

## BÖLÜM 9 – DOĞRU AKIM MOTORLARI

### 1. DA Motorlarına Giriş

### 2. Bir DA Motorunun Eşdeğer Devresi

### 3. Doğru Akım Makinasının Mıknatıslanma Eğrisi

### 4. Serbest Uyarmalı ve Şönt (Paralel) DA Motorlar

- Şönt DA Motorun Uç Karakteristikleri
- Bir Şönt DA Motorunun Doğrusal Olmayan Analizi
- Şönt DA Motorlarının Hız Kontrolü
- *Endüvi Gerilimini Değiştirme*
- *Endüvi devresine seri bir direnç girme:*
- Açık Uyarma Devresinin Etkisi
- Kalıcı-Sürekli Mıknatıslı DA Motor

### 5. DA Motor)

### 6. Seri DA Motor

- *Seri DA Motorunda İndüklenen Moment:*
- *Seri DA Motorunun Uç Karakteristiği:*

### 7. Kompunt Doğru Akım Motoru

- Cumulatively (Eklemeli) Kompunt DA Motorunun Moment-Hız Karakteristikleri
- *Diferansiyel Kompunt Da Motorunun Moment-Hız Karakteristikleri*
- *Kompunt DA Motorların Doğrusal Olmayan Analizi*
- *Eklemeli Kompunt Motorda Hız Kontrolü*

### 8. DA Motor Yol Vericiler (Yol Verme Yöntemleri)

### 9. Ward-Leonard Sistemi ve Yarı İletkenlerle Hız Kontrolü

- Doğru Akım Motorlarında Hız Kontrol Yöntemleri
- Doğru Akım Motorunda Verim Hesaplamaları

## 8. DA MOTORLARINA GİRİŞ

Aynı fiziksel makina motor ya da generator olarak çalışabilir, basitçe bu durum; içinden akan gücün yönü meselesidir.

Doğru Akım motorları, hız regülasyonunda kendileriyle karşılaştırılır. Bir makinenin hız regülasyonu (SR:speed regulation) aşağıdaki gibi tanımlanır;

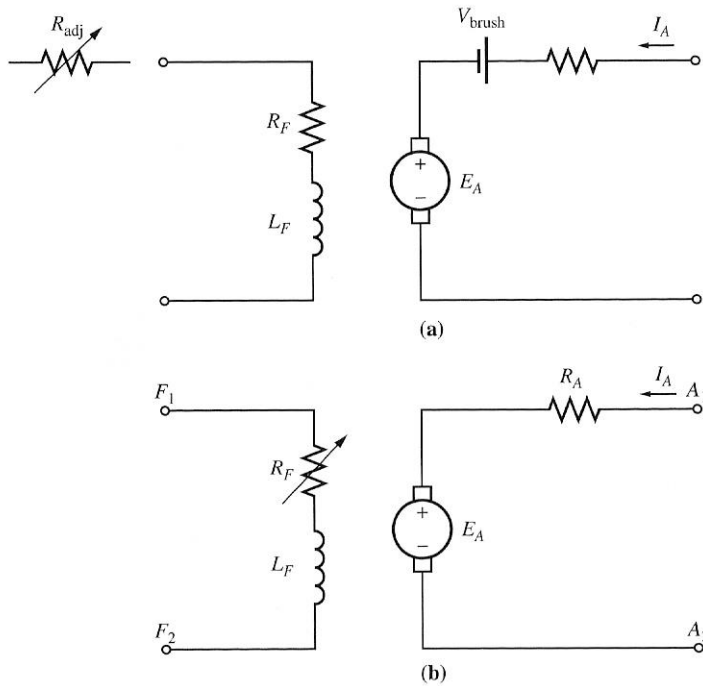
$$SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100 \quad SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100$$

Pozitif hız regülasyonu, motorun hızının artan yük ile düşmesi ve negatif hız regülasyonu, motorun hızının artan yük ile artması demektir.

DA motorları bir DA güç kaynağından beslenir-sürülür. Bir DA motoruna giriş geriliminin sabit olduğu varsayılır çünkü motorların analizini ve farklı motor tipleri arasında karşılaştırmayı kolaylaştırmaktadır. Genel olarak kullanımda beş ana tipte DA motoru vardır;

1. Serbest uyarmalı DA motoru
2. Şönt uyarmalı DA motoru
3. Kalıcı mıknatıslı DA motoru
4. Seri DA motoru
5. Kompund DA motoru

## 9. BİR DA MOTORUNUN EŞDEĞER DEVRESİ



Şekil 9.2.

- (a) DA motorun eşdeğer devresi  
 (b) Uyarma direnci ile  $R_{adj}$  'yi bir araya alarak ve fırça gerilim düşümünü ihmal ederek basitleştirilmiş eşdeğer devre.

Şekildeki bir DA motorun eşdeğer devresinde, endüvi devresi ideal bir gerilim kaynağı  $E_A$  ve bir direnç  $R_A$  ile gösterilmektedir. Bu gösterim gerçekte rotor bobinlerini, ara kutupları ve varsa kompanzasyon sargılarını kapsayacak şekilde tüm rotor yapısının Thevenin eşdeğeridir.

Generatördeki manyetik alanı üreten uyarma bobinleri  $L_F$  indüktansı ve  $R_F$  ise direnci temsil etmektedir. Ek direnç  $R_{adj}$  ise uyarma devresindeki akım miktarını control etmek için kullanılan harici bir değişken direnci gösterir.

Bu makinada üretilen iç gerilim aşağıdaki denklem ile verilir;

$$E_A = K\phi\omega$$

ve indüklenen moment değeri ise;

$$\tau_{ind} = K\phi I_A$$

Bu iki denklem, endüvi devresinin Kirshoff'un gerilim kanunu denklemi ve makinanın mıknatıslanma eğrisi bir DA motorun performans ve davranışını analiz etmek için yeterlidir.

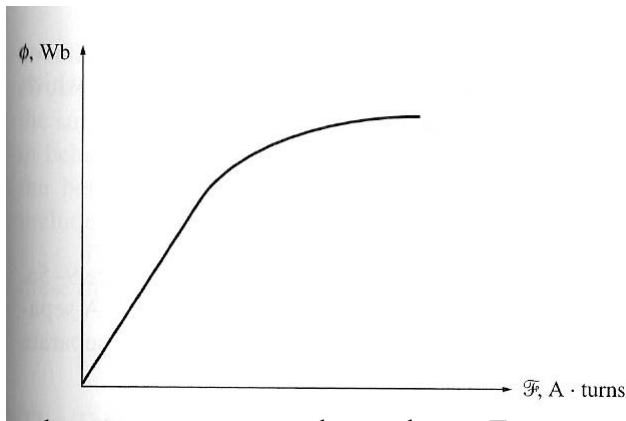
## 10. DOĞRU AKIM MAKİNASININ MİKNATISLANMA EĞRİSİ

Bir DA motor veya generatörünün içinde üretilen gerilim  $E_A$  gerilimi;

$$E_A = K\phi\omega$$

$E_A$  endüvi gerilimi, uyarma akısı ve dönme hızı ile doğru orantılıdır. Makinadaki uyarma akımı ile indüklenen gerilim nasıl ilişkilidir?

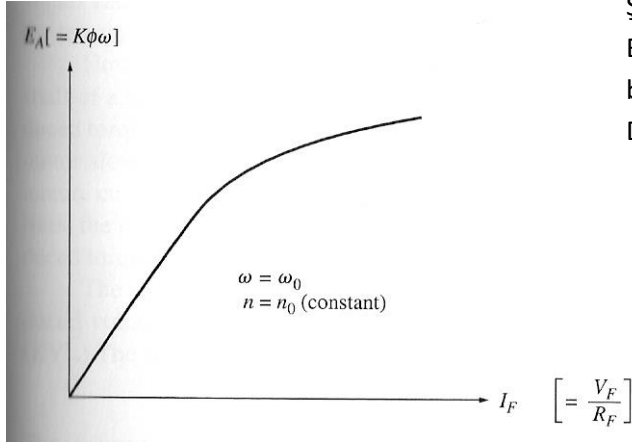
Bir DA makinasında uyarma akımı  $F=N_F I_F$  ile verilen bir manyetomotor kuvvet üretir. Bu mmf kendi mıknatıslanma eğrisine uyumlu makinada bir akı üretir (Şekil 9.3);



Şekil 9.3  
Bir ferromanyetik malzemenin  
mıknatıslanma eğrisi ( $\phi$ 'ye karşı  $\mathfrak{F}$ )

Uyarma akımı manyetomotor kuvvetle ve  $E_A$  manyetik akıya doğrudan orantılı olduğundan belirli bir  $\omega_o$  hızı için  $E_A$ 'ya karşı uyarma akımının bir çizimi olarak mıknatıslanma eğrisini vermek alışılmış bir durumdur (Şekil 9.4).

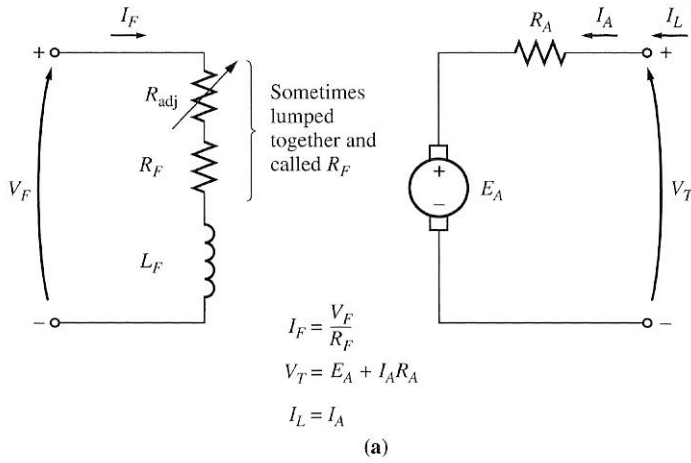
Burada problem, makinanın ağırlığı başına olası maksimum gücü elde etmek için, motor ve generatörlerin çoğu mıknatıslanma eğrisi üzerinde doyma noktasına yakın çalışmak üzere tasarlanmasıdır (eğrinin dirseğinde). Çalışma tam yük civarında iken  $E_A$ 'da küçük bir artış elde etmek için uyarma akımında oldukça büyük bir artış gerekmektedir.



Şekil 9-4

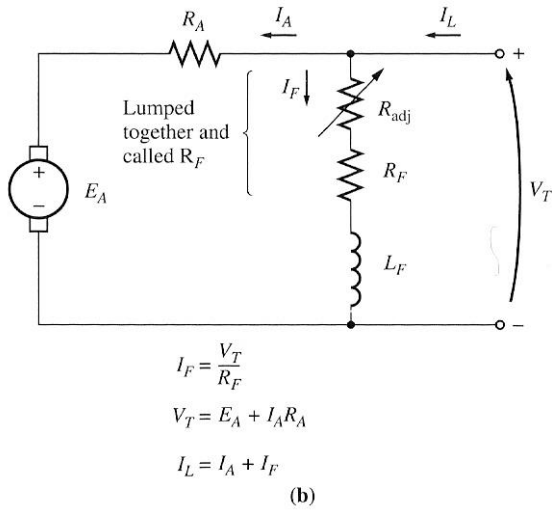
Belirli bir  $\omega_o$  hızı için  $E_A$  ya karşı  $I_F$ 'nin bir çizimi cinsinden ifade edilen bir DA makinanın mıknatıslanma eğrisi.

## 11. SERBEST UYARMALI VE ŞÖNT (PARALEL) DA MOTORLAR



Şekil 9-5.

a) Serbest uyarmalı DA motorun eşdeğer devresi



Şekil 9.5(b)

Şönt DA motorun eşdeğer devresi

Serbest uyarmalı bir DA motoru; alan (*uyarma*) devresi ayrı sabit gerilimli güç kaynağından beslenen bir motordur, şönt motor ise uyarma devresinin gücünü doğrudan motorun endüvi

uçlarından sağladığı bir motor türüdür. Motora uygulanan besleme gerilimi sabit kabul edildiği zaman bu iki makina arasında bir fark yoktur. Aksi belirtilmedikçe bir şönt motorun davranışı tanımlandığında serbest uyarmalı motorunkini de içerdiği kabul edilecektir.

Bu motorların endüvi devresi için Kirshoff'un gerilim kanunu aşağıdaki gibi yazılır;

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

### **Şönt DA Motorun Uç Karakteristikleri**

Bir makinanın uç karakteristiği makinanın çıkış büyüklüklerinin birbirlerine karşı çizimidir. Bir motor için çıkış büyüklükleri milindeki momenti ve hızıdır, böylece bir motorun uç büyüklükleri momente karşı hız grafiğinin çizimidir.

*Bir DA Şönt motor yüke karşı nasıl bir çıkış (tepki) üretir?*

Bir DA şönt motorun milindeki yükün arttırıldığını varsayalım. O halde yük momenti  $\tau_{load}$  makinada endüklenen  $\tau_{ind}$  momenti aşacaktır ve motor yavaşlamaya başlayacaktır. Motor yavaşlamaya başladığı zaman kendi içinde üretilen gerilim düşer ( $E_A = K\phi\omega \downarrow$ ), böylece motordaki endüvi akımı  $I_A = (V_T - E_A \downarrow)/R_A$  artar. Endüvi akımı yükselirken motordaki endüklenen moment artar ( $\tau_{ind} = K\phi I_A \uparrow$ ) ve sonuç olarak daha düşük bir  $\omega$  mekanik hızında endüklenen moment yük momentine eşit olacaktır.

Bir DC şönt motorun çıkış karakteristikleri; endüklenen gerilim ve motorun moment denklemleri ile Kirshoff'un gerilim kanunundan türetilir. Şönt motor için Kirshoff'un gerilim kanunu (KGK) denklemi aşağıdaki gibidir;

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

Endüklenen gerilim;  $E_A = K\phi\omega$ , böylece

$$V_T = K\phi\omega + I_A R_A$$

$\tau_{ind} = K\phi I_A$ , olduğundan  $I_A$  akımı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\phi}$$

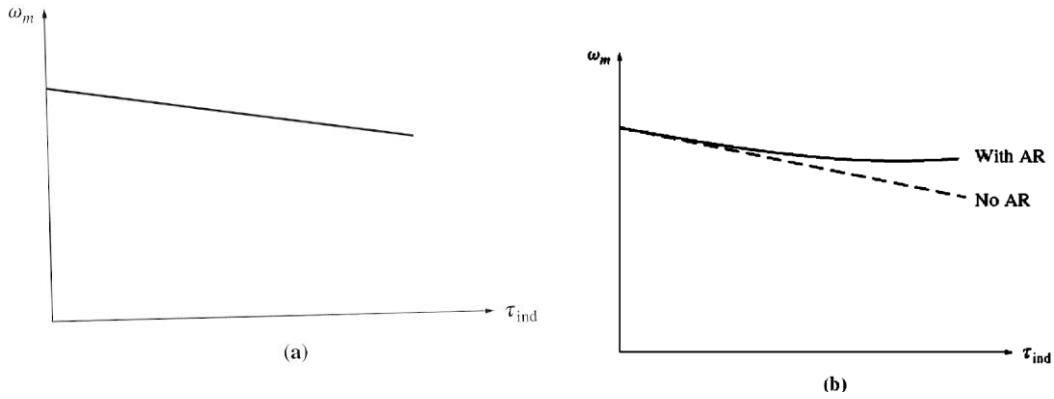
$V_T$  and  $I_A$  eşitliklerini birleştirdiğimizde aşağıdaki ifadeyi üretebiliriz;

$$V_T = K\phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\phi} R_A$$

Sonuç olarak motor hızı için çözdüğümüzde aşağıdaki denklem (9-7) elde edilir;

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{ind}$$

Bu denklem negatif eğimli bir doğrudur. Bir şönt DA motorun oluşan moment-hız karakteristiği aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 9-6.

- Endüvi reaksiyonunu elimine etmek için kompanzasyon sargılı serbest uyarmalı DA motor ve/veya bir şönt motorun moment-hız karakteristiği
- Endüvi reaksiyonunun mevcut olduğu motorun moment-hız karakteristiği

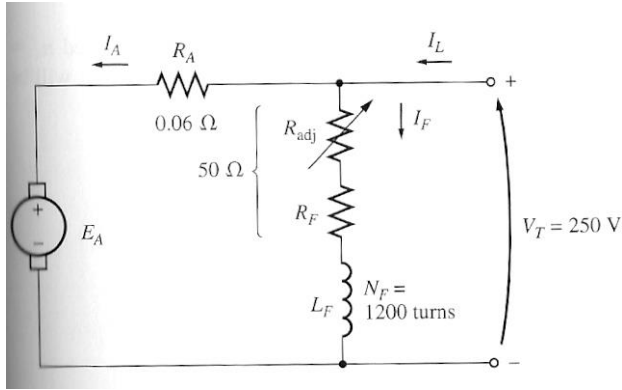
Motorun hızının moment ile doğrusal olarak değişmesini sağlamak önemlidir, bu ifadedeki digger terimler yük değişirken sabit olmalıdır. Bir DA güç kaynağı tarafından sağlanan uç gerilimi sabit kabul edilecektir, sabit değilse o zaman gerilim değişimleri moment-hız eğrisinin şeklini etkileyecektir.

Moment-hız eğrisinin şeklini etkileyen motorun içinden bir diğer etki endüvi reaksiyonudur. Bir motor endüvi reaksiyonuna sahipse, yükü artarken alan zayıflatma etkileri akıyı azaltacaktır. Denklem (9-7)'nin gösterdiği gibi endüvi reaksiyonu olmadan çalışacağı hız üzerinde belirli bir yükte akıdaki azalmanın etkisi, motorun hızında bir artış oluşturur. Endüvi reaksiyonu ile bir şönt motorun moment-hız karakteristiği Şekil 9(b)'de gösterilmektedir. Motor kompanzasyon sargılarına sahipse şüphesiz makinada alan zayıflatma problemleri olmayacak ve makinadaki akı sabit kalacaktır.

Bir şönt DA motoru kompanzasyon sargısına sahipse, *yükü dikkate almaksızın akısı sabit kalır* ve motorun hızı ve endüvi akımı yükün herhangi bir değerinde bilinirse, o zaman herhangi bir başka değerdeki hızı hesaplamak mümkündür. Yine bu yükteki endüvi akımı bilinir veya belirlenebilir.

### EXAMPLE 9.1

Bir 50 HP, 250 V, 1200 r/min (dev/dak)'lık kompanzasyon sargılı bir şönt motor 0.06  $\Omega$ 'luk bir endüvi direncine (fırçaları ve kompanzasyon sargılarını ve ara kutupları kapsayacak şekilde) sahiptir. Uyarma devresi boşta 1200 r/min üretecek şekilde  $R_{adj} + R_F = 50 \Omega$ 'luk toplam dirence sahiptir. Şönt uyarma sargısına kutup başına 1200 sarım vardır (Şekil 9-7);



- (a) Giriş akımı 100 A iken bu motorun hızını bulunuz.  
 (b) Giriş akımı 200 A iken bu motorun hızını bulunuz.  
 (c) Giriş akımı 300 A iken bu motorun hızını bulunuz.

**Çözüm:**

Devir/dakika cinsinden ifade edilen hızı ile bir DA makinasının endüklenen gerilimi aşağıdaki gibi verilir

$$E_A = K' \phi \omega$$

Makinadaki uyarma akımı sabit olduğundan ( $V_T$  ve uyarma direncinin her ikisi de sabit olduğundan) ve endüvi reaksiyonu etkileri olmadığından dolayı bu motordaki akı sabittir. İki farklı şartı da motorun içinde üretilen gerilim ve hızları arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{K' \phi n_2}{K' \phi n_1}$$

Belirli bir makina için sabit olduğundan  $K'$  sabiti ve  $\phi$  akısı yukarıda tanımlandığı gibi yok olur.

$$n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1$$

Boşta, endüvi akımı sıfırdır, böylece  $n_1 = 1200$  dev/dk iken  $E_{A1} = V_T = 250$  V olur. Herhangi bir digger yükte indüklenen gerilimi hesaplayabilirsek, denklem (9-9)'dan bu yükteki motor hızını belirlemek mümkün olacaktır.

a)

If  $I_L = 100$  A, then the armature current in the motor is

$$\begin{aligned} I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\ &= 100 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 95 \text{ A} \end{aligned}$$

Therefore,  $E_A$  at this load will be

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (95 \text{ A})(0.06 \Omega) = 244.3 \text{ V} \end{aligned}$$

The resulting speed of the motor is

$$n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{244.3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ r/min} = 1173 \text{ r/min}$$

b)

If  $I_L = 200$  A, then the armature current in the motor is

$$I_A = 200 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 195 \text{ A}$$

Therefore,  $E_A$  at this load will be

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (195 \text{ A})(0.06 \Omega) = 238.3 \text{ V} \end{aligned}$$

The resulting speed of the motor is

$$n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{238.3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ r/min} = 1144 \text{ r/min}$$

c)

If  $I_L = 300$  A, then the armature current in the motor is

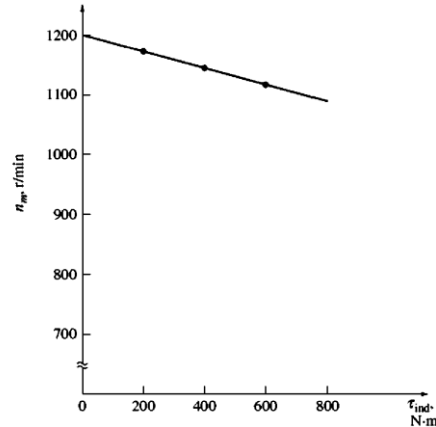
$$\begin{aligned} I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\ &= 300 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 295 \text{ A} \end{aligned}$$

Therefore,  $E_A$  at this load will be

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (295 \text{ A})(0.06 \Omega) = 232.3 \text{ V} \end{aligned}$$

The resulting speed of the motor is

$$n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{232.3 \text{ V}}{250 \text{ V}} 1200 \text{ r/min} = 1115 \text{ r/min}$$



- d) Bu motorun çıkış karakteristiğini çizmek için hızın her bir değerine karşılık gelen momenti bulmak gereklidir. Boşta indüklenen moment  $\tau_{ind}$  açıkça sıfırdır. Herhangi bir diğer yükte endüklenen moment DA motorda dönüştürülen gücün aşağıdaki gibi olduğu gerçeğinden hareketle bulunabilir.



$$P_{\text{conv}} = E_A I_A = \tau_{\text{ind}} \omega \quad (8-55, 8-56)$$

From this equation, the induced torque in a motor is

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{E_A I_A}{\omega} \quad (9-10)$$

Therefore, the induced torque when  $I_L = 100$  A is

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(244.3 \text{ V})(95 \text{ A})}{(1173 \text{ r/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/r})} = 190 \text{ N} \cdot \text{m}$$

The induced torque when  $I_L = 200$  A is

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(238.3 \text{ V})(95 \text{ A})}{(1144 \text{ r/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/r})} = 388 \text{ N} \cdot \text{m}$$

The induced torque when  $I_L = 300$  A is

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{(232.3 \text{ V})(295 \text{ A})}{(1115 \text{ r/min})(1 \text{ min}/60\text{s})(2\pi \text{ rad/r})} = 587 \text{ N} \cdot \text{m}$$

The resulting torque–speed characteristic for this motor is plotted in Figure 9–8.

### **Bir Şönt DA Motorunun Doğrusal Olmayan Analizi**

Akı  $\phi$  ve buradan DA makinasının içinde üretilen gerilim  $E_A$ , manyeto motor kuvvet (mmf)'inin doğrusal olmayan fonksiyonudur.

Dolayısıyla, bir makinadaki mmf'i değiştiren her şey makinanın endüklenen gerilimi üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye sahip olacaktır.  $E_A$  analitik olarak hesaplanamadığından dolayı makinanın mıknatıslanma eğrisi, belirli bir mmf için  $E_A$  gerilimini doğru olarak belirlemek amacıyla kullanılır. Makinadaki mmf'e iki ilkesel katkı, uyarma akımı ve varsa endüvi reaksiyonudur.

Mıknatıslanma eğrisi belirli bir  $\omega_0$  hızı için  $E_A$ 'nın  $I_F$  ye karşı değişimidir ve makinanın uyarma akımını değiştirmenin etkisi, kendi mıknatıslanma eğrisinden doğrudan belirlenebilir.

Makina endüvi reaksiyonuna sahipse de, akısı yükteki her bir artış ile azalacaktır. Bir DA şönt motorda toplam mmf uyarma devresi mmf'i ile endüvi reaksiyonu mmf'inden (AR:armature reaction) farkına eşittir;

$$F_{\text{net}} = N_F I_F - F_{AR}$$

Mıknatıslanma eğrisi;  $E_A$ 'nın uyarma akımına karşı çizimi olarak ifade edildiğinden dolayı makinadaki tüm mmf'lerin bir kombinasyonu ile aynı çıkış gerilimini üretecek olan eşdeğer uyarma akımını tanımlamak, alışılmış bir durumdur. Mıknatıslanma eğrisinde, bu eşdeğer uyarma akımını yerleştirerek oluşan gerilim  $E_A$  belirlenebilir. Bir DA şönt motorun eşdeğer uyarma akımı aşağıdaki gibi verilir;

$$I_F^* = I_F - \frac{F_{AR}}{N_F}$$

Doğrusal olmayan analiz bir DA motorunun endüklenen gerilimini belirlemek için kullanıldığı zaman, bir diğer etki göz önüne alınmalıdır. Mıknatıslanma eğrileri belirli bir hız için, umumiyetle de makinanın nominal hızı için çizilir. Motor nominal hızdan başka bir hızda çalışıyorsa belirli bir uyarma akımının etkisi nasıl belirlenebilir. Hız dev/dak cinsinden ifade edildiği zaman bir DA makinasında endüklenen gerilimin denklemi aşağıdaki gibidir;

$$E_A = K' \phi n$$

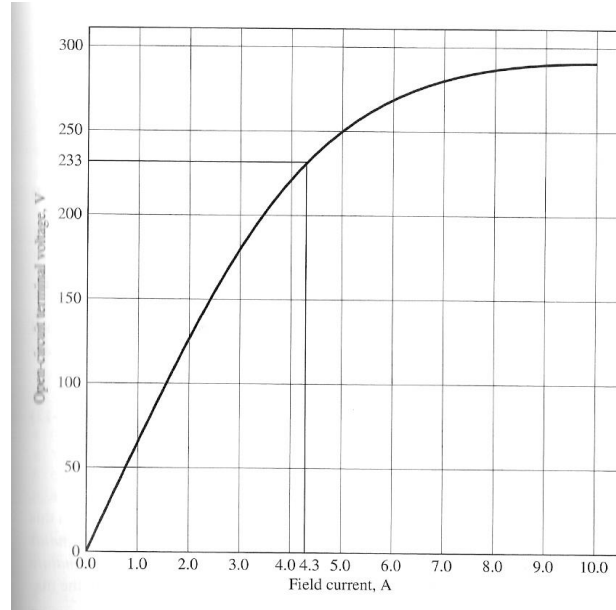
Belirli etkin bir uyarma akımı için makinadaki akı belirlenir, böylece endüklenen gerilim aşağıdaki gibi hızla ilişkilendirilir;

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n}{n_0}$$

Burada,  $E_{A0}$  ve  $n_0$  sırasıyla gerilim ve hızın referans değerlerini temsil eder. Mıknatıslanma eğrisinden referans şartlar bilinirse ve gerçek  $E_A$  Kirshoff'un gerilim kanunundan bilinirse, bu durumda yukarıdaki denklem (9-13)'den gerçek hız  $n$ 'yi belirlemek mümkündür.

### **EXAMPLE 9.2**

Bir 50 HP, 250 V, 1200 r/min'lık kompanzasyon sargısız bir DA şönt motor 0.06  $\Omega$ 'luk bir endüvi direncine sahiptir (fırça ve ara kutupları kapsayacak şekilde). Uyarma devresi boşa 1200 dev/dk'lık hız üreten  $R_{adj} + R_F = 50 \Omega$ 'luk toplam dirence sahiptir. Şönt uyarma sargısında kutup başına 1200 sarım vardır ve endüvi reaksiyonu 200 A'lık bir yük akımında 840 A-sarımlık bir mıknatıslanma çözücü mmf üretir. Bu makinanın mmf eğrisi Şekil 9-9'da gösterilmektedir.



Şekil 9.9. Tipik bir 250 V'luk bir DA motorun mıknatıslanma eğrisi, 1200 Dev/dk'lık hızda alınmıştır.

- (a) Giriş akımı 200 A olduğu zaman bu motorun hızını bulunuz
- (b) Bu motor kompanzasyon sargılarının olmaması dışında problem (9-1)'deki motor ile temelde özdeştir. 200 A'lık bir yük akımında önceki motorunki ile hızını nasıl karşılaştırırsınız?
- (c) Bu motor için moment-hız karakteristiğini çizin ve hesaplayınız.

### **Cözüm:**

a)

If  $I_L = 200$  A, then the armature current of the motor is

$$\begin{aligned} I_A &= I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F} \\ &= 200 \text{ A} - \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 195 \text{ A} \end{aligned}$$

Therefore, the internal generated voltage of the machine is

$$\begin{aligned} E_A &= V_T - I_A R_A \\ &= 250 \text{ V} - (195 \text{ A})(0.06 \Omega) = 238.3 \text{ V} \end{aligned}$$

At  $I_L = 200$  A, the demagnetizing magnetomotive force due to armature reaction is  $840 \text{ A} \cdot \text{turns}$ , so the effective shunt field current of the motor is

$$\begin{aligned} I_F^* &= I_F - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \\ &= 5.0 \text{ A} - \frac{840 \text{ A} \cdot \text{turns}}{1200 \text{ turns}} = 4.3 \text{ A} \end{aligned} \quad (9-12)$$

From the magnetization curve, this effective field current would produce an internal generated voltage  $E_{A0}$  of 233 V at a speed  $n_0$  of 1200 r/min.

We know that the internal generated voltage  $E_{A0}$  would be 233 V at a speed of 1200 r/min. Since the actual internal generated voltage  $E_A$  is 238.3 V, the actual operating speed of the motor must be

$$\begin{aligned} \frac{E_A}{E_{A0}} &= \frac{n}{n_0} \\ n &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 = \frac{238.3 \text{ V}}{233 \text{ V}} (1200 \text{ r/min}) = 1227 \text{ r/min} \end{aligned} \quad (9-13)$$

b)

At 200 A of load in Example 9-1, the motor's speed was  $n = 1144$  r/min. In this example, the motor's speed is 1227 r/min. Notice that the speed of the motor with armature reaction is higher than the speed of the motor with no armature reaction. This relative increase in speed is due to the flux weakening in the machine with armature reaction.

c)

### **Şönt DA Motorlarının Hız Kontrolü**

Bir Şönt DA makinasının hız kontroölünde yaygın olarak kullanılan iki kontrol yöntemi vardır;

1. Uyarma direnci  $R_F$ 'yi ayarlayarak (ve böylece uyarma akısını)
2. Endüviye uygulanan uç gerilimini ayarlayarak.

En az kullanılan hız control yöntemi;

3. Endüvi devresine seri direnç girerek gerçekleştirilen yöntemdir.

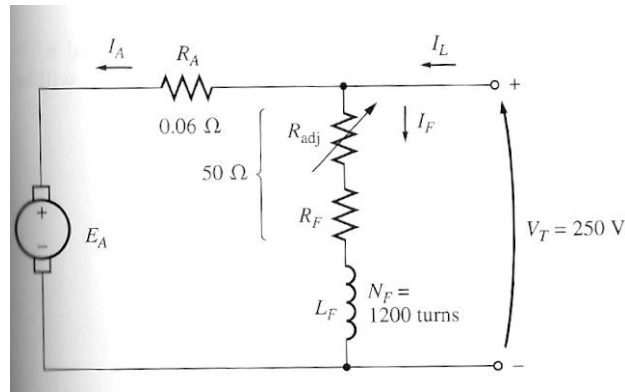
Uyarma Direncini değiştirme

Uyarma direnci arttırılırsa, uyarma akımı azalır ( $I_F \downarrow = V_T/R_F \uparrow$ ) ve uyarma akımı azalırken akı  $\phi$  onunla azalır. Akıdaki bir azalma makinanın endüvi akımında büyük bir artmaya neden olan endüklenen gerilimde anlık olarak bir azalmaya neden olur  $E_A \downarrow (=K\phi\omega)$ , çünkü,

$$I_A \uparrow = \frac{V_T - E_A \downarrow}{R_A}$$

Bir motorda endüklenen moment  $\tau_{ind} = K\phi I_A$  ile verilir. Bu makinadaki akı  $I_A$  akımı artarken azaldığından dolayı hangi yol indüklenen momenti değiştirir?

Aşağıdaki problem bu konuda bizi bilgilendirmektedir;



Yukarıdaki şekilde 0.25Ω'lık iç dirençli bir şönt DA motoru gösterilmektedir. Motor hali hazırda 250 V'luk bir uç geriliminde çalışmakta ve indüklenen gerilim 245 V'tur. Dolayısıyla endüvi akım artışı,

$$I_A = (250V - 245V)/0.25\Omega = 20 \text{ A}$$

Akıdaki yüzde 1'lik bir azalma varsa bu durum motorda nasıl bir durum oluşturur? Eęer akı %1 azalırsa, o zaman  $E_A$  %1 azalmalıdır çünkü  $E_A = K\phi\omega$ 'dır. Dolayısıyla  $E_A$  aşağıdaki değere düşecektir;

$$E_{A2} = 0.99 E_{A1} = 0.99 (245) = 242.55V$$

Bu durumda endüvi akımı aşağıdaki değere yükselir;

$$I_A = (250 - 242.55)/0.25 = 29.8 \text{ A}$$

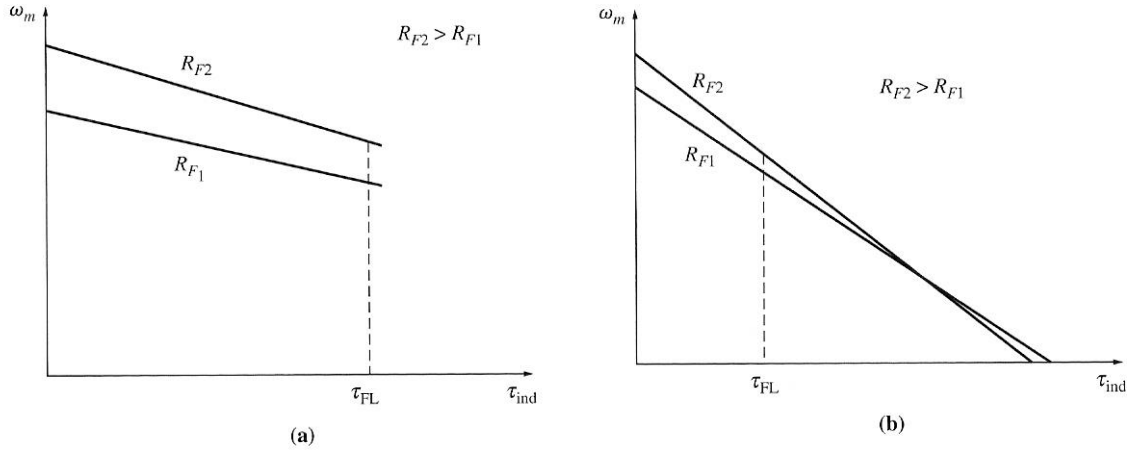
Böylece akıdaki %1'lik azalış endüvi akımındaki %49'luk bir artış üretir.

Böylece baştaki tartışmaya geri dönersek, akıdaki artış akıdaki azalma üzerinde hakimdir ve indüklenen moment yükselir;  $\tau_{ind} = K\phi I_A$ . Böylece  $\tau_{ind} > \tau_{load}$  olduğundan dolayı motor hızlanır.

Bununla birlikte motor hızlanırken indüklenen gerilim  $E_A$ 'nın artması  $I_A$ 'nın azalmasına sebep olur.  $I_A$  azalırken indüklenen moment  $\tau_{ind}$  azalır ve sonuçta  $\tau_{ind}$  yine sürekli durum hızında orijinalinden daha yüksek bir hızda  $\tau_{load}$ 'a eşit olur.

Bu yöntem ile hız kontrolünde ortaya çıkan neden ve etki davranışını özetlersek;

1.  $R_F$  yi arttırmak  $I_F (= V_T / R_F)$ 'nin azalmasına neden olur.
2. Azalan  $I_F$ ,  $\phi$ 'yi azaltır.
3. Azalan  $\phi$ ,  $E_A (= K\phi\omega)$ 'y1 azaltır.
4. Azalan  $E_A$ ,  $I_A (= (V_T - E_A) / R_A)$ 'y1 arttırır.
5.  $I_A$ 'nın artması  $I_A$ 'daki değişim ile akıdaki değişim üzerine baskın,  $\tau_{ind} (= K\phi I_A)$ 'y1 arttırır.
6.  $\tau_{ind}$  artması ile  $\tau_{ind} > \tau_{load}$  olur ve hız  $\omega$  artar.
7. Artma tekrar  $E_A (= K\phi\omega)$ 'y1 arttırır.
8.  $E_A$ 'nın artması  $I_A$ 'y1 azaltır.
9.  $I_A$ 'nın azalması  $\omega$  yüksek hızında  $\tau_{ind} = \tau_{load}$  olana kadar azalır.



Şekil 9-12. Bir şönt motorun moment-hız karakteristiğinde uyarma direnci hız kontrolünün etkisi

- a) Motorun normal çalışma aralığında
- b) Boşta çalışmadan durmaya kadar olan tüm aralıkta.

Makinadaki akı artarken motorun boştaki hızı azalır bu esnada moment-hız eğrisinin eğimi daha dik olurken, motorun boştaki hızının arttığına dikkat ediniz. Doğal olarak  $R_F$  azalması tüm süreci tersine çevirecektir ve motorun hızı düşecektir.

*Uyarma Direnci Hız Kontrolü Hakkında Bir Uyarı:*

Makinadaki akı artarken motorun boştaki hızı azalır bu esnada moment-hız eğrisinin eğimi daha da dikleşir. Bu şekil motorun uç-çıkış karakteristiklerini tarif eden aşağıdaki denklemin bir neticesidir;

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{ind}$$

Yukarıdaki denklemde boştaki hız motordaki akıyla ters orantılıdır. Eğrinin eğimi akının karesiyle ters orantılı olduğunda, akıdaki azalma moment-hız eğrisinin eğimini daha dik yapar.

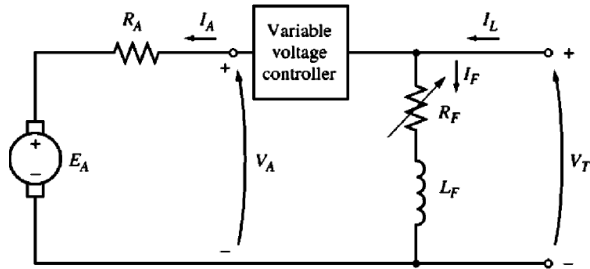
Şekil 9-12(b)'de çok düşük hızlarda uyarma direncindeki bir artış motor hızını gerçekten azaltır. Bu etki çok düşük hızlarda olduğundan dolayı  $E_A$ 'daki azalmadan doğan endüvi akımındaki artış indüklenen moment denklemindeki akıdaki azalmanın dengelenmesi için çok fazla yeterli değildir. Akıdaki azalmanın endüvi akımındaki artıştan daha büyük olması ile indüklenen moment azalır ve motor yavaşlar.

Kontrol amaçları için kullanılan bazı küçük DA motorları durma şartlarına çok yakın yani çok düşük hızlarda çalışırlar. Bu motorlar için uyarma direncindeki bir artış etkisizdir veya motorun hızını azaltabilir. Sonuçlar kestirilemez olduğundan uyarma direnciyle hız kontrolü bu tip motorlarda kullanılmaz. Bunun yerine endüvi gerilim ile hız kontrol yöntemi kullanılmalıdır.

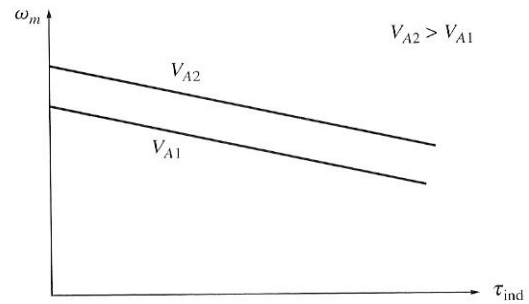
### Endüvi Gerilimini Değiştirme

Bu yöntem, uyarma sargılarına uygulanan gerilimi değiştirmeksizin motorun endüvisine uygulanan gerilimi değiştirerek gerçekleştirilir. Aslında endüvi gerilim kontrolünü kullanmak için motorun serbest uyarımalı olması gerekir (Şekil 9.13).

$V_A$  gerilimi arttırılırsa motordaki endüvi akımı artmalıdır [ $I_A = (V_A - E_A)/R_A$ ].  $I_A$  artarken indüklenen moment  $\tau_{ind} > \tau_{load}$  yaparak,  $\tau_{ind} = K\phi I_A$  ve motorun  $\omega$  hızı artar. Fakat  $\omega$  hızı artarken, içeride üretilen gerilim endüvi akımının azalmasına neden olarak  $E_A (=K\phi\omega)$  artar.  $I_A$ 'daki bu azalma daha yüksek bir dönme hızında  $\tau_{ind} = \tau_{load}$  neden olarak indüklenen momentini azaltır.



Şekil 9-13. Bir şönt (veya serbest uyarımalı) DA Motorun endüvi gerilimi kontrolü ( $V_A$  değişken)



Şekil 9-14. Bir şönt motorun moment-hız karakteristiği üzerinde endüvi gerilimi ile hız kontrolünün etkisi

$V_A$  artarsa  $I_A$  artar,  $I_A$  artarsa  $\tau_{ind}$  artar,  $\tau_{ind}$  artarsa  $\tau_{ind} > \tau_{load}$  yaparak hızı arttırır,  $\omega$  artarsa  $E_A$  artar,  $E_A$  artarsa  $I_A$  azalır,  $I_A$  azalırsa  $\tau_{ind}$  azalır.

### Endüvi devresine seri bir direnç girme:

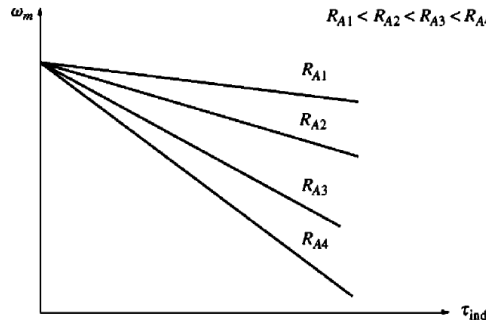
Endüvi devresine seri bir direnç eklenirse motor yüklendiğinde daha yavaş çalışmasına neden olarak, motorun moment-hız karakteristiğinin eğimi büyük ölçüde artar. Bu aşağıdaki denklemden görülebilir;

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{ind}$$

Direnç ekleme hız kontrolü için mürşif (kayıp miktarını arttıran) bir yöntemdir, çünkü eklenen dirençteki kayıplar gereksiz ve çok büyüktür, bu nedenle az tercih edilir. Motorun kendi çalışma zamanının tümünü hemen tam yükte harcadığı veya hangi hız kontrol yönteminin en ucuzu olduğu değerlendirmesi sadece uygulamalarda görülecektir.

Uyarma Direnci Kontrolü:

Uyarma Direnci kontrolünde bir şönt (veya serbest uyarımlı) DA motorunda, düşük uyarma akımı motoru daha hızlı ve yüksek uyarma (alan) akımı ise daha yavaş döndürür. Uyarma akımındaki bir artış hızda azalmaya neden olduğundan dolayı uyarma devresi kontrolüyle ulaşılabilir bir minimum hız daima vardır. Bu minimum hız motorun uyarma devresinden akan maksimum izin verilen akıma ulaşıldığı zaman oluşur.



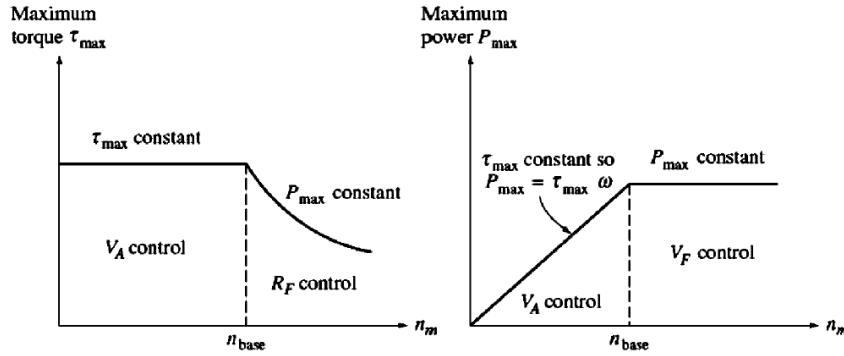
Şekil 9-15. Bir şönt motorun moment-hız karakteristiği üzerinde endüvi direnci hız kontrolünün etkisi

Bir motor kendi nominal uç geriliminde, gücünde ve uyarma akımında çalışıyorsa, o zaman temel (nominal) hızda dönecektir. *Uyarma direnci kontrolü temel hızın üstündeki hızlar için motorun hızını kontrol edebilir ama temel hızın altındaki hızlar için uygun değildir.* Uyarma devresi kontrolüyle temel hızın altındakinden daha düşük hızlara ulaşmak için aşırı uyarma akımı gerekecektir, bu da muhtemelen uyarma sargılarını yakacaktır.

*Endüvi gerilimi kontrolünde, serbest uyarımlı bir DA motorunda düşük endüvi gerilimi motoru daha yavaş ve yüksek endüvi gerilimi daha hızlı döndürecektir.* Endüvi geriliminin değeri nominal seviyeye kadar artırılabilir. Bir motor kendi nominal uç geriliminde, gücünde ve uyarma akımında çalışıyorsa temel hızda dönecektir. Endüvi gerilimi kontrolü temel hızın altındaki hızlar için iyi çalışır, uyarma akımı (veya direnci) kontrolü temel hızın üstündeki hızlarda iyi çalışır.

Bu iki hız kontrol tekniği açıkça birbirini tamamlayıcıdır. *Endüvi gerilimi kontrolü temel hızın altındaki hızlar için iyi çalışır ve uyarma direnci veya uyarma akımı kontrolü temel hızın üzerindeki hızlar için iyi çalışır.* Aynı motorda bu iki yöntemi bir arada kullanarak 40:1 veya

daha fazla hız değişim aralığı elde etmek mümkündür. Şönt ve serbest uyarımalı motorlar mükemmel hız kontrol karakteristiklerine sahiptirler.



Şekil 9-16. Endüvi gerilim ve uyarma direnci kontrolü altında bir şönt motor için hızın bir fonksiyonu olarak güç ve moment sınırları.

Bu iki hız kontrol tipi altındaki makinada moment ve güç sınırlarında anlamlı fark vardır. Endüvi akımının  $I_A$  büyüklüğünün üzerinde bir üst sınır koyan endüvi iletkenlerinin ısınmasıdır. Endüvi geriliminin kontrolü için motordaki akı sabit tutulur, böylece motordaki maksimum moment aşağıdaki gibi olur;

$$\tau_{max} = K \phi I_{A,max}$$

Bu maksimum moment, motorun dönüş hızına bakmaksızın sabittir. Motorun çıkış gücü;

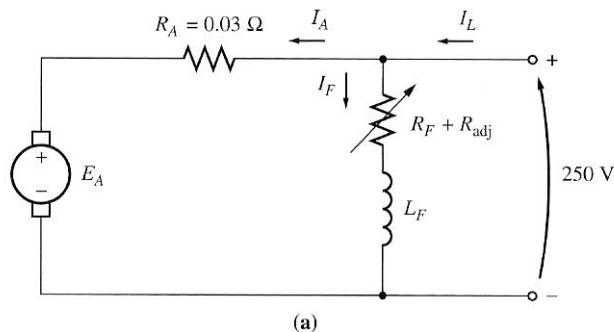
$$P_{max} = \tau_{max} \omega$$

Böylece motorun maksimum çıkış gücü endüvi gerilimi kontrolü altında çalışma hızına doğrudan orantılıdır.

Diğer taraftan uyarma direnci kontrolü kullanıldığı zaman akı değişir. Bu tarz bir kontrolde hız artışı makinanın akısındaki azalma nedeniyledir. Endüvi akım sınırının aşılmasından kaçınılması için indüklenen moment sınırı motorun hızı artarken azalmalıdır. Motorun çıkış gücü  $P = \tau \omega$  ile verildiğinden ve moment sınırı motorun hızı artarken azaldığından dolayı, maksimum moment, motorun hızının tersiyle değişirken, uyarma akım kontrolü altındaki bir DA motorun maksimum çıkış gücü sabit kalır.

Hızın bir fonksiyonu olarak güvenli bir çalışma için şönt DA motorunun bu güç ve moment sınırlamaları Şekil 9.19'da gösterilmektedir.

### EXAMPLE 9.3





Yukarıdaki Şekil 9-17(a)'da, 100 hp, 250 V, 1200 dev/dak (r/min)'lık  $0.03 \Omega$  endüvi direncine ve  $41.67 \Omega$  uyarma direncine sahip bir şönt DA motorunu göstermektedir. Motor kompanzasyon sargılarına sahiptir böylece endüvi reaksiyonu etkileri ihmal edilebilir. Mekanik ve çekirdek kayıpları bu problemin amaçlarına göre ihmal edilebilir. Motor 126 A'lık bir hat akımı ile bir yükü döndürmektedir ve 1103 dev/dk'lık bir başlangıç hızına sahiptir. Problemi basitleştirmek için endüvi akım miktarının motor tarafından sabit kaldığını kabul edelim;

- (a) Makinanın mıknatıslanma eğrisi Şekil 9-9'da gösterildiği gibiyse uyarma direnci  $50 \Omega$ 'a çıkarıldığı zaman motorun hızı ne olur?

### **Cözüm:**

The motor has an initial line current of 126 A, so the initial armature current is

$$I_{A1} = I_{L1} - I_{F1} = 126 \text{ A} - \frac{150 \text{ V}}{41.67 \Omega} = 120 \text{ A}$$

Therefore, the internal generated voltage is

$$\begin{aligned} E_{A1} &= V_T - I_{A1}R_A = 250 \text{ V} - (120 \text{ A})(0.03 \Omega) \\ &= 246.4 \text{ V} \end{aligned}$$

After the field resistance is increased to  $50 \Omega$ , the field current will become

$$I_{F2} = \frac{V_T}{R_F} = \frac{250 \text{ V}}{50 \Omega} = 5 \text{ A}$$

The ratio of the internal generated voltage at one speed to the internal generated voltage at another speed is given by the ratio of Equation (8-41) at the two speeds:

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{K'\phi_2 n_2}{K'\phi_1 n_1} \quad (9-16)$$

Because the armature current is assumed constant,  $E_{A1} = E_{A2}$ , and this equation reduces to

$$1 = \frac{\phi_2 n_2}{\phi_1 n_1}$$

or

$$n_2 = \frac{\phi_1}{\phi_2} n_1 \quad (9-17)$$

A magnetization curve is a plot of  $E_A$  versus  $I_F$  for a given speed. Since the values of  $E_A$  on the curve are directly proportional to the flux, the ratio of the internal generated voltages read off the curve is equal to the ratio of the fluxes within the machine. At  $I_F = 5 \text{ A}$ ,  $E_{A0} = 250 \text{ V}$ , while at  $I_F = 6 \text{ A}$ ,  $E_{A0} = 268 \text{ V}$ . Therefore, the ratio of fluxes is given by

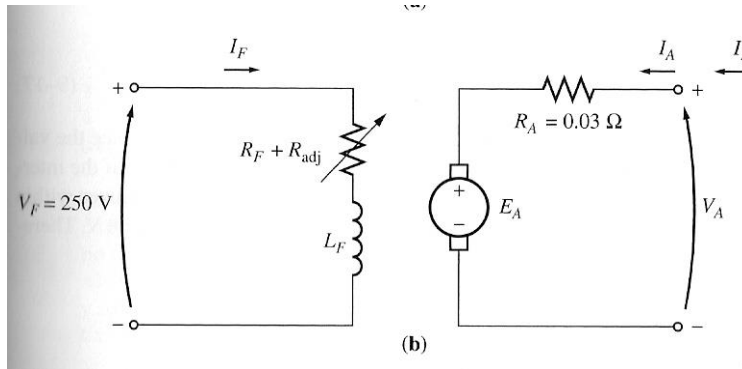
$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{268 \text{ V}}{250 \text{ V}} = 1.076$$

and the new speed of the motor is

$$n_2 = \frac{\phi_1}{\phi_2} n_1 = (1.076)(1103 \text{ r/min}) = 1187 \text{ r/min}$$

### **EXAMPLE 9.4**

Problem 9.3'deki motor şimdi serbest uyarmalı olarak aşağıda gösterildiği gibi bağlanmıştır. Motor başlangıçla  $V_A = 250 \text{ V}$ ,  $I_A = 120 \text{ A}$ , ile sabit yük momentini beslerken  $n = 1103 \text{ r/min}$ 'da çalışmaktadır.  $V_A$ , 200 V'a düşürülürse bu motorun hızı ne olacaktır?



### Çözüm:

The motor has an initial line current of 120 A and an armature voltage  $V_A$  of 250 V, so the internal generated voltage  $E_A$  is

$$E_A = V_T - I_A R_A = 250 \text{ V} - (120 \text{ A})(0.03 \Omega) = 246.4 \text{ V}$$

By applying Equation (9-16) and realizing that the flux  $\phi$  is constant, the motor's speed can be expressed as

$$\begin{aligned} \frac{E_{A2}}{E_{A1}} &= \frac{K' \phi_2 n_2}{K' \phi_1 n_1} & (9-16) \\ &= \frac{n_2}{n_1} \\ n_2 &= \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 \end{aligned}$$

To find  $E_{A2}$  use Kirchhoff's voltage law:

$$E_{A2} = V_T - I_{A2} R_A$$

Since the torque is constant and the flux is constant,  $I_A$  is constant. This yields a voltage of

$$E_{A2} = 200 \text{ V} - (120 \text{ A})(0.03 \Omega) = 196.4 \text{ V}$$

The final speed of the motor is thus

$$n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{196.4 \text{ V}}{246.4 \text{ V}} 1103 \text{ r/min} = 879 \text{ r/min}$$

### Açık Uyarma Devresinin Etkisi

Uyarma direnci arttırılırken motorun hızı onunla birlikte arttırılır. Bu etki uyarma direnci sonuna kadar gerçekten arttırılırsa ne olacaktır? Motor çalışırken uyarma devresi açık devre olursa ne olacaktır?

Önceki tartışmadan, makinadaki akı önemli ölçüde azalacak, her şekilde makinadaki akı düşecek ve  $E_A$ 'da onunla beraber düşecektir. Bu endüvi akımında çok ciddi bir artışa neden olacaktır ve oluşacak indüklenen moment motordaki yük momentinden biraz daha yüksek olacaktır. Dolayısıyla motorun hızı yükselmeye ve böylece devam edecektir.

DA motor yol verme ve koruma devrelerinde uyarma kaybı rölesi normal olarak uyarma akımı kesildiğinde motoru hattan ayırmaktadır. Benzer bir etki kendi endüvi reaksiyonu etkileri yeterince şiddetli ise düşük uyarda çalışan sıradan şönt DA motorlarda oluşabilir. Bir DA

motorundaki endüvi reaksiyonu şiddetli ise yükteki bir artış gerçekte motorun hızının yükselmesine neden olan akısını zayıflatabilir. Birçok yük moment hız ile artarken motorun hızının artması için endüvi reaksiyonu artan, akısını azaltarak, moment-hız eğrilerine sahiptirler. Zayıf akı hızda daha fazla artışa neden olur ve böylece motor aşırı hızlara gider, bu duruma **kaçma** denir.

## 12. THE PERMANENT-MAGNET DC MOTOR (KALICI-SÜREKLİ MIKNATISLI DA MOTOR)

Bir permanent magnet DA motor (PMDC), kutupları kalıcı mıknatıslardan oluşan bir DA motorudur. Kalıcı mıknatıslı DA motorları bazı uygulamalarda şönt DA motorlarına kıyasla daha yararlıdır.

*Avantajları:* Harici bir uyarma deresine ihtiyaç olmadığından uyarma devresi bakır kayıpları yoktur. Uyarma sargısı istenmediğinden dolayı dengi şönt motorlardan boyutu daha küçüktür. Hacim ve güç değeri olarak küçük motor istekleri durumunda çok yaygın kullanılır.

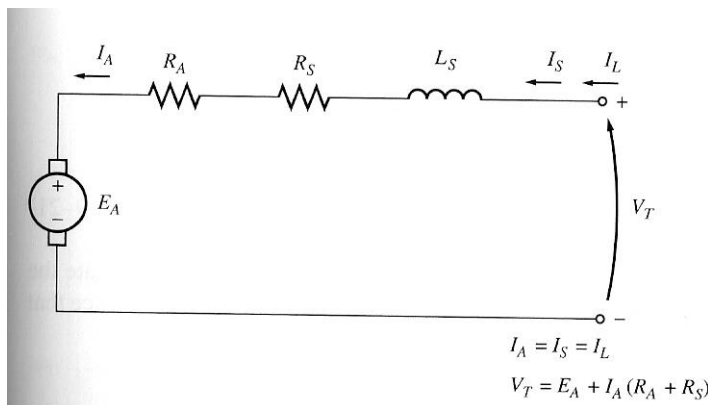
*Dezavantajları:* Kalıcı mıknatıslar dışarıdan beslenen şönt uyarda olduğu gibi yüksek akı yoğunluğu üretmez. Böylece PMDC motor aynı boyut ve yapıdaki bir şönt motordan  $I_A$  endüvi akımı başına daha düşük momente  $\tau_{ind}$  sahiptir. Ayrıca PMDC motor mıknatıssızlaşma riski ile çalışır.

Bir PMDC motorun hızını kontrol etmek için sadece endüvi geriliminin kontrolü veya endüvi direncine ilave direnç yerleştirilerek ayarlanmasıdır.

*Şekil 9.19. Tipik bir ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi*

## 13. SERİ DA MOTOR

Seri bir DA motoru eşdeğer devresi aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, uyarma sargıları endüvi devresine seri bağlı, göreceli olarak birkaç sarımdan ibaret bir DA motorudur.



Şekil 9-20. Seri DA motorunun eşdeğer devresi

Bu motorun endüvi ve uyarma devresi akımı aynıdır. Kirshoff'un gerilim kanunu denklemi şu şekildedir;

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S) \quad (9-18)$$

Seri DA Motorunda İndüklenen Moment:

Seri bir DA motorunun uç karakteristiği, şönt DA motorunkinden çok farklıdır. Seri DA motorun temel davranışı, en azından doymaya ulaşana kadar akının endüvi akımıyla doğrudan orantılı olması gerçeğinden kaynaklanır. Motordaki yük artarken akısı da artar. Önceden görüldüğü gibi motor akısındaki artış, motor hızında azalmaya neden olur. Sonuç, seri motorun keskin düşen bir moment-hız karakteristiğine sahip olmasıdır.

İndüklenen moment;

$$\tau_{ind} = K\phi I_A \quad (9-19)$$

Bu makinada akı endüvi akımıyla doğrudan orantılıdır (en azından çekirdek doyana kadar). Dolayısıyla makinadaki akı şu şekildedir;  $\phi = cI_A$ ,  $c$  orantı sabitidir. Makinada üretilen moment;

$$\tau_{ind} = K\phi I_A = KcI_A^2 \quad (9-20)$$

Motor momenti endüvi akımının karesiyle orantılıdır. Seri DA motor diğer DA motorlardan amper başına daha fazla moment verir. Böylece çok fazla moment gereken uygulamalarda seri motor kullanılır; arabalardaki yol verme motorları, asansör motorları ve lokomotifler gibi.

Seri DA Motorunun Uç Karakteristiği:

Bir seri DA motorun uç karakteristiğini belirlemek için doğrusal mıknatıslanma eğrisi kabulüne dayalı analiz yapılacak ve sonra da doyum etkileri analiz edilecektir. Doğrusal mıknatıslanma eğrisi kabulü gereği denklem;  $\phi = cI_A$  olacaktır. Moment hız eğrisini türetmek için bu denklem kullanılacaktır.

*Moment-hız eğrisi karakteristiğinin türetilmesi için;*

1. Kirshoff'un gerilim kanunu;  $V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$
2. Denklem (9-20)'den endüvi akımı;  $I_A = \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}$
3. Böylece,  $E_A = K\phi\omega$ , bu ifadeleri yukarıdaki Kirshoff denklemi (9-18)'de yerleştirirsek;

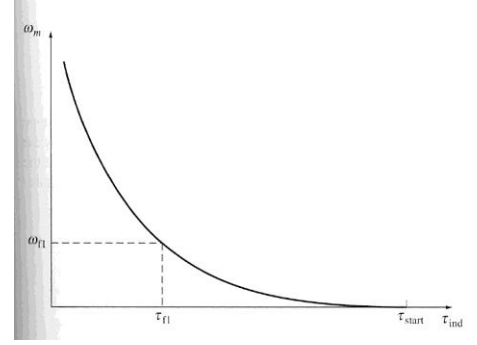
$$V_T = K\phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S)$$

4. Akı bu ifadeden çıkarılabilirse, motorun momenti ile hızı doğrudan ilişkilendirilecektir. Denklemden akıyı yok etmek için;  $I_A = \phi/c$  ve  $\tau_{ind} = (K/c)\phi^2$  eşitliklerinden, böylece akı yeniden yazılırsa;

$$\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}}$$

5. Yukarıdaki  $\phi$  denklemi (9-22)'yi (9-21)'deki  $V_T$  denkleminde yerleştirerek motor açılmal hızının denklemini (9-23) elde edebiliriz;

$$\begin{aligned} V_T &= K \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}} \omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S) \\ \sqrt{Kc} \sqrt{\tau_{ind}} \omega &= V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{Kc}} \sqrt{\tau_{ind}} \\ \omega &= \frac{V_T}{\sqrt{Kc} \sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \\ \omega &= \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \end{aligned}$$

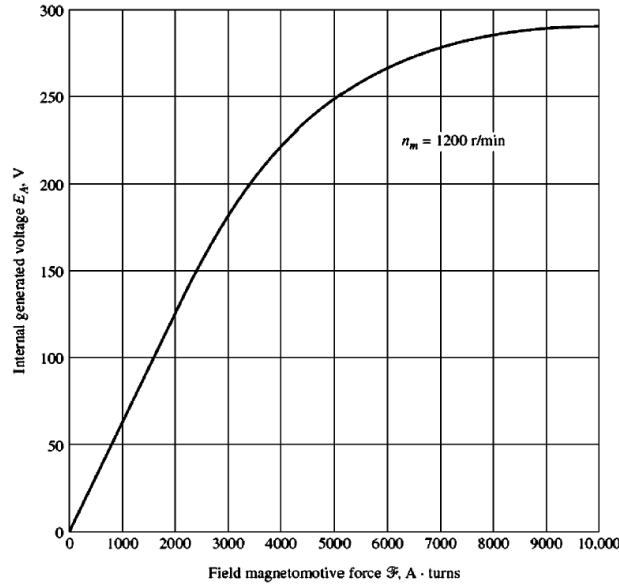


Şekil 9-21. Seri DA motorunun moment-hız grafiği

Doyuma girmemiş bir seri DA motor için motorun hızının momentin karekökünün tersi ile değiştiğine dikkat ediniz. Bu oldukça nadir bir bağıntıdır. Bu ideal moment-hız karakteristiği Şekil 9.21'de verilmiştir. Bu motorun dezavantajı, grafikten görüldüğü gibi, moment sıfıra gittiği zaman hız sonsuza gider. Ancak pratikte moment mekanik, çekirdek ve dağılma kayıplarından dolayı hiçbir zaman sıfıra gitmez. Ancak motor boşta olduğunda yüksek hızlara çıkar ve kendini tahrip edebilir. Bu nedenle seri motor yüksüz ve kayışla veya kırılabilir bir mekanizma ile yüke bağlanmamalıdır.

**Problem 9-5.** Şekil 9-20 kompanzasyon sargılı ve  $R_A + R_S = 0.08 \Omega$ 'luk toplam seri sargı ile 250 V'luk bir seri DA motoru gösterilmektedir. Seri uyarma Şekil 9-22'de gösterilen mıknatıslanma eğrisi ile kutup başına 25 sarımdan ibarettir.

- Endüvi akımı 50 A iken bu motorun indüklenen momentini ve hızını bulunuz.
- Bu motor için moment-hız karakteristiğini hesaplayınız ve çiziniz.



Şekil 9-22. Problem 9-5'deki motorun mıknatıslanma eğrisi. Bu eğri,  $n_m=1200$  dev/dk'da alınmıştır.

### Çözüm:

- a) Doymalı seri motorun davranışını analiz etmek için çalışma eğrisi boyunca noktalar alın ve her bir nokta için moment ve hızı bulunuz. Mıknatıslanma eğrisinin 1200 dev/dk'lık hız için  $E_A$ 'ya karşı manyeto motor kuvvet cinsinden (amper-sarım) verildiğine dikkat ediniz, böylece hesaplanan  $E_A$  değerleri gerçek motor hızını belirlemek için 1200 dev/dk'da eşdeğer değerler ile karşılaştırılmalıdır.

For  $I_A = 50$  A,

$$E_A = V_T - I_A(R_A + R_S) = 250 \text{ V} - (50 \text{ A})(0.08 \Omega) = 246 \text{ V}$$

Since  $I_A = I_F = 50$  A, the magnetomotive force is

$$\mathcal{F} = NI = (25 \text{ turns})(50 \text{ A}) = 1250 \text{ A} \cdot \text{turns}$$

From the magnetization curve at  $\mathcal{F} = 1250 \text{ A} \cdot \text{turns}$ ,  $E_{A0} = 80$  V. To get the correct speed of the motor, remember that, from Equation (9-13),

$$\begin{aligned} n &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\ &= \frac{246 \text{ V}}{80 \text{ V}} 120 \text{ r/min} = 3690 \text{ r/min} \end{aligned}$$

To find the induced torque supplied by the motor at that speed, recall that

$$P_{\text{conv}} = E_A I_A = \tau_{\text{ind}} \omega. \text{ Therefore,}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= \frac{E_A I_A}{\omega} \\ &= \frac{(246 \text{ V})(50 \text{ A})}{(3690 \text{ r/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(2\pi \text{ rad/r})} = 31.8 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

- b) To calculate the complete torque-speed characteristic, we must repeat the steps in *a* for many values of armature current. A MATLAB M-file that calculates the torque-speed

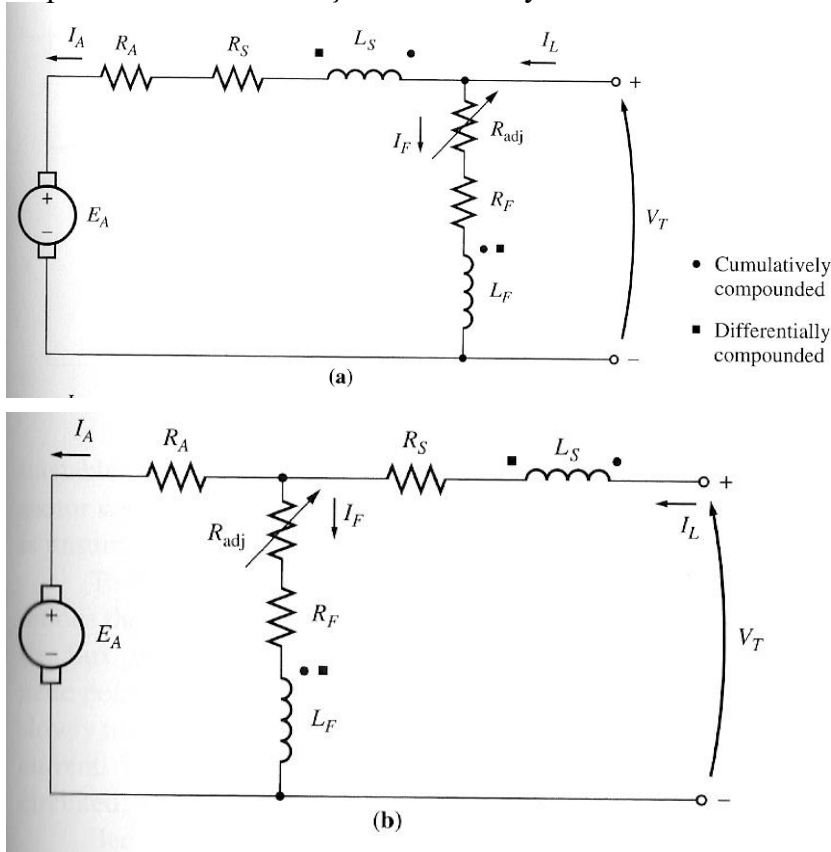
characteristics of the series dc motor is shown below. Note that the magnetization curve used by this program works in terms of field magnetomotive force instead of effective field current.

### Seri DA Motorunun Hız Kontrolü

Şönt motordan farklı olarak seri DA motorunun hızını değiştirmenin sadece bir etkin yolu vardır; motorun uç gerilimini değiştirmektir. Uç gerilimi arttırılırsa, verilen herhangi bir moment için daha yüksek bir hız doğuracak şekilde açısal hız denklemi (9-23)'deki ilk terim arttırılır.

## 14. KOMPUNT DOĞRU AKIM MOTORU

Kompunt DA motoru hem şönt hem seri uyarmalı motorun özelliklerini barındıran bir motordur.



**Şekil 9-24.**

Kompunt DA motorun eşdeğer devreleri

- a) Uzun şönt bağlantı
- b) Kısa şönt bağlantı

*Cumulatively: Eklemeli*

*Differentially: Fark*

İki uyarma bobini üzerinde bulunan noktalar transformatördeki noktalar ile aynı anlamdadır. Noktaya giren akım pozitif bir manyeto motor kuvvet üretir. Akım her iki uyarma bobininde de noktaya doğru akarsa sonuç mmk'ler birbirine eklenir. Bu durum “*eklemeli kompuntlama*” olarak bilinir. Akım bir uyarma bobininde noktaya doğru diğerinde dışa doğru akarsa sonuç mmk'lar çıkarılır. Şekil 9.24'deki yuvarlak noktalar motorun eklemeli kompuntuna denk gelir, kareler ise diferansiyel kompuntlamaya karşılık gelir.

Kompunt DA motoru için KVL denklemi yazarsak;

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

Akımlar ise;

$$I_A = I_L - I_F$$

$$I_F = V_T / R_F$$

Kompunt motorda etkin şönt uyarma akımı ve net mmk aşağıdaki gibi verilir;

$$F_{net} = F_F \pm F_{SE} - F_{AR}$$

$$I_F^* = I_F \pm \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{F_{AR}}{N_F}$$

+ işaret(●): eklemeli kompunt motor için

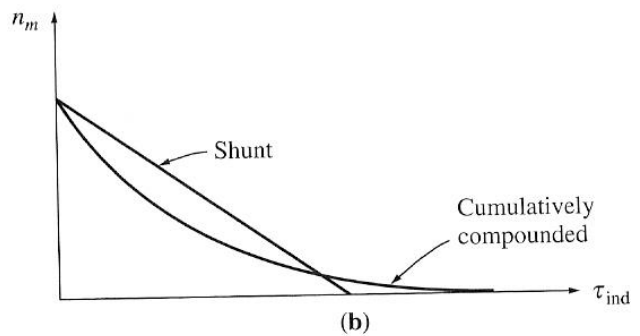
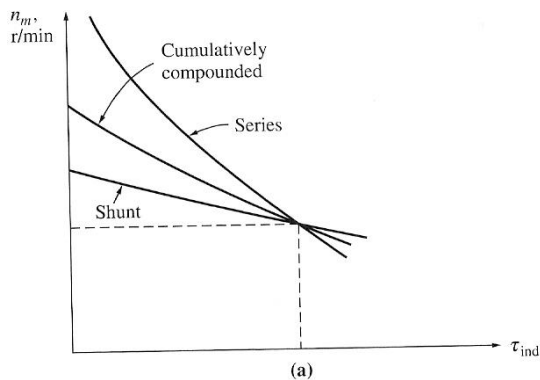
- işaret(□): diferansiyel kompunt motor için

### Cumulatively (Eklemeli) Kompunt DA Motorunun Moment-Hız Karakteristikleri

Eklemeli Kompunt DA motorunda sabit ve endüvi akımına (ve böylece yüküne) orantılı olan bir başka akı bileşeni vardır. Dolayısıyla eklemeli kompunt motor şönt motordan (akımın sabit olduğu) daha yüksek ama seri motordan (tüm akı endüvi akımına orantılı olan) daha düşük bir yol verme momentine sahiptir.

Bir anlamda eklemeli kompunt motoru hem şönt hem de seri motorların en iyi özelliklerini bir araya toplar. Seri motordan farklı olarak yol verme esnasında şönt motora benzer ve boşta aşırı hıza neden olmayan ekstra momente sahiptir.

Hafif yüklerde seri alan çok küçük bir etkiye sahiptir, böylece motor olarak şönt motor gibi davranır. Yük arttığı zaman seri akı daha önemli hale gelir ve moment-hız eğrisi seri motor karakteristiğine benzer.





Şekil 9-25. **a)** Aynı tam yük nominal değerine sahip seri ve şönt motorlara eklemeli kompunt DA motorun moment-hız karakteristiklerinin karşılaştırılması, **b)** Aynı boştaki hıza sahip bir şönt motor eklemeli kompunt motorun moment-hız karakteristiğinin karşılaştırılması

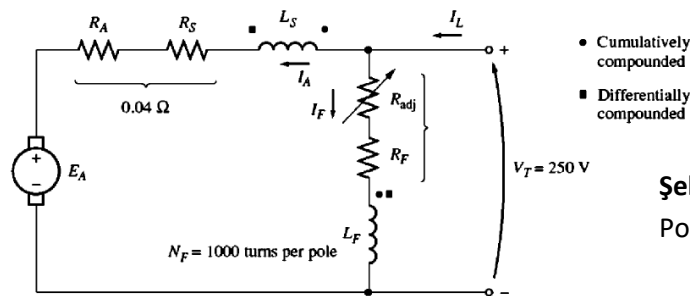
### Diferansiyel Kompunt DA motorunun Moment-Hız Karakteristikleri

Diferansiyel kompunt DA motorunda şönt manyetomotor kuvvet ve seri manyetomotor kuvvetin her biri diğerinden çıkarılır. Bunun anlamı, motordaki yük artarken  $I_A$  artar ve motordaki akı azalır. Ancak, akı azalırken motorun hızı artar. Bu hız artması, yükte  $I_A$ 'yı daha fazla artıran, böylece akıyı azaltan ve hızı tekrardan artıran bir başka artmaya neden olur. Sonuçta diferansiyel kompunt motor kararsız ve kaçmaya meyillidir. Bu kararsızlık bir şönt motorun endüvi reaksiyonundan daha kötü bir durumdur.

Diferansiyel kompunt motor zor meselelerinden dolayı hemen hemen hiç kullanılmaz.

### Kompunt DA motorların Doğrusal olmayan Analizi

**Problem 9-6.** 100 hp, 250 V kompanzasyon sargılı bir kompunt DA motoru seri sargıyı kapsayacak şekilde  $0.04 \Omega$ 'luk bir iç dirence sahiptir. Şönt uyarı kutup başına 1000 sarım ve seri sargıda kutup başına 3 sarım vardır. Makine Şekil 9-27'de ve mıknatıslanma eğrisi Şekil 9-9'da gösterilmektedir. Boşta, uyarı direnci motorun 1200 dev/dak'da dönecek şekilde ayarlanmıştır. Çekirdek, mekanik ve dağılma kayıpları ihmal edilebilir.



**Şekil 9-27.**

Problem 9-6'daki kompunt DA motoru

- Bu makinada boştaki şönt uyarı akımı nedir?
- Motor eklemeli kompunt ise  $I_A=200$  A iken hızını bulunuz.
- Motor diferansiyel kompunt ise  $I_A=200$  A iken hızını bulunuz.

### **Çözüm:**

- Boşta endüvi akımı sıfırdır, böylece motorda indüklenen gerilim  $V_T$ 'ye eşit yani 250 V olması gerekir. Mıknatıslanan eğrisinden 5 A'lık bir uyarı akımı 1200 dev/dak'da 250 V'luk bir  $E_A$  gerilimi üretecektir. Dolayısıyla şönt uyarı akımı 5 A olmalıdır.
- Motordan 200 A'lık bir endüvi akımı aktığı zaman makinanın içinde üretilen gerilim;

$$\begin{aligned}
 E_A &= V_T - I_A(R_A + R_S) \\
 &= 250 \text{ V} - (200 \text{ A})(0.04 \Omega) = 242 \text{ V}
 \end{aligned}$$

The effective field current of this cumulatively compounded motor is

$$\begin{aligned}
 I_F^* &= I_F + \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \\
 &= 5 \text{ A} + \frac{3}{1000} 200 \text{ A} = 5.6 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{9-28}$$

From the magnetization curve,  $E_{A0} = 262 \text{ V}$  at speed  $n_0 = 1200 \text{ r/min}$ . Therefore, the motor's speed will be

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\
 &= \frac{242 \text{ V}}{262 \text{ V}} 1200 \text{ r/min} = 1108 \text{ r/min}
 \end{aligned}$$

c) Makine diferansiyel kompunt ise, etkin uyarma akımı,

$$\begin{aligned}
 I_F^* &= I_F - \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathcal{F}_{AR}}{N_F} \\
 &= 5 \text{ A} - \frac{3}{1000} 200 \text{ A} = 4.4 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{9-28}$$

From the magnetization curve,  $E_{A0} = 236 \text{ V}$  at speed  $n_0 = 1200 \text{ r/min}$ . Therefore, the motor's speed will be

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{E_A}{E_{A0}} n_0 \\
 &= \frac{242 \text{ V}}{236 \text{ V}} 1200 \text{ r/min} = 1230 \text{ r/min}
 \end{aligned}$$

Eklemeli kompunt motorun hızının yük ile azaldığına ve diferansiyel kompunt motorun hızının yük ile arttığına dikkat etmek gerekir

### Eklemeli Kompunt Motorda Hız Kontrolü

Eklemeli kompunt motorun hızını kontrol etmek için kullanılan teknikler şönt motorunkine benzerdir;

1. Uyarma direnci  $R_F$ 'yi değiştirmek
2. Endüvi gerilimi  $V_A$ 'yı değiştirmek
3. Endüvi direnci  $R_A$ 'yı değiştirmek

## **10. DA MOTOR YOL VERİCİLER (Yol Verme Yöntemleri)**

Bir DA motor, çalışmasında başlıca fonksiyonunu yerine getirebilmesi için bazı özel kontrol ve koruma donanımına sahip olmalıdır. Bu donanımların amaçları aşağıdaki gibidir;

1. Donanımdaki kısa devreler nedeniyle oluşacak tahribe karşı motoru korumak
2. Uzun süreli aşırı yüklerden oluşacak tahriplere karşı motoru korumak
3. Aşırı yol verme akımlarına karşı motoru korumak
4. Motorun çalışma hızını kontrol etmek üzere uygun tarzı sağlamak

Bir DA motorunun yol verme esnasında, başlangıçta motor dönmez ve zıt emk  $E_A=0 \text{ V}$  olur. Normal DA motorun iç direnci kendi boyutuna kıyasla çok küçük olduğundan dolayı çok yüksek

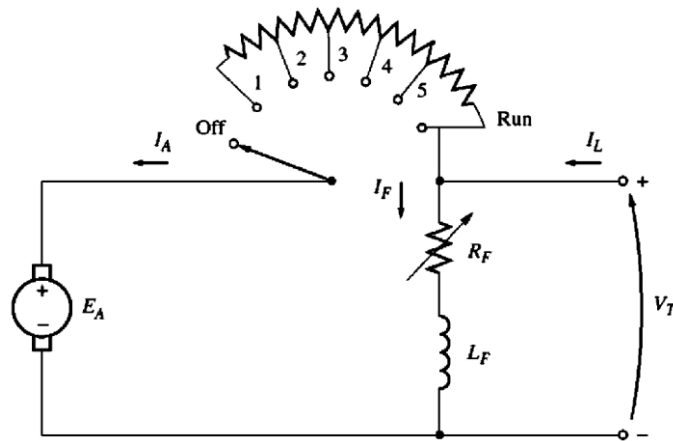
akım çeker. Mesela (Problem 9-1), 50 hp, 250 V'luk motoru göz önüne alalım. Bu motor  $R_A=0.06 \Omega$ 'luk bir endüvi direncine ve 200 A'den daha az bir tam yük akımına sahiptir. Yol verme esnasında bu motor;

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} = \frac{250V - 0V}{0.06\Omega} = 4167 A$$

Bu akım motorun nominal tam yük akımının 20 katından fazladır. Sadece bir anlık bile olsa motorun böyle akımlar ile ciddi tahrip olması kaçınılmazdır.

Yol verme sırasında aşırı akım problemine bir çözüm  $E_A$  zıt emk gerilimi sınırlama yapacak şekilde oluşana kadar akım akışını azaltmak için endüviye seri bir yol verme direnci girmektir. Ancak bu direnç devrede kalıcı olmamalıdır, çünkü aşırı kayıplar oluşturacaktır.

Dolayısıyla, yol verme sırasında akımı sınırlamak için endüvi devresine ayarlı bir direnç (reosta) ilave edilir ve motor hızlandıkça direncin kademesi azaltılır ve motor yeterince hızlandığında ise kaldırılır.



Şekil 9-29. Endüvi devresine kademeli direnç ilavesi ile DA motor yol verici

#### Doğru Akım motorlarında Devir Yönünün Değiştirilmesi

DA motorlarında devir yönünü değiştirmek için endüvi akımının yönünü veya alan uyarma akımının yönünü değiştirmek gerekir. Her iki akımın (endüvi ve uyarma) yönünü değiştirmek devir yönünü değiştirmez. Genellikle endüvi akımının yönü değiştirilmektedir. Çünkü alan sargısının endüktansı yüksektir ve alanda depolanan enerjiyi harcamadan yapılacak olan yön değiştirme işlemi tehlikeli olabilir.

## 11. WARD-LEONARD SİSTEMİ VE YARI İLETKENLERLE HIZ KONTROLÜ

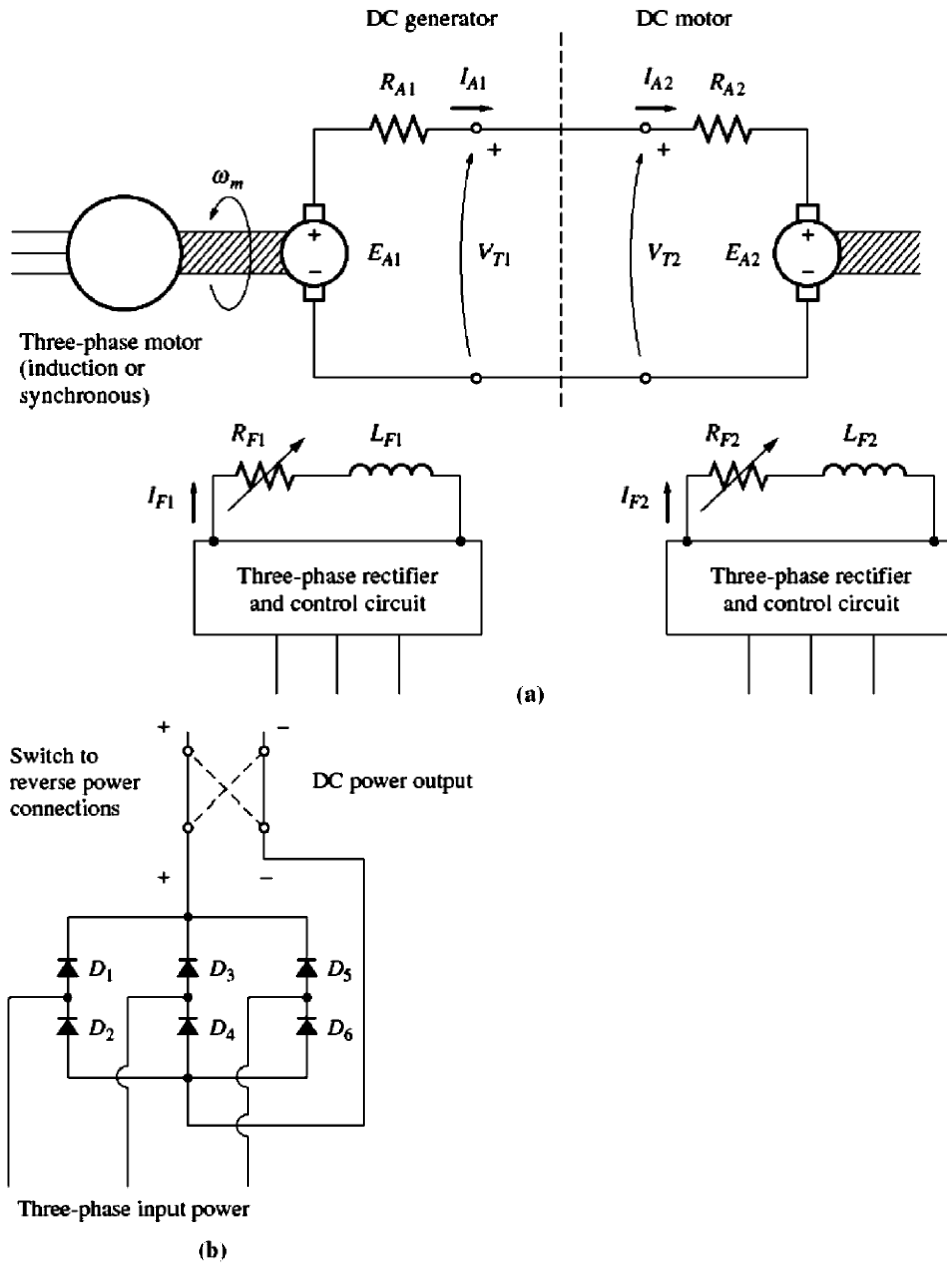
### Doğru Akım Motorlarında Hız Kontrol Yöntemleri

Serbest uyarmalı, şönt ya da kompunt DA motorun hızı aşağıdaki yöntemler kullanılarak değiştirilebilir;

- Uyarma direncini değiştirerek
- Endüvi gerilimini değiştirerek
- Endüvi direncini değiştirerek

Bu yöntemlerin en uygun ve verimli olanı ise motorun maksimum momentini etkilemeksizin geniş bir hız değişimine izin verdiğinden dolayı “endüvi gerilimi kontrolü”dür.

Çok sayıda motor kontrol sistemleri, DA motorlarının endüvi gerilimi kontrolünden yüksek moment avantajını ve kullanılabilen değişken hız avantajını sağlamak üzere geliştirilmiştir. Bu türden bir endüvi gerilimi kontrolü sistemi Şekil 9-33’de gösterilmektedir. Bu şekilde DA motoruna DC gerilim sağlamak üzere kullanılan bir DA generatör için ilk hareketlendirici olarak hizmet eden bir AA motoru gösterilmektedir. Bu tür makine düzeneği *Ward-Leonard sistemi* olarak adlandırılır ve çok yönlüdür.



Şekil 9-33.

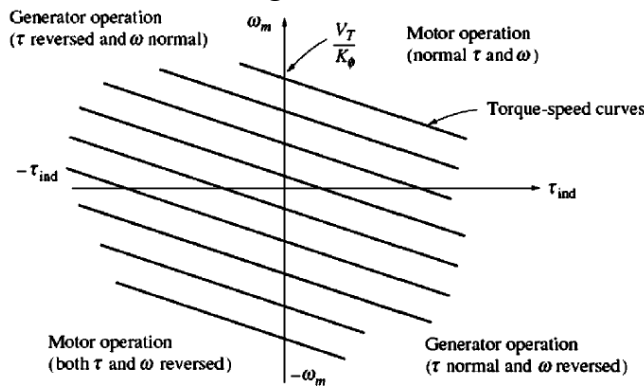
- a) DA motor hız kontrolü için Ward-Leonard sistemi
- b) DA generatörü ve DA motorunda uyarma akımının üretim merkezi

Bu tür bir motor kontrol sisteminde, motorun endüvi gerilimi, DA generatörünün uyarma akımını değiştirerek kontrol edilebilir. Bu endüvi gerilimi, çok küçük bir değerdeki hız ile temel hız arasında düzgün olarak hız değişimine imkan tanır. Motorun hızı, uyarma akımını azaltarak temel hızın yukarısına ayarlanabilir. Böylesi bir esnek düzenek ile toplam motor hız kontrolü mümkündür.

Ayrıca, generatörün uyarma akımı ters çevrilirse o zaman generatörü endüvi geriliminin de polaritesi ters dönecektir. Bu motorun dönüş yönünü ters çevirecektir. Dolayısıyla, Ward-Leonard motor kontrol sisteminin her iki dönüş yönünde çok geniş bir aralıkta hız değişimlerini elde etmek mümkündür.

Ward-Leonard sisteminin bir diğer avantajı makinanın hareket enerjisini kaynağa geri döndürmek ya da rejenere edebilmesidir. Ağır bir yük ile arttırılırsa ve sonra bir Ward-Leonard sisteminin DA motoru tarafından azaltılırsa, yük azaldığı zaman DA motor güç sistemine enerjiyi geri besleyerek generatör olarak çalışır. Bu şekilde ilk durumundan yükü hareketlendirmek için gereken enerjinin çoğu makinanın toplam işletme maliyetlerini azaltacak şekilde yeniden kazanılabilir.

DA motorun muhtemel çalışma modları Şekil 9-34'deki moment-hız diyagramında gösterilmektedir. Motor normal yönde dönerken dönme yönünde bir moment sağlayarak bu şeklin ilk bölgesinde çalışır. Generatörün uyarma akımı ters çevrilirse, bu generatörün uç gerilimini ters çevirecek ve ardından motorun endüvi gerilimi ters dönecektir. Değişmeden kalan motor uyarma akımı ile endüvi gerilimi ters çevrildiği zaman motorun hem momenti hem de hızı ters çevrilir ve makine diyagramın üçüncü bölgesinde motor olarak çalışır. Yalnızca moment veya motorun hızı diğer büyüklük değişmeden ters çevrilirse o zaman makine DA güç sistemine gücü geri veren bir generatör olarak hizmet verir. Ward-Leonard sistemi her iki yönde dönüş ve rejenerasyona izin verir ve *Dört bölge kontrol sistemi* olarak adlandırılır.



Şekil 9-34. Ward-Leonard motor kontrol sisteminin çalışma aralığı. Motor ya ileri (bölge 1) ya da ters yönde (bölge 3) motor olarak çalışır ve 2. ve 4. bölgelerde rejenerasyonda olabilir.

### 9.8 Doğru Akım Motorunda Verim Hesaplamaları

Bir DA motorun verimini hesaplamak için aşağıdaki kayıplar belirlenmelidir;

1. Bakır kayıpları
2. Fırça düşümü kayıpları

3. Mekanik kayıplar
4. Çekirdek kayıpları
5. Dağılma kayıpları

Motordaki bakır kayıpları, motorun uyarma ve endüvi devresi sargılarındaki  $I^2R$  kayıplarıdır. Bu kayıplar makinanın akım ve iki direnç bilgisinden bulunmasıdır. Makinadaki endüvi devresinin direncini belirlemek üzere dönmemesi için rotor tutulur ve endüvi uçlarına küçük gerilim uygulanır. Endüviden akan akım makinanın nominal endüvi akımına eşit olana kadar bu gerilim ayarlanır. Uygulanan gerilimin oluşan endüvi akımına oranı  $R_A$  direnci olur.

Uyarma direnci, uyarma devresine nominal uyarma gerilimi sağlayarak ve oluşan uyarma akımını ölçerek belirlenebilir. Uyarma direnci  $R_F$ , uyarma geriliminin uyarma akımına oranıdır. Fırça düşümü kayıpları bakır kayıpları ile birlikte yaklaşık olarak ele alınır. Ayrı olarak ele alınırsa, kullanılan belirli bir fırça için akıma karşı temas potansiyelinin çiziminden belirlenebilir. Fırça kayıpları fırça gerilim düşümü  $V_{BD}$  ile endüvi akımının çarpımına eşittir.

Çekirdek ve mekanik kayıpları genellikle birlikte belirlenir. Bir motorun boşta ve nominal hızında serbestçe dönmeye izin verilirse o zaman motorun çıkış gücü yoktur. Dolayısıyla uyarma bakır kayıpları motorun giriş gücünden çıkarılırsa kalan giriş gücü mekanik ve bu hızdaki makinanın çekirdek kayıplarıdır. Bu kayıplar motorun boştaki dönme kayıpları olarak adlandırılır.

**Problem 9-8.** 50 hp, 250 V, 1200 dev/dak şönt motoru 5 A'lık bir nominal uyarma akımına ve 170 A nominal endüvi akımına sahiptir. Rotor tutulduğu zaman 10.2 V'luk bir endüvi gerilimi 170 A'lık akan akım üretir ve 250 V'luk uyarma gerilimi 5 A'lık bir uyarma akımı üretir. Fırça gerilim düşümü 2 V kabul edilir. Boşta 240 V'a eşit bir uç gerilimi ile endüvi akımı 13.2 A'e, uyarma akımı 4.8 A ve motorun hızı 1150 dev/dak'ya eşittir,

- a) Bu motorun çıkış gücü nominal şartlarda ne kadardır?
- b) Motorun verimi nedir?

**Çözüm:** Bu makinanın endüvi direnci yaklaşık olarak,

$$R_A = \frac{10.2 \text{ V}}{170 \text{ A}} = 0.06 \Omega$$

and the field resistance is

$$R_F = \frac{250 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 50 \Omega$$

Therefore, at full load the armature  $I^2R$  losses are

$$P_A = (170 \text{ A})^2(0.06 \Omega) = 1734 \text{ W}$$

and the field circuit  $I^2R$  losses are

$$P_F = (5 \text{ A})^2(50 \Omega) = 1250 \text{ W}$$

The brush losses at full load are given by

$$P_{\text{brush}} = V_{BD}I_A = (2 \text{ V})(170 \text{ A}) = 340 \text{ W}$$

Tam yükteki dönme kayıpları boştaki dönme kayıplarına temelde eşdeğerdir ve motorun boştaki tam yükteki hızları önemli ölçüde farklı değildir. Bu kayıplar boşta endüvi devresine giriş gücünü belirleyerek ve endüvi bakır ve fırça düşümü kayıplarının ihmal edildiğini kabul ederek belirlenebilir ki bu boştaki endüvi giriş gücünün dönme kayıplarına eşit olması demektir,

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{core}} + P_{\text{mech}} = (240 \text{ V})(13.2 \text{ A}) = 3168 \text{ W}$$

(a) The input power of this motor at the rated load is given by

$$P_{\text{in}} = V_T I_L = (250 \text{ V})(175 \text{ A}) = 43,750 \text{ W}$$

Its output power is given by

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= P_{\text{in}} - P_{\text{brush}} - P_{\text{cu}} - P_{\text{core}} - P_{\text{mech}} - P_{\text{stray}} \\ &= 43,750 \text{ W} - 340 \text{ W} - 1734 \text{ W} - 1250 \text{ W} - 3168 \text{ W} - (0.01)(43,750 \text{ W}) \\ &= 36,820 \text{ W} \end{aligned}$$

where the stray losses are taken to be 1 percent of the input power.

(b) The efficiency of this motor at full load is

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \\ &= \frac{36,820 \text{ W}}{43,750 \text{ W}} \times 100\% = 84.2\% \end{aligned}$$

## 9.9 Doğru Akım Generatörlerine Giriş

## 9.10 Serbest Uyarmalı DA Generatör

## 9.11 Şönt Uyarmalı DA Generatör

## 9.12 Seri Uyarmalı DA Generatör