

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

FIRÇASIZ MOTOR SÜRÜCÜLERİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Ömer ALACA

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Veli DÖNDÜREN**

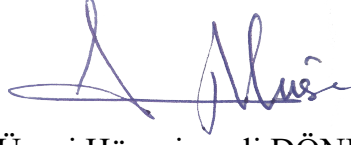
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



©2018 [Ömer ALACA]

TEZ ONAYI

Ömer ALACA tarafından hazırlanan "Fırçasız Motor Sürücülerin Enerji Verimliliği"adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

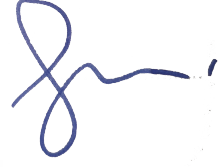


Danışman Dr. ögr. Üyesi Hüseyin v. DÖNDÜREN
Süleyman Demirel
Üniversitesi

Jüri Üyesi Dr. ögr. Üyesi Tansel KOYUN
Süleyman Demirel
Üniversitesi



Jüri Üyesi Prof. Dr. Reşat SELBAŞ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Enstitü Müdürü Prof.Dr. Yusuf UÇAR



TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ömer ALACA


İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. METERYAL VE METOD	21
3.1. Fırçasız DA Motorlar.....	21
3.2. Fırçasız DA Motorların Avantajları ve Dezavantajları	21
3.3. Fırçasız DA Motor Çeşitleri	22
3.3.1. İç rotorlu (inrunner) fırçasız DA motorlar	22
3.3.2. Dış rotorlu (outrunner) fırçasız DA motorlar	23
3.3.3. Disk tipi fırçasız DA motorlar	23
3.4. Fırçasız DA Motor Statoru	23
3.5. Fırçasız DA Motor Rotoru (Gövde).....	24
3.6. Fırçasız DA Motorlarda Manyetik Alan Ve Manyetik Akı Hesaplamaları	25
3.7. Fırçasız DA Motorlarda Harcadığı Güç Ve Verdiği Güç Denklemleri.	25
3.8. Fırçasız DA Motorlarda Kullanılan Mıknatıslar.....	26
3.9. Fırçasız DA Motorlarda Kullanılan Hall Effect Sensörler.....	27
3.10. Fırçasız DA Motorun Çalışması	28
3.11. Fırçasız Motor Sürücülerde Kullanılan Güç Transistörleri	30
3.12. Fırçasız DA Motor Sürücülerde PWM.....	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	34
4.1. Fırçasız DA Motor Sürücü Tasarımı.....	34
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR	62
EKLER	65
EK A. Motor Sürücü Yazılımı Konfigürasyon Algoritması	66
EK B. Motor Sürücü Yazılımı Kontrol Algoritması	76
ÖZGEÇMİŞ	83

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FIRÇASIZ MOTOR SÜRÜCÜLERİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Veli DÖNDÜREN

Yıllar geçtikçe hızla ilerleyen motor teknolojisi sektörü, içten yanmalı motor teknolojisinin yanı sıra, artık alternatif enerjiler ile çalışan motor yapım ve üretimi için Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır. Bu alternatif enerjili motorların ilk sırasında elektrik motorları gelmektedir. Elektrik motorlarının içerisinde son yıllarda en çok tercih edilenler Fırçasız DA motorlardır. Bu motorların tercih sebebi verimli, yüksek performanslı ve bakım gerektirmemesidir. Fırçasız Motorlar, yüksek verimli ve güç yoğunluklu sabit mıknatıslı doğru akım motorlarıdır.

Tez çalışmasında fırçasız DA motor üçgen bağlantılı, “outrunner” çalışan ve üzerinde 120° lik açılar ile yerleştirilmiş manyetik sensor olan bir motorda test aşamaları yapılmıştır. Motor üzerindeki sensör yardımı ile gövdenin hareketi ve konum açısı hakkında bilgi alındı. Sensor yardımı ile konum bilgisi alınarak motor sürücüyeye hangi kanalı açması konusunda geri bildirim yapıldı. Yapılan geri bildirim ile komütasyon ayarı yapıldı ve kontrol sırasında yaşanabilecek olan enerji kayıpları en düşük seviyelere indirildi. Motor sürücü motor fazlarına enerji verirken mosfetleri açıp kapatmak için PWM tekniği kullanıldı. Hata denetimi için PID hata denetim algoritması yazıldı.

Motor sürücü devresinde verimliliği artırmak için motorun fazlarının çektiği akım, üzerinden geçen gerilim, motorun devri, motorun ve sürücünün sıcaklık bilgileri hesaplandı. Elde edilen anlık bu bilgiler neticesinde kullanıcıya güç hesaplanarak kullanıcı bilgi sistemin bilgileri sunuldu. Motorun nominal değerlerine göre motor sürücünün vermesi gereken ideal güç referans alınarak kullanıcıya bildirildi. Kullanıcı bu bilgiler doğrultusunda bataryanın enerjisini verimli şekilde kullanması sağlandı. Bu bilgilerin hepsi aynı zamanda dışarıdan kablosuz haberleşme modülü ile alınarak kullanıcı bilgi sistemine aktarıldı.

Anahtar Kelimeler: Verimlilik, kablosuz haberleşme, kullanıcı bilgi sistemi, komütasyon

2018, 83 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

ENERGY EFFICIENCY OF BRUSHLESS MOTOR DRIVES

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute for Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin Veli DÖNDÜREN

Over the years the rapidly advancing engine technology sector, as well as internal combustion engine technology, which is now working with alternative energies for the production and production of engine R & D studies. Electric motors are the first of these alternative powered motors. Brushless DA motors are the most preferred electric motors in recent years. The reason for these motors is efficient, high performance and maintenance-free. Brushless Motors is a high efficiency and power density permanent magnet direct current motors.

In the thesis study, brushed DC motor with triangular connection, ile outrunner running and a hall effect sensor with 120 ° angles placed on a motor test phase has been made. Information about the movement of the stator and position angle with the help of sensor on the engine. With the help of the sensor, the location information is given to the motor driver to give feedback on which channel to open. The commutation was adjusted with the feedback and the energy losses during the control were reduced to the lowest levels. PWM technique was used to switch on and off the mosfets while energizing the motor drive motor phases. PID error control algorithm is written for error checking.

In order to increase efficiency in the motor drive circuit, the current drawn by the phases of the motor, the voltage passing over it, the speed of the motor, the temperature information of the motor and the drive be calculated. As a result of this instant information, the user was informed of the user information system by calculating power. According to the nominal values of the motor, the motor driver is informed about the ideal power. The user is provided to use the energy of the battery efficiently. All of this information was also taken from outside with wireless communication module and transferred to the user information system.

Keywords: Productivity, wireless communication, user information system commutation

2018, 83 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Veli DÖNDÜREN teőekkürlerimi sunarım. Literatür araştırmalarımnda ve üretim aşamalarında yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Reşat SELBAŞ'a teşekkür ederim.

Tezimin retim aşamasındaki desteklerinde dolayı Teknoloji Fakültesi atolye çalışanlarına teşekkür ederim.

Ömer ALACA
ISPARTA, 2018



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Hall sensör bağlantısı.....	7
Şekil 2.2. Gövde mıknatıs montajları	7
Şekil 2.3. Manyetik sensörlerin yerleşim açıları.....	10
Şekil 2.4. Fırçasız doğru akım motor voltaj vektörü	11
Şekil 2.5. Sensör değerlerine göre motor sürücü çıkış sinyalleri.....	12
Şekil 2.6. Üç fazlı BLDA motorların sürülmesi için altı aşamalı iki fazla uyarma yöntemi. HA, HB ve HC, üç konumda bulunan hall sensörlerin temsil eder.....	13
Şekil 2.7. Hall sensörü lojik çıkış değerleri	14
Şekil 2.8. PWM modlarına göre açılan MOSFET'ler	16
Şekil 2.9. (a)Tipik fırçasız motor sürücü (b)Kondansatörü olmayan fırçasız Motor sürücü	18
Şekil 3.1. 12 kollu stator	24
Şekil 3.2. Yıldız sarım	24
Şekil 3.3. Delta sarım	24
Şekil 3.4. Daimi mıknatıslı rotor	25
Şekil 3.5. Hall Effect sensör yerleşimi ve sürücü sistemi	27
Şekil 3.6. Üç fazlı fırçasız DA motorun şematik diyagramı	29
Şekil 3.7. Üç fazlı fırçasız DA motor sinyalleri ve anahtarlama örüntüsü	30
Şekil 3.8. IRFZ44N datasheet	31
Şekil 3.9. PWM digital kontrol prensibi	33
Şekil 4.1. Akım sensörü, sıcaklık sensörü, hall effect sensör şematik tasarımı.	34
Şekil 4.2. Motor sürücü mikroişlemci katı şematik tasarımı.....	35
Şekil 4.3 Motor sürücü devresi güç katı	36
Şekil 4.4. Motor sürücü MOSFET katı	38
Şekil 4.5. iki boyutlu PCB (ön taraf)	40
Şekil 4.6. 2 boyutlu PCB (arka taraf)	41
Şekil 4.7. Üç boyutlu PCB (ön taraf)	41
Şekil 4.8. Üç boyutlu PCB (arka taraf)	42
Şekil 5.1. Motor sürücü pcb kartı	43
Şekil 5.2. Motor sürücü kartı güç katı ve sensör yerleşimi	44
Şekil 5.3. Motor sürücü kartı malzeme yerleşimleri	45
Şekil 5.4. Motor sürücü kartı arka yüzü	46
Şekil 5.5. Deadtime (gecikme zamanı) ayarlanması	47
Şekil 5.6. Kullanıcı paneli	48
Şekil 5.7. Deney Düzeneği	49
Şekil 5.8. Motor giriş - çıkış gücüne göre devri	51
Şekil 5.9. Motor sürücünün motorun giriş-çıkış güç değerlerine göre verimi	52
Şekil 5.10.Devir Değişimine göre motorun verim grafiği	53
Şekil 5.11. MagicPie motoru ile tasarlanan motorun verim grafikleri	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Manyetik kayıplar	7
Tablo 2.2. Gövde konumuna göre mosfet durumlar.....	8
Tablo 2.3. Manyetik sensor değerlerine göre mosfet voltajları	9
Tablo 2.4. Motor sargılarına verilecek lojik sinyal sırası.....	14
Tablo 4.1. PCB yol kalınlıkları ve akım değerleri.....	39
Tablo 5.1. Motorun giriş ve çıkış değerleri	50
Tablo 5.2. Golden Motor MagicPie HUB(BLDA) motor verim tablosu	53
Tablo 5.3. Motor sürücü ve MagicPie veri karşılaştırması	58



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
DA	Doğru Akım
Dy	Disprosyum
EA	Elektrikli Araç
EMF	Elektro Motor Kuvveti
E-SDŞ	Electronic continuously variable transmission
GEMF	Geri Elektro Motor Kuvveti
GPIO	Genel Giriş Çıkış Portları
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISG	Integrated Starter-Generator
H	Manyetik Alan Şiddeti
HEV	Hibrit Elektrik Vehicle
Hz	hertz (1/sn)
MOSFET	Metal-Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
mV	Mili volt
Nd	Neodyum
PAM	Pulse Amplitude Modulated(Darbe Genişlik Modülasyonu)
Pin	Giriş Gücü
PM	Kalıcı mıknatıs
Pmos	Mosfetin içerisinde harcanan güç
Pout	Çıkış Gücü
PWM	Pulse Width Modulation(Sinyal Genişlik Modülasyonu)
T	Tesla
V	Volt
µA	Mikro Amper

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı yıllar ilerledikçe her alanda artmaktadır. Sanayi ve endüstri her geçen gün daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Sanayi ve endüstride çalışan çoğu ekipmanlar motorlar ile hareket etmektedir. Yani enerjinin belirli bir yüzdesini motorlar harcamaktadır. Motorların kullandığı bu enerjinin verimliliği için motor sürücülerin motor kontrolünü minimum enerjide maksimum performansta kullanması gerekmektedir. Motor üzerine düşen yük arttığında motor ideal akımından daha fazla akım çekmektedir. Tasarlanan motor sürücü ve kullanıcı arayüzü ile birlikte motor optimum düzeyde kullanılarak verimini düşürmeden hareketine devam edebilecektir.

Üretilen motorlarda başlıca aranan özellikler verim, ucuzluk, az bakım ve güvenilirlik olarak sayılabilecek nitelikler aranmaktadır. Özellikle otomotiv gibi sanayi sektöründe, motorlarda bu özelliklerin yanı sıra, hız değişiminin de hassas bir şekilde ayarlanabilmesi istenmektedir. Bu doğrultularda tercih edilebilecek en avantajlı motorlar fırçasız DA motorlardır. Fırçalı DA motorlar; yüksek kalkış momentine, doğrusal bir moment-hız karakterine sahiptir. Yani Fırçasız DA motorların sağladığı bazı avantajları sağlamaktadır. Fakat fırçalı DA motorların yapısında bulunan fırça ve kollektör düzeneklerinden dolayı sürtünme oluşması nedeniyle motor bakımının sık sık yapılması gerekmektedir. Bu durum verim düşürmekte maliyeti ise arttırmaktadır. Klasik (fırçalı) motorların bu dezavantajları göz önüne alınarak fırçasız DA motorlar geliştirilmeye başlanmıştır (Nasar vd.,1993).

Elektrik motorlarının üretiminde kullanılan manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler, motor sürücü sistemlerinde kullanılan elektronik elemanların yeterli yüksek hızlara ulaşmaları ve maliyetlerinin düşmesi, sabit mıknatıslı elektronik komütasyonlu özel elektrik motorlarının ortaya çıkmasının en önemli nedenleri olarak gösterilebilmektedir. Bu tip motorlardan en yaygın olanı, son yıllarda kullanımı giderek artan fırçasız DA motorlardır. Fırçasız DA motorlar, özellikle küçük güçlü kontrol motorları olarak üretilmektedir. Çünkü bu motorlar; yüksek moment, yüksek güç/ağırlık oranı, yüksek verim, sessiz çalışma, yoğun sargı

yapısı, güvenilirlik ve düşük bakım giderleri açısından oldukça avantajlıdır. Bu avantajlarından dolayı fırçasız DA motorlar; bilgisayarlarda, uzay araçlarında, askeri ekipmanlarda, otomotivde, endüstride ve ev gereçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shao, 2003).

Fırçasız DA Motorlara sadece giriş voltajı sağlamak yerine, motor hızını ve torkunu verimli bir şekilde kontrol etmek için motor gövdesinin konumunu belirlemede bir geri bildirim (feedback) sistemi gereklidir. Motor pozisyon konumunun geri bildirimini tipik olarak, hall sensörleri kullanılarak gerçekleştirilir; bunun yanı sıra, sensörsüz çözümler pozisyon geri bildirimleri de gerçekleştirmektedir. Sensörsüz motor sürücü sisteminde, rotor konumu genellikle tahrik edilmeyen fazın Geri Elektromanyetik Kuvvetinden (GEMF) belirlenir. (De Smedt vd.,2016).

Fırçasız DA motorlar, uzay sistemlerinde, otomotiv sektöründe, savunma sanayinde, robotik sistemlerde, tıp elektroniğinde, bilgisayar sistemlerinde, ev aletlerinde yani günümüzde pek çok endüstriyel faaliyet gösteren her alanda kullanılmaktadır. Fırçasız DA motorların sahip olduğu avantajları sıralarsak; verimleri çok yüksektir, yapıları sağlamdır, güvenilirliği yüksektir, yapılarında fırça olmaması nedeniyle ark veya kıvılcım oluşturmazlar, karbon toz salınımı yapmaz, yüksek tork ve yüksek hız elde edilebilir, kolay soğutulur, hız kontrolü mümkündür, yüksek akım-moment ilişkisine sahiptir, küçük boyutlarına rağmen yüksek güç, tork ve moment üretebilirler, fırçalı motorlarda ki gibi tetikleme akımına ihtiyaç yoktur ve fırçalı motorlara göre daha sesiz çalışırlar. Sahip oldukları bu avantajların yanı sıra, belli başlı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar; maliyetlerinin yüksekliği, genel olarak pozisyon kullanım gerekliliği ve karmaşık bir kontrol devresine ve kontrol algoritmasına sahip olması gibi nedenlerdir (Karakulak ve Yaz, 2012).

Fırçasız motorlar son yıllarda birçok alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Kullanım alanlarına göre verimliliklerine önem verilmektedir. Örneğin; kullanılacak olan motor ve motor sürücü elektrikli araçlarda(EA), insansız hava araçlarında(İHA), beyaz eşya sektörü, uzay araçlarında, savunma sanayinde vb.

alanlarda kullanılacaksa verimlilik önemli bir durumdur. Motorun verimliliği sürücü ile sürücü algoritmasının uyumlu çalışmasıyla gerçekleşmektedir.

Fırçasız motor sürücüler kullanılan mosfetin değerlerine göre çıkış verirler. Kullanılacak olan mosfetin iç direnci, mosfetten çekilecek olan akım ve uygulanabilecek en fazla gerilime göre çıkış sağlamaktadır. Mosfetlerin iç direnci ne kadar küçük ise motorun çektiği akıma göre kendi içerisinde harcanacak olan güç o kadar azdır.

Motor sürücü yük altına girdiğinde bataryadan çekebileceği maksimum akımı çekecektir. Maksimum akım çekmesi durumunda mosfetlerin datasheet değerlerinden fazla akım çekmesi durumunda yanmasına neden olur. Bu durum genel olarak sensörsüz fırçasız motor sürücülerde problem konumundadır. Sensörlü motor sürücülerde kullanılan akım sensörleri sayesinde sürücü devresinin bataryadan çekebileceği akım sınırlandırılır. Motor sürücü devresi akım yönünden koruma altına alınmış olur. Fakat kullanılan bu sürücüler motorun belirli devirlerine göre sabit akım çıkışı vermektedir. Bu durumu çözmek için motorun devri hesaplanarak sabit akım değil hareket için ideal akım çekme algoritması geliştirilecektir. Örneğin EA'lar için düşünüldüğünde yokuş aşağı ve yokuş yukarı gibi modların eklenmesiyle enerji tasarrufu sağlanmış olacaktır.

Tasarlanan motor sürücü ile motorun verimli bir şekilde sürülmesi gerçekleştirildi. Verimlilik motor sürücünün komütasyon ayarının yapılması, motorun zorlanması durumunda sürücüdenden istenilenden fazla akım çekmemesi ile devir, akım, gerilim gibi vb. parametrelerin hesaplanıp kullanıcıya sunulması kritik durumlarda uyarılmasıyla gerçekleştirildi. Kullanıcıya bilgiler kullanıcı bilgi sistemi üzerinden kablosuz olarak aktarıldı. Akım kontrolü için Polulu firmasının üretmiş olduğu ACS714 Akım sensörü (30 Amper) ile akım ölçümü yapıldı. Tasarlanan bu motor sürücü kullanıcıya sunulacak bu değerler ile nominal değerinden daha az enerji harcayarak enerji tasarrufu elde edildi. Mevcut enerjinin daha da verimli kullanılması sağlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Fırçasız DA motorlar; yüksek verimlilik, yüksek tork, yüksek güç yoğunluğu, geniş hız kontrolü aralığı, düşük gürültü ve elektromanyetik parazit gibi avantajlar, fırçasız DA (BLDA) motorunu pek çok uygulamada ideal motor olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fırçasız DA motor, birçok beyaz eşya, endüstriyel aletler, tıbbi ekipman, hassas hareket kontrolü olan uygulamalar, otomasyon ve nakliye uygulamalarında kullanılmıştır (Xia, 2012).

Fırçasız DA motorlar yüksek verimi, kompaktlığı, düşük maliyeti ve bakımının kolay olmasından dolayı endüstride giderek daha fazla kullanılmaya başlanmaktadır. Özellikle de havalandırma ve kompresör sistemlerinde gün geçtikçe daha çok kullanılmaktadır. Fırçasız DA motorların yüksek hızla dönmesi, rulman teknolojisinin gelişmesi ile birlikte dakika başına on binlerce devir sayısına (devir/dakika) kadar çıkabilmektedirler (Cavagnino vd.,2014).

Motorun enerji kayıplarını minimuma indirmek için uygun bir tahrik yöntemi ve yüksek geniş hız aralığında verimlilik kritik bir konu haline gelir. Bu arada, fırçasız DA motorun invertör işlemi için altı tane belirli açılarla yerleştirilmiş konumu bilinmelidir. Bunlar genellikle bir motora sonradan monte edilen Hall sensörleri tarafından sağlanmaktadır (Halkosaari, 2006).

Fırçasız DA motorun doğru sabit, anlık momentini elde etmek için motorun statoru üzerine monte edilmiş manyetik sensörler kullanılarak elde edilebilen, stator akımını değiştirmek için rotor konum bilgisi bilinmelidir (Chun vd.,2014).

Fırçasız DA motorlar akımın yön değiştirme işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren DA motorlarda, rotordaki sarımlara elektrik iletimi fırça - kolektör yapısı ile sağlanır. Parçalı bir yapıda olan stator sayesinde, gövde üzerindeki sarımlarından geçen akımın yönü motor dönerken kendiliğinden değişir. Bu sistemin kıvılcım oluşturma, bakım gerektirme ve fırçalarda aşınma gibi problemleri vardır. Fırçasız DA motorlar ise fırça kolektör yapısı bulunmadığından bu motor tipi senkron makinalar

kategorisine girer. Yapısında fırça olmadığından bakım gerektirmezler. Bu durum güç yoğunluğunu ve verimin yüksek olmasının en büyük sebeplerindedir. Gövdeye sabitlenen mıknatısları ile statoru sabit inrunner ve outrunner tahrik sağlayan motorlardır. Fırçasız DA motorların yapısı ve sürülmesi beş birimden oluşmaktadır. Sabit mıknatıslı bir gövde, üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen stator, konum algılayıcı sensorler ile akım - hız geri besleme bilgileri, sürücü birimi(mosfetler), mikro denetleyicilerdir (Dixon ve Leal,2002).

Gövdedeki sabit mıknatıslar ve stator sargılarından dolaşan akımların etkileşimi neticesinde fırçasız DA motorlar çalışmaktadır. Gövde içerisindeki sabit mıknatısa sahip olan fırçasız DA motorların, gövde pozisyonunun bilinmesi motor sürücünün akımın yönünün değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Üç fazlı fırçasız DA motorlarda her zaman iki faz enerjili durumdadır. Gövdenin pozisyonuna bağlı olarak bu iki fazdan güç elde edilmektedir. Stator akımlarının yönlerini, rotorun her kutup değişimi esnasında, motor sürücü devresindeki mikroişlemcinin karar vermesiyle yarıiletken elektronik malzemeler (mosfet, IGBT gibi) güç elektroniği anahtarları tarafından değiştirilir. Fırçasız DA motorlarda mıknatıs ve statorun oluşturduğu uzun ömürlü bir manyetik alan meydana gelir. Bunun nedeni, gövdenin sabit mıknatısa sahip olmasıdır (Bayraktar, 2014).

Fırçasız DA motor üretilirken stator sayısı ve kutup sayıları belli orantılarda olmalıdır. Maksimum kutup sayısı 8 in katı olacak şekilde stator sayısı ise 12'nin katı olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunu yanı sıra 12 kutup 12 stator olacak şekilde veya katları olacak şekilde de tasarımlar yapılmaktadır. Stator sayısı fazla olan motorların tasarlanma amacı güvenilirliği ve çalışma verimliliğini arttırmaktır (Xing vd.,2016).

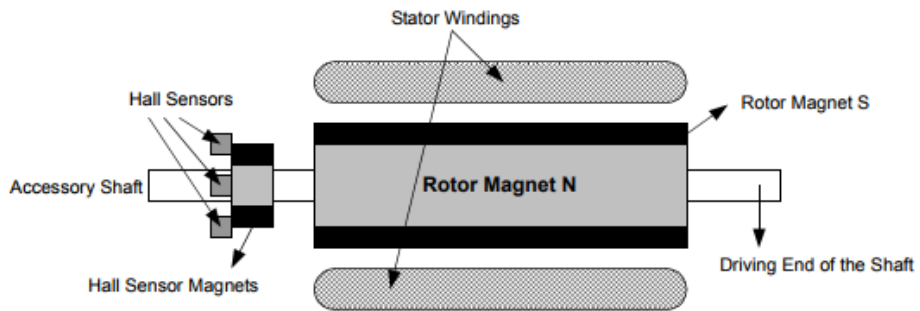
Yarı iletken devre elemanlarının devreler üzerinde aktif olarak kullanılmaya başlamasıyla birlikte fırçasız DA (BLDA) motorların kullanım alanları da yaygınlaşmaya başlamıştır. Fırçasız DA motorlar motor soğutma fanı, klima kompasörleri, klimalarda, hard diskler, elektrikli araçlarda, rüzgâr türbinleri vb. gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Jeon, 2000).

Tablo 2.1’de M250-35A silisyumlu çelik sac lar yüksek verimli motor üretmek için stator yapımında kullanılmaktadır. Bu sacın kullanılma sebepleri arasında az kayıp, yüksek verimlilik ve maliyetin uygun olmasıdır Uygun vd. (2015).

Tablo 2.1. Manyetik Kayıplar

1.5 T ve 50 Hz’de kayıp	2.35 W/kg	
1 T ve 50 Hz ‘de kayıp	0.98 W/kg	
İzotrop olmayan kayıp	%10	
DA artık mıknatıslanım	40 A/m	
1.5 T’ da bağıl geçirgenlik	660 H/m	
İç direnci	55 $\mu\Omega\text{cm}$	
50 Hz’ de manyetik polarizasyon	H= 2500 A/m	1.53 T
	H= 5000 A/m	1.64 T
	H= 10000 A/m	1.76 T

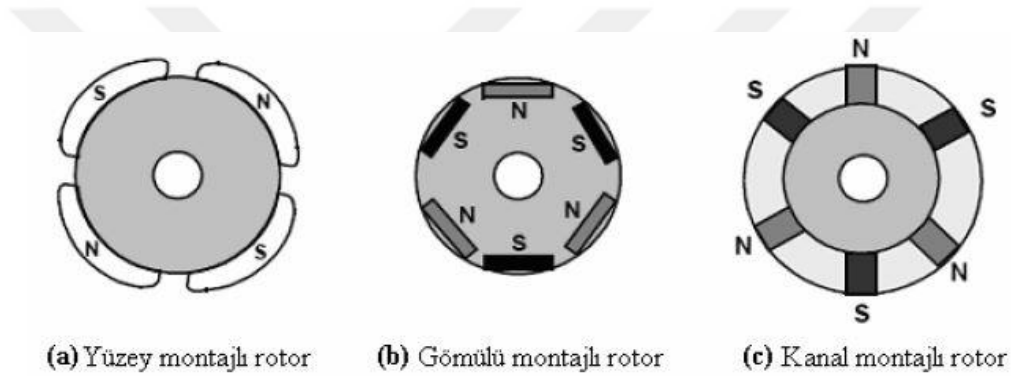
Motorun gövdesinin konumunu belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri Şekil 2.1’de gösterildiği gibi manyetik sensor kullanımıdır. Statorun yüzeyine monte edilmiş 3 adet sensor bulunmaktadır. Bu sensorler gövdeye 60° veya 120° lik açılarla monte edilmektedir. Gövde dönerken manyetik sensore dönüş hız ve konumuna göre sinyal çıkışları vererek motor konumu hakkında bilgiler elde edilmektedir (Yedamale ve Padmaraja, 2003).



Şekil 2.1. Hall sensör bağlantısı

Fırçasız DA motorlar, gövdeye sabit mıknatıslar monte edilmiş, dairenin bir parçası olacak şekilde monte edilerek üretilir. Gövdedeki mıknatıs sayısı maksimum dönme hızıyla ters orantılıdır. Fırçasız DA motorlar gövdedeki mıknatısların yerleşim yerlerine göre 3 şekildedir ve Şekil 2.2’de gösterilmektedir;

- Yüzey montajlı gövde
- Gömülü montajlı gövde
- Kanal montajlı gövde



Şekil 2.2. Gövde mıknatıs montajları

Kullanılacak 3 tane manyetik sensör 120° ve 60° lik açı aralığı vermektedir. Manyetik sensörün çıkışları mikroişlemcinin PWM uçlarına bağlanarak hız bilgisi sağlanmaktadır. Hız bilgisini alarak sayısal matematiksel formül ile motorun konum bilgisi elde edilmektedir Akın vd. (2010).

Fırçasız DA motorlarda manyetik sensör kullanıldığında motorun konumları hakkında bilgi alınabilmektedir. Bu konumlarda motor sürücünde hangi mosfetlerin hangi açılarda iletimde olduğu tablo 2.2 de gösterilmiştir Yılmaz vd. (2011).

Tablo 2.2. Gövde konumuna göre mosfet durumlar

Gövdenin konumu	İletimdeki mosfetler
$30^\circ < \alpha < 90^\circ$	Q1-Q6
$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	Q1-Q2
$150^\circ < \alpha < 210^\circ$	Q2-Q3
$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	Q3-Q4
$270^\circ < \alpha < 330^\circ$	Q4-Q5
$330^\circ < \alpha < 30^\circ$	Q5-Q6

Fırçasız doğru akım motor sürücü devresinde manyetik sensörden gelen verilere göre mosfetlere uygulanacak olan voltaj değerlerini belirlemişlerdir. Bu voltaj aralığı her 60° lik açı geçişlerinde mosfetlerin voltaj değerlerini belirlemektedir. Mosfetlere uygulanacak olan voltaj sınımları enerjilendirir. Uygulanacak olan voltaj ile motor devri sabit olarak hareket sağlanacaktır. Voltaj PWM darbeleri şeklinde olursa motor maksimum ve minimum devirlerde kontrol edilecektir. Tablo 2.3 te manyetik sensörlerin çıkışlarına göre mosfetlerin açık ve kapalı olma durumları gösterilmektedir (Mehta ve Hrishikesh, 2015).

Tablo 2.3. Manyetik Sensor Değerlerine Göre Mosfet

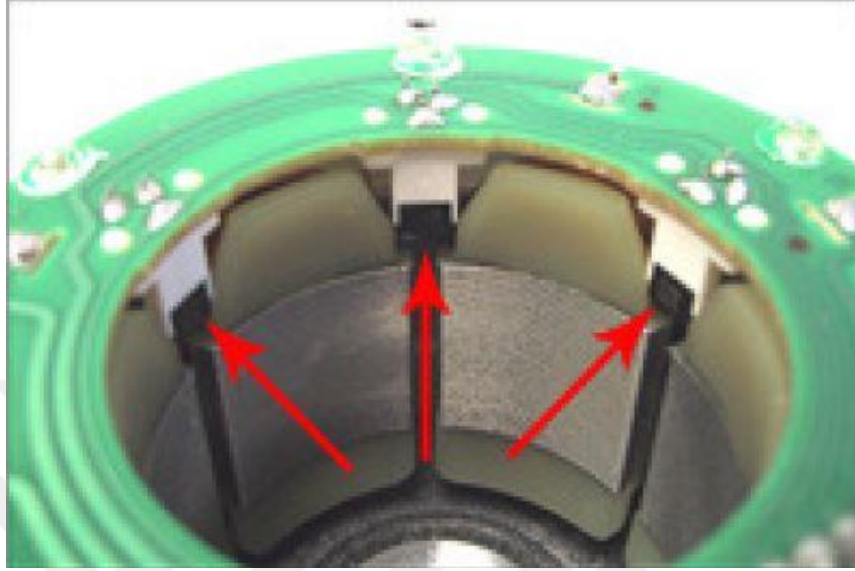
Hall Sensors			Power Switches					
A	B	C	S6	S5	S4	S3	S2	S1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	0	1	1	1	0
0	1	1	0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	1	1
1	0	1	1	1	0	0	0	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fırçasız DA motorları sabit gövdedeki, sabit mıknatıslar ile statordaki sarımlara enerji uygulanması ile aralarında manyetik alan oluşturarak çalışan bir motor türüdür. Bu yüzden motorun rotor ile stator konum açısı, bu açının doğru algılanması motorun verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamaktadır. Motor gövdesine yerleştirilmiş olan manyetik sensorler, motorun çalışmasını verimli kılması sağlanmıştır. Manyetik sensorler doğru akım motorlarında mekanik olarak yapılan akım yön değişimini elektriksel, elektronik olarak gerçekleştirmektedir (Usta vd. 2015).

Günümüzde fırçasız DA motorların stator sargıları genel olarak dağıtılmış(atlamalı) olarak üretilmektedir. Fırçasız DA motorlarda sargı kolları uzun olduğundan dolayı moment yoğunluğu, stator kollarına düşen akım ve verim düşmektedir. Fırçasız DA motorların verimini artırmak için dağılım sargı yerine konsantrik sargı kullanılmıştır. Bu durum “Kesirli Oluk Sargılı fırçasız DA motor” olarak geçmektedir (Hendershot vd. 1994; Wang vd. 2008).

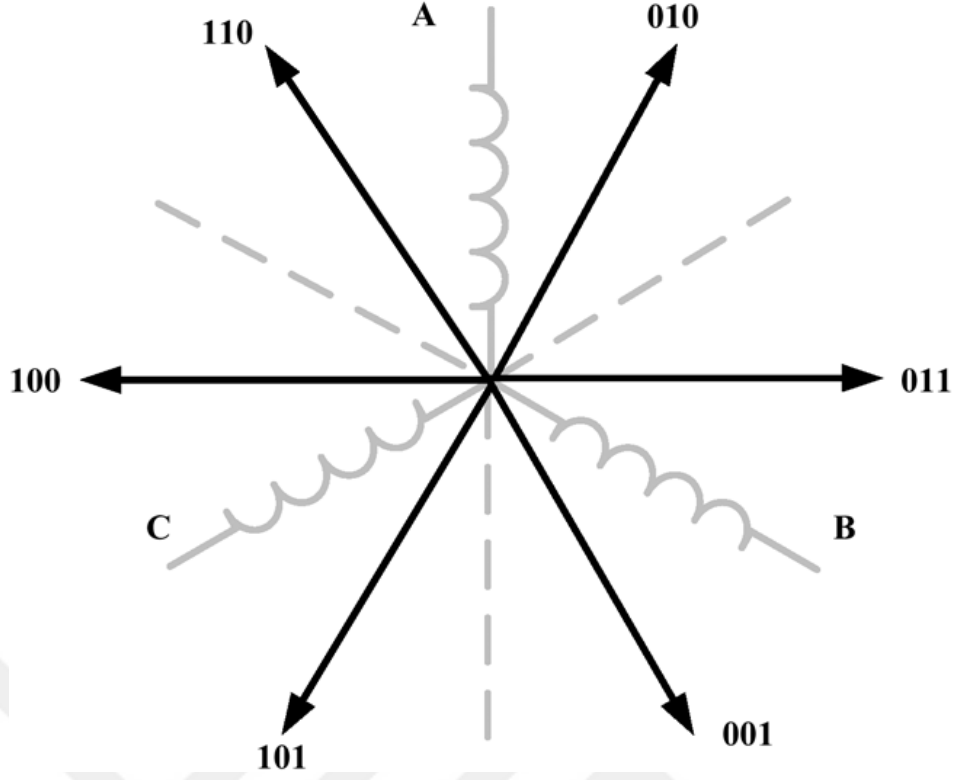
Sabit gövde üzerindeki mıknatıslar manyetik sensörlerin görmesi için manyetik akı meydana getirmektedir. Manyetik sensorün üzerinde 30mV luk çok küçük bir voltaj vardır. Bu voltaj yükselteçler tarafından yükseltilerek elde edilmektedir. Fırçasız DA motorlarda manyetik sensor Şekil 2.3’de gösterildiği gibi 60° lik veya 120° lik açılarla yerleştirilmektedir. Latch (kilitleme) prensibi ile çalışan bu

sensor, rotor döndükçe mıknatısların oluşturduğu N ve S kutuplarına göre iletim ya da kesim durumunda olur. S kutbu geldiğinde iletimde, N kutbu geldiğinde kesim durumu oluşmaktadır (Bayraktar ve Balık 2015; Kenjo ve Nagamori 1985).



Şekil 2.3. Manyetik sensörlerin yerleşim açıları

Fırçasız DA motorun kontrolünde komütasyonu belirlememiz için gövdenin konumunu bilmemiz gerekmektedir. Hall sensörü gövdenin konumunu belirlemede en yaygın, en çok tercih edilen ve en verimli yöntemdir. Fırçasız doğru akım motorlarının voltaj vektörü manyetik sensörden gelen sinyalin altı durumu için şekil 2.4 te gösterilmiştir.

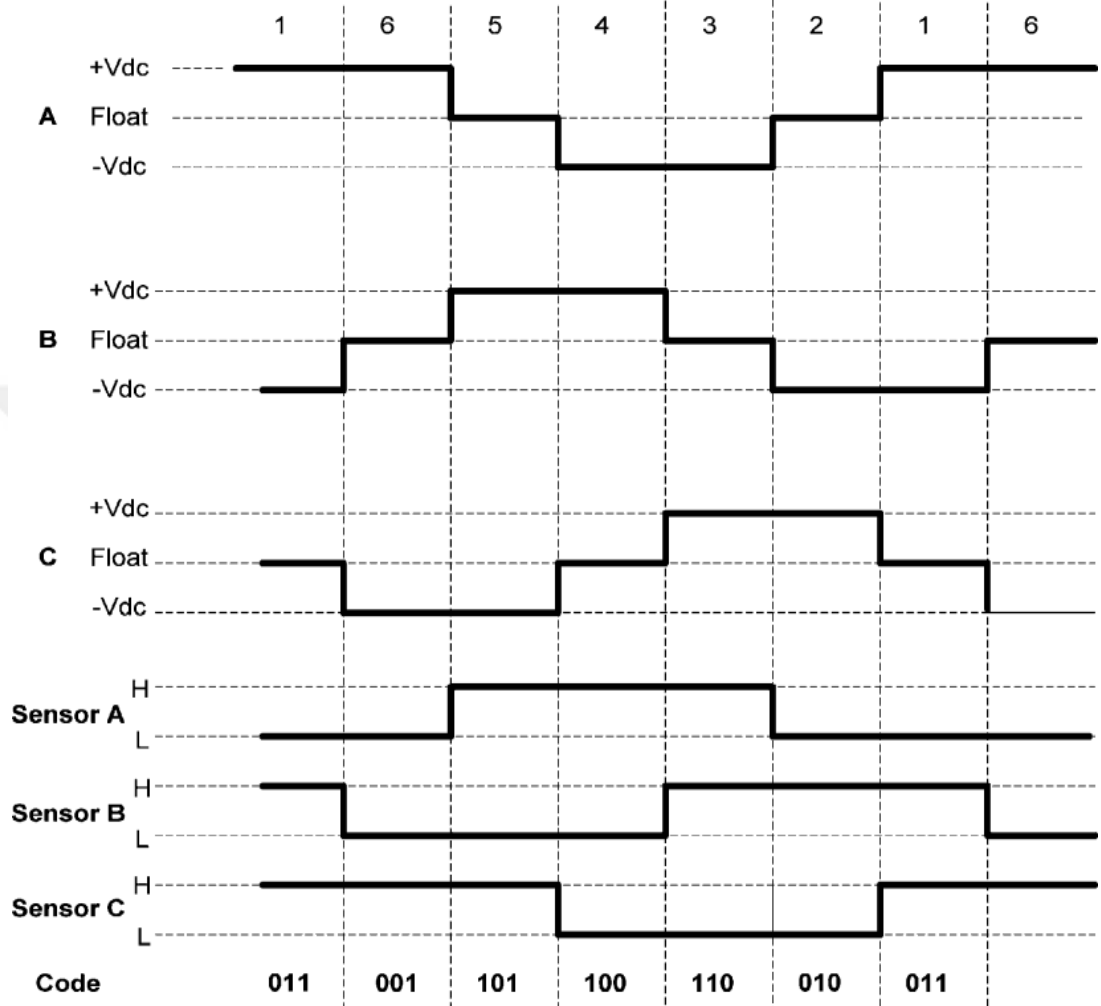


Şekil 2.4. Fırçasız Doğru Akım Motor Voltaj Vektörü Nian vd.(2014)

Açıya bağlı olarak sensor yerinin belirlenmesi ve doğru algoritmalar ile sürücünün tepki vermesi Motorun verimliliğinin artması sağlamaktadır. Motor fazlarına uygulanan gerilim değerlerine göre manyetik sensorün konumunun değiştirilmesi durumunda, sensörlerin aynı yarıçap konumunda devirinin arttığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile Motorun hızının ve gücünün arttığı tespit edilmiştir Nian vd.(2014)

Fırçasız DA motoru döndürmek için, stator sargılarına sırayla enerji verilmelidir. Doğru enerji vermek için gövde pozisyonunu bilmek gerekmektedir. Var olan sistemler için, gövdenin konumunu statora gömülü Hall efekt sensörleri kullanılarak algılanır. Hall efekt sensörlerini okurken, 1 ile 6 arasında değişen değerlerle şekil 2.5 deki kodlara göre kontrol edilir. Her kod değeri rotorun bulunduğu bir bölümü temsil eder. Bu nedenle, her kod değeri gövdenin dönmesi için hangi sargıların enerjilendirilmesi gerektiğine ilişkin bilgi verir. Hall effecti sensörleri için "0" ve "7" durumu geçersiz durumlar olarak gösterilmektedir. Sensör çıkışları ve istenen motor enerjilendirme voltajları

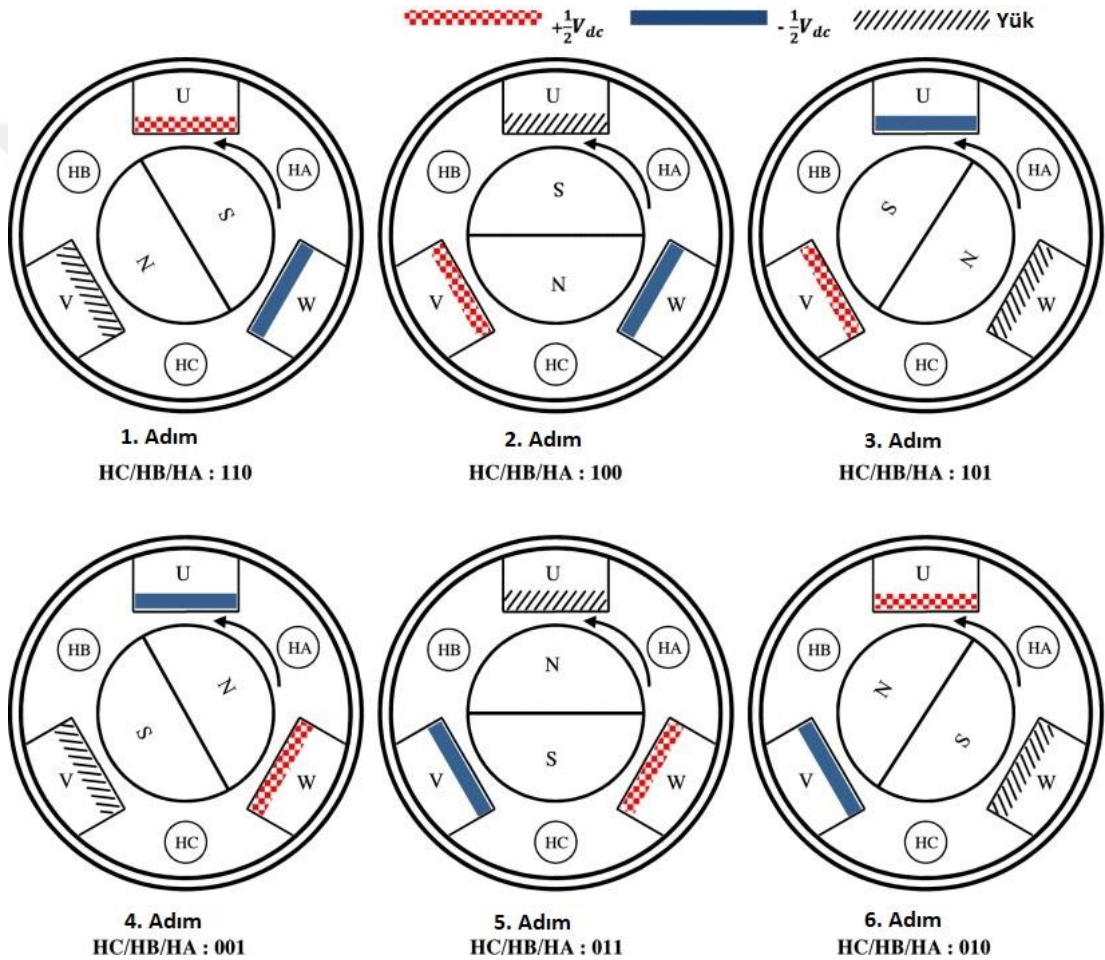
arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram Şekil 2.5'te gösterilmektedir Rodriguez vd. (2004).



Şekil 2.5. Sensör değerlerine göre motor sürücü çıkış

Fırçasız DA motorlar, yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, yüksek hız işletim aralığı, hız ve tork kontrolü gibi çeşitli avantajlara sahiptirler. Geleneksel fırçalı DA motorlar komütatör ve fırçaların mekanik temas gerçekleştirmektedir. Fırçasız DA motorlar mekanik temasın olmaması nedeniyle daha az elektromanyetik ve mekanik gürültü üretir bu sayede daha da dayanıklıdır. Bu avantajları nedeniyle ev aletleri, elektronik ürünler, araçlar, endüstriyel makineler ve tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Fırçalı DA motorlarda komütasyon mekanik ve otomatik olarak değiştirilirken, fırçasız DA

motorlarda bobin tarafından mıknatıs ve manyetik alan arasındaki eş zamanlı konum bilgilerini elde etmek için, hall sensörleri gibi manyetik sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Fırçasız DA motorlar hall sensöründen gelen sinyallere göre gövde pozisyonlarının altı aşamada gerçekleşir. Outrunner bir fırçasız DA motorun gövdesinin sürekli dönmesi için, statorun hall sensörü sinyallerine göre fırçasız DA motor sürücü tarafından fazlarını sırasıyla mıknatıslandırılmalıdır. Fırçasız DA motor şekil 2.6'da gösterildiği gibi altı farklı durumda mıknatıslanmaktadır (Lee ve Kong, 2018).



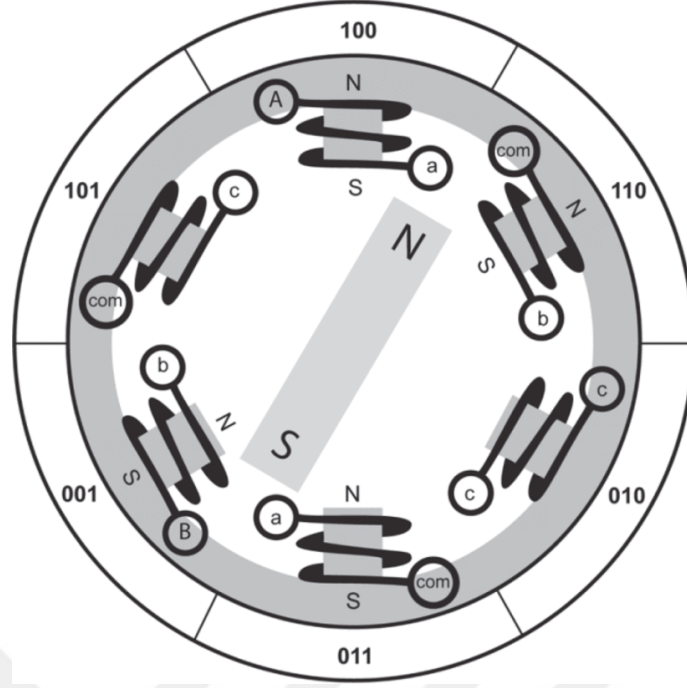
Şekil 2.6. Üç fazlı BLDA motorların sürülmesi için altı aşamalı iki fazlı uyarma yöntemi. HA, HB ve HC, üç konumda bulunan salon sensörlerini temsil eder.

Fırçasız DA motorlarda yüksek hızlara ulaşmasından dolayı enerji kaybı yaşanmaktadır. Bu kayıplar, statorun yapısından oluşan kayıplar, stator sargısındaki bakırların kayıpları, gövde de oluşan Eddy akımları, motorun ısınmasından kaynaklanan kayıplar, rulmanların sürtünmesinden kaynaklanan

kayıplar ve hava sürtünmesinde oluşan kayıplardır. Bu kayıpların hepsi hesaplandığında motorun verim yüzdesi düşmektedir. Bu kayıpların hepsi belirlenebilir kayıplardır. Fakat yüksek hızlara çıkıldığında müdahale ihtimali daha zayıftır Jang vd. (2007).

Fırçasız DA motorların kullanım alanları artması nedeniyle motorun kontrolü üzerinde de çalışmalar hızla devam etmektedir. Hassas hız ve konum gerektiren uygulamalarda motor kontrolü büyük önem taşımaktadır. Motor üzerine herhangi bir yük geldiğinde kontrolcü mikro denetleyicinin bu duruma zamanında cevap vermesi gerekmektedir. Bu nedenle Fırçasız DA motorlar için motor sürücülerinin yük değişimlerine karşı hızlı tepkiler vermesi ve dış etkenlerden etkilenmemesi, verimlerinin yüksek olması yani uzun ömürlü bir sistem tasarlanması gerekmektedir. Bu istenilen şekilde tasarlanan motor sürücülerin verimleri de yüksektir (Yıldız,2009).

Şekil 2.7’de fırçasız DA motorun çevresine yerleştirilmiş hall sensörleri göstermektedir. Şekil 2.6’ e göre gövdenin üst tarafı 0 konumundaki sensör çıkış sinyalinin kodunu göstermektedir. A noktasındaki sensörün başlangıç sensör lojik değeri şekilde verildiği gibidir. Bu lojik değerlerden geçişlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta C noktasından A noktasına geçiştir Joice vd. (2013).



Şekil 2.7. Hall sensörü lojik çıkış değerleri

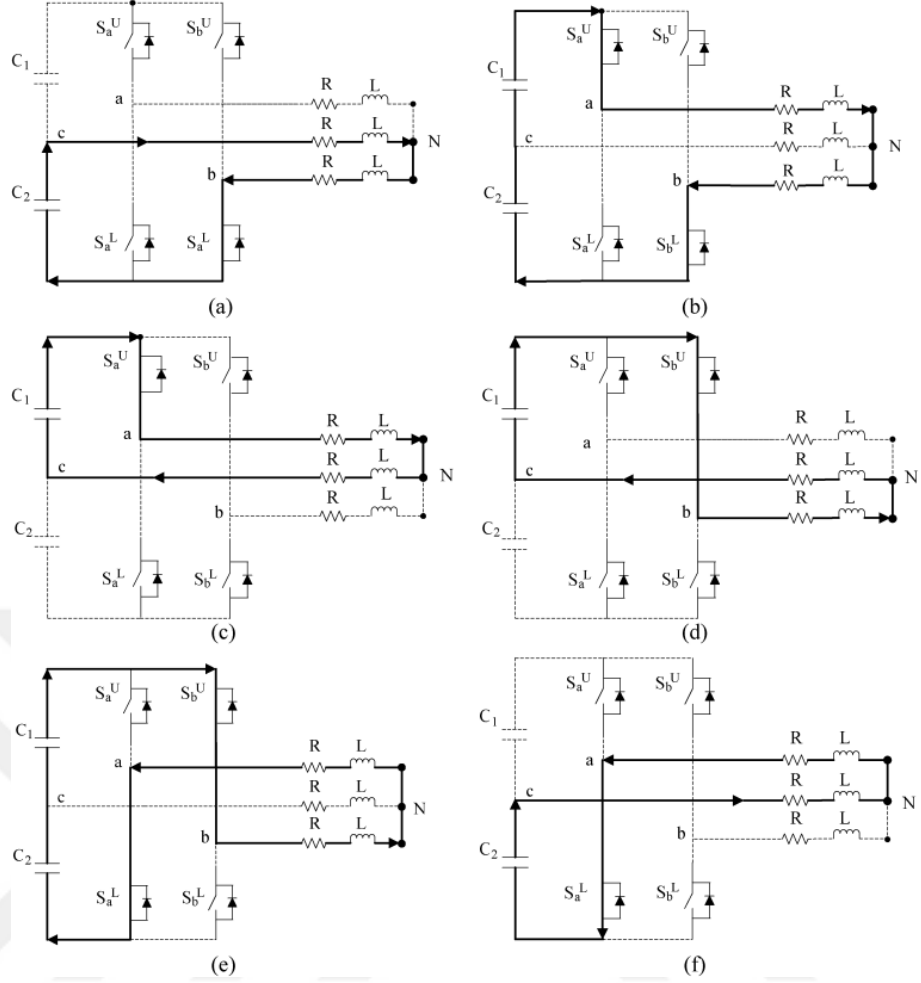
Motor sürücünün hızı ayarlaması PI Kontrolörü ile sağlanmaktadır. Motor sürücünden oransal kazancı arttırılarak, küçük hız düzenleme hataları için daha hızlı tepki verecek şekilde kontrol hassasiyeti arttırılır. Motor sürücü tarafından verilen referans akımın daha hızlı tepkisi ve referans hızın daha iyi bir başlangıç izlemesine olanak tanır. Motor sürücünde artan bu hassasiyet aynı zamanda hız aşımını da azaltır. İstenilen devir ve hıza ulaşıldığında, manyetik akım daha hızlı azalır. İntegral kazancının arttırılması motor devrinin referans hızın rampa fonksiyonuna yakalanmasını örnekleme süreleri boyunca çok daha hızlı bir hale getirecektir. Bir sinyal rampa fonksiyonundan sonra düzenlendiğinde ortaya çıkan küçük hızlı hata integral terimlerinde daha hızlı tepki verecektir. Motor sürücü, rampa fonksiyonunu hızlı bir şekilde izlerken biraz daha yüksek hızlanma torku üreterek, hız hatası integralini çok daha hızlı bir şekilde azaltmak için tepki verecektir. Oransal kazancın ve entegre kazanımlarının çok yüksek bir şekilde artması istikrarsızlığa neden olabilir. Ayarlama işlemi deneme yanılma yöntemiyle ve oransal sabite göre yapılır(K_p) ve İntegral Sabiti (K_i) sırasıyla 0.1 ve 0.03'tür (Joice vd.,2013).

Fırçasız DA motorun çalışmasında sargılara sırasıyla tablo 2.4'deki lojik gerilimler uygulandığında motor hareket edecektir. Dönme sırasında konum bilgisi almanın diğer bir yöntemi ise reed röle kullanmaktır. Reed röle manyetik alan ile karşılaştığında kontakları yer değiştirir. Motor sürücü konum ve hız bilgisi aldıktan sonra uygun sinyaller motora gönderir (Selek ve Berkant, 2014).

Tablo 2.4. Motor sargılarına verilecek lojik sinyal sırası

		Lojik seviyeler					
Sargı	A	1	1	1	0	0	0
Sargı	B	1	0	0	0	1	1
Sargı	C	0	0	1	1	1	0

Şekil 2.8'da gösterildiği gibi mosfetin kontaklarını AÇIK/KAPALI olma durumları gösterilmiştir. Aynı pinlerde hem yüksek hemde düşük anahtarlama durumları için KAPALI durumu gösterilir. "1" durumunda yüksek anahtarlama için AÇIK durumu, "0" durumunda düşük anahtarlama için AÇIK durumundadır (Lin vd., 2008).



Şekil 2.8. PWM modlarına göre açılan MOSFET'ler

Asenkron motor kontrolüne alternatif olarak BLDA motor kontrolünde moment yöntemi kullanmıştır. Moment kontrol yönteminde hem pozisyon hem de hız kontrolü yapmıştır. Hız kontrolünde PI hata denetim kontrolü uygulamıştır. Pozisyon kontrolünde ise değişken yapı yaklaşım modelini kullanmıştır (Low,1992).

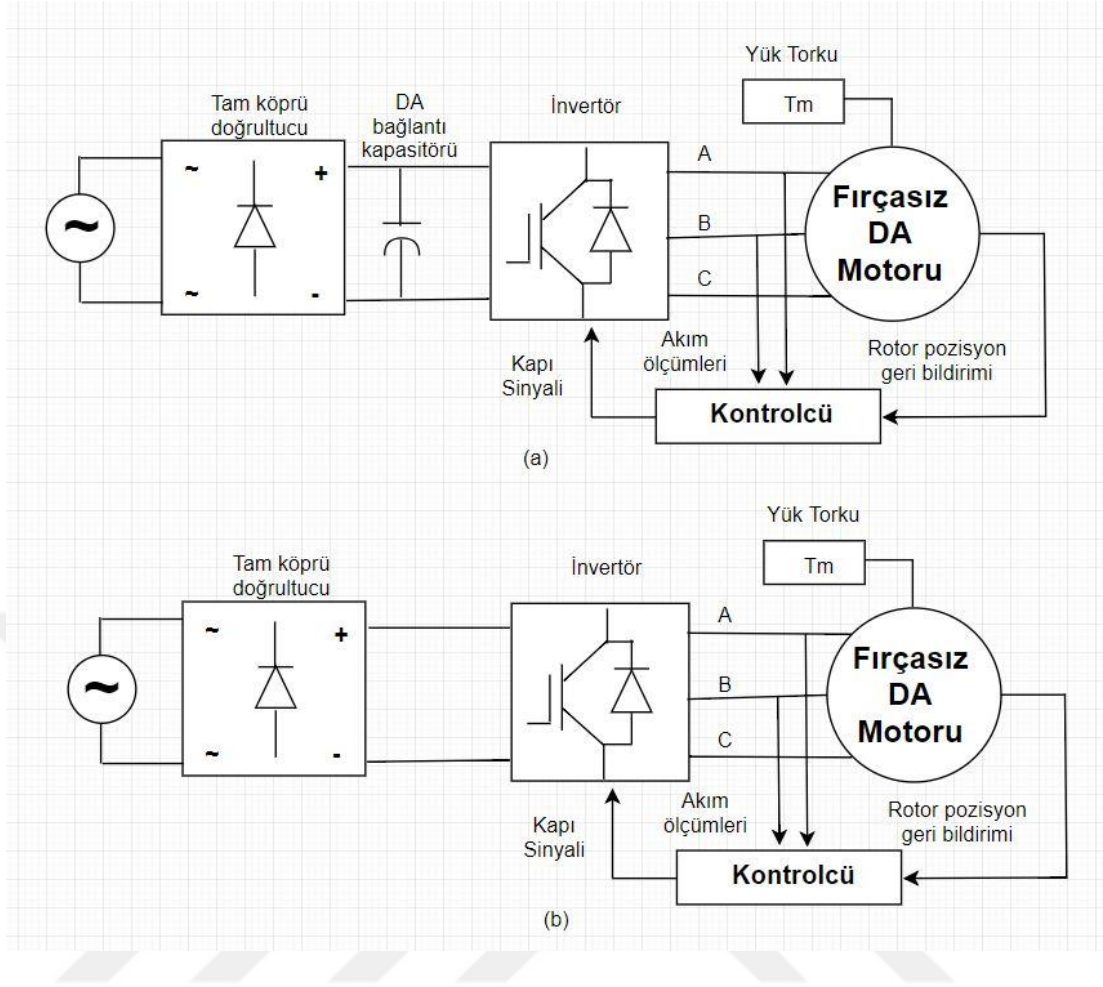
Fırçasız DA motor kontrolünde birçok yöntem kullanılmıştır. Genel olarak PID kontrol sistemi tercih edilmektedir. Bu kontrol uygulamasının servo motor ve DA motor sistemlerinde tepki süresi hızlıdır. Fakat performans gerektiren veya yük altında kullanılan motorlarda düşük performans ile çalışmaktadır. Yüksek performans gerektiren uygulamalarda PID kontrol sistemi yerine, uyarlamalı kontrol yöntemlerinden değişken yapı, model referans, kayma modu, yapay

sinir ağırları veya bulanık mantık kontrol yöntemleri tercih edilmektedir (Ko vd. 1994 ; Demirbaş ve Bal 1997).

Subramanium vd. (2015) Motor sürücü devresi motordan gelen hataları kontrol ederek minimum hataya indirecek seviyede tasarlanmıştır. Hata kontrolü PID hata kontrolü ile sağlanmaktadır. Türev(D) kontrolü, açık döngü transfer fonksiyonuna geçici cevap atar. Integral(I) kontrolcüsü, kararlı durum hatasını (μp) yı sıfıra çekmeye çalışır. Oransal(P) kontrolcü, döngüyü kontrol etmek için hata oranının belli bir kısmını kullanır.

Lai vd. (2007) Fırçasız DA motorların kontrolünde PWM ve PAM olmak üzere iki çeşit kontrol yöntemi vardır. PWM kontrolünde DA gerilim sabit, motorun hızına ve motorun üzerine düşen yüke göre verimi kontrol eder. PAM kontrolünde ise 120° komütasyon ile verim kontrol edilir. PWM sinyali motorun hızı ile belirlenen referans hataya göre ayarlanır. PAM sinyali uygulandığında mosfetlerin anahtarlama kayıpları daha azdır.

Fırçasız motor sürücülerde elektrolitik kondansatörün büyüklüğü, ağırlığı, kullanım ömrü, çalışma sıcaklığından motor sürücünün çalışmasını ciddi şekilde etkilenir. Kondansatörün dâhil edilmesi ısıtma, havalandırma ve klima uygulamalarında sıcak veya soğuk ortamlarda motor sürücüsünün güvenilirliğini düşürür. Ayrıca, elektrolitik kapasitör teknolojisi karardır. Fiyat yalnızca malzemelerin maliyetine bağlıdır. Bu nedenle, bir elektrolitik kondansatörün maliyeti, işlemciler, güç elektroniği anahtarları(MOSFET) ve sürücü devreleriyle ilgili maliyetlere kıyasla daha statiktir. Örneğin, DA bağlantı kapasitörünün maliyeti, Wellington Drive Technologies tarafından yapılan BLDA motor sürücülerinin toplam maliyetinin yaklaşık% 5 -% 15'idir. Buna ek olarak, DA bağlantı kapasitörünün olmaması, baskılı devre kartı (PCB) alanında ve muhafazanın hacminde %4 ile %15 oranında bir azalmaktadır. Bileşenlerin maliyetini düşürmek için Şekil 2.9 (a)'da Tipik fırçasız motor sürücü Şekil 2.9 (b) 'de Kondansatörü olmayan fırçasız motor sürücü blok şeması gösterilmiştir (Ransara ve Madawala, 2015).



Şekil 2.9.(a) Tipik fırçasız motor sürücü (b) Kondansatörü olmayan fırçasız motor sürücü

Son yıllarda, petrol fiyatının bir varilin 100 ABD doları seviyelerine çıkmasıyla birlikte, Hibritli Elektrikli Araçlar(HEV) yüksek petrol fiyat ekonomisinin artışı kullanarak otomobil pazarında cazip hale gelmeye başladılar. Rekabet gücünü artırmak nedeniyle, HEV'ler için ortaya çıkan enerji tasarruflu cihazların geliştirilmesinde acil bir ihtiyaç ortaya çıkardı. HEV'ler, elektrik mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, makine mühendisliği ve kimya mühendisliğini kapsayan çok disiplinli teknolojileri içeriyor olmasına rağmen, HEV'lerin enerji verimliliğini yeni bir yüksekliğe itebilecek üç önemli elektrik teknolojisi geliştirilecek:

1. Hem atık ısı geri kazanımını hem de sıcaklık kontrolünü içeren ve her türlü HEV, özellikle mikro hibritler için enerji açısından verimli olan termoelektrik (TE) sistemler;

2. Hafif melezlerin enerji verimliliğini artırmak için özellikle gereklidir ve yararlı olan ISG sistemleri;
3. Elektronik sürekli değişken transmisyon (E-CVT) tahrik sistemleri - geleneksel mekanik CVT sistemlerinin yerini alabilir ve yüksek enerji verimliliği isteyen tam hibritler sistemlerde kullanıldı. (Chau ve Chan, 2007).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Fırçasız DA Motorlar

Fırçasız DA Motorlar; komütasyon işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren DA motorlarda rotordaki sarımlara enerji iletimi fırça-kollektör yapısı ile iletilmektedir. Parçalı bir yapıda olan kollektör düzeneği sayesinde, rotor sarımlarından geçen akımın yönü motor dönerken kendiliğinden değişir. Bu sistemin kıvılcım oluşturma, bakım gerektirme ve fırçalarda aşınma gibi problemleri meydana getirmektedir. Fırçasız DA motorlarında fırça-kollektör düzeneğinin yani komütasyon görevini elektronik bir denetleyici, motor sürücüler üstlenir. Komütasyon; akımın yöndeğiştirmesi olayıdır. Motor sürücülerde, yüksek akımı anahtarlama görevini yürüten yarıiletken devre elemanları ve anahtarlama ile ilgili zamanlamayı sağlayan mikro denetleyici bulunur. Motorun dönüşünde aksama olmaması için denetleyicinin uygun bir hızda gövdenin(rotorun) konumunu takip etmesi gerekmektedir. Bu işlem, rotor pozisyonunun bilinmesini gerektirir. Sensörlü fırçasız DA motorların birçoğunda rotor pozisyonu için Hall effect sensörleri kullanılır(Bayraktar ve Balık, 2015).

Fırçasız DA motorlar;

- Sargıların bulunduğu stator.
- Mıknatısların yerleştiği rotor.
- Rotor konumu için sabitlenen hall efect sensörler
- Dönmesi için yerleştirilen rulmanlar.
- Motor kontrolü için kullanılan sürücü devreleri.

3.2. Fırçasız DA Motorların Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları;

- Verimleri yüksektir,
- Fırçasız yapıları sebebi ile sürtünme yoktur, ark yapmaz, karbon tozu üretmez,
- Sessiz çalışırlar,

- Çok daha uzun ömürlüdürler,
- Bakıma ihtiyaç duymazlar.
- Çok yüksek devrilerde çalışır,
- Boyutları diğer motorlara göre daha küçük, devir, tork ve momenti daha yüksektir,
- Diğer motorlara göre daha az ısınırlar.

Dezavantajları;

- Karışık bir kontrol devresi vardır,
- Konum bilgisine ihtiyaç duyarlar,
- Maliyetleri yüksektir.

3.3. Fırçasız DA Motor Çeşitleri

Fırçasız DA motorlar iç rotorlu(in runner), dış rotorlu(outrunner) ve disk tipi fırçasız DA motorlar olmak üzere üç şekilde tasarlanabilmektedir.

3.3.1. İç rotorlu (inrunner) fırçasız DA motorlar

İnrunner fırçasız DA motorların yapısı senkron ve asenkron motorların yapısıyla hemen hemen aynıdır. Stator dış tarftadır ve sabittir. Motora yerleştirecek olan mıknatıslar rotoru çevreyecek şekilde rotorun üzerine yapıştirılmaktadır.

Outrunner motorlara göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır;

- Yüksek hızlara çıktığında rotorun parçalanmaması için mıknatıslar çok sıkı bir şekilde sabitlenmelidir. Mıknatısların kaymaması için rotorun çevresi yüksek dirençli metaller ile çevrelenir. Bu durum enerji kaybına sebep olur ve motor verimini düşürmektedir.
- Statorun üretimi ve sarımı oldukça zordur. Bu durum işçiliği ve maliyetin artmasına neden olmaktadır.
- Stator sargıları dış yüzeyde olduğundan hava ile teması kolaylaşacaktır. Bu durum motorun daha az ısınmasını sağlamaktadır (Yedamale ve Padmaraja, 2003).

3.3.2. Dış rotorlu (outrunner) fırçasız DA motorlar

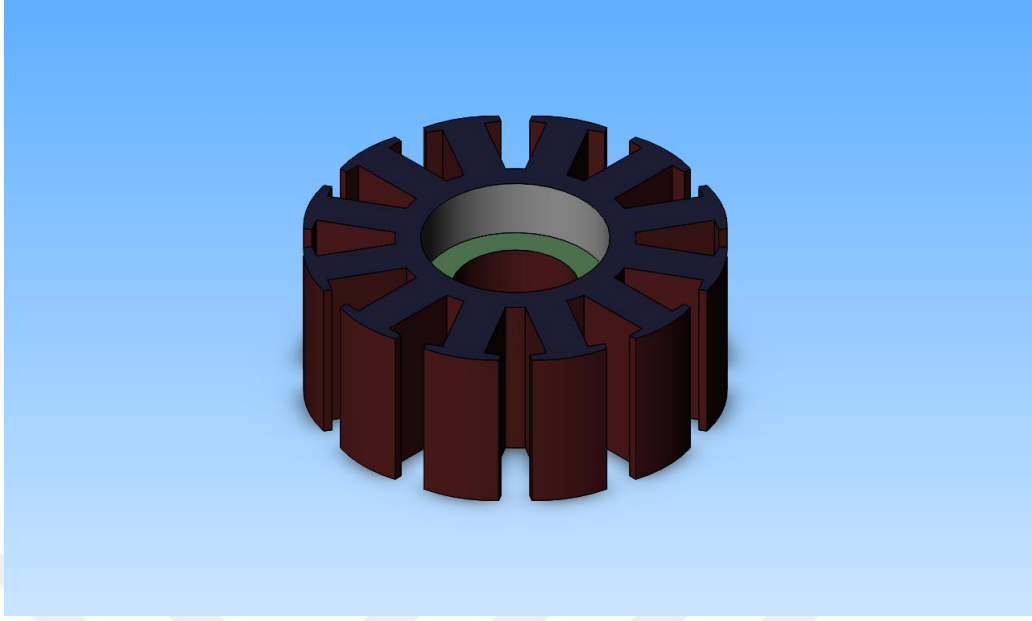
Outrunner motorlarda, mıknatıslar statoru çevreleyen rotorun üzerine yerleştirilir. Fırçalı DA motor ile yapıları aynıdır sadece fırçasız DA motorlarda fırça – kollektör yapısı yoktur. Stator kolları dışa dönük olduğundan sargı işlemi daha da kolay yapılmakta ve bu durum üretimi kolaylaştırmaktadır. Mıknatısların rotor içine kolay bir şekilde yerleştirilmesi motor üretimini kolaylaştırır. Aynı zamanda stator çevresinde oluşacak manyetik alanın etkisini daha çok arttıracaktır. Manyetik alanın fazla olması nedeniyle daha az mıknatıs ile istenilen manyetik alan elde edilebilecektir (Yılmaz, 2015).

3.3.3. Disk tipi fırçasız DA motorlar

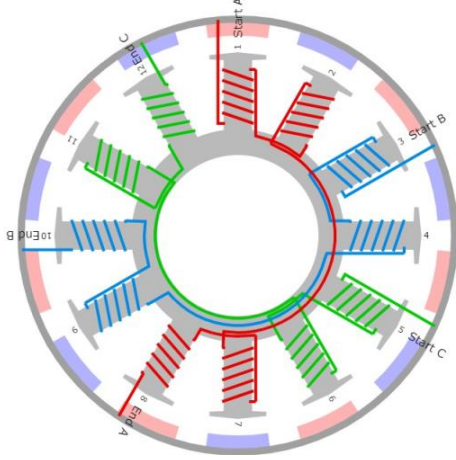
Bu tip fırçasız DA motorların rotor kısmı çelikten üretilmektedir. Mıknatıslar da bu çelik rotorun üzerine yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslara karşı stator sargıları uygun bir şekilde sarılmaktadır. Bu sargılar pcb devre şeklinde de yapılmaktadır. Düşük hız ve tork uygulamalarında hassas çıkışlar elde edilebilmektedir. Motor devri 1000 devir/dakika'in üzerine çıktığında çelikten yapılan rotor ve stator ısınmaktadır. Bu motorları yüksek devirlerde kullanıldığında ek soğutucular kullanılmaktadır. Bu durum maliyetin artmasına neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak disk fırçasız DA motorlar düşük devir ve hızlarda tercih edilmektedir (Yılmaz, 2015).

3.4. Fırçasız DA Motor Statoru

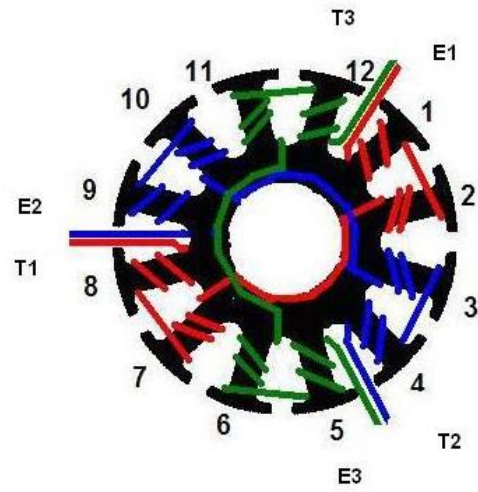
Fırçasız DA motorların statorları AC motorların statorlarına benzemektedir. Stator genel olarak silisyumlu saçlardan imal edilmektedir. Fırçasız DA motorların statorları yıldız(Y) ve üçgen(Δ) bağlantı olacak şekilde sarılmaktadır. Bunlar arasındaki fark; yıldız bağlantı düşük devirlerde yüksek tork sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Delta sarım, düşük devirlerde düşük tork sağlamaktadır. Delta sargılı motorlar, yıldız sargılı motorlara göre 1.73 kaç daha fazla döner ve daha fazla akım çekmektedir. Yani bir yıldız sargıdan delta sargı gücünü elde etmek için 1.73 kat daha fazla sargı yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.1. 12 kollu stator



Şekil 3.2. Yıldız sarım



Şekil 3.3. Delta sarım

3.5. Fırçasız DA Motor Rotoru (Gövde)

Fırçasız DA motorların rotorları genel olarak mıknatısların yerleştirildiği dış gövde kısmıdır. Motorun statoruna bağlı olarak rotorun kutup sayısı belirlenmektedir. Kutup sayıları arttıkça motorun tork seviyeside artmaktadır.

Torkun fazla olması devirin ve hızın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 3.4' de mıknatısların yerleşim yerleri belirli olan rotor çizilmiştir.



Şekil 3.4. Daimi mıknatıslı rotor

3.6. Fırçasız DA Motorlarda Manyetik Alan Ve Manyetik Akı Hesaplamaları

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (3.1)$$

Burada, H manyetik alan şiddeti, N sarım sayısı, I akım şiddeti, l stator kol uzunluğu

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ veya } B = \mu_0 (H + M) \quad (3.2)$$

Burada, B manyetik akı yoğunluğu, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ manyetik akı geçirgenliği, M silisyumlu sacın manyetik geçirgenliği.

3.7. Fırçasız DA Motorlarda Harcadığı Güç Ve Verdiği Güç Denklemleri

$$P_{\text{harcanan}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi}{1000} \quad (3.3)$$

Burada, P_{harcanan} motor üzerinde harcanan güç, V gerilim, I akım, $\cos\phi$ güç faktörüdür. Güç faktörü 1 e yaklaştıkça en ideal akımda çalışma aralığındadır.

$$P_{\text{veren}} = \frac{\sqrt{3} * V * I * \eta * \cos\phi}{1000} \quad (3.4)$$

Burada, P_{veren} motorun verdiği güç, η motorun verimidir.

3.8. Fırçasız DA Motorlarda Kullanılan Mıknatıslar

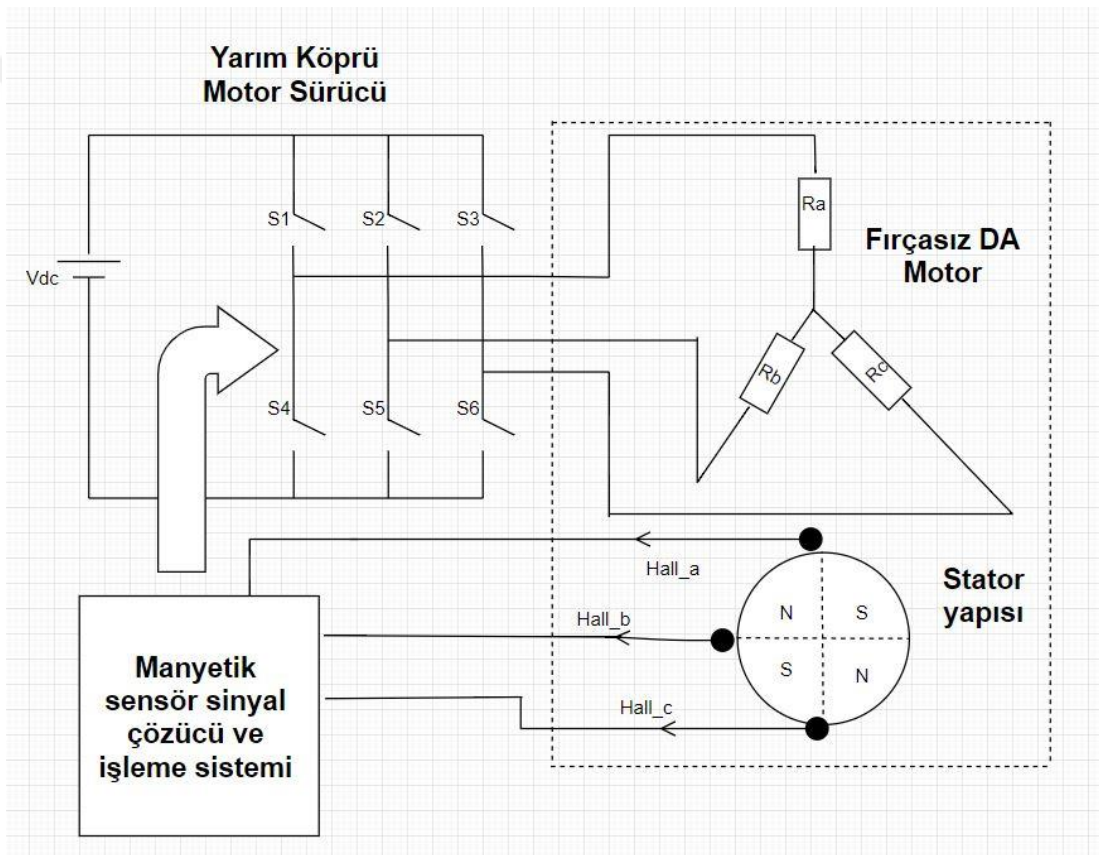
Kalıcı Mıknatıslar (PM'ler), en son teknoloji ürünü çekiş motorlarında temel unsurlardır. Disprosyum (Dy) ve neodyum(Nd) gibi nadir toprak elementlerinin yakın zamandaki dalgalanmaları elektrikli makineler için bir endişe oluşturmaktaydı. Bu tür mıknatıslar hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) gibi maliyet açısından hassas uygulamalarda kullanılmaktadır. PM'lerde kullanılan ağır nadir toprak elementi olan Dy, mıknatısların parazitliğini artırır ve yüksek sıcaklıklarda manyetizmayı önlemeye yardımcı olur, ancak aynı zamanda NdFeB mıknatıslarının maliyetine önemli katkıda bulunur. Sonuç olarak, son mıknatıs materyali geliştirmesinde önemli bir odaklanma alanı, yüksek mıknatıs zorlamasını korurken NdFeB mıknatıslarından Dy'nin yok edilmesidir. Bu sınıfta iki çeşit mıknatıs vardır;

- 1) Yüksek rejansiyometre ve düşük çekme direncine sahip, serbest doymamış NdFeB mıknatıslar
- 2) Düşük rejansiyometre ve daha yüksek koersiviteye sahip Dy-free NdFeB mıknatısları.

Her iki tür mıknatıs da disprosyum içermez ve benzer enerji ürünlerine sahiptir. Ferrit mıknatıslar, kolaylıkla temin edilebilen mıknatıs seçenekleridir. Ferrit mıknatıslar çeşitli uygulamalarda kullanılmasına rağmen nispeten düşük enerjili bir üründür ve özellikle düşük sıcaklıklarda demanyetizma eğilimi göstermektedirler Kim vd. (2013).

3.9. Fırçasız DA Motorlarda Kullanılan Hall Effect Sensörler

Fırçasız DA motorun elektronik olarak yön değiştirmesi, sabit mıknatıslı rotor pozisyon konumunun doğru algılanmasına bağlıdır. Fırçasız DA motorlarda rotor konum algılaması iki farklı yöntemle yapılmaktadır. Birinci yöntemde, rotor pozisyonunu saptamak için sensörler kullanılmaktadır. İkinci yöntem ise, rotor pozisyonunun sensörsüz tekniklerle tespit etme yöntemidir. Optik enkoderler, yüksek çözünürlüklü uygulamalarda, Hall Effect sensörler ise düşük çözünürlüklü uygulamalar için kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. Hall Effect sensör yerleşimi ve sürücü sistemi

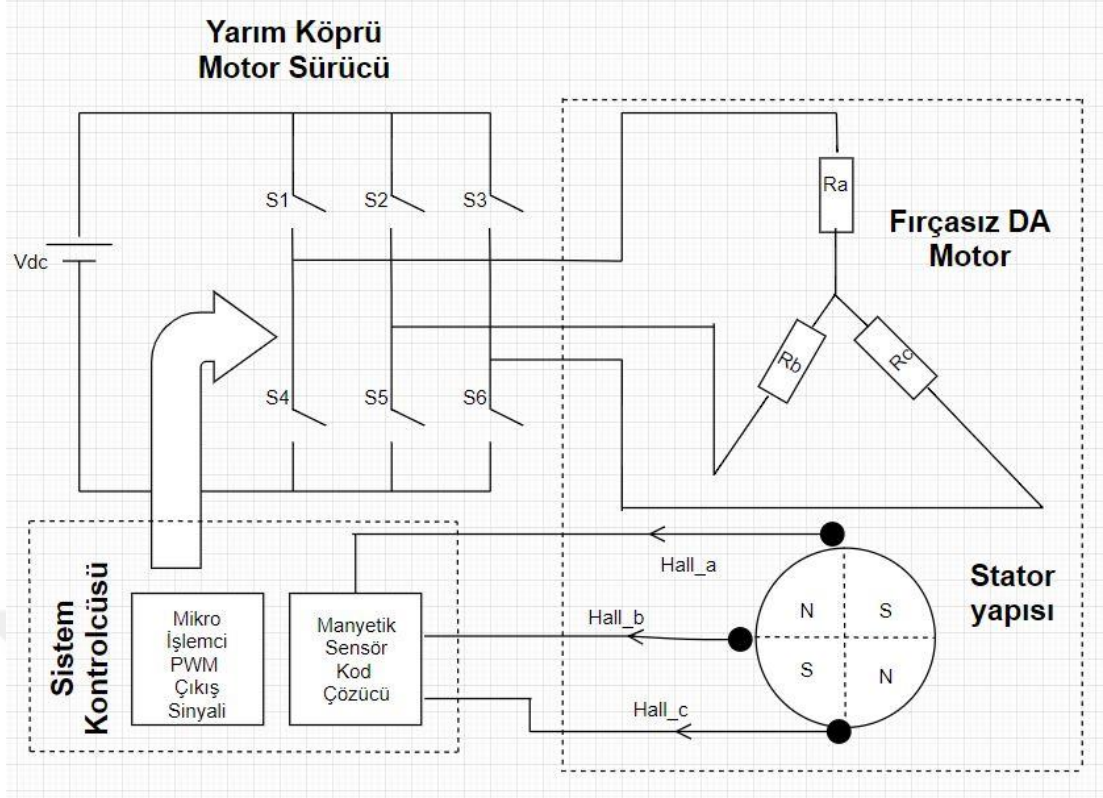
Şekil 3.5'de Hall Effect sensörleri, rotor konumunu algılamak için 120 derece elektrik faz farkıyla motorun statoruna monte edilmektedir. Her bir sensörün çıkışı rotor pozisyonuna göre lojik olarak 1 - 0 değerlerini vermektedir. Elde edilen Hall Effect sinyalleri, fırçasız DA motorun üç fazlı motor sürücüyü anahtarlanması için motordan aldığı sinyalleri göndermektedir. Gelen sinyallere

göre motor sürücü algoritması uygun olan kanalları açarak motorun hareket etmesini sağlamaktadır (Tashakori ve Ektesabi, 2013).

3.10. Fırçasız DA Motorun Çalışması

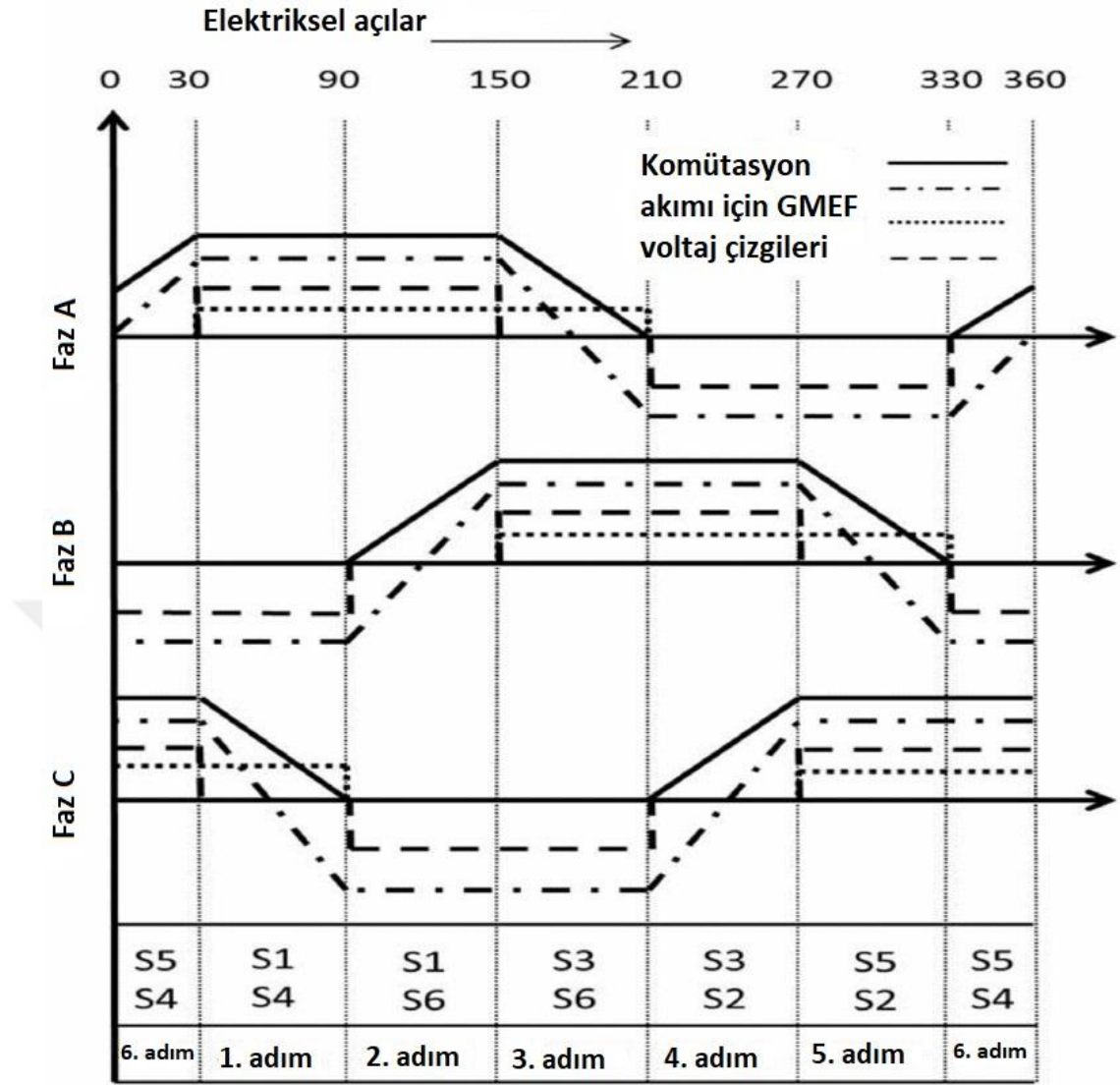
Fırçasız DA motorlar kullanıldığı uygulamalarda, sistemin genel performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Genel sistemlerin güvenilir kontrolü ve kullanılması esasen seçilen motor tipine ve kontrol tetiğine bağlıdır. Motor sürücüsü seçimi, uygulama gereksinimlerine değişiklik göstermektedir. Fırçasız DA motorlar, elektronik komütasyona sahip yeni bir DA motor olarak düşünülebilir. 1970'lerden beri endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Fırçasız DA motorları yüksek verimlilik ve hassas kontrol edilebilirlik özelliklerinden dolayı birçok uygulamada ilk sırada tercih edilmektedir (Lee ve Ehsani, 2001).

Fırçasız DA motorun komütasyonunu elektronik olarak yer değiştirmesi sabit mıknatıslı rotor konumuna dayanmaktadır. Rotorun pozisyonu ya sabit hall effect sensörleri aracılığıyla ya da geri Elektro Motor Kuvveti (EMF) tespiti ile elde edilmektedir. Şekil 3.6'da ki gibi blok diyagramda gösterilen hall effect sensörleri, rotor pozisyonuna göre sinyal çıkışları vermektedir. Fırçasız DA motorun bakımının azaltılması, ekstra kablolama olmaması, sıcaklık hassasiyetinin daha fazla olması, motor konstrüksiyonunun maliyetinin azlığı ve karmaşıklığı sensörsüz kontrol algoritmalarının ana avantajlarıdır. Bununla birlikte, kontrol algoritmalarının karmaşıklığı, başlatma ve düşük hızlı komütasyon yapma güçlükleri, sensörsüz fırçasız DA motor sürücülerin dezavantajlarıdır (Tashakori vd. 2015).



Şekil 3.6. Üç fazlı fırçasız DA motorun şematik diyagramı

Fırçasız DA motor komütasyonu üç tane sabit dahili Hall Effect sensörü ile belirlenmektedir. Hall Effect sensörleri, 120 derecelik elektriksel faz farkı ile motorun dönmeyen ucuna monte edilir. Her sensörün sinyali, fırçasız DA motorun bir tur dönüşü sırasında rotor pozisyonuna göre 180 derece yüksektir. Fırçasız DA motorunun geçiş yerlerini, Hall Effect sinyallerini çözerek belirlenmektedir. Altı aşamalı değiştirme tekniği, fırçasız DA motorun üç fazlı motor sürücününün altı adet MOSFET sırasıyla değiştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Belirtilen bu yöntemle, her bir sinyal çıkışlarında MOSFET'ler üç fazdan iki tanesini enerjilendirirken tek faz pasif konumda kalmaktadır. Anahtarlama dizilerinin ters çevrilmesi motorun dönüş yönünü değiştirir. Motorun hızı, Hall Effect sensörü sinyallerinin genişliği ile doğru orantılıdır. İdeal hat gerilimleri, geri EMF gerilimleri, komütasyon sinyalleri, faz akımları ve üç fazlı fırçasız DA motorun altı kademeli anahtarlama şekli 3.7.'de gösterilmiştir.



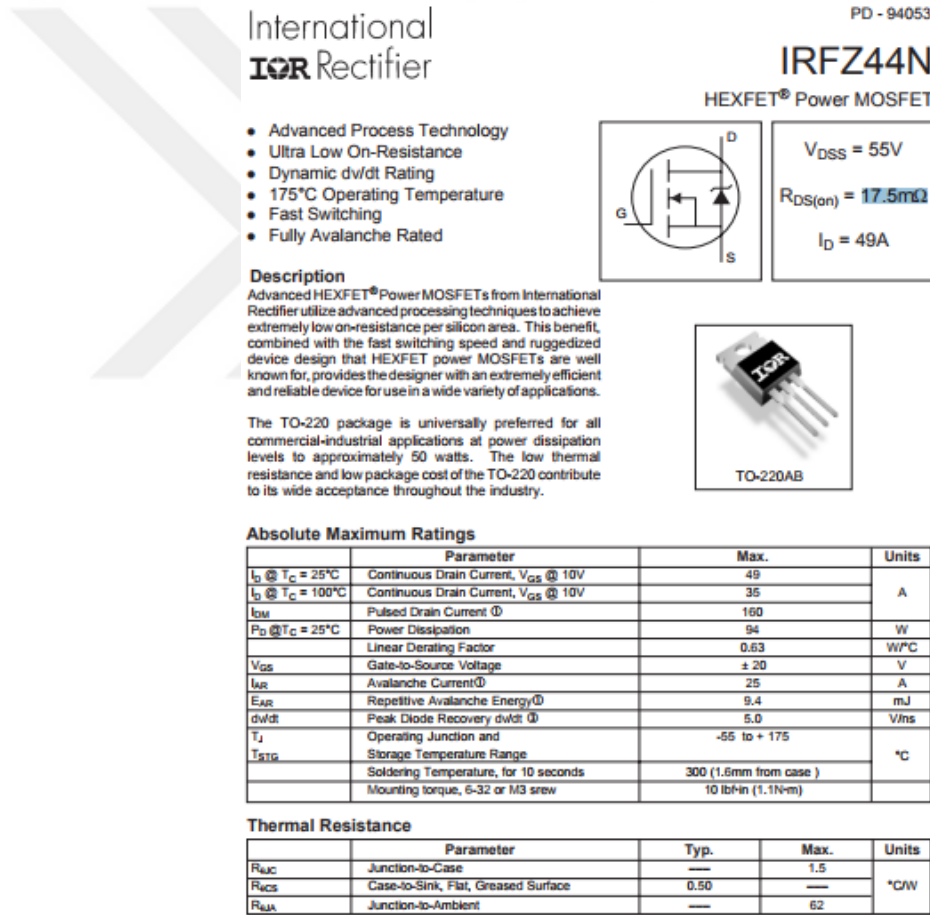
Şekil 3.7.Üç fazlı fırçasız DA motor sinyalleri ve anahtarlama örüntüsü

3.11. Fırçasız Motor Sürücülerde Kullanılan Güç Transistörleri

Fırçasız DA motor sürücülerde genellikle güç transistörleri olarak MOSFET ya da IGBT kullanılmaktadır. Yüksek gerilim ve akımda IGBT tercih edilir. Nominal gerilimde ise MOSFET tercih edilmektedir. Normal BJT transistörler akım ile anahtarlama yapılırken, MOSFET ve IGBT ise gerilim ile anahtarlama yapılmaktadır. Bundan dolayı gate akımı nanoamper(nA) seviyelerindedir. Vgs gerilimi yükseldikçe MOSFETin Rds(on) iç direnci düşer ve bu duruma "lineer bölge" denilmektedir. Vgs 10V civarına yaklaşıncaya MOSFET satürasyon bölgesine ulaşmaktadır. Yani Rds(on) minimum değerine düşmektedir. IRFZ44 için bu değer 17.5 mΩ dur. Bundan sonra Vgs gerilimi artsa da bu değer

değişmemektedir. Vgs gerilimi en fazla 20 V olmaktadır ve bu gerilimden sonra MOSFET bozulmaya başlamaktadır.

Güç transistörlerin tercih edilme sebeplerinde bir tanesi de yüksek hızlı anahtarlama yapmalarına bağlıdır. MOSFET'i tetiklemek için Şekil 3.8'de ki dahasheet de belirtildiği değerleri gate ucuna uygulayarak anahtarlama yapılabilmektedir. MOSFET ler çok hızlı anahtarlama yaptığından hızlı bir şekilde doldurup boşaltmak için MOSFET sürücü entegreleri kullanılmaktadır. Bu durum MOSFET ler için dezavantaj olarak görülmektedir. MOSFET in source gerilimi yine MOSFET in datasheet değerine göre değişmektedir.



Şekil 3.8. IRFZ44N datasheet

İç direnci 17.5 mΩ olan IRFZ44N MOSFET kendi içinde belli bir gerilim ve güç harcamaktadır. Aşağıdaki denklemlerde mosfetin içinde harcanan gerilim ve güç hesaplamaları gösterilmektedir.

$$V_{ds} = R_{DS(on)} * I_D \quad (3.5)$$

Burada, V_{ds} Drain Source gerilimi, $R_{DS(on)}$ MOSFET'in iç direnci, I_D Drain pininden akan akım.

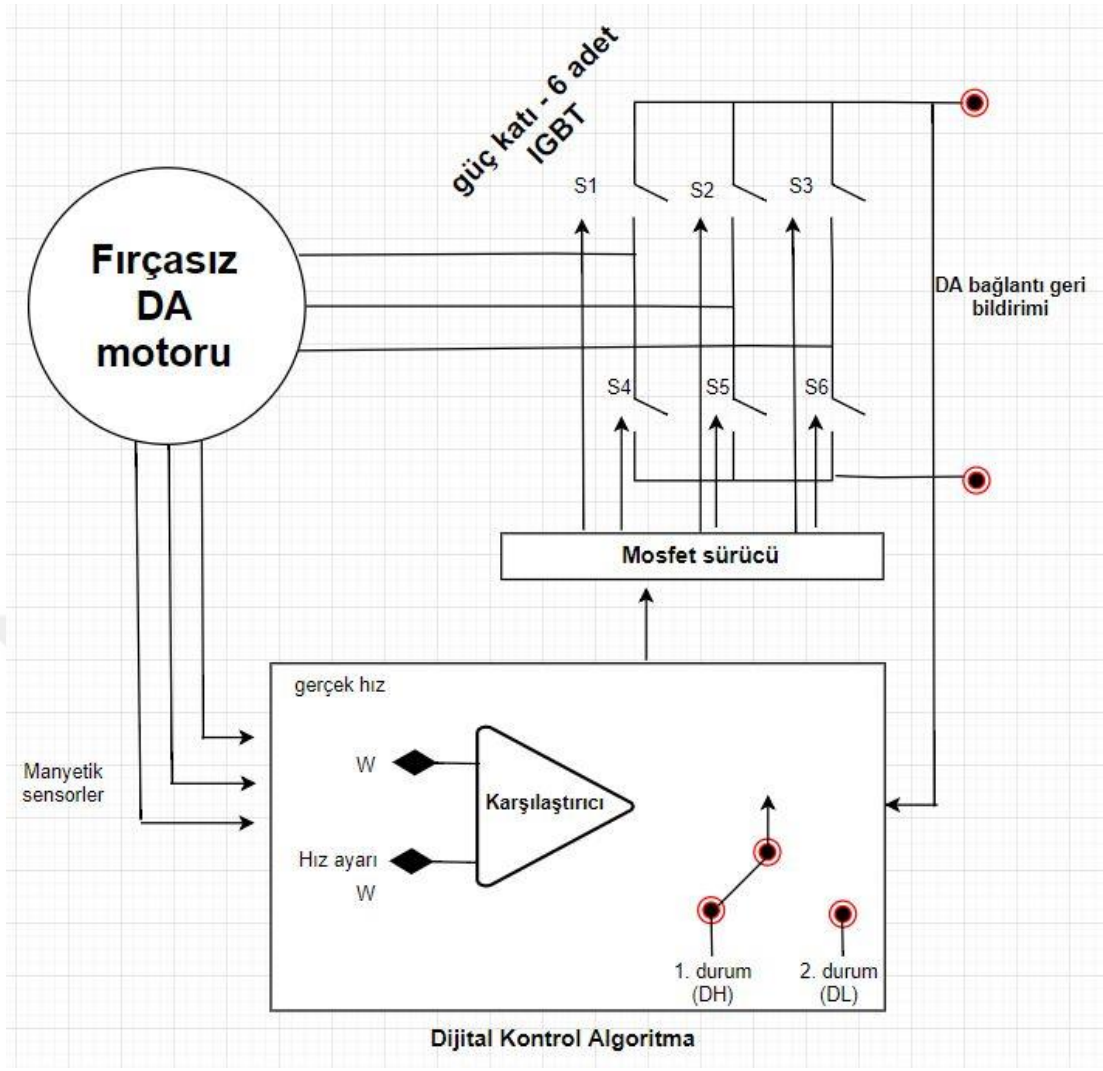
$$P_D = V_{ds} * I_D \quad (3.6)$$

Burada, P_D MOSFET'in içerisinde harcanan güçtür.

3.12. Fırçasız DA Motor Sürücülerde PWM

Fırçasız DA motorun hızı, fazlarına uygulanan voltajla doğru orantılıdır. Bu nedenle, bir Fırçasız DA motorun hızını ayarlamayı sağlamak için, genellikle değişken voltajlı bir DA beslemesi gerekir. Üç fazlı bir sürücü devresi kullanılıyorsa, bu üç fazdan sadece iki faz aktiftir. Bu nedenle dijital PWM sinyali, bir fırçasız DA motorun uçlarına uygulanan değişken faz gerilimleri üreterek kullanılan güç transistörlerini kontrol etmektedir Milivojevic vd. (2012).

Dijital PWM kontrol stratejisinin ana prensibi Şekil 3.9. 'da gösterilmiştir. Bu kontrol stratejisi fırçasız DA motor dijital bir sistem olarak ele alınmaktadır. Başka bir deyişle, güç transistörlerinin anahtarlanması, yalnızca önceden belirlenmiş iki PWM görev döngüsü, hız hatasına bağlı olarak uygulanmaktadır. Yani sürücü iki olası durumda çalışabilir; yüksek bir PWM çalışma döngüsü değeri DH anahtarlarına uygulanır veya düşük bir PWM görev döngüsü değeri DL uygulanır.



Şekil 3.9. PWM digital kontrol prensibi

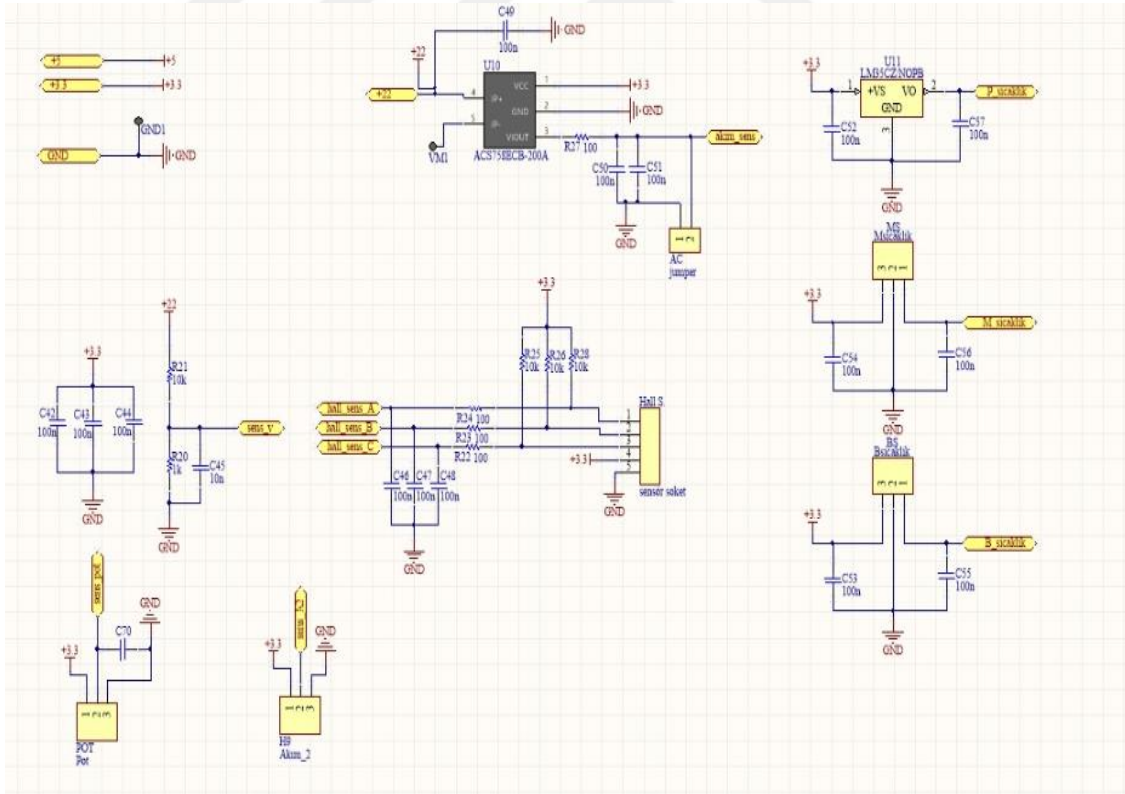
Motor sürücülerde kullanılan mikroişlemciler PWM sinyalleri üretmektedir. Hız regülatörü için elde edilen mantığına dayalı güç transistörleri için komütasyon işlevlerine dönüştürür. Dijital kontrol algoritması basittir. Çıkış hızı, referans hızını sadece girdi olarak alırken, motor sürücü güç transistörleri için PWM lojik sinyaldir. Bu tür PWM voltaj kontrolünü uygulamaya koymak karmaşık değildir. Bununla birlikte, motorun güvenli çalışmasını sağlamak için aşırı akım koruması durumlarında akım sensörü eklemek önerilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümle fırçasız DA motor sürücü devresinin tasarım aşamaları adım adım anlatılmıştır.

4.1. Fırçasız DA Motor Sürücü Tasarımı

Motor sürücü tasarımının Altium Designer pcb devre çizim programında tasarlanmıştır. Motor sürücü devresinde güç mosfetleri olarak IRFZ44N, mosfet sürücüleri olarak IR2106 kullanılmıştır. Motorun çektiği akımı hesaplamak ve bu bilgileri kullanıcıya göndermek için ACS758xCB akım sensörü kullanılmıştır. Motor sürücünün sıcaklığını ölçmek için DSP18B20 sıcaklık sensörü tasarıma eklenmiştir. Rotor pozisyonu için US1881 hall effect sensör çıkışları da çizimlere eklenmiştir. Bu eklenen sensörler ve diğer komponentlerin hepsi ayrı ayrı şematik şekiller üzerinde çizilmiştir.

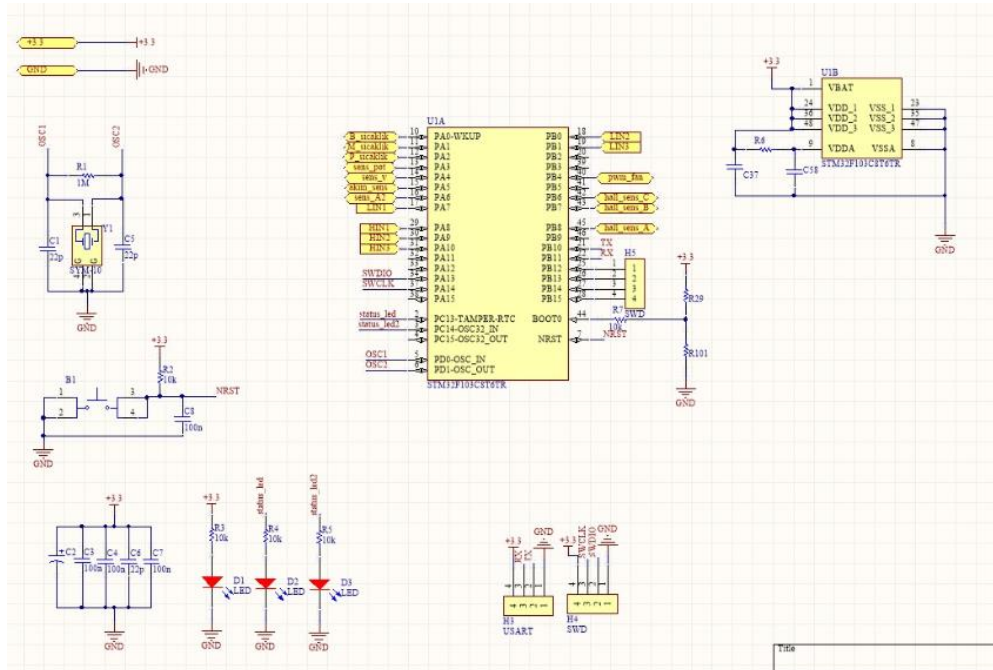


Şekil4.1. Akım sensörü, sıcaklık sensörü, hall effect sensör şematik tasarımı

ACS758ECB-200A akım sensörü, 3-5 V arasında tetiklenmektedir. 120 kHz'lik band genişliğine sahiptir. 3 μ s de bir gelen değerleri okuyabilmektedir. Gelen akımın AC veya DA olması fark etmez iki tür akım içinde çıkış vermektedir. -40° C ile 150° C arasında ölçüm yapmaktadır. Fakat sıcaklık değeri optimumdan uzaklaştıkça ölçüm hassasiyetide azalmaktadır. Sensörün manyetik histerezisi neredeyse sıfırdır yani gecikme yok denecek kadar azdır.

LM35CZNOPB sıcaklık sensörü, her bir °C de 10 mV luk hassasiyette ölçüm yapmaktadır. Sensör 4-30 volt arasındaki besleme gerilimleri ile çalışmaktadır. -55 ile +150 °C arasındaki sıcaklık değerlerini ölçmektedir. Sensör 60 μ A gibi çok değerlikte bir akım çekmektedir.

A1126 Hall effect sensörü, mıknatısları gördükçe dijital olarak çıkış vermektedir. 3-24 V arasında giriş gerilimi ile beslenmektedir. Sensör çıkış verirken maksimum 10 μ A'lık çok küçük değerli akım kullanmaktadır. Sensörde ters akım koruması mevcuttur. Sıcaklık aralığı -55 ile 150 °C arasında olduğu sürece çıkış verebilmektedir. Optimum olarak sıcaklık 85 °C yi geçtiğinde mıknatıslar özelliğini kaybedeceğinden sensörün çıkış vermesi beklenmemektedir.

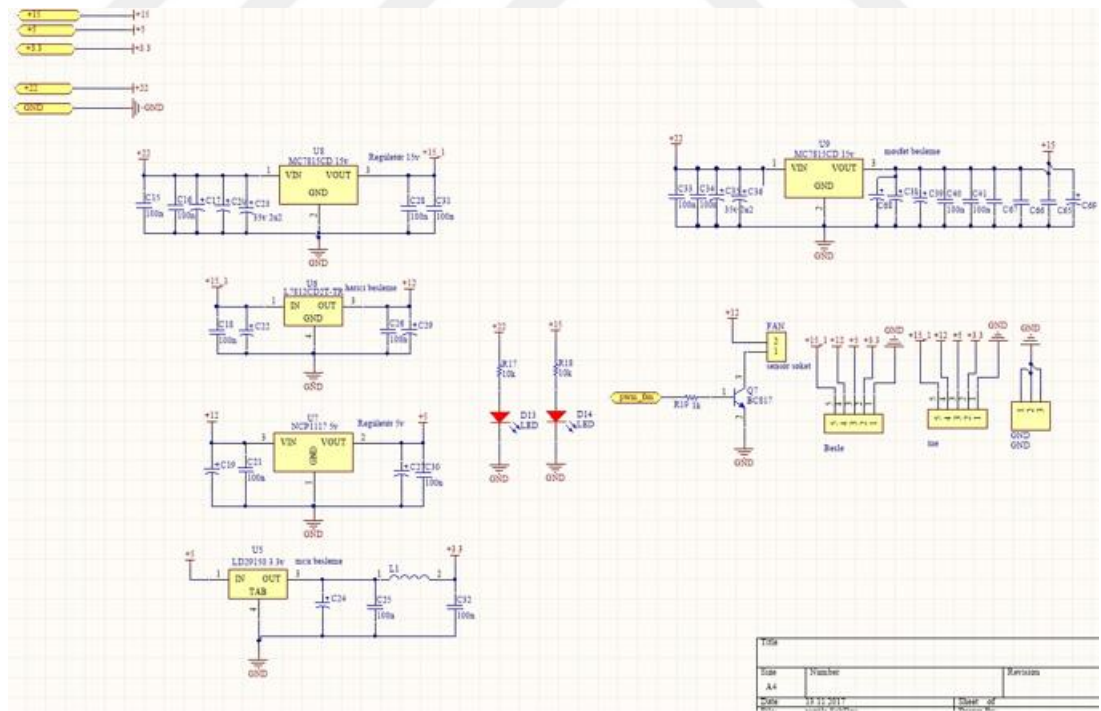


Şekil 4.2. motor sürücü mikroişlemci katı şematik tasarımı

Stm32f103c8t6;

- 72 MHz'e kadar çalışma frekansı,
- 64 veya 128 KByte hafıza,
- 20KByte SRAM,
- 2- 3.6 Volt besleme gerilimi,
- 4 – 16 MHz dahili crsytal osilatör,
- 16 kanal maksimum 12 bit ADA,
- 16 bit motor kontrol için PWM ve deadtime,
- 26 adet GPIO(Genel giriş çıkış portları),
- 7 adet timer.

Yazdığımız kodu yüklemek için mikroişlemci üzerindeki SWD pinleri kullanılarak yükleme yapılacaktır. Yazılan kodlar .hex dosyası olarak kaydedilip, bu kaydedilen dosya mikroişlemciye yüklenecektir.



Şekil 4.3 motor sürücü devresi güç katı

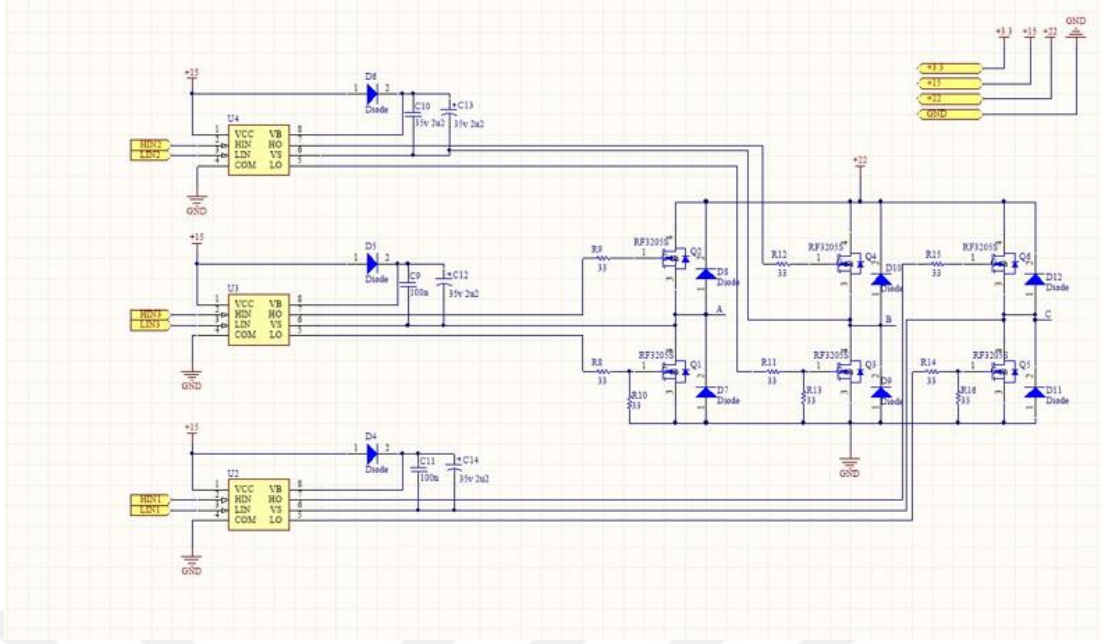
Motor sürücü devresinde MOSFET'leri sürmek için ideal gerilim olan 15 Volt kullanılmıştır. Bu gerilimi elde etmek için MC7815CD voltaj regülâtörü kullanılmıştır. PCB tasarımı DPAK-2 kılıfı kullanılmıştır. Kullanılacak olan bu regülâtör 1 Amperlik akıma kadar kullanılmaktadır.

Mikroişlemci beslemesi için LD29150 voltaj regülâtörü kullanılmıştır. Ir2106 mosfet sürücülerde 3.3 V beslemede kullanılabilir. Fakat bu beslemede mosfet sürücünün hızı yavaşlamaktadır. Bu sebepten dolayı mosfet sürücüler için NCP1117 5 Voltluk voltaj regülâtörü kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekilde Fırçasız DA motoru sürmek için half bridge devresi kurulmuştur. IRF3205 MOSFET'leri sürmek için ir2106 mosfet sürücülerini kullanılmaktadır. IRF3205 MOSFET;

- Drain Gerilimi 55V
- Rds(on) direnci 8m Ω
- Maksimum akım 110

Yukarıdaki değerlere göre MOSFETİN Drain ucuna maksimum uygulanacak gerilim 55V'tur. Kurulacak olan deney düzeneğinde Drain ucuna iki tane Li-Po piller seri bağlanarak yaklaşık 22 Voltluk gerilimle beslenecektir. MOSFET maksimum 110 amper akım geçebilir ve bu değerden sonra MOSFET yüksek sıcaklıklara çıktığından yanmaktadır. Fakat farklı sebeplerden dolayı(ani gerilim yükselişi, PWM dalgalanmaları vb.) MOSFET ısındığından yani $T_c > 100$ olduğunda MOSFET maksimum 80 Amper çekmektedir bu durum ise tasarlanacak motor sürücünün verimsiz olmasına neden olmaktadır. Gate uygulanacak olan gerilim 10-20 V arasındadır ve ideal voltaj 15 V'tur. 15 volt giriş gerilimden regülâtör yardımı ile elde edilecektir. MOSFET'i sürmek için datasheette belirtilen Rds(on) direnç değerini 0'a yaklaştırdıktan sonra MOSFET iletme geçmektedir.



Şekil 4.4. motor sürücü MOSFET katı

Belirli MOSFET sürücülerin kendi içersinde deadtime (ölü zaman) özelliği bulunmaktadır. Deadtime; yarım köprü motor sürücülerde, high veya low anahtarların iletimden kesime ya da kesimden iletime geçmesinden hemen önce başlayıp PWM sinyallerinin geçici süreyle anahtarları kapalı duruma getirecek pozisyonda bekletildiği süreye denir. Bu özellik MOSFET'in açılıp kapanması esnasında devreye girerek MOSFET'in yanmasını engellemektedir. Deadtime MOSFET'in high dan low a veya low dan high a geçişi esnasında MOSFET'in tepkisini beklemesi için kullanılmıştır. Örneğin ır2104 MOSFET sürücü içerisinde mevcut deadtime bulunmaktadır. Fakat projemizde kullanılan ır2106 MOSFET sürücüsünde kendi içerisinde deadtime mevcut değildir. Bu durumda deadtime yazılımsal olarak eklenmektedir.

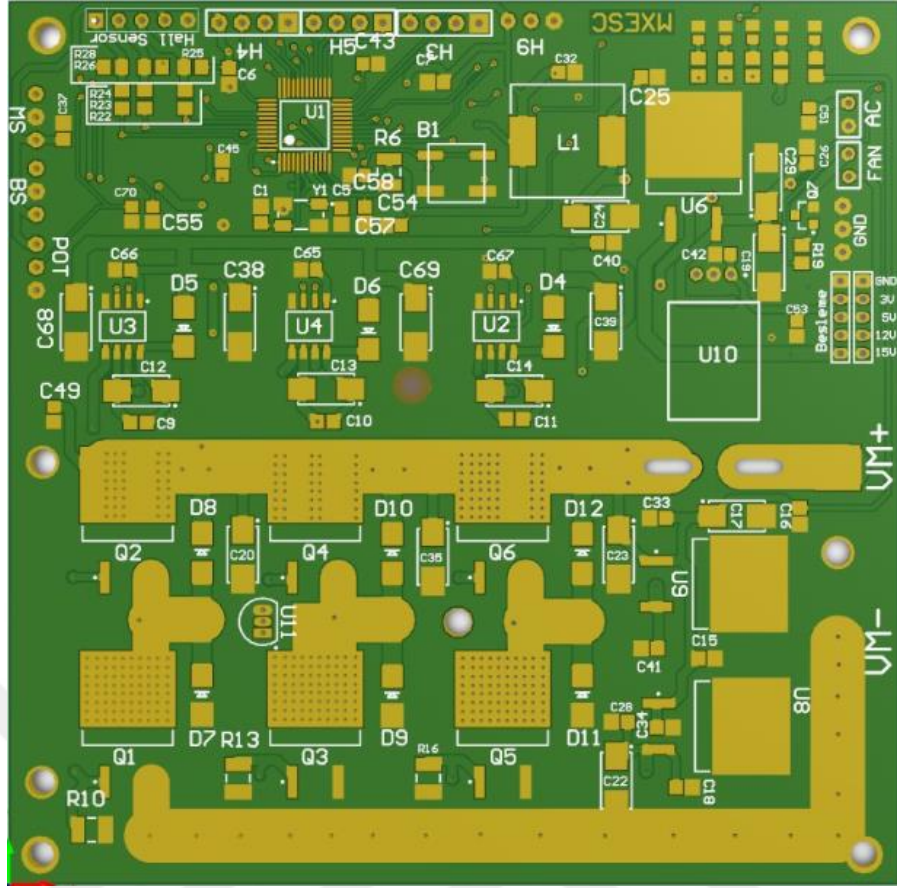
Güç katı PCB de tasarlanırken devre elemanlarını çekecekleri akım değerlerine göre yol kalınlıkları belirlenmiştir. Aşağıdaki tablo 4.1. de gösterildiği şekilde yol kalınlıkları belirlenmiştir.

Tablo 4.1. PCB yol kalınlıkları ve akım değerleri

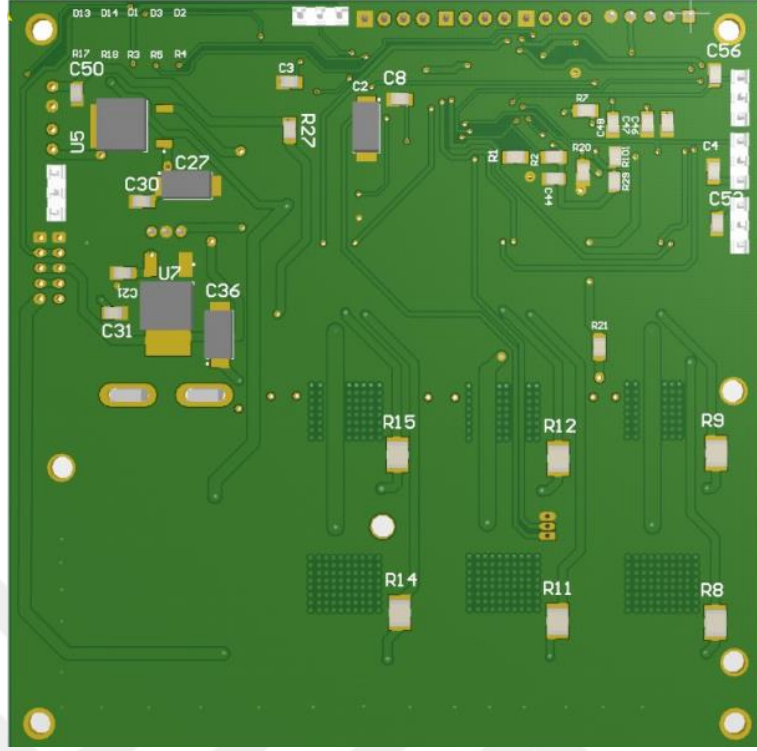
Bağlantı yol genişliği	Taşıyacağı en fazla akım değeri
0.2 mm	100 mA
0.5 mm	300 mA
1 mm	2.5 A
2 mm	5 A
3 mm	6 A
4 mm	7 A
5 mm	9 A

Tablo 4.1. deki yol kalınlık ve akım değerlerine göre PCB kart tasarımı hazırlanmıştır. Tablo 4.1. de maksimum 9 ampere kadar kalınlık bilgisi verilmektedir. Fakat projede motor anlık olarak 40 amper akım çekmektedir. Tezimizde hazırlanan motor sürücünün veriminde kayıp yaşanmaması için yüksek akım çeken yollar bakır kaplanarak kartın ısı artışını nominal düzeyde toplanması sağlanmıştır. Özellikle MOSFET, güç katı ve 3 faz motor çıkışları yüksek akım çekeceğinden yollar maksimum kalınlıkta tasarlanmıştır. Aşağıdaki şekillerde PCB tasarımın 2 boyutlu, 3 boyutlu ve yol kalınlıklarını gösteren şekiller verilmektedir.

PCB tasarımda MOSFET, MOSFET sürücü ve mikro işlemci gibi devreyi oluşturan ana malzemeler kartın ön tarafına yerleştirilmiştir. Soğutucu amaçlı olarak her bir mosfetin altına ve mikroişlemcini altına 0.3 mm lik via delikleri atılmıştır. Top layerden bottom layer a geçişler için atılan via delikleri ise genel olarak 0.4 mm genişliğinde atılmıştır. Tasarımda 3 kanal MOSFET çiftleri karşılıklı yerleştirilmiştir. Bu şekilde yerleştirilen MOSFET'lerin üzerine soğutucu olarak alüminyum blok yerleştirilecektir.



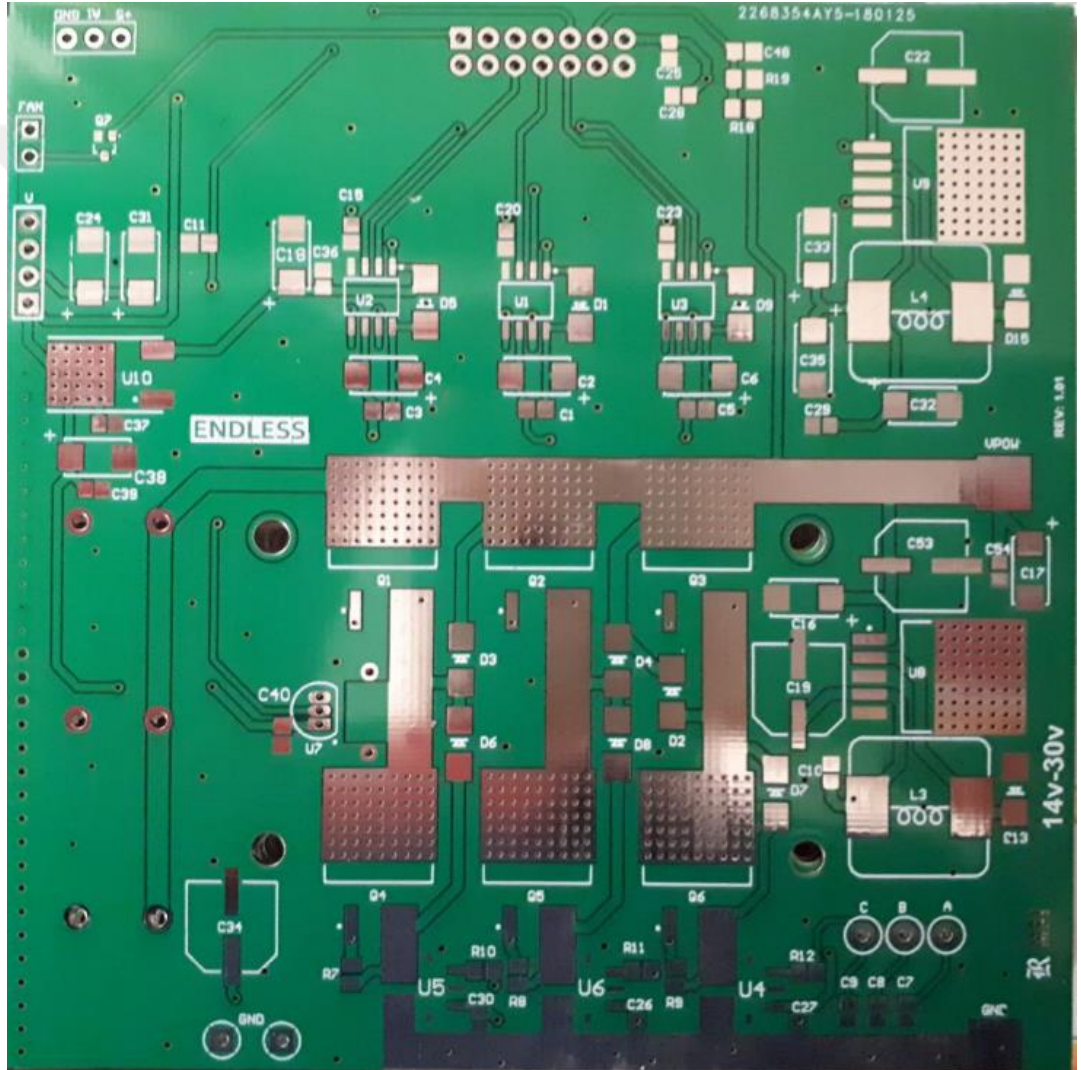
Şekil 4.5. iki boyutlu PCB (ön taraf)



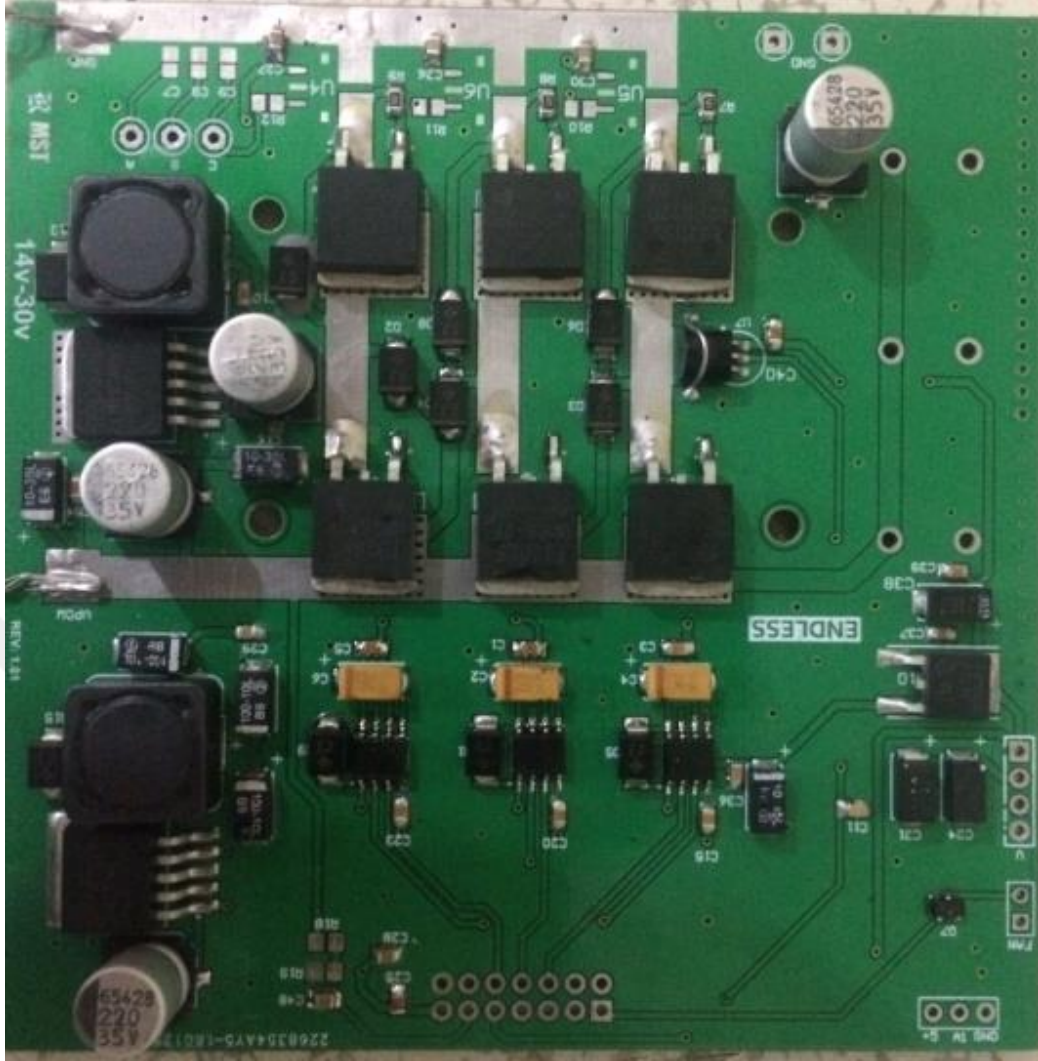
Şekil 4.8. Üç boyutlu PCB (arka taraf)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

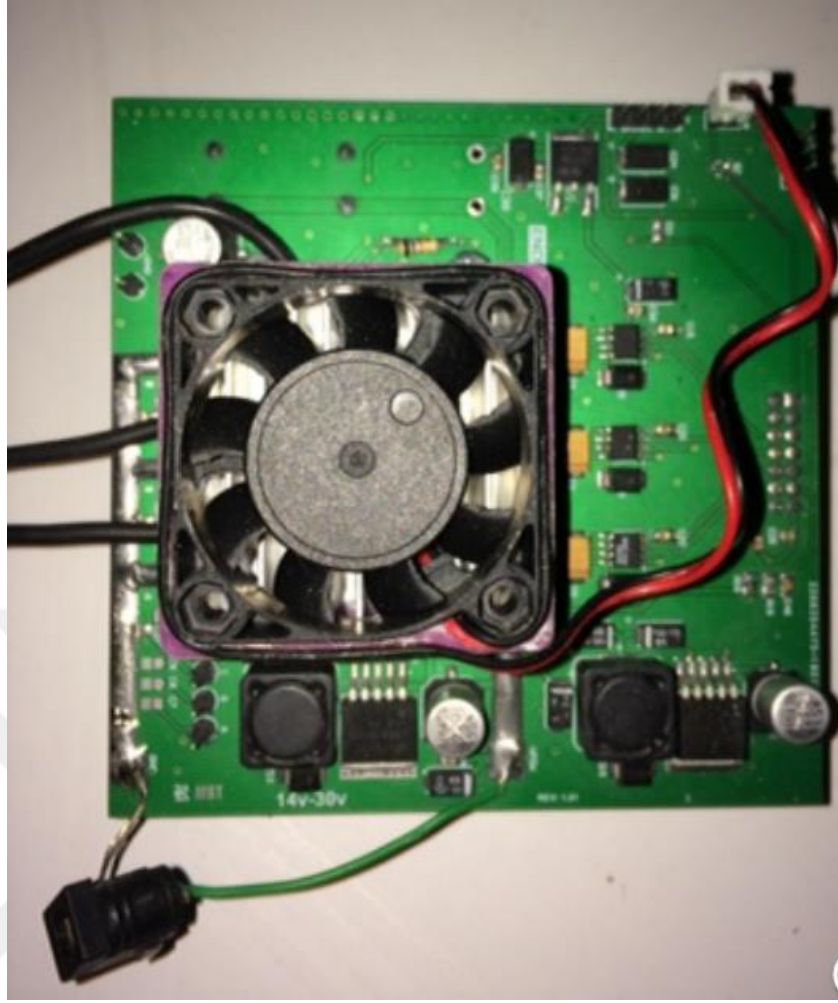
Tasarlanan motor sürücü devresinin bütün devre elemanları pcb tasarım programında yapıldığı gibi kartın üzerine yerleştirildi. Tasarımda motor sürücü kartında kullanılacak olan sıcaklık sensörü, akım sensörü, fırçasız motor kontrolü için MOSFET ve MOSFET sürücü katı, motorun kontrol algoritması için mikroişlemci, diğer pasif ve aktif devre elemanları motor sürücü kartın üzerine lehimlenmiştir.



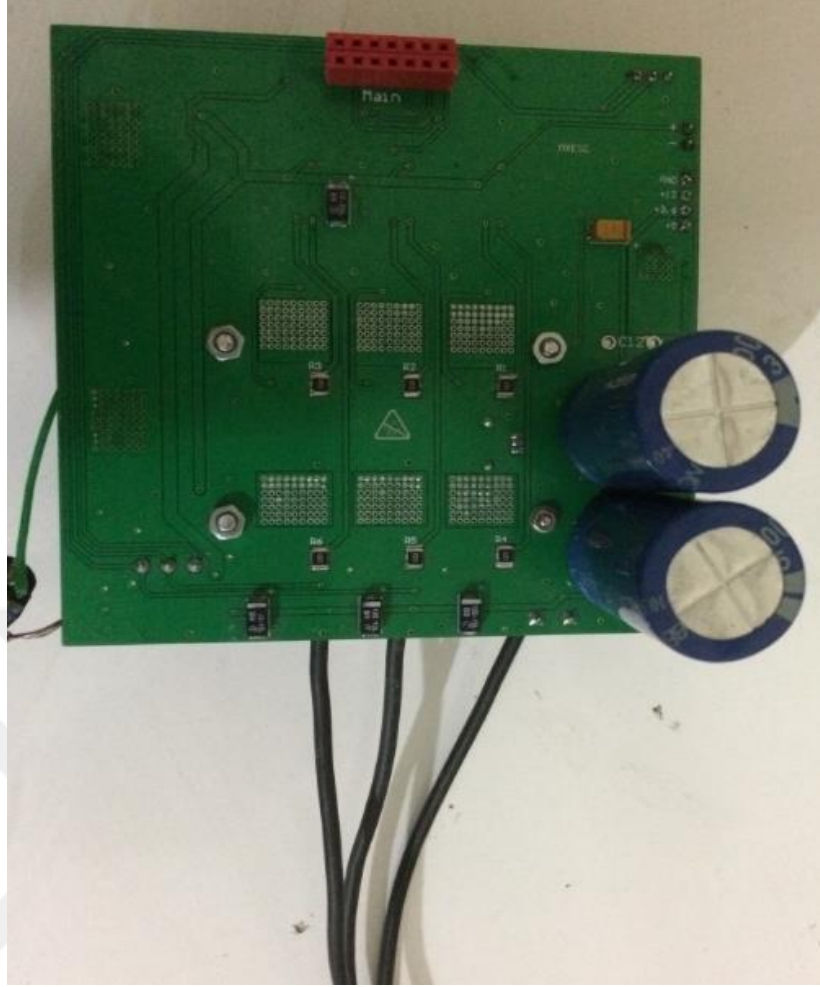
Şekil 5.1. Motor sürücü pcb kartı



Şekil 5.2. Motor sürücü kartı güç katı ve sensör yerleşimi

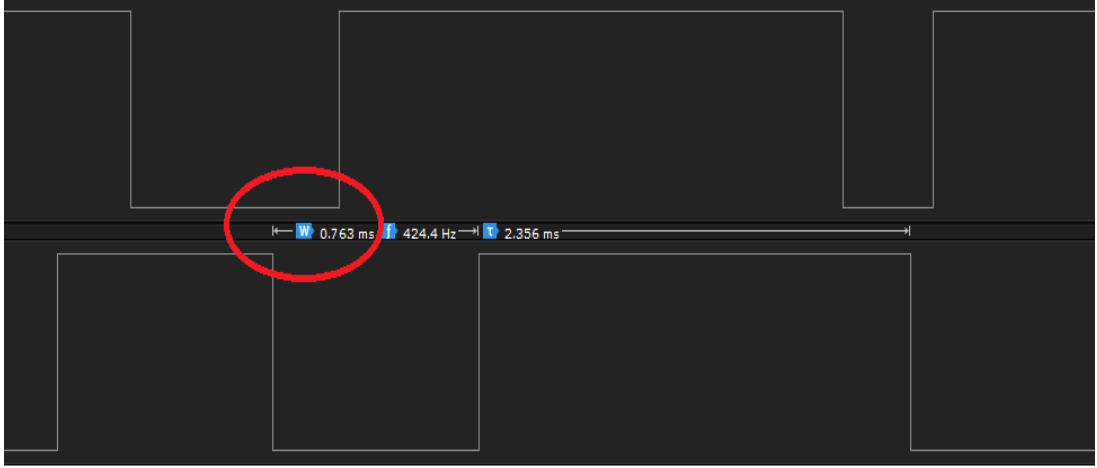


Şekil 5.3. Motor sürücü kartı malzeme yerleşimleri



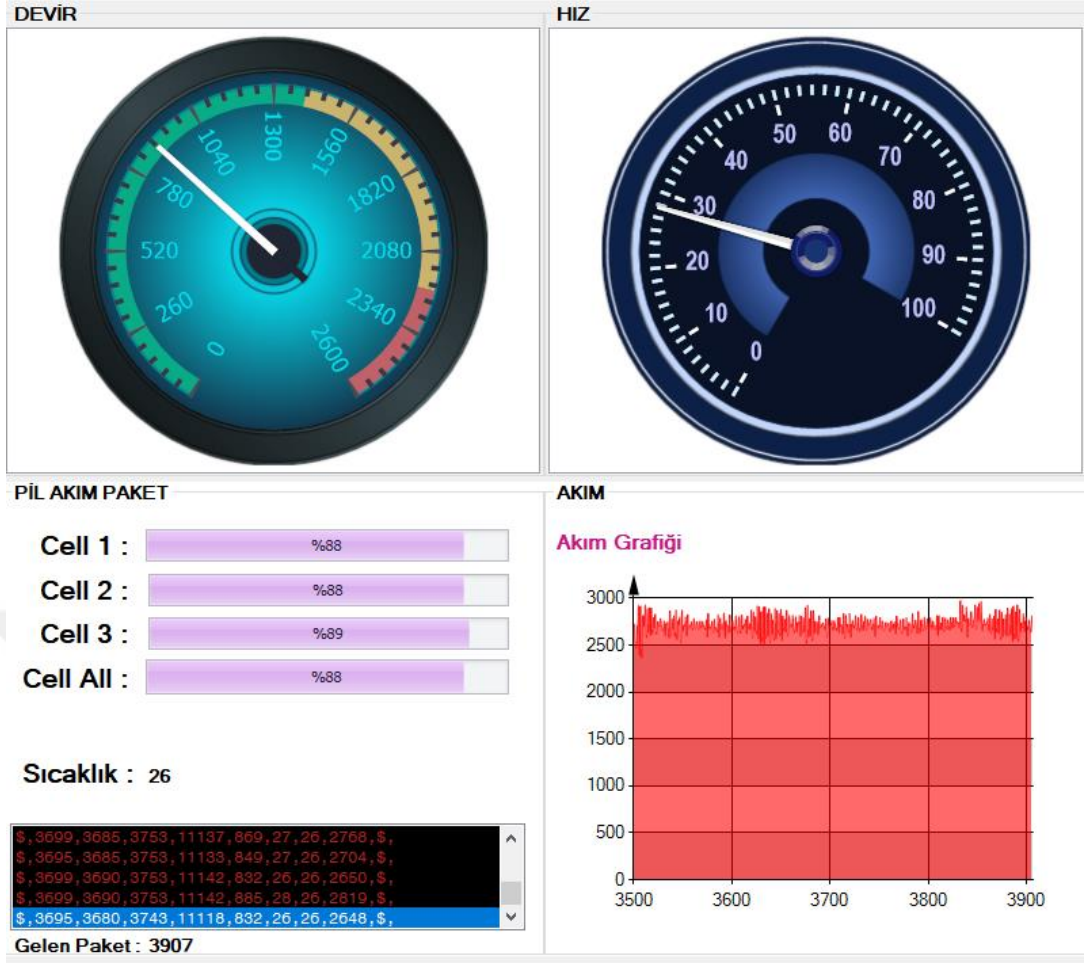
Şekil 5.4. Motor sürücü kartı arka yüzü

Şekil 5.5. te görüldüğü gibi motor sürücü kartın deney düzeneği kuruldu. Motor sürücü kartını denemek için kendi tasarlayıp yapmış olduğum fırçasız motorda testler yapıldı. İlk testlerde motor sürücüyü iki adet Li-Po (Lityum Polimer) pilleri seri bağlayarak yaklaşık 25 voltluk gerilim ve 2200 mAh lik bir besleme kullanıldı. Motor bağlantısını ilk olarak “yıldız” bağlantı şeklinde yapıldı. Bu bağlantı şekli ile yüksüz olarak maksimum güçte 1500 devir/dakika devrine 1.2 Amper değerlerinde ulaşıldı. Bağlantı şeklini “delta” yaptığımızda maksimum güçte 2200 devir/dakika devrine 1.8 Amper seviyelerinde elde edildi. Yani yıldız bağlantıda düşük devir düşük akım, delta bağlantıda ise yüksek devir yüksek akım değerlerini elde edilmiş olundu.



Şekil 5.5 Deadtime (gecikme zamanı) ayarlanması

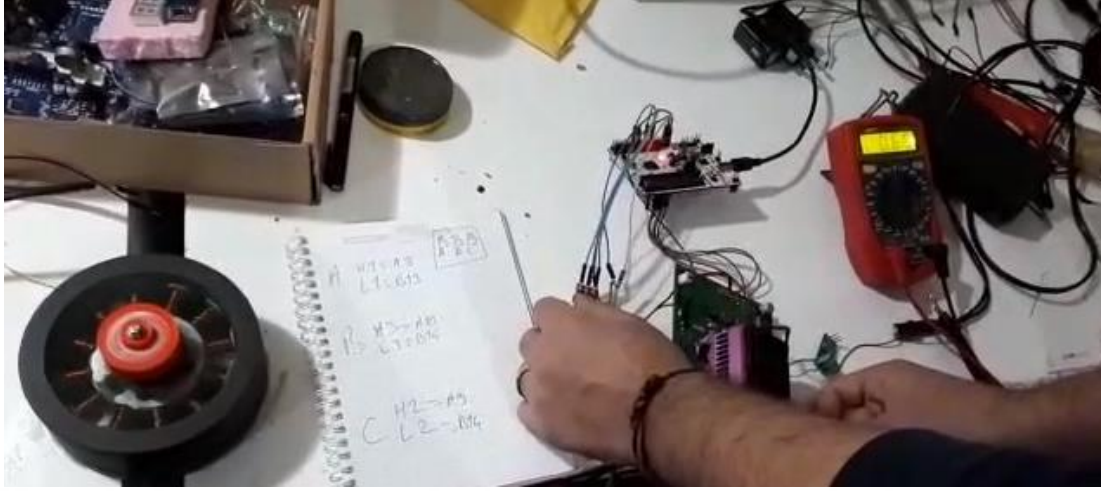
Deadtime, half bridge sürücü devrelerinde MOSFET “HIGH” ve “LOW” anahtarlarının kesimden iletme veya iletimden kesime geçmeden önce anahtarlarının çok kısa bir süre kapalı durumda bırakması için bekletilen süredir. Deadtime süresi eklenmezse MOSFET’ler HIGH’ dan LOW’a veya LOW’dan HIGH durumuna geçerken o kısa süre içerisinde iki MOSFET’te iletimde olur bu durum ise MOSFET çiftlerinin kısa devre olmasına neden olur. Bu kısa süreli kısa devrede kalan MOSFET çiftleri üzerinde fazla akım geçerek ısınmaya başlar ve bu durum motor sürücünde verimsizliğe neden olur. Şekil 5.5 te MOSFET çiftlerinin en verimli şekilde sürmek için 0.763 m sn bekleme süresi eklenmiştir.



Şekil 5.6 kullanıcı paneli

Şekil 5.6 da batarya, motor ve ortam hakkında kullanıcıya bilgiler verilmektedir. Bu panel yardımı ile kullanıcı kaç amper akım çekerken motorun kaç devir de döndüğünü ve kaç km/sa hız gittiğini görmektedir. Aynı zamanda batarya durumunu, ortam ve batarya sıcaklığı hakkında bilgi verilmektedir. Motorun bataryadan çektiği akım hem sayısal veri olarak sunulmakta hem de grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu gösterilen değerlere göre motorun hangi konumda fazla akım çektiği, hangi konumda devrinin düştüğü ve hangi durumda bataryanın ani yüzdesel düşüşler yaşadığı tespit etmiş olunacaktır.

Aynı zamanda panelin sol alt kısmındaki küçük ekranda ise gelen tüm veriler gösterilmektedir. Bu veriler, akım, sıcaklık, her bir hücrenin gerilimi, devir ve hız olarak yansıtılmıştır. Bu verilerin hepsi kablosuz olarak aktarılacaktır. Başka bir kullanıcı tarafından bütün veriler görülebilecektir.



Şekil 5.7. Deney Düzenegi

Tasarlanan motor sürücü devresi ile fırçasız motor sürücünün hız, devir, tork ve motor konumu gibi parametreleri kontrol edilmektedir. Bu parametreler PWM algoritması ve kullandığımız MOSFET sürücü entegresinde mevcut olmayan ölü-zaman ın yazılımsal olarak ayarlaması ile yapılmıştır. PWM sinyali bir tane potansiyometre(ayarlı direnç) ile ayarlanarak motorun hız değişimi yapılmıştır. Ölü-zaman ile MOSFETlerin zamanında açılıp kapanması ayarlanarak istikrarlı bir şekilde anahtarlanma yapılması sağlanmıştır. Ölü-zaman ın nominal şekilde ayarlanması ile motorun torkunun artması da sağlanmıştır. Ölü-zaman ın düşük olması MOSFET ler anahtarlanırken zamanında önce kapalı durumdan açık duruma geçtiğinde hem MOSFETlerin üzerine anlık olarak fazla gerilim düşmesinden dolayı sıcaklığı arttığı gözlemlenmiştir. Hem de motor sürücü motora istenilen gücü istenilen zaman aralığında sağlayamadığından verimsiz çalışmasına neden olmaktadır. Tespit edilen bu durumları en iyi şekilde algoritmik olarak düzenlendiğimizde maksimum verimde bir motor sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

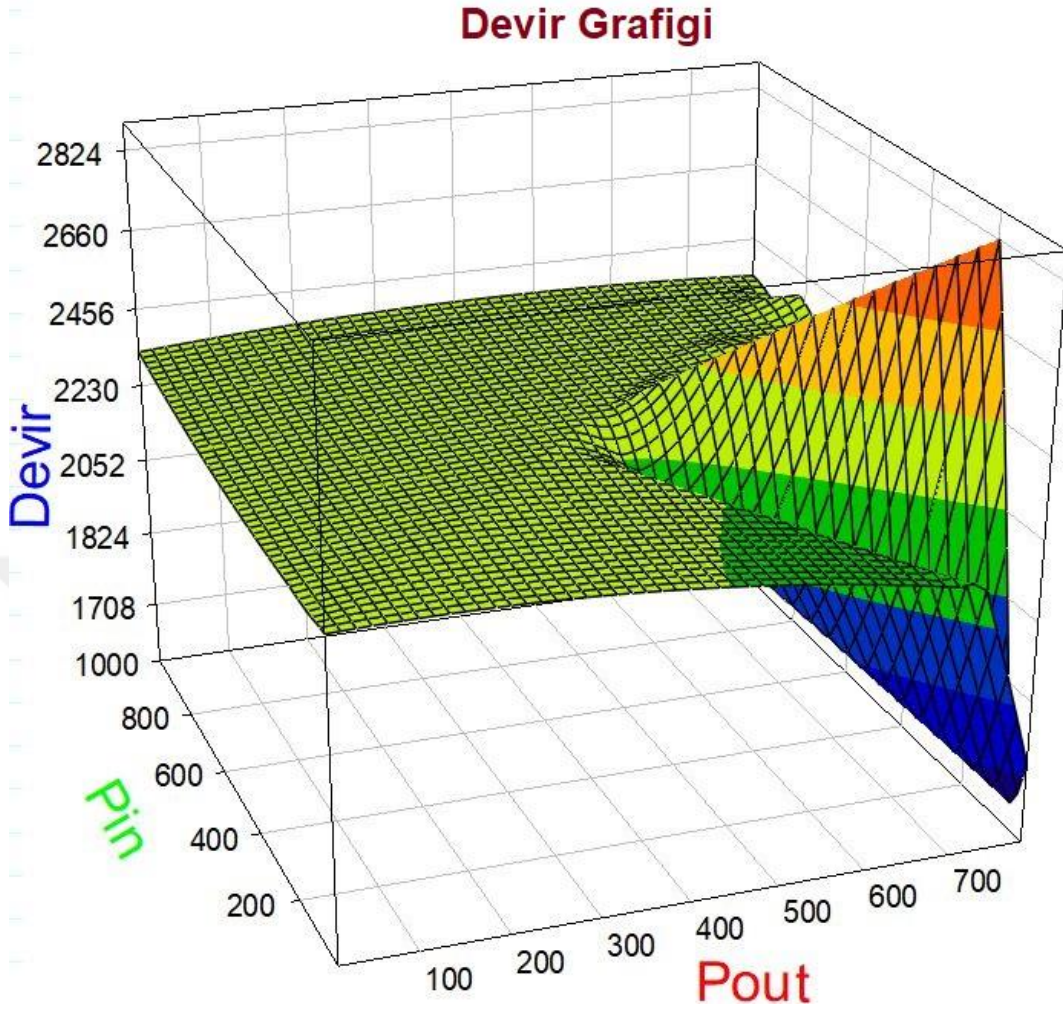
Şekil 5.7.'deki gibi deney düzenegi kurulduktan sonra bataryanın çıkış akım ve gerilim değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Motor sürücünün verimliliği hesaplanması için motora yük uygulanarak motor sürücünün çıkışındaki akım ve gerilim değerleri de belirli aralıklarla ölçülmüştür. Motor sürücü verim değeri 18

A'den sonra düşmeye başlamıştır. Mevcut değerler ve elde edilen ölçüm değerleri aşağıdaki Tablo 5.1'de sırası ile verilmiştir.

Tablo 5.1. Motorun giriş ve çıkış değerleri

	Gerilim(V)	Akım(A)	Pin(W)	Devir(devir/dakika)	Pout(W)	η (%)
1	25,2	0,7	17,6	854	10,9	62
2	25,2	1,8	45,4	912	31,5	69,4
3	25,2	3,9	98,3	1026	74,0	75,3
4	25,2	5,4	136,1	1115	107,6	79
5	25,2	7	176,4	1228	141,9	80,4
6	25,2	9,5	239,4	1330	195,8	81,7
7	25,2	10,7	269,6	1412	221,6	82,2
8	25,2	12,8	322,6	1524	267,1	82,8
9	25,2	15	378	1580	315	83,3
10	25,2	18	453,6	1635	380,5	83,8
11	25,2	20,3	511,6	1710	426,4	83,3
12	25,2	23,2	584,6	1875	483,6	82,7
13	25,2	25,4	640,1	1936	526,6	82,3
14	25,2	27,6	695,5	2025	569,9	81,9
15	25,2	30	756	2128	616	81,4
16	25,2	32,2	811,5	2210	657,5	81
17	25,2	34,1	859,3	2280	692,7	80,6
18	25,2	35,8	902,2	2345	723,3	80,1
19	25,2	37,7	950	2400	755,5	79,5
20	25,2	39,5	1000	2480	788	78,8

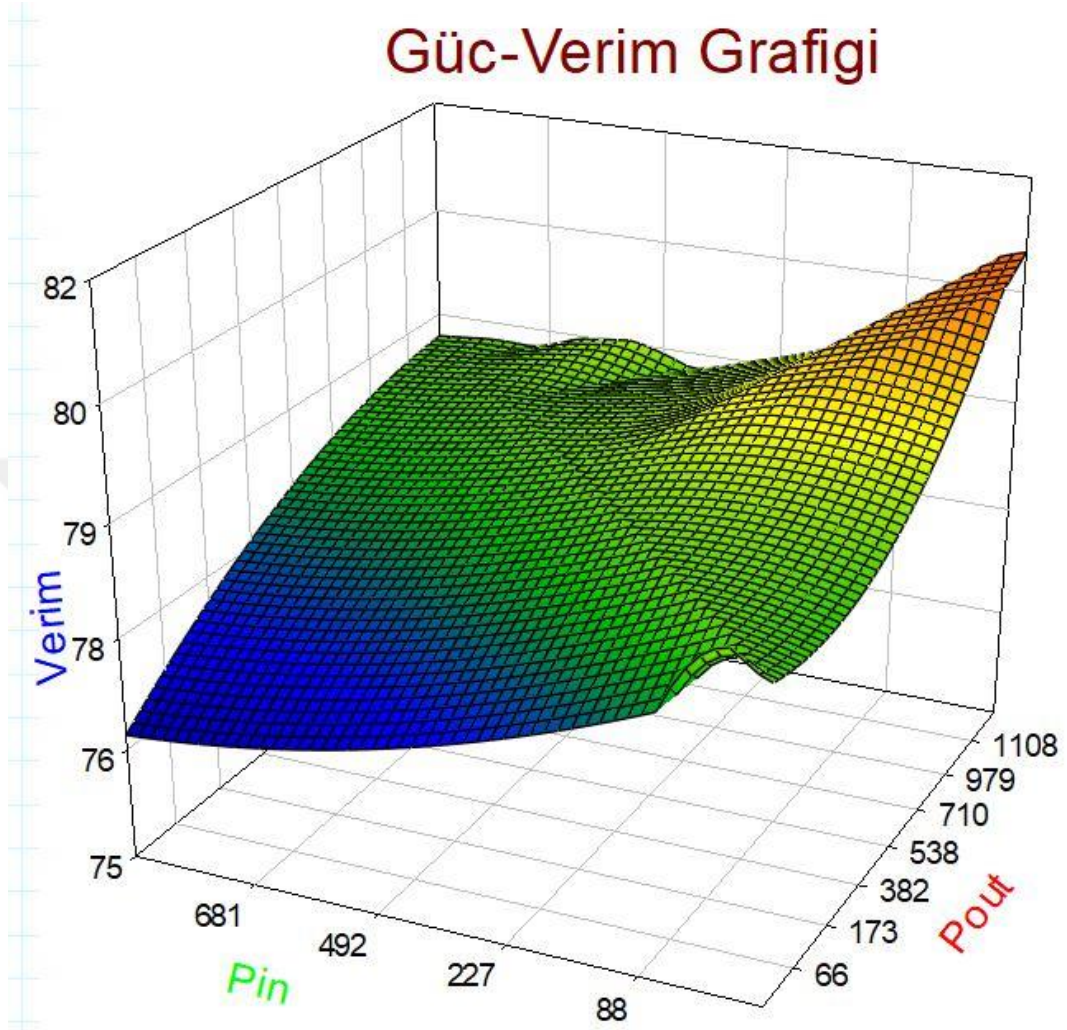
Ölçülen ve tespit edilen bu tablodaki değerlere göre de motor sürücünün akım, gerilim, güç, devir ve verim grafiği Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 deki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 5.8. Motor giriş - çıkış gücüne göre devri

Şekil 5.8'de motorun giriş gücü ve çıkış gücüne göre motorun devri hesaplanmıştır. Ölçülen değerler gösterilmiş olup grafiksel olarak detaylandırılmıştır. Motora giriş gücü minimum değerinde(17,6 W) iken motor devri takometre yardımı ile 854 devir/dakika olarak ölçülmüştür. Bu devirde motorun çıkışında ise 13,2 W'lık bir güç harcanmaktadır. Başlangıç değerinde motorun dönüşünün yanı sıra sıcaklık ve sürtünme gibi harici nedenlerden kaynaklanan yaklaşık 4,4 W'lık enerji kaybı yaşanmıştır. Bu enerji kaybı yüksek güç değerlerine çıktıktan sonra daha fazla artmaktadır. Maksimum giriş gücünde(1000 W), çıkış gücünde(788 W) ve devire(2480 devir/dakika) ulaştığında kayıp dahada fazla olmaktadır. Bu kayıplar tasarlanan motor sürücü yardımı ile ideal koşullarda (optimum güçte) motorun sürülmesi sağlanarak

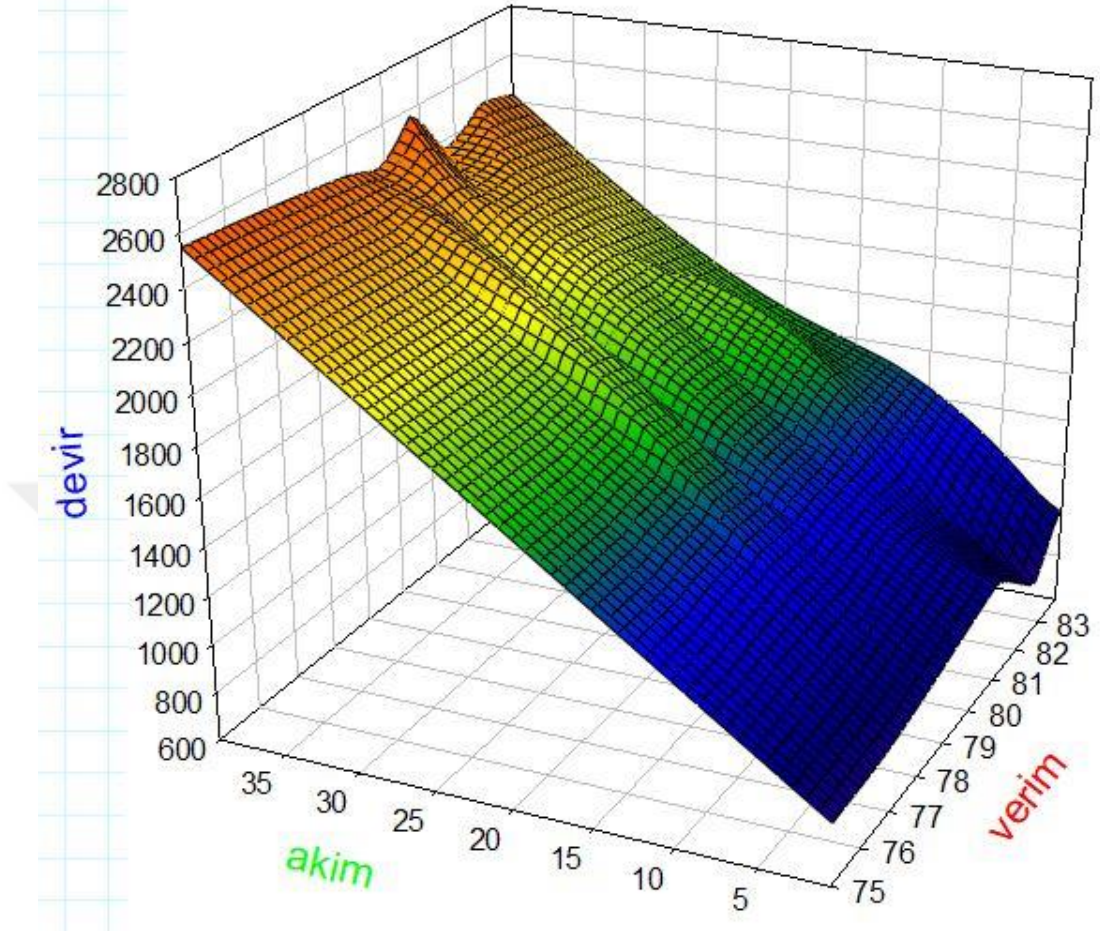
minimum düzeye indirilmektedir. Bu sayede motorun verim değerleride %83,8'e kadar çıkmaktadır.



Şekil 5.9. Motor sürücünün motorun giriş-çıkış güç değerlerine göre verimi

Yukarıdaki şekil 5.9'da motorun verimi çektiği akıma göre hesaplanmıştır. Akım değerleri 0-40 A arasında belirlenmiştir. Motorun verimi 20 A'de maksimum değeri olan %83,8'e ulaşmaktadır. Akım 20 A geçtikten sonra verim düşmeye başlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ve kurulan deney düzeneği sonucunda bu üretilen motor optimum 20 A'de çalışmaktadır. Çıkış değerlerine görede bakıldığında 1000 Wattlık güce sahiptir.

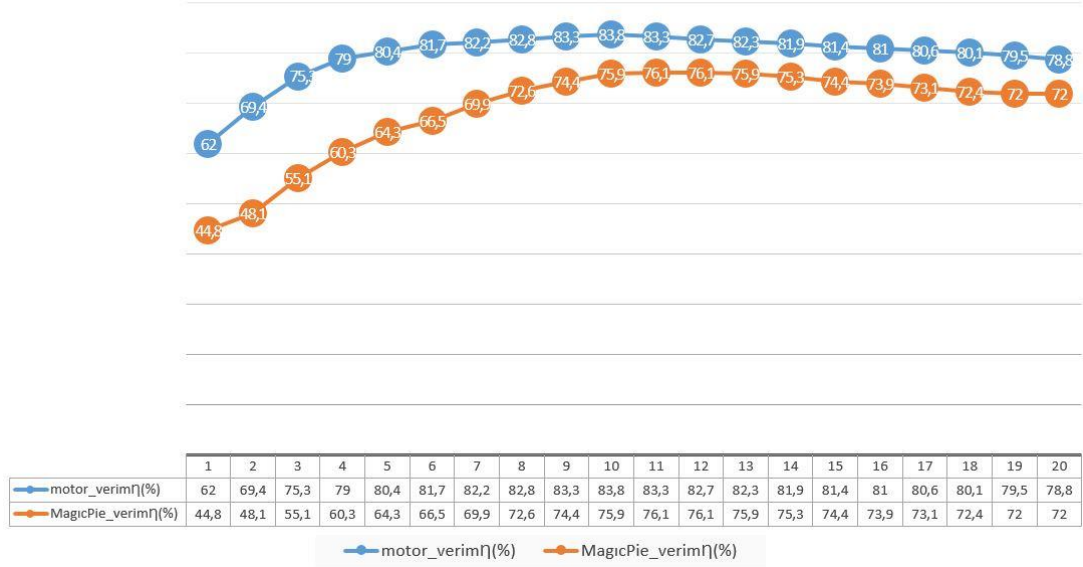
Verim - Devir Grafiği



Şekil 5.10. Devir değişimine göre motorun verim grafiği

Şekil 5.10'da motorun verimine göre devrinin değişimi gösterilmiştir. Grafikte belirtilen değerlere göre motorun devrinin sürekli artması verimi artırmamaktadır. Aksi durumda motor devri 1600 devir/dakika i geçmeye başladıktan sonra verim düşmeye başladığı deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Motora giren toplam güç artık motorun hareketi için değil de sıcaklık ve sürtünme gibi dış etkenlerin kullanımı arttığı ve bu dış etkenlerin verim düşürdüğü gözlenmiştir.

Verim Karşılaştırma Grafiği



Şekil 5.11. MagicPie motoru ile tasarlanan motorun verim grafikleri

Şekil 5.11’ da tezimizde tasarlanan motor ve motor sürücünün verimliliği ile Golden Motor firmasının üretmiş olduğu “MagicPie” isimli fırçasız motor ve motor sürücünün çektikleri akıma göre verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9’ da kırmızı ile belirtilen çizelge yüzdesel olarak tez çalışmasında hazırlanan motor ve motor sürücünün değerlerini belirtmektedir. Sarı çizelgede belirtilen ise MagicPie motor ve motor sürücüsünün yüzdesel olarak değerlerini belirtmektedir.

MagicPie’ nin optimum değerlerde maksimum %76,1 verimlilikte çalıştığı datasheet değerlerinde gösterilmiştir. Tablo 5.2’de detaylı olarak datasheet tablosu verilmiştir. Bu tabloda maksimum verim olan %76,1 ile çalışırken gerilim, akım, giriş gücü(Pin) ve çıkış gücü(Pout) gibi değerleri gösterilmektedir. Bu datasheet değerlerine göre yukarıdaki grafik oluşturulmuştur.

Bu tezde tasarlanan motor ve motor sürücünün tablo 5.1. deki değerlerine göre maksimum %83,8’ lik verim elde edilmiştir. Bu değerler motorun çektiği akıma göre sabit gerilimle hesaplanarak giriş-çıkış güç değerlerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Tablo 5.1. de datasheet değerleri olarak yansıtılmıştır.

Tablo 5.2. Golden Motor MagicPie HUB(BLDA) motor verim tablosu

	(N.m)	(r/min)	Pgiriş(W)	(V)	(A)	Pçıkış(W)	(%)
Max	22.63	130	308.88	308.88	23.86	19.18	457.53
Max	0.00	178	0.00	0.00	24.07	0.94	22.65
Max	22.63	130	308.88	308.88	23.86	19.18	457.53
Max	0.00	178	0.00	0.00	24.07	0.94	22.65
Max	22.63	130	308.88	308.88	23.86	19.18	457.53
Max	22.63	130	308.88	308.88	23.86	19.18	457.53
Max	8.94	159	148.78	148.78	23.99	8.14	195.38
1	0.00	178	0.00	0.00	24.07	0.94	22.65
2	0.13	177	2.43	2.43	24.07	1.05	25.19
3	0.26	177	4.86	4.86	24.07	1.15	27.73
4	0.39	177	7.27	7.27	24.07	1.26	30.27
5	0.52	176	9.68	9.68	24.07	1.36	32.81
6	0.66	176	12.09	12.09	24.07	1.47	35.35
7	0.79	176	14.48	14.48	24.07	1.57	37.89
8	0.92	176	16.87	16.87	24.06	1.68	40.43
9	1.05	175	19.25	19.25	24.06	1.79	42.96
10	1.18	175	21.62	21.62	24.06	1.89	45.50
11	1.31	175	23.99	23.99	24.06	2.00	48.04
12	1.22	175	22.36	22.36	24.06	1.92	46.30
13	1.17	175	21.46	21.46	24.06	1.88	45.33
14	1.09	175	20.01	20.01	24.06	1.82	43.78
15	1.01	175	18.56	18.56	24.06	1.75	42.23
16	0.92	176	16.92	16.92	24.06	1.68	40.48
17	0.84	176	15.47	15.47	24.07	1.62	38.93
18	0.81	176	14.92	14.92	24.07	1.59	38.35
19	0.72	176	13.28	13.28	24.07	1.52	36.61
20	0.64	176	11.81	11.81	24.07	1.46	35.06
21	0.53	176	9.79	9.79	24.07	1.37	32.93
22	0.44	177	8.14	8.14	24.07	1.30	31.18
23	0.31	177	5.74	5.74	24.07	1.19	28.66
24	0.18	177	3.34	3.34	24.07	1.09	26.14
25	0.10	177	1.86	1.86	24.07	1.02	24.59
26	0.00	178	0.00	0.00	24.07	0.94	22.65
27	0.09	177	1.67	1.67	24.07	1.01	24.40
28	0.28	177	5.19	5.19	24.07	1.17	28.08
29	0.39	177	7.22	7.22	24.07	1.26	30.21
30	0.55	176	10.16	10.16	24.07	1.38	33.31
31	0.65	176	12.00	12.00	24.07	1.46	35.25
32	0.86	176	15.83	15.83	24.07	1.63	39.32
33	1.09	175	20.01	20.01	24.06	1.82	43.78
34	1.05	175	19.29	19.29	24.06	1.79	43.00
35	1.21	175	22.18	22.18	24.06	1.92	46.10
36	1.50	174	27.40	27.40	24.06	2.15	51.72
37	1.74	174	31.70	31.70	24.06	2.34	56.37
38	1.65	174	30.09	30.09	24.06	2.27	54.62
39	1.86	174	33.83	33.83	24.06	2.44	58.69
40	2.12	173	38.44	38.44	24.05	2.65	63.72

41	2.22	173	40.21	40.21	24.05	2.73	65.66
43	2.61	172	47.05	24.05	3.04	73.21	64,3
44	2.88	172	51.74	24.05	3.26	78.43	66,0
45	2.98	171	53.48	24.05	3.34	80.36	66,5
46	3.18	171	56.93	24.04	3.50	84.23	67,6
47	3.45	170	61.56	24.04	3.72	89.45	68,8
48	3.58	170	63.77	24.04	3.83	91.97	69,3
49	3.74	170	66.49	24.04	3.95	95.06	69,9
50	4.04	169	71.56	24.04	4.20	100.86	71,0
51	4.41	168	77.76	24.03	4.49	108.01	72,0
52	4.35	168	76.76	24.03	4.45	106.85	71,8
53	4.65	168	81.75	24.03	4.69	112.65	72,6
54	5.08	167	88.83	24.03	5.03	120.95	73,4
55	5.27	167	91.93	24.02	5.19	124.62	73,8
56	5.37	166	93.56	24.02	5.27	126.55	73,9
57	5.70	166	98.90	24.02	5.53	132.92	74,4
58	5.74	166	99.54	24.02	5.57	133.70	74,5
59	6.07	165	104.83	24.02	5.83	140.06	74,8
60	6.36	164	109.43	24.01	6.07	145.66	75,1
61	6.61	164	113.37	24.01	6.27	150.48	75,3
62	6.87	163	117.44	24.01	6.48	155.50	75,5
63	7.31	162	124.26	24.00	6.83	163.98	75,8
64	7.33	162	124.57	24.00	6.85	164.37	75,8
65	7.66	162	129.62	24.00	7.11	170.73	75,9
66	8.12	161	136.59	24.00	7.48	179.59	76,1
67	8.14	161	136.89	24.00	7.50	179.98	76,1
68	8.50	160	142.28	23.99	7.79	186.91	76,1
69	8.59	160	143.61	23.99	7.86	188.64	76,1
70	8.94	159	148.78	23.99	8.14	195.38	76,1
71	9.16	158	152.00	23.99	8.32	199.62	76,1
72	9.56	158	157.80	23.98	8.64	207.32	76,1
73	9.96	157	163.53	23.98	8.97	215.01	76,1
74	10.04	157	164.67	23.98	9.03	216.55	76,0
75	10.43	156	170.18	23.97	9.35	224.05	76,0
76	10.58	155	172.28	23.97	9.47	226.94	75,9
77	10.99	155	177.97	23.97	9.80	234.82	75,8
78	11.46	154	184.41	23.97	10.18	243.85	75,6
79	11.56	153	185.76	23.96	10.26	245.77	75,6
80	12.00	153	191.68	23.96	10.61	254.23	75,4
81	12.13	152	193.41	23.96	10.72	256.72	75,3
82	12.50	151	198.30	23.96	11.01	263.83	75,2
83	12.70	151	200.92	23.95	11.17	267.67	75,1
84	13.29	150	208.54	23.95	11.65	278.99	74,7
85	13.40	150	209.94	23.95	11.74	281.10	74,7
86	13.89	149	216.13	23.94	12.13	290.50	74,4
87	13.95	148	216.88	23.94	12.18	291.65	74,4
88	14.29	148	221.10	23.94	12.46	298.17	74,2
89	14.63	147	225.28	23.94	12.73	304.69	73,9
90	15.10	146	230.96	23.93	13.11	313.69	73,6
91	15.15	146	231.56	23.93	13.15	314.65	73,6

92	15.42	145	234.78	23.93	13.37	319.82	73,4
93	15.82	145	239.48	23.92	13.69	327.49	73,1
94	16.12	144	242.97	23.92	13.93	333.23	72,9
95	16.46	143	246.87	23.92	14.20	339.74	72,7
96	16.78	143	250.50	23.91	14.46	345.86	72,4
97	17.32	141	256.51	23.91	14.90	356.19	72,0
98	17.37	141	257.06	23.91	14.94	357.15	72,0
99	17.64	141	260.02	23.91	15.16	362.31	71,8
100	18.02	140	264.12	23.90	15.46	369.57	71,5
101	18.34	139	267.53	23.90	15.72	375.69	71,2
102	18.90	138	273.38	23.89	16.17	386.39	70,8
103	19.00	138	274.41	23.89	16.25	388.30	70,7
104	19.29	137	277.31	23.89	16.48	393.84	70,4
105	19.88	136	283.30	23.89	16.96	405.10	69,9
106	20.05	136	284.98	23.88	17.10	408.35	69,8
107	20.48	135	289.16	23.88	17.44	416.55	69,4
108	20.60	135	290.32	23.88	17.54	418.84	69,3
109	21.02	134	294.31	23.87	17.88	426.85	68,9
110	21.30	133	296.92	23.87	18.10	432.19	68,7
111	21.75	132	301.06	23.87	18.47	440.77	68,3
112	21.01	132	303.40	23.87	18.68	445.72	68,1
113	21.43	131	307.14	23.86	19.01	453.72	67,7
114	21.63	130	308.88	23.86	19.18	457.53	67,5

Tablo5.2’de Golden Motor firmasının, elektrikli bisikletler için üretmiş olduğu MagicPie isimli Fırçasız DA motorun verimlilik tablosu verilmiştir. Bu motor sabit 24 voltluk ve 20 Amperlik güç kaynağı beslenmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarladığımız motorun ana fiziksel parametreler ile MagicPie’nin tasarladığı motor değerleri karşılaştırılmıştır. Projemizde güç kaynağı olarak iki adet *12 volt 3800Mah’lık 30 CC Li-Po Pil* kullanılmıştır. Golden Motor’un ürettiği motor ile karşılaştırılmıştır ve aynı değerlerde ki akım, Giriş - Çıkış güç değerleri ve verimleri karşılaştırılmıştır. Tablo 5.2.’MagicPie motor verimi ile tablo 5.1.’de ise projemizde tasarlanan motor sürücü devresinin değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Motor sürücü ve MagicPie veri karşılaştırması

Akım	MagicPie (Pout)	MagicPie (verim)	Motor sürücü(Pout)	Motor sürücü(verim)
0,7	12,09	38,2	10,90	62,0
1,8	33,83	57,6	31,50	69,4
3,9	71,56	71,0	74,00	75,3
5,4	93,56	73,9	107,60	79,0
7,0	124,26	75,8	141,90	80,4
9,5	157,80	76,1	195,80	81,7
10,7	177,97	75,8	221,60	82,2
12,8	200,92	75,1	267,10	82,8
15,0	230,96	73,6	315,00	83,3
18,0	264,12	71,5	380,50	83,8
20,3	289,16	69,4	426,40	83,3

<ul style="list-style-type: none"> • MagicPie motoru 9,5 Amperde maksimum verimi olan %76,1 de çalışmaktadır. • Eğer aynı mosfetler kullanılırsa; • $P_{mos} = (9,5^2) * (17,5 * 10^{-3}) = 1,57$ W Mosfetin kendi içinde harcanmaktadır. • MagicPie motoru maksimum verim aralığında çalıştığında $P(\text{motor}) \sim 242$W gücündedir. • 9,5 Amper akım çekerken MagicPie motoru %76,1 verimde çalışmaktadır. • 24 Volt sabit gerilimde 9,5 Amperde yaklaşık 158 watt motorun hareketi için enerji harcamaktadır. Giriş gücünden geriye kalan 60 Watt'lık enerji 	<ul style="list-style-type: none"> • Motor sürücümüz 18 Amperde maksimum verimi olan %83,8 de çalışmaktadır. • Eğer aynı mosfetler kullanılırsa; • $P_{mos} = (18^2) * (17,5 * 10^{-3}) = 5,67$ W Mosfetin kendi içinde harcanmaktadır. • Motor sürücümüz maksimum verimde çalışırken $P(\text{motor}) \sim 460$W gücündedir. • 9,5 Amper akım çekerken motor sürücü devremiz %81,7 verimde çalışmaktadır. • 25,2 Volt sabit gerilimde 9,5 Amperde yaklaşık 196 watt motorun hareketi için enerji harcamaktadır. Giriş gücünden geriye kalan 44 Watt'lık enerji
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

sürtünmeler ve mosfetin içerisinde harcanmaktadır.	sürtünmeler ve mosfetin içerisinde harcanmaktadır.
Yukarıda hesaplanan 9,5 Amperlik değerlere göre projemizde tasarlanan motor sürücü devresi ile MagicPie motor ve motor sürücüsüne göre yaklaşık 16 wattlık kazanç elde edilmektedir. İdeal koşullarda 3kW lık bir batarya için 220 Wattlık enerji kazancı elde edilmektedir. Hesaplanan bu akım değeri MagicPie motorunun en verimli olduğu değer aralığıdır.	
<ul style="list-style-type: none"> • 18 Amper akım çekerken MagicPie motoru %71,5 verimde çalışmaktadır. • 24 Volt sabit gerilimde 18 Amperde yaklaşık 265 watt motorun hareketi için enerji harcamaktadır. Giriş gücünden geriye kalan 105 Watt'lık enerji sürtünmeler ve mosfetin içerisinde harcanmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • 18 Amper akım çekerken MagicPie motoru %83,8 verimde çalışmaktadır. • 25,2 Volt sabit gerilimde 18 Amperde yaklaşık 380 watt motorun hareketi için enerji harcamaktadır. Giriş gücünden geriye kalan 73 Watt'lık enerji sürtünmeler ve mosfetin içerisinde harcanmaktadır.
Yukarıda hesaplanan 18 Amperlik değerlere göre projemizde tasarlanan motor sürücü devresi ile MagicPie motor ve motor sürücüsüne göre yaklaşık 32 wattlık kazanç elde edilmektedir. İdeal koşullarda 3kW lık bir batarya için hesaplandığında 265 Wattlık enerji kazancı elde edilmektedir. Hesaplanan bu akım değeri motor sürücümüz en verimli olduğu değer aralığıdır.	

Golden motorun verilerine göre MagicPie-2x, MagicPie-4, MagicPie-5, MagicPie-Edge olmak üzere 4 farklı sürümde üretilip piyasaya sürülmektedir. Bu motor sürümlerinin veri tabloları aynıdır. Farklı olarak son ürettiği motorlara bluetooth özelliği eklemiştir. Bu motorların her biri yılda yaklaşık 3000 adet satılarak toplam 12000 adet satılmaktadır. Bu tezde tasarlanan motor ve motor sürücü MagicPie motorlarından yaklaşık %7 daha fazla verimlidir. Her bir motor

ve sürücü devresinde 3 kW'lık batarya da 328 Wattlık kazanç elde edilmiştir. Bir yılda 12000 motor olarak hesaplandığında ($328 \times 12000 = 3.936.000 = 3936 \text{ kW}$) enerji kazancı elde edilmektedir. Türkiyede elektrik kW birim fiyatı (0,46£) 46 kuruştur. Bir yılda MagicPie motor ve sürücüsünü yerine bu tezde tasarlanan motor ve sürücüsü kullanıldığında ($3936 \times 0,46 = 1.810,56 \text{ £}$) kar elde edilmektedir.

Motor sürücü devresinde yapılan verimlilik çalışması;

- Tasarlanan motor sürücü devresi üretilen motor ile test edilerek motorun en verimli çalışma aralığı belirlendi
- 25 Volt - 18 Amper - 1600 devirde \sim %83 verim elde edildi.
- Deadtime (0.7ms) ayarlaması yapıldı. MOSFET' in açılıp açılıp kapanırken yüksek voltaja maruz kalması engellenerek uygun sıcaklıkta, optimum gerilim ve optimum güçte kullanılması sağlanmıştır.
- Manyetik sensörden gelen verilere göre komütasyon sıralaması takip edilerek motor fazları aktif duruma geldi ve motor ideal bir şekilde hareketi sağlanmıştır.
- MOSFET' lerin sıcaklığı anlık olarak ölçülmektedir. Kritik değer(50 °C) üzerine çıktığında fan otomatik olarak çalışarak MOSFET' ler üzerinde harcanan güç minimum seviyede tutulmuştur.
- Gövde üzerine yerleştirilen mıknatıslar eşit aralıklarla dizilerek ideal manyetik akı yoğunluğu oluşturulmuştur.
- Kullanıcı için arayüz tasarımı yapılmıştır. Veriler kablosuz olarak motoru kullanan kişiye mevcut enerjinin en verimli şekilde kullanılması sunulmuştur.

Motor sürücünün geliştirilmesi için yapılması gerekenler;

- Motor sürücü tasarımında iç direnci ($R_{DS(on)}$) anahtarlama elemanları kullanılmalıdır.
- Motorda kullanılan mıknatısların yüksek sıcaklığa dayanıklı ve verimli olmalıdır.

- Motor sürücü tasarımı yüksek gerilimli düşük akımlı (120 V – 30A gibi) devreler olarak tasarlanıp programlanmalıdır.
- Motorun stator kol uzunluğu tork ve manyetik alan şiddetini arttırmak için ideal uzunlukta ve silisyumlu sacıta yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- Cavagnino, Andrea, Seyedamin Saied, and Silvio Vaschetto. "Experimental Identification and Reduction of Acoustic Noise in Small Brushed DC Motors." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50(1) (2014): 317-326.
- Akin, B. and Bhardwaj, M., 2010. Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors. Texas instruments.
- Bayraktar, HC, and HH Balık. "The Control of Brushless DC Motors." (2015): 919-932.
- Chau, K.T. and Chan, C.C., 2007. Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), pp.821-835.
- Chun, T.W., Tran, Q.V., Lee, H.H. and Kim, H.G., 2014. Sensorless Control of BLDC Motor Drive for an Automotive Fuel Pump Using a Hysteresis Comparator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), pp.1382-1391.
- Demirbaş, Ş., Bal, G., Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Pozisyon Kontrolü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 4, sf. 455-469, Ankara, 1997.
- De Smedt, V., Thoné, J. and Wens, M., 2016, September. A 650 V, 3 A Three-Phase Fully-Integrated BLDC Motor Driver with Charge Pump and Level Shifters. In *European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC Conference 2016: 42nd* (pp. 277-280). IEEE.
- Dixon, Juan W., and L. A. Leal. "Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal." *IEEE transactions on power electronics* 17.2 (2002): 232-240.
- Golden Motor 2018 MagicPie Fırçasız Motor Datasheet. Erişim Tarihi: 01.11.2018 [https://www.goldenmotor.com/magicpie/MP performance %20data %20 24V. Pdf](https://www.goldenmotor.com/magicpie/MP_performance_%20data_%2024V.Pdf).
- Halkosaari, T., 2006, July. Optimal U/f-Control of High Speed Permanent Magnet Motors. In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* (Vol. 3, pp. 2303-2308). IEEE.
- Hasanusta, Kemal, and Necibe Füsün Oyman SERTELLER. "Fırçasız Doğru Akım Motorlarında (FSDAM) Optimal Hall Sensör Yerinin İncelenmesi ve Motora Etkisi." *Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering* 15.3 (2015).
- Hendershot, J.R. and Miller, T.J.E., 2010. Design of Brushless Permanent - Magnet Machines (pp. 15-64). Motor Design Books.
- Jang, S.M., Cho, H.W. and Choi, S.K., 2007. Design and Analysis of a High - Speed Brushless DC Motor for Centrifugal Compressor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), pp.2573-2575.
- Jeon, Y.S., Mok, H.S., Choe, G.H., Kim, D. K. and Ryu, J. S., 2000. A New Simulation Model of BLDC Motor with Real Back EMF Waveform. In *Computers in Power Electronics, 2000. COMPEL 2000. The 7th Workshop on* (pp. 217-220). IEEE.
- Joice, C.S., Paranjothi, S.R. and Kumar, V.J.S., 2013. Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor with Load Variations. *IEEE transactions on industrial informatics*, 9(2), pp.974-982.

- Karakulak, O., Yaz, O. ve diğerleri, [2012], "PIC Tabanlı Fırçasız DA Motor Sürücü Tasarımı", 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 29-30 Kasım, Balıkesir.
- Kenjo, T., ve Nagamori, S. (1985). Permanent-Magnet and Brushless DC Motors Clarendon Press, Oxford.
- Kim, H.W., Kim, K.T., Jo, Y.S. and Hur, J., 2013. Optimization Methods of Torque Density for Developing the Neodymium Free Spoke-Type BLDC Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), pp.2173-2176.
- Ko, J.S., Lee, J.H. and Youn, M.J., 1994. Robust Digital Position Control of Brushless DC Motor with Adaptive Load Torque Observer. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 141(2), pp.63-70.
- Lai, Y.S., Lee, K.Y., Tseng, J.H., Chen, Y.C. and Hsiao, T.L., 2007, September. Efficiency Comparison of PWM-Controlled and PAM-Controlled Sensorless BLDCM Drives for Refrigerator Applications. In *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE* (pp. 268-273). IEEE.
- Lee, B.K. and Ehsani, M., 2001. Advanced BLDC Motor Drive for Low Cost and High Performance Propulsion System in Electric and Hybrid Vehicles. In *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International* (pp. 246-251). IEEE.
- Lee, M. and Kong, K., 2018. Fourier-Series-Based Phase Delay Compensation of Brushless DC Motor Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1), pp.525-534.
- Lin, C.T., Hung, C.W. and Liu, C.W., 2008. Position Sensorless Control for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Drives. *IEEE transactions on power electronics*, 23(1), pp.438-444.
- Low, T.S., Lee, T.H., Tseng, K.J. and Lock, K.S., 1992. Servo Performance of a BLDC Drive with Instantaneous Torque Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(2), pp.455-462.
- Mehta, H., Joshi, V., Thakar, U., Kuber, M. and Kurulkar, P., 2015, June. Speed Control of PMSM with Hall Sensors Using DSP TMS320F2812. In *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on* (pp. 295-300). IEEE.
- Milivojevic, N., Krishnamurthy, M., Gurkaynak, Y., Sathyan, A., Lee, Y.J. and Emadi, A., 2012. Stability Analysis of FPGA-Based Control of Brushless DC Motors and Generators Using Digital PWM Technique. *IEEE transactions on industrial electronics*, 59(1), pp.343-351.
- Nasar, S.A., Unnewehr, L.E. and Boldea, I., 1993. Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors. CRC press.
- Nian, X., Peng, F. and Zhang, H., 2014. Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), pp.5798-5808.
- Ransara, H.S. and Madawala, U.K., 2011, June. A Low Cost Brushless DC Motor Drive. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on* (pp. 2723-2728). IEEE.
- Rodriguez, F. and Emadi, A., 2006, November. A Novel Digital Control Technique for Brushless DC Motor Drives: Steady State and Dynamics. In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on* (pp. 1545-1550). IEEE.

- Selek, Mustafa Berkant."Elektrikli Bisiklet Uygulaması" Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi (2014): 34.
- Shao, J., 2003. Direct back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Subramonium, A.N., Shetty, P. and Kumar, M.S., 2015, February. Closed Loop Control System Modeling of Permanent Magnet Brushless DC Motor. In Electronics and Communication Systems (ICECS), 2015 2nd International Conference on (pp. 787-791). IEEE.
- Tashakori, A. and Ektesabi, M., 2013, June. A Simple Fault Tolerant Control System for Hall Effect Sensors Failure of BLDC Motor. In Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on (pp. 1011-1016). IEEE.
- Tashakori, A., Hassanudeen, M. and Ektesabi, M., 2015, June. FPGA Based Controller Drive of BLDC Motor Using Digital PWM Technique. In Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on (pp. 658-662). IEEE.
- Uygun, D. and Solmaz, S., 2015, May. Design and Dynamic Study of a 6 kW External Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Drivetrains. In Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2015 IEEE 5th International Conference on (pp. 87-92). IEEE.
- Wang, Jiabin, et al. "Modular Three-Phase Permanent-Magnet Brushless Machines for In-Wheel Applications." IEEE Transactions on Vehicular Technology 57.5 (2008): 2714-2720.
- Xia, C.L., 2012. Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. John Wiley & Sons.
- Xing, X., Shi, C. and Qiu, J., 2016, October. Design and Operation Simulation of a Direct-Drive In-Wheel Motor for EV. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE (pp. 1-5). IEEE.
- Yedamale, P., 2003. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. Microchip Technology Inc, 20, pp.3-15.
- Yıldız, T. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009
- Yılmaz, M. (2015). Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yılmaz, M., Tuncay, R. N., & Üstün, Ö. (2011). Fırçasız DA motorunun (FDAM) Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması. İTÜDERGİSİ/d, 5(3).

EKLER

EK A. Motor Sürücü Yazılımı Konfigürasyon Algoritması

EK B. Motor Sürücü Yazılımı Kontrol Algoritması



EK A. Motor Sürücü Yazılımı Konfigürasyon Algoritması

```
#include "main.h"
#include "stm32f1xx_hal.h"

/* USER CODE BEGIN Includes */

/* USER CODE END Includes */

/* Private variables -----*/
ADA_HandleTypeDef haDA1;
DMA_HandleTypeDef hdma_aDA1;

TIM_HandleTypeDef htim1;
TIM_HandleTypeDef htim3;

UART_HandleTypeDef huart3;

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

uint32_t aDA_okunan[8];

/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_ADA1_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);
static void MX_TIM3_Init(void);
static void MX_USART3_UART_Init(void);

void HAL_TIM_MspPostInit(TIM_HandleTypeDef *htim);

/* USER CODE BEGIN PFP */
/* Private function prototypes -----*/
uint32_t pot;
/* USER CODE END PFP */

/* USER CODE BEGIN 0 */
void HAL_ADA_ConvCpltCallback(ADA_HandleTypeDef* haDA)
{
```

```

if(haDA->Instance==ADA1)
{
pot =aDA_okunan[0];

}
}
/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 *
 * @retval None
 */
int main(void)
{
/* USER CODE BEGIN 1 */

/* USER CODE END 1 */

/* MCU Configuration-----*/

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

/* USER CODE BEGIN Init */

/* USER CODE END Init */

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

/* USER CODE BEGIN SysInit */

/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_DMA_Init();
MX_ADA1_Init();
MX_TIM1_Init();
MX_TIM3_Init();
MX_USART3_UART_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);

```

```

////////////////////////////////////
HAL_ADAEx_Calibration_Start(&haDA1);
HAL_ADA_Start_DMA(&haDA1,(uint32_t*)aDA_okunan,8);
HAL_ADA_Start_IT(&haDA1);

/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
HAL_ADA_Start_IT(&haDA1);

/* USER CODE END WHILE */

/* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
}

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{

RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct;
RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct;
RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit;

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

```

```

/**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
*/
RCC_ClkInitStruct.ClockType                                =
    RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
    |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
RCC_ClkInitStruct.SYSClockSource = RCC_SYSCLOCKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLOCK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_ADA;
PeriphClkInit.ADAClockSelection = RCC_ADAPCLK2_DIV6;
if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

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

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

/* SysTick_IRQn interrupt configuration */
HAL_NVIC_SetPriority(SysTick_IRQn, 0, 0);
}

/* ADA1 init function */
static void MX_ADA1_Init(void)
{
    ADA_ChannelConfTypeDef sConfig;

    /**Common config
    */
    haDA1.Instance = ADA1;
    haDA1.Init.ScanConvMode = ADA_SCAN_ENABLE;
    haDA1.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
    haDA1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    haDA1.Init.ExternalTrigConv = ADA_SOFTWARE_START;
    haDA1.Init.DataAlign = ADA_DATAALIGN_RIGHT;
    haDA1.Init.NbrOfConversion = 8;
}

```



```

if (HAL_ADA_Init(&haDA1) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

/**Configure Regular Channel
*/
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_0;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_1;
sConfig.SamplingTime = ADA_SAMPLETIME_239CYCLES_5;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

/**Configure Regular Channel
*/
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_1;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_2;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

/**Configure Regular Channel
*/
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_2;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_3;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

/**Configure Regular Channel
*/
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_5;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_4;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

/**Configure Regular Channel
*/
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_6;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_5;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(_FILE_, _LINE_);
}

```

```

}

/**Configure Regular Channel
 */
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_7;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_6;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

/**Configure Regular Channel
 */
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_11;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_7;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

/**Configure Regular Channel
 */
sConfig.Channel = ADA_CHANNEL_12;
sConfig.Rank = ADA_REGULAR_RANK_8;
if (HAL_ADA_ConfigChannel(&haDA1, &sConfig) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}
}

/* TIM1 init function */
static void MX_TIM1_Init(void)
{

TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig;
TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC;
TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig;

htim1.Instance = TIM1;
htim1.Init.Prescaler = 7;
htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_CENTERALIGNED3;
htim1.Init.Period = 7900;
htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}
}

```

```

}

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

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

if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) !=
    HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_3) !=
    HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 255;
sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput =
    TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig) !=
    HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

```

```

    HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);

}

/* TIM3 init function */
static void MX_TIM3_Init(void)
{
    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig;
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC;

    htim3.Instance = TIM3;
    htim3.Init.Prescaler = 0;
    htim3.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim3.Init.Period = 0;
    htim3.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim3.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
    if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim3) != HAL_OK)
    {
        _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
    }

    sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
    sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
    if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim3, &sMasterConfig) !=
        HAL_OK)
    {
        _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
    }

    sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC.Pulse = 0;
    sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
    sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
    if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim3, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) !=
        HAL_OK)
    {
        _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
    }

    HAL_TIM_MspPostInit(&htim3);

}

/* USART3 init function */
static void MX_USART3_UART_Init(void)
{
    huart3.Instance = USART3;

```

```

huart3.Init.BaudRate = 115200;
huart3.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
huart3.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
huart3.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
huart3.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
huart3.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
huart3.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
if (HAL_UART_Init(&huart3) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

}

/**
 * Enable DMA controller clock
 */
static void MX_DMA_Init(void)
{
    /* DMA controller clock enable */
    __HAL_RCC_DMA1_CLK_ENABLE();

    /* DMA interrupt init */
    /* DMA1_Channel1_IRQn interrupt configuration */
    HAL_NVIC_SetPriority(DMA1_Channel1_IRQn, 0, 0);
    HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA1_Channel1_IRQn);
}

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

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

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, Durum2_Pin|Durum1_Pin, GPIO_PIN_RESET);

```

```

/*Configure GPIO pin : P_s_cakl_k_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = P_s_cakl_k_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(P_s_cakl_k_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pins : Durum2_Pin Durum1_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = Durum2_Pin|Durum1_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pins : hall_A_Pin hall_B_Pin hall_C_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = hall_A_Pin|hall_B_Pin|hall_C_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_RISING_FALLING;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);

/* EXTI interrupt init*/
HAL_NVIC_SetPriority(EXTI9_5_IRQn, 0, 0);
HAL_NVIC_EnableIRQ(EXTI9_5_IRQn);
}

```

EK B. Motor Sürücü Yazılımı Kontrol Algoritması

```
#include "stm32f1xx_hal.h"
#include "stm32f1xx.h"
#include "stm32f1xx_it.h"

/* USER CODE BEGIN 0 */
extern TIM_HandleTypeDef htim1;
extern uint32_t pot;
/* USER CODE END 0 */

/* External variables -----*/
extern DMA_HandleTypeDef hdma_aDA1;
extern ADA_HandleTypeDef haDA1;

/*****
 /
 /* Cortex-M3 Processor Interruption and Exception Handlers */
 *****/

/**
 * @brief This function handles Non maskable interrupt.
 */
void NMI_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN NonMaskableInt_IRQn 0 */

    /* USER CODE END NonMaskableInt_IRQn 0 */
    /* USER CODE BEGIN NonMaskableInt_IRQn 1 */

    /* USER CODE END NonMaskableInt_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Hard fault interrupt.
 */
void HardFault_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN HardFault_IRQn 0 */

    /* USER CODE END HardFault_IRQn 0 */
    while (1)
    {
        /* USER CODE BEGIN W1_HardFault_IRQn 0 */
        /* USER CODE END W1_HardFault_IRQn 0 */
    }
}
```

```

/* USER CODE BEGIN HardFault_IRQn 1 */

/* USER CODE END HardFault_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Memory management fault.
 */
void MemManage_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN MemoryManagement_IRQn 0 */

/* USER CODE END MemoryManagement_IRQn 0 */
while (1)
{
/* USER CODE BEGIN W1_MemoryManagement_IRQn 0 */
/* USER CODE END W1_MemoryManagement_IRQn 0 */
}
/* USER CODE BEGIN MemoryManagement_IRQn 1 */

/* USER CODE END MemoryManagement_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Prefetch fault, memory access fault.
 */
void BusFault_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN BusFault_IRQn 0 */

/* USER CODE END BusFault_IRQn 0 */
while (1)
{
/* USER CODE BEGIN W1_BusFault_IRQn 0 */
/* USER CODE END W1_BusFault_IRQn 0 */
}
/* USER CODE BEGIN BusFault_IRQn 1 */

/* USER CODE END BusFault_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Undefined instruction or illegal state.
 */
void UsageFault_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN UsageFault_IRQn 0 */

/* USER CODE END UsageFault_IRQn 0 */
}

```



```

while (1)
{
/* USER CODE BEGIN W1_UsageFault_IRQn 0 */
/* USER CODE END W1_UsageFault_IRQn 0 */
}
/* USER CODE BEGIN UsageFault_IRQn 1 */

/* USER CODE END UsageFault_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles System service call via SWI instruction.
 */
void SVC_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN SVCcall_IRQn 0 */

/* USER CODE END SVCcall_IRQn 0 */
/* USER CODE BEGIN SVCcall_IRQn 1 */

/* USER CODE END SVCcall_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Debug monitor.
 */
void DebugMon_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN DebugMonitor_IRQn 0 */

/* USER CODE END DebugMonitor_IRQn 0 */
/* USER CODE BEGIN DebugMonitor_IRQn 1 */

/* USER CODE END DebugMonitor_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles Pendable request for system service.
 */
void PendSV_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN PendSV_IRQn 0 */

/* USER CODE END PendSV_IRQn 0 */
/* USER CODE BEGIN PendSV_IRQn 1 */

/* USER CODE END PendSV_IRQn 1 */
}

```

```

/**
 * @brief This function handles System tick timer.
 */
void SysTick_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 0 */

    /* USER CODE END SysTick_IRQn 0 */
    HAL_IncTick();
    HAL_SYSTICK_IRQHandler();
    /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 1 */

    /* USER CODE END SysTick_IRQn 1 */
}

/*****
 /
 /* STM32F1xx Peripheral Interrupt Handlers          */
 /* Add here the Interrupt Handlers for the used peripherals. */
 /* For the available peripheral interrupt handler names, */
 /* please refer to the startup file (startup_stm32f1xx.s). */
 *****/

/**
 * @brief This function handles DMA1 channel1 global interrupt.
 */
void DMA1_Channel1_IRQHandler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN DMA1_Channel1_IRQn 0 */

    /* USER CODE END DMA1_Channel1_IRQn 0 */
    HAL_DMA_IRQHandler(&hdma_aDA1);
    /* USER CODE BEGIN DMA1_Channel1_IRQn 1 */

    /* USER CODE END DMA1_Channel1_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles ADA1 and ADA2 global interrupts.
 */
void ADA1_2_IRQHandler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN ADA1_2_IRQn 0 */

    /* USER CODE END ADA1_2_IRQn 0 */
    HAL_ADA_IRQHandler(&haDA1);
    /* USER CODE BEGIN ADA1_2_IRQn 1 */
}

```

```

/* USER CODE END ADA1_2_IRQn 1 */
}

/**
 * @brief This function handles EXTI line[9:5] interrupts.
 */
void EXTI9_5_IRQHandler(void)
{
/* USER CODE BEGIN EXTI9_5_IRQn 0 */

/* USER CODE END EXTI9_5_IRQn 0 */
HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_6);
HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_7);
HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_8);
/* USER CODE BEGIN EXTI9_5_IRQn 1 */

if
(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_
    B_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==0))
{
TIM1->CCR1=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);

    }

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
if
((HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall
    _B_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==0))
{
TIM1->CCR1=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

```

```

HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_3);

}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
if
((HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall
_B_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==1))
{
TIM1->CCR1=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);

}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

if
((HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall
_B_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==1))
{
TIM1->CCR1=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);

}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

```

```

if
((HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall
    _B_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==1))
{
TIM1->CCR1=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

if
((HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_A_Pin)==1)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPI
    OB,hall_B_Pin)==0)&&(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB,hall_C_Pin)==0))
{
TIM1->CCR1=pot;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_1);

TIM1->CCR2=0;
HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1,TIM_CHANNEL_2);

TIM1->CCR3=0;
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_3);
}
CODE END EXTI9_5_IRQn 1 */
}

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer ALACA

Doğum Yeri ve Yılı : Giresun,1992

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : omeralaca28@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Giresun Atatürk Lisesi, 2010

Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme
Mühendisliği

Mesleki Deneyim

ISUBÜ Yalvaç Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu 2017-2018