can be predicted not only at zero crossings but also at any given time. Therefore more accurate commutation and so higher efficiency can be obtained.

There are three types of brushless DC motors called inrunner, outrunner and disc type. The inrunner motor has permanent magnetes located on the inside of the stationary electromagnets. Inrunner motors are good when high speed are needed. They are more efficient than outrunner motors the faster they spin. Inrunner motors are low torque than outrunner motors. An outrunner motor has the permanent magnets located on the outside of the stationary electromagnets. Outrunner motors spin slower but output more torque. Disc type brushless DC motors can prefer low

power and low speed applications. If we need low speed but high power, we should choose inrunner motor to has high number of poles.

Parameters in brushless DC motors, such as motor current, torque, rotor position and speed are controlled using various control methods. Control signal is produced by the controller, controls the status of PWM signals selected according to control algorithm. By means of this method, motor parameters that consist of both software and hardware structures, are controlled by the controller. Torque of BLDC motors generally are controlled by controls of stator currents.

PWM process is obtaining voltage at different impulse width by switching a fixed source and therefore voltage control at very wide ranges can be obtained. Impulse width obtained depends on the total of duration the switch remains on and off, the duration the switch remains on. This is provided by changing the switch off duration or period. In BLDC motor applications, control has become increasingly important besides motor design. BLDC motors are controlled by the fundamental power electronic circuits. However, It's necessary that many applications is implemented by the developed control algorithms. Increase in microprocessor capabilities, applicability of obtained mathematical models have made easy designing digital controllers for these models. Due to the improvements mentioned above, technologically advanced and economical solutions are now possible for industrial needs.

Classic controllers for example PI and PD type controllers are used for controlling BLDC motors due to their simplicity of structure and enough efficiency in most applications, in general. However, requiring the model of the system to be controlled and determining the optimum gain values by trial and error method are among the disadvantages of this method, together with lack of performans during sinusoidal and instantaneous system changes. Therefore, PI and PD type controllers are commonly used for applications that do not require high precision. For applications that require very high precision, modern control methods are preferred. Fuzzy logic, artificial neeural network, genetic algorithm, neural fuzzy controllers are examples of modern control techniques.

Fuzzy logic is the most convenient control method for conditions where classical logic is not enough. Especially, if mathematical model of a system is not constructed or is very difficult to construct, and it is a non-linear system, fuzzy logic control method where human perception and experiences are utilized is preferred.

This thesis provides general information about BLDC motors and their control including basic structure, characteristics, types, working principle, control logic and control methods commonly used.

1. GİRİŞ

Fırçasız DC motorlar (BLDC motorlar) özel bir elektrik motorudur. Senkron makinalar kategorisine girer. Rotoru sabit bir mıknatıstan yapılmıştır [1]. BLDC motorlar SMSM (Sürekli mıknatıslı senkron motorlar) ile çok benzerliği bulunmaktadır. SMSM ile BLDC motorlar arasındaki temel fark boşta endüklenen gerilimlerin farklılığıdır. SMSM'da boşta endüklenen gerilimler sinüzoidaldir. BLDC motorlarda ise, boşta endüklenen gerilimler trapezoidal (yamuk veya yamuksal) olmaktadır. BLDC motorların yapısı ve sürülmesi beş birimden oluşmaktadır. Bunlar; sabit mıknatıslı bir rotor, üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen stator, geri besleme üniteleri (pozisyon algılayıcı sensörler ile akım ve hız geri besleme bilgileri), evirici ve sürücü birimi, denetleyici (yazılımsal ve donanımsal yapılar)'dir [2].

Günümüzde motorlarda başlıca ucuzluk, az bakım ve güvenilirlik olarak sayılabilecek özellikler aranmaktadır. Özellikle otomotiv gibi sanayi alanlarında, motorlarda bu gibi özelliklerin yanı sıra, hız değişiminin de hassas bir şekilde ayarlanabilmesi istenmektedir. İşte bu noktada BLDC motorlar avantaj sağlamaktadır. Fırçalı (Brush) DC motorlar, yüksek bir verime ve kalkış momentine, doğrusal bir moment-hız karakteristiğine sahiptir. Yani BLDC motorların sağladığı bu gibi avantajları sağlamaktadır. Fakat fırçalı DC motorların bünyesindeki fırça ve kollektör düzeneklerinden dolayı sürtünme ve şerare oluşmasıyla bakım aralıklarının sık olması zaruretiye neden olmakta, verim düşmektedir. Klasik (fırçalı) motorların bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için BLDC motorlar geliştirilmiştir [3]. Klasik motorlarda, kollektör ve kollektöre basan fırçalar vasıtasıyla rotordaki sargılara elektrik iletilmektedir. BLDC motorlarda ise, bu sistemin görevini elektronik denetleyiciler yerine getirmektedir. Denetleyici rotorun hızını takip edebilmesi için rotorun pozisyonunu bilmesi gerekir. Aksi takdirde motorun çalışmasında aksamalar olur. Rotorun pozisyonunun tespitinde çoğunlukla Alan (Hall) etkili sensörler kullanılır [4].

Rotordaki sürekli mıknatıslar ve stator sargılarından dolaşan akımların etkileşimi neticesinde endüklenen moment ile BLDC motorlar çalışırlar. Sabit mıknatıstan oluşan bir rotoru olan BLDC motorda, rotor pozisyonunun bilinmesi sayesinde elektronik komütasyon gerçekleşir. Üç fazlı BLDC motorlarda her daim iki faz aktiftir. Motora üç faz tatbik edilirken, üretilen güç en yüksek moment üreten iki faz ile gerçekleşir. Rotorun pozisyonuna bağlı olarak bu iki fazdan güç elde edilir. Stator iletkenlerindeki akımın yönleri, rotordaki her kutup değişimi esnasında, mosfet,lgbt v.b. gibi güç elektroniği anahtarları tarafından değiştirilir. BLDC motorlarda uzun ömürlü bir manyetik alan elde edilir. Bunun nedeni, rotorun sabit mıknatıstan oluşmasıdır [5]. BLDC motorların elektromanyetik kirliliğinin düşük olması, yapısının basit olması, öteki motorlara nispetle daha fazla güvenilirliğe sahip olması, yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gibi etmenler nedeniyle kullanımı günümüzde artmıştır [6]. BLDC motorlar, düşük güç ve servo kontrollü sistemlerde oldukça fazla kullanılmaktadır [7].

BLDC motorlar, uzay sistemlerinde, otomotiv alanında, askeri sahada, robotik sistemlerde, tıp elektroniğinde, bilgisayar sistemlerinde, ev aletlerinde velhâsıl günümüzdeki pek çok endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. BLDC motorların sahip olduğu avantajları belirtirsek; verimleri çok yüksektir, yapıları sağlamdır, güvenilirliği yüksektir, yapılarında fırça olmaması sebebiyle ark oluşmaz ve karbon tozları bulunmaz, yüksek hızlar elde edilebilir, kolay soğutulabilir, hız kontrolü mümkündür, yüksek akım-moment ve moment-atalet ilişkisine sahiptir, küçük boyutlarına rağmen yüksek moment üretebilirler, fırçalı motorların aksine uyarma akımları gerektirmezler ve sessiz olarak çalışırlar. Sahip oldukları bu avantajlarına mukabil, birtakım dezavantajlara da sahiptir. Bunları da belirtirsek; maliyetlerinin yüksekliği, pozisyon sensörü kullanımı gerekliliği ve karmaşık bir kontrol devresine sahip olması şeklinde söylenebilir [8]. Günümüzde, kontrol tekniklerinin ve teknolojinin düzeyinin ilerlemesi ile BLDC motorlarının kullanımı hem artmış, hem de süregelen dezavantajları da elimine edilmeye doğru yol almıştır [9].

SMSM'in stator sargılarında endüklenen zıt-emk sinüzoidal, oysa BLDC motorların stator sargılarında oluşan zıt-emk ise trapezoidal yani yamuk şeklindedir. Bundan dolayıdır ki, BLDC motorlara ayrı bir isim verilmiştir. BLDC motorların ağırlığına nispetle ürettiği güç, SMSM'in ağırlığına nispetle ürettiği güce göre, yani ağırlık/güç oranına göre BLDC motorların %25 üstünlüğü vardır. Bu sebeple BLDC motorlar, SMSM'a göre daha çok tercih edilmektedir. Zıt-emk parantezinde ayrı bir konuyu irdelersek; stator sargılarında endüklenen zıt emk'nın trapezoidal olmasından dolayı

BLDC motorların lineer bir matematiksel modeli yoktur ve bu yapısından dolayı da analizi zor olmaktadır [1].

BLDC motorlarının kontrolü, tasarımı kadar, hatta daha da önemli bir noktaya varmıştır. Bu motorların, güç elektroniği devrelerini kullanarak kontrolü yapılabilmektedir. Bunun yanında, günümüzde çeşitli algoritmalar kullanılarak oluşturulan kontrol yöntemlerinin kullanılmasının gerekliliği daha da artmıştır. Teknolojik gelişmelerle üretilen mikroişlemcilerin işlevleri geliştirilmekte ve yeni işlevlere sahip mikroişlemcilerle birlikte bunların yeni matematiksel modelleri de elde edilmektedir ve bunlara uygun olarak yeni sayısal kontrolörler geliştirilmektedir [10].

Darbe genişlik modülasyonu (PWM), BLDC motorların kontrolünde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, değişik darbe genişliğine sahip gerilimler, sabit bir kaynağın anahtarlama işlemiyle elde edilir. Anahtarın açık olma süresinin, anahtarın açık olma ve kapalı olma sürelerinin toplamına bölümü ile darbe genişliği elde edilir. Bu oran, periyot veya anahtarın kapalı olma sürelerinin değiştirilmesiyle elde edilir [1].

Çoğunlukla, stator akımlarının kontrolü ile BLDC motorların momenti ayarlanır. Stator akımının denetiminde de ekseriyetle darbe genişlik ayarlı eviriciler kullanılır. Bu eviricilerin akımlarının denetimi için de pek çok teknik ve algoritma kullanılmaktadır [11-13]. Denetleyici kullanımı, rotor pozisyon ve konumunun hassas bir şekilde denetlenebilmesi için zaruridir. Kullanılan denetleyiciler iki kategoriye ayrılır. Bunlar; klasik ve modern yapıda denetleyiciler olarak isimlendirilmektedir. Literatürde, klasik yapıda olanlar PI ve PID tipi denetleyiciler; modern yapıda olanlar ise modern tabanlı kontrol yöntemleri, lineer karesel kontrol (linear quadratic control "LQR"), kutup geri besleme (pole placement), öngörülü kontrol (model predictive control "MPC"), bulanık mantık kontrol (fuzzy logic control), yapay sinir ağları (artificial neural network), genetik algoritma v.b. kullanılmaktadır [2].

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde, BLDC motorları ve kontrol yöntemlerini tanıma amacı güdülmüştür. Bu amaçla, öncelikle BLDC motorlarının yapısı, çeşitleri, çalışma prensipleri ve ekipmanları açıklanmış; bu motorların kontrolü için kullanılan yöntemler hakkında literatüre dayalı açıklayıcı bilgiler verilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Karthikeyan ve Dhana Sekaran yaptıkları çalışmayla farklı bir BLDC motor kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Bu kontrol biçiminin diğer kontrol biçimlerine göre bazı avantajları olduğunu görmüşlerdir. Bunlar, daha basit bir kontrol biçimi, faz akımlarını dengede tutabilme, bir DC bileşen vasıtasıyla akımın kontrol edilmesi ve bundan dolayı akımlardan ziyade fazın elimine edilmesidir. Onlara göre, bu yöntemle elde edilen karakteristikler, güç transistörleriyle bir akım kontrol stratejisi olarak bir üçgensel taşıyıcının kullanılmasına olanak sağlarlar ki bu da, diğer biçimlere göre daha basit ve daha fazla yanlışsız bir sonuç sağlar. Bu kontrol biçimi diğer bilindik kontrol biçimleriyle mukayese edildiğinde, daha mükemmel modülasyon karakteristiklerine sahiptir [14].

Wu ve Tian yaptıkları çalışmada, sürekli mıknatıslı BLDC motorların çalışma prensibi ve Microchip Technology Inc.'ın geliştirdiği dsPIC30F4012 ile BLDC motorların dijital sinyal kontrolü tanıtıldıktan sonra, fanlar ve pompaların yük gereksinimlerine göre BLDC motorların dsPIC30F4012 kontrol çipi ile kontrol çözümleri önerilmiş; donanım devresi dizayn edilerek bu donanıma kaynak oluşturan yazılım programının bir bölümü verilmiştir. Oluşturulan devre donanımıyla ve kontrol programının yazılımıyla sistem hatalarından arındırılmış ve geliştirilmiştir. Sonuçta, geliştirilen sistem mükemmel bir kontrol performansı, güvenilirlik ve tüm üretim dizayn gereksinimlerinin üstesinden gelmiştir [15].

Wang yaptığı çalışma ile, yüksek güçlü BLDC motorun kapalı çevrim kontrol sistemini dizayn etmişse de; daha ziyade IR2130 sürücü devresi, H köprüsü sürücü devresi, motor için dönüş yönetimi kontrolü ve hız algılama devresi dizaynını hedef seçmiştir. Bu amaçla, motor ayar parametreleri boyunca performansının iyileştirilmesi için güncel uygulama gereksinimleri, güvenilirlik ve kararlılık ilkeleri göz önünde tutularak çekirdek kontrol algoritması olarak PID (oransal-integral ve türev kontrol) kontrolü kullanılmıştır. Bu kontrol iyi bir performans sergilemiştir. Deneylerle görülmüştür ki, hem donanım hem de yazılım kontrol algoritması güvenilir ve kararlıdır. Sistemin çalışma performansının motor hem yüklü, hem de yüksüz iken çok iyi olduğu tespit edilmiştir. Wang'a göre, BLDC motor için hız kontrolü çok önemlidir. Her çeşit kontrol gereksinimlerini karşılamak, BLDC'nin sayısal ve etkin bir kontrolünü gerçekleştirmek için en yaygın kontrol biçimleri: PID kontrolü, bulanık mantık kontrolü ve birleşik kontrol biçimleri olarak bulanık-sinir ağı, bulanık-genetik algoritma v.b. biçimleri kapsar. Bunlardan PID kontrolü günümüzde geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır [16].

Janpan, Chaisricharoen ve Boonyanant yaptıkları çalışmada, doğal mıknatıslı BLDC motorların çalışması esnasında bir taraftan da elektrik enerjisi üretimi yapabileceklerini düşünmüşlerdir. Bu amaçla üç stator sargısına sahip BLDC motorun her kontrol adımında iki sargısı kullanılarak manyetik alan dönüşü elde edilmiş; serbest olan diğer sargıda endüklenen bir zıt-emk ile ise elektrik enerjisi elde edilmiştir. Deney sonuçlarından da görülmüştür ki, BLDC motorun kombine biçimdeki kontrolü ile, motor yüksüz iken elde edilen çıkış voltajı, giriş voltajının %75'i civarında olmuştur (12 V girişten, yaklaşık 9 V çıkış elde edilmesi) ve bu çalışmalar daha da sürmektedir [17].

Karakulak, Yaz ve diğerleri, yaptıkları çalışmada bir BLDC motoru PIC16F877 mikroişlemcisi ile sürülmesi tasarımı yapmışlar ve sonuç pratikte başarıyla gerçekleşmiştir. Basit yapısı ve düşük maliyetine göre sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Tasarlanan devre, BLDC motorun moment kontrolü yapmadan sadece faz gerilim bilgisinden geri besleme alarak kontrolünü sağlamaktadır. Sabit yüklü ve sabit hızlı BLDC motor uygulamalarında kolaylıkla kullanılabilecek yapıdadır. Sistem ilave bir sensör yardımıyla, motor akım kontrolü dolayısıyla moment kontrolü de yapabilecek niteliktedir. Yapılan deneyler sonucunda tasarlanan sürücünün, hem kullanılan malzemelerin ucuzluğu ve tedarik kolaylığı, hem de sistemin kararlılığı nedeniyle pratik uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür [8].

Chowdhury, Chattopadhyay ve Roy, bilindik olan 6 anahtarlmalı komütasyon devresi yerine, 4 anahtarlmalı yeni bir komütasyon yaklaşımıyla doğal mıknatıslı BLDC motorların sensörsüz olarak sürülmesi amacının üstesinden gelmişlerdir. Onlara göre, bu teknik, rotor pozisyonu algılamak için kullanılan ve hantal olan sensörlü BLDC motor sürme tekniklerinden (alan etkili sensörler kullanılarak) her zaman avantajlıdır. Sensörsüz performans hem karmaşık donanımı, hem de ilgili devrenin güç tüketimini azaltır. Bu çalışmalarında, MATLAB/SIMULINK platformunu kullanmışlar; önce 4 anahtarlmalı 3 fazlı BLDC motor sürücüsü tanıtılmış; daha sonra simülasyon çalışmasıyla zıt EMK algılama tekniği kullanılarak rotor pozisyonu için kestirimde bulunmuşlardır. Bu çalışmada, BLDC motorun sensörsüz tekniğinin canlandırılması için lojik devre ile beraber güç elektroniği temelli inverter kullanılmıştır. Bu dizaynın etkililiği simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Bu dizayn ile çok yüksek hızlar elde edilmiş, ancak daha düşük dönüş hızlarında biraz doğrusal olmayan sonuçlar elde edildiği görülmüştür [18].

1.3 Seminer Düzeni

Bu seminer tezinde, birinci bölüm olan giriş bölümünü takiben ikinci bölümde, BLDC motorların tanıtılması başlığı altında; konuya giriş, bu motorların tanıtılması ve özellikleri, kullanım alanları, motor ve sürücü sistem yapısı, çeşitleri, olumlu ve olumsuz yönleri, çalışma prensibi ve matematiksel modeli açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, BLDC motorların kontrolü başlığı altında; konuya giriş, kontrolün tanımı, BLDC motor kontrol yöntemleri ki, bunlar klasik ve modern kontrol yöntemleri olarak sınıflandırılarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde; literatürde kullanılan BLDC motorları ve onların kontrol yöntemleri hakkında karşılaştırmalı sonuçlar açıklanmıştır.

Dördüncü bölümü takiben ise; kullanılan kaynaklar ve özgeçmiş bilgileriyle tez tamamlanmıştır.

2. FIRÇASIZ DC MOTORLARIN TANITIMI

2.1 Giriş

Günümüzdeki endüstriyel uygulamalarda, örneğin robotik sistemlerde, uzay teknolojisinde, otomotiv sanayiinde, bilgisayar sistemlerinde, tıp elektroniğinde, askeri alanlarda, ev aletlerinde v.b. ekseriyetle artık BLDC motorları tercih edilmektedir [19]. Bu bölümün amacı, bu cümlede de bahsi geçen ve hatta geçmeyen birçok uygulama alanına sahip olan BLDC motorların tanıtılmasıdır.

2.2 Tanımı ve Özellikleri

BLDC motorun sabit mıknatısa sahip bir rotoru vardır ve rotorda elektronik bir komütasyon gerçekleşir. Bu komütasyonun gerçekleşebilmesi için rotor pozisyonunun tespit edilmesi gerekir. BLDC motor bir nevi senkron motordur [5]. Bir DC makina, endüvideki bir bobinde, akımın yön değiştirmesi işlemine komütasyon denir [9]. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında oluşan statordaki hava aralığı akısı trapezoidaldir, oluşacak mıknatıs magnetik gerilimi (MMK) ise sabit bir hızla dönmeyecektir. Oysa SMSM'da oluşan hava aralığı akısı sinüzoidaldir. Bahsedilen bu konular, Sürekli Mıknatıslı BLDC motorlar ile SMSM (Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar) arasındaki başlıca farkları oluşturur [20]. Şekil 2.1'de BLDC motor örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Fırçasız DC motor örnekleri [21].

BLDC motorlarının çalışması, fırçalı DC motorlarının çalışmasının karakteristik olarak aynıdır. BLDC motorlarda, sabit mıknatıslı bir rotor yapısı olup fırça ve kolektör düzenekleri olmadığından uyartımda bunların vazifesi yoktur [22]. Fırçasız DC motorlarda kullanılan mıknatısların yüksek enerjili formasyonlarının üretimi ile bu motorlar daha da kullanılabilir hale gelmiştir [23]. BLDC motorların stator ve rotoru bir AC makinası gibi olup bununla birlikte, yarı iletken malzemelerden teşekkül eden bir inverter ve rotor pozisyon sensörlerinin bir araya gelmesiyle oluşan bir yapıdır [9].

BLDC motorlarda işletme hızı, motor boyutları ve motorun hız/yük kapasitesine göre hız aralığı değişir. 42 V'luk DC gerilimden daha az bir kaynak gerilimine sahiptir. Bununla birlikte, bu değerin daha alt ve üst değerlerinde de çalışabilir. En çok 24 V gerilim kullanılır. BLDC motorlar, yüksek bir maksimum momente ve verime, uzun ömüre ve hassas bir şekilde hız kontrol edilebilirliğine sahip olduklarından tercih edilmektedir [24]. Sessiz çalışmaya ve yüksek hız erişimi özelliğine sahiptirler. Alternatif akım ile beslenmediklerinden alternatif akım kaynağındaki voltaj değişikliklerinden etkilenmezler. İcabında portatif bir DC kaynak ile düşük gerilim değerlerinde çalışabilirler. BLDC motorların kontrolü programlanabildiğinden, hız ve devir yönü değişimi, görev çevrilmesi ve frenlenme gerektiği ev aletlerinde kullanılırlar. Patlama riski olan yerlerde veya başka bir deyişle tehlikeli ortamlarda, BLDC motorun çalışması esnasında, şerare oluşmaması ve düşük bir DC gerilimle çalışması nedeniyle en çok tercih edilen motorlardan biri olmuştur [9].

BLDC motorlarda, komütasyon için fırçalara ihtiyaç yoktur. Bu işlem elektronik olarak gerçekleşir. BLDC motorlar, fırçalı DC motorlara nazaran daha verimlidir veya başka bir deyişle her iki motora da aynı elektrikli güç uygulandığında, BLDC motordan fırçalı DC motora göre daha fazla mekanik güç alınır. BLDC motorlarda statora yerleşik sargılar, soğutulmayı daha kolay kılar. Böylelikle motora daha fazla yük bindirilebilir. Fırçaların olmayışı nedeniyle, fırçalarda kayıp söz konusu değildir. Kıvılcım olayı da gerçekleşmez. Silindirik olarak yapılan rotor geometrisi sayesinde, bu motorlarda titreşim sorunları daha az olur. İvmelenme süresinin kısılması için rotor çapı düşürülmelidir. Bunun için de, daha güçlü mıknatıslar kullanılmalıdır. BLDC motorlar, pek çok cihazlarda örneğin, bilgisayarların soğutma fanlarında ve CD/DVD oynatıcılarda tercih edilmektedir [25].

Lineer hız-moment ilişkisini sağlama, fırça ve kolektörünün olmaması ve bunun sonucu bakımın azalması ile tehlike arz eden ortamlarda kullanılabilme imkânı, çalışmasının sessiz olması, yüksek moment-hacim oranını yani küçük hacimle yüksek moment üretimini sağlama ve bu sayede daha az bakır kullanımı , elektriksel gürültüden uzaklaşma, daha çok tork ve daha uzun ömrü sağlayabilme

yeteneklerine sahiptir. Bu kadar istifadelerine rağmen, bazı nahoş tarafları da vardır; harici bir güç elektroniği ve arzu edilen çalışma için rotor konum bilgisi gerekliliği, Alan (Hall) etkili pozisyon sensörlerine olan ihtiyacı gibi sıralanabilir. Pozisyon sensörü kullanılmadığı durumlara algılayıcısız çalışma durumu denir. BLDC'nin algılayıcısız olarak çalışması için birtakım ek algoritmaların kullanılması gereklidir. Bu yöntem de, diğerine göre daha pahalı bir yöntemdir [26].

BLDC motorlar, 50000 devir/dakika'yı aşan geniş bir hız aralığına sahiptir. Motorun boyutları ve taşıdığı yükü çalışma hızını etkiler. Ekseriyetle 24 V besleme gerilimi ile çalışır. Şebekedeki frekans dalgalanması ve frekans kayıpları ile bir ilgisi olmaz. Çünkü DC gerilim ile çalışır. 2,5 cm ile 14 cm civarında boyutları vardır. Açık veya kapalı şekilde yapılabilir. Yapısında mekanik bir kontağın mevcut olmaması nedeniyle verimi çok yüksek olup %70 ilâ %90'lar seviyesindedir. Gereken izolasyon şartları sağlandığında su altında çalıştırılabilir [26].

2.3 Kullanım Alanları

BLDC motorların kontrolü ve yapısında kullanılan malzemelerin, teknolojinin gelişimiyle birlikte yenilenmesi ve gelişmesinin neticesinde fırçalı DC motorlara oranla oldukça rağbet görmektedir. Bu gelişmelerin akabinde BLDC motorların kullanımı sağlık, robot, uzay endüstrisinde, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinde, yürüyen bant sistemlerinde, pompa ve fan motorlarının uygulamalarında, parlama ve yanma riski bulunan ortamlarda, sabit disk sürücü ile CD/DVD-ROM, yazıcı gibi bilgisayar donanımlarında ve bilhassa yüksek güç yoğunluğu ve hızın gerekliliğinin icap ettiği uygulamalarda kullanımı günden güne artmaktadır [20].

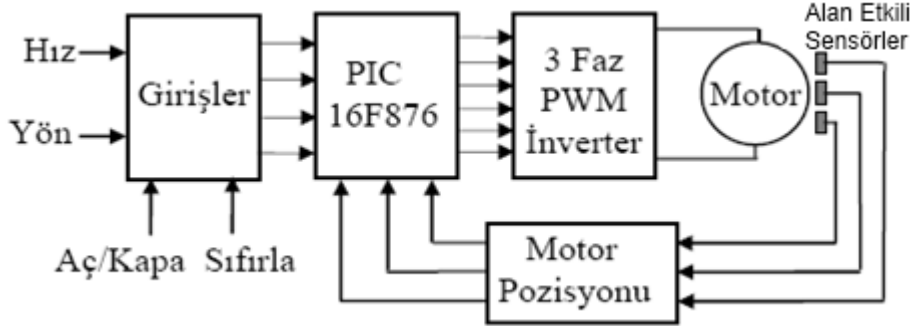
Son yıllarda ülkemizde, bulaşık makinası üretiminde bazı firmalar BLDC motoru içeren bulaşık makinaları imal etmektedirler. Bu şekildeki üretimle, şebeke gerilimindeki azalış ve artışlardan etkilenme özelliği ortadan kalkmaktadır. Otomobil ve helikopterlerde BLDC motorların birim enerji yoğunlukları daha iyi olduğu için daha çok kullanılmaktadır [9].

2.4 Motor ve Sürücü Sistemi Yapısı

BLDC motorların yapısı ve sürülmesi beş birimden oluşmaktadır. Bunlar; sabit mıknatıslı bir rotor, üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen stator, geri besleme üniteleri (pozisyon algılayıcı sensörler ile akım ve hız geri besleme

bilgileri), evirici ve sürücü birimi, denetleyici (yazılımsal ve donanımsal yapılar)'dir [2].

Bu yapıya ait bir örnek Şekil 2.2'de görülmektedir.

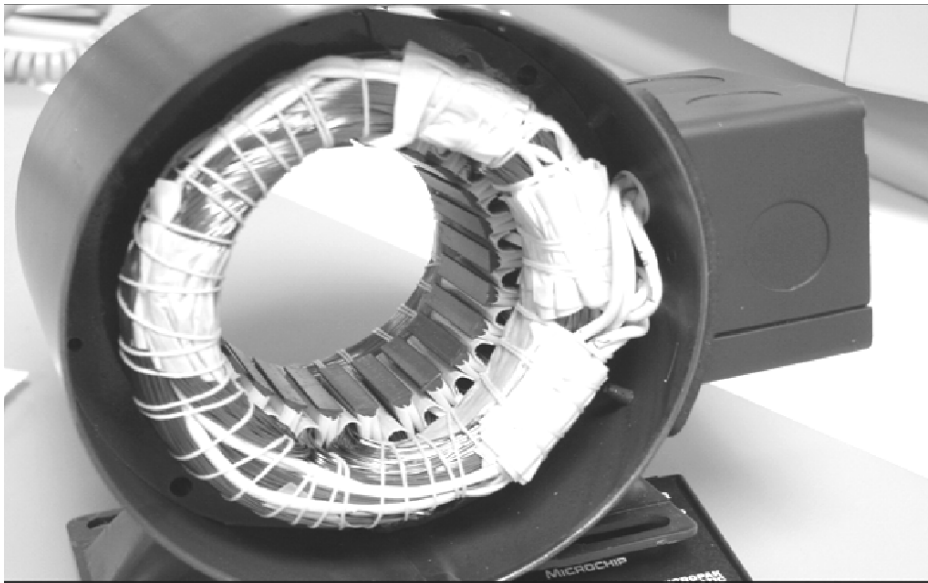


Şekil 2.2 PIC16F876 ile gerçekleştirilen fırçasız dc motor sürücü sistemi [27].

Şekil 2.2'de, denetleyici olarak PIC16F876 entegresi kullanılmış, Alan (Hall) etkili pozisyon sensörleri ile rotor pozisyonu denetleyiciye bildirilerek motorun istenilen parametrelere uygun çalışması sağlanmaktadır. Şekilde motor ile ifade edilen, üç faz sargılı stator ve rotorun birleşimidir. Evirici ve sürücü birimi olarak 3 faz PWM inverter kullanılmıştır.

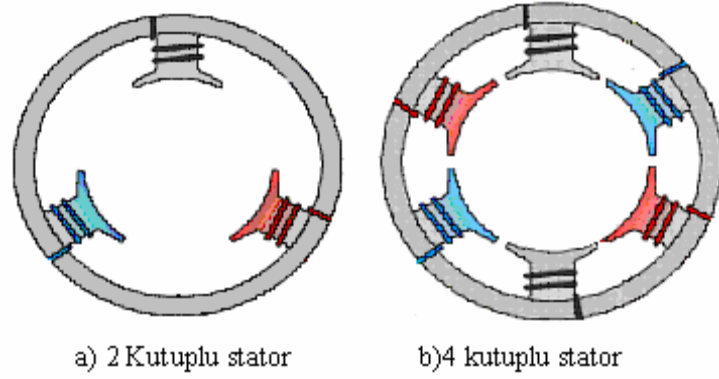
2.4.1 Stator

BLDC motor statoru, bir AC motoruna benzer. Stator, BLDC motorun duran kısmıdır. Bir nüve ve içindeki oyuklara yerleştirilen üç fazlı sargılardan oluşur. Şekil 2.3'de bir stator örneği görülmektedir [28].



Şekil 2.3 : Fırçasız DC motor statoru ve alan sargıları [28].

Statorun, asenkron motorun statoruna benzemesine karşın, statorun içersine sargıların dağılımı asenkron motordan biraz farklıdır. BLDC motor sargıları tıpkı asenkron motorlarda olduğu gibi, yıldız veyahut üçgen bağlanır. BLDC motorlarda, rotorun kutup sayısı, faz sayısı ve stator sargı şekline bağlı olarak stator oluk sayısı belirlenir [29]. Statorun silisli saçlardan yapılmasının nedeni, demir kayıplarını azaltmak içindir [9].



Şekil 2.4 : Farklı kutuplu stator yapıları [1].

Statorun çift kutup sayısının üç katı kadar, stator sargılarının sarıldığı çıkık vardır. Örneğin, $2p=2$ kutuplu bir statorda bir adet çift kutup olduğundan çıkık sayısı üç adettir. Üstte Şekil 2.4’de, bu anlatımın örneği görülmektedir. Motorun gücü arttıkça, stator boyutları da artar. Güç artışı, motordan geçen akımı artırır, bu da kablo kesitlerinin artırılması zarureti doğurur. Kablo kesitlerinin artışı da doğal olarak stator boyutlarının büyümesine neden olur [1].

2.4.2 Rotor

Rotor, BLDC motorun dönen kısmını teşkil eder ve kalıcı mıknatıstan oluşur. BLDC motorlarında kullanılan daimi mıknatıslı rotorlar, çoğunlukla bir veyahut birden fazla mıknatıstan oluşmaktadır. Daimi mıknatıstan oluşan rotorda, kolektör ve fırça düzenekleri bulunmaz. Bunun neticesinde de, ark oluşmaz, bakım ihtiyacı doğmaz ve sürtünmeden dolayı oluşan kayıpların azalmasına neden olur. Rotorun imâlinde, daimi mıknatıs elde etmek amacıyla ekseriyetle ferrit maddesinden yapılan mıknatıslar tercih edilir. Ucuz oluşu nedeniyle tercih edilen ferrit mıknatıslar (diğer alaşımlı mıknatıslara göre), mevcut akı yoğunluğunun düşük olması ve daha az manyetik yoğunluk sağlaması dezavantajına sahiptir [28].

Rotorun manyetik alanını uzun ömürlü bir şekilde oluşturan, rotora yerleştirilen sabit mıknatıslardır. Rotorda kullanılacak manyetik malzemenin belirlenmesinde, birim

hacme düşen moment miktarına, motorun işletme sıcaklığı aralığına ve yerleştirilecek mıknatısın fonksiyonelliği göz önünde bulundurularak sertliği değerlerine dikkat edilir [30]. Bir diğer nokta, rotorda kullanılan mıknatıs malzemeleri pahalıdır ve zaman geçtikçe özelliklerini yitirirler [1].

Rotorda sabit mıknatıs olarak ekseriyetle, ferrit veyahut seramik, alnico (Alüminyum-Nikel-Kobalt) ya da samaryum-kobalt (SmCo) maddesinden oluşan mıknatıslar kullanılmaktadır [9]. Bu maddelere ilâveten günümüzde rotorda, neodmiyum-ferrit-boron (NdFeB) ve neodmiyum (Nd) ile samaryum-kobalt alaşımı ile yapılan sabit mıknatısların üretimi yapılmaktadır [26].

Alnico (Alüminyum-Nikel-Kobalt) mıknatısların, akı yoğunlukları yüksek olup buna karşın zorlayıcı kuvvetleri düşük değerdedir. Bundan dolayı da, sahip oldukları mıknatısiyeti kısa zamanda kaybedebilme sıkıntısı vardır ve bu nedenledir ki günümüzde pek fazla kullanımı yoktur [22].

Ferrit ya da seramik mıknatısların, hem zorlayıcı kuvvetleri, hem de akı yoğunlukları yüksek değerdedir. Sahip oldukları mıknatısiyeti kaybedebilme sıkıntısı da söz konusu değildir. Ferritin doğada çok bulunması ve ucuz oluşu sebebiyle günümüzde kullanımı yaygındır [9].

Samaryum-kobalt (SmCo) mıknatısların, sahip olduğu manyetik yoğunluğu yüksek olup aynı zamanda da düzgün bir B-H karakterine sahiptir. Bu üstünlükleri dolayısıyla rağbet gören bir malzemedir. Fakat bu alaşımı oluşturan malzemelerin doğada az bulunuşu ve bu yüzden de pahalı olması nedeniyle, konuyla ilgilenenler farklı bir arayış içerisine girmişlerdir [1].

Neodmiyum-ferrit-boron mıknatısları, neodmiyum, demir ve bor maddelerinin alaşımından oluşmuştur. Samaryum-kobalt malzemesine nispetle ucuz olması ve düzgün bir B-H karakterine sahip olması gibi üstünlükleri vardır [1].

2.4.3 Geri Besleme Üniteleri

Stator sargıları rotor pozisyonuna göre enerjilendirilmelidir. Algılayıcılar kullanılarak rotor pozisyonu belirlenir. Buna ek olarak, sürücü fonksiyonları için gereken akım ve gerilim değerleri ölçülmeli ve ölçüm değerlerine göre kullanılmalıdır. BLDC motorlarda hız ve konumun kontrol edilebilmesi için, rotorun konumunu algılayacak algılayıcılara ihtiyaç vardır. Bu algılama işlemi için geleneksel olarak Alan (Hall) etkili ya da optik sensörler kullanılır. Bunlar statora ya da motorun miline yerleştirilir. Bu sensörlü sürüm tekniklerinin haricinde, BLDC motorun sensör kullanılmadan sürüldüğü teknikler de günümüzde artan bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Lâkin

sensörsüz sürme teknikleri, ek olarak muhtelif algoritmaların kullanılması zarureti ortaya çıkarır. Bir de sensörsüz kullanılan motorlar, sensörlü kullanılan motorlara nispetle daha az hız ve ivme değerlerine erişebilirler [26].

Sıradan bir kaynaktan ulaşan uyarı ya da işaretleri alıp, aldığı bu işaretlere uygun olarak sinyal üretebilen elemanlara sensör denir. Bunlar, motor kontrolü (denetimi) için kontrol edilen (denetlenen) mekanik veya elektriksel büyüklükten geri besleme olarak denetleyiciye gönderen optik veya elektromanyetik elemanlardır. Denetleme devrelerinde sensörlerden gelen geri besleme bilgileri işlenecek büyüklüğe dönüştürülür [24].

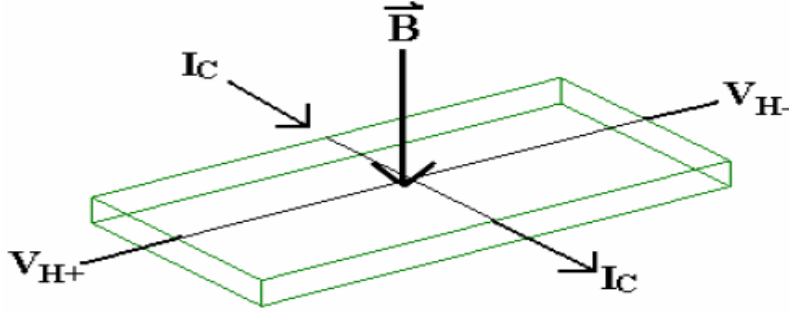
Rotor konumu algılayan algılayıcılar çok çeşitlidir. Bunların içerisinde en çok kullanılan alan etkili sensörler(Hall Effect Sensors)'dir. Bu sensörlerin haricinde, optik sensörler (encoder) ve sıfır geçiş dedektörleri (zero crossing dedectors) de kullanılır. Motor kontrolünde, rotor pozisyonun algılanması için, hangi algılama elemanın seçileceğine karar vermek amacıyla bazı kriterlerin değerlendirilmesi gerekir. Bu kriterler; çevre koşulları, rotorda açısal olarak yer değiştirmenin büyüklük derecesi, algılayıcı için ayrılan mesafe, kontrolden beklenen hassaslık ve doğruluk derecesi, algılayıcı elemanın çekmesi beklenen en fazla güç ve algılayıcı elemanın seri biçimde üretilebilme durumu olarak sayılabilir [31].

A. Alan Etkili Sensör (Hall Effect Sensor) Kullanımı:

Alan etkisi sensörler, manyetik alanın algılanmasında kullanılır. Dr. Edwin Hall tarafından ilk defa olarak 1879 yılında alan etkisinin varlığı keşfedildi. Dr. Hall, altından yapılmış ve içinden geçen ince bir altın plakanın bir yüzeyine, dik bir manyetik alanı olacak şekilde bir mıknatıs yerleştirdiğinde, plakanın diğer tarafında potansiyel bir fark oluştuğunu keşfetti. Oluşan bu potansiyel fark (Hall Gerilimi), bir iletkenin geçebilecek akım ve o iletkenin oluşabilecek manyetik akı ile orantılı olmaktadır. Bu olay da, alan (Hall) etkisinin varlığını göstermektedir. Üzerinden akımın geçtiği bir ince plakanın çıkışındaki uçlar, mevcut manyetik alana dik bir biçimde bağlanmış durumdadır. Manyetik bir alanın mevcut olmadığı durumlarda bir gerilim (Hall Gerilimi, V_H) oluşmaz [32]. Geçen akım ve mevcut manyetik alanın şiddet ve yönü, oluşacak gerilimin şiddet ve yönünü tayin eder. Akım, kontrolün büyüklüğü olarak anılır ve çıkışta oluşacak gerilimle doğru orantılıdır [9]. Şekil 2.5'de Alan etkili bir sensörün yapısı görülmektedir.

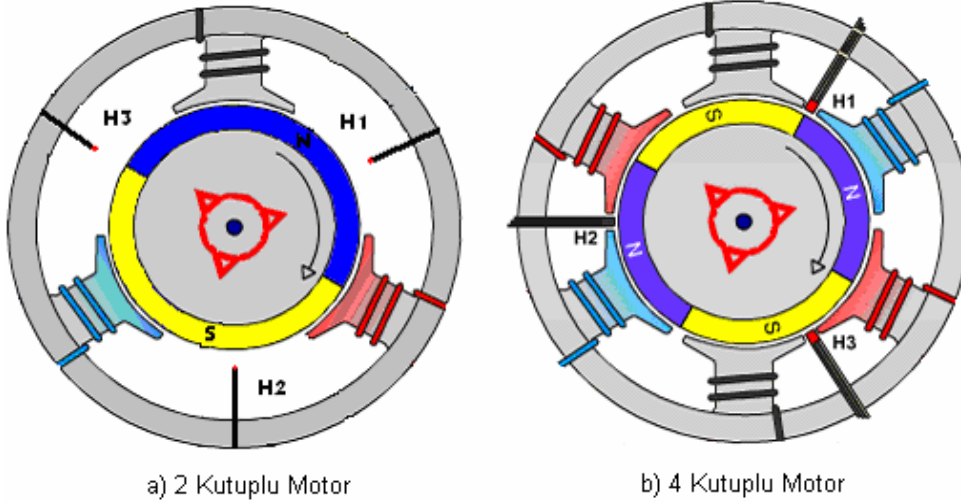
Motorların kontrolünde, hava aralığını ölçmek amacıyla bu sensörler ilk kez 1960 senelerinde kullanılmaya başlanmıştır. BLDC motor rotorunun döndürülebilmesi için

statorun sargılarına bir sıra dahilinde güç uygulanmalıdır. Stator içersine gömülen alan sensörleri sayesinde rotorun pozisyonu algılanır [9].



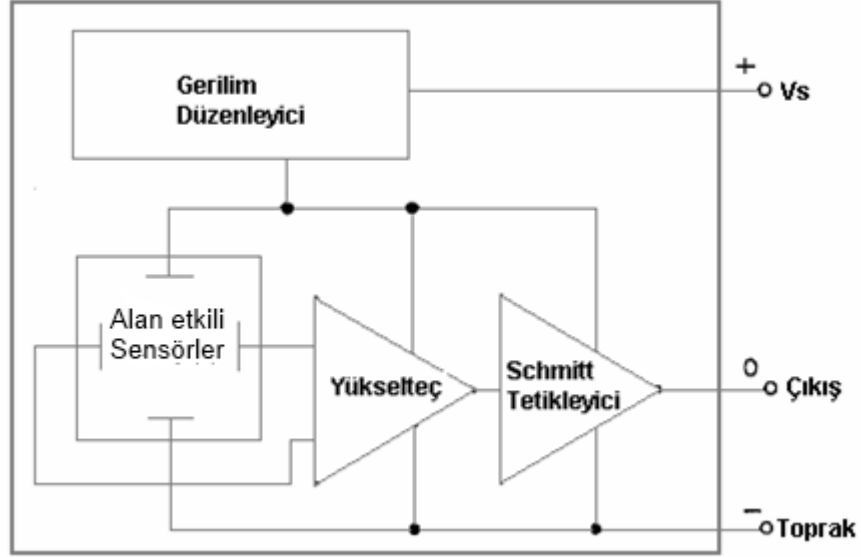
Şekil 2.5 : Alan etkili sensörün yapısı [1].

Statora yerleştirilen alan sensörlerinin yerleri kutup sayısına göre farklılık gösterir. Şekil 2.6'da iki ve dört kutuplu motorlarda alan sensörlerinin nerelere yerleştirildiği örneklenmiştir (H1, H2 ve H3 olarak adlandırılan harfler, Alan (Hall) etkili sensörleri ifade etmektedir).



Şekil 2.6 : İki ve dört kutuplu motorlarda alan etkili sensörlerin durumu [1].

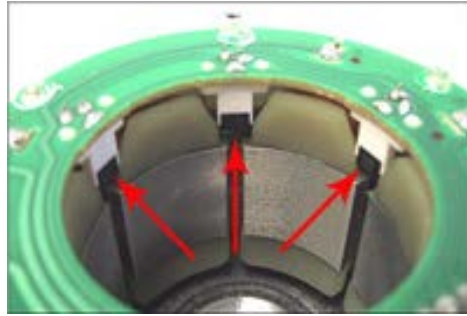
Alan etkili sensörlere, rotorun mıknatısından manyetik akı sağlanır. Ender olarak, motorun miline bağlı olan yardımcı bir mıknatıs tarafından manyetik akı sağlanır. 30 mV gibi küçük bir değere sahip olan Hall Gerilimi bir yükselteç yardımıyla yükseltilir. Şekil 2.7'de böyle bir yapı örneği görülmektedir [32].



Şekil 2.7 : Alan etkili sensör şeması [33].

Alan etkili sensörler, schmitt tetikleyici, yükselteç ve gerilim düzenleyicinin de ilâve olup bir araya gelmesiyle tek bir yapı şeklinde (üstte görüldüğü gibi) günümüzde kullanılmaktadır [32].

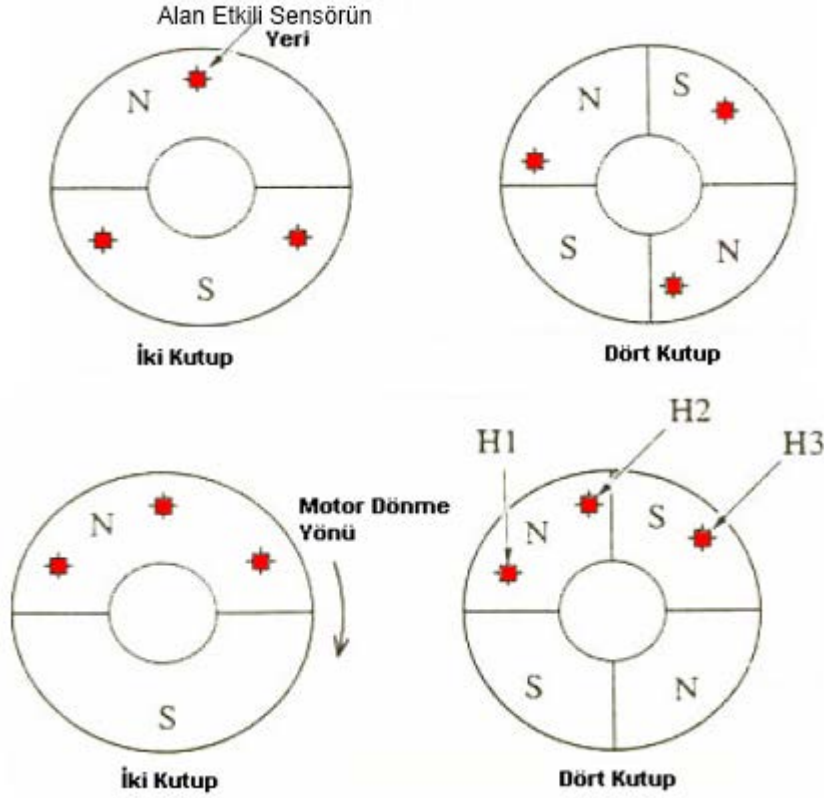
Statorun içerisine alan etkili sensörlerin yerleştirilmesi riskli ve karmaşık bir işlemdir. Çünkü statora yerleştirilen mıknatıslardan dolayı yanlış bir sinyal üretilirse, rotorun pozisyonu da yanlış olarak tespit edilebilir. Şekil 2.8'de motor içerisine yerleştirilen alan etkili sensörler görülmektedir [34].



Şekil 2.8 : Motor içindeki alan etkili sensörlerin konumu [33].

Alan etkili sensörlerin seri üretime olan uygunsuzluğu, motor içerisine gömülmesi zarureti, sıcaklığa olan hassasiyeti ve sınırlı bir çözünürlüğe sahip olması olumsuz taraflarıdır. Bununla beraber yapısının basitliği ve ucuzluğu dolayısıyla günümüzde yaygın bir kullanıma sahiptir [34].

Şekil 2.9'da Alan etkili sensörlerin motorlara yerleşim şekilleri gösterilmiştir.



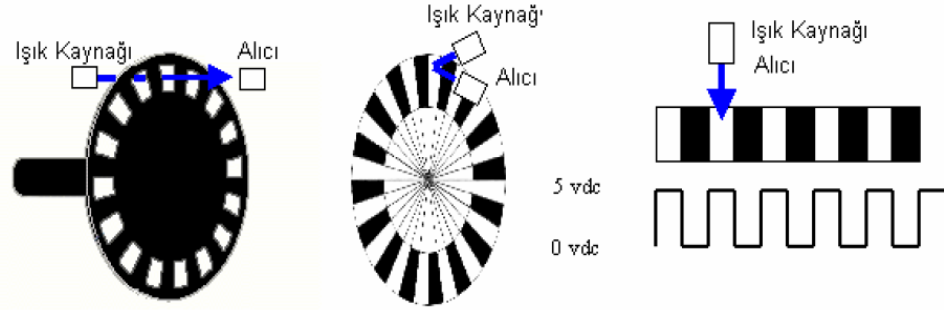
Şekil 2.9 : Alan etkili sensörlerin yerleşim şekilleri [33].

Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi, alan etkili sensörler, 60° ya da 120° aralıklarla motorların statorlarına yerleştirilir [33].

B. Optik Sensör (Encoder) Kullanımı:

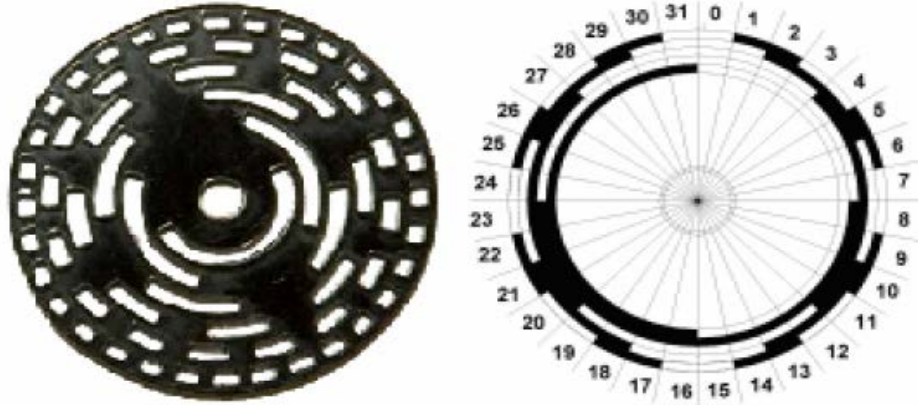
Optik sensörler kullanılarak rotorun konumu, hassas olacak şekilde açısal olarak belirlenir [1]. Optik sensörlerin çalışma prensibi; biri sabit, diğeri de hareketli olan iki diskin bir ışık kaynağından gönderilen ışığı geçirip geçirmediği ve doğrusal veya açısal olarak yer değiştirmenin algılanması esasına dayanır. Gönderilen ışın bir demet halinde, %50 geçirgenliği olan bir durgun diskten geçip diğer diske yani hareketli olana erişir. Hareketli diskten geçmiş olan ışık demeti, ışığa duyarlı bir yüzeye sahip optik sensörün yüzeyine odaklanır ve bu sayede elektriksel bir işarete dönüşmüş olur. Hareketli diskte mevcut olan aralıkların darlık derecesinin artışı, hareketin algılanma hassasiyetini de artırır [9].

İki çeşit encoder tipi vardır. Biri artırımsal ya da artımlı (incremental) algılayıcı, diğeri ise mutlak algılayıcıdır. Artımlı algılayıcıların sayısal çıkışı bir bitliktir. Bu algılayıcının çıkışları, kullanılacak bir elektronik devre ile sayılacak, bu da motorun hızı ve konumu hakkında bilgi verecektir [9]. Şekil 2.10'da Artımlı bir encoder gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Artımlı (artırımsal) encoder [33].

Belirgin bir noktaya göre motorun hız ve konumunu belirleyen algılayıcılara mutlak algılayıcılar denir [9]. Mutlak algılayıcıda, mil konumu ile alâkalı bir tek dijital sinyal üretilmektedir. Mildeki her bir konum bir dijital desene sahiptir. İkilik bir sayı düzeninde olan bu dijital desen içerisindeki bitler, çözünürlüğü oluşturur. Dijital desen, disk üzerinde mevcut olan her bir dairesel iz veya sıradır. Bu desen, $2^8=256$ değişik konum disk üzerinde belirtebilir. Örneğin, 10 ize sahip bir dijital desen $2^{10}=1024$ konum belirtir [33]. Şekil 2.11’de mutlak encoder gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Mutlak encoder [32].

Optik sensörlerde, açısal hız büyüklüğü, dijital değerdeki çıkış bilgisinden iki değişik biçimde elde edilir.

Birincisi, çıkış darbelerinin sayılması yöntemi kullanılarak : Dijital denetleyicide örnekleme periyodunun esas alınmasıyla, T örnekleme süreci içerisindeki, dijital denetleyicide algılayıcı darbesi sayılıp belirlenir. Örnekleme periyodu T , açısal hız w , örnekleme periyodu içerisinde belirlenen darbe sayısı n , diskteki ızgara sayısı N olarak tespit edildiğinde milin sahip olduğu açısal hız;

$$w = \frac{2\pi.n}{N.T} \quad (2.1)$$

şeklindedir. Bu metot, düşük hız durumunda bilhassa tespit edilen bir hız değerinin altında kati netice vermemesi, dikkat edilmesi gereken bir husustur. [35].

İkincisi, darbe zamanlandırma yöntemini kullanarak : Bir kodlayıcının süresi (bitişik vaziyetteki iki ızgara arasındaki süre), yüksek frekansa sahip saat sinyallerinin kullanılmasıyla ölçülerek belirlenir. Düşük hızlarda doğru bir biçimde ölçme yapabilmek için bu yöntem uygundur. Burada, frekans f , ızgara sayısı N , bir kodlayıcının süresi içerisinde sayılacak saat sinyalleri m olarak tespit edildiğinde milin açısal hız değeri;

$$W = \frac{2\pi \cdot f}{N \cdot m} \quad (2.2)$$

şeklindedir. Bu denklem içerisindeki, diskin bir devri müddetince geçen ortalama süre “ $\frac{N \cdot m}{f}$ ” olarak ifade edilir [36].

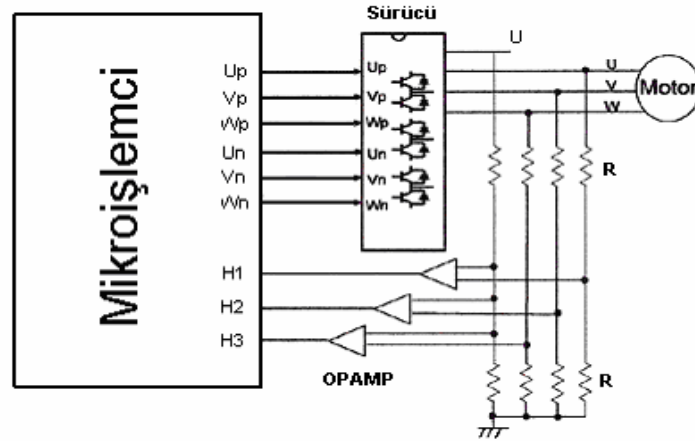
Kısa mesafeler için encoder’dan alınan bilgiler, paralel bir biçimde denetleme birimine, her bir bit değerine karşılık bir kablo olacak şekilde gönderilir. Düşük çözünürlük ve kısa mesafe durumları için paralel olarak yapılan veri aktarımı en uygun yöntemdir. Ancak, çözünürlüğü yüksek olan ve bir adetten daha fazla encoder’ın kullanıldığı robot sistemlerinde maliyet artışına sebep olmaktadır. Özellikle SCADA sistemi uygulamaları için uzak noktalardan veri toplanacaksa seri aktarımı tercih etmek mecburi olacaktır. RS485 ile RS422 ve tipiyle bağlantılı olarak kullanılıyor olan “eş zamanlı bir seri arabirim” de veri değerlerinin iletimi maksimum altı kablo ile yapılır [33].

Artımlı algılayıcılar, mutlak algılayıcılara oranla daha fazla kullanılmaktadır. Çünkü basittir, ucuzdur ve kullanışlı bir yapıya sahiptir [9].

Hassas uygulamalarda encoder kullanımı tercih edilir. Bunun dışında, pahalı olması ve kompleks bir yapıya sahip olmasından dolayı mantıklı bir seçim değildir [1].

C. Sıfır Geçiş Dedektörü Kullanımı:

Statorun sargılarında endüklenen zıt-emk’ne göre, sıfır geçiş dedektörü kullanılarak rotor pozisyonunun belirlenmesi mümkündür. Bu sensör, motor sürücüsüne bağlı olup rotor konumunun tespit edilebilmesi için, stator faz sargılarına uygulanan gerilim ile besleme geriliminin yarı değeri karşılaştırılır. Kendisinin hareketli parçalarının bulunmaması ve motor hareketli parçaları ile bağlantılı olmaması avantaj sağlar. Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı Şekil 2.12’de görülmektedir [1].



Şekil 2.12 : Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı [1].

120° genişliğe sahip akımlar statorun faz sargılarına uygulandığı zaman, üç fazlı BLDC motorda, bir fazdan pozitif, diğer fazdan ise negatif akım akmasına neden olacaktır. İnaktif durumda olan da üçüncü faz olacaktır. İnaktif durumda olan faz, sıfırdan geçiş metodunda zıt-emk'ni ölçmek için kullanılır. İki komütasyon noktasının tam ortası, zıt- emk'nin sıfırdan geçtiği nokta olup bu nokta sıfır geçiş noktası (zero crossing point) olarak adlandırılır. Sıfır geçiş noktası, bir sonraki sargı çiftinin enerjilendirilmesi için referans teşkil eder. Sıfır geçişi olduğunda, bir önceki sıfır geçişine yarı periyotluk bir süre eklenmesiyle, bir sonraki komütasyon anı için kestirimde bulunulabilir. BLDC motorun yüksek hızlı uygulamalarında, bir fazın pasif kalma süresi çok kısa olacağından sıfır geçiş noktasının tayini de bir hayli güçleşecektir. Bu yüzden, bu tip uygulamalar için bu yöntem uygun değildir [20].

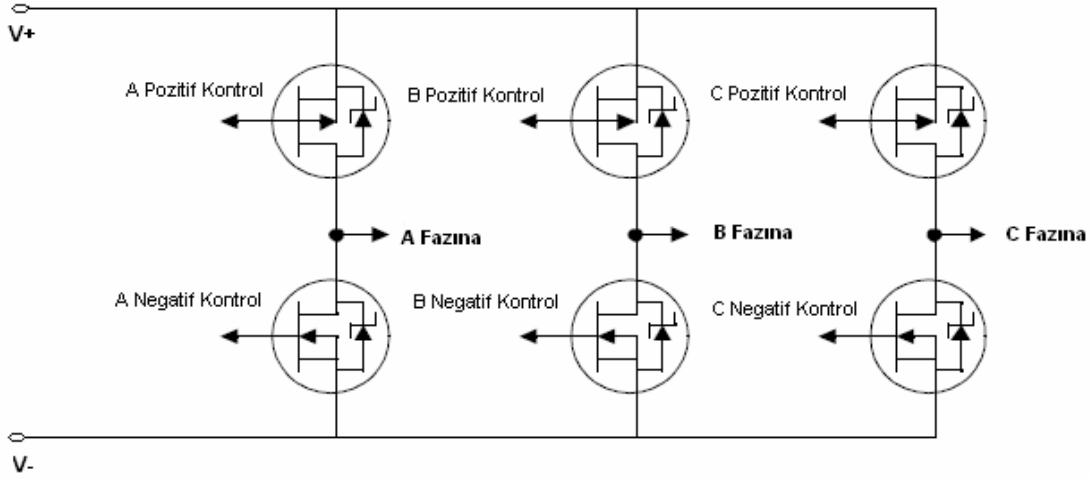
Sıfır geçiş yönteminin haricinde, algılayıcısız çalışmada, Kalman Filtre Teorisi olarak anılan daha güçlü bir yöntem de kullanılmaktadır. Kalman Matematiksel modelinde, motorun hız, konum ve zıt-emk değerleri kullanılır. Bu model ile, ilerleyen zaman adımlarında motor durumunun değişimi için kestirimde bulunulur. Pasif kalan fazın zıt-emk ölçülür ve kestirimde bulunulan fazın zıt-emk ile mukayese edilir. İkisinin arasında ortaya çıkan fark, motor çalışma performansını iyileştirmede kullanılır. Kalman Tekniği ile, sıfır geçiş tahmininin yanı sıra, motor hız ve konum tahmini her bir zaman adımı için yapılır. Böylece, komütasyonun doğruluk derecesi artırılarak daha yüksek bir verim elde edilmesi mümkün olur [20].

2.4.4 Evirici ve Sürücü Katmanı (Güç Dönüştürücüsü)

Bu birimde, motor kontrolünün sağlanmasında kullanılacak gerilim elde edilir. AC/DC çevirici (şebeke bağlantılı sistemlerde), frenleme kısıcısı, filtre ve yarı iletken anahtarların (transistör, mosfet v.b) bir araya gelmesinden oluşan bir evirici

sistemidir. Denetleyici, yarı iletken anahtarları, belirlemiş olduğu anlarda iletim veya kesime sokar. Yarı iletkenlerden oluşan ara birime, anahtar sürücü bloğu denir [2].

Bu katman, stator sargılarından geçen akımın yönünün değişimini, rotor pozisyon bilgisini kullanarak sağlar ve böylelikle rotor dönüşü gerçekleşir. Denetleyici, pozisyon sensörlerinden edindiği bilgiye bağlı olarak eviricideki altı adet yarı iletken anahtara açma ve kapama işareti gönderir [1]. Şekil 2.13'de mosfetlerin kullanıldığı anahtar sürücü bloğu görülmektedir.



Şekil 2.13 : Mosfet'lerle yapılmış sürücü devresi [1].

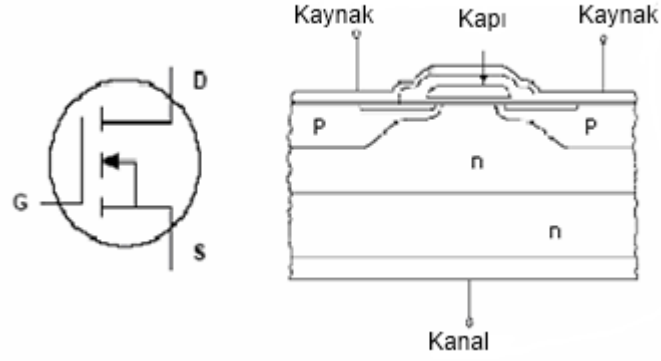
Rotor konumu göz önünde tutularak yarı iletken anahtarlar bir sıra dahilinde tetiklenir. İşlemci sürücünün tetiklenmesini sağlayarak konum sensörlerinden aldığı bilgiye dayanarak bir faza pozitif, bir diğer faza negatif ve üçüncü faza ise gerilim uygulamaz. Bu gerilim uygulaması, sistematik bir şekilde sırayla her faza ayrı ayrı tatbik edilir. Bu şekilde işlemci, bu sürücü yapısıyla motorda bir dönme momenti meydana getirir. Sürücü, motorun performansını belirleyen en önemli elemandır. İşlemci ve anahtarlar da sürücü performansının mertebesini belirler. Anahtarlar, bir sürücünün en önemli elemanlarıdır. Anahtar için eleman seçiminde, anahtarlamamanın hızı ve kayıpları göz önünde tutulur. Mosfet, en yaygın kullanılan elemandır. Fakat , diğer yarı iletken malzemeler de kullanılabilir (Örneğin, transistör, tristör, IGBT vb. gibi) [1].

A. Mosfet:

Geyti, kanal maddesinden Silisyumdioksit maddesi (SiO_2) ile yalıtılmış alan etkili transistörlere (fet "field effect transistors), mosfet transistörler denir. MOS kelimesi, metal oksit semikondüktör kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir. İki

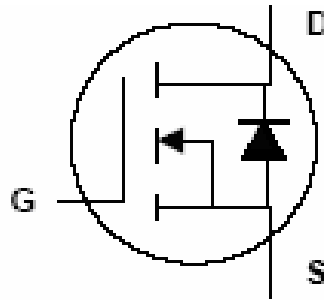
özellikte yapılırlar. Bunlar; azaltan kanallı mosfet (deplasyon tipi), çoğaltan kanallı mosfet (enhensment tipi) [37].

Yüksek hıza sahip anahtarlama elemanlarıdır. Mosfetlerin sembolü ve iç yapısı Şekil 2.14'de görülmektedir.



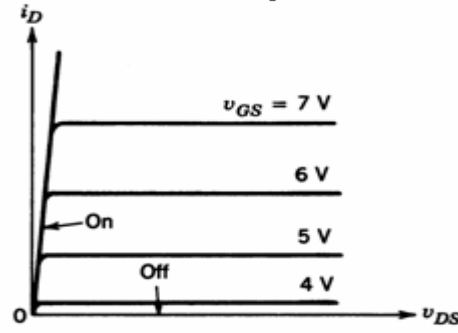
Şekil 2.14 : Mosfet'lerin iç yapısı ve sembolü [1].

Elektrik alanı etkisi, iletme geçmesine sebep olur. Gerekçesi, kapı (gate) ucunun yalıtılmasıdır. Mosfetler kapı akımı çekmezler, bu nedenle sürücülerinin hızları yüksek, yapıları basittir. Mosfetin kanal (drain) ve kaynak (source) uçlarına ters polaritede bir diyot yerleştirilir. Bu diyot anahtarlama esnasında meydana gelecek yüksek gerilimleri önleme amacıyla yerleştirilmiştir [1]. Diyotun yerleştirildiği yapı Şekil 2.15'de görülmektedir.



Şekil 2.15 : Güç mosfetinin sembolü [1].

Mosfetlerin karakteristik eğrisi Şekil 2.16'da görülmektedir.



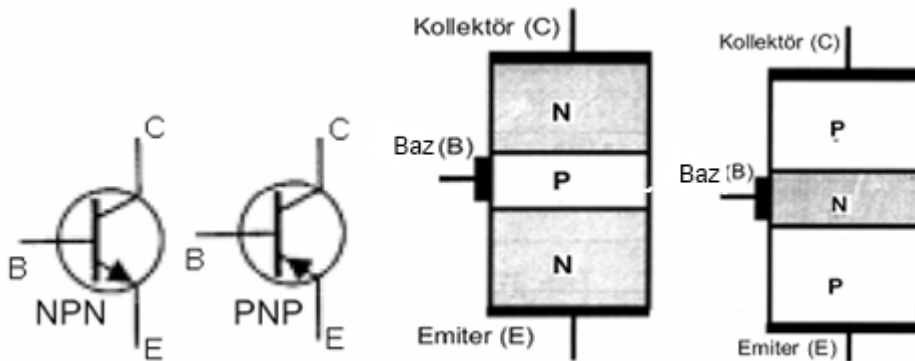
Şekil 2.16 : Mosfetlerin karakteristik eğrisi [1].

Mosfetlerin kaynak ucunun şasesi ile kapı uçları arasında bir direnç bağlanmış olması gerekir. Bu yapılmadığında, kapı ucuna bir gerilimin uygulanmadığı durumda da mosfetin iletim durumu sürecektir [1].

B. Transistörler:

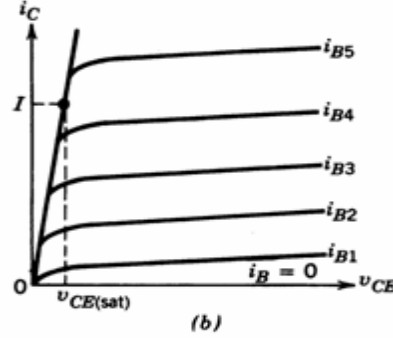
Transistör sözcüğü, transfer-rezistör sözcüklerinden türetilmiştir. Transistör, emetör ve kolektör olarak isimlendirilen iki uç arasındaki direncin, baz (beyz) denilen ortadaki uca uygulanan akım değeriyle azaltılıp, yükseltilmesi demektir. Yapım şekillerine göre dört gruba ayrılırlar. Bunlar; nokta temaslı transistörler, yüzey temaslı transistörler, alaşım yöntemi ile yapılan transistörler ve alaşımlı yayılma yöntemi ile yapılan transistörlerdir. Yüzey temaslı transistörler, PNP ve NPN olmak üzere iki türdedir [37].

Transistörler keşfedilen en eski yarı iletken anahtar tipidir. İletime geçmesi baz akımı ile olur, iletime geçmesi kolektör ile emiterin arasının kapanması yani kapalı bir anahtar konumunda olması demektir. Transistorün kesim durumuna geçmesi için bazından geçen akımın kesilmesi gerekir. Kesime geçince kolektör ile emiter arası tekrar açılır [1]. Transistörlere ait semboller ve transistörlerin iç yapısı Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.17 : PNP ve NPN tipi transistörlerin sembolü ve iç yapısı [1].

Transistörler, iki P tipi yarı iletken tabaka arasına yerleştirilen bir N tipi tabakadan oluşur ki, bu yapı NPN yapısıdır. Bir de, iki N tipi yarı iletken tabaka arasına yerleştirilen bir P tipi tabakadan oluşur ki, bu yapı da PNP yapısı olarak anılır [1]. Transistörlerin karakteristik eğrisi Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



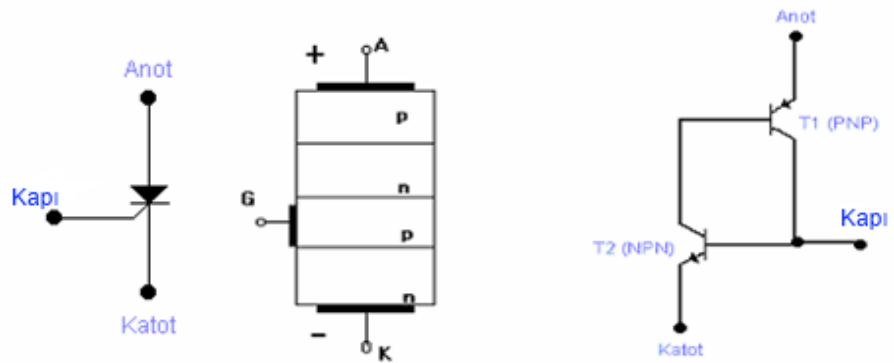
Şekil 2.18 : Transistörlerin karakteristik eğrisi [1].

En eski anahtar olmalarına karşın, günümüzde halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni, yüksek akıma ve güce dayanabilme özelliğidir [1].

C. Tristörler:

İlk tristör 1957'de üretilmiştir. Tristörler, tek yönde akım geçirdiklerinden redresör gibi kullanılabilirler. Büyük akımların küçük akımlarla kontrolünü sağlarlar. Bu nedenle tristörlere Silikon Kontrollü Redresör (S.C.R.) de denir [37].

Tristör 4 farklı dozdaki silisyum kristalinin yan yana gelmesinden oluşmuştur. Tabakalar anottan katoda doğru, pnpn sırasını izler [38]. Bu yapı Şekil 2.19'da görülmektedir.



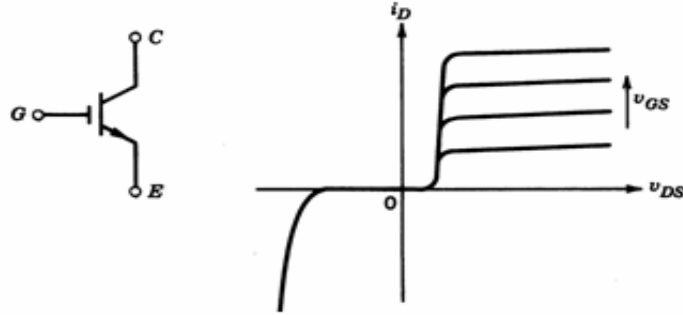
Şekil 2.19 : Tristörün sembolü, yapısı ve tristör eşdeğer devresi [1].

A-K yönü tristörün geçirme, K-A yönü ise kapama yönüdür. Kapı (Gate "G")'dan K'ya doğru bir kumanda akımı geçirilerek tristör iletken hale getirilir. Çeşitli tetikleme

devreleri ile ve bu devrelerde kullanılan elemanların değerlerinin değişimiyle tetikleme açıları değiştirilerek gerilim ve akım ayarı sağlanır [38].

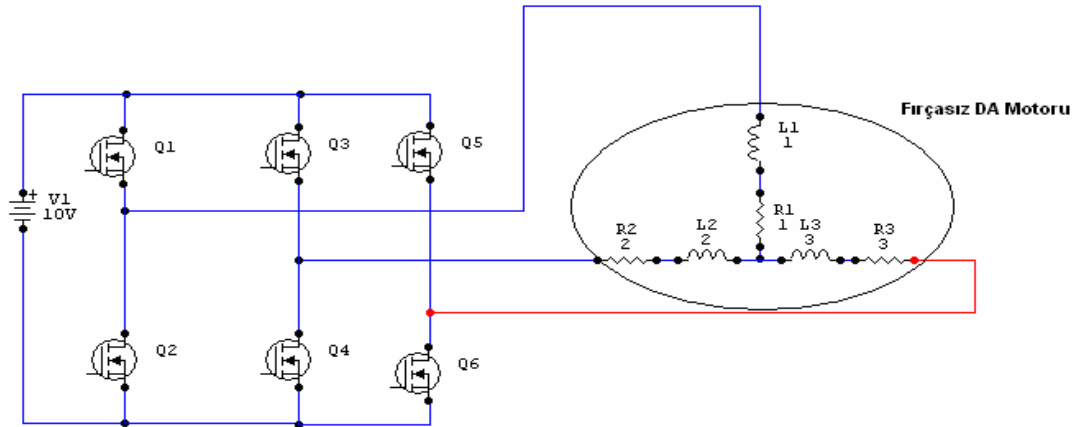
D. IGBT:

İngilizce, Kapı İzoleli Bipolar Transistör (Insulate Gate Bipolar Transistor) kelimelerinin kısaltılmış biçimidir. Bipolar transistörler ve mosfetlerle karakteristikleri aynıdır. Transistörlerde, anahtarlama hızı ve iletim kayıpları düşüktür. Mosfetlerde ise, iletim kayıpları fazla, anahtarlama hızı yüksektir. Bu iki yarı iletken anahtarın dezavantajlarını minimize etmek için geliştirilen IGBT'lerde, anahtarlama hızı neredeyse mosfetlere yakın olup ve aynı zamanda da bir transistör karakteristiklerine sahiptir. IGBT de diğer yarı iletken anahtarlar gibi, kapı ucuna tatbik edilen tetikleme (ateşleme) gerilimi ile iletim durumuna geçerler [1]. IGBT'nin sembolü ve karakteristik eğrisi Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20 : IGBT'nin sembolü ve karakteristik eğrisi [1].

IGBT, mosfetlere nazaran daha yavaş, fakat transistörlere göre daha hızlı anahtarlama özelliğine sahiptir [1]. Mosfetlerle oluşturulan bir sürücü devresi Şekil 2.21'de verilmiştir

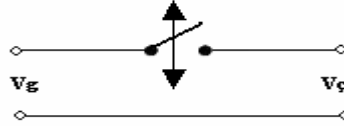


Şekil 2.21 : BLDC motorunun sürücü devre ile bağlantısı [1].

Büyük güçlü olmayan BLDC motorlarının sürücü sistemleri için mosfetler en iyi seçimdir [1].

E. PWM:

Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation “PWM”) ile anahtarlama işlemleri yüksek bir hızda yapılır ve elektrik enerjisinin kullanımında verimlilik sağlanır [39]. Çıkıştaki gerilimin ortalama değeri, devreye bağlanmış olan basit bir şekildeki anahtarla değiştirilir. Bu yapı Şekil 2.22’de gösterilmiştir.

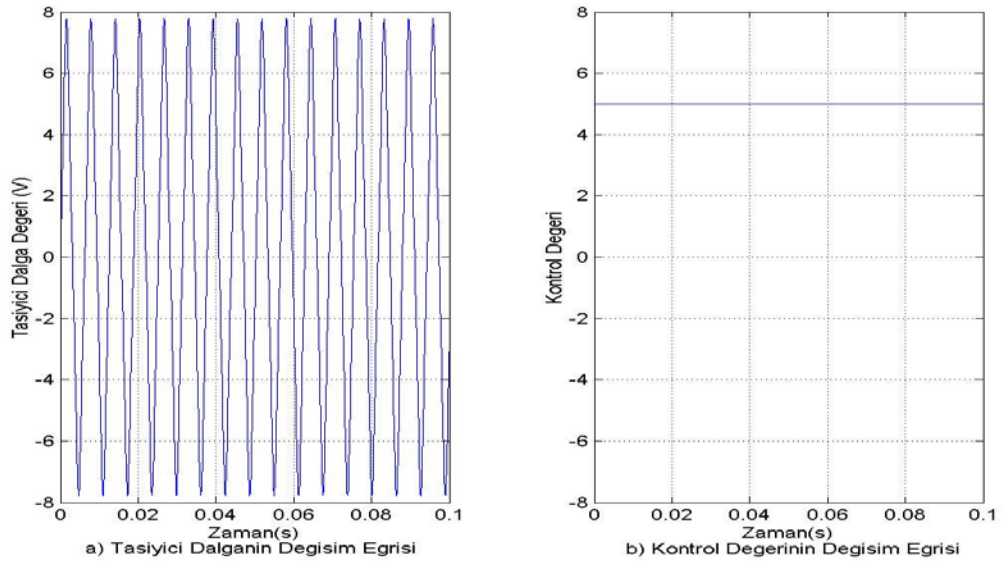


Şekil 2.22 : PWM yönteminin basit anahtar yapısı [1].

Doğru akımda, ortalama gerilim değeri; alternatif akımda etkin gerilim değeri, baz alınır. PWM metodunda, çıkış geriliminin ortalama gerilim değeri anahtarların açık ve/veya kapalı kalma sürelerinin değiştirilmesiyle elde edilir. PWM’de oran-görev periyodu (D) değeri, aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır;

$$D = \frac{V_{\text{ç}}}{V_g} = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} \quad (2.3)$$

şeklindedir. PWM’de taşıyıcı ve kontrol işaretinin değişim eğrileri Şekil 2.23’de gösterilmiştir.



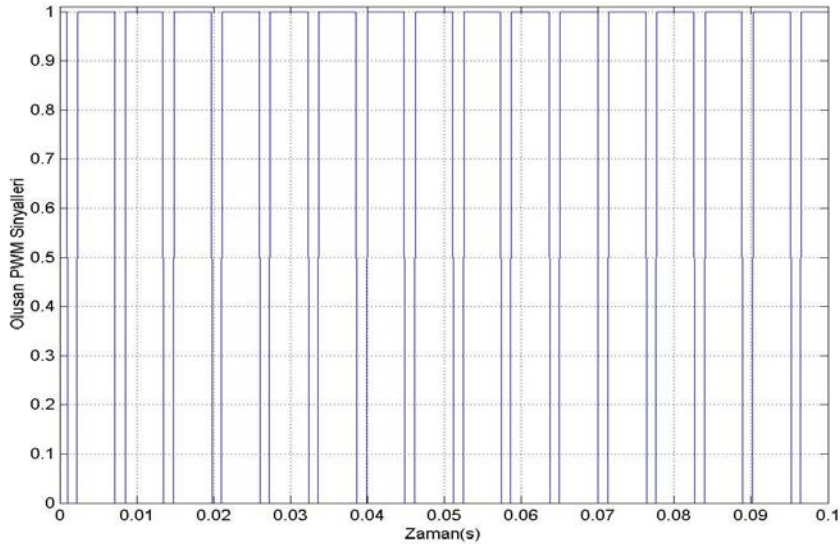
Şekil 2.23 : Taşıyıcı sinyal ve kontrol sinyalinin değişimi [1].

Bu yöntemle, gerilim kontrolü oldukça geniş bir aralıkta gerçekleştirilebilir. Birtakım elektronik devre elemanlarının kullanımıyla değiştirilen anahtarlama süresi ve yarı iletken malzemelerle yapılan anahtarlama işin özünü teşkil eder. İki gerilimin karşılaştırılmasıyla PWM dalga biçimleri meydana getirilir. Bunlar, kontrol sinyali (V_C), diğeri de taşıyıcı sinyal (V_T)'dir. Kontrol sinyali kontrol işlemini, taşıyıcı sinyal ise darbe üretimini sağlar. Taşıyıcı sinyal üçgen veya testere dişli dalga biçimindedir. Görev periyodu, taşıyıcı sinyal frekans ve genliği sabit tutulup kontrol sinyali geriliminin değiştirilmesiyle ayarlanır. Yarı iletken anahtarların kapalı ve açık olması esnasındaki süreyi tayin etmek bir hayli güçtür. Bu nedenle, görev periyodunun hesaplanmasında, kontrol sinyalinin değiştirilebilir ve ölçülebilir olmasından dolayı, maksimum taşıyıcı sinyale oranı ile hesaplanır [1].

$$D = \frac{V_C}{V_{T \max}} \quad (2.4)$$

şeklindedir. Karşılaştırma işleminden sonra, meydana gelen darbeler Şekil 2.24'de görülmektedir. Taşıyıcı sinyalin maksimum ve minimum değerleri arasında kontrol sinyalinin büyüklüğü değiştirilir;

$$V_{T \min} \leq V_C \leq V_{T \max} \quad (2.5)$$



Şekil 2.24 : Taşıyıcı sinyal ile kontrol sinyalinin karşılaştırılması sonucu oluşan darbe sayısı [1].

PWM yönteminde gerilim kontrolü, öteki gerilim kontrol ve ayar yöntemlerine göre hızlı bir şekilde sağlanır. Bu kontrol esnasında kayıplar minimum düzeyde olur. Böylece kontrol, verimli ve hızlı bir şekilde gerçekleşir. Şebekenin üzerinde harmonikler oluşturması dezavantaj teşkil eder. Oluşan harmonikler sebebiyle,

şebeke gerilimi üzerinde yüksek frekanslı dalgalanmalara rastlanır ve bununla bağlantılı olarak yüksek frekansa sahip gürültü, çıkış akım ve geriliminde görülür [1].

2.4.5 Denetleyici (Kontrolör)

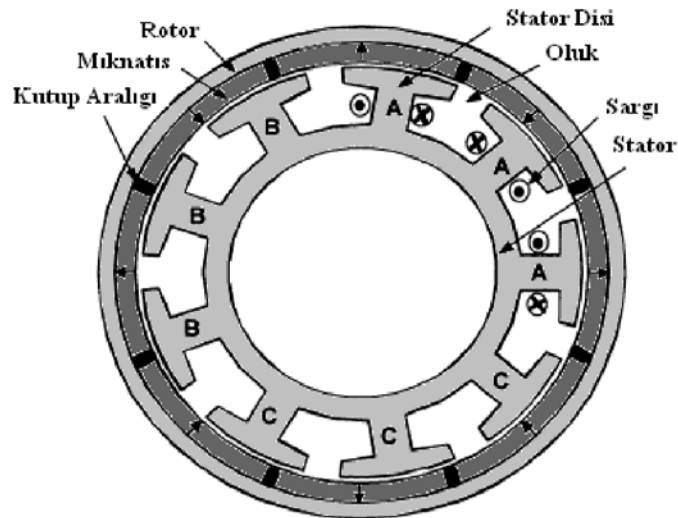
Referans girişi ile pozisyon algılayıcısından aldığı bilgiyi kullanıp ürettiği kontrol sinyalleriyle motorun istenilen çalışma şartlarını gerçekleştiren bir birimdir. PWM sinyallerinin durumu, denetleyicinin ürettiği kontrol sinyalleriyle belirlenmiş olan kontrol algoritmasına göre kontrol edilir. Denetleyici ile temel olarak hız, akım ve/veya pozisyon döngüsünün kontrolü yapılır. Denetleyici, hem donanım ve hem de yazılım yapılarından oluşur [2].

2.5 Fırçasız DC Motor Çeşitleri

BLDC motorlar, rotor yapısına göre üç çeşittir. Birinci tip dış rotorlu, ikinci tip disk tipi, üçüncü tip ise iç rotorlu motorlardır [9]. Bu sınıflandırmanın dışında BLDC motorlar, sensörlü veya sensörsüz olarak da kategorize edilebilir [40].

2.5.1 Dış Rotorlu Fırçasız DC Motorlar

Rotor yuvarlağı stator sargısının dışında olup mıknatıslar bu yuvarlağın içerisine yerleştirilir. Şekil 2.25’de de görüldüğü gibi iç kısımda bulunan statorda endüvi sargıları, dış kısımda ise daimi mıknatısların bulunduğu rotor dönmektedir. Fırçalı bir DC motorla, stator ve rotorun yapısı örtüşmektedir. Bu tipte, mıknatıslar rotora gömülü bir vaziyette yerleştirilir.



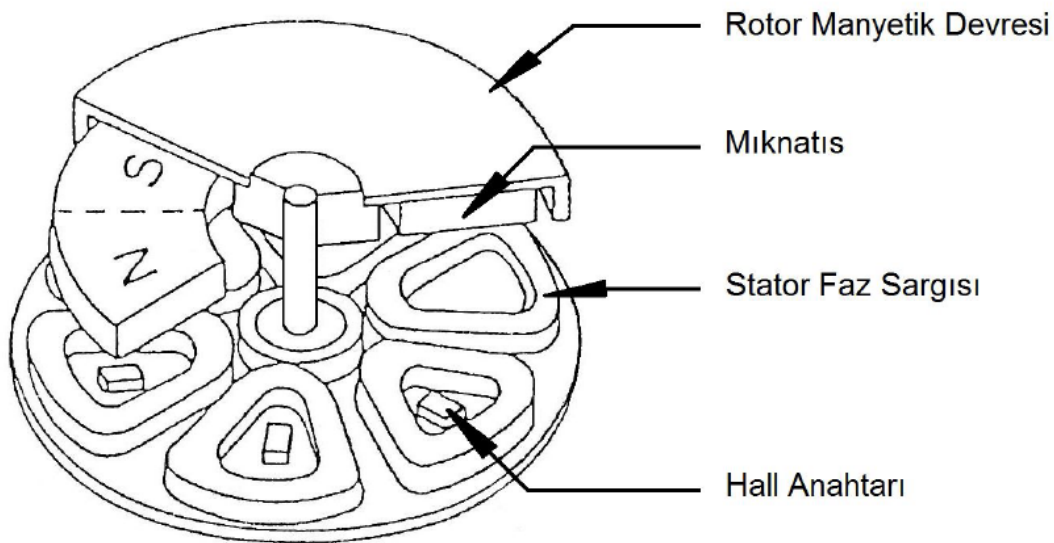
Şekil 2.25 : Dış rotorlu BLDC motor yapısı [31].

Bu da savrulma durumuna karşı rotorun oldukça dayanıklı olmasını sağlar. Seri üretim durumunda, dış yüzeyde bulunan stator sargıları sarım işleminin daha kolay yapılabilmesini sağlar. Rotorun dışta olup yüksek bir kütleye sahip olması, mıknatısların rotora yerleştirilmesi esnasında bir denge sorunu oluşturabilir. Üretimdeki maliyeti düşüren iki unsur vardır. Bunlar; birincisi bu tip motorlarda, diğer çeşitlerin aksine tek rulman ve yatak kullanımı söz konusudur. Diğer nokta, rotorun dışta olması mıknatıs alanını büyütmede ve bu nedenle aynı manyetik alan etkisi daha ucuz mıknatıslarla elde edilebilmektedir. Yüksek eylemsizliğe sahip olmaları nedeniyle, mevcut hız değerlerini, yüklerinin ani değişimi durumlarında muhafaza ederler. Bu özellikleri nedeniyle çamaşır makinası ve fan uygulamalarında oldukça tercih edilmektedir [31].

Bu tip motorlarda bobin sargılarının merkezde olması motorun soğutulma işlemini güçleştirmektedir. Dış rotorlu BLDC motorlar, outrunner veya outline BLDC motorlar adıyla da anılmaktadır. Helikopter, uçak v.b. gibi uçan araçlarda, bu tip motorların torklarının daha yüksek, hızlarının ise daha düşük değerde olmaları nedeniyle tercih edilmektedir [40].

2.5.2 Disk Tipi Fırçasız DC Motorlar

Çelikten yapılan ve iki yüzeyinden birine mıknatıs yerleştirilen bir disk rotoruna sahiptir. Rotor mıknatıslarına karşılık olarak stator da uyarma sargıları mevcuttur. Baskı devre şeklinde imal edilen sargılar da vardır [31]. Şekil 2.26'da disk tipi bir BLDC motor yapısı görülmektedir.

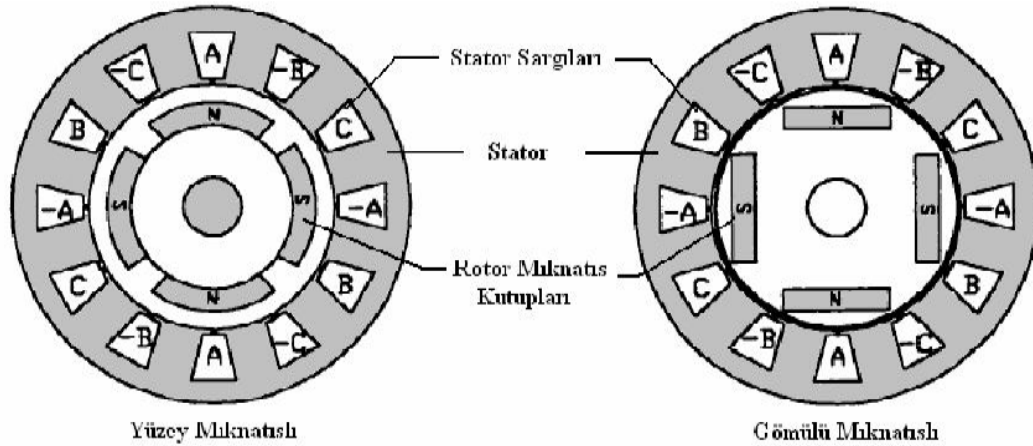


Şekil 2.26 : Disk tipi BLDC motoru [31].

Düşük hız uygulamalarında, kapalı çevrim kontrolü ve hız geri beslemesine sahip bir sistem kullanılarak çok yumuşak bir performans elde edilebilir. Kullanıldığı hız değerleri 1000 rpm üzerine çıkarsa, yapısındaki rotor ve stator disk çeliklerinde ısınma sorunu baş göstermektedir. Bunun önüne geçmek için yüksek hızlara çıkıldığında ek tedbirler alınması gerekir. Pek tabii olarak bu da, maliyeti arttıracaktır. Bu sonuçtan yola çıkılarak, disk rotorlu BLDC motorları düşük hız ve güç uygulamaları için tercih etmek doğru bir yaklaşım olacaktır. Eğer, düşük hız fakat buna mukabil yüksek güç aranıyorsa, tercih edilen motor, yüksek kutup sayısına haiz iç rotorlu BLDC motor olmalıdır [31].

2.5.3 İç Rotorlu Fırçasız DC Motorlar

İç rotorlu BLDC motorlar, yapı olarak asenkron ve senkron motorlara çok benzemektedir. Dıştaki stator, tıpkı asenkron motorlarda olduğu gibi endüvi sargıları bulunmaktadır [19]. Şekil 2.27’de İç rotorlu, yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı bir BLDC motorun yapısı verilmiştir.

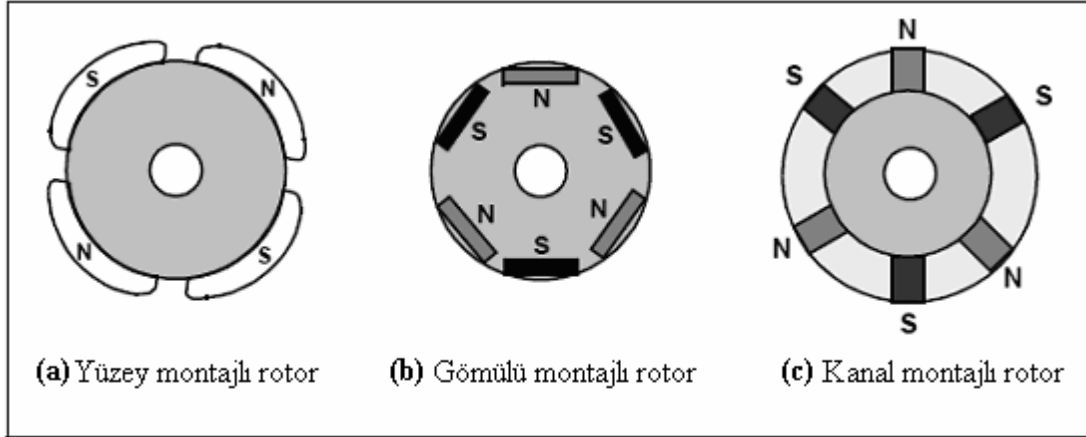


Şekil 2.27 : İç rotorlu BLDC motorların yapısı [19].

Bu tip motorlar, dış rotorlu BLDC motor ile mukayese edildiğinde iki dezavantaja sahiptir. Birincisi, yüksek hızlara çıkıldığında rotordaki mıknatısların stabilizasyonunu muhafaza edebilmek için rotordaki montajlarına dikkat etmek gerekir. Montajın sağlamlığının sağlanabilmesi için, yüksek elektriksel direnci olan metal şeritler ile rotorlar sarılırlar. İkincisi, statorun sarımı, seri üretim olarak düşünüldüğünde işçiliği daha zor ve maliyetlidir. Bu dezavantajlarına rağmen, dış rotorlu BLDC motorlara göre sargının dışarıda olması bu tip motorların daha kolay soğumasını mümkün kılar. Bilhassa yüksek performansa haiz hız ve konum kontrolünün gerektiği kompresör ve servo motor uygulamaları için tercih edilmektedir. Geniş bir uygulama alanına sahiptir [19].

İç rotorlu BLDC motorlar, inrunner veya inline BLDC motorlar olarak da anılmaktadır. Hızları, dış rotorlu BLDC motorlara nazaran daha yüksektir. Bununla beraber, dış rotorlu yapıya göre, volt başına tork üretimi daha düşüktür. Dış görüntü olarak, fırçalı DC motorlara benzemektedir. İçte yer alan rotora sahip olması nedeniyle, kullanım kolaylığına sahiptir [40].

İç rotorlu BLDC motorlar, mıknatısların rotor yapısına monte edilme şekline göre sınıflandırılırlar. Şekil 2.28’de bu şekilde sınıflandırılmış rotor çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.28 : BLDC motorların rotor çeşitleri [28].

A. Yüzey mıknatıslı, iç rotorlu fırçasız DC motorlar:

Rotor dış yüzeyine daimi mıknatısların yerleştirildiği yapıdır. Bu yapı, stator kutuplarına daha yakın bir mıknatıs grubunun olduğu yapı olup, yüksüz durumda daha küçük bir momente sahiptir. Rotorlardaki dış yüzeye tutturulan daimi mıknatıslar, motorun yüksek hızlara çıkmasında parçalanabilme riski vardır. Rotor pozisyonu ile etkin hava boşluğu değiştiğinden dolayı bir miktar endüktans değişimi söz konusudur [9].

B. Gömülü mıknatıslı, iç rotorlu fırçasız DC motorlar:

Rotorun iç tarafına, dikdörtgen bir kesite sahip her bir daimi mıknatısın yerleştirildiği bir yapıdır. Kullanımı pek yaygın değildir. Yapısı gereği, motorun yüksek hızlara çıktığı uygulamalar için uygundur. Rotor pozisyonuna bağlı olan endüktans değişimi önem arz etmeyecek derecede küçük bir değerde olan bir yapı biçimidir [9].

C. Kanal mıknatıslı, iç rotorlu fırçasız DC motorlar:

En iyi bir rotor tipi olup dikdörtgen kesitlere sahip daimi mıknatısların, rotorun yüzeyine açılmış olan kanallara yerleştirildiği yapı türüdür [9].

2.6 Fırçasız DC Motorların Olumlu ve Olumsuz Yönleri

BLDC motorların olumlu yönleri şunlardır:

- Makine uzunluğu, BLDC motorların kollektör ve fırçalara sahip olmamaları nedeniyle DC ve asenkron makinalara nazaran daha kısadır. Böylece aynı değere sahip moment, daha da küçük endüvi yüzeyi ile elde edilmiş olur. Aynı kazançla, daha yüksek hızlara çıkılarak, yüksek hızlı uygulamalarda kullanılabilme imkanı oluşur ve de atalet (eylemsizlik) momenti de azaltılmış olur [8].
- BLDC motorların hız kontrol olanakları çok iyidir. Asenkron motorlara nazaran, kontrol edilebilen hız aralıkları daha geniştir [8].
- Küçük bir boyuta karşın yüksek bir moment üretebilirler. DC ve asenkron motorlara nispetle BLDC motorların, akım/döndürme momenti, ağırlık/güç olarak daha yüksek oranlara sahiptir [8].
- Fırçalı DC motorların ihtiyaç gösterdiği uyarma akımlarına, BLDC motorlar ihtiyaç göstermezler [8].
- Sağladıkları çalışma ortamı güvenilirdir [8].
- Kolay bir şekilde soğutulurlar [8].
- Sessiz bir çalışma ortamı sağlarlar [8].
- Çok yüksek bir verime sahiptirler. Aynı soğutma ve boyut ile BLDC motorların, asenkron ve DC motorlara nazaran sahip oldukları güç faktörü ve verim daha iyidir. %20 ilâ %50 arasında değişen değerlerde, diğer motorlara nispetle daha fazla çıkış gücüne sahiptir [8].
- Fırçalı DC motorlardaki fırça sistemine sahip olmadığından dolayı, fırçalar nedeniyle oluşan karbon tozlarını içermezler [8].
- Yüksek moment-hacim oranını yani küçük hacimle yüksek moment üretimini sağlar ve bu sayede daha az bakır kullanımı imkânı verirler. DC motorlardaki kollektör ve fırça düzenekleri olmayışı nedeniyle tehlikeli ortamlarda çalışabilme ve bakım gereksinimini azaltma imkânı sağlarlar [26].
- Öteki motorlara nazaran kontrolünün çok kolay olmasının nedeni, motor akımı ile doğrudan orantılı olan bir çıkış momentine sahip olmasıdır [31].

Bütün bu olumlu özelliklere rağmen bazı olumsuz özelliklere de sahiptir:

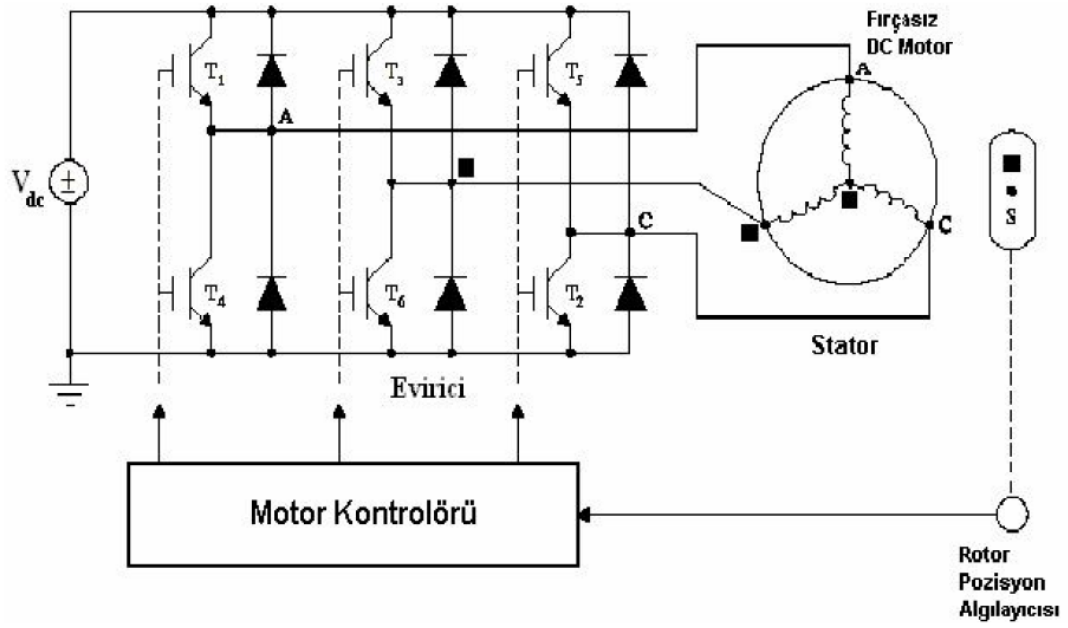
- Harici bir güç elektroniği ve arzu edilen çalışma için rotor konum bilgisi gerekliliği, Alan (Hall) etkili pozisyon sensörlerine olan ihtiyacı söz konusudur. Pozisyon

sensörü kullanılmadığı durumlara algılayıcısız çalışma durumu denir. BLDC'nin algılayıcısız olarak çalışması için birtakım ek algoritmaların kullanılması gereklidir. Bu yöntem de, diğerine göre daha pahalı bir yöntemdir [26].

- Atmosferik ve termik etkiler, daimi mıknatısların uzun süre kullanılmaları neticesinde mıknatısiyet özelliklerinin bozulmasına neden olur [31].
- Daimi mıknatıslı motorların yüksek hızlara ulaşamamasının nedeni, bu motorlar sabit bir uyarma sağlarlar ve mıknatısları arasındaki montaj mekanik gerilim sınırlandırmasına sebep olur [31].
- İnverter hataları, BLDC motorların sürücülerinde oluşabilir. Rotordaki mevcut daimi mıknatıslardan dolayı, inverterde bir kısa devre meydana gelirse, BLDC motorlarda mühim derecede risk teşkil eder. Bunun nedeni, dönmekte olan rotorun her daim enerji vermesi ve sürekli olarak kısa devre olan sargılarda bir emk'ine sebep olmasıdır. Böyle bir durum, bu sargılarda çok büyük değerlerde bir akımın dolaşımına ve bu neticede de oluşan büyük bir momentle motorun durdurulmasına neden olur [31].
- Günümüzde, kontrol tekniklerinin ve teknolojinin düzeyinin ilerlemesi ile BLDC motorlarının kullanımı hem artmış, hem de süregelen dezavantajları da elimine edilmeye doğru yol almıştır [9].

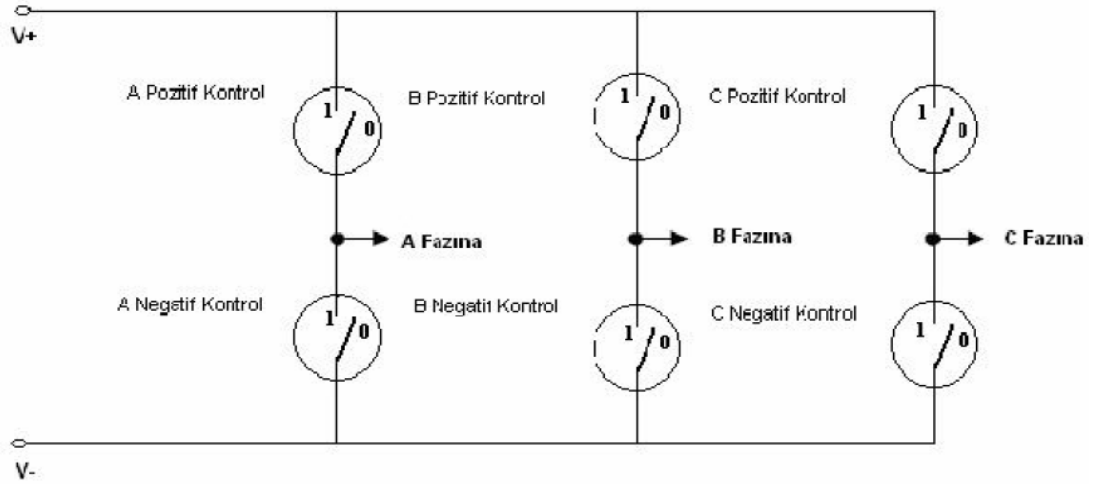
2.7 Fırçasız DC Motorların Çalışma Prensibi

BLDC motor, elektronik komütasyonun gerçekleşebilmesi için rotor pozisyonunun belirlenmesi icap eden, sabit mıknatıslı bir rotora sahip olan, bir nevi senkron motordur. Bir evirici üzerinden beslenen stator sargıları vardır. Evirici bir akım kaynağından beslenir. Rotorun konumu ile senkronize bir şekilde, eviricideki güç anahtarları sırayla anahtarlama yapar. Rotora yerleştirilmiş bir konum algılayıcı ile veya konum algılayıcı kullanılmaksızın yani algılayıcısız bir kontrol algoritmasıyla, hangi güç anahtarının açma veya kapama yapması gerektiği belirlenir [9]. Şekil 2.29'da Rotor pozisyonu geri beslemesine sahip bir BLDC motor sürücü sisteminin klasik kontrol devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.29 : Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin devre şeması [22].

Rotor konumunun bilgisi göz önünde tutularak, stator sargılarındaki akım yönü değiştirilir. Bu işlem, Şekil 2.30'daki anahtarlar kullanılarak yapılır.



Şekil 2.30 : Sürücü anahtarların bağlanması [1].

Statordaki sargılara uygulanan gerilim ve akımın yönü ile rotordaki dönme hareketi, anahtarların kontrol edilmesiyle sağlanır. Bu şekilde, statordaki sargılarda manyetik alan kutupları oluşturulmuş olur. Statorda ve rotorda oluşan manyetik alan kutupları, zıt işaretli kutupların birbirini çekmesi ve aynı işaretli kutupların birbirini itmesi prensibine göre oluşan etkileşim sonucunda bir dönme momenti meydana gelir. Oluşan bu dönme momentinin büyüklüğü, stator ve rotorda oluşan manyetik

alanların şiddetlerine bağlı olarak değişir. Meydana gelen rotor döngüsü sonucunda, rotor konumu değişir. Değişen yeni konum sensörler tarafından algılanarak işlemciye gönderilir.

Çizelge 2.1 : Sensör bilgisine, rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları [1].

		Hall Sensörleri			Anahtar Konumları					
Konum	Konum açısı Φ	H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	$0 \leq \Phi < 60$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	$60 \leq \Phi < 120$	1	1	0	1	0	0	0	1	0
3	$120 \leq \Phi < 180$	0	1	0	0	0	1	0	0	1
4	$180 \leq \Phi < 240$	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	$240 \leq \Phi < 300$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
6	$300 \leq \Phi < 360$	1	0	1	0	0	0	1	1	0

Rotorda oluşan yeni konum işlemci tarafından değerlendirilerek, anahtarların yeni konumları belirlenir. Bu sefer, rotor yeni durumuna göre bir çekme ve itme tesirinde kalır. Hızlı bir şekilde bu anahtarlamaların sürüp gitmesiyle, rotordaki dönme hareketinin devamlılığı sağlanmış olur [9]. Bu dönme hareketi sonucunda oluşan sensörlerin ve anahtarların konum değişim değerleri üstteki Çizelge 2.1'de verilmiştir.

2.8 Fırçasız DC Motorların Matematiksel Modeli

BLDC motor kontrolörünün (denetleyicisinin) tasarımını gerçekleştirebilmek için, bir çalıştırılma modelinin tespit edilmesi gerekir. Modeli belirlenecek sistemde, sisteme dahil olan tüm elemanlar belirlenmeli ve sistem bunların tümünü kapsamalıdır. Örneğin, motoru, motorun sürücüsünü (güç elektroniği tabanlı devresi), konumu ve/veya hızı algılayan birimleri, yük ve dişli kayış-kasnak sistemini v.b. gibi tüm aksamaları kapsamalıdır. Kontrolör sistemlerin tasarımında, daha çok doğrusal bir sistem gerekliliğini içerir. Doğrusal sistem yaklaşımı, diferansiyel denklemlerin içerisindeki katsayıların sabit olmasını gerektirir. Bu da demektir ki, bahis konusu katsayıların, gerilim, hız v.b. gibi parametrelere bağımlı olmaması anlamına gelir. Mevcut sistem doğrusal bir karaktere sahip değilse, sistemde bazı kabuller yapılarak sistem doğrusal forma getirilir [33].

Akım dalga şekilleri ve zıt-emk'nin sinüzoidal olmayan yapısından dolayı, makine eşitliklerinin dönüşümünde, modelleme ve simülasyon için, d-q modelinin hantal yapısı yerine daha kolay olan faz-değişken yaklaşımı kullanılır. Zıt-emk, parçalı lineer eğriler kullanılarak veya bir Fourier Serileri olarak ifade edilebilir. Faz değişkenlerinde üç sargının akım denklemleri aşağıdaki gibi olabilir [41].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & -M & 0 & 0 \\ 0 & L & -M & 0 \\ 0 & 0 & L & -M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Burada V_a , V_b , V_c faz gerilimleri, i_a , i_b , i_c faz akımları, e_a , e_b , e_c faz zıt-emk gerilimleri, R faz direnci, L her fazın öz-endüktansı ve M her iki faz arasındaki karşılıklı (ortak) endüktanstır.

Elektromanyetik dönme momenti aşağıdaki ifadeyle verilmiştir;

$$T_e = \frac{(e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c)}{\omega_m} \quad (2.7)$$

Burada, ω_m rotorun mekanik hızıdır. Hareketin denklemini aşağıdaki gibidir;

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{(T_e - T_L - B.\omega_m)}{J} \quad (2.8)$$

Burada T_L yük dönme momenti, B sürtünme katsayısı ve J eylemsizlik (atalet) momentidir.

Aşağıdaki denklem elektriksel frekans ile mekanik hızın ilişkisidir;

$$\omega_e = \left(\frac{P}{2}\right).\omega_m \quad (2.9)$$

Burada, P rotor kutuplarının sayısıdır.

3. FIRÇASIZ DC MOTORLARIN KONTROLÜ

3.1 Giriş

Kullanım kolaylıkları ve özellikleri açısından, klasik DC motorlar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte, bazı ortam koşullarında, bu motorların yapılarındaki fırça ve kollektör (komütatör) yapılarına bağlı olarak çalışmaları birtakım riskler içermesinden dolayı kullanımında azalmalar meydana gelmiştir. Bu yapı nedeniyle bakımların daha sık olması zarureti söz konusudur. Böyle yani fırçalı bir DC motor bir CD veya disket sürücü olarak kullanılırsa, bu kullanım sabit devir sayısı gerektiren bir uygulama olduğundan birtakım aksaklıklar olacaktır. Çünkü, uzun süreli kullanımlarda devir sayısında bir azalma meydana gelecektir. BLDC motor, işte bu gibi durumlar için düşünülmüştür. BLDC motorlarda, fırça ve komütatör yapısının yerini yarı iletkenlerden oluşan bir yapı almıştır. Bu motorlar, fırçalı motorlardan daha fazla hıza, torka sahiptir. Elektriksel gürültü içermeyen ve daha sessiz bir çalışma söz konusudur. Bunların bakım aralıkları daha az ve daha uzun ömürlüdür. BLDC motorların sahip oldukları tüm bu özellikler nedeniyle, günümüzde kullanım alanları oldukça genişlemiştir. Bu olumlu özelliklerinin yanı sıra, mevcut çalışma sistemi yapısı, tam bir kontrol gerektirmektedir [26]. BLDC motorlarının en verimli bir şekilde kontrolü, bunların kontrolü için kullanılan tüm yöntemlerin yegâne amacıdır [42].

3.2 Kontrol Tanımı

BLDC motorların kontrolünde kullanılan kontrol sistemlerinde, çıkışın istenilen değerlerde elde edilebilmesi için, sistemin girişine uygulanması gereken değerlerin tespit edilmesi gerekir. Sistemde hedeflenen (referans) çıkış değeri ile mevcut sistem çıkış değeri arasındaki fark, hata değeri olarak adlandırılır. Sisteme uygulanacak giriş sinyali, işte bu hatayı en az değere indirebilecek bir değer olarak üretilebilmelidir. Bu da aynı zamanda, sistem çıkışının değeri ile referans çıkışının değerinin birbiriyle karşılaştırılması demektir. Bu amaçla, gerekli sistem çıkışının bilinebilmesi için algılama elemanlarının kullanımı gerekir [43].

3.3 Fırçasız DC Motor Kontrol Yöntemleri

Fırçasız DC motorlarda kullanılan kontrol yöntemleri ile motorun akımı, torku (dönme momenti), rotor konumu ve hızı gibi parametreleri kontrol edilir.

Günümüze değin birçok kontrol yöntemi kullanılagelmiştir. Doğru akım motorlarının hassas olarak hız kontrollerinin yapılabilmesi için, bugüne değin yapay sinir ağları [44], bulanık mantık [45], dalgacık tekniği [31], genetik algoritma [46] olarak adı geçen pek çok yöntem sayılabilir. Ayrıca, adı sayılan bu yöntemlerle birlikte ya da tek başına PID kontrolü de kullanılagelmiştir [47].

3.3.1 Klasik Kontrol Yöntemleri

Klasik denetleyiciler kullanılarak yapılan BLDC motorlarının parametrik kontrolleri, klasik kontrol yöntemleri olarak tanımlanmaktadır. Klasik denetleyiciler PI (oransal-integral kontrolü), PD (oransal-türev kontrolü) ve PID (oransal-integral ve türev kontrolü) tipindeki denetleyicilerdir. Klasik denetleyiciler, diğer denetleyicilere nazaran daha basit ve daha ucuz bir yapıya sahiptir. Sanayideki birçok alanda yeteri derecede verimin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, günümüzde endüstride yaygın bir kullanıma sahiptir. PI tipi denetleyicilerde, oransal ve integral katsayılarını; PD tipi denetleyicilerde, oransal ve türev katsayılarını; PID tipi denetleyicilerde oransal, integral ve türev katsayılarının ayarlanması suretiyle istenilen çalışma performansları elde edilebilir. Ancak bu tip denetleyicilerin, denetlenecek sistemin modeline gereksinim duymaları ve optimum kazanç değerlerinin deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmesi olumsuz yönlerini oluşturur [48]. Klasik denetleyicilerin, ani olarak değişen ve sinüzoidal bir özelliğe sahip olan yüklerdeki performansları düşük olmaktadır.[49].

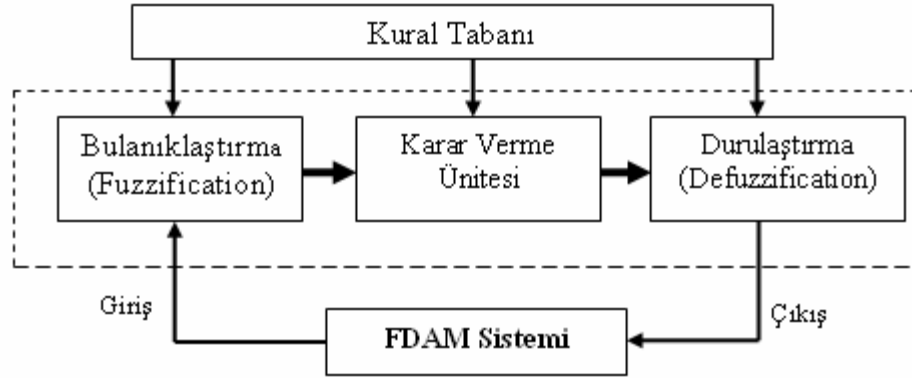
Endüstride, BLDC motorların kontrolünde, çok hassasiyet aranmıyorsa, klasik denetleyici kullanmak doğru bir yaklaşımdır. Çünkü, bu denetleyicilerin maliyeti düşük ve yapısı basittir. Endüstride çok hassasiyetin arandığı uygulamalarda ise modern denetim tekniklerini kullanmak daha doğrudur. Çünkü, bu teknikler daha iyi sonuçlar vermektedir. Günümüzde tercih edilen modern denetim teknikleri, bulanık mantık, genetik algoritma, yapay sinir ağları ve sinirsel bulanık denetleyicilerin kullanıldığı teknikler olarak örneklendirilebilir [50].

3.3.2 Modern Kontrol Yöntemleri

A. Bulanık Mantık:

Klasik denetleyicilerin yeterli hassasiyeti gösteremediği durumlar için tercih edilebilecek en akıllı yaklaşımlardan biri, bulanık mantık denetim yöntemidir. Bulanık mantık denetimi, matematiksel modelin oluşturulamadığı veya oluşturulması esnasında zorluklar yaşanıldığı, insanların tecrübe ve sezgilerine gereksinim duyulması hâllerinin yaşandığı durumlarda ve doğrusal olmayan sistemler için daha olumlu neticeler vermektedir. Bulanık denetleyiciler dilsel ifadeleri kullanırlar. Bulanık denetleyicilerde işlem üç ana basamaktan oluşur:

1. Bulanıklaştırma: Üyelik fonksiyonlarının elde edilmesi işlemidir. Burada, dışarıdan gelen kesin bilgiler, üyelik fonksiyonları cinsinden ifade edilir, yani bulanıklaştırılır.
2. Kural tabanı: Uygun kuralların elde edildiği işlemdir. Bu kurallar, sistemin hakkındaki bilgi ve tecrübelerle istinaden oluşturulur.
3. Durulaştırma : Bulanık sonuç değerleri, durulama yöntemlerinden birini kullanarak tekrar kesin değerler cinsinden ifade edilir ve sistemin ayarlanması yapılır [51]. Şekil 3.1’de bir bulanık denetleyicinin genel yapısı görülmektedir.



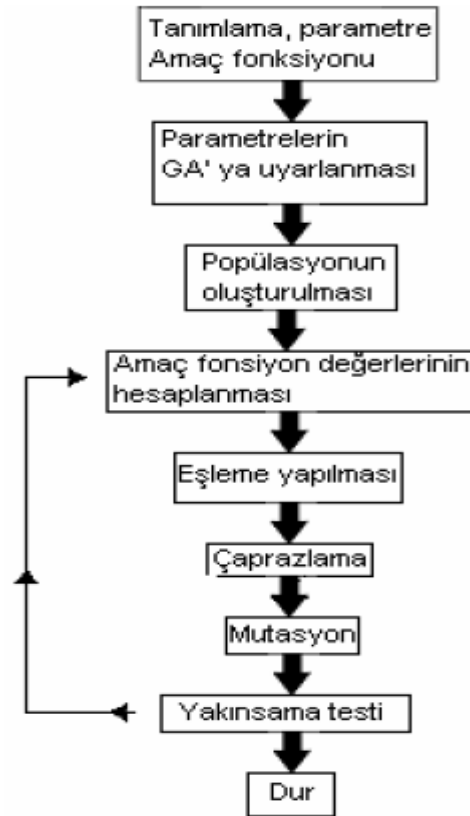
Şekil 3.1 : Bulanık denetleyici genel yapısı [31].

B. Genetik Algoritma:

Genetik algoritma (Genetic algorithm), fonksiyonların optimizasyonunu, biyolojik sürecin modellenmesi işlemi ile gerçekleştiren evrim algoritmalarıdır. Popülasyonun her bir bireyi, kromozomlar şeklinde temsil edilir. Belirlenmiş kurallar içerisinde, popülasyonun uygunluğunun minimizasyonu ve maksimizasyonu yapılır. Uzun süren çalışmaların neticesinde, bu yöntem ilk kez John Holland (1975) tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Genetik algoritmanın üstünlükleri:

- Ayrık ve sürekli olan parametrelerin optimizasyonunu sağlar.
 - Türevsel bilgilere ihtiyaç göstermez.
 - Çalışma için çok sayıda parametre kullanmak mümkündür.
 - Paralel bilgisayarların kullanılmasıyla çalıştırılabilmesi mümkündür.
 - Küresel optimum değeri bulabilmesi mümkündür.
 - Çok sayıda parametrenin en uygun çözümlerini elde edebilmesi mümkündür [52].
- Sisteme ilişkin bir amaç fonksiyonu ve bu fonksiyona bağlı olan sınır şartları, genetik algortmada belirlenmesi gereken ilk işlemlerdir. Buna ilişkin matematiksel ifadenin oluşturulmasından sonra, bu ifade ve sınır şartlarının algortmaya uyarlanması işlemi gerçekleştirilir. Amaç fonksiyonun belirlenmesinde parametre sayısının artırılması daha da gerçekçi bir optimizasyonun yapılmasını sağlar [52].

Genetik algortmalar çalışması esnasında Şekil 3.2'deki işlem sırasını takip ederler.



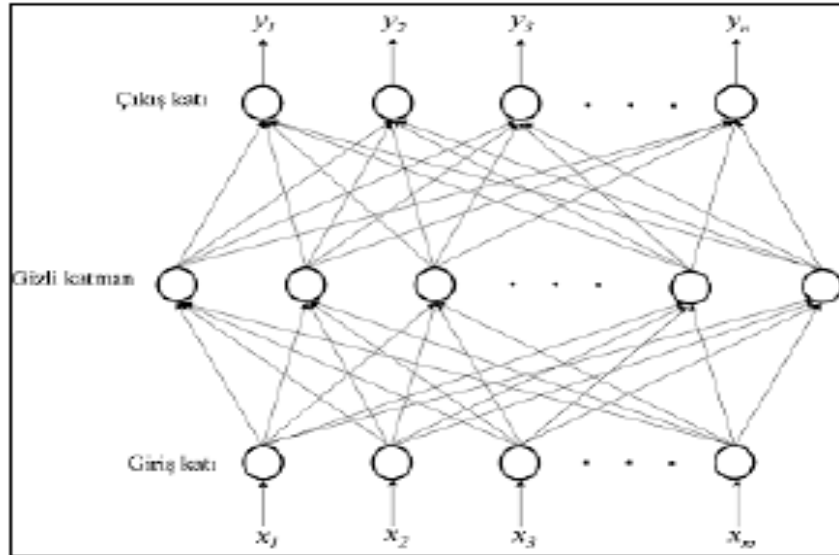
Şekil 3.2 : Genetik algortmadaki işlem sırası [52].

Biyolojideki genleri, genetik algortma parametreleri temsil eder. Kromozom, parametrelerin toplu olarak oluşturduğu kümedir. Her yeni nesil, rasgele olarak bilgi değişimiyle ve diziler içerisinde hayatta kalanların birleştirilmesiyle oluşturulur [53].

Bir genetik algortmada üç ana operatör vardır. Bunlar; seçme, çaprazlama ve mutasyondur. İlk nüfus genelde rasgele oluşturulur. Bir nesildeki dizilerden, bir bölümü bir sonraki nesle aktarılıp, bir bölümü de aktarılamayıp yok olur. Seçim mekanizmaları, hangi dizilerin bir sonraki nesle aktarılacağına rol oynar. Çaprazlama, en önemli genetik operatör olup, yapı bloklarının tekrar birleştirilmesinden ve karıştırılmasından mesuldür. Çaprazlama, iki kromozomdan belirli noktaların yer değiştirmesidir. Böylece, yeni çözümler oluşturmada kilit rol oynar. Şöyle ki; bir çözümün bir bölümünü, diğer bir çözümle değiştirir. Yeni tohumlar bu şekilde meydana gelir. Mutasyon, genetik değişim sağlayan bir operatördür. Bir nesilden bir sonraki nesle kopyalama esnasında, rasgele başkalaşım lar genlere aktarılır. Mutasyon, ender olarak da olsa iyi bireylerin yok olmasına sebep olur ki; genetik algoritma içerisine elitizasyon yapısı yerleştirilmiştir. Bu yapı, en iyi bireylerin bir sonraki nesle aktarılmasını sağlar [54].

C. Yapay Sinir Ağları:

Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks), matematiksel modeli tanımlanamayan ya da çok zor tanımlanabilen sistemlerin çözümünde kullanılabildiği gibi; ayrıca belirli olmayan, verileri eksik olan ve gürültülü sistemlerin çözümünde de kullanılabilir [55]. Literatürde birçok yapay sinir ağı yapısı mevcut olup fakat en çok kullanılanı çok katlı perseptron (ÇKP) modelidir [56]. Şekil 3.3'de çok katlı bir perseptron yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3 : Bir çok katlı perseptron modeli [57].

Bir ÇKP, bir adet giriş ve çıkış katmanı ile bir veya birden fazla ara katmandan ibarettir. Katlardaki elemanlar nöronlardır. Ara katta bulunan her bir nöronun çıkış değeri, kendine bağlı olan girişler ve o girişlerin bağlantılı ağırlıkları ile çarpım sonuçlarının toplamlarına eşittir. Çıkışın toplam bir fonksiyonu olarak, elde edilen bu toplam hesaplanabilir [57].

Burada oluşan fonksiyon bir eşik, sigmoid veya hiperbolik tanjant fonksiyonudur. Diğer katlarda yer alan nöronların çıkış değerleri de aynı biçimde hesaplanır. Ağın çıkışı ile istenen çıkış arasında ortaya çıkan fark hata olup; hata kabul edilebilir seviyeye (minimum seviye önceden belirlenir) ininceye kadar ağın ağırlıkları değiştirilir ve tekrar geriye doğru yayılır. Bu olay, kullanılan eğitime algoritmasına göre yapılır. Yapay sinir ağlarında kullanılan çok sayıda eğitime algoritması mevcuttur [57].

D. Sinirsel Bulanık Denetleyiciler:

Lineer olmayan fonksiyonlara belirlenen bir eğitim işlemlerinden sonra öğrenme ve genelleme yetenekleri katması ile paralel bilgi işleyebilmesi yapay sinir ağlarının üstünlükleri arasındadır. Alışlagelen lojik işlemlerin dışında ara değişkenlerin kullanılması ile uzman bilgisini sistemlere katarak çıkarım (dedüktif çıkarım) yapabilmesi gibi özellikler de bulanık mantığın üstünlükleri arasındadır. Bu iki yöntemin üstünlüklerinin birleştirilmesi amaçlanarak sinirsel bulanık ağ ya da bulanık sinirsel ağ yapıları meydana getirilmiştir. Bu iki ağ yapısı, literatürdeki birtakım çalışmalarda aynı anlam verilmesine karşın, genel olarak farklılık taşımaktadır. Şöyle ki; bulanık sinirsel ağ yapılarının fonksiyonları, yapay sinir ağları fonksiyonlarının bulanık mantık fonksiyonları tarafından yürütülmesi prensibiyle gerçekleşir. Sinirsel bulanık ağ yapılarının fonksiyonları ise, bulanık mantık fonksiyonlarının yapay sinir ağları fonksiyonları tarafından yürütülmesi prensibiyle gerçekleşir. Günümüzde ise, genel olarak, içerisinde sinirsel bulanık ağ yapılarını barındıran sinirsel bulanık denetleyiciler kullanılmaktadır. Bulanık mantık ile yapay sinir ağlarının kullanıldığı tüm sahalarda, bilhassa lineer olmayan sistemlerin kontrolünde sinirsel bulanık denetleyiciler kullanılabilmektedir. Bu doğrultuda, parametre değişimlerinin belirlenmesi, moment ve akının kestirimi, konum ve hız kontrolünde sinirsel bulanık denetleyicilerin kullanımı mümkündür [58].

E. Dalgacık Tekniği:

Zaman domenini ile frekans domeninde durağan niteliğe sahip olmayan işaretlerin analizlerini yapabilmek dalgacık teorisi ile mümkündür. Dalgacık teorisinin bu özelliği nedeniyle görüntü işleme alanında pek yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. BLDC

motorlarındaki kullanımında ise, dalgacık konusunda yararlanılan Fourier Dönüşümü'nün kullanılmasıyla parametrelerin frekans domenindeki dönüşümleri gerçekleştirilir. Yine dalgacık konusundaki alçak, yüksek geçiren filtre işlemleri, Daubechies Filtreleme işlemleri v.b. kullanılarak BLDC motorlarının komütasyon anları tespit edilir. Başka bir deyişle, rotor pozisyonu belirlenir [31].

4. SONUÇLAR

BLDC motorların rotoru daimi mıknatıslardan yapılmıştır. Bu motorların ,sürekli mıknatıslı senkron motorlardan farkı, stator sargılarında oluşan zıt emk'nin sinüzoidal bir biçimde olmayıp trapezoidal (yamuk) şeklinde olmasıdır. Bu da, SMSM'a nazaran ağırlık/güç oranında %25'lik bir avantaj sağlamakta; bu avantaj nedeniyle SMSM'a göre daha çok tercih edilmesi sonucunu doğurmaktadır. Buna mukabil, zıt emk'nin trapezoidal bir yapıya sahip olmasından dolayı bu motorların matematiksel modeli lineer bir yapıya sahip değildir. Bu lineer olmayan yapı biçimi de, bu motorların analizinin daha güç yapılmasına neden olmaktadır [1].

Fırçasız DC motorlarda motorun akımı, torku, rotor konumu ve hızı gibi parametreler çeşitli kontrol yöntemleri ile kontrol edilmektedir. Bu kontrol de şöyle gerçekleşir; denetleyicinin ürettiği kontrol sinyali, seçilen kontrol algoritmasına göre PWM sinyallerinin durumunu kontrol eder. Bu şekilde denetleyici tarafından motor parametreleri kontrol edilir. Denetleyici, hem yazılım hem de donanım yapılarından oluşur [2].

BLDC motorların kontrolünde yapılarının basit olması nedeniyle, birçok uygulamalarda -fazla hassasiyet istenmezse- klasik denetleyiciler (PI ve PD) tercih edilir. Klasik denetleyiciler, kontrol edilmesi gereken sistemin modeline ihtiyaç duyarlar ve optimum kazanç değerlerinin deneme-yanılma yöntemi yöntemi kullanılarak belirlenmesi gerekir. Klasik denetleyicilerin bu özellikleri dezavantaj oluşturur [44]. Ayrıca klasik denetleyiciler, ani olarak değişen yük durumlarında ve yükün sinüzoidal olarak değişimleri karşısında yeterli derecede performans gerçekleştiremez [45].

Klasik denetleyicilerin yeterli derecede performans sergileyemediği veya daha çok hassasiyet istendiği uygulamalarda, modern denetim teknikleri (bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma, sinirsel bulanık denetleyiciler v.b.) kullanılması daha doğru bir yaklaşım olur [46].

Modern denetleyiciler, klasik denetleyicilerin yeterli hassasiyeti gösteremediği durumlar için tercih edilir. Bunların içerisinde en akıllı yaklaşımlardan biri, bulanık mantık denetim yöntemidir. Bulanık mantık denetimi, matematiksel modelin

oluşturulamadığı veya oluşturulması esnasında zorluklar yaşandığı, insanların tecrübe ve sezgilerine gereksinim duyulması hâllerinin yaşandığı durumlarda ve doğrusal olmayan sistemler için daha olumlu neticeler vermektedir [47]. Bunun dışında genetik algoritma, yapay sinir ağları, sinirsel bulanık denetleyiciler veya dalgacık tekniği gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Genetik algoritma, ayrık ve sürekli olan parametrelerin optimizasyonunu sağlaması, türevsel bilgilere ihtiyaç göstermemesi v.b. gibi avantajlara sahiptir [52]. Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks), matematiksel modeli tanımlanamayan ya da çok zor tanımlanabilen sistemlerin çözümünde kullanılabildiği gibi; ayrıca belirli olmayan, verileri eksik olan ve gürültülü sistemlerin çözümünde de kullanılabilir [55]. Sinirsel bulanık denetleyiciler, yapay sinir ağları ile bulanık mantık ağlarının üstün özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşan ağ yapılarının kullanıldığı denetleyicilerdir. Her ikisinin ayrı ayrı kullanıldığı tüm alanlarda kullanılabilir. Bu denetleyiciler, günümüzde, bilhassa lineer olmayan sistemlerin kontrolünde ve bu doğrultuda parametre değişimlerinin belirlenmesi, moment ve akının kestirimi, konum ve hız kontrolünde kullanılmaktadır [58]. Dalgacık yaklaşımının BLDC motorlarındaki kullanımında ise, dalgacık konusunda yararlanılan Fourier Dönüşümü'nün kullanılmasıyla parametrelerin frekans domenindeki dönüşümleri gerçekleştirilir. Yine dalgacık konusundaki alçak, yüksek geçiren filtre işlemleri, Daubechies Filtreleme işlemleri v.b. kullanılarak BLDC motorlarının komütasyon anları tespit edilir. Başka bir deyişle, rotor pozisyonu belirlenir [31].

BLDC motorlar çok girişli bir yapıya sahiptir. Faz akımları ve rotor hızı arasındaki bağıntı lineer değildir. Bu nedenle, konum ve hız denetimleri güç olarak yapılmaktadır. Klasik denetim yöntemleri kullanıldığında, motor kontrolü için bu lineer olmama ihmal edilmekte, lineer sayılmaktadır. Bu şekilde akım kontrolü ile hız kontrolü birbirinden ayrı tutulmaktadır [43].

KAYNAKLAR

- [1] ATAN, Ö., [2007], "Fırçasız DA motorunun Modellenmesi ve PWM Yöntemiyle Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
- [2] (<http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/fyrcasyz-dc-motorun-lineer-karesel-kontrol-lqr-yontemi-ile-konum-denetimi>), Erişim tarihi: 30.03.2014, Sa:15:05.
- [3] NASAR, S.A., BOLDEA, I., and UNNEWEHR, L.E., [1993], "Permanent Magnet, Reluctance and Self-Synchronous Motors", CRC Press, USA.
- [4] (<http://www.mugul.com/blcdc.htm>), Erişim tarihi: 29.03.2014, Sa: 23:00.
- [5] (<http://prezi.com/evjvia1b2bwz/fircasiz-dc-motorlar/>), Erişim tarihi: 29.03.2014, Sa:23:50.
- [6] ACARNLEY, P.P., WATSON, J.F., [2006], "Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. Ind. Electron; 53(2):352-62.
- [7] LAI, Y.S., LIN, Y.K., [2007], "A New Cost Effective Sensorless Commutation Method for Brushless DC Motors Without Using Phase Shift Circuit and Neutral Voltage", IEEE Trans. Power Electron; 22(2):644-53.
- [8] KARAKULAK, O., YAZ, O. ve diğerleri, [2012], "PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücü Tasarımı", 3.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 29-30 Kasım, Balıkesir.
- [9] ULU, B., [2011], "Fırçasız Doğru Akım Motor (BLDC) Hız Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [10] GÖDEKOĞLU, H., [2007], "Fırçasız Doğru Akım Motoru Konum Kontrolü Tasarımı", İTÜ.
- [11] GUMASTE, A.V. and SLEMON, G.R., [1981], "Steady-State Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Voltage-Source Inverter", IEEE Trans. On Industry Appl., Vol. IA-17, pp. 143-151.
- [12] LE-HAY, H., DESSAINT, L.A., [1989], "An Adaptive Current Control Scheme for PWM Synchronous Motor Drives: Analysis and Simulation", IEEE Transactions on Power Elect., Vol 4, No 4, pp. 486-495.
- [13] BOSE, B.K., [1990], "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System", IEEE Transactions on Ind. Elec. Vol 37, No 5. pp. 456-462.
- [14] KARTHIKEYAN, J., DHANA SEKARAN, R., [2011], "Current Control of Brushless DC Motor Based on a Common DC Signal for Space Operated Vehicles", Electrical Power and Energy Systems 33 (2011) 1721-1727.
- [15] WU, Q., TIAN W., [2012], "Design of Permanent Magnet Brushless DC Motor Control System Based on dsPIC30F4012", Procedia Engineering 29 (2012) 4223-4227.
- [16] WANG, H., [2012], "Design and Implementation of Brushless DC Motor Drive and Control System", Procedia Engineering 29 (2012) 2219-2224.

[17] JANPAN, I. et al. [2012], "Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode", *Procedia Engineering* 32 (2012) 279-285.

[18] CHOWDHURY, D., CHATTOPADHYAY, M., ROY, P., [2013], "Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor", *Procedia Technology* 10 (2013) 279-286.

[19] YEDEMALE, P., [2003], "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Microchip Technology Inc. App. Note, USA.

[20] (www.metu.edu)

[39] BOSE, B.K., [1997], "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE Press, New York 640.

[40] (

- [57] SAĞIROĞLU, Ş., BEŞDOK, E., ERLER, M., [2003], “Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I Yapay Sinir Ağları”, Ufuk Yayınevi, Kayseri.
- [58] GÜNDOĞDU, A., [2012], “Asenkron Motorlarda Moment Dalgalanmalarının Sinirsel Bulanık Ağlar ile Azaltılması”, Doktora Tezi, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hüseyin Cem BAYRAKTAR

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul – 1971

E-Posta: h_c_bayraktar@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü (1992).

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Özel şirketlerde şantiye ve bakım mühendislikleri, teknik öğretmenlik.