



FIRÇASIZ MOTOR SÜRÜCÜLERİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Ömer ALACA^{*1}, Reşat SELBAŞ², Mesut TÜRKKALESİ¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta

Makale Bilgisi

Geliş tarihi: 19.01.2019

Kabul Tarihi: 19.05.2022

Yayın tarihi: 30.06.2022

Anahtar Kelimeler;
Verimlilik, Güç
Elektronik, Güç
Komütasyon, Alternatif
Enerji

ÖZET

Yıllar geçtikçe hızla ilerleyen motor teknolojisi sektörü, içten yanmalı motor (Benzinli ve motorinli motorlar vb.) teknolojisinin yanı sıra, artık alternatif enerjiler ile çalışan motor yapım ve üretimi için Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır. Elektrik motorları kendi içinde alternatif akım ile çalışan veya doğru akım kaynağı (batarya) ile çalışan olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Son yıllarda Fırçasız DC Motorlar diğer DC motorlara ve AC motorlara göre daha çok tercih edilmektedir. Bu motorların tercih sebebi verimli, yüksek performanslı ve bakım gerektirmemesidir.

Fırçasız DC motorlar "inrunner" ve "outrunner" olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Stator bağlantıları "yıldız" veya "delta" sargılar olarak iki farklı şekilde ile sarılmaktadır. Aynı zamanda Fırçasız DC motorlar sensörlü Fırçasız DC motor ve sensörsüz Fırçasız DC motor olarak üretilmektedir. Sensörlü Fırçasız DC motorlar üzerindeki sensör yardımı ile rotorun(gövdenin) hareketi ve konum açısı hakkında bilgi alınmaktadır. Sensor ile konum bilgisi alınarak motor sürücüyü hangi kanalı açması konusunda geri bildirim yapılmaktadır. Yapılan geri bildirim ile komütasyon ayarı yapılarak kontrol esnasında yaşanabilecek olan enerji kayıpları minimum seviyede tutulmuş olunacaktır.

Motor sürücü devresinde verimliliği arttırmak için motorun fazlarının çektiği akım, üzerinden geçen gerilim, motorun devri, motorun ve motor sürücünün anlık sıcaklık bilgileri bilinmelidir. Kullanıcı bu bilgiler doğrultusunda bataryanın enerjisini verimli bir şekilde kullanabilecektir.

ENERGY EFFICIENCY OF BRUSHLESS MOTOR DRIVERS

Article Info

Received: 19.01.2019

Accepted: 19.05.2022

Published: 30.06.2022

Keywords;
Efficiency, Power
Electronics,
Commutation,
Alternative Energy

ABSTRACT

The motor technology industry, which has progressed rapidly over the years (Fuel and motorized engines) Research & Development activities for engine construction and production, which are now working with alternative energies. Electric motors are produced in two ways, either working with alternative energy or working with direct current source (battery). Brushless DC motors have been preferred over other DC motors and AC motors in recent years. The reason for preference of these engines is efficient, high performance and maintenance is not required

Brushless DC motors are produced in two forms as "inrunner" and "outrunner". Stator connections are wrapped in two different ways as "star" or "delta" windings. At the same time, Brushless DC motors are manufactured as Brushless DC motor with sensor and Brushless DC motor without sensor. With the aid of the sensor on the brushless DC motors with sensor, information about the movement of the rotor (the body) and the position angle are obtained. The position information of the sensor is taken and feedback is given to the motor driver about which channel is opened. By setting the commutation with the feedback, the energy losses that can be experienced during the control will be kept at the minimum level.

In order to increase the efficiency in the motor drive cycle, the current drawn by the motor phases, the voltage passing through it, the motor revolution, the instantaneous temperature information of the motor and the motor driver must be known. The user will be able to use the energy of the battery efficiently in accordance with this information.

1. Giriş

Enerji ihtiyacı yıllar ilerledikçe her alanda artmaktadır. Sanayi ve endüstriyel alanlarda 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. Motorların üzerine düşen yük arttığında verimin %5-%8 aralığında azaldığını, bu düşüşün motor sürücünün kontrol algoritmalarını kullanarak %2-%3 seviyelerinde geriletilmesi çalışması yapılmıştır.

Genel olarak sanayide endüstride veya herhangi bir alanda kullanılan motorların en az enerji ile en iyi performans sergilenmesi beklenmektedir. Başka bir ifade ile giriş enerji ile çıkış enerjisinin aynı olması beklenmektedir. Bu yüzden 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 DC motorlardır. Fırçalı DC motorlar; yüksek kalkış momentine, doğrusal bir moment-hız karakterine sahiptir. Yani Fırçasız DC motorların sağladığı bazı avantajları sağlamaktadır. Fakat fırçalı DC motorların yapısında bulunan fırça ve kollektör düzeneklerinden dolayı sürtünme oluşması nedeniyle motor bakımının sık sık yapılması gerekmektedir. Bu durum verimi düşürmekte ve maliyeti arttırmaktadır. Klasik(fırçalı) motorların bu dezavantajları göz önüne alınarak Fırçasız DC 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 çıkmasına neden olmuştur. Bu tip motorlardan en yaygın olanı, son yıllarda kullanımı giderek artan fırçasız DC motorlardır. Fırçasız DC 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 DC motorlar; bilgisayarlarda, uzay araçlarında, askeri ekipmanlarda, otomotivde, endüstride ve ev gereçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shao, 2003).

Fırçasız DC motorlar, uzay sistemlerinde, otomotiv sektöründe, savunma sanayinde, robotik sistemlerde, tıp elektroniklerinde, bilgisayar sistemlerinde, ev aletlerinde yani günümüzde pek çok endüstriyel faaliyet gösteren her alanda kullanılmaktadır. Fırçasız DC motorların sahip olduğu avantajları sıralarsak; verimleri çok yüksektir, yapıları sağlamdır, güvenilirliği yüksektir, yapılarında fırça olmaması nedeniyle ark veya kıvılcım oluşmaz, karbon toz salınımı yapmaz, yüksek tork ve 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 sessiz çalışırlar. Sahip oldukları bu avantajların yanı sıra, belli başlı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar; maliyetlerinin yüksekliği, genel olarak pozisyon sensör kullanım gerekliliği ve karmaşık bir kontrol devresine ve kontrol algoritmasına sahip olması gibi nedenlerdir (Karakulak ve Yaz, 2012).

2. Kaynak Özeti

Fırçasız DC motorlar yüksek güç yoğunluğu, yüksek güvenilirlik, yüksek verimlilik, düşük gürültü ve basit bir yapıdadır. Fırçasız DC motorlar bu özellikleri sayesinde; endüstriyel kontrol sistemlerinde, otomotiv sektöründe, tıbbi ekipmanlarda, beyaz eşya sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Fırçasız DC motorlarda, fırçalı motorlardaki fırça-komütatör yapısı güç transistörleri kullanılarak anahtarlama yapılmaktadır. Bu yapı ile birlikte stator üzerinden akan akımın yönü, gövdeye yerleştirilmiş sabit mıknatısların kutuplarının konumunu algılamasıyla gerçekleşmektedir. Motorun gövdesinin konumunun belirlenmesi işlemi hall (manyetik) sensörü kullanılarak tespit edilmektedir. Konumu tespit edilen gövdenin konumuna göre güç transistörlerinden oluşmuş motor sürücü devresi ile sırasıyla stator kutupları enerjilendirilmektedir (Xu vd. 2013).

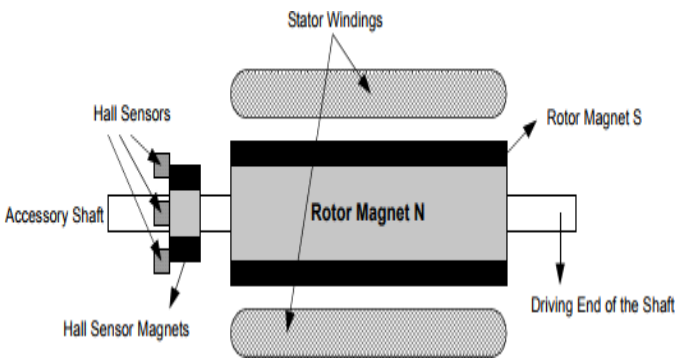
Fırçasız DC motorlar yüksek verimi, kompaktlığı, düşük maliyeti ve bakımının kolay olmasından dolayı endüstride giderek daha fazla kullanılmaya

başlanmaktadır. Özellikle de havalandırma ve kompresörler de kullanılmaktadır. Fırçasız DC motorların yüksek hızla dönmesi, rulman teknolojisinin gelişmesi ile birlikte dakika başına on binlerce devir sayısına (rpm / dk) kadar çıkabilmektedirler (Cavagnino vd. 2014).

Fırçasız dc motorlarda akımın yön değiştirme işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren dc motorlarda, rotordaki sarımlara elektrik iletimi fırçakolektör 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 DC 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 yüksek olmasının en büyük sebeplerindendir. Gövdeye sabitlenen mıknatısları ile statoru sabit inrunner ve outrunner tahrik sağlayan motorlardır. Fırçasız DC motorların yapısı ve sürülmesi beş birimden oluşmaktadır. Sabit mıknatıslı bir gövde, üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen stator, konum algılayıcı sensorler ile akım ve hız geri besleme bilgileri, sürücü birimi(mosfetler), mikro denetleyicilerdir (Dixon ve Leal,2002).

Motorun gövdesinin konumunu belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri manyetik sensör kullanmaktır. Statorun yüzeyine monte edilmiş 3 adet sensör bulunmaktadır. Bu sensörler gövdeye 60° veya 120°'lik açılarla monte edilmektedir. Gövde dönerken manyetik sensöre dönüş hız ve konumuna göre sinyal çıkışları vererek motor konumu hakkında bilgiler elde edilmektedir (Yedamale ve Padmaraja, 2003).

Şekil 1’de hallsensör bağlantısı verilmiştir.

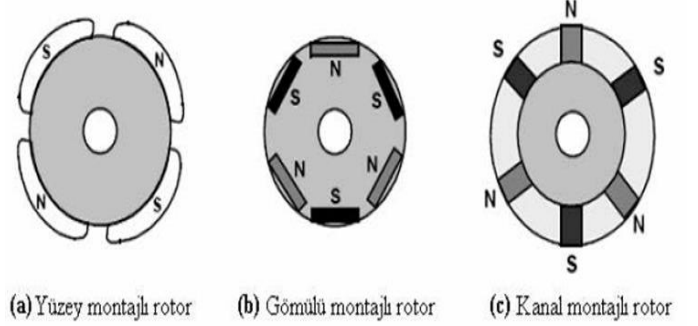


Şekil 1: Hallsensör bağlantısı

BLDC motorlar, gövdeye sabit mıknatıslar monte edilmiş, dairenin bir parçası olacak şekilde monte

edilerek üretilir. Gövdedeki mıknatıs sayısı maksimum dönme hızıyla ters orantılıdır. BLDC motorlar gövdedeki mıknatısların yerleşim yerlerine göre 3 şekildedir; (Şekil 2)

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



Şekil 2. Gövde mıknatıs montajları.

(Mehta ve Hrishikesh, 2015) yaptıkları 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 sarımları enerjilendirir. Uygulanacak olan voltaj ile motor devri sabit olarak hareket sağlanacaktır. Voltaj PWM darbeleri şeklinde olursa motor maksimum ve minimum devirlerde kontrol edilecektir. Tablo 1’de manyetik sensörlerin çıkışlarına göre mosfetlerin açık ve kapalı olma durumları gösterilmektedir.

Tablo 1. Mosfet manyetik sensör değerlerine göre voltajları

| 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 |

Günümüzde BLDC motorların stator sargıları genel olarak dağıtılmış(atlamalı) olarak

üretilmektedir. BLDC motorlarda sargı kolları uzun olduğundan dolayı moment yoğunluğu, stator kollarına düşen akım ve verim düşmektedir. BLDC motorların verimini artırmak için dağılmış sargı yerine konsantrik sargı kullanılmıştır. Bu durum “Kesirli Oluk Sargılı BLDC motor” olarak geçmektedir (Hendershot vd. 1994; Wang vd. 2008).

Fırçasız DC 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 çok zayıftır (Jang vd. 2007).

Fırçasız DC 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 DC 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).

3. Materyal ve Metot

Bu bölümde fırçasız DC motorun ve fırçasız DC motor sürücüsünün tasarımları hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Farklı tasarım modelleri incelenerek veriler elde edilmiştir.

3.1. Fırçasız DC Motorlar

Fırçasız DC Motorlar; komütasyon işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırça içeren DC 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 DC motorlarında

fırça-kollektör düzeneğinin yani kamütasyon görevini elektronik birdenetleyici, motor sürücüler üstlenir. Kamütasyon; akımın yön değiştirmesi 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 DC motorların birçoğunda rotor pozisyonu için Hall effect sensörleri kullanılmaktadır(Bayraktar ve Balık, 2015).

Fırçasız DC motorlar;

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

3.2. Fırçasız Motorların Avantaj 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 devirlerde çalışır,
- Boyutları diğer motorlara göre daha küçük, devir, tork ve momentleri daha yüksektir,
- Diğer motorlara göre daha az ısınırlar.

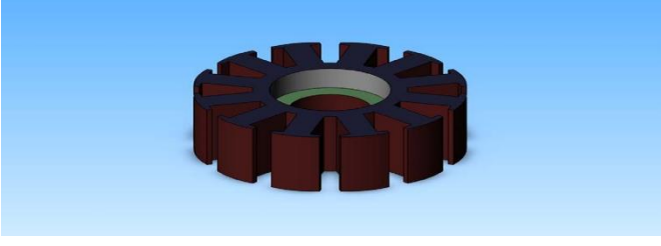
Dezavantajları;

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

3.3. Fırçasız DC Motor Statoru

Fırçasız DC motorların statorları AC motorların statorlarına benzemektedir. Stator genel olarak silisyumlu saçlardan imal edilmektedir. Fırçasız DC motorların statorları yıldız(Y) ve delta(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'te on iki kollu stator verilmiştir.



Şekil 3. On iki kollu stator.

3.4. Fırçasız DC Motor Rotoru

Fırçasız DC motorların rotorları genel olarak mıknatısların yerleştirildiği dış gövde kısmıdır. Motorun statoruna bağlı olarak rotorun kutup sayısı belirlenmektedir. Kutup sayıları arttıkça motorun tork seviyesi de artmaktadır. Torkun fazla olması devirin ve hızın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 3.2' de mıknatısların yerleşim yerleri belirli olan rotor çizilmiştir.



Şekil 4. Daimi mıknatıslı rotor.

3.5. Fırçasız DC Motorun Çalışması

Fırçasız DC 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 DC motorlar, elektronik komütasyona sahip yeni bir DC motor olarak düşünülebilir. 1970'lerden beri endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Fırçasız DC motorları yüksek verimlilik ve hassas kontrol edilebilirlik özelliklerinden dolayı birçok uygulamada ilk sırada tercih edilmektedir (Lee ve Ehsani, 2001).

3.6. Fırçasız Motor Sürücülerde Kullanılan Güç Transistörleri

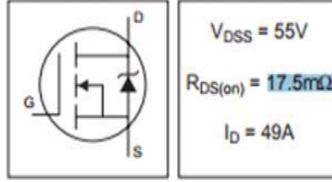
Fırçasız DC motor sürücülerde genellikle güç transistörleri olarak MOSFET ya da IGBT kullanılmaktadır. Yüksek gerilim ve akımda IGBT tercih edilir. Nominal gerilimde ise MOSFET tercih edilmektedir. Normal BJT transistörler akım ile anahtarlama yapılırken, MOSFET ve IGBT ise gerilim ile anahtarlama yapılmaktadır. Bundan dolayı gate akımı nanoamper(nA) seviyelerindedir. Vgs gerilimi yükseldikçe MOSFET'in 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 18 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 datasheetde belirtildiği değerleri gate ucuna uygulayarak anahtarlama yapılabilir. 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 drain gerilimi yine MOSFET in datasheet değerine göre değişmektedir (Şekil 5).

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

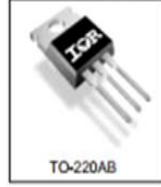
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

| Parameter | Max. | Units |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|
| $I_D @ T_C = 25^\circ C$ | 49 | A |
| $I_D @ T_C = 100^\circ C$ | 35 | A |
| I_{DM} | 160 | A |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$ | 94 | W |
| Linear Derating Factor | 0.63 | W/°C |
| V_{GS} | ± 20 | V |
| I_{AS} | 25 | A |
| E_{AS} | 9.4 | mJ |
| dv/dt | 5.0 | V/ns |
| T_J | -55 to +175 | °C |
| T_{STG} | | °C |
| Soldering Temperature, for 10 seconds | 300 (1.6mm from case) | |
| Mounting torque, 6-32 or M3 screw | 10 lbf-in (1.1N-m) | |

Thermal Resistance

| Parameter | Typ. | Max. | Units |
|-----------|------|------|-------|
| R_{JC} | — | 1.5 | °C/W |
| R_{CS} | 0.50 | — | °C/W |
| R_{JA} | — | 62 | °C/W |

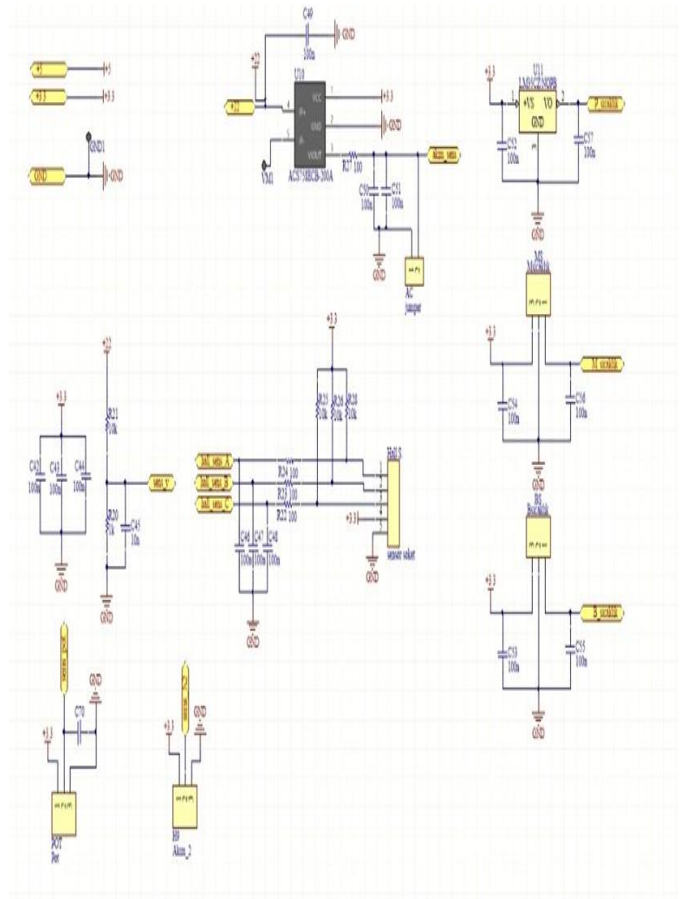
Şekil 5. IRFZ44N datasheet.

4. Araştırma Bulguları

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

4.1 Fırçasız DC Motor Sürücü Tasarımı

Motor sürücü tasarımın Altium Designer pcb devre çizim programında tasarlanmıştır. Motor sürücü devresinde güç mosfetleri olarak IRFZ44N, mosfet sürücüleri olarak IR2104 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 halleffect sensör çıkışları da çizimlere eklenmiştir. Bu eklenen sensörler ve diğer komponentlerin hepsi ayrı ayrı şematik şekiller üzerinde çizilmiştir (Şekil 6).



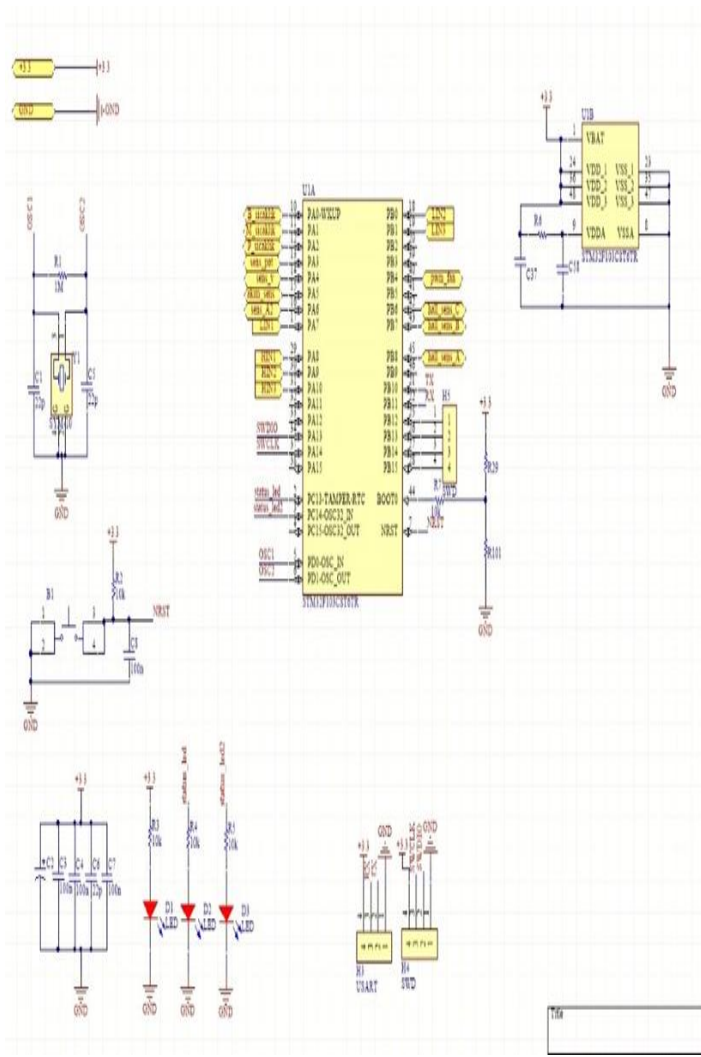
Şekil 6. Akım sensörü, sıcaklık sensörü, halleffect sensör şematiği.

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

LM35CZNOPB sıcaklık sensörü, her bir $^\circ C$ de 10 mVluk hassasiyette ölçüm yapmaktadır. Sensör 4-30 volt arasındaki besleme gerilimleri ile çalışmaktadır. -55 ile $+150^\circ C$ arasındaki sıcaklık değerlerini ölçmektedir. Sensör 60 μA gibi çok değerlikte bir akım çekmektedir.

A1126 Halleffect sensörü, mıknatısları gördükçe dijital olarak çıkış vermektedir. 3-24 V arasında giriş gerilimi ile beslenmektedir. Sensör çıkış verirken maksimum 10 μA 'lik çok küçük değerli akım kullanmaktadır. Sensörde ters akım koruması mevcuttur. Sıcaklık aralığı -55 ile $150^\circ C$ arasında olduğu sürece çıkış verebilmektedir. Optimum olarak sıcaklık $85^\circ C$ 'yi geçtiğinde mıknatıslar özelliğini kaybedeceğinden sensörün çıkış vermesi beklenmemektedir. Şekil 7'de motor sürücü

mikroişlemci katı şematığı verilmiştir.



Şekil 7. Motor sürücü mikroişlemci katı şematığı.

Stm32f103c8t6;

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

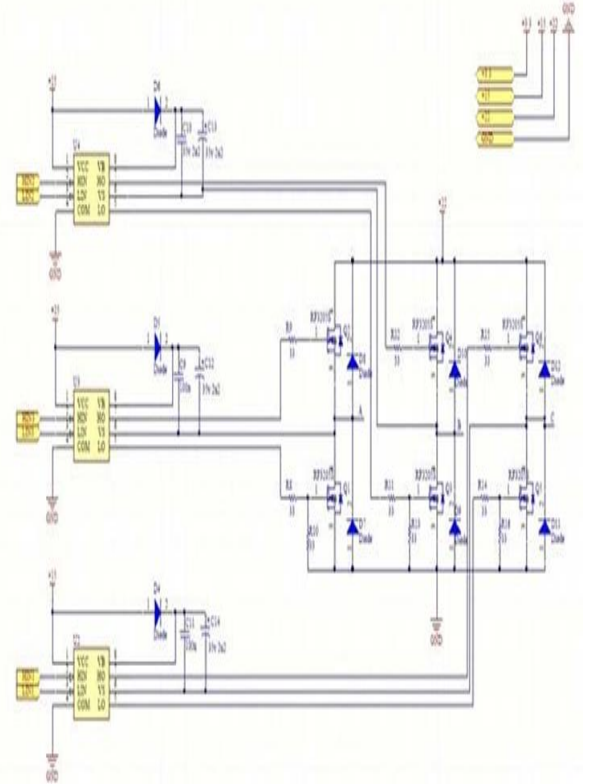
Yazılan algoritma kodunu yüklemek için mikroişlemci üzerindeki SWD pinleri kullanılarak yükleme yapılacaktır. Yazılan kodlar .hex dosyası olarak kaydedilip, bu kaydedilen dosya mikroişlemciye yüklenecektir.

Aşağıdaki şekilde Fırçasız DC motoru sürmek için halfbridge devresi kurulmuştur. IRF3205 MOSFET'leri sürmek için ir2106 mosfet sürücülerini kullanılmaktadır. IRF3205 MOSFET;

- Drain Gerilimi 55V

- Rds(on) direnci 8mΩ
- Maksimum akım 110

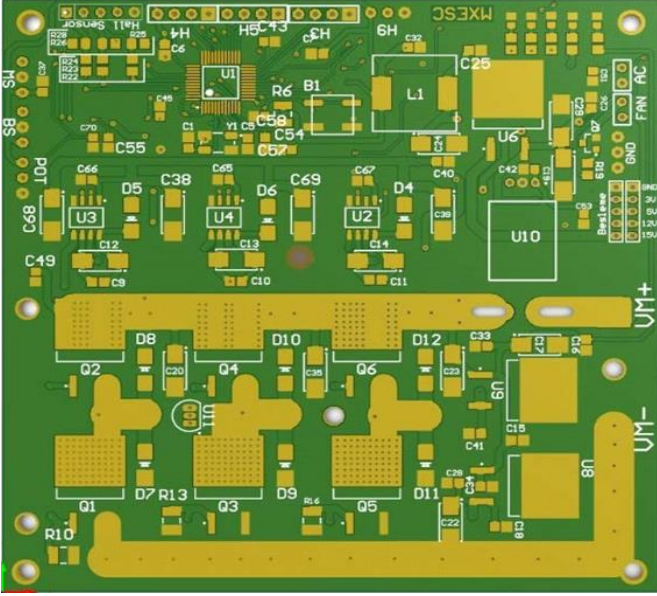
Yukarıdaki değerlere göre MOSFETİN Drain ucuna maksimum uygulanacak gerilim 55V'tur. Kurulacak olan deney düzeneğinde Drain ucuna iki tane Li-Po piller seri bağlanarak yaklaşık 22 Voltluk gerilimle beslenecektir. MOSFET maksimum 110 amper akım geçebilir ve bu değerden sonra MOSFET yüksek sıcaklıklara 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 regülatör yardımı ile elde edilecektir. MOSFET'i sürmek için datasheette belirtilen Rds(on) direnç değerini 0'a yaklaştırdıktan sonra MOSFET iletime geçmektedir. Şekil 8'de motor sürücü MOSFET katı şematığı verilmiştir.



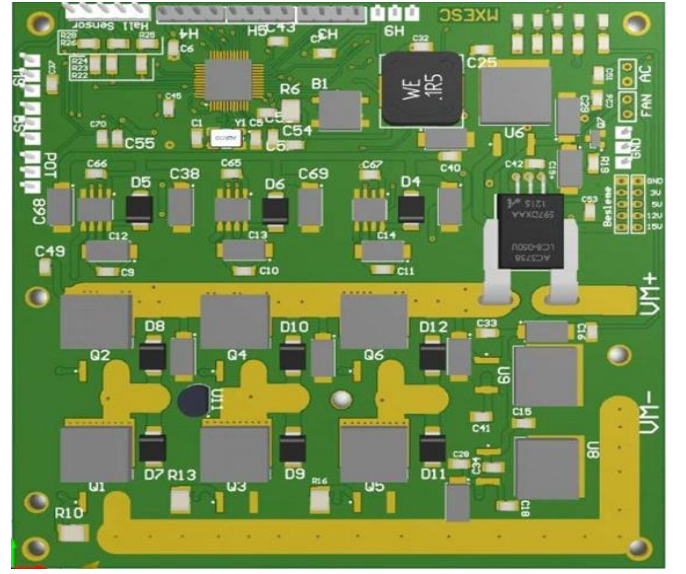
Şekil 8. Motor sürücü MOSFET katı şematığı.

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. Örneğinır2104 MOSFET sürücü içerisinde mevcut deadtime bulunmaktadır. Fakat projemizde kullanılan ır2106 MOSFET sürücüsünde kendi içerisinde deadtime mevcut değildir. Bu durumda deadtime yazılımsal olarak eklenmektedir. Şekil 9 ve 10'da sırasıyla iki ve üç boyutlu PCB verilmiştir.



Şekil 9. İki boyutlu PCB.



Şekil 10. Üç boyutlu PCB.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Fırçasız DC motor sürücülerin en verimli şekilde tasarlanması ve kullanıcıya da aynı verimlilik ile sunulması üzerinde çalışılmıştır. Başlangıçta fırçasız DC motorların yapısından bu yapının avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Fırçasız DC motorların diğer motor türlerine göre farklılıkları, çalışma şekli ve motor sürücü yapısından bahsedilmiştir.

Fırçasız DC motorların sürücü devrelerinin diğer motorlara göre farklı olduğunu ve yapısının 3 fazdan oluştuğuna dikkat edilmiştir. Motor dönerken faz konumlarını belirlemek için sürücü devresine geri bildirim yapması gerektiği bilinmektedir. Bu durumu sağlamak için ise sensörlü ve sensörsüz olarak yapılabileceği tespit edilmiştir. Gelen konum bilgisine göre motor sürücünün güç devrelerinin fazlarını sırasıyla açması gerektiği tespit edilmiştir. Üç fazdan oluşan motor sürücü devresinde motoru enerjilendirmek için iki fazın aktif diğer bir fazın ise pasif konumda olması gerekmektedir. Motor fazlarının açılması için PWM sinyali uygulanması gerektiği ve bu sinyalin konum değiştirmesi sırasında deadtime oluşturması motor sürücünün motoru verimli enerjilendirmesi için uygulanması gerekmektedir. Motor fazları PWM sinyallerini takip ederken PI ve PID gibi hata denetim algoritmalarının yazılması motorun fazlarını kaçırmadan takip etmesini sağlayacaktır. Bu durum ise bataryadan gelen enerjinin tamamına yakınının motorun dönüşü için harcayacağı tespit edilmiştir. Ve motordaki verimliliğin arttığı belirlenmiştir.

Fırçasız DC motora uygulanan DC gerilim PWM

yöntemi ve PID hata denetim algoritmaları yardımıyla motorun üzerindeki hall sensörün gelene veriler ile hız kontrolü sağlanmaktadır. PID kontrol algoritması referans hız ile istenen hız arasındaki hata hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu hata ile referans hız belirlenmektedir. Yük altında çalışan motor zorlanma durumunda değişen hızını PID algoritması sayesinde referans hızda sabit tutabilecektir. Ve busayede motorda yaşanabilecek enerji kayıpları bertaraf etmiş olacaktır.

6. Kaynaklar

- A.Cavagnino, S. Saied, S. Vaschetto, "Experimental identification and reduction of acoustic noise in small brushed DC motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 1, pp.317-326, Jan./Feb. 2014.
- 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 (2002): 232-240.
- Jang, Seok-Myeong, Han-Wook Cho, and Sang – Kyu Choi. "Design and analysis of A high –Speed brushless DC motor for centrifugal compressor ." IEEE Transactions on Magnetics 43.6 (2007): 2573-2575.
- Lee, B. K., & 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. Hendershot.
- James R., and Timothy John Eastham Miller. Design of brushless Permanent - magnet motors. Magna Physics Pub., 1994.
- Karakulak, O., Yaz, O. ve diğerleri, [2012], "PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücü Tasarımı "3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 29-30 Kasım, Balıkesir.
- Mehta, Hrishikesh, et al. "Speed control of PMSM with hall sensors using DSP TMS 320f2812." Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on. IEEE, 2015.
- Nasar, S. A., Unnewehr, L. E., & Boldea, I. (1993). Permanent magnet, reluctance, and self-Synchronous motors. CRC press.
- Shao, J. (2003). Direct back EMF detection method for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives.
- Wang, Jiabin, et al. "Modular three-phase

permanent –magnet brushless machine for in-wheel applications." IEEE Transactions on Vehicular Technology 57.5 (2008): 2714-2720.

- Xu, Y., Pan, H. B., He, S. Z., & Li, L. (2013). Monolithic H-bridge brushless DC vibration motor driver with a highly sensitive Hall sensor in 0.18 μm complementary metal-oxides semiconductor technology. IET Circuits, Devices & Systems, 7(4), 204-210.
- Yedamale, Padmaraja. "Brushless DC (BLDC) motor fundamentals." Microchip Technology Inc 20 (2003): 3-15.
- Yıldız, T. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009.