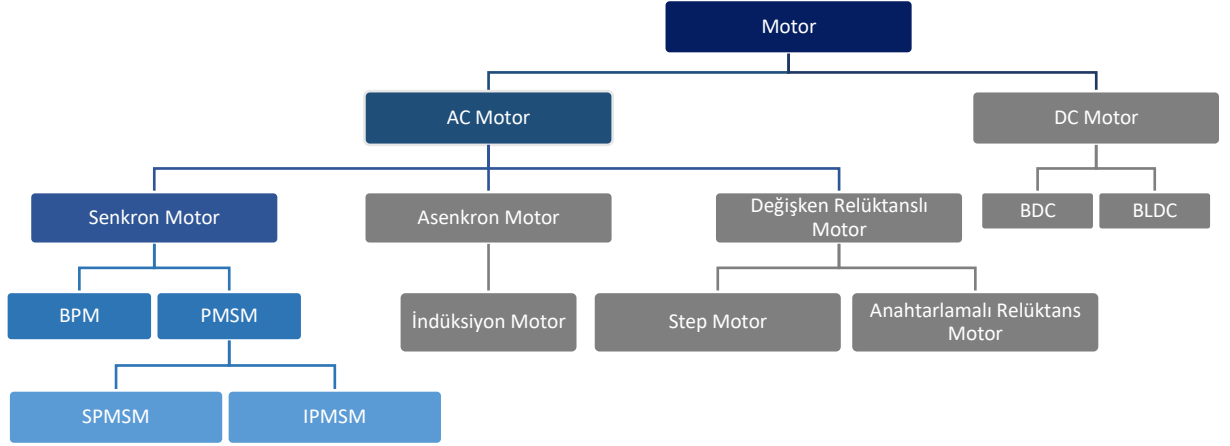


# KALICI (DAİMİ-SÜREKLİ) MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

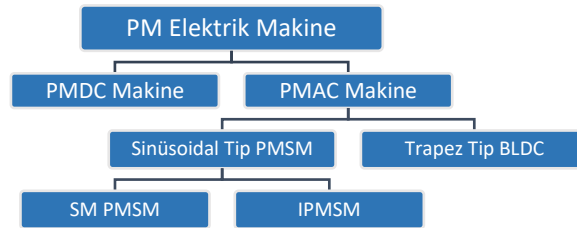
## Motorların Sınıflandırılması

Elektrik motorlarının sınıflandırılması aşağıdaki şekilde görülmektedir. Şekil 1’de görüleceği üzere Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM), Senkron Motor çeşitlerinden biridir.



Şekil 1. Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

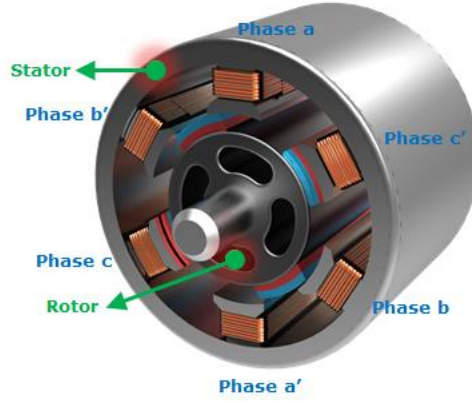
Bir elektrik makinesinde manyetik alanı üretmek için Kalıcı Mıknatıs (PM) kullanıldığında, bir PM motoru haline gelir. Hem DC hem de AC motorlar kalıcı mıknatıslarla yapılabilir. Kalıcı Mıknatıslı motorlar indüklenen emk'nın dalga şekline göre sinüsoidal ve trapez (yamuk) tipli olarak iki türdedir. Sinüsoidal dalga biçiminde emk'ya sahipse PMSM denir, trapez dalga biçiminde emk'ya sahipse BLDC olarak bilinir. Mıknatısların yerleşim şekillerine göre ise Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (SM\_PMSM) ve İç Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (I\_PMSM) olarak iki çeşittir. Bu motorların sınıflandırılması ise Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kalıcı Mıknatıslı Elektrik Makinelerinin Sınıflandırması

## PMSM Yapısı

PMSM, herhangi bir döner elektrik motoru gibi, bir rotor ve bir statordan oluşur. Stator sabit kısımdır, Rotor ise dönen kısımdır-parçadır. PMSM ile Asenkron (indüksiyon) motoru arasındaki ana fark rotordadır ve kalıcı mıknatıslar sebebiyle meydana gelir.



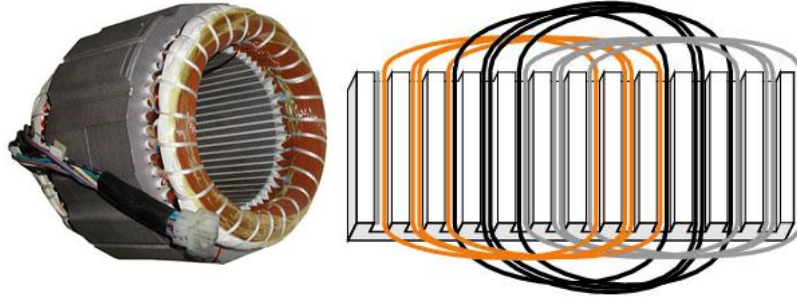
Şekil 3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Yapısı

PMSM, bir endüksiyon motoru ile fırçasız DC motor arasında hibrit (melez) yapıdadır. Fırçasız bir DC motor gibi, sabit mıknatıslı rotor ve üzerinde sargılar olan statordan meydana gelir. Bununla birlikte, makinenin hava boşluğunda sinüzoidal bir akı yoğunluğu üretmek üzere yapılmış sargılara sahip stator yapısı, bir asenkron motorun statoruna benzerdir.

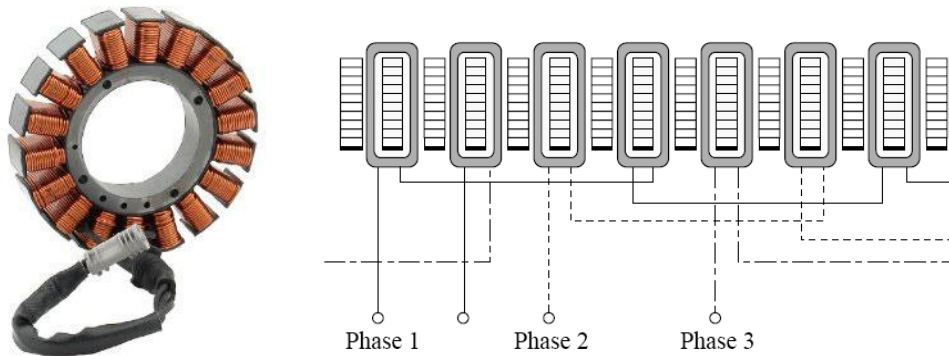
### Stator

Stator bir dış gövdeden ve sarımları olan bir çekirdekten oluşur. Stator tasarımına bağlı olarak, kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM veya PMSM) aşağıdaki sargılarda olabilir:

- Dağıtılmış sargılı
- Dağıtılmamış sargılı



Şekil 4 Dağıtılmış sargılı PMSM statoru



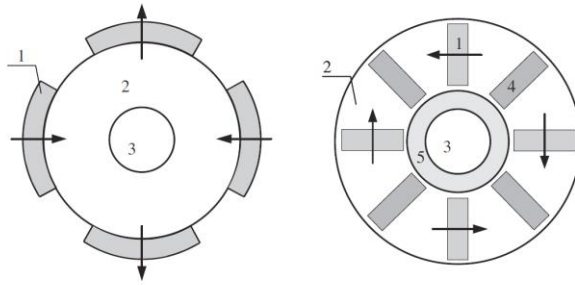
Şekil 5 Dağıtılmamış sargılı PMSM statoru

Statorda, 3 fazlı sargılar stator çekirdeğinde sarılır. Her faz sargısı, diğerlerinden 120 derece ile ayrılır. Üç fazlı asenkron motorda olduğu gibi, 3 fazlı AC akım sargılardan geçtiğinde dönen bir manyetik alan üretilir. Bu döner alan rotor mıknatıslarını çeker veya iter, böylece rotor döner.

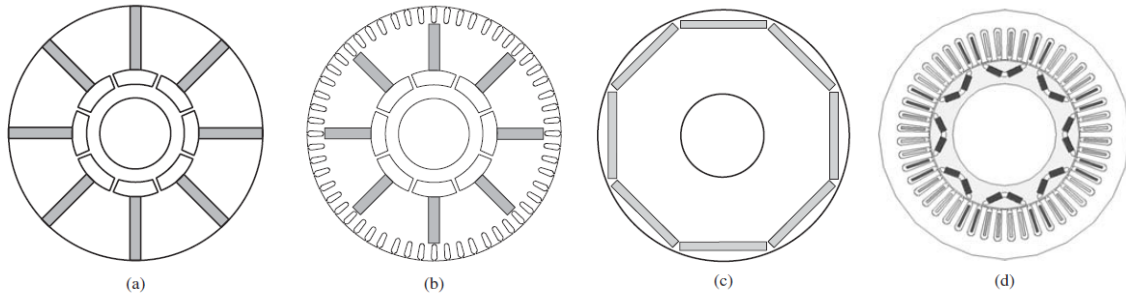
### Rotor

Mıknatısların rotora yerleştirilmesi için Şekil 6’da gösterildiği gibi farklı yöntemler vardır. Mıknatıslar rotorun yüzeyine yapıştırılırsa, yüzeye monteli (Surface Mount) PMSM veya SMPMSM olarak adlandırılır. Mıknatıslar önceden kesilmiş yuvalarda rotorun içine yerleştirilirse, o zaman iç kalıcı (Interior) PMSM veya IPMSM olarak adlandırılır.

Bir SMPMSM için, rotor demir çekirdeğinin kendisi hava aralığına yakın olmadığından rotor katı bir çelik parçası olabilir, bu nedenle girdap akımı kaybı ve yarık/diş harmoniklerinden kaynaklanan histerezis kaybı ihmal edilebilir. IPMSM motoru için, rotorun lamine (ince sac) silikon çelikten yapılması gerekir, çünkü dış/yuva harmonikleri girdap akımı ve histerezis kaybı meydana getirir.



Şekil 6. Rotor yapısı 1-Mıknatıs, 2- Demir Nüve, 3- Mil, 4 ve 5- Manyetik olmayan malzeme



Şekil 7. IPMSM’de Rotor mıknatıslarının yerleştirme şekilleri

Şekil 7’de görüleceği gibi IPMSM’de mıknatısların rotora yerleştirme şekline göre çok farklı yapılandırmaları vardır.

Yüzey montajı ve gömülü PM makineleri genellikle, kalıcı mıknatıs montajlı senkron makineler olarak adlandırılır. SMPMSM’de mıknatıslar kolayca epoksi yapıştırılmış veya silindirik rotora sabitlenmiş kama (hafif gömülü) şeklindedir. Bir IPMSM, rotorun içinde mıknatıslara sahiptir, yapımı daha zordur ancak yüksek hızdaki mıknatıslar üzerinde girdap akımını azaltır.

**Elektrikli makinelerin yapımında kalıcı mıknatısların (PM) kullanılması aşağıdaki avantajları sağlar:**

- Alan uyarma sistemi tarafından hiçbir elektrik enerjisi kaybolmaz ve dolayısıyla verimde önemli bir artış anlamına gelen uyarma kayıpları yoktur,

## Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM)

- Elektromanyetik uyarma kullanıldığında hacim başına daha yüksek moment ve/veya çıkış gücü,
- Elektromanyetik uyarımlı motorlardan daha iyi dinamik performans (hava boşluğunda daha yüksek manyetik akı yoğunluğu),
- Yapım ve bakımın basitleştirilmesi,
- Bazı makineler için fiyatların düşürülmesi.

Rotora yerleştirilen mıknatısların yüzey montajlı olması; PM'leri armatür (endüvi) reaksiyonunun ve merkezkaç kuvvetlerinin manyetik olmayan etkisine karşı korur, asenkron bir başlangıç momenti sağlar ve bir damper olarak görev yapar.

Mıknatısların rotor içine gömülü olması; mıknatıs kutup alanı rotor yüzeyindeki kutup alanından daha küçük olduğundan, açık devre üzerindeki hava boşluğu akı yoğunluğu, mıknatıstaki akı yoğunluğundan daha azdır. Mıknatıs, merkezkaç kuvvetlerine karşı çok iyi korunur. Böyle bir tasarım, yüksek frekanslı yüksek hızlı motorlar için önerilir.

Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek akımlarda manyetikleşmeyi önlemek için genellikle mıknatısların boyutunun artırılması gereklidir. Öte yandan, makinenin performansından ödün vermeden maliyeti azaltmak için mümkün olduğunca az PM malzeme kullanılması avantajlıdır.

PMSM'de Mıknatıs Kalınlığının Rolü:

- Daha kalın mıknatıslar daha yüksek akı sağlar ve böylece amper başına daha fazla moment sağlar.
- Ancak daha yüksek akı aynı zamanda daha yüksek çekirdek kayıpları anlamına gelir.
- Daha kalın mıknatıslar daha düşük indüktans sağlar
- Daha hızlı tepki, ancak daha yüksek PWM akım dalgalanması
- Daha kalın mıknatıslar, motoru manyetikten arındırmalara karşı daha dirençli hale getirir
- Daha kalın mıknatıs da maliyeti önemli ölçüde artırır.
- Kalınlığı iki katına çıkarmak, genelde sadece % 5-10 daha fazla akı verir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan mıknatıs çeşitleri:

- Ferrit
- Alnico (Alüminyum Nikel Cobalt - AlNiCo) Alaşım
- Samaryum Kobalt (SmCo) Alaşım
- Neodimyum Demir Bor (NdFeB) Alaşım

### PMSM Özellikleri

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM), basit yapı, yüksek enerji verimliliği, güvenilir çalışma ve yüksek güç yoğunluğu gibi üstün özellikler nedeniyle yüksek performanslı endüstriyel sürücüler için ideal bir motordur.

PMSM Avantajları:

- AC Asenkron Motorlara (ACIM) kıyasla daha yüksek moment yoğunluğu, yani aynı güç için daha küçük hacim (çerçeve boyutu)
- Kalıcı mıknatıslarla PMSM sıfır hızda (ilk başta-dururken) moment üretebilir
- Kıvılcım yok → Patlayıcı ortamlarda daha güvenli
- Daha verimli ve yüksek hızlı performans
- Yüksek performans gerektiren servo uygulamaları için uygundur

- Enkoder (Encoder-Konum kodlayıcı) ile veya konum kodlayıcı olmaksızın çalışır
- AC Asenkron Motordan daha **kompakt**, verimli ve daha hafif
- **FOC kontrolü ile birleştiğinde optimum tork üretir**
- Düşük akustik gürültü ve elektromanyetik girişim (EMI)
- Hızlı dinamik tepki (hem moment hem de hız)
- Akımsız Rotor uyarımı
- Rotorda iletken kaybı ve ısınma yok

PMSM Dezavantajları:

- Rotor pozisyonunun algılanması (hall etkili sensörler ile) gerekli.
- Motorun çalışması için konum sensörü veya sensörsüz teknik gereklidir.
- Sensörsüz teknik kullanarak motoru çalıştırmak zor.
- Alan akısı kontrolünün esnekliği kaybı
- Daha yüksek maliyetler
- Daima yüksüz döndürme kayıpları var

### Çalışma Prensipleri

Bir PM senkron motor, statoru bir asenkron motorunkine benzer bir stator içerir ve rotor ise sabit manyetik alan oluşturan kalıcı mıknatıslar içerir. Sabit mıknatıslar herhangi bir harici elektrik devresi olmadan kayıpsız bir uyarı sağlar. Asenkron motorlarda üç fazlı simetrik AC beslemeli üç fazlı sargının dönen bir manyetik alan ürettiği biliyoruz. Stator sargılarının senkron AC akımı ile etkileşime giren rotorun manyetik alanı, rotoru dönmeye zorlayan moment meydana getirir. Sabit bir ortalama moment üretmek için, rotor stator alanını takip etmeli ve aynı senkron hızda dönmelidir.

Motor çalıştırıldığında, asenkron motorunkine benzer üç fazlı sargılar ya bir trapez akım formu (fırçasız DC) ya da sinüzoidal akım (senkron AC) ile beslenir. Bu akımlar, rotor ile aynı hızda veya senkron hızda dönen bir manyetik alan oluşturur. Stator akımının frekansı ayarlanarak, rotorun hızı veya senkron hız buna göre ayarlanabilir.

### Sinüzoidal PMSM'nin Matematiksel Modeli

SPMSM'ler için matematiksel model (1) ila (7) denklemlerinde gösterilmiştir. Dinamik model, rotor akısı yönelimli referans çerçevesindedir. Rotor ve rotor akı uzay vektörünün dönme hızı, senkron motor için aynıdır ve bunlar referans çerçevesinin dönme hızına eşittir  $\omega_a = \omega_r = \omega$  :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_r \psi_{qs}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_r \psi_{ds} \quad 1$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad 2$$

$$T_e - T_L = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad 3$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_f \quad 4$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} \quad 5$$

$$\psi_f = L_f i_f + L_m i_{ds} \quad 6$$

$$T_e = \frac{3}{2}P(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) \quad 7$$

Stator gerilimi ve stator akımı için dönüşüm denklemleri, (8) ila (10) denklemlerde gösterilir, burada  $\theta$ , rotorun anlık açısıdır:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \frac{2}{3} \left[ v_a \cos \theta + v_b \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + v_c \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \\ v_{qs} &= -\frac{2}{3} \left[ v_a \sin \theta + v_b \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + v_c \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad 8$$

$$\begin{aligned} i_a &= i_{ds} \cos \theta - i_{qs} \sin \theta \\ i_b &= i_{ds} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{qs} \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c &= i_{ds} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) - i_{qs} \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad 9$$

$$\theta = \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau + \theta(0) \quad 10$$

Senkron motorun rotoru kalıcı bir mıknatıs olduğunda, mıknatıs tarafından üretilen mıknatıslanma akısı bağlantısı, aşağıdaki gibi hayali bir alan akımı olarak ifade edilebilir:

$$\psi_m = L_m i_f \quad 11$$

Keyfi dönen bir referans çerçevesindeki matematiksel model, (11) denklemi (1) ila (7) denklemlerine uygulanmasıyla yeniden yazılabilir:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \end{aligned} \quad 12$$

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= L_s i_{ds} + \psi_m \\ \psi_{qs} &= L_s i_{qs} \end{aligned} \quad 13$$

$$T_e - T_L = \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} \quad 14$$

$$T_e = \frac{3}{2}P(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) = \frac{3}{2}P\psi_m i_{qs} \quad 15$$

## **Kontrol (Sürme-Tahrik) Teknikleri**

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor, değişken bir frekans sürücüsü veya bir servo sürücü gibi bir kontrol sistemi gerektirir. Kontrol sistemlerinde uygulanan çok sayıda kontrol tekniği vardır. Optimum kontrol yönteminin seçimi temel olarak elektrikli sürücünün önüne konan göreve bağlıdır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorun kontrol edilmesi için ana yöntemler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir;

Tablo 1. PMSM Kontrolü için popüler teknikler.

Kontrol				Avantajlar	Dezavantajlar
Sinüoidal	Skaler Kontrol			Basit Kontrol Şeması	Kontrol optimum değildir, değişken yük, kontrol kaybının mümkün olduğu işler için uygun değildir
	Vektörel Kontrol	Alan Yönlendirmeli Kontrol	Konum Sensörlü	Rotor pozisyonu ve motor dönüş hızı, geniş kontrol aralığı için düzgün ve hassas ayar.	Kontrol sistemi içinde rotor pozisyon sensörü ve güçlü bir mikrodenetleyici gerektirir
			Konum Sensörsüz	Rotor konum sensörü gerekli değil. Rotor pozisyonu ve motor devir hızı, geniş kontrol aralığı, ancak pozisyon sensörü ile olandan daha yumuşak ve hassas ayar.	Tam hız aralığında sensörsüz alan odaklı kontrol sadece çıkıntılı kutup rotorlu PMSM için mümkündür, güçlü bir kontrol sistemi gereklidir.
		Doğrudan Moment Kontrol		Basit kontrol devresi, iyi dinamik performans, geniş kontrol aralığı, rotor konum sensörü gerekmez.	Yüksek tork ve akım dalgalanması
	Trapez	Open Loop			Basit kontrol şeması
Closed Loop		Konum Sensörlü		Basit kontrol şeması	Hall sensörü gerekli. tork dalgalanmaları var. Trapez zıt emk'li PMSM'nin kontrolü için tasarlanmıştır. PMSM'yi sinüzoidal zıt emk ile kontrol ederken, ortalama tork %5 daha düşüktür.
		Konum Sensörsüz		Daha güçlü kontrol sistemi gerekli	Düşük hızda çalışmaya uygun değil. Tork dalgalanmaları var. Trapez zıt emk'li PMSM'nin kontrolü için tasarlanmıştır. PMSM'yi sinüzoidal zıt emk ile kontrol ederken, ortalama tork %5 daha düşüktür.

Motor kontrol tasarımcılarının çoğu, sistem maliyetini düşürürken, verimliliği artırmak için sürekli yöntemler araştırmaktadır. Bunlar, mevcut motor tasarımlarını ve motor kontrol tekniklerini geliştirme çabalarını zorlayan iki ana faktördür.

## Sensörlü Teknikler

Sensörlü teknikler, rotorun hızını ve konumunu tespit etmek için rotora bağlı elektromekanik-manyetik sensörler kullanır. En yaygın kullanılan sensörler arasında çözücüler, kodlayıcılar ve Hall efekt sensörleri bulunur. BLDC'ler ve PMSM'ler genellikle bir veya daha fazla rotor konumu sensörüyle çalışır, çünkü stator elektriksel uyarmasının rotor pozisyonu bilgisine ihtiyaç vardır.

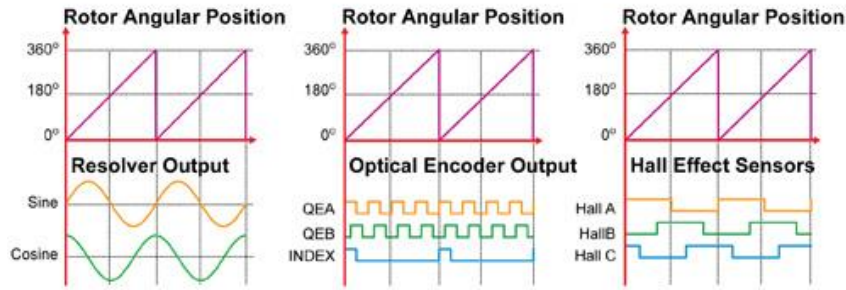
Alan yönlendirmeli kontrol (Field Oriented Control-FOC) algoritmasının uygulanması için rotor konumunun bilinmesi gereklidir. Rotor konumu ise konum (pozisyon) sensörleri ile veya sensörsüz (büyüklükleri tahmin yöntemleri kullanarak kestirmek) yöntemler olarak belirlenebilir. Kullanılan pozisyon sensörleri endüktif, optik ve manyetik olarak üç çeşittir.



Düşük maliyetli, sensör tabanlı uygulamalarda, en yaygın algılama yöntemi, rotora monte edilmiş Hall etkili (effect) sensörlerden oluşur. Üç Hall etkili algılayıcı, rotorun pozisyonundaki her 60° ilerleme için bilgi sağlar, bu da motor dönüştürme için tam zamanlamayı sağlar.

Hassas konum algılamanın hayati olduğu uygulamalar için en iyi algılayıcı yöntemi enkoder (çözümleyici)dir. Aynı zamanda, en pahalısıdır, çünkü motora harici olarak monte edilmiştir. Yüksek çözünürlüğü (devir başına 1024 veya daha yüksek) ve mutlak pozisyonu algılama kabiliyetinden dolayı, endüstriyel kontroldeki servo uygulamaları için tercih edilen konum sensörüdür.

Optik artımlı enkoderler söz konusu olduğunda, çözünürlük hala çok yüksektir (devir başına yaklaşık 512 durum), ancak açılışta mutlak bir pozisyon algılanamamıştır. Optik kodlayıcı harici olarak monte edildiğinden de pahalıdır. Çözünürlükleri nedeniyle servo uygulamalarında da kullanılırlar. Üç sensör tipi için çıkış dalga şekli aşağıdaki gibidir.



Şekil 8. Sensör çıkış dalga şekilleri

### Sensörsüz Teknikler

Maliyet, güvenilirlik, mekanik ambalajlama nedeniyle ve özellikle rotor sıvıya batırılmışsa, motorun konum sensörleri olmadan çalıştırılması istenir. Bu, sensörsüz işlem olarak bilinir.

Sensörsüz kontrolün belirgin maliyet avantajı, pozisyon sensörlerinin kaldırılmasıdır. Düşük maliyet birincil bir endişe ise, çok düşük hızlı motor çalışması bir zorunluluk değildir ve motor yükünün hızlı bir şekilde değişmesi beklenmiyorsa, sensörsüz kontrol bir uygulama için daha iyi bir seçim olabilir.

Sensör bazlı teknikler, yüksek çözünürlüklü pozisyon algılamanın şart olduğu uygulamalarda kullanılır. Sensör kullanmanın maliyeti, sensörsüz tekniklerde kullanılan devrelere kıyasla nispeten yüksektir. Sensörsüz teknikler, düşük maliyetin birincil öneme sahip olduğu uygulamalarda, çok düşük hızlı motor çalıştırmanın bir gereklilik olmadığı ve motor yükünün hızlı bir şekilde değişmesi beklenmeyen uygulamalarda kullanılır.

Sensörsüz Alan yönlendirmeli kontrol, tüketici (klima, buzdolabı), endüstriyel (üfleleyici, pompa) ve ticari (asansör, yürüyen merdiven) ürünler dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılır.

### PMSM ile Kullanılan Sensörler

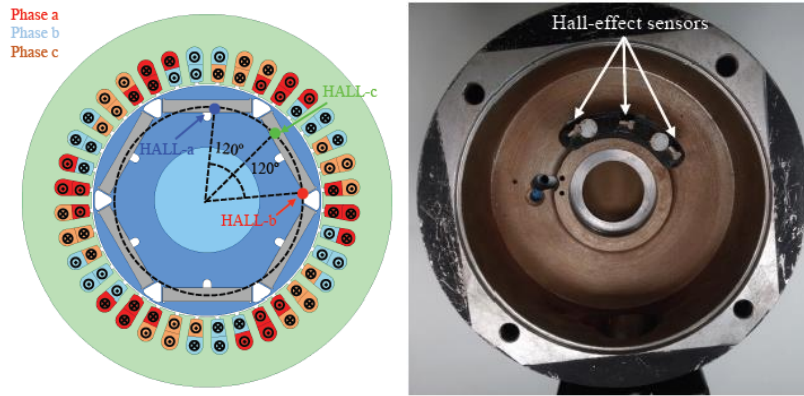
PMSM'lerin kontrolü, makinenin çalıştırılmasından önce rotor konumu ölçümü/tahmininin yanı sıra mıknatıs kutuplarının (her birinin polaritesi) konum bilgisini gerektirir. PMSM'lerin rotor pozisyonları tipik olarak enkoderler kullanılarak ölçülürken, mıknatıs polaritesi genel olarak dijital Hall efekt (etkili) sensörler kullanılarak ölçülür. Sonuç olarak, ticari PMSM'ler genellikle her iki sensör türüyle de donatılmıştır.



## Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM)

Enkoderlerin maliyeti ve buna bağlı kablolama ve arayüzler, özellikle düşük güçlü uygulamalarda toplam sürücü maliyetinin önemli bir kısmını oluşturabilir. Ek olarak, sensör (örneğin hareketli parçalar, kuplaj...) ve ilgili kablo ve konnektörler, sürücü güvenilirliğini azaltan bir arıza kaynağı olabilir. Bu nedenlerden dolayı, konum/hız sensörünün kaldırılması (sensörsüz teknikler) her zaman arzu edilir.

Hall efekt sensörleri, genellikle mıknatıslı mıknatıs makinelerinde kullanılır; fırçasız DC (BLDC), iç PMSM'ler (IPMSM'ler), yüzey PMSM'leri (SPMSM'ler) gibi, hem mıknatıs polaritesi hem de konum tahmini için. Dijital hall etkili sensörler, 60 elektrik derecesinde çözünürlükle pozisyon tahminleri sunar. Bu çözünürlük, 120 elektrik dereceli kare dalga formu gerilimi ile beslenen BLDC sürücüler için yeterlidir, ancak IPMSM'ler ve SPMSM'ler kullanan AC sürücülerinin moment kontrolü ve ayrıca hareket kontrolü için yetersizdir.



Şekil 9. Hall Effect Sensör

### PMSM ile Asenkron Motorların Karşılaştırılması

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), Yüksek tork/atalet oranı, güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik, onları birçok uygulama için endüstrinin işgücü indüksiyon makinelerine alternatif haline getirmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. PMSM'nin asenkron motorla karşılaştırıldığında avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aynı boyut için daha yüksek tork. Aynı güç için, boyut neredeyse %25 daha düşüktür;</li><li>• Aynı güç için daha düşük ağırlık, yaklaşık %25;</li><li>• %3'e kadar daha yüksek verim ile sonuçlanan düşük rotor kayıpları;</li><li>• Rotorun daha yumuşak çalışmasına neden olan 3dB ile motor gürültüsünü azaltmıştır. Bu, hava boşluğunun düzensizliğinden kaynaklanan harmonikler azaltmaya yardımcı olur;</li><li>• Manyetik yol içinde daha yüksek endüktans, yaklaşık 1.2 [T].</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• İnvertör arızası durumunda, motor ve invertör arasında bir anahtar kullanımını zorlayan tork dalgalanmasını azaltarak manyetik alanı azaltmak mümkün değildir;</li><li>• İnvertöre sadece bir motor bağlamak mümkündür; bu nedenle grup motor çalışması mümkün değildir;</li><li>• Kapalı motor muhafazasını kullanan kalıcı mıknatıs kuvvetlerinin kullanılması, soğutma işlemini zorlaştırır;</li><li>• Anahtarlama kayıplarını ve ayrıca invertör yapısını artıran güç transistörlerinin yüksek anahtarlama frekansını kullanmanın önemi, örneğin; trapez invertör;</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Motor çalışırken invertör bloke olması durumunda invertör voltajında bir artış. Bu, DC linkinde kıyıcı kullanılması gerekliliği ile sonuçlanır;</li><li>• Motorun daha yüksek fiyatı (yaklaşık% 10-20).</li></ul>
--	---

### PMSM ile BLDC Motorların Karşılaştırılması

BLDC makinelerin maliyeti genellikle SPMSM'lerin maliyetinden daha düşüktür. Ancak, SPMSM'in performansları çok daha iyidir.

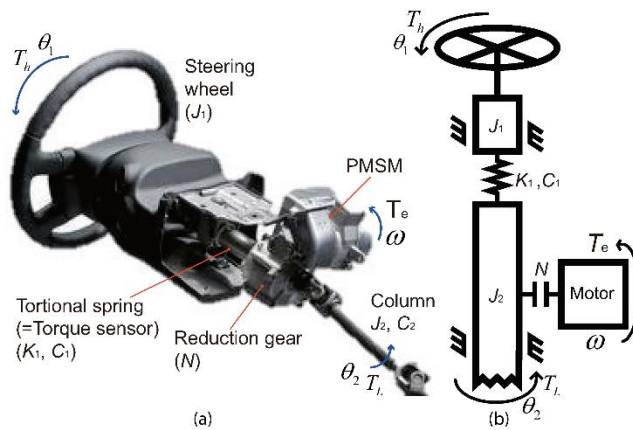
PMSM daha verimlidir ve BLDC motorundan daha düşük moment dalgalanmasına sahiptir. Bu gelişmelerin, BLDC'lere kıyasla PMSM motorlarda kullanılan farklı kontrol tekniklerinin bir sonucu olduğunu belirtmek önemlidir.

BLDC motorlarını kontrol etmek için kullanılan en yaygın teknik trapez kontrolüdür. Bununla birlikte, hem PMSM hem de BLDC motorları sinüzoidal kontrol ve Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) kullanılarak kontrol edilebilir.

### Kullanıldığı Yerler

PMSM yaygın olarak endüstriyel, nakliye ve elektrikli araçlarda kullanılır.

PM motorları, yüksek verimlilik, kompakt (bütünleşik, hepsi bir arada) boyut, düşük hızlarda yüksek moment ve rejeneratif (geri kazanımlı) frenleme için kontrol kolaylığı nedeniyle Elektrikli Taşıtlar (ET-EV:Electric Vehicle) ve Hibrit Elektrikli Taşıtlar (HET-HEV) güç aktarma uygulamaları için en popüler seçeneklerdir. HEV aktarma organlarındaki PM motor, normal sürüş sırasında bir motor olarak veya araç manevraları ve kontrol stratejilerinin gerektirdiği şekilde rejeneratif frenleme ve güç ayrılması sırasında bir jeneratör olarak çalıştırılır. Daha yüksek güç yoğunluklarına sahip PMSM artık artan oranda uçak, denizcilik ve uzay uygulamaları için tercih edilmektedir.



Şekil 10. Elektrikli direksiyon sistemi (EPS) sisteminin resmi ve şeması.



Şekil 11. Toyota Hibrit Camry’inde kullanılan PMSM Motor

Kullanım Yerlerine göre PMSM Motor Gücü Aralığı:

- 15 kW’a kadar Hibrit otomobillerde,
- 150 kW’a kadar uzun SUV’larda,
- 1000 kW’a kadar çekicilerde,
- 500 kW-1000 kW arası rüzgar türbinlerinde,
- Küçük motorlar ısı pompalarında kullanılır.

### KAYNAKLAR

1. Dursun M., BOZ A.F., KALE M., KARABACAK M, “Sensorless Speed Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor With Hybrid Speed Controller Using Model Reference Adaptive System”, Düzce Üniversitesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, Cilt 3, Sayı 1, 24-37, 2014
2. SONG Q., LI Y., JIA C., “A Novel Direct Torque Control Method Based on Asymmetric Boundary Layer Sliding Mode Control for PMSM”, Energies 2018, 11, 657; doi:10.3390/en11030657, 2018.
3. nbnfi-fe200906241647.pdf
4. ABURUB H., IKBAL A, GUZINSKI J, “High Performance Control of AC Drives With Matlab/Simulink Models” Kitap, 2012.
5. MI C, MASRUR M.A, GAO D.W., “Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications With Practical Perspectives”, kitap, 2011.
6. WebSitesi:  
“<https://functionbay.com/documentation/onlinehelp/default.htm#!Documents/pmsmpermanentmagnetsynchronousmachine.htm>”, Ekim 2019.
7. Web Sitesi: “<https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-types/permanent-magnet-synchronous-motor>”, Ekim 2019.
8. Web Sitesi: “[https://jp.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pmsm.html?searchHighlight=PMSM&s\\_tid=doc\\_srchttitle#examples](https://jp.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pmsm.html?searchHighlight=PMSM&s_tid=doc_srchttitle#examples)”, Ekim 2019.
9. Web Sitesi: “<https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>” Ekim 2019.
10. Web Sitesi: “<https://top10electrical.blogspot.com/2014/03/permanent-magnet-synchronous-motor.html>”, Ekim 2019.
11. Web Sitesi: “<https://www.cypress.com/file/285116/download>”, “FM3 Family 3 Phase PMSM FOC Control”, Ekim 2019.
12. Web Sitesi: “<https://functionbay.com/documentation/onlinehelp/default.htm#!Documents/pmsmpermanentmagnetsynchronousmachine.htm>”, Ekim 2019.

13. Web Sitesi: “<https://www.slideshare.net/Prajapatirajeev/study-of-permanent-magnet-synchronous-machine>”, Ekim 2019.
14. MUSTAFA B., “Field Weakening Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Employing Model Order Reduction”, AALTO University, Y.L. Tez, 2018.
15. Mohanty M.K, “Direct Torque Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives With Conventional And Svm Approach”, National Institute of Technology, Rourkela, 2014.
16. Web Sitesi: “<https://slideplayer.com/slide/5735503/>”, “Permanent Magnet Synchronous Motor Drives (PMSM)”, Ekim 2019.
17. ROSS C., “Aspects of Permanent Magnet Machine Design”, Illinois University, 2011.
18. Web Sitesi: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1224>, Ekim 2019.