



MOTORLU ARAÇLAR TEKNOLOJİSİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ELEKTRİK MOTORLARI VE SÜRÜCÜ SİSTEMLERİ

2023-2-TR01-KA210-VET-000180148

Elektrikli Araçlar Teknolojisinde 4.0 Standartlarına Göre Yeni Uygulamalar



Funded by
the European Union

Avrupa Birliği Erasmus+ Programı tarafından finanse edilmektedir. Ancak burada yer alan bilgilerin herhangi bir şekilde kullanılmasından Avrupa Komisyonu ve Türkiye Ulusal Ajansı sorumlu tutulamaz



Funded by
the European Union



Bu öğrenme materyali 2023-2-TR01-KA210-VET-000180148 nolu Elektrikli Araçlar Teknolojisinde 4.0 Standartlarına Göre Yeni Uygulamalar projesi kapsamında hazırlanmıştır. Mesleki eğitim eğitimcilerine rehberlik etmesi amaçlanmaktadır. Kullanıcılar için ücretsizdir, satılamaz, çoğaltılamaz. Proje Web Sitesinde (<https://evta40.com>) bir e-kitap olarak yayınlanacaktır.

İÇİNDEKİLER

AÇIKLAMALAR	v
1. DOĞRU AKIM MOTORLARI	1
1.1. Manyetizma.....	1
1.1.1. Manyetik geçirgenlik.....	2
1.1.2. Prensipler ve Tanımlar	2
1.1.2.1. Amper prensibi	2
1.1.2.2. Faraday'ın İndüksiyon Prensipleri	3
1.1.2.3. Lenz prensibi	4
1.1.2.4. Lorentz prensibi.....	4
1.1.2.5. İndüktans.....	4
1.1.2.6. Manyetomotor kuvvet.....	5
1.1.2.7. Relüktans	5
1.2. Doğru Akım Motorları	6
1.2.1. Stator (Endüktör).....	7
1.2.2. Rotor (Endüvi)	7
1.2.3. Kolektör (Komütatör) ve Fırçalar (Kömürler).....	8
1.2.4. Gövde ve Kapaklar	9
1.2.5. Rulman ve Yataklar	9
1.3. Doğru Akım Motor Çeşitleri.....	10
1.3.1. Fırçalı Doğru Akım Motoru	10
1.3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru (BLDC)	11
1.3.2.1. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru (İnrunner-İnranır BLDC)	11
1.3.2.2. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru (Outrunner-Autranır LDC)	11
1.3.3. Seri Motor	12
1.3.4. Servo Motor	12
1.3.5. Step Motor	13
1.4. Doğru Akım Motorlarının Çalışması.....	14
1.4.1. Fırçalı DC Motorların Çalışması	14
1.4.2. Fırçasız DC Motorların Çalışması	15
2. ASENKRON MOTORLAR	17

2.1. Asenkron Motorların Yapısı	17
2.1.1. Stator	18
2.1.2. Rotor	18
2.1.3. Asenkron Motorların Stator ve Rotor Sargılarının Elektrik Kaynağına Bağlantı Şekilleri	19
2.1.3.1. Yıldız Bağlantı	19
2.1.3.2. Üçgen Bağlantı	20
2.2. Asenkron Motorların Çeşitleri	20
2.2.1. Fazlarına Göre Asenkron Motorlar	20
2.2.1.1. Tek Fazlı Asenkron Motorlar	21
2.2.1.2. Üç Fazlı Asenkron Motorlar	21
2.2.2. Yapılarına Göre Asenkron Motorlar	21
2.2.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar	21
2.2.2.2. Bilezikli (Rotor Sargılı) Asenkron Motorlar	21
2.3. Asenkron Motorların Çalışması	22
2.3.1. Asenkron Motorlarda Yol Verme	25
2.3.1.1. Frekans Değiştirici (İnvertör) İle Yol Verme	25
3. RELÜKTANS MOTORLAR	27
3.1. Relüktans Motorların Yapısı	27
3.1.1. Stator	28
3.1.2. Rotor	28
3.2. Relüktans Motor Çeşitleri	29
3.2.1. Anahtarlama Relüktans Motor (SRM)	30
3.2.2. Senkron Relüktans Motor (SynRM)	30
3.2.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor (PMSynRM)	31
3.3. Relüktans Motorların Çalışması	31
3.3.1. Relüktans Motorun Çalışması	31
3.3.2. Kalıcı Mıknatıslı Relüktans Motorun Çalışması	33
4. SENKRON MOTORLAR	35
4.1. Senkron Motorlar	35
4.1.1. Senkron Motorların Yapısı	35
4.1.1.1. Stator	35

4.1.1.2. Rotor.....	36
4.2. Senkron Motorların Çeşitleri	36
4.2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı (SMSM).....	36
4.2.1.1. Stator	37
4.2.1.2. Rotor.....	37
4.2.1.3. Rotor Konum ve Devir Sensörü	38
4.2.1.4. Stator Sargıları Sıcaklık Sensörü	39
4.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması	39
4.2.2.1. Stator Sargı Düzenine Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	39
4.2.2.2. Rotorda Kullanılan Kalıcı Mıknatısların Yerleşimine Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	40
4.3. Senkron Motorlara Yol Verme.....	42
4.3.1. Değişken Frekanslı İnvertör Kullanarak Yol Vermek	43
4.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Çalışması	44
4.5. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarında Yapılan Kontroller	45
4.5.1. Görsel Kontroller	45
4.5.2. Elektriksel Kontroller.....	45
4.6. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Avantaj ve Dezavantajları	46
4.6.1. Avantajları	46
4.6.2. Dezavantajları	46
5. TEKERLEK İÇİ MOTORLAR.....	48
5.1. Tekerlek İçi Motorların Yapısı	48
5.1.1. Tekerlek İçi Motorların Tarihçesi	48
5.1.2. Tekerlek İçi Motorun Parçaları	50
5.1.2.1. Tekerlek içi Motorun Statoru	51
5.1.2.2. Tekerlek içi Motorun Rotoru	51
5.1.2.3. Tekerlek içi Motorun İnvertörü.....	52
5.1.3. Tekerlek İçi Bir Motorun Özellikleri.....	52
5.1.4. Tekerlek içi Motorların Kullanım Alanları.....	53
5.2. Tekerlek İçi Motorların Çeşitleri	54
5.3. Tekerlek İçi Motorların Çalışması	55
5.4. Tekerlek İçi Motorların Avantaj ve Dezavantajları	55

5.4.1. Avantajları	55
5.4.2. Dezavantajları	56
5.5. Tekerlek İçi Motorlarda Yapılan Kontroller.....	56
5.5.1. Görsel Kontroller	56
5.5.2. Elektriksel Kontroller.....	57
6. SENKRON JENERATÖRLER.....	58
6.1. Senkron Jeneratörün Tanımı	58
6.3. Senkron Jeneratör Çeşitleri	60
6.4. Senkron Jeneratörün Çalışması	61
6.5. Rejeneratif Fren Sisteminin Çalışma Prensipleri	62
KAYNAKÇA	64

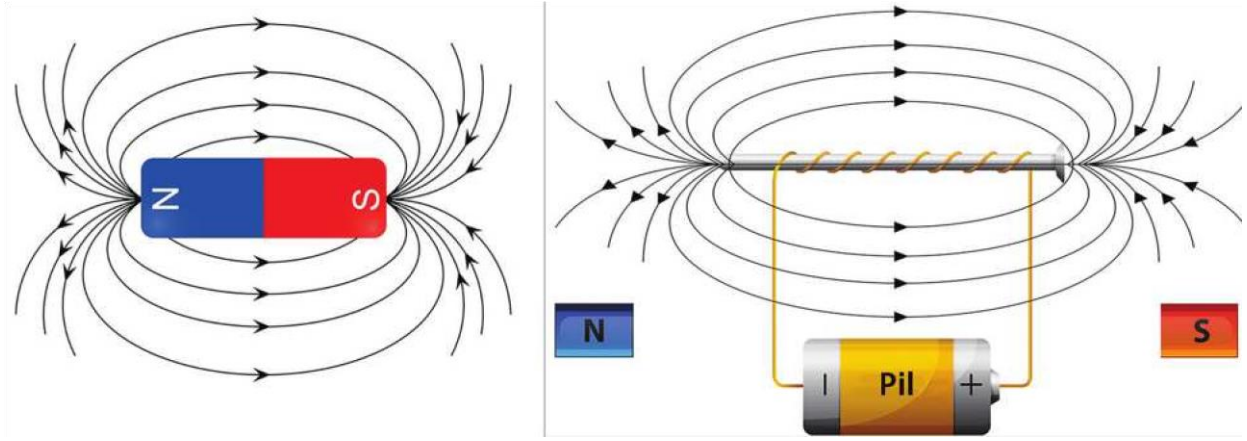
AÇIKLAMALAR

ALAN	Motorlu Araçlar Teknolojisi
MESLEK	Elektrikli Araçlar
MODÜLÜN ADI	Elektrikli Araçlarda Elektrik Motorları ve Sürücü Sistemleri
MODÜLÜN TANIMI	Bu modül, elektrik motorları ve sürücü sistemlerine ilişkin temel bilgi ve becerilerin kazandırıldığı, elektrikli araçlarda kullanılan motor sistemlerine yönelik yapı, çalışma prensibi ve kontrol uygulamalarını içeren bir öğrenme materyalidir.
YETERLİK	Elektrikli araçlarda kullanılan motor ve sürücü sistemlerinin bileşenlerini tanımak, çalışma prensiplerine göre bakım gereksinimlerini belirlemek, temel bakım uygulamalarını yapmak ve ilgili sistemlerin kurulumunu gerçekleştirmek.
MODÜLÜN AMACI	Genel amaç Bu modül ile elektrik motorları ve sürücü sistemlerinin temel bileşenlerini tanıyabilecek, elektrikli araçlara özgü bakım gereksinimlerini belirleyebilecek, sistemlerin montaj ve temel bakım işlemlerini yapabileceksiniz. Amaçlar 1. Elektrik motorlarının ve sürücü sistemlerinin yapılarını ve işlevlerini tanıyabilecektir. 2. Elektrikli ve içten yanmalı araç motorlarının bakım ihtiyaçlarını karşılayabilecektir. 3. Elektrikli araçlarda kullanılan motor ve sürücü sistemlerinin temel bakımını yapabilecektir. 4. İnvertör, batarya ve sensör gibi teknolojik bileşenlerin kurulum ve bakımını gerçekleştirebilecektir.

1. DOĞRU AKIM MOTORLARI

1.1. Manyetizma

Demir, nikel ve kobalt gibi maddeleri çekme özelliği olan maddelere mıknatıs denir. Kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıs olmak üzere iki çeşit mıknatıs vardır. Kalıcı mıknatıslar da doğal mıknatıs ve yapay mıknatıs olmak üzere iki çeşittir. Görsel 1.1’de daimî mıknatıs ve elektromıknatıs gösterilmiştir.

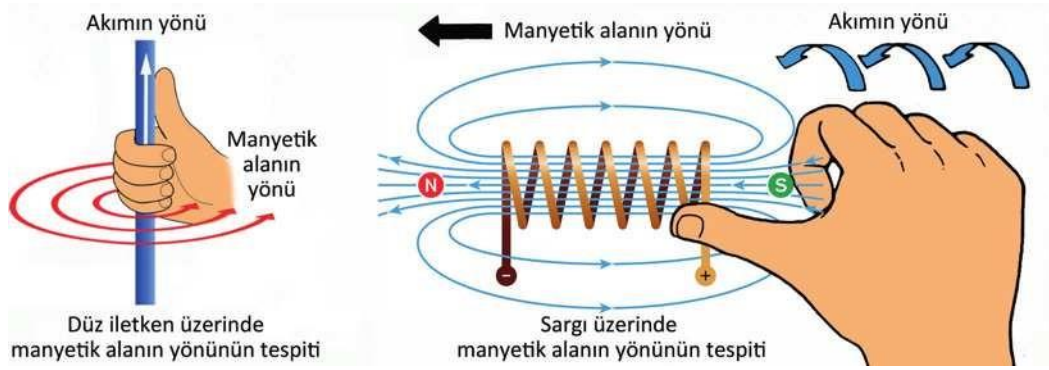


Görsel 1.1: Daimî mıknatıs ve elektromıknatıs

Mıknatısların Kuzey Kutbu ve Güney Kutbu olmak üzere iki kutbu vardır. Bu kutuplar arasında manyetik kuvvet çizgileri vardır. Manyetik kuvvet çizgilerinin yoğunluğuna manyetik akı denir. Manyetik akı, elektriksel bir yük hareketidir. Manyetik akının yönü, mıknatıs içinde Güney Kutbu’ndan (S) Kuzey Kutbu’na (N) doğru, mıknatıs dışında ise Kuzey Kutbu’ndan Güney Kutbu’na doğrudur. Manyetik akı “ Φ ” sembolü ile gösterilir. Manyetik akının birimi MKS (metre, kilogram, saat) birim sisteminde Weber (Wb), CGS (santimetre, gram, saniye) birim sisteminde Maxvell’dir (M). (1 Weber = 10^8 Maxvell)

Birim yüzeydeki manyetik akı miktarına manyetik alan denir. Manyetik akının iletken veya yüzeye temas etme yoğunluğuna göre manyetik alanın şiddeti değişir.

Manyetik alan sembolü “B”dir. Buna göre; “ $B = \Phi / A$ ”dır. “A” manyetik akının tesir ettiği alandır. Manyetik alan şiddeti: Manyetik alanın içinde bulunan madde üzerindeki etkisinin büyüklüğüdür.



Görsel 1.2: Sağ el kuralı ile manyetik alanın yönünün bulunması

Manyetik alanın yönü sağ el kuralına göre tespit edilir. Sağ el ile iletkeni başparmak akımın yönünü gösterecek şekilde tuttuğumuzda diğer parmaklar manyetik alanın yönünü gösterir. Sağ el ile dört parmak akım yönünü gösterecek şekilde sargıyı tuttuğumuzda baş parmak manyetik alanın yönünü gösterir. Görsel 1.2’de düz iletken üzerinde ve sargı üzerinde manyetik alanın yönünün bulunması gösterilmiştir.

1.1.1. Manyetik geçirgenlik

Manyetik alan etkisi altına giren malzemelerin mıknatıslanma derecelerine manyetik geçirgenlik (μ) denir. Bağlı manyetik geçirgenliklerine göre maddeler üç gruba ayrılır, bunlar;

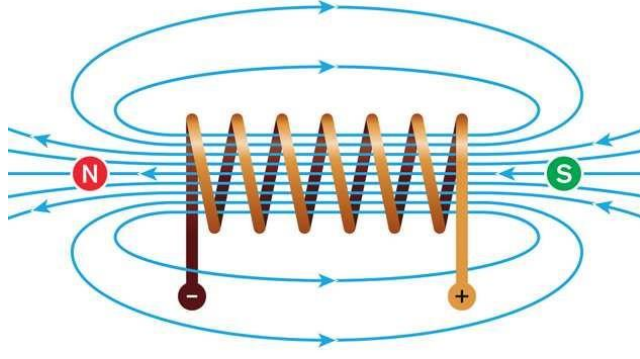
- **Ferromanyetik Madde:** Bağlı geçirgenlikleri “1”den çok büyük olan maddelerdir. Demir, nikel ve kobalt gibi maddeler bu gruptandır.
- **Paramanyetik Madde:** Bağlı geçirgenlikleri “1”den az büyük olan maddelerdir. Alüminyum ve hava gibi maddeler bu gruptandır.
- **Diynamanyetik Madde:** Bağlı geçirgenlikleri “1”den küçük olan maddelerdir. Bakır ve karbon bu maddelerdendir.

1.1.2. Prensipler ve Tanımlar

İşlenecek olan elektrik motorlarının yapılarının ve çalışma prensiplerinin anlaşılması için çeşitli temel prensipler kitapta açıklanacak ve çeşitli tanımlar yapılacaktır.

1.1.2.1. Amper prensibi

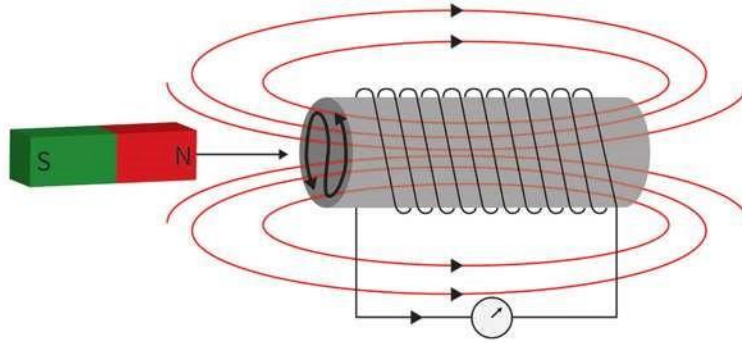
Üzerinden elektrik akımı geçen iletkenin çevresinde manyetik alan oluşur (Görsel 1.3). İletkenin çevresindeki manyetik alanın şiddeti, iletken üzerinden geçen akımla doğru orantılıdır.



Görsel 1.3: Amper prensibi

1.1.2.2. Faraday'ın İndüksiyon Prensibi

Manyetik alan içerisine bir iletken sokulduğunda iletken üzerinde elektrik akımı indüklenir. İletken üzerinde indüklenme gerilimi (elektromotor kuvveti) oluşur (Görsel 1.4). Buna Faraday'ın indüksiyon prensibi denir.



Görsel 1.4: Faraday prensibi

Bir üreticinin veya bataryanın elektrik devresine sağladığı net gerilime (potansiyel farkına) elektromotor kuvveti (EMK) denir. EMK, elektronları hareket ettiren kuvvet anlamına gelir. “ $\mathcal{E}$ ” sembolü ile gösterilir ve birimi voltur.

$\mathcal{E} = N \cdot \Delta\Phi / \Delta t$	
$\mathcal{E}$: Elektromotor kuvveti	$\Delta\Phi$: Değişken manyetik akı
N : İletken sargıdaki sarım sayısı	Δt : Değişken zaman

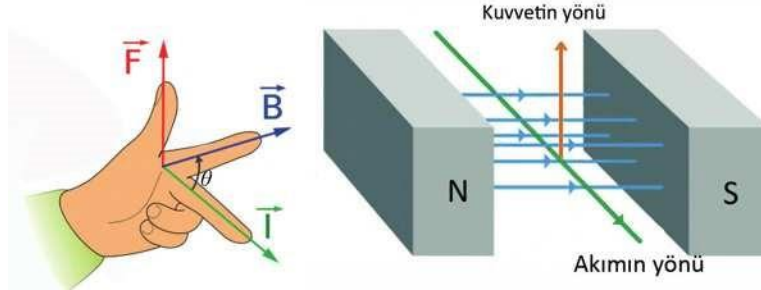
İndüklenmenin olması için zamana bağlı değişken manyetik akı olması gerekir. Manyetik alan kaynağımız bir mıknatıs ise ya iletkenin mıknatıs üzerinde hareket ettirilmesi ya da mıknatısın iletken üzerinde hareket ettirilmesi gerekir.

1.1.2.3. Lenz prensibi

Manyetik alan içindeki iletken üzerinde indüklenme ile elektrik akımı elde edilir. İletken üzerinde indüklenme sonucu bir EMK oluşur. Oluşan EMK kendini oluşturan manyetik akıya karşı direnç oluşturur. Yani indüklenme sonucu oluşan manyetik akı kendini oluşturan manyetik akının değişimine karşı koyar. Bu olaya Lenz prensibi denir.

1.1.2.4. Lorentz prensibi

Üzerinden akım geçen bir iletken, manyetik alan içerisine sokulursa iletkende kuvvet (F) oluşur. Kuvvetin yönü sol el kuralı ile bulunur (Görsel 1.5). “I” elektrik akımı sembolü, “B” manyetik alan sembolüdür.



Görsel 1.5: Lorentz Prensibi (Sol el kuralı ile kuvvetin yönünün bulunması)

1.1.2.5. İndüktans

Bir bobinde indüklenen gerilim (EMK), bobin içinden geçen akımın zamana göre değişimiyle doğrudan orantılıdır. Endüktans, bu orantıda eşitliği sağlayan katsayıdır. Endüktansa (indütans) bir indüktörün manyetik alan içerisinde enerji depolama kabiliyeti de denir. “L” sembolü ile gösterilir. Birimi “Henry”dir.

$\mathcal{E} = L \cdot \Delta I / \Delta t$	
$\mathcal{E}$: İndüklenen gerilim	ΔI : Zamana göre değişen akım
L : Endüktansı	Δt : Değişken zaman

1.1.2.6. Manyetomotor kuvvet

Manyetik bir devrede manyetik akıyı oluşturan fiziksel kuvvete “manyetomotor kuvvet” denir. ”F” sembolü ile gösterilir. Ohm prensibine ($E = I \cdot R$) göre elektrik devresindeki gerilimin yerini alır.

1.1.2.7. Relüktans

Manyetik devrelerde manyetik akıya karşı gösterilen zorluğa relüktans (R) denir. Ohm prensibine göre elektrik devresinde direncin karşılığıdır.

$F = \Phi \cdot R$	
F: Manyetomotor kuvvet	Φ: Manyetik akı
R: Relüktans	

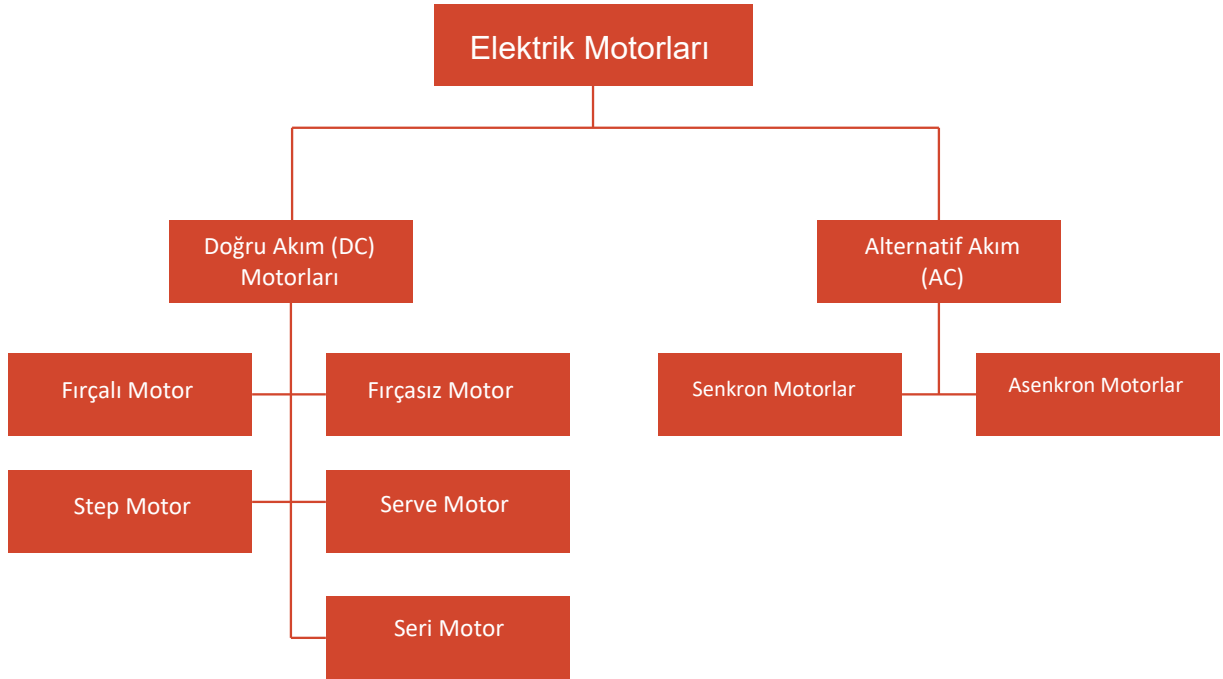
Elektrik makineleri, 1800’lü yıllardan itibaren sanayinin ve teknolojinin gelişmesinde önemli görevler üstlenmiştir. Bu makinelerin günlük hayattan barajlara, otomobillerden fabrikalara kadar çok geniş bir kullanım alanı vardır. Elektrik makineleri hem mekanik enerji üretiminde hem de elektrik enerjisi üretiminde yaygın şekilde kullanılır.

1800’lü yıllarda manyetizmaya dair kavramların ortaya çıkmasıyla elektrik makinelerinin temelleri atılmıştır. 1820’de Hans Christian Oersted (Hans Kristiyan Orstıd) elektrik akımının manyetik alan oluşturduğunu ortaya koymuştur. 1831’de Michael Faraday (Maykıl Feredey) elektromanyetik indüksiyon kavramı ile jeneratörü, 1832’de ise Thomas Davenport (Tamıs Devinport) elektrik motorunu icat etmiştir. Bu gelişmelerle birlikte 1800’lü yıllarda ilk elektrikli araçlar ortaya çıkmış ve zamanla dezavantajlarından dolayı ilgi görmemiştir. Günümüzde ise teknolojinin gelişmesiyle elektrik makineleri otomotiv sektöründe aktif şekilde kullanılmaktadır.

Elektrik makineleri; elektrik motoru, jeneratör ve transformatör olarak üçe ayrılır. Elektrik motoru elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinedir. Jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinelerdir. Transformatörler ise elektrik akımını ve gerilimini elektromanyetik indüksiyon ile dönüştüren durgun makinelerdir. Elektrik motorları elektrikli araçlarda tahrik amaçlı olarak kullanılır. Ayrıca araçlarda kullanılan marş motoru, silecek motoru, yakıt pompa motorları vb. motorlar elektrik motorlarıdır. Araçlarda şarj sistemi elemanı olan alternatör bir jeneratördür. Hibrit ve elektrikli araçlarda elektrik motoru, jeneratör görevi yaparak geri kazanımlı fren sistemlerinde elektrik elde edilmesinde kullanılır. Hibrit

araçlarda kullanılan ateşleme bobinleri de transformatördür. Akü gerilimini artırarak bujide kıvılcımın oluşmasını sağlar.

Otomotiv sektöründe hibrit ve elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla tahrik amaçlı kullanılan motorlarda çeşitlilikler ortaya çıkmıştır. Otomotiv sektöründe kullanılan elektrik motorlarının genel sınıflandırılması Görsel 1.6'da gösterilmiştir



Görsel 1.6: Elektrik motorları genel sınıflandırması

1.2. Doğru Akım Motorları

Doğru akım motorları, doğru akım (DA veya DC) özelliğine sahip elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik makineleridir. DC motor veya DA motor olarak da isimlendirilirler. Düşük hızlarda yüksek tork, kolay kontrol edilebilirlik, basit yapısı, doğrusal tork-hız karakteristiği ve yüksek verim gibi avantajlarından dolayı pek çok alanda tercih edilmektedir. Doğru akım motorları doğru akımla çalıştığı için kontrolü kolaydır. Bu yüzden karmaşık güç elektroniği elemanlarına ihtiyaç yoktur. Doğru akım motorlarında rotor akımı için kolektör-fırça tertibatı kullanılması ise en büyük dezavantajıdır. Fırçalar zamanla aşınarak bakım gerektirirken aynı zamanda motor veriminin azalmasına neden olur. Teknolojik gelişmelerle bu dezavantaj ortadan kaldırılarak fırçasız DC motorlar geliştirilmiştir.

Fırçalı ve fırçasız DC motorlar otomotiv sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunlar; elektrikli taşıtlarda tahrik motorları, marş motorları, gaz kelebeği motorları, silecek motorları,

yakıt pompa motorları, radyatör fan motorları, cam ve ayna motorları, klima fan motorları, rölanti motorları vb. motorlardır. Doğru akım motorları genel olarak şu kısımlardan oluşur: Stator (endüktör), rotor (endüvi), gövde ve kapaklar, fırça mekanizması, rulmanlar ve yataklar

1.2.1. Stator (Endüktör)

Motorun sabit ve hareket etmeyen parçasıdır. Endüktör de denilir. Statorun görevi manyetik alan oluşturmaktır. Gövde, çekirdek ve kutuplardan oluşur. Stator çekirdeği silisyumlu saclardan üretilmiştir. Stator manyetik alan oluşturmak için sargı veya mıknatıs kullanılır.

Stator sargısı izoleli bakır tellerden oluşur. Sargılara elektrik akımı verilerek elektromanyetik alan oluşturulur. Stator gövdesine konumlandırmak için uygun açılarda üretilmiş doğal mıknatıslar kullanılır. Bu mıknatıslar ile sabit bir manyetik alan elde edilir. Motorun dış kısmını oluşturan stator gövdesi çekirdek ve sargıları veya mıknatısları muhafaza eder.



Görsel 1.7: Stator

1.2.2. Rotor (Endüvi)

Motorun dönen, hareketli parçasıdır. Endüvi ve armatür de denilmektedir. Çekirdek, mil ve sargı kısımlarından oluşmuştur. Rotor çekirdeği çelik saclardan üretilmiştir. Rotor sargısı izoleli bakır tellerden oluşur. Rotor sargısına elektrik akımı verilerek manyetik alan oluşturulur. Rotora akım vermek için sargı uçları bakır dilimlerden yapılmış kolektör (komütatör) halkalarına bağlanmıştır. Kolektöre fırçalar (kömürler) üzerinden akım geçmektedir. Sargılarda manyetik alan oluşturularak stator sargılarındaki manyetik alan ile etkileşime girmesi sağlanır. Bu etkileşim sonucu rotorda dönme hareketi ve tork oluşmaktadır.



Görsel 1.8: Rotor

1.2.3. Kolektör (Komütatör) ve Fırçalar (Kömürler)

Rotor sargılarında manyetik alan oluşturmak için kolektör ve fırçalar kullanılır. Kolektör, rotorun sargı uçlarının bağlandığı bakır dilimlerden oluşan parçasıdır. Rotor miline yataklandırılmış olup rotorla beraber dönmektedir. Fırçalar ise kolektöre elektrik akımını iletmek için temas hâlinde olan ara iletim elemanıdır. Rotor sargılarında kolektör-fırça mekanizması ile akımın yön değiştirmesine komütasyon denir. Motorların akım ve gerilim değerlerine göre farklı sertlikte fırçalar kullanılır. Fırçaların temas etmesini sağlamak için fırça yayları kullanılır.

Fırçalar genellikle karbon alaşımlarından üretilmiştir. Bu yüzden kömür de denilir. Fırça, kullanılan bu tip motorlara fırçalı DC motor (Brush DC motor-bıraş di si motor) denilir. Kolektör ve fırçalar kullanıma bağlı olarak zamanla aşınır ve deforme olur. Bu durum motor verimini düşürerek fırçaların ses ve kıvılcım çıkarmasına neden olur. Bu yüzden fırçalı DC motorların periyodik kontrol ve bakımlara ihtiyacı vardır.

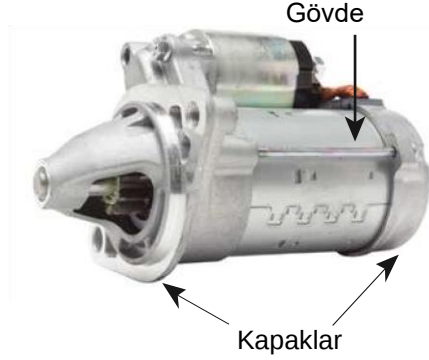
Teknolojik gelişmelerle birlikte kolektör ve fırça kullanılmayan DC motorlar (Brushless DC motor-Bıraşlıs di si motor) geliştirilmiştir.



Görsel 1.9: Kolektör ve fırça tutucusu

1.2.4. Gövde ve Kapaklar

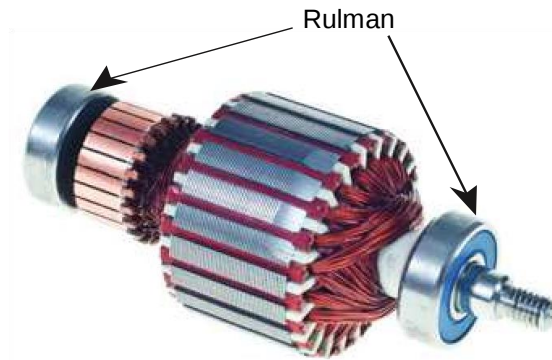
Elektrik motorunu dış etkilerden korumak için statorla beraber motorun dış kısmını oluştururlar. Aluminyum ve demir alaşımından üretilirler. Kapaklar, rotorun stator içerisinde merkezlenerek yataklandırılmasını sağlar ve motorun iç kısmını dış etkilerden korur.



Görsel 1.10: Gövde ve kapaklar

1.2.5. Rulman ve Yataklar

Rotoru yataklamak için rotor mili üzerinde rulmanlar kullanılmaktadır. Rulmanlar, kapaklar üzerindeki yataklara yerleştirilerek rotorun verimli bir şekilde dönmesini sağlar. Sökme ve takma işlemleri sırasında rulmanlara dikkat edilmelidir. Rulmanlar yağsız kalması nedeniyle zamanla ses yapar ve aşınır. Aşınmış rulmanlar sürtünme kayıplarına neden olarak motorun verimini düşürür.



Görsel 1.11: Rulman



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://www.youtube.com/watch?v=b88o37kbmyA>

DC motorlar yapısal olarak rotor ve statorda sargı-mıknatıs konumları değişiklik gösterebilir. Statorda mıknatıs rotorda sargı, statorda sargı rotorda sargı ve statorda sargı rotorda mıknatıs yer alan tasarımlar kullanılır. Yapısal değişikliklere rağmen çalışma prensibi aynıdır.

1.3. Doğru Akım Motor Çeşitleri

1.3.1. Fırçalı Doğru Akım Motoru

Fırçalı DC motorlarda rotor sargılarına akım, kolektör-fırça mekanizması sayesinde iletilir. Bir önceki konuda yapısı açıklanmıştır. Sanayinin pek çok alanında uygun maliyeti ve kolay motor yönetiminden dolayı yaygın bir şekilde kullanılır. Kolektör ve fırça kullanılmasından kaynaklı motorda zamanla aşınma ve kıvılcımlar meydana gelmektedir. Bu durum motor veriminin zamanla düşmesine neden olmaktadır. İlk geliştirilen elektrikli araçlarda tahrik amaçlı kullanılmıştır. Fırçalı DC motor araçlarda marş motoru, silecek motoru, havalandırma fan motoru, radyatör fan motoru, yakıt pompa motoru olarak kullanılır. Bu motorların Fırçasız DC motor çeşitleri de bulunmaktadır.



Görsel 1.12: Marş motoru ve silecek motoru

1.3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru (BLDC)

Fırçalı DC motorların veriminin düşük olması ve bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarından dolayı fırçasız DC motorlar geliştirilmiştir. Kolektör-fırça mekanizması kullanılmadığı için bunlara fırçasız DC Motor (Brushless DC Motor-BLDC) denilmektedir. Rotor manyetik alanı için kalıcı mıknatıslar, stator manyetik alanı için sargılar kullanılır. Çalışması için bir elektronik denetleyici içeren kontrol sistemine ve rotor konumunu algılamak için sensörlere ihtiyaç vardır. Sensör olarak optik veya Hall-effect (Hol efeckt) sensörler kullanılır. Yüksek verim, yüksek başlangıç torku ve sessiz çalışma özelliklerinden dolayı elektrikli taşıtlarda tahrik amaçlı kullanılmaktadır. Araçlarda marş motoru, silecek motoru, yakıt pompa motoru, klima fan motoru ve radyatör fan motoru olarak da kullanılır.

Fırçasız DC motorlar yapısal olarak iç rotorlu ve dış rotorlu olmak üzere ikiye ayrılır.

1.3.2.1. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru (İnrunner-İnranır BLDC)

Geleneksel motorlar gibi rotor motorun merkezinde, stator ise dışındadır. Bu motorlarda yapısından dolayı güç aktarma elemanları gerekmektedir. Üç tekerlekli mikro elektrikli taşıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.3.2.2. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru (Outrunner-Autranır LDC)

Dış rotorlu motorlar çalışma prensibi aynı olmasına rağmen yapısal olarak farklılıklara sahiptir. Rotor motorun dışında yer alırken stator motorun merkezindedir. Bu yapıya tekerlek içi (hub) motor da denilir. Rotor üzerinde kalıcı mıknatıslar yer alır. Sargılar ise statora sarılmıştır. Stator akımı kontrol edilerek rotorun dönmesi sağlanır. Bu motora sahip sistemlerde aktarma organları kullanılmadan hareket doğrudan tekerleklerle aktarılmaktadır. Bu sayede hafif olması istenen elektrikli bisiklet-motosiklet, üç tekerlekli mikro araçlarda vb. taşıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Görsel 1.13: İç rotorlu fırçasız doğru akım motoru

1.3.3. Seri Motor

Seri motorlarda stator ve rotor manyetik alanları için sargı kullanılmıştır. Stator sargıları ile rotor sargılarının seri olarak bağlandığı motorlara seri motor denilir. Fırçalı DC motorlarla aynı parçalara sahiptir. Stator sargıları diğer DC motorlara göre kalın ve az sarımlıdır. Güç kaynağından akım verildiğinde önce stator sargılarına sonra rotor sargılarına akım akar. Yüksek akım çeken bu motorlar yüksek başlangıç torkuna sahiptir. Kalkış sırasında yüksek tork ihtiyacı olan raylı ulaşım araçlarında ve vinçlerde kullanımı yaygındır. Araçlarda ise içten yanmalı motorlara ilk hareketi vermek için marş motoru olarak kullanılır.



Görsel 1.14: Dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru

1.3.4. Servo Motor

Servo motor, güç elektroniği elemanları ile geri besleme yaparak çalışan DC motorlu sistemlerdir. Servo motorun yapısı; DC motor, dişliler, kontrol devresi, potansiyometre veya enkoderden oluşur.

Rotor milinin hız ve konum değerleri potansiyometre veya enkoder tarafından ölçülür ve bu bilgiye geri besleme sinyali denir. Kontrol devresi, giriş sinyali ile geri

besleme sinyalini karşılaştırarak motorun çalışma durumunu sürekli kontrol eder. Servo motor yapısında çeşitli DC motorlar kullanılabilir. Hassas konumlama, hız kontrolü ve düşük devirde yüksek tork sağladığı için sanayide değişik alanlarda kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda tahrik amaçlı kullanılmaz.

Araçlarda en yaygın kullanımı elektronik kontrollü gaz kelebeği motorudur. Elektronik kontrollü gaz kelebeği sistemi geri beslemeli olarak çalışan DC motor kullanan sistemlerdir. Elektronik kontrol ünitesinden gelen sinyal, gaz kelebeği motorunu hareket ettirir. Rotor milinin hareketi redüktör dişlilerinin karşısına yerleştirilmiş gaz kelebeği konum potansiyometresinden ölçülür ve geri besleme sinyali elde edilir. Motor giriş sinyali ile geri besleme sinyali karşılaştırılarak gaz kelebeği konumu doğrulaması yapılır.



Görsel 1.15: Marş motoru sargıları



Görsel 1.16: Elektronik gaz kelebeği

1.3.5. Step Motor

Step motor, girişlerine uygulanan sinyallere göre belirli açılarda dönme hareketi yapan motorlardır. Step motora adım motor da denilir. Servo motora göre daha basittir ve geri beslemesi yoktur. Rotorda kalıcı mıknatıs kullanıldığı için fırçasız motorlardır. Statorda ise sargılar yer alır. Step motorlar 90° , 45° , 18° , $7,5^\circ$, $1,8^\circ$ veya daha farklı açılarda hareket edebilir. Adım hareketlerinin açısı/sayısı statordaki kutup sayılarına bağlıdır. Farklı açılardaki hareketleriyle hassas konumlama imkânı veren step motorlar, hız kontrolü ve yüksek tork sağladığı için sanayide değişik alanlarda kullanılmaktadır. Araçlarda rölanti motoru ve egzoz gazları resirkülasyon (EGR) motoru vb. kademeli hareket eden motorlar step motorlardır.



Görsel 1.17: Rölanti ve EGR motoru

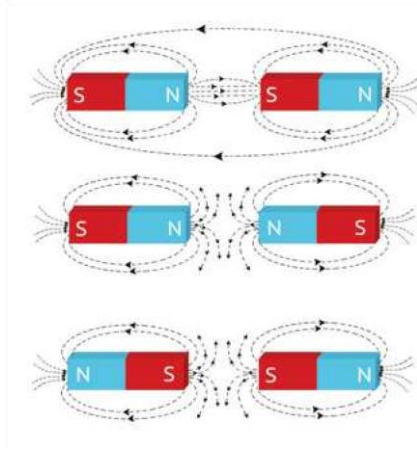
1.4. Doğru Akım Motorlarının Çalışması

1.4.1. Fırçalı DC Motorların Çalışması

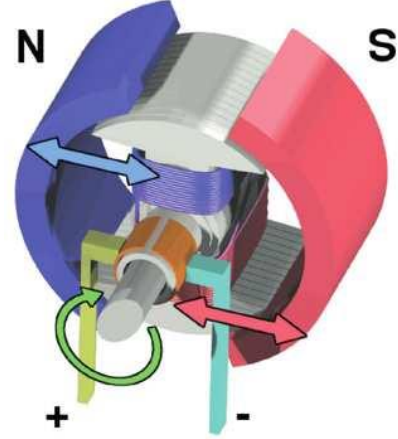
Mıknatısların doğal manyetik alana sahip olduğu ve yapay olarak da sargılar yardımıyla manyetik alan elde edildiği bilinmektedir. Manyetik alanlar arasında kutuplardan dolayı itme ve çekme hareketi oluşmaktadır. Zıt kutuplar birbirini çekerken aynı kutuplar birbirini iter. DC motorların çalışması bu temel ilkeye bağlıdır.

DC motorların rotor ve statorunda mıknatıs ve sargı yardımıyla manyetik alan oluşturulur. Manyetik alanların etkileşimiyle itme çekme sonucunda rotorda dönme hareketi meydana gelir. Statorda sargı ya da mıknatıs ile oluşturulan manyetik alan sabitken rotorda sargı ile oluşturulan manyetik alan hareketlidir. Kolektör-fırça mekanizması ile rotor sargılarında elektrik akımı yön değiştirir. Bu yön değiştirme işlemine komütasyon denir. Komütasyon ile rotor sargılarındaki kutuplar değiştirilerek stator manyetik alanıyla sürekli etkileşim elde edilir. Faraday Yasası'na göre sabit manyetik alan içinde hareket eden iletkende akım indüklenir. Rotor iletkenleri stator manyetik alanı içinde hareket ederken manyetik kuvvet çizgilerini keser ve EMK (elektromotor kuvvet) indüklenmesi meydana gelir. EMK rotora uygulanan gerilime ters yöndedir. Bu yüzden zıt EMK olarak adlandırılır.

Zıt EMK motorun düşük akımla çalışmasını sağlar. Statorda bir kutup enerjilendirilirse rotor belli bir açıda dönüp duracaktır. Bu durumu ortadan kaldırmak için iki kutup birden enerjilendirilerek rotorun sürekli dönmesi sağlanır.



Görsel 1.18: Mıknatıs kutuplarının etkileşimi

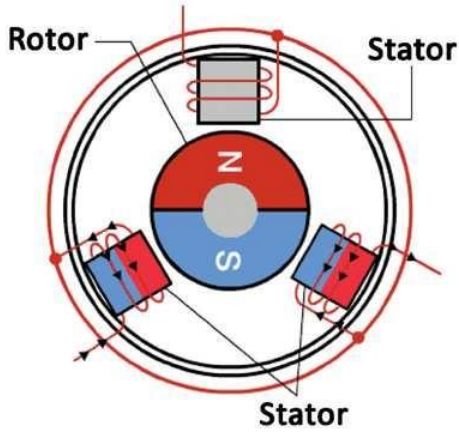


Görsel 1.19: DC motorun çalışması

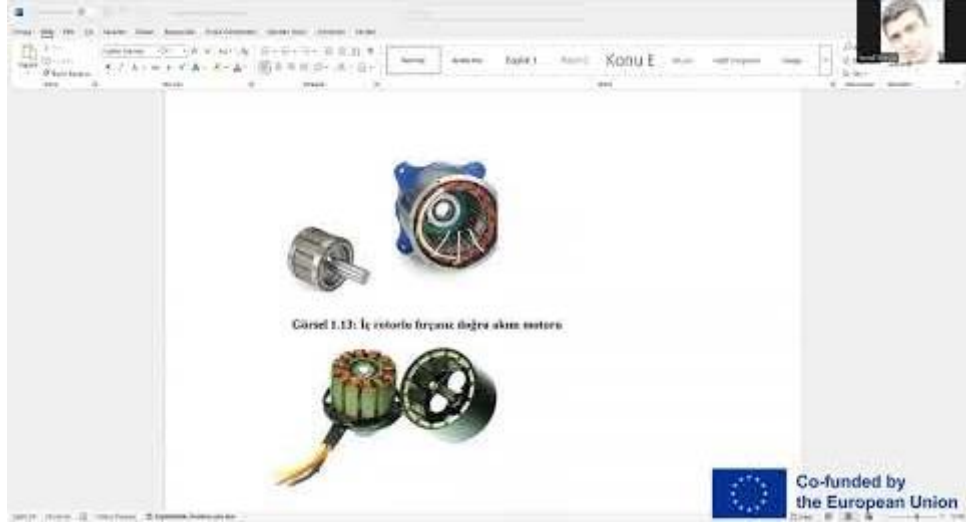
1.4.2. Fırçasız DC Motorların Çalışması

Fırçasız DC motorların fırçalı DC motorlara göre yapısal farkları bulunmaktadır. Rotor ve statorun manyetik alan oluşturma yöntemleri değişmiştir. Rotorda kalıcı mıknatıs kullanılarak sabit manyetik alan elde edilmiştir. Stator ise sargılar kullanılarak döner manyetik alan elde edilmiştir.

Fırçasız DC motorların çalışması için güç elektroniği elemanlarına ihtiyaç vardır. Motoru sürmek için elektronik denetleyiciye ve rotor konum bilgisi için sensörlere ihtiyaç vardır. Rotorun konum tespiti için genellikle Halleffect sensörler kullanılır. Denetleyici sensörden gelen bilgiye göre stator kutuplarına sırasıyla elektrik akımının verilmesini sağlar. Rotor manyetik alanı ile stator manyetik alanı arasındaki itme-çekme etkileşimiyle rotor döner ve tork oluşur. Oluşan tork manyetik alanların şiddetlerine bağlıdır.



Görsel 1.20: Fırçasız DC motorun çalışması

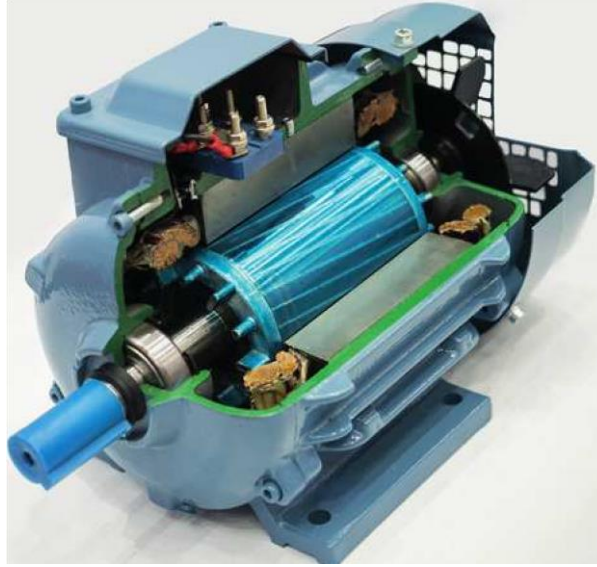


Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/1pmZgyZRdiY>

2. ASENKRON MOTORLAR

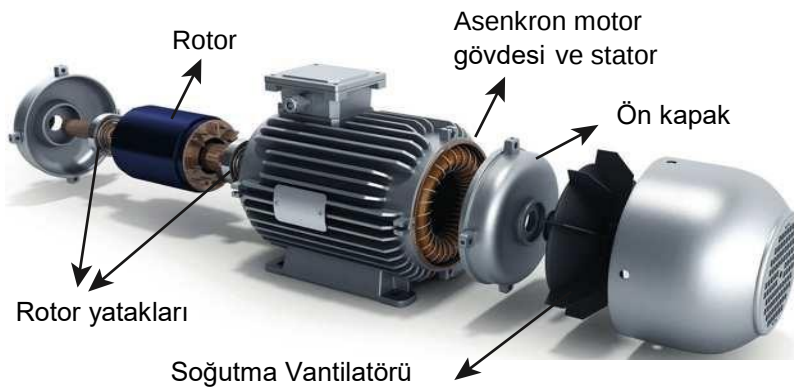
Nikola Tesla tarafından icat edilen asenkron motorlar alternatif akımla çalışır. Bu motorlar; basit yapısı, yüksek güvenilirliği, sağlamlığı, düşük maliyeti ve kolay bakım özellikleriyle elektrikli araçlarda tercih edilir. Bu motorlara çalışma prensibinden dolayı indüksiyon motorları da denir. Çalışma sırasında DC motorlarının kolektörlerinin dilimleri arasında olduğu gibi elektrik arkı meydana gelmez. Görsel 2.1’de asenkron motor kesiti gösterilmektedir.



Görsel 2.1: Asenkron motor kesiti

2.1. Asenkron Motorların Yapısı

Elektrikli araçlarda üç fazlı asenkron motorlar tercih edildiği için bu motorların yapısı incelenecektir. Asenkron motorlar stator ve rotor olmak üzere iki ana parçadan oluşur. Bu ana parçaların dışında rotorun gövdeye yataklandırılmasını sağlayan rulmanlar bulunur.



Görsel 2.2: Asenkron motoru oluşturan parçalar

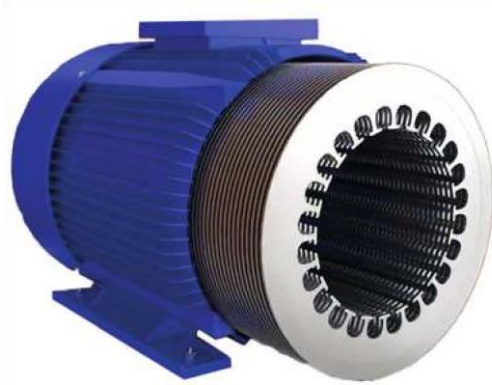
2.1.1. Stator

Stator motorun sabit olan kısmıdır. İç yüzeyine oluklar açılmış, iletkenliği yüksek silisyumlu çelik sac plakalar birleştirilerek gövdenin içerisine yerleştirilmiştir.

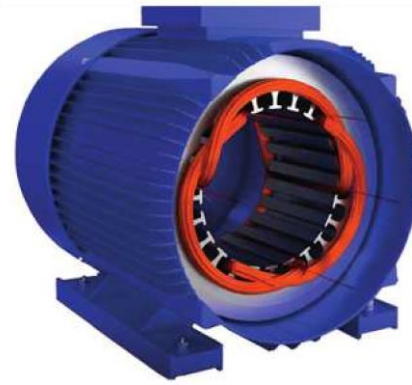


Görsel 2.3: Motor gövdesi ve stator

Sac plakalar manyetik alanın kuvvetlendirilmesini sağlar. Birleştirilmiş plakaların üzerindeki oluklara 120°'lik açı ile yerleştirilmiş üç sargı (bobin) bulunmaktadır (Görsel 2.3, Görsel 2.4 ve Görsel 2.5). Statordaki sargı uçları yıldız veya üçgen bağlanır. Elektrikli araçlarda kullanılan asenkron motorlarda, yıldız bağlantı tercih edilir.



Görsel 2.4: Motor gövdesi ve stator plakaları



Görsel 2.5: Motor gövdesi ve stator sargıları

2.1.2. Rotor

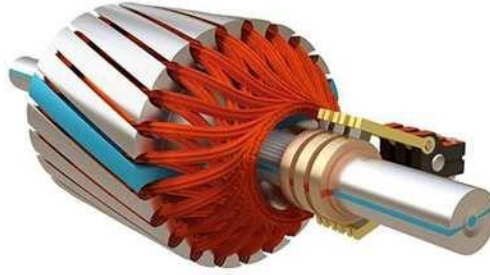
Rotor asenkron motorun hareketli olan parçasıdır. Sincap kafesli rotora statorda olduğu gibi rotor milinin üzerinde iletkenliği yüksek silisyumlu çelik sac plakalar birleştirilmiştir. Statorda olduğu gibi plakalar rotor üzerinde oluşan manyetik alanın kuvvetlendirilmesini sağlar. Bu çelik plakalar üzerindeki oluklardan alüminyum ya da bakırdan yapılmış çubuklar geçirilir. Çubuklar uçlarından rotor milinin her iki tarafında alüminyum ya da bakır halkalar ile birleştirilerek kısa devre yapılır. Bir sincap kafesini andıran görüntüsünden dolayı sincap

kafesli rotor diye isimlendirilir. Rotor mili başındaki ve sonundaki rulmanlar ile motor gövdesine yataklandırılır.



Görsel 2.6: Rotor sincap kafes yapısı ve rotor çelik plakaları

Rotoru sargılı (bilezikli) motorlarda ise rotorda sargı ve bu sargıların uçlarının bağlandığı bilezikler bulunur. Bu bileziklerin üzerine de fırçalar gelir. Bu döner bilezikler ile yol verme ve hız ayarlaması yapılır. Görsel 2.7’de motorun kesiti ve rotoru verilmiştir.



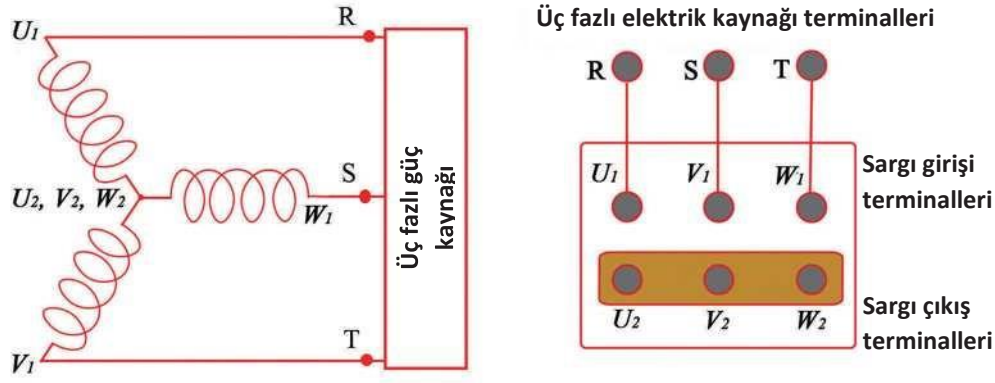
Görsel 2.7: Bilezikli (rotor sargılı) rotor

2.1.3. Asenkron Motorların Stator ve Rotor Sargılarının Elektrik Kaynağına Bağlantı Şekilleri

Üç fazlı asenkron motorların statorunda her faz için 120° ’lik açıyla birer sargı yerleştirilmiştir. Bu sargılar güç besleme devrelerine yıldız veya üçgen bağlantı ile bağlanırlar.

2.1.3.1. Yıldız Bağlantı

Elektrikli araçlarda kullanılan asenkron motorlarda yıldız bağlantı tercih edilir. Endüstriyel amaçlı üretilen motorlarda sargıların giriş, çıkış uçları ve bağlantı şekli Görsel 2.8’de verilmiştir. Elektrikli araç motorlarında ise sadece üç faz girişi için üç uç bulunur. Çıkış uçları sargıların uygun bir noktasında birleştirilip yalıtılmıştır.

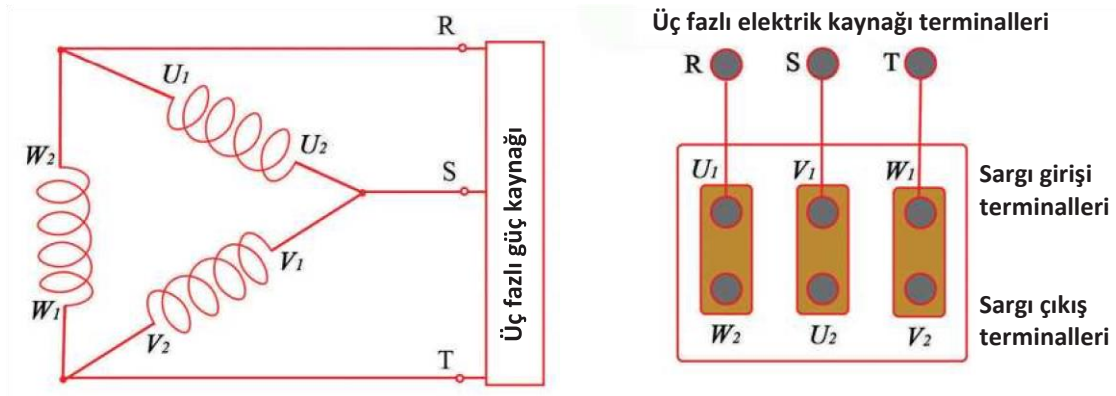


Görsel 2.8: Yıldız bağlantı devresi ve terminallerin bağlantı durumu

Yıldız bağlantıda sargı çıkış uçları birleştirilir. Sargı giriş uçlarının her biri Görsel 2.7'deki gibi üç fazlı elektrik güç kaynağının terminallerine bağlanır. Yıldız bağlantıda her bir sargıya giden gerilim %40 civarında düşer.

2.1.3.2. Üçgen Bağlantı

Bu bağlantıda her bir sargının çıkışı diğer sargının girişi ile birleştirilir ve üç tane ortak terminal oluşur. Bu terminaller üç fazlı elektrik güç kaynağı terminallerine bağlanır. Bu bağlantıda sargılara uygulanan gerilim güç kaynağı gerilimi ile aynıdır, değişmez.



Görsel 2.9: Üçgen bağlantı devresi ve terminallerin bağlantı durumu

2.2. Asenkron Motorların Çeşitleri

2.2.1. Fazlarına Göre Asenkron Motorlar

Tek fazlı ve üç fazlı asenkron motorlar olmak üzere iki çeşidi vardır.

2.2.1.1. Tek Fazlı Asenkron Motorlar

Bu motorlar endüstriyel amaçla üretildiklerinden sadece 220 V AC gerilimle çalışırlar. Momentleri düşük olduğu için elektrikli araç motoru olarak tercih edilmezler.

2.2.1.2. Üç Fazlı Asenkron Motorlar

Momentleri yüksektir. Bu motorlar üç fazlı AC gerilimle çalışırlar. Endüstriyel amaçlı üretilen motorlar 380 volt gerilimle çalışır. Elektrikli araçlarda kullanılan motorlar, üretici markaya göre 400 volt, 480 volt ya da daha farklı gerilimlerde çalışır.

2.2.2. Yapılarına Göre Asenkron Motorlar

İki çeşidi vardır. Asenkron motorların yapısı konusunda yapılarına göre motor çeşitleri incelenmiştir. Bu motorların statorları birbirine benzer yapıdadır. Ancak rotorlarının yapıları farklıdır.

2.2.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar

Üzerine oluklar açılmış, iletkenliği yüksek sac plakalar birleştirilerek rotor miline sabitlenmiştir. Plaka oluklarından geçirilen çubuklar iki taraftan levhalara birleştirilerek kısa devre yapılmıştır. Bu bağlantı şeklinden dolayı bu motorlara kısa devre asenkron motorlar ya da sincap kafesli asenkron motorlar denir (Görsel 2.6, Görsel 2.10).

Bakım ve üretim maliyetleri diğer elektrikli motorlara kıyasla düşüktür. Bu sebeple elektrikli araç motoru olarak daha çok tercih edilirler. Başlangıç momentleri düşüktür fakat başlangıç akımları yüksektir. Hız kontrolü için frekans değiştirici sistemlere ihtiyaç duyulur. Elektrikli araçlarda invertör yönetim grubuyla ihtiyaca göre hız ve moment ayarlanır.



Görsel 2.10: Sincap kafesli rotorlar

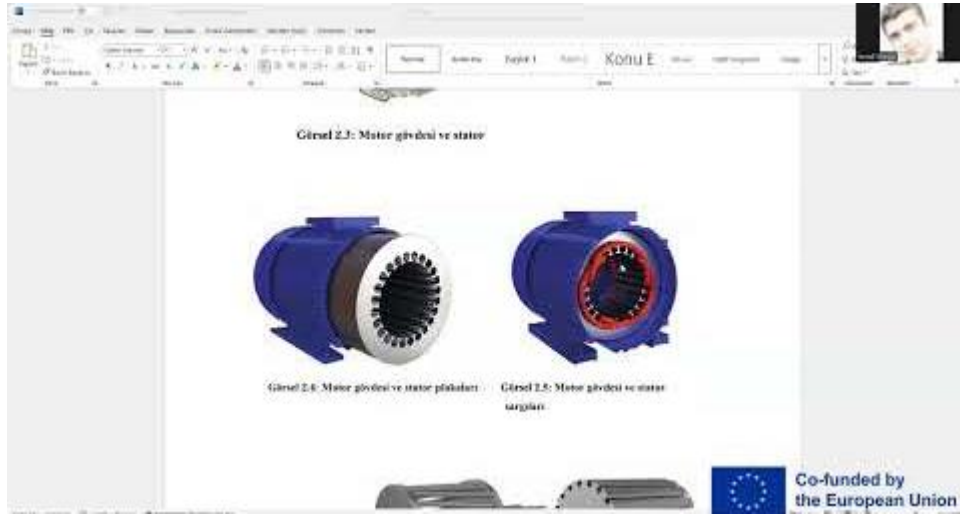
2.2.2.2. Bilezikli (Rotor Sargılı) Asenkron Motorlar

Yüksek moment istenilen yerlerde kullanılır. Devir ayarı yapmak sincap kafesli motorlara göre daha basittir. Başlangıç momentleri de yüksektir. Fırçalı yapıda

olmasından dolayı sincap kafesli motorlara göre bakım aralıkları daha sık ve maliyeti yüksektir. Bu bakımdan sincap kafesli senkron motorlar elektrikli araç için daha çok tercih edilir.



Görsel 2.11: Bilezikli asenkron motor



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

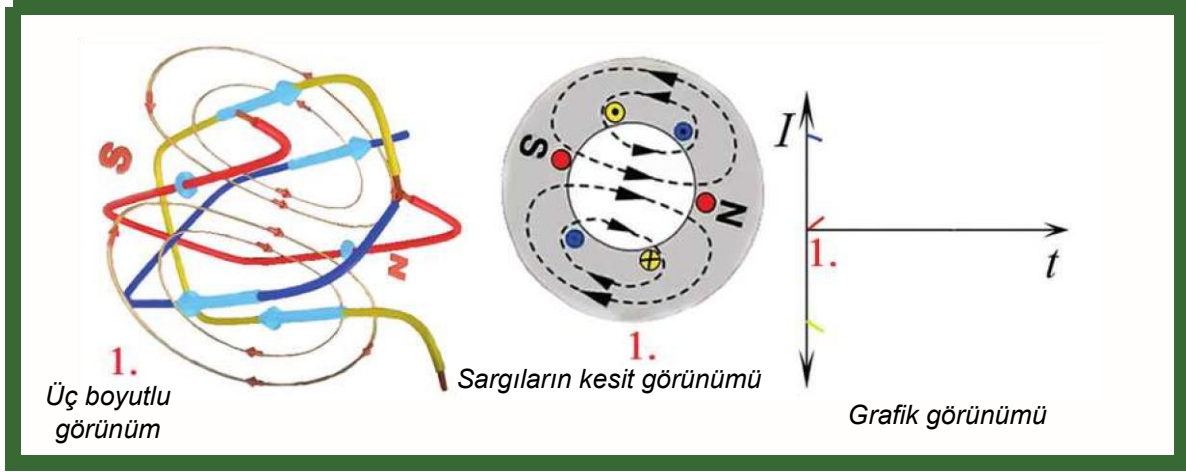
https://youtu.be/axmSr_GHQZ8

2.3. Asenkron Motorların Çalışması

Üç fazlı elektrik güç kaynağından yapılan besleme ile stator sargılarında döner bir manyetik alan oluşur. Döner manyetik alanın hızına senkron hız denir.

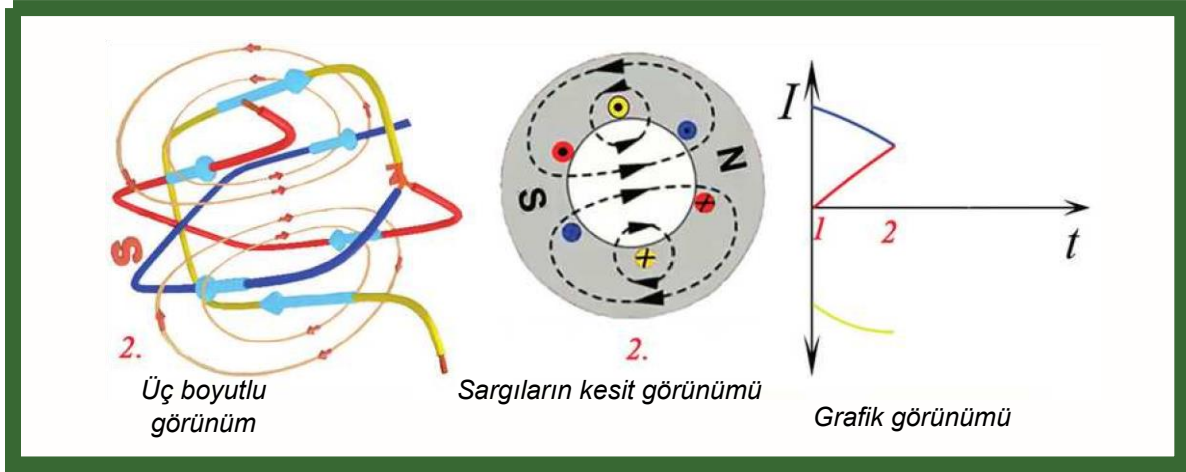
Güç kaynağından üç ayrı fazdan gelen gerilimin her bir sargıdan geçişi görsellerdeki model üzerinde gösterilmektedir. Döner manyetik alanın oluşumu aşamalar hâlinde Görsel 2.12, 2.13 ve 2.14'te açıklanmıştır.

Görsel 2.12'de manyetik alanın oluşumu üç boyutlu model görüntü, iki boyutlu ve grafik olarak verilmiştir. Birinci aşamada karşılıklı olan mavi ve sarı renkte temsil edilen sargılarda manyetik alan oluşur.



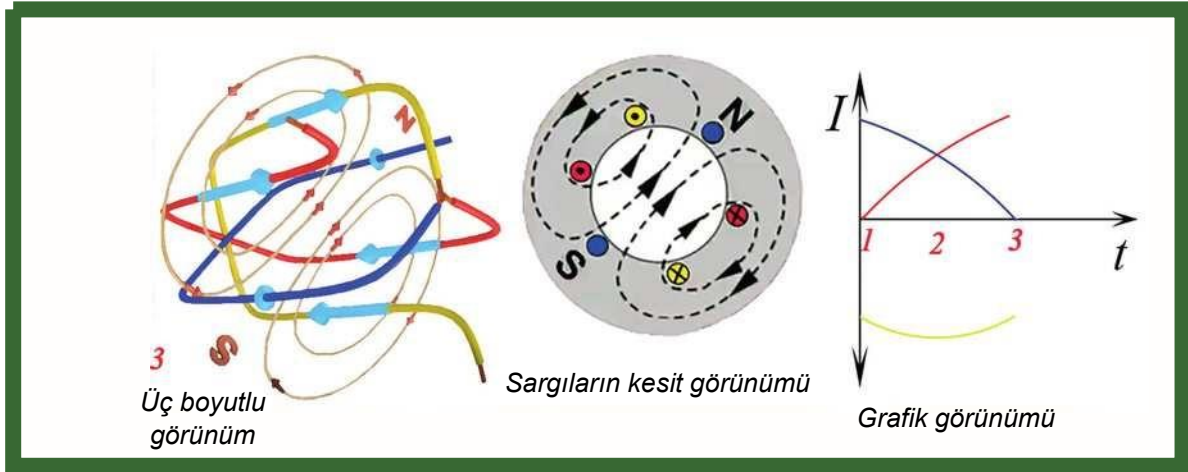
Görsel 2.12: Döner manyetik alanın oluşması (1. aşama)

Ardından sarı renkte temsil edilen sargılardan akım geçer ve manyetik alan oluşur (Görsel 2.13). İkinci aşamada aynı şekilde gerçekleşir ve manyetik alan bir miktar yer değiştirmiş olur.

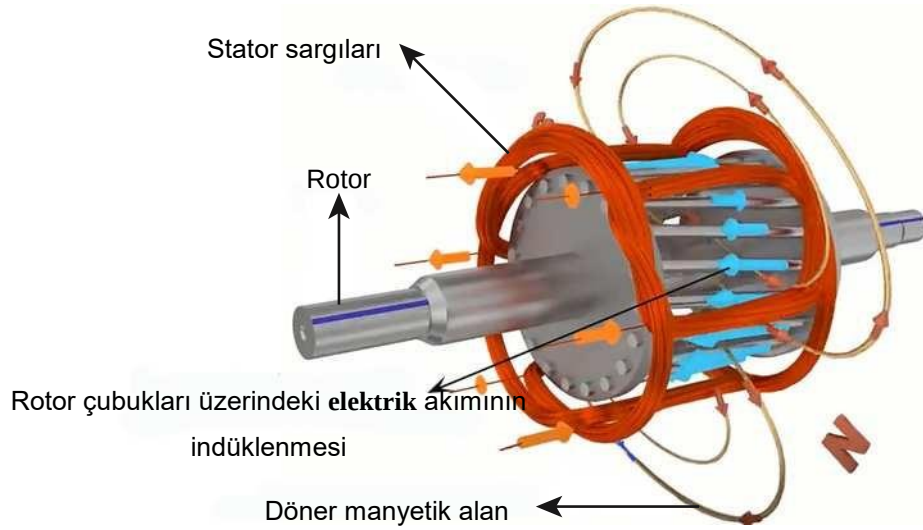


Görsel 2.13: Döner manyetik alanın oluşması (2. aşama)

Üçüncü aşamada sarı ve kırmızı renkte temsil edilen sargılarda manyetik alan oluşur (Görsel 2.14). Manyetik alan en son pozisyonuna göre biraz daha yer değiştirir. Statorda bulunan tüm sargı dilimleri (kutupları) üzerinde ardışık olarak manyetik alan oluşur. Manyetik alan sürekli yer değiştirip rotor çevresinde tur atarak döngüyü (360°'yi) tamamlamış olur ve sonrasında yeni döngü başlar.



Görsel 2.14: Döner manyetik alanın oluşması (3. aşama)



Görsel 2.15: Rotor üzerinde indüklenme

Statorda oluşan döner manyetik alan içinde kalan rotor çubukları üzerinde elektrik akımı indüklenir. Bu sebepten bu motorlara indüksiyon motorları da denir. Rotor üzerinde elektromotor kuvveti (EMK) meydana gelir ve manyetik alan oluşur. Rotor dönmeye başlar (Görsel 2.14).

Rotorun hızı ile senkron hız eşit olmaz. Senkron hız daima rotor hızından yüksektir. Hız eşitlenirse döner manyetik alan rotor ile aynı hızda döneceğinden indüklenme olmaz. Senkron hız ile rotor hızı farkına kayma denir. Rotor hızı senkron hıza eşit olmadığından bu motorlara asenkron motorlar denir.

2.3.1. Asenkron Motorlarda Yol Verme

Sanayide kullanılan asenkron motorların kalkış anında (başlangıç) çektikleri akım yüksektir. Bu durum elektrik şebekesinde gerilim düşmelerine sebep olur. Asenkron motorların kalkış anında çektikleri akıma yol alma akımı denir. Yol alma akımının sınırlandırılma şekillerine yol verme denir. Yol verme şekilleri şunlardır:

1. Doğrudan yol verme
2. Düşük gerilimle yol verme
 - a. Direnç ile yol verme
 - b. Yıldız üçgen yol verme
 - c. Oto trafosu ile yol verme
3. Mikro işlemcilerle yol verme
 - a. Yumuşak yol verme (Soft starter ile)
 - b. Frekans değiştirici (invertör) ile yol verme

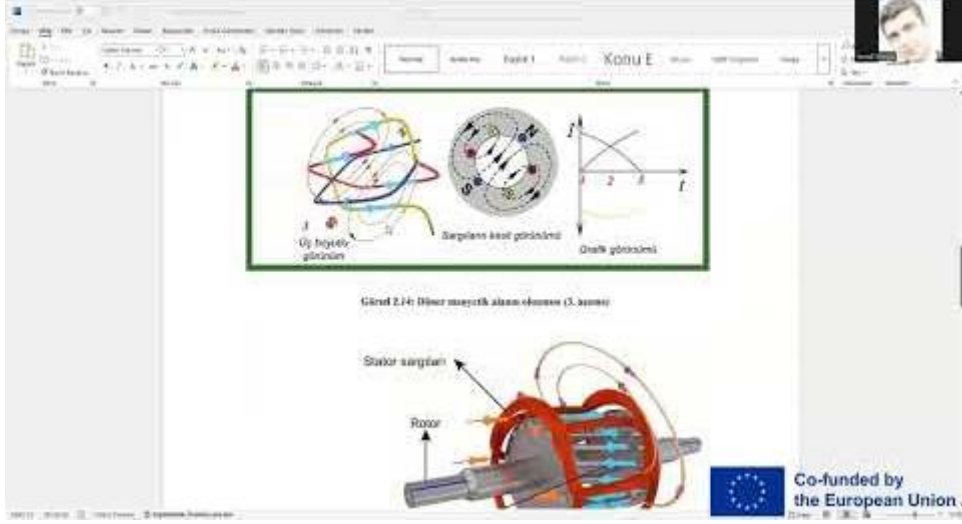
Elektrikli araçlarda sanayide kullanılan asenkron motorlar gibi sabit devirli motorlar kullanılmaz. Yani yol ve yük durumuna göre aracın hızını ayarlamak gerekir. Ayrıca şebekeye yüklenme gibi bir durum söz konusu değildir. Ama aracın elektrik kaynağından kontrollü olarak ve ihtiyaca göre sadece frekans değiştirilerek motorun hız ayarlaması yapılır.

2.3.1.1. Frekans Değiştirici (İnvertör) İle Yol Verme

Doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çeviren, frekansı ve gerilimi ayarlayabilen sistemlere invertör (evirici) denir. Elektrikli araçlarda yol şartlarına, motor çalışma şartlarına göre hız ve moment ayarı yapar. İnvertörler “dönüştürücüler” öğrenme biriminde geniş olarak işlenmiştir.



Görsel 2.16: İnvertör



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/u50KO8uacNA>

3. RELÜKTANS MOTORLAR

Relüktans motorların ortaya çıkışı 1840'lı yıllara dayanmaktadır. Yıllar içinde dezavantajlarından dolayı kullanılmayan bu motorlar, son zamanlarda güç elektroniğinin gelişmesiyle sanayinin önemli alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle elektrikli araç sektörünün relüktans motor geliştirme çalışmaları ve bu motorların kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Firmalar elektrik motorları üzerinde sargı, mıknatıs ve çeşitlerinin kullanımını azaltarak maliyeti düşürmek ve bunlara bağımlılıklarını azaltmak istemektedir.

3.1. Relüktans Motorların Yapısı

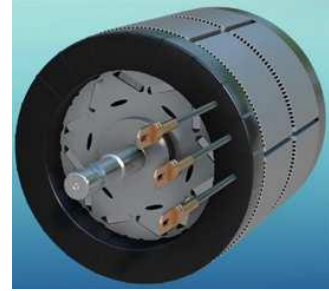
Relüktans, manyetik devrede yer alan manyetik akının geçişine karşı gösterilen zorluktur. Relüktans motor, relüktans prensibine göre alternatif akımla çalışan, güç elektroniği geliştirilmiş motorlardır. Bu motorlarda stator manyetik alanı için sargı kullanılırken genellikle rotorda sargı, mıknatıs, kolektör ve fırça kullanılmaz. Rotor silikonlu çelik lamine saclardan oluşur. Elektrikli araçlar için özel geliştirilmiş relüktans motorlarının rotorlarında kalıcı mıknatıslar kullanılır.



a. Anahtarlama



b. Senkron



c. Kalıcı Mıknatıslı

Görsel 4.1: Relüktans motorlar

Relüktans motorlar basit yapıları, ucuza imal edilmeleri, kolay kullanımları, yüksek hız ve verimlilik özellikleriyle diğer elektrik motorlarına özellikle de kalıcı mıknatıslı motorlara alternatiftir. Fırçasız ve sargısız rotor kullanıldığı için bu motorlar yüksek hızlara çıkabilmektedir. İlk çalışmada fazla akım çekmeden yüksek tork değerlerine sahip olduğu için diğer motorlara göre avantajlıdır. Küçük boyutlarda yüksek tork çıkışına sahip olması diğer bir avantajıdır.

Motorun düzgün çalışabilmesi için sürekli tork üretmesi gerekir. Sürekli tork üretimi için stator ve rotor kutup konumlarının konum algılayıcılar ile tespit edilip uygun faz sırasıyla beslenmesi gerekir. Bu yüzden güç elektroniği elemanları kullanılır. Bu elemanlar; invertör, konum ya da

hız, sıcaklık sensörleri ve kontrolördür. İnvertör, bataryadan gelen doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çevirerek akım ve frekans ayarı ile motorun çalışmasını sağlar. Sıcaklık sensörleri motorun sıcaklığını ölçerek motoru riskli durumlara karşı korumak için bilgi verir. Konum ya da hız sensörleri ise rotorun hızını ve konumunu ölçer. Resolver (rizalvır), enkoder ve Hall-effect tipi sensörler konum ve hız ölçümü için kullanılmaktadır.

Relüktans motorların genel olarak kısımları; stator, rotor, gövde, kapaklar, yataklar ve güç elektroniği elemanlarıdır. Diğer motorlardan farkı olan stator ve rotor üzerinde durulacaktır.

3.1.1. Stator

Motorda döner manyetik alan oluşturan ve hareket etmeyen sabit kısımdır. Çekirdek ve sargılardan oluşur. Stator çekirdeği lamine çelik saclardan üretilir. Stator sargıları ince veya kalın izoleli bakır tellerden çok sarımlı olarak yapılır.

Sargılarda alternatif akımla döner manyetik alan oluşturulur. Manyetik alan içindeki akının rotora doğru akması ve relüktans prensibine göre kutupları etkilemesi istenir. Bu yüzden stator kutupları da relüktans prensibine uygun şekilde tasarlanır. Sargılar çıkıntılı kutuplara sarıldığı gibi dağınık tipte de olabilmektedir.

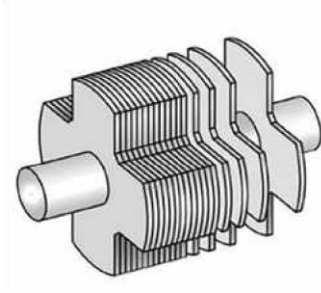
Statorun dış kısmında alüminyum alaşım motor gövdesi bulunur. Gövde üzerinde soğutucu akışkan kanallar ve güç elektroniği bağlantı yerleri bulunmaktadır.



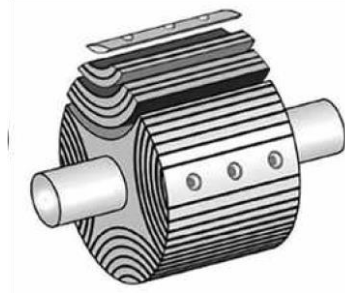
Görsel 3.2: Stator

3.1.2. Rotor

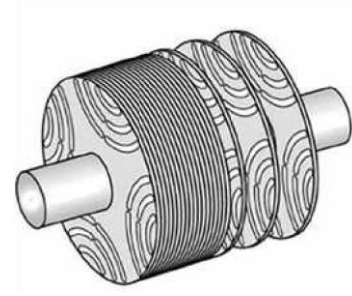
Motorun dönen, hareketli kısmıdır. Statorda oluşan manyetik alanın çekme etkisiyle döner. Çekirdek, mil ve yataklardan oluşur. Rotor çekirdeği genellikle çelik lamine saclardan üretilir. Motor gövdesi üzerinde rotor milinin verimli bir şekilde dönebilmesi için rulmanlar kullanılır. Farklı tiplerde rotor yapıları bulunmaktadır.



a. Çıkıntılı kutuplu rotor



b.Eksenel lamine edilmiş rotor



c. Enine lamine edilmiş rotor

Görsel 3.3: Rotor yapıları

Rotor üzerindeki kutuplar, düşük relüktans değerlerine göre tasarlanmıştır. Havanın relüktans değeri yüksektir. Manyetik akıya yön vermek için rotor üzerinde hava kanalları kullanılır. Bu kanallara akı bariyeri denilmektedir. Klasik relüktans motorlarda sargı, mıknatıs, kolektör ve fırça kullanılmamaktadır. Stator'da oluşan manyetik alan, rotordaki kutup başlarından akarak rotorun dönmesini sağlar. Anahtarlama relüktans motorlarda genelde çıkıntılı kutuplu rotor tercih edilirken senkron relüktans motorlarda eksenel ve enine lamine edilmiş rotorlar kullanılır. İmalat kolaylığı açısından enine lamine edilmiş rotor daha çok tercih edilmektedir. Elektrikli araçlar için özel geliştirilmiş relüktans motorlarında kalıcı mıknatıs kullanılmaktadır. Bu yüzden bu motorlara kalıcı mıknatıslı relüktans motor (PMSRM) denilmektedir.



Görsel 3.4: Akı bariyerleri

3.2. Relüktans Motor Çeşitleri

Sanayinin değişik sektörlerinde ve elektrikli araçlar sektöründe farklı relüktans motorlar kullanılmaktadır. Bunlar; anahtarlama, senkron ve kalıcı mıknatıslı relüktans motorlar olarak sayılabilir. Bu motorların çalışma prensipleri aynı olmakla beraber stator ve rotor yapılarında farklılıklar vardır.

3.2.1. Anahtarlama Relüktans Motor (SRM)

Stator ve rotor kutuplarının çıkıntılı olduğu relüktans motordur. Rotor kutup sayıları stator kutup sayılarından azdır. Bu durum tork dalgalanmasını ortadan kaldırır. Step motorlara benzemektedir. Kutupların çıkıntılı olmasından dolayı manyetik akı çıkıntılı noktalarda daha yoğun oluşmaktadır. Bu da çekme kuvvetini oluşturarak rotorun dönmesini sağlar. Stator sargıları çıkık kutup başlarına sarılmıştır.



Görsel 3.5: Anahtarlama relüktans motor

3.2.2. Senkron Relüktans Motor (SynRM)

Asenkron motorlarla yapısal benzerlikleri olan bu motor, senkron olarak çalışması için tasarlanmış relüktans motordur. Rotor yapısı olarak genellikle enine lamine edilmiş rotor kullanılır. Rotor lamine edilmiş çelik saclardan üretilmiştir. Stator sargıları stator gövdesine dağıtılmış bir şekilde sarılmıştır. Statora üç fazlı alternatif akım uygulanır.

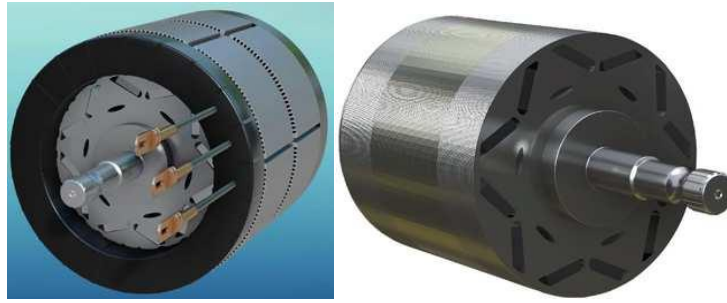


Görsel 3.6: Senkron relüktans motor

3.2.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor (PMSynRM)

Elektrikli araç firmaları tarafından özel olarak geliştirilen motorlardır. Relüktans motorun ve kalıcı mıknatıslı senkron motorun avantajlarının bir araya getirildiği motordur. Standart relüktans motorlarının rotorlarında mıknatıs ve iletkenler kullanılmamaktadır. Bu tür motorlarda ise rotora kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir. Mıknatıs olarak nikel-kobalt-demir, ferritler, neodimyum-demir-bor mıknatıslar tercih edilmektedir. Bu sayede hem relüktans prensibinden hem de mıknatısın manyetik alan etkisinden yararlanılmaktadır. Kalıcı mıknatıs yerleştirme ile relüktans motorların dezavantajı olan tork dalgalanması ortadan kaldırılmış ve tork değerleri artırılmıştır.

Genelde rotor yapısı olarak enine lamine edilmiş akı bariyerli tip tercih edilmektedir. Kalıcı mıknatısların yerleşim tasarımı markadan markaya değişmekle beraber relüktans torkuna katkısı en fazla olacak şekilde tasarlanmaktadır.



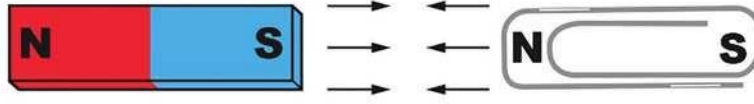
Görsel 3.7: Kalıcı mıknatıslı senkron relüktans motor (PMSynRM) ve rotoru

Zamanla motorlarda manyetik alan kaynaklı torkun düşürülerek relüktans torkunun artırılması öngörülmektedir. Böylece motorlarda mıknatıs ve iletken kullanımı azaltılarak maliyetlerin düşmesi planlanmaktadır.

3.3. Relüktans Motorların Çalışması

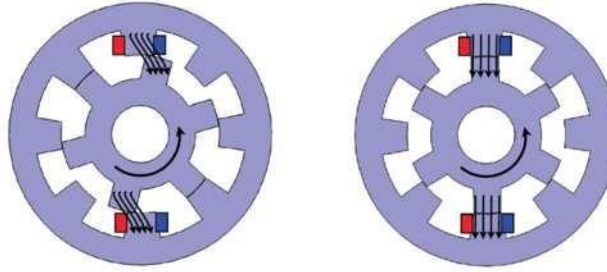
3.3.1. Relüktans Motorun Çalışması

Mıknatısların ya da elektromıknatısların, metal cisimleri manyetik alanlarının etkisiyle kendilerine doğru çekmesi bilinen bir fiziksel olgudur. Relüktans motorlarda klasik elektrik motorlarda olduğu gibi itme-çekme hareketi birlikte olmaz sadece çekme hareketi oluşur. Buradaki çekme hareketi, bir mıknatısı metal bir parçaya yaklaştırdığınızda ortaya çıkan etkidir.

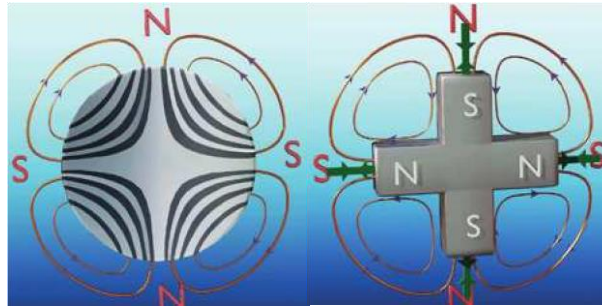


Görsel 3.8: Mıknatıs manyetik alanının bir metali çekmesi

Relüktans, manyetik devrede yer alan manyetik akının geçişine karşı gösterilen zorluktur. Stator sargısına alternatif akım uygulanınca sargılarda manyetik akı oluşur. Manyetik akı hava aralığının çok olduğu yerden geçerken yüksek dirençle (relüktansla) karşılaşır. Hava aralığının az olduğu yerden geçerken daha az bir dirençle karşılaşır. Dolayısıyla manyetik akı daha az direnç olan yere doğru akmaya başlar. Manyetik akının yoğun olduğu stator kutupları rotor kutuplarını çekerek rotorun dönmesini sağlar. Çekme hareketinin sonucunda oluşan dönme ile relüktans torku oluşur.

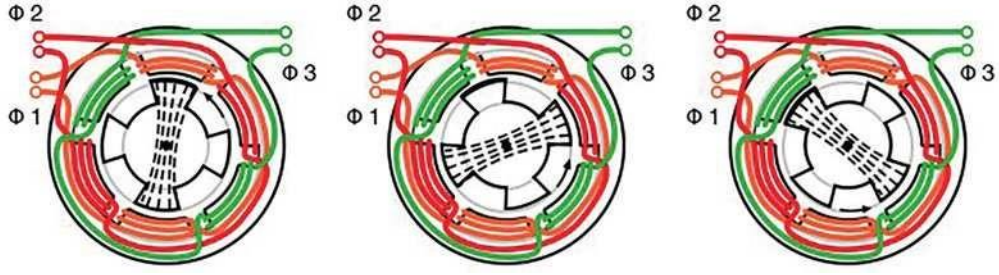


Görsel 3.9: Relüktans etkisiyle rotorun dönmesi



Görsel 3.10: Rotor yapılarında oluşan manyetik alan etkisi

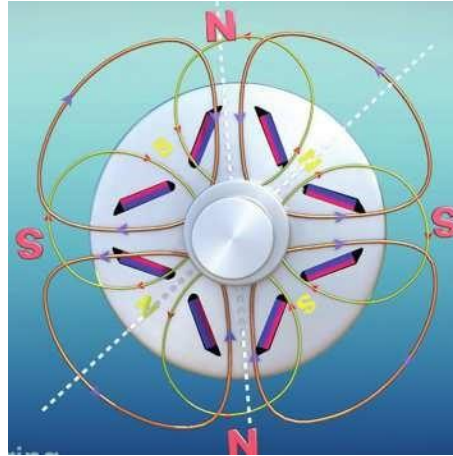
Güç elektroniği ile stator kutuplarının faz sırası değiştirilerek rotor kutuplarının sürekli dönmesi sağlanır. Stator sargılarında manyetik alan saat yönünün tersine dönerken rotor saat yönünde dönmektedir.



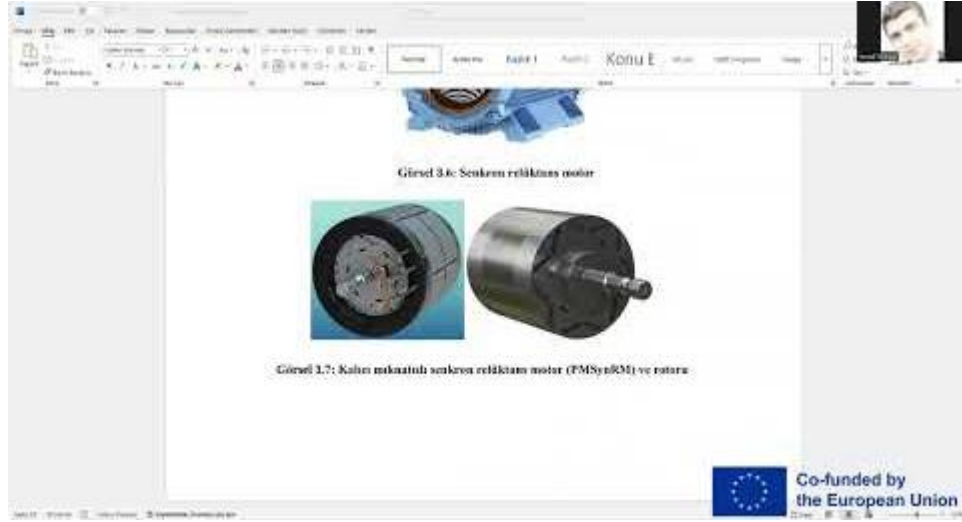
Görsel 3.11: Relüktans motorun çalışması

3.3.2. Kalıcı Mıknatıslı Relüktans Motorun Çalışması

Relüktans motorların rotorunda kalıcı mıknatıs kullanılarak geliştirilmiş motorlardır. Relüktans etkisine ek olarak kalıcı mıknatıslar sayesinde manyetik alan arttırılmıştır. Böylece bu motor hem relüktans motorun hem de kalıcı mıknatıslı senkron motorun avantajlarını birleştirmiştir. Kalıcı mıknatıslar ile rotor üzerine uygulanan manyetik akı güçlendirilmiş bu şekilde relüktans torku arttırılmıştır. Relüktans motorun tork dalgalanması dezavantajı ortadan kaldırılmıştır.



Görsel 3.12: Kalıcı mıknatıslı senkron relüktans motorun çalışması



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/T4UczmRw7OM>

4. SENKRON MOTORLAR

4.1. Senkron Motorlar

Senkron, kelime olarak eşit zamanlı anlamına gelmektedir. Statorda oluşan döner manyetik alan ile rotor aynı devirde döndüğünden bu motorlara senkron motorlar adı verilir. Senkron makineler grubuna, senkron jeneratör ve senkron motorlar girer. Senkron motor ile senkron jeneratör yapı bakımından birbirinin aynısıdır. Senkron makinenin girişine elektrik enerjisi uygulanıp çıkışından mekanik enerji alınırsa buna senkron motor, senkron makinenin girişine mekanik enerji uygulanıp çıkışından elektrik enerjisi alınırsa buna da senkron jeneratör denir. Bu öğrenme biriminde sadece senkron motorlar hakkında bilgi verilecektir. Senkron jeneratörler, başka bir öğrenme biriminde işlenecektir.

4.1.1. Senkron Motorların Yapısı

Senkron motor iki ana parçadan oluşur. Bunlar; sabit parça olan stator (endüvi) ve hareketli parça olan rotor'dur. Bunların dışında senkron motorda muhafaza, rulmanlar ve soğutma sistemi bulunmaktadır. Görsel 4.1'de hibrit bir araçtaki senkron motor görülmektedir.



Görsel 4.1: Senkron motor

4.1.1.1. Stator

Döner manyetik alanın oluştuğu kısımdır. Stator birbirinden vernikle yalıtılmış manyetik saçlardan oluşan dairesel yapıdadır. Saç plakalar üzerindeki kanallara üç fazlı alternatif akımlarla beslenen bakır sargılar sarılmıştır. Bu sargıların birbirine bağlantısında üçgen ya da

yıldız bağlantı çeşidi kullanılır. Senkron motorlarda en çok yıldız bağlantı çeşidi kullanılmaktadır.

4.1.1.2. Rotor

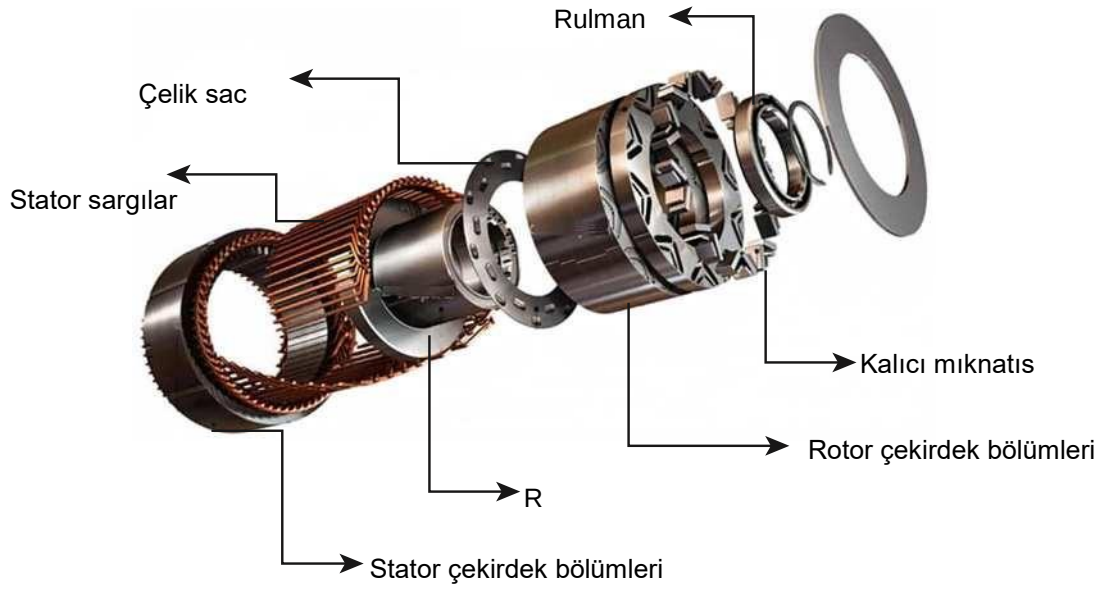
Senkron motorun hareketli olan kısmı rotordur. Rotorun senkron devirde dönebilmesi için manyetik bir alana sahip olması gerekir. Rotordaki manyetik alanı ya rotor sargısını besleyen bağımsız bir doğru akım kaynağı ya da rotora yerleştirilmiş olan daimî mıknatıslar oluşturur.

4.2. Senkron Motorların Çeşitleri

Senkron motorlar, farklı endüstrilerde kullanıldığından birçok çeşidi bulunmaktadır. Ancak elektrikli araçlarda kullanılan çeşidi, sürekli mıknatıslı senkron motorlarıdır. Sürekli mıknatıslı alternatif akım motorları, indüklenen elektromotor kuvveti dalga şekline göre sinüzoidal ve trapezoidal olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Trapezoidal uyarmalı motorlar Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM) olarak sinüzoidal uyarmalı motorlar ise Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) olarak isimlendirilir. Bu öğrenme biriminde sadece sürekli mıknatıslı senkron motorlardan bahsedilecektir.

4.2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı (SMSM)

Sürekli mıknatıslı senkron motorları da diğer elektrik motorlarında olduğu gibi hareketli bir rotora ve sabit bir statora sahiptir. Senkron motoru, senkron devirde döndürebilmek için hem statorda hem de rotorda manyetik alan oluşturmak gerekir. Stator sargılarındaki döner manyetik alan üç fazlı AC (Alternatif akım) akım ile oluşturulur. Rotordaki manyetik alanı oluşturmak için iki metot kullanılır. Bunlardan birincisi, DC (Doğru akım) akım ile beslenen rotor sargıları, ikinci metot ise rotora monte edilmiş kalıcı mıknatıslardır. Doğru akımla beslenen rotor sargılarında manyetik alan oluşturmak için fırça ve bilezik düzeneği kullanma zorunluluğu olduğundan bu tür senkron motorlar elektrikli araçlarda kullanılmamıştır. Rotorlarda kalıcı mıknatıs kullanımı, rotor bakır kayıplarını ve uyarma devresi bakım ihtiyaçlarını ortadan kaldırmıştır. Kalıcı mıknatıs kullanan elektrik motorlarına aynı zamanda fırçasız tip motorlar da denir. Görsel 4.2’de sürekli mıknatıslı senkron bir motorun resmi görülmektedir.



Görsel 4.2: Sürekli mıknatıslı senkron motorun parçaları

4.2.1.1. Stator

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında kullanılan statorlar, yapı bakımından diğer elektrik motorlarında kullanılan statorlar ile benzerlik gösterir. Genellikle stator sarımları, stator oyuklarına yerleştirilmiş üç fazlı sargıdan oluşmaktadır. Stator sargıları manyetik saçlara, dağınık sargılı tip ve toplu sargılı tip olmak üzere iki şekilde sarılabilir. Sargılar birbirine üçgen ve yıldız bağlantı olmak üzere iki şekilde bağlanır. En çok kullanılan bağlantı şekli, yıldız bağlantıdır. Görsel 4.3'te hibrit bir araçta kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorun statoru görülmektedir.

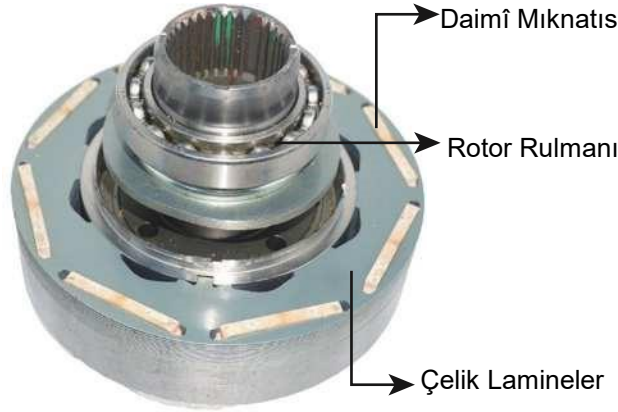


Görsel 4.3: Dağınık sargılı tip stator

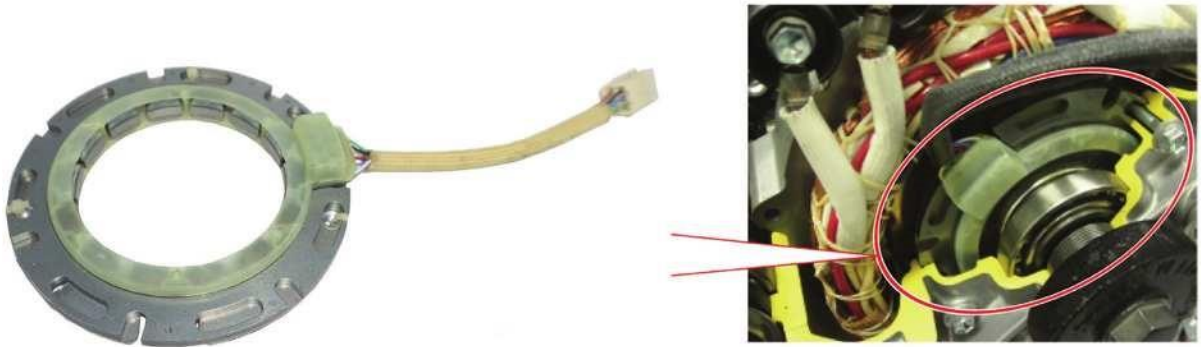
4.2.1.2. Rotor

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında kullanılan rotorların manyetik alanları, kalıcı mıknatıslar tarafından oluşturulur. Kalıcı mıknatısların rotorda kullanılması senkron motorlar için yapı ve çalışma esası bakımından çok elverişli olmuştur. Çünkü manyetik alan oluşturmak

için akım kaynağına, sargılara ve fırça bilezik düzeneğine ihtiyaç kalmamıştır. Kalıcı mıknatıs kullanımı daha küçük boyutlu ve daha güçlü manyetik alana sahip rotorların yapımına imkân vermiştir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında; Samaryum-Cobalt (Sm2Co17) veya Neodim-Demir-Bor (Nd-Fe-B) gibi nadir toprak elementli kalıcı mıknatıslar (REPM) kullanılır. Görsel 4.4'te hibrit bir araçta kullanılan sürekli mıknatıslı senkron bir motorun rotoru görülmektedir.



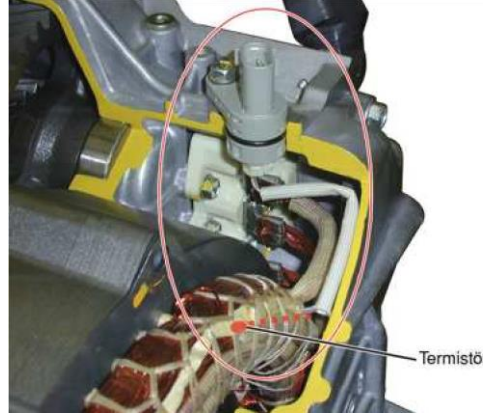
Görsel 4.4: Sürekli mıknatıslı rotor



Görsel 4.5: Rotor konum ve devir sensörü

4.2.1.3. Rotor Konum ve Devir Sensörü

Senkron motorun çalışabilmesi için rotorun konumunun bilinmesi gerekmektedir. Çünkü invertör, alternatif akımın frekansını bu veriye göre belirlemektedir. Bu nedenle elektrikli araçlarda kullanılan senkron motorlarında rotorun konumunu belirleyen ve devrini ölçen bir sensör vardır. Bu sensörler farklı yapıda olabilir. Ancak hepsi aynı görevi yapmaktadır. Görsel 4.5'te hibrit bir araçta kullanılan rotorun devrini ve konumunu belirleyen sensörün motor üzerindeki yeri görülmektedir.



Görsel 4.6: Stator sargıları sıcaklık sensörü

4.2.1.4. Stator Sargıları Sıcaklık Sensörü

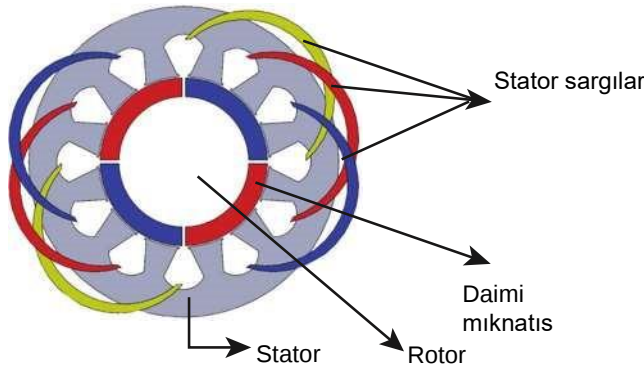
Sıcaklık sensörü, stator sargılarındaki sıcaklığı sürekli ölçer ve verileri elektronik kontrol ünitesine gönderir. Sargılardaki sıcaklık arttığında elektrik kontrol ünitesi motor çıkış gücünü kısıtlayarak sıcaklığın düşmesini sağlar. Bu sensör negatif katsayılı (NTC) bir termistördür. Görsel 4.6’da stator sargılarının sıcaklığını ölçen sensörün senkron motordaki yeri gösterilmiştir.

4.2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, kalıcı mıknatısların rotora yerleştirilme yerine ve stator sargı düzenine göre sınıflandırılır.

4.2.2.1. Stator Sargı Düzenine Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

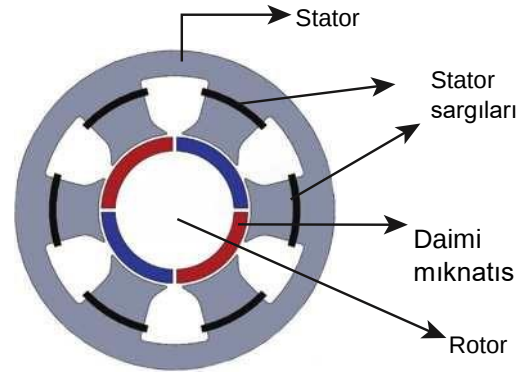
Stator sargılarında iki çeşit sargı düzeni kullanılmaktadır. Bunlar; dağınık tip sargı ve toplu tip sargıdır.



Görsel 4.7’de dağınık tip bir stator sargısı görülmektedir.

- Dağınık tip sargı

Dağınık tip sargılarda, bir sargı bobini diğer sargı bobinini kesen yapıdadır. Bu sebeple bakır kayıpları yüksek, çıkış momenti düşük ve maliyetleri yüksektir. Ancak bu sargılar sabit güç tüketimi ve yüksek hızlarda zıt emk’nin sınırlandırılma uygulamalarında kullanılmaktadır (Aydın,2014).



Görsel 4.8’de toplu tip bir stator sargısı görülmektedir.

- Toplu tip sargı

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında kullanılan diğer bir sargı düzeni ise toplu sargı çeşididir. Bu yapıya sahip motorlarda stator sargılarının kısa olması bakır kayıplarını azaltmakta dolayısıyla sargılarda ortaya çıkan ısı, dağınık tip sargı yapısına sahip motorlara oranla daha az olmakta ve bu sayede elektrik motorunun boyutu daha küçük olmaktadır. Ancak bu sargı düzeninin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar yüksek rotor kayıpları ve düşük relüktans moment değeri olarak gösterilebilir (Aydın,2014).

4.2.2.2. Rotorda Kullanılan Kalıcı Mıknatısların Yerleşimine Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

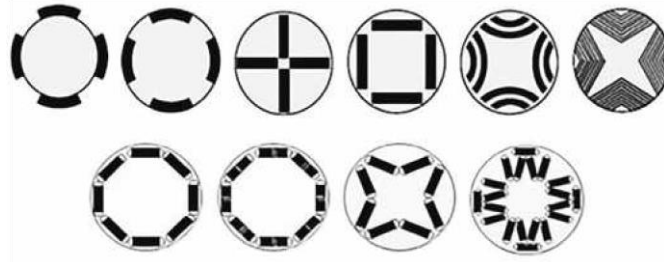
Rotorlarda kullanılan mıknatıs, malzemenin özelliği ve mıknatısın rotora yerleştiriliş şekli senkron motorun performansını ciddi anlamda etkilemektedir. Bu sebeple senkron motorun performansını artırmak için rotor üzerindeki mıknatısların farklı yerleşim tasarımları vardır. Görsel 4.8’de bu zamana kadar tasarlanmış olan kalıcı mıknatısların rotor üzerindeki yerleşimleri görülmektedir.

Rotorda manyetik alanın oluşmasını sağlayan kalıcı mıknatıslar, rotora iki türlü monte edilir. Bunlar;

- Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi,
- Mıknatısların rotorun içine (gömülme) yerleştirilmesidir. Bunlar da kendi arasında

iki çeşittir.

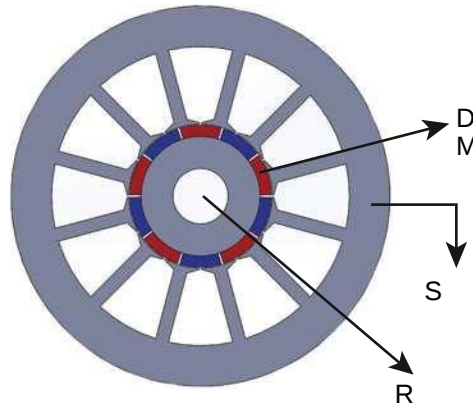
1. Radyal yerleştirilme
2. Dairesel yerleştirilme



Görsel 4.9: Kalıcı mıknatısların rotora yerleşme görselleri

• Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi

SMSM'ler içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip motor türüdür. Bu motorlarda mıknatıslar rotor yüzeyine takıldığından en yüksek hava aralığı akı yoğunluğuna sahiptir. Bunların üretim maliyeti ve yapısal dayanımları düşüktür. Mıknatıslar rotor yüzeyine özel malzemelerle yapıştırılmıştır. Yüksek hızlarda mıknatısların rotor yüzeyinden ayrılma ihtimali nedeniyle daha çok düşük hız uygulamalarında tercih edilir (Aydın,2014).

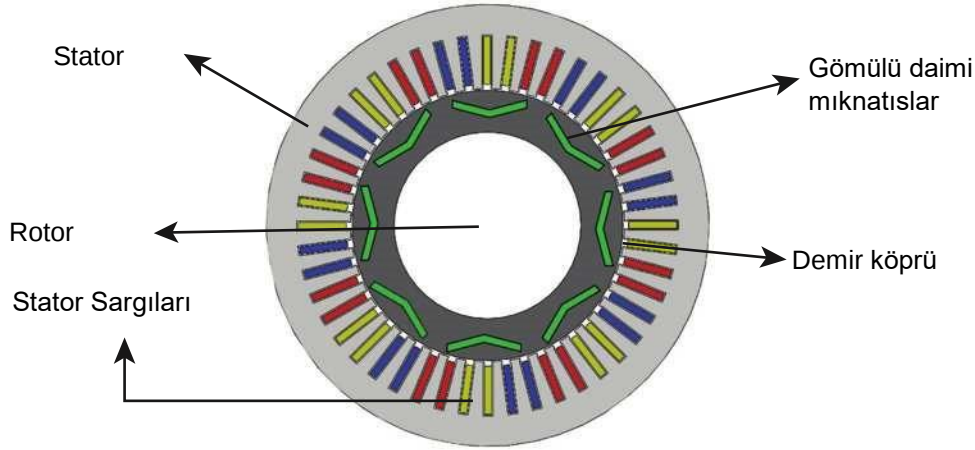


Görsel 4.10: Kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi

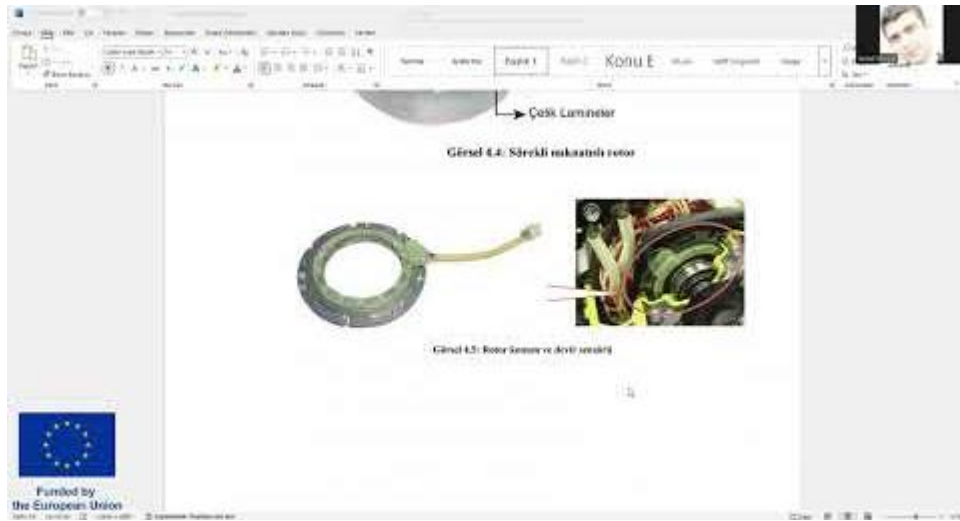
• Mıknatısların rotorun içine yerleştirilmesi (Gömülü mıknatıslar)

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında, rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslar yüksek hızlarda döndüğünde büyük merkezkaç kuvvetlerine maruz kaldığından, mıknatısların rotor yüzeyinden kopma, ayrılma gibi sıkıntılar oluşabilmektedir. Bu nedenle kalıcı mıknatıslar, rotorun içinde açılan oyuklara yapıştırılmak suretiyle yerleştirilir. Gömülü mıknatısın etrafı hava yerine manyetik malzeme ile kaplı olduğundan relüktans momentinin oluşması kaçınılmazdır. Gömülü tip mıknatıslı rotorun en önemli üstünlüğü, mekanik sağlamlığıdır. Bu

nedenle yüksek devir uygulamaları için dizayn edilir. Mıknatısları rotor içine gömülmüş senkron motorun dikkate değer avantajlarından birisi de yüksek verime sahip olmasıdır. Bu tasarımın en büyük dezavantajı ise kalıcı mıknatısların maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Özçira,2007).



Görüş 4.11: Sürekli mıknatısların rotor içine yerleşimi



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/Hk3ngBBCoA0>

4.3. Senkron Motorlara Yol Verme

Rotor hızının sıfırdan senkron hızına ulaşabilmesi için yapılan işleme yol verme denir. Senkron motorlar kendi kendilerine yol alamadıklarından yol almaları için değişik yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır;

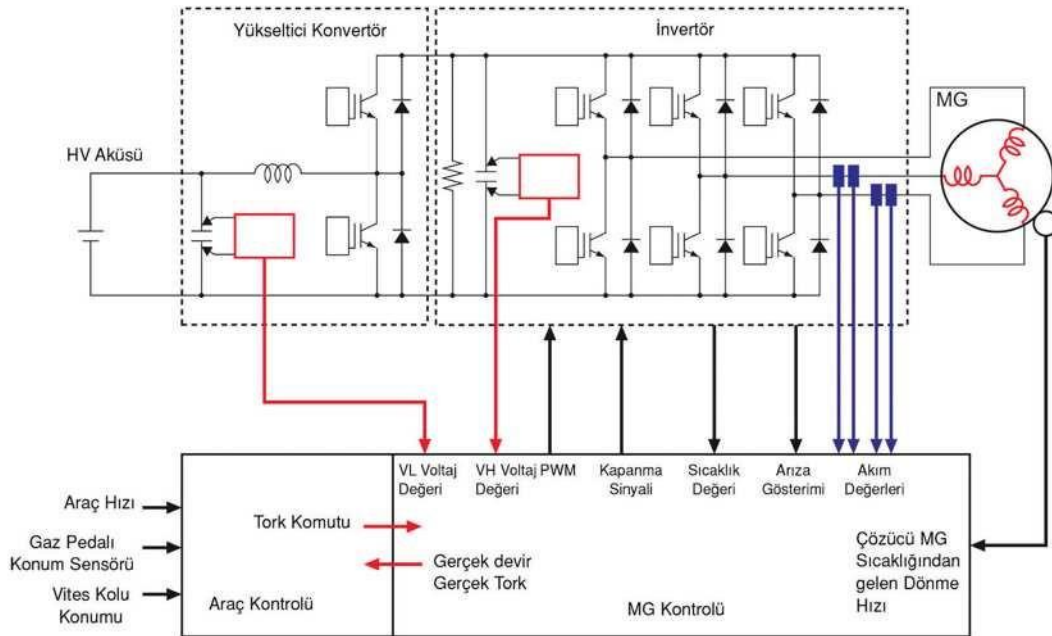
- Değişken frekanslı invertör kullanmak,
- Amortisör sargıları kullanmak,

- İkinci bir tahrik makinesi kullanmak,
- Senkron jeneratör olarak çalıştırmaktır.

Elektrikli araçlarda sürekli mıknatıslı senkron motorlar kullanılır. Bu tür senkron motorlara yol vermede değişken frekanslı invertör kullanılır. Bu nedenle bu öğrenme biriminde sadece değişken frekanslı yol verme yönteminden bahsedilecektir.

4.3.1. Değişken Frekanslı İnvörtör Kullanarak Yol Vermek

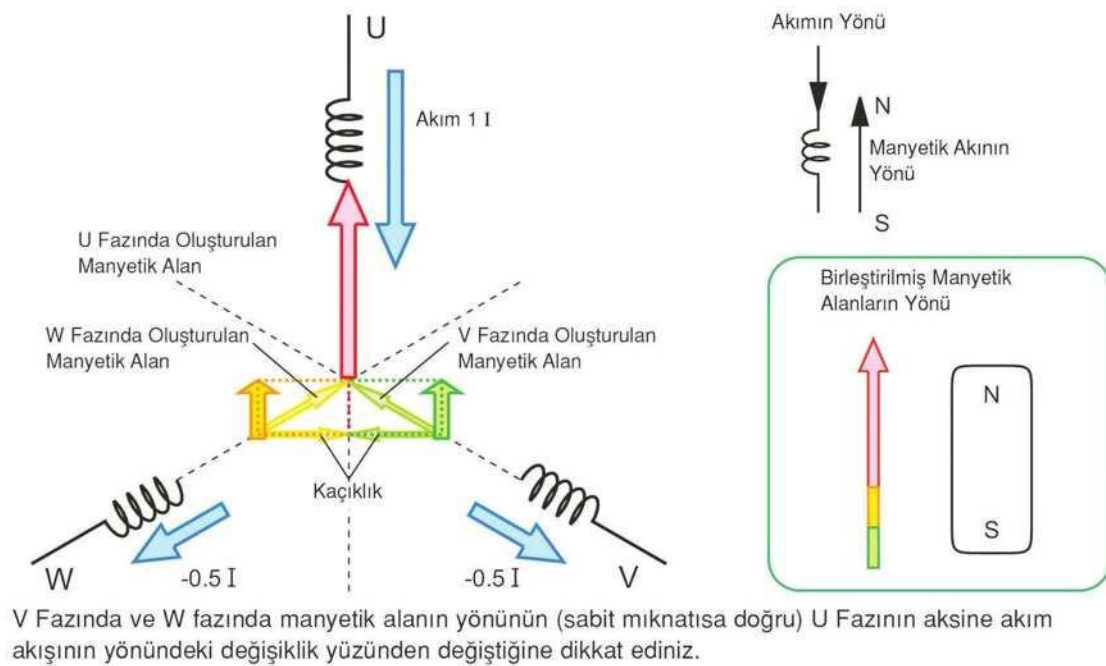
Senkron motorun stator sargılarından üç fazlı AC akım geçtiğinde sargılarda senkron hızda döner manyetik alan oluşur. Başlangıçta rotorun ataletinden dolayı senkron motorda kalkış moment üretilemez. Rotoru uygulanan momentin yönü stator döner alanının her yarı turunda zıt yönde değiştiğinden, rotor harekete edip statorun döner alanı yönünde dönemez. Bu nedenle rotora uygulanan moment sıfır olduğundan rotor hareket edemez. Ancak statora uygulanan gerilimin frekansı azaltılırsa stator döner alanın hızı da azalacağından, rotor üzerine uygulanan dönme momenti yardımıyla rotor, döner alan yönünde dönmeye başlar. Daha sonra stator sargılarına uygulanan gerilimin frekansı kademeli şekilde arttırılarak rotor hızının senkron hıza yükselmesi sağlanır. Görsel 4.12’de değişken frekansla senkron motorlara yol vermeye ait bir devre şeması görülmektedir.



Görsel 4.12: Değişken frekanslı invertör ile yol verme

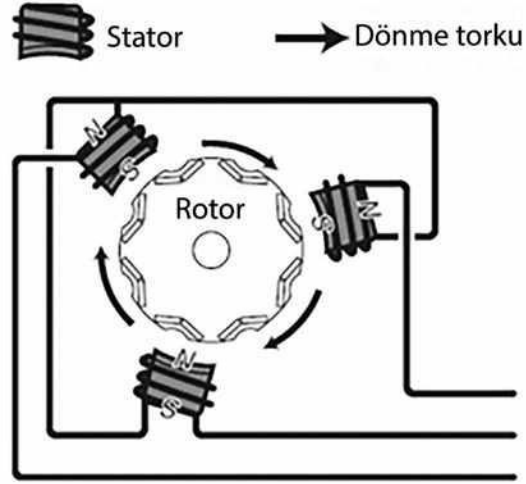
4.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Çalışması

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarının stator sargılarından üç fazlı AC akım geçtiğinde döner manyetik alan oluşur. Döner manyetik alanı oluşturmak için 1200 açıyla yerleştirilmiş sargılar gerekir. Görsel 5.12’de U, V ve W stator sargıları görülmektedir. Bu üç sargının ikisine aynı miktarda akım uygulanırken U sargısına daha büyük miktarda akım şiddeti uygulanır. Bu sayede W ve V sargılarında oluşan manyetik alanın kuvvetleri birbirini sıfırlarken U sargısında oluşan manyetik alan kuvveti (kırmızı renkli ok), sargıya verilen akım yönünün (mavi renkli ok) tam tersi istikametinde oluşur. Bu sayede stator sargılarında oluşan manyetik akımın yönü ve şiddeti belirlenmiş olur. Manyetik akımın yönünün ve şiddetinin değişmesi için sargılara gönderilen akımın yönü ve şiddeti invertör sayesinde devamlı değiştirilerek döner manyetik alan elde edilir. Görsel 4.13’te stator sargılarında döner manyetik alanın nasıl oluştuğu görülmektedir.



Görsel 4.13: Stator sargılarında oluşan döner manyetik alan

Sabit mıknatıslı rotor, dönmekte olan manyetik alanın içerisine sokulduğunda manyetik alanla birlikte dönmeye başlayacaktır. Rotorun dönme konumuna ve hızına göre bu döner manyetik alan kontrol edilerek rotor içerisinde bulunan sabit mıknatıslar döner manyetik alan tarafından çekilir ve böylelikle tork üretilir. Üretilen tork, akımın miktarı ile orantılı olarak düşürülür ya da azaltılır. Rotorun dönme hızı AC akımın frekansı değiştirilerek kontrol edilir.



Görsel 4.14: Döner manyetik alan içindeki rotorun dönmesi

4.5. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarında Yapılan Kontroller

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında yapılan kontrol işlemleri iki gruba ayrılır.

Bunlar;

- Görsel kontroller,
- Elektriksel kontrollerdir.

4.5.1. Görsel Kontroller

Sürekli mıknatıslı senkron motorun görsel kontrolünde aşağıdaki kontroller yapılır:

- Stator sargılarında yanma kontrolü
- Stator sargılarında deformasyon kontrolü
- Rotor rulmanlarında ses kontrolü
- Rotorun görsel kontrolü
- Yüksek gerilim kablo bağlantıları kontrolü
- Rotor balansının kontrolü

4.5.2. Elektriksel Kontroller

Sürekli mıknatıslı senkron motorların rotorunda sargı bulunmadığından sadece stator sargılarında elektriksel kontroller yapılır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarında aşağıdaki elektriksel kontroller yapılır:

- Stator sargılarında direnç kontrolü
- Stator sargılarında süreklilik kontrolü
- Stator sargılarında şasiye kaçak kontrolü

- Yüksek gerilim kablo bağlantılarında kötü temas kontrolü

4.6. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Avantaj ve Dezavantajları

Sürekli mıknatıslı malzemelerde ve elektrikli motor sürücülerindeki yeni gelişmeler, SMSM'nin doğru akım motorları ile alternatif akım motorlarının avantajlı özelliklerini sağlayabilecek duruma getirmiştir. Mıknatıslı senkron motor ile diğer tahrik motorları karşılaştırıldığında aşağıdaki avantaj ve dezavantajlar sıralanabilir (Özçira, 2007).

4.6.1. Avantajları

- Rotorunda sargı yerinde sürekli mıknatıs bulunduğundan uyarma akısına gerek yoktur. Bu nedenle haricî bir uyarma kaynağı yoktur. Uyarma kayıpları olmadığından motor verimi daha yüksektir.
- DC ve bazı AC motorlarında fırça ve kolektör düzeneği kullanılır. SMSM'de bu düzeneğe gerek olmadığından bakım maliyeti azalmakta fırça ve kolektörde kayıplar oluşmadığından verim daha da artmaktadır.
- Kolektör kullanılmaması rotorun kısılmasına, rotorda sargıların olmaması da ağırlığının azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atalet momenti düşük ve dinamik performansı iyidir.
- Hava aralığı endüksiyonu arttığı için daha az stator sargısı kullanılabilmekte ve bu sayede aynı güçteki doğru akım ve asenkron motorlara göre daha küçük hacimde ve ağırlıkta yapılabilmektedir.
- Rotorda sargılar olmadığı için SMSM'nin soğutulması daha kolay olmaktadır.
- Asenkron motora göre güç faktörü yüksektir. İnvertörden beslenen sistemlerde güç katsayısının yüksek olması invertörün gücünden verimli olarak faydalanabilmek açısından önem taşımaktadır.

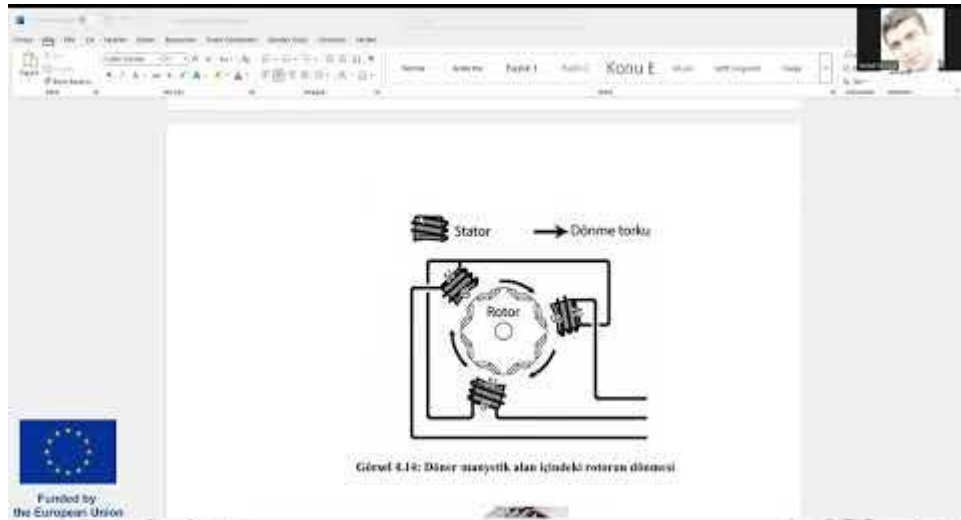
4.6.2. Dezavantajları

- İnvertör kontrol sistemleri kullanılmadığında hızın değişimi söz konusu değildir. Uygulama alanları da sabit hızın gerektiği yerlerdir.
- Sabit mıknatıs ve stator döner alanı arasında senkronizasyon sağlayabilmek için rotor konumunun bilinmesi gerekir. Rotor konumu sensörlerle belirlenebilir fakat bu maliyeti artırır.
- Jeneratör çalışma durumunda, uyarma akımı olmadığından gerilim ayarı yapılamaz.
- Yüksek ısılarda kalıcı mıknatıs malzemelerin mıknatıslanma gücünde eksilme olabileceğinden sistemin güvenilirliği azalmaktadır.

- Yüksek enerjili mıknatısların fiyatlarının ve üretim giderlerinin yüksek olması nedeniyle mıknatıslı senkron motorlar, doğru akım ve asenkron motorlara göre daha pahalıdır.
- Kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine takılmış olan çeşitlerinde yüksek hızlarda mıknatısların rotor yüzeyinde kopma riski vardır.
- Bakım esnasında rotorun statordan çıkarılması durumunda eksenel kaçıklık olma durumu vardır.



Görsel 4.15: Döner manyetik alan içindeki rotorun dönmesi



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/pkDJs0y3-0Q>

5. TEKERLEK İÇİ MOTORLAR

5.1. Tekerlek İçi Motorların Yapısı

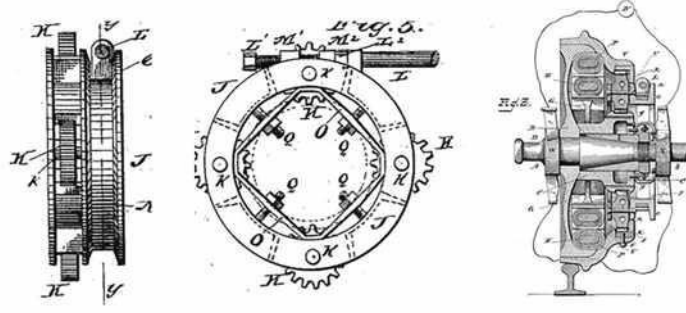
Araç tekerlekleri içine yerleştirilen ve tekerlekleri öndürmek için herhangi bir aktarma organı kullanmayan elektrik motorlarına tekerlek içi motorlar denir. Teknolojisi ve tasarımı gereği gayet verimli olan bu motor, son yıllarda elektrikli otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik motorları elektrikli araçların gündeme gelmesinden itibaren içten yanmalı motorların yerine ya da onları destekleyici bir sistem olarak düşünülmüştür. Farklı tipte üretilen motorlar elektrikli araçlarda kullanılmıştır. Elektrikli araçların ilk üretimlerinde daha çok elektrikli motorun kullanıldığı, gücün dişlilerle tekerleklerle aktarıldığı sistemler kullanılırken günümüzde her bir tekerlek için ayrı bir elektrik motorunun kullanıldığı ve tahrik kuvvetinin doğrudan tekerleğe bağlandığı sistemlere geçiş başlamıştır. Aynı zamanda tekerleğe doğrudan bağlantısı nedeniyle bu motorlara teker (hub) motor da denilmektedir (Akıncı, Ekren, Hüner 2008).



Görsel 5.1: Tekerlek içi motor

5.1.1. Tekerlek İçi Motorların Tarihçesi

Tekerlek içi motorlar, günümüzdeki elektrikli araçların tahrik sistemlerinde yeni yeni kullanılırken ilk üretilme ve patent alma süreçleri 1900'li yıllara dayanmaktadır. Tekerlek içi motor teknolojisinin temelleri 24 Haziran 1884 tarihinde Wellington Adams adlı bir Amerikan mucit tarafından atılmış ve bu motor 300, 827 numaralı patent ile belgelendirilmiştir. 1884–1897 yıllarında birçok çalışmada kullanılan patent, Ferdinand Porsche tarafından değerlendirilmiştir.



Görsel 5.2: Wellington Adams'ın 1884 yılında aldığı patent

1897 yılında Ferdinand Porsche, dünyadaki ilk hibrit aracın prototipini üretti. Bu hibrit aracın ön tekerleklerine hareket veren tekerlek içi motorları vardı. Bu tekerlek içi elektrik motorlarının gücü 3,5 kW civarındaydı. Bu hibrit araca Lohner-Porsche ismi verildi. İlk prototiplerin sadece ön tekerleklerinde teker içi motor bulunurken sonraki modellerinde dört tekerleğinde de tekerlek içi motor kullanılmıştır. 1900 yılında Paris'teki Dünya Sergisi'nde bu otomobil sansasyon yaratmıştır. Sonraki yıllarda 300 adet Lohner-Porsche yapılmış ve bunların zengin alıcıları olmuştur. Görsel 5.3'te dünyanın ilk hibrit aracı gösterilmiştir.



Görsel 5.3: Dünyanın ilk benzinli-elektrikli hibrit otomobili olan yenilenmiş Lohner-Porsche

5.1.2. Tekerlek İçi Motorun Parçaları

Tekerlek içi motorları bir elektrik motorudur dolayısıyla diğer elektrik motorlarında kullanılan birçok parçayı barındırmaktadır. Fırçasız DC motor yapısında olan tekerlek içi motorlarda bir adet rotor bir adet de stator elemanı bulunmaktadır. Geleneksel doğru akım motorlarında genelde rotorlar, stator içinde bulunurken tekerlek içi motorlarında dışıdır. Stator sargıları rotorun içinde bulunmaktadır. Ayrıca gerilim ve akım kontrolü sağlayan bir micro işlemci ve DC akımı AC akıma çeviren invertör grubu da bulunmaktadır. Yüksek akım kullanımından dolayı oluşan ısıyı düşürmek için soğutma sistemi de kullanılmaktadır. Tekerlek içi motorun rotoru direkt janta bağlıdır. Rotor döndüğünde, tekerlek hareket etmektedir. Tekerlek motorunun üzerinde aracın durmasını sağlayan fren sisteminin elemanları da bulunmaktadır. Tekerlek içi motor aynı zamanda aracın süspansiyon sistemi ile de bağlantı hâlinindedir.

Tekerlek içi motorlar genellikle aşağıdaki şu parçalardan oluşmaktadır:

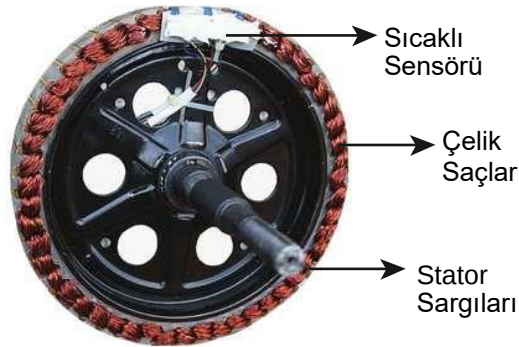
- Stator
- Rotor
- İnvörtör
- Soğutma sistemi
- Fren sistemi



Görsel 5.4: Tekerlek içi motorun parçaları

5.1.2.1. Tekerlek içi Motorun Statoru

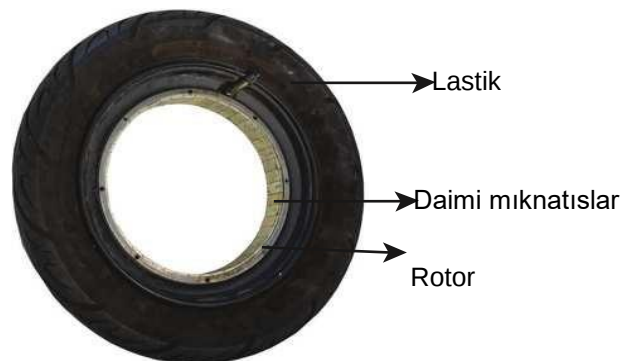
Tekerlek içi motorun statoru, diğer doğru akım motorlarının aksine motorun merkezinde bulunmaktadır. Statorun yapısal durumu diğer elektrik motorlarındaki statorlar ile aynıdır. Görsel 5.5'te tekerlek içi motorun statoru görülmektedir.



Görsel 5.5: Tekerlek içi motor statoru

5.1.2.2. Tekerlek içi Motorun Rotoru

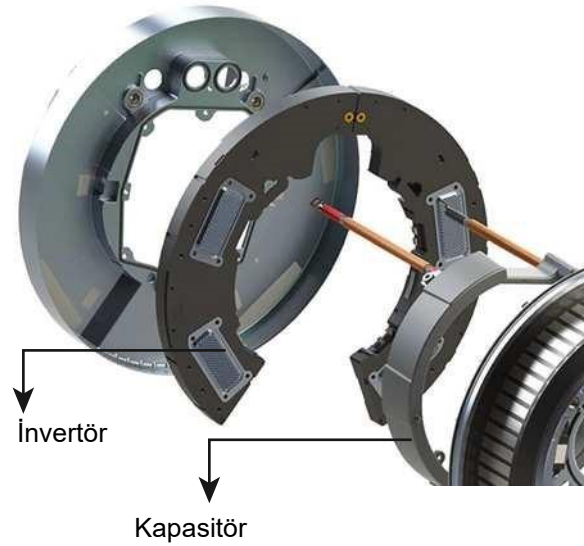
Tekerlek içi motorlar dıştan rotorludur. Rotorun üstüne kalıcı mıknatıslar yapıştırılır. Tekerlek içi motor rotorlarda Samaryum-Cobalt (Sm2Co17) veya Neodim-Demir-Bor (Nd-Fe-B) gibi nadir toprak elementli kalıcı mıknatıslar tercih edilmektedir. Rotor, motorun hareketli olan parçasıdır ve tekerleğin jantına bağlıdır. Stator ve rotordaki manyetik alanların etkisi ile rotor dönmeye başlar ve bu hareketi tekerleğe iletir. Görsel 5.6'da tekerlek ile bütün hâlde olan tekerlek içi motor rotoru görülmektedir.



Görsel 5.6: Tekerlek içi motor rotoru

5.1.2.3. Tekerlek içi Motorun İnvörtörü

Tekerlek içi motorun stator sargılarında üç fazlı alternatif akım kullanılmaktadır. Bu nedenle elektrikli aracın bataryasındaki doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm işini yapan parça invörtördür. Tekerlek içi motor invörtörlerinin araç üzerindeki konumlarında farklılıklar olabilir. Bazı elektrikli araçlarda invörtör araç gövdesi iken bazı araçlarda ise tekerlek içi motor ile kompakt bir yapıdadır. Tekerlek motorun üzerinde bulunan invörtörler boyut bakımından diğer invörtörlerin yarısı kadardır. İnvörtörün tekerlek motoru üzerinde olmasının bazı faydaları vardır. İnvörtör, araç üzerinde bir yere monte edildiğinde tekerlek motoruna gitmesi gereken kablo sayısı artmaktadır. Bu da maliyeti artırmaktadır. Görsel 5.7’de tekerlek içi motor ile kompakt bir yapıdaki invörtör grubu görülmektedir.



Görsel 5.7: Tekerlek içi motor ve mikro invörtörü

5.1.3. Tekerlek İçi Bir Motorun Özellikleri

Konsept bir otomobilde kullanılan örnek tekerlek içi motorun teknik özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Değişkenler	Değeri	Birimi
Nominal besleme gerilimi	370	DC V
Maksimum tork	1200	Nm
Sürdürülebilir tork	650	Nm
Maksimum hızı	1500	rpm
Maksimum çıkış gücü	110	kW

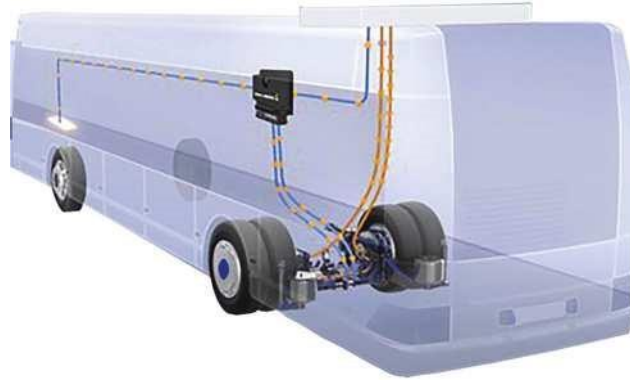
Motor verimi	94	%
Soğutma sistemi	Sıvı soğutmalı	L/dk.
Motor ağırlığı	33	Kg
Güç kontrol elektroniği	Entegre invertör	

Tablo 5.1: *Tekerlek İçi Motorun Özellikleri*

5.1.4. Tekerlek içi Motorların Kullanım Alanları

Günümüzde tekerlek içi motorlar motosikletlerde, bisikletlerde, scooterlarda, otomobillerde otobüslerde, arazi taşıtlarında, kamyonlarda vb. araçlarda kullanılmaktadır. Bisiklet, motosiklet ve scooterlarda tekerlek içi motorlar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Otobüs ve kamyonlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Ancak otomobillerde şu an genellikle konsept olarak kullanılmaktadır. Aşağıda tekerlek içi motor kullanmış bazı konsept otomobiller sıralanmıştır. Görsel 5.8’de tekerlek içi motor kullanan elektrikli bir otobüs görülmektedir.

- General Motors Sequel 2005
- Protean Electric’in 2006’daki Mini QED’i, 2008’deki Ford F-150 kamyoneti ve Hi-PaDrive’ını kullanan diğer arabalar
- Mitsubishi MIEV konsept modeli 2005
- Chebela (2010), arkada 2 doğrudan tahrikli tekerlek içi motor kullanan küçük bir kentsel EV prototipi
- Citroën C-Métisse , TM4 tarafından geliştirilen tekerlekli elektrikli motorlu araç
- Heuliez, Michel’in Aktif Tekerleğini (motorlu aktif süspansiyonu da içeren) 2008 yılında kullanacaktır.
- ZAP-X, 2007 yılında bir lityum-iyon pil takımında yere 644 beygir teslim, dört tekerleğe de yüksek teknoloji elektrik göbek motorları kullanmaktadır.
- Peugeot BB1 2009 yılında tasarlanan arka teker motorlarında tekerlek içi motor kullanılmıştır.
- Toyota’nın yan kuruluşu HinoMotors, 2019 Tokyo Motor Show’da “FlatFormer” adlı bir konsept 6x6 kamyon şasisini göstermiştir.

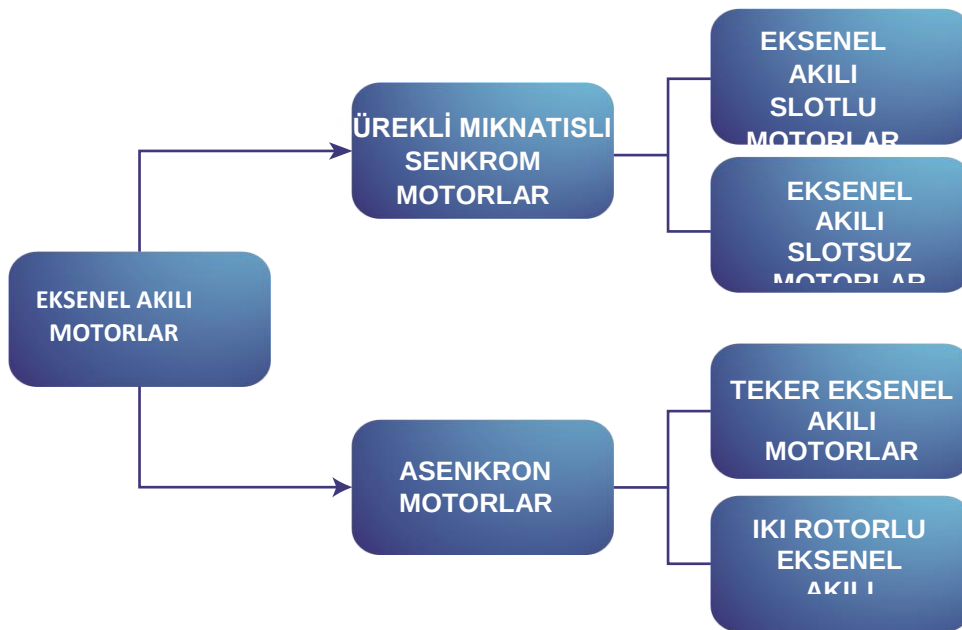


Görsel 5.8: Tekerlek içi motor kullanan elektrikli bir otobüs

5.2. Tekerlek İçi Motorların Çeşitleri

Tekerlek içi motorlar, daha çok konsept elektrikli araçlarda kullanıldığından literatürde tam anlamı ile çeşitlendirilmemiştir. Ancak bu konu üzerinde yazılmış akademik çalışmalara göre tekerlek içi motorların çeşitleri aşağıda verilmiştir.

Elektrikli araçlarda kullanılan teker motorları akılarına göre üçe ayrılır. Bunlar; eksenel, radyal, enine akılı olanlardır. Elektrikli araçlarda kullanılmaya en uygun olan çeşidi eksenel akılı tekerlek içi motorlardır. Eksenel akılı motorlar, kendi içinde sürekli mıknatıslı ve indüksiyonlu olmak üzere ikiye ayrılır. Eksenel akılı asenkron motorlar, teker eksenel akılı ve iki rotorlu eksenel akılı olmak üzere kendi içinde ikiye ayrılır. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar ise kendi içinde eksenel akılı slotsuz sürekli mıknatıslı ve eksenel akılı slotlu tipli senkron motor olarak ikiye ayrılır (Akıncı, Ekren, Hüner 2008).



Görsel 5.9: Tekerlek içi motor çeşitleri

Elektrikli araçlarda kullanılan tekerlek içi motorlar yapı bakımından incelendiğinde farklılıklar gösterebilir. Bu konuda AR-GE çalışmaları yapan ve konsept elektrikli araçlarda ürünlerini deneyen bazı otomotiv firmaları farklı teker içi motorlar tasarlamışlardır. Bu firmalardan bazıları merkezde güçlü bir teker içi elektrik motor kullanırken bazı firmalar ise küçük bir elektrik motorunun hareket verdiği dişliler ile torku artıran dişli sistemi kullanmıştır. Bu çalışmaların dışında başka bir firma ise süspansiyon sistemini de tekerlek içine yerleştirerek daha kompleks bir yapı tasarlayarak araç içindeki kullanım alanını daha da artırmıştır.



Görsel 5.10: Farklı yapıdaki tekerlek içi motorun yapısı

5.3. Tekerlek İçi Motorların Çalışması

Tekerlek içi motorların çalışma prensibi, diğer elektrik motorlarına benzer. Tekerlek içi motorların diğer motorlardan temel farkı rotorun stator sargılarının içinde değil dışında olmasıdır. Bataryadan gelen DC akım, invertör tarafından AC akıma çevrilerek stator sargılarına gönderilir. Statorda oluşan döner manyetik alan bir kutup etkisi oluşturur ve stator sargılarının etrafına dizilen rotorun doğal ve güçlü mıknatıslarının manyetik alanı ile etkileşime girer, rotorda bir itme veya çekme kuvveti oluşturur ve rotorun dönmesi sağlanır. Dönen rotor tekerleğe bağlı olduğundan tekerleğin dönmesi gerçekleşir ve araç harekete geçer.

5.4. Tekerlek İçi Motorların Avantaj ve Dezavantajları

Tekerlek içi motorlar günümüzde birçok elektrikli araçta kullanılmaktadır. Tekerlek içi motorların her sistem gibi avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

5.4.1. Avantajları

- Arkadan veya önden çekişli araçların yanı sıra dört tekerlekten çekişli versiyonlara güç sağlamak için kullanılabilirler.
- Güç aktarma organlarının olmaması nedeni ile otomobil mühendisleri daha fazla kargo odası ekleyebilir, daha güvenli bir araba için yolcu bölmesinin etrafında ezilme bölgeleri ayarlayabilir veya daha küçük, hafif, verimli bir araba tasarlayabilir.

- Tekerlek içi motorlar, şanzıman, diferansiyel ve aksla güç aktarma organlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu, motor ile tekerlek arasında duran her bileşende bulunan mekanik kayıpları azaltır ve aracın daha sessiz çalışmasını sağlar.
- Tekerlek içi motorlar, jeneratör görevi görerek frenleme yapar. Dönen tekerlekler, elektrik üretmek için elektromanyetik alanlara karşı çalışmaya zorlandıkça yavaşlar. Bu rejeneratif frenleme, aracın daha sonra depolanabilen ve yeniden kullanılabilen elektrik üretmesine de izin verir. Böylece fren balatalarının kullanım ömürleri uzamış olur.
- Elektronik motor kontrolündeki gelişmeler sayesinde, mühendisler artık her bir tekerlek içi motorunun torkunu, devrini ve hatta dönüş yönünü kontrol edilebilir hâle gelmişlerdir. Bu kilitlenmeyen frenler, çekiş kontrolü ve hatta hız sabitleyici gibi özelliklerin tek bir ana kontrolör tarafından idare edilebileceği anlamına gelir.

5.4.2. Dezavantajları

- Tekerlek içi motorları çalıştırmak için elektrik enerjisi gereklidir. Bu enerjiyi kullanabilmek için araçlara şarj edilebilir piller koymak gerekir. Ancak bu piller, araca ağırlık ekler ve potansiyel olarak tehlikeli bazı maddeleri atık akışına sokar. Aynı zamanda ülkenin enerji şebekesine ek bir yük getirir ve yeni enerji santrallerine olan ihtiyacı artırır.
- Tekerlek içi motorların karşılaştığı en büyük zorluk, yaysız kütlenin ağırlık sorunudur. Yaysız ağırlık, bir arabanın süspansiyonu tarafından desteklenmeyen tüm bileşenlerin kütlesidir. Araçta yaysız ağırlık tekerlekleri, lastikleri ve frenleri içerir. Yaysız kütlenin fazla olması, aracın konforsuz sürüşüne neden olacaktır.
- Tekerlek içi motorun tekerleklerle yakınlığı nedeniyle frenlemeden kaynaklanan yol şoklarına ve ısıya karşı korunmaları istenilen seviyede değildir.
- Tekerlek içi motorlar, birçok yeni teknolojiyi barındırdığı için maliyetleri yüksektir ve bu nedenle çok pahalıdır.

5.5. Tekerlek İçi Motorlarda Yapılan Kontroller

Tekerlek içi motorlarda yapılan kontrol işlemleri iki gruba ayrılır. Bunlar;

- Görsel kontroller,
- Elektriksel kontrollerdir.

5.5.1. Görsel Kontroller

Tekerlek içi motorun görsel kontrolünde aşağıdaki kontroller yapılır.

- Stator sargılarında yanma kontrolü

- Stator sargılarında deformasyon kontrolü
- Stator rulmanlarında ses kontrolü
- Rotorun görsel kontrolü
- Yüksek gerilim kablo bağlantıları kontrolü
- Rotor balansının kontrolü
- Soğutma sisteminde sızıntı kontrolü

5.5.2. Elektriksel Kontroller

Tekerlek içi motorların rotorunda sargı bulunmadığından sadece stator sargılarında elektriksel kontroller yapılır. Tekerlek içi motorlarda aşağıdaki elektriksel kontroller yapılır.

- Stator sargılarında direnç kontrolü
- Stator sargılarında süreklilik kontrolü
- Stator sargılarında şasiye kaçak kontrolü
- Yüksek gerilim kablo bağlantılarında kötü temas kontrolü
- İnvertör kontrolleri
- Sıcaklık sensörünün kontrolü

6. SENKRON JENESSENKRON JENERATÖRLER

Günümüzde otomobillerde kullanılan önemli enerji türlerinden birisi de elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi birçok yoldan üretilmektedir. Bu öğrenme biriminde elektrikli araçlarda kullanılan, temelde DC (Doğru Akım) ve AC (Alternatif Akım) olmak üzere iki gruba ayrılan AC jeneratörlerinin bir çeşidi olan senkron jeneratörler incelenecektir. Senkron jeneratörlerin tanımı, yapısı, çeşitleri, çalışması, ölçüm ve kontrolleri ele alınacaktır.

6.1. Senkron Jeneratörün Tanımı

Her şey zıddıyla bilinir. Senkron makineleri anlamak için asenkron makinelerden bahsetmek gerekir. Önceki öğrenme birimlerinde ele alınan asenkron motorlar ve senkron motorlar konuları ışığında “asenkron” ve “senkron” kelime anlamlarını ele alarak, ortak olan senkron kelimesiyle birinin başına “a” harfi getirilerek birbirinin zıddı bir ifade oluşturulmuştur.

Senkronun kelime anlamı; en az iki parametrenin olması, bu iki parametrenin karşılaştırılması ve birbiri ile eş çalışması gerekmektedir.

Senkron veya asenkron bir elektrik motoruna üç faz gerilim uygulandığında motor üzerinde iki adet değer oluşur. Bunlardan biri sargılar üzerinde oluşan (hesaplanan) değerdir ve bu senkron hız diye ifade edilir.

Diğeri ise rotor mili üzerinden ölçülen değerdir buna da **rotor hızı** denir.

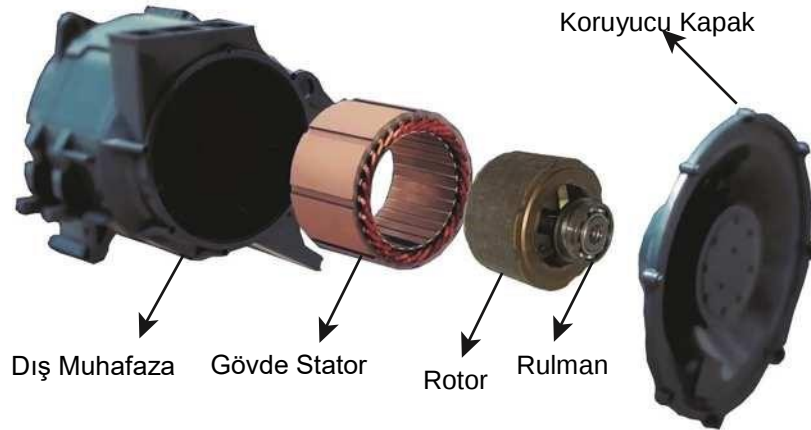
Dakikadaki senkron hız hesabı	
$n_s = 120 \times f/p$	Senkron devir sayısı = $120 \times$ frekans/kutup çifti sayısı

Yukarıda ifade edilen iki hız değeri birbirine eşit ise bu motora senkron motor denir. Eğer hesaplanan değer ölçülen değerden yüksek çıkıyorsa bu tip motorlara da asenkron motor denir. Senkron hız ve rotor hızı arasındaki değer farklılığının en büyük sebebi rotor ile stator arasında oluşan kayıplardır. Bu yüzden de senkron hız değeri hiçbir zaman rotor hız değerinden düşük olamaz.

Görsel 6.1’de senkron ve rotor hızın durumu verilmiştir.

Senkron (Hesaplanan) Hız	Rotor (Ölçülen) Hız	Motor Tipi
Yüksek	Düşük	Asenkron Motor
Eşit	Eşit	Senkron Motor
Düşük	Yüksek	-----

Senkron motor ile senkron jeneratör yapı bakımından birbirinin aynısıdır. Senkron makinenin girişine elektrik enerjisi uygulayıp çıkışından mekanik enerji alınırsa buna senkron motor, senkron makinenin girişine hareket enerjisi uygulayıp çıkışından elektrik enerjisi alınırsa buna da senkron jeneratör denir. Görsel 6.2’de daimî mıknatıslı senkron jeneratör gösterilmiştir. Bir jeneratörün alternatif akım sargılarını taşıyan kısmına endüvi, doğru akım sargılarını taşıyan kısmına endüktör denir. Stator (endüvi) sargısı alternatif akım çıkışına, rotor (endüktör) sargısı ise doğru akım kaynağına bağlanır. Bu nedenle çift uyartımlı makineler grubuna girer.



Görsel 6.2: Daimî mıknatıslı senkron jeneratör

Stator, alternatif akım sargılarının sarıldığı kısımdır. Silisli sacların paketlenmesiyle ve üzerine sargıların sarılmasıyla meydana gelir. Görsel 6.3’te stator ve sargılar gösterilmiştir. Rotor, kutup sargılarının bulunduğu ve doğru akımın uygulandığı kısımdır. Araçlarda kullanılan jeneratörlerdeki rotorlar genellikle daimî mıknatıslı rotorlar olduğu için kutup sargıları yer almaz. Görsel 6.4’te rotor gösterilmiştir



Görsel 6.3: Stator ve sargılar

Bilezikler, senkron makine jeneratör olarak çalışıyorsa rotora doğru akım beslemesinin dış devreden alınmasını sağlar. Fırçalar, dış devreden rotora gerilimin uygulanmasını sağlar. Fırçalar karbon veya karbon alaşımından yapılır. Bilezik ve fırçalar elektrik santrallerinde kullanılan jeneratör parçaları olduğu için burada bilgilendirme amaçlı verilmiştir. Otomobillerde kullanılan jeneratör rotorları genellikle daimî mıknatıslı oldukları için bilezik ve fırça gibi parçalar bulunmamaktadır.

Yataklar ve diğer parçalar, rotorun bir eksen etrafında rahatça dönmesini sağlayan ve rotoru dış etkilerden koruyan kısımdır. Yataklar, mil, pervane, klemens kutusu, kapaklar gibi kısımlardan meydana gelir.



Görsel 6.4: Rotor ve mil

5.3. Senkron Jeneratör Çeşitleri

- Yuvarlak rotorlu senkron jeneratör (Genelde kojenerasyon santrallerinde kullanılır.)
- Turbo rotorlu senkron jeneratör (Genelde kojenerasyon santrallerinde kullanılır.)
- Çıkık kutuplu senkron jeneratör (Genellikle hidroelektrik santrallerinde kullanılır.)
- Sürekli mıknatıslı senkron jeneratör (Hafif sanayide ve otomobillerde kullanılır.)

Not: *Kojenerasyon, enerjiyi daha verimli kullanmak amacıyla elektrik ve ısı enerjisinin birlikte üretilmesini sağlayan teknolojidir.*

6.4. Senkron Jeneratörün Çalışması

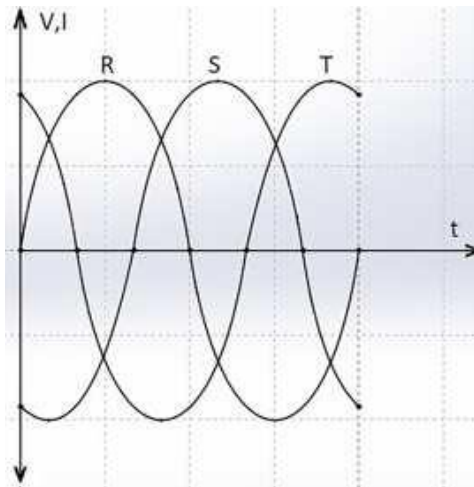
Senkron jeneratörlerde genellikle kutup sargıları makinenin hareketli kısmında yani rotorda bulunur. Rotorda kutup sargıları yerine sabit mıknatıslarda kullanılır. Kutup sargılarında doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen ve genliği sabit olan doğru manyetik alan oluşur veya daimî mıknatıslanma ile sürekli mıknatıslanma hâlinde. Görsel 6.5'te senkron jeneratör rotor ve statoru gösterilmiştir.

Bu manyetik alan, rotorun dışarıdan bir tahrik makinesi ile döndürülmesi sonucu statora yerleştirilmiş üç fazlı sargı düzlemlerinden farklı açılarda geçer. Böylece dönen manyetik alan ile jeneratörün stator sargılarında üç fazlı gerilim indüklemiş olur. Bu gerilim zamana göre değişkendir yani alternatif gerilimdir.



Görsel 6.5: Senkron jeneratör rotor ve statoru

R-S-T fazları ingilizce isimlendirmelerinden kaynaklanır. Öncelikle üç fazı birbirine göre değerlendirebilmek için referans alınacak bir faza gereksinim vardır. Yani referans faz (reference phase) buna göre ikinci sırada olan faza ikinci (second phase) ve son olarak üçüncü faza da üçüncü (third phase) faz denir. R-S-T sinyallerinin sinüs dalga şeklinde gösterimi Görsel 6.6'da verilmiştir.



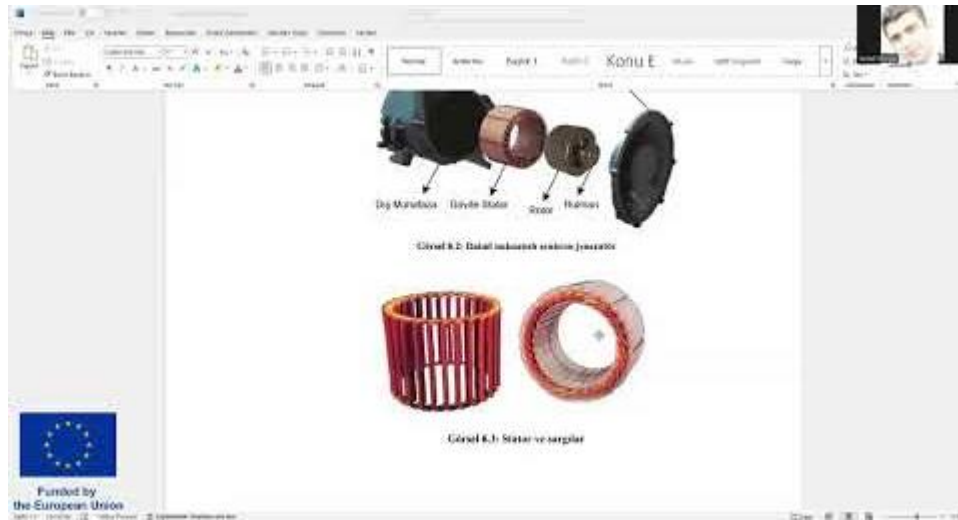
Görsel 6.6: R-S-T sinyalleri sinüs dalga

6.5. Rejeneratif Fren Sisteminin Çalışma Prensibi

Araçtaki kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek ısıyı dışarı atmak yerine, kinetik enerjiyi senkron jeneratör sayesinde elektrik enerjisine çevirerek bataryanın şarj edilmesinde kullanılan bir sistemdir. Elektrikli araçlarda gaz pedalı bırakıldığı zaman bu sistem otomatik olarak devreye girerek aracın yavaş yavaş frenlenmesi sağlanmış olur.



Görsel 6.7: Rejeneratif frenleme



Videoyu oynatmak için resim üzerine tıklayınız veya aşağıdaki linki kopyalayıp tarayıcınız ile açınız

<https://youtu.be/1zOOKAxtYI>

Rejeneratif Fren Sisteminin Devreye Girmesi

Araç belli bir hızda giderken gaz pedalına basılmadığı zaman araç üzerindeki kinetik enerji yani tekerleklerin dönme enerjisi dişliler vasıtasıyla senkron motorun rotorunu çevirmeye başlar. Görsel 6.7’de rejeneratif frenleme gösterilmiştir.

Senkron motoru senkron jeneratör olarak çalıştırmak için gerekli şart, rotorun dönüş hızının manyetik alanın dönüş hızından daha fazla olmasıdır. Bu sırada invertör-konvertör grubu devreye girer. İnvertör-konvertör grubu senkron motora giren frekansı ayarlayarak döner manyetik alan devrini rotor devrinin altında tutar. Böylece stator sargılarında dönüştürücüden gelen akımdan çok daha fazla bir akım oluşur. Üretilen akım alternatif akımdır. ACDC

doğrultmaç yardımıyla akım doğru akıma dönüştürölerek bataryanın şarj olmasını sağlar. Tekerlerin hareketine zıt yönde bir manyetik alan kuvveti bu sırada rotora uygulanarak aracın yavaşlama işlemi de gerçekleştirilmiş olur. Bundan dolayı aracın hızı hassas bir şekilde tek pedal kullanılarak (gaz pedalı) ayarlanabilir. Ayrıca tam duruş için fren pedalı kullanılır.

KAYNAKÇA

Agamloh, E., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2020). Elektrikli araçlarda elektrik makine trendlerine genel bir bakış. *Machines*, 8(2), 20.

Akyazı, Ö., Küçükali, M., & Akpınar, A. (2011). Sürekli mıknatıslı senkron motorun hız denetiminin farklı bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmesi. *Elektrik–Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu Bildirileri*, 311–315.

Aydın, E. (2014). Gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motorların moment dalgalanmalarının minimizasyonu (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Başer, E. (2016). Elektrikli araçlarda yol koşullarına uygun motor seçimi algoritması geliştirme (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Chakraborty, S., Vu, H. N., Hasan, M. M., Tran, D. D., Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2019). Elektrikli araçlar, plug-in hibrit araçlar ve hızlı şarj istasyonları için DC–DC dönüştürücü topolojileri: Mevcut durum ve gelecek trendleri. *Energies*, 12(8).

Chan, C. C. (2007). Elektrikli, hibrit ve yakıt hücreli araçların mevcut durumu. *Proceedings of the IEEE*, 95(4).

Çabuk, A. (2016). Tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının en iyi tasarımı için yeni bir yaklaşım (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çanakoğlu, A. İ., Ünsal, A., & Tunaboğlu, N. S. (2012). Elektrik makinaları. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları.

Çetin, E. (2018). Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motor tasarımı, manyetik analizi ve prototip üretimi (Doktora tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Demirci, Y. (2010). Hibrit araçlarda elektrik motoru denetimi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Millî Eğitim Bakanlığı. (2019). Motorlu Araçlar Teknolojisi – Elektrik Makinaları (10. Sınıf Ders Kitabı). Ankara: Millî Eğitim Bakanlığı Yayınları.