

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fırçasız Doğru Akım Motorunun Yüksek Hızlarda Performansının
İncelenmesi**

Mustafa ABDULHADI

Danışman: Doç. Dr. Yunus BABACAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2022
Her Hakkı Saklıdır.**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Fırçasız Doğru Akım Motorunun Yüksek Hızlarda Performansının İncelenmesi

Mustafa ABDULHADI

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yunus BABACAN

Fırçasız DC motorlar (BLDC), daha az bakım gerektirmeleri, yüksek verime sahip olmaları yüksek hızlara çıkabilmeleri nedeniyle oldukça avantajlıdır. Bu çalışmada insansız hava araçları için hafif, yüksek hızlı ve yüksek kaldırma kuvvetine sahip BLDC motor üretilerek gerekli elektriksel analizi yapılmıştır. Bu analizlerde motorun çektiği akım, pervanesiz olarak, 14x8 ve 18x8 boyutlarında 3 bıçaklı pervaneler ve 18*10 2 bıçaklı pervaneler kullanılarak ölçülmüştür. İlk olarak, devir sayısına bağlı olarak motorun kaldırma kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Artan devir sayısı ile orantılı şekilde motorun kaldırma kuvvetinin de arttığı görülmüştür. Çalışmanın devamında çekilen akıma bağlı olarak devir sayısı ve kaldırma kuvveti incelenmiş ve motorun performans özellikleri çıkarılmıştır. Burada artan çekilen akımla motorun devir sayısının hızlıca arttığı görülmektedir. Aynı şekilde artan akımla kaldırma kuvvetinin de hızlıca arttığı görülmüştür. Son olarak, devir sayısı ile kaldırma kuvveti arasındaki ilişki araştırılmış ve beklendiği gibi artan devir sayısı ile kaldırma kuvveti artmıştır. Sonuç olarak, üretilen motora ait beklenen özellikler elde edilmiş ve testler başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

2022, 60 sayfa

Anahtar Kelimeler: BLDC, DC motor, Fırçasız DC motor, İHA

ABSTRACT

Master Thesis

Investigation Of Performance Of Brushless Direct Current Motor At High Speeds

Mustafa ABDULHADI

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical - Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yunus BABACAN

Brushless DC motors (BLDC) are very advantageous because they require less maintenance, have high efficiency and can reach high speeds. In this study, a light, high-speed and high-thrust BLDC motor for unmanned air vehicles was produced and the necessary electrical analysis was made. In these analyses, the current drawn by the motor was measured without a propeller, using 14×8 and 18×8 three-blade propellers and using 18×10 two-blade propellers. First, the change in the thrust of the motor, depending on the number of revolutions per minute (RPM), was investigated. It has been observed that the thrust of the motor increases in proportion to the increasing number of revolutions. In the continuation of the study, depending on the current drawn, the number of revolutions and the thrust were examined and the performance characteristics of the engine were determined. Here, it is seen that the number of RPM increases rapidly with the increasing current drawn. Likewise, it was observed that the thrust increased rapidly with increasing current. Finally, the relationship between the RPM and the thrust was investigated and as expected, the thrust increased with increasing of rpm. As a result, the expected features of the manufactured motor were obtained and the tests were completed successfully.

2022, 60 Pages

Keywords: BLDC, DC motor, Fırçasız DC motor, İHA

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın hazırlanması ve yürütülmesi sırasında yardımını asla esirgemeyen, bilgisini, tecbürelerini ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, daima yol gösteren kıymetli hocam Doç. Dr.YUNUS BABACAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getiren, her daim yanımda olan ve bana güvenen kıymetli aileme şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

MUSTAFA ABDULHADI

Ocak, 2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	8
3.1. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Tarihçesi.....	8
3.2. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Diğer Motorlarla Karşılaştırılması	9
3.3. Tipik BLDC Motor Uygulamaları.....	10
3.4. Fırçasız DC Motoru Olumlu ve Olumsuz Özellikleri	11
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
4.1. Motor ve Sürücü Sistemi Yapısı	13
4.1.1 Stator yapısı	13
4.1.2. Rotor yapısı	16
4.1.3. Geri besleme ünitesi	19
4.1.3.1. Hall etkili sensör	20
4.1.3.2. Sıfır geçiş dedektörü	23
4.1.4. Evirici ve sürücü birimi	24
4.1.5. Denetleyici.....	25
4.2. Fırçasız DC Motor Çeşitleri	26
4.2.1. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları	26
4.2.2. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları	27
4.2.3. Disk tipi fırçasız DC motorları	28
4.3. Fırçasız DC Motor Çalışma Prensibi	28
4.4. Fırçasız DC Motorların Matematiksel Modeli	31
4.5. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü	35

4.5.1. Klasik Kontrol Yöntemleri	36
4.5.1.1. Oransal integral kontrolü (PI)	36
4.5.1.2. Oransal türev kontrolü (PD)	37
4.5.1.3. Oransal integral ve türev kontrolü (PID)	37
4.5.2. Modern Kontrol Yöntemleri	37
4.5.2.1. Bulanık mantık	38
4.5.2.2. Genetik Algoritma (Genetic algorithm)	39
4.5.2.3. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)	40
4.5.2.4. Dalgacık Tekniği	41
4.5.2.5. Sinirsel-Bulanık Denetleyici	41
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	42
5.1. Tasarlanan BLDC Motor	42
5.2. Kullanılan Sürücü	44
5.3. Batarya Sistemi	44
5.4. Yöntem	45
5.5. Test Sonuçları	46
6. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	56
EKLER	60
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1. Fırçasız doğru akım motorunun sürücü sistemi.....	13
Şekil 4.2. a) Sinüzoidal Zıt EMK b) Yamuklu Zıt EMK	14
Şekil 4.3. Fırçasız bir doğru akım motorun statoru ve sargıları	15
Şekil 4.4. Farklı kutuplu, stator yapıları	16
Şekil 4.5. Fırçasız DC motorların rotor çeşitleri	17
Şekil 4.6. Geri besleme sensör türleri	20
Şekil 4.7. Alan etkili sensör çalışma ilkesi	21
Şekil 4.8. Alan etkili sensörlerin (Hall sensörlerin) yerleşim şekilleri	22
Şekil 4.9. Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı	23
Şekil 4.10. MOSFET’lerle yapılmış sürücü devresi	24
Şekil 4.11. Dış rotorlu fırçasız DC motor yapısı	26
Şekil 4.12. İç rotorlu fırçasız DC motor yapısı	27
Şekil 4.13. Disk tipi fırçasız DC motor	28
Şekil 4.14. Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin devre şeması	29
Şekil 4.15. Sürücü anahtarların bağlanması	29
Şekil 4.16. Stator sargıların akım yönü ve rotorun pozisyonu	30
Şekil 4.17. Fırçasız DC motorun eşdeğer devresi	31
Şekil 4.18. FDAM’ na ait zıt emk’ lar, Hall sensör sinyalleri ve faz akımları	34
Şekil 4.19. Bulanık denetleyicilerin temel yapısı	38
Şekil 4.20. Genetik algoritmanın adımları	39
Şekil 4.21. Çok katmanlı algılayıcı şeması	40
Şekil 5.1. Motorun Statoruna ait çizim.	42
Şekil 5.2. Üretilen motora ait sargıların görüntüsü.....	43
Şekil 5.3. Motorun dış görüntüsü.	43
Şekil 5.4. Motor sürücüsü (ESC).....	44
Şekil 5.5. Kullanılan bataryanın görüntüsü.	44
Şekil 5.6. Motorun bağlantı şeması	46
Şekil 5.7. Test aşamasında motorun Deney düzeneği	46
Şekil 5.8. Yüksüz durumda motorun akımı ve devir sayısı grafiği	47

Şekil 5.9. Üç bıçaklı 14*8 pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği.	48
Şekil 5.10. 14*8 inç pervane ile motorun akımı ve kaldırma kuvveti grafiği	49
Şekil 5.11. 14*8 inç pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği	49
Şekil 5.12. 18*8 inç pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği	50
Şekil 5.13. 18*8 inç pervane ile motorun akımı ve kaldırma kuvveti grafiği	51
Şekil 5.14. 18*8 inç pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği	51
Şekil 5.15. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği	53
Şekil 5.16. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı ve kaldırma kuvveti grafiği	53
Şekil 5.17. 18*10 inç tek pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği	54



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kalıcı mıknatıslı fırçasız DC motorların fırçalı DC motorlarla karşılaştırılması.....	10
Tablo 4.1. Sabit mıknatısların karakteristikleri	19
Tablo 4.2. Yarı iletken anahtarların özellikleri	25
Tablo 4.3. Sensör bilgisine ve rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları.....	31
Tablo 4.4. Kontrol parametrelerinin genel etkileri.....	37
Tablo 5.1. Yüksüz durumunda Akım ve hız değerleri.	47
Tablo 5.2. 14*8 inç pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri.....	50
Tablo 5.3. 8*18 inç pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri	52
Tablo 5.4. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri	54

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

B	Manyetik alan şiddeti
B_m	Sürtünme katsayısı
$e(t)$	Hata sinyali
E_a, E_b, E_c	Stator sargılarında indüklenen zıt elektromotor kuvvet
F	Alan içinde hareket eden elektrik yüküne etki eden kuvvet
$F_a(\theta), F_b(\theta), F_c(\theta)$	Zıt EMK fonksiyonları
h	Metal plaka malzemesine bağlı bir hassasiyet katsayısı
$H1, H2, H3$	Hall sensörleri
I	Akım
i_a, i_b, i_c	Stator faz akımları
j	Mil eylemsizlik momenti
K_d, K_i, K_p	Türev kazancı, İntegral kazancı, Oransal kazancı
K_e	EMK sabiti
L_a, L_b, L_c, L	Stator faz endüktansları
$L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}, M$	Stator faz sargıları arasındaki ortak endüktans
P_e	Üretilen Elektriksel Güç
q	Yük
R	Direnç
R_a, R_b, R_c	Stator faz dirençleri
$T1, T2, T3, T4, T5, T6$	Sürücü anahtarları
T_e	Elektromanyetik moment
T_L	Yük momenti
$u(t)$	Kontrol sinyali
v	Elektron hızı
V_a, V_b, V_c	Stator faz gerilimleri
V_{dc}	DC kaynağın voltajı
V_H	Hall gerilimi

W_m	Rotorun mekanik hızı
α	Plaka düzlemiyle manyetik alan arasındaki yatay açı
θ	Rotor elektriksel pozisyonu
ϕ	Rotorun konum açısı

Kısaltmalar

AlNiCo	Alüminyum Nikel Kobalt (Mıknatıs)
BJT	Bipolar Jonksiyon Transistörü
BLDC	Fırçasız Doğru Akım Motoru
DC	Doğru Akım
DSP	Dijital Sinyal İşlemci
EMK	Elektromotor kuvvet (Endüklenen gerilim)
ESC	Elektronik hız kontrolü
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
FEA	Sonlu elemanlar analizi
IGBT	Kapısı izoleli bipolar taransistör
MOSFET	Metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör
NdFeB	Neodyum Demir Boron (Mıknatıs)
PD	Oransal-türev kontrolü
PI	Oransal-integral kontrolü
PID	Oransal-integral-türev kontrolü
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RPM	Dakikadaki devir sayısı
SmCo	Samaryum kobalt mıknatısları
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı motorların geliştirilmesi, endüstriyel ve çelik haddehaneler, elektrikli trenler, elektrikli otomotiv, havacılık ve robotik gibi diğer amaçlı uygulamalarda çok önemlidir (Zhang vd, 2004). Bu tür uygulamalar için çeşitli elektrik motorları önerilmiştir. Bu türler arasında avantajlı özellikleri ile bilinen geleneksel doğru akım motorlar bulunmaktadır. Doğru akım (DC) motorları, doğru akım elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinelerdir. Bu motorlar, içindeki sargılara elektrik akım uygulandığında motorda sabit mıknatısa zıt yönde oluşan manyetik kuvvetin etkisiyle hareket etmesi esasına dayanırlar. Genel olarak, DC motorlar, birçok uygulamada kullanılmasına rağmen, komütatörlerin rutin bakımı, fırçaların sık değiştirilmesi ve yüksek başlangıç maliyeti gibi dezavantajlara sahiptirler (Pearson ve Paresh, 1984). Ayrıca geleneksel DC motorlar, fırçalardan çıkan kıvılcımlar nedeniyle temiz veya patlayıcı ortamlarda kullanılamaz. Sincap kafesli asenkron motor, geleneksel DC motora alternatiftirler. Bu motorlar dayanıklı ve düşük maliyetlidirler. Bununla birlikte, bu motorların dezavantajları düşük başlangıç torkuna ve düşük güç faktörüne sahip olmalarıdır (Xia, 2012). Ayrıca, yüksek hızlı uygulamalar için ne geleneksel DC motorlar ne de asenkron motorlar çok avantajlı değildirler. Geleneksel DC ve asenkron motorlara alternatif olarak fırçasız DC motorlar (BLDC) icat edilmiştir (Shamseldin ve Elsamahy, 2014).

BLDC motorlar özel bir tür elektrik motorlardır ve senkron motor türlerinden biridir. BLDC motorlar SMSM'ye (Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar) benzerler ve rotoru kalıcı mıknatıstan yapılmıştır (Atan, 2007). Fırçasız DC motorlar ile sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) arasındaki temel fark, boşta indüklenen gerilimlerin şeklidir. SMSM'da boşta indüklenen gerilimler sinüzoidaldir. BLDC motorlarda ise, boşta indüklenen gerilimler trapezoidal olmaktadır. BLDC motorlar, DC motorların hareketli parçaları olan rotor bölümündeki manyetik alanın doğal olarak karşılandığı bir motor türüdür. Bu motorların rotor bölümlerinde güçlü kalıcı mıknatıslar kullanılmaktadır. Geleneksel dc motorlarda motora uygulanacak gerilimi iletmek için kollektörler, dış devredeki akımı motora iletmek için fırça kullanılmaktadır. Ancak Fırçasız doğru akım motorlarında kollektör ve fırça bulunmadığından komütasyon elektronik olarak yapılmaktadır (Yaz ve Cetin, 2021). Elektronik komutasyonun işlemini gerçekleştirmek

için rotor konum algılama sensörleri kullanılır. Çoğu durumda bu işlemi gerçekleştirmek için motor miline veya statora yerleştirilen Hall sensörleri veya optik sensörler tercih edilir.

BLDC motorların uygulama alanları yüksek verim, sessiz çalışma, uzun ömürlü olma, daha az bakım gerektirme, sabit tork sağlama, geniş hız ve tork kontrol aralığına sahip olma ve kolay kontrol edilebilir olmalarından dolayı gün geçtikçe artmaktadır (Tabak, 2020). Adından da anlaşılacağı gibi bu motorda fırça bulunmadığından kıvılcım gibi fırçaların neden olduğu kusurlar bulunmamaktadır. BLDC motorlar komütatör içermediği için endüvi boyunun kısalmasına, rotorun hafif olmasına ve atalet torkunun azalmasını sağlar. Bu özellikler endüstriyel uygulamalarda önemlidir (Kenjo ve Nagomori, 1985).

BLDC motorlar, rotordaki kalıcı mıknatısların ve stator sargılarında dolaşan akımların etkileşimi ile indüklenen tork ile çalışır. BLDC motorlar, 1 fazlı, 2 fazlı ve 3 fazlıdır, ancak genel olarak, üç fazlı kullanımları yaygındır. Üç fazlı BLDC motorlarda aynı anda iki faz birlikte enerjilenir. Üç fazlı bir motor durumunda, üretilen güç, en yüksek torku üreten iki faz tarafından elde edilir. Rotorun konumuna bağlı olarak bu iki fazdan güç elde edilir. Rotor kutuplarında meydana gelen değişimlerin her anında güç elektroniği anahtarları kullanılarak, stator iletkenlerinden geçen akımların yönü değiştirilir. MOSFET ve IGBT gibi birçok güç elektroniği anahtarları , akımın yönünü değiştirme işlemi için kullanabilmektedir.

Dünyada teknolojiye büyük gelişme, mikroişlemcilerin yetenek ve işlevlerinin artmasına yol açmış, bu da elde edilen matematiksel modellerin uygulanmasını ve bu modellere uygun sayısal kontrolörlerin tasarlanmasını kolaylaştırmıştır. Endüstriyel uygulamalarda yukarıda bahsedilen gelişmeler sayesinde ekonomik ve uygulanabilir çözümler üretmek mümkün hale gelmiştir (Gödekoğlu, 2007). BLDC motorların kontrolü, tasarımları kadar ve hatta daha da önemlidir. Bu motorlar, güç elektroniği devreleri kullanılarak kontrol edilebilir. Bugün farklı algoritmalar kullanılarak oluşturulmuş birçok kontrol yöntemi var.

Darbe genişlik modülasyonu (PWM), BLDC motorları kontrol etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu kontrol yönteminde, uygulanan darbenin genişliğinin kontrol

edilmesi prensibine dayanır (Bayraktar, 2015). Fırçasız motorlarda tork kontrolü de önemlidir. Burada stator akımlarını kontrol ederek torku kontrol edilmektedir.

Stator akımlarını kontrol etmek için darbe genişlik ayarlı eviriciler sıklıkla kullanılır. Günümüzde, bu eviricilerin akımlarını kontrol etmek için kullanılan birçok teknik ve algoritma bulunmaktadır (Gumaste ve Slemon, 1981; Bose, 1990).



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bir tür senkron motor olan BLDC motorlar ile ilgili çalışmalar, motorda kullanılan mıknatıslar, motorun nasıl kontrol edildiği ve torktaki dalgalanma üzerine yoğunlaşmışlardır. Pillay ve Krishnanın daimi mıknatıslı senkron motorlar üzerine birçok çalışmaları bulunmaktadır. Senkron motorlar, akım dalgalarının ve üretilen ters elektromanyetik kuvvetin şekline göre sınıflandırmışlardır. Burada, trapezoidal ters elektromanyetik kuvvet üreten motorlar BLDC motor olarak adlandırılırlar. Ayrıca Sinüzoidal ters elektromanyetik kuvvet üreten motorlar SMSM motor olarak adlandırılırlar (Pillay ve Krishnan, 1989).

Çelikel tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek hızlı fırçasız motordaki tork dalgalanmalarını azaltmak için bir yöntem önerilmiştir. Fırçasız motoru sürmek için geleneksel sürüş yöntemleri yerine yükselten-düşüren (buck/boost) DC gerilim dönüştürücüler kullanılmıştır. Yükselten - düşüren dönüştürücü eviricinin giriş gerilimini değiştirerek ve darbe genişlik modülasyonu ile motorun akımını kontrol edilmiştir. Yükselten-düşüren DC dönüştürücünün güç seviyesi dikkate alındığında, bu yöntemin küçük yükler için uygun olduğu görülmüştür. Bu yöntem kullanılarak, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla faz akımlarındaki dalgalanmaların büyük oranda azaldığı fark edilmiştir (Çelikel, 2017)

Konghirun ve Srisiriwanna , rotorun kalıcı mıknatısının stator dişleri ile etkileşiminden kaynaklanan dişlinin torkunu azaltmak için bir çalışma yapmışlar. Bu araştırma ile sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanarak dişli torkunu azaltmak için beş yöntem arasında bir karşılaştırma sunulmuştur. Bu yöntemlerde, hava aralığı uzunluğu, yuva genişliği, yuva/kutup sayısı, mıknatıs akı yoğunluğu ve rastgele stator yuvaları incelenmiştir. Bu yöntemin, motor verimliliğini azaltan diğer yöntemlere kıyasla dişli torkunu önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Konghirun ve Srisiriwanna, 2012)

Hwang ve arkadaşları robotikte elektromanyetik motor olarak kullanılmak üzere üç fazlı yuvasız bir BLDC motor tasarlamak için bir çalışma sunmuşlar ve burada motorun başlangıç tasarımını makul bir geometri içinde geliştirmek için genetik algoritmalar (GA'lar) kullanılmışlardır. Ayrıca çalışmada, robotik uygulamalarda hızlı cevap için gereken yüksek tork-atalet ve tork-ağırlık oranları elde edilmiştir. Makinenin performansı

3D Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) kullanılarak kontrol edilmiş ve deneysel ölçümle doğrulanmıştır (Hwang vd, 2012).

Safi ve arkadaşları BLDC motorların yüksek hızlı tork performansını iyileştirmeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, fırçasız bir motorun kararlı durum performansını tahmin etmek için pratik bir hesaplama tekniği sunulmuştur. Bu yöntem, sistem parametrelerinin ve çalışma düzenlerinin sürücü performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için uygun ve ekonomik bir yol sağlamaktadır. Analiz sonuçları, BLDC motorun yüksek hızlı tork özelliklerinin, seçilen faz ilerleme açısı ayarının ayarlanması ve uygun iletim açılarının kullanılmasıyla önemli ölçüde iyileştirilebileceğini açıkça göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, yüksek hızlı tork performansının, sargı endüktansındaki mütevazı artışlarla birlikte faz ilerlemesi ile geliştirilebileceğini göstermiştir (Safi vd, 1995).

Boukais ve Zeroug BLDC motorun performanslarını yüksek hız altında incelemişlerdir. Çalışmanın temel amacı, elektrikli araçların gereksinimlerini karşılayan optimum çalışma koşullarının belirlenmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile performansın ayrıntılı bir şekilde incelemesi ve demir kayıplarının tahmini gerçekleştirilebilir ve böylece zayıf alan koşullarında genel sistem verimliliğinin daha doğru bir değerlendirmesi yapılabilir. Kullanılan bu yöntem sayesinde farklı yükleme koşulları altında demir kayıpları azaltılarak verimlilikte iyileştirme sağlanabilir (Boukais ve Zeroug, 2014).

Kayabaşı ve Topçu BLDC motorun stator ve rotorundaki yapısal değişikliklerin, belirlenen hız aralığında motorun çıkış gücü ve verimine etkisini inceleyen bir çalışma sunmuşlardır. Motor parametrelerindeki değişiklikler, ANSYS Maxwell programının ön tasarım modülünde (RMxprt) gerçekleştirilmiştir. Motorun stator kısmında laminasyon sac paketinin uzunluğu, sıkıştırma faktörü, slot tipinin değiştirilmesi ile ilgili analizler, rotor kısmında da mıknatıs malzemesi, mıknatıs dizilimi, rotorun yapısı ile ilgili analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde daha düşük hava aralığına sahip olan slot tipi diğer tiplerine göre daha yüksek çıkış gücü ve verim sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca motorun yüzey mıknatısı, diğer kanal tipi ve gömülü tipi ile karşılaştırıldığında, tüm hızlarda güç ve verimlilik açısından daha uygun olduğunu göstermiştir. Laminasyon sac paketinin uzunluğunun ve rotorda farklı mıknatıs malzemelerinin kullanımında hız değerine bağlı olarak performansın değiştiği

görülmüştür. İç rotorlu motorun tüm hızlarda daha verimli çalıştığı ve dış rotor tasarımının güç açısından maksimum devrine (2750 rpm) yakın bölgede daha fazla güç çıkışı sağladığı gözlemlenmiştir. Neodimiyum ve samaryum mıknatıslarla tasarlanan motorların düşük hızlarda, XG196/96 mıknatıslarla yüksek hızlarda daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Kayabaşı ve Topçu, 2019).

El-samahy ve Shamseldin yüksek performanslı BLDC motor için üç farklı güçlü kontrol teknolojisini sunmuşlar. Çalışmanın amacı, her bir kontrol tekniğinin rotoru önceden belirlenmiş bir hız/konum yolunu izlemeye zorlama yeteneğini test etmektir. İlk teknik ünlü PID denetleyicisidir. İkinci denetleyici tekniği, üç farklı maliyet fonksiyonunu en aza indirerek denetleyici parametrelerinin değerlerini ayarlamak için genetik algoritmayı kullanılmıştır. Üçüncü teknoloji ise kontrolörün parametrelerinin sabitlenmediği bulanık PID'dir. Gerekli hız takibini sağlamak için hata ve değişim hatasına göre adaptif olarak güncellenir. Sonuçlar, önerilen bulanık PID'nin diğer iki teknikle karşılaştırıldığında daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir (El-samahy ve Shamseldin, 2014).

Özgenel, fırçasız bir DC motor performansının artırmak için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın amacı, darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği ile faz akımlarını kontrol eden 12 kademeli inverter üretmek ve bu amaçlanan 12 kademeli inverter altında çalışan BLDC motorun dinamik performansını analiz etmektir. 12 kademeli bir invertörde, her aralıkta iki veya üç transistör iletim modundadır ve iletim kayıplarını azaltmak için PWM modunda sadece bir transistör çalışmıştır. Deneysel sonuçlar, 12- kademeli inverterin 6-kademeli inverterden daha yüksek bir faz gerilimi, tork, hız ürettiğini göstermektedir. Çünkü 12 kademeli inverterde üç faz aynı anda aktiftir, tork ve hız üretimine katkı sağlar. Çalışmanın sonunda, sonuçlar bağımsız esnek 12 kademeli PWM inverter ile çalışan fırçasız motorun 6 kademeli invertere göre yüksek dinamik performans ürettiğini göstermiştir (Özgenel, 2020).

Jang ve Lee BLDC motoru büyük torkla yüksek hıza sürmek için yeni bir sarma yöntemi ve invertör devresi sunmuşlardır. Önerilen sargı bobinleri çift bobin yani ana ve yardımcı bobinlerden oluşmaktadır ve önerilen evirici devresi dokuz anahtara sahiptir. Başlangıç periyodunda büyük başlangıç torku üretmek için hem ana hem de yardımcı sargılar paralel bağlantıyla enerjilendirilmiştir (Jang ve Lee, 2005).

Yedemale genel olarak fırçasız motorlar üzerine incelemede bulunmuştur. Bu inceleme, motor yapısı ve çalışma prensipleri, stator bobinleri, sabit mıknatıslı rotor, indüklenen elektromotor kuvveti, rotor sensörleri, tork karakteristikleri, fırçasız DC motorların diğer motorlarla karşılaştırılması gibi konuları kapsamaktadır (Yedemale, 2003).

Çetin ve Yaz bisikletlerde kullanılan fırçasız bir DC motor tasarlayıp motorun detali analizini yapmışlardır. Tasarlanmış BLDC motorun genel özellikleri, besleme gerilimi 72 V, slot sayısı 45, kutup sayısı 50 olup sargılar yıldız şekilde bağlıdır. Burada başlangıç torku için üç başlangıç açısı araştırılmış ve en iyi başlangıç açısının 90 derece olduğu görülmüştür. Tasarlanan motorun dişli torku 0,6 Nm olup, sürekli tork 22 Nm'dir. Mıknatısların yüzeyi ile stator arasındaki hava boşluğunda akı yoğunluğu 0.8 tesladır. (Çetin ve Yaz, 2021).

Orman vd tarafından yapılan bir çalışmada fırçasız doğru akım motoruna hız kontrolü için geleneksel PI kontrolcü ve Kesir dereceli PI kontrolcü yapıları uygulanmıştır. Araştırmacılar, kontrolcü yapısında fırçasız doğru akım motorunun transfer fonksiyonu fabrika verileri kullanılarak elde etmişler ve kesir dereceli kontrolcüyü s-döneminde tasarlayıp sisteme uygulamışlardır. Fırçasız doğru akım motoruna farklı referanslar için uygulanan PI ve KDPI kontrolcülerinin hatayı elimine etme, yükselme zamanı, sistemde meydana gelen değişimlere tepki süreleri ve takip başarısı gibi faktörler ile kıyaslamaları yapılarak bunun sonucunda referans takibinde KDPI kontrolcünün geleneksel PI kontrolcüye göre düşük hızlarda da başarılı olduğunu saptamışlardır. KDPI kontrolcü, klasik PI kontrolcüsü tarafından sağlanamayan ve sistemde ihtiyaç duyulan anlık değişimlere karşı hızlı cevap verme yeteneğini sağlayarak sistemde oluşan hataları tolere ettiği belirlenmiştir. Aynı zamanda, referanstan kopmama ve referans işareti takip etme başarısı açısından PI kontrolcüye nispeten daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır (Orman vd, 2016).

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Tarihçesi

Modern toplumda elektrik, en popüler enerji kaynaklarından biridir. Motorun uygulamaları, bir asırdan fazla süredir elektromekanik enerji dönüştürme cihazı olarak günlük hayatımızda her türlü alana yayılmıştır. Farklı pratik uygulamalara ayak uydurmak için, zamana bağlı olarak senkron motorlar, asenkron motorlar, DC motorlar, ve benzerleri dahil olmak üzere birkaç milivattan milyon kilovata kadar çıkan çeşitli motor türleri ortaya çıkmıştır. Senkron motor, yüksek tork, sert mekanik özellik, yüksek hassasiyet ve verimlilik gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, hız regülasyonunda, uygulama aralığını sınırlandıran dezavantajlara sahiptir. Endüksiyon motorları da, basit yapı, kolay üretim, güvenilir çalışma ve düşük fiyat avantajlarına sahiptir. Ancak motorun hızının geniş aralıkta düzenlenmesi yüksek maliyet gerektirir ve motorun çalıştırılması da kolay değildir. Bu motorlar düşük hızlarda yüksek tork üretebilmesine rağmen, gürültü ve tork dalgalanmaları geniş aralıklarda kullanımlarını sınırlar.

DC motorlar, elektrikli çekiş ve kaldırma ekipmanı gibi çalıştırma ve hız regülasyonu gerektiren elektrikli güç tahrik sistemlerinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü bu tür motorlar yüksek verimliliğe ve iyi hız düzenleme performansına sahiptirler. Bu özellikler karşılığında bu motorlarda komütasyon işlemi fırçalarla mekanik olarak yapılır, bu da kıvılcım oluşturan ve gürültü çıkaran mekanik sürtünme gibi birçok soruna neden olup, motorun ömrünü kısaltır. DC motorun, yüksek üretim maliyeti ve bakımının zor olması gibi dezavantajları göz önüne alındığında, uygulama yelpazesi sınırlıdır (Inoue ve Nakaoka, 1998). Bu nedenle, küçük ve orta ölçekli uygulamalar yeni yüksek performanslı motorlara ihtiyaç duymaktadır.

İlk DC motor, Faraday tarafından elektromanyetik indüksiyon ilkesinin önerilmesinden sonra 1840' larda yapılmıştır. 1930'larda bazı bilim adamları, geleneksel DC motorların dezavantajları nedeniyle, elektronik anahtarlamının uygulandığı fırçasız motorlar geliştirmeye başlamışlardır. 1955 yılında Harrison ve Rye tarafından tristör inverter devresi mekanik komütasyon ekipmanlarının yerini almak üzere icat edilmiştir. Böylece BLDC motorların temelleri bu şekilde atılmış oldu. Sonrasında ise, birçok deneme ve uygulama ile elektronik komütasyonlu fırçasız doğru akım motorları geliştirilmiştir.

1970'lerde, BLDC motorun kontrolü için duyarlılığı Hall elemanınınndan neredeyse binlerce kat daha fazla olan bir mıknatıs algılama diyotu başarıyla kullanılmıştır. Daha sonra, çok sayıda yüksek performanslı yarı iletkenlerin ve NdFeB gibi kalıcı mıknatıs malzemelerinin ortaya çıkmasıyla BLDC motorların kullanımı geniş çapta yayılmıştır. Ayrıca, BLDC motorlar sürücü sistemlerinde, kayan modlu değişken yapı kontrolünde, sinir ağı kontrolünde, bulanık kontrolde, adaptif kontrolde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Ciba, 2019).

3.2. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Diğer Motorlarla Karşılaştırılması

Geleneksel (fırçalı) bir DC motorda, fırçalar rotor üzerindeki bir dizi elektrik kontağıyla (komütatör olarak adlandırılır) mekanik temas kurarak DC elektrik kaynağı ile armatür bobin sargıları arasında bir elektrik devresi oluşturur. Armatür eksen üzerinde dönerken, sabit fırçalar dönen komütatörün farklı bölümleriyle temas eder. Komütatör ve fırça sistemi, seri olarak çalışan bir dizi elektrik anahtarı oluşturur, böylece elektrik enerjisi her zaman statora en yakın motor bobininden (kalıcı mıknatıs) akar. Bir endüksiyon motorunda, Stator sargısına enerji beslendiğinde, bobindeki akımın akışı nedeniyle statorda bir manyetik akı üretilir. Rotor sargısı, her bobin kısa devre yapacak şekilde düzenlenmiştir. Statordan gelen akı, rotordaki kısa devreli bobini keser. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre rotor bobinleri kısa devre yaptığından, akım rotor bobininden akmaya başlayacaktır. Rotor bobinlerinden geçen akım aktığında, rotorda başka bir akı üretilir. Böylece iki tür akış vardır, biri stator akışı, diğeri rotor akışıdır. Rotor akısı, stator akısına göre gecikmeli olacaktır. Bu nedenle rotorun manyetik alanı yönünde dönmesine neden olacak bir tork oluşacaktır. Bir BLDC motorda, elektromıknatıslar hareket etmez, bunun yerine kalıcı mıknatıslar döner ve armatür sabit kalır. Bu tip motorlarda akımlar, komütatör ve fırçalar yerine elektronik bir devre ile armatüre aktarılır. BLDC motorları basit dikkörtgen dalga biçimleriyle çalıştırılabilirken, diğer motorlar sinüs dalga biçimlerinin oluşturulmasını gerektirir. Bunun nedeni, BLDC motorun stator kutuplarının senkron yapısı ve yamuk sargısıdır. Tablo 3.1'de, geleneksel bir DC motor ile fırçasız bir DC motor arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 3.1. Kalıcı mıknatıslı fırçasız DC motorların fırçalı DC motorlarla karşılaştırılması (Tashakori vd, 2011)

Özellik	Fırçasız DC Motor	Fırçalı DC Motor
Komütasyon	Hall konum sensörlerine dayalı elektronik komütasyon kullanır	Fırçalı komütasyon kullanır
Bakım	Fırçaların olmaması nedeniyle daha az bakım gerektirir	Periyodik bakım gerektirir
Ömür	Daha uzun ömürlüdür	Daha kısa ömürlüdür
Verimlilik	Daha yüksek verime sahiptir	Orta verime sahiptir
Tork / Hız Karakteristigi	Kararlı (flat)	Orta kararlı (Moderately flat)
Güç Yoğunluğu (watt/kg)	Yüksektir	Düşüktür
Döneç Ataleti	Düşüktür	Daha yüksektir
Hız Aralığı	Hız aralığı daha yüksektir	Hız aralığı daha düşüktür
Elektriksel Gürültü Üretimi	Düşük elektrik gürültüsü üretir	Fırçalarda ark nedeniyle elektrik gürültüsü oluşturur
Motor kontrolü	Karmaşık ve pahalıdır	Basit ve ucuzdur
Üretim Maliyeti	Daha yüksektir	Düşüktür
Soğutma	İyidir	Zayıftır

3.3. Tipik BLDC Motor Uygulamaları

BLDC motorlar, sektörün her alanında kendilerine uygulama alanı bulmuşlardır. BLDC motorlara ait uygulamalar aşağıdaki gibi üç ana kategoriye ayrılabilir:

- **Sabit Yüklü Uygulamalar**

Hızın doğruluğunu belirli bir hızda tutmaktan daha önemli olduğu uygulama türleridir. Bu tür uygulamalarda yük doğrudan motor şaftına bağlanır. Örneğin, fanlar, pompalar ve üfleyciler bu tür uygulamalara girer. Bu uygulamalar, düşük maliyetli, karmaşık olmayan denetleyiciler gerektirir.

- **Değişken Yüklere Sahip Uygulamalar**

Motor üzerindeki yükün hız aralığına göre değiştiği uygulama türleridir. Çamaşır makineleri, kurutucular ve kompresörler buna iyi örneklerdir. Yine, yakıt pompası kontrolü, elektronik direksiyon kontrolü, motor kontrolü ve elektrikli araç kontrolü bunlara örnektir. Havacılıkta santrifüjler, pompalar, robotik kol kontrolleri, jiroskop kontrolleri gibi uygulamalarda örnek olarak verilebilir. Bu uygulamalarda gelişmiş kontrol algoritmaları kullanır ve bu nedenle kontrolörü karmaşık hale getirir.

- **Konumlandırma Uygulamaları**

Endüstriyel ve otomasyon uygulama türlerinin çoğu bu kategoriye girer. Bu kategorideki uygulamalar, mekanik dişliler veya triger kayışları gibi güç aktarım sistemlerine sahiptirler. Bu uygulamalarda hız ve torkun dinamik tepkisi önemlidir. Ayrıca, bu uygulamalarda sık sık dönüş yönü tersine çevrilebilir. Motor üzerindeki yük tüm bu aşamalarda değişebilir ve bu da kontrolörün karmaşık olmasına neden olur. Bu sistemler çoğunlukla kapalı döngüde çalışırlar. Aynı anda çalışan üç kontrol döngüsü olabilir; Tork kontrol döngüsü, Hız kontrol döngüsü ve Konum kontrol döngüsüdür. Motorun gerçek hızını ölçmek için optik kodlayıcı veya senkron çözücüler kullanılır (Rambabu, 2007).

3.4. Fırçasız DC Motoru Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

BLDC motorlar aşağıda belirtildiği gibi pek çok olumlu özelliklere sahiptirler.

- BLDC motorların hız kontrolü çok iyidir. Kontrol edilebilen hız aralığı asenkron motorlara göre daha yüksektir (Karakulak vd, 2012).
- BLDC motorlar, fırça olmaması nedeniyle fırçalı DC motorlardan daha az bakım gerektirmektedir.
- BLDC motorlar ile yüksek verim elde edilir.
- Elektrik gürültüsü üretimi, fırçalı DC motordan daha düşüktür (Yedamale , 2003).
- BLDC motorların ömrü uzundur.
- BLDC motorların çalışması güvenilirdir.
- BLDC motorların tork/hacim oranı yüksektir, bu nedenle BLDC motor ürünü daha az bakır kullanır.

- Rotordan geçen akımın olmaması nedeniyle motorun hareketli kısmı ısınmaz. Bu nedenle rotoru soğutmaya gerek yoktur. Ayrıca akım taşıyan iletkenler statorda bulunur ve statorun dış yüzeyinin de soğutulması kolaydır.

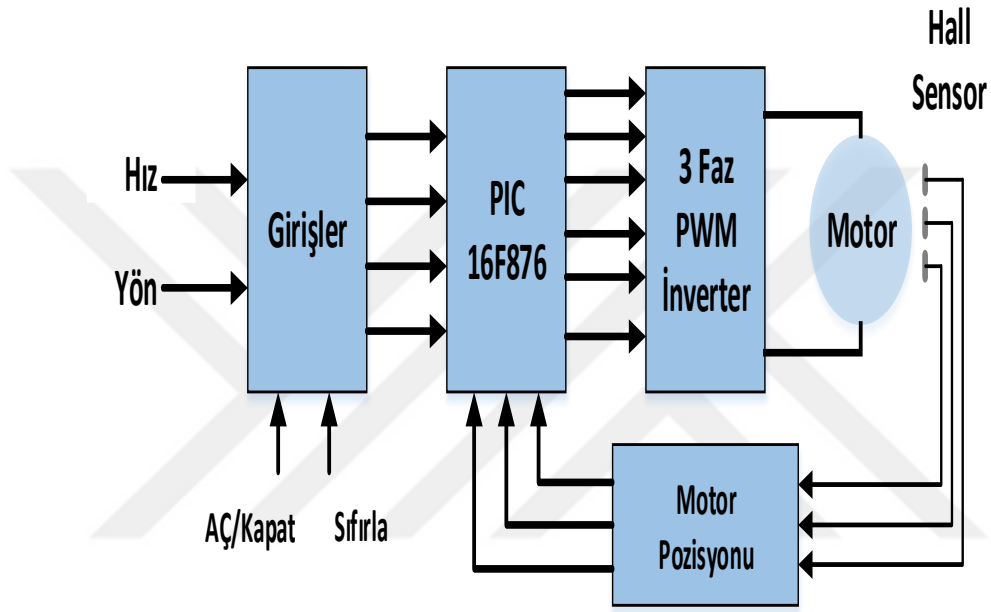
Bu olumlu özelliklere rağmen bazı dezavantajlar da bulunmaktadır :

- BLDC motorların çalışması için, operasyonda istenen harici güç elektroniğı ve rotor konum bilgisi gereklidir. BLDC motor çalışmasında hall etkisi sensörlerinin kullanılması gerekir.
- Motorun sensörsüz çalışabilmesi için karmaşık algoritmalara ihtiyaç duyulmakta ve bu da maliyeti artırmaktadır.
- BLDC motor sürücülerinde inverter hataları oluşabilir.
- Sabit mıknatıslı BLDC motorlar çok yüksek hızlara ulaşamazlar.
- Kalıcı mıknatıslar uzun süre kullanılırsa atmosferik ve termik etkilerden dolayı manyetizma özellikleri zarar görür (Yılmaz, 2005).

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Motor ve Sürücü Sistemi Yapısı

Fırçasız doğru akım motoru beş bölümden oluşmaktadır. Bunlar; sabit mıknatıstan oluşan rotor, Motor bobinlerini içeren stator, konum sensörlerinden oluşan geri besleme birimi, evirici ve sürücü birimi, denetleyici (yazılımsal ve donanımsal yapılar).



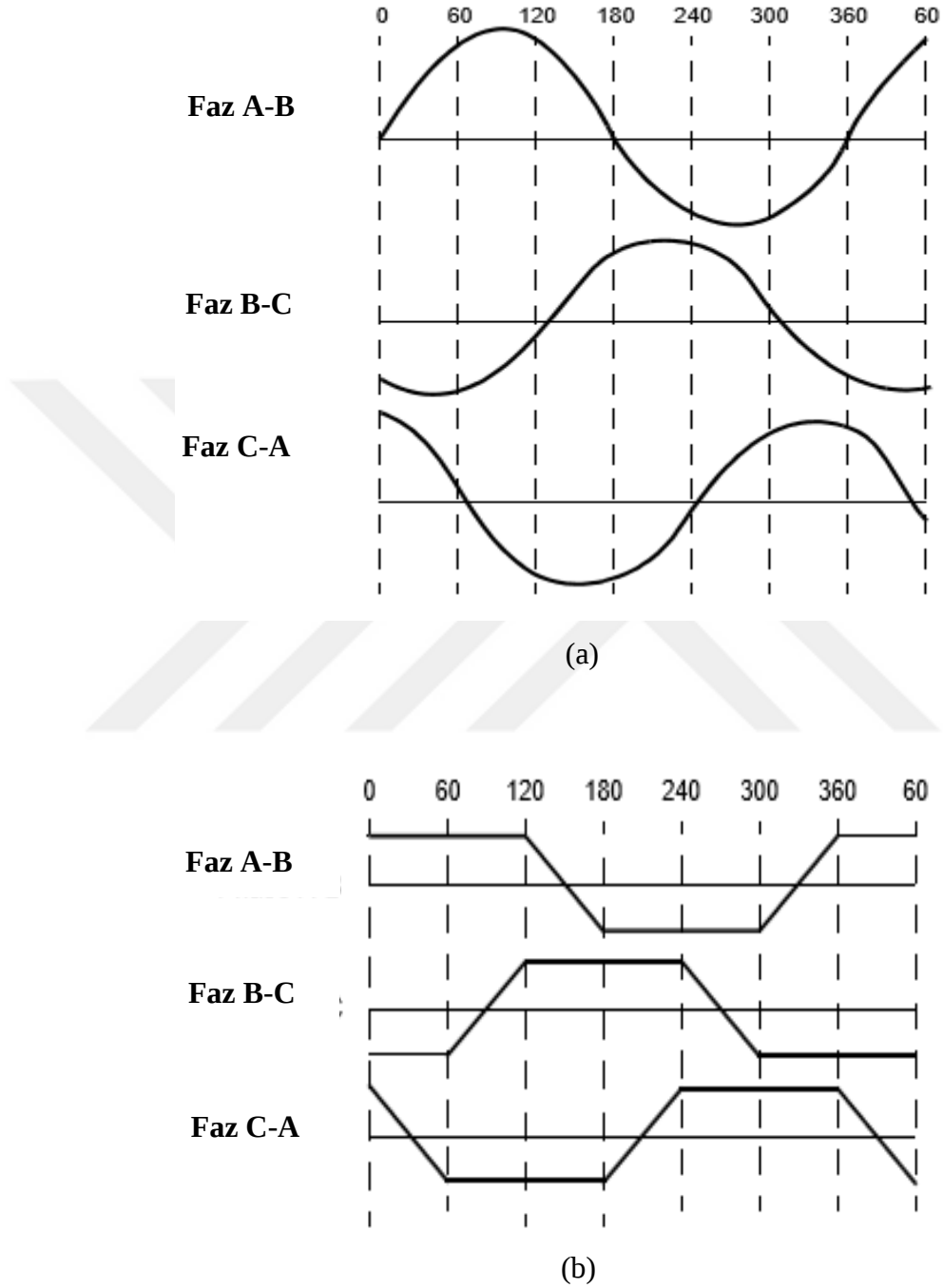
Şekil 4.1. Fırçasız doğru akım motorunun sürücü sistemi (Ciba ve İskender, 2018)

Şekil 4.1'de PIC16F876 denetleyici ile kurulan sistem görülmektedir. Burada geri besleme üniteleri için hall etkili pozisyon sensörleri kullanılmıştır. Bu sensör, dönen parçanın (rotor) konumunu algılar ve denetleyiciye bilgi gönderir.

4.1.1. Stator yapısı

BLDC motorunun statoru, motorun sabit kısmıdır. Stator, bir çekirdek ve içindeki oluklara yerleştirilen sargılardan oluşur. Fırçasız DC motorların statoru ile senkron motorlardaki stator arasındaki fark, sargıların dağılımının şeklidir. Senkron motorlarda sargılar stator boyunca sinüzoidal olarak yerleştirilir. Buna karşın BLDC motorlarında stator sargıları kutup ayaklarının altına yığılınım biçimde yerleştirilir. Buna bağlı olarak BLDC motorunda endüklenen EMK yamuk formda olmaktadır. Şekil 4.2 a , b'de fırçasız

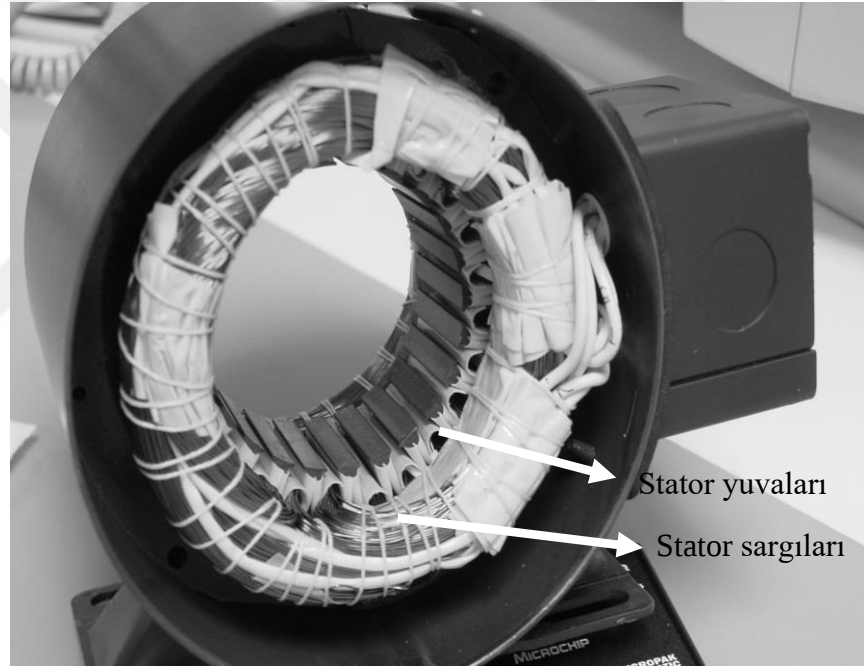
doğru akım motoru ile senkron motorun ters EMK dalga biçimleri arasındaki farkı gösterilmektedir.



Şekil 4.2. a) Sinüzoidal Zıt EMK b) Yamuklu Zıt EMK (Yedamale, 2003)

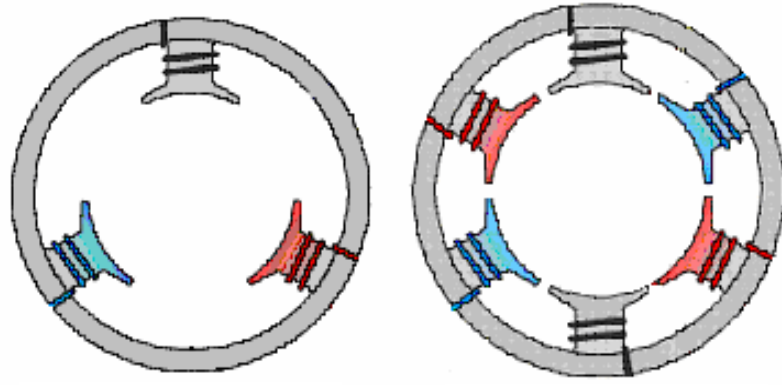
Tek veya çok fazlı simetrik sargılar, yıldız (Y) veya üçgen (D) şeklinde bağlanabilir. Bu iki bağlantı şekli arasındaki en büyük fark, yıldız modelinin düşük RPM'de yüksek tork

vermesi ve üçgen modelinin yüksek RPM'de düşük tork vermesidir. Bunun nedeni, üçgen bağlantıda, sürülmeyen sargıya voltajın yarısının uygulanması, böylece kayıpların ve dolayısıyla verimliliğin ve torkun artmasıdır. Sistemin performansı ve maliyeti göz önüne alındığında Y tipi bağlantı daha çok kullanılır (Xia, 2012). Motor statoru, demir kayıplarını azaltmak için özel saçlardan yapılmıştır. Sargıların stator içerisinde bulunması, sargılarda oluşan ısının dışarıya aktarılmasını kolaylaştırarak motorun soğutulması sağlar. Stator boyutları, motor gücüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Güç arttığı zaman, motorun üzerinden geçen akım ve buna bağlı olarak kablo kesiti artar. Kablonun kesit alanındaki bu artış, sargıları barındırmak için stator boyutunu arttırır. Fırçasız bir DC motorun stator yapısı Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Fırçasız bir doğru akım motorun statoru ve sargıları (Aydoğdu, 2006)

BLDC motorlarda oluk şekli ve sayısı, rotorun kutup sayısı, sarım tipine, sarım şekline ve faz sayısına göre seçilir. Genellikle kesirli bir oluk/kutup oranına sahip tasarım diş etkisi (cogging) momenti minimize etmek için tercih edilir (Yedamale, 2003). Genellikle küçük makinelerde oluklar, oval veya yuvarlak yapılırken, büyük makinelerde şekil tamamen açıktır (Yılmaz, 2005). Stator sargılarının sarıldığı çıkıkların sayısı, kutupların çift sayısının 3 katına eşittir. Şekil 4.4' de iki ve dört kutuplu stator yapıları gösterilmektedir.



a) 2 Kutuplu Stator

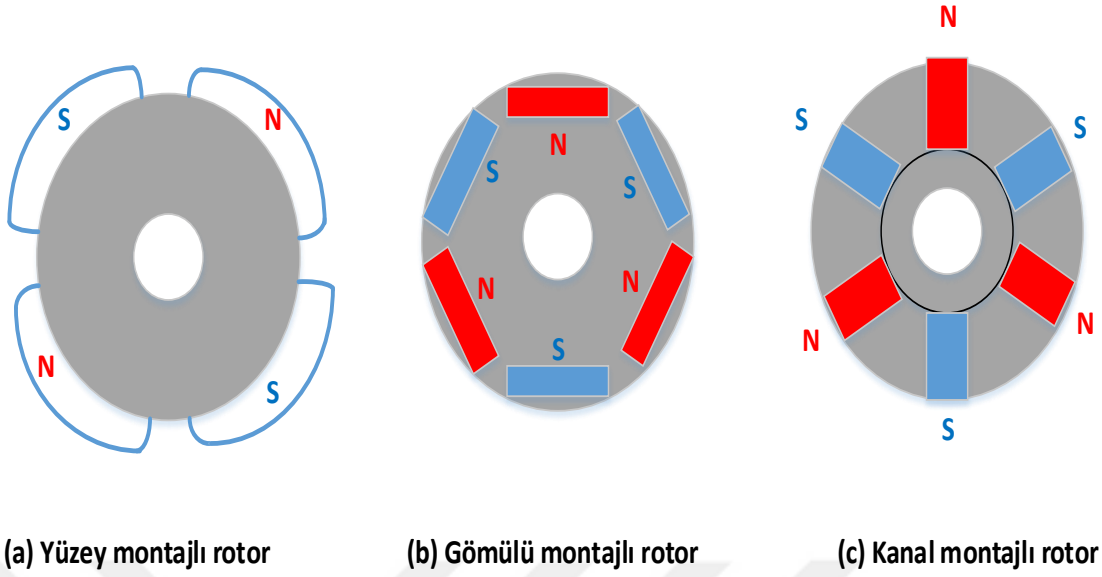
b) 4 Kutuplu Stator

Şekil 4.4. Farklı kutuplu, stator yapıları (Atan, 2007)

4.1.2. Rotor yapısı

Rotor, sabit mıknatıslar içeren motorun dönen kısmıdır. Fırçasız motorlarda rotor bir veya daha fazla mıknatıstan oluşur. Sabit mıknatıslı fırçasız motorlarda, rotorda fırça ve kolektör bulunmaz ve bunun sonucunda kıvılcım oluşmaz ve sık bakım yapılmasına gerek kalmaz. Bu nedenle, sürtünmeden kaynaklanan kayıplar azalır. Rotordaki gerekli manyetik alan yoğunluğuna bağlı olarak, rotoru yapmak için uygun manyetik malzeme seçilir. Ayrıca belirli bir motor için mıknatıslarda kullanılacak malzemeleri seçerken dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar vardır. Bunlar, çalışma sıcaklığı aralığındaki mıknatıs sertlik değerleri, motorun birim hacmine düşen moment miktarıdır (Ulu, 2011). Ferrit ve AlNiCo mıknatıslar, düşük maliyetli oldukları için çeşitli uygulamalarda kullanılırlar (Jung vd, 2003). Ancak bu mıknatıslar düşük akı yoğunluğuna sahip olduğundan iyi manyetik özelliklere sahip SmCo ve NdFeB mıknatıslar performans ve verim odaklı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kalıcı mıknatısın, rotora monte edilme yöntemine göre, üç tip fırçasız DC motor bulunmaktadır. Bunlar: sabit mıknatısları rotor yüzeyine monte edilmiş motorlar (Bkz. Şekil 4.5a), dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotor içerisine gömülü monte edilen motorlar (Bkz. Şekil 4.5b), ve dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotor kanallarına yerleştirilen motorlardır (Bkz. Şekil 4.5c).



Şekil 4.5. Fırçasız DC motorların rotor çeşitleri (Yedamale, 2003)

Şekil 4.5a’da görüldüğü gibi, sabit mıknatısları rotor yüzeyine monte edilmiş motorlarda kalıcı mıknatıslar rotorun yüzeyine monte edilmiştir. Bu tip rotorların imalatı kolaydır ve mıknatıslar stator kutuplarına yakın olduğu için cogging momentı daha küçüktür. Ancak bu avantajlara rağmen rotorun yüzeyine yerleştirilen kalıcı mıknatıslar yüksek hızlarda parçalanabilir. Rotorun konumu ile etkin hava boşluğu değişmesi sonucunda, bu tip motorlarda endüktansta bir değişiklik meydana gelir.

Şekil 4.5b’de görüldüğü gibi, dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotorun içerisine monte edilmiş motorlarda, rotor çekirdeğinin içine dikdörtgen şeklinde kalıcı mıknatıslar yerleştirilir. Çok yaygın kullanımı yoktur. Ancak, bu tip rotorlar, yüksek hız gerektiren uygulamalarda oldukça uygundur. Genellikle bu tip motorlarda, rotorun konumu ile endüktansın değişimi ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Şekil 4.6c’de görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotor kanallarına monte edilmiş motorlarda, mıknatıslar rotor yüzeyine açılan kanallara yerleştirilmiştir. Bu tip, önceki iki tipe kıyasla en iyi rotor tiplerinden biri olarak kabul edilir.

Mıknatısların özelliklerinden genel olarak bahsetmek gerekirse, rotorda kullanılan kalıcı mıknatıslar genellikle iki kısma ayrılır. Bunlar AlNiCo (Alüminyum-Nikel-Kobalt), seramik (stronsiyum ve baryum ferrit) gibi nadir olmayan toprak elemanı mıknatısları ve

SmCo (Samaryum Kobalt), NdFeB (Neodminyum-Demir-Bor) mıknatısları gibi nadir toprak elemanı mıknatıslardır.

- AlNiCo mıknatıslar (alüminyum-nikel-kobalt alaşımı)

Bu mıknatıslar alüminyum, nikel ve kobalt bileşiklerinden yapılmış ve ilk olarak 1910'da kullanılmıştır. Bu bileşenlerin doğasının kırılğan ve sert olduğu bilinmektedir ve dolayısıyla mıknatısın ilk oluşturma işleminden sonra yeniden işlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu mıknatıslar 500°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bu mıknatısların dezavantajlarından biri, yüksek akı yoğunluğuna rağmen düşük zorlayıcı kuvvetlere sahiptir. Bu nedenle kısa zamanda manyetik özelliklerini kaybedebilmektedir. Bu kusur nedeniyle, kalıcı mıknatıslı rotorun yapımında yaygın olarak kullanılmamaktadır (Yazıcı , 2008).

- Seramik mıknatıslar

Bu mıknatıs, baryum ve stronsiyum bileşiklerinden veya kurşun oksitlerinin, demir oksitlerle oluşur, ve ilk olarak 1950'lerde kullanılmıştır. 300 °C'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilirler. Akı yoğunlukları ve zorlayıcı kuvvetleri yüksektir. Manyetik özelliklerini kaybetme riski yoktur. Düşük sıkıştırma derecelerinde kırılğan olup, yüksek ısı sabitine sahiptirler. Bu mıknatıslar, düşük maliyetleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

- SmCo mıknatıslar

Samaryum kobalt mıknatısları 1960'ların sonunda keşfedilmiş ve ticari olarak satılan ilk nadir toprak mıknatıslarıdır. Bu mıknatısların iki avantajı vardır: daha yüksek bir sıcaklık aralığında etkilidirler ve korozyona karşı daha dirençlidirler. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklı ortamlarda veya uygulamalarda performans ve boyutu karşılaştırırken en iyi değeri sunarlar. Bu mıknatıslar 300 °C'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Samaryum kobalt mıknatıslar özellikleri nedeniyle jeneratörler, pompa bağlantıları, sensörler, denizcilik uygulamaları gibi yüksek çalışma sıcaklıkları gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu mıknatısların olumsuz yanları ise pahalı olmalarıdır.

- NdFeB mıknatıslar

Neodyum mıknatıslar, mevcut en güçlü kalıcı mıknatıslardır. Bazen NdFeB veya Neo mıknatıslar olarak adlandırılırlar. Bu mıknatıslar güçlü olmalarına rağmen aynı zamanda hafiftirler, bu yüzden yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha fazla mekanik dayanıma ve daha düşük ısıl kararlılığa sahiptirler. 150 °C'yi geçmeyen sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bu mıknatıslar farklı şekillerde (disk, çubuk, halka) üretilebilir. Tablo 4.1’de dört ana manyetik malzemelerin temel özellikleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

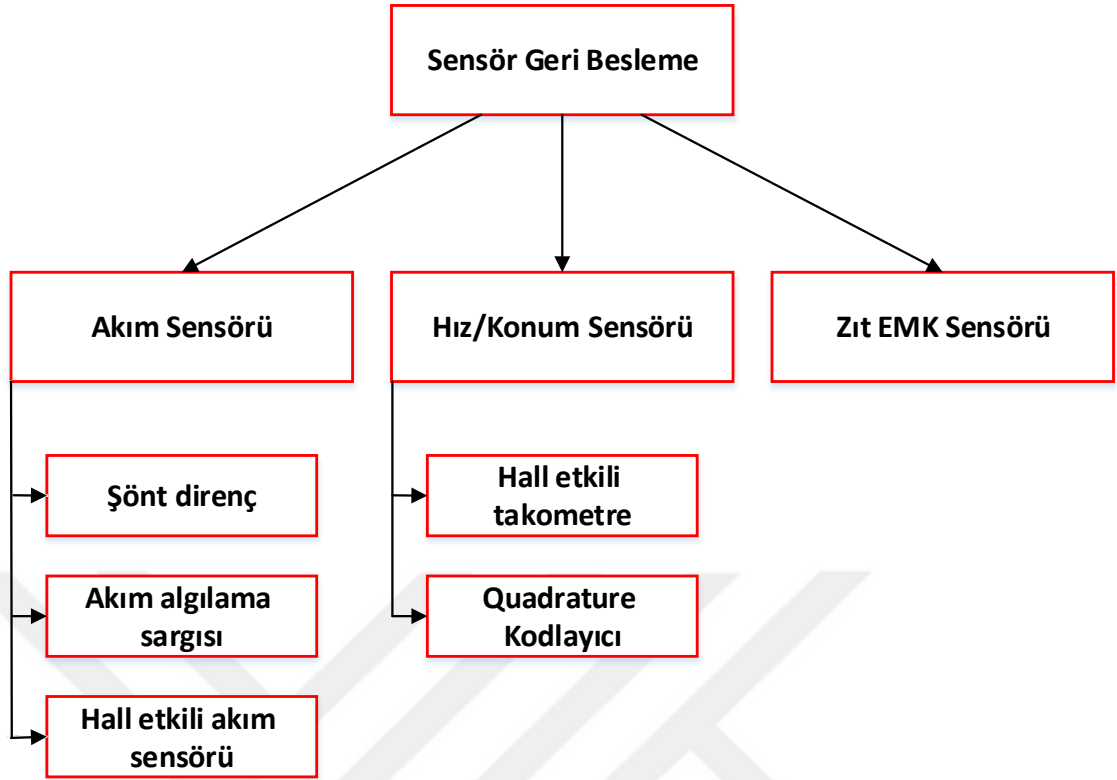
Tablo 4.1. Sabit mıknatısların karakteristikleri (Yazıcı, 2008)

Malzeme	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	Maksimum Manyetik Enerji	Maliyet	Demagnetizasyon Direnci
NdFeB	150° C	48 MGOe	Yüksek	Yüksek
SmCo	300° C	32 MGOe	Çok Yüksek	Yüksek
AlNiCo	550° C	7.5 MGOe	Orta	Orta
Seramik	300° C	4 MGOe	Çok Düşük	Düşük

4.1.3. Geri besleme ünitesi

Geri besleme ünitesi, fırçasız doğru akım motorlarında rotorun hızını ve konumunu kontrol etmek için kullanılır. Bu ünite, esas olarak, motor sargılarının çalışmasını elektronik olarak kontrol etmek için rotorun konumu hakkında bilgi sağlayan herhangi bir sensör tipinden oluşur. Sensörler, herhangi bir kaynaktan sinyal veya uyarı alan ve bu sinyallere uygun bir işaret üreten devre elemanlarıdır.

Fırçasız DC motorlarda kullanılan sensörler genellikle motor mili veya stator üzerine monte edilir. Bu sensörler tarafından sağlanan rotorun konumuna göre statordaki sargılara doğru zamanda enerji verilir. Motorun geri besleme bilgilerini sağlamak için çeşitli sensörler kullanılır. Şekil 4.6’da geri besleme bilgisi için kullanılan bazı sensörler gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Geri besleme sensör türleri (Yazıcı, 2008)

Günümüzde kullanılan en yaygın sensör türlerinden biri alan etkili sensörüdür. Küçük boyut ve motor içerisine montaj kolaylığı gibi özelliklere sahiptir. Optik sensörler, kullanılan sensör türleri arasında ikinci sırada gelir. Çözünürlüğü yüksek olduğundan bazı uygulamalarda iyi bir seçim olmasına karşın pahalıdır. Rotor konum sensörleri seçilirken belirlenecek bazı kriterler vardır. Bunlar; maliyet, çevresel koşulları, rotorda açısız yer değiştirmenin büyüklüğü, doğruluk ve hassasiyet derecesi gibi parametrelerdir.

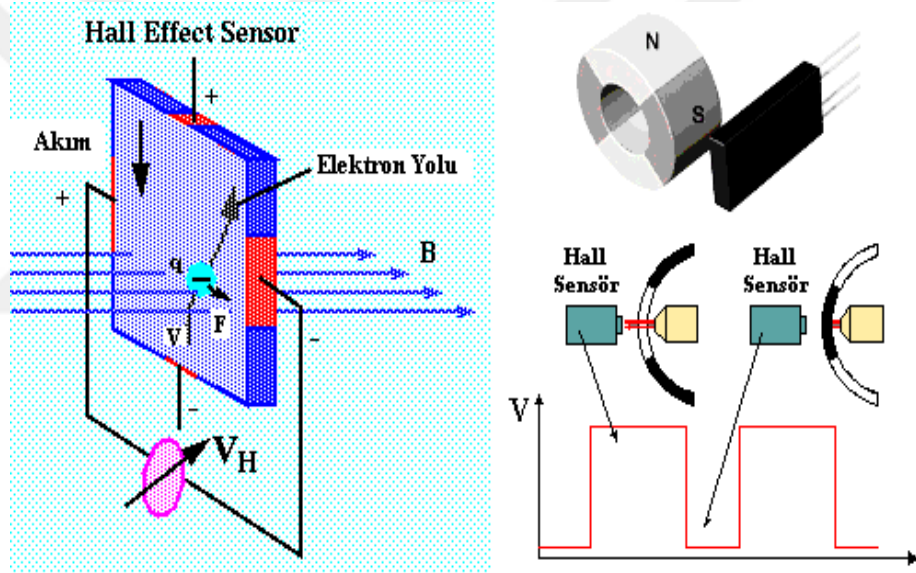
Buna ek olarak, günümüzde sensörsüz kontrol teknolojileri artmıştır. Bu teknolojiler, çeşitli ve karmaşık algoritmaların kullanılmasını gerektirir. Ayrıca sensörsüz motorlar, sensör içeren motorlara kıyasla daha düşük hızlarda olmaktadır (Bayraktar ve Balık, 2015).

4.1.3.1. Hall etkili sensör

Fırçalı bir DC motorun aksine, fırçasız DC motorun komütasyonu elektronik olarak kontrol edilir. Fırçasız DC motoru döndürmek için stator sargılarına sırayla enerji verilmelidir. Hangi sargıya enerji verileceğini anlamak için rotor pozisyonunu bilmek

önemlidir. Rotorun konumu, statora gömülü alan etkili sensörlerle öğrenilmektedir. Alan etkisi, Amerikalı araştırmacı Edwin Hall tarafından 1879'da keşfedildi. Yaptığı deneylerde içinden akım geçen altından yapılmış ince bir altın plakanın bir yüzüne, manyetik alanı dik olacak şekilde bir mıknatıs yerleştirilirse, altın plakanın diğer ucunda bir potansiyel farkı meydana geldiği görülmüş. Bu gerilim farkı, iletkeni geçen akımla ve iletkeni oluşturan manyetik akı ile orantılıdır. Bu potansiyel fark, manyetik alanın yarattığı manyetik kuvvetin sonucudur.

Motor kontrolü alanında ilk olarak hava aralığı manyetik alanını ölçmek için 1960'lı yıllarda kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.7'de alan etkisi sensörlerinin çalışma prensibi verilmiştir .



Şekil 4.7. Alan etkili sensör çalışma ilkesi (Yılmaz, 2005)

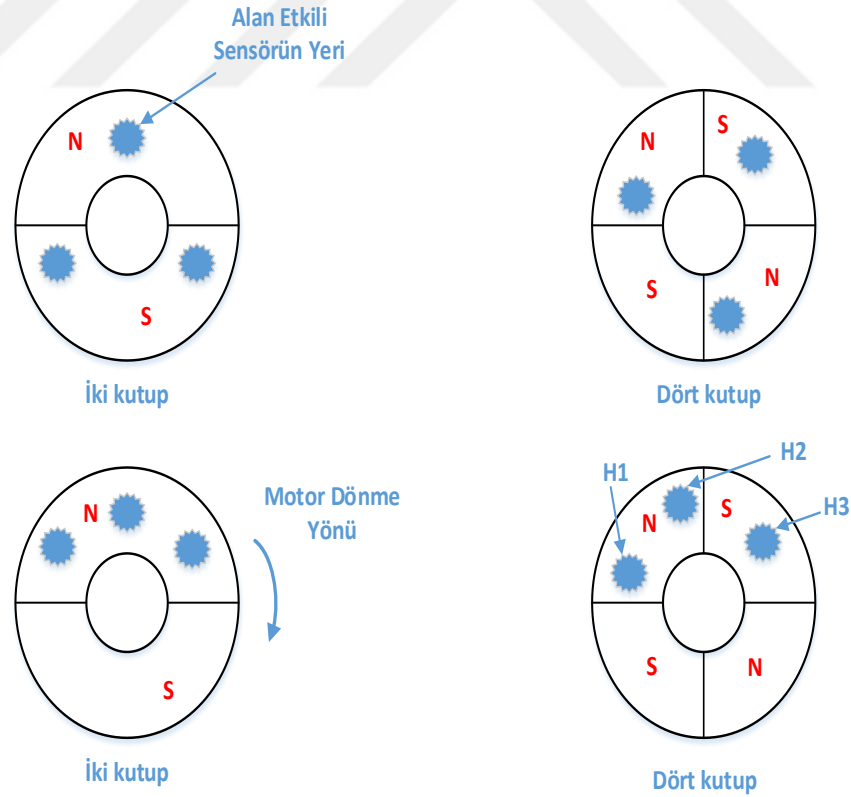
Alan içinde hareket eden elektrik yüküne etki eden kuvvet Eş. 4.1'deki gibi ifade edilir.

$$F = qvB \quad (4.1)$$

Eş 4.1.'deki formülde yer alan q , yük; v , elektron hızı; B ise manyetik alan şiddetidir. Elektron, kuvvetin etkisi ile metal plakanın kenarlarına doğru hareket edecek, elektronların hareket ettiği kısım, diğer kısımdan daha düşük potansiyele sahip olacak ve iki kısım arasında bir Hall gerilimi (V_H) oluşacaktır. Bu gerilim belirli bir sıcaklık değeri için Eş. 4.2'deki gibi ifade edilir.

$$V_H = h i B \sin \alpha \quad (4.2)$$

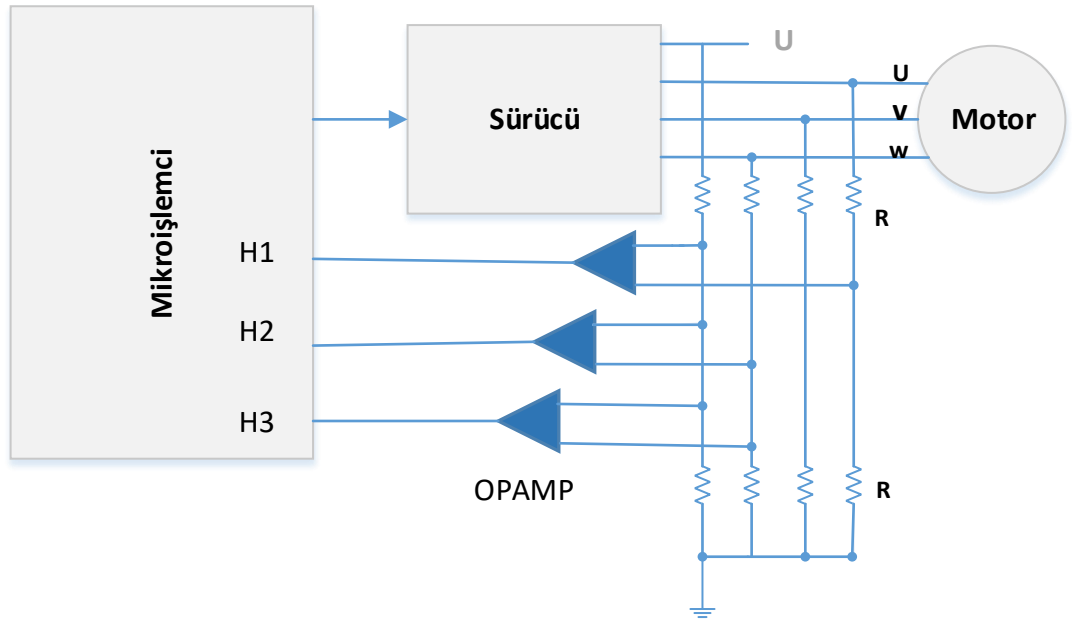
Eş 4.2.'deki formülde yer alan h , metal plaka malzemesine ve geometrik yapıya bağlı bir hassasiyet katsayısı; i , akım; α ise manyetik alan ile plaka düzlemi arasında kalan yatay açıdır (Yılmaz, 2005). Oluşan gerilimin yönü ve şiddeti, plakadan geçen akım, ayrıca manyetik alanın gücüne ve yönüne bağlıdır. Manyetik bir alanın mevcut olmadığı durumlarda bir hall gerilimi oluşmaz. Hall gerilimi 30 mV değerinde bir gerilim olduğundan bir yükselteç ile yükseltilmelidir. Burada manyetik akı, rotorun mıknatısından sağlanmaktadır. Bazı motorlarda ise motor miline bağlanan yardımcı bir mıknatıstan sağlanır. Bu sensörler, motor içerisine yerleştirilme ihtiyacı, sınırlı doğrulukları, sıcaklıklara duyarlılıkları, seri üretime uygun olmaması gibi bazı dezavantajlarla ilişkilendirilse de düşük maliyetli ve basit yapı gibi avantajları vardır. Bu nedenle çok yaygın olarak kullanılmaktadır. (Ulu, 2011). Alan etkili sensörler (Hall sensörler) 60° veya 120° aralıklarla statora monte edilir. Şekil 4.8'de bu sensörlerin farklı yerleşimini göstermektedir.



Şekil 4.8. Alan etkili sensörlerin (Hall sensörlerin) yerleşim şekilleri (Ciba, 2019)

4.1.3.2. Sıfır geçiş dedektörü

Son yıllarda fırçasız doğru akım motorunun kontrol işlemlerinde sensörlerin kullanımına paralel olarak, sensörsüz kontrol teknolojisi de birçok uygulama için kullanılmıştır. Dijital işleme kapasitesinin geliştirilmesi, sensörsüz kontrol yöntemlerinin kullanımının artmasında önemli bir rol oynamıştır. Bunlardan biri sıfır geçiş yöntemidir. Bu sensör motor sürücüsüne bağlıdır. Stator sargılarında indüklenen ters gerilime (zıt-emk) göre, rotorun konumu bilinebilir. Üç fazlı fırçasız DC motorlarda her iki faz birlikte enerjilendirilir ve üçüncü faz ise pasif durumda kalacaktır. Sıfır geçiş tekniğı, pasif fazda indüklenen ters voltajların (zıt-emk) hesaplanmasına ve işlenmesine dayanır. Algılanan EMK, eviricideki güç anahtar elemanları için uygun anahtarlama sıralarının belirlenmesi için çeşitli şekillerde kullanılabilir. Zıt EMK'nın sıfırdan getiğı nokta, iki komütasyon noktasının tam ortasıdır. Bu konseptten, sıfır noktasından geçiş gerçekleştiğinde, önceki sıfırdan geçiş noktasına yarı periyod süresi ekleyerek, bir sonraki komütasyonun gerçekleşeceği zaman tahmin edilebilir (Yazıcı, 2008). Bu tekniğı, sensörsüz kontrol işleminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri olarak kabul edilir. Bu teknolojinin avantajlarından biri hareketli parçalar içermemesi ve motorun hareketli parçalarıyla temas etmemesidir. Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı Şekil 4.9' da görölmektedir.

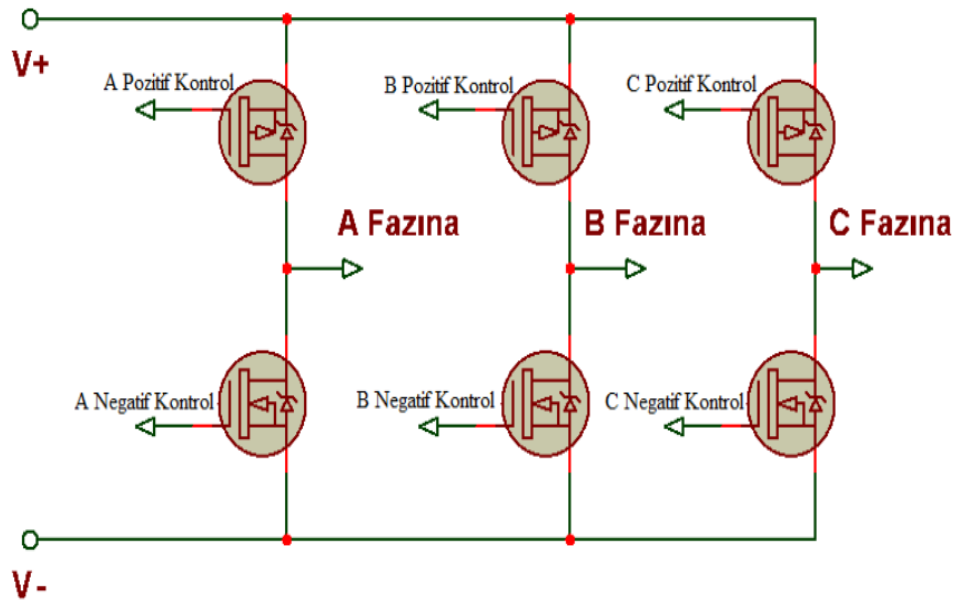


Şekil 4.9. Sıfır geçiş dedektörünün yapısı ve bağlantısı (Bayraktar, 2014)

Kalman filtre yöntemi de algılamasız işlemlerde rotorun konumunu belirlemek için kullanılan yöntemlerden biridir. Matematiksel Kalman modelinde motorun hız, konum ve ters EMK değerleri kullanılmaktadır. Bu modelde, daha sonraki zaman adımlarında motorun durumundaki değişiklikler için tahminler yapılır. Pasif fazın EMK değeri ölçüldükten sonra, tahmin edilen fazın EMK değeri ile karşılaştırılır. İki fazın EMK değerleri arasındaki fark, motorun çalışma performansını iyileştirmek için kullanılır. Bu iki yöntemi birlikte kullanarak, motorun konumu ve hızı, zamanın her anında tahmin edilir. Komütasyonun doğruluğu artırıldığında yüksek verim elde edilir (Bayraktar, 2015).

4.1.4. Evirici ve sürücü birimi

DC sinyali AC sinyale dönüştüren devrelere evirici (inverter) devresi denir. Evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak BJT, MOSFET veya IGBT tipi anahtarlar kullanılabilir. Yarı iletken elemanların performansının iyileştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi ile fırçasız motorların sürücü uygulamaları artmıştır. Geri besleme biriminden elde edilen rotor bilgisi kullanılarak, işlem ünitesinden gelen sinyallere göre evirici anahtarının açılması ve kapanması yapılır. Şekil 4.10'da MOSFET'ler ile yapılan sürücü devresi verilmiştir.



Şekil 4.10. Mosfet'lerle yapılmış sürücü devresi (Bayraktar, 2014)

Bu birimde, stator sargılarından akan akımın yönü, rotor konum bilgisine bağlı olarak değiştirilerek, bu sayede rotorun dönmesi gerçekleşir. İşlemciye ulaşan rotor konum bilgisine bağlı olarak işlemci, eviriciye bir anda biri üstte diğeri altta olmak üzere iki çift anahtar açması için bir sinyal verir; bir faza pozitif gerilim ve diğerine negatif gerilim uygulanır. Üçüncü faz ise gerilimsiz kalır. Bu gerilim uygulaması her bir faza sırayla ve ayrı ayrı uygulanır. Bu şekilde işlemci, inverter devresinin yardımıyla motorda tork üretir. Yarı iletken anahtarların tipini seçerken, anahtarlamanın hızı ve kayıpları dikkate alınır. Transistör, kullanılan en eski yarı iletken anahtar türlerinden biridir. Bu anahtarın dezavantajı, iletimden kesime veya tam tersine geçiş hızının yavaş olmasıdır. MOSFET için, anahtarlama hızı yüksektir, ancak iletimdeki kayıplar fazladır (Atan, 2007). IGBT, bir BJT transistörün ve bir MOSFET'in özelliklerini birleştirecek şekilde tasarlanmış bir güç elemanıdır. IGBT kapısının yüksek empedansı nedeniyle, kapısından akan akım küçüktür. Çok küçük akımlı bir kapı gerilimiyle kontrol edildiğinden; bir BJT'nin anahtarlamasından çok daha yüksek hızlarda anahtarlama yapabilir. Aynı zamanda IGBT'ler iletimdeyken gerilim düşümü ve kayıpları MOSFET'e göre daha az olur. Bu özellikleri nedeniyle yüksek güç - yüksek frekans uygulamalarında kullanılırlar (Chapman, 2007). Tablo 4.2'de yarı iletken anahtarların kullanım yılları ve bu anahtarların özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Yarı iletken anahtarların özellikleri (Cıba, 2019)

Adı	Kullanıma Sunulduğu yıl	Anma Gerilimi (Kv)	Anma Akımı (KA)	Anma frekansı (KHZ)	Anma gücü (MW)	İleri gerilim (V)
Tristor (SCR)	1957	6	3,5	0,5	100'lerce	1,5 - 2,5
BJT (Darlington)	1960'lı yıllar	1,2	0,8	10	1	1,5 - 3
MOSFET	1976	0,5	0.05	1000	0,1	3 - 4
IGBT	1983	1,2	0,4	20	100'lerce	3 – 4

4.1.5. Denetleyici

Geri besleme ünitesinden ve referans giriş ünitesinden bilgilerine göre bu ünite, motorun gerekli çalışma koşullarını elde etmesini sağlayan sinyaller üretir. (Bayraktar, 2014). PWM sinyallerinin durumu, kontrol sinyalleri tarafından belirtilen kontrol algoritmasına

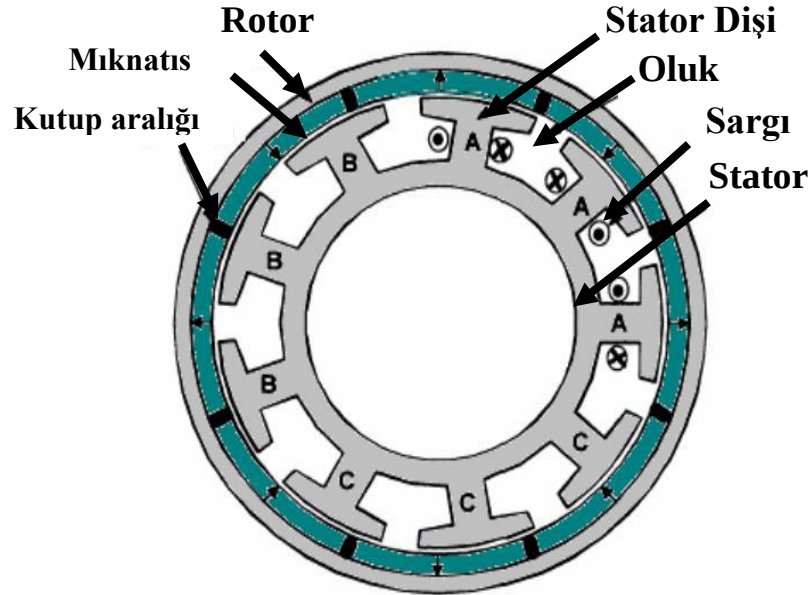
göre kontrol edilir. Bu üniteye temel olarak, hız, akım ve/veya konum kontrol edilir. Denetleyici, hem donanım ve hem de yazılım yapılarından oluşur.

4.2. Fırçasız DC Motor Çeşitleri

Fırçasız DC motorlar rotorun konumuna göre üç sınıflandırılır. Bunlar hakkında aşağıdaki gibi ayrı ayrı başlıklar ile detaylı bilgiler verilecektir.

4.2.1. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

Dış rotorlu yapılar, fırçasız DC motorlar için en yaygın kullanılan yapı türleridir. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi endüvi sargılarını taşıyan stator içte, sabit mıknatısların bulunduğu rotor ise dışta bulunmaktadır (Yılmaz, 2005). Bu, rotor kütlelerinde bir artışa ve dolayısıyla yüksek bir atalet torkuna neden olur (Gödekoğlu, 2007). Bu yapıda mıknatıslar rotora gömülü olarak yerleştirildiğinden savrulmaya karşı oldukça dayanımlıdır. Ayrıca stator sargılarının dışta olduğundan seri üretimde büyük kolaylık sağlar. Bu rotorlarda, iç rotorlu motorlara göre nispeten yüksek akı yoğunluğu gerekmediğinden, ferrit mıknatıslar daha fazla kullanım alanı bulmuştur.

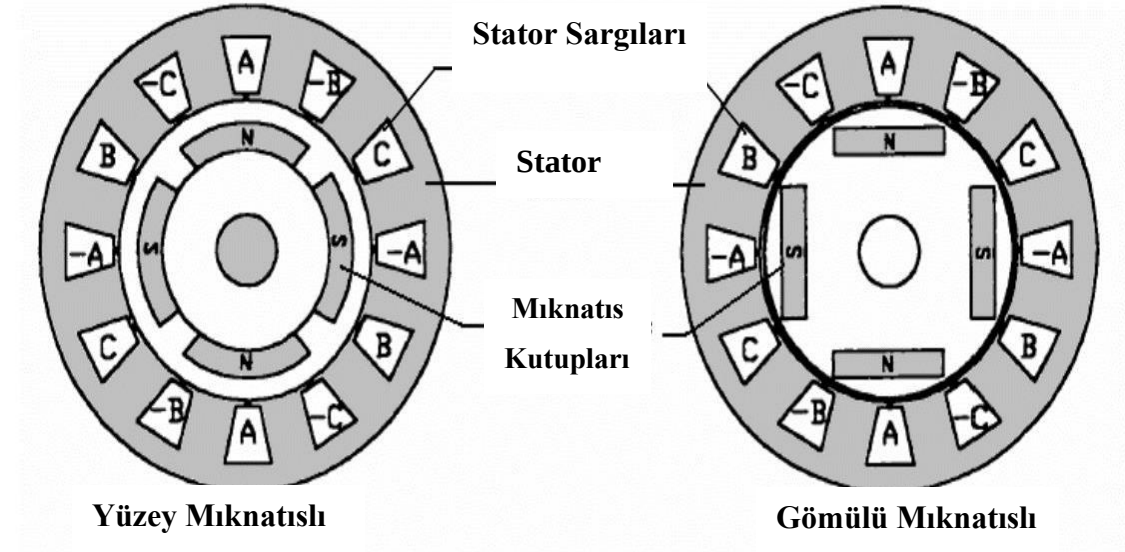


Şekil 4.11. Dış rotorlu fırçasız DC motor yapısı (Yılmaz, 2005)

Bu tip motorlar, özellikle fan ve çamaşır makinası uygulamalarında, yüksek eylemsizlik nedeni ile ani yük değişimlerinde hız sabitliğini koruma özelliğinden dolayı tercih edilirler. Otomobillerde kullanılan otomatik kontrollü klima motorları buna bir diğer örnektir. Bu motorlarda tork yüksek ve hız değeri düşük olduğu için uçak, helikopter gibi uçan araçlarda kullanılması tercih edilmektedir.

4.2.2. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

Yapısal olarak, iç rotorlu fırçasız DC motorlar, klasik senkron ve asenkron motorlara benzer olarak endüvi sargıları, dış kısımdaki statorun içine yerleştirilmiştir. Rotorda ise mıknatıslar bulunmaktadır. Bu tip rotorda, mıknatıslar rotorun dış yüzeyine ince şeritler veya yaylar halinde yerleştirilirler. Şekil 4.12’de iç rotorlu, yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı bir BLDC motorun yapısı verilmiştir.



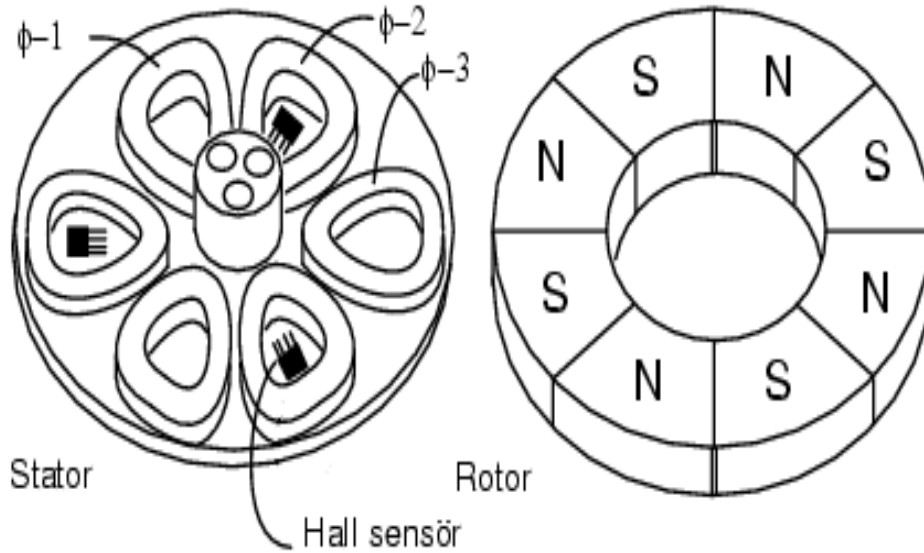
Şekil 4.12. İç rotorlu fırçasız DC motor yapısı (Yılmaz, 2005)

Bu yapının özelliklerinden biri, düşük atalet torkuna sahip olması, bu nedenle moment/ atalet oranının yüksek olmasıdır. Bu motorların, dış rotorlu BLDC motorlara kıyasla iki dezavantajı vardır. Birincisi, yüksek hızlarda rotordaki mıknatısların çıkma riskidir. Bu tehlikeyi önlemek için rotor, yüksek elektrik direncine sahip metal şeritlerle sarılmalıdır. İkincisi, stator soğutmasının iç rotorlu motorlarda daha kolay olmasına rağmen, stator sarma işleminin seri üretimde karmaşık ve pahalı olmasıdır. Bu tip motorlar, genellikle

kompresör ve servo motor uygulamaları gibi yüksek hız ve konum performans gerektiren uygulamalarda kullanılır.

4.2.3. Disk tipi fırçasız DC motorları

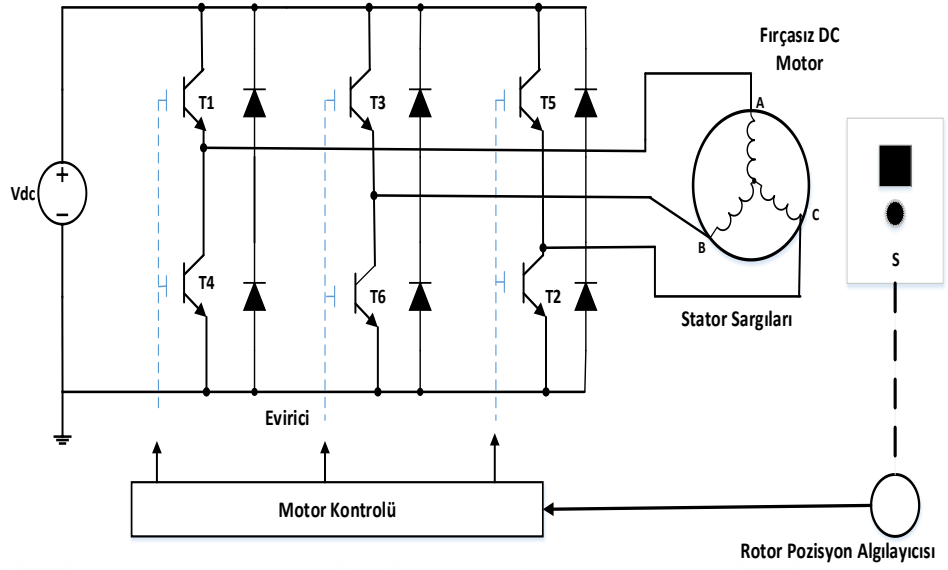
Bu tip motorda, rotor çelik diskten yapılmıştır ve kalıcı mıknatıslar bir yüzeye yerleştirilmiştir. Baskı devre şeklinde olarak üretilen sargılar statorda bulunmaktadır. Bu motorlarla ilgili sorunlardan biri stator ve rotor çelik disklerinde 1000 rpm aşan hız değerlerinde oluşan ısınmadır. Motorun yüksek hızlarda çalıştırabilmesi için ısınma sorununu ortadan kaldıracak ek önlemler alınmalıdır. Bu da maliyeti artırır. Bu nedenle, bu tip motorlar, bilgisayar soğutma fanları gibi düşük hızlı ve düşük güçlü uygulamalarda kullanılır (Bayraktar ve Balık, 2015). Bu tip motorların yapısı Şekil 4.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Disk tipi fırçasız DC motor (Karakaş, 2016)

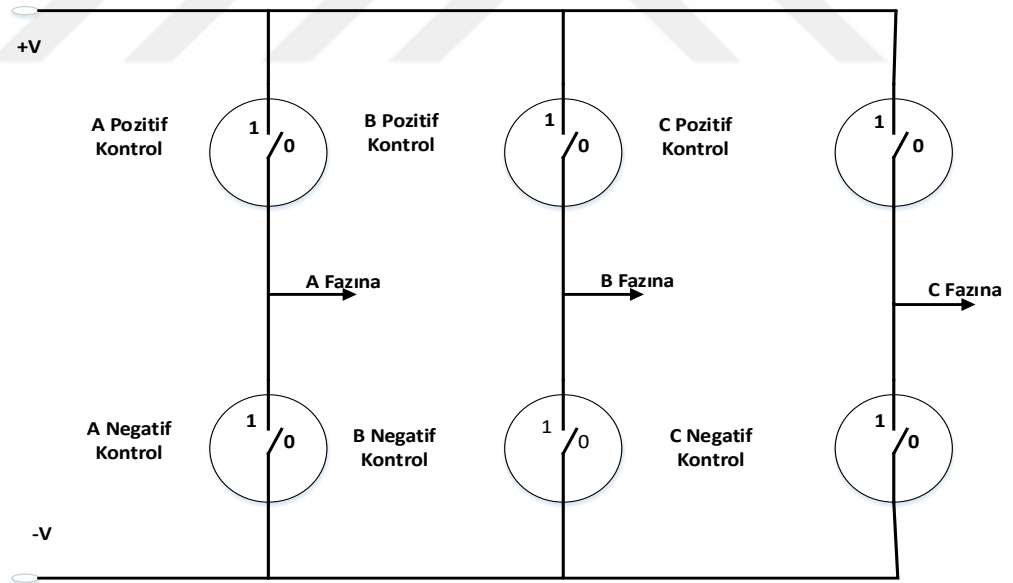
4.3. Fırçasız DC Motor Çalışma Prensibi

BLDC motor, invertörle beslenen stator sargılarına sahiptir. İnvertör de bir akım kaynağı tarafından beslenir. İnverter, güç anahtarlarından oluşur. Güç anahtarlarının değiştirilmesi, rotorun konumuna bağlıdır. Rotorun konumu, konum sensörleri veya sensörsüz kontrol algoritmaları tarafından belirlenir. Şekil 4.14 pozisyon geri beslemeli bir BLDC motor sürücü sistemi devre şemasını göstermektedir.



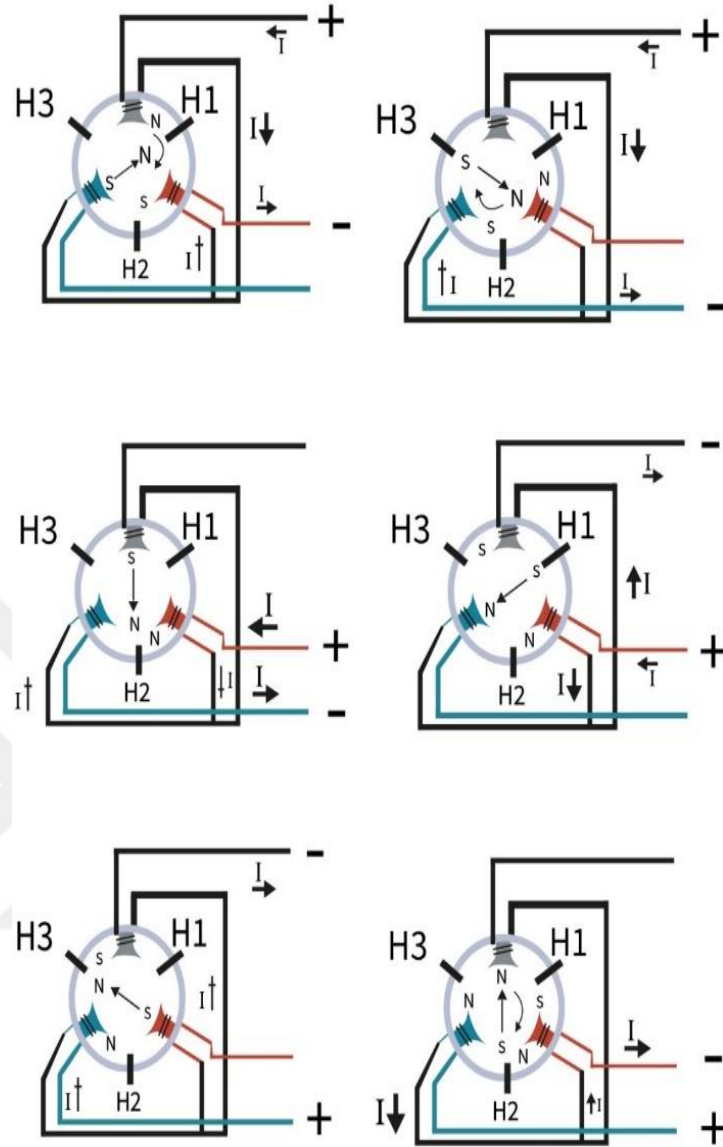
Şekil 4.14. Pozisyon geri beslemeli bir fırçasız doğru akım motor sürücü sisteminin devre şeması (Demirbaş, 1995)

Stator sargılarındaki akımların yönü, rotor konum bilgisi kullanılarak değiştirilir. Bu işlem, Şekil 4.15'te gösterildiği gibi güç anahtarları kullanılarak gerçekleştirilir.



Şekil 4.15. Sürücü anahtarların bağlanması (Ulu, 2011)

Aşağıdaki Şekil 4.16'da gösterildiği gibi güç anahtarlarını değiştirerek, stator sargılarında uygulanan voltajlar ve akımların yönü ve dolayısıyla da rotorun hareketi kontrol edilir.



Şekil 4.16. Stator sargıların akım yönü ve rotorun pozisyonu (Atan, 2007)

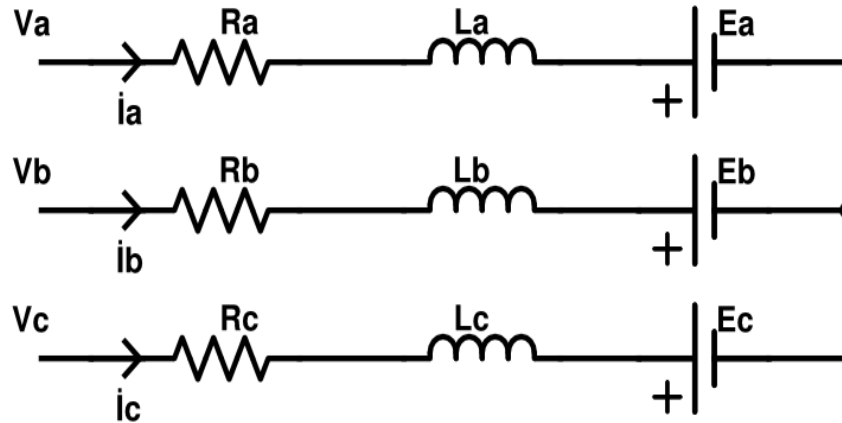
Bu şekilde, stator sargılarında manyetik alan kutupları meydana gelir. Rotor kutupları ile statorda oluşan alan kutupları arasındaki çekim ve itme işlemi sayesinde tork üretilir. Tork değerleri, stator ve rotorun manyetik alan kuvvetine bağlıdır. Rotor döndükçe rotorun konumu değişir. Rotorun yeni konumu, konum sensörü tarafından tespit edilir ve işlem ünitesine gönderilir. Rotorun konumu işlemci tarafından değerlendirilerek hangi çift anahtarın çalıştırılacağını belirlenir. Rotorun konumunu değiştiren anahtar ve sensörlerin değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Rotorun dönüşü, hızlı bir şekilde tekrarlanan anahtarlama ile sürekli olarak sağlanır.

Tablo 4.3. Sensör bilgisine ve rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları (Ulu, 2011)

		Hall Sensörleri			Anahtar Konumları					
Konum	Konum açısı ϕ	H1	H2	H3	T1	T2	T3	T4	T5	T6
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

4.4. Fırçasız DC Motorların Matematiksel Modeli

Fırçasız DC motorlardaki zıt elektromanyetik kuvvet (EMK), senkron motorlarda olduğu gibi sinüzoidal bir şekle sahip olmadığından, matematiksel modelin d-q uzayında kullanımı karmaşıktır ve motor özelliklerini incelemek için yetersizdir. Bu nedenle, modelleme ve simülasyonlar için d-q modelinin hantal yapısı yerine daha kolay olan faz-değişken yaklaşımı kullanılır (Aydoğdu, 2006). Fırçasız üç fazlı motorlarda, matematiksel model her bir faz için ayrı ayrı yapılır. Her faz, seri olarak bağlanmış bir direnç, bobin ve bir DC gerilim kaynağından oluşur. Fırçasız üç fazlı bir DC motor için eşdeğer devre Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Fırçasız DC motorun eşdeğer devresi (Karakaş, 2016)

Fırçasız DC motor için matematiksel model denklemlerini yazmadan önce bazı varsayımlar yapılmıştır. Bunlar:

- Motor doyumda değildir.
- Sargıların tüm dirençleri, özel indüktörleri ve ortak indüktörleri sabit ve eşittir.
- Demir kayıpları ihmal edilmiştir.
- Güç devresi yarı iletkenleri ve evirici idealdir.

Yukarıdaki eşdeğer devreye göre faz gerilim denklemleri:

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{d}{dt} \cdot i_a + L_{ab} \frac{d}{dt} \cdot i_b + L_{ca} \frac{d}{dt} \cdot i_c + E_a \quad (4.3)$$

$$V_b = R_b \cdot i_b + L_b \frac{d}{dt} \cdot i_b + L_{ab} \frac{d}{dt} \cdot i_a + L_{bc} \frac{d}{dt} \cdot i_c + E_b \quad (4.4)$$

$$V_c = R_c \cdot i_c + L_c \frac{d}{dt} \cdot i_c + L_{ca} \frac{d}{dt} \cdot i_a + L_{bc} \frac{d}{dt} \cdot i_b + E_c \quad (4.5)$$

şeklinde yazılır. Her fazın elemanlarının eşit ve sabit olduğu varsayılırsa;

$$R_a = R_b = R_c = R ; L_a = L_b = L_c = L ; L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = M$$

olarak yazılabilir. Bu duruma göre gerilim denklemleri tekrar şu şekilde yazılır;

$$V_a = R \cdot i_a + L \frac{d}{dt} \cdot i_a + M \frac{d}{dt} \cdot i_b + M \frac{d}{dt} \cdot i_c + E_a \quad (4.6)$$

$$V_b = R \cdot i_b + L \frac{d}{dt} \cdot i_b + M \frac{d}{dt} \cdot i_a + M \frac{d}{dt} \cdot i_c + E_b \quad (4.7)$$

$$V_c = R \cdot i_c + L \frac{d}{dt} \cdot i_c + M \frac{d}{dt} \cdot i_a + M \frac{d}{dt} \cdot i_b + E_c \quad (4.8)$$

Burada, V_a, V_b, V_c BLDC motorun faz gerilimleri, R_a, R_b, R_c faz dirençleri, L_a, L_b, L_c faz indüktansları, M iki stator sargısı arasındaki karşılıklı indüktans, E_a, E_b, E_c faz zıt-emk gerilimleri ; i_a, i_b, i_c faz akımlarıdır.

faz gerilim denklemleri bir matris olarak tekrar yazılırsa; şu şekilde olacaktır.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Stator sargılarında indüklenen zıt elektromanyetik kuvvet (E_a, E_b, E_c), rotorun hızına ve açısına, statordaki sarım sayısına ve rotordaki manyetik akıya bağlıdır (Karakaş, 2016). EMK'ler, akı bağlantılarının türevlerinin sonucudur ve akı bağlantıları, sürekli fonksiyondur. Endüklenen EMF'lerin keskin köşeleri değil, yuvarlak kenarları vardır. Fırçasız DC motorlarda, zıt EMK dalga şekilleri, rotorun konumuna bağlı olarak yamuktur. Zıt elektro motor kuvvet , rotor konumunun (θ) bir fonksiyonudur ve $E = K_e \cdot W_m$ genliğine sahiptir.

Burada; K_e , zıt EMK sabitidir; W_m , rotorun mekanik hızıdır ; θ , rotor elektrik pozisyonudur. fırçasız dc motorlardaki, anlık zıt EMK ' ler şu şekilde yazılır:

$$E_a = f_a(\theta) * K_e \cdot W_m \quad (4.10)$$

$$E_b = f_b(\theta) * K_e \cdot W_m \quad (4.11)$$

$$E_c = f_c(\theta) * K_e \cdot W_m \quad (4.12)$$

zıt Emk değerleri bir matris olarak yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} f_a(\theta) \\ f_b(\theta) \\ f_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

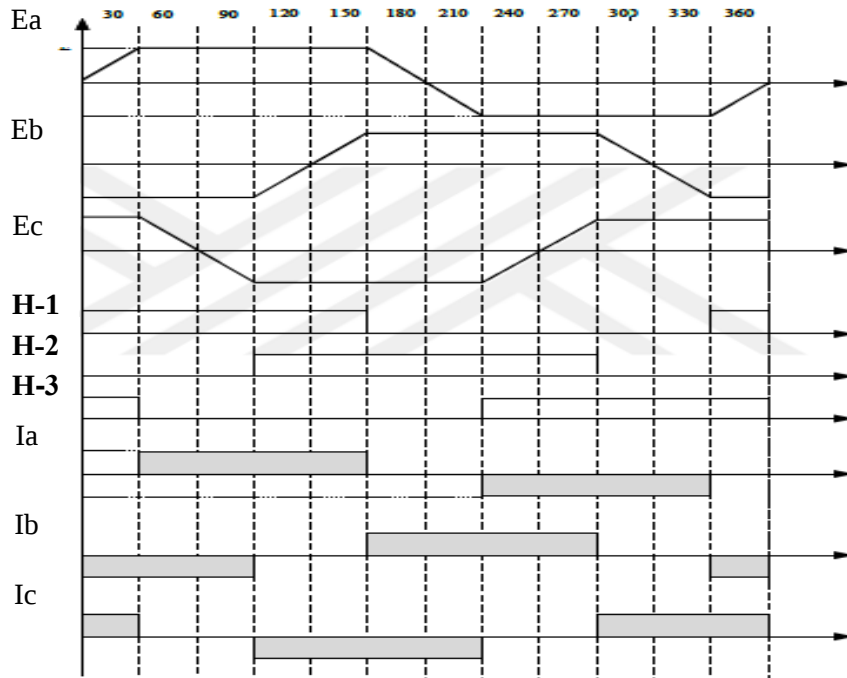
olarak yazılabilir. Zıt EMK fonksiyonu, $f_a(\theta), f_b(\theta)$ ve $f_c(\theta)$ olarak temsil edilen rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur ve limit değerleri -1 ve 1 arasında şu şekilde tanımlanır:

$$f_a(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta & (0 \leq \theta < \frac{\pi}{6}) \\ 1 & (\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{5\pi}{6}) \\ -\left(\frac{\pi}{6}\right)\theta + 6 & (\frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{7\pi}{6}) \\ -1 & (\frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6}) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 12 & (\frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (4.14)$$

$$fb(\theta) = \begin{cases} -1 & (0 < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ (\frac{6}{\pi})\theta - 4 & (\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{5\pi}{6}) \\ 1 & (\frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{9\pi}{6}) \\ -(\frac{6}{\pi})\theta + 10 & (\frac{9\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6}) \\ -1 & (\frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (4.15)$$

$$fc(\theta) = \begin{cases} 1 & (0 < \theta < \frac{\pi}{6}) \\ -(\frac{\pi}{6})\theta + 2 & (\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ -1 & (\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{7\pi}{6}) \\ (\frac{6}{\pi})\theta - 8 & (\frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{9\pi}{6}) \\ 1 & (\frac{9\pi}{6} < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (4.16)$$

Ters EMK dalgaları, akım dalgaları ve sensör sinyalleri Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Bu sinyallerin rotorun 360 derecelik tam dönüşü için sunulmuştur.



Şekil 4.18. FDAM' na ait zıt emk' lar, Hall sensör sinyalleri ve faz akımları (Çelikel, 2016)

Güç anahtarlarının her anahtarlama aşamasında üretilen anlık güç zıt EMK ile faz sargılarından geçen akımın çarpımına eşittir. Bu eşitlik Denklem 4.17'de verilmiştir.

$$P_e = E_a.i_a + E_b.i_b + E_c.i_c \quad (4.17)$$

Üretilen elektromanyetik momentin hesaplanması için güç-moment eşitliği kullanılır.

$$T_e = \frac{P_e}{W_m} = \frac{E_a.i_a + E_b.i_b + E_c.i_c}{W_m} \quad (4.18)$$

Bir elektrik motorunda üretilen güç, motor mekanik kayıplarını, yükün ivmelenmesi için gereken gücü ve yük momentinden kaynaklanan gücü karşılamak zorundadır. Buna göre moment denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$T_e = T_L + J \frac{d(W_m)}{dt} + B(W_m) \quad (4.19)$$

T_e : Motorun ürettiği elektriksel tork. T_L ; yük momenti. J ; milin eylemsizlik momenti ve B_m ise sürtünme katsayısıdır.

4.5. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü

BLDC motor uygulamalarında motor tasarımının yanında kontrolün önemi giderek artmaktadır. BLDC motorlar, temel güç elektroniği devreleri tarafından kontrol edilir. Ancak birçok uygulamanın geliştirilen kontrol algoritmaları ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Mikroişlemci yeteneklerinin artması, elde edilen matematiksel modelin uygulanabilirliği bu modeller için sayısal kontrolör tasarlamayı kolaylaştırmıştır. Yukarıda bahsedilen gelişmeler sayesinde teknolojik olarak gelişmiş ekonomik çözümler mümkün olmaktadır (Godekoğlu, 2007). Tüm BLDC motor kontrol yöntemlerinin amacı optimal kontrolün gerçekleştirilmesidir.

Hata değeri, referans değeri ile çıkış değeri arasındaki farktır. Sistemi zorlayacak giriş sinyali minimum hata değerini düşüren bir değer üretebilir. Buna göre sistem çıkışının değeri ile referans çıkışının değeri karşılaştırılır. Sistem çıktısını tahmin etmek için dedektör kullanmak gereklidir (Gedikpınar ve Güldemir, 2002).

Fırçasız DC motorlarda motor akımı, tork, rotor konumu ve hızı gibi parametreler çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak kontrol edilir. DC motorların hızını hassas bir şekilde kontrol etmek için çeşitli kontrol yöntemleri de kullanılmıştır. Örneğin, yapay sinir ağları, bulanık mantık, dalgacık tekniği, genetik algoritma v.b.

Ayrıca PID kontrolü, tek başına veya bu yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır (Coşkun ve Terzioğlu, 2007). BLDC motorların kontrol yöntemleri klasik ve modern kontrol yöntemleri olarak ikiye ayrılır. BLDC motorlarda, hız/akım izleme performansı ve parametre değişimleri, tork dalgalanması, doyuma karşı sağlamlık gibi faktörlere göre hangi kontrol yönteminin kullanılacağına karar verilebilir.

4.5.1. Klasik Kontrol Yöntemleri

Klasik kontrolcüler, yapılarının basitliği ve genel olarak çoğu uygulamada yeterli verimlilikleri nedeniyle BLDC motorları kontrol etmek için kullanılır. PI (Oransal integral kontrolü), PD (Oransal türev kontrolü) ve PID (oransal-integral ve türev kontrolü) kontrolcüler klasik yapılardır. İstenilen performansı elde etmek için oransal kazancı (k_p), türev kazancı (k_d) ve integral kazancı (k_i) ayarlanır.

Bu yöntemin dezavantajlarından biri optimum kazanç değerlerinin deneme yanılma yöntemi ile belirlenebilmesi ve ayrıca sinüsoidal ve anlık sistem değişimlerinde performans düşüklüğüdür. Bu nedenle, yüksek hassasiyet gerektirmeyen uygulamalar için klasik kontrolcüler yaygın olarak kullanılmaktadır (Bayraktar ve Balık, 2015).

4.5.1.1. Oransal integral kontrolü (PI)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (4.20)$$

Transfer fonksiyonu:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.21)$$

şu şekildedir. Burada $u(t)$, kontrol sinyali; $e(t)$, hata sinyali; K_p , oransal kazanç; K_i , integral kazancıdır.

4.5.1.2. Oransal türev kontrolü (PD)

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.22)$$

Transfer fonksiyonu:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + K_d S \quad (4.23)$$

şu şekildedir. Burada K_d , türev kazancıdır.

4.5.1.3. Oransal integral ve türev kontrolü (PID)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.24)$$

Transfer fonksiyonu:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d \cdot S \quad (4.25)$$

şu şekildedir.

Her bir kontrolör parametresinin (K_p, K_i, K_d) genel etkileri Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. Kontrol parametrelerinin genel etkileri (Ciba, 2019)

Kontrol parametresi	Yükselme Zamanı (Rising Time)	Aşma (Overshoot)	Oturma Zamanı (Settling Time)	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Azaltır	Artırır	Az Değiştirir	Azaltır
K_i	Azaltır	Artırır	Artırır	Azaltır
K_d	Az Değiştirir	Azaltır	Azaltır	Değiştirmez

4.5.2. Modern Kontrol Yöntemleri

Çok yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için modern kontrol yöntemleri tercih edilmektedir. Bulanık mantık, genetik algoritma, yapay sinir ağları, dalgacık tekniği,

geniştirilmiş Kalman filtresi, adaptif kontrol, bulanık sinir kontrolcöleri modern kontrol tekniklerinin örnekleridir (İbrahim ve Levi , 2002).

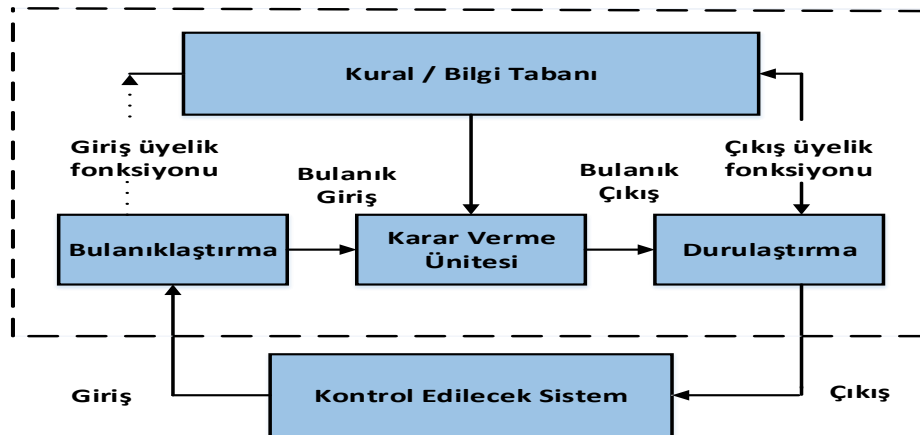
4.5.2.1. Bulanık mantık

Bulanık mantık, klasik mantığın yeterli olmadığı durumlar için en uygun kontrol yöntemidir. Özellikle, belirli bir sistemin matematiksel modelini oluşturmak çok zor ve doğrusal olmayan bir sistem ise, insan algısı ve deneyiminin kullanıldığı bulanık mantık kontrol yönteminin kullanılması tercih edilir. Bulanık mantık teorisi 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Ancak bu teori ilk olarak 1974 yılında İbrahim Mohammadan tarafından buhar motoru kontrol sisteminde kullanılmıştır. Günümüzde kamera odaklarının ayarlanması, çamaşır makinelerinin, mikrodalga fırınların, asansörlerin programlanması ve kontrol edilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Bayraktar ve Balık, 2015). Bulanık denetleyiciler dilsel terimler kullanır. Bu süreç, Şekil 4.19 da gösterildiği gibi üç ana aşamadan oluşur

Bulanıklaştırma (Fuzzification): Bu arayüzde veriler bulanıklaştırılır veya veriler için organik değerler oluşturulur ve bulanık gruplara yerleştirilir.

Bulanık süreç (Fuzzy processing): Bu arayüzde uygun kurallara göre bulanık çıktı üretilir.

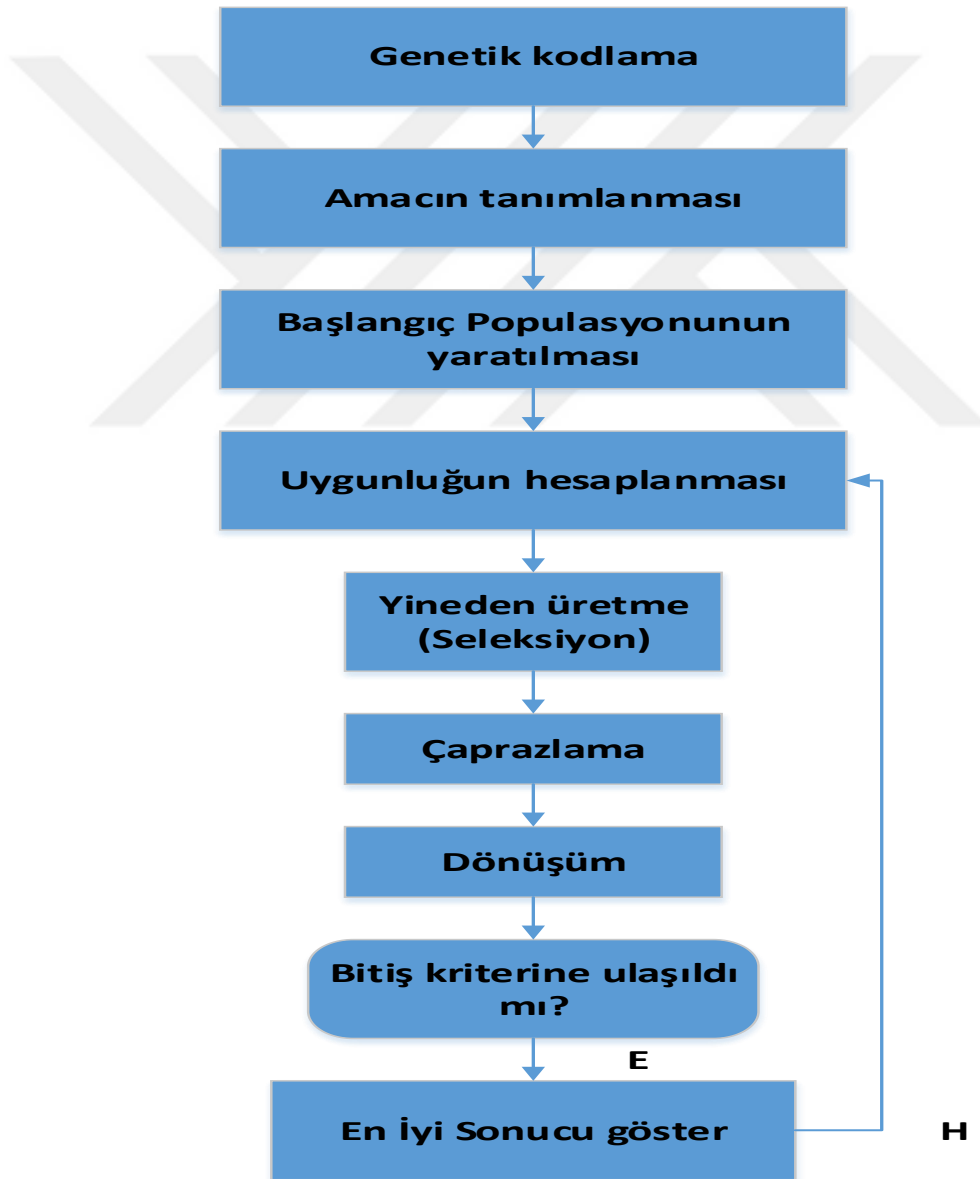
Durulaştırma (Defuzzification): Bu arayüzde durulaştırma yöntemi kullanılarak bulanık sonuç değerleri elde edilir ve son olarak sistem bu sonuçları kalibre eder.



Şekil 4.19. Bulanık denetleyicilerin temel yapısı (Ciba, 2019)

4.5.2.2. Genetik Algoritma (Genetic algorithm)

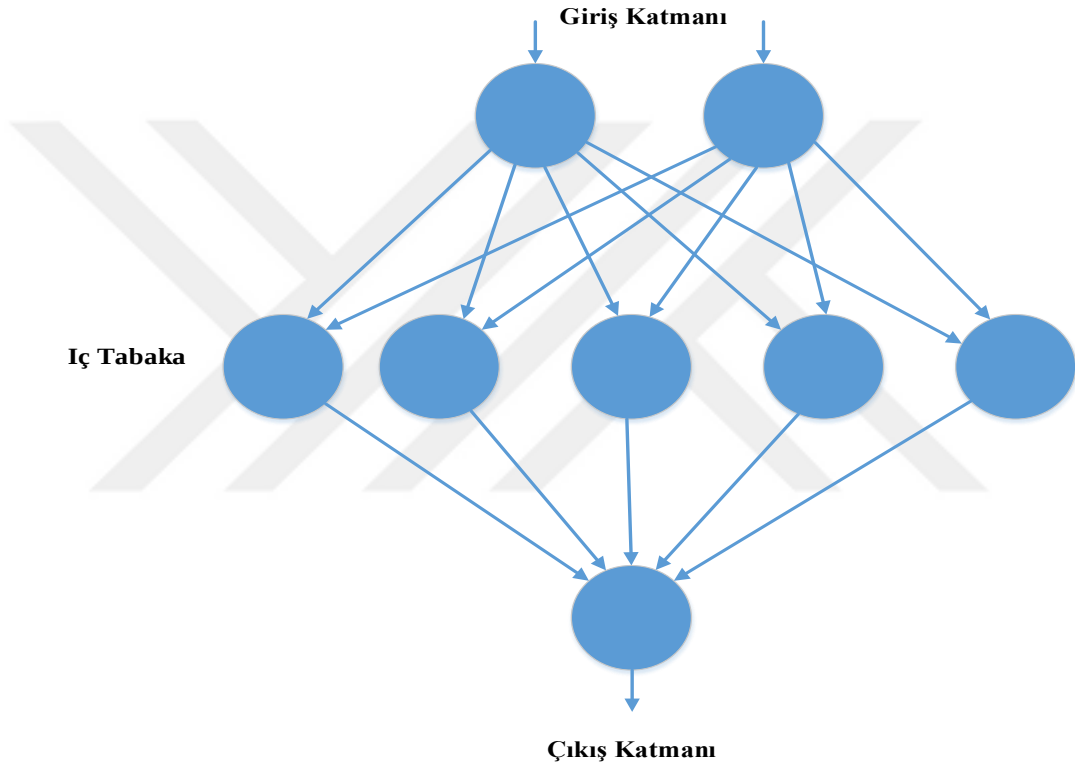
Bu yöntem ilk kez 1975 yılında John Holland tarafından kullanılmıştır. Genetik algoritma, biyolojik sürecin modelleme işlemi ile gerçekleştirilen fonksiyonların optimizasyonunu sağlayan bir evrim algoritmasıdır. Bu kontrol yöntemi, optimizasyon, kontrol (gaz boru hattı), tasarım (uçak tasarımı, iletişim ağları), güvenlik (kodlama, kod çözme), makine programlama ve makine öğrenmesi (hava tahmini, protein yapı tahmini ve sınıflandırma) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 4.20 de genetik algoritmadaki işlem sırasını göstermektedir .



Şekil 4.20. Genetik algoritmanın adımları (Ciba, 2019)

4.5.2.3.Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Matematiksel bir modelin oluşturulmadığı veya kurulmasının çok zor olduğu, çözümün belirsiz olduğu, eksik veri ve gürültülü sistemlerin olduğu durumlarda yapay sinir ağı yöntemi kullanılmaktadır. Literatürde birçok yapay sinir ağı bulunmaktadır. Ancak çok katmanlı algılayıcı modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.21 çok katmanlı algılayıcı şemasını gösterir.



Şekil 4.21. Çok katmanlı algılayıcı şeması (Arı ve Berberler, 2017)

Çok katmanlı algılayıcı üç veya daha fazla katmandan (bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı, bir veya daha fazla iç katman) oluşur. Katmanlarda nöronlar bulunur. Ara katmanda bulunan her bir nöronun çıkış değeri hesaplanırsa işlem sonucu elde edilir. Bunun için öncelikle bir nöronların girişleri ağırlıklarla çarpılıp, çarpma sonuçları toplanır ve böylece toplam fonksiyon elde edilir. (Sağıroğlu vd, 2003). Diğer katmanlarda bulunan nöronların çıkış değerleri de benzer şekilde hesaplanır. Hata değeri, ağıın çıkışı ile çıkışın istenen değeri arasındaki farktır. Ağ ağırlıkları değiştirilir ve hata değerleri belirlenene kadar arka arkaya dağıtılır. Bu işlem belirlenen eğitim algoritmasına göre

gerçekleştirilir. Yapay sinir ağlarında çok sayıda eğitim algoritması kullanılmaktadır. Bu kontrol yöntemi tıp bilimleri (kanser hücre analizi) alanlarında ve robot sistemlerinin kontrolü gibi mühendislik alanlarında, ekonomik tahmin ve risk analizi gibi finansal konularda, üretim sistemlerinin optimizasyonu ve kalite kontrol gibi üretim alanında kullanılmaktadır.

4.5.2.4. Dalgacık Tekniği

Dalgacık teorisi ile durağan olmayan sinyallerin zaman ve frekans domeninde analizleri yapılır. Bu özelliğinden dolayı bu teori görüntü işlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teoriyi BLDC motorlarda kullanırken, frekans domeninde parametrelerin dönüşümünü gerçekleştirmek için Fourier Dönüşümü kullanılır. BLDC motorların komütasyon süreleri, yüksek ve düşük geçiren filtre işlemleri (Daubechies Filtre işlemleri) kullanılarak belirlenir. Bu şekilde rotorun konumu belirlenir (Yılmaz, 2005).

4.5.2.5. Sinirsel-Bulanık Denetleyici

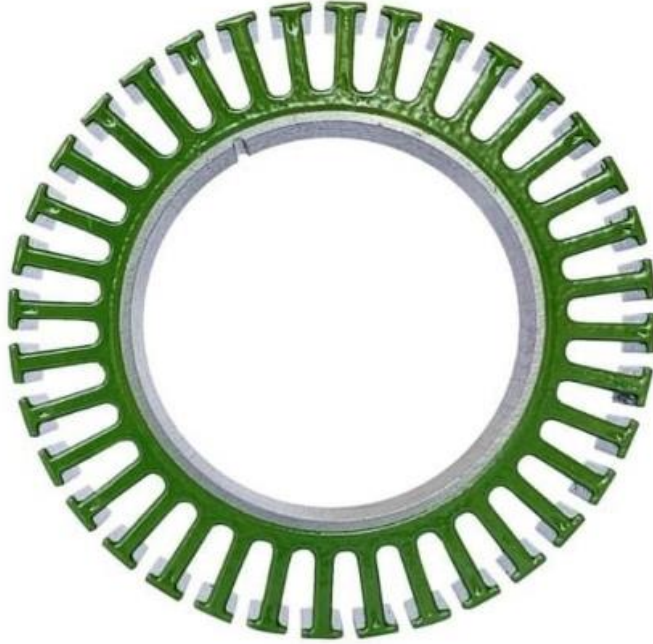
Yapay sinir ağı ve bulanık mantık ağının birleşimidir. Bu yöntemlerin avantajları birleştirilerek sinirsel-bulanık ağ elde edilir. Bu yöntemde bulanık mantığın fonksiyonları yapay sinir ağları tarafından gerçekleştirilir. Günümüzde yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılan tüm alanlarda sinir-bulanık denetleyici kullanılabilir. Ayrıca bu kontrolör, özellikle lineer olmayan sistemleri kontrol etmek için de kullanılır. Bu nedenle, sinir-bulanık denetleyici tork, akış ve hız ve konumu kontrol etmek için kullanılır (Gündoğdu , 2012).

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, tasarlanan BLDC motor, sürücü ve bunların beslenmesi için kullanılan batarya hakkında bilgiler verilmiştir. Kullanılan her bir eleman hakkında aşağıda görüldüğü üzere ayrı ayrı başlıklar altında bilgiler verilmiştir.

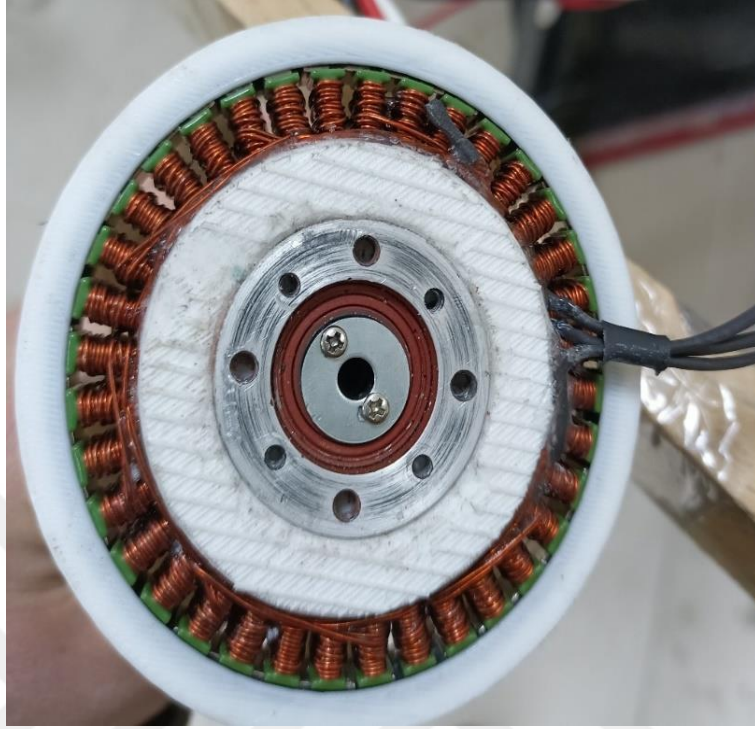
5.1. Tasarlanan BLDC Motor

Bu çalışmada bir adet dış rotorlu fırçasız DC motor üretilmiştir. Burada üretilen motor 228 gr ağırlığında olup, insansız hava araçları için uygun ağırlıktadır. Rotorda 41 adet 10mm*5mm*2mm boyutlarında sabit neodyum mıknatıslar bulunmaktadır. Bu neodyum mıknatıslar 85 santigrad dereceye kadar çalışabilir özelliktedirler. Stator ise 36 kutuptan oluşmaktadır. Şekil 5.1 de motorun statoruna ait çizim görülmektedir.



Şekil 5.1. Motorun statoruna ait çizim

Motorda sargı işlemi için, 0,7 mm bakır teller çift yönlü sargılar sarılarak verim artırılmıştır. Şekil 5.2 de görüldüğü üzere motorun sargılarından 3 adet çıkış alınmıştır. Motorun iç kısmı alüminyum, dış kısmı ise hafif ve dayanıklı plastikten üretilmiş ve yüksek hıza motorun dayanıklı hale getirilmesi sağlanmıştır. Motorun dış görünümü ise Şekil 5.3 te verilmiştir.



Şekil 5.2. Üretilen motora ait sargıların görüntüsü



Şekil 5.3. Motorun dış görüntüsü

5.2. Kullanılan Sürücü

Motor sürücü olarak Castle PHOENIX ICE2 HV 120 Fırçasız ESC kullanılmıştır. Bu sürücü, 50 V'a kadar giriş gerilimine uygundur. Ayrıca, bu ESC ile 120 A değerine kadar motorlar rahatlıkla sürülebilir. Motor sürücüsüne ait fotoğraf Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Motor sürücüsü (ESC)

5.3. Batarya Sistemi

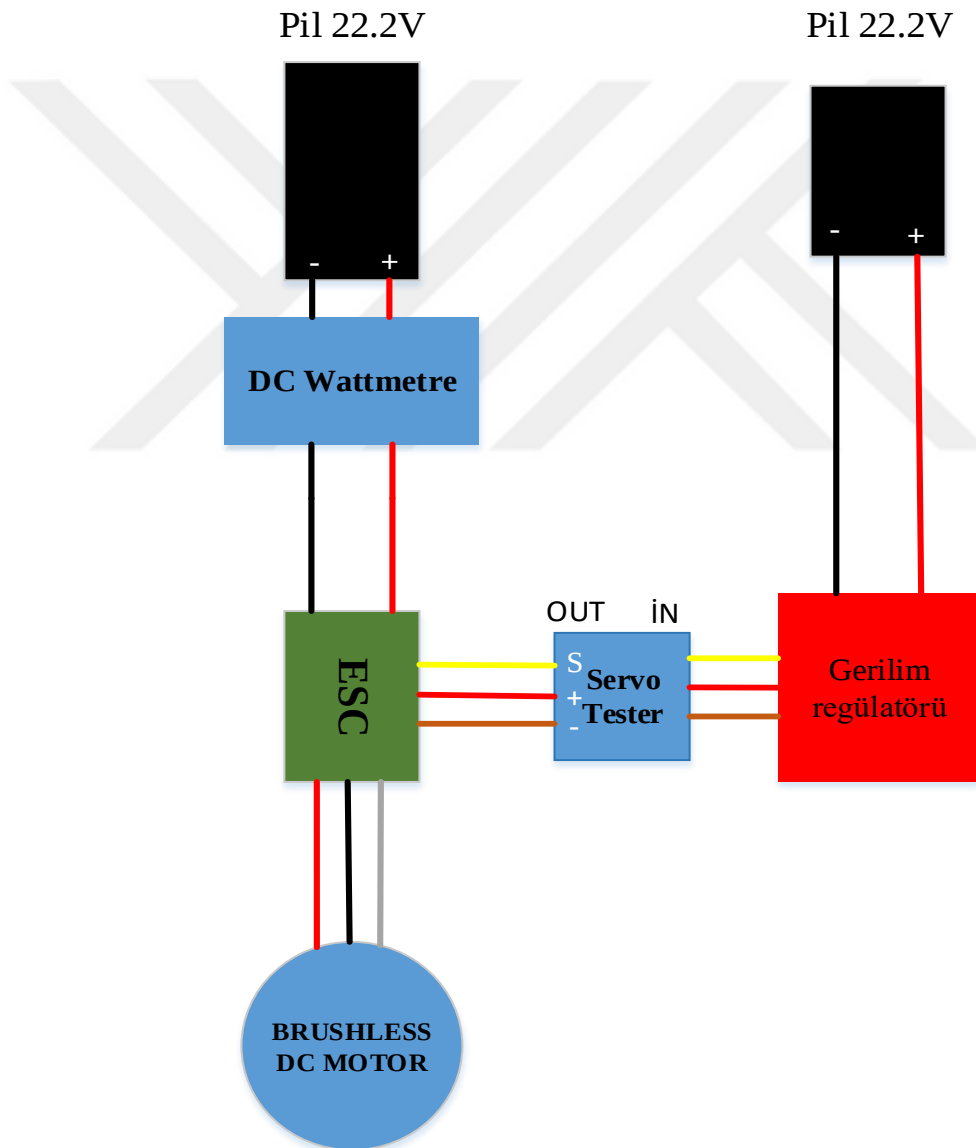
Deneyler süresince 6 hücreye sahip olan 22,2V lityum polimer batarya kullanılmıştır. Batarya, 5000 mAh kapasiteli olup, farklı tür bataryalara göre daha küçük ve hafif bir gövdeye sahiptir. Ayrıca bu tür LiPo bataryalar, uzun şarj ve deşarj sürelerine sahiptirler. Kullanılan batarya Şekil 5.5'te verilmiştir.



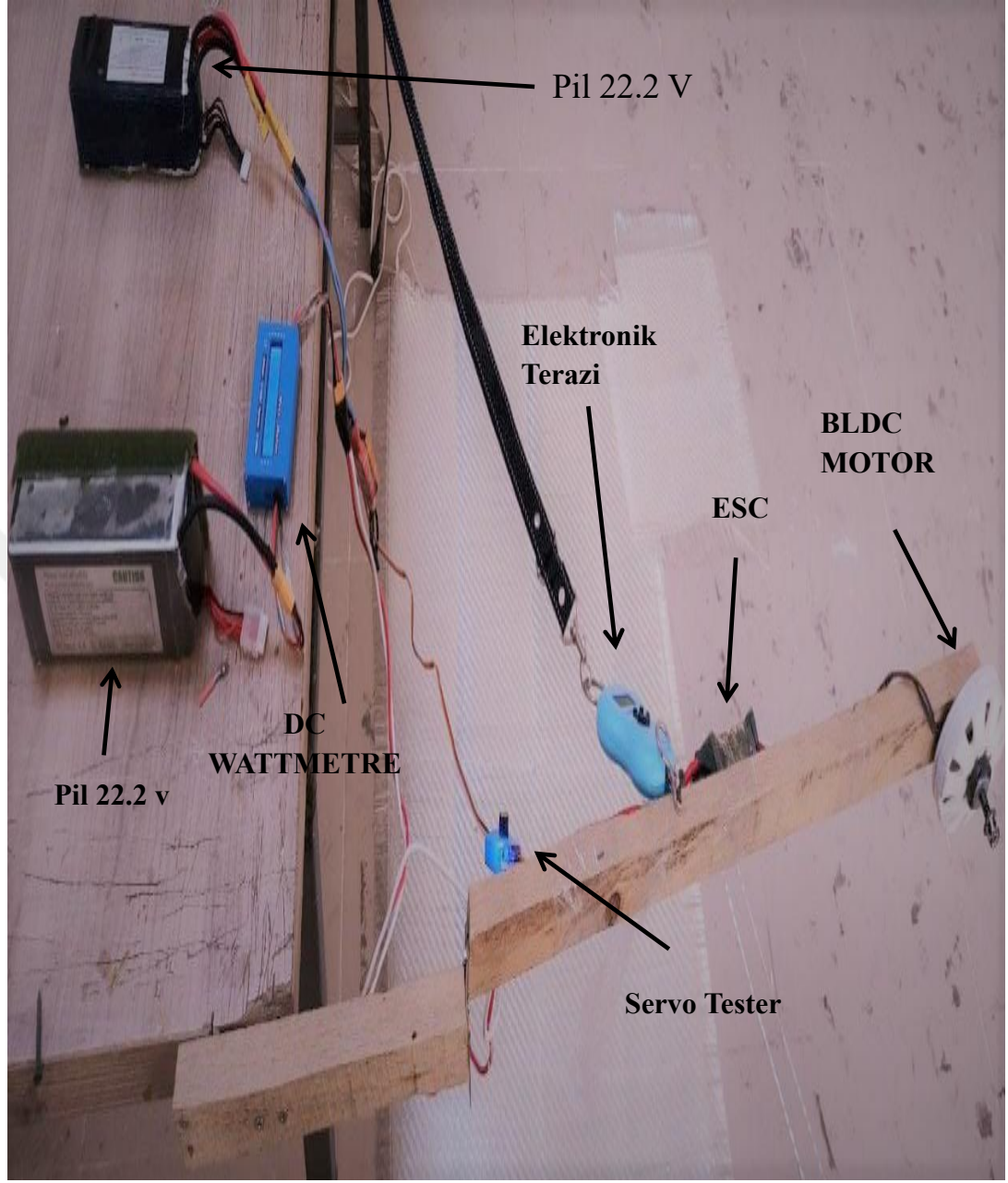
Şekil 5.5. Kullanılan bataryanın görüntüsü

5.4. Yöntem

Şekil 5.6’da batarya, sürücü ve tasarlanıp üretilen motorun bağlantı şeması görülmektedir. Burada görüldüğü gibi ESC, motoru sürmek için kullanılmaktadır. Servo tester devresi kullanılarak ESC devresi PWM darbeleri ile beslenir, böylece motor gerilimi ve hızı kontrol edilmektedir. Bataryalar 6S hücreye sahip olup, lityum malzemeden üretilmiştir. Bunun nedeni yüksek akım verebilmesidir. Deney düzeneği Şekil 5.7’de görüldüğü gibi kurulmuştur.



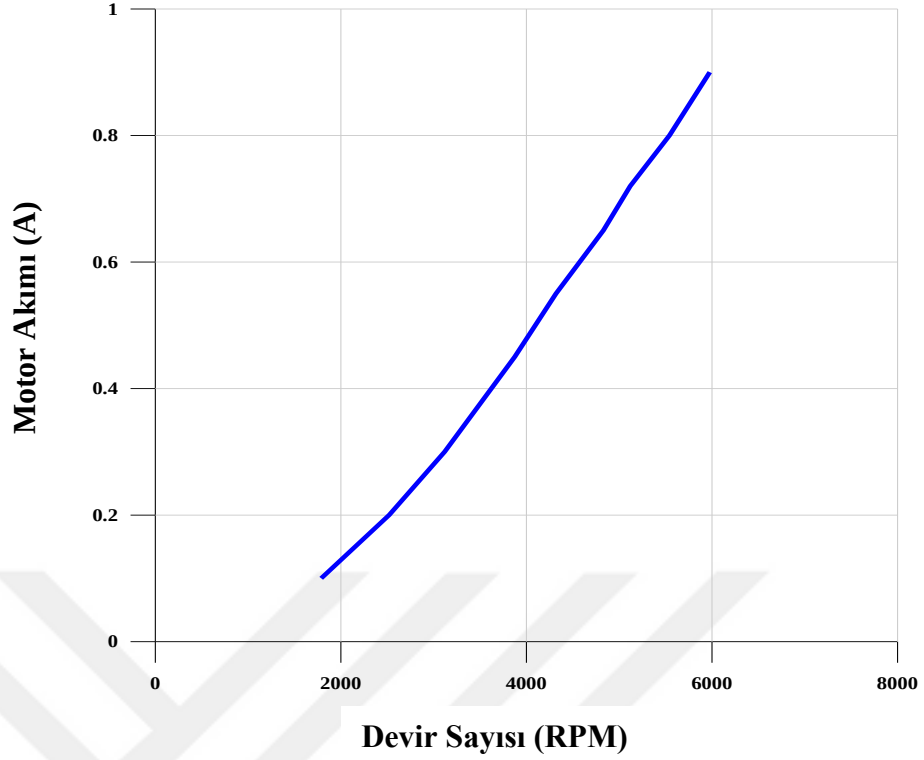
Şekil 5.6. Motorun bağlantı şeması



Şekil 5.7. Test aşamasında motorun Deney düzeneği

5.5. Test Sonuçları

İlk olarak motorun devir sayısına bağlı olarak çektiği akım incelenmiştir. Beklendiği üzere devir sayısı ile akım orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Devir sayısı ve çekilen akıma ait grafik Şekil 5.8’de görülmektedir. Burada motor test edilirken herhangi bir pervane kullanılmamış olup motorun boşta çalışmadaki performansı incelenmiştir.



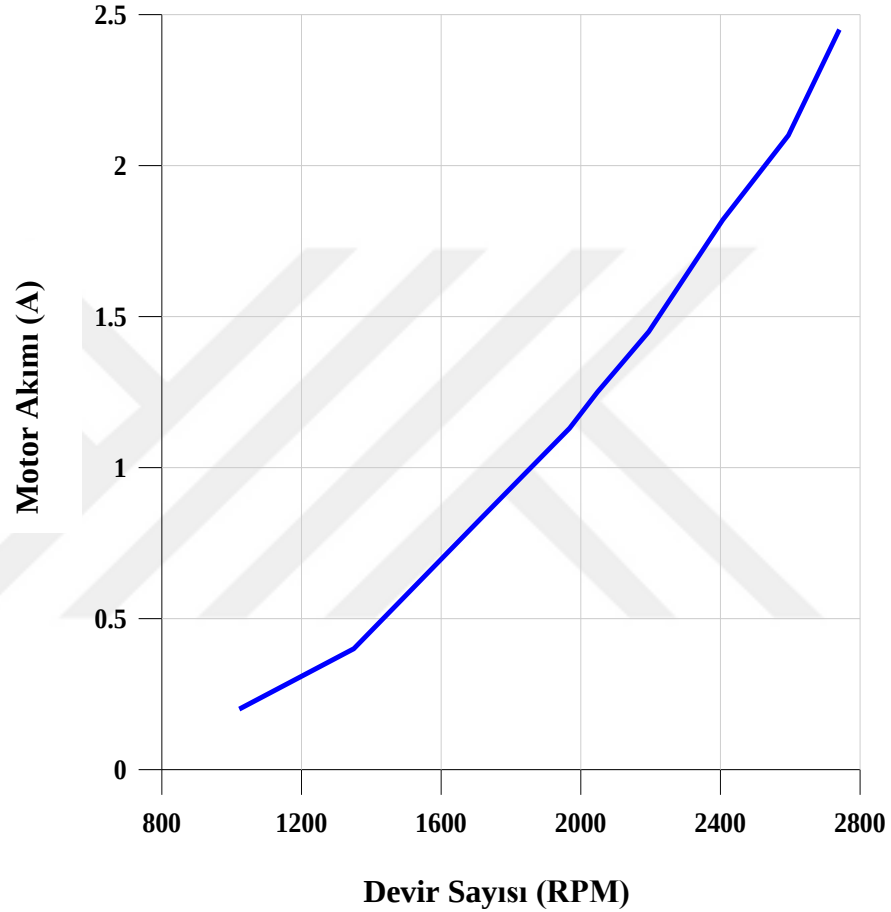
Şekil 5.8. Yüksüz durumda motorun akımı ve devir sayısı grafiği

Yukarıdaki grafikten, yüksüz durumda rotorun ulaştığı maksimum hızın dakikada 5977 devir olduğunu görülmektedir. Ayrıca yüksüz durumda motordan çekilen akımın en büyük değerinin 0,9 A olduğunu anlaşılmaktadır. Çekilen akım ve elde edilen hız değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. Yüksüz durumunda akım ve hız değerleri

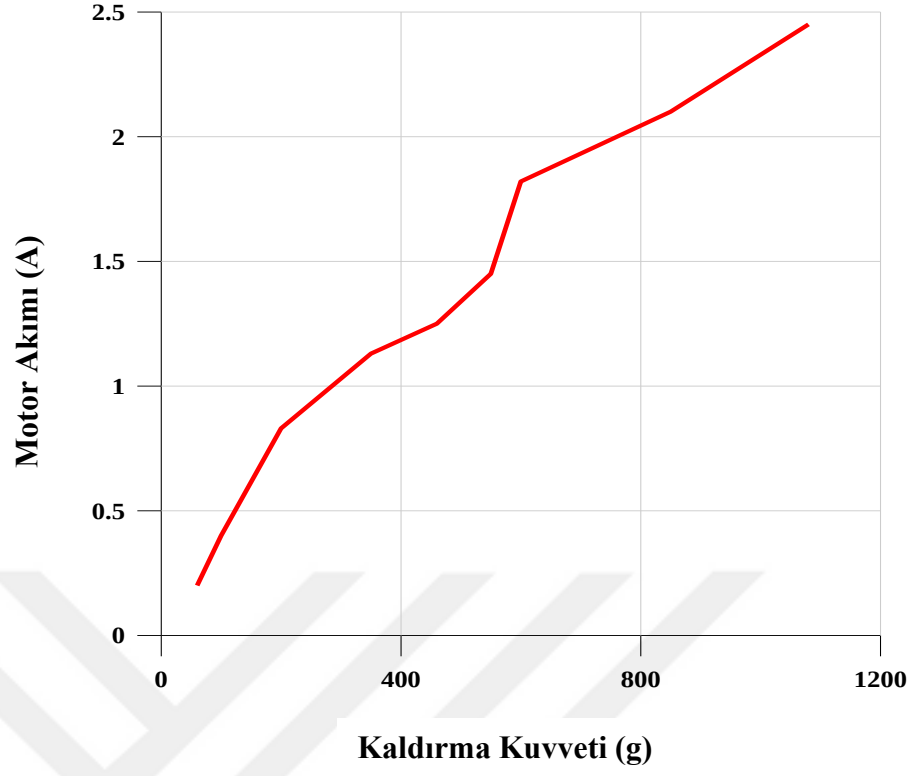
Devir sayısı (RPM)	Motor Akımı (A)
1789	0,1
2522	0,2
3120	0,3
3875	0,45
4320	0,55
4830	0,65
5120	0,72
5543	0,8
5977	0,9

Boşta çalışma testinden sonra pervane kullanılarak tasarlanan ve üretilen motor test edilmiştir. Yüksek verim elde edilmesi ve dayanıklılık açısından kayın ağacından üretilen pervaneler kullanılmıştır. Motorun performansının test edilmesi için ikinci test ise motorun devir sayısı ile çekilen akım arasındaki ilişkidir. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi devir sayısı ile çekilen akım incelenmiştir. Burada, 3 bıçaklı 14*8 pervane kullanılmıştır.

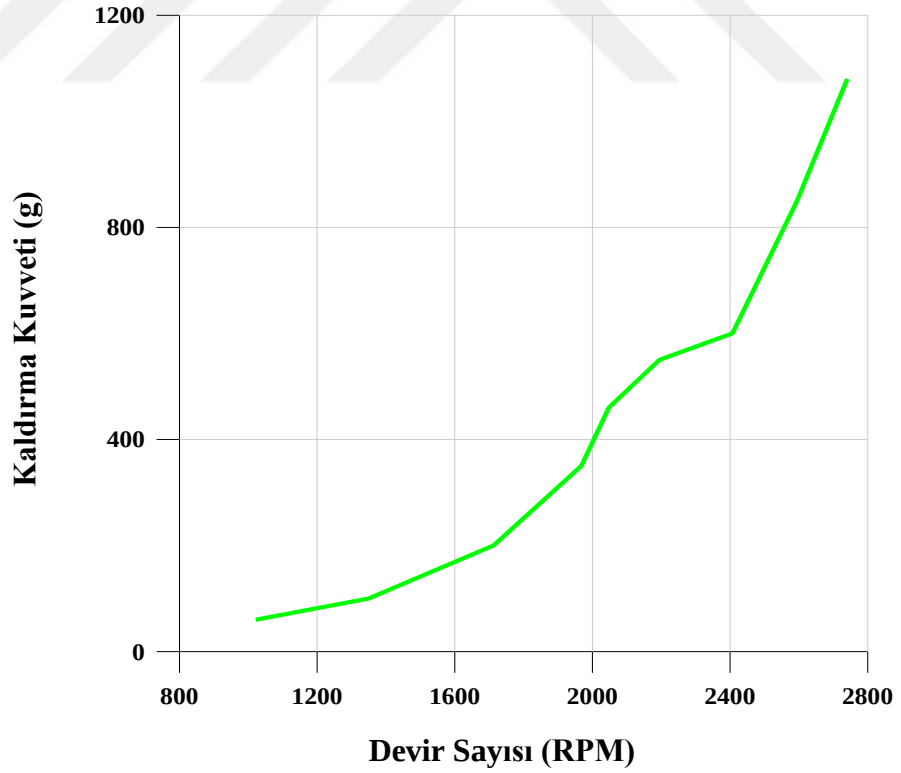


Şekil 5.9. Üç bıçaklı 14*8 pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği

Motorun kaldırma kuvveti ile çekilen akım arasındaki ilişki ölçümler yapılarak Şekil 5.10’da çıkarılmıştır. Burada kaldırma kuvveti arttıkça çekilen akımın arttığı rahatlıkla görülmektedir. Ayrıca, görüldüğü üzere bu iki büyüklük arasındaki ilişkinin lineer olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Aynı pervane ile devir sayısı ile kaldırma kuvveti arasındaki ilişki araştırılmış ve Şekil 5.11’deki gibi bir grafik elde edilmiştir. Burada devir sayısı arttıkça kaldırma kuvvetinin de hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. 14*8 pervane ile kaldırma kuvveti, çekilen akım ve devir sayısı değerleri Tablo 5.2’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.10. 14*8 pervane ile kaldırma kuvveti ve motorun çektiği akımı grafiği

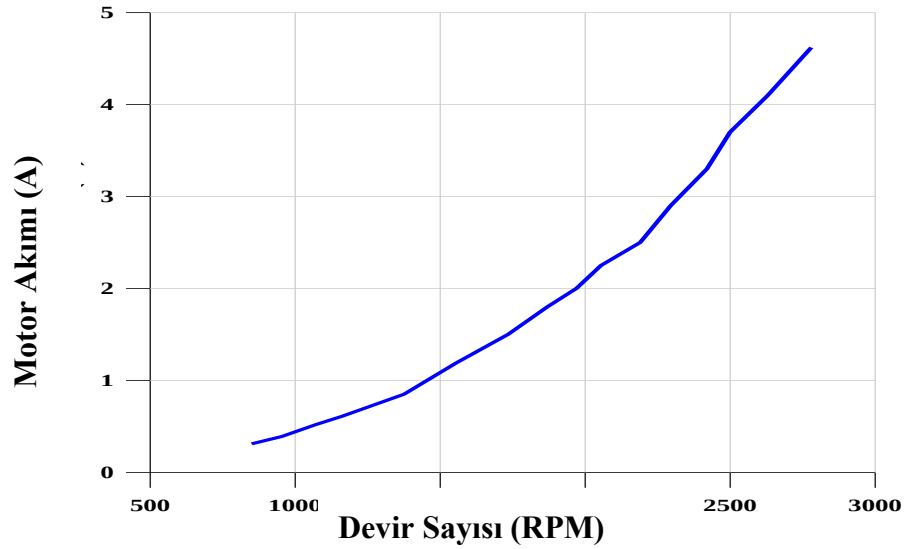


Şekil 5.11. 14*8 inç pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği

Tablo 5.2. 14*8 inç pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri

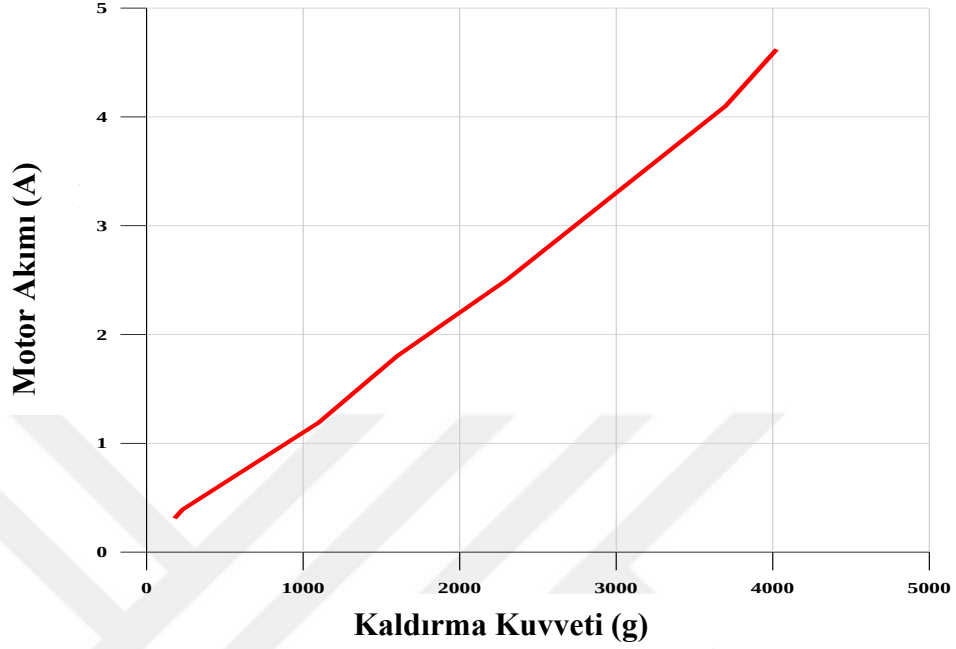
Kaldırma kuvveti (g)	Devir sayısı (RPM)	Akım (A)
60	1022	0,2
100	1350	0,4
200	1713	0,83
350	1968	1,13
460	2048	1,25
550	2195	1,45
600	2407	1,82
850	2595	2,1
1080	2741	2,45

Tasarlanan ve üretilen motorun performansının incelenmesi için farklı bir pervane kullanılmıştır. Burada kullanılan pervane yapı itibari ile önceki pervane ile aynı olup sadece pervanelerin uzunluğu farklıdır ve 18*8 özelliktedir. Bu pervane için de ilk olarak devir sayısı ve motorun çektiği akım dikkate alınmıştır. Yine görüldüğü gibi devir sayısı artırıldıkça çekilen akımında o oranda arttığı görülmektedir. Ancak pervane boyutu arttırıldığı için 14*8 pervane ile kıyaslandığında daha fazla akım çekildiği görülmektedir. Çekilen akım ve devir sayısı ilişkisi Şekil 5.12’ de verilmiştir.



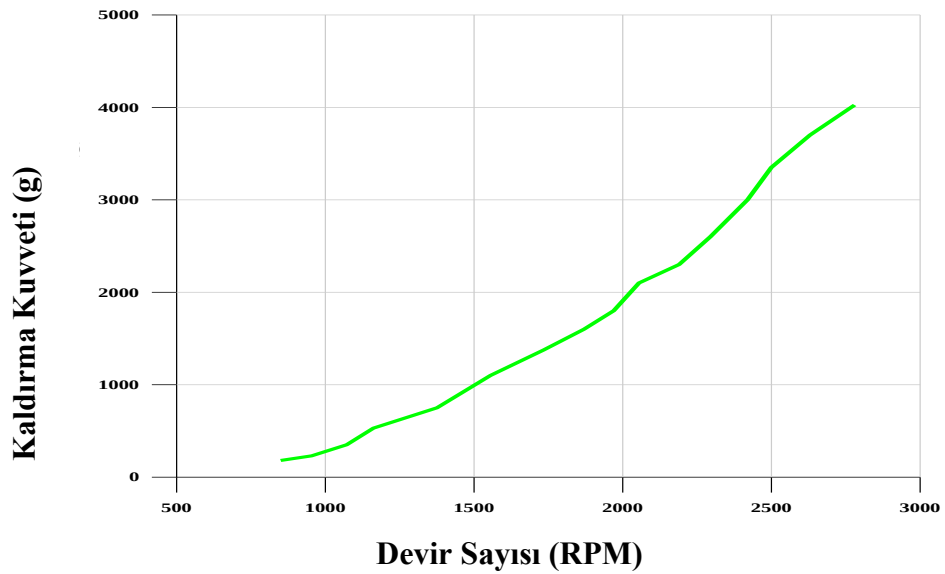
Şekil 5.12. 18*8 inç pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği

İkinci testte çekilen akım ile kaldırma kuvvetinin ilişkisi kontrol edilerek ve Şekil 5.13’te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. 18*8 inç pervane ile motorun akımı ve kaldırma kuvveti grafiği

18*8 pervane için son olarak devir sayısı ile oluşan kaldırma kuvveti arasındaki ilişki incelenmiştir. Burada 14*8 pervane kullanıldığında oluşan devir sayısına benzer bir hız üretildiğinde çok daha yüksek kaldırma kuvvetinin oluştuğu Şekil 5.14’te görülmüştür.



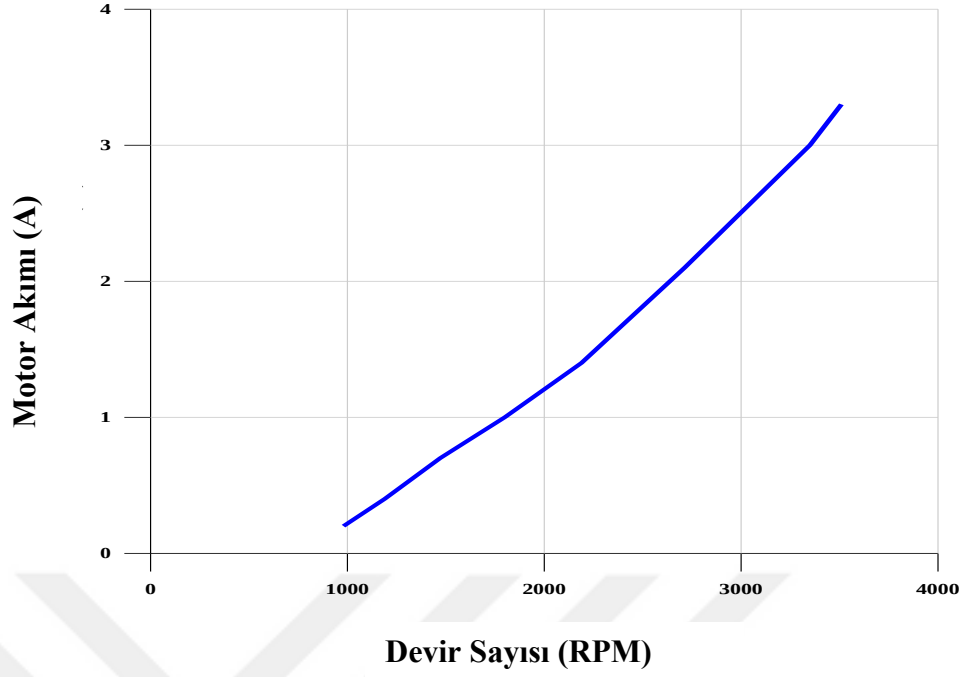
Şekil 5.14. 18*8 inç pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği

Son olarak 18*8 pervane kullanıldığında devir sayısı, kaldırma kuvveti ve motordan çekilen akım değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. 18*8 inç pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri

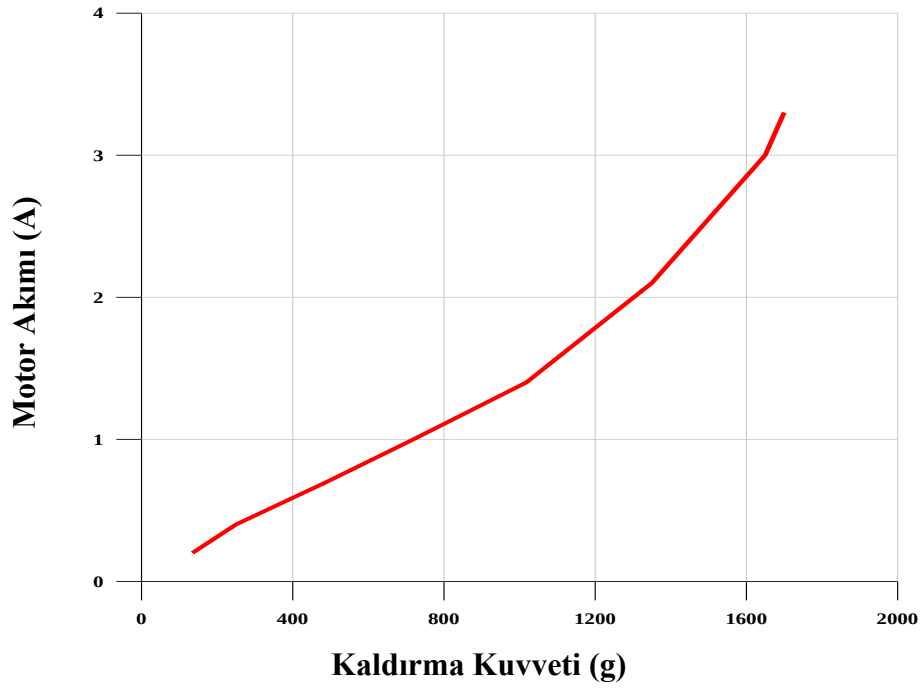
Devir Sayısı (RPM)	Kaldırma kuvveti (g)	Akım (A)
850	180	0,31
954	230	0,39
1072	350	0,52
1162	530	0,61
1376	750	0,85
1556	1100	1,19
1734	1375	1,5
1870	1600	1,8
1970	1800	2
2055	2100	2,25
2190	2300	2,5
2295	2600	2,9
2420	3000	3,3
2500	3350	3,7
2630	3700	4,1
2780	4025	4,62

Motorun üç bıçaklı pervaneler üzerindeki testleri tamamlandıktan sonra farklı bir tür pervane üzerinde de performansı incelenmiştir. Burada incelenen özellik ise hatvenin ve bıçak sayısının motor performansı üzerindeki etkisidir. Bir pervane 18*10 olarak ifade edildiğinde 18 rakamı pervanenin inç olarak çapını, 10 ise hatve değerini ifade eder. Burada 18*8 üç bıçaklı pervane performansından sonra 18*10 iki bıçaklı pervane performansı incelenmiştir. Öncelikle devir sayısı ve motor akımı arasındaki ilişki Şekil 5.15'te görülmektedir. Burada dikkat edilirse bıçak sayısı ikiye düştüğü için motorun çektiği akımın düştüğü görülmektedir. Ancak bıçak sayısı ve akım azaldıkça devir sayısının düşmemesinin nedeni de artan hatve miktarı olarak anlaşılmıştır.



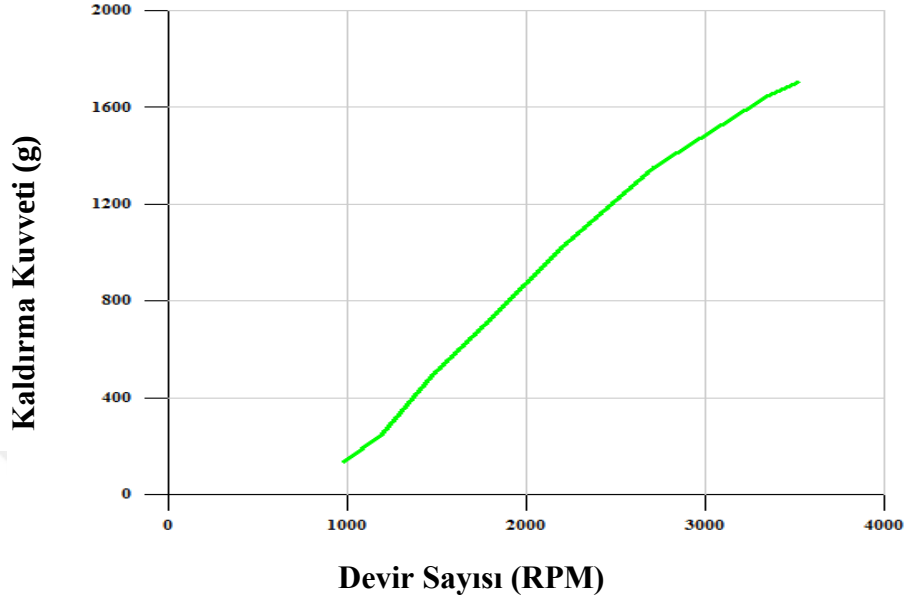
Şekil 5.15. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı ve devir sayısı grafiği

Pervanedeki bıçak sayısının doğrudan kaldırma kuvveti ile ilişkili olduğu bilinen bir gerçektir. Burada azalan bıçak sayısı ile birlikte Şekil 5.16’da görüldüğü üzere çekilen akım ve kaldırma kuvveti de azalmıştır. Zaten beklenen değerde bu şekildedir.



Şekil 5.16. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı ve kaldırma kuvveti grafiği

Kaldırma kuvvetinin devir sayısı ile arasındaki ilişkiye bakıldığında Şekil 5.17’de görüldüğü gibi elde edilmektedir. Burada da beklendiği üzere bıçak sayısı üçten ikiye düşürüldüğü için kaldırma kuvveti de azalmıştır.



Şekil 5.17. 18*10 inç tek pervane ile motorun kaldırma kuvveti ve devir sayısı grafiği

Son olarak, elde edilen veriler topluca Tablo 5.4’te verilmiştir. Burada devir sayısı, kaldırma kuvveti ve motorun çektiği akım arasındaki ilişki tablodan rahatlıkla elde edilebilir.

Tablo 5.4. 18*10 inç tek pervane ile motorun akımı, kaldırma kuvveti ve devir sayısı değerleri

Devir sayısı (rpm)	Kaldırma kuvveti (g)	Akım (A)
981	135	0,2
1190	250	0,4
1472	490	0,7
1800	720	1
2190	1018	1,4
2714	1350	2,1
3350	1650	3
3510	1700	3,3

6. SONUÇLAR

İnsansız hava araçları (İHA) günümüzde gerek harp teknolojilerinde, gerekse de kargo taşımacılığı, haberleşme, görüntü alma gibi hayatın her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Önemleri gittikçe artan bu araçlar için yüksek performanslı, hafif ve dayanıklı motorlara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada İHA'lar için motor tasarımı, üretimi ve performans analizleri yapılmıştır. Tasarımı yapılan motor fırçasız olup yüksek hızlara çıkabilmektedir. Ayrıca oldukça hafif ve dayanıklı malzemeden üretilen motor aynı zamanda ekonomik olarak ta uygun malzemelerin seçimi ile avantajlı hale gelmektedir. Üretilen motorun performans testleri büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla pervanesiz, 3 bıçaklı iki farklı boyutta pervane kullanılarak ve iki bıçaklı pervane kullanılarak testler yapılmıştır. İlk olarak pervane olmadığında beklendiği gibi çekilen akım ve motor hızının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Sonrasında ise üç bıçaklı 14*8 ve 18*8 pervaneler kullanılarak kaldırma kuvveti, motor tarafından çekilen akım ve devir sayısı incelenmiştir. Burada motorun performansının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Üç bıçaklı pervanenin kullanılmasından sonra ise iki bıçaklı pervane kullanılarak motor performansı analiz edilmiştir. Burada da beklendiği gibi bıçak sayısı azaldığı için gerek kaldırma kuvveti gerekse de çekilen akım azalmıştır. Ayrıca bu azalma hatve değeri yüksek olmasına rağmen görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında insansız hava araçları için fırçasız DC motor tasarlanarak üretilmiş ve gerekli performans testleri farklı pervaneler kullanılarak elde edilmiştir. Tüm sonuçlar piyasada bulunan motorların performansları da göz önüne alındığında tez kapsamında sunulan motorun İHA'larda kullanılabileceği sonucunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Arı, Ayşe., ve Berberler, M. E. (2017) “Yapay sinir ağları ile tahmin ve sınıflandırma problemlerinin çözümü için arayüz tasarımı”, *Acta Infologica*, 1(2), 55-73.
- Atan, Ö. (2007) “Fırçasız DC motorun modellenmesi ve PWM ile kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 1-2, 6-14.
- Aydoğdu, Ö. (2006) “Fırçasız doğru akım motorlarının genetik tabanlı bulanık denetleyici ile sensörsüz kontrolü”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 19-29.
- Bayraktar, H. C. (2014) “Fırçasız doğru akım motorunun kontrolü”, Seminer Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bayraktar, H. C. (2015) “Yabancı Uyartımlı İle Fırçasız Dc Motorların Hız Ve Tork Karakteristiklerinin Karşılaştırılması”, Doktora Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 3-4, 64.
- Bayraktar, H. C. and BALIK, H. (2015) “The Control of Brushless DC Motors” *International Journal of Electronics Mechanical and Mechatronics Engineering*, 5(2), 919-932.
- Bose, B. K. (1990) “An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive system”, *IEEE Transactions on industrial electronics*, 37(5), 402-408.
- Boukais, B., and Zeroug, H. (2004) “Efficiency Determination of a Brushless DC Motor Under Field Weakening Operation”, *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Italy, 567-570.
- Chapman, S. (2007) Elektrik makinalarının temelleri, Çev. E. Akın ve A. Orhan, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 28, 160-162.
- Ciba, S ve İskender, İ. (2018) “Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Model Referans Adaptif Kontrol Yöntemi - MIT Kuralı ile Kontrol Edilmesi”, *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing*, Malatya, 1-3.
- Ciba, S. (2019) “FİRÇASIZ DA MOTORLARININ PERFORMANS ANALİZİ VE DENETİMİ”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-17, 25-28.
- Coşkun, İ. and Terzioğlu, H. (2007) “Hız Performans Eğrisi Kullanılarak Kazanç (PID) Parameterlerinin Belirlenmesi”, *Selçuk Teknik Dergisi*, 6(3), 180-205.
- Çelikel, R. (2016) “Uydular için volanlı enerji depolama sistemlerinde kullanılabilecek yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorunun genetik algoritma tabanlı akım kontrolü”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.

- Çelikel, R. (2017) “Yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorlarında moment dalgalanmalarını azaltan bir yöntem”, **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, 8(3), 485-493.
- Gedikpınar, M. and Güldemir, H. (2002) “Fırçasız doğru akım motorlarının algılayıcısız hız kontrolü”, **Politeknik Dergisi**, 5(4), 273-279.
- Gödekoğlu, H. (2007) “Fırçasız doğru akım motoru konum kontrolörü tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-4, 17-20.
- Gumaste, A. V. and Slemon, G. R. (1981) “Steady-state analysis of a permanent magnet synchronous motor drive with voltage-source inverter”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, (2), 143-151.
- Gündoğdu, A. (2012), “Asenkron Motorlarda Moment Dalgalanmalarının Sinirsel Bulanık Ağlar ile Azaltılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ.
- Hwang, C. C., Li, P. L., Liu, C. T., and Chen, C. (2012) “Design and analysis of a brushless DC motor for applications in robotics”, **IET electric power applications**, Taipei, 6(7), 385-389.
- Ibrahim, Z. and Levi, E. (2002) “A comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high-performance AC drives using experimental approach”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 38(5), 1210-1218.
- Inoue, K. and Nakaoka, M. (1998) “Autotuning gain parameter implementation with fuzzy learning control scheme for DC brushless servo system”, **IEE Proceedings-Control Theory and Applications**, 145(5), 419-427.
- Jang, G. H. and Lee, C. I. (2005) “Dual winding method of a BLDC motor for large starting torque and high speed”, **IEEE transactions on magnetics**, Seoul, 41(10), 3922-3924.
- Jung, I. S., Chang, H. S. and Back, S. H. (2003) “Magnetic field analysis of polar anisotropic ferrite-bonded magnet for brushless DC motor application”, **In Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS**, Vol 2, 774-777.
- Karakaş, E. (2016) “Elektrikli araçlar için fırçasız doğru akım motorlarının sensörsüz doğrudan moment kontrolünün güç geri kazanımlı olarak gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 11-17.
- Karakulak, O., Yaz, O., Köybaşı, E., BİÇAKCI, S., CANDAN, C., and AKDAŞ, D. (2012) “PIC TABANLI FIRÇASIZ DC MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI”, **3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir, 231-238.

- Kayabaşı, S. E. and Topçu, E. E. (2019) “Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Minyatür Fırçasız DA Motorların Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(2), 236-250.
- Kenjo, T., Nagomori, S. (1985) “Principles and fundamental structures of brushless DC motors”, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, E. H. Rhoderick, P. Hammond, and R. L. Grimsdale, *Clarendon Press*, Oxford, 57-70.
- Orman, K., Başçı, A. and Derdiyok, A. (2016) “Speed Control of BLDC Motor Using Fractional Order PI Controller”, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, TOK’16, Eskişehir, 471-475.
- ÖZGENEL, M. C. (2020) “Design, Producing and Testing of 12-Step Three-Phase Voltage Source Inverter with Flexible Independent PWM Current Control for Brushless Direct Current Motor”, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(2), 956-969.
- Pearson, W. R. and Sen, P. C. (1984) “Brushless DC motor propulsion using synchronous motors for transit systems”, *IEEE transactions on Industrial Electronics*, (4), 346-351.
- Pillay, P. and Krishnan, R. (1989) “Modeling Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25 (2), 24-29 .
- Rambabu, S. (2007) “Modeling and control of a brushless DC motor”, Master of Thesis In Power Control and Drives Technology, *National Institute of Technology, Rourkela*.
- Safi, S. K., Acarnley, P. P. and Jack, A. G. (1995) “Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 142(3), 191-200.
- Sağıroğlu, Ş., Beşdok, E., Erler, M. (2003), “Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I Yapay Sinir Ağları”, *Ufuk Yayınevi*, Kayseri.
- Shamseldin, M. A. and EL-Samahy, A. A. (2014) “Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller”, *International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 1-9.
- Srisiriwanna, T. and Konghirun, M. (2012) “A study of cogging torque reduction methods in brushless DC motor”, *In 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Bangkok, 1-4.
- Ş, Demirbaş. (1995) “Fırçasız DA Motorlarının Simülasyonu ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Tabak, A. (2020) “Fırçasız doğru akım motorlarının hız kontrolünü gerçekleştirmek için PID/PD kontrolcü tasarımı ve performans incelemesi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 145-155.
- Tashakori, A., Ektesabi, M., and Hosseinzadeh, N. (2011) ” Characteristics of suitable drive train for electric vehicle”, *International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems*, Hong Kong, 537.
- Ulu, B. (2011) “Fırçasız doğru akım motor (BLDC) hız kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi , *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 11, 19-23.
- Xia, C.L. (2012) Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls, John Wiley and Sons, *Science Press*, Singapore.
- Yaz, M. and Cetin, E. (2021) “Brushless Direct Current Motor Design and Analysis”, *COJ Electronics & Communications*, 1-12.
- Yazıcı, Y. (2008) “Fırçasız doğru akım motorunun sayısal sinyal işlemci (DSP) ile kontrolü” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-32.
- Yedamale, P. (2003) “Brushless DC (BLDC) motor fundamentals”, *Microchip Technology Inc*, 20(1), 1-20.
- Yılmaz, M. (2005) “Fırçasız doğru akım motorunun algılayıcısız kontrolünde dalgacık tekniğinin uygulanması”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-24, 37.
- Zhang, J., Wang, N. And Wang, S . (2004) “A developed method of tuning PID controllers with fuzzy rules for integrating process,” *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, 1109-1114.

EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Abdulhadı, M. ve Babacan, Y. (2021) “İnsansız Hava Araçları İçin Fırçasız DC Motor Üretimi ve Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi-I”,**6.Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 243-250.**

Abdulhadı, M. ve Babacan, Y. (2021) “İnsansız Hava Araçları İçin Fırçasız DC Motor Üretimi ve Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi-II”, **6. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 236-242.**

