Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2022-2023

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 di rotore già viste in $d^x q^x$

$$\begin{cases} 0 = R_r \mathbf{i}_r^x + \dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_r^x}{dt} + j(\omega_x - \omega_{me})\boldsymbol{\lambda}_r^x \\ \boldsymbol{\lambda}_r^x = L_r \mathbf{i}_r^x + L_M \mathbf{i}_s^x \end{cases} \Longrightarrow \quad \mathbf{i}_r^x = \frac{\boldsymbol{\lambda}_r^x}{L_r} - \frac{L_M}{L_r}\mathbf{i}_s^x$$

Sostituendo nella prima equazione:

$$0 = \frac{R_r}{L_r}\boldsymbol{\lambda}_r^x - \frac{R_r}{L_r}L_M \mathbf{i}_s^x + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^x}{dt} + j\omega_x^r \boldsymbol{\lambda}_r^x$$

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

Scomponendo delle due equazioni d e q:

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

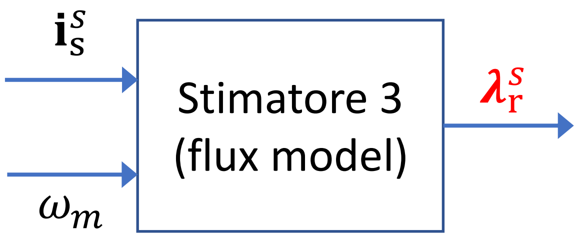
$\boxed{\text{Se sono in FOC } \lambda_{rq} \equiv 0}$

$$\Rightarrow \quad \omega_x^r = \omega_x - \omega_{me} = \frac{R_r}{L_r}L_M \frac{i_{sq}^{x}}{\lambda_{rd}^{x}}$$

- Quando sono in orientamento di campo (dq orientato con il flusso rotorico) la $\omega_{dq}^{r} = \omega_{\lambda}^{r}$ è pari al valore ω_x^r sopra calcolato (sfrutto per 3^ metodo diretto: “modello di flusso”)

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

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

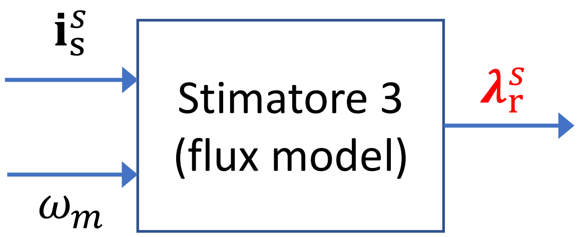


E’ basato sulla seguente sequenza di equazioni

misurata

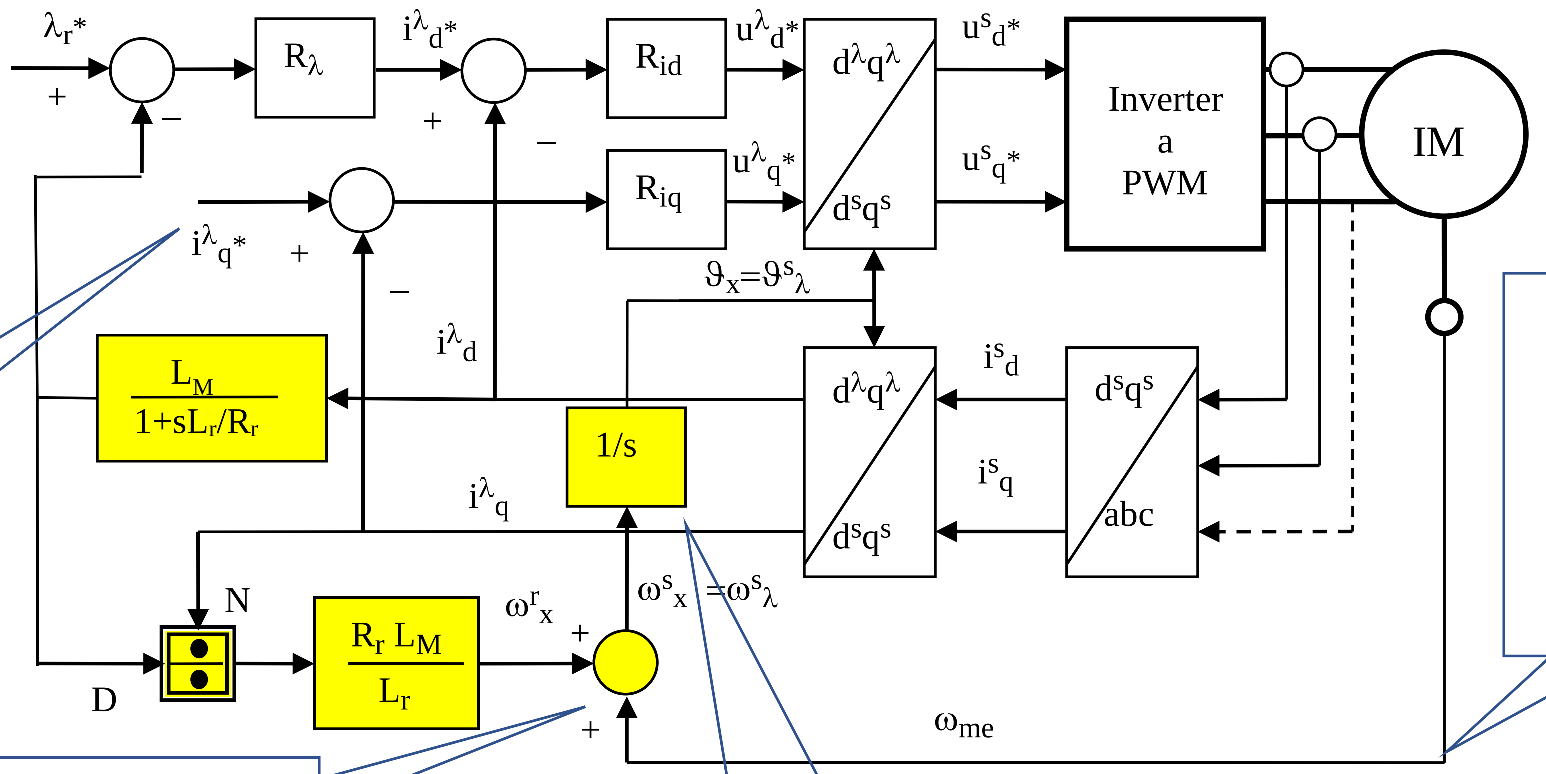
- $$\mathbf{i}_s^{\lambda} = \mathbf{i}_s^{s}\, e^{-j\vartheta_\lambda^s} = \mathrm{i}_{sd}^{\lambda} + j\mathrm{i}_{sq}^{\lambda}$$
- $$\lambda_r + \frac{L_r}{R_r}\frac{\mathrm{d}\lambda_r}{\mathrm{dt}} = L_M \mathrm{i}_{sd}^{\lambda}$$
- $$R_r \frac{L_M}{L_r}\frac{\mathrm{i}_{sq}^{x}}{\lambda_r} =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

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



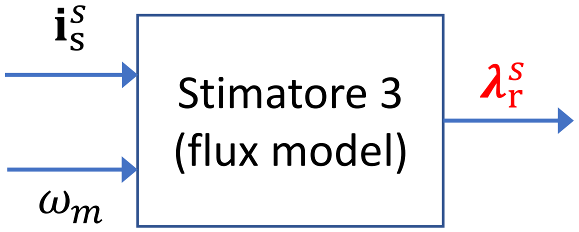
Riferimento di «coppia»

Somma di precisione

No problemi di cond. iniziali

Misura di velocità anche in assenza di anello di velocità

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



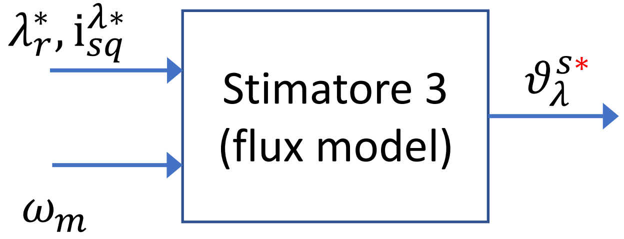
Analisi delle prestazioni

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 allo stimatore 2.

Metodo indiretto
(Feed forward Flux model)

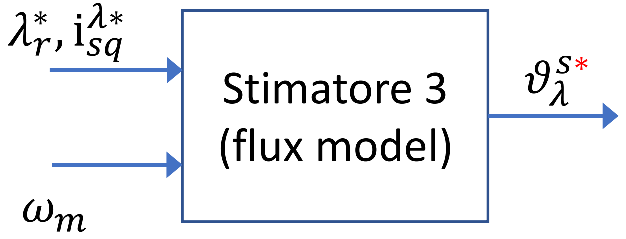


E' basato sulle seguenti poche equazioni, a partire dai riferimenti di flusso e di corrente, oltre che dalla velocità misurata.

- $R_r \frac{L_M}{L_r} \frac{\mathrm{i}_{sq}^{\lambda *}}{\lambda_r^*} = \omega_\lambda^{r*}$

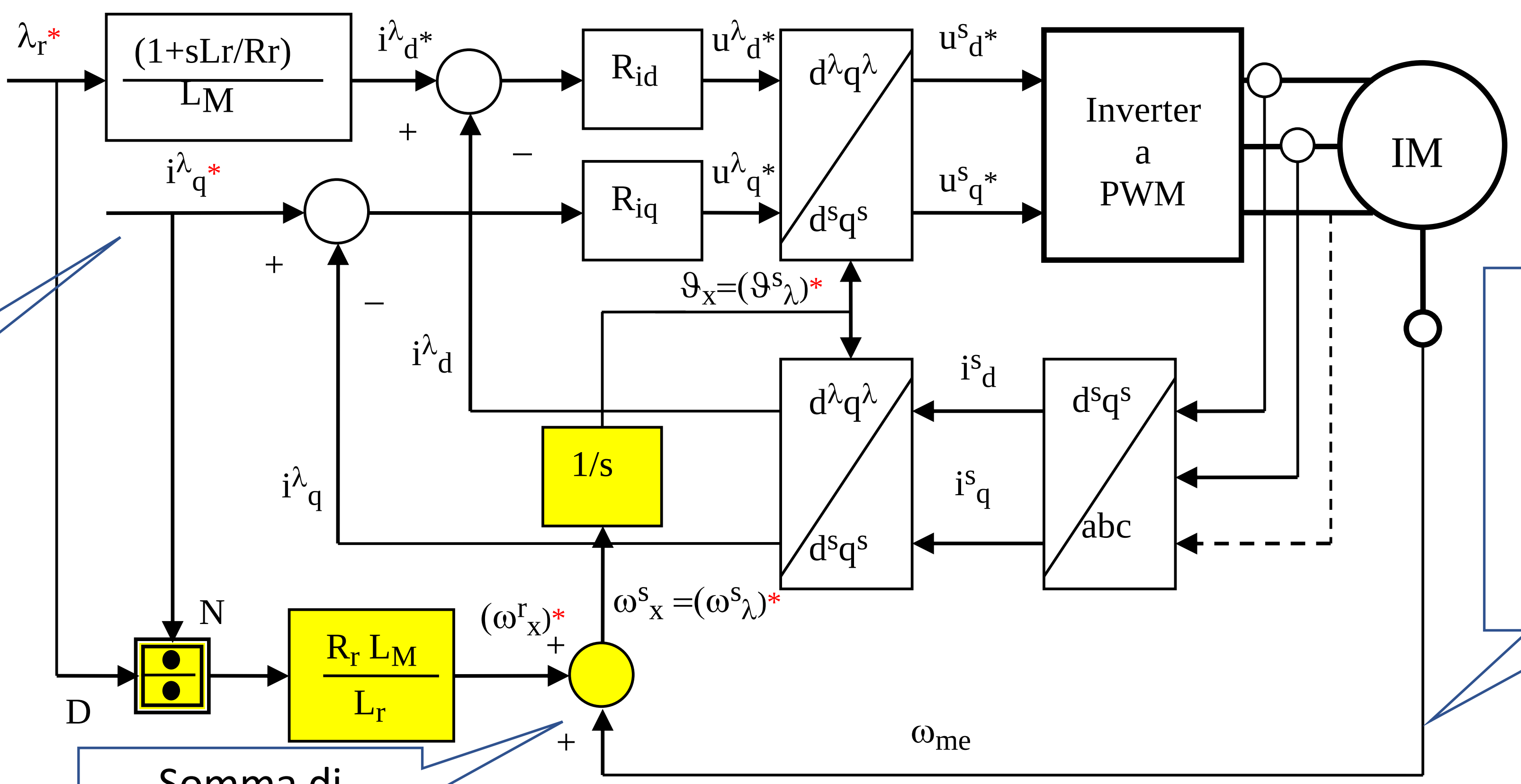
- $\omega_\lambda^{s*} = \omega_\lambda^{r*} + \omega_{me} \quad \Longrightarrow \quad \vartheta_\lambda^{s*} = \int_0^t \omega_\lambda^{s*} dt$

Metodo indiretto
(Feed forward Flux model)



Schema a blocchi

Lo stimatore è costituito dai blocchi evidenziati

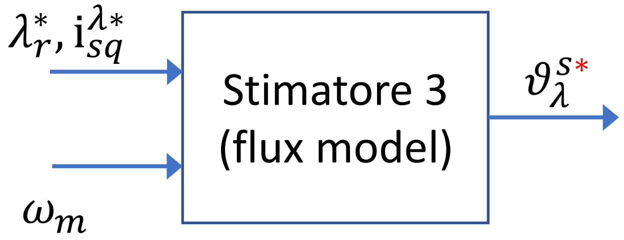


Riferimento di «coppia»

Somma di precisione

Misura di velocità anche in assenza di anello di velocità

Metodo indiretto
(Feed forward Flux model)



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

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 la velocità di rotazione dello stesso.

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

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

Si analizza l'effetto sul flusso rotorico: si riprendano le equazioni di rotore in un generico sistema di riferimento

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

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

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

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

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

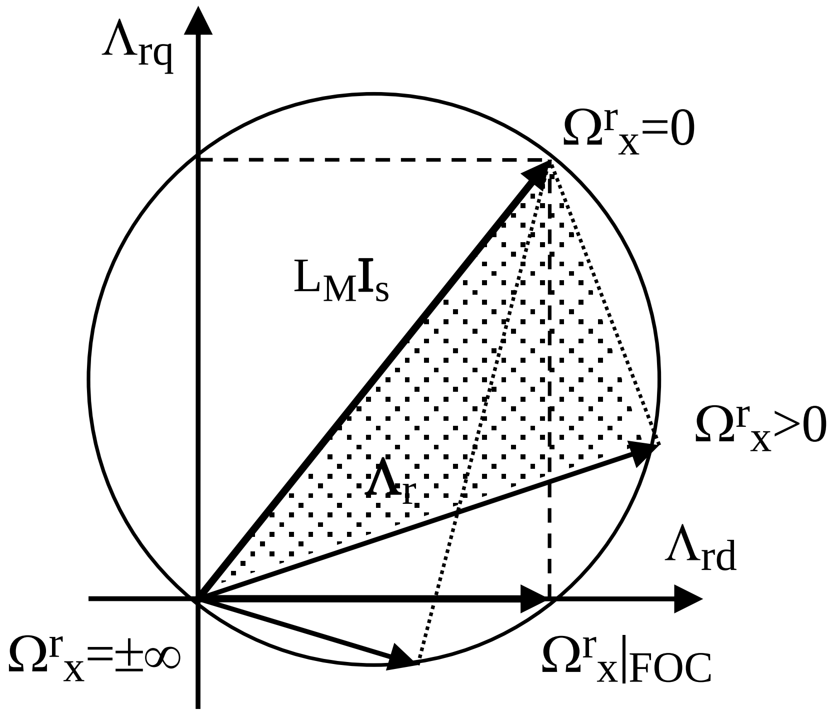
$$R_r \frac{L_M}{L_r}\frac{i_{sq}^x}{\lambda_r} = \omega_\lambda^r$$

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

Sono le equazioni parametriche di un cerchio

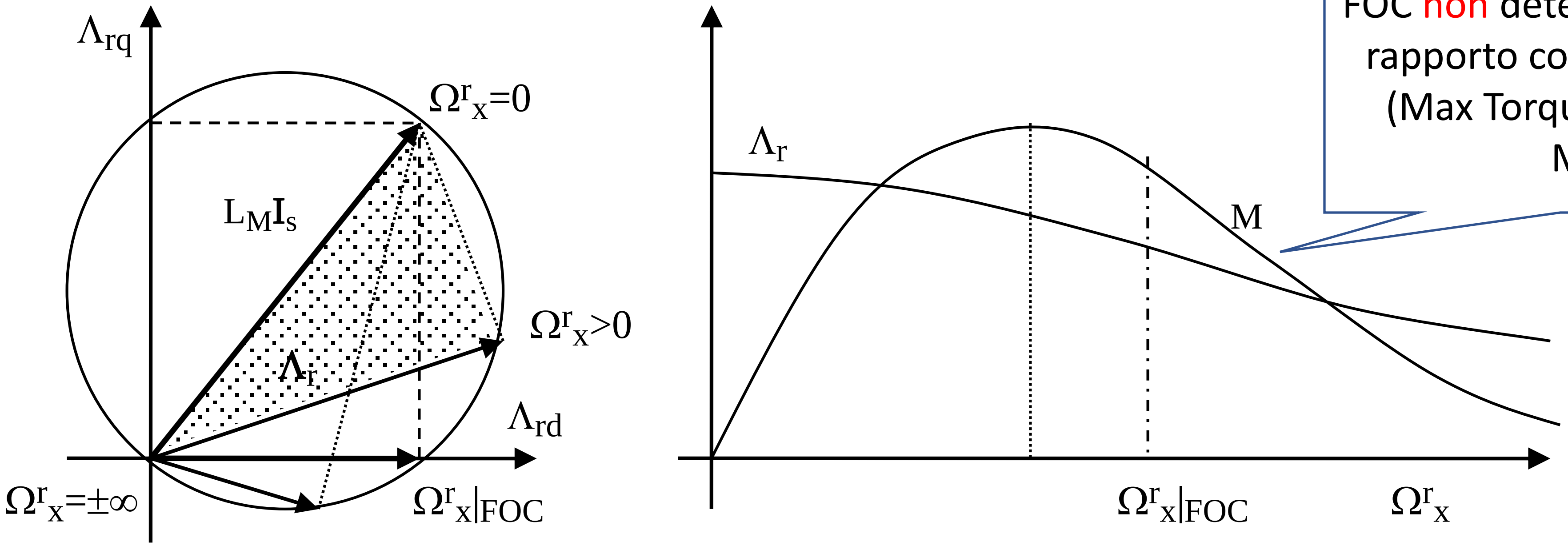
$$\Lambda_{rd}^{x} = L_M \frac{\frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r I_{sq}^x + I_{sd}^x}{1+\left(\frac{L_r}{R_r}\Omega_x^r\right)^2}$$

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



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

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



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