Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

Macchina asincrona
(Macchina a induzione)

Controllo ad orientamento di campo
(Flux model, FOC indiretto)

Velocità di scorrimento ω_{dq}^{r} degli assi dq per il FOC

Equazioni già viste in $d^x q^x$ particolarizzate per $d^\lambda q^\lambda$ ($n = L_M/L_r$, $L_2 = 0$, $L_3 = (L_M/L_r)^2 L_r$)

$$\begin{cases} 0 = \left(R_r \frac{n}{L_3}\lambda_{3d}^x - R_r n\, i_{sd}^x\right) + \left(L_2 \frac{n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\frac{d\lambda_{3d}^x}{dt} - L_2 n \frac{di_{sd}^x}{dt} - (\omega_x^r)\left[\left(\frac{L_2 n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\lambda_{3q}^x - L_2 n i_{sq}^x\right] \\ 0 = \left(R_r \frac{n}{L_3}\lambda_{3q}^x - R_r n\, i_{sq}^x\right) + \left(\cancel{L_2 \frac{n}{L_3}} + \frac{1}{n}\right)\frac{d\lambda_{3q}^x}{dt} - \cancel{L_2 n \frac{di_{sq}^x}{dt}} + (\omega_x^r)\left[\left(\cancel{\frac{L_2 n}{L_3}} + \frac{1}{n}\right)\lambda_{3d}^x - \cancel{L_2 n i_{sd}^x}\right] \end{cases}$$

Quella di asse q diventa

$$0 = \left(R_r \left(\frac{L_r}{L_M}\right)^{\cancel{2}} \frac{1}{L_r} \frac{\cancel{L_M}}{\cancel{L_r}} \lambda_{3q}^x - R_r \frac{L_M}{L_r} i_{sq}^x\right) + \frac{L_r}{L_M}\frac{d\lambda_{3q}^x}{dt} + (\omega_x^r)\left[\frac{L_r}{L_M}\lambda_{3d}^x\right]$$

Velocità di scorrimento ω_{dq}^{r} degli assi dq per il FOC

Riordinandola

$$\left(\frac{L_r}{L_M}\right)\left[\frac{R_r}{L_r}\lambda_{3q}^{x}+\frac{d\lambda_{3q}^{x}}{dt}\right]=\underbrace{R_r\frac{L_M}{L_r}\mathrm{i}_{sq}^{x}-(\omega_x^r)\left[\frac{L_r}{L_M}\lambda_{3d}^{x}\right]}$$

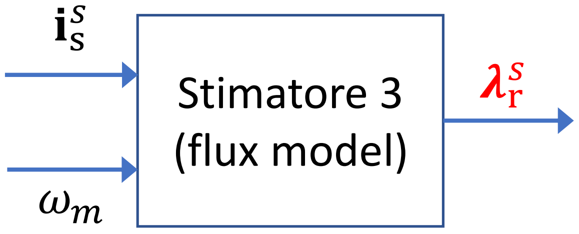
Deve essere(è) identicamente nullo per avere(se è) λ_{3q}^{x}=0

$$\Rightarrow \quad \omega_x^r=\frac{R_r\frac{L_M}{L_r}\mathrm{i}_{sq}^{x}}{\underbrace{\left[\frac{L_r}{L_M}\lambda_{3d}^{x}\right]}_{\lambda_r}}=\overbrace{R_r\left(\frac{L_M}{L_r}\right)^2}^{R_{rs}}\frac{\mathrm{i}_{sq}^{x}}{\underbrace{\lambda_3}_{\lambda_{rs}}}=\boxed{R_r\frac{L_M}{L_r}\frac{\mathrm{i}_{sq}^{x}}{\lambda_r}=\omega_\lambda^r}$$

- Quando sono in orientamento di campo (dq orientato con il flusso rotorico) la ω_{dq}^{r} è pari al valore sopra calcolato (metodo indiretto feedback per imporre il FOC = 3^ metodo diretto: “modello di flusso”)

- Se impongo una ω_{dq}^{r} pari al valore sopra calcolato il flusso λ_{3q}^{x} risulta nullo e quindi sono in orientamento di campo (metodo indiretto (feedforward) per imporre il FOC)

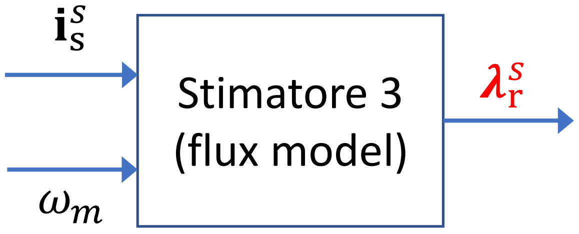
Metodo diretto 3): Stima del vettore λ_r^s da e $\mathbf{i}_s^s$ e ω_m (Flux model)



E' basato sulla seguente sequenza di equazioni

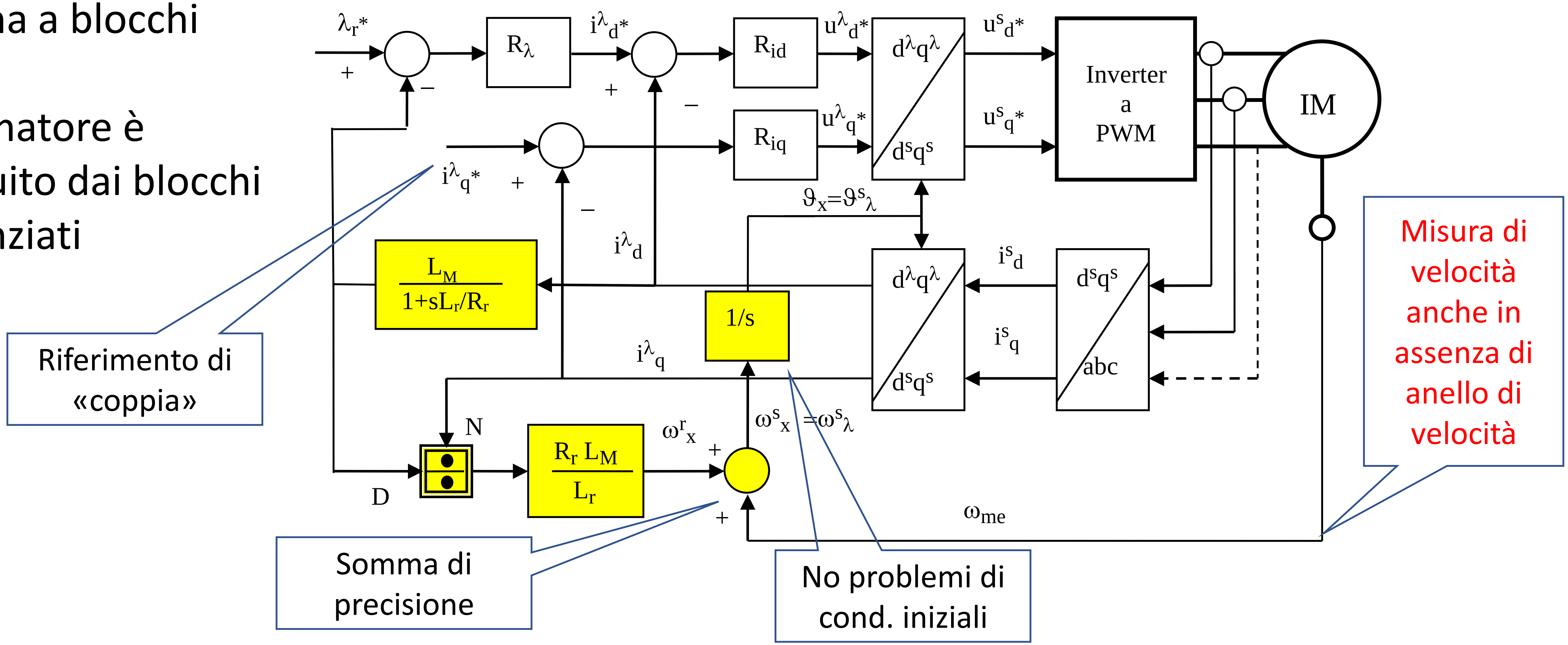
- $$\mathbf{i}_s^\lambda = e^{-j\vartheta_\lambda^s}\,\mathbf{i}_s^\lambda = \mathrm{i}_{sd}^\lambda + j\mathrm{i}_{sq}^\lambda$$
- $$\lambda_r + \frac{L_r}{R_r}\frac{\mathrm{d}\lambda_r}{\mathrm{dt}} = L_M \mathrm{i}_{sd}^\lambda$$
- $$R_r\frac{L_M}{L_r}\frac{\mathrm{i}_{sq}^x}{\lambda_r} = \omega_\lambda^r$$
- $$\omega_\lambda^s = \omega_\lambda^r + \omega_{me} \qquad \vartheta_\lambda^s = \int_0^t \omega_\lambda^s dt$$

Metodo diretto 3): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_r^s$ da e $\mathbf{i}_s^s$ e ω_m (Flux model)

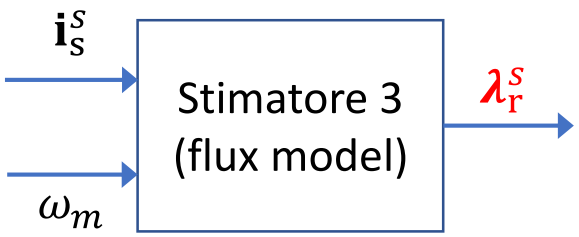


Schema a blocchi

Lo stimatore è costituito dai blocchi evidenziati



Metodo diretto 3): Stima del vettore λ_{r}^{s} da e $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$ e ω_m (Flux model)



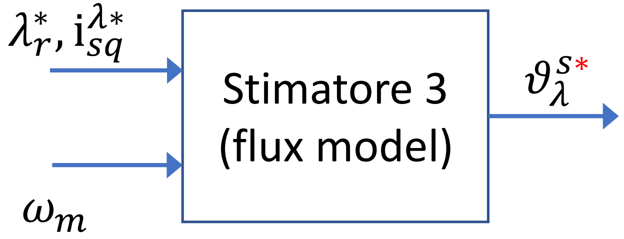
<u>*Analisi delle prestazioni*</u>

Lo stimatore basato sul "Flux model" ha le stesse prestazioni dello stimatore 2 (sensibilità parametrica, parametri coinvolti, campo di funzionamento).

Fornisce sia modulo che angolo del flusso rotorico. Ed anche velocità di rotazione dello stesso.

La sua concezione più intuitiva lo fa preferire.

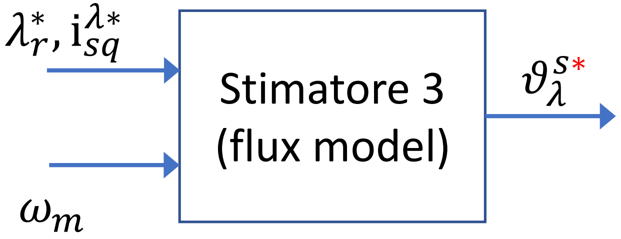
Metodo indiretto
(Feed forward Flux model)



E’ basato sulle seguenti poche equazioni, a partire dai riferimenti di flusso e di corrente, oltre che dalla velocità misurata.

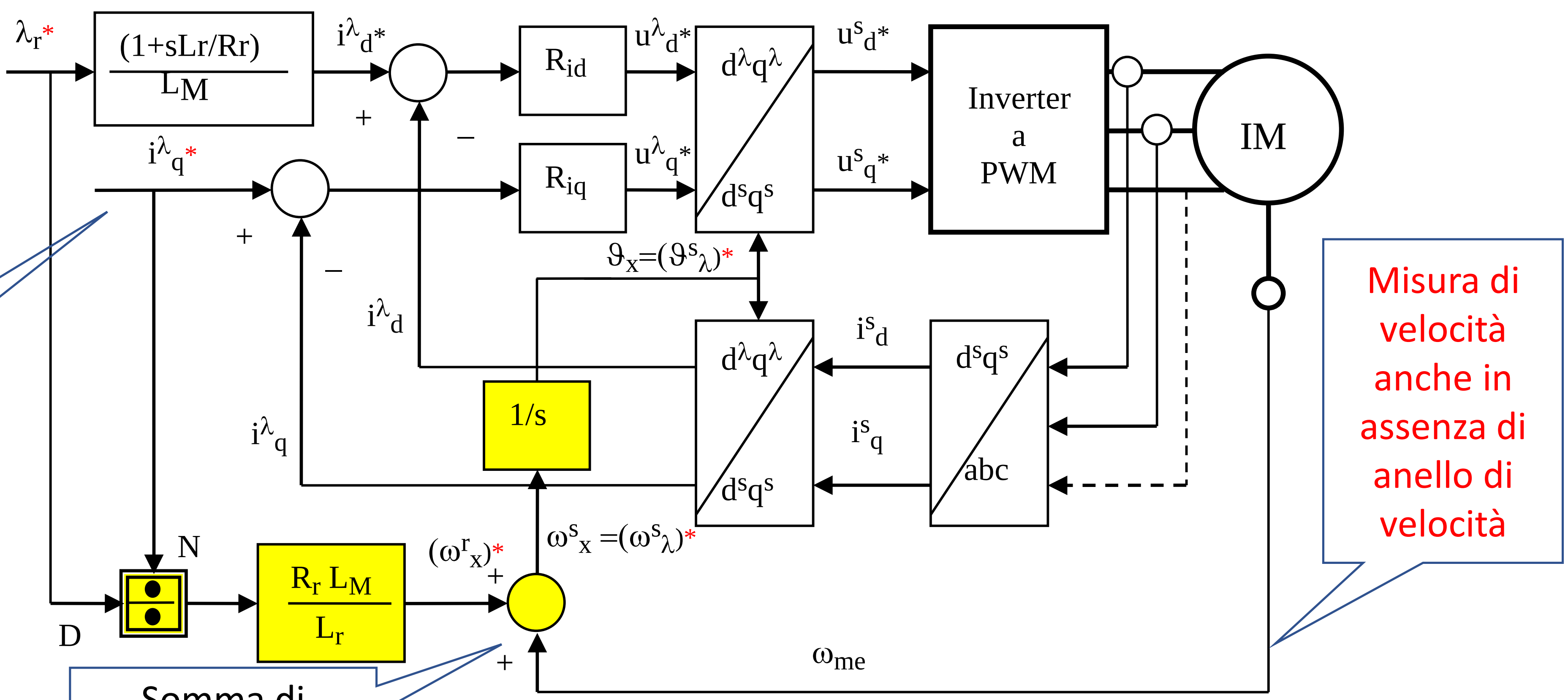
- $R_r \frac{L_M}{L_r} \frac{\mathrm{i}_{sq}^{\lambda *}}{\lambda_r^*} = \omega_\lambda^{r*}$
- $\omega_\lambda^{s*} = \omega_\lambda^{r*} + \omega_{me} \quad \Longrightarrow \quad \vartheta_\lambda^{s*} = \int_0^t \omega_\lambda^{s*} dt$

Metodo indiretto (Feed forward Flux model)



Schema a blocchi

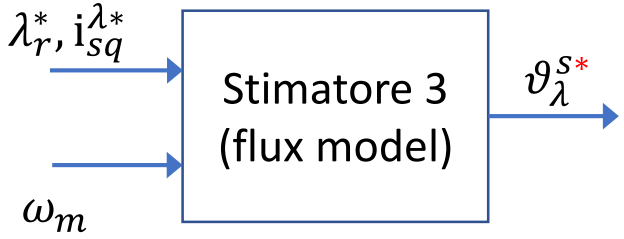
Lo stimatore è costituito dai blocchi evidenziati



Riferimento di «coppia»

Somma di precisione

Metodo indiretto
(Feed forward Flux model)



Analisi delle prestazioni

Lo schema del FOC indiretto ha le stesse prestazioni dello stimatore 2 e del Flux model (sensibilità parametrica, parametri coinvolti, campo di funzionamento).

Fornisce l'angolo del flusso rotorico e velocità di rotazione dello stesso.

La sua struttura elementare e l'uso di grandezze di riferimento invece che di misure (disturbate) lo ha reso molto diffuso.

Effetto dell'errato calcolo della velocità di scorrimento in azionamenti ad orientamento di campo indiretto

<u>Sapendo che il flusso di interesse è il flusso rotorico, scriviamo le equazioni di rotore in un generico sistema di riferimento</u>

$$\begin{cases} 0 = \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rd}^x - \dfrac{R_r}{L_r}L_M i_{sd}^x + \dfrac{d\lambda_{rd}^x}{dt} - \omega_x^r \lambda_{rq}^x \\ 0 = \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rq}^x - \dfrac{R_r}{L_r}L_M i_{sq}^x + \dfrac{d\lambda_{rq}^x}{dt} + \omega_x^r \lambda_{rd}^x \end{cases}$$

Se imponiamo correnti costanti in questo sistema di riferimento, avremo flussi costanti e quindi a regime le equazioni diventano così:

$$\begin{cases} \dfrac{R_r}{L_r}\Lambda_{rd}^x - \Omega_x^r \Lambda_{rq}^x = \dfrac{R_r}{L_r}L_M I_{sd}^x \\ \dfrac{R_r}{L_r}\Lambda_{rq}^x + \Omega_x^r \Lambda_{rd}^x = \dfrac{R_r}{L_r}L_M I_{sq}^x \end{cases}$$

Effetto dell'errato calcolo della velocità di scorrimento in azionamenti ad orientamento di campo indiretto

Risolvendo

$$\Lambda_{rd}^{x} = L_M \frac{\frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r I_{sq}^x + I_{sd}^x}{1+\left(\frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r\right)^2}$$

$$\Lambda_{rq}^{x} = L_M \frac{I_{sq}^x - \frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r I_{sd}^x}{1+\left(\frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r\right)^2}$$

NB: E' nullo per $\Omega_x{}^r$ pari a $(R_r/L_r)*(I_{sq}/I_{sd})$ che è la condizione di FOC a regime:

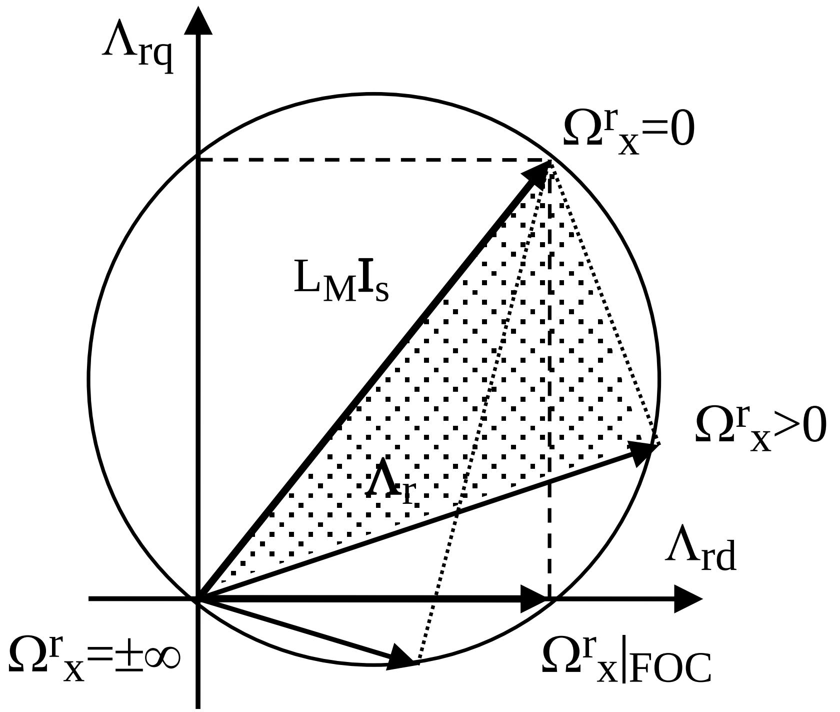
$$R_r \frac{L_M}{L_r}\frac{i_{sq}^x}{\lambda_r} = \omega_\lambda^r$$

Effetto dell’errato calcolo della velocità di scorrimento in azionamenti ad orientamento di campo indiretto

Sono le equazioni parametriche di un cerchio

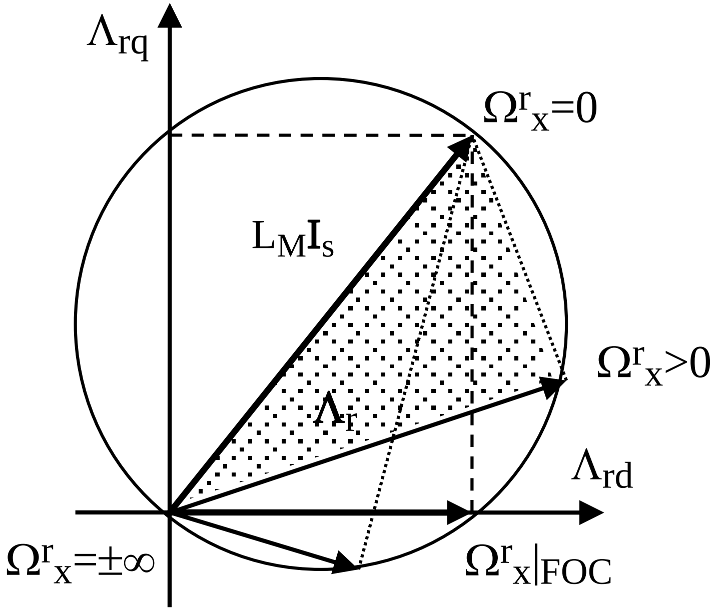
$$\Lambda_{rd}^{x} = L_M \frac{\dfrac{L_r}{R_r}\Omega_x^r I_{sq}^x + I_{sd}^x}{1+\left(\dfrac{L_r}{R_r}\Omega_x^r\right)^2}$$

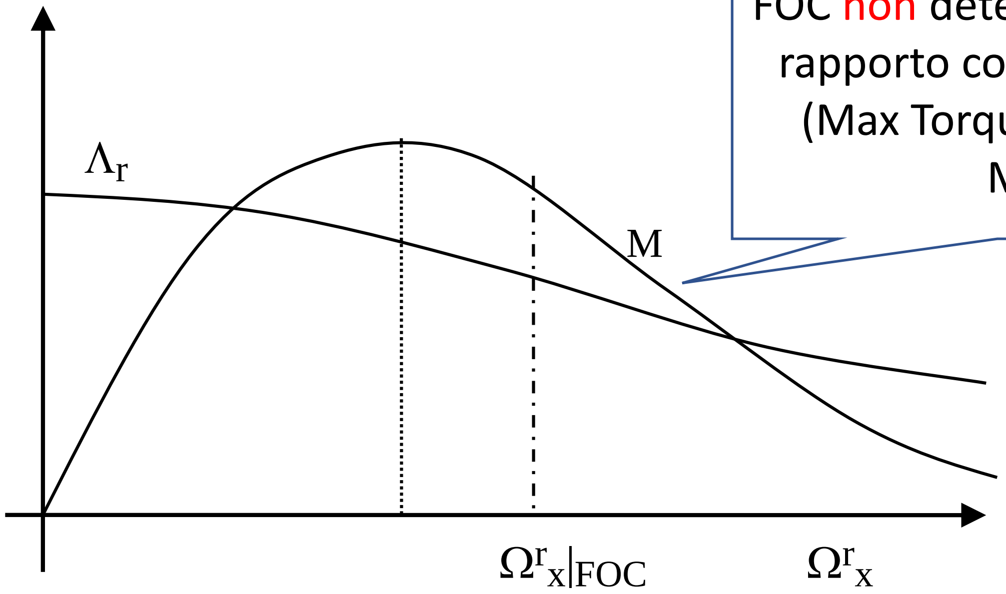
$$\Lambda_{rq}^{x} = L_M \frac{I_{sq}^x - \dfrac{L_r}{R_r}\Omega_x^r I_{sd}^x}{1+\left(\dfrac{L_r}{R_r}\Omega_x^r\right)^2}$$



Effetto dell'errato calcolo della velocità di scorrimento in azionamenti ad orientamento di campo indiretto

Il triangolo ombreggiato ha area $\cong I_s \Lambda_r$ sin(*angolo compreso*) $\cong$ *Coppia*





FOC non determina il massimo rapporto coppia su corrente (Max Torque Per Ampere: MTPA)