

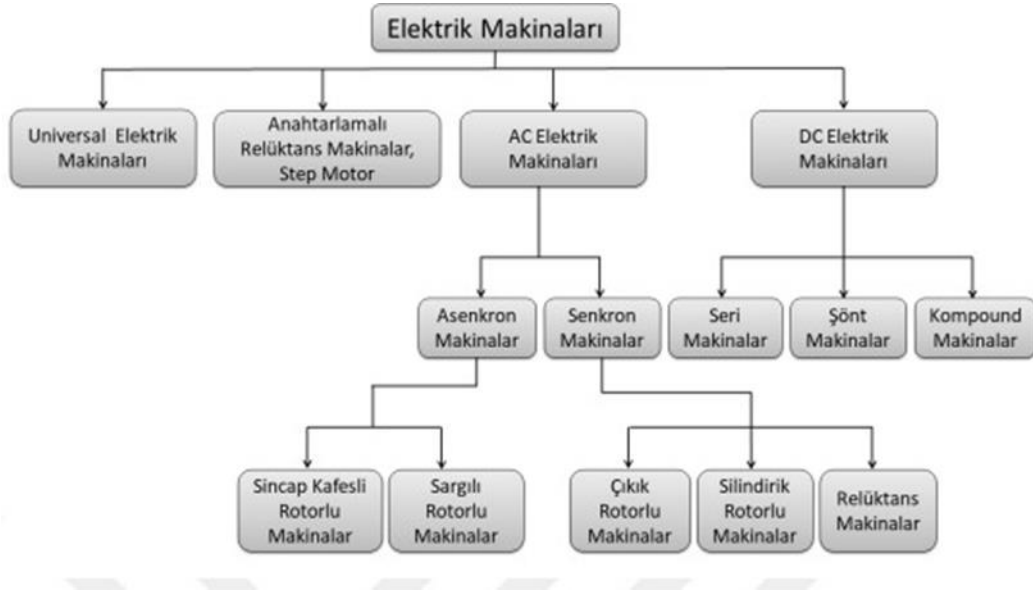
FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU

BRUSHLESS DC MOTOR (BLDC)

GİRİŞ

Elektrik Motorları

Elektrik makinaları çalışma moduna göre hem motor hem de jeneratör olarak kullanılmaktadır. Motor olarak kullanıldıklarında girişine uygulanan elektrik enerjisini doğrusal veya dönel mekanik enerjiye çevirmektedirler.

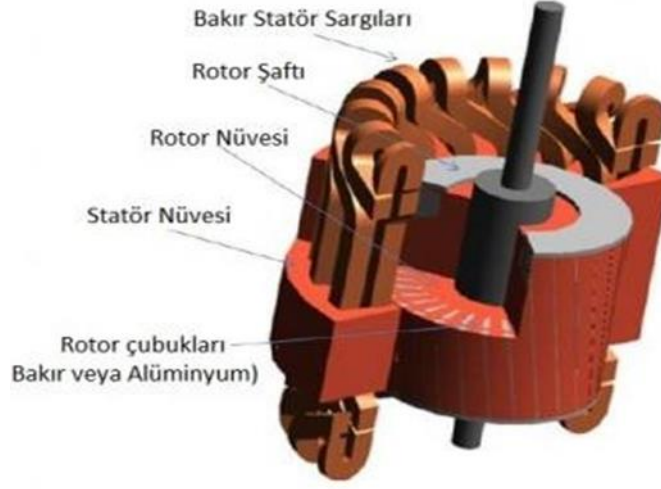


Şekil 1. Elektrik Makinaları Çeşitleri

Sincap Kafesli Asenkron Motorlar:

Sincap kafesli asenkron motorlar yüzyılı aşkın süredir endüstride, beyaz eşyada, ev aletlerinde, fabrikalarda, elektrikli araçlarda vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Basit bir yapıya sahiptirler, bakım gereksinimleri düşüktür, diğer elektrik motorlarına kıyasla daha ucuzdur. Ömür ve güvenilirlikleri yüksektir. Bu tip motorların çalışma prensibi rotor üzerinde indüklenen gerilimin oluşturduğu kısa devre akımlarına dayanmaktadır. Rotor üzerindeki alüminyum çubuklar yapısı gereği rotorun her iki yüzeyinde kısa devre edilmiştir. Bu durum indüklenen gerilimin kısa devre akımları akıtmasına sebep olur. Bu

akımlar bir manyetik alan oluşturur ve dönen stator manyetik alanı ile etkileşime girer. Rotor manyetik alanı stator manyetik alanına yetişmeye çalışır. Bu durum rotorun

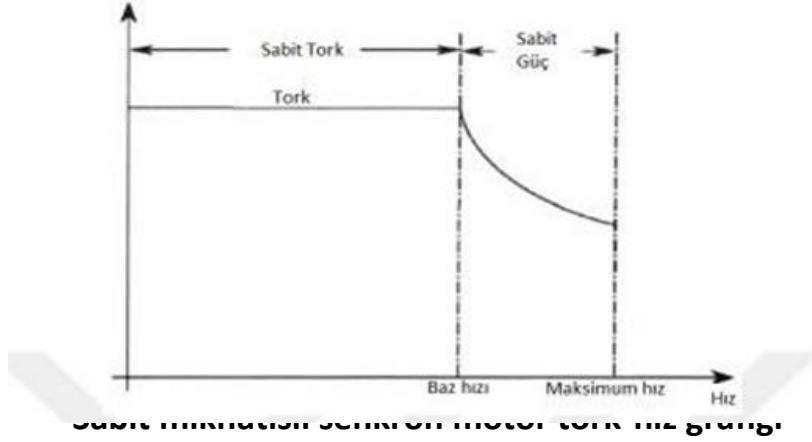


dönmesine sebep olur. Burada rotor statora yetişemediği için rotoru ve statorun devir sayıları birbirinden farklı olmaktadır. Bu yüzden bu tip motorlar asenkron motor adını almaktadır.

Şekil 2. Sincap Kafesli ASM yapısı

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar:

Sabit mıknatıslı senkron motorlar yapısı itibarı ile sincap kafesli asenkron motorlara çok benzemektedir. Aradaki fark sincap kafesli motorların rotorlarındaki iletken çubuk yerine mıknatıs kullanılmasıdır. Bu mıknatıslar sayesinde ayrıca rotor üzerinde bir manyetik alan oluşturma ihtiyacı bulunmamaktadır. Stator sargı yapısı neredeyse birebir aynıdır. Bu tip motorlarda asenkron motorlardan farklı olarak çalışabilmesi için rotor pozisyonunun bilinmesi gerekmektedir. Sabit mıknatıslı motorlar iki tipte sınıflandırılır. Bunlar sırasıyla Fırçasız Alternatif Akım Motoru (BLAC Motor) ve Fırçasız Doğru Akım Motoru (BLDC Motor)'dur. Bu iki motor tipini birbirinden ayıran belirgin özelliği stator yapılarındaki fark ortaya koyar. Fırçasız Alternatif Akım Motorlarda (BLAC) sargılarda oluşan Elektromotor kuvveti (EMK) sinüzoidal şekilde olmaktadır. Fırçasız Doğru Akım Motorlarda (BLDC) EMK trapeziodal şekilde olmaktadır. Farklı kontrol yöntemleri ile kontrol edilebilmelerine rağmen benzer performans özelliği gösterirler. Güç-ağırlık ve güç-hacim oranları asenkron motorlara kıyasla yüksektir.



Şekil 3.: Sabit mıknatıslı senkron motor tork-hız grafiği

Doğru Akım Motoru:

Doğru akım motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinedir. Motorun içinde yer alan sargılara elektrik akımı uygulandığında, yine motorun içerisinde bulunan sabit mıknatıslara zıt yönde oluşan manyetik kuvvetin etkisi ile hareket etme prensibine dayanır. Bu akımın yönünün, sürekli olarak sabit mıknatısa ters manyetik alan oluşturacak şekilde değiştirilmesi gereklidir. Bu değişim, fırçalı motorlarda motorun sarımlarına temas eden fırçalar ile fırçasız motorlarda ise elektronik hız kontrol devresi tarafından yapılır.

Avantajları: basit sürücü devresi, kullanım kolaylığı, uygun fiyat.

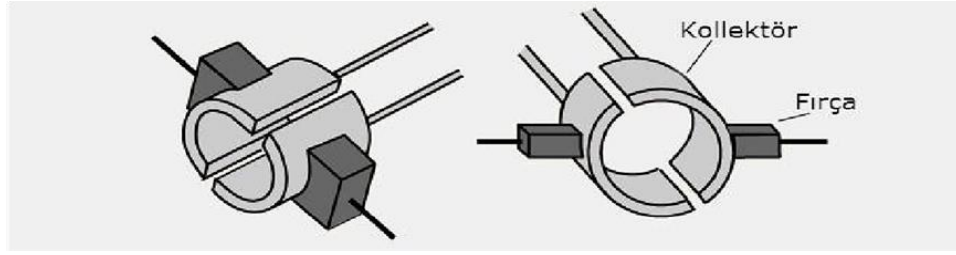
Dezavantajları: Yüksek EMC, Düşük verim, Bakım gereksinimi.

Fırça ve Kollektör:

DC motorlarda motorun hareketli kısmı olan rotor sargılarına gerilim uygulanması için kullanılan ara bağlantı elemanına fırça, fırçaların temas ettiği rotorun bölümüne ise kollektör veya komutator denir. DC motor fırçaları bakır alaşımlardan yapılabildiği gibi genellikle karbon alaşımlardan yapılmaktadır. Bu nedenle DC motor fırçalarına kömür de denmektedir.

DC motorlarda statorda oluşan manyetik alanın içerisinde kalan rotor sargılarına uygulanan gerilim sargı iletkeni üzerinde akım akmasına neden olur. Manyetik alan içerisinde bulunan, üzerinden akım geçen iletkeni ise bir kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvet ile iletken yani rotor hareket eder. Rotorun bu sürekli hareketinin hiç durmadan devam etmesi için rotora uygulanan gerilimin de kesintiye uğramaması

gerekir. Bu kesintisiz gerilim kullanılan fırçalarla sağlanır. Aşağıda fırça ve kollektörün temel görünüşü yer almaktadır.



Şekil 3: Fırça ve Kollektörün Motor Üzerinde Gösterimi

Fırçasız DC Motorlar:

Fırçasız Doğru Akım Makineleri özel elektrik makinesi grubundan olup senkron motor sınıfındadırlar. Rotoru sabit mıknatıslardan meydana gelir. Yapı olarak senkron makinalara benzemektedir. Bu motorlar uzun ömürlü olmaları, bakım gerektirmemeleri, gürültüsüz çalışmaları ve yüksek verimli olmaları gibi birçok avantaja sahiptirler. Ancak bu motorlar yüksek maliyetli olmaları, belli bir gücün üzerinde üretilmemeleri, sürücü ve konum sensörü gerektirmeleri ve yüksek frekanslı osilasyonlara sahip olmaları gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle bazı özel uygulamaların dışında pek kullanılmamaktadır. Giderek sürücü ve elektronik kontrollerin ucuzlaması bu motorların kullanımını arttırmıştır. Bilgisayarlarda, uzay araçlarında, ev gereçlerinde, endüstride, otomotivde ve askeri ekipmanlarda sıkça kullanılmaktadır. Kontrolünde doğru akım komütasyonu için rotor pozisyon bilgisi gerekmektedir. Bu rotor bilgisini birkaç yöntem ile elde etmek mümkündür. Örnek olarak hall sensörler veya sensörsüz yöntemler ile elde etmek mümkündür.

Fırçasız Doğru Akım Motoru terimi AA makinanın, yarı iletken invertörün ve rotor konum sensörünün bir kombinasyonunu isimlendirmek için kullanılır. Bu kombinasyon sonucunda klasik DA makinalarındaki gibi doğrusal hız moment-hız karakteristiğine sahip bir sürücü sistemi meydana getirilir. Bir AA makinası Stator ve Rotordan meydana gelmektedir.

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 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 DA motorların birçoğunda rotor pozisyonu için Hall effect sensörleri kullanılır.

Fırçasız Motorların Yapısı:

Geleneksel doğru akım motorları düşünöldüğünde stator tarafından sabit manyetik alan, rotor tarafından ise dönen manyetik alan oluşturulur. Bu sayede rotorun dönmesi bu ikimanyetik alanın etkileşimi ile oluşmaktadır. Rotor tarafından oluşturulan dönen manyetik alan fırçalar ve komütatör yardımı ile meydana gelir. Komütatör ve fırçalar rotorun pozisyonuna göre rotor sargısı üzerinden geçen akımın yönünü değiştirerek dönen manyetik alanı oluşturur. Bu tip motorlarda akım değişimi mekanik olarak yapılmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorları (BLDC); üç adet faz sargısının bulunduğu stator, daimi (sürekli) mıknatıstan oluşan bir rotor, konum sensörü ve sürücöden meydana gelir. Bu motorlarda faz sargılarının sarıldığı stator çıkılarının sayısı, kutup sayısı ile doğru orantılıdır. Motor; stator, rotor, konum sensörü ve sürücü sistemleri olarak dört kısımdan meydana gelir. BLDC'lerde rotor üzerinde sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Bu mıknatıslar sabit manyetik alan oluşturmaktadır. Geleneksel doğru akım motorlarının aksine BLDC'de dönen manyetik alan stator tarafından oluşturulmaktadır.

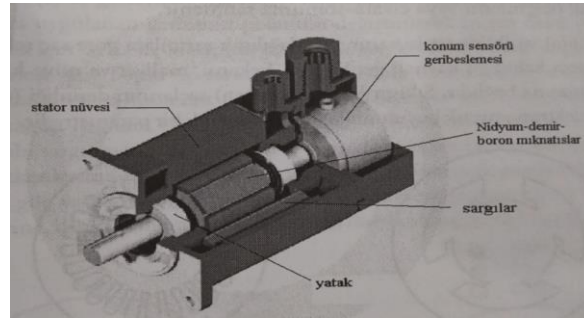
Stator:

Faz sargılarının sarıldığı motorun duran kısmıdır. Demir kayıplarını azaltmak için statorlar silisli sağçadan yapılırlar. Bu sağçlar bir yüzü yalıtılmış çelik malzemelerden meydana gelir. Bu çelik sağçlar bir araya getirilip preslenerek stator meydana gelir. Bu çelik sağçların bir araya gelmesiyle oluşan kısma nüve denir. Statoru oluşturan diğer kısım ise sargılardır. Nüve içerisine stator sargılarının yerleştirilmesi için oluklar açılmıştır. Fırçasız doğru akım motorunda oluk sayısı, rotor kutup sayısına, faz sayısına ve sargı sayısına bağlı olarak seçilir. Sargıların statorda yer alması, sargılarda meydana gelen ısının, kolaylıkla dışarı aktarılarak motorun etkin bir şekilde soğumasını sağlamaktadır. Fırçasız doğru akım motorlarının sargıları, asenkron motorlarda olduğu gibi yıldız ve üçgen olarak bağlanabilir.

Sağçlar, asenkron veya senkron makinalarda olduğu gibi birer yüzeyi silisli olup üzerlerine kalıplarla stator olukları açılır. Biğimlendirilen stator sağçları sıkıştırılarak perçinlenir veya civata-somunla sabitlenir. Sağçların kalınlığı; kaynak geriliminin frekansı, maliyet ve nüve

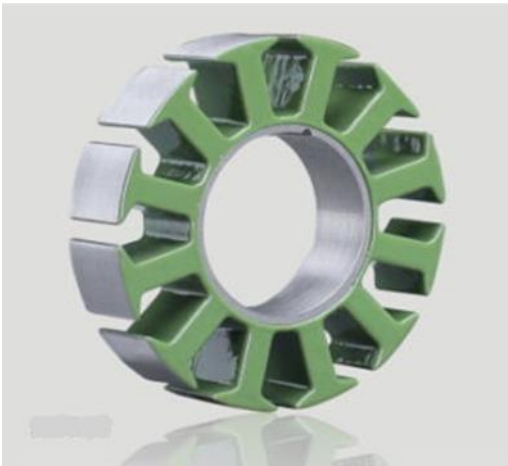
kayıplarının dikkate alınmasına bağlıdır. Sıkıştırılan (paketlenen) saçlarının derinliği (uzunluğu) makinanın elektromanyetik boyutunu belirleyen önemli bir parametredir.

Sargılar kalıcı mıknatıslı makinaların büyük çoğunluğunda, özellikle güç uygulamalarında kullanılan makinalarda, bir veya çok fazla sargıları AA makinalarına benzerdirler. Sargılar genellikle çift katmanlı (iki sargının birer kenarları bir oyuğa) ve paralel (bükülmü) sarım kullanılırken, tek katmanlı toplu sarımlar da kullanılmaktadır. DA makinalarına zıt olarak AA sargıları açık uçludur. Sargılar tek tek kendi aralarında bağlanarak bir faz grubunu meydana getirirler. Faz gruplarında kendi aralarında seri veya paralel kombinasyonlarda uygun bir şekilde bağlanarak yıldız , üçgen, zikzak, iki faz veya basit bir faz sargıları oluştururlar. AA sargıları, sargılarda üretilen harmonik gerilimleri azaltmak için genellikle kısa sargı adımları ile sarılırlar.



Şekil 4. Fırçasız DA Motor Yapısı

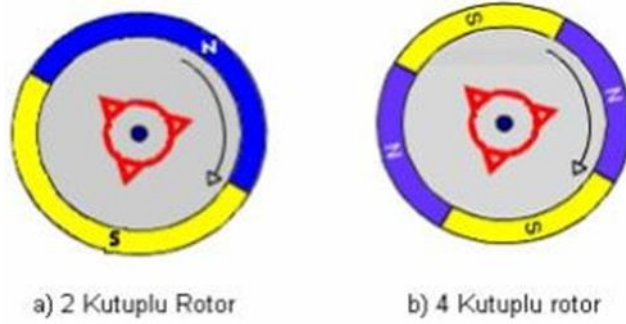
Fırçasız motorda sargıların statorda yer alması, sargılarda meydana gelen ısıнын en etkin şekilde dışarı aktarılacak motorun daha kolay soğuyabilmesi ve böylece ömrünün arttırılmasını ve yüksek hızlarda mekanik sorunlara en aza indirilmesini sağlar.



Şekil 5. Stator ve Stator Sargıları

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 seviyesi de artmaktadır. Torkun fazla olması devirin ve hızın düşmesine neden olmaktadır. Rotorun sabit mıknatıstan yapılarak meydana gelmiş olması, motorda fırça ve kolektör kullanılmadığını göstermektedir. Bunun sonucu olarak da ark olayı olmaz, bakım gerektirmez ve sürtünme kayıpları azalır. Aşağıdaki şekilde iki kutuplu ve dört kutuplu rotor yapıları görülmektedir. Rotorlarda kullanılan sabit mıknatıs garyum, samaryum ve feritten yapılmış olabilir. Bu malzemelerin dezavantajları zamanla bu özelliklerini yitirmeleri ve pahalı olmalarıdır.



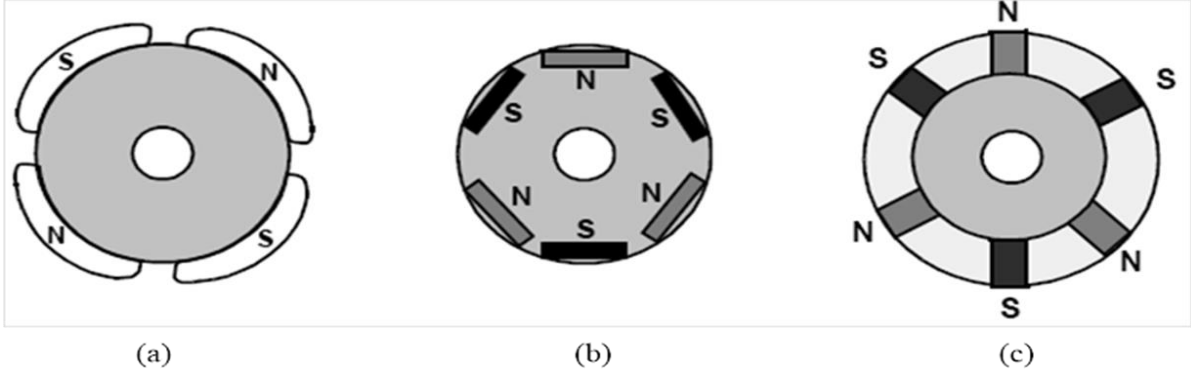
Şekil 5. Rotor Tipleri

Samaryum Kobalt: Samaryum ve kobalt alaşımından oluşan bu malzeme, yüksek manyetik yoğunluğa sahip ve B-H karakterleri oldukça düzgündür. Bu nedenle, kullanım oranı oldukça fazladır. Ancak, yeryüzünde fazla bulunmayan kobalt ve samaryum maddelerinden yapılmasından dolayı, oldukça pahalıdır. Bu nedenle, araştırmacılar farklı arayışlar içine girmişlerdir.

Neodiyum Demir Bor: Neodiyum, demir ve bor alaşımından oluşmuştur. Bu manyetik malzeme, samaryum kobalttan ucuz olması ve B-H karakterinin iyi olması gibi avantajlara sahiptir.

Ferrit Seramik: Doğada oldukça fazla olmasından dolayı ucuzdur. Manyetik özelliklerini yitirmemesi, bu malzemelerin kullanımını arttırmıştır. Ancak, kırılkan olmaları ve B-H karakterlerinin iyi olmaması bu malzemelerin dezavantajlarındandır.

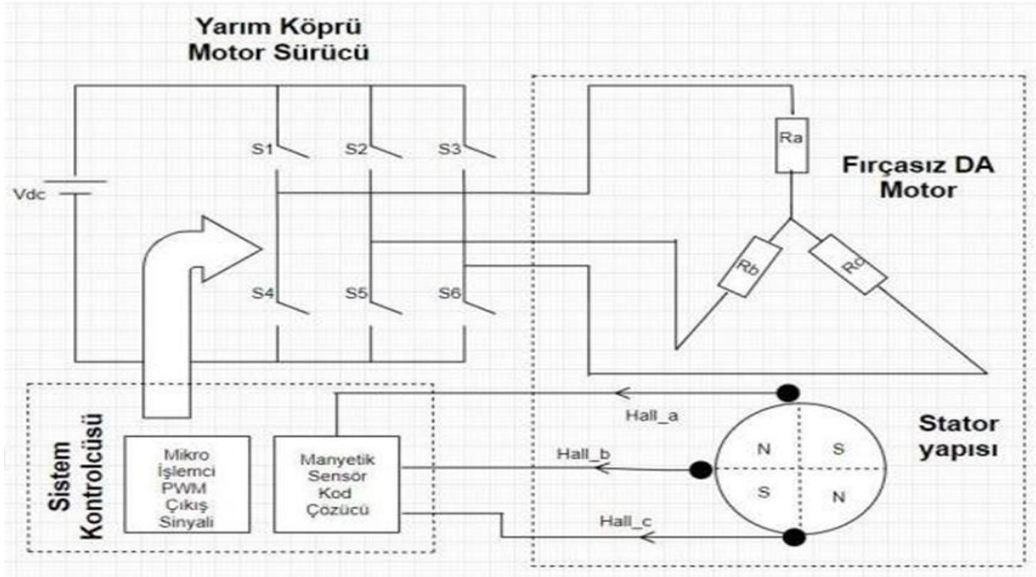
BLDC Rotor Tipleri:



- a) Kalıcı mıknatıs rotor milinin yüzeyine yerleştirilmiş
- b) Kalıcı mıknatıs rotor gövdesinin içine yerleştirilmiş
- c) Kalıcı mıknatıs oyuklara yerleştirilmiş

Fırçasız DA Motorun Çalışması:

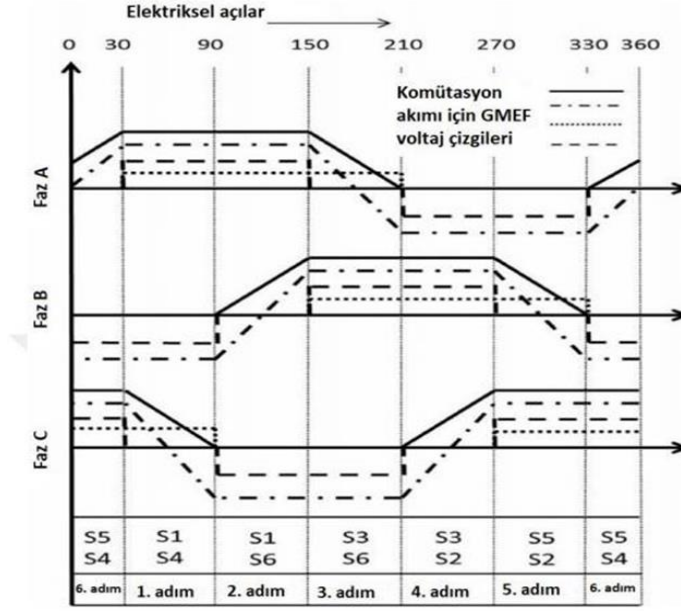
Fırçasız DA motorlar kullanıldığı uygulamalarda, sistemin genel performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Genel sistemlerin güvenilir kontrolü ve kullanılması esasen seçilen motor tipine ve kontrol tetiğine bağlıdır. Motor sürücüsü seçimi, uygulama gereksinimlerine değişiklik göstermektedir. Fırçasız DA motorlar, elektronik komütasyona sahip yeni bir DA motor olarak düşünülebilir. 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. 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.



Şekil 6. Üç fazlı fırçasız DA motorun şematik diyagramı

Şekildeki gibi blok diyagramda gösterilen hall effect sensörleri, rotor pozisyonuna göre sinyal çıkışları vermektedir.

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 sürücünün 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 şekil' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Üç fazlı fırçasız DA motor sinyalleri ve anahtarlama örüntüsü

Hava aralığı:

Hava aralığı, stator ile rotor arasında bulunan dairesel boşluktur. Hava aralığının motor verimi üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır. Hava aralığının fazla olması kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik akının etkisinin azalmasına ve buna bağlı olarak motorun ürettiği momentin düşmesine neden olmaktadır.

Fırçasız DA Motorlarda Manyetik Alan Ve Manyetik Akı Hesaplamaları

$$H = N \cdot I / L$$

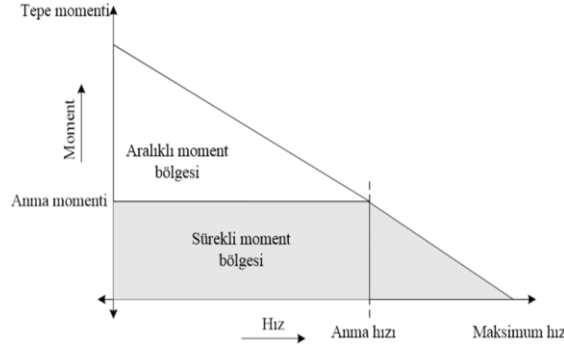
Burada, H manyetik alan şiddeti, N sarım sayısı, I akım şiddeti, L stator kol uzunluğu

$$B = \mu \cdot H \text{ veya } B = \mu (H + M)$$

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

Hız ve Moment Karakteristiği:

Fırçasız dc motorlar doğrusal bir hız-moment karakteristiğine sahiptirler. Nominal hıza kadar fırçasız dc motordan sabit bir tork alınabilir. Bunun üstünde bir tork almak istediğimizde motor kesintili tork bölgesine geçer. Nominal hızın üstüne çıkıldıkça üretilen tork sabit bir şekilde azalır.



Şekil 8. Hız-moment eğrisi

Fırçasız DA Motorlarda Harcadığı Güç Ve Verdiği Güç Denklemleri

$$P_{\text{harcanan}} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \div 1000$$

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

$$P_{\text{veren}} = \sqrt{3} \times V \times \eta \times I \times \cos \varphi \div 1000$$

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

Geri Besleme Ünitesi

Stator sargılarının rotor pozisyonuna göre enerjilendirilmesi gerekmektedir. Rotor pozisyonları sensörler kullanılarak belirlenmektedir. Geri besleme ünitelerinde sürücü fonksiyonları için gereken akım ve gerilim değerleri ölçülerek, ölçülen değerlere göre kullanılmalıdır. BLDC'lerde hız ve konumu kontrol etmek için, rotorun konumunu algılayabilen sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu algılama işlemi için genellikle alan (Hall) etkili sensörler ya da optik sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörler stator üzerine veya motorun miline yerleştirilmektedir. Bu sensör ile sürülme teknolojisinden başka, BLDC'nin sensörlerin kullanılmadığı şekilde sürülen teknolojileri de günümüzde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Fakat sensörlerin kullanılmadığı sürme tekniklerinde ilave olarak çeşitli düzeneklerin kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında sensör olmadan kullanılan motorlar, sensörlü olarak kullanılan motorlara göre daha düşük hız ve ivme değerlerine ulaşabilirler.

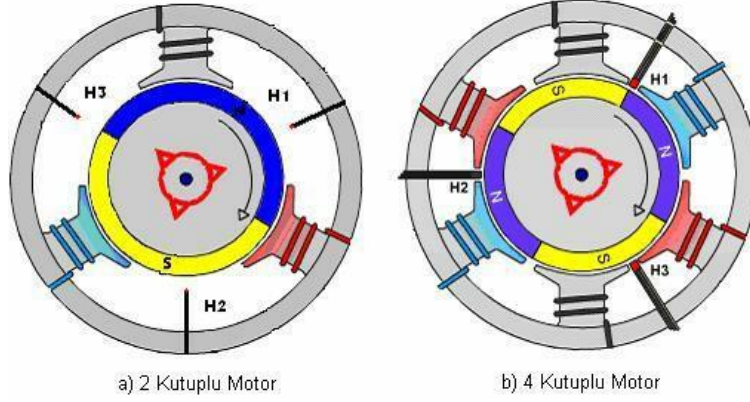
Birçok çeşit rotor konumu algılayan sensörler bulunmaktadır. Alan etkili sensörler (hall effect sensors) sensörler içinde en çok kullanılan sensör tipidir. Bu sensörlerden başka kullanılan diğer sensörler: optik sensörler (encoder) ve sıfır geçiş dedektörleri (zero crossing dedectors) dir. Motorun kontrolü sırasında rotor pozisyonun algılanması için,

hangi algılama elemanın kullanılacağına karar vermek için bazı ölçütlerin değerlendirilmeden geçmesi gerekir. Değerlendirilecek ölçütler; çevre şartları, rotorda açılabilir olarak gerçekleşen yer değiştirmenin büyüklük derecesi, sensör için belirlenen mesafe, kontrol için beklenen hassaslık veya doğruluk derecesi, sensörün çekebileceği en büyük güç ve sensörün seri bir şekilde üretilebilme durumu olarak söylenebilir.

Alan Etkili Sensörlerin (Hall Effect Sensor) Kullanımları:

Manyetik alanın algılanmasında alan etkili sensörler kullanılmaktadır. İlk defa 1879 yılında Dr. Edwin Hall tarafından alan etkisinin varlığı keşfedilmiştir. Dr. Edwin Hall altından bir plaka hazırlamış ve içinden geçen ince bir altın plakanın bir yüzeyine, manyetik alanı dik olacak şekilde bir mıknatıs yerleştirmiş ve altın plakanın öteki tarafında bir potansiyel fark oluştuğunu keşfetmiştir. İletkenden geçebilecek akım ve o iletkende oluşabilecek manyetik akı ile orantılı bir değerde oluşan bir gerilim (potansiyel fark) Hall gerilimidir. Elde edilen bu sonuç alan (hall) etkisinin varlığını ortaya koymaktadır. İnce plakanın çıkışındaki uçlardan akım geçmektedir ve mevcut olan manyetik alana dik bir biçimde bağlanmış durumdadır. Bir manyetik alanın oluşmadığı durumlarda bir hall gerilimi (VH) oluşmaz. Oluşacak gerilimin yönü ve şiddetini geçen akım ve oluşan manyetik alanın yönü ve şiddeti belirler. Akım, kontrolün büyüklüğü olarak söylenir ve çıkışta oluşacak gerilimle doğru orantılı olur. Aşağıdaki şekilde alan (hall) etkili bir sensörün yapısı gösterilmiştir. Bu sensörler ilk defa 1960’larda motorların kontrolünde, hava aralığını ölçmek amacıyla kullanıma geçmiştir. Stator sargılarına bir sıra halinde güç uygulanarak BLDC rotorunun döndürülebilmesi sağlanır. Rotorun pozisyonu stator içerisine gömülen alan (hall) sensörleri tarafından algılanır.

Stator üzerinde bulunan alan sensörlerinin konumları kutup sayısına göre değişiklik gösterir. Alan etkili sensörlerinin nerelere yerleştirildiği. Aşağıdaki şekilde iki ve dört kutuplu motorlar için gösterilmiştir. (H1, H2, H3 olarak isimlendirilen harfler, alan (Hall) etkili sensörleri simgelemektedir).



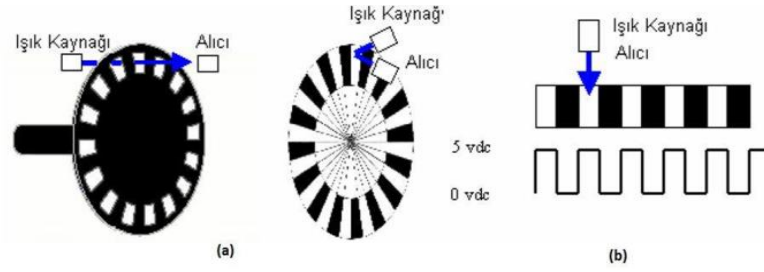
Şekil 9. 2 kutuplu ve 4 kutuplu motorlar için alan etkili sensörlerin durumu

Alan etkili sensörler için rotorun mıknatısı sayesinde bir manyetik akı oluşur. Nadiren ise motorun miline bağlı bulunan yardımcı bir mıknatıs tarafından manyetik akı elde edilir. 30mV seviyelerinde küçük bir değere sahip olan hall gerilimi bir yükselteç kullanılarak yükseltilmektedir.

Alan etkili sensörler seri üretim için uygun değildir. Olumsuz olan tarafları; motorun içerisinde gömülmesi gerekliliği, sıcaklığa olan duyarlılığı ve çözünürlüğünün olmasıdır. Bunun yanında yapısının basit olması ve fiyatının ucuz olması sebebiyle günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Optik Sensörlerin (Encoder) Kullanımları:

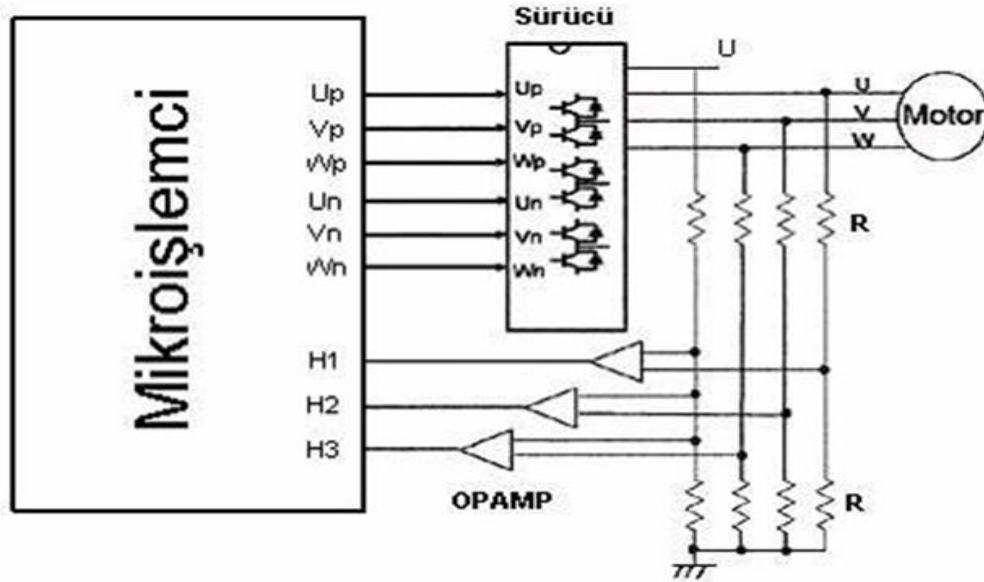
Rotor konumu açısal olarak optik sensörler kullanılarak hassas bir şekilde belirlenmektedir. Optik sensörlerin çalışma şekli şu şekildedir. İki diskten biri sabit, diğeri hareketlidir. Bir ışık kaynağı tarafından ulaştırılan ışığı diskin geçirip geçirmediği ile doğrusal veya açısal bir şekilde yer değiştirmesinin algılanması esasına göre. Yüzde 50 geçirgenliği bulunan durgun bir diskten ulaştırılan ışın bir demet halinde geçip, hareketli olan diğer diske ulaşır.



Şekil 10. Optik Sensör

Sıfır Geçiş Dedektörlerinin Kullanımları:

Rotor pozisyonunu belirlerken stator sargılarında indüklenen zıt emk'ya göre bu dedektörlerden faydalanmak mümkün olmaktadır. Sıfır geçiş dedektörü motor sürücüsüne bağlıdır ve rotorun konumunu belirlemek için, besleme gerilim değerinin yarısı ile statordaki faz sargılarına uygulanan gerilimi karşılaştırmak gerekir. Bu sensörlerin avantajı, hareket eden parçasının olmaması ve motordaki hareket eden diğer parçalarla bağlantısının olmamasıdır. Aşağıdaki şekilde bu dedektöre ait yapısı ile bağlantısı gösterilmiştir.



akım uygulandığında, 3 fazlı BLDC'de, fazlardan birinde pozitif, diğerinde negatif akım seçmesine sebep olmaktadır. Diğer üçüncü faz ise aktif olmayan durumda olmaktadır. Aktif olmayan faz, sıfır geçiş metodunda zıt emk'ı bulmak için bu aktif olmayan faz kullanılmaktadır. Sıfır geçiş noktası zıt emk'nın sıfır noktasından geçtiği yerdir ve bu yer

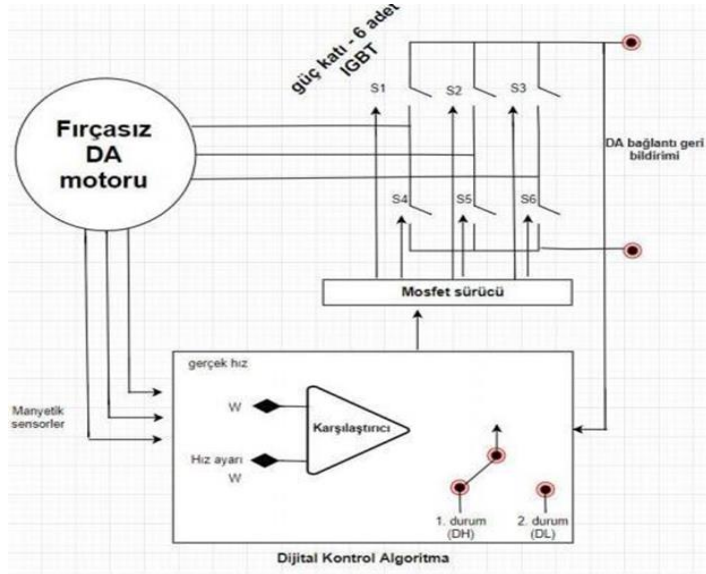
komütasyon noktalarını orta noktasıdır. Bu nokta, sonra gelen sargı çiftinin enerjilenmesi için referans oluşturur. Sıfır geçişi olduğu zaman, bir öndeki sıfır geçişe yarım periyotluk zaman eklenmesi ile bir sondaki komütasyon anı tahmin edilebilir. Hızın yüksek olduğu BLDC uygulamasında, fazlardan birinin pasif olma zamanı çok kısa olmasından dolayı sıfır geçiş noktası belirlenmesi zorlaşacaktır. Bu sebepten dolayı bu yöntem bu tip uygulamalar için uygun olmamaktadır.

Bu yöntemden başka, daha iyi bir yöntem olan Kalman Filtre Teorisi sensörsüz çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu teoride, motora ait hız, motorun konumu ve oluşan zıt emk değerleri kullanılmaktadır. Bu modelde, ileriki zamanlarda motorun durumundaki değişimleri için tahminde bulunmaktadır. Pasif olan fazda zıt emk ölçülerek, tahmin edilen fazdaki zıt emk ile kıyaslanır. İki durum arasındaki oluşmuş fark, motorun çalışmasındaki performansı daha iyi duruma getirmek için kullanılmaktadır. Kalman Teorisi ile sıfır geçiş tahmini ile beraber, motorun hızı ve konum bilgisinin tahminleri her bir zaman dilimi için yapılmaktadır. Böyle olunca, komütasyondaki doğruluk derecesinin artırılmasıyla verimin daha yüksek değerlere çıkarılması mümkün olmaktadır.

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 DC 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.

Dijital PWM kontrol stratejisinin ana prensibi Şekil de 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 11. PWM Uygulaması

Motor sürücülerde kullanılan mikroişlemciler PWM sinyalleri üretmektedir. Hız regülatörü için elde edilen mantığa 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.

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 yaklaşıncı 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.

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.

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.

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

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

$$P_D = V_{ds} * I_D$$

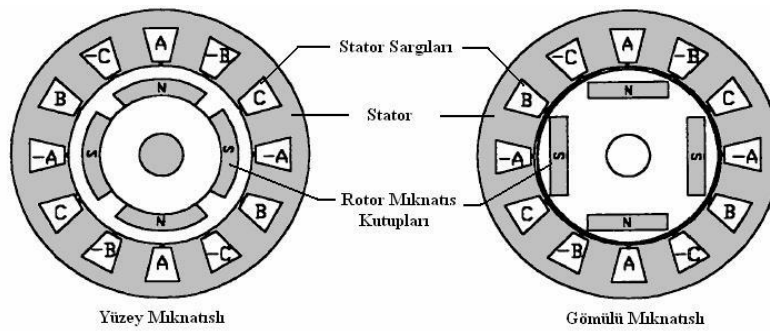
Burada, P_D MOSFET'in içerisinde harcanan güçtür.

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.

İç rotorlu (inrunner) fırçasız DA motorlar:

İnrunner fırçasız DA motorların yapısı senkron ve asenkron motorların yapısıyla hemen hemen aynıdır. Stator dış taraftadır ve sabittir. Motora yerleştirilecek olan mıknatıslar rotoru çevreleyecek şekilde rotorun üzerine yapıştırılmaktadır.



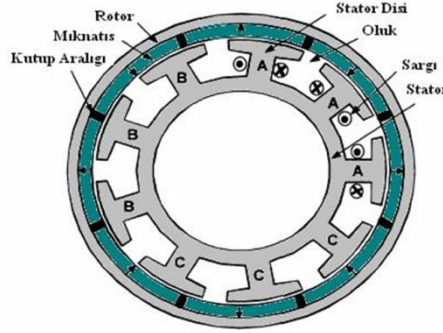
Şekil 12. İç rotorlu fırçasız doğru akım motorunun yapısı

Bu yapının üstünlüğü yüksek moment/eylemsizlik oranından dolayı, eylemsizliklerinin düşük olmasıdır. Dış rotorlu yapıyla karşılaştırıldığında iki olumsuz özelliğe sahiptir. Özellikle yüksek hızlarda mıknatısların rotordaki yerlerinden çıkarak, rotorun parçalanmaması için mıknatısların sabitlenmesi çok dikkatli yapılmalıdır. Bu amaçla

rotorlar yüksek elektriksel dirençli metal şeritler ile sarılırlar. İkinci olumsuz yanı ise, statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi oldukça zordur, aynı zamanda maliyeti ve işçiliği de çok fazladır. Stator sargıları dış yüzeyde olduğundan, dış rotorlu yapıya göre statorun soğuması daha kolaydır. Özellikle yüksek performanslı konum ve hız kontrolü gerektiren servo motor ve kompresör uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Dış rotorlu (outrunner) fırçasız DA motorlar:

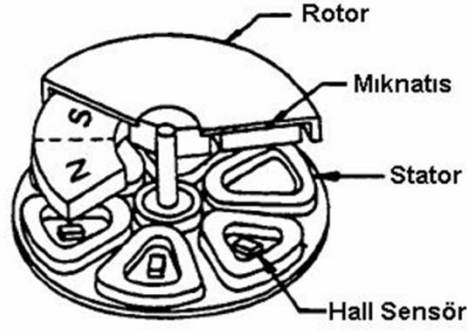
Rotorun, statorun dışına yerleştirildiği dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru en çok kullanılan yapıdandır. Outrunner motorlarda, mıknatıslar statoru çevreleyen rotorun üzerine yerleştirilir. Fırçalı DA motor ile yapıları aynıdır sadece fırçasız DA motorlarda fırça-kollektör yapısı yoktur. Stator kolları 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.



Şekil 13. Dış Rotorlu Yapısı

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 d/d'nin 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.



Şekil 14. Disk tipi Yapısı

Fırçasız Motorların Özellikleri Ve Uygulama Alanları:

Çalışma hızı, motorun yük-hız durumuna ve motor boyutlarına bağlıdır. Yüksek moment, hassas hız kontrolü, yüksek verim ve uzun ömür gibi önemli özellikler fırçasız motorları birçok uygulamalar için en iyi seçim durumuna getirmektedir. Bu motorlar yüksek hızda ve sessiz çalışırlar. DA kaynaktan beslendikleri için alternatif akım güç kaynağındaki gerilim değişikliklerinden etkilenmezler, taşınabilir. DA kaynaklarından güvenli düşük gerilimlerde çalışabilirler. Fırçasız motorlar; değişik hız, görev çevrimi, devir yönü değiştirilmesi ve frenleme gibi özelliklerin gerekli olduğu aletlerde programlanabilir kontrolü kolaylıkla uygulanabilir. Güvenli düşük gerilim ve kıvılcımsız bir çalışma özelliği bu tip motorları uygun kılar. Elektronik anahtarlama fırçasız motorlar geniş uygulama alanına sahiptir.

Uygulama alanları; Büro aletleri, fotokopi makinaları, fanlar, su-hava kimyasal pompalar, tarayıcılar, yazıcılar, gaz analiz ediciler gibi... Optik tarayıcılar, tıp aletleri, büyük havalandırma sistemleri.

Fırçasız motorlar genellikle 100000 d/d'ya kadar yüksek hızlarda çalıştırılabilir. Bu yüksek hızlarda motor işletme emniyetine sahip olup az bakım gerektirir. Motor ömrü sadece yatak ömrü ile sınırlı olup uzun ömürlüdür.

İki özel örnek; uzay uygulamaları ve medikal alan.

Aşağıdaki Şekiller Örnek Veriler:

Çizelge 6.1 50W, 100W ve 138W güçlerindeki fırçasız motorların etiket değerleri

Güç (W)	50	100	138
Anma gerilimi (V)	36	36	36
Anma hızı (d/d)	4000	4000	4000
Anma momenti (Nm)	0.011	0.022	0.032
Anma akımı (A)	2.7	5.2	8.1
Ağırlık (kg)	0.50	0.75	1.00

Çizelge 6.2 8W ve 26W güçlerindeki fırçasız motorların etiket değerleri

Güç (W)	8	26
Anma gerilimi (V)	36	36
Anma hızı (d/d)	500	5000
Anma momenti (Nm)	0.0055	0.005
Anma akımı (A)	0.43	1.1
Ağırlık (kg)	0.84	0.68

Çizelge 6.3 Küçük güçlü bazı fırçasız motorların özellikleri

Güç (W)	5.9	14.8	25
Anma gerilimi (V)	24	24	24
Anma hızı (d/d)	1425	1500	1500
Anma momenti (Nm)	0.039	0.094	0.160
Anma akımı (A)	0.700	1.250	2.100
Moment sabiti (Nm/A)	0.056	0.075	0.077
Zıt emk sabiti (V/rad/s)	0.056	0.075	0.077
Terminal direnci (Ω)	3.80	2.30	0.91

Parametre	Sembol	Birim	12V	24V
Sürekli moment (en yüksek)	TC	Nm	0.045	0.060
Pik moment (dururken)	TPK	Nm	0.150	0.181
Motor ağırlığı	WM	kg	0.17	0.19
Yüksüz hız	SNL	(d/d)	(11363)	(7400)
		rad/s	1190	775
Sürtünme momenti	TF	Nm	0.93×10^{-3}	0.96×10^{-3}
Rotor ataleti	JM	kgm ²	0.99×10^{-6}	1.52×10^{-6}
Elektrik zaman sabiti	τ_E	ms	0.089	0.108
Mekanik zaman sabiti	τ_M	ms	8.20	7.14
Viskos sönüm	D	Nm/(rad/s)	1.1×10^{-6}	2.5×10^{-6}
Sönüm sabiti	KD	Nm/(rad/s)	122×10^{-6}	212×10^{-6}
En yüksek sargı sıcaklığı	θ_{MAX}	Co	155	155
Termal empedans	RTH	Co/wat	5.7	5.1
Termal zaman sabiti	τ_{TH}	dakika	7.7	8.5
Motor sabiti	KM	Nm/(\sqrt{W})	11×10^{-3}	14.6×10^{-3}
Motor uzunluğu	L1	mm (en yüksek)	41.2	51.4

Fırçasız Doğru Akım Motorunun Olumlu ve Olumsuz Yönleri: Fırçasız doğru akım motorları, diğer elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında aşağıda sıralanan üstünlüklere sahiptir.

Olumlu Yönleri:

1. Sürekli mıknatıs olarak nadir topraklı veya Ferit malzeme kullanılan makinalar, asenkron makinadaki rotor kafesine göre aynı güç için daha düşük eylemsizliğe sahip olduklarından referans değişimlerine veya verilen elektriksel momente karşı daha hızlı cevap verirler. Asenkron makinayla karşılaştırıldığı zaman daha küçük bir eylemsizliğe sahiptir. Moment/Eylemsizlik oranı daha yüksektir.

2. Yüksek verim ve kolay soğutma: Sürekli mıknatıslı makinalar bir asenkron makinadan daha yüksek bir verime sahiptir. Sürekli mıknatıslı motorlarda ihmal edilebilir rotor kayıpları olmasına karşılık, asenkron makinada rotor kayıpları çalışma kaymasına bağlı olarak oldukça fazla olabilir. Bu kayıplar aynı zamanda önemli bir ısı kaynağı olduğundan soğutmanın yeterli olmadığı ortamlarda çalışma akımlarını sınırlar. Ayrıca fırça ve kollektörlerden kaynaklanan mekaniksel sürtünme kayıpları için ilave bir moment üretimine gereksinim duyulmaması verimi arttıran diğer bir faktördür. Doğru akım motorlarında enerji dönüşümü endüvi iletkenlerinde oluştuğundan ısı transferini

gerçekleştirmek zordur. BLDC'lerde akım taşıyan iletkenler statorda bulunduğundan ısının dış ortama transferi daha kolay olmaktadır.

3. Asenkron makinalarda uyarma alanı için endüktif karakterli mıknatıslama akımları gereklidir. Bu akım değeri sabit gerilim/frekans oranı için sabit bir değerdedir ve makinanın güç katsayısının düşmesine, stator elektriksel kayıplarının artmasına dolayısıyla verimin düşmesine neden olur. Sürekli mıknatıslı makinalarda uyarma rotordaki sabit akılı mıknatıslarla sağlandığından bu olumsuzluklar giderilmiş olur.

4. Mıknatıslanma akımına ihtiyaç duyması ve daha düşük verime sahip olması, aynı çıkış kapasitesine sahip bir sürekli mıknatıslı makinaya göre, asenkron makinada daha büyük nominal değerlere sahip doğrultucu ve evirici kullanılmasını zorunlu kılar. Bu durum maliyetin de artmasına neden olmaktadır.

5. Hacim ve ağırlık (küçük ve hafif): Fırçasız doğru akım motorunun güç yoğunluğu yüksek, yani yüksek moment/akım oranına sahiptir. Bu yüzden aynı kapasitedeki bir asenkron makineden daha küçük ve hafiftir. Bu durumda, motor hacminin önemli bir sınırlama olduğu hallerde sürekli mıknatıslı makinaların tercih edilmesi sonucunu doğurmaktadır.

6. Düşük gürültü seviyesi: Fırçasız doğru akım motorlarında fırça ve kollektör bulunmadığından, mekaniksel gürültü seviyesi oldukça düşüktür. Komutasyon elektronik olarak gerçekleştirilmektedir.

7. Düşük bakım gereksinimi, uzun ömür ve güvenilirlik: Kollektör ve fırça grubu içermediğinden kollektörlü makinalara göre bakım gereksinimi oldukça azdır, bu durum aynı zamanda sistem güvenilirliğinin ve ömrünün artmasını da sağlamaktadır.

8. Kolay kontrol: Fırçasız doğru akım motoru, klasik fırçalı doğru akım motor yapısında, yani çıkış momenti doğrudan motor akımıyla orantılı olduğundan asenkron ve senkron makinalara göre kontrolü oldukça kolaydır. Bu durum üretici açısından, karmaşık kontrol algoritmaları içermediğinden, sistemin toplam maliyetinin azalmasını da sağlamaktadır.

Bütün bu üstünlüklerine rağmen fırçasız doğru akım motorları bir takım olumsuz özelliklere de sahiptir.

Olumsuz Yönleri:

1. Maliyet: Yüksek enerjili mıknatısların fiyatlarının ve üretim giderlerinin yüksek olması nedeniyle fırçasız doğru akım motorlarının maliyetleri asenkron ve doğru akım motorlarına göre oldukça yüksektir. Aynı zamanda sürekli mıknatısların çalışma sıcaklık aralığı sınırlıdır.

2. Sürekli mıknatısların demagnetize olmaları riski: Uzun zaman süresince kullanılan sürekli mıknatısların, atmosferik ve termik etkiler sonucu kalıcı mıknatısiyetleri azalmaktadır. Mıknatıs malzemelerinin sıcaklığa olan duyarlılığı ve demagnetize olması riski sistemin güvenilirliğini de azaltmaktadır.

3. Genişletilmiş hız bölgesinin sınırlı olması: Sürekli mıknatıslar sabit bir uyarma sağladığından, fırçasız doğru akım motorlarının alan zayıflatma bölgesinde çalışmaları sınırlıdır, bu bölgede kontrol daha zordur ve hız sınırlaması gereksinimi bulunmaktadır.

4. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, motor sargılarının komutasyonu için mekanik rotor konum algılayıcılarına ihtiyaç duyarlar. Sinüs biçimli akım ve gerilimli makinalarda, konum yüksek hassasiyetli konum algılayıcılarıyla, trapezoidal gerilim endüklenen makinalarda sargılar belirli durum ve aralıklarla kare dalga akımla beslendiğinden rotor konumunu elektriksel olarak 60° aralıklarla algılanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Konum algılayıcıları özellikle uygulama, performans, seri üretim ve maliyet açısından tahrik sistemlerinde çeşitli kısıtlamalar meydana getirmektedir.

Fırçalı Ve Fırçasız DC Motorlar Arasındaki Fark:

ÖZELLİK	FIRÇASIZ DC MOTOR	FIRÇALI DC MOTOR
Komütasyonlar (Anahtarlama mekanizması)	Elektronik Komütasyon	Mekanik Komütasyon
Bakım	Az	Sürekli
Verim	Yüksek	Düşük-Orta
Termal performans	Daha iyi	Kötü (düşük)
Hız sınırı	Yüksek	Düşük
Elektrik gürültü	Düşük	Yüksek
Hız / Moment karakteristikleri	doğrusal	Yüksek hızlarda momenti azalır
Çıkış gücü	Yüksek	(Orta-Düşük)
Ömür	Uzun	Kısa
Üretim Maliyeti	Pahalı	Fırçasız'a göre ucuz
Kontrol	Karmaşık ve pahalı	Basit ve ucuz.

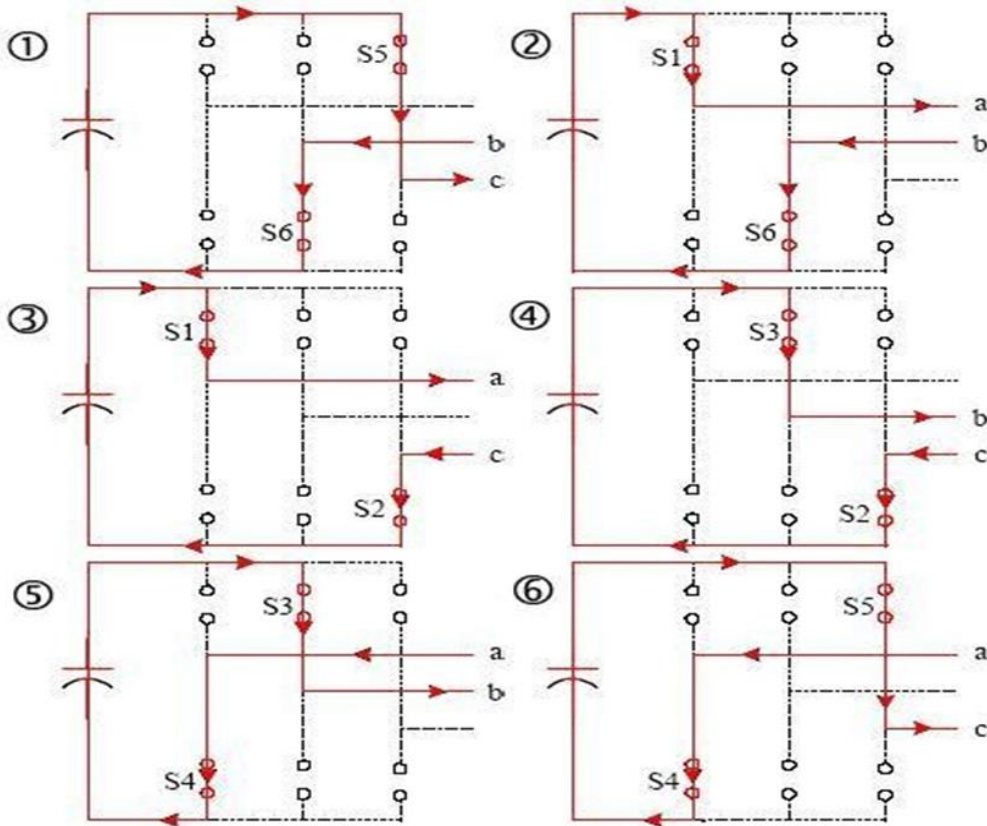
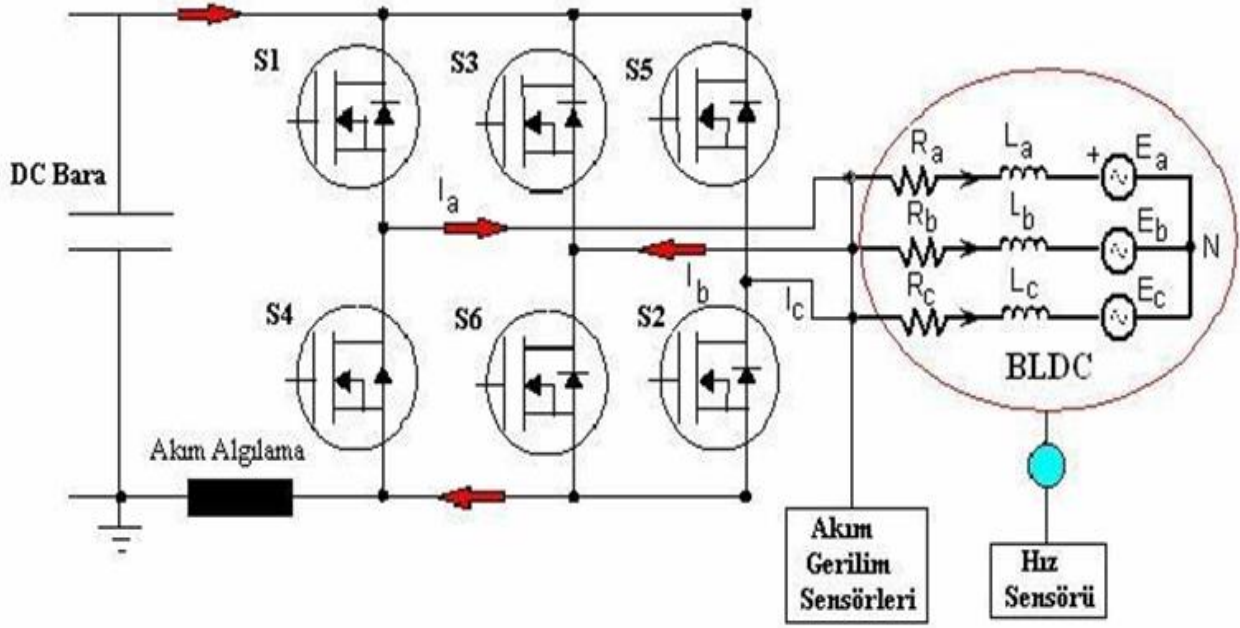
Fırçasız Doğru Akım Motorunun Kontrolü:

Fırçasız doğru akım motorunun kontrolünü iki bağımsız ayrı kısımda incelemek mümkündür.

1. Stator ve rotor akı senkronizasyonu
2. Akım değerinin kontrolü

Bu iki çalışma durumu da üç fazlı evirici tarafından gerçekleştirilir. Akı senkronizasyonu için, algılayıcılardan ya da algılayıcısız kontrolden bilgiler alınır, bu pozisyon bilgisinden yararlanılarak kontrolörün uygun anahtar çiftini sürmesi sağlanarak senkronizasyon gerçekleştirilir. Akım değerinin ayar ve kontrolü sabit 60°lik iletim aralıkları referans alınarak darbe genişlik modülasyonu (PWM) veya histerisiz kontrolle sağlanır. Kaynak gerilimi akım hatasına bağlı olarak belirli bir çalışma oranıyla sabit bir frekansta kırpılır. Bu yüzden hem akımın hem de akım değişim aralığının kontrol edilmesi gerekmektedir. PWM metodunda kırpma frekansı sabit parametrelerden oluştuğu için akustik ve elektromanyetik gürültüyü filtrelemek oldukça kolaydır. Histerisiz metot da ise akım kırpma süreci sabit kırpma frekansında gerçekleştirilemediğinden (anahtarlama frekansı sabit değil) akustik ve elektromanyetik gürültüyü filtrelemek zordur. Bu kontrolde güç anahtarlarının iletme ve kesime sokulması yardımıyla referans akımın gerçek akımdan büyük ya da küçük olmasına bakılmaktadır. Bu amaçla histerisiz kontrolörler de bir histerisiz band içerisinde faz akımı sınırlaması yapılmaktadır. Kaynak gerilimi sabitken, akım hatası değişken olduğundan anahtarlama frekansı değişkendir.

İki faz iletimli BLDC'nin karakteristiğinden dolayı birim zamanda akımın algılanması için tek bir motor fazına akım algılayıcı yerleştirmek yeterlidir. Bu akım algılayıcı sayesinde diğer faz akımlarını da kontrol etmek mümkündür. Fırçasız doğru akım motorunun 120° elektriksel açılarda iletim durumu için uygun güç anahtar çiftlerinin iletim eşdeğer devreleri aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Şekil 15. Fırçasız doğru akım motorunun 120° elektriksel açılarda iletim durumu için uygun güç anahtar çiftlerinin iletim eşdeğer devreleri

BLDC MOTOR ÖRNEKLERİ:



Şekil 16. 100W 12V / 24V 3000rpm BLDC Motor

100W fırçasız DC motor, yüksek performansla tasarlanmış, 3000 dev / dak. Anma hızına, 60 mm küçük flanş boyutuna sahip, 12V veya 24V DC gerilimde, 0.32Nm tutma torku ve 0.96Nm'ye kadar tepe torku üzerinde çalışıyor.

1/2 hp (400W) 24/48 / 72V 2000 dev/dak Fırçasız DC Motor



Şekil 17. 2000 rpm düşük hız ve 2 Nm tutma torku ile 110 mm kare flanş boyutlu fırçasız dc motor, 24V/48V/72V besleme gerilimi üzerinde 400 W anma gücü, 2000 rpm anma hızı, salmastra ile IP54 derecesi, nemli veya nemli ortamlara maruz kalabilir.



Şekil 18. 72 V 5000 W elektrikli otomobil BLDC elektrikli motorlu scooter motoru (bisiklet, otomotiv)

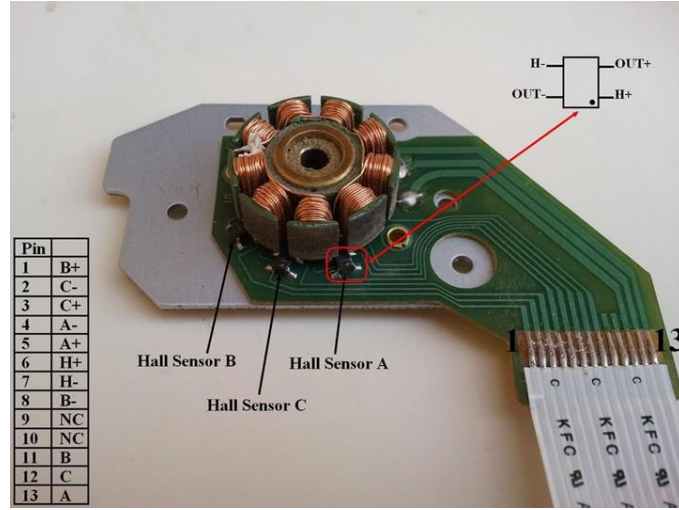


Şekil 19. Elektrikli araç için 48 V BLDC motoru



Şekil 20. Fırçasız 12V DC su pompası

Şekil 21. CD-ROM



Şekil 22. Printer



Fırçasız Doğru Akım Motor Parametreleri:

İtke Ağırlık Oranı (ThrustTo Weight Ratio) ideal olarak İHA havada (Hover durumu) yaklaşık yarı gazda kalabilmelidir. Diğer bir deyişle %50 İtke oranı ile İHA'yı havaya kaldıracak itki kuvveti olacaktır. Böylelikle kontrol ve rüzgarda stabil kalabilmek için yeterli itki kuvveti olacaktır.

Örnek: 4 kg ağırlığında 4 motorlu bir döner kanatlı İHA toplamda 8 kg ağırlık kaldırabilecek itki kuvvetine sahip olmalıdır. Bu durumda her motorda 2 kg itki kuvveti oluşturacak şekilde motor ve pervane seçimi yapılmalıdır.

Örnek Motor Verileri:

Gerilim	Pervane Ölçüleri	Akım	İtki	Güç	Verim	Devir
The voltage (V)	Paddle size	current (A)	thrust (G)	power (W)	efficiency (G/W)	speed (RPM)
8	Carbon Fibre Prop 6x3	6.4	240	51.2	4.7	11910
12	Carbon Fibre Prop 5x3	7.5	310	90.0	3.4	20100
	Carbon Fibre Prop 6x3	11.5	440	138.0	3.2	16300

- Verim arttıkça uçuş süresi artar.
- İHA görev amacına göre İtki ve verim arasında tercih yapılmalıdır.
- Düşük gerilimlerde verim artar ancak itki azalır.
- Gerilim yükseldiğinde pil ağırlığı da artacaktır.
- Bu da toplam kalkış ağırlığının artmasına neden olacaktır.

Motor Ölçüleri:

Radyo Kontrollü araçlarda kullanılan fırçasız DC motorlar «AABB» yapısında bir kodla tanımlanmaktadır.

AA: stator kalınlığını mm cinsinden

BB: stator yüksekliğini mm cinsinden

Stator yüksekliği arttıkça yüksek devirde güç artar. Stator genişledikçe düşük devirde tork artar.

KV DEĞERİ:

Hız sabitidir: RPM/Volt

Örnek: 2300 kV bir motor için,

3S bir pil kullanılmışsa: 12,6V Maximum değerde $2300 \times 12,6 = 28980$ Devir/Dakika Burada;

Hesaplanan devir yüksüz (pervane yokken) elde edilecek olan devir sayısıdır. Pervane takıldığında bu devir düşecektir. Yüksek kV'li motorlar pervaneyi hızlı döndürecek.

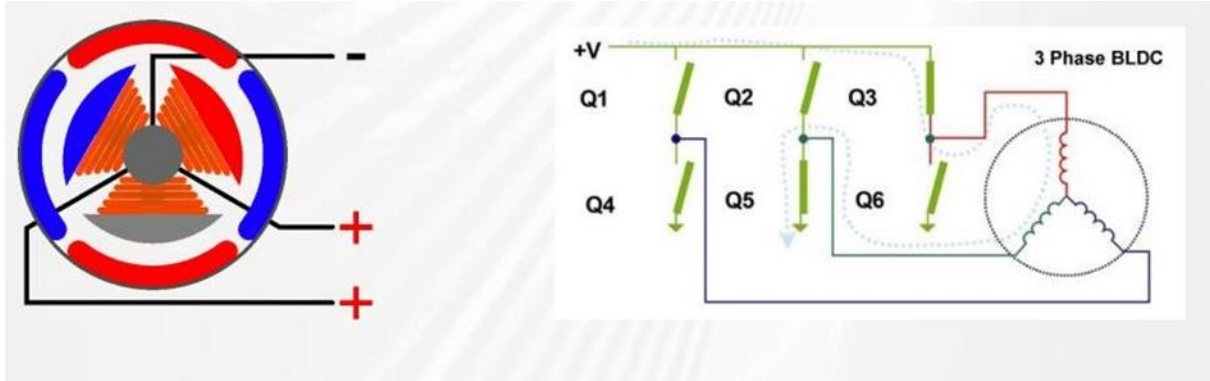
Düşük kV'li motorlar yüksek tork üretir.

Düşük kV'li motorlara büyük pervaneler, yüksek kV'li motorlara küçük pervaneler tercih edilmelidir.

İtke ile motora uygulanan gerilim doğrudan orantılıdır.

Kalkış ağırlığı arttıkça itke için gereken güç artacaktır. Seçilen pile bağlı olarak burada uygulayabileceğiniz gerilim sınırlıdır. O nedenle motorun çekeceği akım önem kazanmaktadır.

Bunun sonucunda kullanılacak Elektronik Hız Kontrol devresinin (ESC) seçiminde akım değerleri önem kazanacaktır. Düşük gerilimli PWM servo kontrol sinyali ESC tarafından yüksek gerilim ve akımda fırçasız motoru sürececek anahtarlamalı işaretlere dönüştürülür.



ESC BAĞLANTISI:

ESC Yüksek gerilimli bataryaya direkt bağlanmalıdır.

Her motor için 1 ESC kullanılması gerekecektir.

Motor bağlantı uçlarının sırası motorun dönme yönünü değiştirir.

Motor beklenenden farklı yöne hareket ediyorsa önce bu bağlantılar kontrol edilmelidir.

ESC kontrol sinyali servo kontrol sinyali ile aynıdır.

ESC kontrol sinyali için standart servo motorlara uygulanan PWM sinyali uygulanmalıdır.

Fırçasız motorlar ilk hareket aldıklarında çalışma akımlarının 3 veya 4katı akım çekmektedir. Bu nedenle ESC seçiminde motorun çekeceği standart akım yanı sıra motor pik akımı düşünülerek ona uygun akım değerlerini sağlayacak ESC seçilmelidir. Aksi takdirde ilk hareket anında ESC transistörleri bu akımı kaldıramayarak yanacaktır.

ESC nin yüksek akımlarda çalışacağı düşünülerek ona uygun bir soğutucusu üzerinde olmalıdır. Bu soğutucunun da verimli soğutma yapabilmesi için araç üzerinde hava akımının yüksek olduğu yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir.

ESC programlanabilir yapıdadır. Bu özellik sayesinde ESC'nin gaz açıldığında düşük tork ile başlama (Yumuşak Başlatma), voltaj düştüğünde veya ESC fazla ısındığında motora giden akımı kesme, dinamik motor freni gibi özellikleri istediğiniz ayarlar ile yeniden programlanabilir.



Li-Po Batarya:



S Değeri (Seri Bağlı Hücre Sayısı):

Bir LiPo batarya hücresi 3.7V nominal değerli gerilime sahiptir.

Tam dolu bir hücre 4.2V değerine sahiptir.

Hiçbir hücre 3V altında gerilim değerine düşmemelidir.

Yaygın olarak 3S 11,1V veya 6S 22,2 nominal değerli piller İHA'larda kullanılmaktadır.

ESC ve Motor gerilimlerinize bağlı olarak uygun S değerli bataryayı seçebilirsiniz.

mAh Değeri (Batarya Akım/Saat Kapasitesi):

Bataryanın 1 saatte kaç miliamper akım sağlayabildiği bilgisini verir.

Bu değer bataryanızın direkt kapasitesini yansıtır.

Örnek: İHA'nız ortalama 20A akım çekiyorsa 5000mAh bir batarya $(5 \times 60)/20 = 15$ dakika size enerji sağlayacaktır.

Hiçbir LiPo batarya %100 deşarj edilmemelidir. Bu nedenle hesaplanan süreden 2-3 dakika daha eksik sürede uçuş yapabileceğinizi düşünmelisiniz.

C katsayısı (Deşarj Oranı):

Bataryanın ne kadar hızlı deşarj olabildiğini gösteren katsayıdır.

Bataryanın kapasitesiyle birlikte değerlendirildiğinde bir anlam ifade eder.

Bu katsayı doğru seçilmezse ESC ve motorunuzun anlık olarak talep ettiği akımı bataryanız sağlayamaz ve aracınız istediğiniz performans değerine çıkamayacaktır.

Pilden anlık çekilebilecek akım (A)= C değeri x Pil kapasitesi(A)

Örnek: $25C \times 5A = 125A$

Örnekteki batarya ile anlık 125A akım sağlanabilmektedir.

Bunun üstünde akıma ihtiyaç duyan bir ESC kullanıyorsanız batarya bu akımı veremeyecek, aşırı ısınma ve yanma riski oluşturacaktır.

Motorun pik akımı da düşünülerek ESC'nin %10 üstünde bir C değeri seçilmelidir.

Piller genelde 1C veya 2C değerinde akımlarla şarj edilmelidir. 5C üzerinde bir akımla şarj etmek pilin patlamasına neden olacaktır.

<https://www.ecalc.ch/>

bu bağlantı adresine girerek hesaplama yapabilirsiniz.