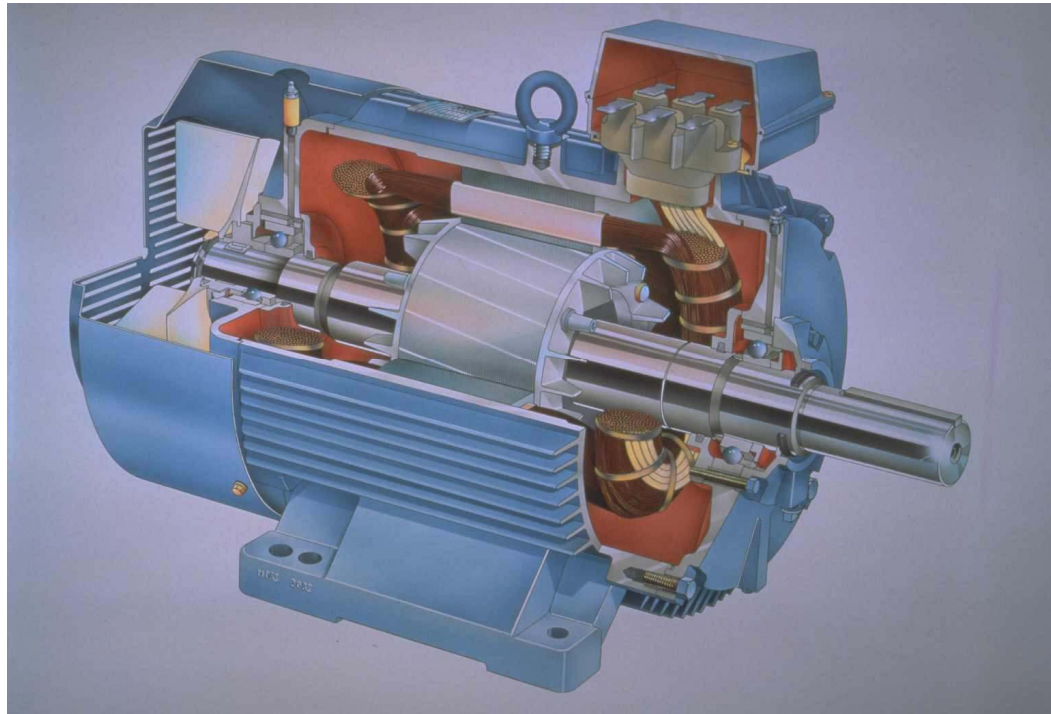




# Elektrik Makineleri II

## *Asenkron Makineler*



*MUSTAFA TURAN*

Sakarya Üniversitesi

# Elektrik Makineleri II

## *Kısım 1 - Asenkron Makineler*

### **Yazar**

Yrd.Doç.Dr. Mustafa Turan

T.C. SAKARYA ÜNİVERSİTESİ

Bu ders malzemesi henüz tamamlanmamış bir kopyadır.  
Güncellemeler yapılacaktır.

(Sürüm 0.2) - 23 Ocak 2009

This document has not been completed yet (V. 0.2)

Bazı hakları saklıdır.  
Some rights reserved.



## İÇİNDEKİLER

1. ASENKRON MAKİNALARIN YAPISI.....	5
1.1. Giriş .....	5
1.2. Rotor Yapısına Göre Asenkron Motorlar .....	6
1.3. Stator Gövdesi Ve Stator Saç Paketi .....	6
1.4. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar .....	8
1.5. Bilezikli Yada Rotoru Sargılı Asenkron Motorlar .....	9
2. DÖNER ALAN .....	11
2.1. İçinden Doğru Akım Akan Bir Çap Sargının MMK'i .....	11
2.2. İçinden Alternatif Akım Akan Bir Faz Sargısının MMK'i.....	11
2.3. Çok Fazlı Makinelerde Bileşke MMK .....	13
2.4. Asenkron Makinelerin Çalışma İlkesi.....	15
2.5. Kayma .....	16
2.5.1. Generatör Çalışma.....	17
2.5.2. Motor Çalışma.....	17
2.5.3. Transformatör Çalışma.....	17
2.5.4. Fren Çalışma.....	18
3. ASENKRON MAKİNANIN EŞDEĞER DEVRESİ.....	19
3.1. Asenkron Makinenin Tam Eşdeğer Devresi .....	19
3.2. Asenkron Makinenin Yaklaşık Eşdeğer Devresi.....	23
3.3. Asenkron Makinenin Fazör Diyagramı.....	24
3.4. Sincap Kafesli Rotora Ait Parametrelerin İndirgenmesi.....	25
3.5. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler.....	30
3.5.1. Boşta Çalışma Deneyi $\{P_m = 0, V_1 = V_{1n}\}$ .....	31
3.5.2. Kısa Devre / Kilitli Rotor Deneyi $\{n = 0, V_{1k} = V_1 _{I_{1k}=I_{1n}}\}$ .....	32
3.6. Asenkron Makinenin Güç Dengesi .....	34
4. DÖNDÜRME MOMENTİ.....	37
4.1. Asenkron Makinenin Dış Karakteristiği.....	38
4.2. Kalkış / Yol Verme Momenti.....	39

4.3.	DEVİRİLME KAYMASI ve DEVİRİLME MOMENTİ .....	40
4.4.	Kloss Denklemi .....	42
4.5.	Örnekler .....	42
4.6.	Döner Makinelerde Mıknatıslanma Reaktansı .....	49
5.	ASENKRON MOTORLARA YOLVERME ve HIZ AYARI.....	52
5.1.	Asenkron Motorlara Yolverme.....	52
5.1.1.	Yolvermenin Etkileri .....	53
5.2.	Yolverme Yöntemleri .....	54
5.2.1.	Direk Yolverme .....	54
5.2.2.	Ön Direnç İle Yolverme .....	55
5.2.3.	Kuşa Bağlaması .....	56
5.2.4.	Yıldız-Üçgen Bağlama .....	56
5.2.5.	Oto-Trafo İle Yolverme.....	58
5.2.6.	Bilezikli Makineye Yolverme .....	60
5.2.7.	Asenkron Motora Yumuşak Yolverici ile Yolverme .....	61
5.3.	Asenkron Motorlarda Hız Ayarı.....	62
5.3.1.	Kutup Sayısı Değiştirilebilen Sargı Kullanarak Hız Ayarı .....	62
5.3.2.	Frekans Değişimi İle Devir Sayısı Ayarı.....	64
5.3.3.	Bilezikli Asenkron Motorun Rotor Devresine Direnç İlave Ederek Hız Ayarı	66
5.3.4.	Gerilimin Değiştirilmesi İle Hız Ayarı.....	67
5.4.	Asenkron Motorun Frenlenmesi .....	67
5.4.1.	Mekanik Frenleme .....	68
5.4.2.	Ters Akım ile Frenleme .....	68
5.4.3.	Doğru Akım ile Frenleme .....	69
	KAYNAKLAR.....	76

# 1. ASENKRON MAKİNALARIN YAPISI

## 1.1. Giriş

Endüstride kullanılan elektrik makinelerinden, en sağlam, en az arıza yapanı, en ucuz olanı ve en çok kullanılanı asenkron makinelerdir. Asenkron makinelerin, senkron makinelerden en büyük farkı dönme hızının sabit olmayışıdır. Bu hız, motor olarak çalışmada, senkron hızdan küçüktür. Makinenin adının, asenkron makine oluşu bu özellikten kaynaklanmaktadır. Asenkron makineler, bir fazlı, iki fazlı, üç fazlı ve çok fazlı olarak yapılırlar. Günümüzde, fabrikalarda, evlerde, bürolarda bir ve çok fazlı asenkron motorlar büyük ölçüde kullanılmaktadır.

Asenkron makinenin çalışma teorisi ve yapım ilkeleri 1820-1831 yılları arasında ortaya atılmıştır. 1825 yılında Amper kanunu ve 1831 de Faraday kanunu bulunmuştur. Fakat Endüstri Tipi bir asenkron motor 1890 'lardan önce yapılamamıştır. Asenkron motorun temel ilkelerini kapsayan ilk patent 1888 de Nikola Tesla tarafından alınmıştır. 1888 'de ilk imal edilen 5 hp 'lık motorun yaklaşık ağırlığı 456 kg. iken, bugün aynı güçteki motorun ağırlığı yaklaşık 40-50 kg dır.

Asenkron makineler, alternatif akım makineleridir ; genellikle sabit duran stator ve dönen rotordan oluşur. Statorlarında bir, iki, üç yada çok fazlı sargılar bulunur. Stator sargıları adı verilen bu sargılara, alternatif gerilimler uygulanır. Hızları yük ile çok az değişen motorlardır. Dönen rotorda bir, iki, üç yada çok fazlı sargılar bulunur. Rotor sargıları adı verilen bu sargılarda gerilim ve akımlar, stator sargıları alanından endüksiyon yolu ile endüklenir. Özel amaçlı kullanımlar dışında, rotor sargısına dış bir kaynaktan gerilim uygulanmaz. Stator ve rotor arasında kalan hava aralığının radyal doğrultudaki boyu sabittir. Dönen rotor, duran statorun içinde olduğuna göre statorun iç çevresi yarıçapı ve rotorun da dış çevresi yarıçapı sabittir. Böyle bir yapı

özellığı bulunan makinenin, rotor ve stator sargılarının öz endüktansları rotorun konumuna yada 9 dönme açısına bağımlılığı ihmal edilebilecek kadar azdır.

## 1.2. Rotor Yapısına Göre Asenkron Motorlar

Asenkron makineler; bir, iki, üç yada çok fazlı olmak üzere bir kaç watt gücünden 15000 kW gücüne kadar imal edilebilmektedir. Bu motorların stator sargı gerilimleri ise 110-660 Volt ve hatta büyük güçlü makinelerde 15000 Volt olabilmektedir. Makineler rotor ve rotor sargılarının yapılışına göre iki gruba ayrılır:

Rotoru Sincap Kafesli olan motorlar

Rotoru Bilezikli ve Sargılı olan motorlar

Asenkron motorlar ister bilezikli ister sincap kafesli olsun statorları ile bunun taşıdığı stator sargıları genellikle aynı özellikte yapılır. Sincap kafesli motorların rotor sargısı çubuklardan oluşan sincap kafesi biçiminde bir sargıdır. Dış devreye hiçbir uç çıkarılmamıştır. Bilezikli motorlarda ise rotorda, yalıtılmış çok fazlı bir sargı vardır ve bu sargının uçları bilezik-fırça sistemi ile dış devreye alınmıştır.

## 1.3. Stator Gövdesi Ve Stator Saç Paketi

Stator iki temel alt kısımdan oluşur :

İnce silisyumlu 0.5 mm lik dinamo saçlarından yapılmış saç paketi

Bu saç paketini taşıyan alüminyum veya pik dökümden yapılmış stator gövdesi

**a.**

**Stator Sac Paketi:** Stator sac paketi, stator sargılarını taşıyan ve manyetik akıyı ileten kısımdır. 0.5 mm silisyumlu saclar, asenkron motorların yapımında gerek ağırlık ve gerekse fiyat bakımından önemli yer tutar. Sacların yüzleri, ince bir yalıtkan lak tabakası ile kaplanır. Saclar laklandıktan sonra genellikle 170-360 °C sıcaklıkta fırınlarda kurutulur. Lakların sacın her iki yüzeyinde kullanılması halinde, sac kalınlığı 8-25 µm kadar artar.

Stator saclarının olukları ile rotor sargılarının olukları özel ve otomatik tezgahlarda kesilir. Önce stator sacının dış çevresi, rotor olukları mil, kama yeri kesilerek açılır.

Hava aralığına göre de stator sacının iç çapı ve rotor sacları elde edilir.

Stator ve rotor sacları bir araya getirilerek 7-10 kg./cm<sup>2</sup> lik bir kuvvetle sıkıştırılırlar. Stator saclarının meydana getirdiği sac paketi eksenel yönde soğumayı kolaylaştırmak için 3,5,7,... cm lik paketlere ayrılır. Bunlar arasında uygun profiller konarak 0.5...1 cm lik radyal kanallar bırakılır. Büyük motorlarda stator paketinin soğutulması için eksenel kanallar açılır. Ayrıca soğuma yüzeyini arttırma bakımından stator sacının dış yüzeyi girintili yapılır.

Asenkron makineler, alternatif akımla çalışan makineler olduğundan statorlarındaki manyetik alan şiddeti zamanla değişmektedir. Bu değişim fuko ve histerizis kayıplarından oluşan demir kayıplarını meydana getirir. Bu kayıpları küçük tutmak ve stator sac paketinin fazla ısınmasının önüne geçmek için statorda yüzleri yalıtılmış ince silisyumlu saclar kullanılmaktadır. Normal asenkron motorlarda kullanılan sacların 50 Hz ve 10000 gauss yada 1 wb/m<sup>2</sup> lik manyetik endüksiyonda demir kayıpları 3 W/kg kadardır. Kayıpları azaltmak için, saclar çoğu kez tavlanır. Ayrıca, sac paketlerini sıkıştıran cıvatalar saclardan yalıtılır ve kısa devre meydana gelmesine engel olunur. Bu yalıtım yapılmadığı takdirde değişen manyetik akı dolayısıyla endüklenen gerilimler, kısa devre yolundan büyük kısa devre akımları geçirir ve aşırı ısınmaya yol açar.

Stator oluklarına bir, iki, üç veya çok fazlı sargılar yerleştirilir. Ayrıca motorlara değişik özellikler vermek bakımından stator oluklarına çok değişik biçimler verilmektedir. Örneğin, stator oluklarının açık, kapalı oluşu vs. Stator ile rotor arasındaki hava aralığı 0.25 mm - 4.25 mm arasında yapılır. Asenkron motorların hava aralığı büyüdükçe boшта çalışma akımı da büyür. Boшта çalışma akımının küçük tutulması için hava aralığı da küçük tutulur.

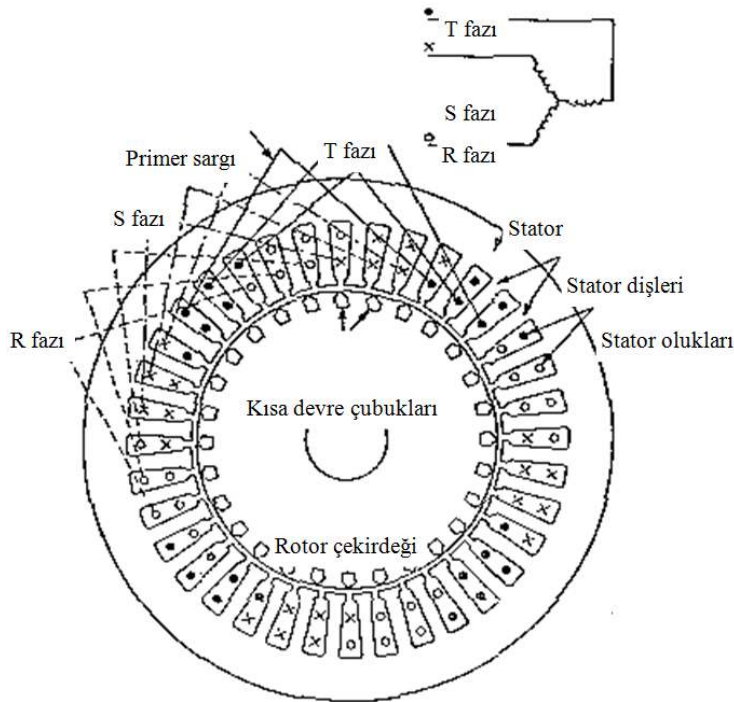
**b. Stator Gövdesi :** Stator gövdesi, stator sac paketini ve bunun sargılarını taşır, rotorun yataklanmasını ve motorun sabit bir yere bağlanmasını sağlar. Motorların standart büyüklükleri mil yüksekliği H (mm) ya göre tanımlanır. Küçük motorlarda, örneğin standart büyüklüğü 80-90 olan motorlarda stator gövdesi çoğu kez alüminyumdan yapılır. Gövdeyi taşıyan ayaklar çelikten yapılır.



Stator gövdesi ayaksız olan, sabit bir zemine bağlanmak için, flanşlı yapılan motorlara kısaca Flanşlı Motorlar denir.

#### 1.4. Sincap Kafesli Asenkron Motorlar

Bu motorların statorlarında normal alternatif akım sargıları bulunur ve (Şekil 1.1) Rotor sargısı, rotora açılan oluklara yerleştirilir. Rotor olukları, otomatik tezgahlarda kesilerek açılır. Rotor sargısı, oluklara yerleştirilen çıplak çubuklar ve bu çubukları her iki uçtan kısa devre eden kısa devre halkalarından oluşur (bkz. kapak resmi). Sincap kafesli motor deyimi, rotor sargılarının bu biçimde yapılışı nedeniyle kullanılmaktadır. Normal çalışma koşulları altında, rotor çubuklarında endüklenen gerilim 10 voltun altındadır. Bu nedenle, rotor çubukları rotor sac paketinden yalıtılmaz. Rotor sac paketi de, statorda olduğu gibi 0.5mm lik yüzeyleri yalıtılmış silisyumlu saclardan yapılır. Rotor sac paketi statordan hava aralığına geçen akının manyetik yolunu oluşturur. Sac paketi, rotor sargılarını taşır ve manyetik yoldan endüklenen momenti mile iletir.



Şekil 1.1 Stator - rotor sargılarının görünüşü (Statorda iki katlı sargı kullanılmıştır)

### **Rotor Çubuklarının Biçimleri:**

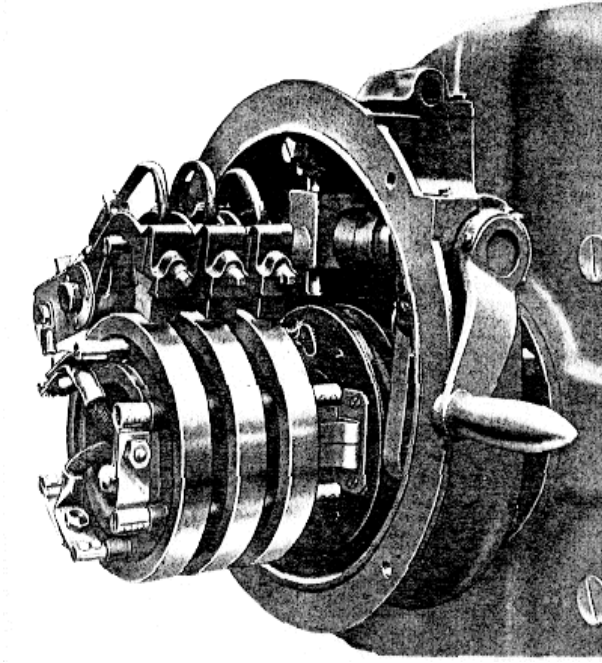
- a) Yarı açık, yuvarlak rotor oluklarına yerleştirilmiş normal çubuklardan oluşmuş rotor ; oluklara çıplak olarak yerleştirilen çubuklar bakır yada basınçla dökülmüş alüminyumdandır. Çubukların her iki yanı kısa devre halkaları ile kısa devre edilmiştir. Bakır çubuklar halinde, kısa devre halkası çubuklara her iki başlarından lehimlenirken, çubukların alüminyum olması halinde ise kısa devre halkaları döküm esnasında, bu çubuklar ile birlikte dökülür.
- b) Derin olukları olan rotor ; bu oluklara genişliği az, yüksekliği büyük olan bakır yada alüminyum çubuklar yerleştirilir. Derin oluklu motorlarda, yol alma momenti büyük ve yol alma akımı küçüktür.
- c) Çift sincap kafesli rotorlar ; rotor saclarında iki tür oluk açılmıştır. Normal ve derin oluklar. Bu oluklardan rotor yüzeyine uzak olan oluklara motorun normal çalışma rotor kafesi yerleştirilir. Normal ve rotor yüzeyine yakın olan oluklara ise yol alma kafesi yerleştirilir.

Motorlar değişik kutup sayısında, örneğin  $2p=2, 4, 6, \dots$  için yapılır. Yapılan hesaplardan, rotor sac paketinin mekanik dayanıklılığı bakımından,  $2p=2$  kutuplu motorların sınır gücü olarak 12000 kW ve  $2p=4$  kutuplu motorların sınır gücü için yaklaşık 20000 kW bulunmaktadır.

### **1.5. Bilezikli Yada Rotoru Sargılı Asenkron Motorlar**

Bilezikli asenkron motorların rotorlarında genellikle üç fazlı sargılar bulunur. Sargılar yalıtılarak rotor oluklarına yerleştirilir. Üç fazlı rotor sargısı yıldız olarak bağlanır ve yıldız noktası dışarıya çıkarılmaz. Mil üzerine bağlı ve milden yalıtılmış üç bilezik, rotor ile birlikte döner. Rotorun üç fazlı sargısının giriş uçları bu bileziklere bağlanır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımıyla rotor sargı sistemine, dış kaynaktan genliği yada frekansı değiştirilebilen gerilim uygulanabilir. Ayrıca sargılara dışarıdan empedans da bağlanabilir. Rotor sargıları tek tabakalı veya iki tabakalı alternatif akım sargıları tipinde olabilir. Bu sargılar, stator sargılarında olduğu gibi ya normal iletkenlerden yada çubuk sargılardan oluşur.

Rotor bileziklerine yol alma direnci bağlanarak, yol alma akımı sınırlanır ve yol alma momenti büyütülür. Ayrıca rotora, tristörler veya diğer uygun düzenekler yardımıyla frekansı ve genliği ayarlanabilen bir gerilim uygulanarak hız ve güç kontrolü yapılabilir. Fırçalar bilezikler üzerinde çoğunlukla sürekli olarak temas halindedir. Bazı motorlarda fırça ve bilezik aşınmasını önlemek için fırçalar bilezikler üzerinden kaldırılır ve özel bir düzen ile rotor bilezikleri kısa devre edilir. Bu halde motor rotoru kısa devre edilmiş asenkron motor gibi çalışır.



Şekil 1.2 Bilezik - fırça düzeninin görünüşü

Fırçaların bilezik üzerinde devamlı olarak çalışması halinde fırçaların aşınması nedeniyle meydana gelen tozlar makine içine girebilir. Motoru bu tozlardan korumak için, bileziklerin bulunduğu kısım çoğu zaman motorun geri kalan kısmından ayrılmıştır (Şekil 1.2).

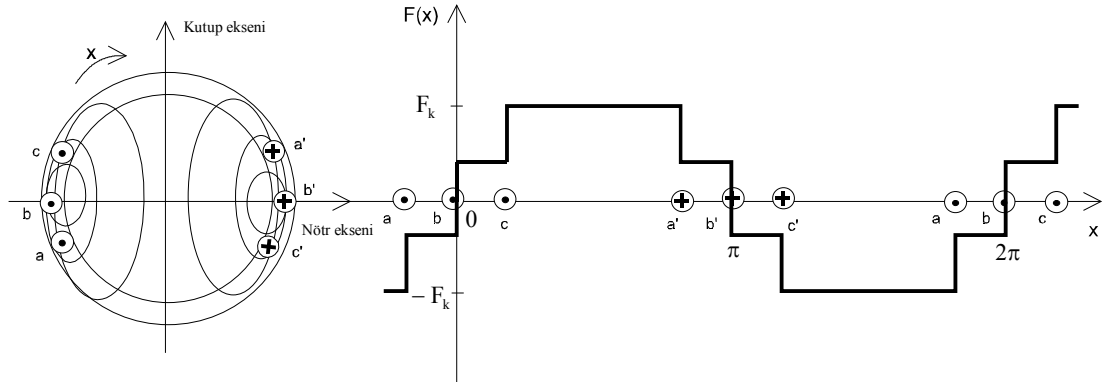
## 2. DÖNER ALAN

### 2.1. İçinden Doğru Akım Akan Bir Çap Sargının MMK'i

Statorda x çevresi boyunca dağıtılmış bobinlerden  $N(x)$  zamana göre değişmeyen bir akımın aktığını düşünürsek, bobinin üreteceği mmk;

$$F(x) = I \cdot N(x) \quad (2.1)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda stator çevresinde x yönündeki  $\Sigma F$  Şekil 2.3'deki gibi olur. Bu mmk dalgasının stator çevresinde sinüsoidal değil basamaklı bir dalga olduğu ve harmonikler içerdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 2.1 Dağıtılmış bobinli, 2 kutuplu bir faz sargısına ait mmk dağılımı ( $F_k$  kutup başına düşen mmk 'dir).

Kutup başına mmk;

$$F_k = \frac{N \cdot I}{2} \quad (2.2)$$

olup, N bobindeki toplam sarım sayısıdır.

### 2.2. İçinden Alternatif Akım Akan Bir Faz Sargısının MMK'i

Şimdi; faz sargısından zamana göre kosinüsoidal olarak değişen (2.3) bir akım aktığını kabul ederek açığa çıkacak olan mmk dağılımını inceleyelim.

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \omega t \quad (2.3)$$

En genel halde sargı faktörü  $k_{we}$  olan,  $2p$  kutuplu simetrik bir faz sargısına ilişkin sarım dağılımının, Fourier açılımındaki herhangi bir e. harmonik bileşenini ele alalım ve (2.3) 'deki akımı uygulayalım. Zamana ve stator çevresine göre mmk dağılımı;

$$F_e(x, t) = F_{em} \cdot \cos \omega t \cdot \sin x \quad (2.4.a)$$

olur. Burada e uzay harmonik numarası olup,

$$F_{em} = \frac{N \cdot \sqrt{2} \cdot I}{2 \cdot p} \cdot \frac{4}{\pi \cdot e} \cdot K_{we} \quad (2.4.b)$$

olarak kısaltılmış ve bir faz mmk'nin maksimum değeridir. Bobinleri stator çevresine dağıtılmış ve kosinüsoidal akımla uyarılmış bir makinede çeşitli uzay harmoniklerinin üreteceği bileşke mmk;

$$F(x, t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_1}{p} \cdot I_\mu \cdot \left[ k_{w1} \cdot \sin x + \frac{k_{w3}}{3} \cdot \sin 3x + \dots \right] \cdot \cos \omega t \quad (2.5)$$

şeklinde olacaktır. (2.4.a) ifadesinde  $\cos \omega t$  yerine Euler açılımı yazılırsa;

$$F_e(x, t) = F_{em} \cdot \sin x \cdot \left( \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \right) \quad (2.6.a)$$

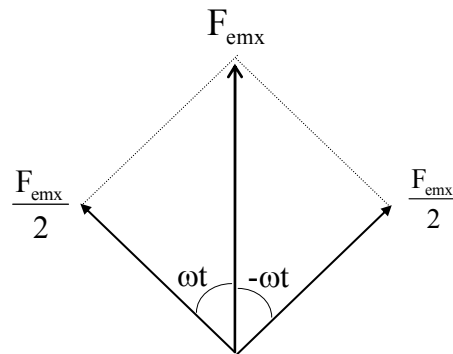
$F_e(x, t)$  'nin maksimum değeri olarak

$$F_{emx} = F_{em} \cdot \sin x \quad (2.6.b)$$

tanımlanırsa bileşke mmk;

$$F_e(x, t) = \frac{F_{emx}}{2} \cdot e^{j\omega t} + \frac{F_{emx}}{2} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.6.c)$$

birbirine zıt yönde  $\omega t$  hızı ile dönen genlikleri eş ve maksimum değerin yarısı olan iki adet döner fazör elde edilir.



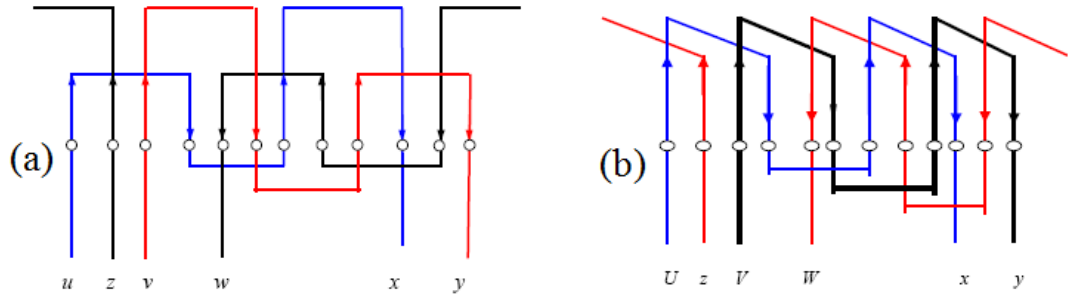
Şekil 2.2 Alternatif alanın bileşenleri

İçinden alternatif akım geçen bir faz sargısının ürettiği alan; y eksenini üzerinde  $\omega t$  ile titreşen iki eş genlikli ve zıt yönlü döner alanlardan meydana gelmektedir. Bu alana alternatif alan denir. Netice itibarı ile Şekil 2.3'de görülen sargıya, alternatif akım uygulanması halinde (Şekil 2.1; d.a. için çizilmişti) mmk dalgasının basamaklı şeklini muhafaza edip, zamana göre pozitif ve negatif  $F_{emx}$  değerleri arasında titreşeceği aşikardır.

### 2.3. Çok Fazlı Makinelerde Bileşke MMK

Çok fazlı alternatif akım sargılarının oluştuğu bileşke mmk 'i bulabilmek için, m Fazlı alternatif akım sistemini, birbirinden  $2\pi/m_1$  radyan açı kadar ötelenmiş (Şekil 2.3) alternatif akım sargısına uygulayalım. Özel durum olarak  $m_1 = 3$  alınırsa, bileşke mmk;

$$F(x, t) = F_R(x, t) + F_S(x, t) + F_T(x, t) \quad (2.7)$$



Şekil 2.3 Birbirlerinden 120° ötelenmiş 3 fazlı sargılar a) El sargısı, b) Zincir sargı

yazılabilir. Efektif faz akımları  $I_R = I_S = I_T = I$  olarak konulursa;

$$i_R = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \omega t, \quad i_S = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad i_T = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (2.8)$$

3 fazlı sargılar makine çevresinde 120° ötelenmiş olduklarından,  $N(x)$  sarım ifadeleri de ardıl fazlar için 120° ötelenir. Yani,

$$N_R = N(x), \quad N_S = N \left( x - \frac{2\pi}{3} \right), \quad N_T = N \left( x - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (2.9)$$

2.4, 2.7, 2.8 ve 2.9 'dan

$$F_e(x, t) = F_{em} \cdot \left\{ \text{Sin}x \cdot \text{Cos}\omega t + \text{Sin}\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \text{Sin}\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (2.10)$$

olarak e. harmonik bileşke momenti elde edilir. Şimdi,

$$\text{Sina} \cdot \text{Cosb} = \frac{1}{2} \cdot [\text{Sin}(a + b) + \text{Sin}(a - b)] \quad (2.11)$$

açılımını kullanarak 3 fazlı sistem için temel bileşen mmk 'lerinin oluşturduğu bileşke mmk 'lerini irdelleyelim. e yerine muhtelif tek sayılar konulup bileşke harmonik momentlerin varlığı irdelenebilir. Burada sadece e = 1 alarak döner alana ilişkin temel bileşen mmk 'lerinin bileşkesini inceleyelim:

$$F_1(x, t) = F_{1m} \cdot \left\{ \text{Sin}x \cdot \text{Cos}\omega t + \text{Sin}\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \text{Sin}\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (2.12)$$

Parantez içi ifadelerin kısaltılması için özdeşlikler kullanılırsa;

$$\text{Sin}x \cdot \text{Cos}\omega t = \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}(x + \omega t) + \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}(x - \omega t) \quad (2.13)$$

$$\text{Sin}\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}\left(x + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}(x - \omega t)$$

$$\text{Sin}\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \text{Cos}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}\left(x + \omega t - \frac{8\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}(x - \omega t)$$

$$\frac{F_1(x, t) / F_{1m}}{0} = \frac{+}{+} \frac{3}{2} \cdot \text{Sin}(x - \omega t)$$

$$F_1(x, t) = \frac{3}{2} \cdot F_{1m} \cdot \text{Sin}(x - \omega t) \quad (2.14.a)$$

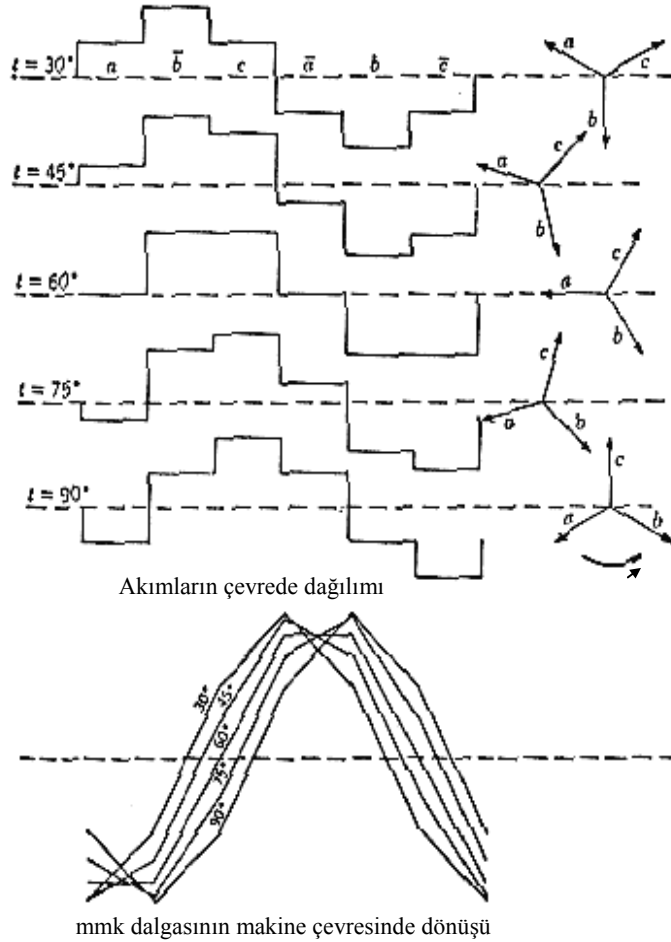
olur. Bu ise hızı  $\omega t$  olan ve x yönünde dönen bir alanı simgeler. Bu alanın genliği bir faz genliğinin 3/2 ( $m_1/2$ ) katıdır. Ayrıca 2.14.a ifadesi fazör olarak da gösterilebilir:

$$F_1(x, t) = \frac{m_1}{2} \cdot F_{1m} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.14.b)$$

Bu döner alan asenkron makinenin temel çalışma gereğini oluşturur.

Statordaki oluklu yapının oluşturduğu harmonikli faz mmk dalgalarının çeşitli harmoniklerinin oluşturduğu bileşke mmk incelenirse ( $e = 3, 5, 7, 9 \dots$ ), 3 ve 3'ün katı harmonik mmk 'lerin toplamının sıfır olduğu, 5. harmonik mmk 'lerin toplamının

5.ωt hızında ve temel bileşene ters yönde döndüğü, ve 7. harmonik mmk 'lerin bileşkesinin ise temel bileşen ile aynı yönde dönen bir alan olduğu görülebilir. Bu harmonikli mmk'ler asenkron makinenin dış karakteristiğini önemli ölçüde etkileyebileceklerinden tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdırlar. Döner alanın makine çevresinde ilerleyişi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Üç fazlı sargıda döner alanın oluşumu ; zamana göre akımların ve mmk 'nin değişimi

## 2.4. Asenkron Makinelerin Çalışma İlkesi

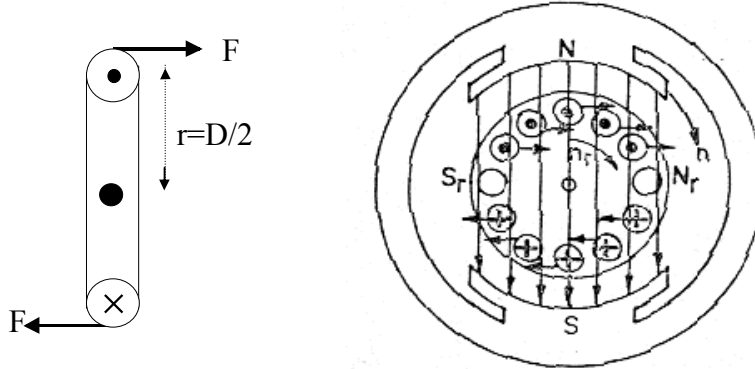
Makinenin statoruna yerleştirilen üç fazlı veya çok fazlı sargıya uygulanan aynı faz sayısındaki alternatif akımın oluşturduğu bileşke  $\phi_m$  akısı zamana göre sabit maksimum değer ile hava aralığı çevresinde döner. Böylece rotorda bulunan sargıları çevreleyen bu akı, rotor sargılarında Faraday kanununa göre alternatif bir gerilim ve akım endükler. Döner manyetik alan içerisindeki bulunan iletkenlerde bu akım; iletkenlerde Lorentz kuvveti oluşturur. İletkenin bir ucuna etkiyen bu kuvvet



diğer yönde aksi istikamette olacağı için, rotor merkezine göre bir moment meydana getirir (Şekil 2.5) ve rotor hareket eder. Rotorun erişmesi muhtemel en büyük hız;

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.15)$$

senkron devir sayısıdır. Fakat makine bu hıza hiçbir zaman erişemez, zira bu hızda, döner alan hızı rotor iletkenlerinin hızına eşit olacağından (relatif hız sıfır olur), iletkenlerde gerilim ve akım, dolayısıyla döndürme momenti oluşamaz. Eğer makine bu hıza çıkartılmış olsa bile, dış kuvvet ortadan kalkınca makine  $n_s$  'den daha küçük bir  $n$  devrine düşer. Bu hız ise makineye uygulanan fren momentine bağlıdır.



Şekil 2.5 Rotor çubuklarında moment endüklenmesi

## 2.5. Kayma

Asenkron makinenin çalışma prensibinde bahsedilen rotorun dönme hızı ile döner alanın hızı arasındaki relatif ilişkiye kayma denir. Rotor hızının senkron hıza göre relatif olarak ne kadar değiştiğini belirtir. “s” ile gösterilen kayma, genellikle 0 ile 1 arasındadır. Bu bağıl ifade çoğu kez yüzde olarak verilir. Kayma aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{veya} \quad s = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (2.16)$$

Dikkat edilirse s kayması,  $n_s$  ve  $n$  'nin değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Buradan kaymanın farklı değer aralıklarında, makinenin farklı işletme koşullarında çalışacağı ortaya çıkar.

### 2.5.1. Generatör Çalışma

Döner alanın hızının yönüne ait işaret pozitif ve referans olarak alındığı takdirde, rotorun dönüş hızı,  $n_s$  senkron hızın üzerine çıktığı takdirde, kayma negatif değer alır. Makine  $n_s$  'in üzerine kendi kendine çıkamayacağına göre bir dış tahrik makinesi ile çıkartılmalıdır. Böylece  $n$  devir sayısına bir limit konulamayacağı için kayma,

$$-\infty \leq s \leq 0$$

arasında değişecektir.

Bu şartlar altında makinede endüklenen gerilim şebeke geriliminden büyük olacağı için akım  $180^\circ$  yön değiştirerek şebekeye doğru akacaktır.

### 2.5.2. Motor Çalışma

Bu çalışma durumunda, elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Makinede döner alan ve rotor hızı aynı yöndedirler. Haliyle üretilen gerilim şebeke geriliminden ufaktır. Makine mekanik enerji üretmek ve muhtelif kayıplarını karşılamak için şebekeden bir enerji çekmektedir. Motor çalışma; rotor devir sayısının sıfır olması haline kadar sürer. Haliyle,

$$0 < s < 1$$

olur.

### 2.5.3. Transformatör Çalışma

Kaymanın bire eşit olduğu zamandır. Yani rotor durmaktadır. Statorda meydana gelen alan, aynen trafoda olduğu gibi rotor sargılarında bir gerilim üretir. Ancak rotora uygulanan fren momenti, oluşan döndürme momentinden büyükse rotor dönemez ve trafo gibi çalışır.  $s = 1$  'dir.

#### 2.5.4. Fren Çalışma

Çalışmakta olan bir makinede döner alan yönünün iki fazın yeri değiştirilerek aksedilmesiyle  $n_s \rightarrow -n_s$  olur. Bu durumda bir yönde dönmeye devam eden makinenin aksi yönde dönmeye zorlanması söz konusu olmaktadır. Böylece makineye döndüğü yönün aksinde fren momenti uygulanmış olur. Bu nedenle bu işletmeye fren çalışma denir. Makinenin kayması pozitif olur ve 1 'in üstüne çıkar.

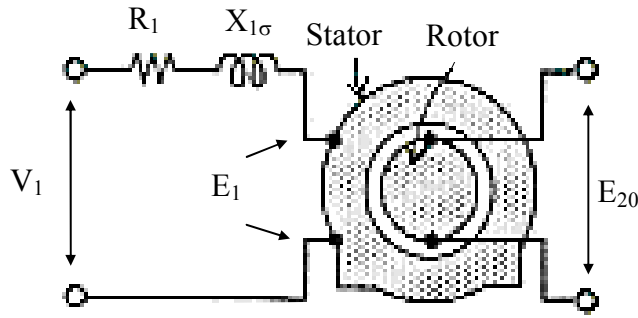
$$s = \frac{-n_s - n}{-n_s} = 1 + \frac{n}{n_s} \quad +1 \leq s < +\infty$$

Aksi yönde döndürülmeye gayret edilen makine süratle yavaşlar ve devir sayısı sıfır ( $n = 0$ ) olur. Bunu müteakiben makine aksettirilen döner alan yönünde dönmeye başlar. Eğer makinenin aksi istikamete dönmesi istenmiyorsa, şebeke anahtarı açılarak makine enerjisiz bırakılır.

### 3. ASENKRON MAKİNANIN EŞDEĞER DEVRESİ

#### 3.1. Asenkron Makinenin Tam Eşdeğer Devresi

Rotoru sargılı makinenin rotor uçlarının açık ve rotorun durduğunu, statora çok fazlı gerilim uygulandığını düşünürsek; statordaki döner alan hava aralığı üzerinden geçip rotor iletkenlerinde gerilim endüktür. Bu endüksiyon trafodaki gibidir. Zira  $\delta$  hava aralığı küçültülüp sıfıra götürülürse yapısal olarak trafo elde edilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Asenkron makinenin trafo benzetimi ( $s = 1$ , rotor durmakta)

Fakat rotorun hareket ettiğini düşünürsek, rotor sargılarında endüklenecek emk ve bunun frekansı devir sayısı ile ters orantılı değişecek ve  $n = n_s$  olduğunda  $E_2$  ve  $f_2 = 0$  olacaktır. Duran halde trafo gerilimleri,

$$E_1 = 4.44 \cdot \phi_m \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{w1} \quad (3.1)$$

$$E_2 = 4.44 \cdot \phi_m \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{w2} \quad (3.2)$$

yazılabilir. Bu ifadelerden gerilim çevirme oranı;

$$\dot{u}_g = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{N_2 \cdot k_{w2}} \quad (3.3)$$

diye tanımlanır. Makine dururken,  $s = 1$  olup, bu durumdaki rotor gerilimi;

$$E_2|_{s=1} = s \cdot E_{20} = E_{20} \text{ olur.} \quad (3.4)$$

$s = 1$  iken  $f_2$  rotor frekansı  $f_1$  'e eşit olacak,  $s = 0$  olduğunda da stator ile rotor arasında fark hız olmadığından  $E_2$  ve  $f_2 = 0$  olacaktır. Bu iki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_2 = s \cdot f_1 \begin{cases} s = 1 \rightarrow f_2 = f_1 \\ s = 0 \rightarrow f_2 = 0 \end{cases}$$

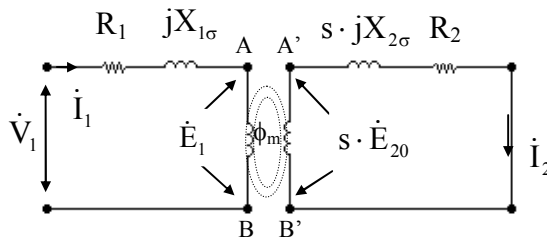
$s \neq 0$  ve  $s \neq 1$  iken rotorda  $f_2$  frekanslı gerilimler endüklenecek ve  $f_2 = s \cdot f_1$  olacaktır. Bunu yukarıdaki emk ifadesine katkılırsak,

$$E_2 = 4.44 \cdot \phi_m \cdot (s \cdot f_1) \cdot k_{w2} = s \cdot E_{20} \quad (3.5)$$

olur. Rotor dururken,  $E_2 = E_{20}$ , hareket halinde ise  $E_2 = s \cdot E_{20}$  olur. Rotor dururken  $X_{2\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{2\sigma}$  idi. Durma durumunda  $X_{2\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{2\sigma}$  olan rotor kaçak reaktansı; hareket halinde değişikliğe uğrayarak;

$$X_{2\sigma} \rightarrow 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_{2\sigma} \text{ olup, } X_{2\sigma} = s \cdot x_{2\sigma} \quad (3.6)$$

şeklini alır. Elde edilen trafo benzeri ifadelerden aşağıdaki trafo modeli kolaylıkla oluşturulabilir:



Şekil 3.2 Eşdeğer devrede indirgeme yapılmadan önceki durum

Böyle bir benzetimden sonra, hesaplarda kolaylık sağlayacak olan, rotoru statoruna elektriksel bağlı eşdeğer devreye adım atmak istiyoruz.

Rotorda endüklenen  $E_2 = s \cdot E_{20}$  emk 'i kaymanın fonksiyonu olduğundan statora indirgenip  $A A'$  ve  $B B'$  birleştirilemez. Bilindiği gibi iki ayrı devrenin birbirine paralel bağlanabilmesi için belirli paralel bağlanma koşullarının sağlanması gerekir: Gerilimler eşit olmalı, frekanslar eşit olmalı, polariteler eşit olmalı, gerilimler arasında faz farkı olmamalıdır. Bu birleşmenin gerçekleştirilebilmesi için rotorda sabit bir gerilim endükleniyor gibi bir gösterime gidilmelidir. II çevresinden,

$$\dot{E}_2 = s \cdot \dot{E}_{20} = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + s \cdot jX_{2\sigma}) \quad (3.7)$$

denklemini  $s$  ile bölünürse;

$$\dot{E}_{20} = \dot{I}_2 \cdot \left( \frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \quad (3.8)$$

sabit bir gerilim elde edilir. Artık bu gerilim statora indirgenebilir. Yani;

$$\dot{E}'_{20} = \dot{I}_2 \cdot \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \quad (3.9)$$

yazılabilir. Ayrıca faz açıları da değişmemiştir. Şöyle ki;

$$\tan^{-1} \left( \frac{s \cdot X_{2\sigma}}{R_2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{X'_{2\sigma}}{R'_2 / s} \right) \quad (3.10)$$

Bütün bu gelişmelerden sonra artık  $A A'$ ,  $B B'$  birleştirilmesi yapılabilir.

$E_1 = E'_{20}$  olmalı yani 3.3 Eşitliğinin kullanılması ile;

$$E'_{20} = \dot{u}_g \cdot E_{20} \quad (3.11)$$

olur. (3.7) ve (3.9) Eşitliklerinden görüleceği üzere, rotoru statora indirgenmiş makinede  $R_2$  yerine  $R'_2 / s$ ,  $s \cdot X_{2\sigma}$  yerine de  $X'_{2\sigma}$  gelecektir. Şimdi rotoru statora indirgenmiş makinedeki, indirgenen diğer parametreleri belirleyelim.

Elektrik makinelerinin temel mmk eşitliği;

$$F_1 \cong F_2 \quad ; \quad m_1 \cdot I_1 \cdot k_{w1} = m_2 \cdot I_{21} \cdot k_{w2} \quad (3.12)$$

olup akımların oranı;

$$\ddot{u}_a = \frac{I_1}{I_2} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{k_{w2}}{k_{w1}} \quad (3.13)$$

İndirgenmiş durumdaki  $I_2'$  akımı yaklaşık olarak  $I_1$  stator akımına eşit olmalıdır:

$$\ddot{u}_a = \frac{I_1}{I_2} \cong \frac{I_2'}{I_2} \quad (3.14)$$

İndirgenmiş durumdaki bakır kayıplarının korunumu;  $m_1 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'$  olup,

$$R_2' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \cdot R_2 \quad (3.15)$$

olur. 3.13 ifadesi 3.15 'de yerine yazılırsa,

$$R_2' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left( \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{w1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{w2}} \right)^2 \cdot R_2 \quad \text{olur ve (3.3) Eşitliği ile kısaltma yapılırsa;}$$

$$R_2' = \frac{m_1}{m_2} \cdot \ddot{u}_g^2 \cdot R_2 \quad (3.16)$$

olur. İndirgenmiş ve indirgenmemiş durumdaki, rotor reaktif güçleri yazılıp benzeri işlemler yapılırsa;

$$X_{2\sigma}' = \frac{m_1}{m_2} \cdot \ddot{u}_g^2 \cdot X_{2\sigma} \quad (3.17)$$

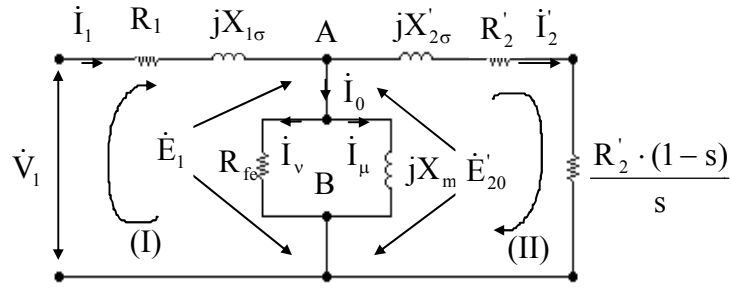
$\frac{R_2'}{s}$  kaymaya bağımlı direnç içerisindeki bakır kaybını ayırmak için

$$\frac{R_2'}{s} \text{ 'den } R_2' \text{ çıkartılırsa } \frac{R_2'}{s} - R_2' = \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \text{ olur. Yani;}$$

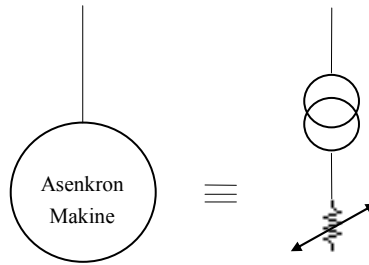
$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \quad (3.18)$$

eşdeğeri, artık eşdeğer devrede yerine konulabilir. Transformatörde olduğu gibi, demir ve alternatif akının yan yana olduğu bir yerde demir kaybı da olacağından bunu ifade etmek için mıknatıslama reaktansına paralel olarak  $R_{fe}$  çizilirse tam

eşdeğer devre (T tipi) elde edilmiş olur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Asenkron makinenin tam (T tipi) eşdeğer devresi



Şekil 3.4 Asenkron makinenin bir trafo ve kaymaya bağımlı bir yük direnci ile temsili

Böylelikle asenkron makine bir trafo ve bir kaymaya bağımlı direnç olarak gösterilmiş olur (Şekil 3.4).

Şekil 3.3 'deki devre için; (I), (II) çevreleri - A, ve B düğümlerine ilişkin Kirchhoff gerilim ve akım denklemleri yazılırsa;

$$(I) \text{ çevresinden} \quad \dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) \quad (3.19)$$

$$(II) \text{ çevresinden} \quad \dot{E}'_{20} = \dot{I}'_2 \cdot ((R'_2 / s) + jX'_{2\sigma}) \quad (3.20)$$

$$(A) \text{ düğümünden} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \text{ ve} \quad (3.21)$$

$$(B) \text{ düğümünden ise} \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_\gamma + \dot{I}_\mu \text{ olur.} \quad (3.22)$$

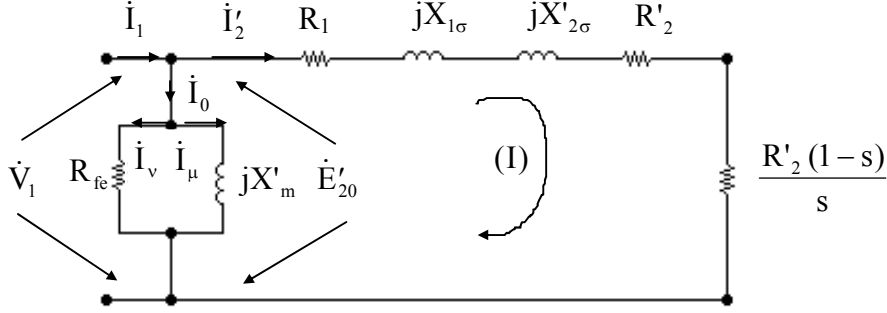
### 3.2. Asenkron Makinenin Yaklaşık Eşdeğer Devresi

Yukarıdaki eşitliklerde akımları bulmak için 3 bilinmeyenli 3 denklemin çözülmesi gerekir. Bunun yerine yaklaşık eşdeğer devre ile akımlar kolayca bulunur. Bunun için mıknatıslama reaktansı ve demir direnci terminale taşınırsa (Şekil 3.5), (I) çevresinden;



$$I_1 \cong I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (3.23)$$

elde edilir.



Şekil 3.5 Asenkron makinenin yaklaşık (L tipi) eşdeğer devresi

Hesapları kolaylaştıran bu devreye L eşdeğer devresi ya da yaklaşık eşdeğer devre denir (Şekil 3.5).

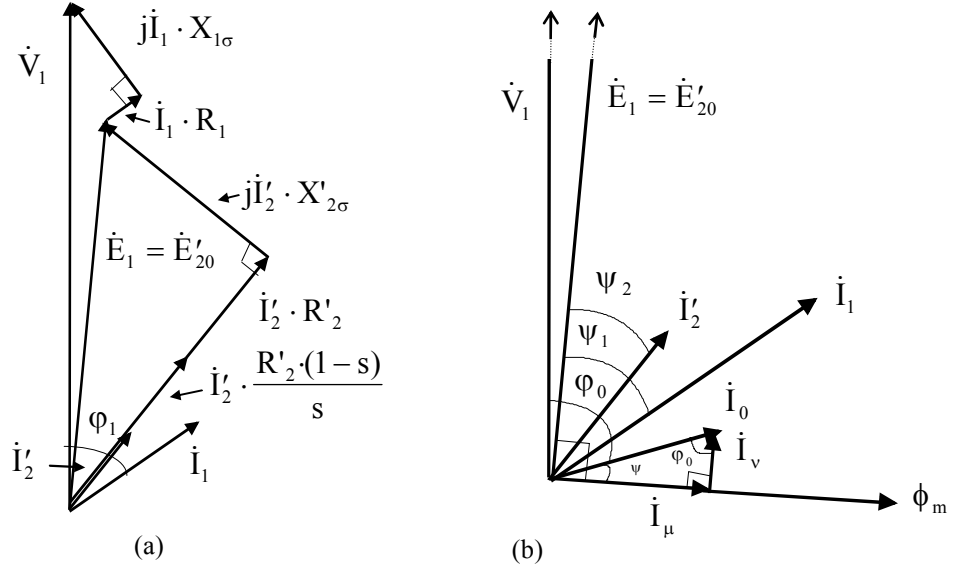
### 3.3. Asenkron Makinenin Fazör Diyagramı

Fazör diyagramlarını çizmek için 3.19 ve 3.20 ifadelerini ele alalım:

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - j\dot{I}_1 \cdot X_{1\sigma} - \dot{I}_1 \cdot R_1, \quad 0 = \dot{E}_{20}' - j\dot{I}_2' \cdot X_{2\sigma}' - \dot{I}_2' \cdot R_2' - \dot{I}_2' \cdot \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \quad \text{ve}$$

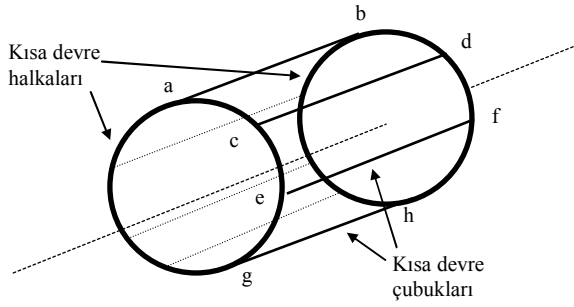
$$\dot{E}_1 = \dot{E}_{20}', \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2', \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_v + \dot{I}_\mu$$

ifadelerini kullanılıp  $\dot{V}_1$  referans alınarak ( $|\dot{V}_1| \angle 0^\circ$ ), Şekil 3.6'daki fazör diyagram elde edilir. Burada  $j$  operatörünün çarpıldığı elemanın fazını  $90^\circ$  ilerlettiği unutulmamalıdır ( $90^\circ \angle j \cdot I ; I$ ).



Şekil 3.6 Asenkron makinenin T tipi eşdeğer devresine ait fazör diyagram

### 3.4. Sincap Kafesli Rotora Ait Parametrelerin İndirgenmesi

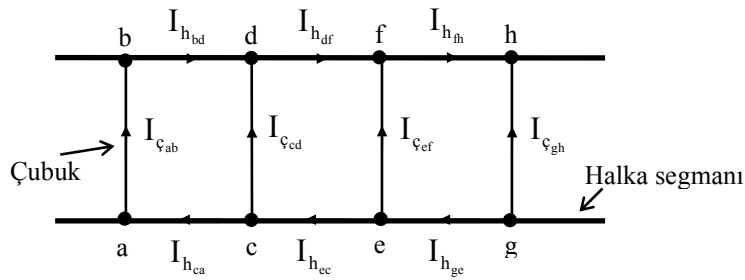


Şekil 3.7 Sincap kafesli rotorun iletken aksamı

$I_{\phi}$  = çubuk akımı

$I_h$  = halka segmenti akımı

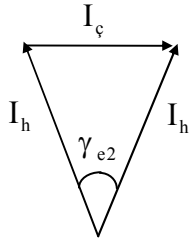
Aksiyel yöndeki çubuklar, İki kısa devre halkası ile birleştirilip sincap kafes oluşturulmuştur. Bu konstrüksiyonda rotörü çevresel olarak kesip açarsak;



Şekil 3.8 Sincap kafesteki çubuk ve halkaların çevresel açılmış hali

Şekil 3.7 ve 3.8’de görüldüğü gibi, kısa devre halka segmanları ve çubuklar olmak üzere karşımıza iki kısım çıkar.

Rotor üzerindeki çubukların hava aralığındaki konumları farklı olduğu için çubuklarda endüklenen gerilimler farklıdır. Yani kaç tane çubuk varsa; o kadar faz vardır ( $m_2 = Q_2 = N_2$ ). Sincap kafesli makine statoru üç fazlı (çoğunlukla) rotoru - daha- çok fazlı ( $m_2$ ) bir makinedir.



Şekil 3.9 Halka ve çubuk akımları arasındaki ilişki

Çubuk sayısı  $Q_2$ , rotor faz sayısı  $m_2$  ‘ye eşittir.

Halka akımı  $I_h$ , çubuk akımı  $I_ç$  'den oldukça büyük olup; kutup başına düşen oluk (ya da çubuk) sayısı ne kadar büyük olursa, bu fark da o kadar büyür.

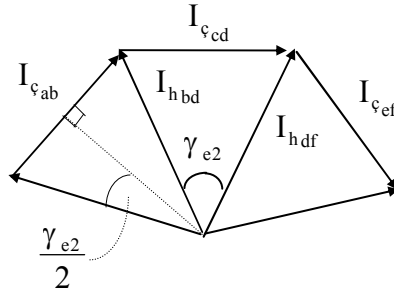
Çubuklar arasındaki açığı  $\gamma_{e2}$  ile gösterelim (Şekil 3.9). Kısa devre kafesinin simetrik olması nedeniyle çubuklardan akan akım genlik itibarıyla birbirine eşit, fakat  $\gamma_{e2}$  kadar faz farklıdır. Aynı durum çubuklar arasında akan halka akımlarında da vardır.

Şekil 3.9'dan görüleceği üzere çubuk akımı iki komşu halka segmanı akımı arasındaki farka eşittir.

$Q_2$  oluklu (çubuklu) kısa devre sargısı, doğal olarak  $m_2$  fazlı olacağından,  $p$  çift kutuplu makinede  $\gamma_{e2}$  ;

$$m_2 = Q_2 \Rightarrow \gamma_{e2} = \frac{2\pi}{Q_2} \cdot p \text{ 'dir.} \quad (3.25)$$

faz farklarına göre akımlar çizilirse;



Şekil 3.10 Halka akımları ile çubuk akımları arasındaki ilişki

$$I_{\phi ab} = 2 \cdot I_{hbd} \cdot \sin \frac{\gamma_{e2}}{2}, \quad I_{\phi} = 2 \cdot I_h \cdot \sin \left( \frac{\pi}{Q_2} p \right) \text{ olup,}$$

$$\frac{I_h}{I_{\phi}} = \frac{1}{2 \sin \left( \frac{\gamma_{e2}}{2} \right)} \text{ olur.} \quad (3.26)$$

Sincap kafeste çubuk başına iki adet halka segmanı düşmektedir. Dolayısıyla rotor direncini bulmak, ya da çubuk-halka-segmanı kombinasyonunu yapmak için (halka segmanlarından ve çubuklardan akan akımlar aynı fazda olmadığı, kesitler de farklı olduğu), halka direncini çubuk direncine indirgememiz gerekir. Eşdeğer rotor faz direnci ;

$$R_2 = R_{\phi} + 2 \cdot R'_h \quad (3.27)$$

olacaktır. İndirgeme için (rotoru sargılı makinede olduğu gibi) bakır kayıplarının korunumundan gidilirse;

$$I_h^2 \cdot R_h = I_{\phi}^2 \cdot R'_h \Rightarrow R'_h = \left( \frac{I_h}{I_{\phi}} \right)^2 \cdot R_h \quad (3.28)$$

3.26 ifadesi 3.27'de  $\left( \frac{I_h}{I_{\phi}} \right)$  yerine yazılırsa ;

$$R'_h = \frac{1}{4 \cdot \sin^2 \left( \frac{\gamma_{e2}}{2} \right)} \cdot R_h \quad (3.27)$$

$$R_2 = R_{\phi} + 2 \cdot R'_h \Rightarrow R_2 = R_{\phi} + 2 \cdot \frac{R_h}{4 \cdot \sin^2 \left( \frac{\gamma_{e2}}{2} \right)} \quad \text{ya da } \ddot{u}_{h\phi} = \frac{1}{2 \cdot \sin \left( \frac{\gamma_{e2}}{2} \right)}$$

olarak tanımlanırsa; (3.28)

$$R_2 = R_{\phi} + 2 \cdot \ddot{u}_{h\phi}^2 \cdot R_h \quad R_2 = R_{\phi} + \frac{R_h}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{\gamma_{e_2}}{2}\right)} \quad (3.29.a,b)$$

Rotor direnci bulunmuş oldu. Fakat bunu eşdeğer devreye yazmak için statora indirgemek gerekir. Şimdi bu direnci statora indirgeyelim.

Rotoru sargılı makinede kullanılan (3.16) ifadesi ile  $m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'$  (rotordaki toplam bakır kaybının korunumu) ifadesinin kullanımı için  $I_{\phi} = I_2$  olacaktır.

$$R_2' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 \cdot R_2 \quad \text{çıkarak} \quad \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{N_2 \cdot k_{w2}} \quad \text{idi.}$$

$$R_2' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2^2} \cdot \frac{N_1^2 \cdot k_{w1}^2}{N_2^2 \cdot k_{w2}^2}\right)^2 \cdot R_2 = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{w1}}{N_2 \cdot k_{w2}}\right)^2 \cdot R_2 \quad (3.30)$$

$m_2 \Rightarrow Q_2$  sincap kafesli makinede (çubuk sayısı = rotor oluk sayısı) olup,

$$N_2 = 1 / 2 \text{ Sarım} \quad (3.31)$$

(Bir sarım iki iletken oluşmaktaydı. Dolayısıyla, 1 çubuk 1/2 sarımdır) olur.

Herhangi bir çubuk bir fazı temsil ettiği ve tek parça olan bir çubuğun dağıtılması veya kırılganlığı söz konusu olmadığından;

$$k_{w2} = k_{p2} \cdot k_{d2} = 1 \cdot 1 = 1 \quad (3.32)$$

3.31 ve 3.32 ifadeleri, 3.30 ifadesinde yerine yazılırsa;

$$R_2' = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{w1}}{(1/2) \cdot 1}\right)^2 \cdot R_2 = 4 \cdot \frac{m_1}{Q_2} \cdot (N_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot R_2$$

Burada ;

$$\ddot{u}_s = \frac{4 \cdot m_1}{Q_2} \cdot (N_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \text{ye} \quad (3.33)$$

sincap kafes çevirme oranı denir. İndirgenmiş rotor direnci;

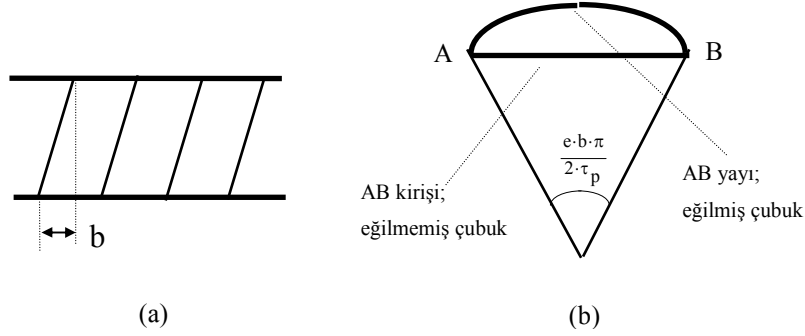
$$R'_2 = \ddot{u}_s \cdot R_2 \quad (3.34.a)$$

$$R_2 = R_\phi + 2 \cdot \ddot{u}_{h\phi}^2 \cdot R_h \text{ idi.}$$

$$R'_2 = \ddot{u}_s \cdot (R_\phi + 2 \cdot R_h \cdot \ddot{u}_{h\phi}^2) \quad (3.34.b)$$

olur.

Sincap kafes sargısında  $k_{w2} = 1$  olduğundan, rotorda endüklenecek -titreşime neden olan- harmonik gerilimleri yok etmek için yapılacak çözüm, çubukları eğik yapmaktır. Bu da rotora yeni bir faktör getirir;  $k_{eğik}$  (eğiklik faktörü).



Şekil 3.11 a) Eğik kafes sargıları, b) Eğik ve eğik olmayan sargı arasındaki ilişki

Eğiklik faktörü Şekil 3.11'den;

$$k_{eğik} = \frac{AB \text{ kirişi}}{AB \text{ yayı}} \text{ olup, } e \text{. rotor uzay harmoniği için;}$$

$$k_{eğik_e} = \frac{\sin(e \cdot b \cdot \pi)}{\frac{e \cdot b \cdot \pi}{2 \cdot \tau_p}} \quad (3.35)$$

olarak elde edilir ve 3.30 'daki sincap kafes çevirme oranı aşağıdaki hali alır:

$$\ddot{u}_s = \frac{4 \cdot m_1}{Q_2} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{k_{eğik}} \right)^2 \text{ olur.} \quad (3.36)$$

Reaktanslarda; dirençlerin benzeri şekilde;

$$X_{2\sigma} = X_{\sigma} + 2 \cdot X'_{h\sigma} = X_{\sigma} + 2 \cdot \ddot{u}_{h\sigma}^2 \cdot X_{h\sigma} \quad (3.37)$$

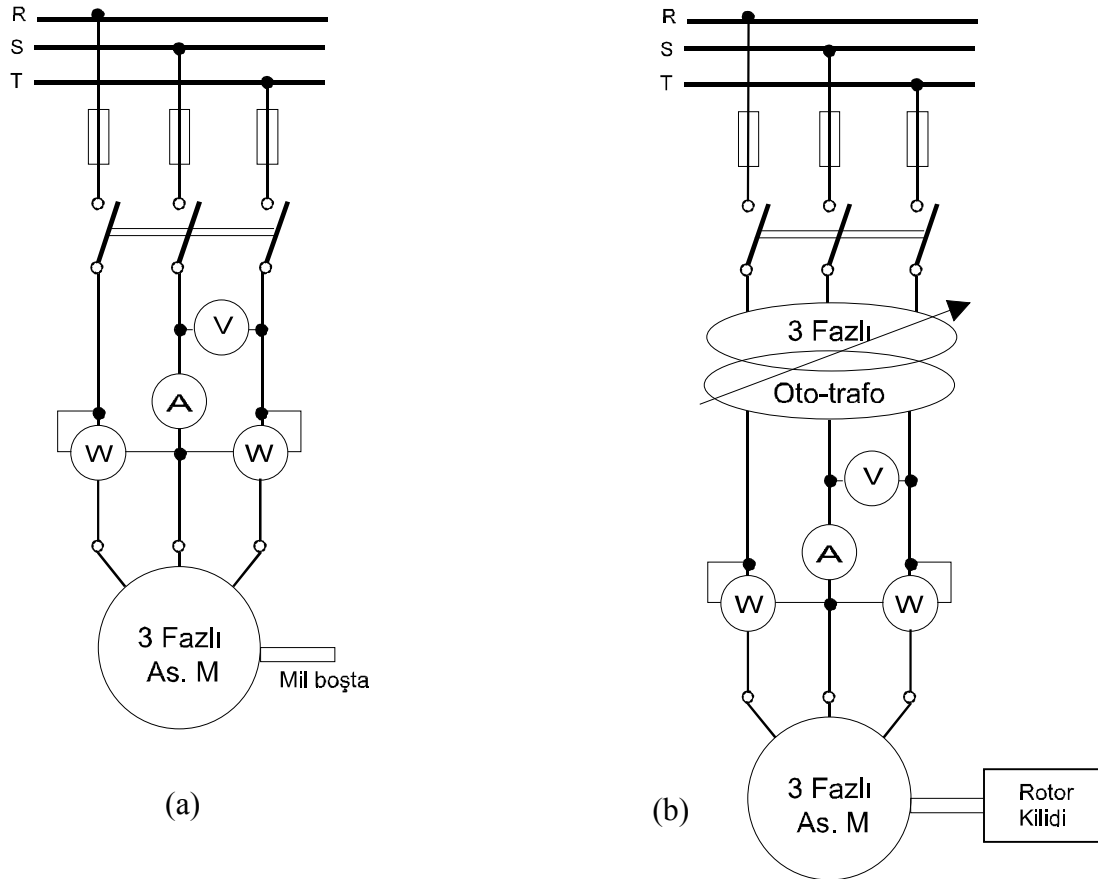
$$X'_{2\sigma} = \ddot{u}_S \cdot X_{2\sigma} \quad \text{ve} \quad (3.38)$$

$$X'_{2\sigma} = \ddot{u}_S \cdot (X_{\sigma} + 2 \cdot X_{h\sigma} \cdot \ddot{u}_{h\sigma}^2) \quad (3.39)$$

olarak elde edilir.

### 3.5. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

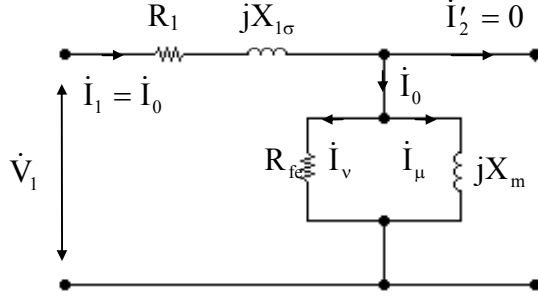
Eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için aşağıdaki bağlama şeması kullanılır.



Şekil 3.12 Asenkron motorun a) Boşta çalışma, b) Kısa devre / kilitli rotor deneyi için bağlama şeması

### 3.5.1. Boşta Çalışma Deneyi $\{P_m = 0, V_1 = V_{1n}\}$

$n \cong n_s$  olacağından  $s \cong 0$  alınabilir. Dolayısı ile  $\frac{R'_2}{s}$  çok büyük olduğu için  $I'_2 \cong 0$  alınır. T tipi eşdeğer devre Şekil 13'teki gibi basitleşir.



Şekil 3.13 Asenkron makinenin boşta çalışmada eşdeğer devresi

T tipi eşdeğer devrede  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1$  olur.  $\dot{Z}_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$ ,  $\dot{Z}_m = \frac{R_{fe} \cdot jX_m}{R_{fe} + jX_m}$  olarak tanımlanırsa;  $\dot{I}_0 \cong \dot{I}_{10} \cong \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_m}$  olur.

$m_1$  faz için boşta çalışmada çekilen güç bir faz için olan değer  $m_1$  katı olacaktır:

$P_0 = m_1 \cdot (I_0^2 \cdot R_1 + I_v^2 \cdot R_{fe})$  yani  $P_0 = P_{cu10} + P_{fe}$  olur.  $I_0$  akımı küçük olduğundan  $P_{cu10}$  ve  $Q_{10}$  ihmal edilebilir. Böylelikle;

$$P_0 \cong P_{fe}, \quad Q_0 \cong Q_m \quad (3.40)$$

yazılabilir.

$$P_0 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0, \quad Q_0 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \sin \varphi_0 \quad (3.41)$$

veya 3 fazlı sistemde hat parametreleri cinsinden;

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_{1L} \cdot I_{10L} \cdot \cos \varphi_0, \quad Q_0 = \sqrt{3} \cdot V_{1L} \cdot I_{10L} \cdot \sin \varphi_0 \quad (3.42)$$

olup, burada  $\varphi_0 = \angle V_1; I_{10}$  'dir.

Özetlenecek olursa; boşta çalışma deneyinde Şekil 3.12.a'daki bağlantı yapılır ve  $V_1$ ,  $P_0$ ,  $I_{10}$  ölçülüp,  $R_{fe}$  ve  $X_m$  aşağıdaki 3.42 - 3.47 bağıntıları ile hesaplanır:

$$\varphi_0 = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{P_0}{m_1}}{V_1 \cdot I_{10}} \right) \quad (3.43)$$



$$I_v = I_{10} \cdot \cos \varphi_0 \quad I_\mu = I_{10} \cdot \sin \varphi_0 \quad (3.44), (3.45)$$

$$R_{fe} = \frac{V_1}{I_v}, \quad X_m = \frac{V_1}{I_\mu} \quad (3.46), (3.47)$$

3.46 - 3.47'de  $E_1 \cong V_1$  alınmıştır; bu 3.40 ifadesindeki kabule dayanmaktadır.

Diğer bir yolda aşağıdaki gibidir:

$$R_{fe} = \frac{V_1^2}{\frac{P_0}{m_1}}, \quad X_m = \frac{V_1^2}{\frac{Q_0}{m_1}}, \quad (3.48), (3.49)$$

### 3.5.2. Kısa Devre / Kilitli Rotor Deneyi $\left\{ n = 0, \quad V_{1k} = V_1 \Big|_{I_{1k}=I_{1n}} \right\}$

Bu çalışma durumunda;  $n = 0$ ,  $s = 1$  ve dolayısı ile  $R'_2 \cdot \frac{(1-s)}{s} = 0$  olduğundan makine şebeke tarafından bakıldığında minimum empedansa sahip olur. Bu nedenle makineye nominal gerilimi uygulanmaz, aksi halde nominal akımın çok üstünde bir değerde akım çekilir ve makine kısa sürede zarar görür. Bu nedenle makinenin nominal akım çekmesini temin etmek için, oto - trafo üzerinden  $V_{1k} < V_{1n}$  gerilimi uygulanır (Şekil 3.12.b).

$$V_1 \Big|_{\substack{s=1 \\ I_1=I_{1n}}} = V_{1k} \text{ olup, } V_{1k} \cong \%(10-20) \cdot V_{1n} \quad (3.50)$$

mertebelerindedir. Bu küçük  $V_{1k}$  geriliminde  $m_1 \cdot \frac{V_{1k}^2}{R_{fe}}$ ; demir kayıpları,  $m_1 \cdot \frac{V_{1k}^2}{X_m}$ ; mıknatıslama reaktif gücü nominal gerilim uygulandığı duruma göre oldukça küçük olacağından, T eşdeğer devresindeki  $Z_m$  mıknatıslama kolu empedansı diğer elemanlara göre az akım çektiğinden ihmal edilirse yaklaşık eşdeğer devre (Şekil 3.5) daha da basitleşir. Bu durumda  $V_{1k}$  geriliminde bir faz sargısından geçen akım;

$$I_{1k} = I_{1n} = \frac{V_{1k}}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} \quad (3.51)$$

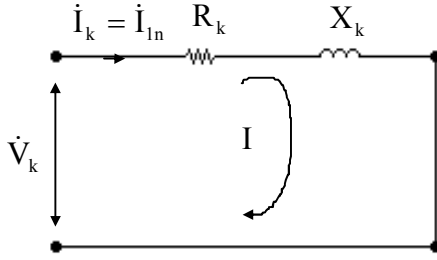
$\angle V_{1k}; I_{1k} = \varphi_k$  olmak üzere,  $m_1$  faz için kayıp güç;

$$P_k = m_1 \cdot V_{1k} \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi_k, \quad P_k = m_1 \cdot (I_{1k}^2 \cdot R_1 + I_{1k}^2 \cdot R'_2), \quad P_k = P_{cu_{1n}} + P_{cu_{2n}}$$

olacaktır.

$$R_k = R_1 + R'_2, \quad X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \quad (3.52), (3.53)$$

tanımlamaları yapıp,  $R'_2 \cdot \frac{(1-s)}{s} \rightarrow 0$  olduğu da göz önüne alınırsa; eşdeğer devre aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Asenkron makinenin kısa devre çalışmada eşdeğer devresi

Bu çalışma durumu  $X_k$  ve  $R_k$  'nın elde edilmesi için teşkil edilir (Şekil 12.b). Rotor kilitlenilip,  $I_{1k}$  akımı  $I_{1n}$  olacak şekilde,  $V_1$  gerilimi sıfırdan başlanılarak  $V_k$  değerine getirilir ve  $P_k$ ,  $V_{1k}$  ve  $I_{1k}$  değerleri kaydedilip  $X_k$  ile  $R_k$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır. Şekil 14'ten;

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \quad Z_k = \frac{V_k}{I_k}, \quad \varphi_k = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{P_k}{m_1}}{V_{1k} \cdot I_{1k}} \right) \quad (3.54), (3.55)$$

$$(3.56)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k, \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k \quad (3.57), (3.58)$$

Diğer bir yol ise;

$$R_k = \frac{\frac{P_k}{m_1}}{V_{1r}^2}, \quad R_{fe} = \frac{\frac{P_0}{m_1}}{V_{1x}^2}, \quad V_{1k} = \sqrt{V_{1r}^2 + V_{1x}^2}, \quad (3.59), (3.60), (3.61)$$

$$V_{1r} = V_{1k} \cdot \cos \varphi; \text{ kısa devre direncinde düşen gerilim,} \quad (3.62)$$

$$V_{1x} = V_{1k} \cdot \sin \varphi; \text{ kısa devre reaktansında düşen gerilimdir.} \quad (3.63)$$

### 3.6. Asenkron Makinenin Güç Dengesi

Güçleri bulmak için Şekil 3.3'teki tam eşdeğer devreden yazılmış olan 3.19 - 3.22'nci ifadeleri ilgili akımlar ile çarpalım;

$$(i) \quad \dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) \quad * \dot{I}_1 \rightarrow \dot{I}_1 \cdot \dot{V}_1 = \dot{I}_1 \cdot \dot{E}_1 + \dot{I}_1^2 \cdot R_1 + \dot{I}_1^2 \cdot jX_{1\sigma} \quad (3.64)$$

$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$  ifadesi (3.22) ; (3.64)'de yerine yazılır ve  $m_1$  fazlı güçleri bulmak için  $m_1$  ile çarpılırsa;

$$m_1 \cdot \dot{I}_1 \cdot \dot{V}_1 = m_1 \cdot \dot{I}_1^2 \cdot R_1 + m_1 \cdot \dot{I}_1^2 \cdot jX_{1\sigma} + m_1 \cdot \dot{I}_0 \cdot \dot{E}_1 + m_1 \cdot \dot{I}'_2 \cdot \dot{E}_1 \quad (3.65)$$

elde edilir. Aktif güçleri bulmak için her iki tarafın reel kısımlarını alırsak,

$$P_1 = P_{cu1} + P_{fe} + P_i \quad (3.66)$$

elde edilir. Burada;  $P_1$  ; makinenin giriş gücü,  $P_{cu1}$  ; stator sargılarındaki toplam bakır kaybı,  $P_{fe}$  ; Statordaki toplam demir kaybı,  $P_i$  ; Statordan rotora intikal eden toplam iç güç yada hava aralığı gücüdür.

Aslında  $P_{fe} = P_{fe1} + P_{fe2}$  şeklinde ifade edilebilirse de rotordaki demir kayıpları, gerek rotor frekansının ve gerekse rotor geriliminin çok küçük olmasından dolayı, ihmal edilebilir ( $P_{fe2} \cong 0$ ). Dolayısı ile  $P_{fe} \cong P_{fe1}$  alınacaktır.

(3.65) ifadesinin imajiner kısımları alınır;

$$Q_1 = Q_{1\sigma} + Q_m + Q_{2\sigma} \quad (3.67)$$

elde edilir. Burada  $Q_1$  ; Girişten çekilen toplam reaktif güç,  $Q_{1\sigma}$  ; Stator sargıları kaçak reaktanslarının harcadığı reaktif güç,  $Q_m$  ; Statordan çekilen toplam mıknatıslama reaktif gücü,  $Q_{2\sigma}$  ; Rotor kaçak reaktanslarının harcadığı reaktif güçtür.

$$(ii) \quad \dot{E}'_{20} = \dot{I}'_2 \cdot \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \text{ ifadesi } m_1 \cdot \dot{I}'_2 \text{ ile çarpılırsa;}$$

$$m_1 \cdot \dot{I}'_2 \cdot \dot{E}'_{20} = m_1 \cdot \dot{I}'_2{}^2 \cdot R'_2 + m_1 \cdot \dot{I}'_2{}^2 \cdot \frac{R'_2(1-s)}{s} + m_1 \cdot \dot{I}'_2{}^2 \cdot jX'_{2\sigma} \quad (3.68)$$

elde edilir. (3.68) ifadesinin reel kısımları alınır;

$$P_i = P_{cu2} + P_{mi} \quad (3.69)$$

olur. Burada  $P_{cu2}$  ; Rotor sargılarındaki toplam bakır kaybı,  $P_{mi}$  ; Rotorda endüklenen toplam mekanik mil gücüdür.

Rotorun mekanik ortamında yataklarda sürtünme ve sargıların cebren fan ile soğutulması için vantilasyon kayıpları da mevcuttur. Bunlar;

$$P_{mi} = P_{st+v} + P_2 \quad (3.70)$$

olarak ifade edilebilir. Bunlar;

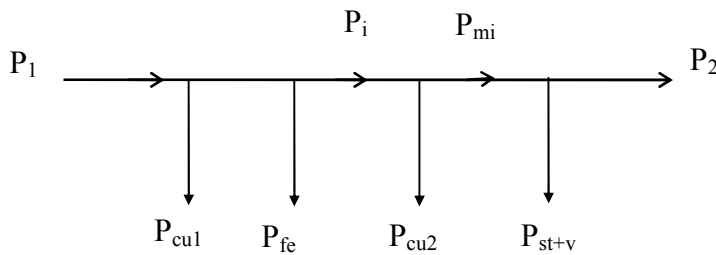
$P_{st+v}$  ; Rotordaki sürtünme ve vantilasyon kayıplarının toplamı,

$P_2$  ; Makineden çıkan net mil gücüdür.

(3.66), (3.69) ve (3.70) ifadeleri birleştirilirse;

$$P_i = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_{st+v} + P_2 \quad (3.71)$$

makinenin bileşke güç dengesi elde edilmiş olur. Bu bir diyagram üzerinde gösterilecek olursa;



Şekil 3.15 Asenkron makinenin güç dengesi.

Şekil 3.15 elde edilir.

$P_i$  iç güç (döner alan gücü ya da hava aralığı gücü);

$$P_i = m_1 \cdot E'_{20} \cdot I'_2 \cos \varphi_2, \quad \varphi_2 < \angle E'_{20}; I'_2 \text{ 'dir.} \quad (3.72)$$

Hava aralığı gücünden sonra makinenin  $m_1$  fazı için (toplam) güçleri özetlersek:

$$P_{fe} = m_1 \cdot \frac{E_1^2}{r_{fe}} = P_0 - P_{cu10} = m_1 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0 - m_1 \cdot I_{10}^2 \cdot R_1 \cong m_1 \cdot \frac{V_1^2}{R_{fe}}$$

$$P_{mi} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s}, \quad P_{cu1} = m_1 \cdot I_1'^2 \cdot R_1, \quad P_{cu2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2',$$

$P_1 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ ,  $P_2 = P_{mi} - P_{st+v}$  çoğu kez  $P_{st+v} \cong 0$  olarak kabul edilip,  $P_2 = P_{mi}$  yazılır. Bu kabul ile yaklaşık mekanik mil çıkış gücü;

$$P_2 \cong m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \quad (3.73)$$

olur. Bu güç ilişkilerinden sonra verim;

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.74)$$

olarak verilir.

Kayma ile rotor bakır kayıpları arasındaki ilişkiyi araştırmak için  $P_i = f(P_{cu2})$  'yi yazalım;

$\psi_2 \angle E_{20}' ; I_2'$  olmak üzere;

$$P_i = m_1 \cdot E_{20}' \cdot I_2' \cdot \cos \psi_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} = \frac{P_{cu2}}{s}, \quad P_{cu2} = s \cdot P_i \quad (3.75), (3.76)$$

olduğu görülür. Bu ifade kayma arttıkça rotor bakır kayıplarının artacağını, dolayısı ile rotorun ısınacağını göstermektedir. Bu yüzden asenkron makinelerin büyük kaymalarda çalıştırılması tercih edilmez. Nominal kayma genellikle % 3-5 mertebelerindedir.

(3.70)'te  $P_i = P_{cu2} + P_{mi}$  idi. Bu ifade (3.76)'da yazılırsa;

$$P_{mi} = (1-s) \cdot P_i \quad (3.77)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede kaymanın sıfıra yakın olduğu durumlarda hava aralığı gücünün tamamının mile aktarıldığını, aksi halde (büyük kaymalarda) endüklenen mil gücü azaldığı görülmektedir.

#### 4. DÖNDÜRME MOMENTİ

Mekanik dünyada  $M = P/\omega$  'dır. Bu ilişkiyi asenkron makineye uyarlırsak;

$$M = \frac{P_2}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} \quad (4.1)$$

olur.  $P_{st+v} \cong 0$  kabul edilerek,  $P_2$  'yi yaklaşık olarak;

$$P_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \frac{(1-s)}{s}$$

alınmıştı (3.73). Şimdi yaklaşık eşdeğer devreden  $I_2'$  'yü elde edip  $P_2$  'de yerine koyalım:

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \text{ yazılırsa, } I_2'^2 = \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}$$

Bu ifadeyi yukarıdaki  $P_2$  'de yerine yazarsak,

$$P_2 = m_1 \cdot \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (4.2)$$

olur. Bu ifade (4.1)'de yerine yazılırsa;

$$M = \frac{m_1 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \frac{R_2' \cdot (1-s)}{s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (4.3)$$

olur.  $n$  yerine dönüşümler yaparak  $s = \frac{n_s - n}{n_s}$   $n = (1-s) \cdot n_s$  ve  $n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$  'den

$n = (1-s) \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p}$  ifadesi elde edilir. Bu ifade (4.3)'te yazılırsa;

$$M = \frac{m_1 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (1-s) \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p}} \cdot \frac{R'_2 \cdot (1-s)}{s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}$$

elde edilir. Sadeleştirmelerden sonra moment ifadesi;

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot (R'_2/s) \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]} \quad (4.4)$$

elde edilmiş olur. Hesaplarımızda çoğunlukla bu ifadeyi kullanacağız.

T tipi eşdeğerdevre kullanılırsa Şekil 3.3'ten,

$$I'_2 = \frac{E'_{20}}{\sqrt{(R'_2/s)^2 + X_{2\sigma}'^2}} \cdot I_2'^2, \quad I_2'^2 = \frac{E_{20}'^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}'^2}$$

yazılabilir ve endüklenen mekanik güç ( $P_{st+v} \cong 0$  alınıp);

$$P_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R'_2 \cdot (1-s)}{s} \quad \text{ve} \quad M = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}} \text{ 'den benzer bir şekilde,}$$

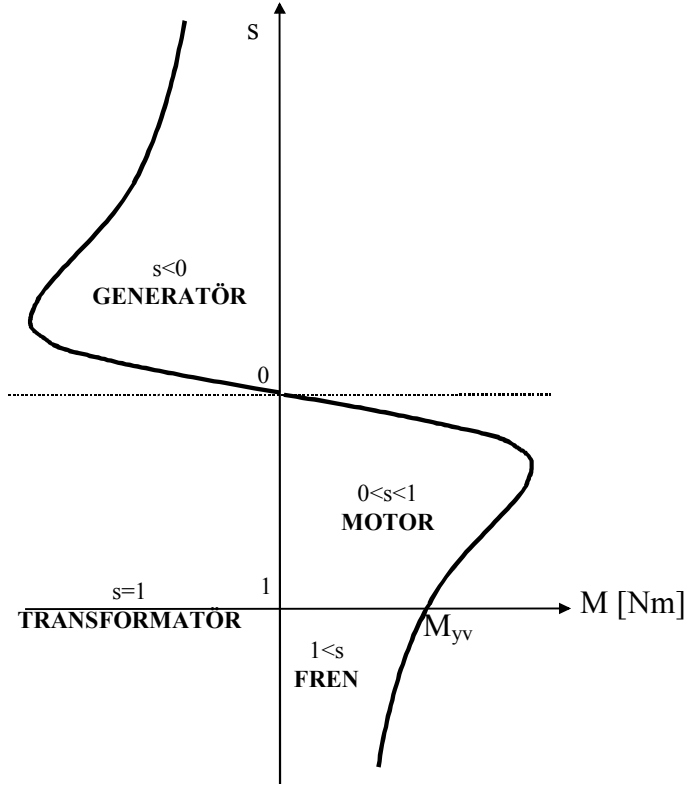
$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot (R'_2/s) \cdot E_{20}'^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_{2\sigma})^2 \right]} \quad (4.5)$$

olur.

#### 4.1. Asenkron Makinenin Dış Karakteristiği

Yukarıda elde edilen (4.4) v3 (4.5) bağıntılardan, momentin gerilimin karesi ile değiştiği ve kaymaya nonlinear olarak bağlı olduğu görülür. Bu ilişkiler  $M = f(s)$

olarak çizilirse Şekil 4.1'deki asenkron makinenin dış karakteristiği elde edilir. Makine farklı kayma aralıklarında farklı işletme durumlarında bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Tipik bir asenkron makine dış karakteristiği

#### 4.2. Kalkış / Yol Verme Momenti

$M_{yv} = M|_{s=1}$  motor duruyorken ( $n = 0$ ) motor milindeki momenttir (Şekil 4.1). L tipi eşdeğer devre kullanılırsa, (4.4) ifadesinde  $s=1$  koyarak;

$$M_{yv} = \frac{m_1 \cdot p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ (R_1 + R'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]} \quad (4.6)$$

$R_1 + R'_2 = R_k$  (kısa devre direnci) ve  $X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = X_k$  (kısa devre reaktansı) olarak tanımlanırsa;

$$M_{yv} = \frac{m_1 \cdot p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [R_k^2 + X_k^2]} \quad (4.7)$$

aynı şekilde T tipi eşdeğer devre için elde edilen (4.5) ifadesinde  $s = 1$  konursa



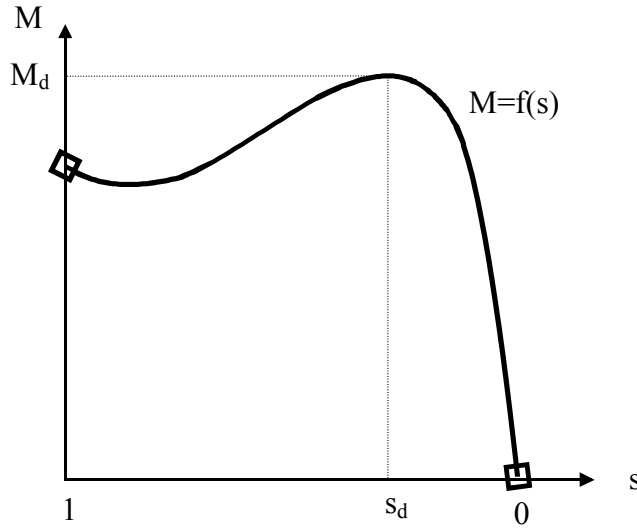
yolverme momenti;

$$M_{yv} = \frac{m_1 \cdot p \cdot R'_2 \cdot E_{20}'^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [R_2'^2 + X_{2\sigma}'^2]} \quad (4.8)$$

olarak elde edilir.

### 4.3. DEVRİLME KAYMASI ve DEVRİLME MOMENTİ

Dış karakteristiği bildiğimiz ekstramum noktası bulma problemine dönüşecek şekilde ele alalım (Şekil 4.2):



Şekil 4.2 Dış karakteristik üzerinde devrilme noktaları

$M_d = M_{\max}$  yani ekstramumdur.  $\frac{dM}{ds} = 0$  denklemi çözülürse bu noktaya ilişkin  $s$  değeri  $s_d$  'yi verecek ve  $M|_{s=s_d} = M_d$  olacaktır. Bu yaklaşımı T tipinde uygularsak; gerilimi sabit kabul edersek,

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot E_{20}'^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{R'_2/s}{[(R'_2/s)^2 + X_{2\sigma}'^2]} = k \cdot \frac{R'_2/s}{[(R'_2/s)^2 + X_{2\sigma}'^2]}$$

yazılabilir. Bu kısaltmada  $k = \frac{m_1 \cdot p \cdot E_{20}'^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1}$  olup sabittir. Ekstramum noktası için türev alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{dM}{ds} = k \cdot \frac{d}{ds} \left\{ \frac{r'_2}{\frac{R'^2_2}{s} + s \cdot X'^2_{2\sigma}} \right\} \quad \frac{dM}{ds} = -k \cdot \left( \frac{-R'^2_2/s^2 + X'^2_{2\sigma}}{(\quad)^2} \right) = 0$$

ve,  $\frac{s^2}{R'_2 \cdot k}$  uygulanırsa,

$$R'^2_2 - s^2 \cdot X'^2_{2\sigma} = 0$$

$$s \rightarrow s_d = \pm \frac{R'_2}{X'_{2\sigma}} \quad (4.9)$$

olur.  $M_d = M|_{s=s_d}$  olacağından  $s_d$  (4.8)'de yerine konursa;

$$M_d = \frac{m_1 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \left( \frac{X'_{2\sigma}}{R'_2} \right) \cdot \frac{E'^2_{20}}{\left\{ \left( R'_2 \cdot \frac{X'_{2\sigma}}{R'_2} \right)^2 + X'^2_{2\sigma} \right\}},$$

ve  $2 \cdot X'_{2\sigma} \cong X_k$  yazılırsa;

$$M_d = \frac{m_1 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{E'^2_{20}}{X_k} \quad (4.10)$$

elde edilmiş olur. L tipi eşdeğer devre için devrilme kaymasının bulunabilmesi için;

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{R'_2/s}{\left\{ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_k^2 \right\}} = k \cdot R'_2 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\left( R_1^2 + 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R'_2}{s} + \frac{R'^2_2}{s^2} + X_k^2 \right)}$$

$$M = k \cdot R'_2 \cdot \frac{1}{s \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R'_2 + \frac{R'^2_2}{s} + s \cdot X_k^2}$$

yazılabilir. Bu kısaltmada  $k = \frac{m_1 \cdot p \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1}$  olup sabittir.

$$\frac{dM}{ds} = 0 \text{ 'dan } s_d \text{ çözülürse, } \frac{dM}{ds} = k \cdot R'_2 \cdot \frac{d}{ds} \left( \frac{1}{s \cdot R_1^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R'_2 + R'^2_2/s + s \cdot X_k^2} \right) = 0$$

$$\frac{-k \cdot R'_2 \cdot \left( R_1^2 - \frac{R_2^2}{s^2} + X_k^2 \right)}{\left( \right)^2} = 0 \quad * \frac{s^2}{-k \cdot R'_2} \text{ uygulanırsa,}$$

$$R_1^2 \cdot s^2 - R_2'^2 + s^2 \cdot X_k^2 = 0 \quad s \rightarrow s_d \quad s_d^2 \cdot (R_1^2 + X_k^2) = R_2^2$$

$$s_d = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (4.11)$$

Elde edilen bu  $s_d$  ifadesi, yukarıdaki (4.7) ifadesinde elde edilen  $M_d$  'de yerine yazılırsa;

$$M_d = \frac{m_1 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot X_k} \quad (4.12)$$

olarak elde edilir.

#### 4.4. Kloss Denklemi

L tipi eşdeğer devreye ait  $M/M_d$  oranlanır ve yaklaşıklıklar yapılırsa,

$$\frac{M}{M_d} = \frac{2}{\frac{s}{s_d} + \frac{s_d}{s}} \quad (4.13)$$

elde edilir. Bu ifadeye KLOSS denklemi denir. Kloss denklemi ile, eşdeğer devre parametrelerini bilinmeksizin herhangi bir kaymadaki moment yaklaşık olarak hesaplanabilir.

#### 4.5. Örnekler

**Örnek 1:** Plaka değeri 55kW, 380V, 104A, 2965 d/dak  $GF = \cos\phi = 0.89$  olan 3 fazlı sincap kafesli motorun kalkış akımının anma akımına oranı 6.3, devrilme momentinin anma momentine oranı 2.3, yol verme momentinin nominal momente oranı 1.6 olarak verilmiştir. Motorun uçlarına uygulanan gerilimin;

- Anma değerinde olması halinde  $I_{yv}$ ,  $M_n$ ,  $M_{yv}$ ,  $M_d$
- Anma değerinin %90'ı ( $V'_{1L} = 0.9 \cdot V_{1L}$ ) olması halinde kalkış akımını ve kalkış

momentini hesaplayınız.

- c) Anma akımında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünen güçler ile makine verimini hesaplayınız.

**Çözüm 1:**

$$55 \text{ kW} , 380 \text{ V} , 104 \text{ A} , 2965 \text{ d/dak} , \cos\varphi = 0.89$$

$$I_{yv}/I_{ILn} = 6.3 \quad M_d/M_n = 2.3 \quad M_{yv}/M_n = 1.6$$

$$a) I_{yv} = 6.3 \cdot I_{ILn} = 104 \cdot 6.3 = 655.2 \text{ A} \quad M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{55000}{2 \cdot \pi \cdot \frac{2965}{60}} = 177.1 \text{ Nm}$$

$$M_{yv} = M_n \cdot 1.6 = 177.1 \cdot 2.3 = 283.4 \text{ Nm}$$

$$M_d = M_n \cdot 2.3 = 177.1 \cdot 2.3 = 407.3 \text{ Nm}$$

$$b) V'_{IL} = 0.9 \cdot V_{IL} , \quad \frac{I'_{yv}}{I_{yv}} = \frac{V'_{IL}}{V_{IL}} , \quad \frac{M'_{yv}}{M_{yv}} = \left( \frac{V'_{IL}}{V_{IL}} \right)^2 = 0.9^2 , \quad \left( \frac{M'_d}{M_d} \right) = \left( \frac{V'_{IL}}{V_{IL}} \right)^2$$

$$I'_{yv} = 0.9 \cdot I_{yv} = 0.9 \cdot 655.2 = 589 \text{ A} , \quad M'_{yv} = 0.9^2 \cdot 283.4 = 229.5 \text{ Nm}$$

$$M'_d = 0.9^2 \cdot M_d = 0.81 \cdot 407.3 = 339.9 \text{ Nm}$$

$$c) S_1 = \sqrt{3} \cdot V_{IL} \cdot I_{IL} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 104 = 68.45 \text{ kVA}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi = 68.45 \cdot 0.89 = 60.42 \text{ kW}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi = 68.45 \cdot 0.456 = 31.21 \text{ kVAr}$$

$$\% \eta = P_{2n}/P_1 = (55/60.42) \cdot 100 = \%90.28$$

**Örnek 2:** Stator direnci faz başına  $0.23 \Omega$  olan 3 fazlı yıldız bağlı bir asenkron motorun boşa çalışma deneyinde alınan veriler; 2400V, 11746W, 18.38A ‘dir. Kısa devre deneyinde alınan sonuçlar ise 500V, 56800W, 210A‘dir. Kaymanın %1 olması halinde (L tipi eşdeğer devreyi kullanarak) devre elemanlarını, akımları  $\varphi_0$ ,  $\psi$ ,  $\varphi_k$  ‘yı bulunuz.

**Çözüm 2:** Boşa çalışma deneyinden,  $I_v$ ,  $R_{fe}$ ,  $I_\mu$ ,  $X_m$ ,  $\psi$ ,  $\varphi_0$  bulunur. Şekil 10‘daki L tipi devreden;

$$P_{fe} = m_1 \cdot V_1 \cdot I_v , I_v = \frac{P_{fe} / m_1}{V_1} = \frac{11746 / 3}{2400 / \sqrt{3}} \Rightarrow I_v = 2.83 \text{ A}$$

$$R_{fe} = \frac{V_1}{I_\mu} = \frac{2400 / \sqrt{3}}{2.83} \Rightarrow R_{fe} = 489.6 \Omega$$

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_v^2} \Rightarrow I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_v^2} = \sqrt{18.38^2 - 2.83^2} \Rightarrow I_\mu = 18.16A$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_\mu} = \frac{2400 / \sqrt{3}}{18.16} \Rightarrow X_m = 76.3\Omega$$

$$\text{Şekil 3.6b'den } \psi = \tan^{-1}\left(\frac{I_v}{I_\mu}\right) = 15.58^\circ, \quad \varphi_0 \cong 90 - \psi = 74.42^\circ,$$

Kısa devre deneyi sonuçlarından ise  $Z_k, R_k (R_1, R'_2), X_k, (X_{1\sigma}, X_{2\sigma}), \varphi_k$  bulunur.

$$Z_k = \frac{V_{lk}}{I_k} = \frac{500 / \sqrt{3}}{210} = 1.375\Omega, \quad P_k = m_1 \cdot I_k^2 \cdot R_k \Rightarrow R_k = \frac{P_k / m_1}{I_k^2}$$

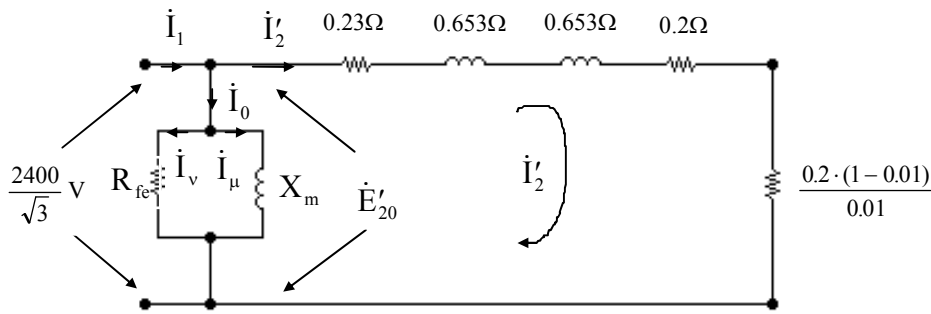
$$R_k = \frac{56800 / 3}{210^2} = 0.43\Omega \quad R_k = R_1 + R'_2 \Rightarrow R'_2 = R_k - R_1$$

$$R'_2 = 0.43 - 0.23 \Rightarrow R'_2 = 0.2 \Omega$$

( $R_1$  ölçülmediyse,  $R_1 \cong R'_2 \cong R_k / 2$  alınabilir.)

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{1.375^2 - 0.43^2} = 1.306 \Omega, \quad X_{1\sigma} \cong X_{2\sigma} \cong \frac{X_k}{2} = 0.653 \Omega$$

$s = 0.01$  durumu için L eşdeğer devresini teşkil edersek;



elde edilir.  $s = 0.01$  için  $I'_2$  yolundaki empedans :

$$Z = \sqrt{\left(R_k + \frac{R'_2 \cdot (1-s)}{s}\right)^2 + X_k^2} = \sqrt{\left(0.429 + \frac{0.2 \cdot 0.99}{0.01}\right)^2 + 1.306^2}$$

$Z = 20.27 \Omega$   $I'_2 = \frac{V_1}{Z} = \frac{2400 / \sqrt{3}}{20.27} \Rightarrow I'_2 = 68.4 \Omega$  olur. Böylelikle makineye ilişkin önemli parametreler bulunmuş olur.

**Örnek 3:** Rotorunda faz başına direnci, kaçak endüktansı sırası ile  $0.1 \Omega$  ve  $0.5 \text{ mH}$  olan bilezikli 3 fazlı asenkron makinenin anma hızı  $950 \text{ d/dak}$  olup rotorundan  $20 \text{ A}$  geçmektedir. Statorda meydana gelen kayıplar ( $P_{cu}$  ve  $P_{fe}$ ) ve sürtünme - vantilasyon kayıplarını ihmal ederek rotor devresinde oluşan iç güç (hava aralığı), bakır kayıpları, devir sayısı, çıkış gücü ve momentini,

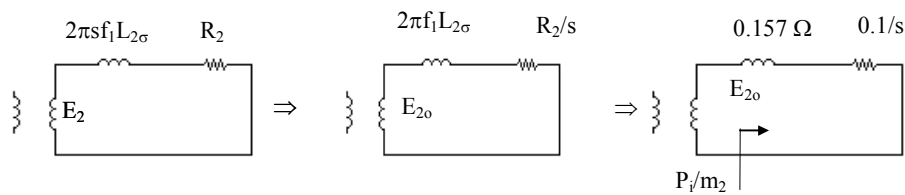
- Anma kayması,
- $s = -0.01$
- $s = 1.4$  için bulunuz.
- Bulunan noktaları  $s - M$  grafiğinde işaretleyiniz.

**Çözüm 3:**

- $950 \text{ d/dak}$  'ya en yakın (üst) senkron devir sayısı  $1000 \text{ d/dak}$  'dır.

O halde nominal kayma;  $s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$  olur.

İndirgenmemiş parametreler ile;



(67.a) ifadesi indirgenmemiş büyüklükler için yazılırsa;

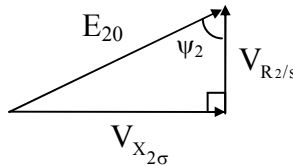
$$P_i = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} = 3 \cdot 20^2 \cdot \frac{0.1}{0.05} = 2400 \text{ W}$$

$$P_2 = P_{mi} - \cancel{P_{s+v}^0} = P_i \cdot (1 - s) = 2400 \cdot (1 - 0.05) = 2280 \text{ W}$$

$$P_{cu2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = P_i \cdot s = P_i - P_{mi} = 2400 - 2280 = 120 \text{ W}$$

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{2280}{2 \cdot \pi \cdot 950 / 60} = 22.92 \text{ Nm}$$

b) Kayma  $s_n$  'den -0.1'e gittiği için  $I_2$  'de değişecektir.  $I_2$  'yi bulmak için  $E_{20}$  gereklidir.  $E_{20}$  değişmediğine göre; (a)'daki verilerle



$$\sqrt{(I_2 \cdot R_2 / s)^2 + (I_2 \cdot X_{2\sigma})^2} = E_{20}$$

$E_{20} = \left[ (20 \cdot 0.1 / 0.05)^2 + (20 \cdot 0.157)^2 \right]^{1/2} = 40 \text{ V}$  olarak bulunur.  $P_i = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}$  'in hesaplanabilmesi için  $s = -0.1$  için  $I_2$  bulunmalıdır;

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\left[ \left( \frac{r'_2}{-0.1} \right)^2 + X_{2\sigma}^2 \right]^{1/2}} = \frac{40}{\left[ \left( \frac{0.1}{-0.1} \right)^2 + 0.157^2 \right]^{1/2}} = 39.5 \text{ A, artık } P_i \text{ hesaplanabilir.}$$

$$P_i = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} = 3 \cdot 39.5^2 \cdot \frac{0.1}{-0.1} = -4680.8 \text{ W,}$$

$$P_{mi} = P_i \cdot (1 - s) = -4680.8 \cdot (1 - (-0.1)) = -5149 \text{ W,}$$

$$P_{cu2} = P_i \cdot s = -4680.8 \cdot -0.1 = 468 \text{ W,}$$

Güç yön (işaret) değişti. Yani (a)'da motor olarak çalışan makine bu kez generatör çalışıyor; Zira  $s < 0$  'dır.

$$n = (1-s) \cdot n_s = (1 - (-0.1)) \cdot 1000 = 1100 \text{ d/dak ,}$$

$1100 > 1000 \Rightarrow n > n_s$  senkron üstü hızda dönmektedir. Kayıp pasif olduğundan  $P_{cu} > 0$  dır.

$$P_{stv} \cong 0 \text{ olarak verildiğinden, } M = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{-5149}{2\pi \cdot 1100 / 60} = -44.7 \text{ Nm}$$

Motorken ürettiği momentin tersi yönde moment üretmektedir. Yani dış kaynaktan moment almakta, moment alıp elektrik üretmektedir. Bu ise generatör çalışmadır.

c)  $s=1.4$  için

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\left[ \left( \frac{r'_2}{1.4} \right)^2 + X_{2\sigma}^2 \right]^{1/2}} = \frac{40}{\left[ \left( \frac{0.1}{1.4} \right)^2 + 0.157^2 \right]^{1/2}} = 232 \text{ A}$$

(bu  $\sim 10 \cdot I_n$  olup, uzun süre geçerse sargılar için zararlı olacaktır)

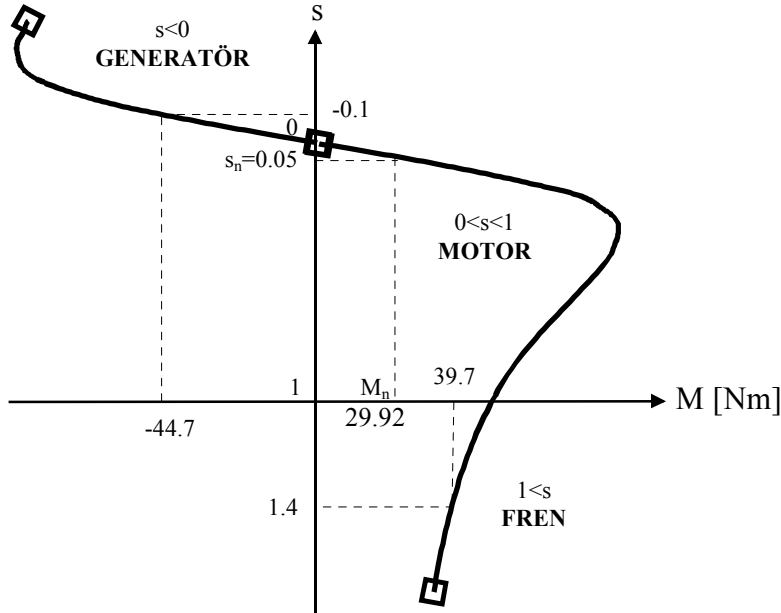
$$P_i = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} = 3 \cdot 232^2 \cdot \frac{0.1}{1.4} = 11524 \text{ W (Pasif çalışma: şebekeden güç çekiliyor)}$$

$$P_{mi} = P_i \cdot (1 - s) = 11524 \cdot (1 - 1.4) = -4610 \text{ W (iş makinesinden güç çekiliyor, yani onu frenliyor. Zira } s > 1 \text{ fren çalışma vardır.)}$$

$$P_{cu2} = P_i \cdot s = 11524 \cdot 1.4 = 16134 \text{ W (kayıplar pasif olduğundan } P_{cu2} > 0 \text{ 'dır)}$$

Görüleceği üzere mutlak değerce büyük kaymalarda  $P_{cu2}$  ( $I_1$  artacağından  $P_{cu1}$  'de) artmaktadır. Bu yüzden verimli ve ısınmaya yol açmayan bir çalışmayı temin etmek için küçük kaymalarda (mutlak değerce) çalışılmalıdır.

d) Elde edilen noktaları asenkron makinenin dış karakteristiğinde işaretlersek;



diyagram elde edilir.



**Örnek 4:** Yıldız bağlı bilezikli bir asenkron motorun plakasında; 7.5 kW, 16 A, 380 V, 1430 d/dak,  $\cos\phi=0.8$  ve  $f=50$  Hz yazılıdır. Devrilme ve anma momenti arasındaki oran 3.2 olup, nominal rotor akımı 25 A ‘dir. Rotor terminalleri arasında boşta endüklenen gerilim;  $E_{20}=180$  V ‘tur.

- Motorun nominal ve devrilme momentini,
- Anma çalışmasındaki verimi, iki bilezik arasında endüklenen rotor gerilimini ve rotor faz empedansını,
- Devrilme kaymasını bulunuz.

**Çözüm 4:**

$$a) M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{7500}{2\pi \frac{1430}{60}} = 50 \text{ Nm} , \quad M_d = 3.2 \cdot M_n = 3.2 \cdot 50 = 150 \text{ Nm}$$

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_{1L} \cdot I_{1L} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 16 \cdot 0.82 = 8635 \text{ W}$$

$$b) \eta_n = \frac{P_{2n}}{P_1} = \frac{7500}{8635} = \%86.85 , \quad s_n = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.0467$$

$$E_{2L} = s \cdot E_{20L} = 0.0467 \cdot 180 = 8.4 \text{ V} \quad \text{Bu gerilim; bilezikler arasındaki gerilim olup,}$$

rotor yıldız bağlı olduğundan sargı gerilimi olarak bu değerin  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  ‘ü konulacaktır;

$$Z_2 = \frac{E_{2L} / \sqrt{3}}{I_{2n}} = \frac{8.4 / \sqrt{3}}{25} = 0.194 \Omega$$

$$c) \text{Kloss İfadesi'nden; } \frac{M}{M_d} = \frac{2}{\frac{s}{s_d} + \frac{s_d}{s}} \Rightarrow \frac{s_n}{s_d} + \frac{s_d}{s_n} = \frac{2M_d}{M_n}$$

$$\frac{s_n}{s_d} = \frac{M_d}{M_n} \pm \sqrt{\left(\frac{M_d}{M_n}\right)^2 - 1} \Rightarrow \frac{s_n}{s_d} = 3.2 \pm \sqrt{3.2^2 - 1} ; \quad \frac{s_n}{s_d} = 0.16 ,$$

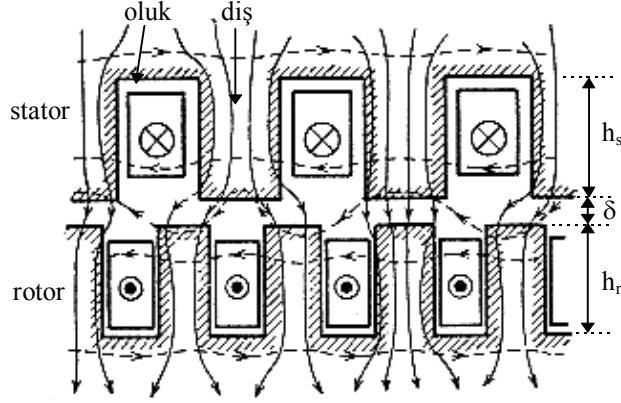
$$s_d = \frac{0.0467}{0.16} = 0.292 \text{ olur.}$$

Nominal devir sayısı 1430 d/dak olan bir motorun senkron devir sayısı 1500 olur.

$$n_d = n_s \cdot (1 - s_d) = 1500 \cdot (1 - 0.292) = 1062 \text{ d/dak} \quad \text{olarak elde edilir.}$$

#### 4.6. Döner Makinelerde Mıknatıslanma Reaktansı

Döner alan reaktansı da denir. Demirdeki mmk düşümü ihmal edilecektir ( $\mu_r \cong \infty$ ).



Şekil 4.3 Çevresel açılmış makinede stator ve rotor dişlerinin karşılıklı konumları

Stator ve rotor teğetsel çizilirse (Şekil 4.3), hava aralığının değişimi  $\delta + h_s + h_r$ ,  $\delta + h_s$ ,  $\delta_{hr}$ ,  $\delta$  gibi olur.

Hava aralığındaki bu değişikliği hesaba katmak için  $\delta$  'yı 1 'den büyük bir katsayı ile çarpalım.

$$\delta \rightarrow k_\delta \cdot \delta ; k_\delta > 1 \quad k_\delta : \text{hava aralığı düzeltme faktörü}$$

Diş kenarlarındaki doymayı  $\mu_0$  'a etki ederek düzeltmek istersek;

$$\mu_0 \rightarrow \frac{\mu_0}{k_\mu} ; k_\mu > 1$$

yazılabilir.

Önce bir faz sargısının sadece kendisi beslendiğinde mıknatıslanma öz endüktansını bulalım. Temel eşitlikler:

$$F = \phi \cdot \mathcal{R}_m, \quad \phi = B \cdot A, \quad F = B \cdot A \cdot \frac{\delta}{\mu_0 \cdot A} = B \cdot \frac{\delta}{\mu_0}, \quad B = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot F \text{ olup,}$$

doyma ve hava aralığı değişimine dikkat edip; B'yi maksimum değerler cinsinden yazarsak;

$$B_m = \frac{\mu_0}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot F_m \quad (4.14)$$

Dağıtılmış stator sargılarının üretileceği mmk'in, bir faz sargısı tarafından üretilen bileşeni şu şekilde idi (bkz Eşitlik 2.5):

$$F(x,t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_1}{p} \cdot I_\mu \cdot \left[ k_{w1} \cdot \sin x + \frac{k_{w3}}{3} \cdot \sin 3x + \dots \right] \cdot \cos \omega t \quad (4.15)$$

Bu ifadenin temel bileşeninin maksimum değeri,

$$F_{1m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_1}{p} \cdot k_{w1} \cdot I_\mu \quad (4.16)$$

ve (4.14) te konursa;

$$B_{1m} = \frac{2\sqrt{2} \cdot \mu_o}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta \pi} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \cdot I_\mu \quad (4.17)$$

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} \cdot B_{1m} \cdot A = \frac{2}{\pi} \cdot B_{1m} \cdot \tau_p \cdot \ell = \frac{2}{\pi} \cdot B_{1m} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell$$

$$\phi_m = \frac{2}{\pi} \cdot \left( \frac{2\sqrt{2} \cdot \mu_o}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot \pi} \cdot \frac{N \cdot k_{w1}}{p} \cdot I_\mu \right) \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot \ell$$

ve bobin akı kavramasının;  $\Psi = (N_1 \cdot k_{w1}) \cdot \phi$  olduğu hatırlanırsa;

$$\Psi_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\mu_o \cdot D \cdot \ell}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot I_\mu \quad (4.18)$$

$$L_f = \frac{\Psi_m}{I_\mu} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\mu_o \cdot D \cdot \ell}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot \frac{I_\mu}{\sqrt{2} \cdot I_\mu}$$

Dolayısıyla bir faz için mıknatıslanma endüktansı

$$L_f = \frac{2 \cdot \mu_o \cdot D \cdot \ell}{\pi \cdot k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \text{ olarak elde edilir.} \quad (4.19)$$

$X_f = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_f$  olup;

$$X_f = \frac{4 \cdot f_l \cdot \mu_o \cdot D \cdot \ell}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \left( \frac{N_l \cdot kw_l}{p} \right)^2 \quad (4.20)$$

olur. Çok fazlı makinelerde döner alan bahsi hatırlanırsa (bkz. 2.Bölüm);

$F_{mf} = \frac{m}{2} \cdot F_{lf}$  idi. Dolayısıyla benzer şekilde,

$$L_m = \frac{m}{2} \cdot L_f, \quad X_m = \frac{m}{2} \cdot X_f \text{ olacaktır.} \quad (4.21.a, b)$$

$$X_m = \frac{2 \cdot m_l \cdot f_l \cdot \mu_o \cdot D \cdot \ell}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot \delta} \left( \frac{N_l \cdot kw_l}{p} \right)^2 \quad (4.22)$$

$E_1 = X_m \cdot I_\mu$  olduğundan  $I_\mu$  istenildiğinde kolayca bulunabilir. D hava aralığı ortasındaki çaptır.

(4.22) ifadesinden görüleceği üzere;  $\delta$  hava aralığı,  $p$  çift kutup sayısı,  $k_\mu$  arttıkça (makine doydukça)  $X_m$  küçülmekte,  $I_\mu$  artmakta ve makine daha fazla reaktif (mıknatıslanma için) güç çekmektedir. Bu ise rotor ile stator arasındaki hava aralığının ve kutup sayısının küçük yapılmasının (küçük devir yada büyük kutup sayısı tercih edilmemektedir) en büyük sebebidir.

## 5. ASENKRON MOTORLARA YOLVERME VE HIZ AYARI

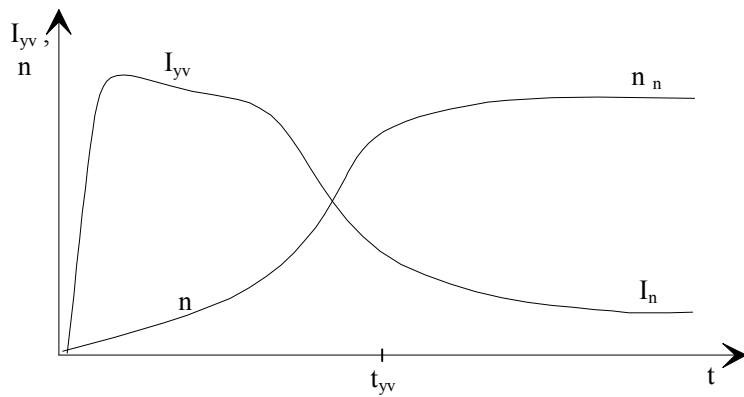
### 5.1. Asenkron Motorlara Yol verme

Yolverme, bir asenkron motorun şebekede önemli miktarda gerilim düşümüne ve sargıların tahribine yol açmayacak kadar küçük bir akım ile motorun durma konumundan normal çalışma devir sayısına getirilmesi işlemine denir.

Bilindiği gibi asenkron motorların şebeke yanından görülen empedansı kaymaya bağlıdır. Bu empedansta kaymaya bağlı eleman  $\frac{R'_2(1-s)}{s}$  olup, durma anında ( $s=1$ ), 0 'değerindedir. Bu da makine empedansının minimum olduğu durumdur. Şayet motora nominal gerilimi uygulanacak olursa, nominal akıma göre 4 ile 6 kat akım çekecektir. Bu  $I_{yv}$  akımı;

$$\text{L tipinde } I_{yv} \cong \frac{V_1}{\sqrt{(R_k^2 + X_k^2)}}, \quad \text{T tipinde } I_{yv} \cong \frac{E'_{20}}{\sqrt{(R'_2{}^2 + X_k^2)}} \quad (5.1.a, b)$$

olarak verilmişti. Bu akım gerek şebeke gücüne, gerekse motor gücü ve motor milindeki toplam atalet momentine bağlı olarak, çoğu kez müsaade edilemezdir. Yolverme süresinde hattın çekilen akımın efektif değeri zamana göre Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Yolverme sırasında akım ve hızın değişimi

### 5.1.1. Yolvermenin Etkileri

Yolvermenin iki değişik etkisi vardır:

**a. Şebekeye etkisi:** Şebekeler çoğu kez bu kalkış akımlarına yetersiz kaldığından, bir yada daha fazla motorun aynı anda devreye girmeleri, enerji dağıtım hatlarında kayda değer gerilim düşümlerine neden olurlar. Bu durum aynı hattan beslenen diğer tüketicileri de olumsuz etkiler. Ataleti büyük olan yüksek güçlü motorlarda, yol verme süresi uzayacağından, bu gerilim düşümleri daha da uzun sürer ve önem taşır.

**b. Motora etkisi:** Büyük değerli bu kalkış akımı motor sargılarında

$$P_{cuyv} = m_1 \cdot I_{yv}^2 \cdot R_k \quad (\text{Burada } I_{yv} \text{ zamana göre değişmektedir.}) \quad (5.2)$$

yolverme bakır kayıp gücünün harcanmasına neden olur. Bu kayıp güç hayli büyük olup,  $t_{yv}$  uzadıkça (motor milindeki atalet momenti büyüdükçe  $t_{yv}$  artar)

$$Q = k \cdot \int_0^{t_{yv}} P_{cuyv} \cdot dt \quad (5.3)$$

kalori kadar bir ısı enerjisi motor sargılarını ısıtır. Bu ısı, makine izolasyon malzemelerine zarar verecek kadar artabilir.

Yolvermenin yan etkilerini azaltmak için ;

$R_{\delta}$  : Stator sargılarına seri bağlanmış reosta,

$R'_{yv}$  : Bilezikli motorda, bileziklere dışarıdan bağlanan  $R_{yv}$  yol verme direncinin statora indirgenmiş değeri olarak tanımlanırsa, yol verme akımı

$$I_{yv} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_k + R_{\delta} + R'_{yv})^2 + X_k^2}} \quad , \quad I_{yv} = f(V_1, R_k, R_{\delta}, R'_{yv}, X_k) \quad (5.4.a, b)$$

olur. Burada  $R_k$  ve  $X_k$  makine içi sabitler olduğu için, dıştan bakıldığında;

$$I_{yv} = f(V_1, R_{\delta}, R'_{yv}) \quad (5.5)$$

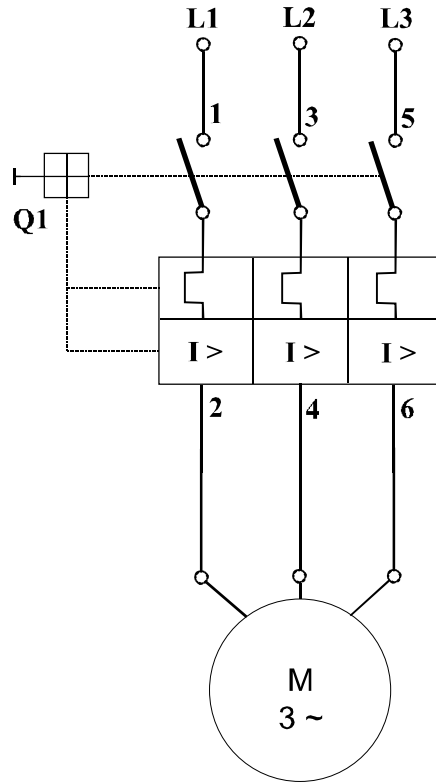
şeklinde yazılabilir. Burada  $I_{yv}$ ;  $V_1$  ile doğru,  $R_{\delta}$  ve  $R'_{yv}$  ile ters orantılıdır. O halde  $I_{yv}$ ;  $V_1$ ,  $R_{\delta}$  ve  $R'_{yv}$  nin uygun seçilmesiyle istenilen sınırlar içerisinde tutulabilir.

Fakat bu değişimler yapılırken makine momentinin de deęiőeceęi göz ardı edilmemelidir.

## 5.2. Yolverme Yöntemleri

### 5.2.1. Direk Yolverme

Daha ziyade 5kW'a kadar olan motorlara uygulanır. Bu güçteki bir motorun şebekede önemli bir gerilim düşümüne neden olmayacağı kabul edilmektedir. Diğer taraftan, bu güçteki motorların atalet momenti de küçük olacağından, yolverme süresinde sargılarda açığa çıkacak ısı artışı küçük olacaktır. Şekilde 5.2'de Q1; termik manyetik anahtardır.



Şekil 5.2 Asenkron motora direk yolverme bağlantı şeması

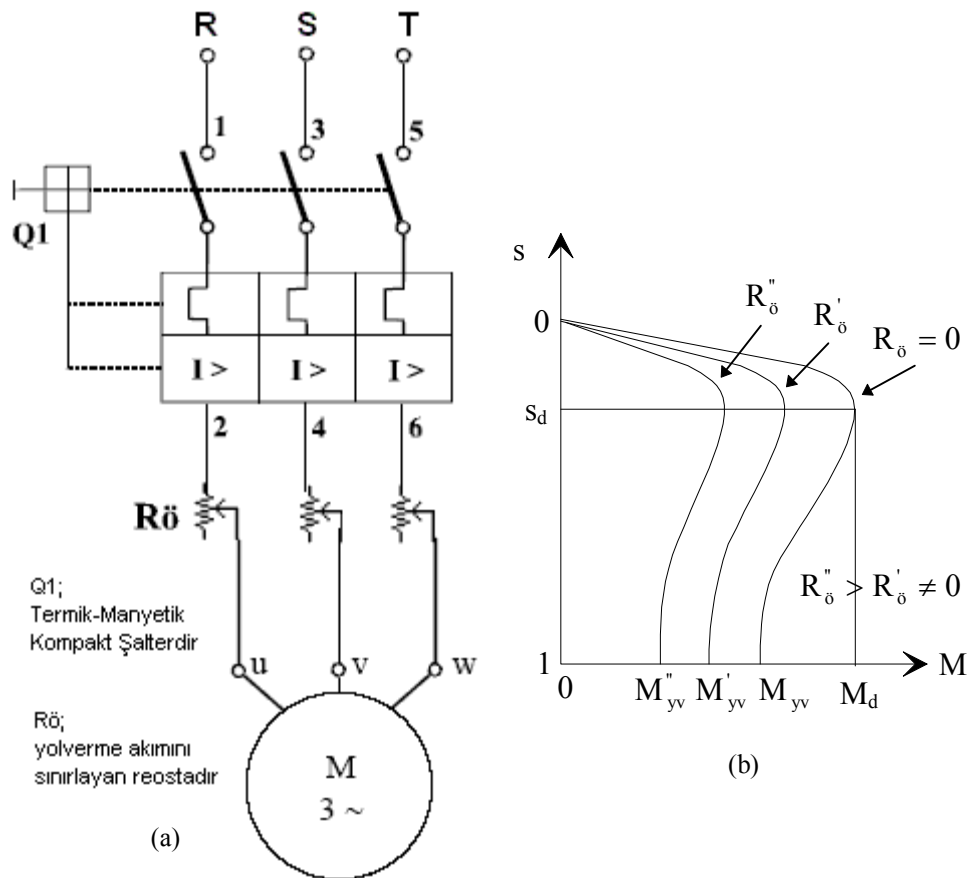
Bu yöntem sincap kafesli motorlarda kullanılır. Zira bilezikli asenkron motorlar bu kadar küçük güçlerde imal edilmezler.

### 5.2.2. Ön Direnç İle Yolverme

Bu yöntemde motor uçlarındaki gerilim ön direnç ile düşürülerek, motorun küçük akım ile yol alması sağlanır (Şekil 5.3a). Yolverme akımı;

$$I_{yv} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_k + R_{\ddot{o}})^2 + X_k^2}} \quad (5.6)$$

olup,  $R_0$  arttıkça  $I_{yy}$  'nin azalacağı aşıkardır. Makine momenti ise Şekil 5.3b'deki gibi değişecektir.



Şekil 5.3 a) Ön direnç ile yolverme bağlantı şeması, b) Dış karakteristiğin  $R_0$  ile değişimi

$$\frac{M_{yv}}{M'_{yv}} = \left( \frac{I_{yv}}{I'_{yv}} \right)^2 \quad (5.7)$$

olacaktır. Bu yöntem sincap kafesli motorlara uygulanmakta olup,  $R_6$  'deki güç kaybı fazla olduğu için çok tercih edilmemektedir.



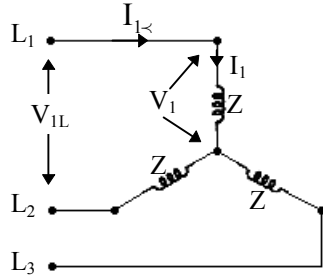
### 5.2.3. Kuşa Bağlaması

5.2.2. Konusundaki yöntemin bir faza uygulanmış halidir;  $R_0$  sadece statorun bir fazına bağlanır. Makinenin akım döner alan simetrisi bozulur. Sabit genlikli döner alan yerine, genliği zamanla değişen eliptik bir döner alan oluşur. Makine küçük akımla vuruntulu olarak kalkış yapar. Dış karakteristiğin değişimi Şekil 5.3.b'deki gibidir. Günümüzde zorunluluk halleri dışında pek kullanılmamaktadır.

### 5.2.4. Yıldız-Üçgen Bağlama

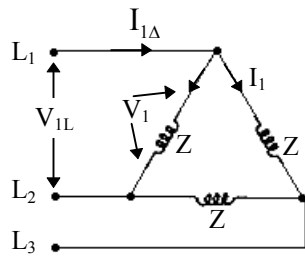
Yıldız-üçgen yolvermenin yapılabilmesi için stator sargı geriliminin, şebeke faz arası gerilimine eşit olması gerekir. Yani Türkiye şebekesinde  $V_{\text{üçgen}}/V_{\text{yıldız}}$ ; 380/660V olan motorlara yıldız-üçgen yolverilebilir.

Üçgen ve yıldız durumlarında şebekeden çekilecek akımları incelersek:



$$I_1 = \frac{V_1}{Z} = \frac{V_{1L}}{Z} \quad I_L = I_1$$

$$I_L = \frac{V_{1L}}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (5.8)$$



$$I_1 = \frac{V_1}{Z} = \frac{V_{1L}}{Z} \quad I_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_1$$

$$I_{\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{1L}}{Z} \quad (5.9)$$

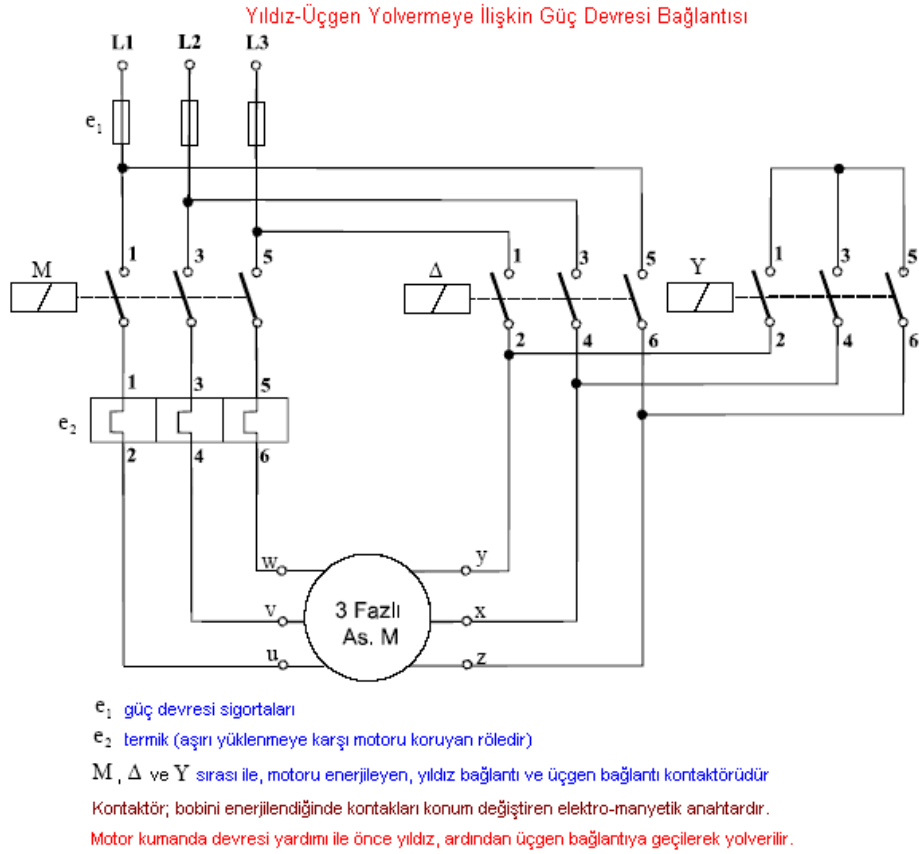
$$\frac{I_{\Delta}}{I_L} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{1L}}{Z} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot Z}{V_{1L}} \Rightarrow I_{\Delta} = 3 \cdot I_L \quad (5.10)$$

bulunur.

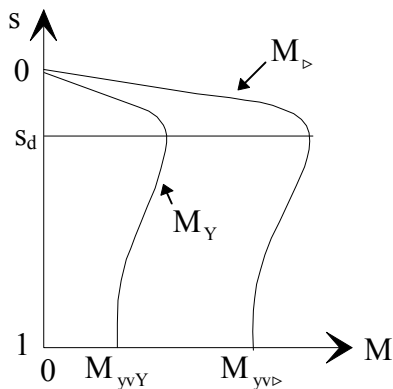
Görüleceği üzere yıldız bağlantıda hattan, üçgen bağlantıya göre üçte bir akım çekilir. Bu oran, bu yöntemi orta güçlü makineler için tatmin edici yapar. Bu arada akımın değişmesi ile momentte değişir ve

$$M_{\Delta} = 3 \cdot M_Y \quad (5.11)$$

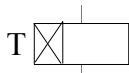
(Şekil 5.4c) olur. Bu tip yolvermede, ya elle kumanda edilen yıldız-üçgen yolverme anahtarı, yada AC3 sınıfından seçilmiş, kontaktörlü kumanda devresinden faydalanılır. Burada ikinci bağlama verilecektir (Şekil 5.4a, b).



(a)

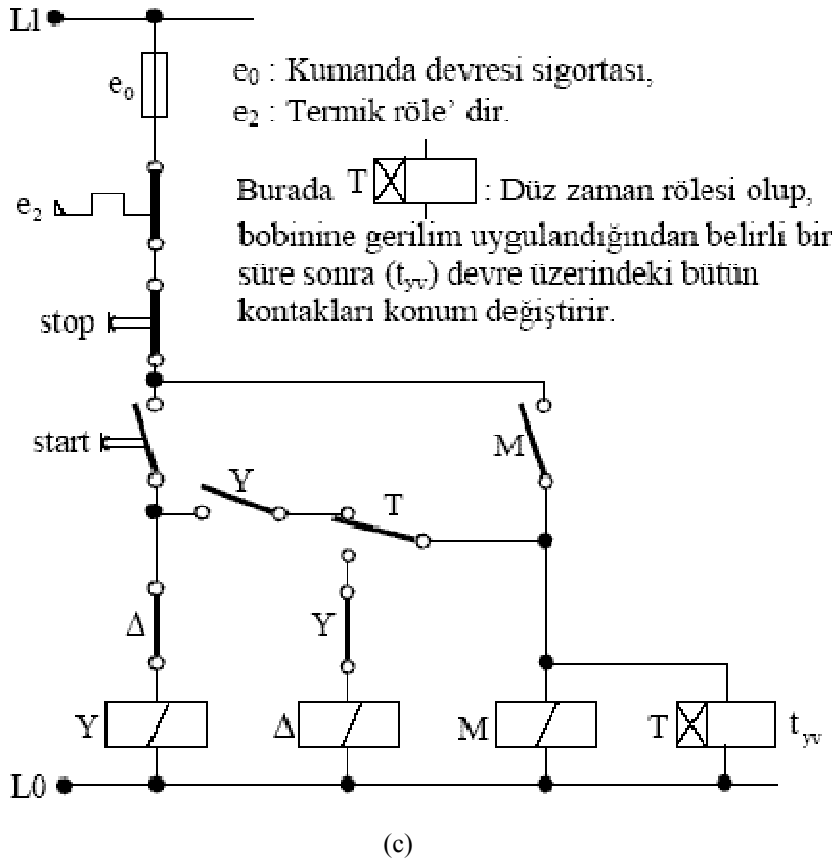


(b)

Burada  : Düz zaman rölesi olup, bobinine gerilim uygulandığından belirli bir süre sonra ( $t_{yv}$ ) devre üzerindeki bütün kontakları konum değiştirir.

$e_0$  : Kumanda devresi sigortası,  
 $e_1$  : Güç devresi sigortası,  
 $e_2$  : Termik röle' dir.

Şekil 5.4 Yıldız/Üçgen yolverme bağlantı şeması; a) Güç devresi, b) Dış karakteristik değişimi

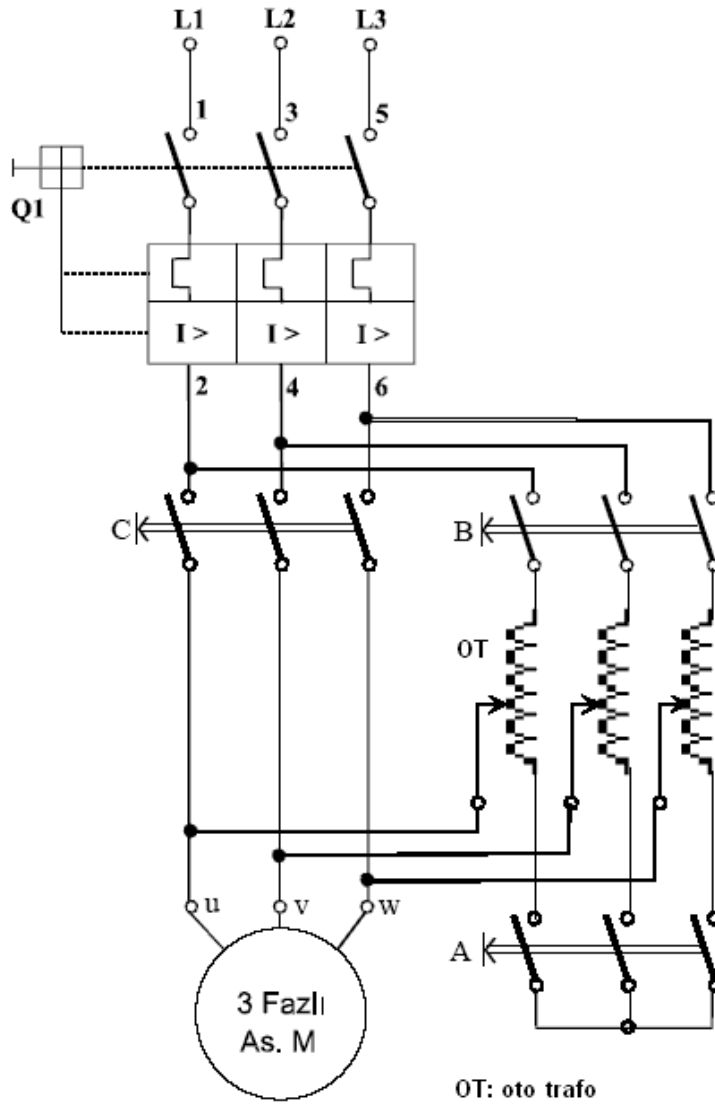


Şekil 5.4 c) Yıldız/Üçgen yolvermeye ilişkin kumanda devresi

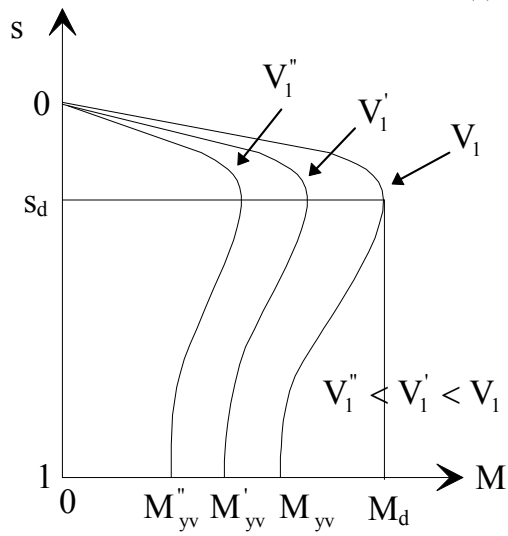
### 5.2.5. Oto-Trafo İle Yolverme

Gerilimi küçültürerek  $I_{yv}$  'yi sınırlayan bir yöntemdir. Daha ziyade büyük güçlü motorlarda uygulanır. Gerilim oto-trafo üzerindeki sürgü kolu yada kademe atlayarak arttırılır ve motor nominal devrinin %70 'ine ulaşınca oto-trafo devre dışı bırakılarak, devreye direk bağlanır.

Şekil 5.5a'da bağlantı şeması verilen devrede; Q1 termik manyetik anahtarı kapatıldıktan sonra, önce A, sonra B anahtarları kapatılıp oto-trafo üzerinden gerilim arttırılarak motorun yumuşak bir şekilde  $0.7 \cdot n_n$  devrine çıkması sağlanır. Sonra, A açılıp C kapatılarak akım kesilmeksizin motor şebekeye direk bağlanır. Daha sonra, B açılarak oto-trafo devre dışı bırakılır.



(a)



(b)

Şekil 5.5 Oto-trafo ile yolverme a) Bağlantı şeması b) Dış karakteristiğin değişimi

### 5.2.6. Bilezikli Makineye Yolverme

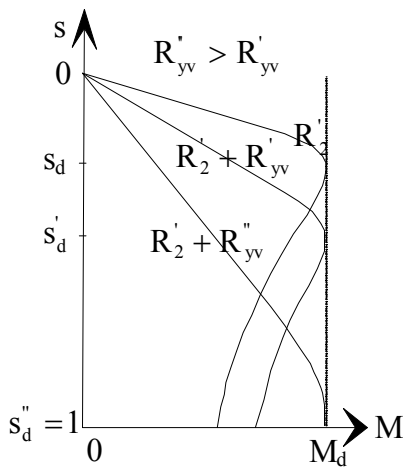
Bilezikler üzerinden terminallere alınan rotor sargı uçlarına direnç bağlanarak ( $R_{yv}$ ), rotor devresi direnci arttırılır (Şekil 5.7). Böylelikle motorun şebekeden görünen empedansı artacağından yolverme akımı azalır.  $R_{yv}$  direnci maksimumdan yavaş yavaş minimuma getirilerek motorun yolalması sağlanır. Bu yöntemde akım azalmasına rağmen makinenin kalkış momenti artar ( belirli bir  $R_{yv}$  aralığı için ).  $R_{yv}$  uygun değerde seçilerek, motorun maksimum moment ile (  $M_d$  ) kalkış yapması sağlanabilir. Rotor terminallerine  $R_{yv}$  bağlandığında yolverme momenti;

$$M_{yv} = \frac{m \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{(R'_2 + R'_{yv}) \cdot V_1^2}{[(R_k + R'_{yv})^2 + X_k^2]} \quad (5.12)$$

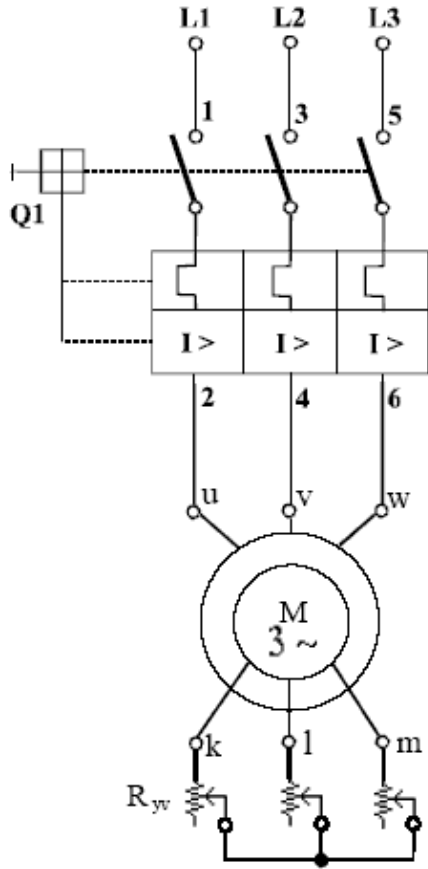
olur. Burada  $R'_{yv}$  ;  $R_{yv}$  direncinin statora indirgenmiş değeridir. Şayet yolverme momentinin motorun normal çalışmasındaki herhangi bir s kaymasındaki momentine eşit olması istenirse;

$$R'_{yv} \cong \frac{R'_2 \cdot (1-s)}{s} , \quad R'_{yv} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \dot{u}_g^2 \cdot R_{yv} \quad (5.13), (5.14)$$

değeri seçilir.

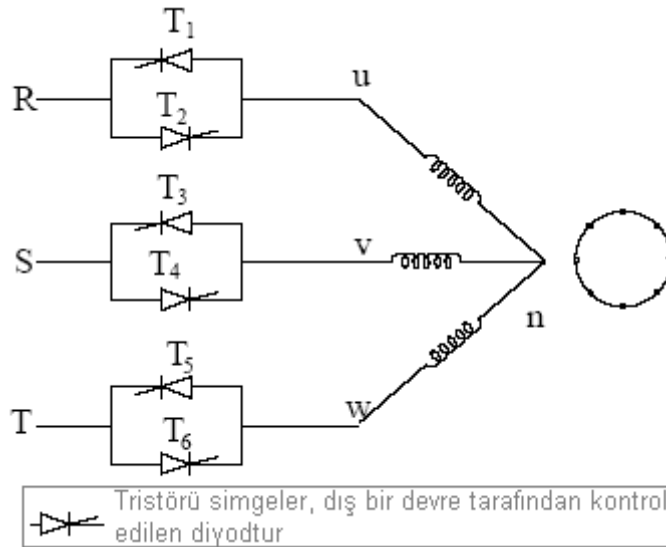


Şekil 5.6 Bilezikli asenkron makine rotoruna ilave direnç bağlayarak yolvermede dış karakteristik değişimi



Şekil 5.7 Bilezikli asenkron makine rotoruna ilave direnç bağlayarak yolvermeye ilişkin bağlantı şeması

### 5.2.7 Asenkron Motora Yumuşak Yolverici ile Yolverme



Tristör katı çoğu kez mikrobilgisayar kontrollü olduğu için, sistem birçok işlev için programlanabilir. Kullanılacak tasarım ile; aşırı akım koruma, hızlanma süresi belirleme, devir yönü değişimi, frenleme, frenleme süresi belirleme, hata kontrolü gibi birçok işlem gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 5.8 AC Kıyıcı ile asenkron motora yumuşak yolverme

Günümüzde elektronik sistemlerin maliyetlerinin düşmesi ile, 100kW-500 kW arası

motorların yolverilmesinde yumuşak yolvericiler en ekonomik ve esnek çözüm olmaya başlamıştır.

### 5.3. Asenkron Motorlarda Hız Ayarı

Bilindiği üzere asenkron motorun rotor hızı, döner alan hızını ( $n_s$ ) yakalamaya çalışmaktadır. O halde döner alan hızı değiştirilebilirse rotor hızı da değişecektir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (5.15)$$

olduğundan,  $n_s$  'e etkiyen parametreler  $p$  ve  $f_1$  'dir. Bu parametrelerin değiştirilmesi, yüklü yada boşta çalışma durumunda da rotor hızını değiştirir.

Devir sayısı ayar yöntemlerinden bir diğeri de üretilen momente etki etmektir. Moment ifadesi genel halde;

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2 + R'_{yv}}{s} \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2 + R'_{yv}}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]} \quad (5.16)$$

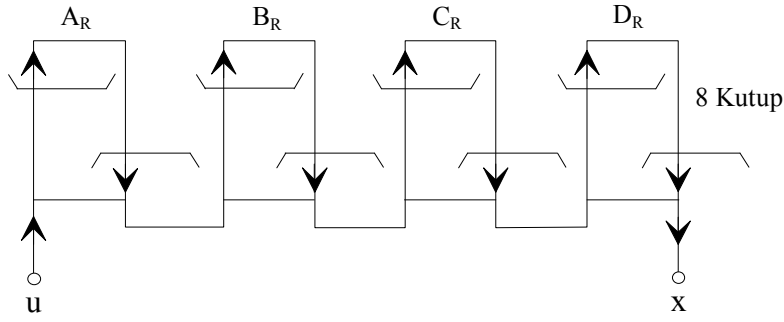
olacağından,  $f_1$  ve  $p$  haricinde dışarıdan değiştirilebilecek parametreler  $V_1$  ve  $R'_{yv}$  'dür (bilezikli makinede). Bu moment ifadesi bir  $M_y \neq 0$  yük momentine eşitlenip  $V_1$  yada  $R'_{yv}$  değiştirilirse, eşitliği sağlayacak farklı bir  $s$  kayması elde edilir. Böylelikle motorun devri ayarlanmış olunur. Şimdi bu parametrelerin değiştirilerek hızın ayarlandığı yöntemleri inceleyelim.

#### 5.3.1. Kutup Sayısı Değiştirilebilen Sargı Kullanarak Hız Ayarı

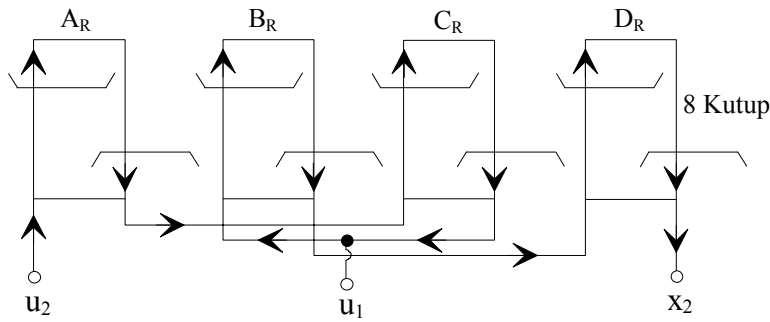
Özel olarak sarılmış, kutup sayısı değiştirilen bir çok sarım türü olmasına rağmen, kolaylığı açısından en yaygın olarak DAHLANDER SARGI kullanılmaktadır. Bu sarım tekniğinde kutup sayısı 2/1 oranında (Üçgen/Çift-Yıldız), dolayısı ile döner alan hızı da 1/2 oranında değiştirilebilmektedir.

8 Kutuplu makinede, bir faza ait sargı, normal sargıda Şekil 5.8a'daki gibi yerleştirilmişken, Dahlander sargıda bobin ara bağlantıları Şekil 5.8b'deki gibi

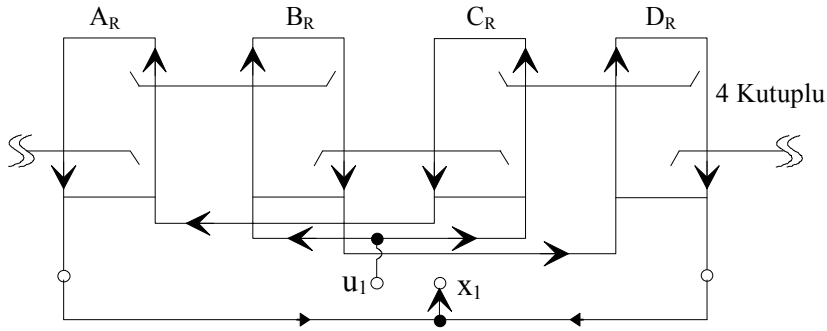
düzenlenmiş olup, sargı ortasından bir uç çıkartılmıştır.



a) Normal Sargı



b) Dahlander Sargı;  $u_2$  ve  $x_2$  'den beslenmiş



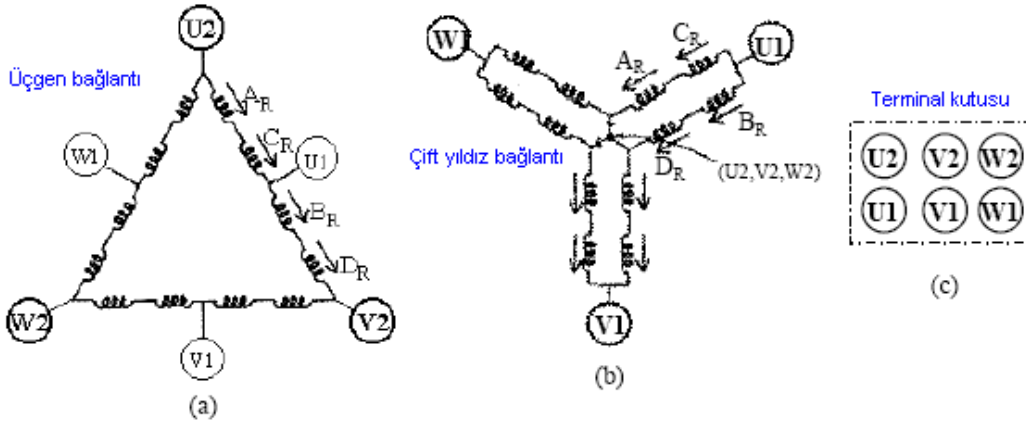
c) Dahlander Sargı;  $u_1$  ve  $x_1$  'den beslenmiş

Şekil 5.9 Bir faz sargısında Dahlander bağlantının elde edilmesi

Dahlander sargıda büyük kutup sayısı/alçak devir elde etmek için  $u_2$  ile  $x_2$  'den besleme yapılır. Küçük kutup sayısı/yüksek devir sayısı için ise  $u_2$  ile  $x_2$  birleştirilip;  $x_1$  diye adlandırılıp  $u_1$  ile  $x_1$  'den besleme yapılır. Bu durumda sargıların yarısındaki akım yönü değişir, böylece kutup sayısı da yarıya iner (Şekil 5.9c).

Makinenin üç fazlı olduğu kabul edilirse, faz sargıları kendi içinde üçgen bağlanır ve aşağıda görüleceği üzere dışarı 6 uç çıkartılır (Şekil 5.10).





Dahlander sargı özel uçlar çıkartılmış, iç bağlantıları özel yapılmış ve normalde üçgen bağlanmış bir sargıdır.

Büyük devir sayısının küçük devir sayısına oranı yaklaşık olarak 2 dir, çünkü sargıda oluşan kutup sayılarının oranı 1/2 dir.

Sargıya U2, V2, W2'den enerji verilirse motor büyük kutup sayısı ve küçük devir sayısında döner, bu durumda sargı üçgen bağlıdır (a);

U2, V2, W2 birleştirilip, motora U1, V1, W1 terminallerinden enerji verilirse, motor küçük kutup sayısında ve büyük devir sayısında döner, bu durumda sargı yıldız (çift yıldız) bağlanmış olur.

Şekil 5.10 Üçgen ve YıldızYıldız bağlı 3 fazlı makinede sargılar arası bağlantılar; a) Üçgen bağlantı: büyük kutup/ alçak devir, b) YıldızYıldız bağlantı: küçük kutup /yüksek devir, c) Terminal kutusu

Dahlander sargıda faz sargıları normalde Üçgen bağlanır ve  $u_2, v_2, w_2$ ' den besleme yapıldığında motor alçak devirde döner.

İki katı devir sayısı elde etmek için (yüksek devir)  $u_2, v_2, w_2$  birleştirilip,  $u_1, v_1, w_1$ ' den besleme yapılır. Bu durumda sargıların bağlantısı Şekil 5.10b'deki çift-yıldız bağlantıdaki gibi olur.

### 5.3.2. Frekans Değişimi İle Devir Sayısı Ayarı

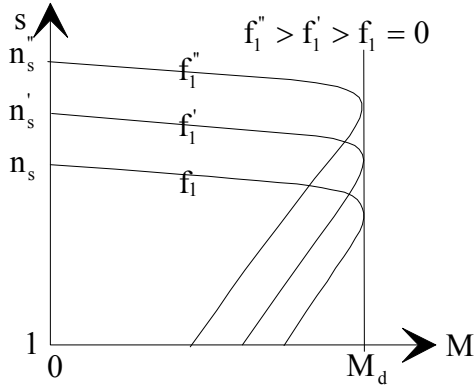
Bu yöntemde,  $f_1$  şebeke frekansı değiştirilerek döner alan hızının değişmesi sağlanır ve böylelikle rotor hızı ayarlanır. Fakat T tipi eşdeğer devreden (Şekil 3.3),

$$I_\mu = \frac{E_1}{X_m} = \frac{E_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_m} \quad (5.17)$$

olduğundan  $f_1$  değiştikçe  $I_\mu$  'de değişir.  $f_1$  nominal değerine göre azaltılırsa  $X_m$  küçüleceğinden  $I_\mu$  artar.  $I_\mu$  'nün artması makinenin doyması ve lineerliğinin kaybolması anlamına gelir. Doymaya sebebiyet vermemek için  $E_1 / f_1$  oranının sabit tutulması gerekir.  $E_1$  'in sabit tutulması müşkülât çıkartacağından ( $V_1 \cong E_1$  kabulü ile)  $V_1 / f_1$  oranını sabit tutulması yoluna gidilir.

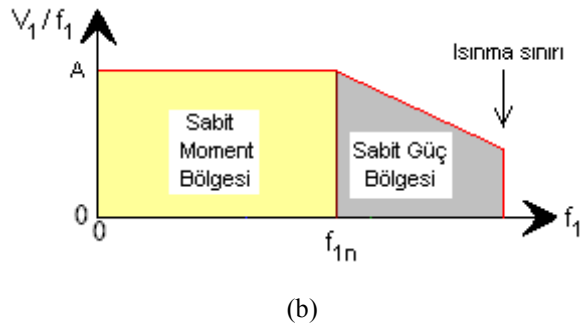
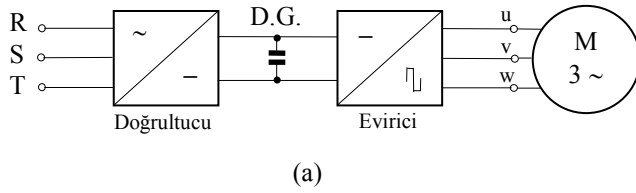
Diğer taraftan çalışma bölgesi göreceli olarak sabit kalacağından ( $s=s_b$ ), frekans arttıkça makine empedansı artacak,  $V_1 / f_1$  oranı sabit tutulduğundan  $I_2$  'de yaklaşık olarak sabit kalır.

Bu ilişkiler Biot-Savart Kanunu (  $F=B.I.\ell$  ) gereği, üretilen momentin sabit kalacağı anlamına gelir. Dış karakteristik Şekil 5.11'deki gibi değişir.



Şekil 5.11  $f_1$  değiştirildiğinde dış karakteristiğin değişimi ( $V_1/f_1 = s_b$ )

Bu teknik, D.A. yada D.G. ara devreli 3 fazlı darbe genişlik modülasyonlu eviriciler kullanılarak gerçekleştirilir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 a) Evirici üzerinden beslenen asenkron motor, b)  $V_1/f_1$  oranının değişimi

$f_1$  değiştirildiği için etiket hızının üstüne çıkabilir. Bu durumda frekansa bağlı demir

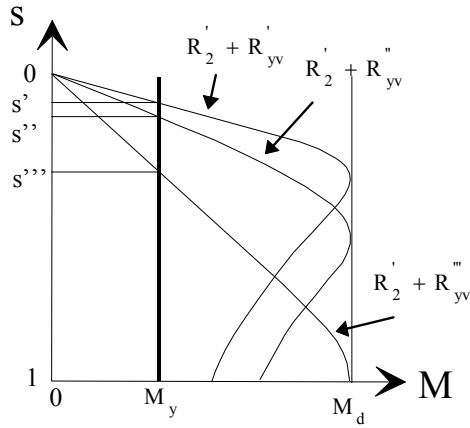
kayıplarının artacağı ve makinenin ısınacağı göz ardı edilmemelidir. Nominal frekans altında sabit moment kipinde çalışılır  $V_1/f_1$  oranı sabittir. Nominal frekansın üzerine çıkılması durumunda makine güç sınırının aşılması için sabit güç kipinde çalışılır, bu bölgede artan frekans ile  $V_1/f_1$  oranı azaltılır (Şekil 5.12b).

### 5.3.3. Bilezikli Asenkron Motorun Rotor Devresine Direnç İlave Ederek Hız Ayarı

Bu yöntemde döner alan hızına etki edilmez, dolayısı ile boşta hız ayarı yapılamaz; sadece senkron altı devirlerde ayar yapılabilir. Yüklü durumda motor çalışma noktası bir kaymadan diğerine değişir. Kayma değiştiğinde rotor hızı da değişmiş olur.

(5.16) ifadesinde  $R'_{yv}$  değiştirilirse eşitlik farklı bir  $s$  değeri için sağlanır. Kayma ve hız  $R'_{yv}$  ile değiştirilmiş olur.

Bu esnada  $R'_{yv}$  büyürken  $S_d$  'de büyüyecektir. Uygun  $R'_{yv}$  seçimi ile ( $M_{yv}=M_d$ ) yol verme momenti maksimum momente eşitlenerek motorun yüksek kalkış momenti ile yolalması sağlanabilir. Dış karakteristik Şekil 5.13'deki gibi değişir.



Şekil 5.13 Bilezikli asenkron motorda rotor devresine direnç ilave edildiğinde dış karakteristiğin değişimi.

Arzu edilen  $s_1$  kaymasından,  $s_2$  kaymasına geçmek için rotor devresine ilave edilecek direnç:

$$\frac{R'_2}{s_1} = \frac{R'_2 + R'_{yv}}{s_2} \quad (5.18)$$

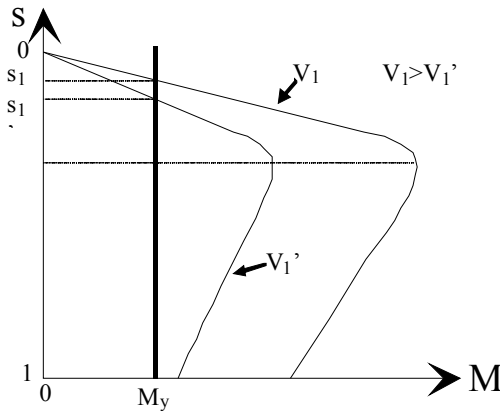
eşitliğinden bulunur.

Devre bağlama şeması, bilezikli asenkron motora yolvermede kullanılan şema ile aynıdır (Şekil 5.7).

#### 5.3.4. Gerilimin Değiştirilmesi İle Hız Ayarı

$V_1$  Şebeke gerilimi değiştirildiğinde döner alan hızı değişmeyeceğinden, boştaki devir sayısı değiştirilemez. Dolayısı ile bu tip hız ayarı sadece yüklü durumda yapılabilir.

(5.16) bağlantısında  $V_1$  değişince, (belirli bir yük momenti varken) eşitliğin sağlanması için  $s$  kayması başka bir  $s'$  değerine oturur. Böylece motorun devri değiştirilmiş olur. Senkron altı devirlerde;  $n_s$  ile  $n_d$  arasında ayar yapılabilir.  $V_1$  nominal değerinin üzerine çıkartılmaz, aksi halde motor doyar. Büyük kaymalarda rotor sargılarının ısınacağı göz ardı edilmemelidir. Gerilimin değiştirilmesi için alternatif akım kısıyıcısı ya da oto-transformatörler kullanılabilir. Şayet oto-trafo kullanılırsa bağlama şeması; oto-trafo ile yolverme bahsinde verilen ile aynı olur (Şekil 5.5a). Dış karakteristik Şekil 5.14'deki gibi değişir.



Şekil 5.14 Gerilim değişimi ile hız ayarında dış karakteristik.

#### 5.4. Asenkron Motorun Frenlenmesi

Çeşitli frenleme şekilleri olmasına rağmen, en çok kullanılan üç tip verilecektir.

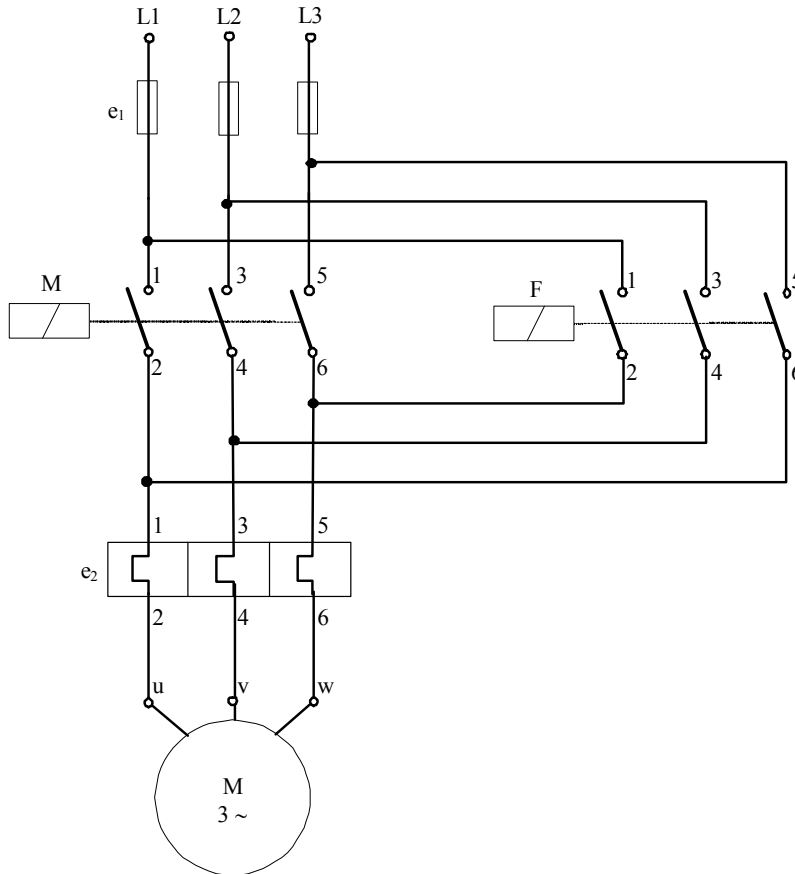
### 5.4.1. Mekanik Frenleme

Burada motor mekanik fren araçları ile donatılır. Örneğin çalışma süresinde bir elektromıknatısla kaldırılan mekanik fren, motorun devreden çıkması ile düşerek motorun durması sağlanır.

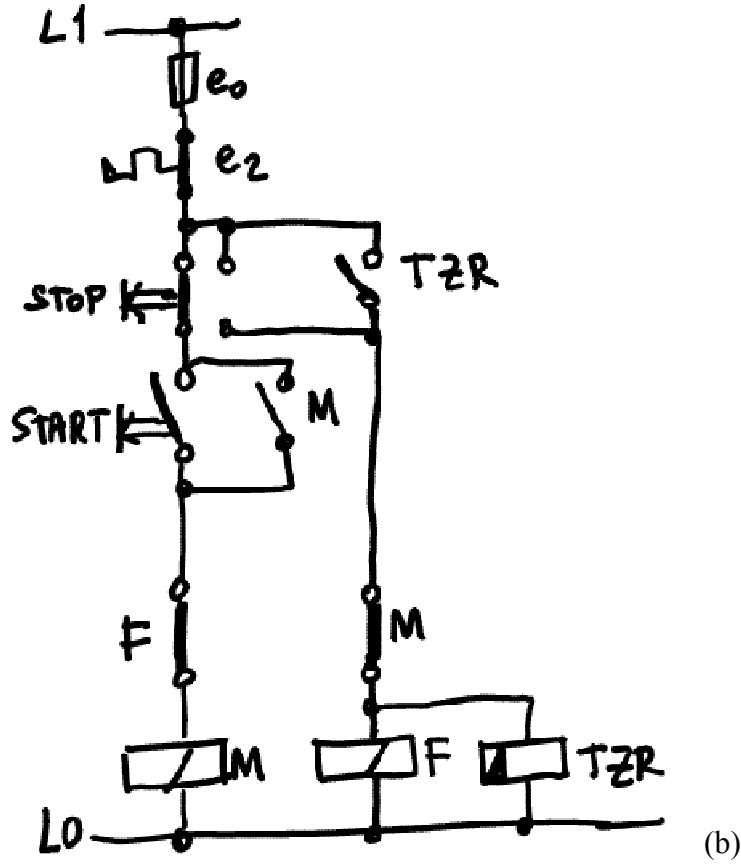
Frenleme esnasında motoru (elektriksel olarak) yüklemeyiz. Mekanik frenli motorların frenleri; diskli ve elektromıknatıslı lamelli olabileceği gibi konik rotorlu olan tipleri vardır. Asansör sistemleri ve yüksek hızlı matbaa makinelerinde kullanılırlar

### 5.4.2. Ters Akım ile Frenleme

Kontaktörlü ve zaman röleli bir otomatik kumanda düzeni ile stator fazlarından herhangi ikisi yer değiştirilerek döner alanın yönü ters değiştirilir. Rotor, döner alanı takip edeceğinden, dönüş yönünü (biriktirdiği kinetik enerjiyi ısıya çevirdikten sonra) değiştirmek isteyecek ve devir sayısı sıfırdan geçerken otomatik kumanda düzeni motoru devre dışı bırakacaktır.



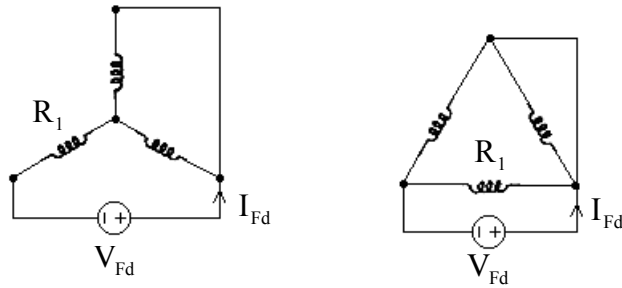
(a)



Şekil 5.15 Ters akımla frenleme; a) Güç devresi b) Kumanda devresi

### 5.4.3. Doğru Akım ile Frenleme

Bu yöntemde motor sargıları uygun şekilde birleştirildikten sonra bu uçlara  $V_{Fd}$  doğru gerilimi uygulanır. Tabii ki bu işlemden önce motor şebekeden ayrılmış olmalıdır. Sargılar genellikle aşağıdaki gibi birleştirilir.



Şekil 5.16 Stator sargısına doğru akım uygulanırken kullanılan bağlamalar

$I_{Fd}$  akımı ;

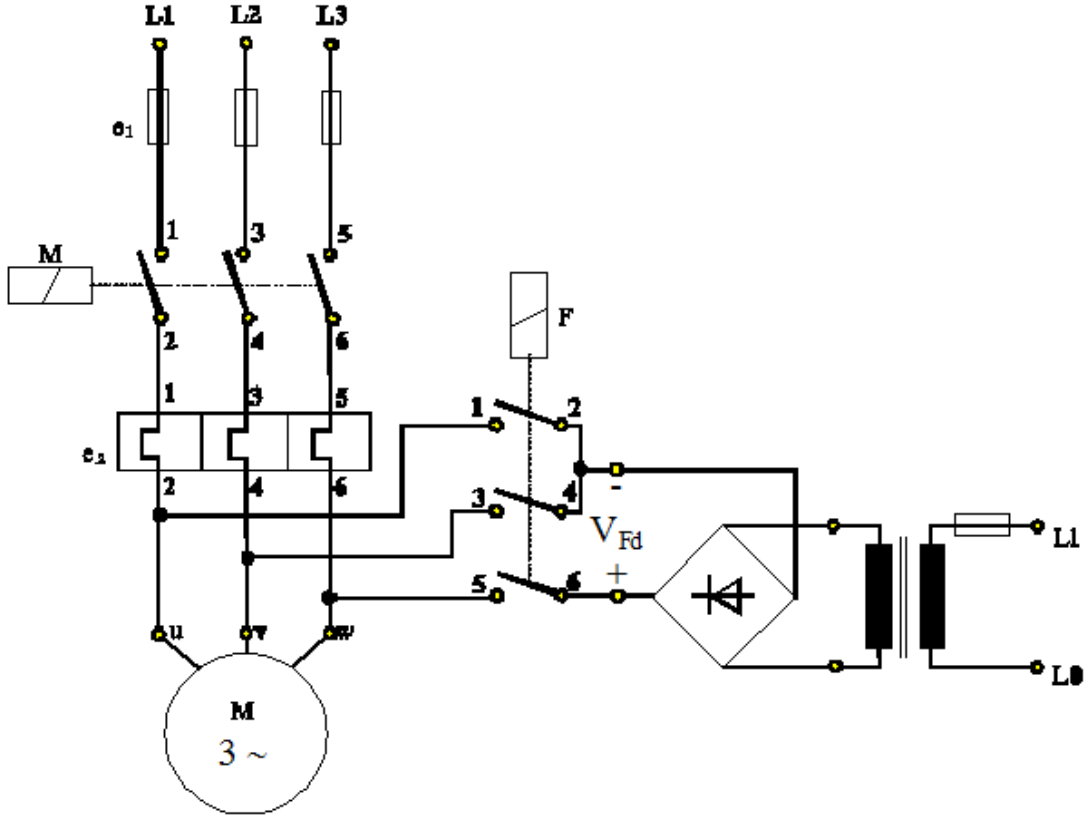
$$I_{Fd} = k \cdot I_{In} \quad (5.19)$$

olup, k; Şekil 5.15'deki (a) bağlaması için 1.225, (b) bağlaması için 2.12 olarak

verilmektedir. Frenleme gerilimi;

$$V_{Fd} = I_{Fd} \cdot R_{eş} \quad (5.20)$$

bağıntısı ile bulunur.  $R_{eş}$  ; (a) bağlamasında  $1.5 \cdot R_1$  ve (b) bağlamasında  $0.66 \cdot R_1$  olacaktır. Bağlama şeması aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.17 Doğru akım ile frenleme; (a) Güç devresi, b) Kumanda devresi ters akımla frenlemeye ait kumanda devresi ile aynıdır. (Şekil 5.14b)

## EK 1. SORU ve CEVAPLAR

Bu bölümde bazı sınavlarda çıkan sorular ve cevaplar verilmiştir. Çözümlerde MCAD paket programı kullanılmış olup, çözüm çıktılarının MCAD 'ten MsWORD'e dönüştürülmesinde bazı metin kayıpları ve anlam düşüklüğü oluşmuş olabilir.

### SA.Ü. MÜH. FAK. ELEKTRİK MAKİNALARI III YILIÇİ SINAVI 11.12.1996

1) 500V, 50Hz 'lik üç fazlı şebekede çalışan, yıldız bağlı, 8 kutuplu bir bilezikli asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri aşağıda verilmiştir.

$$R_1 = 0.25\Omega, \quad R'_2 = 0.18\Omega, \quad X_{\sigma 1} = 0.6\Omega, \quad X'_{\sigma 2} = 0.6\Omega, \quad X_m = 25\Omega$$

Bu motor 175Nm momentinde sabit bir yükü tahrik etmektedir.

<15p> a) Motorun bu yükü hareket ettirip ettiremeyeceğini belirleyiniz.

<05p> b) Sistemi ivmelendiren momentini,

<10p> c) Motorun çalışma hızını bulunuz.

<30p> 2) Etiket değerleri; 132kW, 500V, 50Hz, 176A, 2970d/dak, GF=0.93, verimi 0.93 olan üçgen bağlı 3 fazlı s.k.'li bir asenkron motorun boşa çalışma deneyinden  $P_0 = 7kW$ ,  $\varphi_0 = 72^\circ$  olarak ölçüldüğüne göre eşdeğer devre parametrelerini hesaplayınız ( $P_{stv} = 0$  alınacaktır).

3) 380V, 50Hz 'lik bir şebekede çalışan yıldız bağlı ve  $R_1 = 0.36\Omega$ ,  $R'_2 = 0.4\Omega$ ,  $X_{\sigma 1} = 0.42\Omega$ ,  $X'_{\sigma 2} = 0.42\Omega$ ,  $X_m = 15.8\Omega$

parametrelerine sahip 4 kutuplu bir s.k.'li bir asenkron motorun ;

<10p> a) Motorun yol alma akımını ve momentini,

<10p> b) devrilme momentini ve kaymasını bulunuz.

<10p> c) Kaymanın 0.08 olması durumunda üretilen momentini bulunuz.

<10p> 4) Asenkron makinenin güç bilançosunu diyagram halinde veriniz.



**TÜM SORULARDA L EŞDEĞER DEVRESİNİ KULLANINIZ, SÜRE 90' DİR**  
**SA.Ü. MÜH. FAK. ELEKTRİK MAKİNALARI III YILIÇI SINAVI ÇÖZÜMLERİ 1.12.1996**

**1. SORU**

$$V_1 := \frac{500}{\sqrt{3}} \text{ V (yıldız)} \quad p := 4 \quad X_m = 25 \quad \Omega \quad f := 50 \text{ Hz} \quad m_1 := 3 \quad m_2 := 3$$

$$R_1 := 0.25 \quad \Omega \quad R'_2 := 0.18 \quad \Omega \quad X\sigma_1 := 0.6 \Omega \quad X'\sigma_2 := 0.6 \Omega \quad My := 175 \text{ Nm}$$

**a)**

$$M(s) := \frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (V_1)^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X\sigma_1 + X'\sigma_2)^2 \right]}$$

$$Myv := M(1) \quad Myv = 352.611 \quad \text{Nm}$$

$Myv > My$  olduğundan motor yükü hareket ettiri

**b)**

$$Ma := Myv - My \quad Ma = 177.611 \quad \text{Nm} \quad \text{olur}$$

**c)**

$$\frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (V_1)^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X\sigma_1 + X'\sigma_2)^2 \right]} = My$$

$$\frac{\frac{1.8 \cdot 10^5}{s}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left[ \left( 0.25 + \frac{0.18}{s} \right)^2 + (0.6 + 0.6)^2 \right]} = 175$$

$$s_1 := 1.02 \cdot 10^{-2} \quad s_1 \text{ 0 ile 1 arasında olduğu için seçilir.}$$

$$s_2 := 2.108$$

$$ns := 60 \cdot \frac{f}{p} \quad ns = 750 \quad \text{d/dak} \quad n := ns \cdot (1 - s_1) \quad n = 742.35 \quad \text{d/dak olur.}$$

**2. SORU**

$$P_{\phi} := 132000 \text{ W} \quad V_1 := 500 \text{ V} \quad I_1 := \frac{173}{\sqrt{3}} \text{ A} \text{ sargı akımı cinsinden} \quad GF := 0.93 \quad \eta := 0.93$$

$$\text{üçgen bağlı } m_1 := 3 \quad P_0 := 7000 \text{ W} \quad \phi_0 := \frac{72}{180} \cdot \pi \text{ rad} \quad f := 50 \text{ Hz} \quad P_{st} := 0 \quad n := 2970 \text{ d/dak}$$

**ÇÖZÜM:**

$$n_s := 60 \cdot \frac{f}{p} \quad n_s := 3000 \quad 60 \cdot \frac{50}{p} = 3000 \quad p := 1 \quad n_s = 3 \cdot 10^3 \text{ d/d} \quad s := \frac{n_s - n}{n_s} \quad s = 0.01$$

$$\frac{P_0}{3} = \frac{500^2}{R_{fe}} \quad R_{fe} := \frac{500^2 \cdot 3}{P_0} \quad R_{fe} = 107.143 \text{ } \Omega$$

$$Q_0 := P_0 \cdot \tan(\phi_0) \quad Q_0 = 2.154 \cdot 10^4 \text{ Var} \quad \frac{|Q_0|}{3} = \frac{500^2}{X_m} \quad X_m := \frac{500^2 \cdot 3}{|Q_0|} \quad X_m = 34.813 \text{ } \Omega$$

$$P_m := P_{\phi} - P_{st} \quad P_m = 1.32 \cdot 10^5 \text{ W} \quad I'_2 := I_1 \text{ L tipi eşdeğer devre} \quad I'_2 = 99.882 \text{ A}$$

$$P_m = m_1 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1-s}{s} \quad R'_2 := \frac{\frac{P_m}{3}}{\frac{1-s}{s} (I'_2)^2} \quad R'_2 = 0.045 \text{ } \Omega \quad R_1 := R'_2$$

$$R_1 = 0.045 \text{ } \Omega$$

$$P_g := \frac{P_{\phi}}{\eta} \quad P_g = 1.419 \cdot 10^5 \text{ W} \quad \phi := \arccos(0.93) \quad Q_g := P_g \cdot \tan(\phi) \quad Q_g = 5.61 \cdot 10^4 \text{ Var}$$

$$Z := \frac{V_1}{I_1} \quad Z = 5.006 \text{ } \Omega \quad Z = \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_k)^2} \quad 5.006 = \sqrt{20.246 + (X_k)^2}$$

$$X_k := 2.194 \text{ } \Omega \quad X_{\sigma_1} := \frac{X_k}{2} \quad X_{\sigma_1} = 1.097 \text{ } \Omega \quad X'_{\sigma_2} := \frac{X_k}{2} \quad X'_{\sigma_2} = 1.097 \text{ } \Omega$$

**3. SORU**

$$V_1 := \frac{380}{\sqrt{3}} \text{ V (yıldız)} \quad p := 2 \quad X_m := 15.8 \, \Omega \quad f := 50 \text{ Hz} \quad m_1 := 3$$

$$R_1 := 0.36 \, \Omega \quad R'_2 := 0.4 \, \Omega \quad X_{\sigma_1} := 0.42 \, \Omega \quad X'_{\sigma_2} := 0.42 \, \Omega$$

**ÇÖZÜM**

**a)**

$$I(s) := \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma_1} + X'_{\sigma_2})^2}} \quad I_{yv} := I(1) \quad I_{yv} = 193.676 \text{ A}$$

$$M(s) := \frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (V_1)^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma_1} + X'_{\sigma_2})^2\right]} \quad M_{yv} := M(1) \quad M_{yv} = 286.558 \text{ Nm}$$

**b)**

$$S_d := \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_{\sigma_1} + X'_{\sigma_2})^2}} \quad S_d = 0.438$$

$$M_d := M(S_d) \quad M_d = 360.815 \text{ Nm}$$

**c)** Moment denkleminde kayma yerine konulursa

$$M(0.08) = 156.153 \text{ Nm}$$

yada Kloss denkleminde yaklaşık olarak

$$M := \frac{M_d \cdot 2}{\frac{0.08}{S_d} + \frac{S_d}{0.08}} \quad M = 127.634 \text{ Nm bulunur}$$

94 Şubat SAU FBE Y.Lisans Sınavı Sorusu ve Çözümü:

Yıldız bağlı, 220V (hat gerilimi), 10hp, 60Hz'lik rotoru sargılı bir asenkron motorun faz başına devre parametreleri, tarafına irca edilmiş hali ile aşağıda verilmiştir.

$$V_1 := \frac{220}{\sqrt{3}} \quad p := 3 \quad X_m = 13.25 \, \Omega \quad f := 60 \, \text{Hz} \quad m_1 := 3 \quad m_2 := 3$$

$$R_1 := 0.294 \, \Omega \quad R'_2 := 0.144 \, \Omega \quad X_1 := 0.503 \, \Omega \quad X'_2 := 0.209 \, \Omega$$

Mekanik ve demir kayıplarının toplamı bütün hızlar için 403 W' tır. Aşağıdaki soruları motorun yaklaşık eşdeğer de kullanarak cevaplayınız.

a) Motor  $n := 1164$  d/dak hızla çalışırsa kayma ne olur? Mekanik ve elektriksel kayıplar ihmal edilirse, motor boşta çalışırken kayma ve hız ne olur.

$$n_s := 60 \cdot \frac{f}{p} \quad n_s = 1.2 \cdot 10^3 \quad d/d \quad s := \frac{n_s - n}{n_s} \quad s = 0.03$$

Bütün kayıplar ihmal edilirse boştaki devir sayısı  $n_s$ 'e gider. Dolayısı ile kayma da sıfır olacaktır.

b) Motorun yolalma momentini bulunuz.

Bunun için moment bağıntısında  $s=1$  konulur:

$$M(s) := \frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (V_1)^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} \quad M(1) = 79.369 \, \text{Nm}$$

c) Maksimum yol alma momentini elde edebilmek için rotor devresine ilave edilecek yol verme direncini bulunuz. (stator/rotor dönüşüm oranı  $\bar{u} := 2$  dir.)

$$S_d := \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad S_d = 0.187$$

Moment formülünde  $S_d=1$  konursa:  $M(S_d) = 180.941 \, \text{Nm}$

Maksimum moment ile kalkış yapabilmek için  $M_k(R'_{yv}) = M_d$  olmalıdır.

$$\frac{m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2 + R'_{yv}}{1} \cdot (V_1)^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2 + R'_{yv}}{1} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} = M(S_d) = \frac{3 \cdot 3 \cdot \left( \frac{0.144 + R'_{yv}}{1} \right) \cdot 16133.3}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \left[ \left( 0.294 + \frac{0.144 + R'_{yv}}{1} \right)^2 + (0.503 + 0.209)^2 \right]} = 180.934$$

$$R'_{yv1,2} = \left( \frac{.618}{.634} \right) \quad \text{Bu dirençlerin ikisi de tutarlı olduğundan daha küçük kalkış akımı büyük olanı seçilebilir. Gerçek } R_{yv} \text{ ise;}$$

$$R_{yv} := \left( \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{\bar{u}^2} \right) \cdot 0.634 \quad \text{ifadesinden} \quad R_{yv} = 0.159 \, \Omega \quad \text{olarak elde edilir.}$$

NOT: Hesaplarda virgülden sonra az ondalık yada yuvarlamalar yapıldığında  $R'_{yv}$  karmaşık sayı olarak çıkmaktadır. durum bu problemde yanıltıcı olmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://webex.adamyosakarya.edu.tr/moodle/> (Eriřim: 20 Ocak 2009)
- [2] Mergen, A. Faik; Zorlu, Sibel, 'Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler', Birsan Yayınevi, 2005, İstanbul
- [3] Mergen, A. Faik; Zorlu, Sibel, 'Elektrik Makineleri III Senkron Makineler', Birsan Yayınevi, 2005, İstanbul
- [4] Mergen, A. Faik; Gizlier, Ediz; Bağcı, Nölüfer; 'Elektrik Makineleri Transformatörler ve Asenkron Makineler'de Çözömlü Problemler', Birsan Yayınevi, 2005, İstanbul
- [5] Mergen, A. Faik; Kocabař, A. Derya, Gizlier, Ediz; 'Senkron Makine Çözömlü Problemler'; Birsan Yayınevi, 2005, İstanbul
- [6] Sen, P.C., 'Principles of Electric Machines and Power Electronics', John-Wiley & Sons, 1989.
- [7] Fitzgerald, A. E., Kingsley, Jr. C., Umans, Jr. S., Umans, S, 'Electric Machinery', 6th Edition, Mc Graw - Hill, 2003