



کنترل محرکه های الکتریکی

فصل ۸:

محرکه های الکتریکی با موتور القایی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر

دانشکده فنی

گروه برق

حسن علیپور

استاتور موتور القایی و میدان متحرک آن

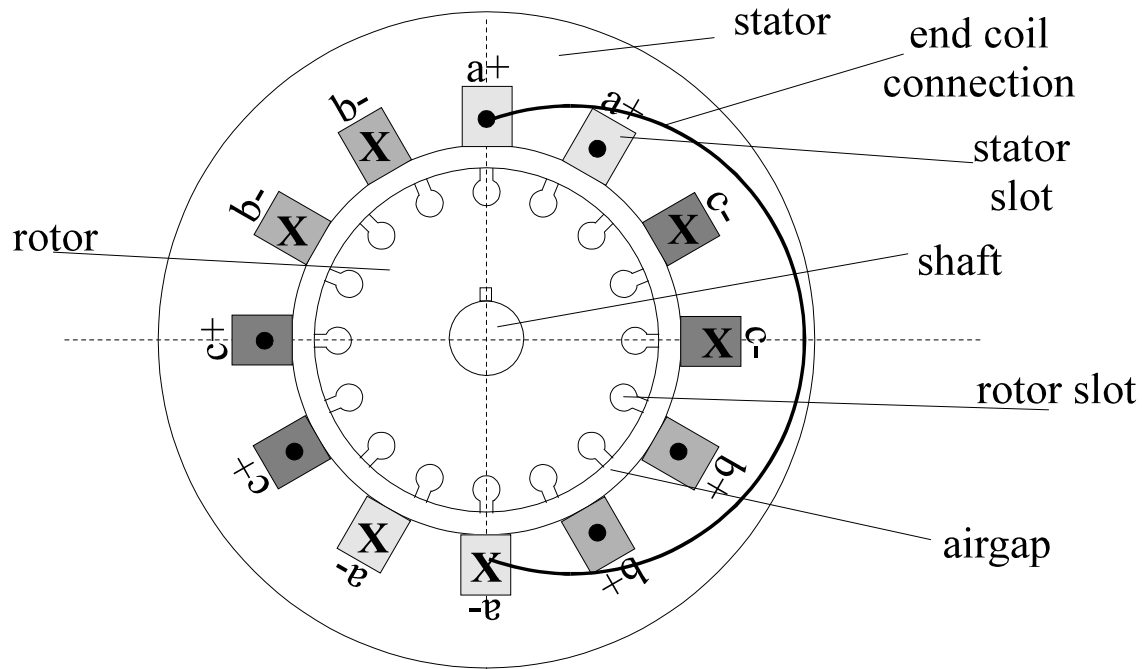


Figure 8.1. Cross section of an induction motor with two poles

$$\alpha_e = p \cdot \alpha_g$$

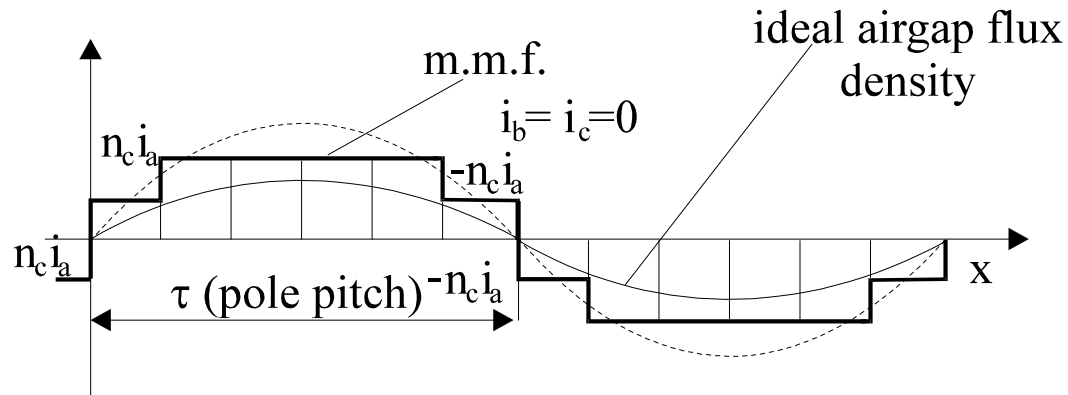


Figure 8.2. The mmf and air-gap flux density of phase a

$$F_{a1}(x, t) = F_{a1m} \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} x \cdot \sin \omega_1 t$$

$$i_a(t) = I\sqrt{2} \sin \omega_1 t$$

$$F_{s1}(x, t) = \frac{3}{2} F_{a1m} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega_1 t \right)$$

$$\frac{dx}{dt} = \tau \cdot \frac{\omega_1}{\pi} = 2\tau f_1$$

$$B_{g1}(x, t) \approx \mu_0 \cdot \frac{F_{s1}(x, t)}{g_e}$$

$$n_1 = f_1 / p$$

روتور موتور القايي

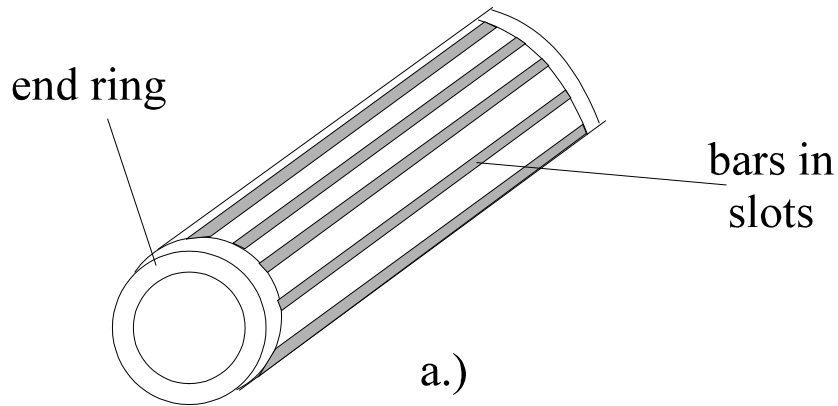
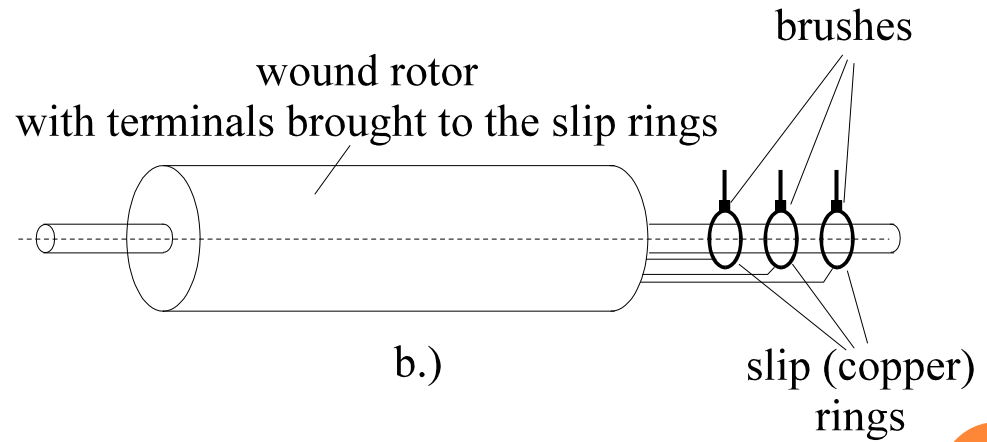


Figure 8.3. Induction motor rotors;
a) cage-type rotor, b) wound rotor



ماتریس اندوکتانس

- ❖ موتور را می توان به صورت مجموعه ای از مقاومتها، اندوکتانسهای خودی و متقابل در نظر گرفت.
- ❖ در مدار معادل ماشین القایی ۶ مدار (فاز) با اندوکتانسهای خودی و متقابل مختص به خود وجود دارد.
- ❖ اندوکتانس خودی فازها به موقعیت روتور بستگی ندارد.
- ❖ اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ های استاتور و روتور به موقعیت روتور وابسته است.
- ❖ فرض کنیم: چگالی شار فاصله هوایی برای هر فاز در طول محیط روتور به صورت سینوسی است و اندوکتانس کوپلینگ بین فازهای مختلف به صورت کسینوسی با توجه به زاویه الکتریکی دو سیم پیچ تغییر می کند.

ماتريس اندوكتانس

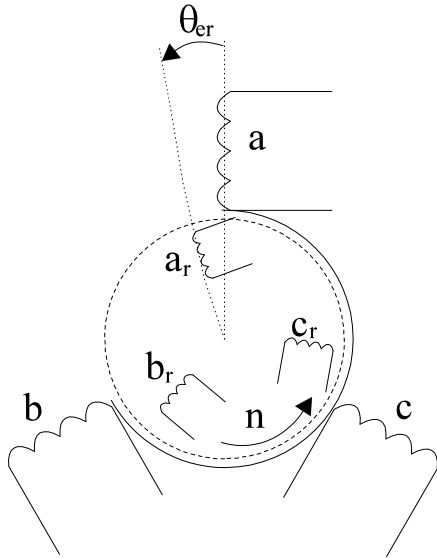


Figure 8.6. Three phase induction motor with equivalent wound rotor

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = L_{ms} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{L_{ms}}{2}$$

$$L_{a_r b_r} = L_{b_r c_r} = L_{c_r a_r} = L_{mr} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{L_{mr}}{2}$$

$$L_{sr}(\theta_{er}) = L_{ms} \cdot \frac{W_{re}}{W_{se}} \cos \theta_{er}$$

$$\frac{W_{re}}{W_{se}} = \sqrt{\frac{L_{mr}^r}{L_{ms}}} = K_{rs}$$

$$L_{sr}(\theta_{er}) = L_{srm} \cos \theta_{er}$$

$$L_{srm} = \sqrt{L_{ms} L_{mr}^r}$$

ماتريس اندوكتانس

$$\left[L_{a,b,c,a_r,b_r,c_r}(\theta_{er}) \right] = \begin{bmatrix} & a & b & c & a_r & b_r & c_r \\ a & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{a_r a} & L_{b_r a} & L_{c_r a} \\ b & L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} & L_{a_r b} & L_{b_r b} & L_{c_r b} \\ c & L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} & L_{a_r c} & L_{b_r c} & L_{c_r c} \\ a_r & L_{a_r a} & L_{a_r b} & L_{a_r c} & L_{a_r a_r} & L_{a_r b_r} & L_{a_r c_r} \\ b_r & L_{b_r a} & L_{b_r b} & L_{b_r c} & L_{a_r b_r} & L_{b_r b_r} & L_{b_r c_r} \\ c_r & L_{c_r a} & L_{c_r b} & L_{c_r c} & L_{a_r c_r} & L_{b_r c_r} & L_{c_r c_r} \end{bmatrix}$$

Where: $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{ls} + L_{ms}$ $L_{ab} = -L_{ms} / 2$ $L_{ac} = -L_{ms} / 2$

$$L_{a_r a} = L_{b_r b} = L_{c_r c} = L_{srm} \cos \theta_{er} \quad L_{a_r a_r} = L_{b_r b_r} = L_{c_r c_r} = L_{lr}^r + L_{mr}^r$$

$$L_{c_r a} = L_{a_r b} = L_{b_r c} = L_{srm} \cos(\theta_{er} - 2\pi/3)$$

$$L_{c_r b} = L_{a_r c} = L_{b_r a} = L_{srm} \cos(\theta_{er} + 2\pi/3)$$

$$L_{a_r b_r} = -L_{mr}^r / 2 \quad L_{b_r c_r} = -L_{mr}^r / 2 \quad L_{srm} = \sqrt{L_{ms} \cdot L_{mr}^r}$$



انتقال مدار روتور به استاتور

❖ جهت سادگی فرض کنیم: $L_{srm} = L_{ms}$

❖ مقادیر ولتاژ و جریان روتور در سمت روتور با سر اندیس r و مقادیر انتقال یافته به سمت استاتور بدون سر اندیس نشان داده

شده اند.

$$\frac{i_{ar}}{i_{ar}^r} = \frac{i_{br}}{i_{br}^r} = \frac{i_{cr}}{i_{cr}^r} = K_{rs}$$

$$\frac{V_{ar}}{V_{ar}^r} = \frac{V_{br}}{V_{br}^r} = \frac{V_{cr}}{V_{cr}^r} = \frac{1}{K_{rs}}$$

$$\frac{r_r}{r_r^r} = \frac{L_{lr}}{L_{lr}^r} = \frac{1}{K_{rs}^2}$$

So the new inductance matrix $[L_{a,b,c,a_r,b_r,c_r}(\theta_{er})]$ is similar to that in (8.18),

but with $L_{mr}^r \rightarrow L_{ms}$, $L_{srm} \rightarrow L_{ms}$.



THE PHASE COORDINATE MODEL

$$[V] = [r] \cdot [i] + \frac{d}{dt} [\lambda]$$

$$[\lambda] = [L_{a,b,c,a_r,b_r,c_r}(\theta_{er})] \cdot [i]$$

$$[r] = \text{Diag}[r_s, r_s, r_s, r_r, r_r, r_r]$$

$$[V] = [V_a, V_b, V_c, V_{ar}, V_{br}, V_{cr}]^T$$

$$[i] = [i_a, i_b, i_c, i_{ar}, i_{br}, i_{cr}]^T$$

with θ_{er} variable in time in any case - we obtain:

$$[V] = [r] \cdot [i] + [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{d\theta_{er}} \cdot [i] \cdot \frac{d\theta_{er}}{dt}$$

where:

$$\frac{d\theta_{er}}{dt} = \omega_r = p\Omega_r$$



THE PHASE COORDINATE MODEL

❖ در غیاب اشباع مغناطیسی:

$$[i]^T \cdot [V] = [i]^T \cdot [r] \cdot [i] + \frac{d}{dt} \frac{1}{2} [[L] \cdot [i] \cdot [i]^T] + \frac{1}{2} \cdot [i]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_{er}} \cdot [i] \cdot \omega_r$$

❖ جمله اول: تلفات مسی، جمله دوم: تغییران انرژی ذخیره شده، جمله سوم توان الکترومغناطیسی (P_e) است.

$$P_e = T_e \cdot \Omega_r = \frac{1}{2} [i]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_{er}} [i] \cdot \omega_r$$
$$T_e = \frac{1}{2} p \cdot [i]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_{er}} [i]$$

❖ The motion equation are:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{load}; \quad \frac{d\theta_{er}}{dt} = \omega_r$$

❖ این مدل یک مدل غیرخطی پیچیده با ضرایب (اندوکتانسهای) متغیر با زمان است که حل آن تنها از طریق روشهای عددی ممکن است.

مدل فازور فضایی

❖ در مدل فازور فضایی، ضرایب مستقل از زمان یا مکان می باشند.

❖ در این مدل ۶ معادله ولتاژ به ۲ معادله تبدیل می شود.

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}; \cos\frac{2\pi}{3} = \text{Re}[a]; a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}; \cos\frac{4\pi}{3} = \text{Re}[a^2];$$

$$\cos\left(\theta_{er} + \frac{2\pi}{3}\right) = \text{Re}\left[a \cdot e^{j\theta_{er}}\right]; \cos\left(\theta_{er} + \frac{4\pi}{3}\right) = \text{Re}\left[a^2 \cdot e^{j\theta_{er}}\right];$$

$$\lambda_a = L_{ls} \cdot i_a + L_{ms} \cdot \text{Re}\left[i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c\right] + L_{ms} \cdot \text{Re}\left[(i_{ar} + a \cdot i_{br} + a^2 \cdot i_{cr})e^{j\theta_{er}}\right]$$

$$\lambda_{ar} = L_{lr} \cdot i_{ar} + L_{ms} \cdot \text{Re}\left[i_{ar} + a \cdot i_{br} + a^2 \cdot i_{cr}\right] + L_{ms} \cdot \text{Re}\left[(i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c)e^{-j\theta_{er}}\right]$$

❖ بردار فضایی جریان استاتور و روتور:

$$\bar{i}_s^s = \frac{2}{3} \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \quad \bar{i}_r^r = \frac{2}{3} \cdot (i_{ar} + a \cdot i_{br} + a^2 \cdot i_{cr})$$

$$\text{Re}[\bar{i}_s^s] = i_a - \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c) = i_a - i_0 \quad \text{Re}[\bar{i}_r^r] = i_{ar} - \frac{1}{3} \cdot (i_{ar} + i_{br} + i_{cr}) = i_{ar} - i_{0r}$$

مدل فازور فضایی

$$\mathbf{i}_a + \mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c = 0; \mathbf{i}_{ar} + \mathbf{i}_{br} + \mathbf{i}_{cr} = 0 \quad \diamond \text{ و}$$

\diamond با تعریف بردار جریان فضایی داریم:

$$\lambda_a^s = L_{ls} \cdot \text{Re}(\bar{\mathbf{i}}_s^s) + L_m \cdot \text{Re}(\bar{\mathbf{i}}_s^s + \bar{\mathbf{i}}_r^s \cdot e^{j\theta_{er}}); \quad L_m = \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$\lambda_{ar}^r = L_{lr} \cdot \text{Re}(\bar{\mathbf{i}}_r^s) + L_m \cdot \text{Re}(\bar{\mathbf{i}}_r^r + \bar{\mathbf{i}}_s^s \cdot e^{-j\theta_{er}})$$

\diamond بنابراین بردارهای فازور فضایی شار به صورت زیر خواهند بود:

$$\bar{\lambda}_s^s = \frac{2}{3} \cdot (\lambda_a + a \cdot \lambda_b + a^2 \cdot \lambda_c) \quad \bar{\lambda}_r^r = \frac{2}{3} \cdot (\lambda_{ar} + a \cdot \lambda_{br} + a^2 \cdot \lambda_{cr})$$

$$\bar{\lambda}_s^s = L_s \cdot \bar{\mathbf{i}}_s^s + L_m \cdot \bar{\mathbf{i}}_r^r \cdot e^{j\theta_{er}} \quad \bar{\lambda}_r^r = L_r \cdot \bar{\mathbf{i}}_r^r + L_m \cdot \bar{\mathbf{i}}_s^s \cdot e^{-j\theta_{er}}$$

مدل فازور فضایی

❖ بنابراین معادلات فازور فضایی برای ولتاژ روتور و استاتور موتور القایی به صورت زیر می باشد:

$$\bar{\mathbf{V}}_s^s = \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{V}_a + a \cdot \mathbf{V}_b + a^2 \cdot \mathbf{V}_c) \quad \bar{\mathbf{V}}_r^r = \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{V}_{ar} + a \cdot \mathbf{V}_{br} + a^2 \cdot \mathbf{V}_{cr})$$

$$\bar{\mathbf{V}}_s^s = \mathbf{r}_s \cdot \bar{\mathbf{i}}_s^s + \frac{d\bar{\lambda}_s^s}{dt} = \mathbf{r}_s \cdot \bar{\mathbf{i}}_s^s + L_s \cdot \frac{d\bar{\mathbf{i}}_s^s}{dt} + L_m \frac{d(\bar{\mathbf{i}}_r^r e^{j\theta_{er}})}{dt}$$

$$\bar{\mathbf{V}}_r^r = \mathbf{r}_r \cdot \bar{\mathbf{i}}_r^r + \frac{d\bar{\lambda}_r^r}{dt} = \mathbf{r}_r \cdot \bar{\mathbf{i}}_r^r + L_r \cdot \frac{d\bar{\mathbf{i}}_r^r}{dt} + L_m \frac{d(\bar{\mathbf{i}}_s^s e^{-j\theta_{er}})}{dt}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m; \quad L_r = L_{lr} + L_m$$

مدل فازور فضایی

$$\omega_b = \frac{d\theta_b}{dt} \quad \diamond \text{ سرعت قاب مرجع:}$$

$$\bar{\lambda}_s^s = \bar{\lambda}_s^b \cdot e^{j\theta_b}; \quad \bar{i}_s^s = \bar{i}_s^b \cdot e^{j\theta_b}; \quad \bar{V}_s^s = \bar{V}_s^b \cdot e^{j\theta_b}$$

$$\bar{\lambda}_r^r = \bar{\lambda}_r^b \cdot e^{j(\theta_b - \theta_{er})}; \quad \bar{i}_r^r = \bar{i}_r^b \cdot e^{j(\theta_b - \theta_{er})}; \quad \bar{V}_r^r = \bar{V}_r^b \cdot e^{j(\theta_b - \theta_{er})}$$

$$\bar{V}_s = r_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j \cdot \omega_b \cdot \bar{\lambda}_s$$

$$\bar{V}_r = r_r \cdot \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j \cdot (\omega_b - \omega_r) \cdot \bar{\lambda}_r$$

$$\bar{\lambda}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + L_m \cdot \bar{i}_r$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \cdot \bar{i}_r + L_m \cdot \bar{i}_s$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Re}(j \cdot \bar{\lambda}_s \cdot \bar{i}_s^*) = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Re}(j \cdot \bar{\lambda}_r \cdot \bar{i}_r^*)$$

DQ مدل

❖ بردارهای فازور فضایی را می توان به دو مولفه تجزیه کرد.

$$\bar{V}_s = V_d + j \cdot V_q; \quad \bar{i}_s = i_d + j \cdot i_q; \quad \bar{\lambda}_s = \lambda_d + j \cdot \lambda_q$$

$$\bar{V}_r = V_{dr} + j \cdot V_{qr}; \quad \bar{i}_r = i_{dr} + j \cdot i_{qr}; \quad \bar{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j \cdot \lambda_{qr}$$

$$V_d = r_s \cdot i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_b \cdot \lambda_q$$

$$V_q = r_s \cdot i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_b \cdot \lambda_d$$

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_b - \omega_r) \cdot \lambda_{qr}$$

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_b - \omega_r) \cdot \lambda_{dr}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2} p L_m (i_q i_{dr} - i_d i_{qr})$$



تبدیل ABC به DQ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [P(\theta_b)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

❖ $[P(\theta_b)]$ is the Park transformation:

$$[P(\theta_b)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\theta_b) & \cos\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta_b - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_b) & \sin\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_b - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

❖ The inverse of Park transformation is:

$$[P(\theta_b)]^{-1} = \frac{3}{2} \cdot [P(\theta_b)]^T$$

❖ برای تبدیل مقادیر روتور به صورت مشابه می توان از $\theta_b - \theta_{er}$ به جای θ_b استفاده کرد.



Example 8.1. The space phasor of sinusoidal symmetric currents.

Consider three symmetrical sinusoidal currents and show how their complex space phasor \bar{i}_s^s in time through 6 instants. Give a graphical description of this process in time.

Solution:

The three phase currents may be written as:

$$i_{a,b,c} = I\sqrt{2} \cdot \cos\left(\omega_1 t - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right); i = 1,2,3$$

The space phasor in stator coordinates \bar{i}_s^s is, (8.37),:

$$\bar{i}_s^s = \frac{2}{3} I\sqrt{2} \left[\cos\omega_1 t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

with

$$e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j \cdot \sin\frac{2\pi}{3}; e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\frac{4\pi}{3} + j \cdot \sin\frac{4\pi}{3}$$

$$\bar{i}_s^s = I\sqrt{2} [\cos\omega_1 t + j \cdot \sin\omega_1 t] = i_d + j \cdot i_q$$



The position of the space phasor for $\omega_1 t = 0, \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \pi, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}$ is shown in figure 8.7.

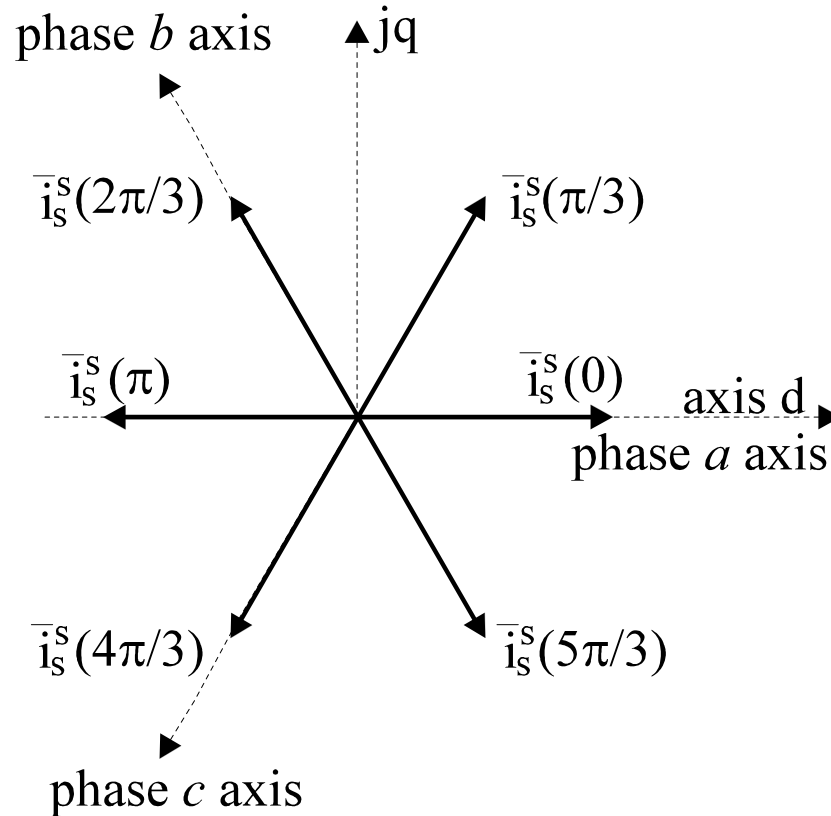


Figure 8.7. The space phasor of sinusoidal three phase currents

مدل حالت گذرای الکتریکی با متغیرهای شار پیوندی

❖ اگر در سرعت ثابت متغیرهای جریان روتور و استاتور را حذف کنیم:

$$\bar{\dot{i}}_s^b = \sigma^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_s^b}{L_s} - \frac{\bar{\lambda}_r^b \cdot L_m}{L_s L_r} \right)$$

$$\bar{\dot{i}}_r^b = \sigma^{-1} \left(\frac{\bar{\lambda}_r^b}{L_r} - \frac{\bar{\lambda}_s^b \cdot L_m}{L_s L_r} \right)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

❖ بنابراین با استفاده از رابطه (۸-۵۱) داریم:

$$\tau_s' \frac{d\bar{\lambda}_s^b}{dt} + (1 + j \cdot \omega_b \cdot \tau_s') \cdot \bar{\lambda}_s^b = \tau_s' \bar{V}_s^b + K_r \bar{\lambda}_r^b$$

$$\tau_r' \frac{d\bar{\lambda}_r^b}{dt} + (1 + j \cdot (\omega_b - \omega_r) \cdot \tau_r') \cdot \bar{\lambda}_r^b = \tau_r' \bar{V}_r^b + K_s \bar{\lambda}_s^b$$

مدل حالت گذرای الکتریکی با متغیرهای شار پیوندی

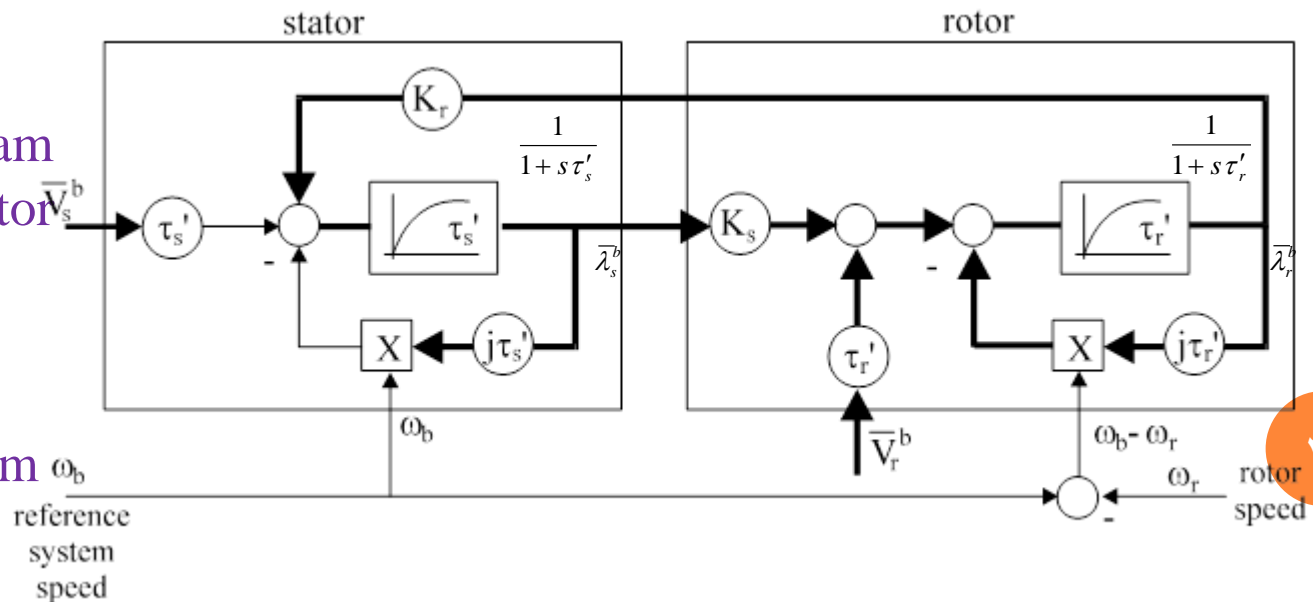
❖ در این روابط τ_s, τ_r ثوابت زمانی الکتریکی روتور و استاتور و τ_s', τ_r' ثوابت زمانی گذرای روتور و استاتور می باشند.

$$K_s = \frac{L_m}{L_s}; \quad K_r = \frac{L_m}{L_r}$$

$$\tau_s' = \tau_s \cdot \sigma; \quad \tau_r' = \tau_r \cdot \sigma$$

$$\tau_s = \frac{L_s}{r_s}; \quad \tau_r = \frac{L_r}{r_r}$$

Figure 8.9.
Structural diagram
of induction motor
with stator and
rotor flux
and as
variables; random
speed (ω_b)
coordinates



مدل حالت گذرای الکتریکی در شار ثابت روتور

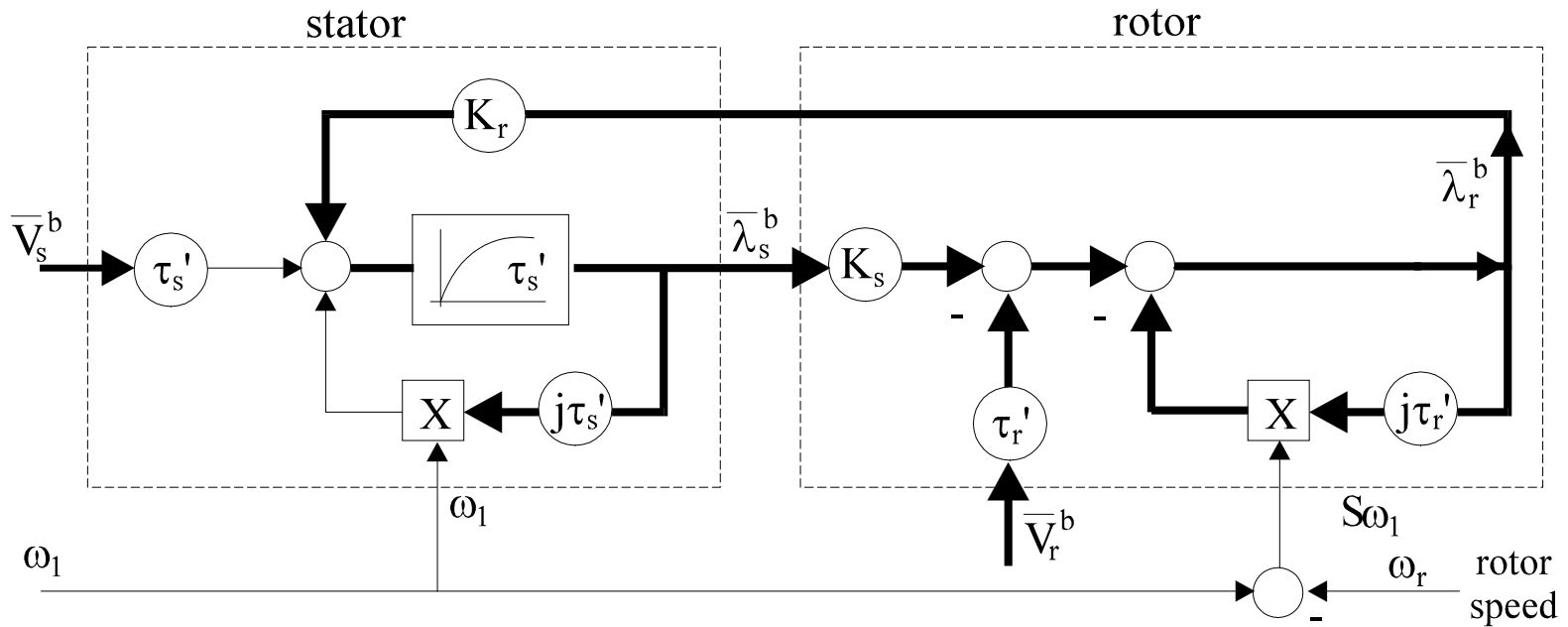


Figure 8.10. Structural diagram of induction motor with *constant rotor flux* and speed in synchronous coordinates ($\omega_b = \omega_1$)

بررسی مدل حالت ماندگار

❖ در حالت ماندگار متغیرهای سه فاز متعادل و سینوسی می باشند.

$$V_{a,b,c} = V\sqrt{2} \cdot \cos\left(\omega_1 t - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right) ; i = 1, 2, 3 \quad \text{❖}$$

$$\bar{V}_s^b = \frac{2}{3} \left[V_a(t) + V_b(t) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \cdot e^{-j\theta_b} \quad \text{❖ بردار فضایی ولتاژ}$$

$$\bar{V}_s^b = V\sqrt{2} [\cos(\omega_1 t - \theta_b) + j \cdot \sin(\omega_1 t - \theta_b)] \quad \theta_b = \omega_b t + \theta_0$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_s^b &= V\sqrt{2} [\cos[(\omega_1 - \omega_b)t - \theta_0] + j \cdot \sin[(\omega_1 - \omega_b)t - \theta_0]] \\ &= V\sqrt{2} \cdot e^{j[(\omega_1 - \omega_b)t - \theta_0]} \end{aligned}$$

❖ بنابراین در حالت ماندگار ولتاژ و جریان ماشین در دستگاه دلخواه با سرعت (ω_b) دارای فرکانس $(\omega_1 - \omega_b)$ می باشند.

بررسی مدل حالت ماندگار

با قرار دادن $d/dt = j(\omega_1 - \omega_b)$ در رابطه (۸-۶۶) داریم:

$$\bar{V}_{s0}^b = r_s \cdot \bar{i}_{s0}^b + j \cdot \omega_1 \cdot \bar{\lambda}_{s0}^b$$

$$\bar{V}_{r0}^b = r_r \cdot \bar{i}_{r0}^b + j \cdot S \omega_1 \cdot \bar{\lambda}_{r0}^b; \quad s = 1 - \omega_r / \omega_1$$

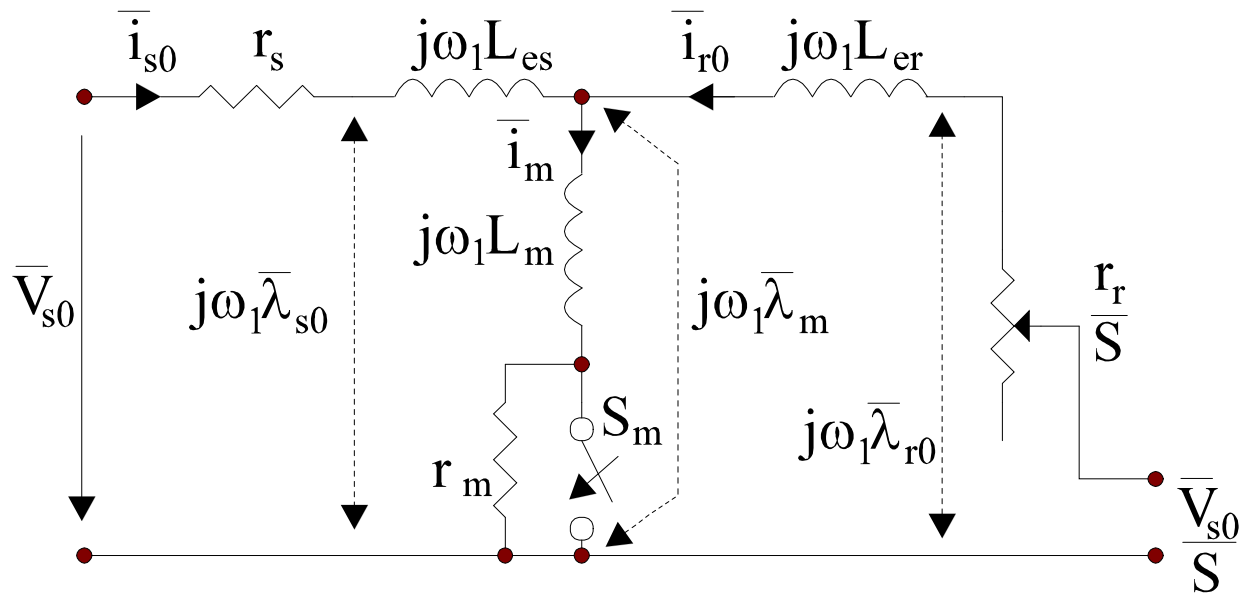


Figure 8.11. Space phasor steady state equivalent circuit of induction machine

عملکرد موتور، ژنراتوری و ترمزی AC موتور القایی

توان حقیقی موتور در حالت ماندگار:

$$P_e = 3 \cdot I_{r0}^2 \cdot \frac{r_r}{S} = T_e \cdot \frac{\omega_1}{p}; \quad S = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_1}$$

Table 8.1. Operation modes (cage rotor)

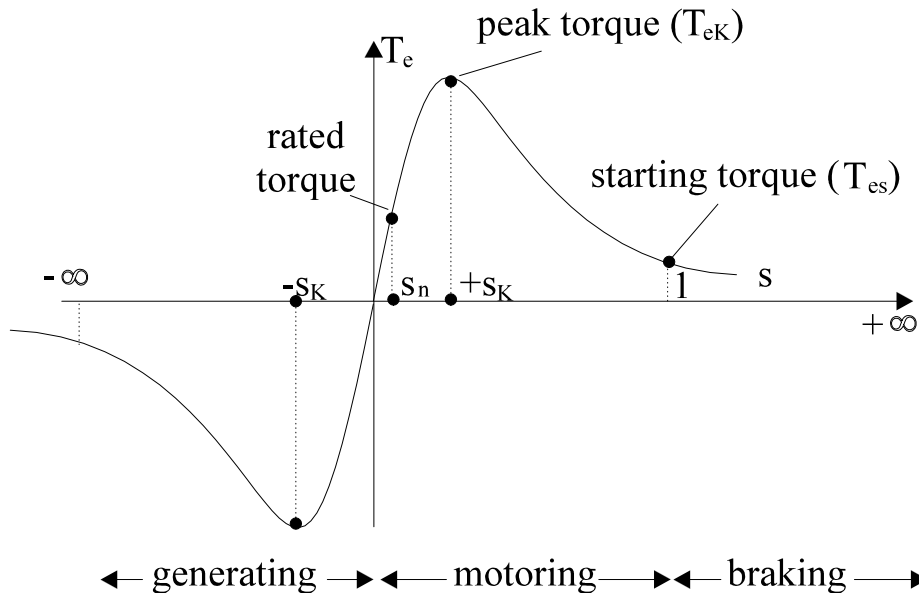
S	-∞ - - - - - 0 + + + + + 1 + + + + + ∞																		
ω_r	+∞ + + + + + ω ₁ + + + + + 0 - - - - - - - - - ∞																		
T_e	0 - - - - - - - 0 + + + + + T _e (start) + + + + + 0																		
P_e	- - - - - - - 0 + + + + + + + + + + + + + + +																		
mode	Generating						Motoring						AC braking						

عملکرد موتوری، ژنراتوری و ترمزی AC موتور القایی

گشتاور و گشتاور ماکزیمم:

$$T_e = \frac{3p}{\omega_1} \frac{V^2 \cdot r_r / S}{(r_s + c_1 r_r / S)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + c_1 L_{lr})^2} \quad c_1 \approx 1 + \frac{L_{ls}}{L_m}$$

$$\rightarrow S_k = \frac{\pm c_1 r_r}{\sqrt{r_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + c_1 L_{lr})^2}} \quad T_{ek} = \frac{3p}{\omega_1} \cdot \frac{V^2}{2c_1 \left(r_s \pm \sqrt{r_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + c_1 L_{lr})^2} \right)}$$



$$\frac{T_e}{T_{ek}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Figure 8.14. Torque - speed curve of induction motors for constant voltage and frequency

ترمز DC

در این ترمز منبع سه فاز از منبع قطع شده و دو فاز به هم وصل شده و با پایانه باقی مانده یک منبع dc وصل میشود. این ترمز نسبتاً نرم است.

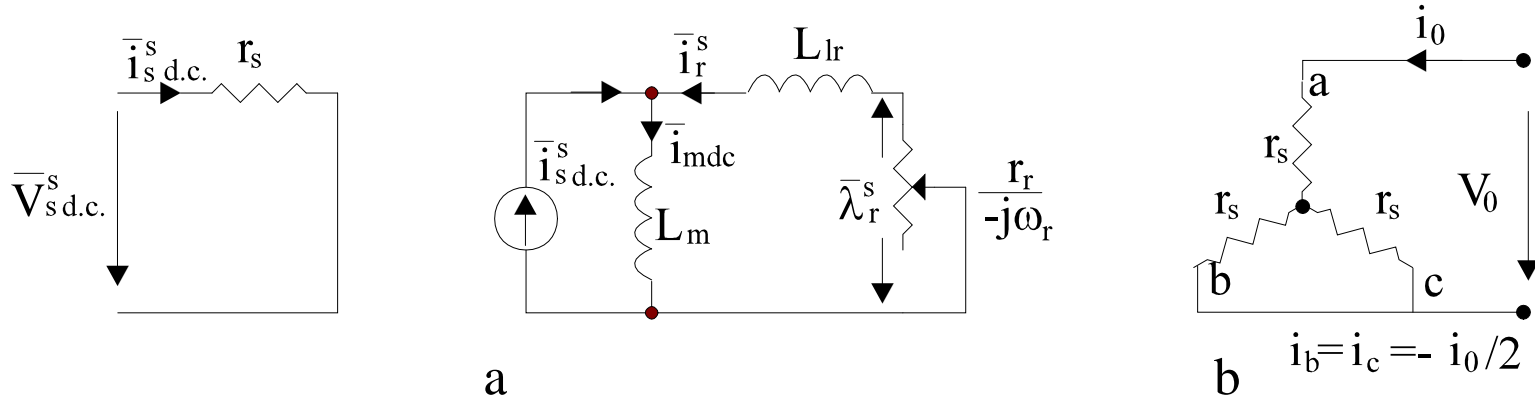


Figure 8.15. Equivalent circuit for DC braking - stator coordinates - in space phasors, steady state

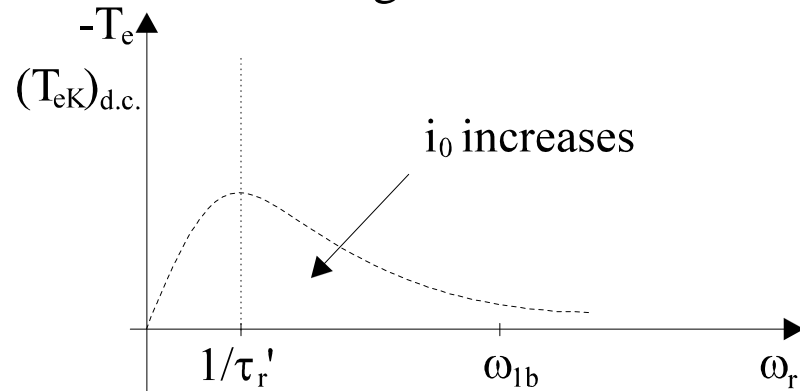


Figure 8.16. DC braking torque of induction motors

$$\bar{i}_{sdc}^s = \frac{2}{3} \left(i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} \left(i_0 - \frac{i_0}{2} 2 \cos \frac{2\pi}{3} \right) = i_0$$



روش های کنترل سرعت

- برای تغییر سرعت بی باری موتور می توان از سه روش زیر استفاده کرد:
 ۱. تغییر فرکانس استاتور
 ۲. تغییر تعداد قطب ها
 ۳. تغذیه سیم بندی روتور (تغییر در فرکانس برق روتور) (تا $\pm 30\%$ سرعت موتور)

- روشهای کنترلی که به صورت تجاری وجود دارند:

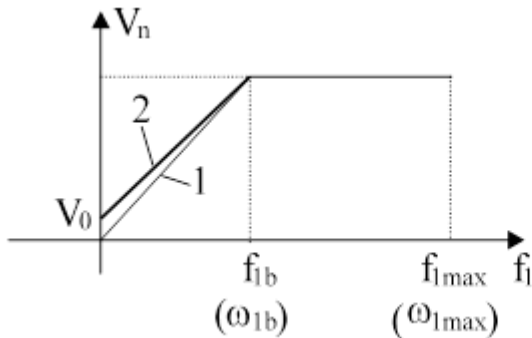
1. V_1/f_1 scalar control;
2. Constant (controlled) rotor flux (λ_r) vector control;
3. Constant (controlled) stator flux (λ_s) vector control.

V₁/F₁ TORQUE - SPEED CURVES

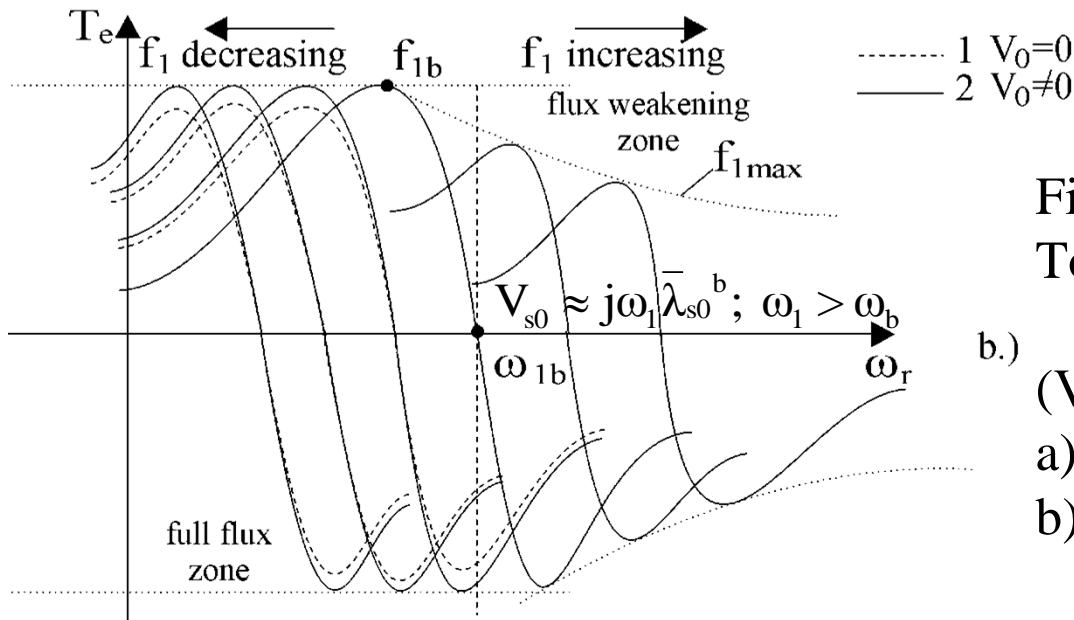
در کنترل V_1/f_1 رابطه ولتاژ و فرکانس به صورت زیر است:

$$V_1 = V_0 + K_f \cdot f_1$$

$$V_0 = c_0 r_s i_{sn}$$



a.)



b.)

Figure 8.17. ÷
Torque / speed curves
for
(V_1/f_1 control);
a) V_1/f_1 dependences,
b) T_e/ω_r curves



ONLY FOR CONSTANT ROTOR FLUX TORQUE-SPEED CURVES ARE LINEAR

○ The torque expression for constant rotor flux λ_r^b is (8.96):

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{\lambda_{r0}^2 (\omega_1 - \omega_r)}{r_r}$$

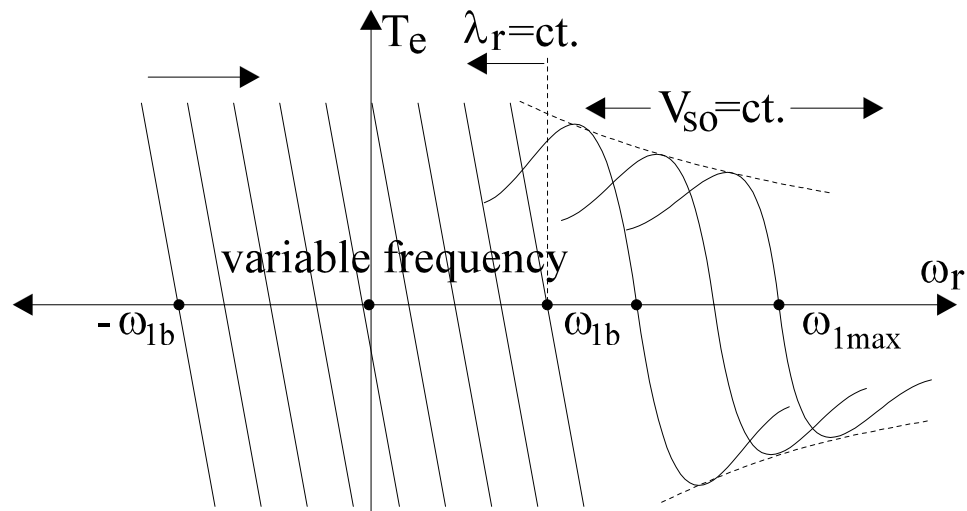


Figure 8.18. Torque-speed curves for constant rotor flux $\lambda_r^b = \text{cte.}$ up to base frequency ω_{1b} ; constant voltage and variable frequency above ω_{1b}



CONSTANT STATOR FLUX TORQUE-SPEED CURVES HAVE TWO BREAKDOWN POINTS

Let us note from (8.104) that the stator-rotor flux relationship for steady-state (cage rotor) is:

$$\bar{\lambda}_{s0} = \bar{\lambda}_{r0} \frac{(1 + jS\omega_1\tau_r')}{K_s}$$

$$(8-146), (8-147) \Rightarrow T_e = \frac{3}{2} p \frac{K_s^2}{r_r} \frac{S\omega_1 \lambda_{s0}^2}{1 + (S\omega_1\tau_r')^2}$$

- This expression has extreme (critical) values for:

$$(S\omega_1)_k = \pm \frac{1}{\tau_r'}$$

$$T_{ek} = \frac{3}{2} p \frac{K_s^2 \lambda_s^2}{2r_r \tau_r'}$$



CONSTANT STATOR FLUX TORQUE-SPEED CURVES HAVE TWO BREAKDOWN POINTS

Above base frequency, according to (8.145) the approximate peak torque would be:

$$(T_{ek})_{\omega_1 > \omega_{1b}} = \frac{3}{2} p \frac{K_s^2}{2r_r \tau_r'} \cdot \frac{V_{s0}^2}{\omega_1^2}$$

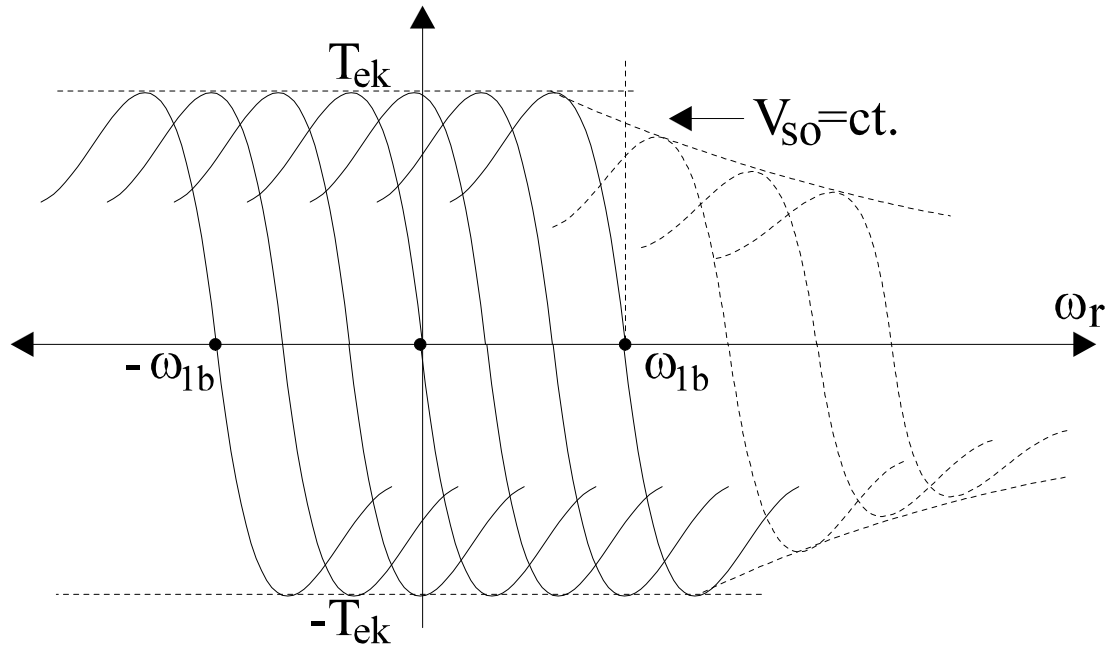


Figure 8.19. Torque-speed curves for constant stator flux amplitude λ_s up to ω_{1b} and constant voltage above ω_{1b}