Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

Macchina asincrona
(Macchina a induzione)

Comportamento a regime sinusoidale

Equazioni in $d^s q^s$

$$\mathbf{u}_s^s = R_s\,\mathbf{i}_s^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s^s}{dt}$$

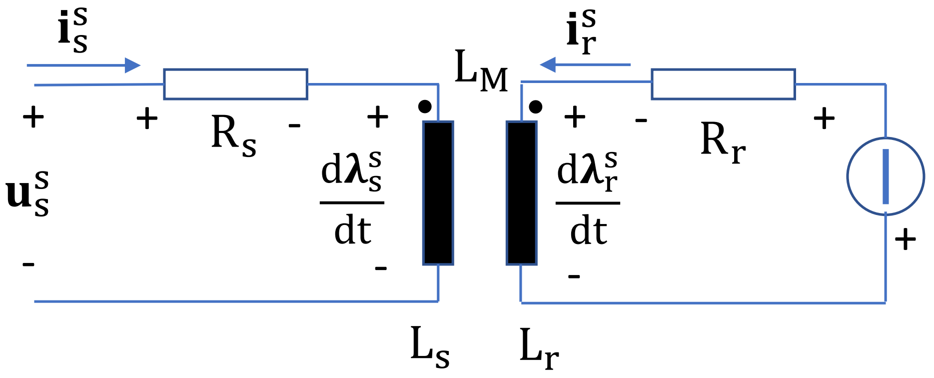
$$\mathbf{u}_s^s = R_s\mathbf{i}_s^s + L_s\frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} + L_M\frac{d\mathbf{i}_r^s}{dt}$$

$$0 = R_r\,\mathbf{i}_r^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} - j\omega_{me}\boldsymbol{\lambda}_r^s$$

$$0 = R_r\mathbf{i}_r^s + L_M\frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} + L_r\frac{d\mathbf{i}_r^s}{dt} - j\omega_{me}(L_M\boldsymbol{i}_s^s + L_r\,\boldsymbol{i}_r^s)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_s^s = L_s\,\boldsymbol{i}_s^s + L_M\,\boldsymbol{i}_r^s$$

$$\boldsymbol{\lambda}_r^s = L_M\boldsymbol{i}_s^s + L_r\,\boldsymbol{i}_r^s$$



$$-j\omega_{me}\,\boldsymbol{\lambda}_r^s =$$

$$= -j\omega_{me}(L_M\boldsymbol{i}_s^s + L_r\,\boldsymbol{i}_r^s)$$

Terne simmetriche in regime sinusoidale *(per esempio una terna di tensioni)*

$$u_a(t) = U_M \cos(\omega t + \vartheta_o)$$

$$u_b(t) = U_M \cos\left(\omega t + \vartheta_o - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_c(t) = U_M \cos\left(\omega t + \vartheta_o - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$u_a(t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[\dot{\mathbf{U}} e^{j\omega t}\right] \quad \text{con} \quad \dot{\mathbf{U}} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} e^{j\vartheta_o}$$

Rappresentazione simbolica

$$\mathbf{u}_s^s(t) = U_M\, e^{j(\omega t + \vartheta_o)} = U_M\, e^{j\vartheta_o}\, e^{j\omega t}$$

$$\mathbf{u}_s^s(t) = \sqrt{2}\,\dot{\mathbf{U}}\, e^{j\omega t}$$

Vettore spaziale

Regime sinusoidale

$$\mathbf{u}_s^s = R_s\,\mathbf{i}_s^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s^s}{dt}$$

$$\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{U}}_s e^{j\Omega_s t} = R_s\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{I}}_s e^{j\Omega_s t} + j\Omega_s\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{\Lambda}}_s e^{j\Omega_s t}$$

$$\dot{\mathbf{U}}_s = R_s\dot{\mathbf{I}}_s + j\Omega_s\dot{\mathbf{\Lambda}}_s$$

statore

$$0 = R_r\,\mathbf{i}_r^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} - j\omega_{me}\boldsymbol{\lambda}_r^s$$

$$0 = R_r\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{I}}_r e^{j\Omega_s t} + j\Omega_s\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{\Lambda}}_r e^{j\Omega_s t} - j\Omega_{me}\sqrt{2}\,\dot{\mathbf{\Lambda}}_r e^{j\Omega_s t}$$

$$0 = R_r\dot{\mathbf{I}}_r + j\Omega_s\dot{\mathbf{\Lambda}}_r - j\Omega_{me}\dot{\mathbf{\Lambda}}_r$$

$$\boldsymbol{\lambda}_s^s = L_s\,\boldsymbol{i}_s^s + L_M\,\boldsymbol{i}_r^s$$

$$\boldsymbol{\lambda}_r^s = L_M\boldsymbol{i}_s^s + L_r\,\boldsymbol{i}_r^s$$

$$0 = R_r\dot{\mathbf{I}}_r + j(\Omega_s - \Omega_{me})\dot{\mathbf{\Lambda}}_r$$

rotore

Regime sinusoidale

Dall'equazione di rotore $\boxed{0 = \mathrm{R_r}\dot{\mathbf{I}}_r + \mathrm{j}(\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}})\dot{\boldsymbol{\Lambda}}_r}$

$$\dot{\boldsymbol{\Lambda}}_r = \frac{-\mathrm{R}_r\dot{\mathbf{I}}_r}{\mathrm{j}(\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}})}$$ quindi

$$-\mathrm{j}\Omega_{\mathrm{me}}\dot{\boldsymbol{\Lambda}}_r = -\mathrm{j}\Omega_{\mathrm{me}}\frac{-\mathrm{R}_r\dot{\mathbf{I}}_r}{\mathrm{j}(\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}})} = \frac{\Omega_{\mathrm{me}}}{\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}}}\mathrm{R}_r\dot{\mathbf{I}}_r$$

Regime sinusoidale

Allora l'equazione di rotore nella forma

$$\boxed{0 = \mathrm{R_r}\dot{\mathbf{I}}_r + \mathrm{j}\Omega_s\dot{\mathbf{\Lambda}}_r - \mathrm{j}\Omega_{\mathrm{me}}\dot{\mathbf{\Lambda}}_r}$$

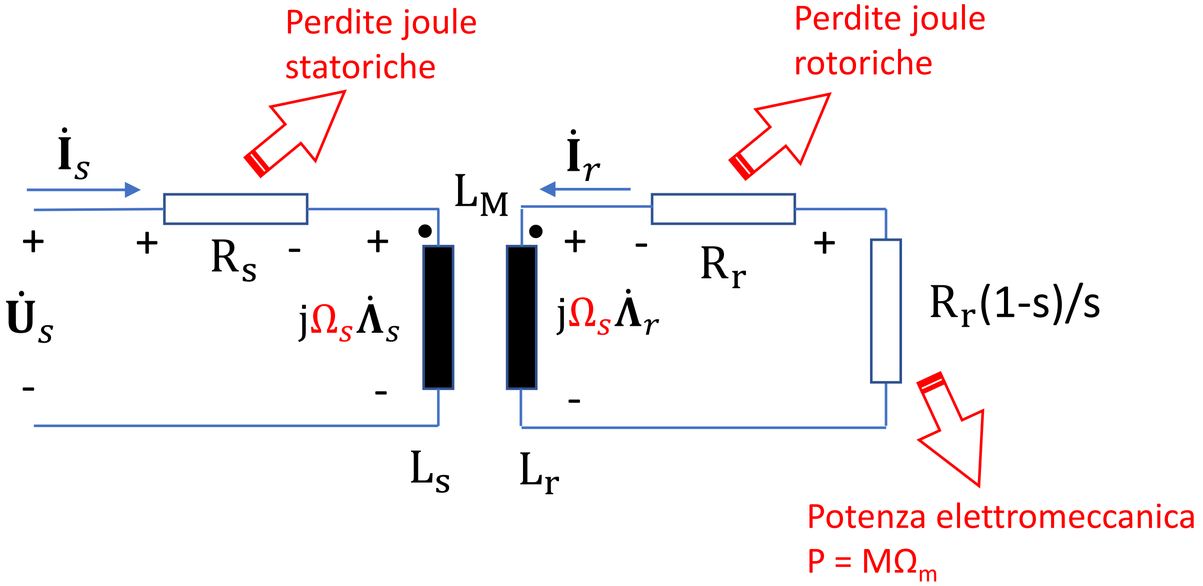
diventa

$$\boxed{0 = \mathrm{R_r}\dot{\mathbf{I}}_r + \mathrm{j}\Omega_s\dot{\mathbf{\Lambda}}_r + \frac{\Omega_{\mathrm{me}}}{\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}}}\mathrm{R}_r\dot{\mathbf{I}}_r}$$

ed anche se $s = (\Omega_s - \Omega_{\mathrm{me}})/\Omega_s$

$$\boxed{0 = \mathrm{R_r}\dot{\mathbf{I}}_r + \mathrm{j}\Omega_s\dot{\mathbf{\Lambda}}_r + \frac{1-s}{s}\mathrm{R}_r\dot{\mathbf{I}}_r}$$

s = scorrimento



Relazioni fra le potenze sul rotore, coppia

Perdite joule rotoriche

$$P_{jr} = 3\left|\dot{\mathbf{I}}_r\right|^2 R_r = 3 I_r^2 R_r \qquad \left(= \frac{3}{2}\left|\mathbf{i}_r^s\right|^2 R_r\right)$$

Potenza elettromeccanica

$$P = 3\left|\dot{\mathbf{I}}_r\right|^2 R_r \frac{1-s}{s} = 3\, I_r^2\, R_r \frac{1-s}{s} = P_{jr}\frac{1-s}{s}$$

$$\boxed{P_{jr} = P\frac{s}{1-s}}$$

Potenza trasmessa
(Potenza al traferro)

$$P_t = 3\left|\dot{\mathbf{I}}_r\right|^2 \left(R_r \frac{1-s}{s} + R_r\right) = 3\, I_r^2\, R_r \frac{1}{s} = P_{jr}\frac{1}{s} \longrightarrow \boxed{P_{jr} = P_t\, s}$$

$$\boxed{P = P_t\,(1-s)}$$

Coppia

$$\boxed{P = M\Omega_m = P_t\,(1-s)}$$

$$M = P_t\,\frac{(1-s)}{\Omega_m} = p\, P_t\,\frac{(1-s)}{\Omega_{me}} = p\, P_t\,\frac{1}{\Omega_s}$$

Caratteristica meccanica – *curva coppia/giri per prefissate condizioni di alimentazione elettrica*

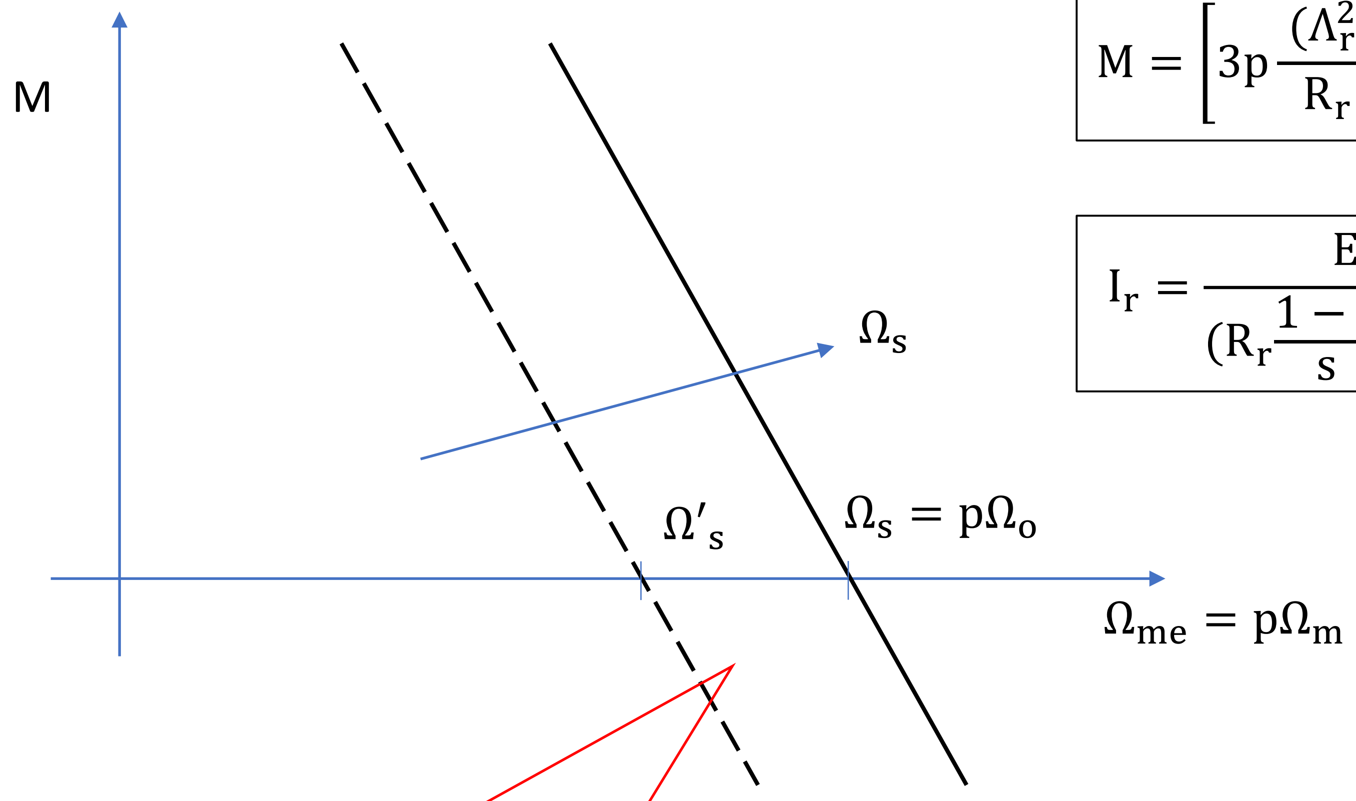
- Sia $\left|\dot{\boldsymbol{\Lambda}}_r\right| = \Lambda_r = \text{costante}$ e Ω_s = costante (frequenza di alimentazione costante)

Allora $\Lambda_r\,\Omega_s = E_r = \text{costante},$ con E_r fem indotta nel rotore del circuito equivalente visto. La tensione è aggiustata per avere $E_r = \text{costante}$ al variare dello scorrimento. Allora

$$P_t = 3\frac{E_r^2}{(R_r\frac{1-s}{s} + R_r)} = 3\frac{E_r^2}{(R_r\frac{1}{s})} = 3\frac{s\,E_r^2}{R_r}$$

$$M = p\,P_t\,\frac{1}{\Omega_s} = 3p\frac{s\,E_r^2}{\Omega_s R_r} = 3p\frac{s(\Lambda_r^2\Omega_s^2)}{\Omega_s R_r} = 3p\frac{s\,\Omega_s(\Lambda_r^2)}{R_r} = \underbrace{\left[3p\frac{(\Lambda_r^2)}{R_r}\right]}_{\text{costante}}(\Omega_s - \Omega_{me})$$

Caratteristica meccanica a flusso rotorico costante



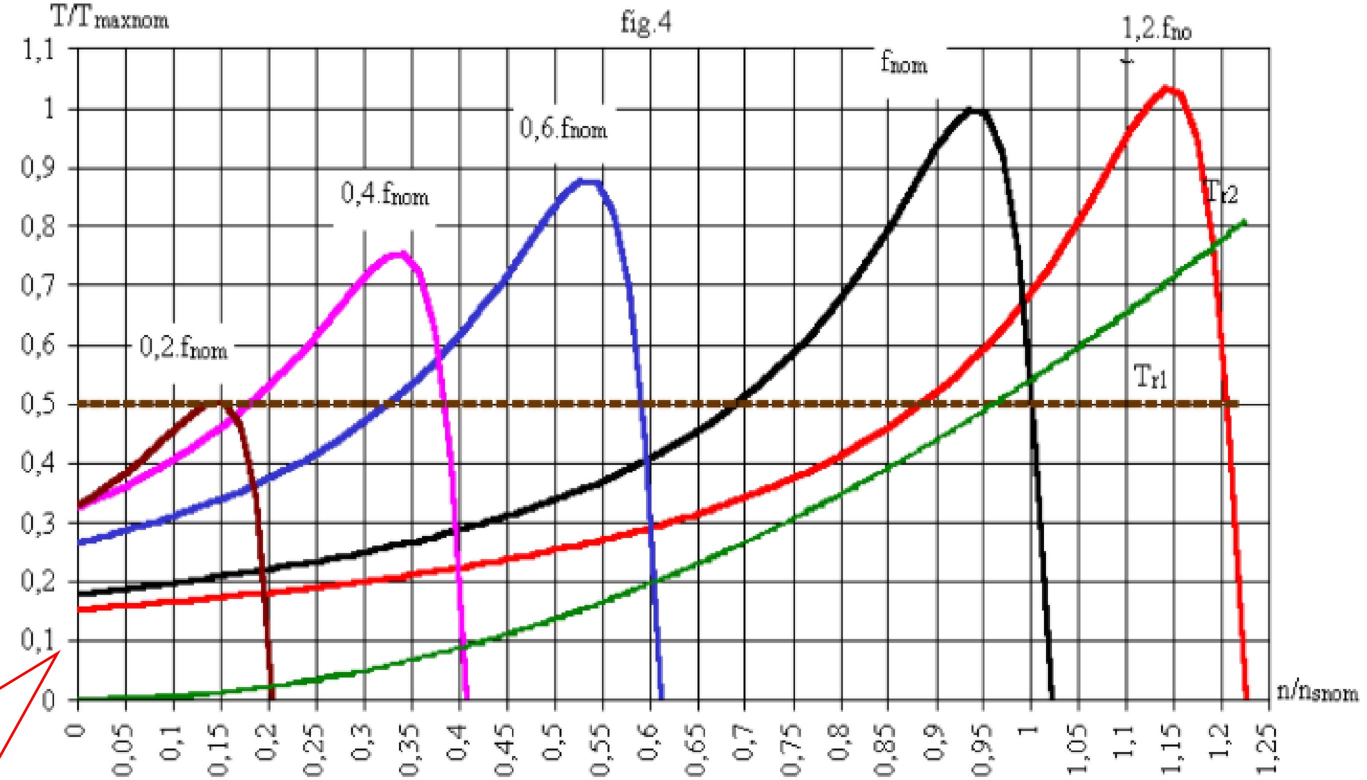
Regolazione $\frac{E_r}{\Omega_s} = \Lambda_r$= costante

$$M = \left[3p\frac{(\Lambda_r^2)}{R_r}\right](\Omega_s - \Omega_{me}) = \frac{3p}{R_r}\left(\frac{E_r}{\Omega_s}\right)^2(\Omega_s - \Omega_{me})$$

$$I_r = \frac{E_r}{(R_r\frac{1-s}{s} + R_r)} = \frac{sE_r}{R_r} = \frac{s\Lambda_r\Omega_s}{R_r} = \frac{\Lambda_r}{R_r}(\Omega_s - \Omega_{me})$$

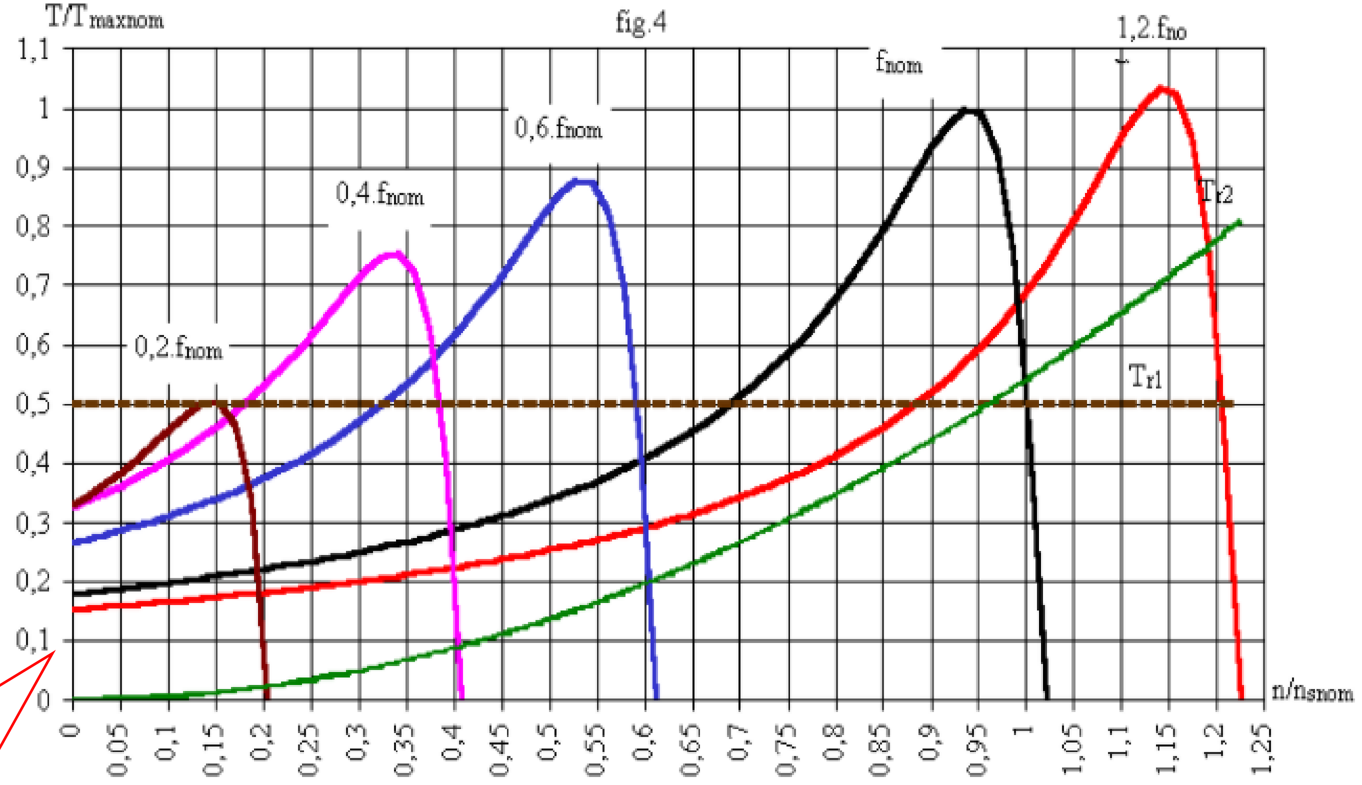
$$M = 3p\Lambda_r I_r$$

Caratteristica meccanica a tensione statorica costante



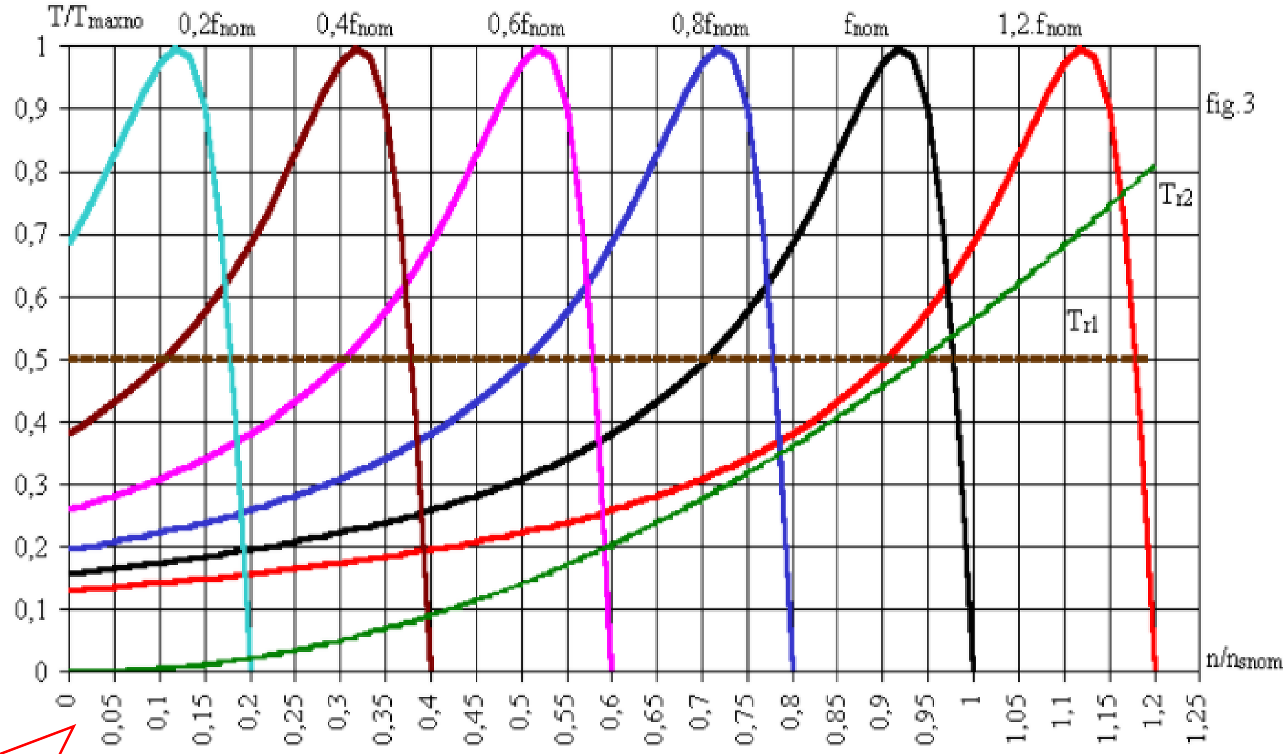
Regolazione $\frac{U_s}{\Omega_s}$ = costante

Caratteristica meccanica a tensione statorica costante



Regolazione $\frac{U_s}{\Omega_s}$ = costante

Caratteristica meccanica a flusso statorico costante



Regolazione $\frac{E_s}{\Omega_s} = \Lambda_s = \text{costante}$

Si ottiene aggiustando la tensione statorica con la corrente assorbita in modo da compensare la cdt resistiva di statore.

Sono regolazioni a dinamica molto modesta. Note come "controlli Volt-Hertz" oppure "controlli tensione-frequenza"

NON sono veri controlli di coppia!