

- (c) Tüm değerlerin b şıklındaki gibi kaldığını ve besleme geriliminin 80 V'a düşürüldüğünü kabul ediniz. Çubuğu yeni sürekli durum hızı ne olur?  
 (d) b ve c şıklardan bir doğrusal makinanın (veya gerçek DA makinasının) hızını kontrol etmenin iki yöntemi için ne söyleyebilirsiniz?

## REFERANSLAR

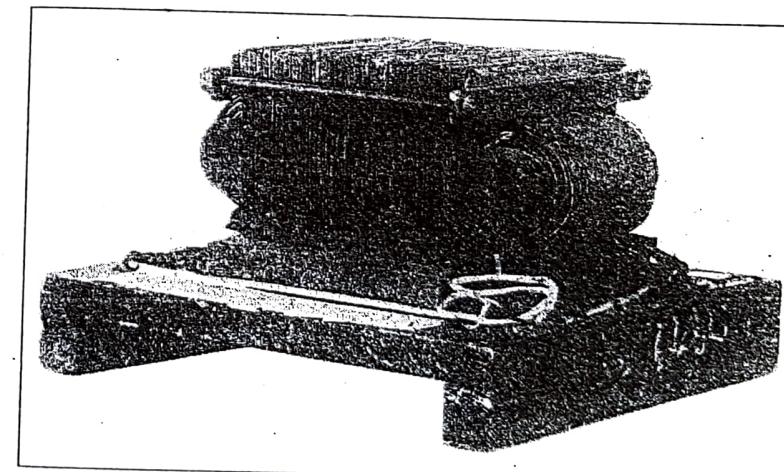
1. Alexander, Charles K., and Matthew N. O. Sadiku: *Fundamentals of Electric Circuits*, McGraw-Hill, 2000.
2. Beer, F., and E. Johnston, Jr.: *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1997.
3. Hayt, William H.: *Engineering Electromagnetics*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1989.
4. Mulligan, J. F.: *Introductory College Physics*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
5. Sears, Francis W., Mark W. Zemansky, and Hugh D. Young: *University Physics*, Addison-Wesley Reading, Mass., 1982.

## BÖLÜM 2

## TRANSFORMATÖRLER

*elektrik devresi : tesis ve problemler 30.10.2012  
 Elektroteknik 1 dersi  
 Ders notları  
 Elektroteknik 1 dersi  
 Elektroteknik 1 dersi  
 Elektroteknik 1 dersi*

**Bir transformator, değişken bir manyetik alan etkisiyle bir gerilim seviyesindeki AA elektrik gücünü diğer bir gerilim seviyesindeki AA elektrik gücüne dönüştüren bir alettir. Ortak bir ferromanyetik çekirdek üzerine sarılmış olan iki veya daha fazla bobinden ibarettir. Bu bobinler arasında elektriksel bir bağlantı yoktur. Bobinler arasındaki bağlantı sadece çekirdekteki ortak manyetik akıdır.**



**ŞEKİL 2-1**

1885'te William Stanley tarafından yapılan ilk pratik modern transformator. Çekirdeğin tek tek metal levhalardan (laminasyonlardan) oluştuğuna dikkat ediniz. (General elektrik şirketinin izini ile).

Transformatör sargılarından biri, AA güç kaynağuna bağlanır ve ikinci (varsayı üçüncü) transformatör sargası da yükün elektrik gücünü sağlar. Güç kaynağuna bağlı olan transformatör sargasına *birincil (primer) sargı veya giriş sargası* ve yükle bağlanan sargiya da *ikincil (sekonder) sargı veya çıkış sargası* denir. Eğer transformatörde üçüncü bir sargı varsa, bu sargı *tersiyer sargı* olarak isimlendirilir.

## 2.1 TRANSFORMATÖRLER NEDEN MODERN HAYAT İÇİN ÖNEMLİDİR?

Birleşik Devletlerde ilk güç dağıtım sistemi, Thomas A. Edison tarafından akkor flamanlı ampüllere güç sağlayan 120 V'luk bir DA sistemi idi. Edison'un ilk merkezi güç istasyonu Eylül 1882'de Newyork şehrinde çalışmaya başladı. Ne yazık ki; böyle düşük gerilimlerde güç üreten ve ileten bir güç sistemi, gücü bir yere iletmek için çok büyük akımlara gereksinim duymaktaydı. Bu yüksek akımlar, iletim hatlarındaki yüksek gerilim düşümleri ve güç kayiplarından dolayı üretim istasyonunun hizmet alanını oldukça sınırlıyordu. 1880'lerde, merkezi güç istasyonları bu problemin üstesinden gelmek için birkaç şehir bloğunu besleyecek şekilde yerleştirildi. Düşük gerilimli DA güç sistemleriyle uzak noktalara iletim oldukça güç olduğundan, enerji santralleri küçük ve yerel olmak zorundaydı. Ancak bunlar da göreceli olarak verimsizdi.

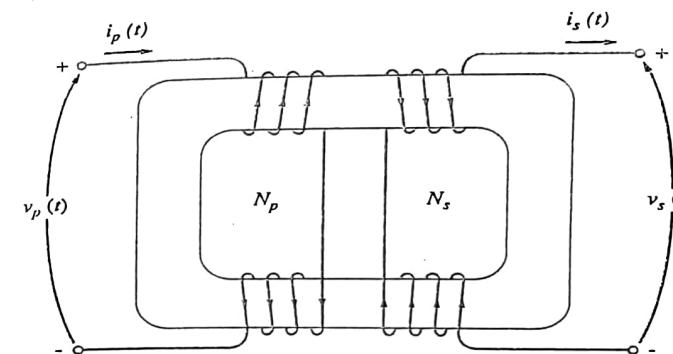
Transformatörün bulunması ve AA güç kaynaklarının oldukça hızlı gelişimiyle güç sistemlerinin güç seviyesi ve güç aralığındaki bu sınırlamalar tamamen ortadan kalkmıştır. Bir transformatör ideal olarak, primerden çekilen gerçek gücün değiştirmezsiz gerilimi bir AA seviyesinden bir diğer AA gerilim seviyesine değiştirir. Bir transformatör bir devrenin gerilim seviyesini artırırsa, giriş gücünü çıkış gücüne eşitlemek için akımı azaltmalıdır. Bundan dolayı, AA elektrik gücü bir merkezi yerde üretilebilir, çok düştük kayiplarla çok uzak mesafelere iletim için gerilimi artırılır ve son kullanım için gerilim tekrar düşürülür. Bir güç sisteminin hatlarındaki iletim kayipları hatlardaki akımın karesiyle orantılıdır. İletim gerilimini 10 kat artırıp, iletim akımını 10 kat azaltarak güç iletim kayiplarını 100 kat azaltmış oluruz. Transformatörler olmasaydı elektrik gücünün günümüzdeki kullanımını bu kadar kolay ve mümkün olmayacağı.

Modern bir güç sisteminde elektrik gücü 12 ile 25 kV gerilimler arasında üretilmektedir. Transformatörler çok küçük kayiplarda çok uzak mesafelere güç iletimi için gerilimi 110 kV ile 1000 kV arasındaki gerilim değerlerine yükseltmektedir. Daha sonra yerel dağıtım için transformatörler gerilimi 12 ile 34,5 kV arasındaki değerlere düşürürler ve sonuçta 120 V kadar düşük gerilimlerde evlerde, ofislerde ve fabrikalarda kullanılacak değerlere getirirler.

## 2.2 TRANSFORMATÖRLERİN YAPISI VE ÇEŞİTLERİ

Bir transformatörün temel amacı bir gerilim seviyesindeki AA gücünü aynı frekansta bir diğer gerilim seviyesindeki AA güçüne dönüştürmektir.

Aynı zamanda transformatörler başka amaçlar için de kullanılırlar. Örneğin,



ŞEKİL 2-2

Transformatör çekirdek yapısının oluşumu

gerilim örneklemme, akım örneklemme ve empedans dönüşümü. Fakat bu bölüm öncelikle güç transformatörlerine ayrılmıştır.

Güç transformatörleri iki tip çekirdek türünden birine göre imal edilirler. Çekirdek yapılarından biri, transformatör sargasının dikdörtgen çekirdeğin iki tarafına sarıldığı basit bir dikdörtgen laminasyonlu çelik yapıdan ibarettir.

Bu üretim çeşidi, çekirdek tip üretim olarak bilinir ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Diğer çekirdek yapısı, sargasın orta bacagının etrafına sarıldığı üç haccaklı laminasyonlu çekirdektenden ibarettir. Bu çekirdek türü Shell tipi çekirdek yapısı olarak bilinir ve bu yapı Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Her iki yapıda da, çekirdek, girdap akım kayiplarını minimize etmek için birbirlerinden elektriksel olarak izole edilmiş ince laminasyonlardan yapılmıştır.

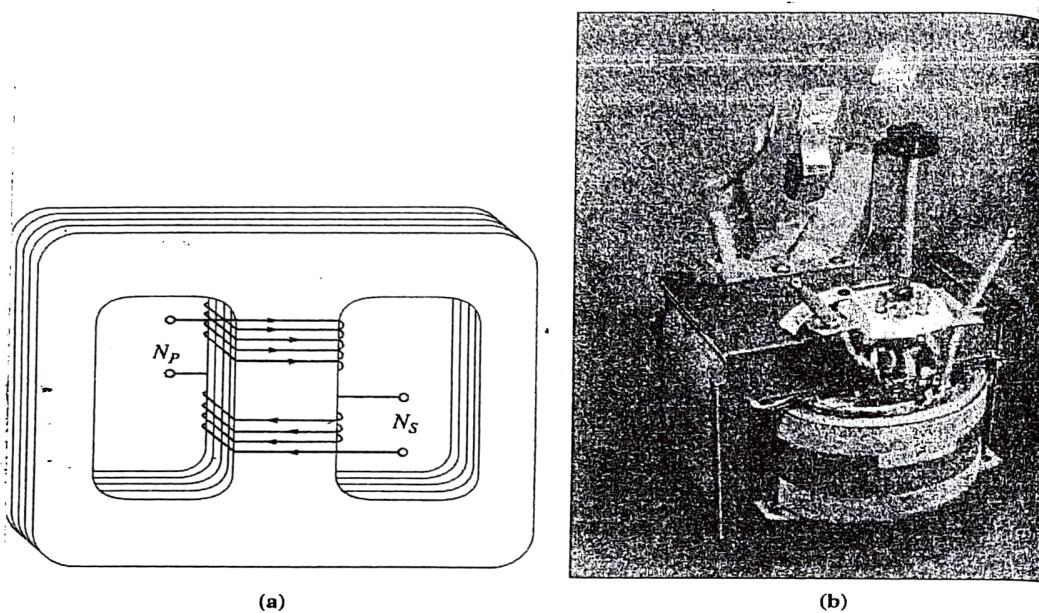
Fiziksel bir transformatördeki primer ve sekonder sargaslar düşük gerilim sargası en içte kalacak şekilde biri diğerinin üzerine paketlenir. Böyle bir sarım şeclinin iki amacı vardır:

**Yüksek gerilim sargasını çekirdektenden izole problemini basitleştirmek.**

**İki sarginin çekirdek üzerinde belirli bir aralıkta yerleştirildikleri duruma göre çok daha küçük kaçak akı meydana gelmesini sağlamak.**

Güç transformatörleri; güç sisteminde kullanımlarına bağlı olarak farklı isimlerle isimlendirilir. Generatorün çıkışına bağlanan ve gerilimini iletim hattının seviyesine (110+kV) yükseltmek için kullanılan bir transformatör bazen *birim transformatörü* olarak isimlendirilir. Gerilimi, iletim hattındaki gerilim seviyeinden; dağıtım hattı gerilim seviyelerine (2,3 kV ile 34,4 kV arası) düşüren transformatör *alt istasyon* dağıtım transformatörü olarak isimlendirilir. Sonuç olarak; dağıtım gerilimini alıp, gücün gerçek olarak kullanıldığı son gerilim değerine düşüren transformatör, *dağıtım transformatörü* olarak isimlendirilir. Bu cihazların tümü aslında aynıdır. Aralarındaki tek fark onların kullanım amacındadır.

Elektrik makineleri ve güç sistemlerinde, değişik güç transformatörlerine ek olarak iki özel amaçlı transformatör daha kullanılır. Bu özel transformatörlerden birincisi; yüksek bir gerilimi örnekleyp sekonderinde, primer gerilimiyle



ŞEKİL 2-3

(a) Shell-tipi şeklärdeki transformatörün yapısı (b) Tipik bir Shell-tipi transformatör (General Elektrik şirketinin izini ile)

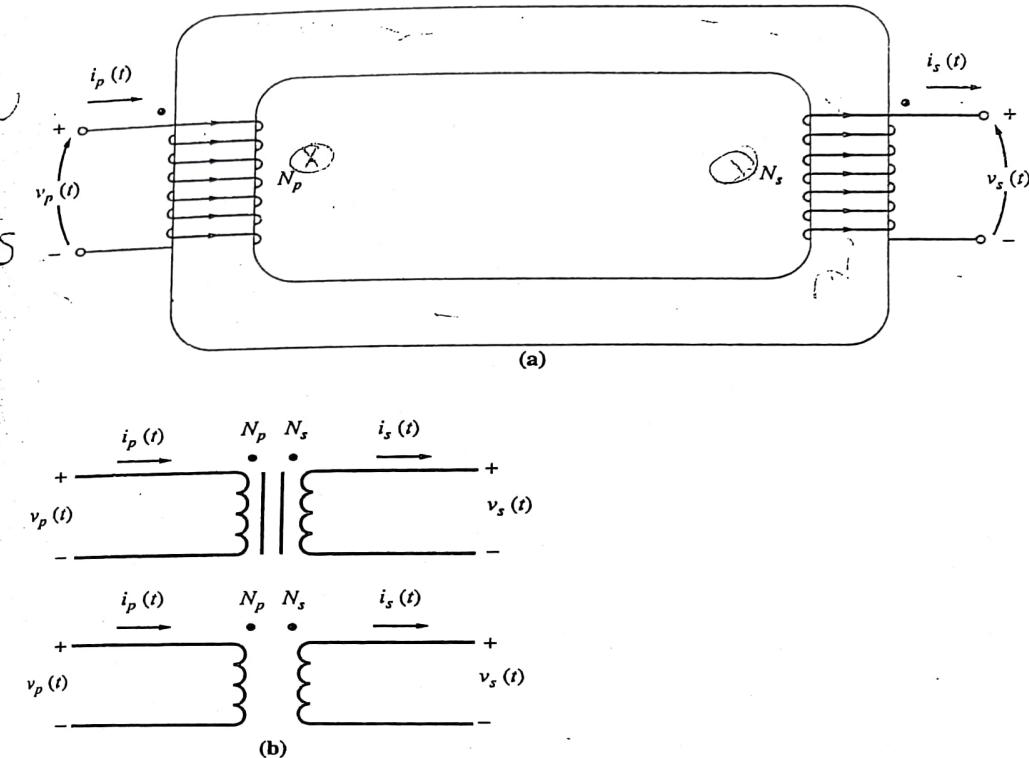
doğrudan orantılı düşük bir sekonder gerilim üretmek için özel olarak tasarlanmıştır. Böyle bir transformatör gerilim transformatörü olarak adlandırılır. Bir güç transformatörü de primer gerilimiyle doğrudan orantılı olan bir sekonder gerilimi üretir; ancak bir güç transformatörüyle bir gerilim transformatörü arasındaki fark gerilim transformatörünün sadece çok küçük bir akımla çalışmak üzere tasarlanmış olmasıdır.

Özel transformatörün ikincisi; primer akımıyla doğrudan orantılı fakat primer akımından çok daha küçük bir sekonder akımı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu transformatöre akım transformatörü denir. Özel amaçlı transformatörlerin her ikisi de bu bölümün son kısmında tartışılacektir.

### 2.3 İDEAL TRANSFORMATÖR

Ideal bir transformatör, bir giriş ve bir çıkış sargasına sahip kayıpsız bir cihazdır. Giriş ve çıkış gerilimi ile giriş ve çıkış akımı arasındaki bağıntılar iki basit denklem ile verilir. Şekil 2.4, ideal bir transformatörü gösterir.

Şekil 2.4'de gösterilen transformatör; primer tarafında  $N_p$ , sekonder tarafında ise  $N_s$  sarıma sahiptir. Transformatörün primerine uygulanan  $v_p(t)$  gerilimi ve



ŞEKİL 2.4

(a) Ideal bir transformatörün yapısı (b) Bir transformatörün devre sembollerı

sekonder tarafında induklenen  $v_s(t)$  gerilimi arasındaki bağıntı

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2-1)$$

olur. Burada, a'ya transformatörün sarım oranı denir.

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (2-2)$$

Transformatörün primer akımı  $i_p(t)$  ve sekonder akımı  $i_s(t)$  arasındaki bağıntı

$$N_p \cdot i_p(t) = N_s \cdot i_s(t) \quad (2-3a)$$

veya

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (2-3b)$$

olur. Fazör büyüklüklerine bağlı olarak, bu denklemler

$$\frac{V_p}{V_s} = a \quad (2-4)$$

ve

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (2-5)$$

dir. Burada  $V_p$ 'nin faz açısının  $V_s$ 'nin faz açısıyla ve  $I_p$ 'nin faz açısının da  $I_s$ 'nin faz açısıyla aynı olduğuna dikkat ediniz. Ideal transformatörün sarım oranı gerilimlerin ve akımların genliklerini etkiler, fakat açıları üzerinde bir etkisi yoktur.

(2-1) den (2-5)'e kadar olan denklemler, transformatörün primer ve sekonder taraflarındaki gerilim ve akımların genlik ve açıları arasındaki bağıntıları tanımlar. Fakat burada cevaplandırılmamış bir soru vardır: Bobinin belirli bir ucunda primer devrenin gerilimi pozitif olarak verilirse, sekonder devrenin polaritesi ne olacaktır? Gerçek transformatörlerde, transformatör açılıp, sargıları incelenseydi sekonderin polaritesi doğrudan söylenebilirdi. Böyle bir durumdan sakınmak için, transformatörlerde nokta gösterimi kullanılır. Şekil 2.4'deki her bir bobinin ucunda görünen noktalar transformatörün sekonder tarafındaki gerilim ve akımın polaritesini gösterir. Bağıntılar aşağıdaki gibidir.

1. Primer gerilim-sarginin, nokta konulmayan ucuna göre nokta konulan ucunda pozitif olursa, sekonder gerilim de noktalı ucta pozitif olacaktır. Gerilim polariteleri çekirdeğin her bir tarafındaki noktalara göre aynıdır.
2. Transformatörün primer akımı primer sarginin ucuna konulan noktaya doğru akarsa, sekonder akım sekonder sarginin ucuna konulan noktadan dışarıya doğru akacaktır.

Nokta gösteriminin fiziksel manası ve polaritelerin sebebi bölüm 2.4'de açıklanacaktır.

### İdeal Bir Transformatörde Güç

Primer devre giriş gücü,

$$P_{in} = V_p I_p \cos \theta_p \quad (2-6)$$

denklemiyle verilir.

Burada  $\theta_p$  primer gerilimiyle, primer akımının arasındaki açıdır. Transformatörün yüküne sekonder devresi tarafından sağlanan transformatör çıkış gücü;

$$P_{out} = V_s I_s \cos \theta_s \quad (2-7)$$

denklemiyle verilir.

Burada  $\theta_s$  sekonder gerilimi ile sekonder akımı arasındaki açıdır. Ideal bir trans-

matörde gerilim ve akım açıları değişmediğinden  $\theta_p - \theta_s = \theta$  dir. Ideal bir transformatörün primer ve sekonder sargıları aynı güç faktöründe sahiptirler.

Ideal transformatörün primerindeki giriş gücüyle transformatör çıkış gücü nasıl karşılaştırılır? Gerilim ve akım denklemlerinin basitçe incelemesiyle bu karşılaştırmayı yapmak mümkündür. [(2-4) ve (2-5) denklemleri]. Bir transformatörün çıkış gücü

$$P_{out} = V_s I_s \cos \theta \quad (2-8)$$

dir. Sarım oranın denklemlerinin kullanılmasıyla elde edilen  $V_s = V_p/a$  ve  $I_s = a I_p$  eşitlikleri kullanılarak

$$P_{out} = \frac{V_p}{a} (a I_p) \cos \theta$$

$$P_{out} = V_p I_p \cos \theta = P_{in} \quad (2-9)$$

elde edilir. Buna göre, ideal bir transformatörün çıkış gücü, giriş gücüne eşit olur.

Aynı bağıntı; Q reaktif gücü ve S görünür gücü için elde edilebilir:

$$Q_{in} = V_p I_p \sin \theta = V_s I_s \sin \theta = Q_{out} \quad (2-10)$$

$$S_{in} = V_p I_p = V_s I_s = S_{out} \quad (2-11)$$

### Bir Transformatör Üzerinden Empedans Dönüşümü

Bir cihaz veya bir elemanın empedansı; uçlarındaki gerilim fazörünün, empedanstan geçen akım fazörüne orani olarak tarif edilir:

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} \quad (2-12)$$

Bir transformatörün ilginç özelliklerinden biri akım ve gerilim seviyelerini değiştirmesidir. Akım ve gerilim seviyelerindeki bu değişim gerilim ve akım arasındaki oranı, dolayısıyla da bir elemanın görünür empedansını değiştirir.

Bu olayı anlamak için şekil 2.5'e bakınız. Sekonder akımı  $I_s$  ve gerilimi de  $V_s$  olarak isimlendirilirse yükün empedansı;

$$Z_L = \frac{V_s}{I_s} \quad (2-13)$$

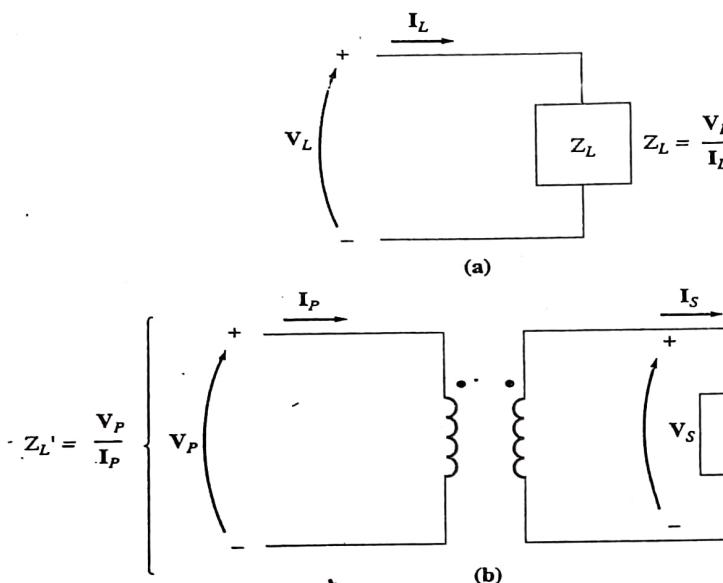
ile verilir. Transformatörün primer devresinin görünür empedansı;

$$Z'_L = \frac{V_p}{I_p} \quad (2-14)$$

olur. Primer gerilim,

$$V_p = a V_s$$

ve primer akımı,



**ŞEKİL 2-5**  
(a) Empedansın tanımı. (b) Bir transformator üzerinden empedans uyumu

olarak yazılabilceğinden; primerin görünür empedansı,

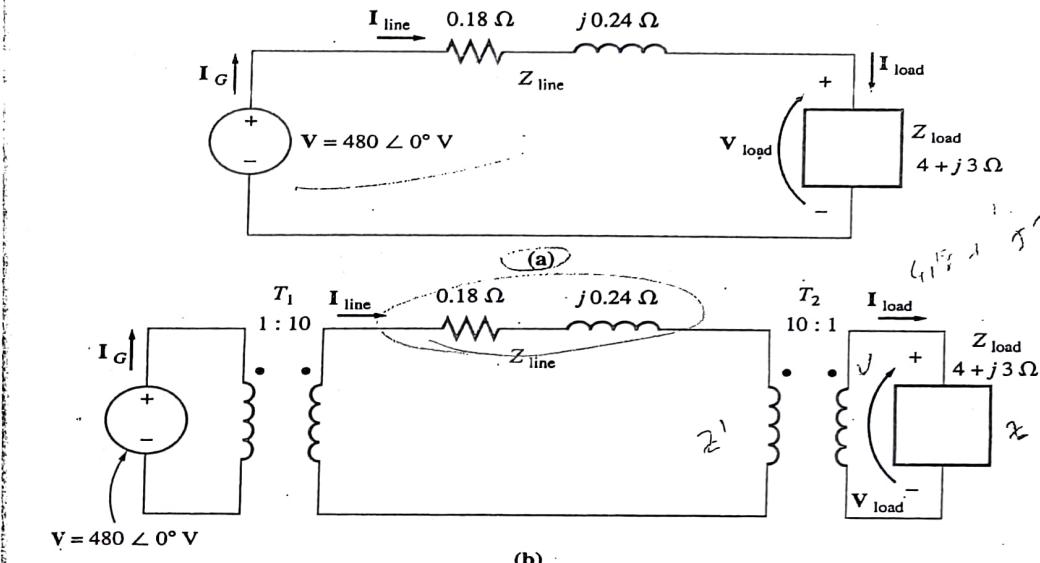
$$Z'_L = \frac{V_P}{I_P} = \frac{aV_S}{I_S/a} = a^2 \frac{V_S}{I_S} = a^2 Z_L \quad (2-15)$$

olar.

Bir transformator ile yük empedansının genliğini, sarım oranlarını uygun tutarak basitçe kaynak empedansına uydurmak mümkündür.

### İdeal Transformator İçeren Devrelerin Analizi

Bir devre ideal bir transformator içeriyorsa; transformatorun gerilimleri ve akımları için devreyi analiz etmenin en kolay yolu, transformatorun bir tarafındaki devre parçasını, aynı terminal karakteristikli bir eşdeğer devre ile yer değiştirmektir. Eşdeğer devre bir tarafa yerleştirildikten sonra, yeni devre (mevcut bir transformator olmaksızın) gerilimler ve akımlar için çözülebilir. Değiştirilmeyen devre kısımdan elde edilen çözümler orjinal devre için gerilim ve akımın doğru değerleri olacaktır. Bu durumda transformator sarım oranı, transformatorun diğer tara-



**ŞEKİL 2-6**  
Örnek 2.1'deki güç sistemi (a) Transformatörstüz iletim hattı (b) Transformatörlü iletim hattı

findaki gerilim ve akımları belirlemek için kullanılabilir. Bir transformatorun bir tarafının diğer tarafındaki gerilim seviyesine ilişkin eşdegeriyle değiştirilmesi transformatorun ikinci kısmının, birinci kısmına dönüştürülmesi olarak bilinir.

Eşdeğer devre nasıl oluşturulur? Eşdeğer devre şekil olarak orjinal devreye tam olarak aynıdır. Yer değiştirmiş taraftaki gerilim değeri (2-4) ve empedasların değerleri de (2-15) denklemleri ile verilir.

Eşdeğer devredeki gerilim kaynaklarının polariteleri; eğer transformator sarginının bir tarafındaki noktalar sarginın diğer tarafındaki noktalara göre ters olursa, orjinal devredeki yönüne göre ters olacaktır. Aşağıdaki örnekte ideal transformatörleri içeren devrelerin çözümü açıklanmaktadır.

**Örnek 2-1.** Tek fazlı bir güç sistemi;  $Z_{\text{line}} = 0.18 + j 0.24 \Omega$ 'luk empedansa sahip bir iletim hattı üzerinden  $Z_{\text{load}} = 4 + j 3 \Omega$ 'luk bir yükü besleyen  $480 \text{ V}, 60 \text{ Hz}$ 'lik bir generatörden ibarettir. Bu sistem için aşağıdaki soruları cevaplayıniz.

- Güç sistemi Şekil 2-6a'daki gibi tanımlanırsa, yük gerilimi ve iletim hattı kayipları ne olacaktır?
- Generatör çıkışına 1:10'luk yükseltici bir transformator ve iletim hattının 10:1'lik düşürücü bir transformator bağlandığını kabul ediniz. (Şekil 2-6b) durumda yük gerilimi ve iletim hattı kayipları ne olacaktır?

*Cözüm:*

(a) Şekil 2-6a, transformatörsüz güç sistemini gösterir. Burada  $I_G = I_{\text{line}} = I_{\text{load}}$ 'tür. Bu sistemdeki hat akımı

$$\begin{aligned} I_{\text{line}} &= \frac{V}{Z_{\text{line}} + Z_{\text{load}}} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(0.18 \Omega + j0.24 \Omega) + (4 \Omega + j3 \Omega)} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ}{4.18 + j3.24} = \frac{480 \angle 0^\circ}{5.29 \angle 37.8^\circ} \\ &= 90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

ile verilir. Dolayısıyla yük gerilimi;

$$\begin{aligned} V_{\text{load}} &= I_{\text{line}} Z_{\text{load}} \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(4 \Omega + j3 \Omega) \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(5 \angle 36.9^\circ \Omega) \\ &\approx 454 \angle -0.9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

ve iletim hattı kayipları

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}} &= (I_{\text{line}})^2 R_{\text{line}} \\ &= (90.8 \text{ A})^2 (0.18 \Omega) = 1484 \text{ W} \end{aligned}$$

(b) Şekil 2-6b, transformatörlü güç sistemini gösterir. Bu sistemi analiz etmek için, sistemi ortak bir gerilim seviyesine dönüştürmek gereklidir. Bu iki adımda yapılmıştır:

1. Yük, iletim hattına indirgenir. Bunun için  $T_2$  transformatörü elimine edilir
2. Kaynak tarafı iletim hattının geriliminde eşdeğer yükü ve iletim hattının empedanslarını dönüştürerek  $T_1$  transformatörü elimine edilir.

Yük empedans değeri, iletim sisteminin gerilime yansıtıldığında

$$\begin{aligned} Z'_{\text{load}} &= a^2 Z_{\text{load}} \\ &= \left(\frac{10}{1}\right)^2 (4 \Omega + j3 \Omega) \\ &= 400 \Omega + j300 \Omega \end{aligned}$$

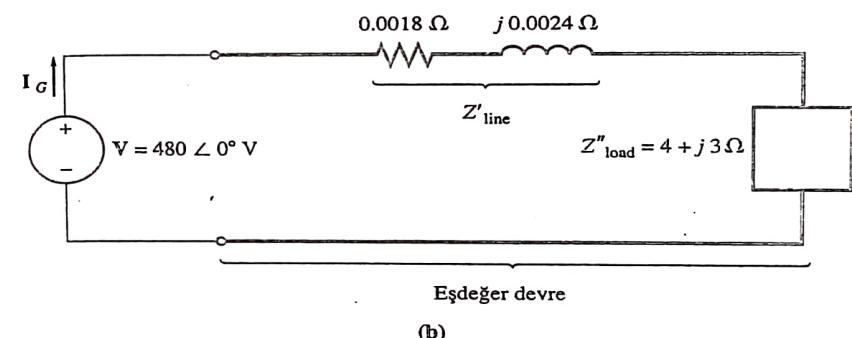
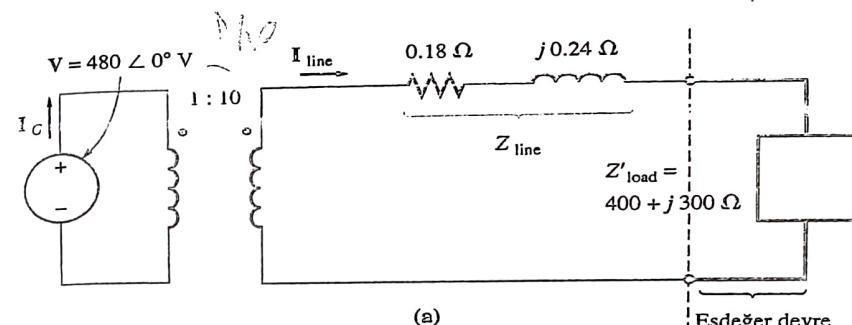
İletim hattı seviyesindeki toplam empedans aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} Z_{\text{eq}} &= Z_{\text{line}} + Z'_{\text{load}} \\ &= 400.18 + j300.24 \Omega = 500.3 \angle 36.88^\circ \Omega \end{aligned}$$

Eşdeğer devre Şekil 2-7a'da gösterilmiştir. İletim seviyesindeki (iletim hattına indirgenmiş)  $(Z_{\text{line}} + Z'_{\text{load}})$  empedansı şimdilik kaynağın gerilim seviyesindeki  $T_1$  uçlarına dönüştürülmür (indirgenir).

$Z''_{\text{load}} = 4+j3$  ohm ve  $Z'_{\text{line}} = 0.0018+j0.0024$  ohm olduğuna dikkat ediniz. Sonuç eşdeğer devre Şekil 2-7b'de gösterilmiştir. Generatörün akımı;

$$\begin{aligned} Z'_{\text{eq}} &= a^2 Z_{\text{eq}} \\ &= a^2(Z_{\text{line}} + Z'_{\text{load}}) \end{aligned}$$



ŞEKİL 2-7

(a) İletim sistemi gerilim seviyesine indirgenmiş yüklü sistem (b) generatör gerilim seviyesine indirgenmiş yük ve iletim hattına sahip sistem

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{1}{10}\right)^2 (0.18 \Omega + j0.24 \Omega + 400 \Omega + j300 \Omega) \\ &= (0.0018 \Omega + j0.0024 \Omega + 4 \Omega + j3 \Omega) \\ &= 5.003 \angle 36.88^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$I_G = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{5.003 \angle 36.88^\circ \Omega} = 95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A}$$

olur.  $I_G$  akımının bilinmesiyle şimdilik geri giderek  $I_{\text{line}}$  ve  $I_{\text{load}}$  akımını bulabiliriz.  $T_1$  üzerinden geri giderek,

$$N_{P1} I_G = N_{S1} I_{\text{line}}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{line}} &= \frac{N_{P1}}{N_{S1}} I_G \\ &= \frac{1}{10} (95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A}) = 9.594 \angle -36.88^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

elde edilir.  $T_2$  üzerinden geri gidilerek;

$$\begin{aligned} N_{P2} I_{\text{line}} &= N_{S2} I_{\text{load}} \\ I_{\text{load}} &= \frac{N_{P2}}{N_{S2}} I_{\text{line}} \\ &= \frac{10}{1} (9.594 \angle -36.88^\circ \text{ A}) = 95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

elde edilir.

Şimdi başta sorulan soruları cevaplandırmak mümkündür. Yük gerilimi

$$\begin{aligned} V_{\text{load}} &= I_{\text{load}} Z_{\text{load}} \\ &= (95.94 \angle -36.88^\circ \text{ A})(5 \angle 36.87^\circ \Omega) \\ &= 479.7 \angle -0.01^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

olarak elde edilir ve hat kayipları

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}} &= (I_{\text{line}})^2 R_{\text{line}} \\ &= (9.594 \text{ A})^2 (0.18 \Omega) = 16.7 \text{ W} \end{aligned}$$

şeklinde bulunur.

Güç sisteminin iletim gerilimini yükseltmenin, iletim hattı kayiplarını yaklaşık %90 oranında düşürdüğüne dikkat ediniz! Ayrıca transformatörlü sistemde yükteki gerilim düşümü, transformatörsüz sistemden çok daha düşüktür. Bu basit örnek, modern güç sistemlerinde transformatörlerin son derece önemini olduğunu ve yüksek-gerilim iletim hatlarını kullanmanın avantajlarını açıkça ortaya koyar.

## 2.4 GERÇEK TEK FAZ TRANSFORMATÖRLERİN ÇALIŞMASININ TEORİSİ

Bölüm 2-3'de tanımlanan ideal transformatörler şüphesiz gerçek hayatı imal edilemezler. Üretilenin gerçek transformatörlerin yapısı nasıldır? Bunlar ferromanyetik bir nüve üzerine sarılan iki ya da daha fazla bobin grubundan oluşurlar. Gerçek bir transformatörün karakteristiği bir dereceye kadar ideal bir transformatörün kijkeye yakılır. Bu bölümde gerçek transformatörlerin davranışları incelenecaktır.

Gerçek bir transformatörün çalışmasını anlamak için Şekil 2-8'i dikkate alınınız. Şekil 2-8 bir transformatör çekirdeğine sarılmış iki bobinden oluşan bir transformatörü gösterir. Transformatörün prizeri AA güç kaynağına bağlanmıştır ve sekonder sargası açık devredir. Transformatörün histeresis eğrisi Şekil 2-9'da gösterilmektedir.

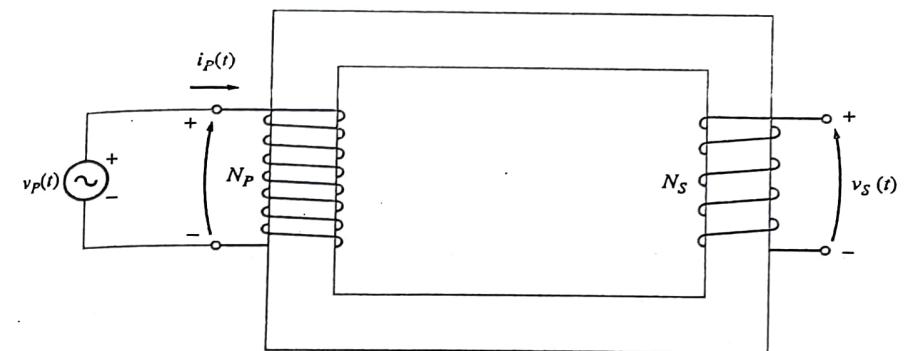
Transformatörün çalışma ilkeleri Faraday kanunundan türetilabilir:

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1-41)$$

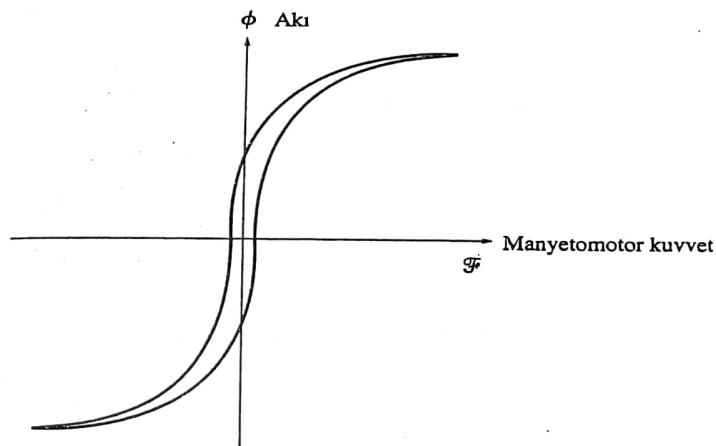
Burada  $\lambda$  gerilimin indüklendiği bobindeki halkalama akısıdır. Halkalama akısı  $\lambda$  bobindeki tüm sargılardan geçen akıların toplamıdır.

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (1-42)$$

Bir bobindeki toplam halkalama akısı sadece  $N\phi$  değildir, burada  $N$  bobinin



**ŞEKİL 2-8**  
Sekonderine yük bağlanmamış gerçek bir transformatör



**ŞEKİL 2-9**  
Transformatörün histerezis eğrisi

şarım sayısıdır. Çünkü bobinin her bir sarımından geçen akı bobin içinde sarımın konumuna bağlı olarak diğer sarımlardaki akıdan az da olsa farklıdır.

Bununla birlikte, bir bobinde sarım başına ortalama akımı tanımlamak mümkündür. Eğer bobinlerin tüm sargılardaki toplam halkalama akısı  $\lambda$  olursa ve  $N$  sarıma sahipse, o zaman sarım başına ortalama akı

$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N} \quad (2-16)$$

olur ve Faraday yasası

$$e_{\text{ind}} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-17)$$

olarak yazılabilir.

#### Bir Transformatörün Uçları Arasındaki Gerilim Oranı

Şekil 2-8'deki kaynak gerilimi  $V_p(t)$  olursa; bu gerilim doğrudan transformatörün primer sargasının bobinlerinin uçlarına uygulanan gerilim olarak ele alınabilir. Transformatör bu uygulanan gerilime karşı nasıl bir davranış gösterecektir? Faraday kanunu bu durumda ne olacağını açıklar. Denklem (2-17) transformatörün primer sargasındaki ortalama akı için çözüldüğünde, sonucu:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (2-18)$$

olur. Bu denklem, sarıdaki ortalama akının sarıya uygulanan gerilimin integrali ile doğru ve primer sarginın sarım sayısıyla ters orantılı olduğunu gösterir.

Bu akı transformatorun primer sargasında bulunmaktadır. Bu akı transformatorun sekonder sargasında ne tür bir etkiye sahiptir? Etkisi, akının ne kadarlık bir kısmının sekondere ulaşmasına bağlıdır. Primer sargedə üretilen akının tamamı sekonder sargedən geçmez; akı çizgilerinin bir kısmı demir çekirdeğin terk eder ve devresini havadan tamamlar (Şekil 2-10'a bakınız). Transformator çekirdeğindeki sargılardan sadece birinden geçen fakat değerinden geçmeyen akı parçasına kăçak akı denir. Böylece transformatorun primerindeki akı iki bileşene ayrılabilir: Birincisi her iki sargıyı halkalayan ve çekirdekte kalan ortak akı ve ikincisi de primer sargedən geçen; sekonder sargıyı kesmeyen ve havadan geri dönen küçük bir kăçak akıdır.

$$\bar{\phi}_P = \phi_M + \phi_{LP} \quad (2-19)$$

Burada,

$\bar{\phi}_n$  = Toplam ortalama primer aki

$\phi_M$  = Hem primer ve hem de sekonder bobinlerini halkalayan akı

$\phi_{1B}$  = Primer kaçak akı

dir.

Sekonder sargidan geçen fakat primer sargidan geçmeyeip havadan devresini tamamlayan kaçak akı ve ortak akı arasında, primer sargidakı yapıya benzer bir ayrisma vardır.

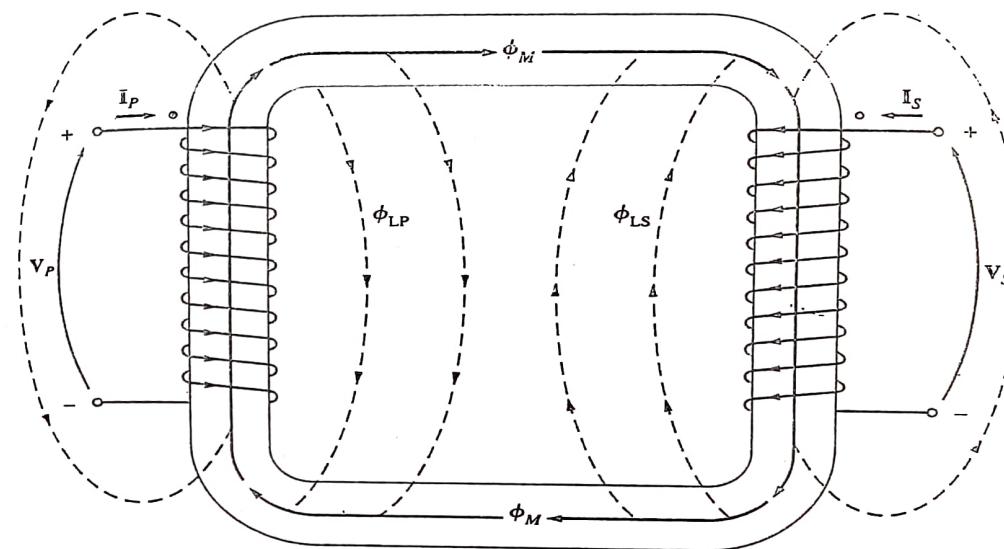
$$\bar{\phi}_S = \phi_M + \phi_{LS} \quad (2-20)$$

Burada,

$\bar{\phi}_s$  = Toplam ortalama sekonder akı

$\phi_M$  = Hem primer ve hem de sekonder bobinlerini halkalayan akı

$\phi_s$  = Sekonder kacak aki



**ŞEKİL 2.10**  
Bir transformatör çekirdeğindeki ortak ve kacak akımlar.

Ortalama primer akının; ortak ve kaçak bileşenlerine ayrıstırılmasıyla, primer devre için Faraday kanunu

$$\begin{aligned} v_P(t) &= N_P \frac{d\phi_P}{dt} \\ &= N_P \frac{d\phi_M}{dt} + N_P \frac{d\phi_{LP}}{dt} \end{aligned} \quad (2-21)$$

olarak tekrar yazılabilir. Bu denklemin birinci terimi  $e_P(t)$  ve ikinci terimi  $e_{LP}(t)$  olarak isimlendirilebilir. Buna göre (2-21) denklemi

$$v_p(t) = e_p(t) + e_{I,p}(t) \quad (2-22)$$

olarak yeniden yazılabilir. Transformatörün sekonder bobinindeki gerilim Faraday kanununa bağlı olarak yazılabılır:

$$v_s(t) = N_s \frac{d\phi_s}{dt} - N_M \frac{d\phi_M}{dt} + N_L \frac{d\phi_L}{dt} \quad (2.23)$$

$$\equiv e_c(t) + e_{\perp c}(t) \quad (2-24)$$

Ortak akının oluşturduğu primer gerilimi;

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt} \quad (2-25)$$

ve yine ortak akının oluşturduğu sekonder gerilimi;

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_M}{dt} \quad (2-26)$$

ile verilir. Bu eşitlikler dikkatle incelenirse;

$$\left( \frac{e_p(t)}{N_p} \right) = \left( \frac{d\phi_M}{dt} \right) = \left( \frac{e_s(t)}{N_s} \right)$$

olur ve bundan dolayı;

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2-27)$$

yazılabilir. Bu denklemin; ortak akının oluşturduğu primer geriliminin yine ortak akının oluşturduğu sekonder gerilime oranının, transformatörün sarım sayılarının oranına eşit olduğunu gösterir. İyi tasarlanmış bir transformatörde  $\phi_M \gg \phi_{LP}$  ve  $\phi_M \gg \phi_{LS}$  olduğundan, transformatörün primerindeki toplam gerilimin, transformatörün sekonderindeki toplam gerilime oranı yaklaşık olarak

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2-28)$$

olur. Transformatör kaçak akıları küçüldükçe; transformatör gerilim oranı Bölüm 2.3'te verilen ideal transformatörünkine gittikçe yaklaşır.

### Gerçek Bir Transformatördeki Mıknatışlanma Akımı

Bir AA güç kaynağı Şekil 2.8'de gösterildiği gibi bir transformatöre bağlandığında, sekonder devresi açık devre olsa bile, primere bir akım akmeye başlar. Bu akım 1. bölümde açıkladığı gibi, gerçek bir ferromanyetik çekirdekteki akımı üretecek akımdır. Bu akım iki bileşenden oluşur.

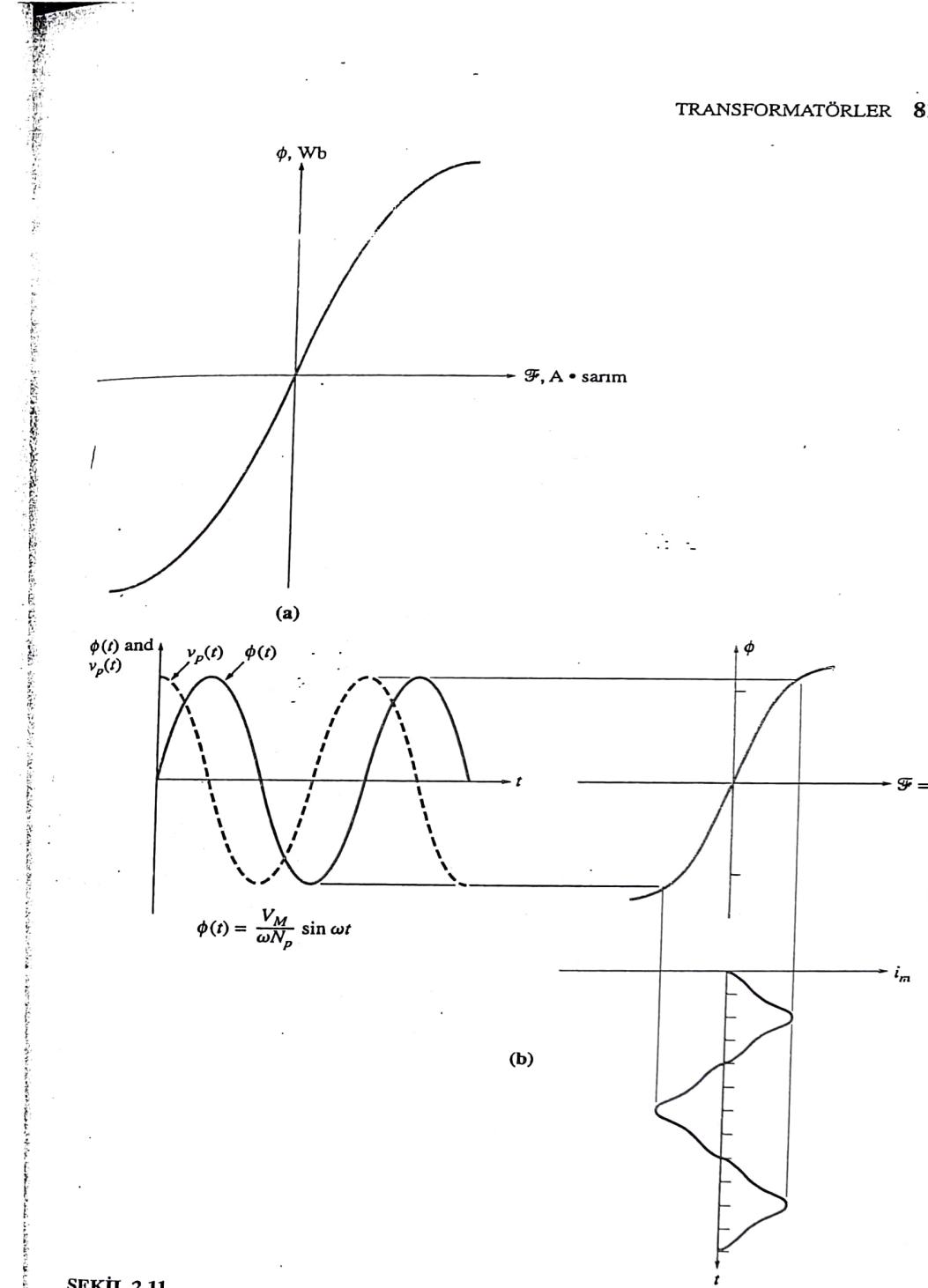
1. Transformatör çekirdeğindeaki üretmek için gerekli akım; yani mıknatışlanma akımı  $i_m$
2. Histerezis ve Girdap akım kayıplarını karşılamak için gereken çekirdek kaykı akımı  $i_{h+e}$

Şekil 2.11, tipik bir transformatör çekirdeğinin mıknatışlanma eğrisini gösterir. Transformatörün çekirdeğindeki akı bilinirse, mıknatışlama akımının genliği doğrudan Şekil 2.11'den bulunabilir.

Bir an için, kaçak akının etkileri ihmal edilirse, çekirdekteki ortalama akının

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (2-18)$$

ile verildiğini görürüz. Primer gerilim  $V$  ifadesi ile verilirse, sonuç akı;



SEKİL 2.11

(a) Transformatör çekirdeğinin mıknatışlama eğrisi (b) Transformatör çekirdeğindeki akı tarafından oluşturulan mıknatışlama akımı

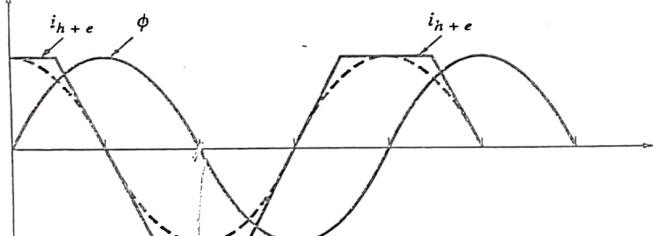
$$\begin{aligned}\bar{\phi} &= \frac{1}{N_p} \int V_M \cos \omega t dt \\ &= \frac{V_M}{\omega N_p} \sin \omega t \quad \text{Wb}\end{aligned}\quad (2-29)$$

olmalıdır. Verilen bir akayı (Şekil 2-11 a) üretmek için gereken akım değerleri, farklı anlarda çekirdekteki akı ile karşılaştırılırsa; çekirdek üzerindeki sargıda mıknatışlanma akımının değişimini elde etmek mümkün olur. Böyle bir değişim Şekil 2.11.b'de gösterilmiştir. Mıknatışlanma akımı için aşağıdaki noktalara dikkat ediniz;

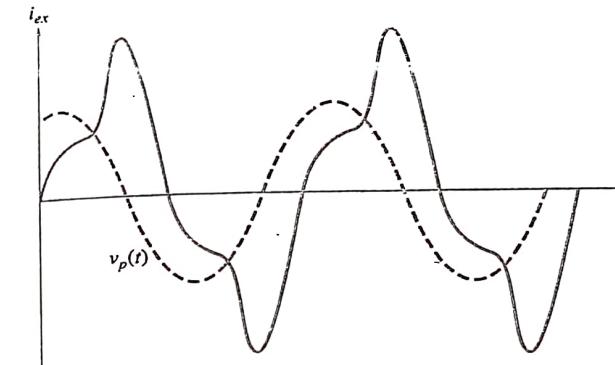
1. Transformatördeki mıknatışlanma akımı sinüzoidal değildir. Mıknatışlanma akımındaki yüksek frekanslı bileşenler, transformatör çekirdeğindeki manyetik doyumdan kaynaklanmaktadır.
2. Akının tepe değeri çekirdekteki doyum noktasına ulaştığında, tepe akıdaki küçük bir artış için tepe mıknatışlanma akımında çok büyük bir artışa gerekseme vardır.
3. Mıknatışlanma akımının temel bileşeni, çekirdek geriliminden  $90^\circ$  gerideye düşürür.
4. Mıknatışlanma akımındaki daha yüksek bileşenler temel bileşenle karşılaşıldığında gayet büyük olabilir.

Genelde, bir transformatör çekirdeği için doyum değerinden sonraki artış çekirdeği doyuma sokar, daha büyük harmonik bileşenler oluşur.

Transformatördeki boşta çalışma akımının diğer bileşeni çekirdekteki histeresiz ve girdap akım kayiplarını karşılamak için gereken akımdır. Bu akım çekirdek kaybı akımdır. Çekirdekteki akının sinüzoidal olduğunu kabul ediniz. Çekirdekteki girdap akımları  $d\phi/dt$  ile orantılı olduğundan, çekirdekteki akı 0 Wb değerinden geçtiğinde girdap akımları daha büyük olurlar. Dolayısı ile, çekirdek kaybı akımı akı sıfırdan geçerken en büyük değerindedir. Çekirdek kayiplarını karşılamak için gereken akım Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



ŞEKİL 2.12  
Bir transformatördeki çekirdek kaybı akımı



ŞEKİL 2.13  
Bir transformatördeki toplam uyartım akımı

Çekirdek kaybı akımı hakkında aşağıdaki noktalara dikkat ediniz.

1. Çekirdek kaybı akımı, histeresisin doğrusal olmayan etkilerinden dolayı non-lineerdir.
2. Çekirdek kaybı akımının temel bileşeni, çekirdeğe uygulanan gerilimle aynı fazdadır.

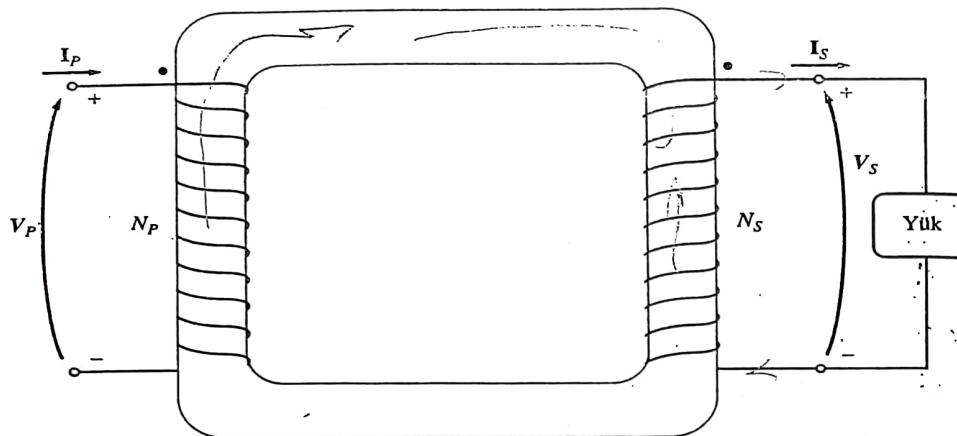
Çekirdekteki toplam boşta çalışma akımı, transformatörün uyartım akımı olarak isimlendirilir. Uyartım akımı, çekirdekteki mıknatışlama akımı ve çekirdek kaybı akımlarının toplamıdır.

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e} \quad (2-30)$$

Bir transformatör çekirdeğindeki toplam uyartım akımı Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

### Bir Transformatördeki Akım Oranı ve Nokta Gösterimi

Transformatörün sekonderine bir yükün bağlandığını kabul ediniz. Bu duruma ilişkin devre Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Transformatörün sargılarındaki noktalara dikkat ediniz. İdeal bir transformatorde önceden tanımlandığı gibi, noktalar, çekirdekteki sargılarda fiziksel olarak bir inceleme yapmaksızın akımlar ve gerilimlerin polaritelerini belirlemeye yardımcı olur. Nokta gösteriminin fiziksel anlamı; bir sarginin noktalı yerine akan akının pozitif bir manyetomotor kuvvet, nokta konulmamış ucuna akan akının da negatif manyetomotor kuvvet üremesidir. Dolayısı ile, kendi sargılarının noktalı kısımlarına doğru akan iki akım birbirine eklenen manyetomotor kuvvet'ler oluşturur. Eğer akımlardan biri noktalı ustan içeri, diğeri



**ŞEKİL 2-14**  
Sekonderine yük bağlı gerçek bir transformatör.

ri de noktalı yerden dışarı doğru akıyorsa o zaman manyetomotor kuvvet'ler birinden çıkarılır.

Şekil 2-14'teki transformatörde; primer akımı pozitif bir manyeto motor kuvvet  $\mathcal{F}_P = N_P I_P$  ve sekonder akımı negatif bir manyeto motor kuvvet  $\mathcal{F}_S = -N_S I_S$  üretir. Dolayısıyla çekirdekteki net manyeto motor kuvvet;

$$\mathcal{F}_{\text{net}} = N_P i_P - N_S i_S \quad (2-31)$$

olmalıdır. Bu net manyeto motor kuvvet çekirdekte net akımı üretir. Dolayısıyla bileske manyeto motor kuvvet;

$$\mathcal{F}_{\text{net}} = N_P i_P - N_S i_S = \phi \mathcal{R} \quad (2-32)$$

ifadesine eşit olmalıdır.

Burada  $\mathcal{R}$  transformatör çekirdeğinin relüktansıdır. İyi tasarılanmış bir transformatör çekirdeğinin relüktansı, çekirdek doyuncaya kadar çok küçük (yaklaşık sıfır) olduğundan; primer ve sekonder akımlar arasındaki bağıntı yaklaşık olarak çekirdek doymadığı sürece;

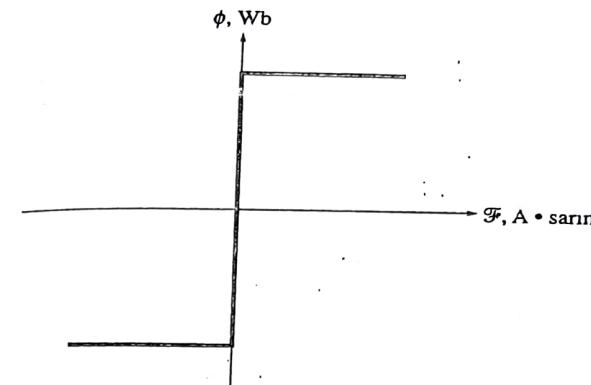
$$\mathcal{F}_{\text{net}} = N_P i_P - N_S i_S \approx 0 \quad (2-33)$$

olur. Bundan dolayı;

$$N_P i_P \approx N_S i_S \quad (2-34)$$

$$\frac{i_P}{i_S} \approx \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a} \quad (2-35)$$

veya



**ŞEKİL 2-15**  
İdeal bir transformatörün muknatsıslama eğrisi

dur. Çekirdekteki manyeto motor kuvvet 'in sıfır yakın olma gerçeği Bölüm 2.3'teki nokta gösterimini de açıklar. Manyeto motor kuvveti yaklaşık olarak sıfır yapmak için, akım sargılardan birinde noktalı kısımdan içeriye, diğerinden de noktalı kısımdan dışarı doğru akmalıdır. Her bir sargıda noktalara göre akımları gerekten yönde oluşturmak için gerilimler aynı şekilde uygulanmalıdır (Transformatör sargılarının yapısı görülebiliyorsa, gerilimlerin polariteleri Lenz kanununa göre de belirlenebilir).

Gerçek bir transformatörü önceden tanımlanan ideal bir transformatöre dönüştürmek için gerekli kabuller nelerdir? Bunlar aşağıdaki gibidir:

1. Çekirdek, histeresiz ve girdap akım kayıplarına sahip olmamalıdır.
2. Miknatıslama eğrisi Şekil 2.15 'te gösterilen keskinlige sahip olmalıdır. Doyma olmayan bir çekirdek için net MMK 'nın sıfır olduğuna ve bunun da  $N_P i_P = N_S i_S$  eşitliğini ortaya çıkardığını dikkat ediniz.
3. Çekirdekteki kaçak akı sıfır olmalıdır. Bu da tüm akının her iki sargıyı halkaladığı sonucunu ortaya koymaktadır.
4. Transformatör sargılarının direnci sıfır olmalıdır.

Bu şartlar asla tam olarak sağlanamaz ancak, iyi tasarılanmış bir güç transformatöründe bu sonuçlara oldukça yaklaşılabilir.

## 2.5 BİR TRANSFORMATÖRÜN EŞDEĞER DEVRESİ

Gerçek transformatörlerde oluşan kayıplar, transformatörlerin gerçek modellerinde hesaba katılmak zorundadır. Böyle bir modelin oluşturulmasında göz önüne alınan ana konular;

- Bakır Kayipları (PR)**: Bakır kayipları transformatörün primer ve sekonder sargı dirençlerinde ortaya çıkan ıslık kayiplardır. Sargılardan geçen akımın karesi ile doğru orantılıdır.
- Girdap Akım Kayipları**: Girdap akım kayipları transformatör çekirdeğindeki rezistif ıslık kayiplardır. Transformatöre uygulanan gerilimin karesi ile orantılıdır.
- Histerezis Kayipları**: Histerezis kayipları Bölüm 1'de açıklandığı gibi her bir yarı peryot boyunca çekirdekteki manyetik parçacıkların tekrar dizilişi ile ilgilidir. Bu kayiplar transformatöre uygulanan gerilimin kompleks ve doğrusal olmayan bir fonksiyonudur.
- Kaçak Açı**: Transformatör sargılarının sadece birinden geçen; çekirdek ve havaya aralığından devresini tamamlayan  $\phi_{LP}$  ve  $\phi_{LS}$  akıları kaçak akıllardır. Bu kaçak akılar primer ve sekonder bobinlerinde bir self induktans oluştururlar. Eşdeğer devrede induktansın etkileri hesaba katılmalıdır.

### Gerçek Bir Transformatörün Tam Eşdeğer Devresi

Gerçek transformatördeki başlıca eksikliklerin tümünü dikkate alan bir eşdeğer devre oluşturmak mümkündür. Her bir ana eksiklik sırayla göz önüne alınır ve etkisi transformatör modelinde gösterilir. En kolay modellenenek etki bakır kayiplarıdır. Bakır kayipları, transformatörün çekirdeğindeki primer ve sekonder sargılarında oluşan rezistif (önrik) kayiplardır. Bunlar, transformatörün primer devresine  $R_p$  ve sekonder devresine  $R_s$  direnci yerleştirilerek modellenir.

Bölüm 2.4'te açıklandığı gibi, primer sargılarındaki kaçak akı  $\phi_{LP}$ :

$$e_{LP}(t) = N_p \frac{d\phi_{LP}}{dt} \quad (2-36a)$$

ile verilen bir  $e_{LP}$  gerilimi üretir. Sekonder sargıdaki kaçak akı  $\phi_{LS}$ :

$$e_{LS}(t) = N_s \frac{d\phi_{LS}}{dt} \quad (2-36b)$$

ile verilen bir  $e_{LS}$  gerilim üretir.

Kaçak akı yolunun çoğu havadan geçtiğinden ve havanın relüktansı çekirdeğin relüktansından çok daha yüksek bir relüktansa sahip olduğundan,  $\phi_{LP}$  akısı primer devre akımı  $I_p$  ile ve  $\phi_{LS}$  akısı da sekonder devre akımı  $I_s$  ile orantılıdır.

$$\phi_{LP} = (\mathcal{P}N_p)i_p \quad (2-37a)$$

$$\phi_{LS} = (\mathcal{P}N_s)i_s \quad (2-37b)$$

Burada,

$\mathcal{P}$  = Akı yolunun geçirgenliği

$N_p$  = Primer sargıdaki sarım sayısı

$N_s$  = Sekonder sargıdaki sarım sayısıdır.

(2-37) eşitlikleri (2-36) eşitliklerinde yerine yazılırsa ;

$$e_{LP}(t) = N_p \frac{d}{dt}(\mathcal{P}N_p)i_p = N_p^2 \mathcal{P} \frac{di_p}{dt} \quad (2-38a)$$

$$e_{LS}(t) = N_s \frac{d}{dt}(\mathcal{P}N_s)i_s = N_s^2 \mathcal{P} \frac{di_s}{dt} \quad (2-38b)$$

elde edilir. Bu denklemdeki sabitler tek bir sabitle gösterilebilir. Bu durumda;

$$e_{LP}(t) = L_p \frac{di_p}{dt} \quad (2-39a)$$

$$e_{LS}(t) = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (2-39b)$$

elde edilir. Burada  $L_p = N_p^2 \mathcal{P}$  primer sargının self induktansı ve  $L_s = N_s^2 \mathcal{P}$  sekonder sargının self induktansıdır. Bu yüzden kaçak akı, primer ve sekonderdeki induktanslar ile modellenecektir.

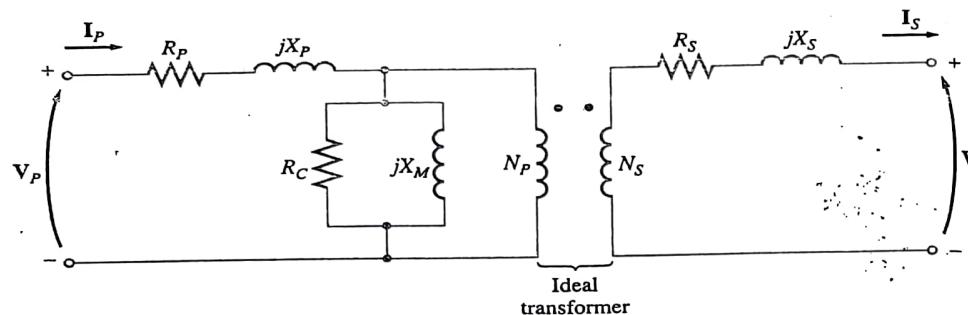
Cekirdeğin uyartımı hasil modellenebilir? Mıknatışlanma akımı  $I_m$ , çekirdeğe uygulanan gerilimle orantılı bir akımdır (döymuda olmayan bölgelerde) ve uygulanan gerilimden 90° geridedir. Bundan dolayı primer gerilim kaynağının uclarına bağlanan bir  $X_M$  reaktansı ile modellenebilir. Çekirdek kaybı akımı  $I_{h+e}$  uygulanan gerilimle aynı fazda olan, çekirdeğe uygulanan gerilimle orantılı bir akımdır. Dolayısı ile primer gerilim kaynağının uclarına bağlı bir dirençle modellenebilir. (Bu akımların her ikisinin de nonlinear olduğunu hatırlayınız.  $X_M$  induktansı ve  $R_C$  direnci gerçek uyartımın olsa olsaya yaklaşıklı etkilerini ortaya koyar.

Sonuç eşdeğer devre Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Uyartım kolundaki elementlerin primer direnç ve induktansının iç tarafına yerleştirildigine dikkat ediniz. Bunun nedeni, çekirdeğe uygulanan gerçek gerilimin, sargı gerilim düşümleri kadar giriş geriliminden daha az olmasıdır.

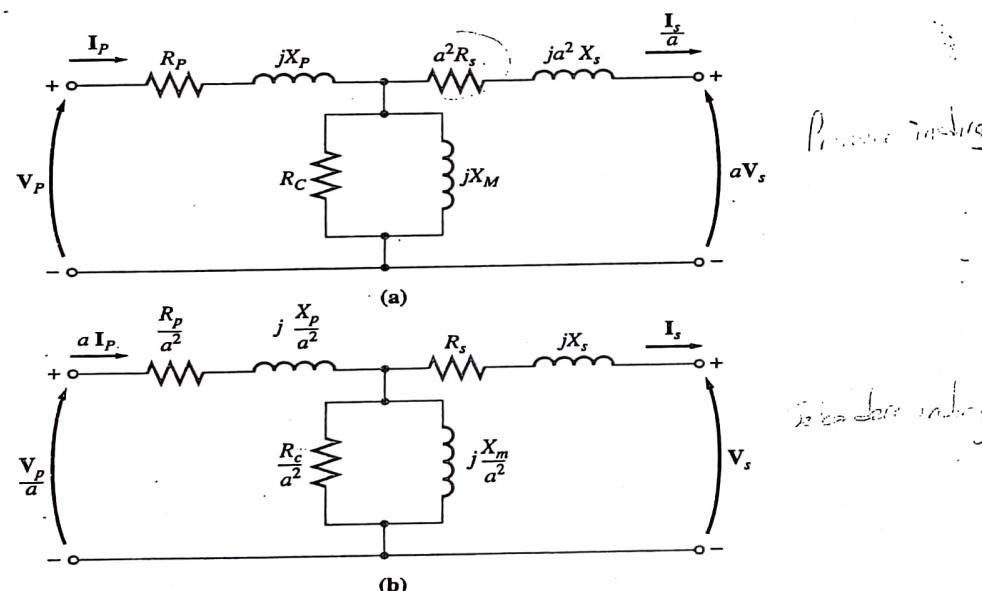
Şekil 2.16 bir transformatörün gerçek bir modeli olmasına rağmen, kullanılmış bir model değildir. Transformatörleri içeren pratik devreleri analiz etmek için, normal olarak devreleri tek bir gerilim seviyesine sahip bir eşdeğer devreye dönüştürmek gereklidir (Böyle bir dönüşüm Örnek 2.1'de yapılmıştır). Bu yüzden eşdeğer devre, problem çözümlerinde ya primer ya da sekonder tarafa dönüştürülmelidir. Şekil 2.17.a primere indirgenmiş eşdeğer devre, Şekil 2.17.b' de sekondere indirgenmiş eşdeğer devredir.

### Bir Transformatörün Yaklaşık Eşdeğer Devresi

Önceki bölümde verilen transformatör modelleri, pratik mühendislik uygulamalarında iyi sonuçlar elde etmek için gerekenden çok daha kompleksidir. Karmaşıklığa neden olan en önemli etken, uyartım devresinin modele eklendiği yerdir. Uyartım devresinin yeri; modeli, olduğundan daha karmaşık hale getirir. Uyartım kolu, yük akımıyla karşılaştırıldığında çok küçük bir akım değerine sahiptir. Gerçekte normal şartlar altında bu akım o kadar küçütür ki, bu değerden dolayı  $R_p$  ve  $X_p$  üzerindeki gerilim düşümleri ihmal edilebilir. Çünkü bu gerçekten de böyledir. Hemen hemen orijinal model kadar iyi çalışan bir eşdeğer devre oluşturulabilir.



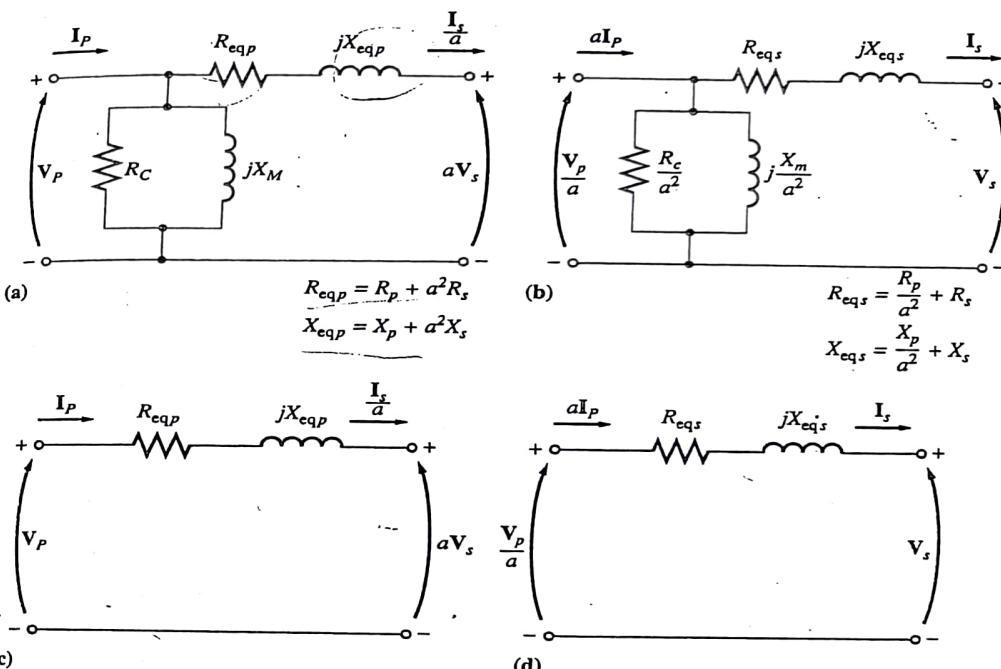
**ŞEKİL 2.16**  
Gerçek bir transformatörün modeli



**SEKİL 2.17** (a) Primer gerilim seviyesine indirgenmiş transformatör modeli (b) Sekonder gerilim seviyesine indirgenmiş transformatör modeli

Uyartım kolu basitçe transformatörün ön kısmına getirilir ve bu durumda prime ve sekonder empedanslar birbirleriyle seri hale gelmiş olur. Bu empedanslar bir birine eklenirler ve Sekil 2.18a ve b' deki yaklaşık eşdeğer devreleri oluştururlar.

Bazı uygulamalarda, uyartım-kolunun ihmali ciddi bir hata oluşturmaz. Bu durumlarda, transformatörün eşdeğer devresi Şekil 2.18 c ve d' deki basit devre-jere indirgenir.

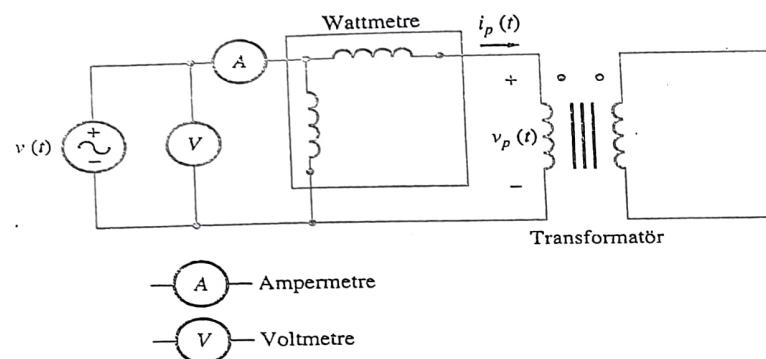


**ŞEKİL 2.18**  
Yaklaşık transformatör modelleri (a) Primer tarafa göre (b)Sekonder tarafa göre (c) Uyartım kolu olmaksızın primer tarafa göre (d) Uyartım kolu olmaksızın sekonder tarafa göre

### **Transformatör Modelindeki Parametrelerin Belirlenmesi**

Transformatör modelindeki induktansların ve dirençlerin değerlerinin deneyel olarak belirlenmesi mümkündür. Bu değerler; boş çalışma (açık-devre) ve kısa-devre deneylerinden elde edilebilir.

Bosta çalışma deneyinde; transformatörün sekonder sargası açık devre edilir ve primer sargasına nominal hat gerilimi uygulanır. Şekil 2.17’deki eşdeğer devre bakınız. Tanımlanan şartlar altında, giriş akımının tamamı transformatörün



ŞEKİL 2.19..  
Transformatör boşta çalışma deneyinin bağlantı şeması

uyartım kolundan akar. Seri bağlı  $R_p$  ve  $X_p$  elemanları  $R_c$  ve  $X_m$  ile karşılaştırıldığında çok çok küçüktür. Yani esas olarak tüm giriş gerilimi hemen hemen uyartım kolunda düşer.

Boşta çalışma deneyinin bağlantıları Şekil 2.19'da gösterilmektedir. Transformatörün primerine nominal hat gerilimi uygulanır ve transformatörün giriş gerilimi, giriş akımı ve giriş gücü ölçülür. Bu bilgiden, giriş akımının güç faktörünü ve dolayısıyla da uyartım empedansının hem genliğini hem de açısını belirlemek mümkün olur.

$R_c$  ve  $X_m$  değerlerini belirlemenin en kolay yolu öncelikle, uyartım kolunun admitansına bakmaktır. Çekirdek kayıp direncinin iletkenliği

$$G_C = \frac{1}{R_C} \quad (2-40)$$

ile, miknatışlanma induktansının suseptansı da,

$$B_M = \frac{1}{X_M} \quad (2-41)$$

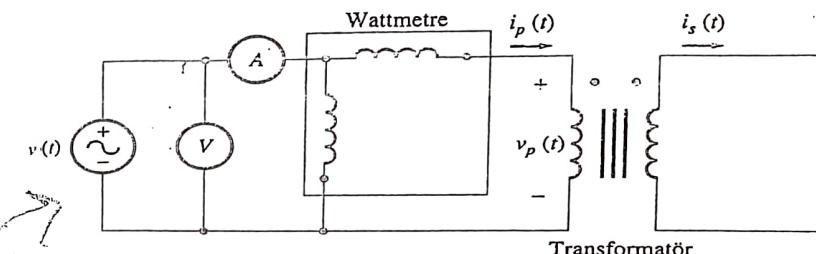
ile verilir. Bu iki eleman paralel olduklarından, admitansları toplanır ve böylece toplam uyartım admitansı,

$$Y_E = G_C - jB_M \quad (2-42)$$

$$= \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M} \quad (2-43)$$

olur.

Uyartım admitansının genliği (primer devreye göre), boşta çalışma test gerilimi ve akımından bulunabilir.



ŞEKİL 2.20  
Transformatör kısa-devre deneyi bağlantı şeması

$$|Y_E| = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \quad (2-44)$$

Admitansın açısı, devrenin güç faktöründen bulunabilir. Açık-devre güç faktörü (PF)

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2-45)$$

ve güç faktörü açısı (1)

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2-46)$$

ile verilir. Güç faktörü gerçek bir transformator için daima geri fazdadır. Dolayısıyla akımın açısı daima  $\theta$  kadar gerilim açısından geride olur. Bu yüzden  $Y_E$  admitansı

$$\begin{aligned} Y_E &= \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta \\ &= \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\cos^{-1} PF \end{aligned} \quad (2-47)$$

olur. (2-43) ve (2-47) denklemelerin karşılaştırılmasıyla; boşta çalışma deneyi ile elde edilen veriler kullanılarak doğrudan  $R_c$  ve  $X_m$  değerlerini belirlemek mümkün olur.

Kısa devre deneyinde; transformatorun sekonder uçları kısa devre edilir ve (Şekil 2.20'de gösterildiği gibi) primer uçları oldukça düşük bir gerilim kaynağına bağlanır. Giriş gerilimi, kısa devre olan sargılardaki akım anma (nominal) degerine gelinceye kadar artırılır (bu esnada primer gerilimini güvenilir bir seviyede tuttuğunuzdan emin olunuz). Deney yaparken transformatorun sargılarını yakmak iyi bir iş olamaz. Burada tekrar giriş gerilimi, akımı ve güç faktörü ölçülür.

Giriş gerilimi kısa-devre deneyi esnasında çok küçük olduğundan, uyartım kolundan ihmali edilemeyecek bir akım akar. Uyartım akımı ihmali edilirse, transformatordeki gerilim düşümünün tamamı devredeki seri elemanlarla ilişkilendirilir. Transformatörün primerine göre seri empedansların genliği aşağıdaki gibi olur:

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2-48)$$

Akımın güç faktörü ise

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2-49)$$

şeklindedir ve bu değer geridedir. Yani akım açısı negatiftir dolayısıyla empedansın açısı pozitif olur.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2-50)$$

Bundan dolayı,

$$Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \theta^\circ \quad (2-51)$$

dir. Seri empedans  $Z_{SE}$ ,

$$\begin{aligned} Z_{SE} &= R_{eq} + jX_{eq} \\ &= (R_p + a^2 R_s) + j(X_p + a^2 X_s) \end{aligned} \quad (2-52)$$

ye eşittir.

Bu teknigi kullanarak primere göre (primere indirgenmiş) toplam seri empedansı bulmak mümkünür fakat seri empedansı primer ve sekonder büyüklüklerine (bileşenlerine) ayırmak için kolay bir yol yoktur. Zaten normal problemlerin çözümünde böyle bir ayrıştırma da gerekli değildir.

Gerilim seviyeleri veya diğer nedenlerden dolayı bu deneylerin sekonder tarafta yapılması daha uygunsa, bu testler sekonder tarafta da yapılabilir. Deneyler sekonder tarafta yapıldığı takdirde sonuçlar, primere indirgenmiş-değerler yerine sekondere göre elde edilmiş olacaktır.

**Örnek 2-2:** 20 kVA, 8000/240 V, 60 Hz'lik bir transformatörün eşdeğer devre empedansları bellilenecektir. Açık-devre ve kısa-devre deneyleri transformatörün primer tarafinda yapılmıştır ve aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

Boşta Çalışma Deneyi (Primer tarafta)	Kısa Devre Deneyi (Primer tarafta)
$V_{oc} = 8000 \text{ V}$	$V_{sc} = 489 \text{ V}$
$I_{oc} = 0.214 \text{ A}$	$I_{sc} = 2.5 \text{ A}$
$P_{oc} = 400 \text{ W}$	$P_{sc} = 240 \text{ W}$

Primer tarafa göre yaklaşık eşdeğer devre empedanslarını bulunuz ve bu devreyi çiziniz.

**Çözüm:**  
Boşta çalışma deneyinden elde edilen güç faktörü

$$\begin{aligned} PF &= \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} \\ &= \cos \theta = \frac{400 \text{ W}}{(8000 \text{ V})(0.214 \text{ A})} \\ &= 0.234 \text{ geride} \end{aligned} \quad (2-45)$$

dir. Uyartım admitansı

$$\begin{aligned} Y_E &= \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\cos^{-1} PF \\ &= \frac{0.214 \text{ A}}{8000 \text{ V}} \angle -\cos^{-1} 0.234 \\ &= 0.0000268 \angle -76.5^\circ \Omega \\ &= 0.0000063 - j0.0000261 = \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_M} \end{aligned} \quad (2-47)$$

ile verilir. Dolayısıyla,

$$\begin{aligned} R_C &= \frac{1}{0.0000063} = 159 \text{ k}\Omega \\ X_M &= \frac{1}{0.0000261} = 38.4 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

olur.

Kısa devre deneyinden elde edilen güç faktörü,

$$\begin{aligned} PF &= \cos \theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc}} \\ &= \cos \theta = \frac{240 \text{ W}}{(489 \text{ V})(2.5 \text{ A})} = 0.196 \text{ geride} \end{aligned} \quad (2-49)$$

dir. Seri empedans,

$$\begin{aligned} Z_{SE} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle -\cos^{-1} PF \\ &= \frac{489 \text{ V}}{2.5 \text{ A}} \angle 78.7^\circ \\ &= 195.6 \angle 78.7^\circ = 38.4 + j192 \Omega \end{aligned}$$

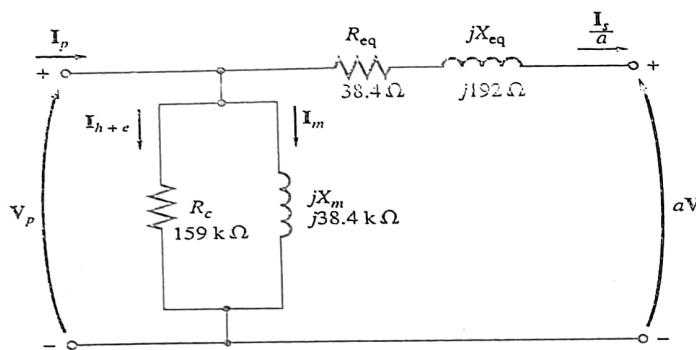
ile verilir. Buradan, eşdeğer direnç ve reaktans

$$R_{eq} = 38.4 \Omega \quad X_{eq} = 192 \Omega$$

olarak hesaplanır. Sonuç olarak basitleştirilmiş eşdeğer devre Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

## 2.6 BİRİM İNDİRGENMİŞ ÖLÇÜM SİSTEMİ

Göreceli olarak basit olan 2.1 örneğinde gösterildiği gibi, transformatör içeren devrelerin çözümü, sistemdeki transformatörlerin farklı taraflarındaki gerilim seviyelerine dönüştürmek gereksiniminden dolayı oldukça sıkıcı bir işlemidir. Ancak



**ŞEKİL 2.21**  
Örnek 2.2' deki problemin eşdeğer devresi

bu dönüşümden sonra sistemin akımları ve gerilimleri çözülebilir. Yapısında transformatör bulunan sistemlerde, transformatörlerdeki gerilim seviyelerine dönüşüm gereksinimini ortadan kaldırın bir yaklaşım daha vardır. Bu yaklaşımda her bir dönüşüm tek tek yapılması yerine, gereken dönüşümler kullanıcının empedans transformasyonunun getirdiği olumsuzluklarla karşılaşmaksızın yöntemin kendisi tarafından otomatik olarak yapılır. Böylece empedans transformasyonlarına gereksinim kalmayacağından, birçok transformator içeren devre daha az bir hata ihtiyalile kolaylıkla çözülebilir. Bu hesaplama yöntemi, ölçümlerin (büyüklüklerin) birime indirgenmiş (per-unit) sistemi olarak adlandırılır.

Elektrik makineleri ve transformatörler için gayet önemli olan birime indirgenmiş sistemin başka bir üstünlüğü daha vardır. Bir transformator veya makinenin boyutu değişirken, giriş empedansı geniş bir aralıktır değişir. 0.1 ohm'luk bir primer devre reaktansı bir transformator için yüksek bir değer olabilirken bir başka transformator için de oldukça düşük bir değer olabilir. Bu değer gerilim ve gücün anma değerlerine bağlıdır. Bununla birlikte, birime indirgenmiş değer, makine ve transformator empedanslarının oldukça dar bir aralıktar arasında değişir. Bu durum problem çözümlerinde faydalı bir kontrol olanağı sağlayabilir.

Birime indirgenmiş (Per-unit) sisteme, gerilimler, akımlar, güçler, empedanslar ve diğer elektriksel nicelikler bilinen SI birim sistemindeki gibi (Volt, Amper, Watt, Ohm) ölçülmeyecektir. Bunun yerine, her bir elektriksel nicelik birkaç temel seviyede ondalıklı bir kesir olarak ölçülür. Herhangi bir büyülüklük;

$$\text{Per unit değer} = \frac{\text{(Gerçek değer)}}{\text{(Baz değer)}} \quad (2.53)$$

denklemiyle per-unit olarak ölçülebilir. Burada gerçek değer, volt, amper, ohm birimli bir değerdir. Verilen bir per-unit sistemi tanımlamak için, genelde iki temel büyülüklük seçilir. Genellikle seçilenlerden biri gerilim diğer ise güç veya görünür

güçtür. Bu baz büyülüklükler bir kez seçilince, diğer baz büyülüklüklerin tümü elektriksel kanunlarla bu baz büyülüklüklerden türetilir. Tek fazlı bir sisteme, bu bağınırlar.

$$P_{\text{base}}, Q_{\text{base}}, \text{ or } S_{\text{base}} = V_{\text{base}} I_{\text{base}} \quad (2.54)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} \quad (2.55)$$

$$Y_{\text{base}} = \frac{I_{\text{base}}}{V_{\text{base}}} \quad (2.56)$$

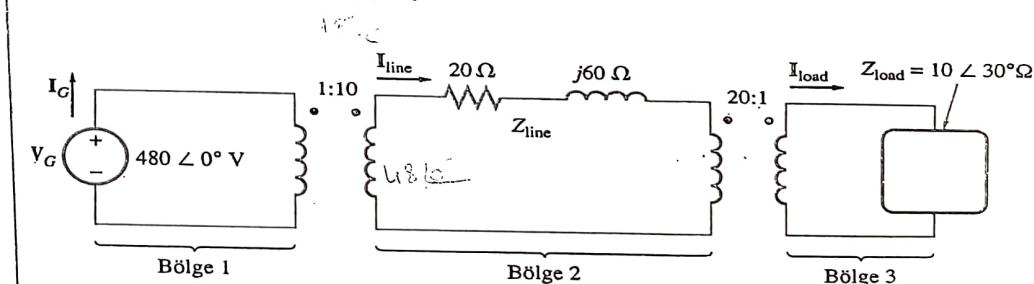
$$Z_{\text{base}} = \frac{(V_{\text{base}})^2}{S_{\text{base}}} \quad (2.57)$$

dir. Bir kez  $S$  (veya  $P$ ) ve  $V$ 'nin baz (esas) değerleri seçilince, diğer tüm baz değerler kolaylıkla 2.54' den 2.57' ye kadar olan denklemlerden hesaplanabilir.

Bir güç sisteminde, baz görünür güç ve baz gerilim, sistem için özel bir noktada seçilir. Bir transformatorun giriş görünür gücü transformatorun çıkış görünür gücüne eşit olduğundan [denklem 2.11] transformatorun, sistemin baz görünür gücü üzerinde bir etkisi yoktur. Diğer taraftan, transformator gerilim seviyesini değiştirdiğinden, baz gerilim değeri sarım oranına bağlı olarak her transformatörde değişir. Bir transformatordeki baz büyülüklükler değiştiğinden ortak bir gerilim seviyesine göre yapılan işlem per unit dönüşümde otomatik olarak gerçekleştirili.

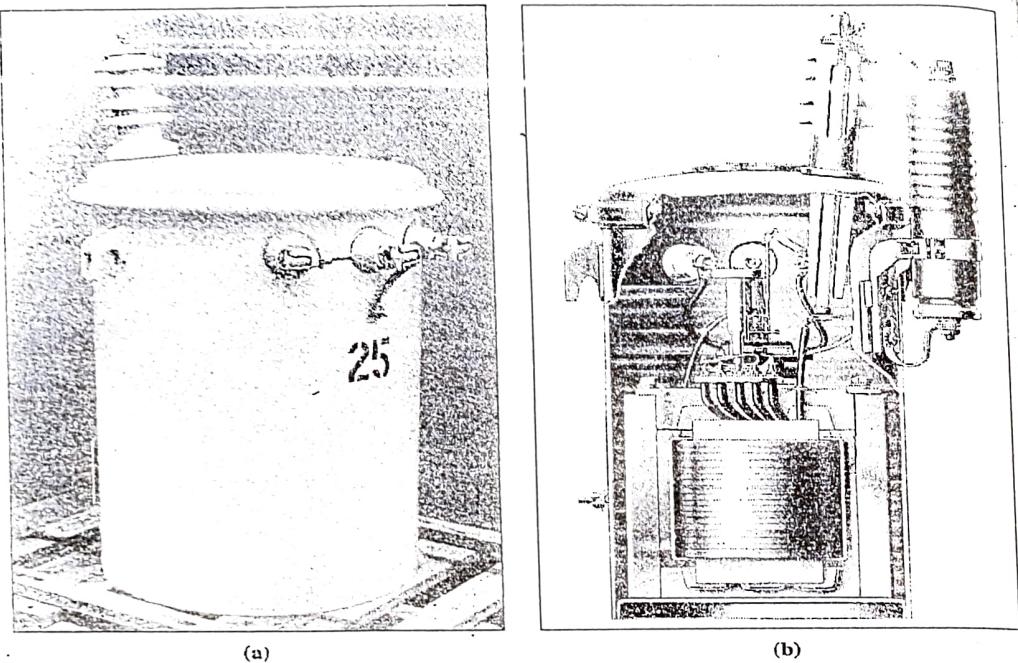
**Örnek 2.3:** Basit bir güç sistemi Şekil 2.22' de gösterilmektedir. Bu sistem, ideal bir 1:10' luk yükseltici transformatöre bağlanan 480 V'luk generatörü, bir iletim hattını, ideal bir 20:1' lik düşürücü transformatörü ve bir yükü içerir. İletim hattının empedansı  $20+j60 \Omega$  ve yükün empedansı  $10 \angle 30^\circ \Omega$ 'dur. Bu sistemin baz değerleri generatörde 10 kVA ve 480 V olarak seçilmişlerdir.

- Güç sistemindeki her bir noktada temel gerilim, akım, empedans ve görünür gücü bulunuz.
- Bu sistemin per-unit eşdeğer devresini elde ediniz.
- Bu sisteme yükle sağlanan gücün bulunuz.
- İletim hattındaki güç kaybını bulunuz.



**ŞEKİL 2.22**  
Örnek 2.3' ün güç sistemi





ŞEKİL 2-24

(a) Tipik bir 13.2-kV ile 120/240V dağıtım transformatörü (General Elektrik'in izniyle). (b) İçerisinde nüveli (çekirdek) transformatörü gösteren dağıtım transformatörünün kesit görünümü (General Elektrik'in izniyle)

nellikle 0.02 ile 0.10 pu arasındadır. Genelde büyük transformatörlerin seri empedansları daha küçüktür. Çekirdek kayıp direnci genelde yaklaşık olarak 50 ile 200 pu arasında değişirken, mıknatıslama reaktansı genellikle 10 ile 40 pu arasındadır. Per-unit değerler, farklı büyülüklüklerdeki transformatörlerin karakteristiklerinin karşılaştırılmasında uygun ve anlamlı bir yol sağladığından, transformator empedansları normalde per-unit veya transformatorun etiket değerinin bir yüzdesi olarak verilir (Bu bölümden sonra Şekil 2.46'ya bakınız).

Aynı düşünce senkron ve asenkron makinelere de uygulanır: Bu makinelein per-unit empedansları, gayet büyük değerlerde ama gayet dar bir aralıktır değişir.

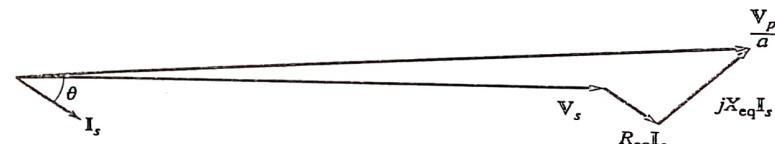
Bir güç sisteminde tek bir makina ve bir transformatörden daha fazla elektrik makinası bulunursa, sistemin baz gerilimi ve baz gücü keyfi seçilebilir; fakat tüm sistem, aynı baz değere sahip olmalıdır. Yaygın bir prosedür sistemin baz büyülüklülerini, sistemdeki en büyük bileşenin baz değerine eşit olacak şekilde seçmektedir. Diğer bir baz değer için verilen per-unit değerler ara bir adım olarak gerçek değerlerine (Volt, Amper, ohm v.s) ve yeni baz değerine dönüştürülebilir.

$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} I_s + jX_{eq} I_s \quad (2-64)$$

olarak bulunabilir. Bir transformatörün fazör diyagramını bu denklemin gorseli nae getirilmiş göstergedir.

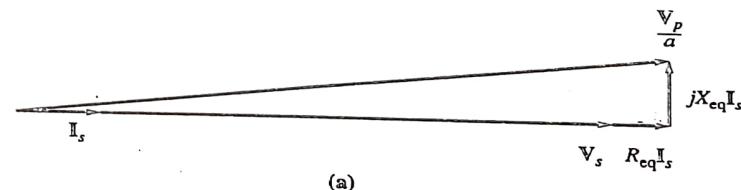
Şekil 2-26 geri güç faktöründe çalışan bir transformatörün fazör diyagramını göstermektedir. Geri güç faktörlü bir yük için ( $V_p/a > V_s$ ) olduğunu görmek kolaydır. Buna göre geri güç faktörlü bir yükle yüklü bir transformatörün gerilim regülasyonu sıfırdan daha büyük olmak zorundadır.

Birim güç faktöründeki fazör diyagramı Şekil 2.27a' da gösterilmiştir. Burada yine, sekonder gerilimi primer geriliminden daha düşüktür. Böylece  $V_R > 0$  olur. Bununla birlikte, bu durumda gerilim regülasyonu, geride akımlı bir yükün gerilim regülasyonundan daha küçüktür. Sekonder akımı ileride olursa, sekonder gerilimi gerçekten primer geriliminden daha yüksek olabilir. Eğer bu meydana gelirse, transformator gerçekten negatif bir gerilim regülasyonuna sahip olur (Şekil 2.27b' ye bakınız).

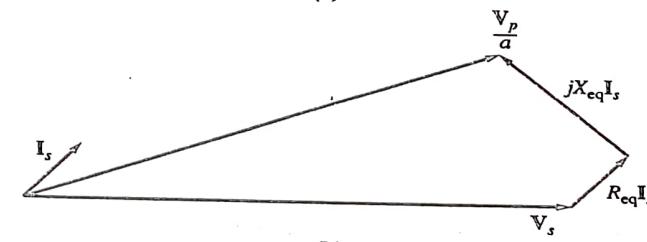


ŞEKİL 2-26

Geri güç faktöründe çalışan bir transformatörün fazör diyagramı



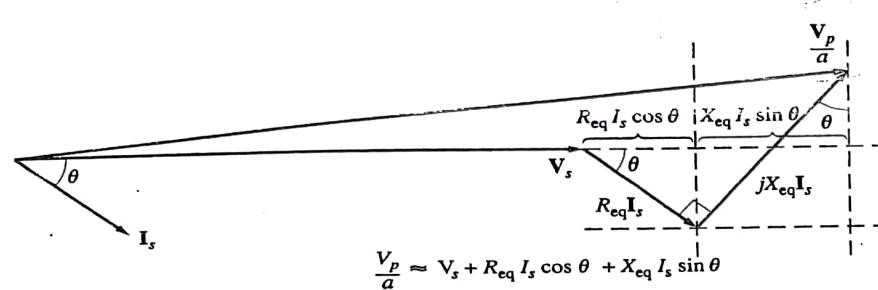
(a)



(b)

ŞEKİL 2-27

(a) Birim ve (b) İleri güç faktöründe çalışan bir transformatörün fazör diyagramı



**ŞEKİL 2.28**  
 $V_p/a$  için yaklaşık denklemin türetilmesi

### Transformatörün Verimi

Transformatörler verimlerine göre de karşılaştırılır ve değerlendirilirler. Bir cihazın verimi

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2-65)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}} \times 100\% \quad (2-66)$$

denklemi ile verilir.

Bu denklemler transformatörlerde uygulanıldığı gibi motor ve generatörlerde de uygulanır. Transformator eşdeğer devreleri verim hesaplarını kolaylaştırır. Transformatörlerde üç tür kayıp vardır. Bunlar:

1. **Bakır ( $I^2R$ ) kayipları.** Bu kayiplar eşdeğer devredeki seri dirençle hesaplanır.
2. **Histeresis kayipları.** Bu kayiplar Bölüm 1'de açıklanmıştır ve  $R_c$  direnciyle hesaba katılmıştır.
3. **Girdap akım kayipları.** Bu kayiplar Bölüm 1'de açıklanmıştır ve  $R_c$  direnciyile hesaba katılmıştır.
4. Belli bir yükte bir transformatorun verimini hesaplamak için, her bir dirençteki kayipları birbirine ekleyin ve 2.67 denklemini kullanın. Çıkış gücü,

$$P_{\text{out}} = V_s I_s \cos \theta_s \quad (2-7)$$

ile verildiğinden, transformatorun verimi

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos \theta}{P_{\text{Cu}} + P_{\text{core}} + V_s I_s \cos \theta} \times 100\% \quad (2-67)$$

olarak elde edilebilir.

**Örnek 2.5** Bir 15 kVA, 2300/230 V transformatorde, uyartım kolu bileşenlerini, seri empedanslarını ve gerilimi regülasyonunu belirlemek için deneyler yapılmıştır. Aşağıda deney verileri transformatorun primer tarafından alınmıştır.

Boşta Çalışma Deneyi (Primer tarafta)	Kısa Devre Deneyi (Primer tarafta)
$V_{OC} = 2300$ V	$V_{SC} = 47$ V
$I_{OC} = 0.21$ A	$I_{SC} = 6.0$ A
$P_{OC} = 50$ W	$P_{SC} = 160$ W

Şekil 2.19 ve 2.20'de gösterilen bağıntılar kullanılarak yukarıdaki veriler alınmıştır. Buna göre:

- (a) Yüksek gerilim tarafına göre bu transformatorun eşdeğer devresini bulunuz.
- (b) Düşük gerilim tarafına göre bu transformatorun eşdeğer devresini bulunuz.
- (c) 0.8 geri, 1.0 ve 0.8 ileri güç faktörlerinde tam yük gerilim regülasyonunu bulunuz.
- (d) 0.8 geri, 1.0 ve 0.8 ileri güç faktörlerinde yüksüz durumdan tam yük durumuna ulaşıcaya kadar gerilim regülasyonunu hesaplayınız ve çiziniz.
- (e) Transformatorun 0.8 geri güç faktöründe tam yükteki verimi nedir?

### Cözüm

- (a) Transformator eşdeğer devresindeki uyartım kolinin değerleri boşta çalışma deney verilerinden ve seri elemanlar da kısa devre deney verilerinden hesaplanabilir. Boşta çalışma deneylerinden boşta çalışma empedans açısı;

$$\theta_{OC} = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}}$$

$$= \cos^{-1} \frac{50W}{(2300V)(0.21A)} = 84^\circ$$

olur. Böylece uyartım admittansı:

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -84^\circ$$

$$= \frac{0.21A}{2300V} \angle -84^\circ$$

$$= 9.13 \times 10^{-5} \angle -84^\circ \Omega = 0.0000095 - j0.0000908 \Omega$$

olarak bulunur. Primere göre uyartım kolinin elemanları;

$$R_C = \frac{1}{0.0000095} = 105 \text{ k}\Omega$$

$$X_M = \frac{1}{0.0000908} = 11 \text{ k}\Omega$$

şeklindedir. Kısa-devre deneylerinden, kısa-devre empedans açısı,

$$\begin{aligned}\theta_{SC} &= \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \\ &= \cos^{-1} \frac{160 \text{ W}}{(47 \text{ V})(6 \text{ A})} = 55.4^\circ\end{aligned}$$

olur. Böylece eşdeğer seri empedans;

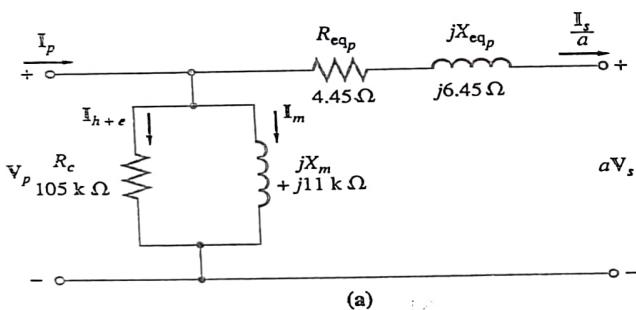
$$\begin{aligned}Z_{SE} &= \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \theta_{SC} \\ &= \frac{47 \text{ V}}{6 \text{ A}} \angle 55.4^\circ \Omega \\ &= 7.833 \angle 55.4^\circ = 4.45 + j6.45 \quad \text{Ω}\end{aligned}$$

olarak elde edilir. Primere göre seri elemanların değerleri,

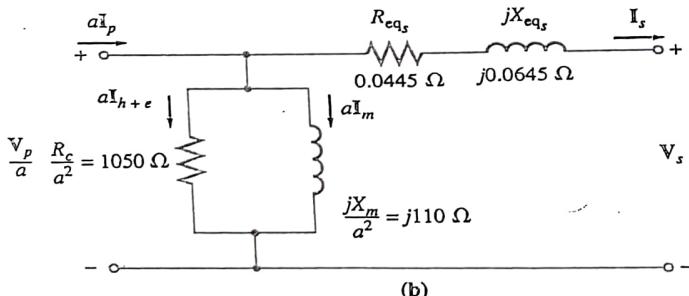
$$R_{eq} = 4.45 \Omega \quad X_{eq} = 6.45 \Omega$$

olur. Bu eşdeğer devre Şekil 2.29'a' da gösterilmiştir.

(b) Düşük gerilim tarafına göre eşdeğer devreyi bulmak için, empedansı basitçe  $a^2$  ile bölmek yeterlidir.  $a = N_p / N_s = 10$  olduğundan, sonuçta değerler,



(a)



(b)

ŞEKİL 2-29

Örnek 2.5 için (a) primer tarafa ve (b) sekonder tarafa dönüştürülmüş eşdeğer devre

$$R_C = 1050 \Omega \quad R_{eq} = 0.0445 \Omega$$

$$X_M = 110 \Omega \quad X_{eq} = 0.0645 \Omega$$

olarak elde edilir. Sonuç eşdeğer devre Şekil 2.29b' de gösterilmiştir.

(c) Bu transformatörün sekonder tarafındaki tam yük akımı,

$$I_{S,rated} = \frac{S_{rated}}{V_{S,rated}} = \frac{15,000 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 65.2 \text{ A}$$

$V_p / a'$  yi hesaplamak için (2.64) denklemini kullanınız.

$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} I_s + jX_{eq} I_s \quad (2-64)$$

0.8 geri güç faktöründe,  $I_s$  akımı  $I_s = 65.2 \angle -36.9^\circ \text{ A}$  olur. Dolayısıyla;

$$\begin{aligned}\frac{V_p}{a} &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + (0.0445 \Omega)(65.2 \angle -36.9^\circ \text{ A}) + j(0.0645 \Omega)(65.2 \angle -36.9^\circ \text{ A}) \\ &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + 2.90 \angle -36.9^\circ \text{ V} + 4.21 \angle 53.1^\circ \text{ V} \\ &= 230 + 2.32 - j1.74 + 2.52 + j3.36 \\ &= 234.84 + j1.62 = 234.85 \angle 0.40^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

Sonuçta gerilim regülasyonu

$$\begin{aligned}VR &= \frac{V_p/a - V_{S,fl}}{V_{S,fl}} \times 100\% \\ &= \frac{234.85 \text{ V} - 230 \text{ V}}{230 \text{ V}} \times 100\% = 2.1\%\end{aligned} \quad (2-62)$$

olur.

Güç faktörü = 1.0' de, akım  $I_s = 65.2 \angle 0^\circ \text{ A}$  Dolayısıyla

$$\begin{aligned}\frac{V_p}{a} &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + (0.0445 \Omega)(65.2 \angle 0^\circ \text{ A}) + j(0.0645 \Omega)(65.2 \angle 0^\circ \text{ A}) \\ &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + 2.90 \angle 0^\circ \text{ V} + 4.21 \angle 90^\circ \text{ V} \\ &= 230 + 2.90 + j4.21 \\ &= 232.9 + j4.21 = 232.94 \angle 1.04^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

Sonuç olarak gerilim regülasyonu

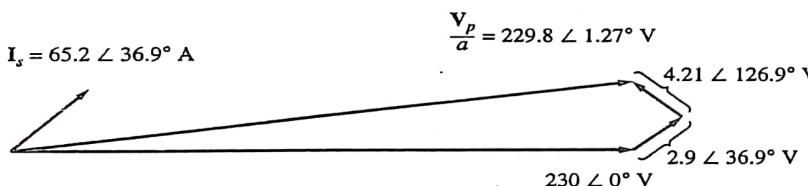
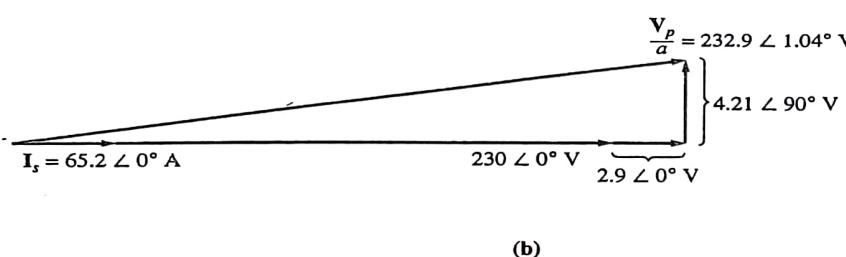
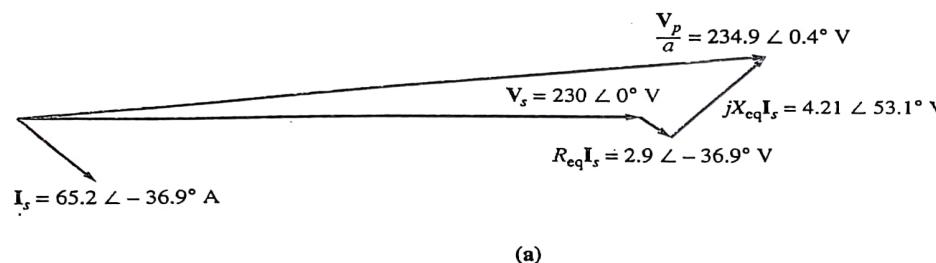
$$VR = \frac{232.94 \text{ V} - 230 \text{ V}}{230 \text{ V}} \times 100\% = 1.28\%$$

olur.

Güç faktörü = 0.8' de, akım  $I_s = 65.2 \angle 36.9^\circ \text{ A}$ . Dolayısıyla,

$$\begin{aligned}\frac{V_p}{a} &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + (0.0445 \Omega)(65.2 \angle 36.9^\circ \text{ A}) + j(0.0645 \Omega)(65.2 \angle 36.9^\circ \text{ A}) \\ &= 230 \angle 0^\circ \text{ V} + 2.90 \angle 36.9^\circ \text{ V} + 4.21 \angle 126.9^\circ \text{ V} \\ &= 230 + 2.32 + j1.74 - 2.52 + j3.36 \\ &= 229.80 + j5.10 = 229.85 \angle 1.27^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

olur. Sonuç olarak gerilim regülasyonu



**ŞEKİL 2-30**  
Örnek 2.5 için transformator fazör diyagramları

$$VR = \frac{229.85 \text{ V} - 230 \text{ V}}{230 \text{ V}} \times 100\% = -0.062\%$$

olur.

- (d) Yükün bir fonksiyonu olarak gerilim regülasyonunu çizmenin en kolay yolu MATLAB kullanarak çok farklı yükler için ciddi hesapları tekrarlamaktır. Bunu yapmak için bir program aşağıda sunulmuştur.

```
% M-file: trans_vr.m
% M-file to calculate and plot the voltage regulation
% of a transformer as a function of load for power
% factors of 0.8 lagging, 1.0, and 0.8 leading.
VS 230;                                % Secondary voltage (V)
amps 0:6.52:65.2;                      % Current values (A)
```

Req 0.0445;  
Xeq 0.0645;  
% Equivalent R (ohms)  
% Equivalent X (ohms)

% Calculate the current values for the three  
% power factors. The first row of I contains  
% the lagging currents, the second row contains  
% the unity currents, and the third row contains  
% the leading currents.

I(1,:) amps .* (0.8 - j*0.6);	% Lagging
I(2,:) amps .* (1.0);	% Unity
I(3,:) amps .* (0.8 j*0.6);	% Leading

% Calculate VP/a.  
VPA VS Req.\*I j.\*Xeq.\*I;

% Calculate voltage regulation  
VR (abs(VPA) - VS) ./ VS .\* 100;

% Plot the voltage regulation  
plot(amps,VR(1,:), 'b-');  
hold on;  
plot(amps,VR(2,:), 'k-');  
plot(amps,VR(3,:), 'r-.');  
title ('Voltage Regulation Versus Load');  
xlabel ('Load (A)');  
ylabel ('Voltage Regulation (%)');  
legend('0.8 PF lagging','1.0 PF','0.8 PF leading');  
hold off;

Bu program ile elde edilen grafik Şekil 2.31'de gösterilmiştir.

- (e) Transformatörün verimini bulmak için, önce kayıplarını hesaplayınız. Bakır kayıpları,

$$P_{Cu} = (I_S)^2 R_{eq} = (65.2 \text{ A})^2 (0.0445 \Omega) = 189 \text{ W}$$

dir. Çekirdek kayıpları

$$P_{core} = \frac{(V_p/a)^2}{R_C} = \frac{(234.85 \text{ V})^2}{1050 \Omega} = 52.5 \text{ W}$$

ve bu güç faktöründe transformatorun çıkış gücü

$$P_{out} = V_S I_S \cos \theta$$

$$= (230 \text{ V})(65.2 \text{ A}) \cos 36.9^\circ = 12,000 \text{ W}$$

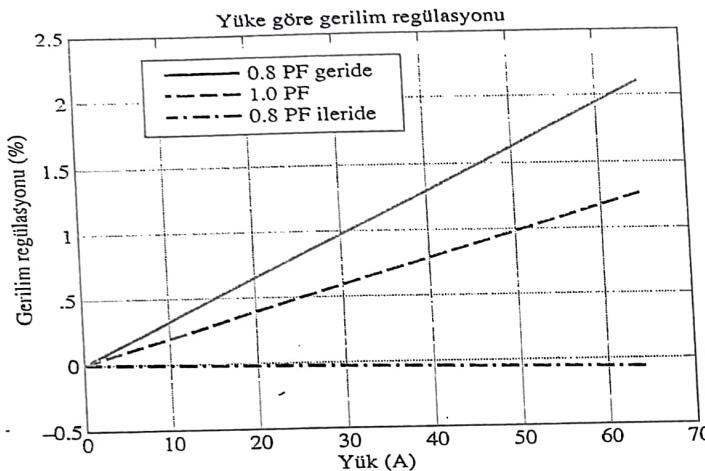
bulunur. Dolayısıyla, bu durumda transformatorun verimi,

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos \theta}{P_{Cu} + P_{core} + V_S I_S \cos \theta} \times 100\% \quad (2-68)$$

$$= \frac{12,000 \text{ W}}{189 \text{ W} + 52.5 \text{ W} + 12,000 \text{ W}} \times 100\%$$

$$= 98.03\%$$

bulunur.



**SEKİL 2-31**  
Örnek 2.5' teki transformatör için yükle göre gerilim regülatyonunun değişimi

## 2.8 TRANSFORMATÖR KADEMELERİ VE GERİLİM REGÜLASYONU

Bu bölümde transformatörler sarım oranları veya primer geriliminin sekonder gerilime oranyla tanımlandı. Bu bölümlerde, belirli bir transformatörün sarım oranını tamamen sabit olarak alınmıştır. Hemen hemen tüm gerçek dağıtım transformatörlerinde, bu tam doğru değildir. Dağıtım transformatörleri, imalattan sonra transformatörün sarım oranında küçük değişimlere müsaade edecek kademeli bir seri sargı bağlantı yapısına sahiptir. Tipik olarak, aralarında tam yük gerilimine ek olarak gerilimin  $\pm 2.5\%$  ine ayarlanmış 4 kademeli bir sargı yapısı bulunmalıdır. Bu tür bir sargı yapısı transformatörün anma gerilim değerinin  $\pm 5\%$  altında veya üstünde gerilimi ayarlama imkanı sağlar.

**Örnek 2.6** 500 kVA, 13200/480 V'luk bir dağıtım transformatörü primer sargasında  $\pm 2.5$  değişimli 4 sargıya sahiptir. Bu transformatörün her bir ayar kademelerindeki gerilim değeri nedir?

### Cözüm

Bu transformatörün mümkün olan beş gerilim değeri aşağıdadır;

+ 5.0 kademelerinde	13860/480 V
+ 2.5 kademelerinde	13530/480 V
Anma değer	13200/480 V
- 2.5 kademelerinde	12870/480 V
- 5.0 kademelerinde	12540/480 V

Bir transformatördeki kademeler lokal gerilim değişimlerini karşılamak için transformatörün alanındaki ayarlamaları sağlar. Bununla birlikte, normalde bu sarker transformatöre bir güç uygulanıyorken değiştirilemez. Bunlar başlangıçta ayarlanmalı ve öylece bırakılmalıdır.

Bazen bir transformatör, gerilimin geniş bir aralıktaki yükle değiştiği bir güç hattında kullanılır. Bu tür gerilim değişimleri, güç sistemindeki generatorler arasındaki yüksek hat empedansından dolayı olabilir ve bazen buna yük de neden olabilir. Normal yükler sabit bir gerilime gereksinim duyar. Bir güç şirketi sabit olarak değişen yüklerde, yüksek empedanslı hatlar üzerinden kontrollü bir gerilimi nasıl sağlayabilir? Bu problemin bir çözümü; yük altında sargı değiştiren ve TCUL olarak isimlendirilen özel bir transformatör ya da gerilim regülatörü kullanmaktadır. Temel olarak bir TCUL transformatör, yük altında kademelerin oranlarını değiştirmeye yeteneğine sahip bir transformatördür. Bir gerilim regülatörü, sistem gerilimini sabit tutmak için, sargı oranlarını otomatik olarak değiştiren gerilim-algilama devresine sahip bir TCUL transformatördür. Bu tür özel transformatörler modern güç sistemlerinde oldukça yaygındır.

## 2.9 OTOTRANSFORMATÖR

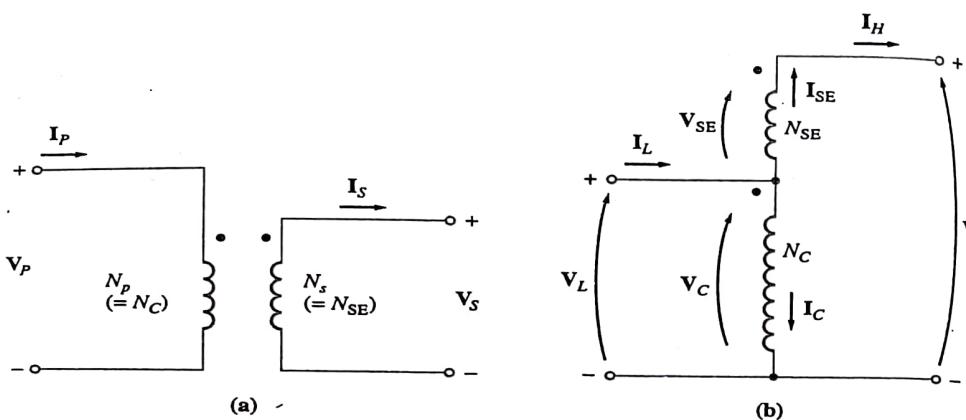
Bazı uygulamalarda gerilim seviyesinin yalnızca küçük bir miktar değiştirilmesi gerekebilir. Örneğin; gerilimin 110 V'tan 120 V'a veya 13.2 kV'tan 13.8 kV'a değiştirilmesi gerekebilir. Bu küçük gerilim yükseltme ihtiyacı; güç sisteminde generatorün üretim noktalarından uzak mesafelerde gerekebilir. Bu tür durumlarda, her biri yaklaşık aynı gerilimde iki tam sargılı bir transformatörün kullanımı son derece pahalı ve verimsiz bir işlemidir. Bu tür bir transformatörün yerine (*ototransformatör*) olarak isimlendirilen özel amaçlı bir transformatör kullanılır.

Yükseltici bir ototransformatörün diyagramı Şekil 2.32'de gösterilmiştir. Şekil 2.32a'da transformatörün iki sargısı bilinen tarzda gösterilmiştir. Şekil 2.32b'de, birinci sargı gerilimi ve ikinci sargı gerilimi arasındaki bağıntı, transformatör sarım oranıyla verilmiştir. Bununla birlikte, tüm transformatörün çıkışındaki gerilim primer sargı gerilimiyle sekonder sargı geriliminin toplamıdır. Birinci sargı ortak sargı olarak isimlendirilir. Çünkü birinci sarginın gerilimi transformatörün her iki tarafında da görülür. Daha küçük olan sargı seri sargı olarak isimlendirilir. Bu sargiya seri sargı denilme nedeni, ortak sargıyla seri olarak bağlanmasıdır.

Düşürtücü bir ototransformatörün diyagramı Şekil 2.33'de gösterilmiştir. Burada giriş gerilimi seri sargı ve ortak sargıdaki gerilimlerin toplamıdır. Çıkış gerilimi ortak sargıdaki gerilimdir.

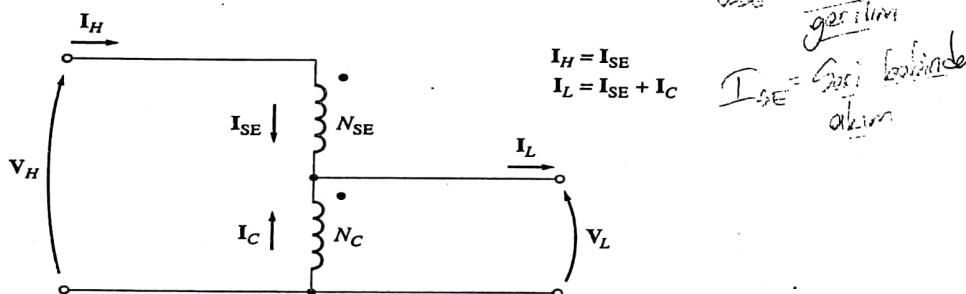
Transformatör bobinleri fiziksel olarak bağlı olduğundan, ototransformatörler için diğer transformatörlerden farklı bir terminoloji kullanılır. Ortak bobindeki gerilim, *ortak gerilim*  $V_C$  ve bu bobindeki akım da *ortak akım*  $I_C$  olarak isimlendirilir. Seri bobindeki gerilim ise *seri gerilim*  $V_{SE}$  ve bu bobindeki akım da  $I_{SE}$  seri akımı olarak isimlendirilir.

Transformatörün yüksek gerilim tarafına karşılık gelen nicelikler  $V_H$  ve  $I_H$  olarak isimlendirilirken, transformatörün düşük gerilim tarafındaki gerilim ve



ŞEKİL 2-32

(a) Bilinen tarzda bağlı ve (b) ototransformatör olarak bağlı singularlarla bir transformatör



ŞEKİL 2-33

Gerilimi düşüren bir ototransformatörün bağlantısı

akım sırasıyla  $V_L$  ve  $I_L$  olarak isimlendirilir. Ototransformatörün primer tarafı (girişinin olduğu kısım), ototransformatörün düşürütücü veya yükseltici olmasına bağlı olarak yüksek gerilim veya düşük gerilim tarafı olabilir.) Şekil 2.32b'de singularardaki gerilimler ve akımlar arasında

$$\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}} \quad (2-68)$$

$$N_C I_C = N_{SE} I_{SE} \quad (2-69)$$

bağıntıları vardır. Singularardaki gerilimler ile üç gerilimleri arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntılarla verilir..

$$V_L = V_C \quad (2-70)$$

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad (2-71)$$

ve singularardaki akımlarla üç (çıkış) akımları arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilir.

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad (2-72)$$

$$I_H = I_{SE} \quad (2-73)$$

### Bir Ototransformatörde Gerilim ve Akım Bağıntıları

Bir ototransformatörün iki tarafı arasındaki gerilim-bağıntısı nedir?  $V_H$  ve  $V_L$  arasındaki bağıntıyı belirlemek gayet kolaydır. Ototransformatörün yüksek gerilim tarafındaki gerilim

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad (2-71)$$

ile verilir. Fakat  $V_C / V_{SE} = N_C / N_{SE}$  dir. Buradan,

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} V_C \quad (2-74)$$

olur. Sonuç olarak  $V_L = V_C$  olduğuna dikkat ederek;

$$\begin{aligned} V_H &= V_L + \frac{N_{SE}}{N_C} V_L \\ &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} V_L \end{aligned} \quad (2-75)$$

buluruz veya

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_{SE} + N_C} \quad (2-76)$$

olur. Transformatörün iki tarafı arasındaki akım bağıntısı,

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad (2-72)$$

ile bulunabilir. (2.69) denkleminden,  $I_C = (N_{SE} / N_C) * I_{SE}$ , böylece

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} I_{SE} + I_{SE} \quad (2-77)$$

olur. Sonuç olarak,  $I_H = I_{SE}$  olduğunu göz önüne alarak,

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{N_{SE}}{N_C} I_{SE} + I_{SE} \\ &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} I_{SE} \end{aligned} \quad (2-78)$$

veya

$$\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \quad (2-79)$$

bulunur.

### Ototransformatörün Görünür Güçte Anma Değer Avantajı

Bir ototransformatörde primerden sekondere geçen gücün tamamının sargılar üzerinden geçmemesi dikkate değer ilginçlidir. Sonuç olarak, bilinen bir transformator bir oto transformator gibi bağlanırsa, orijinal bağlantısındaki anma değerinden çok daha fazla güç elde edilebilir.

Bu olayı anlamak için tekrar Şekil 2.32b'yi dikkate alınır. Oto transformatorun giriş görünürlük gücünün

$$S_{in} = V_L I_L \quad (2-80)$$

ile verildiğine ve çıkış gücünün de,

$$S_{out} = V_H I_H \quad (2-81)$$

ile verildiğine dikkat ediniz.

Gerilim ve akım denklemlerini [(2.76) ve (2.79) denklemlerini] kullanarak, giriş görünürlük gücünün tekrar çıkış görünürlük gücüne eşit olduğunu göstermek kolaydır.

$$S_{in} = S_{out} = S_{IO} \quad (2-82)$$

Burada  $S_{IO}$ , transformatorun giriş ve çıkış görünürlükleri olarak tanımlanır. Bununla birlikte transformator sargısındaki görünürlük,

$$S_W = V_C I_C = V_{SE} I_{SE} \quad (2-83)$$

olar.

Transformatorun giriş gücü (ve sekonder çıkış gücü) ve transformatorun gerçek sargılarındaki güç arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\begin{aligned} S_W &= V_C I_C \\ &= V_L (I_L - I_H) \\ &= V_L I_L - V_L I_H \end{aligned}$$

(2.79) denklemini kullanarak,

$$\begin{aligned} S_W &= V_L I_L - V_L I_L \frac{N_C}{N_{SE} + N_C} \\ &= V_L I_L \frac{(N_{SE} + N_C) - N_C}{N_{SE} + N_C} \quad (2-84) \\ &= S_{IO} \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C} \quad (2-85) \end{aligned}$$

elde ederiz. Dolayısıyla, oto transformatorun primer ve sekonderindeki görünürlük, sargılarındaki gerçek görünürlük güç oranını,

$$\frac{S_{IO}}{S_W} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_{SE}} \quad (2-86)$$

olar.

(2.86) denklemi bilinen bir transformatöre göre bir ototransformatörün görünürlük anma değer listesini gösterir. Burada,  $S_{IO}$  primere giren ve sek-

derden çıkan görünürlük,  $S_W$  de gerçekten transformator sargılarında dolaşan görünürlük gösterir (Geri kalan güç, transformator sargıları üzerinden herhangi bir kuple olmaksızın primerden sekondere geçer). Burada seri sargı büyük ölçüde avantajın büyüdüğünü dikkat ediniz.

Örneğin, 110 kV'lık bir sistemi 138 kV'lık bir sistemeye dönüştüren 5000 kVA'lık bir ototransformatör, 110:28'lik bir  $N_C / N_{SE}$  sarım oranına sahip olacaktır. Böyle bir ototransformatör gerçekten,

$$\begin{aligned} S_W &= S_{IO} \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C} \\ &= (5000 \text{ kVA}) \frac{28}{28 + 110} = 1015 \text{ kVA} \end{aligned} \quad (2-85)$$

kadarlık sargı görlüğüne sahip olacaktır. Bilinen bir transformator aynı işi yapmak için 5000 kVA anma değerine sahip sargılara gereksinim gösterirken, ototransformatör sadece 1015 kVA anma değerine sahip sargılarla bu işi yapacaktır. Bunun anlamı ototransformatörün bilinen transformatörden 5 kat daha küçük ve aynı zamanda çok daha ucuz olabilmesidir. Bu nedenle, birbirine yakın hemen hemen eşit gerilimler arasında, transformatörleri ototransformatör olarak yapmak çok avantajlıdır.

Aşağıdaki örnek ototransformatörlerin anma değer avantajını ve oto transformator analizini açıklamaktadır.

**Örnek 2.7 :** 100 VA, 120/12-V bir transformator yükseltici bir oto transformator oluşturacak şekilde bağlanmıştır (Şekil 2.34). Transformatorun primerine 120 V'lık bir gerilim uygulandığında,

- (a) Transformatorun sekonder gerilimi ne olur?
- (b) Bu çalışma modunda maksimum voltamper anma değeri nedir?
- (c) Bilinen 120/12 V'lık çalışmaya göre bu ototransformatörün anma değer avantajını hesaplayınız.

#### Cözüm

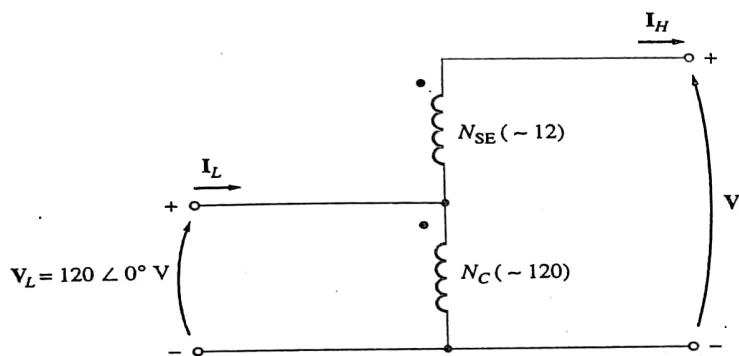
Primerine 120 V gerilim uygulanan yükseltici bir transformator elde edebilmek için bu transformatörde, ortak sargı sarım sayısı  $N_C$ 'nin seri sargı sarım sayısı  $N_{SE}$ 'ye oranı 120:12 (veya 10:1) olmalıdır.

- (a) Bu transformator, yükseltici bir transformator olarak kullanılmaktadır. Sekonder gerilimi  $V_H$ 'dır ve denklem (2.75)'den

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} V_L \\ &= \frac{12 + 120}{120} 120 \text{ V} = 132 \text{ V} \end{aligned} \quad (2-75)$$

elde edilir.

- (b) Bu transformatorun her iki sargısındaki maksimum voltamper anma değeri 100 VA'dır. Bu VA değerine göre, ne kadarlık giriş veya çıkış görünürlük güçü üretilbilir? Bunun için seri sargıyı inceleyiniz. Sargıda gerilim  $V_{SE}$  12 V'dur ve sar-



**ŞEKİL 2-34**  
Örnek 2.7' deki ototransformatör

günün voltamper anma değeri 100 VA'dır. Bundan dolayı seri sargı akımı,

$$I_{SE,max} = \frac{S_{max}}{V_{SE}} = \frac{100 \text{ VA}}{12 \text{ V}} = 8.33 \text{ A}$$

bulunur.  $I_{SE}$ , sekonder akımı  $I_S$ 'e (veya  $I_H$ ) eşit ve sekonder gerilimi  $V_S = V_H = 132 \text{ V}$  olduğundan, sekonder görünür güç,

$$\begin{aligned} S_{out} &= V_S I_S = V_H I_H \\ &= (132 \text{ V})(8.33 \text{ A}) = 1100 \text{ VA} = S_{in} \end{aligned}$$

olarak.

(c) Anma değer avantajı (b) şıklından veya ayrı olarak (2.86) denkleminden hesaplanabilir. (b) şıklından,

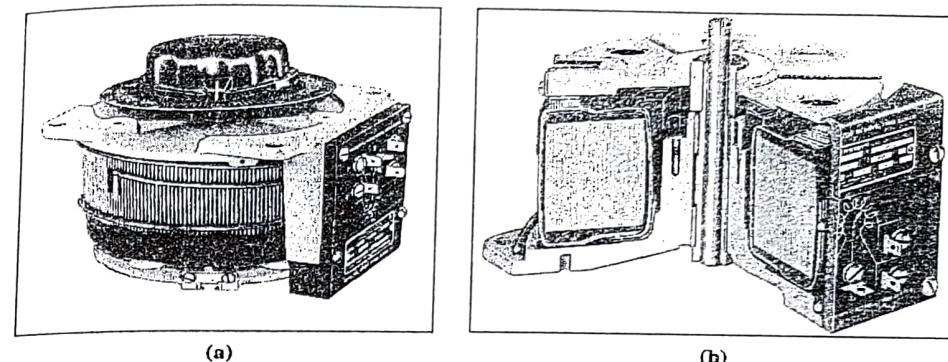
$$\frac{S_{IO}}{S_W} = \frac{1100 \text{ VA}}{100 \text{ VA}} = 11$$

(2.86) denkleminden

$$\begin{aligned} \frac{S_{IO}}{S_W} &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_{SE}} \quad (2-86) \\ &= \frac{12 + 120}{12} = \frac{132}{12} = 11 \end{aligned}$$

bulunur. Her iki denklemde de görünür güç anma değerinin 11 kat arttığı görülmektedir.

Bilinen bir transformatörü bir ototransformatör olarak bağlamak ve örnek 2.7' deki gibi kullanmak normalde mümkün değildir. Çünkü bilinen transformatörün düşük gerilim tarafındaki izolasyon, ototransformatör bağlantısındaki tüm çıkış gerilimine dayanabilecek yeterlilikte değildir. Oto transformatör olarak imal edilmiş özel transformatörlerde, daha küçük sargı (seri sargı) üzerindeki izolasyon daha büyük bobindeki izolasyon kadar kuvvetli yapılır.



**ŞEKİL 2-35**  
(a) Değişken gerilim ototransformatörü (b) Ototransformatörün basit görünüsü (Superior Elektrik Şirketinin izniyle)

Birbirine oldukça yakın gerilim seviyelerinde oto transformatörlerin kullanımı pratik açıdan gereklidir. Çünkü gerilimler birbirine yaklaştıkça, oto transformatörün daha yüksek güç üretme avantajı olur. Bu transformatörlerde düşük gerilim kademesi sargıyı aşağı ve yukarı hareket ettirdiğinden bu transformatörler değişken transformator olarak da kullanılırlar. Bu kullanım şekli değişken bir AA gerilim elde etmek için uygun bir yoldur. Böyle bir değişken ototransformatör Şekil 2.35' te gösterilmiştir.

Ototransformatörlerin bilinen transformatörlerden farklı olarak ilkesel dezavantajı, primer ve sekonder devreler arasında doğrudan bir fiziksel bağlantı olmasıdır. Bu bağlantı iki tarafın elektriksel izolasyonunun kaybolmasına neden olabilir. Eğer mevcut uygulama elektriksel bir izolasyona gereksinim göstermiyorsa, o zaman oto transformatör kullanımı birbirine yaklaşık eşit gerilimleri elde etmek için uygun ve pahalı olmayan bir yol olur.

### Bir Ototransformatörün Giriş Empedansı

Oto transformatörler bilinen transformatörlerle karşılaşıldıklarında ek bir dezavantaja daha sahiptirler. Bilinen bir transformatör ile karşılaşıldığında, bir ototransformatörün etkin birim değer empedansı, oto transformatör bağlantısının güç avantajıyla ters orantılı bir faktör kadar küçük olur.

Bu durumun ispatı bölümün sonundaki bir probleme bırakılmıştır.

Bilinen iki sıklı bir transformatörle karşılaşıldığında bir oto transformatörün daha küçük olan giriş empedansı, güç sistem arızalarında (kısa devrelerde), akımı sınırlamak için seri empedansa gereksinim duyulan bazı uygulamalarda ciddi bir problem olabilir. Bir ototransformatörde küçük giriş empedansının etkisi, oto transformatör seçilmeden önce dikkate alınmalıdır.

**Örnek 2.8 :** Bir transformator bilinen 2 sargılı transformator olarak çalıştırıldığında 1000 kVA, 12/1.2 kV, 60 Hz nominal değerlere sahiptir. Bu şartlarda, seri direnç ve reaktansı sırasıyla 0.01 ve 0.08 per-unit olarak verilmiştir. Bu transformator bir güç dağıtım sisteminde düşürücü 13.2/12 kV'luk bir oto transformator olarak kullanılacaktır. Oto transformator bağlantısında,

- Bu tarz bir kullanım için transformatorun anma gücü ne olur?
- Per-unit olarak transformatorun seri empedansı ne olur?

**Cözüm:**

(a)  $N_C / N_{SE}$  sarım oranı 12:1.2 veya 10:1 olmalıdır. Bu transformatorun gerilim ratingi 13.2/12 kV olacaktır ve görünür güç anma değeri,

$$S_{IO} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_{SE}} S_W$$

$$= \frac{1 + 10}{1} 1000 \text{ kVA} = 11,000 \text{ kVA}$$

bulunur.

(b) Transformator bilinen tarzda bağlandığında transformatorun per-unit empedansı

$$Z_{eq} = 0.01 + j0.08 \text{ pu} \quad \text{ayrı sargılar}$$

olur.

Bu oto transformatorun görünür güç avantajı 11'dir. Böylece, tanımlandığı gibi bağlanan oto transformatorun per-unit empedansı,

$$Z_{eq} = \frac{0.01 + j0.08}{11}$$

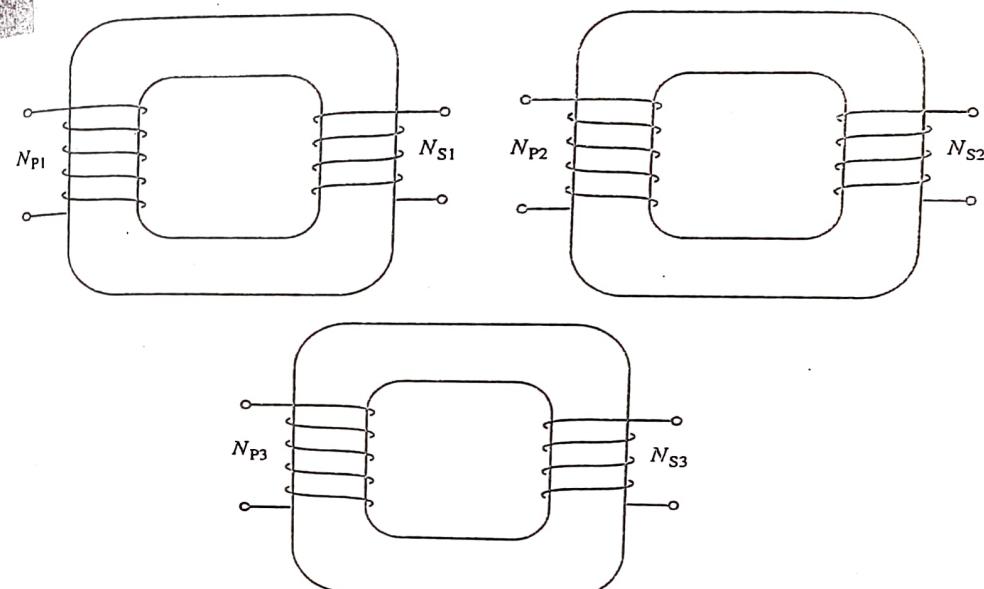
$$= 0.00091 + j0.00727 \text{ pu} \quad \text{ototransformator}$$

olur.

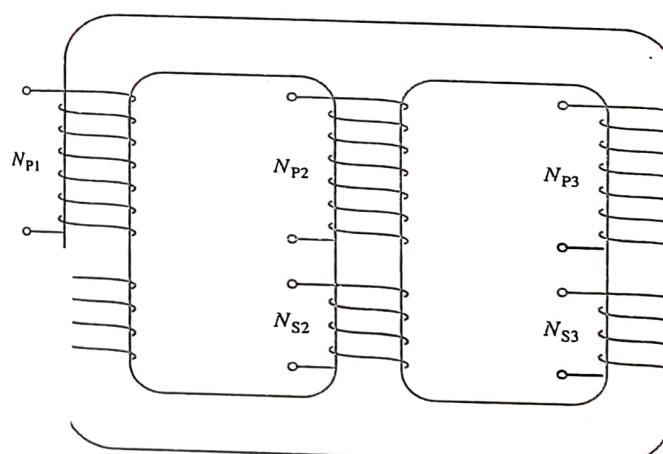
## 2.10 ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLER

Bugün dünyadaki ana güç üretim ve dağıtım sistemlerinin hemen hemen tümü üç fazlı AA sistemleridir. Üç fazlı sistemler modern hayatı böylesine önemli bir rol oynadığından, üç fazlı sistemlerde transformatorların nasıl kullanıldığını anlamak gereklidir.

Üç fazlı devrelere uygun transformatorlar iki şekilde imal edilebilirler. Yaklaşımından biri tek fazlı üç tane transformatorun üç fazlı bank oluşturacak şekilde bağlanmasıdır. Bir diğer alternatif yaklaşım ortak bir çekirdek üzerine sarılmış üç sargı setinden oluşan üç fazlı bir transformator imal etmektir. Bu iki transformatorun yapısı Şekil 2.36 ve 2.37'de gösterilmiştir. Günümüzde üç fazlı transformatorların yapısı daha hafif, daha küçük, daha ucuz ve daha verimli olduğundan pratikte yaygın olarak tercih edilmektedirler. Daha önceleri üç fazlı transformator üç ayrı transformator kullanılarak gerçekleştirildi. Bu yaklaşım, bir arıza halinde banktaki her bir birimin tek tek değiştirilebilme avantajına sahiptir. Fakat bu durum çoğu uygulamalarda üç fazı bir arada bulunan transformatorun sağlayacağı avantajlardan daha önemli değildir. Bununla birlikte hala serviste olan üç tek fazlı birimden oluşan transformator bankları da vardır.



**ŞEKİL 2-36**  
Bağımsız transformatorlerden oluşan üç fazlı bir transformator bankı



**ŞEKİL 2-37**  
Ortalı çekirdek üzerine sarılmış üç fazlı bir transformator

olarak  
ortasında  
bileşenlerin  
oir akım denge-

Üç fazlı devrelere ilişkin bir inceleme Ek A'da sunulmuştur. Bazı okurlar, aşağıdaki konuyu çalışmadan önce isterlerse bu Ek'e başvurabilirler.

### 3-Faz Transformatör Bağlantıları

Üç fazlı bir transformatör ya ayrı ayrı ya da bir çekirdek üzerine sarılmış üç transformatörden ibarettir. Herhangi bir üç fazlı transformatörün primer veya sekonderleri bağımsız olarak ya üçgen ( $\Delta$ ) ya da yıldız ( $Y$ ) şeklinde bağlanabilir. Bu durum, üç fazlı bir transformatör bağlantısı için mümkün olan 4 bağlantı şéklini ortaya çıkarır.

1. Yıldız-Yıldız ( $Y-Y$ )
2. Yıldız-Üçgen ( $Y-\Delta$ )
3. Üçgen-Yıldız ( $\Delta-Y$ )
4. Üçgen-Üçgen ( $\Delta-\Delta$ )

Bu bağlantılar Şekil 2.38'de gösterilmiştir.

Herhangi bir üç fazlı transformatör bankını analiz etmenin anahtarı, bankta tek bir transformatörü incelemektir. Bankta herhangi bir transformatör bu bölümde incelenen tek fazlı transformatörlere tam olarak benzeyen bir davranış ortaya koyar. Üç fazlı transformatörlerin empedansı, gerilim regülasyonu, verimi ve benzer hesaplamalarında tek fazlı transformatörler için geliştirilen tekniklerin tamamen aynı kullanılır.

Üç fazlı transformatör bağlantılarının her birinin avantaj ve dezavantajlarını aşağıda incelenecaktır.

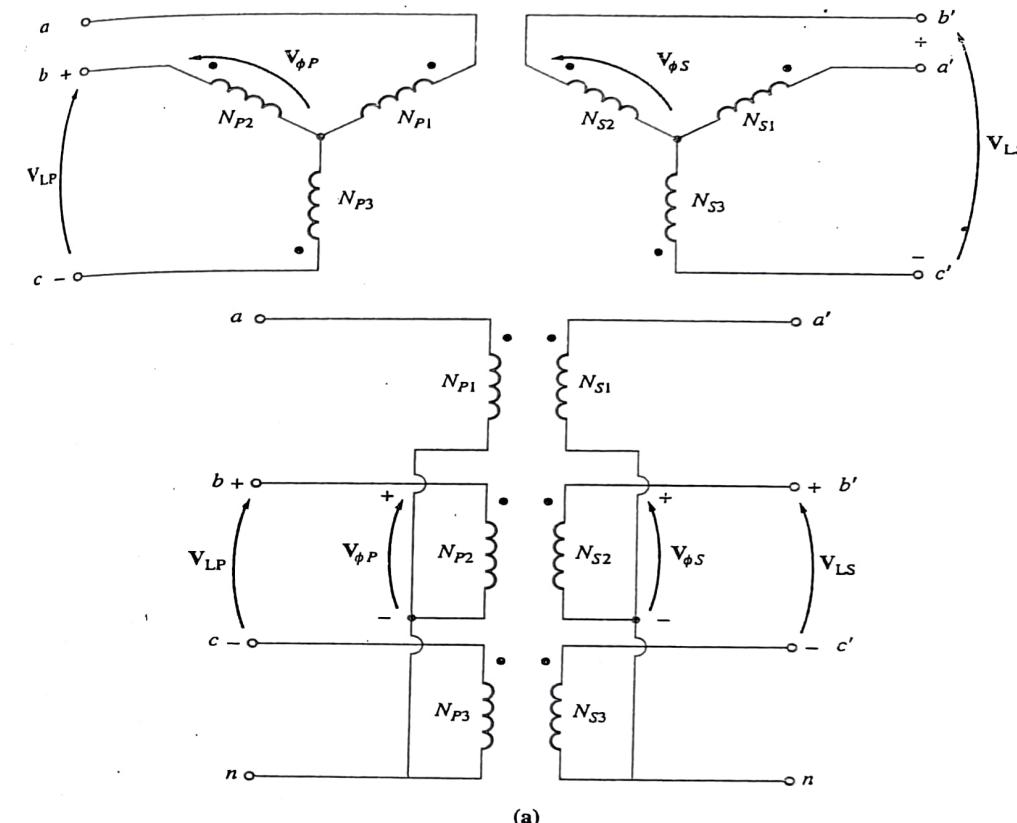
**YILDIZ-YILDIZ BAĞLANTI.** Üç fazlı transformatörlerin  $Y-Y$  bağlantısı Şekil 2.38a'da gösterilmiştir. Bir  $Y-Y$  bağlantısında, transformatörün her bir fazındaki primer gerilim  $V_{\phi P} = V_{LP} / \sqrt{3}$  ile verilir. Primer faz gerilimi ile sekonder faz gerilimi arasındaki bağlantı transformatorun sarım oranıyla ilişkilidir. Sekonder faz gerilimi ile sekonder hat gerilimi arasındaki bağlantı  $V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\phi S}$  dir. Dolayısıyla transformatörün gerilim oranı,

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \quad Y-Y \quad (2-87)$$

dir.  $Y-Y$  bağlantı çok ciddi iki probleme sahiptir:

1. Transformatör devresindeki yükler dengesiz olurlarsa, bu durumda transformatörün fazları üzerindeki gerilimler ölçüde dengesiz hale gelebilir.
2. Üçüncü harmonik gerilimler artabilir.

Üç fazlı gerilimler  $Y-Y$  bağlı bir transformatöre uygulanırsa, herhangi bir fazındaki gerilimler diğer fazlardaki gerilimlerle  $120^\circ$  lik bir faz farkına sahip olacaklardır. Bununla birlikte, üç fazdaki üçüncü harmonik bileşenlerin her biri, ana frekansın her bir peryodunda üç peryoda sahip olacaklarından diğerleriyle aynı fazda olacaktır. Bir transformatörde çekirdeğin doğrusal olmayan yapısından do-



ŞEKİL 2.38

Üç fazlı transformatör bağlantıları ve sargı diyagramları (a)  $Y-Y$  (b)  $Y-\Delta$  (c)  $\Delta-Y$  (d)  $\Delta-\Delta$

layı daima üçüncü harmonik bileşenler vardır ve bu bileşenler birbirine eklenir.

Sonuç; 50 veya 60 Hz'lik gerilimin ana bileşenine ek olarak çok büyük üçüncü harmonik bileşenidir. Bu üçüncü harmonik gerilim ana geriliminden büyük olabilir.

Hem dengesizlik problemi ve hem de üçüncü harmonik problem aşağıdaki iki teknikten biri kullanılarak çözülebilir:

1. Transformatörlerin nötrlerini özellikle de primer sargasının nötrünü tam olarak topraklamak. Bu bağlantı büyük gerilimlerin oluşması yerine nötr noktasında bir akımın akmasına neden olacak şekilde ek üçüncü harmonik bileşenlerin akmasına müsaade eder. Nötr aynı zamanda yükteki herhangi bir akım dengesizliği durumunda bir geri dönüş yolu sağlar.

2. Transformatör bankına  $\Delta$  şeklinde üçüncü bir tersiyer sargı bağlamak. Üçgen şeklinde bağlanmış üçüncü bir sargı transformatöre eklenirse, bu durumda üçgen sargıdaki 3. harmonik bileşen gerilimler bir sirkülasyon akımına neden olacaktır. Bu işlem, transformatör nötr noktalarının topraklanmasına benzer şekilde gerilimin üçüncü harmonik bileşenlerini bastıracaktır.

$\Delta$  bağlı tersiyer sarginin transformatör kabinin dışına alınmasına geek yoktur. Bu sargilar genellikle yerleştirildikleri alt isasyon içerisinde yardımcı güç kaynağı ve istasyonun ışıklandırılması amacıyla da kullanılırlar. Tersiyer sargilar sirkülasyon akımlarını taşıyabilecek büyülüklük olmalıdır. Bunun için bu sargilar genellikle iki ana sargin nominal güçlerinin üste biri olacak şekilde imal edilirler.

Bu düzeltme tekniklerinden herhangi biri  $Y-Y$  bağlı bir transformatörde de kullanılmalıdır. Pratikte  $Y-Y$  bağlı transformatörler çok az kullanılırlar.

**YILDIZ-ÜÇGEN BAĞLANTI.** Üç fazlı transformatörlerin  $Y-\Delta$  bağlantısı Şekil 2.38b'de gösterilmiştir. Bu bağlantıda sekonder hat gerilimi sekonder faz gerilimine  $V_{LS} = V_{\phi S}$  eşit iken, primer hat gerilimi ile primer faz gerilim arasındaki bağıntı  $V_{LP} = *V_{\phi P}$  dir. Her bir fazın gerilim oranı

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

dir. Buradan bankın primer tarafındaki hat gerilimi ile bankın sekonder tarafındaki hat gerilimi arasındaki bağıntı

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}}$$

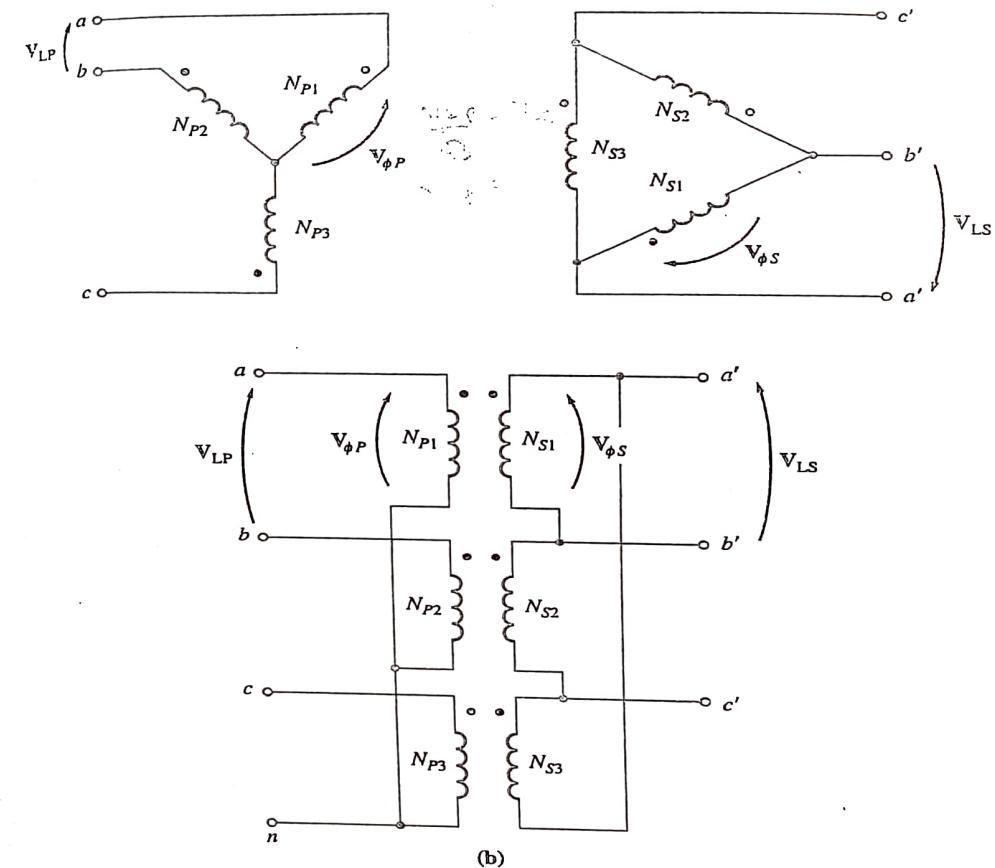
$$\boxed{\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3}a \quad Y-\Delta} \quad (2-88)$$

olar.

$Y-\Delta$  bağlantısında,  $\Delta$  bağlı olantarafta bir sirkülasyon akımı dolaştığından, gerilimlerde üçüncü harmonik bileşenler görülmez. Bu bağlantı dengesiz yükler için de daha kararlıdır. Çünkü  $\Delta$  bağlantı meydana gelen herhangi bir dengesizlik kismen dağıtır.

Bu bağlantı yine de sekonder geriliminin, primer gerilime göre  $30^\circ$ lik bir faz farkı problemine sahiptir. Faz kayması, iki transformatör bankının sekonderlerinin paralel bağlanması durumunda problemlere neden olabilir. Transformatör sekonderlerinin faz açıları, paralel bağlanma durumunda eşit olmalıdır. Ayrıca paralel bağlamada oluşan  $30^\circ$ lik faz farkının yönüne de dikkat edilmelidir.

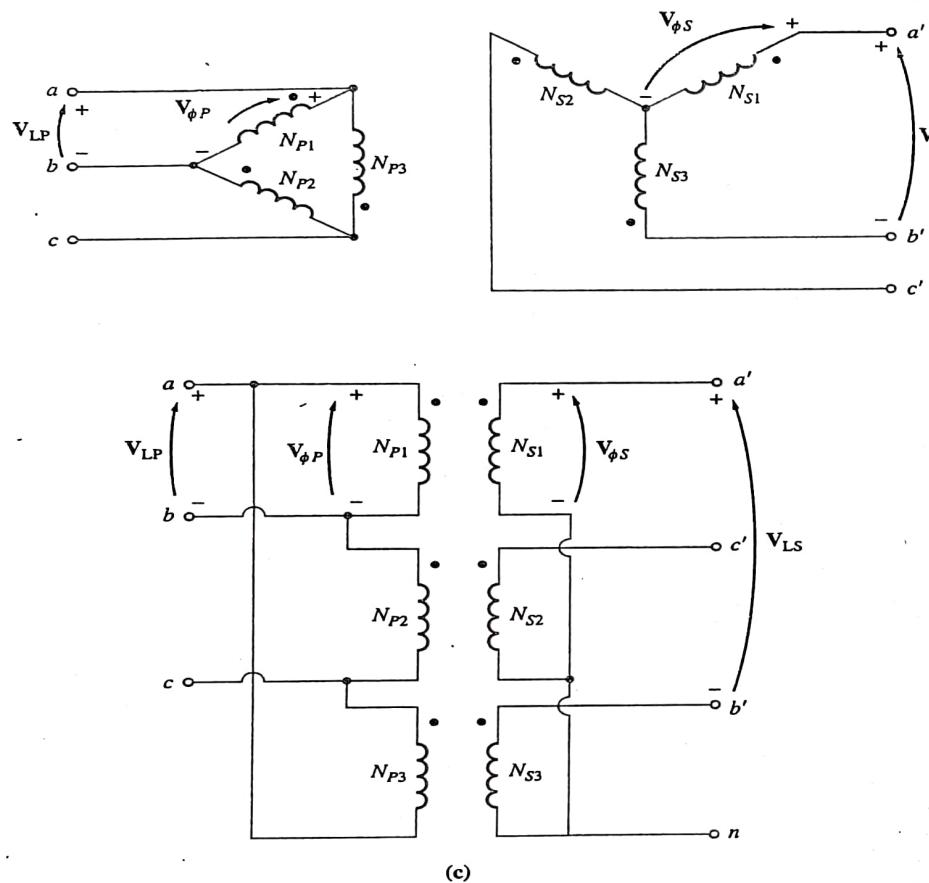
Birleşik devletlerde, genellikle sekonder gerilim primer gerilime göre  $30^\circ$  geride bırakılır. Bu standart olmasına rağmen, bu durum her zaman gözlenmemiştir ve eski tesislerde, yeni bir transformatör paralel alınmadan önce faz açılarının birbirlerini karşıladığından emin olmak için çok dikkatli bir şekilde faz açıları kontrol edilmelidir.



ŞEKİL 2.38  
(b)  $Y-\Delta$  (devamı)

Şekil 2.38b'de gösterilen bağlantı, sistem faz sırası  $abc$ , olursa sekonder geriliminin geride olmasına neden olacaktır. Sistem faz sırası  $acb$  olursa, Şekil 2.38b'de gösterilen bağlantı sekonder geriliminin, primer gerilime göre  $30^\circ$  ile ride olmasına neden olacaktır.

**ÜÇGEN-YILDIZ BAĞLANTI.** Üç fazlı transformatörlerin  $\Delta-Y$  bağlantısı Şekil 2.38c'de gösterilmiştir. Bir  $\Delta-Y$  bağlantısında, primer hat gerilimi primer faz gerilime  $V_{LP} = V_{\phi P}$  eşittir. Bu durumda sekonder gerilimler arasındaki bağıntı da  $V_{LS} = \sqrt{3}*V_{\phi S}$  dir. Dolayısıyla, bu transformatörün fazlar arası gerilim oranı,



**ŞEKİL 2.38**  
(c)  $\Delta$ - $\Delta$  (devamı)

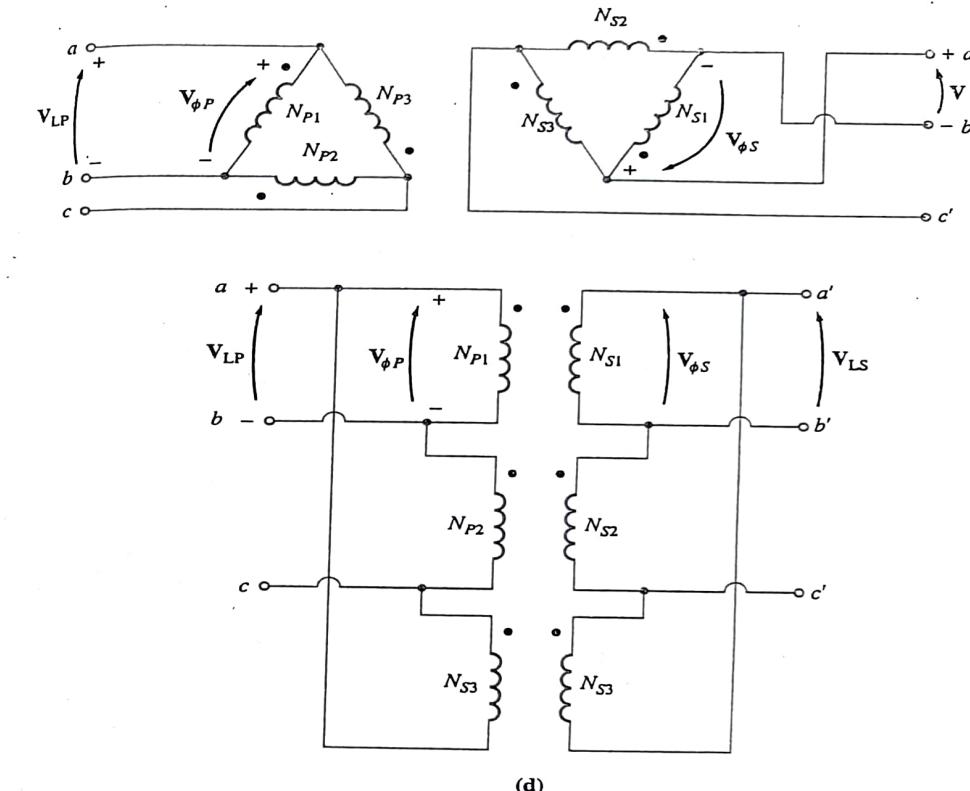
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} V_{\phi S}}$$

$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}}{a}$	$\Delta - \Delta$
--	-------------------

(2-89)

olar.

Bu bağlantı Y- $\Delta$  transformator bağlantısındaki avantajlara ve aynı faz farkına sahiptir. Şekil 2.38c'de gösterilen bağlantı sekonder geriliminin primer geriliminden  $30^\circ$  geride olmasına neden olur.



**ŞEKİL 2.38**  
(d)  $\Delta$ - $\Delta$  (devamı)

**ÜÇGEN-ÜÇGEN BAĞLANTI.**  $\Delta$ - $\Delta$  bağlantı Şekil 2.38d'de gösterilmiştir.  $\Delta$ - $\Delta$  bir bağlantıda,  $V_{LP} = V_{\phi P}$  ve  $V_{LS} = V_{\phi S}$ 'dır. Primer ve sekonder hat gerilimleri arasındaki bağlantı

$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$	$\Delta - \Delta$
---	-------------------

(2-90)

dir.

Bu transformatör bağlantısı faz kayması, dengesiz yük ve harmonik problemlerine sahip değildir.

### Üç Fazlı Transformatörler için Per-Unit Sistem

Üç fazlı transformatörlerin per-unit değerlerinin bulunmasında tek fazlı transformatördeki işlemlerin aynısı kullanılır. Tek faz için (2.53)'den (2.56)'ya kadar el-

de edilen baz denklemler faz başına baz büyüklükler olarak üç fazlı sisteme uygulanır. Transformatör bankının toplam baz voltamper değeri  $S_{base}$  olarak isimlendirilir, bu durumda transformatörlerden birinin baz voltamper değeri

$$S_{1\phi,base} = \frac{S_{base}}{3} \quad (2-91)$$

olar ve transformatörün baz faz akımı ve empedansı

$$I_{\phi,base} = \frac{S_{1\phi,base}}{V_{\phi,base}} \quad (2-92a)$$

$$I_{\phi,base} = \frac{S_{base}}{3 V_{\phi,base}} \quad (2-92b)$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{\phi,base})^2}{S_{1\phi,base}} \quad (2-93a)$$

$$Z_{base} = \frac{3(V_{\phi,base})^2}{S_{base}} \quad (2-93b)$$

olar.

Üç fazlı transformatör banklarındaki hat büyüklükleri de per-unit sistemde gösterilebilir. Transformatörün baz faz gerilimi ve baz hat gerilimi arasındaki bağlantı, sargıların bağlantısına bağlıdır. Sargılar yıldız bağlandıklarında  $V_{L,base} = V_{\phi,base}$  olurken, sargılar üçgen bağlandıklarında  $V_{L,base} = \sqrt{3} V_{\phi,base}$  olur. Bir üç fazlı transformatör bankındaki baz hat akımı

$$I_{L,base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{L,base}} \quad (2-94)$$

ile verilir.

Üç fazlı transformatör problemlerine per-unit sistemin uygulanması yeni ve riimiş olan tek fazlı örneklerdeki uygulamaya benzerdir.

*Örnek 2.9* Bir 50 kVA 13800/208 V  $\Delta$ -Y dağıtım transformatörü 0.01 pu' lik direnç ve 0.07 pu' lik bir reaktansa sahiptir.

- (a) Yüksek gerilim tarafına göre transformatörün faz empedansı nedir?
- (b) Hesaplanan yüksek taraf empedansını kullanarak, tam yük ve 0.8 geri güç faktöründe bu transformatörün gerilim regülasyonunu hesaplayınız.
- (c) Bu transformatörün gerilim regülasyonunu aynı şartlar için per-unit sistemi kullanarak hesaplayınız.

#### Cözüm

- (a) Bu transformatörün yüksek gerilim tarafı 13800 V' luk bir baz hat gerilimine ve 50 kVA' lik bir baz görünürlüküne sahiptir. Primer  $\Delta$  bağlı olduğundan primer faz gerilimi hat gerilimine eşittir. Dolayısıyla primer sarginın baz empedansı

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{3(V_{\phi,base})^2}{S_{base}} \\ &= \frac{3(13,800 \text{ V})^2}{50,000 \text{ VA}} = 11,426 \Omega \end{aligned} \quad (2-93b)$$

olar. Transformatörün per-unit empedansı;

$$Z_{eq} = 0.01 + j0.07 \text{ pu}$$

dir. Dolayısıyla ohm olarak yüksek gerilim tarafı empedansı

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= Z_{eq,pu} Z_{base} \\ &= (0.01 + j0.07 \text{ pu})(11,426 \Omega) = 114.2 + j800 \Omega \end{aligned}$$

olar.

(b) Üç fazlı transformatör bankının gerilim regülasyonunu hesaplamak için, bankta ki herhangi bir transformatörün gerilim regülasyonunu belirleyiniz. Bir tek transformatör üzerindeki gerilimler faz gerilimleridir. Böylece

$$VR = \frac{V_{\phi P} - aV_{\phi S}}{aV_{\phi S}} \times 100\%$$

olar. Primer taraftaki nominal transformatör faz gerilimi 13800 V' tur. Böylece primerdeki anma faz akımı

$$I_{\phi} = \frac{S}{3V_{\phi}}$$

olarak verilir. Anma görünür gücü  $S = 50 \text{ kVA}$  olduğuna göre, buradan

$$I_{\phi} = \frac{50,000 \text{ VA}}{3(13,800 \text{ V})} = 1.208 \text{ A}$$

bulunur.

Transformatörün sekonderindeki nominal faz gerilimi  $208V / \sqrt{3} = 120V$  'tur. Transformatörün yüksek gerilim tarafına göre, bu gerilim  $V'_{\phi S} = aV_{\phi S} = 13800 \text{ V}$ 'tur. Transformatörün sekonderinin nominal gerilim ve akımında olduğunu kabul ederek, primer faz gerilimini bulunuz:

$$\begin{aligned} V_{\phi P} &= aV_{\phi S} + R_{eq} I_{\phi} + jX_{eq} I_{\phi} \\ &= 13,800 \angle 0^\circ \text{ V} + (114.2 \Omega)(1.208 \angle -36.87^\circ \text{ A}) + (j800 \Omega)(1.208 \angle -36.87^\circ \text{ A}) \\ &= 13,800 + 138 \angle -36.87^\circ + 966.4 \angle 53.13^\circ \\ &= 13,800 + 110.4 - j82.8 + 579.8 + j773.1 \\ &= 14,490 + j690.3 = 14,506 \angle 2.73^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Dolayısıyla

$$\begin{aligned} VR &= \frac{V_{\phi P} - aV_{\phi S}}{aV_{\phi S}} \times 100\% \\ &= \frac{14,506 - 13,800}{13,800} \times 100\% = 5.1\% \end{aligned}$$

bulunur.

- (c) Per-unit sisteme, çıkış gerilimi  $1 \angle 0^\circ$  ve akımı  $1 \angle -36.87^\circ$  dir. Dolayısıyla, giriş gerilimi,

$$\begin{aligned}
 V_P &= 1 \angle 0^\circ + (0.01)(1 \angle -36.87^\circ) + (j0.07)(1 \angle -36.87^\circ) \\
 &= 1 + 0.008 - j0.006 + 0.042 + j0.056 \\
 &= 1.05 + j0.05 = 1.051 \angle 2.73^\circ
 \end{aligned}$$

dir.

Gerilim regülasyonu

$$VR = \frac{1.051 - 1.0}{1.0} \times 100\% = 5.1\%$$

dir.

Şüphesiz transformatör bankının gerilim regülasyonu, hesaplar ister per-unit, ister gerçek ohm olarak yapılsın, aynı çıkmaktadır.

## 2.11 İKİ TRANSFORMATÖR KULLANARAK ÜÇ FAZ DÖNÜŞÜMÜ

Standart üç faz transformatör bağlantısından başka, sadece iki transformatörle üç fazın elde edilebileceği bağlantı yöntemleri de vardır. Bu tekniklerin tümünde transformatörün güç verme yeteneğinde bir azalma görülür, fakat ekonomik olarak gereken durumlarda bu yöntemler kullanılabilir.

Cok önemli iki transformatör bağlantısının birkaçı:

1. Açık- $\Delta$  (veya V-V) bağlantı
2. Açık-V-açık- $\Delta$  bağlantı
3. Scott-T bağlantı
4. Üç faz T bağlantıdır

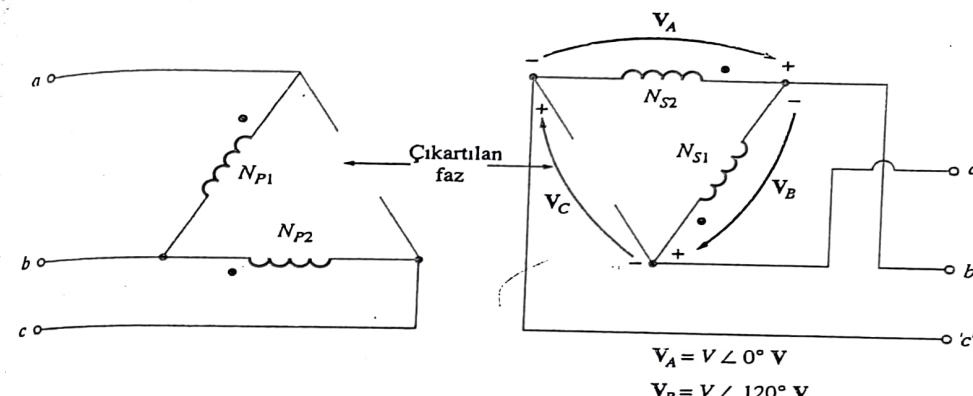
Bu transformatör bağlantılarının her biri aşağıda tanımlanmıştır.

### Açık- $\Delta$ (veya V-V) Bağlantı

Bazı durumlarda bir transformatör bankının tamamı üç fazlı bağlantıyı elde etmek için kullanılamayabilir. Örneğin, ayrı transformatörlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş  $\Delta$ - $\Delta$  bağlı bir transformatör bankındaki bir transformatörün arızalandığını ve tamir için götürüldüğünü kabul ediniz. Bu durum Şekil 2.39'da gösterilmiştir. Geriye kalan iki sekonder gerilim  $V_A = V \angle 0^\circ$  ve  $V_B = V \angle 120^\circ$  V, olursa, bu durumda arızalı transformatörden dolayı açık kalan uçlardaki gerilim,

$$\begin{aligned}
 V_C &= -V_A - V_B \\
 &= -V \angle 0^\circ - V \angle -120^\circ \\
 &= -V - (-0.5V - j0.866V) \\
 &= -0.5V + j0.866V \\
 &= V \angle 120^\circ \quad V
 \end{aligned}$$

olur. Bu değer, üçüncü transformatör boş olan kolda bulunsaydı, elde edilecek değerle aynı gerilim değeridir. Burada c fazı bazen hayalet faz olarak isimlendirilir. Böylece, açık-üçgen bağlantı, sadece iki transformatörle, üç transformatörden olu-



ŞEKİL 2-39

Açık üçgen veya V-V transformatör bağlantısı

şan bir transformatör bankının transformatörlerinden biri arızalanıp devre dışı kalısa bile güç akışını devam ettirmek üzere kullanılabilir.

Üç transformatörden biri devre dışı kaldığında açık üçgen bağlantılı yeni transformatör bankı görünür gücün ne kadarını sağlayabilir? Başlangıçta, transformatörün üçte ikisi devrede olduğundan, anma gücünün üçte ikisini sağlayacakmış gibi görünür. Bunlar çok basit olaylar değildir. Bir transformatör üç fazlı yapıdan ayrıldığında nelerin değiştiğini anlamak için, Şekil 2.49'a bakınız.

Şekil 2.40a omik yükle yüklenmiş bir transformatör bankını göstermektedir. Banktaki bir transformatörün anma gerilimi  $V_\phi$  ve anma akımı da  $I_\phi$  olursa, bu durumda yükle sağlanabilecek maksimum güç,

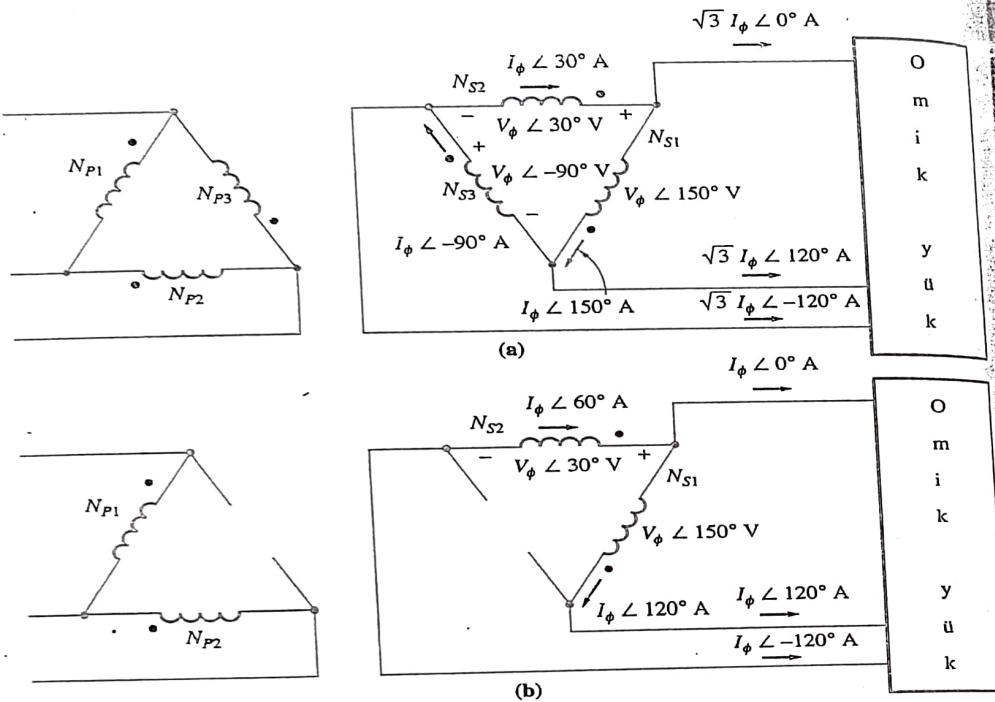
$$P = 3V_\phi I_\phi \cos \theta$$

olur. Her bir fazdaki  $V_\phi$  gerilimi ve  $I_\phi$  akımı arasındaki açı  $0^\circ$  dir. Buna göre transformatörden sağlanan toplam güç,

$$\begin{aligned}
 P &= 3V_\phi I_\phi \cos \theta \\
 &= 3V_\phi I_\phi
 \end{aligned} \tag{2-95}$$

olur.

Açık üçgen transformatör Şekil 2.40b'de gösterilmiştir. Bu transformatörde gerilim ve akımlar arasındaki açılara dikkat edilmelidir. Transformatör fazlarının biri devre dışı kaldığından iletim hattı akımı her bir transformatördeki faz akımına eşit olur ve transformatör bankındaki gerilim ve akım arasında  $30^\circ$  lik bir faz farkı meydana gelir. Akım ve gerilim açıları iki transformatörün her birinde farklı olduğundan, maksimum gücü her birinin sağlayıp sağlamadığı araştırılmalıdır. Transformatör 1 için, gerilim açısı  $150^\circ$  ve akım açısı  $120^\circ$  dir. Buna göre transformatör 1'deki maksimum güç ifadesi,



**ŞEKİL 2-40**  
(a) Δ-Δ bağlantılı bir transformator bankasındaki gerilimler ve akımlar (b) Açık-Δ transformator bankasındaki gerilimler ve akımlar

$$\begin{aligned} P_1 &= 3V_\phi I_\phi \cos(150^\circ - 120^\circ) \\ &= 3V_\phi I_\phi \cos 30^\circ \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi \end{aligned} \quad (2-96)$$

olar.

Transformator 2 için, gerilim açısı 30° ve akım açısı 60° dir. Buna göre maksimum güç,

$$\begin{aligned} P_2 &= 3V_\phi I_\phi \cos(30^\circ - 60^\circ) \\ &= 3V_\phi I_\phi \cos(-30^\circ) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} V_\phi I_\phi \end{aligned} \quad (2-97)$$

olar.

Dolayısıyla, açık-üçgen bankın toplam maksimum gücü

$$P = \sqrt{3}V_\phi I_\phi \quad (2-98)$$

ile verilir.

Transformator ister 2 ister 3 fazlı olsun her bir transformator fazındaki ama akım ve gerilimi, aynıdır. Buna göre açık Δ bankasından elde edilen çıkış gücünün, normal 3 faz banktan elde edilen çıkış gücüne oranı

$$\frac{P_{\text{open } \Delta}}{P_{\text{3 phase}}} = \frac{\sqrt{3}V_\phi I_\phi}{3V_\phi I_\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \quad (2-99)$$

olur. Açık-Δ bağlantısından elde edilen çıkış gücü, orijinal bananma değerlerinin sadece %57.7'sidir.

Burada sorulabilecek iyi bir soru vardır: Açık-Δ bağlantınının değerlerinin bu şekilde azalmasının nedeni nedir? Normalde, iki transformatörün birlikte üretebildiği toplam güç orijinal bankın nominal değerinin üçte ikisidir. Açık-Δ bankın reaktif gücünü dikkatle inceleyiniz. Transformator 1'in reaktif gücü

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3V_\phi I_\phi \sin(150^\circ - 120^\circ) \\ &= 3V_\phi I_\phi \sin 30^\circ \\ &= \frac{1}{2} V_\phi I_\phi \end{aligned}$$

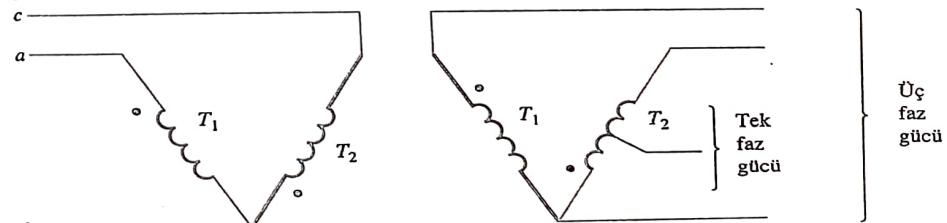
dir. Transformator 2'nin reaktif gücü,

$$\begin{aligned} Q_2 &= 3V_\phi I_\phi \sin(30^\circ - 60^\circ) \\ &= 3V_\phi I_\phi \sin(-30^\circ) \\ &= -\frac{1}{2} V_\phi I_\phi \end{aligned}$$

olur. Buna göre bir transformator reaktif güç üreterken bir diğeri de tüketiyor. İki transformator arasındaki bu enerji değişimi çıkış gücünü asla olmasa gereken orijinal bankın nominal değerinin %66.7'si yerine yüzde %57.7'sine sınırlar.

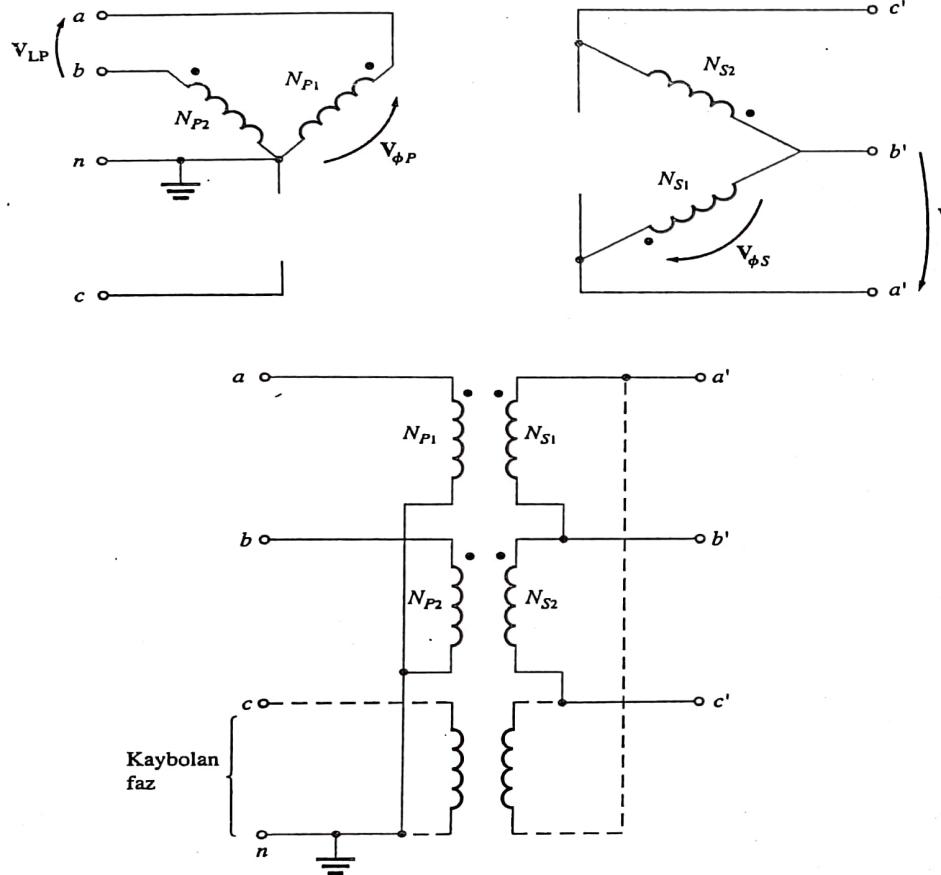
Açık-üçgen bağlantının nominal değerine bakmanın bir diğer yolu, kalan iki transformatörün (fazın) nominal değerinin %86.6'sının kullanılabilenin görülmeliştir.

Açık-üçgen bağlantılar; arasında tek faz bir yük için üç faz için küçük bir kısmını kullanmak gerekiyor. Böyle bir durumda, Şekil 2.41'deki bağlantı kullanılabılır. Burada T<sub>2</sub> transformatoru T<sub>1</sub> transformatorlarından çok daha büyütür.



**ŞEKİL 2-41**

Açık transformator bağlantısı kullanılarak, birkaç tek faz güç ile üç faz gücünün küçük bir kısmının elde edilmesi. T<sub>2</sub> transformatoru T<sub>1</sub> transformatorundan çok daha büyütür.



ŞEKİL 2.42

Açık-Y-açık- $\Delta$  transformator bağlantısı ve bağlantı diyagramı. Bu bağlantının, üçüncü transformator ve nötr hattının bulunması haricinde Şekil 3.38b'deki Y- $\Delta$  bağlantıyla aynı olduğuna dikkat ediniz.

### Açık-Yıldız-Açık-Üçgen Bağlantı

Açık-yıldız-açık-üçgen bağlantı, primer gerilimlerin iki faz ve nötrden türetilmesi haricinde açık üçgen bağlantıyla benzerdir. Bu bağlantı Şekil 2.42'de gösterilmiştir. Bu bağlantı şekli, kursal alanlarda henüz üç fazın oluşturulmadığı bölgelerde üç faza gereksinim duyan küçük ticari tüketicilere hizmet vermek için kullanılır. Bu bağlantıyla, bir tüketici geçici olarak üç fazlı bağlantı yapısı elde edilinceye kadar üç faz hizmeti alabilir.

Bu bağlantının ana dezavantajı, primer devrenin nötrinden büyük bir dönüş akımının akmak zorunda olmasıdır.

### Scott-T Bağlantı

Scott-T bağlantı üç fazlı bir güç kaynağından,  $90^\circ$  faz farklı iki faz elde etmek için kullanılan bir bağlantı şeklidir. AA güç iletiminde iki faz ve üç faz güç sistemlerinin en yaygın sistemler olduğu önceden anlatılmıştır. Günümüzde, iki ve üç fazlı sistemlerin birbirine bağlanabilmesi için Scott-T transformator bağlantısı geliştirilmiştir.

Bugün, iki-fazlı güç asında belirli kontrol uygulamaları için sınırlanmıştır; fakat Scott-T, hala bu uygulamalar için gereken gücün üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Scott-T aynı anma değerli iki tek-fazlı transformator bağlantısından ibarettir. Bu transformatörlerden biri primer sargasında tam yük geriliminin %86.6'sına denk gelen bir kademeye sahiptir. Bağlantı şekli, Şekil 2-43a'da gösterilmiştir.  $T_2$  transformatörünün %86.6'lık kısmının üç noktası  $T_1$  transformatörünün orta noktasına bağlanmıştır. Primer sargaşa uygulanan gerilimler Şekil 2-43b'de ve iki transformatörün primerine uygulanan sonuç gerilimler Şekil 2-43c'de gösterilmiştir. Bu gerilimler  $90^\circ$  faz farkına sahip olduklarından, sonuçta iki fazlı çıkış edilmiş olur.

Bu bağlantıyla iki fazlı gücün üç fazlı giice dönüştürmek mümkündür; fakat pek az iki fazlı generatör kullanımında olduğundan, bu nadiren yapılır.

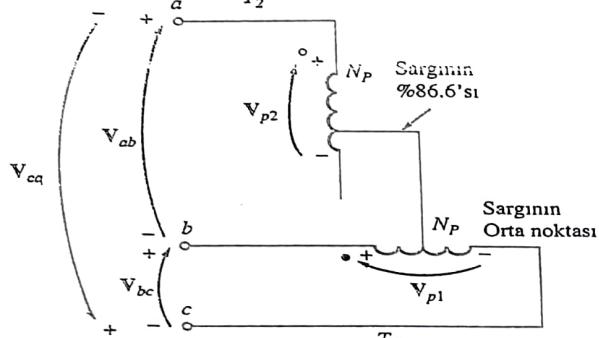
### Üç-faz T Bağlantı

Scott-T bağlantı, üç fazlı gücü farklı bir gerilim seviyesindeki iki fazlı güç'e dönüştürmek için iki transformator kullanır. Bu bağlantının basit şekilde değiştirileşile, aynı iki transformator, üç faz gücü farklı bir gerilim seviyesindeki üç faz gücü de dönüştürebilir. Bu tür bir bağlantı Şekil 2-44'de gösterilmiştir. Burada  $T_2$  transformatörünün hem primer hem de sekonder sargasları; %86.6'lık kademeye sahiptir ve bu kademeler,  $T_1$  transformatörünün karşılık gelen sargasının merkezindeki kademelere bağlanır. Bu bağlantida  $T_1$  ana transformator ve  $T_2$  tersiyer transformator olarak isimlendirilir.

Scott-T'de olduğu gibi, üç faz giriş gerilimi, transformatörlerin primer sargasında  $90^\circ$  faz farklı iki gerilim üretir. Bu primer gerilimler,  $90^\circ$  faz farklı sekonder gerilimler üretir. Sekonder gerilimler tekrar bir üç faz çıkış verecek şekilde tekrar düzenlenir; bu durum scott-T bağlantya benzemez.

Diğer üç faz iki transformatörlü (açık-üçgen ve açık-yıldız- açık-üçgen) bağlantılara göre üç-faz T bağlantının ana avantajı transformator bankının hem primer ve hem de sekonderine bir nötrün bağlanabilmesidir. Bu bağlantı bazen müstakil tam teşekkürüllü üç faz dağıtım transformatörlerinde kullanılır. Çünkü bu bağlantının yapımı (imalat) maliyetleri üç-fazlı bir transformator bankının maliyetinden daha düşüktür.

132 ELEKTRİK MAKİNALARININ TEMELLERİ



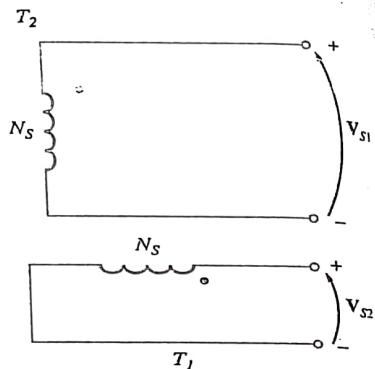
(a)

$$\begin{aligned}V_{ab} &= V \angle 120^\circ \\V_{bc} &= V \angle 0^\circ \\V_{ca} &= V \angle -120^\circ \\V_{ab} &\quad V_{bc} \\V_{ca} &\end{aligned}$$

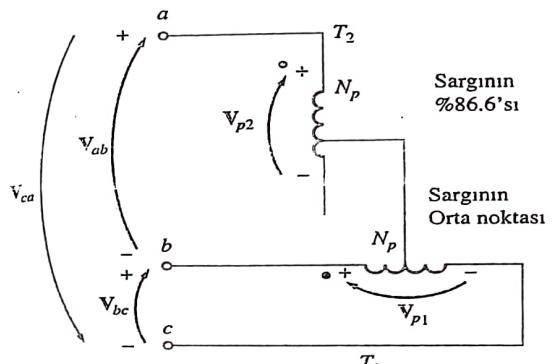
(b)

$$\begin{aligned}V_{S2} &= \frac{V}{a} \angle 90^\circ & a &= \frac{N_p}{N_s} \\V_{S1} &= \frac{V}{a} \angle 0^\circ\end{aligned}$$

(d)



(c)

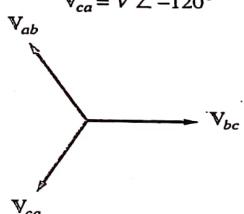


(a)

$$V_{ab} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{bc} = V \angle 0^\circ$$

$$V_{ca} = V \angle -120^\circ$$



(b)

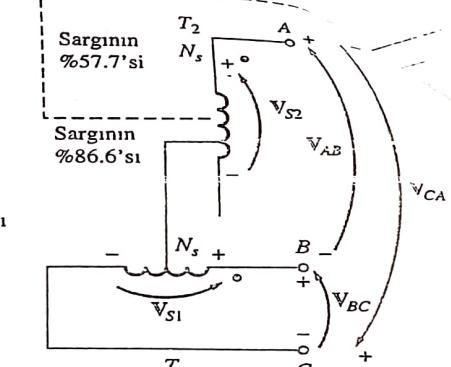
$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{AB} &= \frac{V}{a} \angle 120^\circ & a &= \frac{N_p}{N_s} \\V_{S2} & \\V_{S1} &= \frac{V}{a} \angle 0^\circ \\V_{CA} &= \frac{V}{a} \angle -120^\circ\end{aligned}$$

$$\text{Note: } \mathbf{V}_{AB} = \mathbf{V}_{S2} - \mathbf{V}_{S1}$$

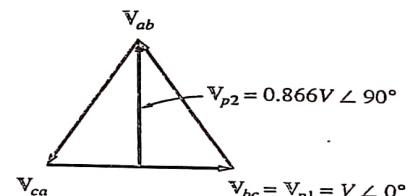
$$\mathbf{V}_{BC} = \mathbf{V}_{S1}$$

$$\mathbf{V}_{CA} = -\mathbf{V}_{S1} - \mathbf{V}_{S2}$$

(d)



(a)



(c)

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{AB} &= \frac{V}{a} \angle 120^\circ \\V_{BC} &= \frac{V}{a} \angle 0^\circ \\V_{CA} &= \frac{V}{a} \angle -120^\circ\end{aligned}$$

(e)

ŞEKİL 2-43

Scott-T transformator bağlantısı (a) Bağlantı şeması (b) Üç-faz giriş gerilimleri (c) Transformatör primer sargılarındaki gerilimler (d) iki-faz sekonder gerilimler.

Tersiyer transformator sargılarının alt kısımları, ne primer ve ne de sekonder sargıda kullanılmadığından, yani performans üzerine bir etkileri olmadığından dikkate alınmamayırlar.

ŞEKİL 2-44

Üç-faz T transformator bağlantısı (a) Bağlantı şeması (b) Üç-faz giriş gerilimleri; (c) Transformatör primer sargılarındaki gerilimler (d) Transformatör sekonder sargılarındaki gerilimler (e) Sonuç üç-faz sekonder gerilimler.

## 2-12 TRANSFORMATÖR RATINGLERİ VE İLGİLİ PROBLEMLER

Transformatörler dört ana anma değerine sahiptirler: görünür gütç, gerilim, akım ve frekans. Bu bölümde transformatör anma değerleri incelenecel ve bu büyükliklerin seçim kriterleri açıklanacaktır. Bu bölümde ayrıca; bir transformatörün iletim hattına ilk bağlanışında meydana gelen aşırı akımla ilgili sorular da göz önüne alınacaktır.

### Bir Transformatörün Gerilim ve Frekans Anma Değerleri

Bir transformatörün gerilim anma değeri iki fonksiyon ortaya koyar. Bu fonksiyonlardan biri, sargıya aşırı bir gerilim uygulandığında sargı izolasyonunun bozulmasını önlemektir. Bu pratikte transformatörler için ciddi bir problem değildir. İkinci fonksiyon, transformatörün mıknatıslanma akımı ve mıknatıslanma eğrisiyle ilgilidir. Şekil 2-11, bir transformatör için mıknatıslanma eğrisini gösterir.

$$v(t) = V_M \sin \omega t$$

volt'luk bir sürekli durum gerilimi transformatörün primer sargısına uygulanrsa, transformatörün akısı

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N_p} \int V_M \sin \omega t dt \\ \phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \end{aligned} \quad (2-100)$$

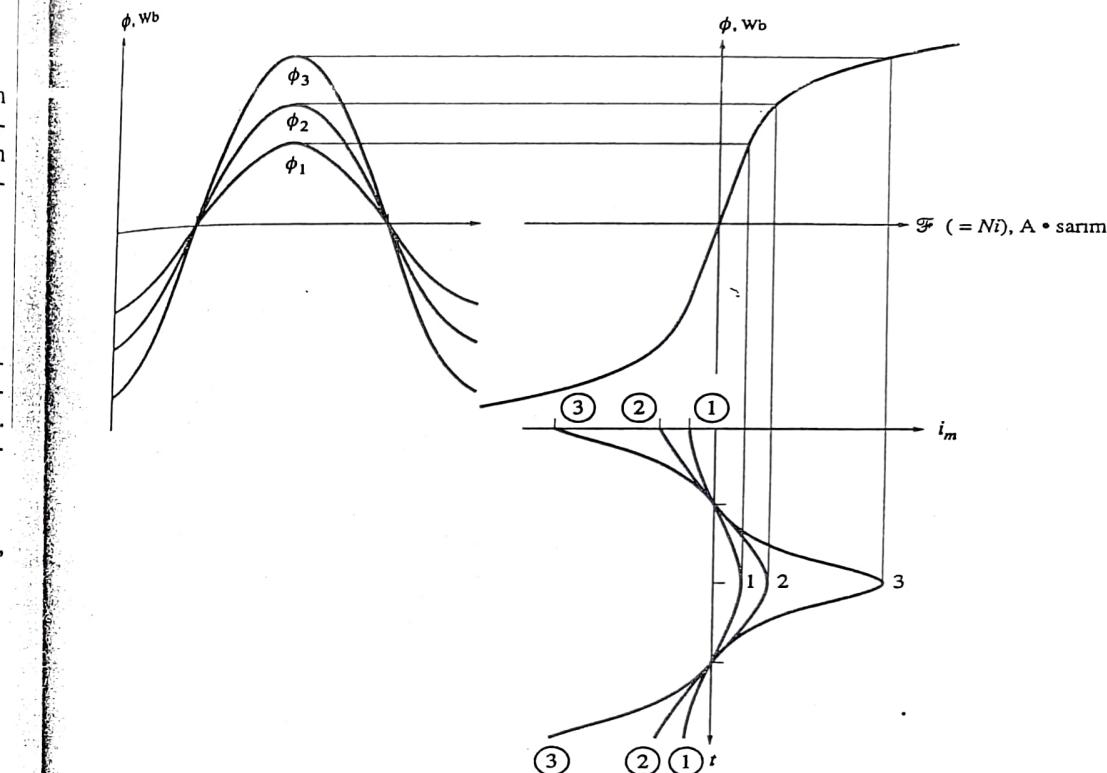
olarak elde edilir.

Uygulanan  $V(t)$  gerilimi %10 artırılırsa, sonuçta çekirdekteki maksimum akıda %10 artar. Mıknatıslanma eğrisindeki belli bir noktanın üzerinde, akıdaki %10'luk bir artış, mıknatıslanma akımında %10'dan daha büyük bir artış gereksinim duyar. Bu durum ŞEKİL 2-45'de açıklanmıştır. Gerilim artarken, yüksek mıknatıslanma akımları sonuçta kabul edilemeyecek değerlere ulaşır. Uygulanacak gerilimin maksimum değeri (ve dolayısı ile nominal gerilim) çekirdekte mümkün olan maksimum mıknatıslanma akımı ile belirlenir.

Maksimum akı sabit tutulursa, gerilim ve frekansın ortak bir şekilde davranışına dikkat ediniz.

$$\phi_{\max} = \frac{V_{\max}}{\omega N_p} \quad (2-101)$$

Buna göre; 60 Hz'lik bir transformatör 50 Hz'de çalıştırılırsa, uygulanan gerilim 1/6 oranında azaltılmalıdır, aksi takdirde çekirdekteki akının tepe değeri çok yükselecektir. Frekansındaki azalmaya karşılık uygulanan gerilimin düşürülmesi işlemine DERATING denir. Benzer şekilde, 50 Hz'lik bir transformatör eğer bir



ŞEKİL 2-45

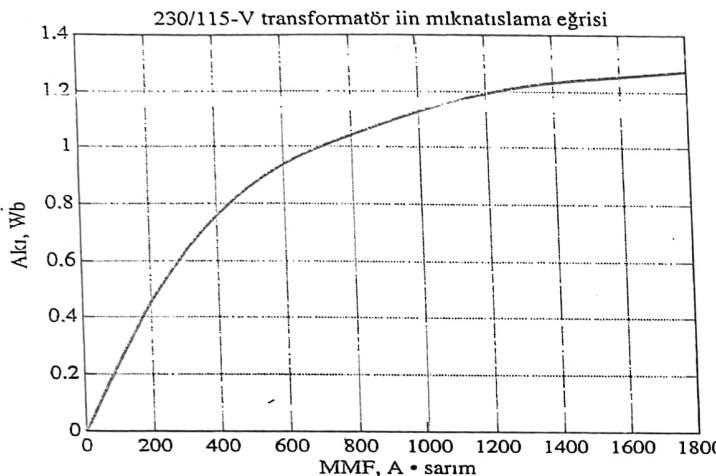
Belirli bir mıknatıslanma akımı üzerine bir transformatör çekirdeğindeki akının tepe değerinin etkisi izolasyon problemi oluşmazsa, 60 Hz'deki gerilimden %20 daha yüksek bir gerilimle, çalıştırılabilir.

**Örnek 2-10:** 1 kVA, 220/115 V, 60 Hz'lik tek fazlı bir trasformatörün primer sargı sarım sayısı 850, sekonder sargı sarım sayısı 425'dir. Bu trasformatörün mıknatıslanma eğrisi Şekil 2-46'da gösterilmiştir.

- Bu trasformatörün 230 V, 60 Hz'lik bir güç kaynağına bağlanma durumu için mıknatıslanma akımını hesaplayınız ve çiziniz. Bu durum için mıknatıslanma akımının rms değerini hesaplayınız.
- Bu trasformatörün 230 V, 50 Hz'lik bir güç kaynağına bağlanma durumu için mıknatıslanma akımını hesaplayınız ve çiziniz. Mıknatıslanma akımının rms değerini hesaplayınız. 60 Hz'deki mıknatıslanma akımı ile karşılaşıldığında bu akım nasıldır?

### Çözüm

Bu problemi çözmeyenin en iyi yolu; bu çekirdek için zamanın bir fonksiyonu olarak akımı



ŞEKİL 2-46

Örnek 2-10'daki 230/115V'luk transformatör için mknatslanma eğrisi

hesaplamak ve manyetomotor kuvvette karşılık gelen her bir akayı bulmak için mknatslama eğrisini kullanmaktadır. Bu durumda mknatslama akımı

$$i = \frac{\mathcal{F}}{N_p} \quad (2-102)$$

denkleminden belirlenebilir.

Çekirdeğe uygulanan gerilimin  $V(t) = V_m \sin \omega t$  volt olduğu kabul edilirse, zamanın bir fonksiyonu olarak çekirdekteki akı (2-101) denklemi ile verilir.

$$\phi(t) = -\frac{V_m}{\omega N_p} \cos \omega t \quad (2-100)$$

Bu transformatör için mknatslanma eğrisi **mag\_curve\_1.dat** olarak isimlendirilen bir dosya'da elektronik olarak kullanılabilir. Bu dosya buradaki akı değerlerini, karşılık gelen mmk değerlerine dönüştürmek için kullanılabilir. Sonuç olarak, mknatslanma akımının rms (etkin) değeri

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2-103)$$

denkleminden hesaplanabilir.

Bu hesaplamaları yapmak için kullanılan MATLAB programı aşağıda verilmiştir.

```
% M-file: mag_current.m
% M-file to calculate and plot the magnetization
% current of a 230/115 transformer operating at
% 230 volts and 50/60 Hz. This program also
% calculates the rms value of the mag. current.

% Load the magnetization curve. It is in two
% columns, with the first column being mmf and
% the second column being flux.
```

```
load mag_curve_1.dat;
mmf_data mag_curve_1(:,1);
flux_data mag_curve_1(:,2);

% Initialize values
VM 325; % Maximum voltage (V)
NP 850; % Primary turns

% Calculate angular velocity for 60 Hz
freq 60; % Freq (Hz)
w 2 * pi * freq;

% Calculate flux versus time
time 0:1/3000:1/30; % 0 to 1/30 sec
flux -VM/(w*NP) * cos(w.*time);

% Calculate the mmf corresponding to a given flux
% using the flux's interpolation function.
mmf interp1(flux_data,mmf_data,flux);

% Calculate the magnetization current
im mmf / NP;

% Calculate the rms value of the current
irms sqrt(sum(im.^2)/length(im));
disp(['The rms current at 60 Hz is ', num2str(irms)]);

% Plot the magnetization current.
figure(1)
subplot(2,1,1);
plot(time,im);
title ('\bf Magnetization Current at 60 Hz');
xlabel ('\bf Time (s)');
ylabel ('\bf itI_{m} \rm(A)');
axis([0 0.04 -2 2]);
grid on;

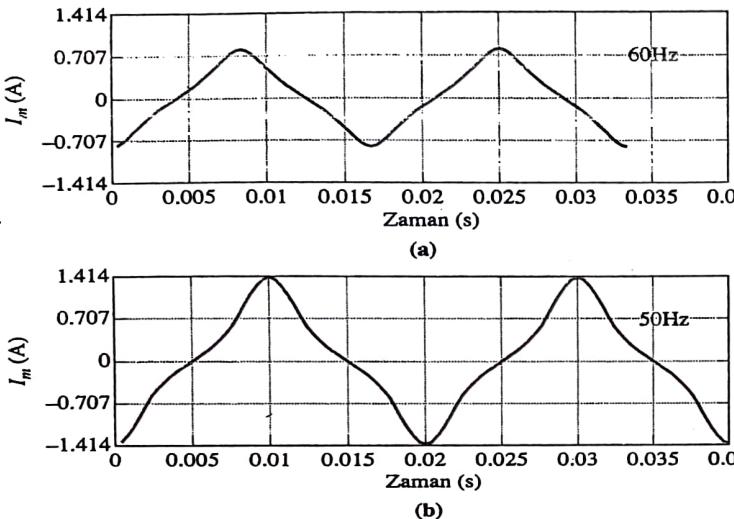
% Calculate angular velocity for 50 Hz
freq 50; % Freq (Hz)
w 2 * pi * freq;

% Calculate flux versus time
time 0:1/2500:1/25; % 0 to 1/25 sec
flux -VM/(w*NP) * cos(w.*time);

% Calculate the mmf corresponding to a given flux
% using the flux's interpolation function.
mmf interp1(flux_data,mmf_data,flux);

% Calculate the magnetization current
im mmf / NP;

% Calculate the rms value of the current
irms sqrt(sum(im.^2)/length(im));
disp(['The rms current at 50 Hz is ', num2str(irms)]);
```



ŞEKİL 2-47

(d) 60 Hz'de çalışan trasformatörün mıknatışlanma akımı (b) 50 Hz'de çalışan trasformatörün mıknatışlanma akımı

```
% Plot the magnetization current.
subplot(2,1,2);
plot(time,im);
title ('\bfMagnetization Current at 50 Hz');
xlabel ('\bfTime (s)');
ylabel ('\bf\itI_{m} \rm(A)');
axis([0 0.04 -2 2]);
grid on;
```

Bu program çalıştırıldığında, sonuçları

```
> mag_current
The rms current at 60 Hz is 0.4894
The rms current at 50 Hz is 0.79252
```

olar. Sonuçta elde edilen mıknatışlanma akımları Şekil 2-47'de gösterilmiştir. Mıknatışlanma akımının rms değerinin, frekans 60 Hz'den 50 Hz'e düşürüldüğünde %60'dan daha fazla arttuğuna dikkat ediniz.

### Bir Trasformatörün Görünür Güç Anma Değeri

Bir trasformatörün görünürlük ratinginin esas amacı; gerilim anma değeri ile birlikte trasformatör sargılarından geçecek akımın ayarlanmasıdır. Trasformatörden akan akım,  $P_R$  kayıplarının neden olduğu ısının kontrolü açısından önemlidir. Burada ısı kritik bir değerdir; çünkü trasformatör bobinlerindeki aşırı ısı, sargı izolasyonunun ömrünü önemli ölçüde kısaltır.

Bir trasformatörün gerçek voltamper anma değeri bir tek değerden daha fazla olabilir. Gerçek trasformatörlerde, trasformatörün kendisine ait bir voltamper anma değeri yanında, cebri soğutmayla ilgili ve degerce daha yüksek bir anma değeri vardır. Güç anma değeri fikrinin arkasındaki temel fikir trasformatörün ömrünün kısalmasına için trasformatör sargılarında dağılan ısının sınırlanma zorluluğudur.

Bir trasformatörün gerilimi herhangi bir nedenle azaltılırsa (yani o trasformatör normalden daha düşük bir frekansa çalıştırılırsa), bu durumda trasformatörün voltamper anma değeri eşdeğer miktarda azaltılmalıdır. Bu yapılmazsa, trasformatör sargılarındaki akım maksimum seviyeyi aşacak ve aşırı ısıya neden olacaktır.

### Akımlı Yükselme Problemi

Trasformatördeki gerilim seviyesi ile ilgili bir problem, başlangıçta (trasformatörün devreye alınmasında) oluşan akım artış problemidir. Trasformatörün güç hattına ilk bağlanma durumunda uygulanan gerilimin

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + \theta) \quad V \quad (2-104)$$

olduğunu kabul ediniz. Uygulanan gerilimin ilk yarı-peryodunda akının maksimum değerine ulaşması; gerilimin uygulandığı andaki gerilim açısına bağlıdır. Gerilimin başlangıç değeri

$$v(t) = V_M \sin(\omega t + 90^\circ) = V_M \cos \omega t \quad V \quad (2-105)$$

ve çekirdekteki başlangıç akı değeri sıfır olursa; bu durumda ilk yarı peryottaki maksimum akı sürekli durumdaki maksimum akıya eşit olacaktır.

$$\phi_{\max} = \frac{V_{\max}}{\omega N_p} \quad (2-101)$$

Bu akı değeri seviyesi sürekli durum akı değeridir, bu durum özel problemlere neden olmaz. Fakat uygulanan gerilim

$$\text{olursa, ilk yarı peryottaki maksimum akı}$$

$$v(t) = V_M \sin \omega t \quad V$$

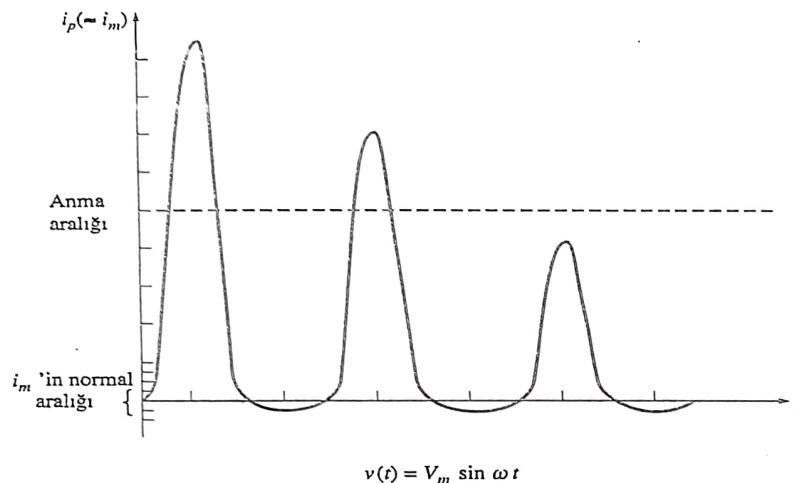
$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int_0^{\pi/\omega} V_M \sin \omega t \, dt$$

$$= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \Big|_0^{\pi/\omega}$$

$$= -\frac{V_M}{\omega N_p} [(-1) - (1)]$$

$$\boxed{\phi_{\max} = \frac{2V_{\max}}{\omega N_p}} \quad (2-106)$$

olarak verilir. Bu maksimum akı, normal sürekli durum akısının iki katıdır. Şekil 2-11'deki mıknatışlanma eğrisi incelenirse, çekirdekteki akının iki katına çıkması halinde mıknatışlanma akımının çok büyük değerlere çıkabileceği kolayca görülebilir. Gerçekte peryodun bir kısmında, trasformatör kısa devreymiş gibi davranışır



ŞEKİL 2-48

Transformatörün devreye alınmasında miknatışlanma akımından kaynaklanan akım artışı

ve çok büyük bir akım çeker (Şekil 2-48).

Transformatörün devreye alınmasında problemsiz faz açısı  $90^\circ$  ile en kötü durumun meydana geldiği  $0^\circ$  lik faz açısı arasındaki herhangi bir açıda gerilim uygulandığında, transformatör fazından aşırı akımlar akabilir. Uygulanan gerilimin faz açısı normalde devreye alma esnasında kontrol edilemez; bundan dolayı transformatör hatta bağlandıktan sonra ilk bir kaç periyotta çok yüksek akım artışları meydana gelebilir. Transformatör ve transformatörün bağıldığı güç sistemi bu akımlara dayanıbmelidir.

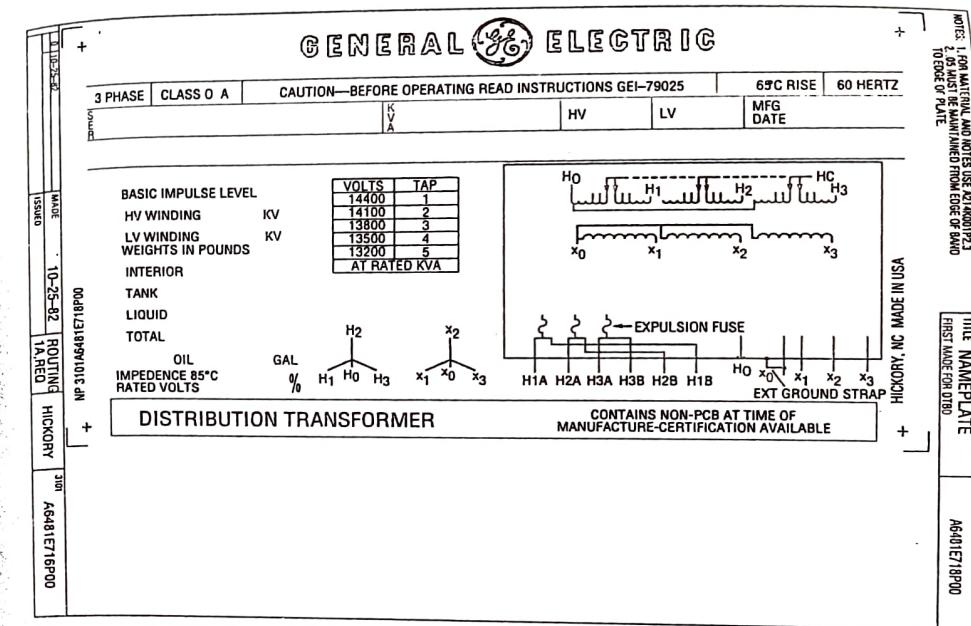
## Transformatörün Etiketi

Bir dağıtım transformatörünün tipik etiketi Şekil 2-49'da gösterilmiştir. Böyle bir etiket, anma gerilimi, anma kilovoltamperi, anma frekansı ve transformatör per-unit seri empedans değerini içerir. Transformatör etiketi ayrıca, transformatörün sargı şemasını ve transformatörün her bir kademesi için gerilim anma değerlerini gösterir.

Etilketler tipik olarak transformatörün tasarım çeşidini ve çalışma bilgileri için referansları da içerir.

### 2.13 ÖLCÜ TRANSFORMATÖRLERİ

Ölçüm amacıyla güç sistemlerinde iki özel amaçlı transformatör kullanılır. Bunlar dan biri gerilim transformatörü diğeri de akım transformatöridir.



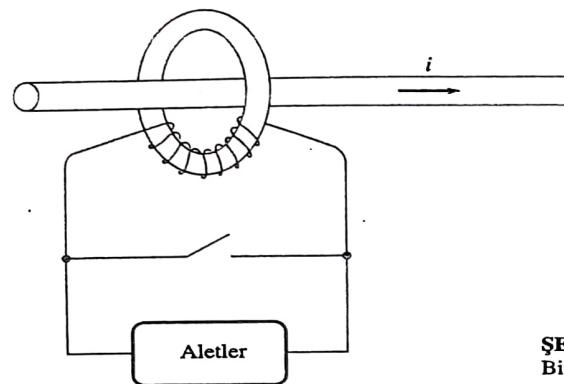
SEKİL 2-49

Bir dağıtım transformatörü etiket örneği. Listelenen anma değerlerine dikkat ediniz: gerilim, frekans, görünür güç, ve kademe ayarları (General Elektrik Şirketinin İzniyle)

*Bir gerilim transformatörü; yüksek gerilim tarafı primer, düşük gerilim tarafı sekonder olarak sarılmış özel sarımlı bir transformatördür. Çok düşük güç ratingine sahiptir ve bu transformatörün tek amacı güç sisteminin gerilimini düşürtüp bu geriliği cihazlarda izlenecek değere getirmektir. Bu transformatörün ilkesel amacı gerilim örnekleme olduğundan, doğruluk derecesi çok yüksek olmalı, gerilimin gerçek değerini bozmamalıdır. Birkaç doğruluk sınıfına sahip olan gerilim transformatörleri herhangi bir uygulamada hangi doğruluk sınıfı gerekiyorsa ona göre seçilmelidir.*

Akim transformatörleri bir hattaki akımı örnekleyerek, akımı ölçülebilir ve güvenli bir seviyeye indirgerler. Tipik bir akım transformatörünün şeması Şekil 2-50'de gösterilmiştir. Akım transformatörü ferromanyetik bir halka üzerine sarılmış sekonder sargı ve halkanın ortasından geçen bir tek primer hattan ibarettir. Ferromanyetik halka, primer hattan akan akının oluşturduğu akının bir örneğini alır ve tutar. Bu akı sekonder sargıda bir gerilim induksiyonu ve bir akım oluşturur.

Akim transformatörü bu bölümde anlatılan diğer transformatörlerden farklıdır. Çünkü akım transformatörlerinin sargıları arasındaki kuplaj çok zayıftır. Akım transformatörlerindeki ortak akı  $\phi_M$  diğer transformatörlerden farklı olarak kaçak akı  $\phi_L$ 'den daha küçüktür. Zayıf kuplajdan dolayı, (2-1) ile (2-5) denklemlerindeki gerilim ve akım oranları bir akım transformatörüne uygulanmaz. Yine de bir



**ŞEKİL 2-50**  
Bir akım transformatorünün bağlantısı

akım transformatöründeki sekonder akım çok büyük bir oranda primer akımla doğrudan orantılıdır ve alet ölçüm amaçlarına uygun olarak hat akımının doğru bir örneğini sağlayabilir.

Akım transformatör anma değerleri primer akımın sekonder akıma oranı olarak verilir. Tipik bir akım transformatörü oranı 600:5, 800:5 veya 1000:5 gibi oranlarla verilir. 5 A değeri bir akım transformatorünün sekonderi üzerinde standarttır.

Bir akım transformatorunu tüm anlarda kısa devreden korumak oldukça önemlidir. Çünkü akım transformatorünün sekonder uçları boşta bırakıldığından sekonder uçlarında son derece yüksek gerilimler görülebilir. Gerçekte bir akım transformatöründen elde edilen akımı kullanan röleler ve diğer aletlerin birçoğu, rölenin kontrol ve ayarı için sökülmeden önce kapatılması gereken bir kısa devre bağlantısına sahiptirler. Bu uçlar kısadevre yapılmadan röle soketten çıkartılırsa çok yüksek (tehlikeli) gerilimler oluşabilir.

## 2.14 ÖZET

Bir transformatör; bir gerilim seviyesindeki elektrik enerjisini, manyetik alanın değişimiyle bir diğer gerilim seviyesindeki elektrik enerjisine dönüştüren bir alettir. Transformatörler elektrik gücünün uzak mesafelere ekonomik olarak iletilmesini sağlayarak modern hayatı son derece önemli bir rol oynarlar.

Bir transformatörün primerine gerilim uygulandığında, faraday kanununa göre bir akı meydana gelir. Çekirdekteki akının değişmesi transformatörün sekonder sargasında bir gerilim induktörleridir. Çünkü transformatör çekirdekleri çok yükseğinden (permeabiliteye) sahip olduklarıdan, çekirdekte akımı üretmek için gereken net manyetomotor kuvvet çok küçük olur. Net manyetomotor kuvvet çok küçük olduğundan, primer devrenin manyetomotor kuvveti, sekonder devrenin manyetomotor kuvvetine yaklaşık olarak eşit ve zit olmalıdır. Bu gerçek transformatör akım oranını verir.

Gerçek bir transformatör hem primer hem de sekonder sargı kaçak akılarına

sahiptir. Ayrıca histerezis, girdap akımı ve bakır kayipları da vardır. Bu etkiler transformatörün eşdeğer devresinde hesaba katılır. Transformatör kusurları, gerçek bir transformatörde gerilim regülasyonu ve verimi ile ölçülür.

Per-unit sistem kullanımı, transformatörleri içeren sistemlerin çalışmasını incelemek için uygun bir yoldur; çünkü bu yolla sisteme farklı gerilim seviyeleri ortadan kalkar. Ek olarak bir transformatörün per unit empedansları nisbeten bir aralıkta değerlere sahip olduğundan ve kendi anma değerlerine göre ifade edildiklerinden, problem çözümlerinde mantıksız sonuçlara karşı uygun bir kontrol sağlanır.

Bir ototransformatör, iki sargılı bağlış şekliyle bilinen bir transformatörden farklıdır. Transformatörün bir tarafındaki gerilim her iki sarginin uçlarındaki gerilimin toplamıdır. Bir ototransformatördeki gücün sadece bir kısmını gerçekten sargılar üzerinden geçer. Bir ototransformatör aynı hacimdeki bilinen bir transformatör ile karşılaşıldığında güç anma avantajına sahiptir. Bununla birlikte bağlantı, transformatörün primer ve sekonder tarafları arasındaki elektriksel izolasyonu ortadan kaldırır.

Üç fazlı devrelerin gerilim seviyeleri iki veya üç transformatörün düzenli bir kombinasyonuyla dönüştürülebilir. Gerilim transformatörleri ve akım transformatörleri bir devredeki mevcut akım ve gerilimleri örnekleyebilir. Her iki alet büyük güçlü dağıtım sistemlerinde çok yaygındır.

## SORULAR

1. Bir transformatörün sarım oranı, transformatörün uçlarındaki gerilimlerin oraniyla aynı midir? Niçin öyledir veya niçin öyle değildir?
2. Mıknatışlanma akımı niçin bir transformatörün çekirdeğine uygulanan gerilimin üst sınırını belirler?
3. Bir transformatörün uyartım akımını hangi bileşenler belirler? Transformatörün eşdeğer devresinde bunlar nasıl modellenir?
4. Bir transformatördeki kaçak akı nedir? Niçin bir transformatörün eşdeğer devresinde bir induktansla modellenir?
5. Bir transformatörde meydana gelen kayipları listeleyiniz ve tanımlayınız.
6. Bir yükün güç faktörü niçin bir transformatörün gerilim regülasyonunu etkiler?
7. Kısa devre deneyi bir transformatörde niçin sadece  $I^2 R$  kayiplarını gösterir, uyartım kayiplarını göstermez?
8. Niçin açık devre deneyi sadece uyartım kayiplarını gösterir,  $I^2 R$  kayiplarını göstermez?
9. Per-unit sistem, bir güç sisteminde farklı gerilim seviyeleri problemini nasıl ortadan kaldırır?
10. Ototransformatörler aynı boyuttaki bilinen transformatörlerden niçin daha fazla güç sağlayabilir?
11. Transformatördeki kademeler nedir? Niçin kullanılırlar?
12. Y-Y bağlı üç fazlı transformatörlerde ortaya çıkan problemler nelerdir?
13. Bir TCUL transformatör nedir?
14. İki transformatörle üç fazlı dönüşüm nasıl başabilir? Ne tür bağlantılar kullanılabilir? Avantajları ve dezavantajları nelerdir?
15. Açık  $\Delta$  transformatör bağlantısında yüze sağlanan gücün, normal  $\Delta-\Delta$  bağlantısının sağladığı gücün niçin %57.7'sine sınırlandığını açıklayınız.

- 2.16. 60 Hz'lik bir transformatör 50 Hz'lik bir sistemde çalıştırılabilir mi? Bu çalışmaya sağlamalı için ne gereklidir?
- 2.17. Bir transformatör bir güç hattına bağlandığında ilk olarak ne tür bir problemle karşılaşılır? Bu problemi hafifletmek için bir şey yapılabılır mı?
- 2.18. Gerilim transformatörü nedir? Nasıl kullanılır?
- 2.19. Akım transformatörü nedir? Nasıl kullanılır?
- 2.20. Bir dağıtım transformatörünün anma değerleri 18 kVA, 20.000/480 V ve 60 Hz'dır. Bu transformatör güvenli olarak 50 Hz'de 15 kVA, 415V sağlayabilir mi? Niçin veya niçin değil?
- 2.21. Bir kişi büyük bir güç transformatörünün yakınında durduğunda niçin bir vizüel duyar?

## PROBLEMLER

- 2-1. Bir transformatörün sekonder sargası  $v_s(t) = 282.8 \sin 377t$  V'luk bir uç gerilimine sahiptir. Transformatörün sarım oranı 100:200'dür ( $a=0.50$ ). Transformatörün sekonder akımı  $I_s(t) = 7.07 \sin(377t - 36.8^\circ)$  A olursa, bu transformatörün primer akımı ne olur? Bu transformatörün gerilim regülasyonu ve verimi nedir? Primere göre bu transformatörün empedansları;

$$\begin{aligned} R_{\text{esdeger}} &= 0.20 \Omega & R_c &= 300 \Omega \\ X_{\text{esdeger}} &= 0.750 \Omega & X_M &= 80 \Omega \end{aligned}$$

dur.

- 2-2. 20kVA 8000/400 V'luk bir dağıtım transformatörü aşağıdaki direnç ve reaktanslara sahiptir.

$$\begin{aligned} R_p &= 32 \Omega & R_s &= 0.05 \Omega \\ X_p &= 45 \Omega & R_s &= 0.06 \Omega \\ R_c &= 250 \text{ k}\Omega & X_M &= 30 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Uyartım kolu empedansı transformatörün yüksek gerilim tarafına göre verilmiştir. (a) Bu transformatörün yüksek gerilim tarafına göre esdeger devresini bulunuz.

- (b) Bu transformatörün per-unit esdeger devresini bulunuz.  
 (c) Bu transformatörün 480 V ve 0.8 geri güç faktörü anma değerlerine sahip bir yük beslediğini kabul ediniz. Bu durumda bu transformatörün giriş gerilimi ne olur? Gerilim regülasyonu ne olur?  
 (d) (c) şıklarında transformatörün verimi ne olur?

- 2-3. 1000 VA 230/115 V'luk bir transformatörün esdeger devresini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

Açık devre testi	Kısa-devre testi
$V_{OC} = 230 \text{ V}$	$V_{SC} = 19.1 \text{ V}$
$I_{OC} = 0.45 \text{ A}$	$I_{SC} = 8.7 \text{ A}$
$P_{OC} = 30 \text{ W}$	$P_{SC} = 42.3 \text{ W}$

verilen tüm data transformatörün primer tarafından alınmıştır.

- (a) Alçak gerilim tarafına göre bu transformatörün esdeger devresini bulunuz.  
 (b) Nominal koşullarda ve (1) 0.8 geri güç faktöründe, (2) 1.0 güç faktöründe, (3) 0.8 ileri güç faktöründe transformatörün gerilim regülasyonunu bulunuz.

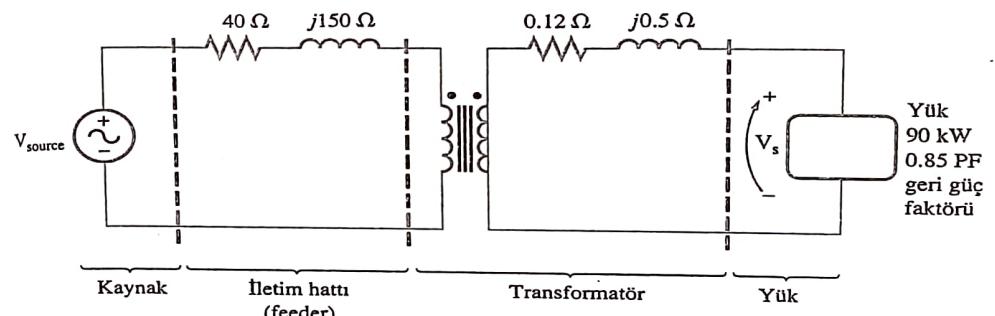
- (c) Nominal koşullarda ve 0.8 geri güç faktöründe transformatörün verimini belirleyiniz.

- 2-4. Tek fazlı bir güç sistemi Şekil P2-1'de gösterilmiştir. Güç kaynağı 40+j150  $\Omega$ 'luk bir empedansa sahip bir iletim hattı üzerinden 100 kVA 14/2.4 kV'luk bir transformatörü beslemektedir. Alçak gerilim tarafına göre transformatörün eşdeğer seri empedansı 0.12+j0.5  $\Omega$ 'dur. Transformatörün yükü 0.80 geri güç faktörü ve 2300 voltta 90 kW'lık güç çekmektedir.

(a) Sistemin güç kaynağındaki gerilim nedir?

(b) Transformatörün gerilim regülasyonu nedir?

(c) Tüm güç sistemi ne kadar verimlidir?



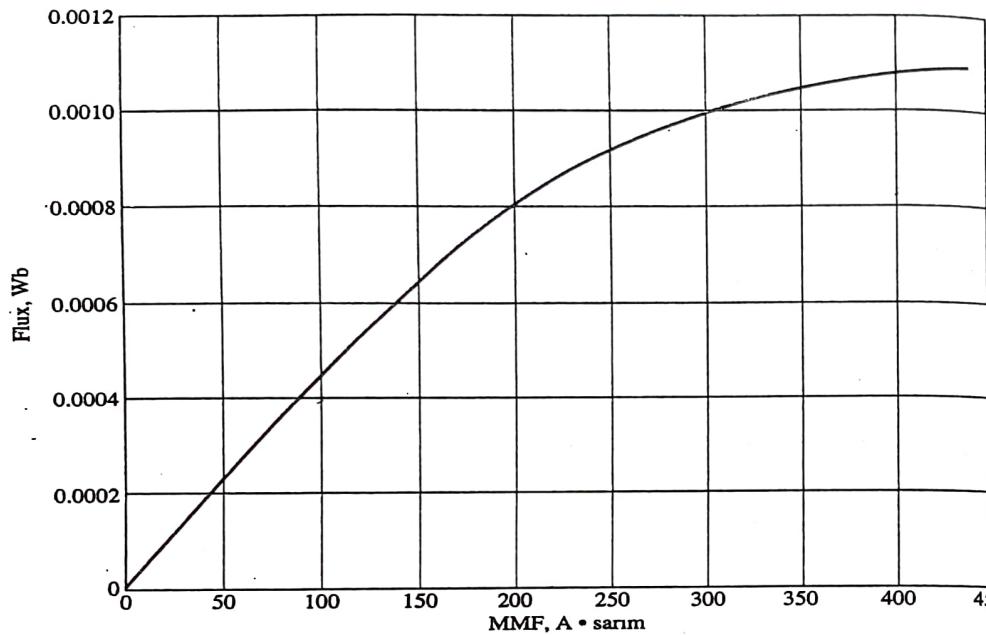
ŞEKİL P2-1  
Problem 2-4'ün devresi

- 2-5. Birleşik devletler ve Kanada'dan, Avrupa'ya seyahat edenler Avrupa'da farklı bir güç dağıtım sisteminin oluşturduğu zorlukla karşılaşırlar. Priz gerilimi tipik olarak Avrupada 50 Hz'de 220 ile 240 V iken, bu değer Kuzey Amerikalıda 60 Hz'de 120 V rms dir. Bu ülkeler arasında seyahat edenler yanlarında küçük bir yükseltici veya düşürücü transformatör taşırlar. Böylece ziyaret ettikleri ülkelerde aletlerini kullanabilirler. Tipik bir transformatör 1 kVA ve 120/240 V değerine sahip olmalıdır. Bu transformatör 120 V tarafında 500 sarıma ve 240 V tarafında 1000 sarıma sahiptir. Bu transformatörün muknatsılanma eğrisi Şekil P2-2'de gösterilmiştir ve bu kitabın web sitesindeki P22.mat dosyasında bulunabilir.

- (a) Bu transformatörün primerinin 120 V, 60 Hz'lik kaynağa bağlandığını ve 240 V tarafının da boşta olduğunu kabul ediniz. Transformatörden akacak olan muknatsılanma akımını çiziniz. (Eğer kullanılabilseniz akımı doğru olarak çizmek için MATLAB programını kullanınız). Muknatsılanma akımının rms genliği nedir? Tam yük akımına göre muknatsılanma akımının yüzdesi ne olur?

- (b) Şimdi bu transformatörün 240 V'luk kısmının 50 Hz'lik kaynağa bağlandığını ve 120 V tarafının da boşta bırakıldığını kabul ediniz. Transformatörden akacak olan muknatsılanma akımını çiziniz. (Eğer kullanılabilseniz, akımı doğru olarak çizebilmek için MATLAB programını kullanınız). Muknatsılanma akımının rms genliği nedir? Tam yük akımına göre muknatsılanma akımının yüzdesi ne olur?

- (c) Hangi durumda muknatsılanma akımı, tam yük akımından daha yüksek bir yüzdeye sahiptir? Niçin?



ŞEKİL P2-2

Problem 2-5'deki transformatörün mıknatışlanma eğrisi

2-6. 15 kVA 8000/230 V'luk bir dağıtım transformatörü primere indirgenmiş  $80+j300 \Omega$ 'luk bir empedansa sahiptir. Primere göre uyartım kolunun bileşenleri  $R_c = 350 \text{ k}\Omega$  ve  $X_m = 70 \text{ k}\Omega$  'dur.

(a) Primer gerilim 7967 V ve yük empedansı  $Z_L = 30+j1.5 \Omega$  olursa transformatörün sekonder gerilimi ve gerilim regülatörüne ne olur?

(b) Yük çıkartılır ve yükün yerine  $-j4.0 \Omega$ 'luk bir kondansatör bağlanırsa, transformatörün sekonder gerilimi ne olur? Bu koşullarda gerilim regülatörüne ne olur?

2-7. 5000 kVA 230/13.8 kV'luk tek fazlı bir güç transformatörü % 1'lik per-unit direnç ve % 5'lik per-unit reaktansa sahiptir (veriler transformatörün etiketinden alınmıştır). Transformatörün alçak gerilim tarafında yapılan boşta çalışma deneyinden aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

$$V_{OC} = 13.8 \text{ V} \quad I_{OC} = 15.1 \text{ A} \quad P_{OC} = 44.9 \text{ kW}$$

(a) Bu transformatörün düşük gerilim tarafına göre eşdeğer devresini bulunuz.

(b) Sekonder taraftaki gerilim 13.8 kV ve 0.8 geri güç faktöründe sağlanan güç 4000 kW olursa; transformatörün gerilim regülatörüne ne olur? Verimi bulunuz.

2-8. 200 MVA, 15/200 kV'luk tek fazlı bir transformator % 1.2'lik per-unit dirence ve % 5'lik per-unit reaktansa sahiptir (veriler transformatörün etiketinden alınmıştır).

Mıknatışlanma empedansı  $j80$  per-unit tir.

(a) Bu transformatörün düşük gerilim tarafına göre eşdeğer devresini bulunuz.

(b) 0.8 geride güç faktöründe tam yük akımı için bu transformatörün gerilim regülatörünü hesaplayınız.

(c) Bu transformatörün primer geriliminin 15 kV ve sabit olduğunu kabul ederek; boşta çalışmadan tam yük akımına kadar, yük akımının bir fonksiyonu olarak sekonder gerilimini çiziniz. Bu işlemleri 0.8 geri, 1.0 ve 0.8 ileri güç faktörleri için tekrarlayınız.

2-9. Üç fazlı bir transformatör bankı 600 kVA güç verebilmektedir ve 34,5/18,8 kV gerilim oranına sahiptir. Transformatör bankı (a) Y-Y ; (b) Y-Δ ; (c) Δ-Y ; (d) Δ-Δ ; (e) açık Δ ; (f) açık Y-akıç Δ bağlanırsa banktaki her bir transformatör için anma değerlerini (yüksek gerilim, düşük gerilim, sarım oranları ve görünür güç ) bulunuz.

2-10. 13800/480 V üç faz Y-Δ bağlı bir transformatör bankı üç tane 100 kVA 7967/480 V'luk transformatörden oluşturulmuştur. Bu transformatörler büyük bir sabit gerilim hattından beslenmektedirler. Kısa devre deneyinde, bu transformatörlerden birinin yüksek gerilim tarafından kaydedilen değerler

$$V_{SC} = 560 \text{ V} \quad I_{SC} = 12,6 \text{ A} \quad P_{OC} = 3300 \text{ W} \quad \text{dir.}$$

(a) Bu transformatör bankı 0.85 geri güç faktöründe ve anma geriliminde yükle nominal değerler sağlarsa, transformatör bankının yüksek gerilim tarafındaki hat-hat gerilimi ne olur?

(b) Bu transformatörün primer geriliminin sabit ve 13.8 kV olduğunu kabul ederek; boşta çalışma değerinden tam yük akımına kadar, yük akımının bir fonksiyonu olarak sekonder gerilimini çiziniz. Bu işlemi 0.85 geri, 1.0 ve 0.8 ileri güç faktörleri için tekrarlayınız.

2-11. 100.000 kVA, 230/115 kV, Δ-Δ üç-fazlı bir güç transformatörü 0.02 pu'lık bir dirence ve 0.055 pu'lık bir reaktansa sahiptir. Uyartım kolu elemanları  $R_c = 110$  pu ve  $X_M = 20$  pu'dır.

(a) Bu transformatörün 0.85 geri güç faktöründe bir yükle 80 MVA sağlama durumu için, bir fazın fazör diyagramını çiziniz.

(b) Bu koşullarda transformatör bankının gerilim regülatörünü ne olur?

(c) Bu transformatörün bir fazının alçak gerilim tarafına göre eşdeğer devresini çiziniz. Alçak gerilim tarafına göre transformatörün tüm empedanslarını hesaplayınız.

2-12. 13,2 kV'luk bir dağıtım hattını 13.8 kV'luk bir dağıtım hattına bağlamak için bir ototransformatör kullanılmıştır. Bu ototransformatör 2000 kVA'lık güç sağlayabilmektedir. Y-Y bağlanmış ve nötrleri tam olarak topraklanmış üç faz vardır.

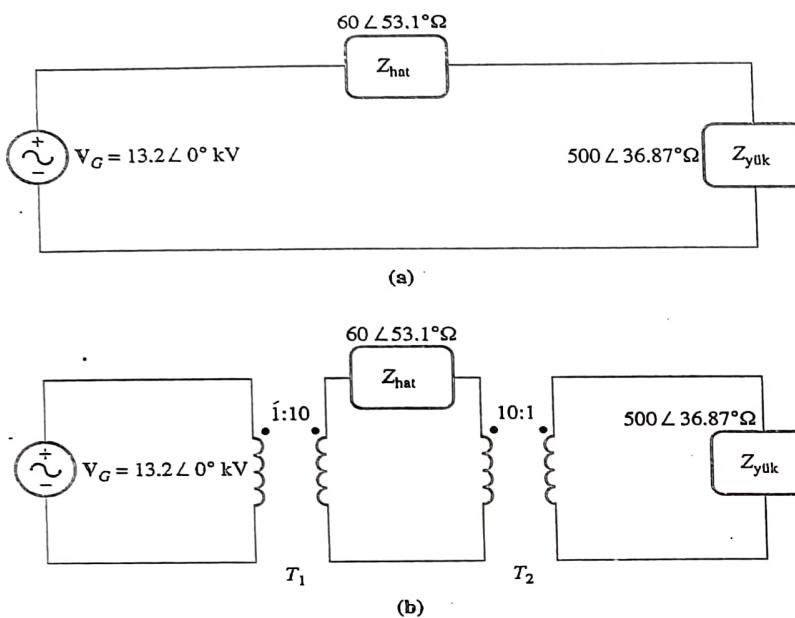
(a) Bu bağlantıyı yapmak için  $N_C/N_{SE}$  oranı ne olmalıdır?

(b) Ototransformatörün her bir fazi ne kadarlık bir görünür güç sağlayabilir?

(c) Ototransformatörlerden biri bilinen transformatör gibi bağlanırsa, ratingleri ne olacaktır?

2-13. 13,8 kV üç-faz dağıtım hattının iki fazı uzak bir köy yolunu (nötrü de kullanılabilen) beslemektedir. Yol boyunca bir çiftçi 480 V'luk bir gerilimde 120 kW 0.8 geri güç faktöründe üç fazlı bir yükü ve ayrıca 50 kW, 0.9 geri güç faktöründe tek fazlı bir yükü beslemektedir. Tek fazlı yükler üç fazlı yükün etrafına düzgün olarak dağılmıştır. Çiftçinin, çiftliğine güç sağlamak için açık-Y-akıç-Δ bağlantıyı kullandığını kabul ederek, iki transformatörün her birindeki gerilimleri ve akımları bulunuz. Aynı zamanda her bir transformatörün sağladığı aktif ve reaktif güçleri de hesaplayınız. Burada transformatörlerin ideal olduğunu kabul ediniz.

2-14. 13,2 kV'luk tek fazlı bir generator bir iletim hattı üzerinden bir yükü beslemektedir. Yük empedansı  $Z_{yük} = 500 \angle 36,87^\circ \Omega$  ve iletim hattının empedansı da  $Z_{yük} = 60 \angle 53,1^\circ \Omega$ 'dur.



ŞEKİL P2-3

Problem 2-14'e ilişkin devreler (a) Transformatörsüz ve (b) Transformatörlü

- (a) Generatör yüke doğrudan bağlanırsa (Şekil P2-3a), yük geriliminin üretilen gerilime oranı ne olur? Sistemin iletim kayipları ne olur?
- (b) Generatörün çıkışına 1:10 yükseltici bir transformator ve iletim hattının sonuna 10:1'lik bir düşürücü transformator bağlanırsa, yük geriliminin üretilen gerilime oranı ne olur? Şimdi sistemin iletim kayipları ne olur? (Not: Transformatör ideal kabul edilebilir).
- 2-15. 5000 VA, 480/120 V'luk bir transformator, 120 V'luk bir yükle 600 V'luk bir kaynaktan güç sağlamak için kullanılacaktır. Transformatorun ideal olduğunu göz önünde alınız ve tüm izolasyonun 600 V'a dayanabileceğini kabul ediniz.
- (a) Bu işlemi yapacak transformator bağlantısını çiziniz.
- (b) Transformatörün kilovoltamper ratingini bulunuz.
- (c) Bu koşullar altında primer ve sekonder sargılardan akacak maksimum akımları bulunuz.
- 2-16. 5000 VA, 480/120 V'luk bir transformator, 480 V'luk bir yükü 600 V'luk bir kaynaktan beslemek için kullanılacaktır. Transformatorun ideal olduğunu göz önüne alınız ve tüm izolasyonun 600 V'a dayanabileceğini kabul ediniz. 2-15'deki soruları, bu transformator için yanıtlayınız.
- 2-17. Aşağıdaki durumu ispatlayınız: seri empedansı  $Z_{\text{esdeger}}$  olan bir transformator ototransformatör olarak bağlanırsa; bir ototransformatör olarak per-unit empedansı

$$Z'_{\text{eq}} = \frac{N_{\text{SE}}}{N_{\text{SE}} + N_C} Z_{\text{eq}}$$

olacaktır. Bu ifadenin oto transformatörünün güç avantajını da ortaya koyduğuna dikkat ediniz.

- 2-18. Üç tane 25 kVA, 24.000/277-V dağıtım transformatörü Δ-Y olarak bağlanmıştır. Boşta çalışma deneyi bu transformatörün düşük gerilim tarafında yapılmıştır ve aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

$$\begin{array}{lll} V_{\text{line},\text{OC}} = 480 \text{ V} & I_{\text{line},\text{OC}} = 4.10 \text{ A} & P_{3\phi,\text{OC}} = 945 \text{ W} \\ V_{\text{line},\text{SC}} = 1600 \text{ V} & I_{\text{line},\text{SC}} = 2.00 \text{ A} & P_{3\phi,\text{SC}} = 1150 \text{ W} \end{array}$$

- (a) Bu transformatör bankının per-unit eşdeğerini bulunuz.  
(b) Bu transformatör bankının nominal yük ve 0.90 geri güç faktöründeki gerilim regülasyonunu bulunuz

- (c) Bu koşullarda transformatör bankının verimi ne olur?  
2-19. 20 kVA, 20.000/480-V, 60-Hz'lik bir dağıtım transformatörünün boşta çalışma ve kısa devre deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Boşta-Çalışma Deneyi (ölçümler sekonder tarafta yapılmıştır)	Kısa-Devre Deneyi (ölçümler sekonder tarafta yapılmıştır)
$V_{\text{OC}} = 480 \text{ V}$	$V_{\text{SC}} = 1130 \text{ V}$
$I_{\text{OC}} = 1.60 \text{ A}$	$I_{\text{SC}} = 1.00 \text{ A}$
$P_{\text{OC}} = 305 \text{ W}$	$P_{\text{SC}} = 260 \text{ W}$

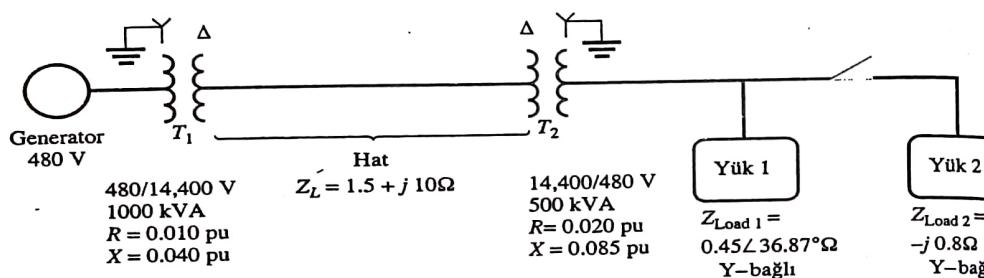
- (a) Bu transformatör için 60 Hz'deki per-unit eşdeğer devreyi bulunuz.  
(b) Bu transformatör 50 Hz'lik güç sistemine bağlansaydı, bu transformatörün ratingi ne olacaktı?  
(c) 50 Hz'lik güç sistemiyle çalışma durumu için bu transformatörün per-unit eşdeğer devresini çiziniz.

- 2-20. Şekil 2-38b'de gösterilen Y-Δ transformatördeki üç faz sekonder gerilimlerin, primerdeki 3-fazlı gerilimin  $30^\circ$  gerisinde olduğunu ispat ediniz.
- 2-21. Şekil 2-38c'de gösterilen Δ-Y transformatördeki üç faz sekonder gerilimlerin, primerdeki 3-fazlı gerilimin  $30^\circ$  gerisinde olduğunu ispat ediniz.
- 2-22. Tek fazlı 10 kVA, 480/120 V'luk bir transformator, 600 V'luk bir dağıtım hattı üzerinde bir yükle 480 V sağlayacak şekilde ototransformatör olarak kullanılacaktır. Bu transformatörde bilinen bir transformator gibi boşta çalışma ve kısa devre deneyleri yapıldığında aşağıdaki veriler elde edilmiştir. Ölçümler transformatörün 480-V'luk primer tarafından yapılmıştır.

Boşta Çalışma Deneyi	Kısa Devre Deneyi
$V_{\text{OC}} = 480 \text{ V}$	$V_{\text{SC}} = 10.0 \text{ V}$
$I_{\text{OC}} = 0.41 \text{ A}$	$I_{\text{SC}} = 10.6 \text{ A}$
$P_{\text{OC}} = 38 \text{ W}$	$P_{\text{SC}} = 26 \text{ W}$

- (a) Bu transformatörün bilinen şekilde bağlanması durumu için per-unit eşdeğer devresini bulunuz. Nominal koşullarda ve birim güç faktöründe transformatörün verimi ne olur? Bu koşullardaki gerilim regülasyonu nedir?

- (b) Bu transformatörün 600/480-V düşürücü bir ototransformatör olması durumu için transformatör bağlantılarını çiziniz  
 (c) Bu transformatör, bir oto transformatör olarak bağlandığında kilovoltamper ratingi ne olur?  
 (d) Ototransformatör bağlantısı için a şikkündaki soruları cevaplayınız.  
 2-23. Şekil P2-4 hattın başında ve sonunda birer transformator içeren ve bir iletim hattı üzerinden iki yükü besleyen üç fazlı 480 V 60 Hz'lik generatörden ibaret olan bir güç sistemini gösterir.



ŞEKİL P2-4

Problem 2-23'deki güç sisteminin hat diagramı. Bazı empedans değerleri per-unit sistemde verilirken bazalarının da ohm olarak verildiğine dikkat ediniz

- (a) Bu güç sisteminin faz-başına eşdeğer devresini çiziniz.  
 (b) Anahtarın açılmasıyla, aktif güç P, reaktif güç Q, ve görünür güç S'i bulunuz. Generatörün güç faktörü nedir?  
 (c) Anahtarın kapatılmasıyla, generatörün sağladığı, aktif güç P, reaktif güç Q ve görünür güç S'i bulunuz. Generatörün güç faktörü nedir?  
 (d) Anahtar açıldığında bu sistemdeki iletim hattı kayıpları ne olur? Anahtar kapatıldığında ne olur? Sisteme ikinci yükün eklenme etkisi nedir?

## REFERANSLAR

1. Beeman, Donald. *Industrial Power Systems Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1955.
2. Del Toro, V. *Electric Machines and Power Systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1985.
3. Feinberg, R. *Modern Power Transformer Practice*. New York: Wiley, 1979.
4. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr., and S. D. Umans. *Electric Machinery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
5. McPherson, George. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. New York: Wiley, 1981.
6. M.I.T. Staff. *Magnetic Circuits and Transformers*. New York: Wiley, 1943.
7. Slemmon, G. R., and A. Straughen. *Electric Machines*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
8. *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, East Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation, 1964.

## BÖLÜM

# 7

## ASENKRON MOTORLAR

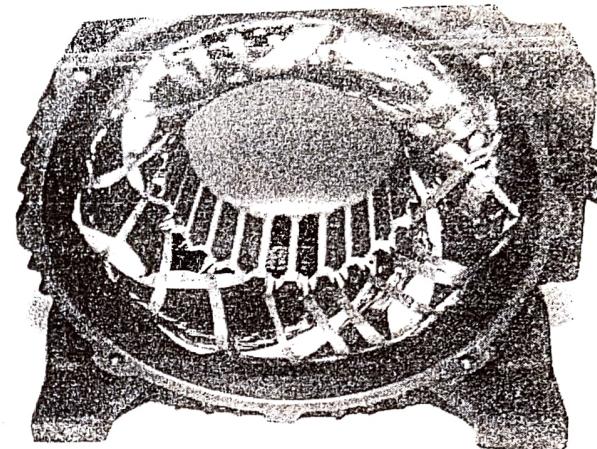
Bir önceki bölümde, dışardan bir uyarıcı akım kaynağı yokken senkron motor üzerindeki amortisör sargılarının, nasıl yol verme momenti üretebildiğini gördük. Aslında amortisör sargıları, senkron motorun ana DA uyarma devresi olmadan da bir motor oluşturacak kadar iyi çalışmasını sağlar. Sadece amortisör sargılarından oluşan makinaya *asenkron makina* denilir. Bu türden makinalar, rotor gerilimi (rotor akımını ve rotor manyetik alanını üreten) fiziksel kablo bağlantısı olmaksızın rotor sargılarında indüklendiğinden dolayı asenkron makina (veya indüksiyon makineleri) olarak adlandırılırlar. Bir asenkron motorun en ayırt edici özelliği makinanın çalışması için *DA uyarma akımına gerek duymamasıdır*.

Asenkron makinanın motor ya da generator olarak kullanımı mümkündür fakat generator olarak kullanıldığı zaman birçok dezavantaja sahiptir ve bu tarzda az kullanılır. Bu nedenle asenkron makinalar genellikle asenkron motor olarak bilinirler.

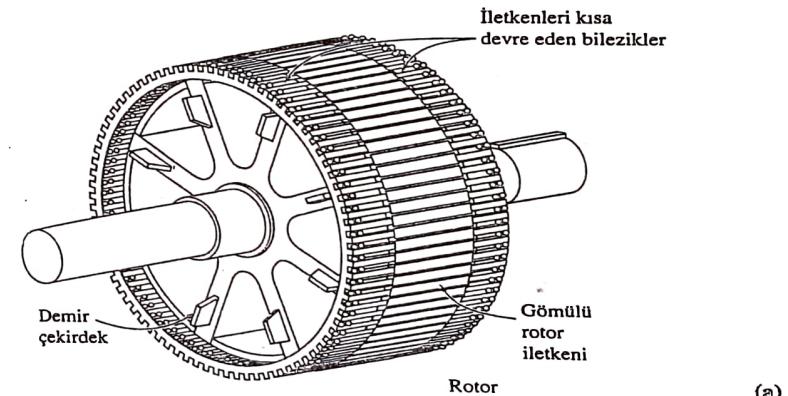
### 7.1 ASENKRON MOTORUN YAPISI

Bir asenkron motorun stator yapısı senkron motor ile aynı ancak rotor yapısı farklıdır. Bir asenkron motor, senkron motor ile aynı stator yapısındadır ama rotor yapısı farklıdır. Tipik bir iki kutuplu stator Şekil 7-1'de gösterilmektedir. Statoru senkron motorunki ile aynıdır. Statorun içine yerleştirilebilen rotor yapısına göre iki farklı tipte asenkron motor çeşidi vardır. Biri *bilezikli* olarak adlandırılırken diğeri *kafes* rotor olarak adlandırılır.

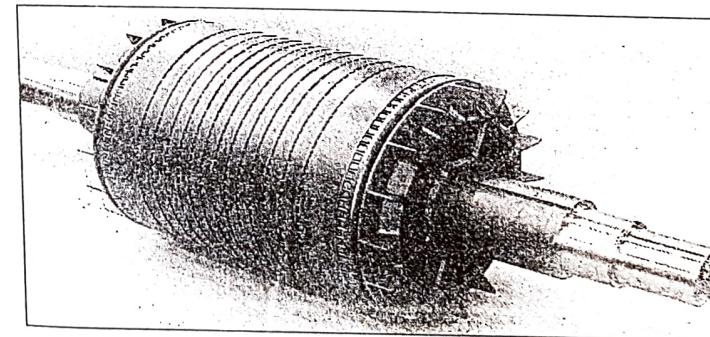
Şekil 7-2 ve 7-3 kafesli asenkron motor rotorlarını göstermektedir. Kafesli bir asenkron motorun rotor yüzeyine oyulmuş oluklardaki seri bağlı iletken çu-



**ŞEKİL 7-1**  
Stator sargılarını gösteren tipik bir asenkron motorun stotoru  
(MagneTek, Inc'in izniyle)



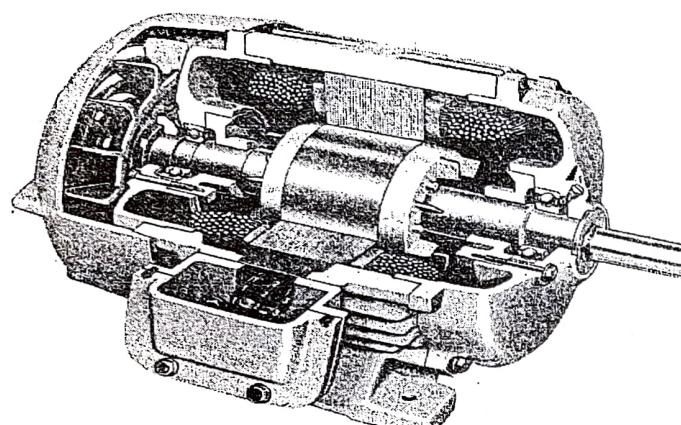
(a)



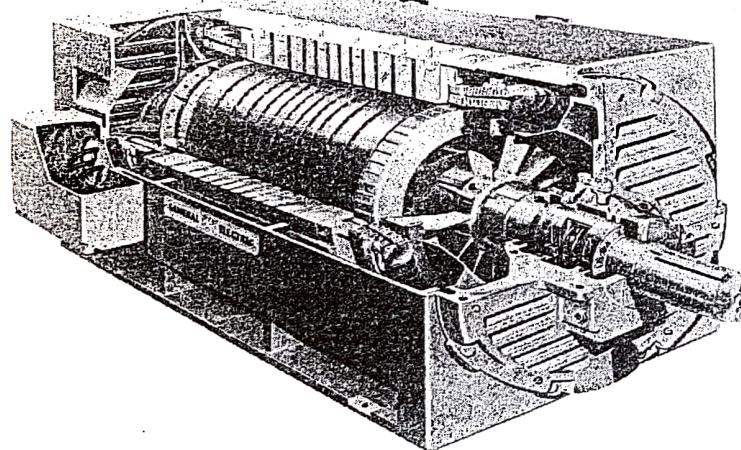
(b)

**ŞEKİL 7-2**

a) Kafes rotorun taslaç çizimi b) Tipik bir kafes rotor (General Electric Company' nin izniyle)



(a)



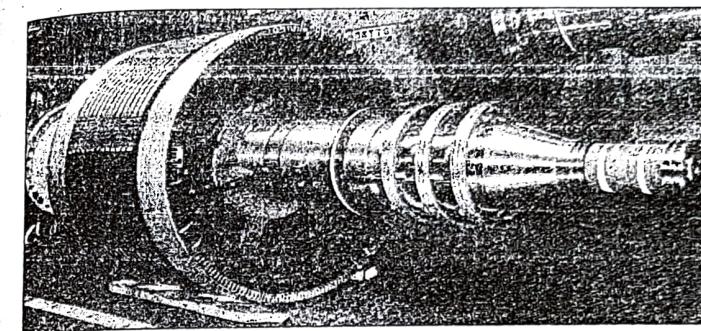
(b)

**ŞEKİL 7-3**

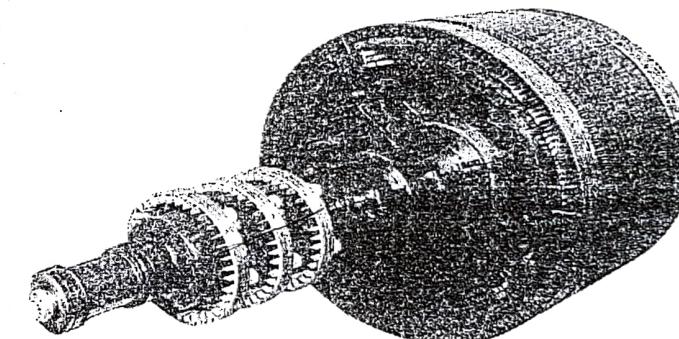
- (a) Tipik bir kafes rotorlu küçük asenkron motorun kesiti (*MagneTek, Inc'in izniyle*)  
 (b) Tipik bir kafes rotorlu büyük asenkron motorun kesiti (*General Electric Company'nin izniyle*)

buklar, büyük *kısa devre halkalarıyla* her iki uçtan kısa devre edilmiştir. Bu tasarım, iletkenlerin oluşturduğu yapı içinde sincapların veya cırlak sıçanların kendi kendilerine koşturduğu çalışma tekerlerine benzettiğinden dolayı kafesli rotor olarak görülür.

Diğer rotor tipi bilezikli rotordur. Bilezikli rotor, statordaki sargıların yansımıası olan üç fazlı bir sargı grubuna sahiptir. Üç fazlı rotor sargıları genellikle Y-bağlıdır ve rotor iletkenlerinin uçları rotor mili üzerinde bileziklere bağlıdır. Rotor sargıları bilezikler üzerinde kayan fırçalar üzerinden kısa devre edilir. Bilezikli asenkron motorlarda, bu nedenle rotor akımlarına statordaki fırçalar üzerinden ula-



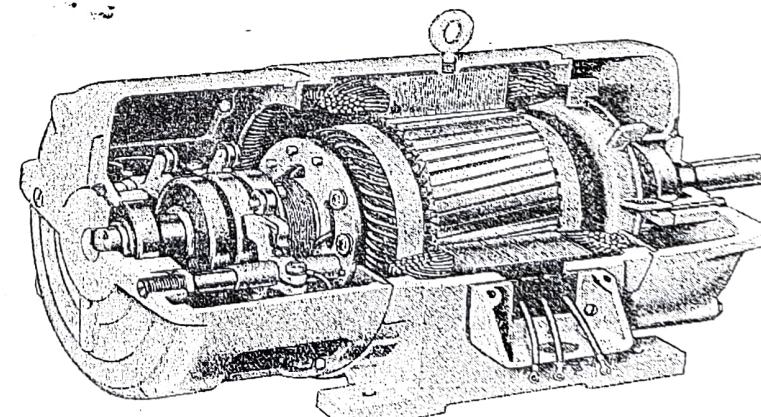
(a)



(b)

**ŞEKİL 7-4**

Asenkron motorlar için tipik bilezikli rotorlar. Rotor sargılarını bileziklere bağlayan çubuklara ve bileziklere dikkat ediniz. (*General Electric Company'nin izniyle*)

**ŞEKİL 7-5**

Bilezikli bir asenkron motorun kesit diyagramı. Fırça ve bileziklere dikkat ediniz. Rotor sargılarının oluk harmoniklerini yok etmek üzere ekip olduğuna da dikkat ediniz. (*MagneTek, Inc'in izniyle*)

şılabilir ve bunlar sayesinde rotor devresine ek dirençler bağlanabilir. Motorun bu üstünlüğünden yararlanarak moment-hızı karakteristiğini değiştirmek mümkündür. İki bilezikli rotor örneği Şekil 7-4'de ve eksiksiz bir bilezikli asenkron motor Şekil 7-5'de gösterilmektedir.

Bilezikli asenkron motorlar kafes yapılı asenkron motorlardan daha pahalıdır ve firça-bilezik sisteminden dolayı daha fazla bakım gerektirirler. Bunun sonucu olarak bilezikli asenkron motorlar daha az kullanılırlar.

## 7.2 ASENKRON MOTORUN TEMEL KAVRAMLARI

Asenkron motorun çalışması, temel olarak, senkron motorda amortisör sargasının ile aynıdır. Şimdi, temel çalışma durumu incelenecik ve bazı önemli asenkron motor terimleri tanımlanacaktır.

### Bir Asenkron Motorda İndüklenen Momentin Oluşumu

Şekil 7-6 kafes rotorlu bir asenkron motoru göstermektedir. Statora üç fazlı gerilim uygulanmış ve bu akımlar saat dönüş yönünün tersinde dönen  $B_s$  manyetik alanını üretmektedir. Manyetik alanın dönüş hızı aşağıdaki gibi verilir.

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{P} \quad (7-1)$$

Burada  $f_e$  Hertz cinsinden sistem frekansı ve  $P$  makinanın kutup sayısıdır. Bu dönen  $B_s$  manyetik alanı, rotor çubukları üzerinden geçer ve onlarda gerilim indükler.

Belirli bir rotor çubuğunda induklenen gerilim aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1-45)$$

Burada  $\mathbf{v}$  = manyetik alana göre çubuğun hızı

$\mathbf{B}$  = Manyetik akı yoğunluğu vektörü

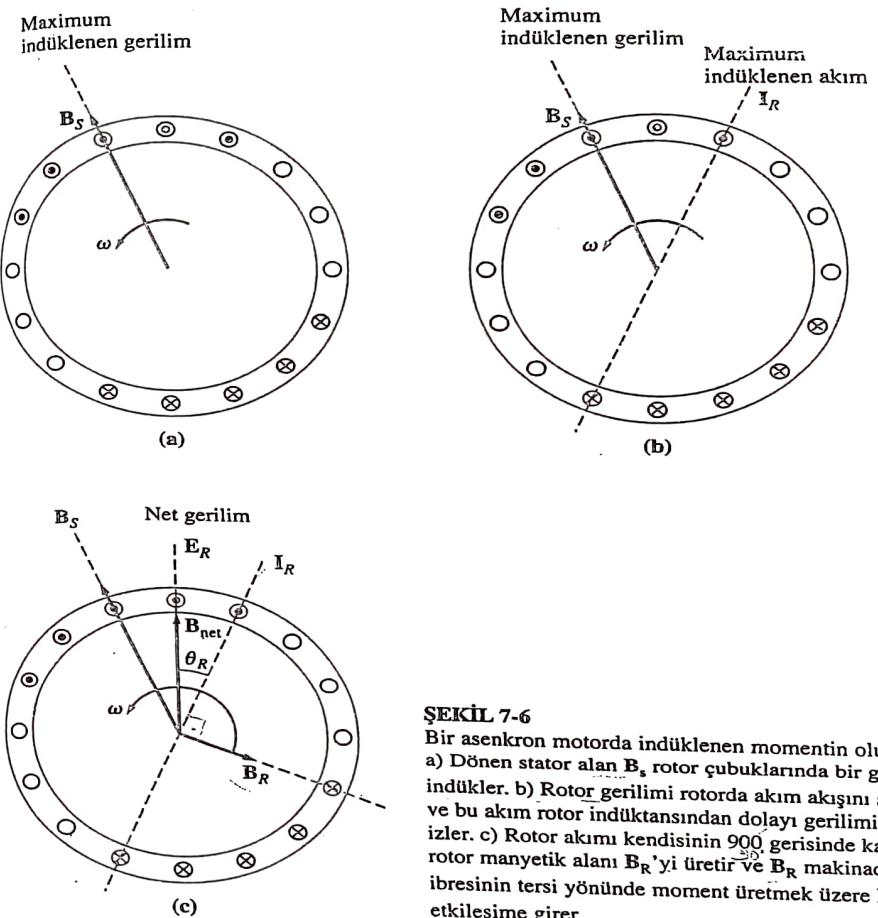
$\mathbf{l}$  = Manyetik alandaki iletkenin uzunluğu

Rotor çubuğunda induklenen gerilimi üreten, stator manyetik alanına göre rotorun *göreceli* hareketidir. Manyetik alana göre üstteki rotor çubuklarının hızı sağa doğrudur ve böylece üstteki çubuklarda induklenen gerilim sayfa düzleminde dışarı doğrudur ve alttaki çubuklarda induklenen gerilim sayfa düzleminden içeri doğrudur. Bu, üstteki çubuklardan alttaki çubuklara doğru akım akmasına neden olur. Bununla birlikte rotor kurgusu indüktif olduğundan dolayı rotor akımının tepe değeri, rotor geriliminin tepe değerinin gerisinde kalır (bakınız Şekil 7-6b). Rotor'dan akan akım  $B_R$  rotor manyetik alanını üretir.

Sonuçta makinada induklenen moment aşağıdaki gibi verildiğinden

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \quad (4-58)$$

net moment saat ibresinin tersi yönünde olacaktır. Rotorda induklenen moment, saat ibresinin tersi yönünde olduğundan dolayı rotor bu yönde ivmeleneciktir.



ŞEKİL 7-6

Bir asenkron motorda induklenen momentin oluşumu  
a) Dönen stator alan  $B_s$  rotor çubuklarında bir gerilim indükler. b) Rotor gerilimi rotorda akım akışını sağlar ve bu akım rotor indüktansından dolayı gerilimi gerider izler. c) Rotor akımı kendisinin 90° gerisinde kalan rotor manyetik alanı  $B_R$ 'yi üretir ve  $B_R$  makinanın saat ibresinin tersi yönünde moment üretmek üzere  $B_{net}$  ile etkileşime girer.

Ancak, motor hızının belirli bir üst sınırı vardır. Eğer asenkron motorun rotoru, *senkron hızda* dönerse o zaman, *rotor çubukları manyetik alana göre durağan* olacak ve gerilim indüklenmeyecektir. Eğer  $e_{ind}$ , 0'a eşit olursa hem rotor akımı hem de rotor manyetik alanı olmayacaktır. Rotor manyetik alanı yokken induklenen moment sıfır olacaktır ve rotor sürtünme kayıplarından dolayı yavaşlayacaktır. Bir asenkron motor böylece senkron hızı civarına kadar hızlanabilir ancak tam olarak senkron hızda asla ulaşamaz.

Normal çalışmada, hem rotor hem de stator manyetik alanları  $B_R$  ve  $B_s$  birlikte  $n_{sync}$  senkron hızında dönerlerken rotor tabiatıyla daha düşük bir hızda döner.

### Rotor Kayması Kavramı

Bir asenkron motorun rotor çubuğuında induklenen gerilim manyetik alanına göre rotorun bağlı hızına bağlıdır. Bir asenkron motorun davranışının rotorun gerilim ve akımına bağlı olduğundan bu göreceli hız hakkında konuşmak daha mantıklıdır. Rotorun ve manyetik alanın göreceli hareketini tanımlamak için iki terim yaygın olarak kullanılmaktadır. Birisi, senkron hız ve rotor hızı arasındaki fark olarak tanımlanan *kayma hızıdır*.

$$n_{\text{slip}} = n_{\text{sync}} - n_m \quad (7-2)$$

Burada  $n_{\text{slip}}$  = makinanın kayma hızı

$n_{\text{sync}}$  = manyetik alanın hızı

$n_m$  = motorun mekanik hızıdır.

Göreceli hızı tanımlamak için kullanılan diğer terim, yüzde ya da birim değer cinsinden ifade edilen *kaymadır*. Yani kayma aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$s = \frac{n_{\text{slip}}}{n_{\text{sync}}} (\times 100\%) \quad (7-3)$$

$$s = \frac{n_{\text{sync}} - n_m}{n_{\text{sync}}} (\times 100\%) \quad (7-4)$$

Bu denklem  $\omega$  (rad/san) açısal hızı cinsinden de aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$s = \frac{\omega_{\text{sync}} - \omega_m}{\omega_{\text{sync}}} (\times 100\%) \quad (7-5)$$

Rotor senkron hızda dönüyorrsa  $s=0$  ve rotor duruyorken  $s=1$  olduğuna dikkat ediniz. Tüm normal motor hızları bu iki sınır arasında bir değere denk gelir.

Senkron hız ve kayma cinsinden rotor milinin mekanik hızını ifade etmek mümkündür. Mekanik hız için Denklem (7-4) ve (7-5)'i çözürgütmüzde;

$$n_m = (1 - s)n_{\text{sync}} \quad (7-6)$$

veya

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{\text{sync}} \quad (7-7)$$

elde edilir. Bu denklemler asenkron motorun moment ve güç ilişkilerinin elde edilmesinde yararlı olmaktadır.

### Rotorun Elektriksel Frekansı

Bir asenkron motor, makinanın rotorunda induklenen akım ve gerilimler ile çalışır ve dolayısıyla bazen *dönen transformatör* olarak da adlandırılır. Bir transformatörre benzer şekilde birincil devre (stator) ikincil devrede (rotorda) bir gerilim induklar, ancak transformatörden farklı olarak ikincil devre frekansının birincil devre ile aynı olması gerekmekz.

Motorun rotoru hareket etmeyecek şekilde kilitli tutulursa o zaman rotor stator ile aynı frekansa sahip olacaktır. Diğer taraftan rotor senkron hızda dönüyorsa rotordaki frekans sıfır olacaktır. Herhangi keyfi bir orandaki rotor hızında rotor frekansı ne olacaktır?

$n_m=0$  dev/dak'da rotor frekansı  $f_r=f_e$  ve kayma  $s=1$ 'dir.  $n_m=n_{\text{sync}}$  için rotor frekansı  $f_r=0$  Hz ve kayma  $s=0$ 'dır. Aradaki herhangi bir hızda, rotor frekansı manyetik alan hızı  $n_{\text{sync}}$  ve rotor hızı  $n_m$  arasındaki *farkla* doğru orantılı olur. Rotorun kayması aşağıdaki şekilde tanımlandığından dolayı,

$$s = \frac{n_{\text{sync}} - n_m}{n_{\text{sync}}} \quad (7-4)$$

rotor frekansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f_r = sf_e \quad (7-8)$$

Bu ifadenin bazen daha kullanışlı birkaç alternatif biçimini vardır. Daha yaygın ifadelerden biri; kayma için Denklem (7-4)'ü Denklem (7-8)'de yerine koyarak ve sonra ifadenin paydasında  $n_{\text{sync}}$ 'yi yerine koyarak çıkarılabilir.

$$f_r = \frac{n_{\text{sync}} - n_m}{n_{\text{sync}}} f_e$$

Ancak  $n_{\text{sync}} = 120f_e / P$  [Denklem (7-1) den] öyleyse,

$$f_r = (n_{\text{sync}} - n_m) \frac{P}{120f_e} f_e$$

buradan, ifade aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{\text{sync}} - n_m) \quad (7-9)$$

Örnek 7-1. 208 V, 10-hp, dört-kutuplu, 60 Hz, Y-bağlı asenkron motor tam yükte yüzde 5 kaymaya sahiptir.  $\underline{s=0.05}$

(a) Bu motorun senkron hızı nedir?

(b) Nominal yükte bu motorun rotor hızı nedir?

(c) Nominal yükte bu motorun rotor frekansı nedir?

(d) Nominal yükte bu motorun mil momenti nedir?

### Cözüm

(a) Bu motorun senkron hızı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} n_{\text{sync}} &= \frac{120f_e}{P} \\ &= \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ poles}} = 1800 \text{ dev/dak} \end{aligned} \quad (7-1)$$

(b) Motorun rotor hızı aşağıdaki gibi hesaplanır:  $\underline{s=0.05}$

$$\begin{aligned} n_m &= (1 - s)n_{\text{sync}} \\ &= (1 - 0.05)(1800 \text{ dev/dak}) = 1710 \text{ dev/dak} \end{aligned} \quad (7-6)$$

(c) Bu motorun rotor frekansı aşağıdaki gibidir.

$$f_r = s f_s = (0.05)(60 \text{ Hz}) = 3 \text{ Hz}$$

Alternatif olarak frekans, Denklem (7-9)'dan da bulunabilir.

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{P}{120} (n_{\text{sync}} - n_m) \\ &= \frac{4}{120} (1800 \text{ dev/dak} - 1710 \text{ dev/dak}) = 3 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (7-9)$$

(d) Mile ait yük momenti aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \tau_{\text{load}} &= \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m} \\ &= \frac{(10 \text{ hp})(746 \text{ W/hp})}{(1710 \text{ r/dak})(2\pi \text{ rad/r})(1 \text{ dak}/60 \text{ s})} = 41.7 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

İngiliz birim sisteminde yük momenti Denklem (1-17) ile verilmektedir.

$$\tau_{\text{load}} = \frac{5252P}{n}$$

Burada  $\tau$  pound-feet cinsinden,  $P$  beygir gücü ve  $n_m$  dakikadaki devir sayısı cinsindendir. Dolayısıyla,

$$\tau_{\text{load}} = \frac{5252(10 \text{ hp})}{1710 \text{ dev/dak}} = 30.7 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

olur.

### 7.3 BİR ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRESİ

Bir asenkon motorun çalışması, rotor devresindeki akım ve gerilimlerin stator devresinden induksiyonu (Transformatör durumu) temeline dayanır. Bir asenkon motorun rotor devresindeki akım ve gerilimin indüklenmesi temel olarak bir transformatör çalışması olduğu için asenkon motorun eşdeğer devresi transformatörünkine çok benzer bir hale dönüşecektir. Asenkon motorlarda güç sadece stator devresine uygulandığından tek uyartımlı bir makina olarak adlandırılır (çift uyartımlı senkron makinanın aksine). Bir asenkon motor bağımsız uyarma devresine sahip olmadığından dolayı, modelinde bir senkron makinada üretilen dahili gerilim  $E_A$  gibi bir dahili gerilim kaynağı yoktur.

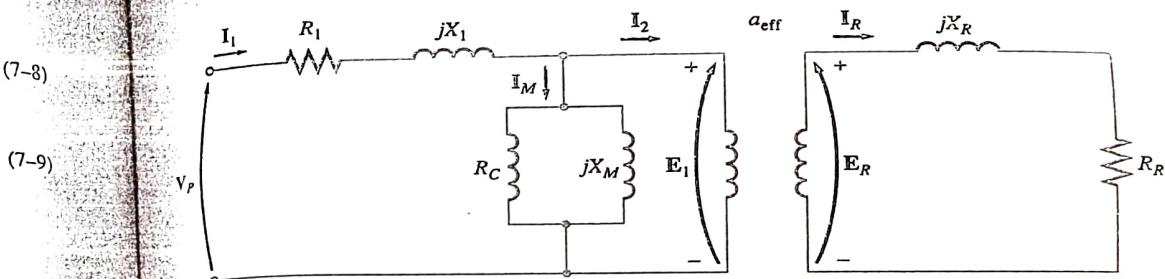
Transformatör bilgilerinden ve asenkon motorda rotor frekansının hız ile değiştiği bilgisinden hareketle bir asenkon motorun eşdeğer devresini çıkarmak mümkündür. Asenkon motor modeli, Bölüm 2'deki transformatör modeli ile başlanıp daha sonra değişken rotor frekansı ve benzer asenkon motor etkilerinin nasıl hesaba katılacağına karar vererek geliştirilebilir.

#### Asenkon Motorun Transformatör Modeli

Bir transformatörün faz başına eşdeğer devresi bir asenkon motorun çalışmasını temsil edecek şekilde Şekil 7-7'de gösterilmektedir. Herhangi bir transformatördeki gibi makinanın eşdeğer devresinde temsil edilmesi gereken birincil (stator)

(7-8)

(7-9)



ŞEKİL 7-7

$a_{\text{eff}}$  dönüştürme oranlı ideal bir transformatör ile bağlı stator ve rotorluğun bir asenkon motorun transformatör modeli

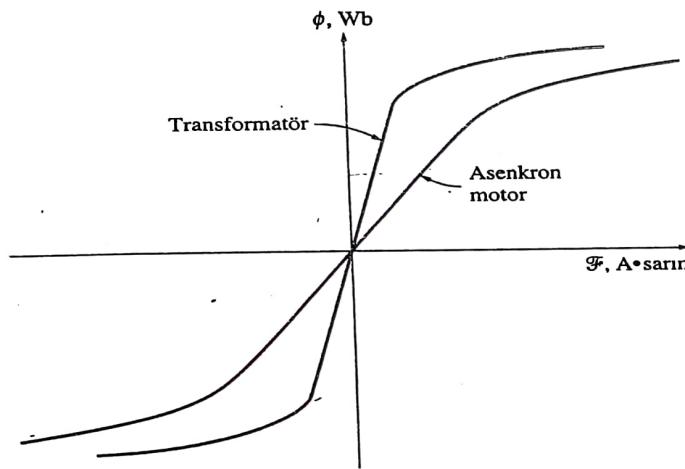
sargılarında belirli bir direnç ve öz induktansı vardır. Stator direnci  $R_1$  ve stator kavşak induktansı  $X_1$  olarak adlandırılacaktır. Bu iki bileşen makina modelinin girişinin sağında görülmektedir.

Yine herhangi bir demir çekirdekli transformatördeki ne benzer şekilde makinadaki akı, uygulanan gerilim  $E_1$ 'in integrali ile ilişkilendirilir. Bu makina için manyeto motor kuvvette karşı akı eğrisi (miknatışlanma eğrisi) Şekil 7-8'deki güç transformatörü için çizilmiş eğri ile karşılaştırılır. Asenkon motor manyeto motor kuvvet-akı eğrisinin eğiminin iyi bir transformatörün eğrisindenkinden daha az olduğuna dikkat ediniz. Bu, asenkon motorda akı yoluun reluktansını önemli ölçüde arturan ve bu nedenle birincil ve ikincil sargılar arasındaki manyetik kenetlemeyi azaltan hava aralığının var olmasından kaynaklanır. Hava aralığının neden olduğu yüksek reluktans istenen akı seviyesinin elde etmek üzere daha fazla miknatışlanma akımı gerektirir. Bu nedenle eşdeğer devredeki miknatışlanma reaktansı  $X_M$  sıradan bir transformatördekinden daha küçük bir değere sahip olacaktır (veya  $B_M$  suseptansi daha büyük bir değere sahip olacaktır).

Birincil iç stator gerilimi  $E_1$  ideal bir transformatördeki gibi ikincil  $E_R$  gerilimiyle kenetlenir. Etkin sarım oranı  $a_{\text{eff}}$ 'nın bilezikli motor için etkin sarım oranı  $a_{\text{eff}}$ 'nin belirlenmesi kolaydır- temel olarak adım ve dağıtım çarpan farklılıklarla değiştirilmiş statordaki faz başına iletken sayısının rotordaki faz başına iletken sayısına oranıdır. Kafes rotorlu motorun rotorunda kısa devre çubuklar olup aynı sargılar olmadığından  $a_{\text{eff}}$  oranını açıkça görmek mümkün değildir. Her iki durumda da motor için etkin sarım oranı vardır.

Rotordaki sarımda üretilen  $E_R$  gerilimi, makinanın kısa devre rotorunda (veya ikincil sargıda) akan akımı üretmektedir.

Asenkon motorun birincil empedansları ve miknatışlanma eğrisi transformatör eşdeğer devresine denk gelen bileşenlere çok benzerdir. Bir asenkon motor eşdeğer devresi, rotor gerilimi  $E_R$  ve rotor empedansları  $R_R$  ve  $jX_R$  ile değişen rotor frekansının etkileri cinsinden esas olarak transformatörün eşdeğer devresinden farklıdır.



**ŞEKİL 7-8**  
Bir asenkron motor ile transformatörün karşılaştırmalı mıknatıslanma eğrisi.

## Rotor Devre Modeli

Bir asenkron motorda, stator sargılarına gerilim uygulandığı zaman makinanın rotor sargılarında bir gerilim induklenir. Genel olarak, *rotor gerilimi ve rotor frekansını oluşturan, rotor ve stator manyetik alanları arasındaki göreceli hareket*dir. En büyük göreceli hareket rotor dururken oluşur ve *kilitli rotor veya tutulu rotor* olarak adlandırılır, böylece en büyük rotor gerilimi ve frekansı bu koşulda induklendir. En küçük gerilim (0V) ve frekans (0 Hz) da rotor, stator manyetik alanı ile aynı hızda hareket ederken yani göreceli hareket yokken oluşur. Bu üç noktalar arasındaki herhangi bir hızda rotorda induklenen gerilimin frekansı ve genliği, motorun kayması ile doğru orantılıdır. Bu nedenle eğer kilitli rotor durumunda induklenen rotor geriliminin büyüklüğü  $E_{R0}$  olarak adlandırılırsa herhangi bir kaymada induklenen rotor geriliminin genliği aşağıdaki denklem ile verilecektir.

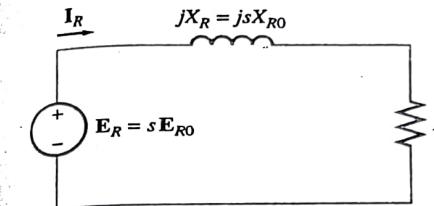
$$E_R = s E_{R0} \quad (7-1)$$

Ve herhangi bir kaymada rotorda indüklenen gerilimin frekansı ise aşağıdaki denklemle verilecektir.

$$f_r = sf_e \quad (7)$$

Bu gerilim, devresinde hem direnç hem de reaktans içeren bir rotorda i düklenmektedir. Rotor direnci  $R_R$  kaymadan bağımsız bir sabittir (deri etkisi h ric) buna karşın rotor reaktansı kayma ile daha karmaşık bir şekilde etkilenir.

Bir asenkron motorda rotorun reaktansı, rotorun indüktansına ile rotorda akım ve gerilimin frekansına bağlıdır.  $L_R$  rotor indüktansı ile rotor reaktansı aşağıdaki gibi verilir.



**ŞEKİL 7-9**  
Bir asenkron motorun rotor devre modeli

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

Denklem 7-8'e göre  $f_r = sf_e$  dir, öyle ise

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \\ &= sX_{R0} \end{aligned} \quad (7-11)$$

Burada  $X_{R0}$  kilitli rotorun rotor reaktansıdır.

Sonuçta rotor eşdeğer devresi Şekil 7-9'da gösterilmektedir. Rotordan akan akım aşağıdaki gibi bulunabilir.

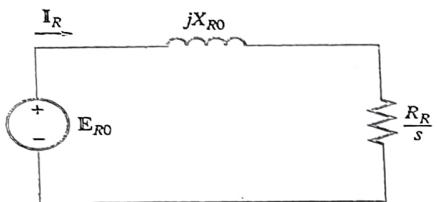
$$\boxed{I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}} \quad (7-12)$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (7-13)$$

Denklem 7-13'den, rotor hızının değişmesi nedeniyle, sabit-gerilim kaynağı  $E_R$ 'dan beslenen gücün etkilenmiş olduğu *değişken empedans*'dan dolayı olacak rotor etkilerinin tamamını modelde göstermenin mümkün olduğuna dikkat ediniz. Bu bakıs açısından esdeğer rotor empedansı:

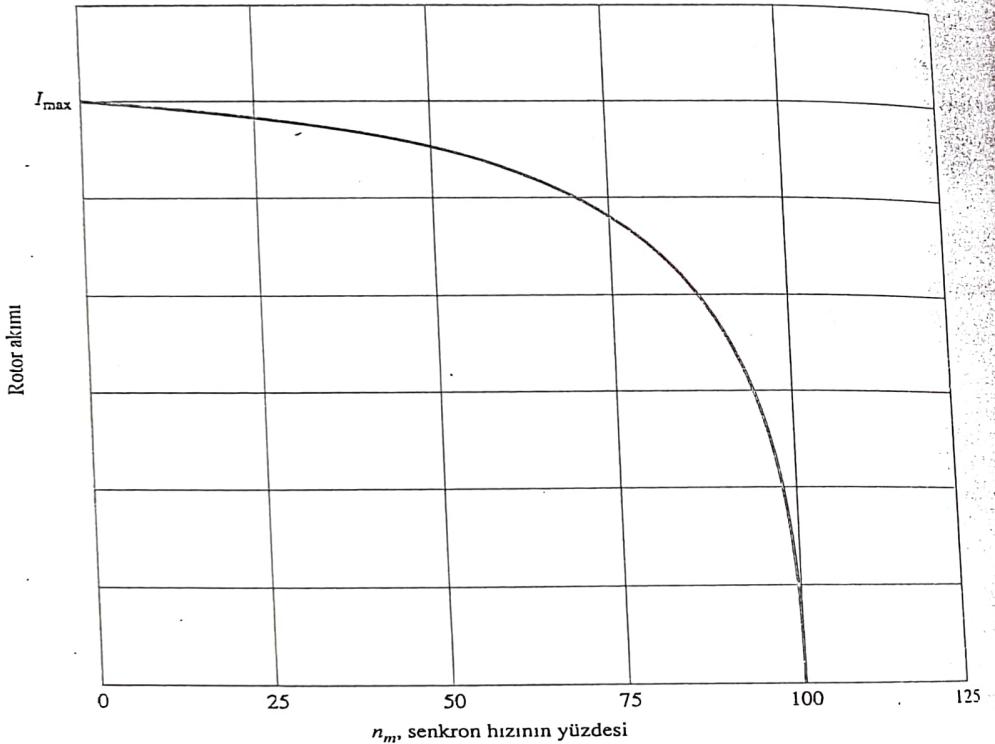
$$Z_{R,\text{eq}} = R_R/s + jX_{R0} \quad (7-14)$$

olarak yazılabilir ve bu kuraldan dolayı, rotor eşdeğer devresi Şekil 7-10'da gösterilmektedir. Şekil 7-10'daki eşdeğer devrede rotor gerilimi sabit  $E_{R0}$  V'dur ve rotor empedansı  $Z_{R,eq}$  rotor kayması ile değişim etkilerinin tamamını kapsamaktadır. Denklem 7-12 ve 7-13'de geliştirildiği gibi rotordan akan akıma ait bir çizim Şekil 7-11'de gösterilmektedir. Çok küçük kaymalarla direnç teriminin  $R_R/s >> X_{R0}$  olduğuna dikkat ediniz, bu durumda rotor direnci ve rotor akımı kayma ile doğrusal olarak değişir. Yüksek kayma değerlerinde  $X_{R0}$ ,  $R_R/s$ 'den çok daha büyütür ve rotor akımı, kayma çok büyürken *sürekli durum* değerine yaklaşır.



SEKİL 7-10

$R_s$  direnci üzerinde yoğunlaştırılan tüm frekans (kayma) etkilerini gösteren rotor devre modeli



SEKİL 7-11  
Rotor hızının bir fonksiyonu olarak rotor akımı

#### Son Eşdeğer Devre

Bir asenkron motorda faz başına eşdeğer devreyi üretmek için modelin rotor bölgümünü stator tarafına indirgemek gerekir. Stator tarafına indirgenecek olan rotor devre modeli, empedans teriminde yoğunlaştırılmış tüm hız değişim etkilerini içerecek bir tarzda Şekil 7-10'da gösterilen modeldir.

Sıradan bir transformatörde cihazın ikincil tarafındaki akım, gerilim ve empedanslar transformatörün dönüşüm oranı aracılığı ile birincil tarafa indirgenebilir.

$$\bar{V}_P = \bar{V}'_S = a\bar{V}_S \quad (7-15)$$

$$\bar{I}_P = \bar{I}'_S = \frac{\bar{I}_S}{a} \quad (7-16)$$

$$Z'_S = a^2 Z_S \quad (7-17)$$

Burada üst nokta akım, gerilim ve empedansın indirgenmiş değerlerini göstermektedir.

Tam olarak aynı türden bir dönüşüm asenkron motorun rotor devresi için de yapılabılır. Bir asenkron motorun etkin dönüşüm oranı  $a_{eff}$  ise dönüştürülmüş rotor gerilimi;

$$\bar{E}_1 = \bar{E}'_R = a_{eff} \bar{E}_{R0} \quad (7-18)$$

olur. Rotor akımı,

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{I}_R}{a_{eff}} \quad (7-19)$$

ve rotor empedansı;

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (7-20)$$

olur. Şimdi aşağıdaki tanımlamaları yaparsak

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (7-21)$$

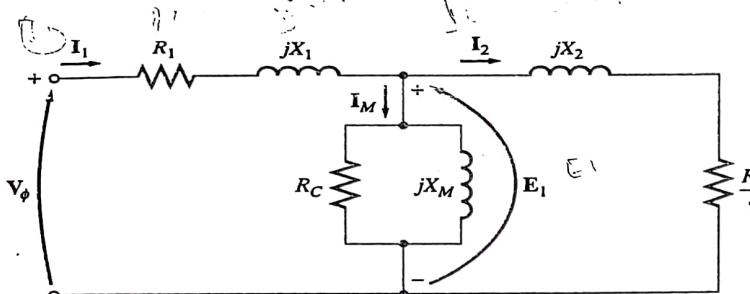
$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (7-22)$$

elde ederiz ki, bu durumda asenkron motorun faz başına son eşdeğer devresi Şekil 7-12'de gösterildiği gibi olur.

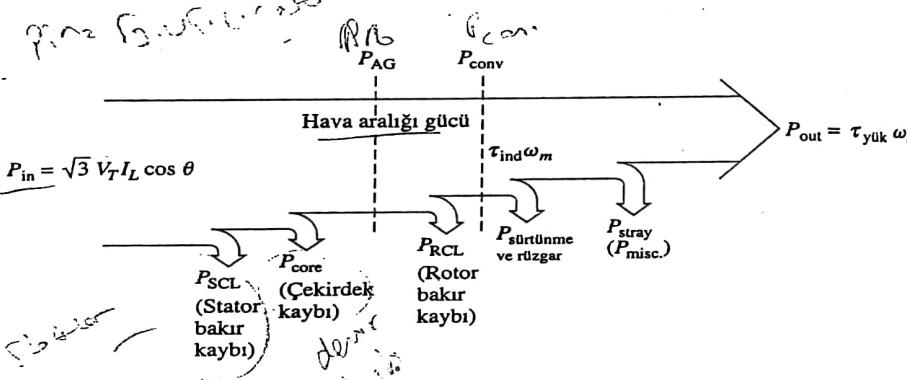
Rotor direnci  $R_R$  ve kilitli-rotor reaktansı  $X_{R0}$ 'i belirlemek çok zordur hatta kafesli rotorlarda doğrudan belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla etkin dönüştürme oranı  $a_{eff}$ 'i kafesli tip motorlar için elde etmek de zordur.  $R_R$ ,  $X_{R0}$  ve  $a_{eff}$  ayrı olarak bilinmese bile *indirgenmiş direnç*  $R_2$  ve  $X_2$  *reaktansını* doğrudan verecek ölçümleri yapmak mümkündür. Asenkron motorun parametrelerinin ölçümlü Bölüm 7.7'de ele alınacaktır.

#### 7.4 ASENKRON MOTORLARDA GÜC VE MOMENT

Asenkron motorlar tek uyartılı makinalar olduklarından, güç ve moment ilişkileri önceki bölümde anlatılan senkron makinalara göre önemli ölçüde farklıdır. Bu bölümde asenkron motorlardaki güç ve moment ilişkileri incelenecaktır.



**ŞEKİL 7-12**  
Bir asenkron motorun faz başına eşdeğer devresi



**ŞEKİL 7-13**  
Bir asenkron motorun güç akış diyagramı

### Kayıplar ve Güç Akış Diyagramı

Bir asenkron motor, temel olarak dönen bir transformatör şeklinde tanımlanabilir. Giriş üç fazlı bir akım ve gerilim sistemidir. Sıradan bir transformatör için çıkış, ikincil sargılardan elde edilen elektrik gücüdür. Bir asenkron motordaki ikincil sargılar (rotor) kısa devredir ve normal asenkron motorlarda elektriksel çıkış yoktur. Bu motorun elektriksel güç girişi ile mekanik güç çıkışının arasındaki ilişki Şekil 7-13'deki güç akış diyagramında gösterilmektedir.

Bir asenkron motorun giriş gücü  $P_{in}$ , üç fazlı elektrik akım ve gerilimlerin ürünüdür. Makinada karşılaşılan ilk kayiplar stator sargılarındaki  $I^2R$  kayiplarıdır (*stator bakır kayığı*  $P_{SCL}$ ). Kalan gücün bir miktarı statorda histerezis ve girdap akımları olarak kaybolur ( $P_{core}$ ). Bu noktada kalan güç stator ve rotor arasındaki hava aralığı üzerinden makinanın rotoruna aktarılır. Bu güç makinanın *hava aralığı gücü*  $P_{AG}$  olarak adlandırılır. Güç rotora aktarıldıkten sonra, onun bir kısmı  $I^2R$

kayıplarında harcanır (*rotor bakır kayıpları*  $P_{RCL}$ ) ve kalan güç, elektrikselden mekanije dönüştürülür ( $P_{conv}$ ). Sonuçta sürüünme ve rüzgar kayipları  $P_{F&W}$  ve kaçak kayiplar  $P_{misc}$  çıkarılır. Kalan güç  $P_{out}$  motorun çıkış gücüdür.

Çekirdek kayıpları Şekil 7-13'de gösterilen noktada güç akış diyagramında her zaman görünmez. Demir kayıplarının doğasından dolayı hesaba katıldıkları makinede oldukça rasgeledir. Bir asenkron motorun demir kayipları, kısmen stator devresinden ve kısmen rotor devresinden kaynaklanır. Bir asenkron motor normal olarak senkron hız civarında bir hızda çalıştığından, rotor yüzeyi üzerinde manyetik alanların göreceli hareketi oldukça yavaştır ve rotor çekirdek kayıpları stator demir kayıplarına göre çok azdır. Çekirdek kayıplarının en büyük kısmı stator devresinden geldiğinden dolayı tüm çekirdek kayıpları diyagram üzerindeki bu noktada öbeklenir. Bu kayıplar asenkron motorun eşdeğer devresinde  $R_c$  direnci (veya  $G_c$  iletkenliği) ile temsil edilmektedir. Çekirdek kayıpları bir devre elemanı yerine sayısal bir değer olarak daha yüksek bir hız değerinde (Watt cinsinden) verilirse, bu mekanik kayıplar ile birliktedir ve diyagram üzerindeki mekanik kayıpların yer aldığı noktadan çıkarılır.

Bir asenkron motorun *daha yüksek* hız değerlerinden daha yüksek sürüünme, rüzgar ve dağıılma kayıpları oluşur. Diğer taraftan motorun *daha düşük* hız değerlerinden ( $n_{sync}$ 'ye kadar), daha düşük çekirdek kayıpları oluşur. Bu nedenle, bu üç kayıp kategorisi bazen bir arada ele alınır ve dönme kayıpları olarak adlandırılır. Kayıp bileşenleri hızındaki değişime göre zit yönde değiştiğinden dolayı, motorun toplam dönme kayıplarının değişen hız ile sabit kaldığı çoğulukla kabul edilmektedir.

**Örnek 7-2.** 480V, 60HZ, 50-hp lik bir asenkron motor, 60 A'lık bir akım ile 0.85 geride güç faktöründe çalışmaktadır. Stator bakır kayıpları 2 kW ve rotor bakır kayıpları 700 W'dır. Sürüünme ve rüzgar kayıpları 600W, demir kayıpları 1800 W ve dağıılma kayıpları ihmal edilmiştir. Aşağıdaki büyüklükleri bulunuz:

- Hava aralığı gücü  $P_{AG}$
- Dönüştürülen gücü  $P_{conv}$
- Cıkış gücü  $P_{out}$
- Motorun verimi

### Çözüm

Bu soruları cevaplandırmak için asenkron motorun güç akış diyagramına başvurunuz (Şekil 7-13).

- Hava aralığı gücü, giriş gücü eksi stator bakır  $I^2R$  kayıplarıdır. Giriş gücü aşağıdaki gibi verilir:

$$\begin{aligned} P_{in} &= \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3}(480 \text{ V})(60 \text{ A})(0.85) = 42.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

Güç akış diyagramından hava aralığı gücü aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}P_{AG} &= P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \\&= 42.4 \text{ kW} - 2 \text{ kW} - 1.8 \text{ kW} = 38.6 \text{ kW}\end{aligned}$$

(b) Güç akış diyagramından elektrikten mekanik biçime dönüştürülen güç

$$\begin{aligned}P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\&= 38.6 \text{ kW} - 700 \text{ W} = 37.9 \text{ kW}\end{aligned}$$

(c) Güç akış diyagramından çıkış gücü aşağıdaki gibi verilir

$$\begin{aligned}P_{out} &= P_{conv} - P_{F&W} - P_{misc} \\&= 37.9 \text{ kW} - 600 \text{ W} - 0 \text{ W} = 37.3 \text{ kW}\end{aligned}$$

Veya beygir gücü olarak,

$$P_{out} = (37.3 \text{ kW}) \frac{1 \text{ hp}}{0.746 \text{ kW}} = 50 \text{ hp}$$

(d) Bu nedenle asenkron motorun verimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \\&= \frac{37.3 \text{ kW}}{42.4 \text{ kW}} \times 100\% = 88\%\end{aligned}$$

### Asenkron Motorda Güç ve Moment

Şekil 7-2 bir asenkron motorun faz başına eşdeğer devresini göstermektedir. Eşdeğer devre yakından incelenirse motorun çalışmasını yöneten güç ve moment denklemlerini çıkartmak için kullanılabilen biri görülmeli.

Motorun bir faz giriş akımı; giriş geriliminin toplam eşdeğer empedansa bölünmesiyle bulunabilir:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (7-23)$$

$$\text{burada } Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \quad (7-24)$$

Dolayısıyla, stator bakır kayipları, demir kayipları ve rotor bakır kayipları bulunabilir. Üç fazdaki stator bakır kayipları aşağıdaki gibidir.

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (7-25)$$

Demir kayipları,

$$P_{core} = 3E_1^2 G_C \quad (7-26)$$

Böylece hava aralığı gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (7-27)$$

Rotorun eşdeğer devresine yakından bakıldığından, hava aralığı gücünün tüketildiği eşdeğer devredeki tek eleman  $R_2/s$  direnç olaraak görülür. Bu nedenle hava aralığı gücü aşağıdaki gibi verilebilir.

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (7-28)$$

Rotor devresindeki gerçek direnç kayipları aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_R \quad (7-29)$$

İdeal bir transformatörün her iki ucundaki güç değişmediği için rotor bakır kayipları da aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (7-30)$$

Stator bakır kayipları, çekirdek kayipları ve rotor bakır kayipları motorun giriş gücünden çıkartıldıktan sonra kalan güç, elektrikten mekanike dönüştürülür. Dönüştürülen bu güç bazen üretilen mekanik güç olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\&= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\&= 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right)\end{aligned}$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (7-31)$$

(7-28) ve (7-30) denklemlerinden rotor bakır kayiplarının hava aralığı gücünün kayma ile çarpımına eşit olduğu görülmür:

$$P_{RCL} = sP_{AG} \quad (7-32)$$

Bu nedenle makinada, motorun düşük kayma değeri için düşük rotor kayıpları oluşur. Rotor dönmediği zaman, kayma  $s=1$  dir ve hava aralığı gücü tamamıyla rotorda tüketilir. Bu mantıksaldır çünkü eğer rotor dönmüyorsa, çıkış gücü  $P_{out} (=??_{load} w_n)$  sıfır olmalıdır.  $P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$  olduğu için bu, hava aralığı gücü ve elektrikten mekanike dönüştürülen güç arasındaki diğer bir ilişkiye de vermektedir.

$$\begin{aligned}P_{conv} &= P_{AG} - P_{RCL} \\&= P_{AG} - sP_{AG}\end{aligned}$$

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG} \quad (7-33)$$

Sonuçta, stirtünme ve rüzgar kayipları ve dağılma kayipları bilinirse çıkış gücü aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{F&W}} - P_{\text{misc}} \quad (7-34)$$

Makinada *indüklenen*  $\tau_{\text{ind}}$  momenti, iç elektrikten mekanike güç dönüşümü ile üretilen moment olarak tanımlanmıştır. Bu moment makinadaki sürtünme ve rüzgâr momentlerine eşit bir miktar kadar motorun uçlarındaki gerçek kullanılıbirlik momentten farklıdır. İndüklenen moment aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \quad (7-35)$$

Keza bu moment, makinanın *üretilen momenti* olarak da adlandırılır.

Bir asenkron motorun indüklenen momenti farklı bir biçimde de ifade edilebilir. Denklem (7-33),  $P_{AG}$  ve kayma cinsinden  $P_{\text{conv}}$ 'u ifade ederken Denklem (7-7) senkron hız ve kayma cinsinden gerçek hızı ifade etmektedir. Bu iki denklemi Denklem (7-35) de yerine yazdığımızda

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{\text{sync}}} \quad (7-36)$$

elde ederiz. Sonuncu denklem özellikle faydalıdır çünkü, indüklenen momenti hava aralığı gücü  $P_{AG}$  ve değişmeyen *senkron hız* cinsinden doğrudan ifade eder.  $P_{AG}$  bilgisi böylece doğrudan  $\tau_{\text{ind}}$  ifadesini verir.

### Asenkron Motorun Eşdeğer Devresinde Mekaniğe Dönünen Güç ile Rotor Bakır Kayıplarının Ayrılması

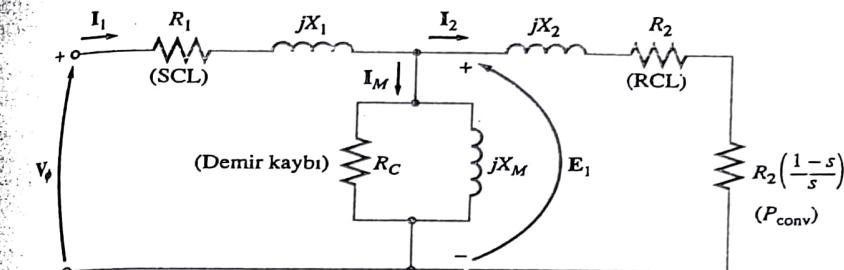
Bir asenkron motorun hava aralığı gücünün bir kısmı rotor bakır kayıplarında harcanır ve kalan kısmı motor milini sürmek için mekanik güç dönüştürülür. Hava aralığı gücünün iki ayrı kullanıma ayırmak ve eşdeğer devrede onları ayrı ayrı göstermek mümkündür.

Denklem (7-28), bir asenkron motorda toplam hava aralığı gücünü ifade etmektedir. Denklem (7-30) ise, motordaki gerçek rotor kayıplarını verir. Rotor bakır kayıpları  $R_2$  değerli dirençte tüketilen güç iken, hava aralığı gücü  $R_2/s$  değerli dirençte tüketilen güçtür. Bu iki güç arasındaki fark  $P_{\text{conv}}$ , aşağıda verilen dirençte tüketilmesi gereken güçtür:

$$R_{\text{conv}} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right)$$

$$R_{\text{conv}} = R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (7-37)$$

Rotor bakır kayıpları ve farklı elemanlara ayrılmış mekanik enerjiye dö-



**ŞEKİL 7-14**  
Aynılmış rotor kayıpları ve  $P_{\text{core}}$  ile faz başına eşdeğer devre

nüştürulen güçe bağlı olarak elde edilen faz başına eşdeğer devre Şekil 7-14'de gösterilmektedir.

**Örnek 7-3.** Bir 460V, 25-Hp, 60-Hz dört kutuplu Y-bağlı asenkron motor stator devresine indirgenmiş Ohm cinsinden aşağıdaki empedanslara sahiptir.

$$R_1 = 0.641 \Omega \quad R_2 = 0.332 \Omega$$

$$X_1 = 1.106 \Omega \quad X_2 = 0.464 \Omega \quad X_M = 26.3 \Omega$$

Toplam dönme kayıpları 1100 W'dır ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Çekirdek kayıbı dönme kayıplarıyla birliliktedir. Nominal gerilim ve nominal frekansta yüzde 2.2'lik bir rotor kayması için motorun;

- (a) Hız
- (b) Stator akımı
- (c) Güç faktörü
- (d)  $P_{\text{conv}}$  ve  $P_{\text{out}}$
- (e)  $\tau_{\text{ind}}$  ve  $\tau_{\text{load}}$
- (f) Verim değerlerini bulunuz.

### Cözüm

Bu motorun faz başına eşdeğer devresi Şekil 7-12'de gösterilmektedir. Ve güç akış diyagramı ise Şekil 7-13'de gösterilmektedir. Demir kayıpları sürtünme ve rüzgar kayıpları ve dağılmaya kayıpları ile bir araya toplandığı için mekanik kayıp gibi işlem görecekerdir ve güç akış diyagramında  $P_{\text{conv}}$ 'dan daha sonra çıkartılacaktır.

- (a) Senkron hız

$$n_{\text{sync}} = \frac{120f_e}{P} = \frac{120(60 \text{ Hz})}{4 \text{ kutup}} = 1800 \text{ dev/dak}$$

$$\text{veya } \omega_{\text{sync}} = (1800 \text{ dev/dak}) \left( \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ r}} \right) \left( \frac{1 \text{ dak}}{60 \text{ s}} \right) = 188.5 \text{ rad/s}$$

Rotorun mekanik hızı

$$n_m = (1-s)n_{\text{sync}}$$

$$= (1-0.022)(1800 \text{ dev/dak}) = 1760 \text{ dev/dak}$$

$$\text{veya} \quad \omega_m = (1 - s)\omega_{\text{sync}} \\ = (1 - 0.022)(188.5 \text{ rad/s}) = 184.4 \text{ rad/s}$$

(b) Stator akımını bulmak için devrenin eşdeğer empedansını alınız. İlk aşama, mıknatıslanma koluyla paralel bağlı olan indirgenmiş rotor empedansının eşdeğerini bulmakur ve sonra bu birleşime seri stator empedansını eklemektedir. Indirgenmiş rotor empedansı;

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \\ = \frac{0.332}{0.022} + j0.464 \\ = 15.09 + j0.464 \Omega = 15.10 \angle 1.76^\circ \Omega$$

bir araya getirilmiş mıknatıslanma artı rotor empedansı aşağıdaki gibi birdir.

$$Z_f = \frac{1}{1/jX_M + 1/Z_2} \\ = \frac{1}{-j0.038 + 0.0662 \angle -1.76^\circ} \\ = \frac{1}{0.0773 \angle -31.1^\circ} = 12.94 \angle 31.1^\circ \Omega$$

Bu nedenle toplam empedans;

$$Z_{\text{tot}} = Z_{\text{stat}} + Z_f \\ = 0.641 + j1.106 + 12.94 \angle 31.1^\circ \Omega \\ = 11.72 + j7.79 = 14.07 \angle 33.6^\circ \Omega$$

sonuç stator akımı;

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{\text{tot}}} \\ = \frac{266 \angle 0^\circ \text{ V}}{14.07 \angle 33.6^\circ \Omega} = 18.88 \angle -33.6^\circ \text{ A}$$

(c) Motor güç faktörü

$$\text{PF} = \cos 33.6^\circ = 0.833 \quad \text{geride}$$

(d) Bu motora giriş gücü;

$$P_{\text{in}} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \\ = \sqrt{3}(460 \text{ V})(18.88 \text{ A})(0.833) = 12,530 \text{ W}$$

Bu makinadaki stator bakır kayıpları

$$P_{\text{SCL}} = 3I_1^2 R_1 \quad (7-25) \\ = 3(18.88 \text{ A})^2(0.641 \Omega) = 685 \text{ W}$$

olur. Hava aralığı gücü aşağıdaki gibi verilir.

$$P_{\text{AG}} = P_{\text{in}} - P_{\text{SCL}} = 12,530 \text{ W} - 685 \text{ W} = 11,845 \text{ W}$$

Bu nedenle dönüştürülen güç;

$$P_{\text{conv}} = (1 - s)P_{\text{AG}} = (1 - 0.022)(11,845 \text{ W}) = 11,585 \text{ W}$$

Cıkış gücü;

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{rot}} = 11,585 \text{ W} - 1100 \text{ W} = 10,485 \text{ W} \\ = 10,485 \text{ W} \left( \frac{1 \text{ hp}}{746 \text{ W}} \right) = 14.1 \text{ hp}$$

şeklindedir.

(e) İndüklenen moment

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_{\text{sync}}} \\ = \frac{11,845 \text{ W}}{188.5 \text{ rad/s}} = 62.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ve çıkış gücü aşağıdaki gibi verilir.

$$\tau_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m} \\ = \frac{10,485 \text{ W}}{184.4 \text{ rad/s}} = 56.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(İngiliz birim sisteminde bu momentler sırasıyla 46.3 ve 41.9 lb-ft)

(f) Bu işletme koşulunda motorun verimi

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \\ = \frac{10,485 \text{ W}}{12,530 \text{ W}} \times 100\% = 83.7\%$$

şeklinde yazılır.

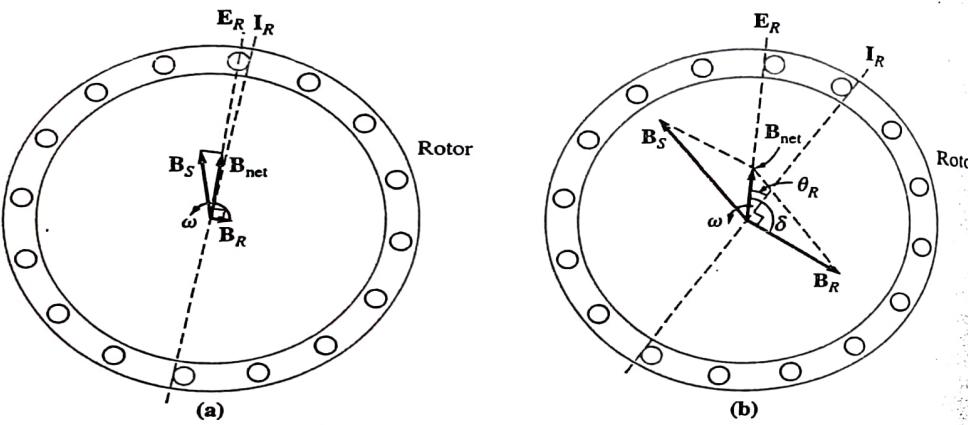
## 7.5 ASENKRON MOTORUN MOMENT-HİZ KARAKTERİSTİKLERİ

Bir asenkron motorun momenti yük değişirken nasıl değişir? Bir asenkron motor yol verme koşullarında ne kadarlık bir moment sağlayabilir? Bir asenkron motor hızı milindeki yük artarken ne kadar düşer? Bu ve benzer soruların cevabını bulmak için motorun momenti, hızı ve gücü arasındaki ilişkileri açıkça anlamak gereklidir.

Aşağıdaki kısımda, moment-hız ilişkisinin anlaşılması için, ilk olarak fiziksel bakış açısından motorun manyetik alanının davranışını inceleneciktir. Sonra asenkron motor eşdeğer devresinden kaymanın bir fonksiyonu olarak moment için genel bir denklem türetilcektir (Şekil 7-12).

### Fiziksel Açıdan İndüklenen Moment

Şekil 7-15a, başlangıçta yüksüz çalışan ve bu nedenle senkron hızın hızda dönen bir kafes rotorlu asenkron motoru göstermektedir. Bu makinede net manyetik alan motorun eşdeğer devresinde (bakınız Şekil 7-12) akan  $I_M$  mıknatıslama akımı



ŞEKİL 7-15

(a) Düşük yük altında bir asenkron motordaki manyetik alanlar (b) Ağır yük altında bir asenkron motordaki manyetik alanlar

ile üretilmektedir. Mıknatışlanma akımının büyüklüğü ve dolayısıyla  $B_{net}$ 'in  $E_1$  gerilimi ile doğru orantılıdır. Eğer  $E_1$  sabit ise motordaki net manyetik alan da sabittir.

Gerçek bir makinada  $E_1$ , yükle bağlı olarak değişir çünkü stator empedansı  $R_1$  ve  $X_1$ , değişen yükle değişen gerilim düşümüne neden olur. Dolayısıyla, stator sargılarındaki bu düşümler göreceli olarak küçüktür, böylece  $E_1$  (ve buradan  $I_M$  ve  $B_{net}$ ) yükteki değişikliklere karşı yaklaşık olarak sabit kalır.

Şekil 7-15a'ya yüksüz asenkron motoru göstermektedir. Yüksüz durumda rotor kayması ve böylece rotor ve manyetik alanı arasındaki göreceli hareket ve rotor frekansı da çok küçüktür. Göreceli hareket küçük olduğundan, rotorun çubuklarında indüklenen  $E_R$  gerilimi de çok küçüktür ve sonuca akan akım  $I_R$ 'de küçüktür. Keza rotor frekansı da çok küçük olduğundan rotorun reaktansı da yaklaşık olarak sıfırdır ve maksimum rotor akımı  $I_R$  rotor gerilimi  $E_R$  ile hemen hemen aynı fazdadır. Rotor akımı böylece net manyetik alanın  $B_{net}$  arkasında  $90^\circ$  den azıcık daha büyük bir açıda küçük bir manyetik alan  $B_R$ 'yi üretir. Stator akımının yüksüz durumda bile  $B_{net}$ 'in çoğunu sağlaması gereğinden epey büyük olması gereğine dikkat ediniz. (Bu, asenkron motorların boşta çalışma akımlarının diğer motorlara göre büyük olmasının nedenidir.)

Rotorun dönüşünü devam ettiren indüklenen moment aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net} \quad (4-60)$$

Büyüklüğü

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \mathbf{B}_{net} \sin \delta \quad (4-61)$$

ile verilir. Rotor manyetik alanı çok küçük olduğundan dolayı, indüklenen moment de oldukça küçüktür. Yalnız bu moment, motorun dönme kayiplarının üstesinden gelebilecek büyülüktedir. Asenkron motorun yüklediğini varsayılm (Şekil 7-15b). Motor yük artarken kayması artar ve rotor hızı düşer. Rotor hızı azaldığından dolayı makinadaki stator ve rotor manyetik alanları arasında *daha göreceli bir hareket* vardır. Daha fazla göreceli hareket, daha büyük rotor gerilimi  $E_R$  ve daha büyük rotor akımı  $I_R$  üretir. Daha büyük bir rotor akımı ile, rotor manyetik alanı  $B_R$  de artar. Bununla birlikte rotor akımı ve  $B_R$ 'nin açısı da değişir. Rotor kayması büyündüğünden dolayı rotor frekansı yükselir ( $f_r = s f_e$ ) ve rotorun reaktansı artar ( $\omega L_R$ ). Bu nedenle rotor akımı rotor geriliminin gerisindedir ve rotor manyetik alanı, akım ile kayar. Şekil 7-15 b aşırı yükte çalışan asenkron motoru göstermektedir. Rotor akımının ve  $\delta$  açısının artırılmış olduğuna dikkat ediniz.  $\delta$  açısındaki artış momentin azalmasına yol açarken,  $B_R$ 'deki artış, momentte artmaya yol açar ( $\tau_{ind} \sin \delta$  ile orantılıdır ve  $\delta > 90^\circ$ ). İlk etki, ikinciden daha büyük olduğundan dolayı toplam indüklenen moment motorun artan yükünü karşılayacak şekilde artmaktadır.

Bir asenkron motor devrilme momentine ne zaman ulaşır? Devrilme momentine mil üzerindeki yük artarken,  $\sin \delta$  teriminin  $B_R$  teriminin artısından daha fazla azaldığı noktada ulaşılır. Bu noktada yükte fazladan bir artış oluşursa bu  $\tau_{ind}$ 'i azaltır ve motor durdurur.

Bir asenkron motorun hıza göre çıkış momentinin karakteristigi yaklaşık olarak türetmek için makinanın manyetik alan bilgisini kullanmak mümkündür. Makinada indüklenen momentin genliğinin aşağıdaki hatrlayalım.

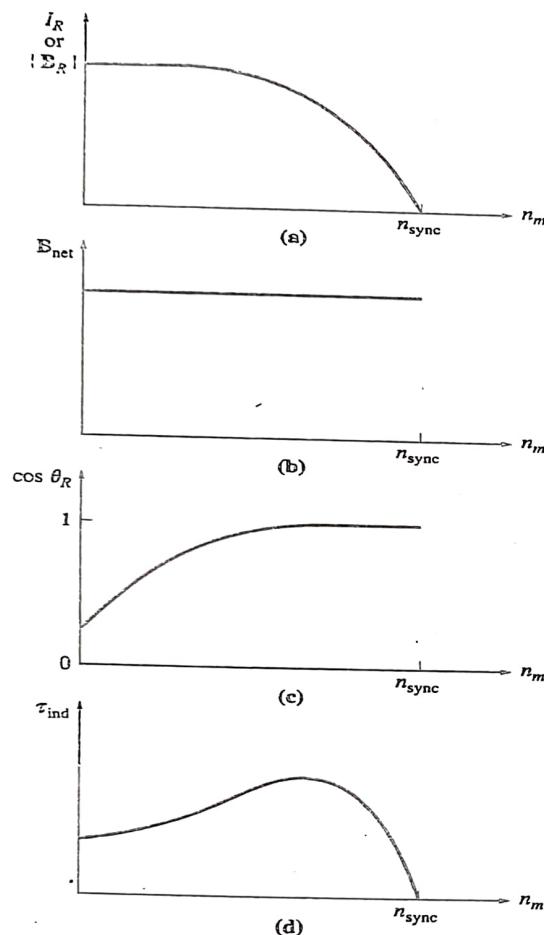
$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \mathbf{B}_{net} \sin \delta \quad (4-61)$$

Bu ifadedeki her bir terim makinanın toplam davranışını türetmek için ayrı ayrı göz önüne alınabilir. Tek tek terimler ele alınırsa;

- $B_R$ . Rotor manyetik alanı, rotor doyumda olmadığı sürece rotordan akan akımla doğrudan orantılıdır. Rotorda akan akım Denklem (7-13)'e göre artan kayma (azalan hız) ile artar. Bu akan akım Şekil 7-11'de çizilmiş ve Şekil 7-16'a da tekrar gösterilmiştir.
- $B_{net}$ . Motordaki net manyetik alan  $E_1$  ile orantılıdır ve bu nedenle yaklaşık olarak sabittir (aslında  $E_1$  artan akım ile azalır ama bu etki diğer ikisine kıyasla küçüktür ve bu grafik geliştirirken ihmal edilecektir) Hıza karşı  $B_{net}$  eğrisi Şekil 7-16b'de gösterilmektedir.
- $\sin \delta$ . Net ve rotor manyetik alanları arasındaki açı farkı  $\delta$ , çok yararlı bir şekilde ifade edilebilir. Şekil 7-15 b'ye bakınız. Bu şekilde, açıkça  $\delta$  açısının rotorun güç faktörü açısının artı  $90^\circ$  ye eşit olduğu görülür.

$$\delta = \theta_R + 90^\circ \quad (7-38)$$

Bu nedenle  $\sin \delta = \sin (\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$  olur. Bu terim rotorun güç faktöründür. Rotorun güç faktörü açısının aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.



ŞEKİL 7-16

Bir asenkron motor moment-hız karakteristiğinin grafiksel geliştirimi.  
(a) Bir asenkron motor için hıza karşı rotor akımının (ve böylece  $|B_R|$  ye) değişimi. (b) Motor için hıza göre net manyetik alanının çizimi (c) Rotor gürültü faktörünün motor hızına karşı değişimi  
(d) Sonuç moment-hız karakteristiği

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} = \tan^{-1} \frac{sX_{R0}}{R_R} \quad (7-39)$$

Sonuç rotor gürültü faktörünün aşağıdaki gibidir.

$$PF_R = \cos \theta_R$$

$$PF_R = \cos \left( \tan^{-1} \frac{sX_{R0}}{R_R} \right) \quad (7-40)$$

Hız'a karşı rotor gürültü faktörünün değişimi Şekil 7-16 c'de gösterilmektedir.

İndüklenen moment bu üç terimin çarpımıyla orantılı olduğundan dolayı, bir asenkron motorun moment-hız karakteristiği önceki üç çizimin grafiksel olarak

çarpımından elde edilebilir (Şekil 7-16 a-c). Bu tarzda elde edilen bir asenkron motorun moment-hız karakteristiği Şekil 7-16 d'de gösterilmektedir.

Bu karakteristik eğri kabaca üç bölgeye bölünebilir. Eğrinin ilk bölgesi düşük kayma bölgesidir. Düşük kayma bölgesinde motor kayması artan yükle yaklaşık doğrusal olarak artar ve rotor mekanik hızı yükle yaklaşık olarak doğrusal azalır. Bu çalışma bölgesinde rotor reaktansı ihmali edilebilir ve böylece rotor güç faktörü, rotor akımı kayma ile doğrusal olarak artarken yaklaşık olarak birim değerinde olur. Asenkron motorun tüm normal sürekli durum çalışma aralığı bu doğrusal düşük kayma bölgesini kapsar. Böylece, normal çalışmada bir asenkron motorun hızı doğrusal olarak azalır.

Asenkron motorun hız-moment eğrisinin ikinci bölgesi vasat kayma bölgesi olarak adlandırılır. Vasat kayma bölgesinde rotor frekansı öncekinden yüksektir ve rotor reaktansı rotor direncinin ile aynı büyüklük seviyesindedir. Bu bölgede rotor akımı önceki bölgeye göre daha yavaş artarken güç faktörü de düşmeye başlar. Motorun tepe momenti (devrilme momenti) yükteki artımsal bir yükselme için rotor akımındaki artışın rotor güç faktöründeki azalış ile tam olarak dengelendiği noktada oluşur.

Motor eğrisi üzerindeki üçüncü bölge yüksek kayma bölgesi olarak adlandırılır. Bu yüksek kayma bölgesinde, indüklenen moment aslında artan yük ile azalar. Çünkü rotor akımındaki artış, rotor güç faktöründeki azalma ile tam olarak bastırılır.

Tipik bir asenkron motor için eğri üzerindeki devrilme momenti makinanın nominal yük momentinin yüzde 200–250'si olacaktır ve yol verme momenti (sıfır hızda moment) tam yük momentinin eşi veya yüzde 150'si olacaktır. Senkron motordan farklı olarak asenkron motora milinde tam yük varken bile yol verebilir.

### Asenkron Motorda İndüklenen Moment Denkleminin Çıkarılması

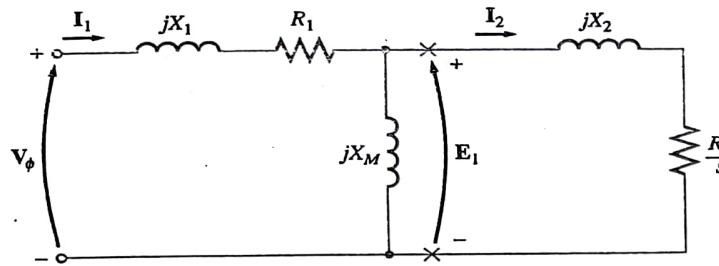
Hızın bir fonksiyonu olarak indüklenen momentin genel bir ifadesini çıkartmak üzere asenkron motorun eşdeğer devresini ve motorun güç akış diyagramını kullanmak mümkündür. Bir asenkron motorda indüklenen moment ifadesi, Denklem (7-35) veya (7-36) ile verilmektedir.

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} \quad (7-35)$$

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_{\text{sync}}} \quad (7-36)$$

Senkron hız belirli bir frekans ve kutup sayısı için sabittir dolayısıyla sonuncu denklem özellikle yararlıdır.  $\omega_{\text{sync}}$  sabit olduğundan dolayı hava aralığı gücüne ilişkin bilgi, motorun indüklenen moment bilgisini verir.

Hava aralığı gücü statordan rotor devresine hava aralığından geçen güçtür. Bu  $R_2/s$  de tutulan güçe eşittir. Bu güç nasıl bulunabilir?



**ŞEKİL 7-17**  
Bir asenkron motorun faz başına eşdeğer devresi

Şekil 7-17'de verilen eşdeğer devreye bakalım. Bu şekilde motorun bir fazına sağlanan hava aralığı gücünün aşağıdaki gibi görülebilir.

$$P_{AG,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Bu nedenle toplam hava aralığı gücü;

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

yazılır. Eğer  $I_2$  belirlenebilirse, o zaman hava aralığı gücü ve indüklenen moment bulunabilecektir.

$I_2$  akımı için Şekil 7-17'deki devreyi çözmek üzere birçok yol olmasına rağmen belki en kolayı şekilde  $X$ 'lerin solundaki devrenin Thevenin eşdeğerini belirlemektir. Thevenin teoremi: sistemden iki uç ile ayrılabilen herhangi bir doğrusal devrenin, eşdeğer bir impedans ve seri bir gerilim kaynağı ile yer değiştirilebilir olduğunu söyler. Bu bir asenkron motor eşdeğer devresine uygulanırsa, sonuç devre Şekil 7-18 c'de gösterildiği gibi basit bir seri bağlı eleman birleşimi olacaktır.

Asenkron motor eşdeğer devresinin giriş tarafının Thevenin eşdeğerini hesaplamak için  $X$ 'lerdeki uçları açık devre yaparak açık devre gerilimini buluruz. Sonra Thevenin impedansını bulmak için, faz gerilimini sıfırlayarak (kısa devre ederek) ve uçlara bakarak görülen  $Z_{eq}$  buluruz.

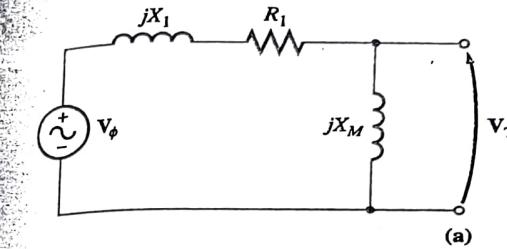
Şekil 7-18a Thevenin gerilimini bulmak için kullanılan açık devre uçlarını göstermektedir. Gerilim bölücü kuralı ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \\ &= V_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \end{aligned}$$

$V_{TH}$  Thevenin geriliminin büyüklüğü;

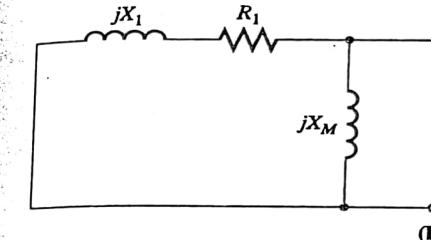
$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

verilmektedir.

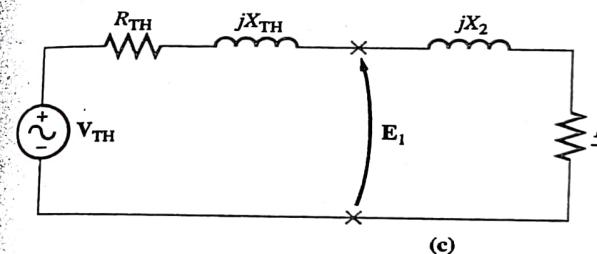


$$V_{TH} = \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} V_\phi$$

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_\phi$$



$$Z_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$



(c)

**ŞEKİL 7-18**

(a) Bir asenkron motorun giriş devresinin Thevenin eşdeğer gerilimi, (b) Giriş devresinin Thevenin eşdeğer impedansı, (c) Bir asenkron motorun basitleştirilmiş eşdeğer devresi

Mıknatışlanma reaktansı  $X_M \gg X_1$  ve  $X_M \gg R_1$  olduğu için, Thevenin geriliminin büyüklüğü yaklaşık olarak daha doğru bir sonuç için,

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (7-41b)$$

Şekil 7-18b giriş gerilim kaynağının kısa devre edilmesi ile oluşan giriş devresini göstermektedir. İki impedans paraleldir ve Thevenin impedansı aşağıdaki gibi verilir:

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (7-42)$$

Bu impedans aşağıdaki değere indirgenir:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (7-43)$$

$X_m >> X_1$  ve  $X_M + X_1 >> R_1$  olduğundan dolayı Thevenin direnç ve reaktansı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$R_{TH} \approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (7-44)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (7-45)$$

Sonuçta elde edilen eşdeğer devre Şekil 7-18 c'de gösterilmektedir. Bu devreden akan  $I_2$  akımı aşağıdaki gibi verilir:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (7-46)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (7-47)$$

Bu akımın büyüklüğü,

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (7-48)$$

olarak yazılabilir. Bu nedenle hava aralığı gücü aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

$$= \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (7-49)$$

Rotorda indüklenen moment için,

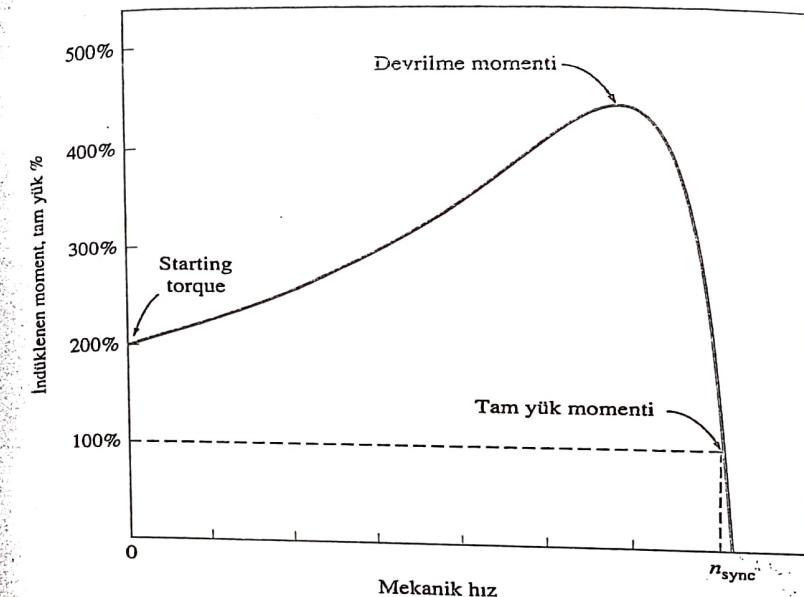
$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (7-50)$$

yazılır. Hızın (ve kaymanın) bir fonksiyonu olarak asenkron motor momentinin değişimi Şekil 7-19'da gösterilmektedir. Normal motor çalışma hız aralığının alt ve üstündeki hızları gösteren grafik Şekil 7-20'deki gibidir.

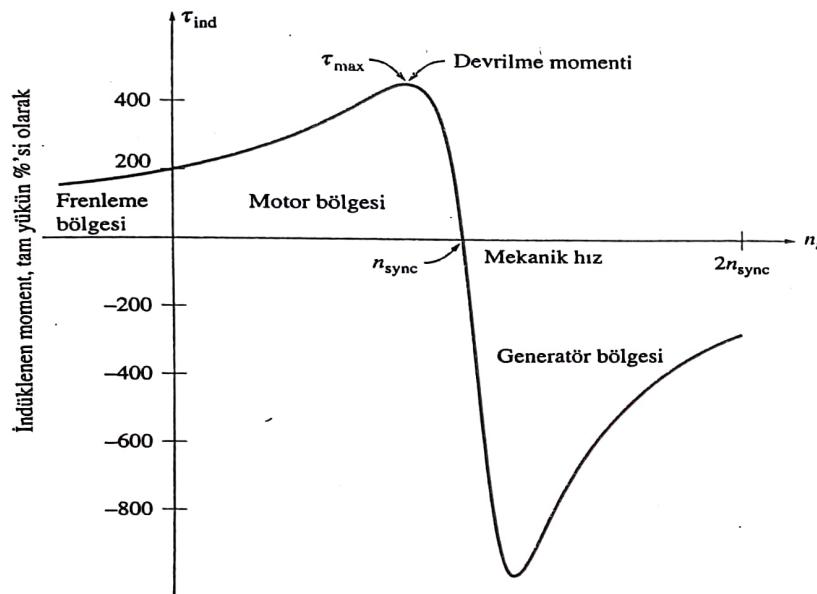
### Asenkron Motor Moment-Hız Eğrisi Üzerine Yorumlar

Şekil 7-19 ve Şekil 7-20'deki asenkron motor moment-hız karakteristik eğrisi, asenkron motorların çalışması hakkında bir çok önemli bilgiler içermektedir. Bu bilgiler aşağıdaki gibi özetlenebilir.



ŞEKİL 7-19  
Asenkron motor için tipik moment-hız karakteristik eğrisi

1. Senkron hızda motorda indüklenen moment sıfırdır. Bu gerçek daha önceden tartışılmıştı.
2. Moment-hız eğrisi boşta çalışma ve yüklü durum arasında yaklaşık olarak doğrusal olarak değişmektedir. Bu aralıkta rotor direnci rotor reaktansından daha büyütür, böylece rotor akımı, rotor manyetik alanı ve indüklenen moment artan kayma ile doğrusal olarak artar.
3. Aşılamayan olası bir maksimum moment vardır. Devrilme veya tepe moment olarak adlandırılan bu moment motorun nominal yük momentinin 2-3 katıdır. Bu bölümün sonraki ayrıntıda devrilme momentinin hesaplanması için bir yöntem sunulacaktır.
4. Motorda yol verme momenti kendi tam yük momentinden biraz daha büyük olur ve böylece bu motor, tam güçte besleyebildiği herhangi bir yükü taşımağa başlayacaktır.
5. Belirli bir kayma için motordaki momentin uygulanan gerilimin karesi ile değiştiğine dikkat ediniz. Bu daha sonra tartışılabilecek olan bir asenkron motor hız kontrol yöntemi için faydalı olacaktır.
6. Asenkron motorun rotoru senkron hızdan daha yüksek bir hız ile sürülürse, o zaman makinada indüklenen momentin yönü ters döner ve makina mekanik gücü elektrik gücüne dönüştüren bir发电机 haline gelir. Asenkron makinaların generator olarak kullanımı daha sonra tartılacaktır.



SEKİL 7-20

Asenkron motorun genişletilmiş işletme aralıklarını (frenleme bölgesi ve generatör bölgesi) gösteren moment-hız karakteristik eğrisi.

7. Eğer motor manyetik alan yönüne göre ters yönde dönüyorrsa, makina hızlı bir şekilde duracaktır ve makinada indüklenen momente ters yönde onu döndürmeye çalışacaktır. Manyetik alanın dönme yönünün ters çevrilmesi herhangi iki stator faz anahtarlarının yerlerini değiştirmekle mümkün olduğu için, bu gerçek asenkron motoru hızlı durdurmak için bir yol olarak kullanılabilir. Motoru durdurmak için iki fazın yer değiştirmesi gerçeği plugging olarak adlanır.

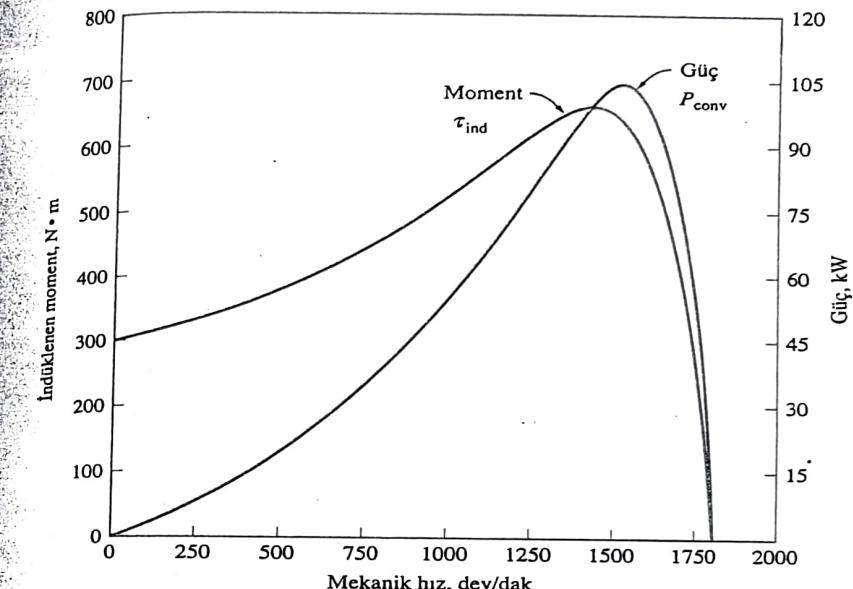
Bir asenkron motorda mekanik biçimde dönüştürülen güç aşağıdaki ifadeye esittir:

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega_r$$

ve Şekil 7-21'deki gibi gösterilir. Asenkron motor tarafından sağlanan maksimum gücün maksimum momentten farklı bir hızda oluştuğuna dikkat ediniz ve şüphesiz rotor sıfır hızda olduğu zaman mekanik güçe dönüşüm olmaz.

#### **Asenkron Motorun Maksimum (Deyrilme ) Moment**

İndüklenen moment  $P_{AG}/\omega_{sync}$ 'ye eşit olduğundan dolayı, maksimum olası moment, hava aralığı gücü maksimum olduğunda oluşur. Hava aralığı gücü  $R_2/s$  dir.



SEKİL 7-2

Ömek olarak dört kutuplu bir motor için devir/dakika cinsinden motor hızına karşı üretilen güç ve indüklenen moment değişimleri

rencinde tüketilen güç eşit olduğundan maksimum indüklenen moment, bu dirence tüketilen güç, maksimum olduğu zaman elde edilir.

$R_2/s$ 'e sağlanan güç, ne zaman maksimum değerinde olur? Şekil 7-8'deki basitleştirilmiş eşdeğer devreye bakınız. Yük empedansının açısının sabit olduğu durumda, maksimum güç transfer teoremine göre,  $R_2/s$  direncine transfer edilen maksimum güç bu empedansın genliği, kaynak empedansının genliğine eşit olduğunda meydana gelecektir; empedansın, kaynak empedansının *büyüküğünə* (genliğine) eşit büyüklükte olduğu zaman oluşacaktır. Devredeki eşdeğer kaynak empedansı:

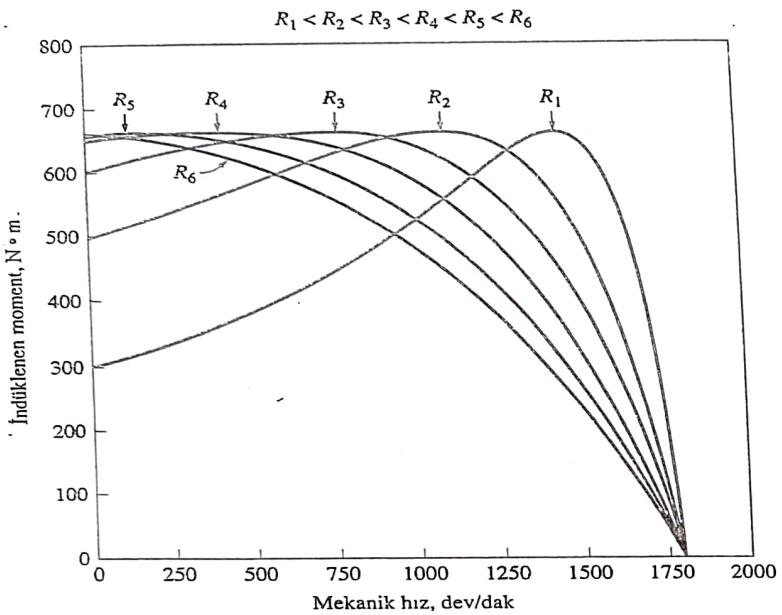
$$Z_{\text{source}} = R_{\text{TH}} + jX_{\text{TH}} + jX_2 \quad (7-51)$$

Böylece, maksimum güç transferi aşağıdaki koşulda olusur.

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (7-52)$$

Kayma için Denklem (7-52)'yi çözerek, devrilme momentindeki kaymanın aşağıdaki gibi ifade edilebildiğini görürlür.

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (7-53)$$



ŞEKİL 7-22

Bir bilezikli asenkron motorun moment-hız karakteristiği üzerinde değişen rotor direncinin etkisi

İndirgenmiş rotor direnci  $R_2$ 'nin sadece payda gözüktüğüne dikkat ediniz, böylece maksimum momentteki rotor kayması rotor direnci ile doğrudan orantılı olur.

Maksimum momentin değeri moment denklemine [Denklem (7-50)] maksimum momentte kayma ifadesi girilerek bulunabilir. Maksimum veya devrilme momenti için sonuç denklem aşağıdaki gibidir.

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (7-54)$$

Bu moment besleme geriliminin karesi ile doğru orantılıdır ve yine stator empedansı ve rotor reaktansının büyülüüğü ile ters orantılıdır. Daha küçük makina reaktansları makinaya daha büyük maksimum momente ulaşabilme yeteneğini kazandırır. Maksimum momentin olduğu *kayma*, rotor direnci ile doğru orantılıdır [Denklem (7-53)] ancak maksimum momentin rotor direncinin değerinden bağımsız [Denklem (7-54)] olduğuna dikkat ediniz.

Bilezikli bir asenkron motor için moment-hız karakteristiği Şekil 7-22'de gösterilmektedir. Bilezikli rotor devresine bilezikler üzerinden direnç eklemenin mümkün olduğunu hatırlayınız. Rotor direnci artırılırken oluşan şekele dikkat edilirse, motorun devrilme hızının azaldığı ancak maksimum momentin sabit kaldığı görülür.

Bilezikli asenkron motorların bu karakteristiğinin üstünlüğünü çok ağır yükler için kullanmak mümkündür. Rotor devresine bir direnç eklenirse, yol alma koşullarında maksimum moment oluşacak şekilde ayarlanabilir. Dolayısıyla, olası maksimum moment, ağır yüklerle yol vermek için kullanılabilecektir. Öte yandan yük, bir kez hareket ettirildikten sonra ekstra direnç devreden çıkarılır ve maksimum moment düzenli çalışma için senkron hız civarına ötelenir.

**Örnek 7-4.** İki kutuplu ve 50 Hz'lik bir asenkron motor, 2950 dev/dak'lık bir hızda 15 kW'lık bir yükü beslemektedir.

- Motorun kayması nedir?
- Bu koşullar altında Nm cinsinden motorda induklenen moment nedir?
- Moment iki katına çıkarılırsa motorun çalışma hızı ne olacaktır?
- Moment iki katına çıktıığı zaman motor tarafından ne kadar güç sağlanacaktır?

#### Cözüm

- Bu motorun senkron hızı

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{P} = \frac{120(50 \text{ Hz})}{2 \text{ kutup}} = 3000 \text{ dev/dak}$$

yazılır. Buradan motorun kayması

$$\begin{aligned} s &= \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} (\times 100\%) \\ &= \frac{3000 \text{ dev/dak} - 2950 \text{ dev/dak}}{3000 \text{ dev/dak}} (\times 100\%) \\ &= 0.0167 \text{ or } 1.67\% \end{aligned} \quad (7-4)$$

olur.

- Motorda induklenen moment yük momentine eşit kabul edilmelidir ve  $P_{conv}$ ,  $P_{load}$ 'a eşit kabul edilmelidir, çünkü mekanik kayıplar için herhangi bir değer verilmemiştir. Moment böylece;

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{P_{conv}}{\omega_m} \\ &= \frac{15 \text{ kW}}{(2950 \text{ dev/dak})(2 \pi \text{ rad/r})(1 \text{ dak}/60 \text{ s})} \\ &= 48.6 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

- Düşük kayma bölgesinde, moment-hız eğrisi doğrusaldır ve induklenen moment kaymayıla doğru orantılıdır. Dolayısıyla, moment iki katına çıkarsa, bu durumda yeni kayma yüzde 3.33 olacaktır. Böylece motorun çalışma hızı;

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.0333)(3000 \text{ dev/dak}) = 2900 \text{ dev/dak}$$

- Motor tarafından üretilen güç aşağıdaki gibi verilir:

$$\begin{aligned} P_{conv} &= \tau_{ind}\omega_m \\ &= (97.2 \text{ N} \cdot \text{m})(2900 \text{ dev/dak})(2 \pi \text{ rad/r})(1 \text{ dak}/60 \text{ s}) \\ &= 29.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

**Örnek 7-5.** 460-V, 25-hp, 60-Hz, dört kutuplu ve Y-bağlı bilezikli bir asenkron motor stator devresine indirgenmiş faz başına Ohm cinsinden aşağıdaki empedanslara sahiptir.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.641 \Omega & R_2 &= 0.332 \Omega \\ X_1 &= 1.106 \Omega & X_2 &= 0.464 \Omega & X_M &= 26.3 \Omega \end{aligned}$$

- (a) Bu motorun maksimum momenti nedir? Hangi hız ve kaymada oluşur?
- (b) Bu motorun yol alma momenti nedir?
- (c) Rotor direnci iki katına çıkarıldığı zaman maksimum momentin şimdiden oluşacağı hız ne olur? Motorun yeni yol alma momenti ne olur?
- (d) Bu motorun hem orijinal rotor direnci ile hem de iki kat rotor direncine sahip olduğunda, moment-hız karakteristiğini çiziniz ve hesaplayınız.

### Cözüm

Bu motorun Thevenin gerilimi

$$\begin{aligned} V_{TH}' &= V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \\ &= \frac{(266 \text{ V})(26.3 \Omega)}{\sqrt{(0.641 \Omega)^2 + (1.106 \Omega + 26.3 \Omega)^2}} = 255.2 \text{ V} \end{aligned} \quad (7-41a)$$

olur. Thevenin direnci;

$$\begin{aligned} R_{TH} &\approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \\ &\approx (0.641 \Omega) \left( \frac{26.3 \Omega}{1.106 \Omega + 26.3 \Omega} \right)^2 = 0.590 \Omega \end{aligned} \quad (7-44)$$

ve Thevenin reaktansı

$$X_{TH} \approx X_1 = 1.106 \Omega$$

olur.

- (a) Maksimum momentin olduğu kayma Denklem (7-53) ile verilmektedir.

$$\begin{aligned} s_{max} &= \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \\ &= \frac{0.332 \Omega}{\sqrt{(0.590 \Omega)^2 + (1.106 \Omega + 0.464 \Omega)^2}} = 0.198 \end{aligned} \quad (7-53)$$

Bu, aşağıdaki mekanik hıza karşılık gelir:

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.198)(1800 \text{ dev/dak}) = 1444 \text{ dev/dak}$$

Bu hızdaki moment,

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \\ &= \frac{3(255.2 \text{ V})^2}{2(188.5 \text{ rad/s})[0.590 \Omega + \sqrt{(0.590 \Omega)^2 + (1.106 \Omega + 0.464 \Omega)^2}]} \\ &= 229 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (7-54)$$

dir.

(b) Bu motorun yol alma momenti Denklem (7-50) de  $s=1$  yazarak bulunabilir:

$$\begin{aligned} \tau_{start} &= \frac{3V_{TH}^2 R_2}{\omega_{sync}[(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \\ &= \frac{3(255.2 \text{ V})^2(0.332 \Omega)}{(188.5 \text{ rad/s})[(0.590 \Omega + 0.332 \Omega)^2 + (1.106 \Omega + 0.464 \Omega)^2]} \\ &= 104 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

(c) Rotor direnci iki katına çıkarılsa o zaman maksimum momentteki kayma da iki katına çıkar. Bu nedenle

$$s_{max} = 0.396$$

ve maksimum momentteki hız

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0.396)(1800 \text{ dev/dak}) = 1087 \text{ dev/dak}$$

Maksimum moment hala;

$$\tau_{max} = 229 \text{ N} \cdot \text{m}$$

dir. Şimdi yol alma momenti

$$\begin{aligned} \tau_{start} &= \frac{3(255.2 \text{ V})^2(0.664 \Omega)}{(188.5 \text{ rad/s})[(0.590 \Omega + 0.664 \Omega)^2 + (1.106 \Omega + 0.464 \Omega)^2]} \\ &= 170 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

olur.

- (d) Motorun hem orijinal rotor direnci hem de iki kat rotor direncine sahip olduğu durumlarda moment-hız karakteristiğini çizip hesaplamak için MATLAB M-dosyası yaratacağız. M-dosyası yaklaşık hesaplamalar yerine  $V_{TH}$  ve  $Z_{TH}$  [Denklemler (7-41a) ve (7-43)] için tam denklemleri kullanarak Thevenin empedansını hesaplayacaktır. Çünkü bilgisayar tam hesaplamaları daha kolay bir şekilde yapabilir. Sonra Denklem (7-50)'yi kullanarak indüklenen momenti hesaplayacak ve sonuçları çizecektir. M-dosyası aşağıda gösterilmektedir.

```
% M-file: torque_speed_curve.m
% M-file create a plot of the torque-speed curve of the
% induction motor of Example 7-5.
```

```
% First, initialize the values needed in this program.
r1 = 0.641; % Stator resistance
x1 = 1.106; % Stator reactance
r2 = 0.332; % Rotor resistance
x2 = 0.464; % Rotor reactance
xm = 26.3; % Magnetization branch reactance
v_phase = 460 / sqrt(3); % Phase voltage
n_sync = 1800; % Synchronous speed (r/min)
w_sync = 188.5; % Synchronous speed (rad/s)
% Calculate the Thevenin voltage and impedance from Equations
% 7-41a and 7-43.
v_th = v_phase * (xm / sqrt(r1^2 + (x1 + xm)^2));
z_th = ((j*xm) * (r1 + j*x1)) / (r1 + j*(x1 + xm));
r_th = real(z_th);
```

```

x_th = imag(z_th);
% Now calculate the torque-speed characteristic for many
% slips between 0 and 1. Note that the first slip value
% is set to 0.001 instead of exactly 0 to avoid divide-
% by-zero problems.
s = (0:1:50) / 50; % Slip
s(1) = 0.001;
nm = (1 - s) * n_sync; % Mechanical speed

% Calculate torque for original rotor resistance
for ii = 1:51
    t_ind1(ii) = (3 * v_th^2 * r2 / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2));
end

% Calculate torque for doubled rotor resistance
for ii = 1:51
    t_ind2(ii) = (3 * v_th^2 * (2*r2) / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + (2*r2)/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2));
end

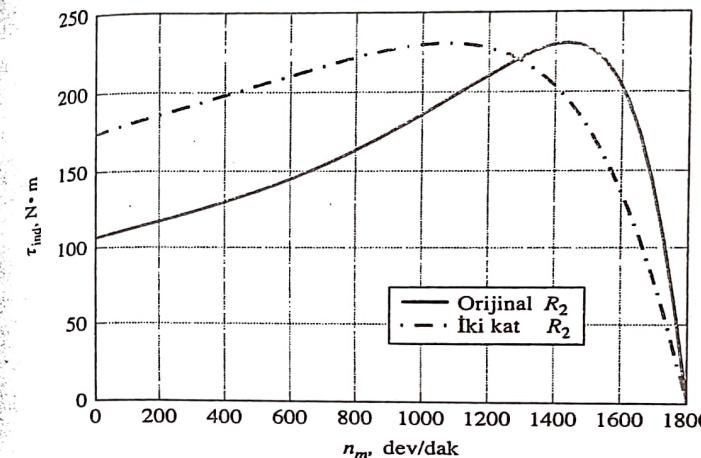
% Plot the torque-speed curve
plot(nm,t_ind1,'Color','k','LineWidth',2.0);
hold on;
plot(nm,t_ind2,'Color','k','LineWidth',2.0,'LineStyle','-.');
xlabel('nm, dev/dak');
ylabel('τind, N·m');
title ('Induction motor torque-speed characteristic',...
'Fontweight','Bold');
legend ('Original R2', 'Doubled R2');
grid on;
hold off;

```

Sonuç moment-hız karakteristikleri Şekil 7-23'de gösterilmektedir. Eğri üzerindeki tepe moment ve yol alma momenti (a)'dan (c)'ye kadar olan maddelerin hesaplamalarını karşılar. Keza  $R_2$  artarken motorun yol alma momentinin yükselmesine dikkat ediniz.

## 7.6 ASENKRON MOTOR MOMENT-HİZ KARAKTERİSTİĞİNDE VARYASYONLAR

Bölüm 7-5'te bir asenkon motorun moment-hız karakteristiği türetilmiştir. Bu bölümde birçok karakteristik eğri rotor direncine bağlı olarak gösterildi. Örnek 7-5 bir asenkon motor tasarımcısının ikilemini göstermektedir eğer rotor yüksek bir dirençle tasarlanırsa o zaman motorun yol alma momenti yüksek olur ancak kayma, normal çalışma koşullarında da oldukça yüksektir.  $P_{conv}=(I-s)P_{AC}$ 'na göre yüksek kayma nedeniyle, hava aralığı güçlünün sadece bir kısmı mekanik biçimde dönüştürülür. Bu durum daha düşük bir motor verimine neden olur. Böylece daha düşük bir motor verimi olur. Yüksek rotor dirençli bir motor iyi yol alma momentine ama normal çalışma koşullarında kötü bir verime sahip olur. Diğer yan- dan düşük rotor dirençli bir motor, düşük yol alma momenti ve yüksek yol verme



ŞEKİL 7-23

Örnek 7-5 deki motor için moment-hız karakteristiği

akımına sahiptir ancak normal çalışma koşullarında verimi yüksektir. Bir asenkon motor tasarımcısı yüksek yol alma momenti ve yüksek verim ihtiyacı uyuşmazlığı arasında uzlaşmaya zorlanmaktadır.

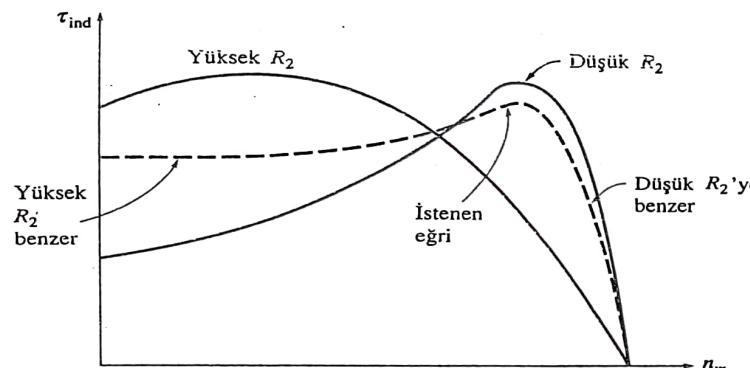
Bu zorluk için olası bir çözüm Bölüm 7-5'de sunulan ve yol alma esnasında rotor devresine ekstra direnç sokulması ve bilezikli bir asenkon motorun kullanılmasıydı. Ekstra direnç normal çalışma sırasında daha iyi verim için tam olarak devre dışı bırakılmalıdır. Ne yazık ki, bilezikli motorlar daha pahalı, daha fazla bakım gerektirir ve kafes rotorlu motorlardan daha karmaşık otomatik kontrol devresine gerek duyarlar. Keza, patlayıcı ve tehlikeli ortamlarda yer aldığı zaman bir motorun tam sızdırmazlığı önemlidir ve bunu kendi başına çalışan bir rotor ile yapmak daha kolaydır. Yol alma sırasında ekstra rotor direnci eklemek ve bu dirençleri normal çalışma sırasında devre dışı yapmak ve *kontrol devresi kullanmaksızın ve işletmeci olmaksızın* çözüm sağlamaın güzel bir yolu olacaktır.

Şekil 7-24 istenen motor karakteristiğini göstermektedir. Bu şekil iki bilezikli motor karakteristiğini göstermektedir. Bu motorlardan biri yüksek dirençli ve diğer düşük dirençlidir. Yüksek kaymalarda istenilen motor yüksek dirençli bilezikli motor eğrisine benzer ve düşük kaymalarda ise düşük dirençli bilezikli motor davranışına benzer davranış malmalıdır.

Neyse ki, asenkon motor tasarımından gelen kaçak reaktansın üstünlüğü kullanılarak bu çelişkinin esaslı bir şekilde üstesinden gelmek mümkündür.

## Kafes Rotor Tasarımı İle Motor Karakteristiklerinin Kontrolü

Bir asenkon motor eşdeğer devresindeki  $X_2$  reaktansı, rotorun statora indirgenmiş kaçak reaktansını temsil etmektedir. Kaçak reaktanslar stator sargılarıyla kenetli olmayan rotor akı çizgileri nedeniyle oluşan reaktanslardır. Genelde statordan



ŞEKİL 7-24

Yüksek hızda (yüksek kayma) düşük direnç etkileri ve düşük hızlarda (yüksek kayma) yüksek direnç etkilerinin birleştirilmesiyle elde edilen moment-hız karakteristiği

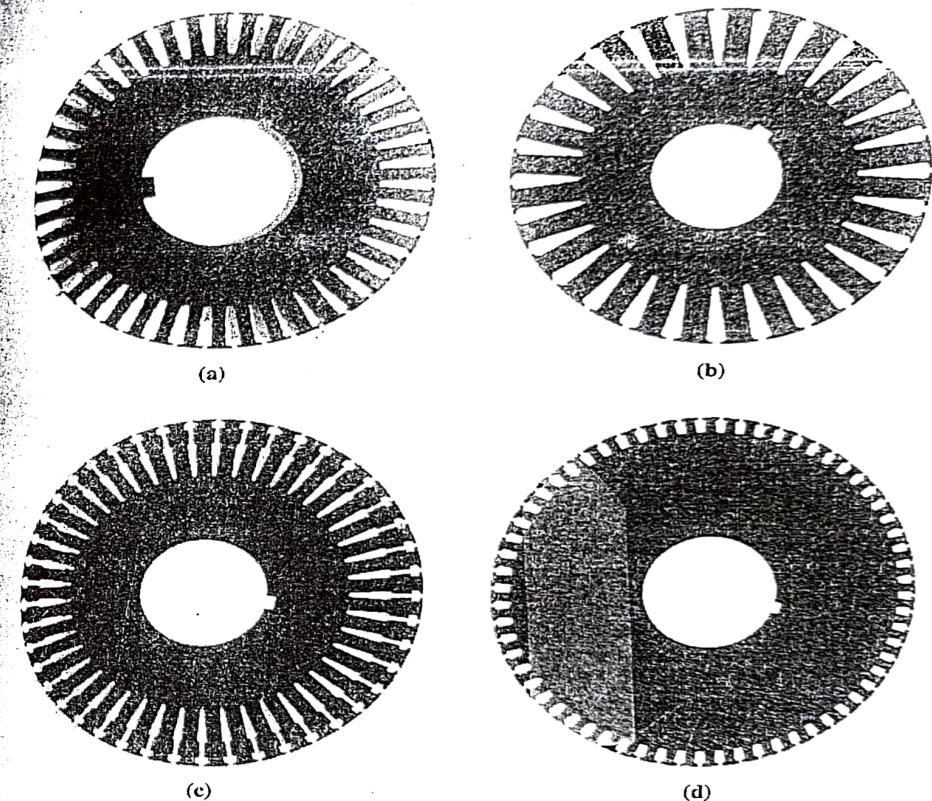
epey uzak bir rotor çubuğu ve ya çubuğun bir parçası en büyük kaçak reaktansa sahiptir, çünkü çubuk akısının küçük bir yüzdesi statora ulaşacaktır. Bu nedenle, kafes rotorun çubukları rotor yüzeyinin yakınına yerleştirilirse, sadece küçük bir kaçak akıya sahip ve  $X_2$  reaktansı eşdeğer devrede küçük olacaktır. Diğer taraftan rotor çubukları rotor yüzeyinin içine yerleştirilirse daha fazla kaçak olacak ve rotor reaktansı  $X_2$  daha büyük olacaktır.

Örneğin Şekil 7-25a rotordaki çubukların kesitini gösteren rotor laminasyonunun bir fotoğrafıdır. Şekildeki rotor çubukları gayet genişir ve rotor yüzeyine yakın yerleştirilir. Böylesi bir tasarım düşük bir dirence (büyük kesit alanından dolayı) ve düşük kaçak reaktansa ve  $X_2$ 'ye sahip olacaktır (statora yakın rotor yerlesiminden dolayı). Düşük rotor direncinden dolayı devrilme momenti senkron hızza yakın olacaktır [bakınız Denklem (7-53)] ve motor daha verimli olacaktır.

$$P_{\text{conv}} = (1 - s)P_{\text{AG}} \quad (7-33)$$

Hava aralığı gücünün çok küçük bir kısmının rotor direncinde harcandığını hatırlayınız. İfadeden yukarıdaki gibi olduğunu hatırlayınız ve buna göre hava aralığı gücünün çok küçük bir kısmı rotor direncinde harcanır. Bununla birlikte  $R_2$  küçük olduğundan, motorun yol alma momenti küçük ve yol alma akımı yüksek olacaktır. Bu tarz tasarım National Electrical Manufacturers Association (NEMA) tarafından A tasarım sınıfı olarak adlandırılır. Aşağı yukarı bu motor, tipik bir asenkon motorudur ve karakteristikleri ekstra direnç eklenmemiş bilezikli asenkon motorunki ile aynıdır. Moment-hız karakteristikleri Şekil 7-26'da gösterilmektedir.

Şekil 7-25d, rotor yüzeyine yakın yerleştirilen küçük çubuklu bir asenkon motor rotorunun kesitini göstermektedir. Çubukların kesit alanı küçük olduğundan rotor direnci göreceli olarak yüksektir. Çubuklar statora yakın yerleştirildiğinden rotor kaçak reaktansı hala küçüktür. Bu motor rotoruna ekstra direnç bağlanmış bilezikli bir asenkon motora çok benzemektedir. Daha büyük rotor direncinden do-



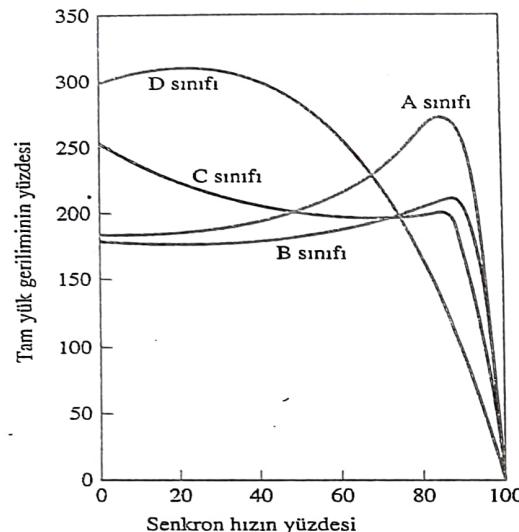
ŞEKİL 7-25

Rotor çubuklarının kesitini gösteren tipik kafesli asenkon motor rotorlarının laminasyonları. (a) NEMA A tasarım sınıfı- yüzeye yakın rotor çubukları (b) NEMA B tasarım sınıfı- büyük derin rotor çubukları (c) NEMA C tasarım sınıfı- çift kafesli rotor tasarımı (d) NEMA D tasarım sınıfı- yüzeye yakın küçük çubuklar (MagneTek Inc. İzniyle)

layı bu motor yüksek kaymada oluşan bir devrilme momentine sahiptir ve motorun yol verme momenti de yüksektir. Bu tip bir rotor yapısı kafes rotor NEMA D tasarım sınıfı olarak adlandırılır. Moment-hız karakteristikleri şekilde gösterilmektedir.

### Derin Çubuklu ve Çift Kafesli Rotor Tasarımları

Önceki rotor tasarımlarının her ikisi; rotor direnci düzeneğine sahip bilezikli motora temel olarak benzemektedir. D-sınıfının yüksek yol alma momenti ve düşük yol alma akımı ile A-sınıfı tasarıının düşük normal çalışma kayması ve yüksek verimini bir araya getirmek için değişken dirençli bir rotor nasıl üretilebilir?

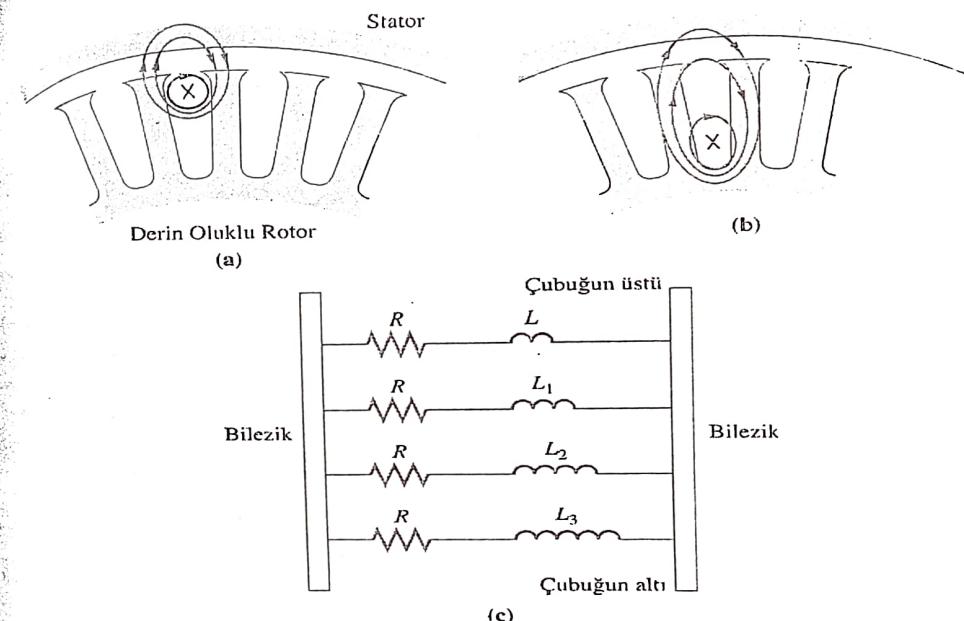


**ŞEKİL 7-26**  
Farklı rotor tasarımları için tipik moment-hız eğrileri.

Derin rotor çubukları kullanarak veya çift kafesli rotor kullanılmasıyla değişken rotor direnci üretmek mümkündür. Temel kavram Şekil 7-27'deki derin çubuklu rotor ile gösterilmektedir. Şekil 7-27'a derin rotor çubuğuğun üst kısmından akan akımı göstermektedir. Bu alanda akan akım statora sıkıca olduğundan kaçak induktans bu bölge için küçüktür. Şekil 7-27'b çubuğu en dibinde akan akımı göstermektedir. Burada kaçak induktans daha yüksektir. Rotor çubuğuğun tüm bileşenleri elektriksel olarak paralel olduğundan çubuk temel olarak paralel elektrik devreleri serisini temsil eder. Üsttekiler daha küçük induktansa ve alttakiler ise daha büyük induktansa sahiptir.

Düşük kaymada rotorun frekansı çok küçüktür ve çubuklardaki tüm paralel yolların reaktansları dirençlerine kıyasla küçük olur. Çubuğu tüm bileşenlerinin empedansları yaklaşık olarak eşittir böylece akım çubuğu tüm bileşenlerinden eşit olarak akar. Sonuç olarak daha büyük kesit alanı rotor direncini küçük yapar ve düşük kaymalarla iyi bir verim sağlar. Yüksek kaymada (yol alma koşulları) reaktanslar rotor çubuklarındaki dirençlere kıyasla büyütür böylece akım statora yakın çubuğu düşük reaktanslı bileşeni üzerinden akmeye zorlanır. Etkin kesit küçük olduğundan rotor direnci öncekinden daha yüksek olur. Yüksek rotor direnci ile yol alma momenti göreceli olarak yüksektir ve yol alma akımı A sınıfı tasarımından göreceli olarak küçüktür. Bu yapı için tipik moment-hızı karakteristiği Şekil 7-26'daki B harfi ile E tasarım sınıfı eğrisi temsil edilmektedir.

Çift kafesli rotorun kesit görünüsü Şekil 7-25c'de gösterilmektedir. Çift kafesli rotor, derinine eritilerek yerleştirilmiş düşük dirençli çubuklar ve rotor yüzeyindeki yüksek dirençli küçük çubuklardan oluşur. Çift kafesli rotorlar, düşük kayma ve yüksek kaymalar arasındaki farkın iyice abartılması dışında, derin çubuklu rotora benzer. Yol alma koşullarında sadece küçük çubuk etkindir ve rotor direnci yüksektir. Bu yüksek direnç büyük yol alma momentini oluşturur.



**ŞEKİL 7-27**  
Derin çubuklu rotorda halkalama akısı (a) Çubuğu üst kısmından akan akım için statora sıkıca hala kalmaktadır ve kaçak induktans küçüktür (b) Çubuğu alt kısmında akan akım için statora zayıf bağlıdır ve kaçak induktans büyütür (c) Rotor derinliğinin bir fonksiyonu olarak rotor çubuğuunu sonuç esdeger devresi

Normal çalışma hızlarında her iki çubuk da etkindir ve rotor direnci derin çubuklu rotordaki kadar düşüktür. Bu türden çift kafesli rotorlar NEMA B sınıfı ve C sınıfı karakteristikler üretmek üzere kullanılırlar. Böyle tasarlanmış bir rotor için olası moment-hızı karakteristiği Şekil 7-26'da B tasarım sınıfı ve C tasarım sınıfı için gösterilmektedir.

Çift kafesli rotorlar diğer kafesli tip rotorlara göre daha pahalı olma dezavantajına sahiptirler ancak bilezikli tip rotor tasarımlarından daha ucuzdurlar. Bu motorlar bilezikli motorların mümkün olan en iyi özelliklerinin bir kısmını daha düşük bir mal yetileştirme ile birlikte ve bileziklerin bakımına gerek duymaksızın yerine getirirler (düşük yol alma akımıyla yüksek yol alma momenti ve normal çalışma koşullarında iyi bir verim).

### Asenkron Motor Tasarım Sınıfları

Asenkron motorların rotor karakteristiklerini değiştirmek için geniş bir çeşitlilik sağlanmak mümkündür. Birleşik Devletlerde NEMA ve Avrupa'da International Electrotechnical Commission (IEC)'da tüm güç aralığında de-

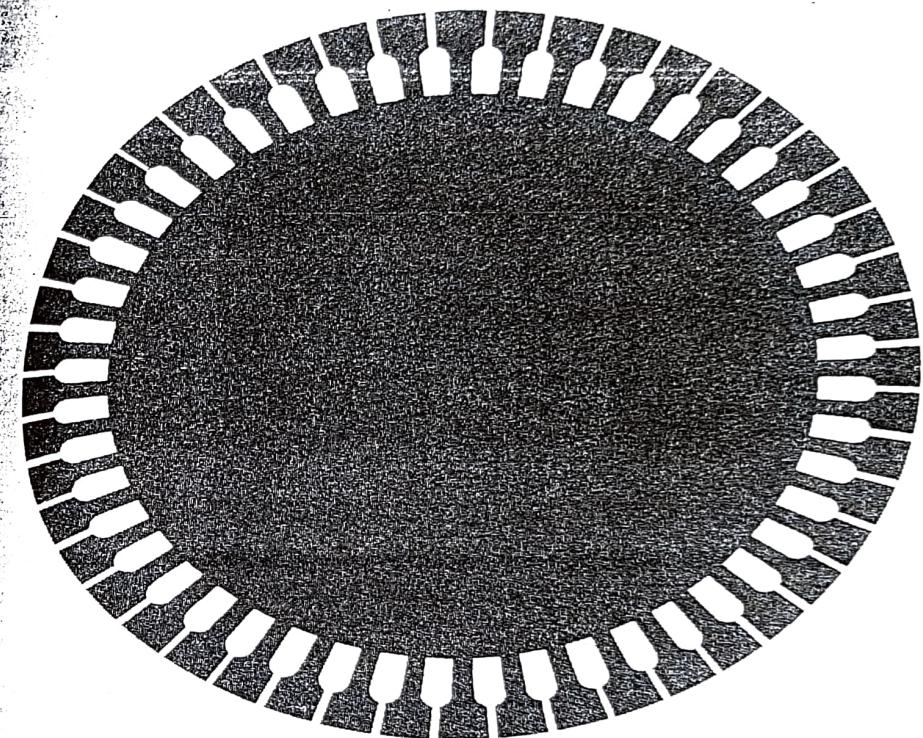
gişik uygulamalar için uygun motor seçiminde endüstriye yardımcı olmak amacıyla farklı moment-hız eğrileri ile standart tasarım serilerini tanımlanmış bulunmaktadır. Bu standart tasarımlar tasarım sınıfları olarak ele alınır ve her bir motora tasarım sınıfı X olan motor diye başvurulabilir. Buradaki motor tasarım sınıfları önceden oluşturulmuş olan IEC ve NEMA tasarım sınıflarıdır. Şekil 7-26 standart dört NEMA tasarım sınıfı için tipik moment-hız eğrilerini göstermektedir. Her bir standart tasarım sınıfının karakteristik özellikleri aşağıda verilmektedir.

**A TASARIM SINIFI.** A tasarım sınıfı motorlar normal yol verme akımı, normal yol verme momenti ve düşük kayma ile standart motor tasarımlarıdır. A sınıfı motorların tam yükteki kayması yüzde 5'den daha küçük olmalıdır ve eşdeğer oranındaki B tasarım sınıfınınkinden küçük olmalıdır. Devrilme momenti tam yük momentinin yüzde 200-300'dür ve düşük kaymada oluşur (yüzde 20'den daha küçük). Bu tasarımın yol verme momenti çok büyük motorlar için en az nominal momenttir ve küçük motorlar için nominal momentin yüzde 200'ü veya fazlasıdır. Bu tasarım sınıfının ilkesel problemi yol alma sırasında son derece yüksek ani akım çekmesidir. Yol almada akan akım tipik olarak yüzde 500-800'ü olur. 7.5 hp'nın üstündeki boyutlarda geriliyi azaltarak yol verme beslendiği enerji sisteminde yol alma sırasında oluşacak gerilimin çökmesi problemlerinden kaçınmak üzere bu motorlarda kullanılır. Geçmişte A sınıfı motorlar 7.5 hp'nın altındaki ve 200 hp'nın üzerindeki çoğu uygulamalar için standart tasarımı ama son yıllarda B sınıfı motorlar ile büyük ölçüde yer değiştirdiler. Bu motorlar için tipik uygulamalar; fanlar, pompalar, üfleyiciler, torna ve diğer makina tezgâhlarının sürülmESİdir.

**B TASARIM SINIFI.** Tasarım sınıfı B motorlar, normal yol verme momenti, düşük yol alma akımı ve düşük kaymaya sahiptirler. Bu motor yüzde 25 daha az bir akım ile A sınıfı motorla yaklaşık aynı yol verme momentini üretir. Devrilme momenti nominal momentin yüzde 200'ne eşit veya daha büyktür ama A sınıfı motorundan daha küçütür çünkü rotor direnci artmıştır. Rotor kayması tam yükte göreceli olarak hala küçütür (yüzde 5 den az). Uygulamalar A sınıfı tasarımına benzerdir ama B tasarım sınıfı düşük yol verme akım gereksiniminden dolayı tercih edilir. Yeni tesislerde B tasarım sınıfı motorlar, A tasarım sınıfı motorlar ile büyük ölçüde yer değiştirmiştir.

**C TASARIM SINIFI.** C tasarım sınıfı motorlar düşük yol alma akımı ve tam yükte düşük kayma (yüzde 5 den az) ile yüksek yol alma momentine sahiptir. Yol alma momenti tam yük momentinin yüzde 250'sine çıkarken, devrilme momenti A sınıfı motorlarından biraz düşüktür bu yüzden önceki sınıflardaki motorlardan biraz daha pahalıdırlar. Bunlar yüklü pompa, kompresör ve taşıyıcı gibi yüksek yol alma momentli yükler için kullanılırlar.

**D TASARIM SINIFI.** D tasarım sınıfı motorlar çok yüksek yol alma momenti (nominal momentin yüzde 275'i veya daha fazlası) ve düşük yol alma akımına ancak aynı zamanda tam yükte yüksek kaymaya sahiptirler. Temelde sıradan A sınıfı asenkron motorlardır ancak rotor çubukları daha küçük kesitli ve daha yüksek di-



ŞEKİL 7-28

F tasarım sınıfına sahip bir asenkron motorun yapısını gösteren rotor kesiti. Rotor çubukları derin dökülmüş olduğundan çok yüksek kaçak reaktansa sahiptirler. Yüksek kaçak reaktans bu motorun yol alma momentini ve akımını azaltır böylece yumuşak yol verme tasarım olarak adlandırılır. (MagneTek Şirketinin izniyle)

rencli malzeme ile yapılmaktadır. Yüksek rotor direnci tepe momenti çok düşük hiza doğru oteler. Bu motor için tam yük kayması yüksek rotor direncinden dolayı yüksektir. Tipik olarak yüzde 7-10 arasındadır fakat yüzde 17 veya daha fazlasına gidebilir. Bu motorlar son derece yüksek eylemsizlige sahip yüklerin ivme-lendirilmesini gerektiren uygulamalarda, özellikle makas ve delgi preslerin büyük olanlarında kullanılır.

Bu dört tasarım sınıfına ek olarak yumuşak yol verme asenkron motorlar olarak adlandırılan E ve F sınıfı motorların tanımlanmasında da NEMA standartları kullanılır (bakınız Şekil 7-28). Bu tasarımlar çok az yol verme akımlarıyla çalışacak şekilde seçilmekte idi ve yol verme akımlarının problem olduğu durumlarda düşük yol verme momentli yükler için kullanılırdı. Bu tasarımların artık modası geçmiştir.

**Örnek 7-6.** 460-V, 30-hp, 60 Hz, dört kutuplu ve yıldız bağlı asenkron motor iki olası rotor tasarımına sahiptir; tek kafesli rotor ve çift kafesli rotor (stator her iki rotor tussen için aynıdır). Tek kafes rotorlu motor, stator devresine indirgenmiş Ohm cinsinden faz başına aşağıdaki empedanslar ile modellenebilir.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.641 \Omega & R_2 &= 0.300 \Omega \\ X_1 &= 0.750 \Omega & X_2 &= 0.500 \Omega & X_M &= 26.3 \Omega \end{aligned}$$

Çift kafes rotorlu motor, düşük dirençli iç kafes ile zayıf kenetlemeli olan paralel yüksek dış kafes direnci ile sıkıca kenetli (Şekil 7-25c'nin yapısına benzer) olacak şekilde modellenebilir. Stator ve mıknatışlanma direnç ve reaktansları tek kafes tasarımındaki ile aynı olacaktır.

Dış rotor kafesinin direnç ve reaktansı;

$$R_{2o} = 3.200 \Omega \quad X_{2o} = 0.500 \Omega$$

şeklinde dir. Direncin yüksek olusuna dikkat ediniz çünkü dıştaki çubuk düşük kesit alanına sahiptir olsa da reaktans, dıştaki kafes statora çok yakın ve kaçak reaktans küçük olduğundan tek kafesli rotorun reaktansı ile aynıdır.

İç rotor kafesinin direnç ve reaktansı

$$R_{2i} = 0.400 \Omega \quad X_{2i} = 3.300 \Omega$$

Buradaki direnç, çubuklar büyük kesit alanına sahip olduğundan küçüktür fakat kaçak reaktans yüksektir.

İki rotor tasarımına ilişkin moment-hız karakteristiklerini hesaplayınız. Onları nasıl karşılaştırırınız?

### Cözüm

Tek kafes rotorlu motorun moment-hız karakteristikleri Örnek 7-5'deki gibi hesaplanabilir. Çift kafes rotorlu motorun moment-hız karakteristikleri yalnız her bir kaymadaki rotor direnç ve reaktansının iç ve dış kafeslerdeki empedansların paralel birleşimi olması dışında, tek kafes rotorlu motorunki ile aynı tarzda elde edilebilir. Düşük kaymalarda rotor reaktansı göreceli olarak önemzsiz olacaktır ve büyük iç kafes makinanın çalışmasında ana bileşen oluşturacaktır. Yüksek kaymalarda içteki kafesin yüksek reaktansı onu hemen hemen taşımaktadır.

İki moment-hız karakteristiğini çizmek ve hesaplamak için hazırlanmış bir MATLAB M-dosyası aşağıda gösterilmektedir.

```
% M-file: torque_speed_2.m
% M-file create and plot of the torque-speed curve of an
% induction motor with a double-cage rotor design.

% First, initialize the values needed in this program.
r1 = 0.641; % Stator resistance
x1 = 0.750; % Stator reactance
r2 = 0.300; % Rotor resistance for single-
% cage motor
r2i = 0.400; % Rotor resistance for inner
% cage of double-cage motor
r2o = 3.200; % Rotor resistance for outer
% cage of double-cage motor
x2 = 0.500; % Rotor reactance for single-
% cage motor
```

```
x2i = 3.300; % Rotor reactance for inner
% cage of double-cage motor
x2o = 0.500; % Rotor reactance for outer
% cage of double-cage motor
xm = 26.3; % Magnetization branch reactance
v_phase = 460 / sqrt(3); % Phase voltage
n_sync = 1800; % Synchronous speed (r/min)
w_sync = 188.5; % Synchronous speed (rad/s)
% Calculate the Thevenin voltage and impedance from Equations
% 7-41a and 7-43.
v_th = v_phase * ( xm / sqrt(r1^2 + (x1 + xm)^2) );
z_th = ((j*xm) * (r1 + j*x1)) / (r1 + j*(x1 + xm));
r_th = real(z_th);
x_th = imag(z_th);

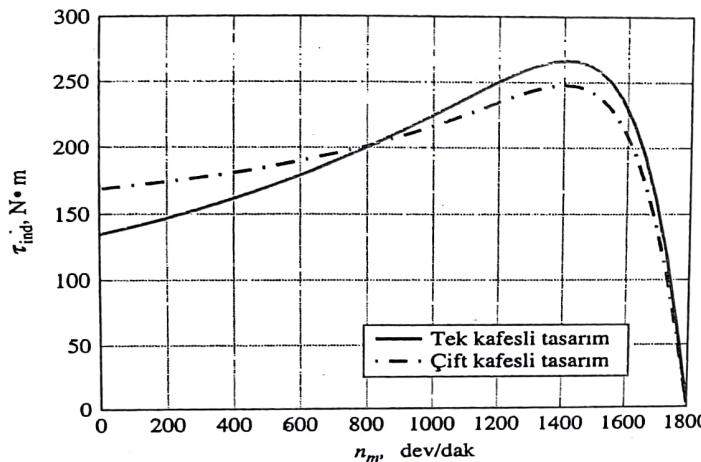
% Now calculate the motor speed for many slips between
% 0 and 1. Note that the first slip value is set to
% 0.001 instead of exactly 0 to avoid divide-by-zero
% problems.
s = (0:1:50) / 50; % Slip
s(1) = 0.001; % Avoid division-by-zero
nm = (1 - s) * n_sync; % Mechanical speed

% Calculate torque for the single-cage rotor.
for ii = 1:51
    t_ind1(ii) = (3 * v_th^2 * r2 / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2));
end

% Calculate resistance and reactance of the double-cage
% rotor at this slip, and then use those values to
% calculate the induced torque.
for ii = 1:51
    y_r = 1/(r2i + j*s(ii)*x2i) + 1/(r2o + j*s(ii)*x2o);
    z_r = 1/y_r; % Effective rotor impedance
    r2eff = real(z_r); % Effective rotor resistance
    x2eff = imag(z_r); % Effective rotor reactance

    % Calculate induced torque for double-cage rotor.
    t_ind2(ii) = (3 * v_th^2 * r2eff / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2eff/s(ii))^2 + (x_th + x2eff)^2));
end

% Plot the torque-speed curves
plot(nm, t_ind1, 'Color', 'k', 'LineWidth', 2.0);
hold on;
plot(nm, t_ind2, 'Color', 'k', 'LineWidth', 2.0, 'LineStyle', '--');
xlabel('n/m', 'Fontweight', 'Bold');
ylabel('tau_{ind}', 'Fontweight', 'Bold');
title('Induction motor torque-speed characteristics', ...
    'Fontweight', 'Bold');
legend('Single-Cage Design', 'Double-Cage Design');
grid on;
hold off;
```



ŞEKİL 7-29  
Örnek 7-6'daki tek ve çift kafesli rotorlar için moment-hız karakteristiklerinin karşılaştırılması

Sonuç olarak elde edilen moment-hız karakteristikleri Şekil 7-29'da gösterilmektedir. Çift kafesli rotor tasarımının tek kafesli rotor tasarımına kıyasla normal çalışma aralığında açık yüksek kaymaya, daha küçük maksimum momente ve daha yüksek bir yol verme momentine sahip olduğuna dikkat ediniz. Bu davranış bu bölümdeki teorik tartışmalarımızı doğrudan niteliktedir.

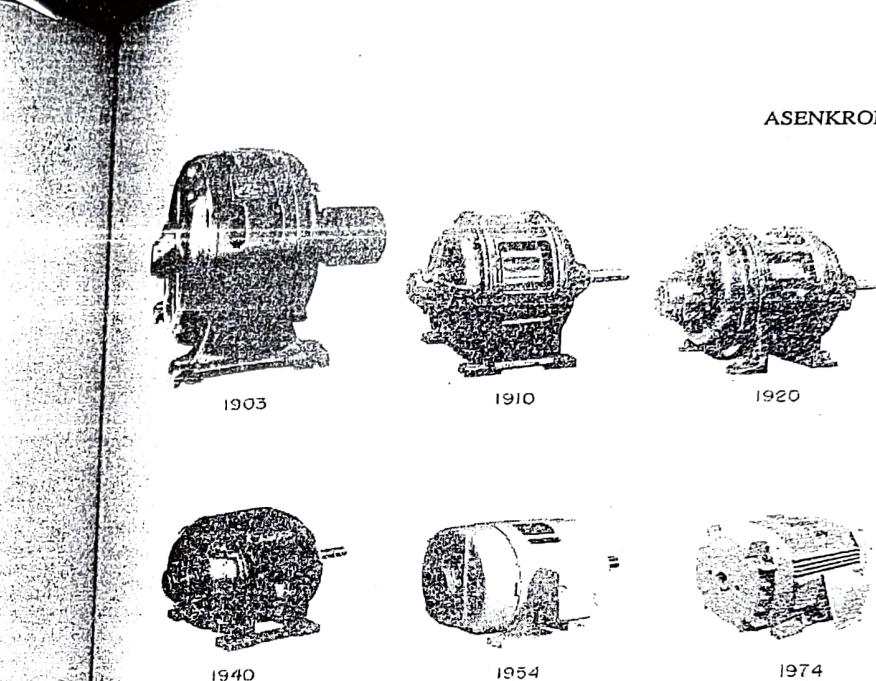
## 7.7 ASENKRON MOTOR TASARIMINDAKİ YÖNELİMLER

Asenkron motorun arkasındaki temel fikir, 1888'de düşündürünün ilk patentini alan Nicola Tesla tarafından 1880'lerin sonlarında geliştirildi. Bu sırada Tesla, American Institute of Electrical Engineers [AIEE, bugünkü Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) atası]’den önce bilezikli asenkron motorun temel ilkelerini tanımladığı diğer iki önemli AA motor düşüncesi yani-senkron motor ve reliktans motor ile ilgili bir makale sundu.

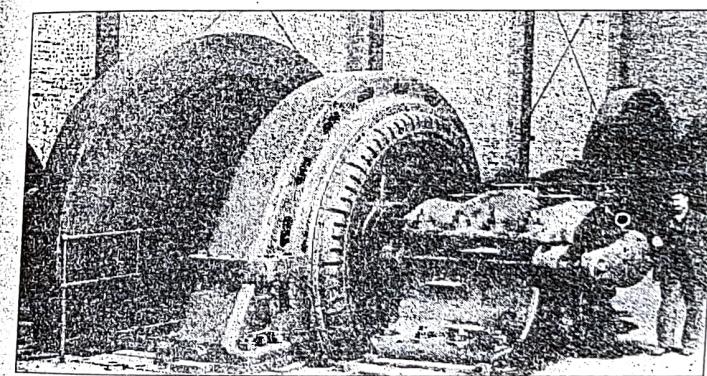
Asenkron motorun temel önerisi 1888'de tanımlanmış olmasına rağmen motor kendiliğinden atılım yapacak biçimde değildi. Hızlı gelişimin başlangıç periyodu, yavaşlama süreci ve bu güne kadar süren evrimsel gelişmeleri oldu.

Asenkron motorun 1888 ve 1895 arasında tanımlanabilir modern biçimini aldığı kabul edilmektedir. Bu dönemde iki ve üç fazlı güç kaynakları motorda dönen manyetik alanları üretmek üzere geliştirildi, dağıtılmış stator sargıları geliştirildi ve kafes rotor tanıtıldı. 1896'larda tam fonksiyonel ve tanımlanabilir üç fazlı asenkron motorlar ticari olarak kullanılabilmekteydi.

1970'lerin başı ve sonu arasında çelik kalitesinde, döküm tekniklerinde, ya lituma ve asenkron motorlarda kullanılan yapılmış özelliklerinde sürekli bir gelişme meydana geldi. Belirli bir motor çıkış gücü için daha küçük bir motor boyutu do-



ŞEKİL 7-30  
Asenkron motorun evrimi. Bu şekilde gösterilen motorlar 220-V, 15-hp nominal değerindedir. İlk pratik motorlar 1890'larda üretildiğinden beri asenkron motorlardaki malzeme gereksiniminde ve motor boyutunda dramatik bir azalış olmuş bulunuyor. (General Electric Şirketinin izniyle)



ŞEKİL 7-31  
Tipik ilk büyük asenkron motorları. Gösterilen motorlar 2000 hp boyutundadır. (General Electric Şirketinin izniyle)

ğuran bu yönelimler yapılmış maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamıştır. Aslında modern bir 100-hp'lik motor 1897'deki 7.5-hp'lik bir motorla aynı fizikal boyutdadır. Bu ilerlemeye Şekil 7-30'da gösterilen 15-hp'lik asenkron motorlar ile açıkça gösterilmektedir. (bakınız Şekil 7-31).

Bununla birlikte asenkron motor tasarımlındaki bu geliştirmeler motor çalışma verimindeki geliştirmelere gereği şekilde öncülük etmedi. Ana tasarım çabası, makinaların verimlerini artırmaya değil kullanılan malzemeleri azaltmaya doğru yönlendirilmiştir. Tasarım çabası elektrik çok pahalı olmadığından bu yöne yönlenmişti ve müşterilerin motor seçiminde kullandığı ilkesel kriter açıkça motorun maliyeti idi.

Petrolün fiyatının 1973'te speküasyon sonucunda tırmanmaya başlamasından dolayı makinaların عمر işletme maliyeti çok daha önemli oldu ve başlangıç kurulum maliyeti görece daha az önemli hale geldi. Bu yönelişlerin bir sonucu olarak yeni vurgu hem tasarımcılar hem de makinaların son kullanıcıları tarafından motor verimi üzerine oturtulmuş bulunuyor.

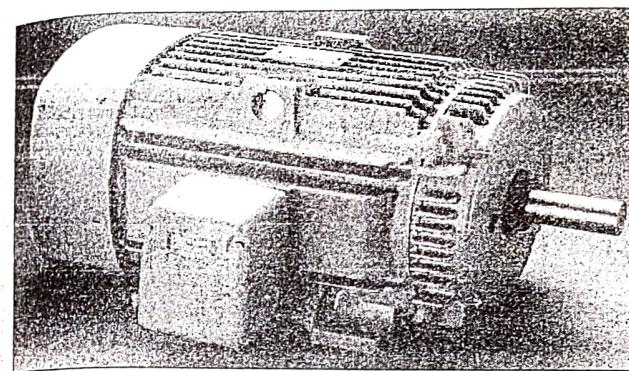
Günümüzde yüksek verimli yeni asenkron motor biçimleri tüm ana üreticiler tarafından üretilmekte ve asenkron motor pazarında artan bir paya sahip olmaktadır. Geleneksel standart verimli tasarımlara kıyasla bu motorların verimi geliştirirken birçok teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında;

1. Stator sargalarındaki bakır kayıplarını azaltmak için daha fazla bakır kullanılır.
2. Rotor ve stator çekirdek uzunluğu makinanın hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu azaltmak üzere artırılır. Bu, çekirdek kayıplarını azaltarak makinanın manyetik doyumunu azaltır.
3. Daha fazla ısının motorun dışına atılmasına izin verecek şekilde ve işletme sıcaklığını azaltmak üzere daha fazla çelik makinanın statorunda kullanılır. Rotorun fanı rüzgar kayıplarını azaltacak şekilde yeniden tasarlanır.
4. Statorda kullanılan çelik düşük histerezis kayıplı özel üstün nitelikli elektriksel bir çeliktir.
5. Çelik ince bir mastardan yapılır (yani laminasyonlar birbirine çok yakındır) ve çelik çok yüksek iç dirence sahiptir. Her iki etki motordaki girdap akımı kayıplarını azaltmaya yönelikir.
6. Motordaki dağılma yük kayıplarını azaltarak düzgün bir hava aralığı üretmek üzere rotor dikkatlice işlenir.

Yukarıda tanımlanan genel tekniklere ek olarak her bir üretici motor verimi ni geliştirmek için kendi yaklaşımına sahiptir. Tipik bir yüksek verimli motor Şekil 7-32'de gösterilmektedir.

Motor verimlerinin karşılaştırılmasına yardım için, NEMA; IEEE Standart 112 Yöntem B, *Çok Fazlı Asenkron Motor ve Generatörler İçin Test Prosedürü*, temelli motor verimini ölçme amaçlı standart teknigue uyumlu hale gelmiştir. NEMA yine A, B ve C tasarım sınıfı motorların etiketlerinde görünen *NEMA nominal verimi* olarak adlandırılan bir derecelendirme yolunu da sunmuştur. Nominal verim, belirli bir modelde büyük sayıdaki motorların ortalama verimini tanımlar ve yine bu tipteki bir motor için belirli bir minimum verimi de garanti eder. Standart NEMA nominal verimleri Şekil 7-33'de gösterilmektedir.

Diğer standart kurumları da asenkron motorlar için verim standartları oluşturmuşlardır. Bunlardan en önemlileri British (BS-269), IEC (IEC34-2) ve Japa-



ŞEKİL 7-32

Bir General Electric üretimi olan enerji tasarruflu motor, modern yüksek verimli asenkron motorların tipik bir örneğidir. (General Electric Şirketinin izniyle)

Nominal verim	Garantili minimum verim	Nominal verim	Garantili minimum verim
95.0	94.1	80.0	77.0
94.5	93.6	78.5	75.5
94.1	93.0	77.0	74.0
93.6	92.4	75.5	72.0
93.0	91.7	74.0	70.0
92.4	91.0	72.0	68.0
91.7	90.2	70.0	66.0
91.0	89.5	68.0	64.0
90.2	88.5	66.0	62.0
89.5	87.5	64.0	59.5
88.5	86.5	62.0	57.5
87.5	85.5	59.5	55.0
86.5	84.0	57.5	52.5
85.5	82.5	55.0	50.5
84.0	81.5	52.5	48.0
82.5	80.0	50.5	46.0
81.5	78.5		

ŞEKİL 7-33

NEMA nominal verim standartları tablosu. Nominal verim çok sayıdaki örnek motorun ortalama verimini ve garanti edilmiş minimum verim, belirli bir motor sınıfı için en düşük izin verilebilir verimi temsil eder. (Motors and Generators?den NEMA Publications MG-I, copyright 1987 by NEMA izniyle yeniden basılmıştır.)

nese (JEC-37) standartlarıdır. Bununla birlikte asenkron motor veriminin ölçümleri için öntanımlı teknikler her bir standartta farklıdır ve *aynı fiziksel makina için farklı sonuçlar* verir. Eğer iki motorun her biri nominal yüzde 82.5 verimde ise, ama farklı standartlara göre ölçülyorlarsa bu durumda eşit verime sahip olmaları beklenmez. İki motor karşılaştırıldığı zaman aynı standart altında ölçülen verimleri karşılaştırmak önemlidir.

## 7.8 ASENKRON MOTORLARA YOL VERME

Asenkron motorlarda senkron motorlardaki yol verme problemleri mevcut değildir. Çoğu durumda şebekeye basitçe bağlanarak yol verilebilir. Bununla birlikte bazen bunu yapmamak için iyi nedenler vardır. Örneğin gerekli yol alma akımı şebeke geriliminde kabul edilemez bir çökmeye neden olabilir.

Bilezikli motorlar için yol verme işlemi sırasında rotor devresine yol verme sırasında ekstra direnç girerek göreceli olarak düşük akımlara ulaşılabilir. Bu ekstra direnç sadece yol verme momentini artırmakla kalmaz diğer taraftan yol verme akımını da azaltır.

Kafesli asenkron motorlar için yol verme akımı, öncelikle motorun nominal gücüne ve yol verme koşullarındaki etkin rotor direncine bağlı olarak geniş bir aralıktır değişebilir. Yol verme koşullarındaki rotor akımını tahmin etmek için tüm kafesli motorlar kendi etiket plakalarında şimdi bir *kod harfine* sahip olmalıdır (tasarım sınıflarından farklı olan). Bu kod harfi yol verme koşullarında motorun çekebileceği akım miktarının üst sınırlarını belirlemektedir.

Bu sınırlar beygir gücü aralıklarının bir sonucu olarak, motorun yol verme görünür gücü cinsinden ifade edilir. Şekil 7-34 her bir kod harfi için beygir gücü başına yol verme kilovolt amperini içeren bir tablodur.

Bir asenkron motorun yol verme akımını belirlemek için etiketinden plakasından nominal gerilimi, beygir gücünü ve kod harfini okuyunuz. Bu durumda motor için yol verme görünür gücü aşağıdaki gibi olacaktır;

$$S_{\text{start}} = (\text{Nominal beygir gücü/kod harfi} \times \text{çarpımı}) \quad (7-55)$$

böylece yol verme akımı şu denklemden bulunabilir:

$$I_L = \frac{S_{\text{start}}}{\sqrt{3}V_T} \quad (7-56)$$

denkleminden bulunabilir.

**Örnek 7-7.** 15-hp, 208-V F- kod harfli ve üç fazlı bir asenkron motorun yol verme akımı ne olur?

### Cözüm

Şekil 7-34'e göre beygir gücü başına maksimum kilovoltamper 5.6 olur. Bu nedenle bu motorun maksimum yol verme kilovoltamperi;

$$S_{\text{start}} = (15 \text{ hp})(5.6) = 84 \text{ kVA}$$

Nominal kod harfi	Kilitli rotor kVVA/hp	Nominal kod harfi	Kilitli rotor kVVA/hp
A	0-3.15	L	9.00-10.00
B	3.15-3.55	M	10.00-11.00
C	3.55-4.00	N	11.20-12.50
D	4.00-4.50	P	12.50-14.00
E	4.50-5.00	R	14.00-16.00
F	5.00-5.60	S	16.00-18.00
G	5.60-6.30	T	18.00-20.00
H	6.30-7.10	U	20.00-22.40
J	7.7-8.00	V	22.40 and up
K	8.00-9.00		

ŞEKİL 7-34

Bir motor için anma beygir gücü başına yol verme kilovoltamperini gösteren NEMA kod harfleri tablosu. Her bir kod harfi genişletilebilir ama sonraki yüksek sınıfın alt sınırları kapsamaz. (*Motors and Generators'den NEMA Publications MG-I, copyright 1987 by NEMA izniyle yeniden basılmıştır.*)

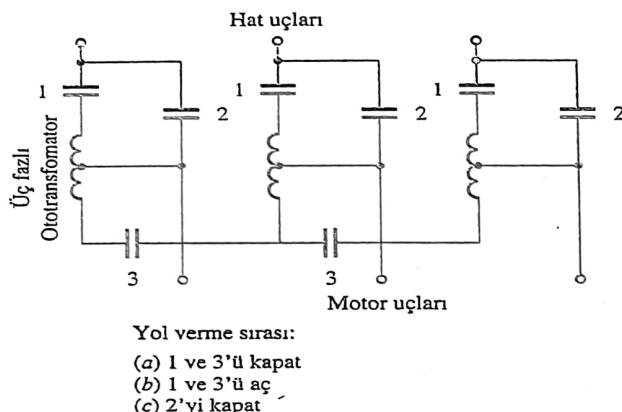
Yol verme akımı böylece;

$$I_L = \frac{S_{\text{start}}}{\sqrt{3}V_T} = \frac{84 \text{ kVA}}{\sqrt{3}(208 \text{ V})} = 233 \text{ A} \quad (7-56)$$

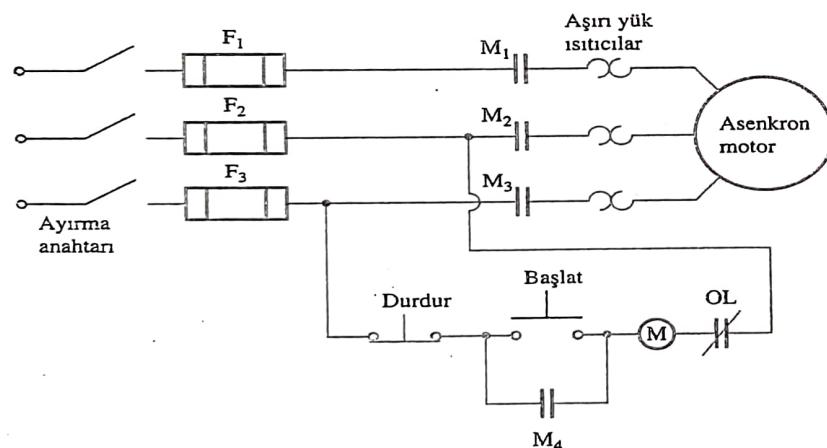
olar. Gerekirse bir asenkron motorun yol verme akımı bir yol verme devresi ile azaltılabilir. Bununla beraber bu yapılarla motorun yol verme momenti de azaltacaktır.

Yol verme akımının azaltılmasının bir yolu da yol verme sırasında şebekeye ekstra induktör veya dirençler eklemektir. Bu yaklaşım eskiden yaygın bugün nadiren kullanılır. Alternatif yaklaşım oto transformatör kullanarak uygulanan gerilimi başlangıçta azaltmaktadır. Şekil 7-35 oto transformatör kullanarak tipik bir düşük gerilimle yol verme devresini göstermektedir. Yol verme sırasında motora daha düşük bir gerilim sağlayacak olan 1 ve 3 kontakları kapanır. Motor bir kez hızlanmaya kalktı mı bu kontaklar açılır ve kontak 2 kapanır. Bu kontaklar motor uçlarına tüm hat gerilimini uygular.

Yol verme momenti uygulanan gerilimin karesi ile azalırken yol verme akımının üç gerilimindeki düşüşle doğru orantılı olarak azaltılmasını gerçekleştirmek önemlidir. Dolayısıyla, motor milindeki yük ile kalkabilecek ise, sadece belirli bir miktar akım azaltılabilir.



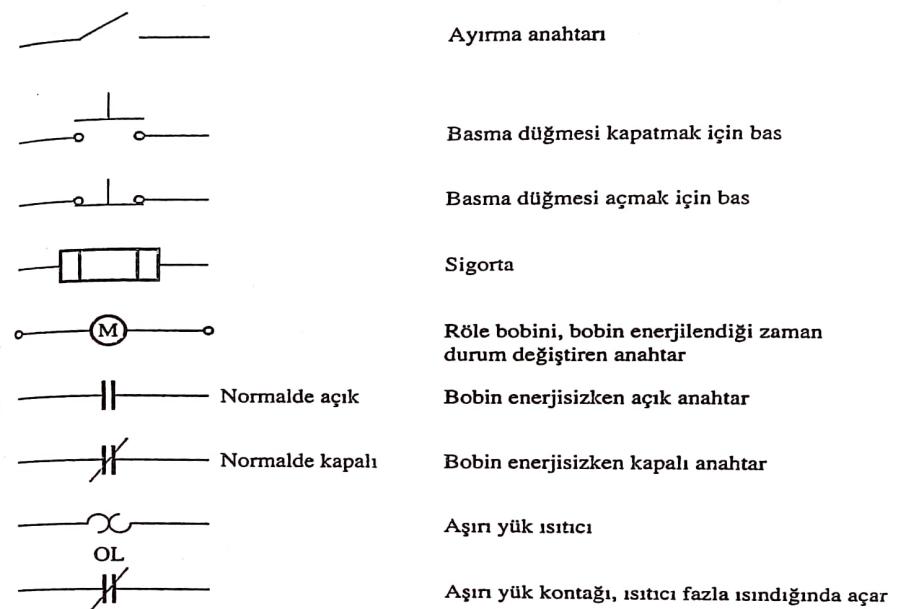
**ŞEKİL 7-35**  
Bir asenkron motorun oto transformatörlü yol verme devresi



**ŞEKİL 7-36**  
Bir asenkron motor için tipik bir doğrudan yol verici

### Asenkron Motor Yol Verme Devreleri

Tipik bir tam gerilim veya doğrudan manyetik asenkron motor yol verme devresi Şekil 7-36'da gösterilmektedir ve şekildeki kullanılan sembollerin anlamları Şekil 7-37'de açıklanmaktadır. Bu devrenin çalışması çok basittir. Başlat (start) düğmesine basıldığı zaman röle (veya kontaktör) bobini M normalde açık olan M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> ve M<sub>3</sub> kontaklarını kapatmak üzere enerjilenir. Bu kontaklar kapandığı zaman asen-



**ŞEKİL 7-37**  
Asenkron motor kontrol devrelerinde bulunan tipik bileşenler

kron motora güç uygulanır ve motor yol alır. M<sub>4</sub> kontağı da kapanarak, yol verme anahtarını kısa devre eden M rölesini besleyen gücün bu kontak üzerinden akması sağlanır. Stop düğmesine basıldığı zaman M rölesinin bobinini besleyen akım kesilir ve kontaklar açık duruma geçeceğiinden motor durur.

Bu türden bir manyetik motor yol verici birçok koruma özelliğiyle desteklenmelidir.

1. Kısa devre koruması
2. Aşırı yük koruması
3. Düşük gerilim koruması

*Motorun kısa devre koruması* F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> ve F<sub>3</sub> sigortalarıyla sağlanır. Eğer motorda ani bir kısa devre gelişir ve nominal akımdan çok fazla bir akım akmasına neden olursa bu sigortalar atacaktır böylece motoru güç kaynağından ayıracak ve yanmaktan koruyacaktır. Bununla birlikte bu sigortalar normal motor yol alması sırasında yanmamalıdır. Böylece onlar devreyi açmadan önce tam yük akımından bir kaç kat daha büyük akımın akabilmesi için tasarlanmaları gereklidir. Bu demektir ki, yüksek bir direnç üzerinden kısa devre ve/veya aşırı motor yükü, sigortalar ile fark edilmeyecektir.

Motor için *aşırı yük koruması* şekildeki OL etiketli cihazlar tarafından sağlanır. Bu aşırı yük koruma cihazları iki bölümünden ibarettir, bir aşırı yük ısıtıcı eleman ve aşırı yük kontakları. Normal koşullar altında aşırı yük kontakları kapalıdır. Ancak ısıtıcı elemanlarda sıcaklık yükseldiği zaman OL kontakları açılır.

Bir asenkron motor aşırı yüklenmediği zaman yüksek akımlardan kaynaklanan aşırı ısınma sonucunda tarihp olur. Bununla birlikte bu tarihp zaman alır ve yüksek akımların kısa periyotlarla akması zarar veremeyecektir. Sadece yüksek akım sürdürülürse tarihp oluşacaktır. Aşırı yük ısıtıcı elemanlar çalışmasındaki ısıya da bağlıdır, böylece yol verme sırasında yüksek akımın kısa periyotlu olması durumundan etkilenmeyecektir ve tarihp olabileceği durumdan önce motorun gücünü kesecik ama henüz uzun periyotlu yüksek akım süresince çalışacaktır.

*Düşük gerilim koruması* denetleyiciyle de sağlanır. M rölesi için kontrol gümüşün doğrudan motorun hat uçlarından geldiği şekilde görülmektedir. Motora uygulanan gerilim çok fazla düşerse, M rölesine uygulanan gerilim de düşecek ve röle enerjisiz kalacaktır. M kontakları açılarak motor uçlarından gücü uzaklaştırır.

Yol verme akımını azaltmak için kullanılan dirençli bir asenkron yol verme devresi Şekil 7-38'de gösterilmektedir. Bu devre yol verme direncinin devre dışı olmasını kontrol etmek üzere ek elemanların varlığı dışında öncekine benzerdir. Şekil 7-38'deki 1TD, 2TD ve 3TD kontaklarının hepsi açıktır enerjilendikleri zaman kontakları kapanmadan önce belirli bir zaman gecikmesi vardır.

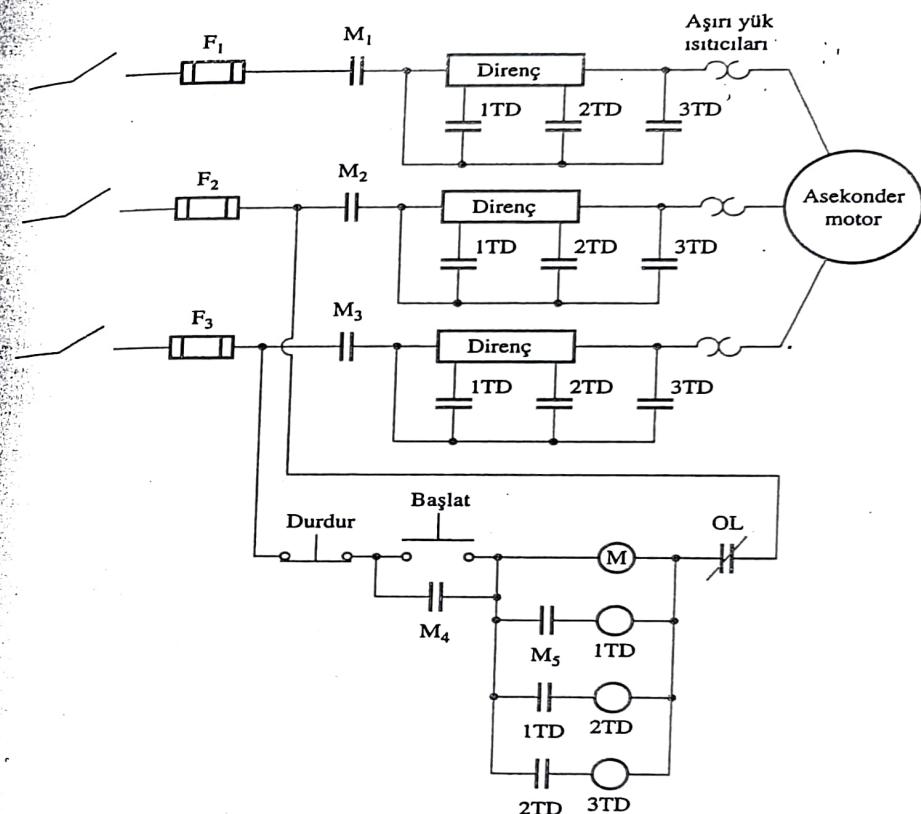
Bu devrede başlat düğmesine basıldığı zaman M rölesi enerjilenir ve güç önceki gibi motora uygulanır. 1TD, 2TD, 3TD tümü açık olduğundan dolayı yol verme direnci yol verme akımını azaltacak şekilde motora seri bağlıdır.

M kontakları kapalı olduğu zaman 1TD rölesinin enerjili olduğuna dikkat ediniz. Bununla birlikte 1TD kontakları kapanmadan önce sonlu bir gecikme vardır. Bu zaman esnasında motor kısmen hızlanır ve yol verme akımı biraz düşer. Bu zamandan sonra, yol verme direnci bölümünü devre dışı ederek ve 2TD rölesini anlık olarak enerjileyerek 1TD kontakları kapanır. Bir başka gecikmeden sonra direncin ikinci kısmını devre dışı ederek ve 3TD rölesini enerjileyerek 2TD kontakları kapanır. Son olarak, 3TD kontakları kapanır ve bütün yol verme direnci devre dışı olur.

Direnç değerleri ve zaman gecikmelerinin akıllıca seçimiyle bu yol verme devresi motor yol verme akımını tehlikeli derecede büyük olmaktan korur. Buna karşın normal işletme hızına çabuk hızlanmasılığını sağlamak için yeterince akım akmasına izin verir.

## 7.9 ASENKRON MOTORLARIN HIZ KONTROLU

Modern yarı iletken sürücülerin keşfine kadar, genelde asenkron motorlar önemli ölçüde hız kontrolü gerektiren uygulamalar için uygun makineler değildi. Tipik bir asenkron motorun normal çalışma aralığında motorun kayması (tasarım sınıfı, A, B ve C) yüzde 5 daha azına sınırlanmıştır ve bu aralıktaki hız değişimi motorun milindeki yüze az veya çok doğru orantılıdır. Kayma daha büyük yapılabilese bile motorun verimi çok kötü olacaktır, çünkü rotor bakır kayıpları motordaki kay-



ŞEKİL 7-38  
Bir asenkron motor için üç adımlı direnç kullanan yol verici

mayla doğrudan orantılıdır ( $P_{RCL} = sP_{AG}$  olduğunu hatırlayınız).

Aslında bir asenkron motorun hızının kontrol edebilmek için sadece iki teknik vardır. Biri stator ve rotor manyetik alanlarının hızı olan senkron hızı değiştirmek, çünkü rotor hızı daima  $n_{sync}$ 'ye yakın olur. Diğer teknik ise belirli bir yük için motorun kaymasını değiştirmektir. Bu yaklaşımın her biri daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Bir asenkron motorun senkron hızı aşağıdaki gibidir:

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{P} \quad (7-1)$$

Böylece makinanın senkron hızının değiştirilebildiği yollar: (1) elektriksel

frekansı değiştirmek ve (2) makinadaki kutup sayısını değiştirmek şeklindedir. Kayma kontrolü ya rotor direncini ya da motorun uç gerilimini değiştirek yapılmıştır.

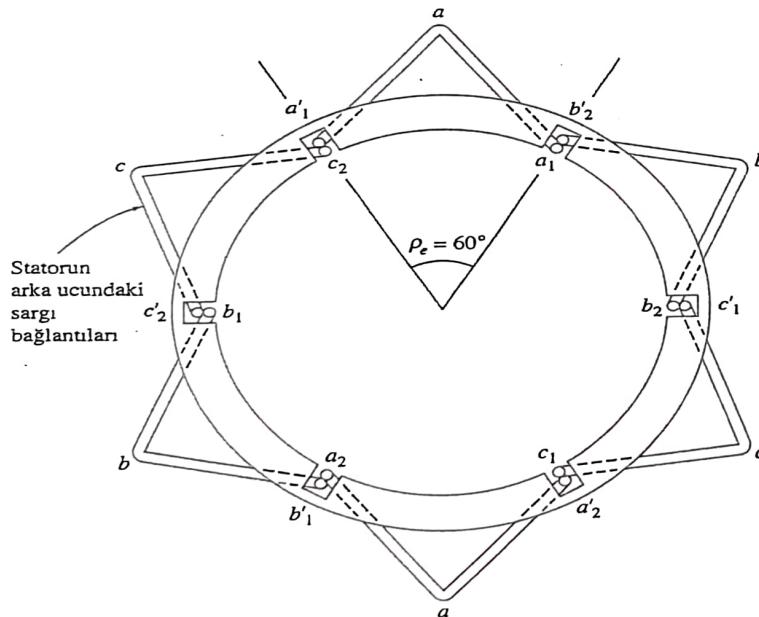
### Kutup Değiştirerek Asenkron Motor Hız Kontrolü

Asenkron motorda kutup sayısını değiştirmek için iki ana yaklaşım vardır:

1. İzleyen kutuplar yöntemi
2. Çoklu stator sargıları

*İzleyen kutuplar yöntemi* 1897'de orijinal olarak geliştirilmiş olan hız kontrolü için en eski yöntemdir. Asenkron motorun stator sargılarındaki kutup sayısının bobin bağlantılarındaki basit değişiklikler ile 2:1 çarpanı ile kolayca değiştirilebilmesi gerçekleşinde yatar.

Şekil 7-39 kutup değiştirmek için kullanılabilen basit iki kutuplu asenkron motorun statorunu göstermektedir. Aynı bobinler çok kısa adımlıdır ( $60^\circ$ - $90^\circ$ ). Şekil



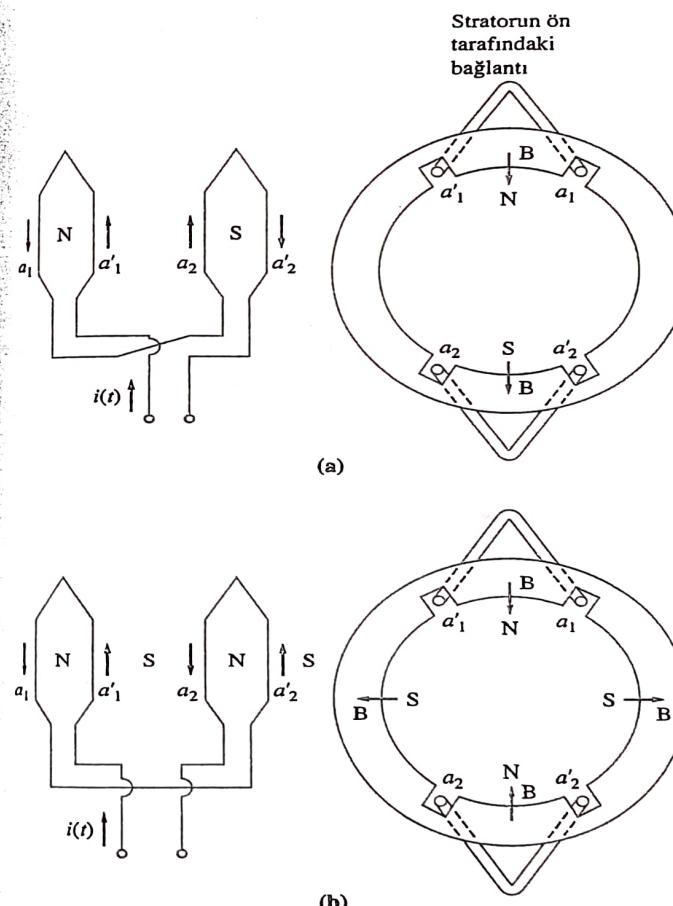
ŞEKİL 7-39

Kutup değiştirme için kullanılan iki kutuplu stator sargısı. Bu sargılardaki çok küçük rotor sargı adımlarına dikkat ediniz.

7-40 daha fazla ayrıntı için bu sargıların *a* fazını göstermektedir.

Şekil 7-40a normal çalışma sırasında herhangi bir andaki stator sargılarının *a* fazındaki akım akışını göstermektedir. Manyetik alanın tıst faz grubundan (kuzey kutbu) statoru terk ettiğine ve alt faz grubunda (güney kutbu) statora girdiğine dikkat ediniz. Bu sargı böylece iki stator manyetik kutbu üretir.

Statordaki alt faz grubunda akan akım yönünün ters çevrildiğini varsayıñız



ŞEKİL 7-40

Kutup sayısı değiştirilen sarginin bir fazının yakından incelenmesi (a) İki kutup yapılandırmasında bir bobin bir kuzyey kutbu ve diigeri güney kutbur. (b) İki bobinin birinin bağlantısı ters çevrildiginde, her ikisi de kuzyey kutbu olur ve manyetik akı iki bobin arasındaki orta noktadan statora akar. Güney kutupları izleyen kutuplar olarak adlandırılır ve sargı simdi dört kutuplu bir sargıdır.

(bakınız 7-40b). Bu durumda manyetik alan hem üst faz grubunda hem de alt faz grubunda statoru terk edecektir- her biri kuzey manyetik kutbu olacaktır. Bu makinaları manyetik akı iki faz grubu arasında *sıralı* güney manyetik kutbunu oluşturarak statora dönmelidir. Şimdi statorun öncekinin iki katı kadar yani dört kutbu sahip olduğuna dikkat ediniz.

Bu tür bir motorun rotoru; kafes rotor daima statordaki ile aynı sayıda kutup indüklediğinden ve stator kutuplarının sayısı değiştiği zaman uyum sağlayacağından dolayı kafes tasarımlı olarak yapılır.

Motorun kutup sayısını ikiden dörde çıkarıldığı zaman asenkron motorun oluşan maksimum momenti, stator sargı bağlantılarının nasıl düzenlendiğine bağlı olarak öncekinin aynısı (sabit moment bağlantısı), önceki değerinin yarısı (fanlar v.s için kullanılan kare kanunu moment bağlantısı), veya önceki değerinin iki katı olabilir (sabit çıkış gücü bağlantısı). Şekil 7-41 olası stator bağlantılarını ve moment-hız eğrisi üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Hız değiştirmede sıralı kutup yöntemi kullanmanın en önemli dezavantajı hizın 2:1 oranında olması gereklidir. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için genelikle yaklaşım, farklı kutup sayısına sahip *çoklu stator sargıları* kullanmak ve bir anda sadece bir gruba enerji vermektedir. Örneğin bir motor dört kutuplu ve altı kutuplu stator sargı kümeleriyle sarılabilir ve güç bir sargı kümelerinden diğerine anahtarlanarak 60 Hz de senkron hızı, 1800'den 1200 dev/dak'ya değiştirilebilir. Ne yazık ki çoklu stator sargıları motorun fiyatını artırır ve dolayısıyla mutlaka gerektiyse kullanılabilir.

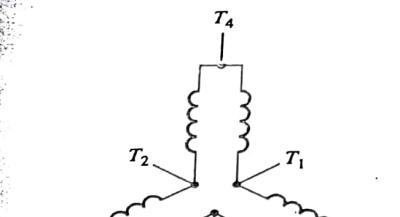
Çoklu stator sargılarıyla izleyen kutuplar yöntemini birleştirerek dört ayrı hızda çalışan asenkron motor yapmak mümkündür. Örneğin, ayrı dört ve altı kutuplu sargılar ile 60-Hz'lik motor 600, 900, 1200 ve 1800 dev/dak'da çalışabilir.

### Hız Frekansını Değiştirerek Hız Kontrolü

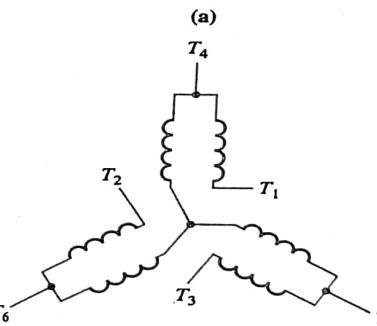
Bir asenkron motorun statoruna uygulanan elektriksel frekans değiştirilirse manyetik alanın dönme oranı  $n_{sync}$  elektriksel frekansla orantılı bir şekilde değişecek ve moment-hız karakteristik eğrisindeki boşta çalışma noktası da değişecektir (bakınız Şekil 7-42). Nominal koşullarda motorun senkron hızı temel hız olarak bilinir. Değişken frekans kontrolünü kullanarak motorun hızını temel hızın üzerine ya da altına ayarlamak mümkündür. Özellikle uygun tasarlanmış değişken frekanslı asenkron motor sürücülerü çok esnektir. Bu sürücüler nominal hızın yüzde 5'i kadar düşük hızdan iki katı hızda geniş bir aralıkta asenkron motorun hızını kontrol edebilir. Bununla birlikte frekans değişirken motorda belirli gerilim ve moment sınırlarını güvenli çalışmayı temin açısından önemlidir.

Motor temel hızının altındaki hızlarda çalıştığı zaman statora uygulanan üç gerilimini azaltmak gereklidir. Statora uygulanan üç gerilimi stator frekansının azaltılmasıyla doğru orantılı olarak düşürülmeliidir.

Bu süreç *azaltma* olarak bilinir. Eğer gerilim azaltma işlemi yapılmazsa, asenkron motorun çekirdeğindeki çelik doyacak ve makinada aşırı mıknatıslama akımları akacaktır.

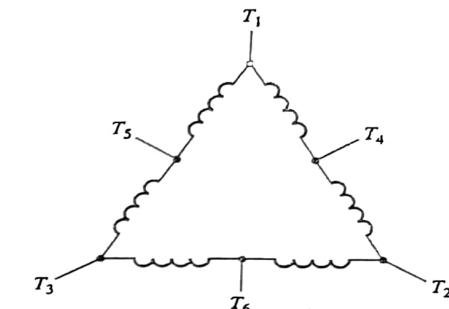


Hız	Faz			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Düşük	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> açık
Yüksek	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub> - T <sub>2</sub> - T <sub>3</sub> bir arada



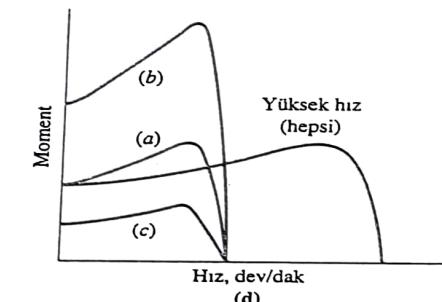
Hız	Faz			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Düşük	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> açık
Yüksek	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub> - T <sub>2</sub> - T <sub>3</sub> bir arada

(c)



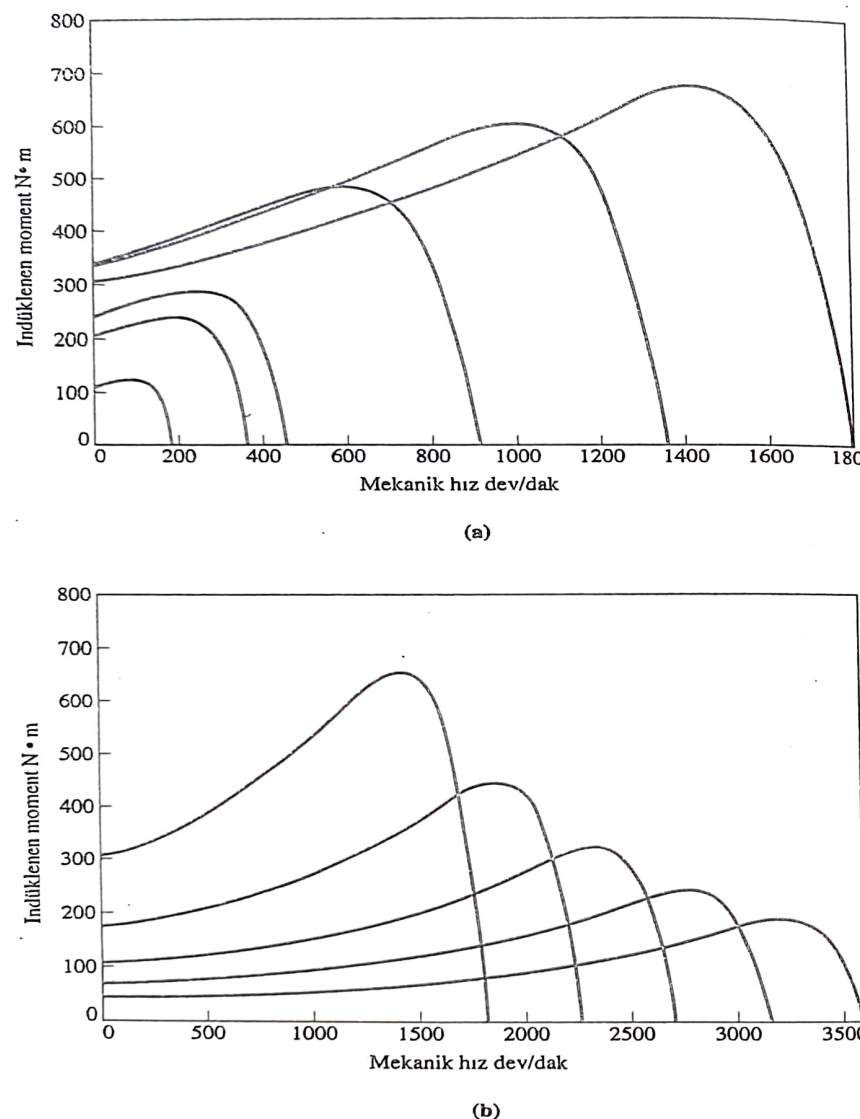
Hız	Faz			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	
Düşük	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>1</sub> - T <sub>2</sub> - T <sub>3</sub> bir arada
Yüksek	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> açık

(b)



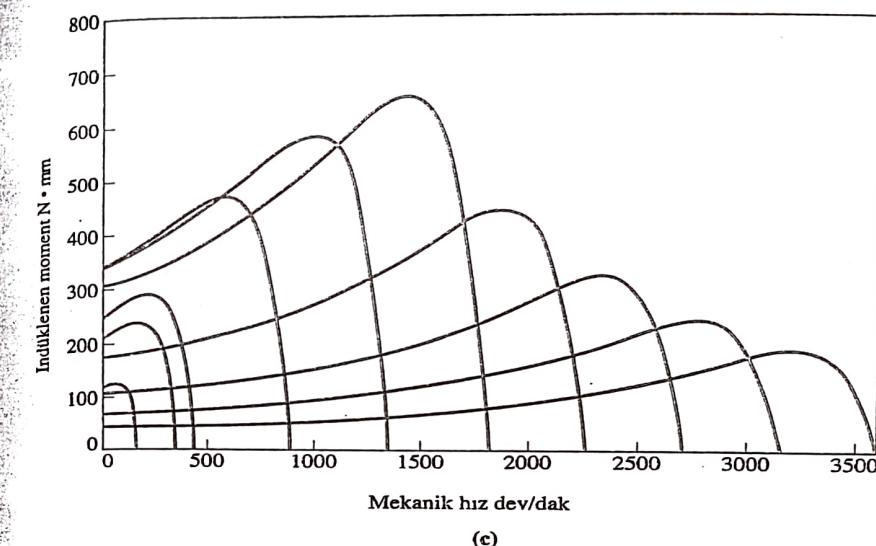
ŞEKİL 7-41

Kutup sayısı değişebilen bir motorda moment hız karakteristikleri ile olası stator bobin bağlantıları (a) *Sabit moment bağlantısı*- motorun moment yetenekleri hem yüksek hız hem de düşük hız bağlantılarında yaklaşık olarak sabit kalır. (b) *Sabit beygirci bağlantısı*- motorun güç kabiliyetleri hem yüksek hız ve hem de düşük hız bağlantılarında yaklaşık olarak sabit kalır. (c) *Fan moment bağlantısı*- motorun moment yetenekleri fan tipi yükler ile aynı tarzda hız ile değişir.



ŞEKİL 7-42

Bir asenkron motorda değişken frekans ile hız kontrolü. (a) Temel hızdan küçük hızlar için hat geriliminin frekansla doğru orantılı olduğu varsayılarak elde edilen moment-hız karakteristik eğri ailesi (b) Temel hızdan büyük hızlar için hat geriliminin sabit olduğu varsayılarak elde edilen, moment-hız karakteristik eğri ailesi



ŞEKİL 7-42 (devam)

(c) Tüm frekanslar için moment-hız karakteristik eğrileri

Azaltmanın gerekliliğini anlamak için bir asenkron motorun temelde, dönen bir transformatör olduğunu hatırlayınız. Herhangi bir transformatörde olduğu gibi, asenkron motorun çekirdeğindeki akı Faraday kanunundan bulunabilir:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-36)$$

Gerilim  $v(t) = V_M \sin \omega t$  çekirdeğe uygulanırsa, olacak akı aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_P} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N_P} \int V_M \sin \omega t dt \\ \phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_P} \cos \omega t \end{aligned} \quad (7-57)$$

Bu ifadenin *paydasında* elektriksel frekansın görüneceğine dikkat ediniz. Bu nedenle, statora uygulanan gerilimin büyüklüğü sabit kalırken statora uygulanan elektriksel frekans yüzde 10 azaltılırsa, motorun çekirdeğindeki akı yüzde 10 civarında artacaktır. Dolayısıyla motorun muknatsıslama akımı artacaktır. Motorun muknatsıslama eğrisinin doymamış bölgesinde, muknatsıslama akımındaki artış oranı yüzde 10 civarında olacaktır. Bununla birlikte motorun muknatsıslama eğrisinin doyma bölgesinde akıda yüzde 10'luk bir artış muknatsıslama akımında çok da-

ha büyük artmaya sebep olur. Asenkron motorlar normal olarak mıknatışlanma eğrisinin doyma bölgesinde yakınında çalışmak üzere tasarlanırlar. Böylece, frekanstaki bir azalma nedeniyle akıdaki artış, motorda aşırı mıknatışlama akımlarının akmasına neden olacaktır (Aynı problem transformatörlerde de gözlemlendi; bakınız Bölüm 2.12).

Aşırı mıknatışlanma akımlarından kaçınmak için frekanstaki azalmayı doğru orantılı olarak uygulanan stator gerilimini, motorun nominal frekansının altındaki frekanslar için azaltmak gereklidir. Uygulanan gerilim Denklem (7-57)'nin paydasında görüldüğünden ve frekans  $\omega$  Denklem (7-57)'nin paydasında görüldüğünden iki etki birbirini ters etkiler ve mıknatışlanma akımı etkilenmez.

Temel hızın altında asenkron motora uygulanan gerilim, frekansla doğru orantılı olarak azaltılırsa, motordaki akı yaklaşık olarak sabit olacaktır. Bu nedenle motorun sağlayabileceği maksimum moment yüksek kalacaktır. Bununla birlikte motorun maksimum güç oranı stator devresini aşırı ısınmadan korumak için frekansın azalmasıyla doğrusal olarak azaltılmalıdır. Bir üç fazlı asenkron motora sağlanan güç aşağıdaki gibi verilir:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

$V_L$  gerilimi azaltılırsa, maksimum güç  $P$  de azaltılmalıdır, aksi takdirde motorda aşırı akım akacak ve motor aşırı ısınacaktır.

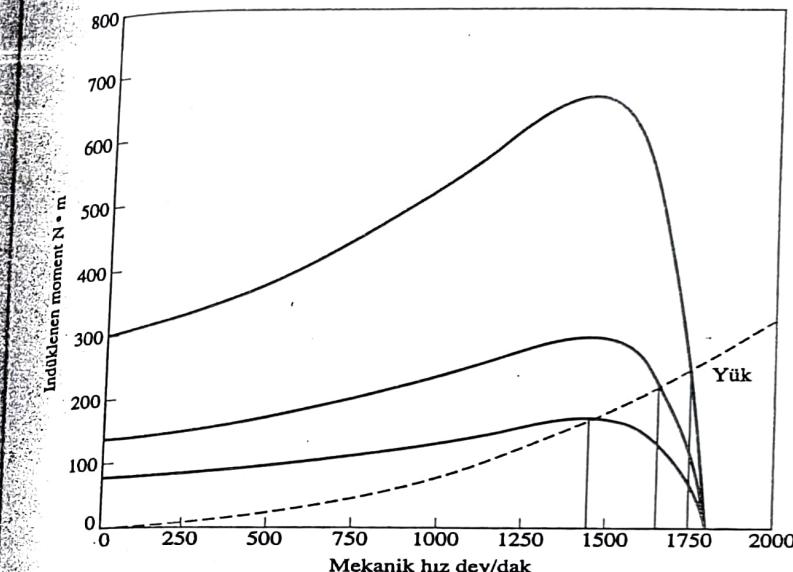
Şekil 7-42a temel hızın altındaki hızlar için stator gerilimi büyülüğünün frekansla doğrusal olarak değiştiğini kabul ederek, asenkron motor moment-hız karakteristik ailesini göstermektedir.

Motora uygulanan elektriksel frekans motorun nominal frekansını aşarsa stator gerilimi nominal değerinde sabit tutulur. Doyma mülahazaları bu durum altında nominal değerin üstünde gerilimin yükseltilmesine izin vermesine rağmen motorun sağa yalıtımını korumak için nominal gerilime sınırlanır. Temel hızın üstünde frekans arttıkça, Denklem (7-57)'nin paydası daha büyük hale gelir. Payda terim nominal frekansın üstünde sabit tutulduğundan dolayı, makinada oluşacak akı azalır, maksimum moment de onunla azalır. Şekil 7-42b stator geliminin sabit tutulduğunu varsayılarak temel hızın yukarıındaki hızlar için asenkron motor moment-hız karakteristik eğrileri ailesini göstermektedir.

Temel hızın altında stator gerilimi frekansla doğrusal olarak değiştirilirse ve temel hızın üstünde sabit tutulursa oluşacak moment-hız karakteristik eğri ailesi Şekil 7-42c'de gösterilmektedir. Şekil 7-42'deki motor için nominal hız 1800 dev/dak dir.

Geçmişte hız değiştirme yöntemi olarak elektriksel frekans kontrolünün ilkesel dezavantajı sırı bu iş için adanmış发电机 veya mekanik frekans değiştirici çalıştırılması gerekliliğiydi. Bu problem modern yarı iletken değişken frekanslı motor sürücülerin geliştirilmesiyle ortadan kalktı. Aslında yarı iletken motor sürücüler ile hat frekansını değiştirmek asenkron motor hız kontrolü için seçim yöntemi oldu.

Bu yöntemin, özel stator sargılı motor gerektiren kutup değiştirme yönteminden farklı olarak herhangi bir asenkron motor ile kullanılabilidine dikkat ediniz.



ŞEKİL 7-43

Asenkron motorda değişken hat gerilimi ile hız kontrolü

Tipik bir yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücü Bölm 7-10'da tanımlanacaktır.

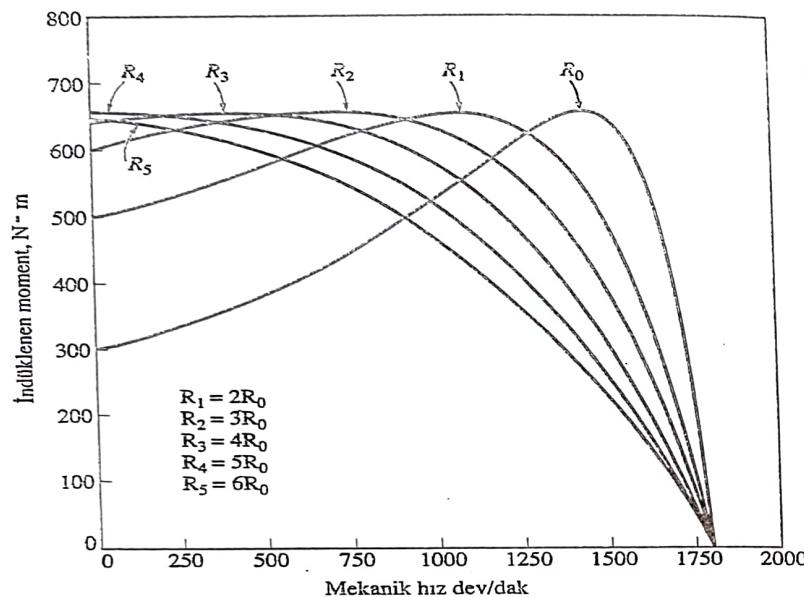
#### Hat Gerilimini Değiştirerek Hız Kontrolü

Bir asenkron motor tarafından geliştirilen moment uygulanan gerilimin karesi ile doğru orantılıdır. Bir yük momenti Şekil 7-43'te görüldüğü gibi bir karakteristike sahipse, hat gerilimini değiştirerek hız sınırlı bir aralıkta kontrol edilebilir. Bu şekildeki bir hız kontrolü fanları süren küçük motorlar için bazen kullanılır.

#### Rotor Direncini Değiştirerek Hız Kontrolü

Bilezikli asenkron motorlarda makinanın rotor devresine ekstra dirençler eklenecek moment-hız eğrisinin şeklini değiştirmek mümkündür. Oluşacak moment-hız karakteristik eğrileri Şekil 7-44'te gösterilmektedir.

Yükün moment-hız karakteristik eğrisi şekilde gösterildiği gibi ise, bu durumda rotor direncini değiştirmek motorun çalışma hızını değiştirecektir. Bununla birlikte asenkron motorun rotor devresine ekstra dirençler eklendiğinde makinanın verimi ciddi olarak azalır. Bu türden bir hız kontrol yöntemi verim proble-



**ŞEKİL 7-44**  
Bilezikli asenkron motorun rotor direncini değiştirerek hız kontrolü

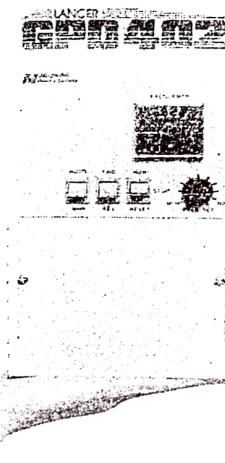
minden dolayı, sadece çok kısa periyotlar için kullanılır.

## 7.10 YARI-İLETKEN ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ

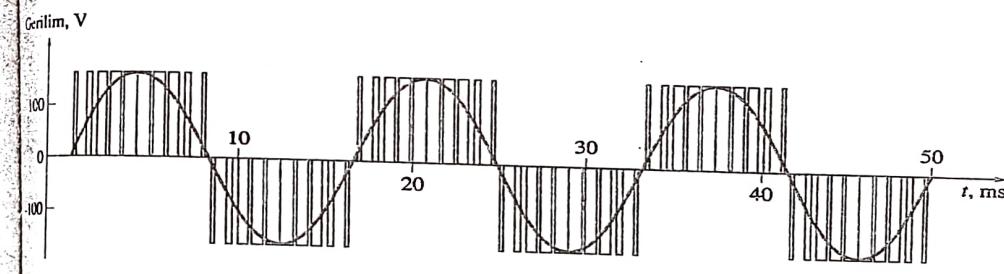
Önceki bölümde bahsedildiği gibi asenkron motor hız kontrolü için, bugünün geçerli yöntemi yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücüsüdür. Bu türden tipik bir sürücü Şekil 7-45 de gösterilmektedir. Bu tür bir sürücü çok esnekdir: giriş gücü ya tek faz ya da üç fazlıdır, 50 Hz veya 60 Hz olabilir, 208–230 V'dan biri ile çalışabilir. Bu sürücünün çıkış frekansı 0 dan 120 Hz'e ve gerilim 0V'dan motorun nominal gerilimine kadar değişimdir.

Cıkış gerilimi ve frekansın kontrolü Bölüm 3'te tanımlanan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) teknikleri kullanılarak başırlabilir. Hem çıkış frekansı hem de çıkış gerilimi, darbe genişlik modülasyonuyla bağımsız olarak kontrol edilebilir. Şekil 7-46'da DGM'lu sürücünün sabit rms gerilim seviyesi sağlanırken, çıkış frekansını kontrol edebildiği durumu açıklamaktadır. Buna karşın Şekil 7-47'deki DGM sürücünün sabit bir frekans sağlarken, aynı zamanda rms gerilim seviyesini kontrol edebildiğini göstermektedir.

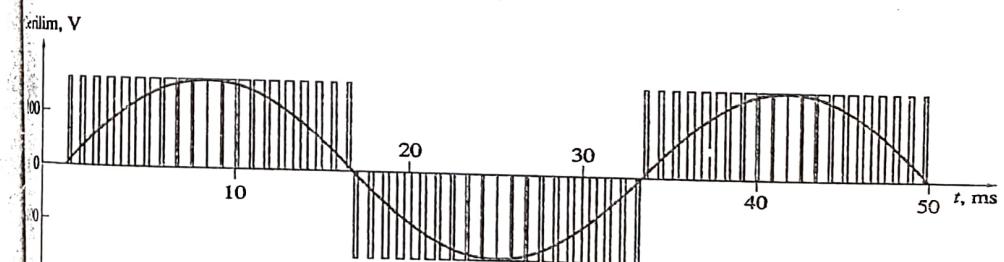
Bölüm 7.9'da tanımladığımız gibi çıkış frekansı ve çıkış geriliminin doğrusal olarak değiştirilmesi istenir. Şekil 7-48, frekans ve gerilimin doğrusal bir şekilde anlık olarak değiştirildiği durum için sürücünün bir fazından alınmış tipik çıkış ge-



**ŞEKİL 7-45**  
Tipik yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücüsü (MagneTek Şirketinin izniyle)

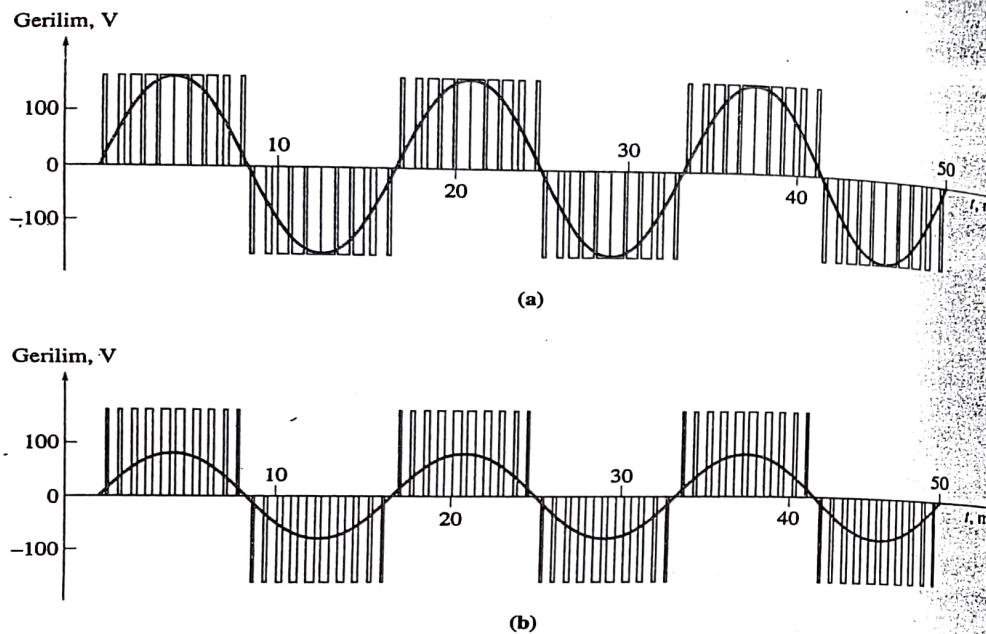


(a)



(b)

**ŞEKİL 7-46**  
DGM dalga şekli ile değişken frekanslı kontrol (a) 60-Hz, 120-V DGM için dalga şekli (b) 30-Hz 120-V DGM için dalga şekli



ŞEKİL 7-47

DGM dalga şekli ile değişken gerilim kontrolü (a) 60-Hz, 120-V DGM dalga şekli (b) 30-Hz 120-V DGM dalga şekli

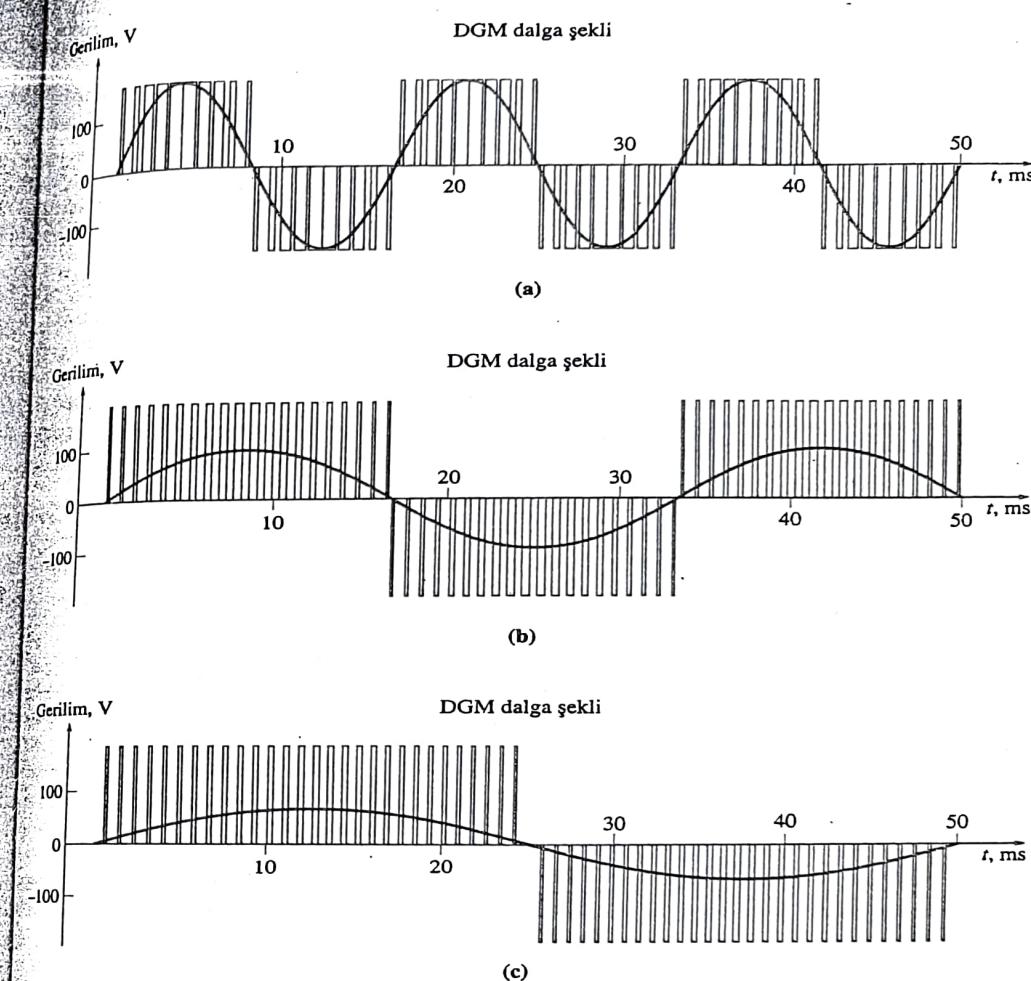
rilim dalga şekillerini göstermektedir.\* Şekil 7-48a 60 Hz'lik bir frekans ve 120V'luk rms gerilim için ayarlanan çıkıştı göstermektedir. Şekil 7-48b, 30Hz'lik bir frekans ve 60V'luk bir gerilim için ayarlanan çıkıştı ve Şekil 7-48c ise 20Hz'lik bir frekans ve 40V'luk bir gerilim için ayarlanan çıkıştı göstermektedir. Sürücünün tepe gerilim çıkışının bu üç yapıda da aynı kaldığını dikkat ediniz; rms gerilim seviyesi, gerilim zamanın bir kısmında on yapılarak kontrol edilir ve frekans; pozitiften negatif ve tersine anahtarlama yapılarak darbelerin polaritesinin anahtarlanması oraniyla kontrol edilir.

Şekil 7-45'de gösterilen tipik asenkron motor sürücüsü, kolay kullanılabilirlik ve ayarlanabilirlik gibi birçok özelliği barındırmaktadır. Burada bu özelliklerin bir kısmı özetlenmiştir.

### Frekans (Hız) Ayarı

Sürücünün çıkış frekansı, sürücü kabinine montajlı bir kontrol edici vasıtasyla el

\*Şekil 7-47'deki çıkış dalga şekilleri gerçekle basitleştirilmiş dalga şekilleridir. Gerçek asenkron motor sürücü şekilde göstergelenden daha yüksek taşıyıcı frekansına sahiptir.



ŞEKİL 7-48

DGM dalga şekli ile anlık gerilim ve frekans kontrol (a) 60-Hz, 120-V DGM için dalga şekli (b) 30-Hz 60-V DGM için dalga şekli (c) 20-Hz, 40-V DGM için dalga şekli

ile ya da harici bir gerilim ya da akım işaretti ile uzaktan kontrol edilebilir. Dışarıdan gelen bazı işaretlere verdiği tepki cinsinden sürücünün frekans ayarlama yeteneği, harici bilgisayar ile veya kurulu olduğu tesisin tüm ihtiyaçlarına göre motordan hızını kontrol etmek amacıyla oluşturulmuş süreç denetleyiciye izin verdiğinden dolayı çok önemlidir.

## Gerilim ve Frekans Örüntülerinin Seçimi

Asenkron motora bağlanabilen mekanik yük tipleri önemli ölçüde değişmektedir. Fan gibi bazı yükler, yol verme sırasında (veya düşük hızda çalışıkları zaman) çok küçük bir moment isterler ve hızın karesi ile artan bir momente sahiptirler. Motorun nominal tam yük momentinden daha fazlasını gerektiren diğer yüklerde yol alması daha zordur. Bu sürücü, asenkron motordan yükün gerektirdiği momenti karşılamak üzere seçilebilen gerilime karşı frekans örüntülerini sağlayabilmektedir. Bu örüntülerin üçü Şekil 7-49'dan Şekil 7-51'e kadar gösterilmektedir.

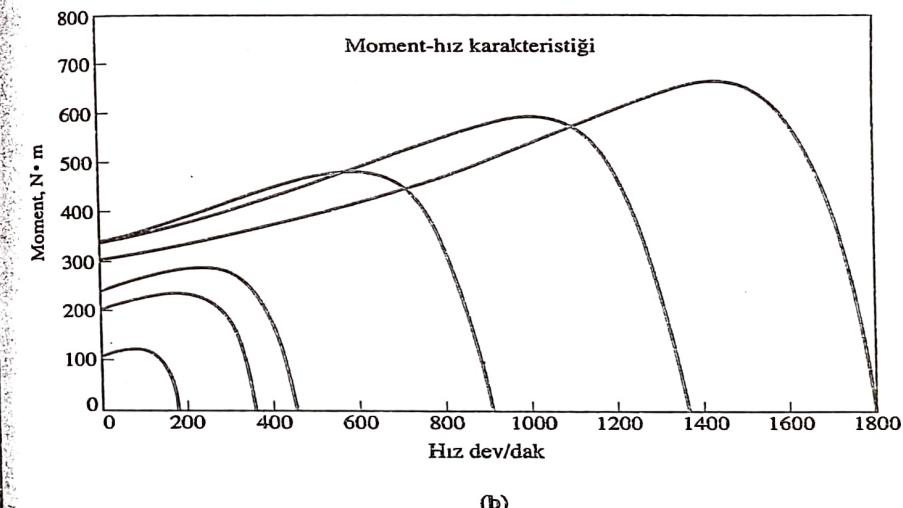
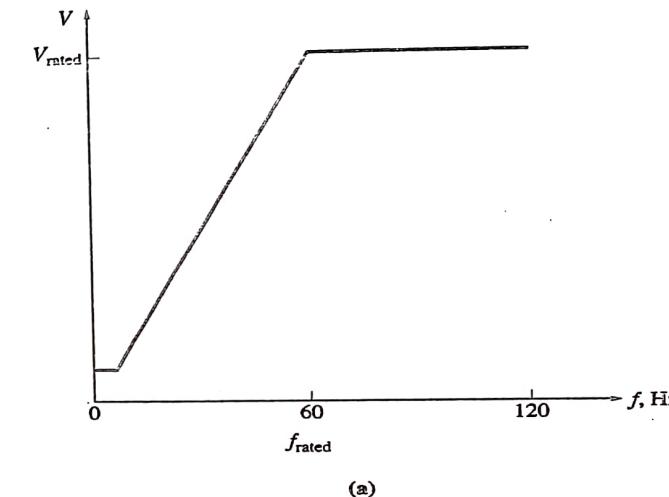
Şekil 7-49a, önceki bölümde tanımlanan standart veya genel amaçlı gerilime karşı frekans örüntüsünü göstermektedir. Bu örüntü temel hızın altında hızlar için çıkış frekansındaki değişiklikler ile çıkış gerilimini doğrusal olarak değiştirir ve temel hızın yukarıındaki hızlar için çıkış gerilimini sabit tutar. (Çok düşük frekanslarda gerilimin sabit tutulacağı küçük bir bölge; düşük hızlarda gerekli yol verme momentini sağlamak için gereklidir.) Şekil 7-49b temel hızın altında birçok işletme frekansı için olacak asenkron motor moment-hız karakteristiklerini göstermektedir.

Şekil 7-50a yüksek yol verme momentli yükler için kullanılan gerilime karşı frekans örüntüsünü göstermektedir. Bu örüntü yine temel hızın altında hızlar için çıkış frekansındaki değişiklikler ile çıkış gerilimini doğrusal olarak değiştirir ama 30 Hz'in altındaki frekanslarda hafif çökmemeli bir eğime sahiptir. 30 Hz'in altında belirli bir frekans için çıkış gerilimi önceki örüntüde olduğundan *daha yüksek* olacaktır. Bu yüksek gerilim, manyetik doyumun ve mıknatışlanma akımlarının artması maliyeti ile daha yüksek moment üretecektir. Artan doyum ve yüksek akımlar ağır yüklerde yol vermek için gereken kısa periyotlar için umumiyetle kabul edilebilir. Şekil 7-50b temel hızın altında birçok çalışma frekansı için asenkron motor moment-hız karakteristiklerini göstermektedir. Şekil 7-49b ile karşılaştırıldığında, düşük frekanslarda daha yüksek moment elde edilebildiğine dikkat ediniz.

Şekil 7-51a, çok düşük yol verme momentiyle (*yumuşak yol vermelii yükler olarak adlandırılan*) kullanılan gerilime karşı frekans örüntüsünü göstermektedir. Bu örüntü temel hızın altında hızlar için çıkış frekansındaki değişikliklere karşı parabolik olarak çıkış gerilimini değiştirir. 60 Hz'in altında verilen herhangi bir frekans için çıkış gerilimi standart örüntününkinden daha düşük olacaktır. Bu düşük gerilim düşük momentli yükler için düzgün ve yavaş yol alma sağlayarak düşük moment üretecektir. Şekil 7-51b temel hızın altında birçok işletme frekansı için asenkron motorun moment-hız karakteristiklerini göstermektedir. Şekil 7-49'a kıyasla düşük frekanslarda kullanılabilen azaltılmış momente dikkat ediniz.

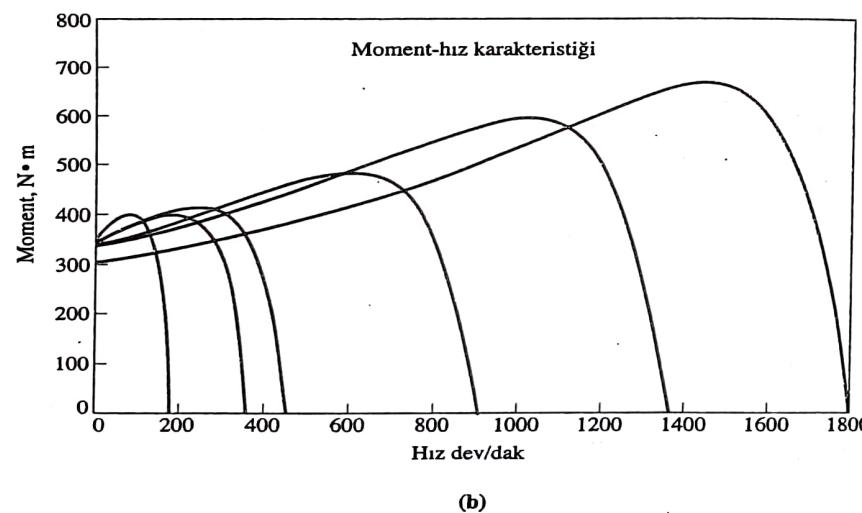
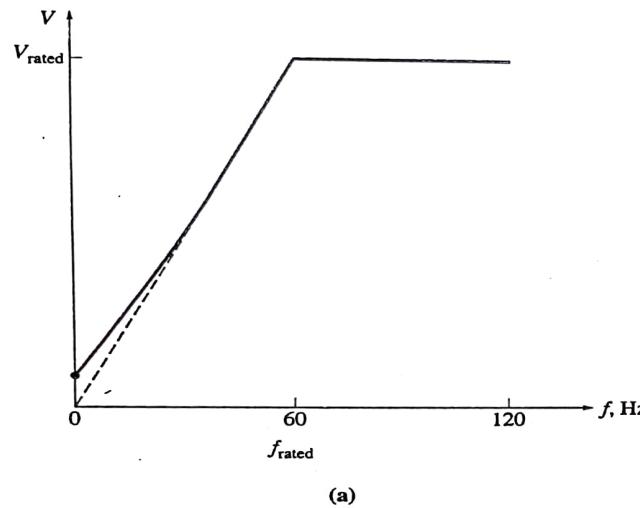
## Bağımsız Ayarlanabilir Hızlanma ve Yavaşlama Rampaları

Bir motorun istenen çalışma hızı değiştirildiği zaman, onu kontrol eden sürücü yeri çalışma hızına motoru getirene kadar frekansı değiştirecektir. Hız değişimi ani olursa (Örneğin 900'den 1200 dev/dak'ya ani bir sıçrama), sürücü eski hızdan istenen yeni hiza motorun hızının ani olarak sıçramasını gerçekleştiremez. Onun ye-



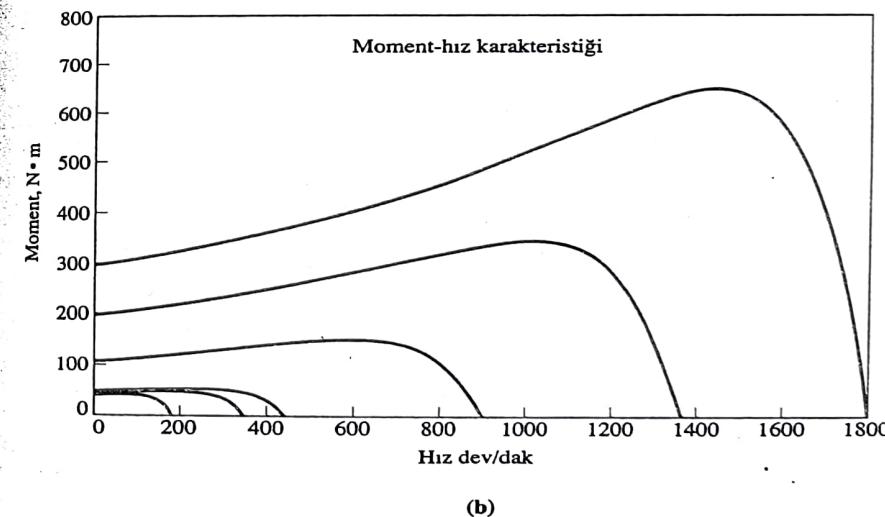
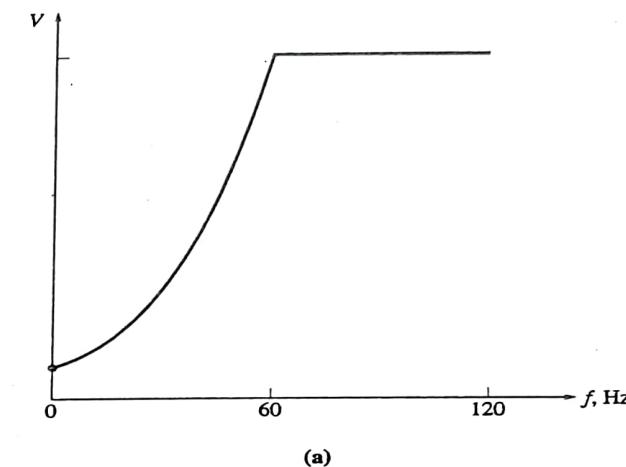
ŞEKİL 7-49

(a) Yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücü için olası gerilime karşı frekans örüntülerü: *Genel amaçlı örüntü*. Bu örüntü, nominal frekansın altında doğrusal gerilim-frekans eğrisinden ibarettir ve nominal frekansın yukarısında sabit bir gerilimdir. (b) Nominal frekansın altında hızlar için, (nominal frekansın yukarıındaki hızlar için bakınız Şekil 7-41b) moment-hız karakteristik eğrileri.



SEKİL 7-50

(a) Yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücü için olası gerilime karşı frekans örüntüleri: *yüksek yol verme moment örüntüsü*. Bu, yüksek yol verme momenti gerektiren yükler için değiştirilmiş ve kullanılan gerilim frekans örüntüsündür. Düşük hızlar dışında doğrusal gerilim frekans örüntüsü ile aynıdır. Gerilim, yüksek muknatsınma akımı bedeliyle ekstra moment üreten çok düşüklü hızlarda orantısız şekilde yüksektir. (b) Nominal hızın altındaki hızlar için oluşan moment-hız karakteristik eğrileri



SEKİL 7-51

(a) Yarı iletken değişken frekanslı asenkron motor sürücü için olası gerilime karşı frekans örüntüleri: *fan moment örüntüsü*. Bu çok düşük yol alma momentine sahip olan fan ve merkezkaç pompaları süren motorlar ile kullanım için kullanılan bir gerilim frekans örüntüsündür. (b) Nominal hızın altındaki hızlar için oluşacak moment-hız karakteristik eğrileri (nominal frekansın yukarıındaki hızlar Şekil 7-41b'ye benzer)

rine motorun hızlanma ve yavaşlama oranları sürücünün elektroniğine konulan özel devreler ile emniyet seviyesine sınırlanır. Bu oranlar hızlanma ve yavaşlama için bağımsız olarak ayarlanabilir.

### Motor Koruma

Asenkron motorlu sürücü, sürücüye bağlı motoru korumak üzere tasarlanmış çeşitli özellikler ile oluşturulur. Sürücü, aşırı sürekli durum akımını (bir aşırı yük koşulu), anlık aşırı akımları, aşırı gerilim koşullarını ve düşük gerilim koşullarını sezebilir. Yukarıdaki durumların herhangi birin oluştuğunda motor durdurulacaktır.

Yukarıda tanımlanana benzeyen asenkron motorlu sürücüler, asenkron motorların geniş bir aralıktaki hız değişimi gerektiren birçok uygulama için DA motorların yerini aldığı esnek ve güvenilir sistemlerdir.

### 7.11 DEVRE MODELİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Bir asenkron motorun eşdeğer devresi yük değişimlerine karşı motorun cevabının belirlenmesinde çok yararlı bir araçtır. Bununla beraber gerçek makina için bir model kullanılacaksa, modelde hangi eleman değerlerinin kullanılacağını belirmek gereklidir.  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  ve  $X_M$  değerleri gerçek bir motor için nasıl belirlenebilir?

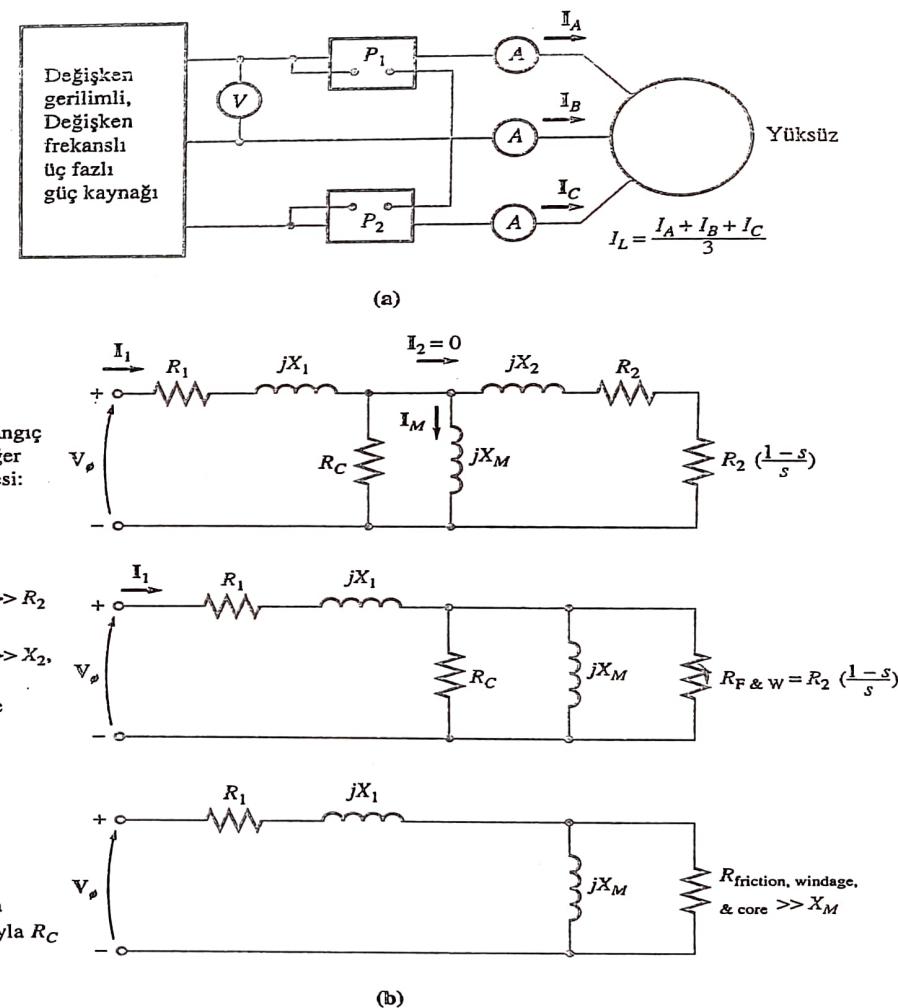
Bu bilgi parçaları, transformatördeki açık ve kısa devre deneylerine benzer şekilde bir asenkron motor için de deneyler yaparak bulunabilir. Deneyler kesin olarak kontrollü koşullarda yapılmalıdır çünkü dirençler sıcaklıkla ve rotor direnci ise rotor frekansı ile değişir. Her bir asenkron motor deneyinin doğru sonucu vermesi için nasıl yapılması gerektiğinin tüm ayrıntıları IEEE standart 112'de türündür. Deneylerin ayrıntıları çok karmaşık olmasına rağmen arkasındaki kavramlar, göreceli olarak kolaydır ve burada açıklanacaktır.

### Boşta Çalışma Deneyi

Asenkron motorun boşta çalışma deneyi, motorun dönmeye kayiplarını ölçer ve makinatlanma akımı hakkında bilgi sağlar. Bu deney için deney devresi Şekil 7-52 a'da gösterilmektedir. Wattmetreler, bir voltmetre ve üç ampermetre asenkron motorun serbestçe dönmesine izin verecek şekilde bağlanır. Motor üzerindeki tek yük sürtünme ve rüzgâr kayiplarıdır. Böylece motordaki tüm  $P_{conv}$ , mekanik kayiplar tarafından tüketilir ve motorun kayması çok küçüktür (0.001 veya daha küçük). Bu motorun eşdeğer devresi Şekil 7-52 b'deki gibidir. Çok küçük kayma değeri ile dönüştürülen güçe karşılık gelen  $R_2(1-s)/s$  direnci, rotor bakır kayiplarına karşılık gelen dirençten ve rotor reaktansı  $X_2$ 'den de çok çok büyüktür. Bu durumda eşdeğer devre Şekil 7-52b'deki sonuncu devreye indirgenir.

Cıkış direnci,  $X_M$  makinatlanma reaktansı ve çekirdek kayipları  $R_C$  ile paralleldir.

Boşta çalışmada bu motorun ölçü aletleri tarafından ölçülen giriş güçü mo-



$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (7-2)$$

Böylece, giriş gücü aşağıdakine eşit olmalıdır

$$\begin{aligned} P_{\text{in}} &= P_{\text{SCL}} + P_{\text{core}} + P_{\text{F\&W}} + P_{\text{misc}} \\ &= 3I_1^2 R_1 + P_{\text{rot}} \end{aligned} \quad (7-5)$$

Burada  $P_{rot}$  motorun dönme kayıplarıdır.

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{core}} + P_{\text{F&W}} + P_{\text{misc}} \quad (7-5)$$

Böylece motora verilen giriş gücü makinanın dönme kayıpları olarak belirlenebilir.

Bu koşulda çalışan motoru tanımlayan eşdeğer devre  $X_M$  muknatislanma reaktansı ile paralel  $R_2(I-s)/s$  ve  $R_C$  dirençlerini içerir. Manyetik alanı oluşturma için gerekli akım, hava aralığının yüksek relüktansından dolayı bir asenkron motor torda daha büyüktür; böylece  $X_M$  reaktansı kendisine paralel dirençlerden daha küçük olacaktır ve bunun sonucu olarak toplam giriş güç faktörü çok küçük olacaktır. Büyüklük geride fazlı akım ile gerilim düşümünün çoğu, devredeki induktif bilsenlerin uclarında olacaktır. Böylece eşdeğer giriş empedansı yaklaşık olarak,

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\phi}{I_{L_{nl}}} \approx X_1 + X_M \quad (7-60)$$

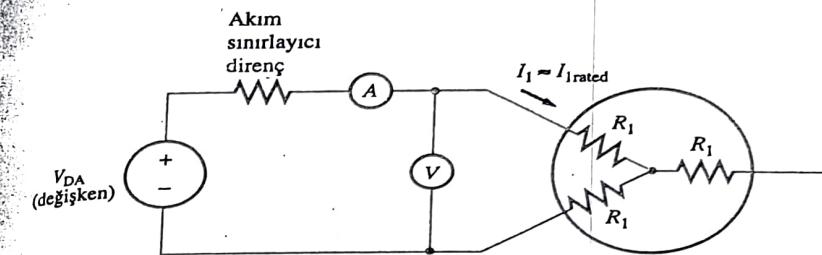
ve eğer  $X_I$  başka bir yoldan bulunabilirse, miknatışlanma reaktansı  $X_M$  motor içi bilinir olacaktır.

#### **Stator Direnci için DA Denevi**

Asenkron motorun çalışmasında  $R_2$  rotor direnci son derece kritik rol oynar. Aynı zamanda  $R_2$ , makinanın devrilmeye momentinin olduğu hızı belirleyerek moment-hız eğrisinin şeklini belirler. Kısa devre deneyi denilen standart motor deneyi toplam motorun devre direncinin belirlenmesinde kullanılır (bu deney sonrası bölümde ele alınacaktır). Bununla birlikte bu deneyden sadece toplam direnç bulunur.  $R_1$  rotor direncini doğru olarak bulmak için toplamdan çıkartılmak üzere,  $R_1$ 'in bilinmesi gereklidir.

$R_1$  için yapılacak deney  $R_2$ ,  $X_1$  ve  $X_2$ 'nin kinden bağımsızdır. Bu deney DA deneyi olarak adlandırılır. Temel olarak asenkron motorun stator sargılarına bir DA gerilimi uygulanır. Akım DA olduğundan rotor devresinde gerilim induklamaz ve rotordan akım akmaz. Keza DA akımda motorun reaktansı sıfır olacaktır. Dolayısıyla motorda akan akımı sınırlayan tek büyüklik stator direncidir ve bu direnç belirlenebilir.

DA deneyi için temel devre Şekil 7-53'de gösterilmektedir. Bu şekil yıldız bağlı asenkron motorun üç ucundan ikisine bağlanan bir DA güç kaynağını göstermektedir. Deneyi yapmak için stator sargasındaki akım nominal değerine ayarlanır.



**ŞEKİL 7-53**  
DA direnç deneyi için deney devresi

ve uçlar arasındaki gerilim ölçütür. Stator sargılarındaki akım, normal çalışma sırasında sahip olacağı sıcaklığa sargıların getirilmesiyle, nominal değerine ayarlanır (sargı direncinin sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu hatırlayınız).

Şekil 7-53'teki akım iki sargıdan akar böylece bu akım yolundaki toplam diferansiyel  $2R$ , dir. Dolayısıyla,

$$R_1 = \frac{V_{DA}}{I_{DA}}$$

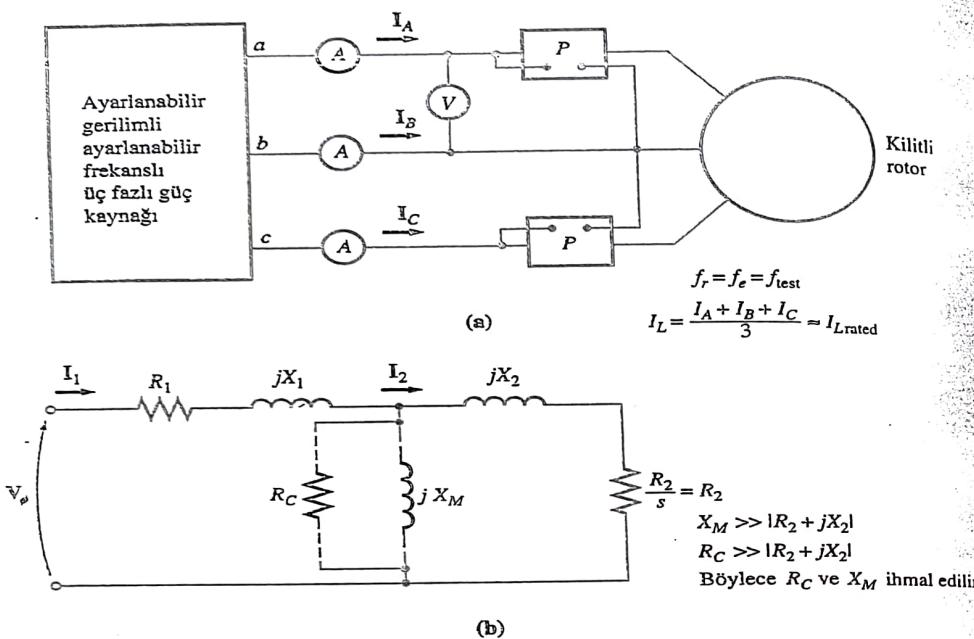
$R_1$ 'in bu değeri ile boştaki stator bakır kayıpları belirlenebilir ve dönme kayıpları boştaki giriş gücü ve stator bakır kayıpları arasındaki fark cinsinden bulunabilir.

Bu tarzda hesaplanan  $R_1$  değeri tam olarak doğru değildir çünkü bir AA gerilimi safilere uygulandığı zaman oluşan deri olayını ihmal etmiştir. Sıcaklık ve deri etkisi için düzeltmeler ile ilgili daha çok ayrıntı IEEE standart 112'de bulunabilir.

#### **Kısa Devre (Tutulu – kilitli rotor) Deneyi**

Bir asenkron motordaki devre parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilen üçüncü deneye, kilitli rotor deneyi veya bazen tutulu rotor deneyi denilir. Bu deney transformatördeki kısa devre deneyine karşılık gelir. Bu deneyde rotor hareket etmemesi için tutulur veya bloke edilir. Motora bir gerilim uygulanır ve ortaya çıkan akım, gerilim ve güç ölçülür.

**Şekil 7-54a** tutulu rotor deneyi için bağlantıları göstermektedir. Tutulu rotor deneyini yapmak için statora bir AA gerilimi uygulanır ve akan akım yaklaşık olarak tam yük değerine ayarlanır. Akım tam yük değerinde olduğu zaman motorda akan akım, gerilim ve güç ölçülür. Bu deney için eşdeğer devre **Şekil 7-54b**'de gösterilmektedir. Rotorun hareket etmediğine dikkat ediniz, kayma  $s=1$ 'dir ve böylece rotor direnci  $R_2/s$ ,  $R_2$  ye eşittir (oldukca küçük bir değer).



**ŞEKİL 7-54**  
Bir asenkon motor için tutulu rotor deneyi (a) deney devresi (b) motor eşdeğer devresi

*R<sub>2</sub>* ve *X<sub>2</sub>* böyle küçük olduğlarından dolayı daha büyük olan mıknatıslama reaktansından akmak yerine giriş akımının hemen tamamı onların üzerinden akanacaktır. Dolayısıyla bu koşullar altında devre *X<sub>1</sub>*, *R<sub>1</sub>*, *X<sub>2</sub>* ve *R<sub>2</sub>*'nin seri kombinasyonu olacaktır.

Bununla birlikte bu deneyde bir problem vardır. Normal çalışmada stator frekansı şebeke frekansıdır (50 veya 60 Hz). Yol verme koşullarında rotor da şebeke frekansıdır. Bununla birlikte normal çalışma koşullarında çoğu motorun kayması sadece yüzde 2–4'e eşittir ve ortaya çıkan rotor frekansı 1–3 Hz aralığındadır. Bu hat frekansının motorun normal işletme koşullarında olmadığını göstermektedir. Etkin rotor direnci, B tasarım sınıfı ve C sınıfı motorlar için frekansın kuvvetli bir fonksiyonu olduğundan yanlış rotor frekansı bu deneyde yanlış sonuçlara yol açabilir. Deney yaparken uzlaşılan tipik değer nominal frekansın yüzde 25'i veya daha az bir frekans kullanmaktadır. Bu yaklaşım, temel sabit dirençli rotorlar için kabul edilebilir (A sınıfı ve D sınıfı tasarım), birisi değişken dirençli bir rotorun normal rotor direncini bulmak için uğraştığı zaman istenilen birçok şeyi göz ardı eder. Bu ve benzeri problemlerden dolayı büyük dikkatle bu deneylerden alınacak ölçüler üzerinde çalışılmalıdır.

Deney gerilimi ve frekansı ayarlandiktan sonra motorda akan akım hemen nominal akımı civarına ayarlanır ve rotor fazlaıyla ısnanmadan giriş gücü, gerilimi ve akımı ölçülür. Motorun giriş gücü aşağıdaki gibi verilir:

$$P = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$$

Böylece tutulu rotor güç faktörü aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\text{PF} = \cos \theta = \frac{P_{\text{in}}}{\sqrt{3} V_T I_L} \quad (7-62)$$

Ve empedans açısı  $\theta$  dir. Dolayısıyla  $\cos^{-1} \text{PF}$ 'ye eşittir.

Bu anda motor devresindeki toplam empedansın büyüklüğü

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_L} \quad (7-63)$$

Ve toplam empedans açısı  $\theta$  dir. Buradan,

$$\begin{aligned} Z_{LR} &= R_{LR} + jX'_{LR} \\ &= |Z_{LR}| \cos \theta + j |Z_{LR}| \sin \theta \end{aligned} \quad (7-64)$$

Tutulu rotor reaktansı *R<sub>LR</sub>* aşağıdaki ifadeye eşit olacaktır.

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad (7-65)$$

$$X'_{LR} = X'_1 + X'_2 \quad (7-66)$$

Burada *X'<sub>1</sub>* ve *X'<sub>2</sub>* deney frekansındaki stator ve rotor reaktanslarıdır.

*R<sub>2</sub>* rotor direnci aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$R_2 = R_{LR} - R_1 \quad (7-67)$$

Buradaki *R<sub>1</sub>* DA deneyinden belirlenmiştir. Statora indirgenmiş toplam rotor reaktansı da bulunabilir. Reaktans frekansa doğru orantılı olduğundan normal çalışma frekansında toplam eşdeğer reaktans aşağıdaki gibi bulunur.

$$X_{LR} = \frac{f_{\text{rated}}}{f_{\text{test}}} X'_{LR} = X_1 + X_2 \quad (7-68)$$

Ne yazık ki stator ve rotor reaktanslarını birbirlerinden ayırmak kolay bir yolu yoktur. Uzun yılların deneyimi; belirli tasarım tiplerindeki motorların rotor ve stator reaktansları arasında belirli oranların olduğunu göstermiştir. Şekil 7-55 bu deneyimi özellemektedir. Normal практике reaktans tüm moment denklemlerinde *X<sub>1</sub>+X<sub>2</sub>* toplamı olarak görüldüğünden *X<sub>LR</sub>*'nın nasıl bulunduğu konu edilmez.

**Örnek 7-8.** Aşağıdaki veriler 7.5-hp, dört kutuplu, 208-V, 60-Hz, A tasarım sınıfı, yıldız bağlı 28 A lik bir akıma sahip bir asenkon motordan alınmıştır.

	$X_{LR}$ 'nin fonksiyonu olarak $X_1$ ve $X_2$	
Rotor Tasarımı	$X_1$	$X_2$
Bilezikli rotor	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Tasarım A	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Tasarım B	$0.4 X_{LR}$	$0.6 X_{LR}$
Tasarım C	$0.3 X_{LR}$	$0.7 X_{LR}$
Tasarım D	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$

Şekil 7-55  
Stator ve rotor reaktanslarını bölmek için yaklaşık hesap

DA deneyi

$$V_{DA} = 13.6 \text{ V}$$

$$I_{DA} = 28.0 \text{ A}$$

Boşta çalışma deneyi

$$V_T = 208 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$I_A = 8.12 \text{ A}$$

$$P_{in} = 420 \text{ W}$$

$$I_B = 8.20 \text{ A}$$

$$I_C = 8.18 \text{ A}$$

Tutulu rotor deneyi:

$$V_T = 25 \text{ V}$$

$$f = 15 \text{ Hz}$$

$$I_A = 28.1 \text{ A}$$

$$P_{in} = 920 \text{ W}$$

$$I_B = 28.0 \text{ A}$$

$$I_C = 27.6 \text{ A}$$

(a) Bu motor için faz başına eşdeğer devreyi tasarlaymentır

(b) Devrilme momentindeki kaymayı bulunuz ve devrilme momentinin kendisinin değerini bulunuz.

**Cözüm**

(a) DA deneyinden

$$R_1 = \frac{V_{DA}}{2I_{DA}} = \frac{13.6 \text{ V}}{2(28.0 \text{ A})} = 0.243 \Omega$$

bulunur. Boşta çalışma deneyinden

$$I_{L,av} = \frac{8.12 \text{ A} + 8.20 \text{ A} + 8.18 \text{ A}}{3} = 8.17 \text{ A}$$

$$V_{\phi,nl} = \frac{208 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

elde edilir. Dolayısıyla,

$$|Z_{nl}| = \frac{120 \text{ V}}{8.17 \text{ A}} = 14.7 \Omega = X_1 + X_M$$

$X_1$  bilindiği zaman  $X_M$  bulunabilir. Stator bakır kayıpları

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 = 3(8.17 \text{ A})^2(0.243 \Omega) = 48.7 \text{ W}$$

gibidir. Dolayısıyla boştaki dönme kayıpları

$$\begin{aligned} P_{rot} &= P_{in,nl} - P_{SCL,nl} \\ &= 420 \text{ W} - 48.7 \text{ W} = 371.3 \text{ W} \end{aligned}$$

bulunur. Tutulu rotor deneyinden

$$I_{L,av} = \frac{28.1 \text{ A} + 28.0 \text{ A} + 27.6 \text{ A}}{3} = 27.9 \text{ A}$$

yazılır. Tutulu rotor empedansı

$$|Z_{LR}| = \frac{V_T}{I_A} = \frac{25 \text{ V}}{\sqrt{3}(27.9 \text{ A})} = 0.517 \Omega$$

ve empedans açısı  $\theta$  aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_L} \\ &= \cos^{-1} \frac{920 \text{ W}}{\sqrt{3}(25 \text{ V})(27.9 \text{ A})} \\ &= \cos^{-1} 0.762 = 40.4^\circ \end{aligned}$$

Dolayısıyla,  $R_{LR} = 0.517 \cos 40.4^\circ = 0.394 \Omega$   $= R_1 + R_2$ .  $R_1 = 0.243 \Omega$  olduğundan  $R_2 = 0.151 \Omega$  olmalıdır. 15 Hz'deki reaktans

$$X'_{LR} = 0.517 \sin 40.4^\circ = 0.335 \Omega$$

şeklindedir. 60 Hz'deki eşdeğer reaktans

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{LR} = \left( \frac{60 \text{ Hz}}{15 \text{ Hz}} \right) 0.335 \Omega = 1.34 \Omega$$

olur. A tasarım sınıfı asenkron motorlar için bu reaktansın rotor ve stator arasında eşit olarak bölündüğü kabul edilir, böylece

$$X_1 = X_2 = 0.67 \Omega$$

$$X_M = |Z_{nl}| - X_1 = 14.7 \Omega - 0.67 \Omega = 14.03 \Omega$$

Faz başına sonuç eşdeğer devre şekil 7-56 da gösterilmektedir.

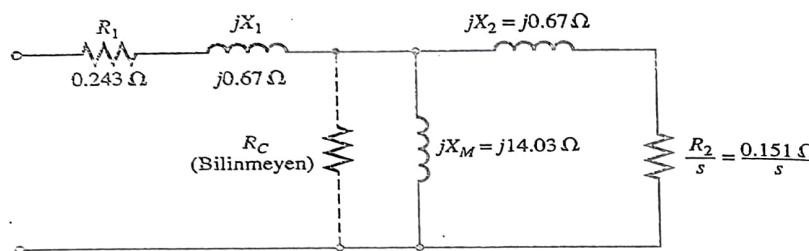
(b) Bu eşdeğer devre için Thevenin eşdeğerleri Denklem (7-41b), (7-44) ve (7-45)'den bulunabilir.

$$V_{TH} = 114.6 \text{ V} \quad R_{TH} = 0.221 \Omega \quad X_{TH} = 0.67 \Omega$$

Dolayısıyla devrilme momentindeki kayma aşağıdaki gibi verilir.

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

(7-53)



**ŞEKİL 7-56**  
Örnek 7-8 için motorun bir faz eşdeğer devresi

$$= \frac{0.151 \Omega}{\sqrt{(0.243 \Omega)^2 + (0.67 \Omega + 0.67 \Omega)^2}} = 0.111 = 11.1\%$$

Bu motorun maksimum momenti aşağıdaki gibi verilir.

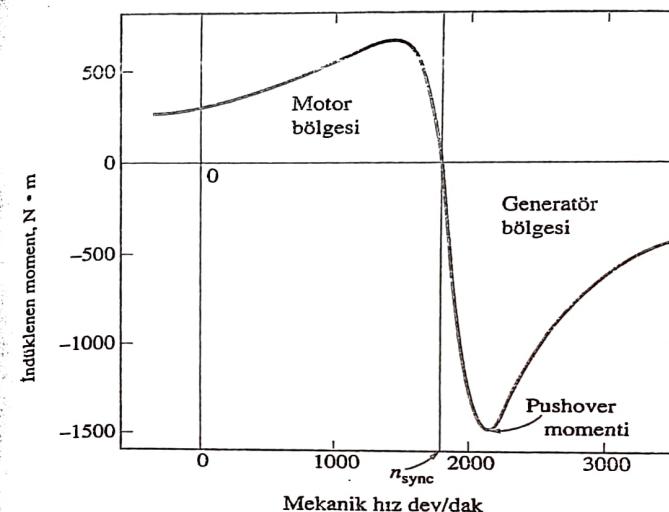
$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync}[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X^2)}]} \\ &= \frac{3(114.6 \text{ V})^2}{2(188.5 \text{ rad/s})[0.221 \Omega + \sqrt{(0.221 \Omega)^2 + (0.67 \Omega + 0.67 \Omega)^2}]} \\ &= 66.2 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (7-54)$$

## 7.12 ASENKRON GENERATÖR

Şekil 7-20'deki moment-hız karakteristik eğrisine göre, asenkron motor harici bir hareket kaynağı ile  $n_{sync}$  hızından daha yüksek bir hızda sürülsürse, indüklenen momentinin yönü ters olacak ve makina generatör olarak davranışacaktır. Birincil hareket ettirici ile miline uygulanan moment arttıkça asenkron generatör tarafından üretilen güç miktarı artar. Şekil 7-57'de gösterildiği gibi generatör çalışma modunda indüklenmesi olası maksimum bir moment vardır. Bu moment generatörün *pushover momenti* olarak bilinir. Eğer birincil hareket ettirici, asenkron generatörün miline pushover momentten daha büyük bir moment uygularsa generatör aşın hızlanacaktır.

Bir generatör olarak bir asenkron makina birçok sınırlamalara sahiptir. Aynı bir uyarma devresi olmadığından bir asenkron generatör reaktif güç üretemez. Aslında reaktif güç tüketir ve harici bir reaktif güç kaynağı stator manyetik alanını sağlamak üzere tüm zamanlarda bağlı olmalıdır. Bu harici reaktif güç kaynağı generatörün üç gerilimini de kontrol etmelidir-uyarma akımsız bir asenkron generatör kendi çıkış gerilimini kontrol edemez. Normal olarak generatörün gerilimi bağlandığı harici güç sistemiyle sürdürülür.

Bir asenkron generatörün en büyük avantajı basitleşтиridir. Bir asenkron generatör aynı bir uyarma devresi gerektirmez ve belirli bir hızda sürekli olarak sürümme ihtiyacı yoktur. Makinanın hızı bağlandığı güç sisteminin  $n_{sync}$ inden daha bü-



**ŞEKİL 7-57**  
Bir asenkron makinanın generatör çalışma bölgesini gösterecek şekilde moment-hız karakteristiği. Pushover momente dikkat ediniz.

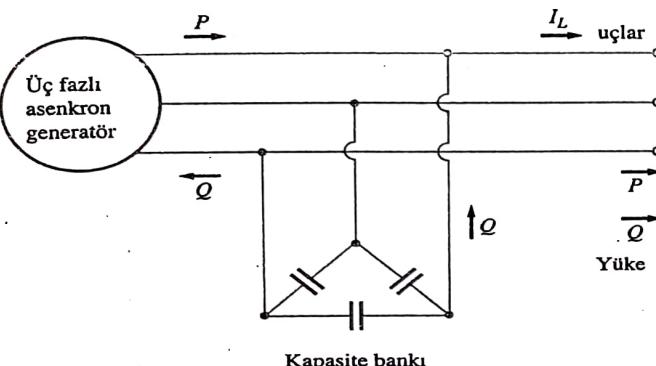
yük bir değerdir. Miline daha büyük moment uygulanırsa (belirli bir noktaya kadar) daha büyük bir çıkış gücüyle sonuçlanır. Mevcut bir güç sistemine bağlı rüzgar mili, ısı kazanım sistemleri için iyi bir ayarlamaya gerek duymaması bu generatörü iyi bir seçim konumuna getirir. Bu gibi uygulamalarda güç faktörü düzeltimi kondansatörler tarafından sağlanır ve generatörün üç gerilimi harici güç sistemiyle kontrol edilebilir.

### Tek Başına Çalışan Asenkron Generatör

Bir asenkron makina için herhangi bir güç sisteminde bağımsız izole bir generatör olarak işlev görmek, generatörün ve bağlı yüklerin gerek duyduğu reaktif güç kondansatörler tarafından karşılandığı sürece mümkünündür. Böyle bir izole asenkron generatör Şekil 7-58 de gösterilmektedir.

Üç geriliminin bir fonksiyonu olarak, bir asenkron makina tarafından gerek duyulan muknatsıslama akımı, boşta motor olarak makinayı çalıştırarak ve üç geriliminin bir fonksiyonu olarak kendi endüvi akımını ölçerek bulunabilir. Bu tür bir muknatsıslama eğrisi Şekil 7-59a da gösterilmektedir. Asenkron generatörde belirli bir gerilim seviyesine ulaşmak için harici kondansatörler bu seviyeye karşılık gelen muknatsıslama akımını sağlamalıdır.

Bir kondansatörün üretebildiği reaktif akım, ona uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğundan, kondansatörden akan akım ve gerilimin tüm olası kombinasyonlarının yeri bir doğru üzerindedir. Belirli bir frekans için gerilimin akıma göre



ŞEKİL 7-58

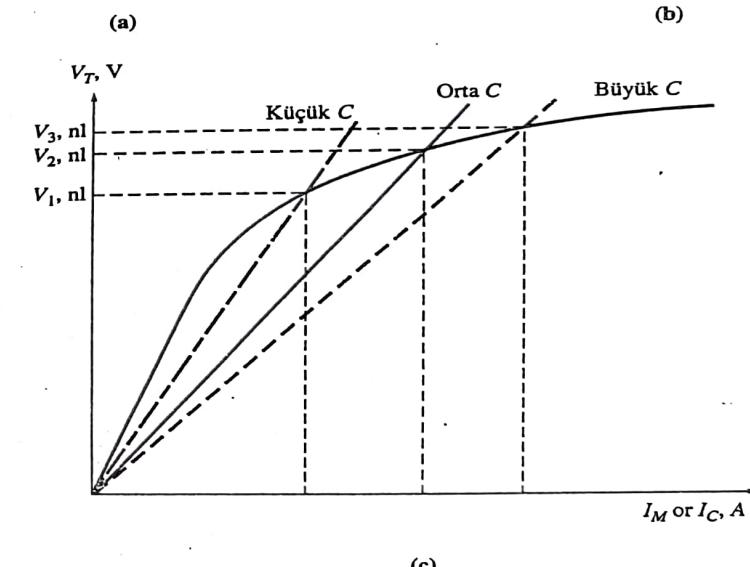
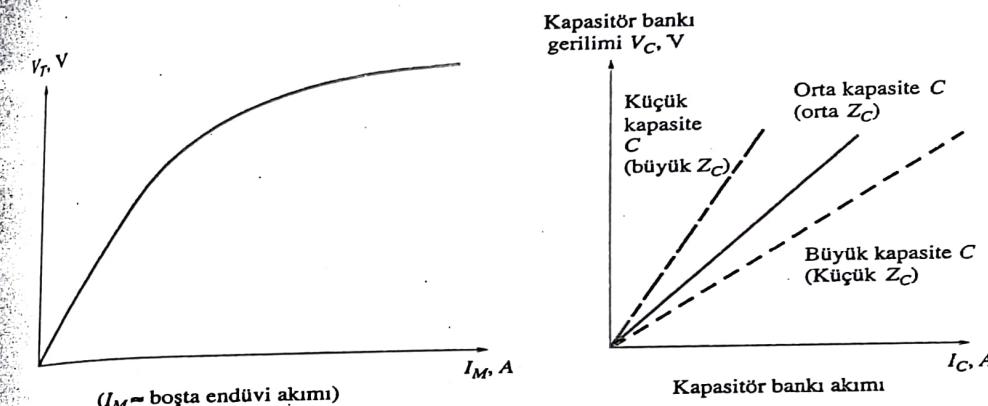
Tek başına çalışan asenkron motor için bir kondansatör bankı ile reaktif güç sağlanması gösteren şema.

değirmi Şekil 7-59b'de gösterilmektedir. Eğer üç fazlı bir kondansatör grubu bir asenkron generatörün uçları arasına bağlanırsa, asenkron generatörün boştaki gerilimi, kondansatörün yük doğrusu ve generatörün mknatışlanması eğrisinin kesim noktası olacaktır. Üç farklı kondansatör grubu için asenkron generatörün boştaki uç gerilimi Şekil 7-59c'de gösterilmektedir.

İlk kez çalıştırıldığında bir asenkron generatörde gerilim nasıl oluşturulur? Bir asenkron generatör ilk kez dönmeye çalıştığından kendi uyarma devresindeki artık mknatıslık küçük bir gerilim üretir. Bu küçük gerilim, kapasitif bir akım üretir, bu akım gerilimi artırır, bu gerilim kapasitif akımı biraz daha artırır ve bu işlem gerilim tam olarak oluşuncaya kadar devam eder. Asenkron generatörün rotorunda artık aki yoksa o zaman gerilim oluşmayacaktır ve bir an için onu motor olarak döndürerek mknatıslamak gereklidir.

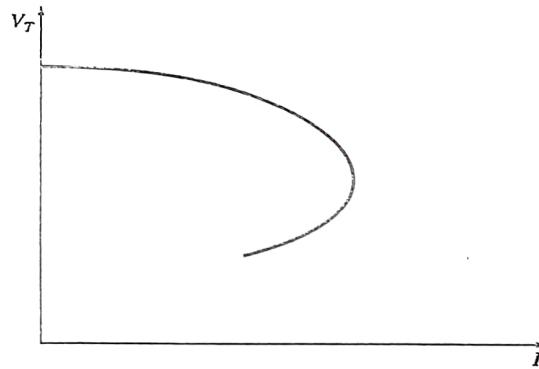
Asenkron generatörün en ciddi problemi geriliminin yükle ve özellikle reaktif yük ile çokça değişmesidir. Sabit paralel bir kondansatör ile tek başına çalışan bir asenkron generatörün tipik üç karakteristikleri Şekil 7-60'da gösterilmektedir. Endüktif yük durumunda gerilim çökümlerinin çok hızlı olmasına dikkat etmek gereklidir. Bu, sabit kondansatörler ile hem yük hem de generatör tarafından istenen tüm reaktif gücün sağlanması gereğinden ve yükle yönlendirilen her reaktif güç generatör geriliminde önemli bir düşmeye neden olacağından, generatörün yalnız olduğu zaman ki mknatışlanması eğrisine generatörü geri taşır. Dolayısıyla bir asenkron generatörden beslenen bir güç sistemindeki bir asenkron motora yol vermek çok zordur- yol verme sırasında etkin kapasiteyi artırmak ve sonra normal çalışma sırasında azaltmak için özel teknikler kullanılmalıdır.

Asenkron makinanın moment-hız karakteristiğinden dolayı değişen yük ile asenkron generatörün frekansı değişir: ama moment-hız karakteristiği normal çalışma aralığında çok kademeli olduğundan toplam frekans değişimi yüzde 5'den daha az bir değere sınırlanır. Bu değişim miktarı birçok izole ve acil generatör uygulamalarında kabul edilebilirdir.



ŞEKİL 7-59

(a) Bir asenkron makinanın mknatışlanması eğrisi. Mknatışlanması akımının bir fonksiyonu olarak makinanın üç geriliminin çizimi (faz geriliminden yaklaşık olarak  $90^\circ$  geride olan). (b) Kondansatör bankının akım gerilim karakteristiğinin çizimi. Kapasitenin büyük olduğu belirli bir gerilim için daha büyük bir akıma neden olur. Bu akım yaklaşık olarak  $90^\circ$  ile faz geriliminin önlindedir. (c) İzole bir asenkron generatör için boştaki uç gerilimi, generatör uç gerilimi ve tek bir eksen takımında kondansatör akım gerilim karakteristiğini çizerek bulunabilir. İki eğrinin kesimini generatörün gerek duyduğu reaktif gücün tamamen kondansatörler tarafından sağlanığı noktadır ve bu nokta generatörün boştaki uç gerilimini verir.



ŞEKİL 7-60

Sabit bir geride güç faktörüne sahip olan bir yük için bir asenkron generatörün üç gerilim-akım karakteristiği

## **Asenkron Generatör Uygulamaları**

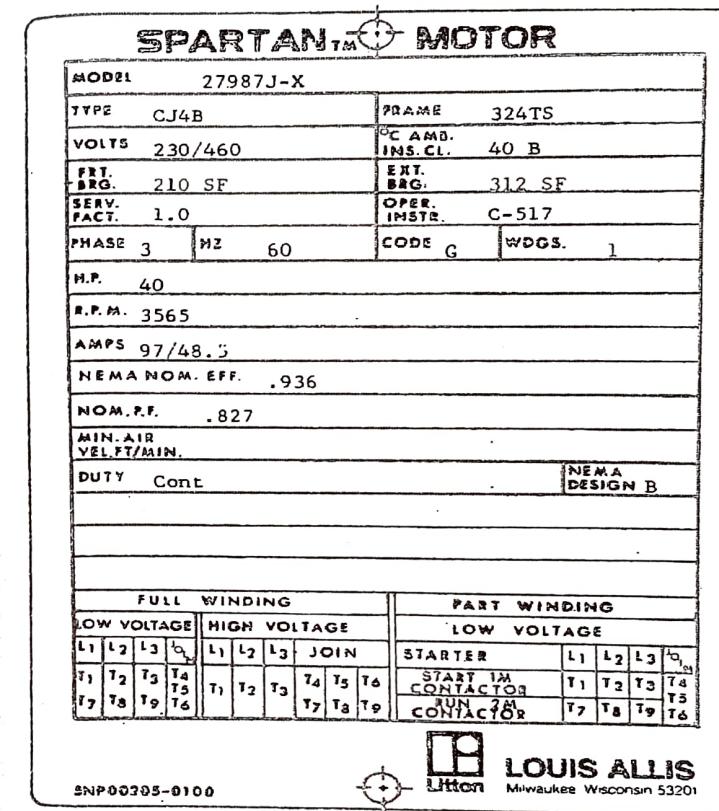
Asenkron generatörler yirminci yüzyılın başından beri kullanılmaktadır ama 1960 ve 1970'lerde büyük ölçüde kullanım dışı görüntülmüştür. Bununla birlikte asenkron generatörlerin 1973'deki petrol fiyatlarındaki şoklardan beri kullanımları artmaya başlamıştır. Enerji maliyetlerinin çok yüksek olması ile enerjinin genel kazanılması birçok endüstriyel süreç ekonomisinin önemli bir parçası olmuştur. Asenkron generatör çok az bir bakım ve kontrol gerektirmesinden dolayı bu gibi uygulamalar için idealdir.

Başitlikleri ve çıkış gücünün kilowatt başına küçük boyutlarından dolayı küçük rüzgâr turbinleri için çok şiddetle önerilir. Birçok ticari rüzgâr turbini büyük güç sistemleri ile paralel çalışarak tüketicinin toplam güç gereksinimlerinin birliğini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu tür bir çalışmada güç sisteminin gerilimi ve frekans kontrolüne güvenilebilir ve statik kondansatörler güç faktörü düzeltici için kullanılabilir.

#### 7.13 ASENKRON MOTORUN ANMA DEĞERLERİ

Tipik bir yüksek verimli ve integral beygir güçlü asenkron motor için etiket Şekil 7-61. Etikette en önemli alınma değerleri sunulur.

1. Çıkış gücü
  2. Gerilim
  3. Akım
  4. Güç faktörü
  5. Hız
  6. Nominal verim



ŞEKİL 7-61

**Yüksek verimli tipik bir asenkron motorun etiketi (MagneTek Şirketinin izniyle)**

## 7. NEMA tasarımları sınıfları

#### 8. Yol verme kodu

Standart verimli tipik bir asenkron motor etiketi nominal verimin gösterilememesi dışında benzerdir.

Motordaki gerilim limiti, maksimum kabul edilebilir mıknatışlanma akım aksına dayandırılır, çünkü gerilimin yüksek olması ile motorun demiri daha fazla doyar ve mıknatışlama akımı daha yüksek olur. Gerilimin anma değeri frekansta ki azalmaya orantılı olarak azaltılmak kaydıyla transformatör ve senkron makina daki gibi 60-Hz'lik bir asenkron motor 50-Hz'lik bir güç sisteminde kullanılabilir. Bu azaltma motorun çekirdeğindeki akının uygulanan gerilimin integraliyle

orantılı olmasından dolayı gereklidir. İntegrasyon periyodu artarken çekirdekteki maksimum akımı sabit tutmak için ortalama gerilim seviyesi azaltılmalıdır.

Bir asenkron motordaki akım sınırı motorun sargılarındaki kabul edilebilir maksimum ısnınmaya göre ve güç sınırı da makinanın güç faktörü ve verimiyle, akım ve gerilim anma değerlerinin kombinasyonuyla belirlenir.

NEMA tasarım sınıfları, yol verme kod harfleri ve nominal verimler bu bölümün önceki kısımlarında tartışılmıştır.

## 7.14 ÖZET

Asenkron motor basitliği ve kolay çalışmasından dolayı, AA motorlarının en bilinen türüdür. Bir asenkron motorun ayrı bir uyarıma devresi yoktur, bunun yerine bir transformatördeki gibi, kendi uyarıma devresinde akım ve gerilimi indükler. Eşdeğer devresi hızla bağlı değişme etkileri dışında transformatörünkine benzerdir.

Bir asenkron motor senkron hız civarındaki bir hızda çalışır ama asla tam olarak  $n_{sync}$  hızında çalışmaz. Asenkron motorun uyarıma devresinde bir gerilim indüklemek için bir miktar göreceli hareket olmak zorundadır. Rotor ve stator manyetik alanları arasındaki fark sayesinde indüklenen rotor gerilimi bir rotor akımı üretir ve bu rotor akımı motorda indüklenen momenti üretmek üzere stator manyetik alanı ile etkileşir.

Bir asenkron motorda, maksimum momentin olduğu hız veya kayma, rotor direnci değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu maksimum momentin değeri rotor direncinden bağımsızdır. Yüksek rotor direnci maksimum momentin olduğu hızı düşürür ve böylece motorun yol verme momenti artar. Bununla birlikte bu yol verme momenti için normal çalışma aralığında çok kötü bir hız ayarına sahip olarak bir bedel ödenir. Diğer taraftan çok düşük bir rotor direnci, hız ayarını geliştirmeden yol verme momentini azaltır. Her normal asenkron motor tasarımını bu iki çelişki arasında bir uyum sağlamalıdır.

Bir tür ulaşmaya ulaşmanın yolu derin çubuk veya çift kafes kullanmaktadır. Bu rotorlar yol verme sırasında yüksek etkin dirence ve normal çalışma koşulları altında düşük etkin dirence sahiptirler ve böylece hem yüksek yol verme momenti hem de aynı motorda iyi bir hız ayarına sahip olurlar. Aynı etki rotor uyarıma direnci değiştirilirse, bilezikli asenkron motorla da sağlanabilir.

Asenkron motorların hızı makinanın kutup sayısı değiştirilerek, uygulanan elektriksel frekans değişerek, uygulanan uç gerilimini değiştirerek veya bilezikli asenkron motor durumunda rotor direnci değiştirilerek kontrol edilir.

Asenkron makina güç sisteminde biraz reaktif güç sağlanabilirse (kondansatörler veya senkron makina) generatör olarak da kullanılabilir. Tek başına çalışan bir asenkron generatör ciddi gerilim ayarlama problemlerine sahiptir ancak büyük bir güç sistemi ile paralel çalıştığı zaman güç sistemi makinanın gerilimini kontrol edebilir. Asenkron generatörler umumiyetle oldukça küçük makinalardır ve ilkesel olarak rüzgâr tribünü veya enerji geri kazanım sistemleri gibi alternatif enerji kaynaklarıyla birlikte kullanılır. Kullanıldığı büyük generatörlerin hepsi senkron generatörlerdir.

## SORULAR

- 7-1. Bir asenkron motorda kayma ve kayma hızı nedir?
- 7-2. Bir asenkron motor nasıl moment üretir?
- 7-3. Bir asenkron motorun senkron hızda neden moment üretmesi mümkün değildir?
- 7-4. Bir tipik asenkron motorun moment-hız karakteristik eğrisinin şekliniz ve açıklayınız?
- 7-5. Hangi eşdeğer devre elemanı devrilme momentinin olduğu hız üzerinde daha fazla doğrudan etkiye sahiptir?
- 7-6. Derin çubuklu kafes rotor nedir? Niçin kullanılır? Hangi NEMA tasarım sınıfı(ları) bu şekilde yapılabılır?
- 7-7. Çift kafesli rotor nedir? Niçin kullanılır? Hangi NEMA tasarım sınıfı(ları) bu şekilde yapılabılır?
- 7-8. Bilezikli asenkron motorların ve NEMA tasarım sınıfı kafes rotorlarının her birinin karakteristiklerini ve kullanımını tanımlayınız.
- 7-9. Bir asenkron motorun verimi yüksek kaymada (Kafes veya bilezikli) neden düşüktür?
- 7-10. Asenkron motorların hızını kontrol etmenin dört yolu nımları ve tanımını yapınız.
- 7-11. Bir asenkron motorda elektriksel frekans azaltılırken uygulanan gerilimin azaltılması neden gereklidir?
- 7-12. Uç gerilimi ile hız kontrolü neden çalışma aralığı ile sınırlıdır?
- 7-13. Yol verme kod çarpanları nedir? Bir asenkron motorun yol verme akımı hakkında ne ifade ederler?
- 7-14. Bir asenkron motor için omik yol verme devresi nasıl çalışır?
- 7-15. Hangi bilgi kilitli rotor deneyinden elde edilir?
- 7-16. Hangi bilgi boşta çalışma deneyinden elde edilir?
- 7-17. Hangi eylemler modern yüksek verimli asenkron motorun verimini geliştirmek için yapılır?
- 7-18. Asenkron generatörün yalnız başına çalışmasındaki uç gerilimini ne kontrol eder?
- 7-19. Asenkron generatörler tipik olarak hangi uygulamalar için kullanılır?
- 7-20. Bilezikli asenkron motor bir frekans değiştirici olarak nasıl kullanılır?
- 7-21. Farklı gerilim-frekans örüntüleri asenkron motorun moment-hız karakteristiklerini nasıl etkiler?
- 7-22. Bölüm 7-10 da anlatılan yarı iletken asenkron motor sürücünün ana özelliklerini tanımlayınız.
- 7-23. İki 408-V, 100-Hp asenkron motor üretilmiştir. Biri 50 Hz lik çalışma için tasarlanmış diğeri 60 Hz için tasarlanmıştır, ama diğerleri benzerdir. Bu makinaların hangisi daha büyüktür?
- 7-24. Bir asenkron motor nominal koşullarda çalışmaktadır. Milindeki yük şimdi artırılırsa aşağıdaki büyülükler nasıl değişir?
  - (a) Mekanik hız
  - (b) Kayma
  - (c) Rotorda indüklenen gerilim
  - (d) Rotor akımı
  - (e) Rotor frekansı
  - (f)  $P_{RCL}$
  - (g) Senkron hız

## PROBLEMLER

- 7-1. Bir DA deneyi 460-V, Y-bağlı, 100-Hp'lik bir asenkron motorda yapılmaktadır. Eğer  $V_{DA}=24$  V ve  $I_{DA}=80$  A ise, Stator direnci  $R_1$  ne olur? Neden böyledir?
- 7-2. 220-V üç fazlı, iki kutuplu, 50 Hz'lik bir asenkron motor yüzde 5'lük bir kayma ile çalışmaktadır.
- Manyetik alanın hızını dakikadaki devir sayısı cinsinden bulunuz.
  - Rotorun hızını dakikadaki devir sayısı cinsinden bulunuz
  - Rotorun kayma hızını
  - Hertz cinsinden rotor frekansını bulunuz.
- 7-3. Problem 7-2'deki soruları 480-V üç fazlı, dört kutuplu ve 60-Hz'lik bir asenkron motor yüzde 0.035'lük bir kayma için cevaplayınız.
- 7-4. Üç fazlı 60 Hz'lik bir asenkron motor boşta 890 dev/dak da ve tam yükte 840 dev/dak da çalışmaktadır.
- Bu motor kaç kutbu sahiptir?
  - Nominal yükte kayma ne olur?
  - Nominal yükün dörtte birinde hız ne olur?
  - Nominal yükün dörtte biri hızda rotorun elektriksel frekansı ne olur?
- 7-5. 50 kW, 440-V üç fazlı, altı kutuplu 50-Hz lik bir asenkron motor tam yük koşullarında yüzde 6 lik bir kaymada çalışmaktadır. Tam yük koşullarında sürütme ve rüzgar kayipları 300 W dir ve çekirdek kayipları 600 W dir. Tam yük koşulları için aşağıdaki değerleri bulunuz:
- Mil hızını bulunuz
  - Watt cinsinden çıkış gücünü bulunuz
  - Newton-metre cinsinden yük momentini
  - Newton-metre cinsinden indüklenen momentini
  - Hertz cinsinden rotor frekansını bulunuz.
- 7-6. Üç fazlı, dört kutuplu, 60 Hz'lik bir asenkron motor boşta 1790 dev/dak da ve tam yükte 1720 dev/dak da çalışmaktadır. Tam yük ve boşta çalışma koşullarında rotorun elektriksel frekansını ve kaymasını hesaplayınız. Bu motorun hız ayarlaması ne olur? [Denklem (4-68)]
- 7-7. Bir 203-V, iki kutuplu, 60-Hz Y-bağlı bilezikli bir asenkron motor 15-hp nominal gücündedir. Esdeğer devre elemanları

$$R_1 = 0.200 \Omega$$

$$X_1 = 0.410 \Omega$$

$$P_{mech} = 250 \text{ W}$$

$$R_2 = 0.120 \Omega$$

$$X_2 = 0.410 \Omega$$

$$P_{misc} \approx 0$$

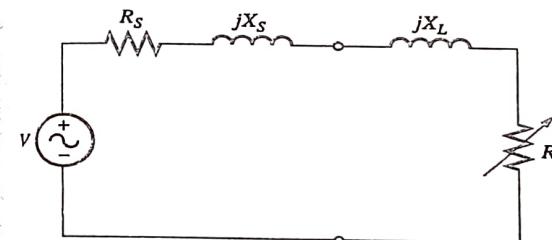
$$X_M = 15.0 \Omega$$

$$P_{core} = 180 \text{ W}$$

0.05'lük bir kayma için

- $I_L$  hat akımını
  - $P_{SCL}$  stator bakır kayiplarını
  - Hava aralığı gücü  $P_{AG}$  yi
  - Elektrikten mekanike dönüştürülen gücü  $P_{conv}$
  - İndüklenen momenti
  - Yük momentini
  - Toplam makina verimini
  - dev/dak veya rad/san cinsinden motorun hızını bulunuz.
- 7-8. Problem 7-7'deki motor için devrilme momentindeki kayma nedir? Bu motorun devrilme momenti nedir?

- 7-9. (a) Problem 7-7'deki motorun moment-hız karakteristiklerini hesaplayınız ve çiziniz.  
 (b) Problem 7-7'deki motorun çıkış gücüne karşı hız eğrısını hesaplayınız ve çiziniz.
- 7-10. Problem 7-7'deki motor için yel verme koşullarında (Mil duruyorken) maksimum momenti oluşturmak için rotor devresine ne kadar bir ek direnç eklenmelidir? Girilen ek direnç ile bu motorun moment-hız karakteristiklerini çiziniz.
- 7-11. Problem 7-7'deki motor 50 Hz lik bir güç sisteminde çalıştırılacaksa besleme gerilimi ne olmalıdır? Neden? 50 Hz de esdeğer devre eleman değerleri ne olur? 50 Hz de 0.05lik bir kayma ile ve bu makina için uygun bir gerilim ile çalışma için Problem 7-7'deki soruları cevaplayınız.
- 7-12. Şekil 7-18a bir gerilim kaynağı, bir direnç ve iki reaktanstan ibaret bir devreyi göstermektedir. Bu devrenin uçlarındaki Thevenin gerilim ve esdeğer empedansı bulunuz. Sonra Denklem (7-41) ve (7-44) de verilen  $V_{TH}$ 'ın büyüklüğü ve  $R_{TH}$  için ifadeleri türetiniz.
- 7-13. Şekil P7-1 birbirleriyle seri iki direnç, iki reaktans ve bir gerilim kaynağından ibaret olan basit bir devreyi göstermektedir.  $R_L$  direncinin değişmesine izin verilir ve diğer tüm elemanlar sabit tutulursa  $R_1$  nin hangi değerinde aktarılacak güç maksimum olacaktır? Cevabınızı ispatlayınız. (ipucu:  $V$ ,  $R_S$ ,  $X_S$ ,  $R_L$  ve  $X_L$  cinsinden yük gücü için ifadeyi çıkarınız ve  $R_L$  ye göre ifadenin kısmi türevini alınız) Devrilme momenti için ifadeyi türetmek için bu sonucu kullanınız. [Denklem (7-54)].



ŞEKİL P7-1  
Problem 7-13 için devre

- 7-14. 440-V, 50-Hz, iki kutuplu, Y-bağlı asenkron motor 75 kW nominal değerindedir. Esdeğer devre parametreleri aşağıdaki gibiyse

$$R_1 = 0.075 \Omega$$

$$X_1 = 0.17 \Omega$$

$$P_{F&W} = 1.0 \text{ kW}$$

$$R_2 = 0.065 \Omega$$

$$X_2 = 0.17 \Omega$$

$$P_{misc} = 150 \text{ W}$$

$$X_M = 7.2 \Omega$$

$$P_{core} = 1.1 \text{ kW}$$

0.04 luk bir kayma için,

- Hat akımı  $I_L$
- Stator güç faktörünü
- Rotor güç faktörünü
- Stator bakır kaybı  $P_{SCL}$
- Hava aralığı gücü  $P_{AG}$
- Elektrikten mekanike dönüştürülen gücü  $P_{conv}$
- İndüklenen momenti
- Yük momentini
- Toplam makina verimini
- dev/dak ve rad/san cinsinden motor hızını bulunuz.

- 7-15. Problem 7-14' deki motor için devrilme momenti nedir? Devrilme momentindeki kayma nedir? Devrilme momentindeki rotor hızı nedir?
- 7-16. Problem 7-14'deki motor 440-V, 60 Hz'lik bir güç kaynağından sürülsürse devrilme momenti ne olacaktır? Devrilme momentindeki kayma ne olacaktır?
- 7-17. Kayma yüzde 0 dan 10 değişirken problem 7-14 deki motor için aşağıdaki büyütükleri çiziniz.(a)  $\tau_{ind}$  (b)  $P_{conv}$  (c)  $P_{out}$  (d)  $\eta$  verim. Hangi kaymada  $P_{out}$  makinanın nominal gücüne eşit olur?
- 7-18. 208-V, 60-Hz, altı-kutuplu, Y-bağılı 25-hp B tasarım sınıfı asenkron motor laboratuarında test edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Boşta:	208 W, 22.0 A, 1200 W, 60 Hz
Kilitli rotor:	24.6 V, 64.5 A, 2200 W, 15 Hz
DA deneyi:	13.5 V, 64 A

Bu motorun eşdeğer devresini bulunuz ve onun moment-hız karakteristik eğrisini çiziniz.

- 7-19. 460-V, dört kutuplu, 50-hp, 60 Hz Y-bağılı üç fazlı bir asenkron motor 60HZ ve 460V da çalıştığı zaman yüzde 3.8 lik bir kaymada tam yük endüklenen momentini üretmektedir. Motorun faz başına devre model empedansları:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.33 \Omega & X_M &= 30 \Omega \\ X_1 &= 0.42 \Omega & X_2 &= 0.42 \Omega \end{aligned}$$

Mekanik, çekirdek ve dağılma kayipları bu problemde ihmal edilebilir.

- (a)  $R_2$  rotor direncinin değerini bulunuz
- (b) Bu motor için maksimum momentteki  $\tau_{max}$ ,  $s_{max}$  ve rotor hızını bulunuz
- (c) Bu motorun yol verme momentini bulunuz
- (d) Hangi kod harfi faktörü bu motora çakıştırılmalıdır?
- 7-20. Problem 7-19 daki motor hakkında aşağıdaki soruları cevaplayınız.
- (a) Bu motor 208-V luk sonsuz bir baradan yol alırsa, motordan yol alma sırasında ne kadarlık bir akım akacaktır?
- (b) Faz başına  $0.35+j0.25$  Ohmluk bir empedanslı bir iletim hattı asenkron motoru sonsuz baraya bağlamak için kullanılırsa motorun yol alma akımı ne olacaktır? Yol verme sırasında motorun üç gerilimi ne olacaktır?
- (c) İdeal bir 1.4:1 düşürücü transformator motor ve iletim hattının arasına bağlanırsa, yol verme sırasında iletim hattından ne kadarlık bir akım akacaktır? Yol verme sırasında iletim hattının ucunda motorda ne kadarlık bir gerilim olacaktır?
- 7-21. Bu bölümde düşürücü bir transformatörden asenkron motor tarafından çekilen yol verme akımını azaltmak için kullanılabildiğini öğrendik. Bu teknik işe yarayan bir teknik iken bir oto transformatör göreceli olarak pahalıdır. Yol verme akımını azaltmanın daha az pahalı bir yolu Y-Δ yol verici olarak adlandırılan bir cihaz kullanmaktır. Bir asenkron motor normal olarak Δ-bağılı ise faz gerilimini  $V_\phi$  yol verme sırasında stator sargılarının yeniden yıldız bağlayarak azaltmak mümkündür faz gerilimini  $V_\phi$  (ve dolayısıyla yolalma akımını) ve sonra motor hızına ulaştıktan sonra bağlanıltırı tekrar Δ-bağlanır. Bu tür bir yol verici ile ilgili aşağıdaki soruları cevaplayınız.
- (a) Normal çalışma koşulları altındaki faz gerilimi ile yol vermedeki faz gerilimini nasıl karşılaştırırsınız?

- (b) Y- bağılı motorun yol verme akımını Motor yol verme sırasında  $\_\_\_$ -bağlı kalırsa olacak yol verme akımıyla nasıl karşılaşırırsınız.
- 7-22. 460-V, 100-hp, dört kutuplu, Δ-bağılı, 60-HZ üç fazlı bir asenkron motor tam yükte yüzde 5 kayma, yüzde 92 lik bir verim geride 0.82 lik bir güç faktörüne sahiptir. Yol verme sırasında motor tam yük momentinin 1.9 katı kadar bir moment üretir ancak nominal gerilimde nominal akımının 7.5 katını çeker. Bu motor bir oto transformatorlu gerilim azaltıcı yol verici ile kullanılınır.
- (a) Motorun nominal momentine eşit olana kadar yol verme momentini azaltmak için yol verme devresinin çıkış gerilimi ne olmalıdır?
- (b) Bu gerilimde kaynakta çekilen akım ve motorun yol verme akımı ne olacaktır?
- 7-23. Bilezikli bir asenkron motor makinanın nominal yükünün yüzde 25 i civarında ve kisa devre bilezikler ile nominal gerilim ve frekansta çalışmaktadır. Bu makinanın rotor direnci rotor devresine ekstra direnç sokarak iki katına çıkarılırsa aşağıdaki büyütüklere ne olacağını açıklayınız.
- (a) Kayma
- (b) Motor hızı  $n_m$
- (c) Rotorda indüklenen gerilim
- (d) Rotor akımı
- (e)  $\tau_{ind}$
- (f)  $P_{out}$
- (g)  $P_{RCL}$
- (h) Toplam verim n
- 7-24. 460-V, Δ-bağılı, iki kutuplu, 75-hp, 60-Hz yol verme kod harfi E ile bir asenkron motorlarındaki aşağıdaki soruları cevaplayınız:
- (a) Bu makinanın denetleyicisinin uğraşmak için tasarlanması gereken maksimum yol verme akımı nedir?
- (b) Kontrol edici yol verme sırasında Δ-bağlantıdan Y-bağlantıya stator sargılarını anahtarlamak üzere tasarlanırsa, kontrol edicinin başa çıkmak üzere maksimum yol verme akımı nedir?
- (c) 1.25:1 lik bir düşürücü oto transformatör yol verici yol verme sırasında kullanılsa hattan çekeceği maksimum yol verme akımı nedir?
- 7-25. Bir asenkron motoru çok hızlı durdurmak gerektiği zaman bir çok asenkron motor denetleyici herhangi iki stator ucunu anahtarlayarak manyetik alanların dönüş yönünü ters çevirir. Manyetik alanların dönüş yönü ters çevrildiği zaman dönüşün mevcut yönüne zıt bir indüklenen moment üretir, böylece çabucak durur ve ters yönde dönmeye başlayacak şekilde bir moment oluşturmaya çalışır. Rotor hızı sıfırı yaklaştığı zaman momentte stator devresinden çekilirse, o zaman motor çok daha hızlı bir şekilde durdurulmuş olur. Bir asenkron motoru çok hızlı bir şekilde durdurmak için bu teknik plugging olarak adlandırılır. Problem 7-19'daki motor nominal koşullarda çalışıyor ve pluggingle durdurulacaktır:
- (a) Pluggingden önceki s kayması nedir?
- (b) Pluggingden önce rotorun frekansı nedir?
- (c) Pluggingden önceki indüklenen moment  $\tau_{ind}$  nedir?
- (d) Stator uçları anahtarlandıktan hemen sonra s kayması nedir?
- (e) Stator uçları anahtarlandıktan hemen sonra rotorun frekansı nedir?
- (f) Stator uçları anahtarlandıktan hemen sonra indüklenen moment  $\tau_{ind}$  ne olur?

## REFERANSLAR

1. Alger, Phillip. *Induction Machines*, 2nd ed. New York: Gordon and Breach, 1970.
2. Del Toro, V. *Electric Machines and Power Systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1985.
3. Fitzgerald, A. E. and C. Kingsley, Jr. *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 1952.
4. Fitzgerald, A. E., C. Kingsley, Jr., and S. D. Umans. *Electric Machinery*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
5. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE Standard 112-1996. New York: IEEE, 1996.
6. Kosow, Irving L. *Control of Electric Motors*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1972.
7. McPherson, George. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. New York: Wiley, 1981.
8. National Electrical Manufacturers Association. *Motors and Generators*, Publication No. MG1-1993. Washington, D.C.: NEMA, 1993.
9. Slemon, G. R., and A. Straughen. *Electric Machines*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
10. Vitayathil, Joseph. *Power Electronics: Principles and Applications*. New York: McGraw-Hill, 1995.
11. Wernick, E. H. (ed.). *Electric Motor Handbook*. London: McGraw-Hill, 1978.

---

 BÖLÜM  
 8
 

---

 DA MAKİNALARIN  
 TEMELLERİ
 

---

**DA** makinaları, DA elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren motor ve mekanik enerjiyi DA elektrik enerjisine dönüştüren generatörlerden oluşur. DA makinalar dahili AA gerilimi, uçlarında DA akıma dönüştüren bir mekanizmaya sahip olduklarıdan dolayı bir DA çıkışa sahiptir. Bu nedenle, çoğu DA makinaları dahili AA gerilim ve akımına sahip AA makinalara benzerler. Bu mekanizma komütatör olarak adlandırılır ve DA makinaları aktarımı makinalar olarak da bilinir.

### 8.1 EĞİMLİ KUTUP ALINLARI ARASINDA DÖNEN BASIT BİR İLETKEN ÇERÇEVE

Bölüm 1.8'de ele alınan doğrusal makina, temel makina davranışının anlaşılmasında bize yardımcı olmuştur. Bu makinanın manyetik alanların değiştirilmesine ve yüklenmesine verdiği cevap, Bölüm 9'da inceleyeceğimiz gerçek DA generator ve motorlarının davranışına oldukça benzerdir. Ancak gerçek motor ve generatörler doğrusal hareket etmez, dönmeye hareketi yapar. Gerçek DA makinaların anlaşılmasına doğru bir sonraki adım, olası dönen bir makinanın en basit örneğini incelemektir.

Olası bir temel DA makinası Şekil 8-1'de gösterilmektedir. Bu, makine belirli bir eksen etrafında dönebilen tek bir iletken çerçeveden oluşmaktadır. Makinanın dönen kısmı *rotor* ve duran kısmı *stator* olarak adlandırılır.

Makina için manyetik alan Şekil 8-1'de gösterilen stator üzerindeki kuzey ve güney manyetik kutuplarıyla sağlanır.

Rotordaki iletken çerçeveye ferromanyetik bir çekirdek üzerine oyulmuş bir