Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

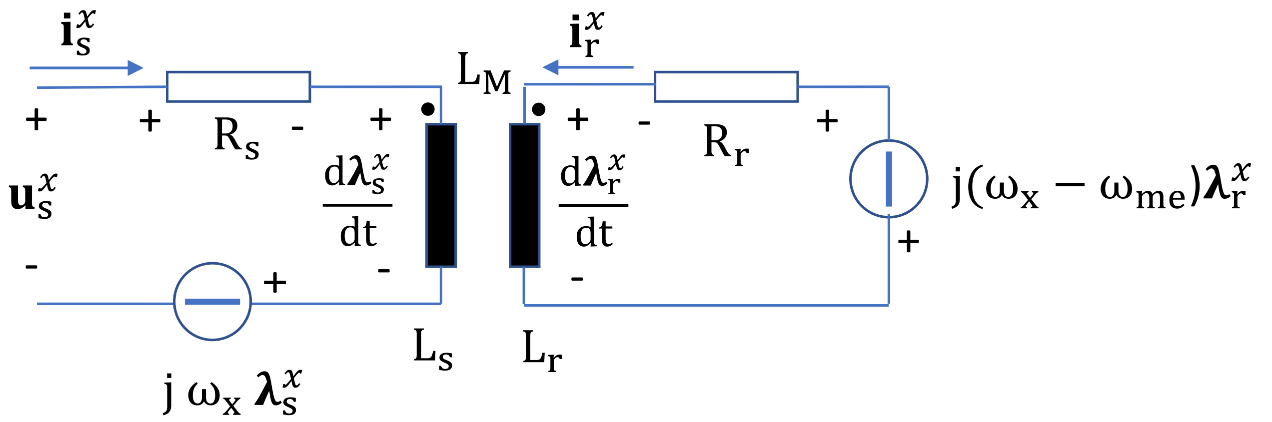
PARTE IV

Macchina asincrona (Macchina a induzione)

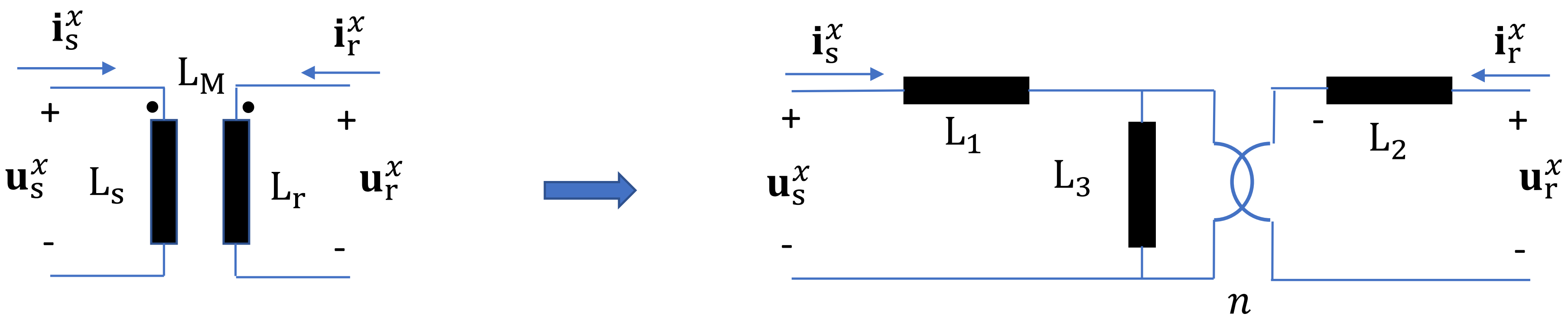
Introduzione al controllo

Equazioni in $d^x q^x$

$$
\begin{cases}
\boxed{\mathbf{u}_s^x = R_s \mathbf{i}_s^x + \dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_s^x}{dt} + j\omega_x \boldsymbol{\lambda}_s^x} \\
\boxed{0 = R_r \mathbf{i}_r^x + \dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_r^x}{dt} + j(\omega_x - \omega_{me}) \boldsymbol{\lambda}_r^x} \\
\boxed{\begin{array}{l} \boldsymbol{\lambda}_s^x = L_s\, \boldsymbol{i}_s^x + L_M\, \boldsymbol{i}_r^x \\ \boldsymbol{\lambda}_r^x = L_M \boldsymbol{i}_s^x + L_r\, \boldsymbol{i}_r^x \end{array}}
\end{cases}
\Rightarrow
\begin{cases}
\boxed{\mathbf{u}_s^s = R_s \mathbf{i}_s^s + L_s \dfrac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} + L_M \dfrac{d\mathbf{i}_r^s}{dt} + j\omega_x \boldsymbol{\lambda}_s^x} \\
\boxed{0 = R_r \mathbf{i}_r^s + L_M \dfrac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} + L_r \dfrac{d\mathbf{i}_r^s}{dt} + j(\omega_x - \omega_{me}) \boldsymbol{\lambda}_r^x}
\end{cases}
$$



Modellazione del mutuo accoppiamento



Se opportuno, le grandezze di rotore possono essere riportate allo statore, eliminando il trasformatore ideale.

$$L_s = L_1 + L_3$$

$$L_M = L_3/n$$

$$L_r = L_2 + L_3/n^2$$

$$L_3 = n\, L_M$$

$$L_1 = L_s - n\, L_M \qquad \forall n \;\Rightarrow L_3\,,\, L_1\,,\, L_2$$

$$L_2 = L_r - L_M/n$$

(p.es. $n = 1 \;\Rightarrow\; L_3 = L_M,\quad L_1 = L_s - L_M,\quad L_2 = L_r - L_M$)

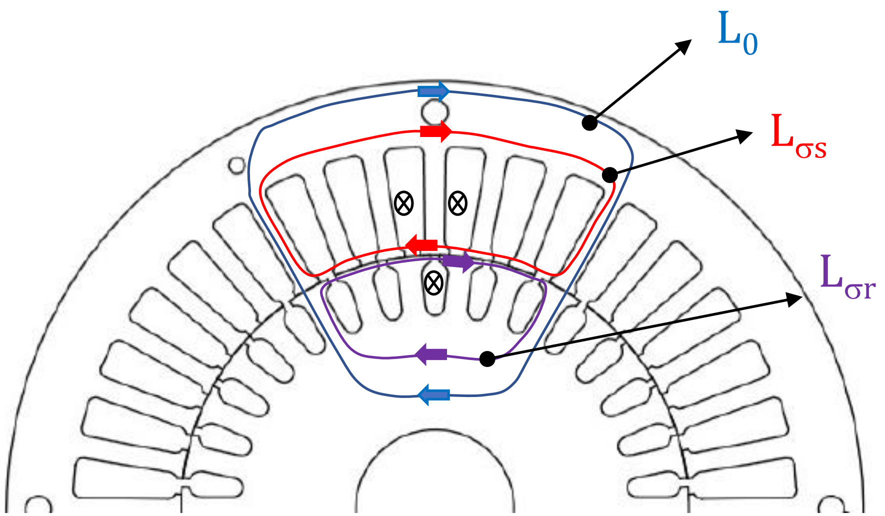
Scelta di n *(si immaginano diverse configurazione delle mappe delle linee di campo, fermo restando i flussi concatenati per date correnti)*

$n=(N_s/\ N_r)$

$L_3 = (N_s/\ N_r)\ L_M = L_0$ = induttanza principale

$L_1 = L_s - (N_s/\ N_r)\ L_M = L_{\sigma s}$ induttanza di dispersione di statore

$L_2 = L_r - L_M\,/(N_s/\ N_r) = L_{\sigma r}$ induttanza di dispersione di rotore

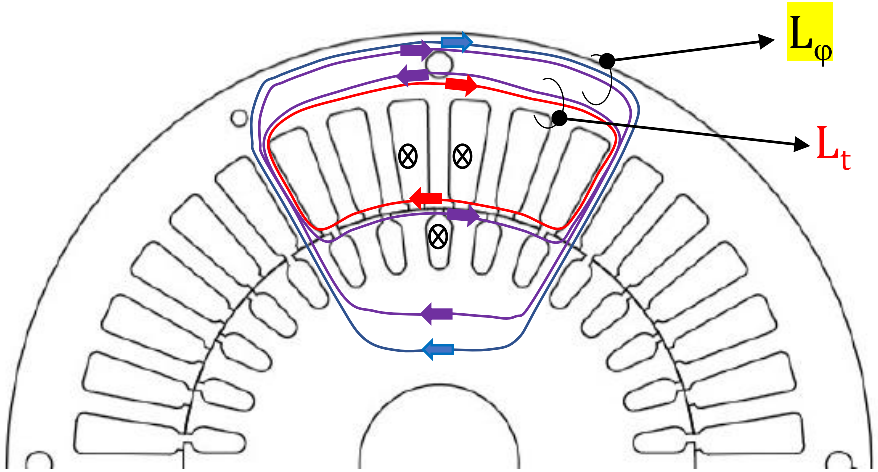


$n = L_M\,/\ L_r$

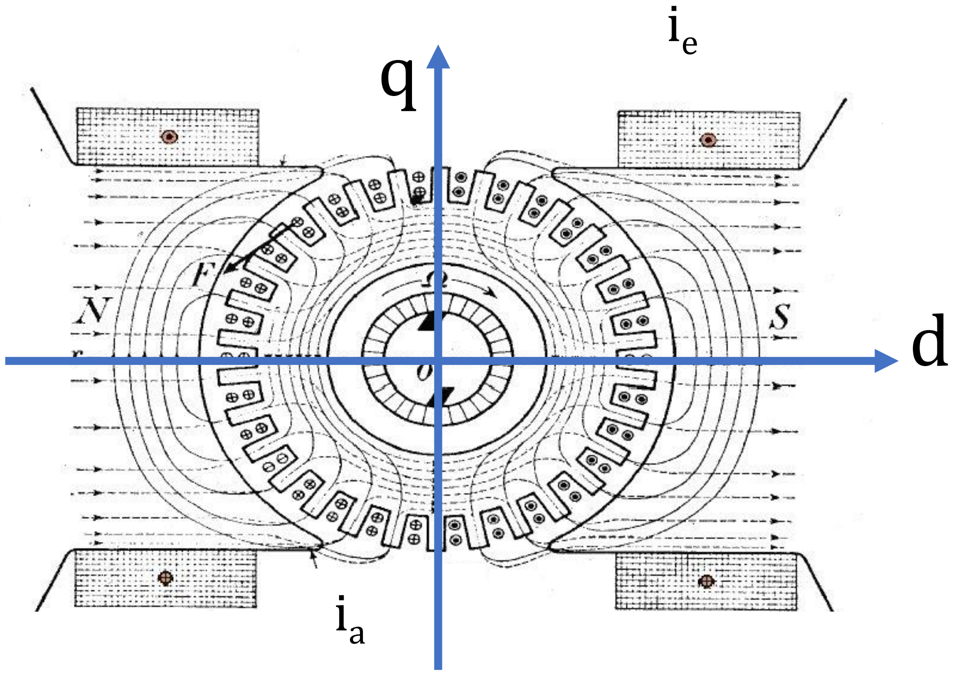
$L_3 = L^2_M\,/\ L_r = n^2\, L_r = L_\varphi$ = induttanza magnetizzante (di statore)

$L_1 = L_s - L^2_M\,/\ L_r = L_t\ (=L'_s)$ induttanza transitoria di statore

$L_2 = L_r - L_M\,/(L_M\,/\ L_r) = 0$ (nulla!)

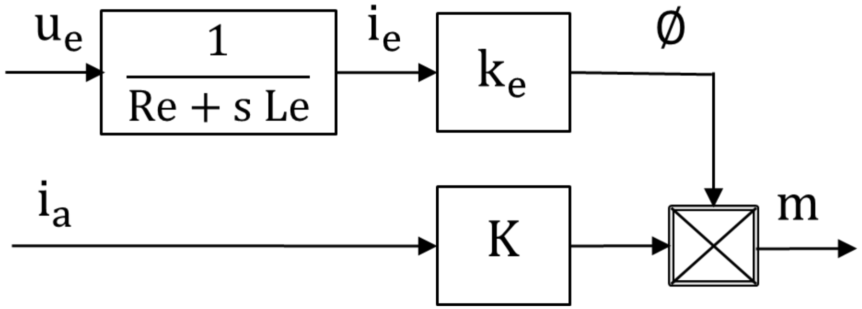


Richiamo al motore in CC ad eccitazione indipendente



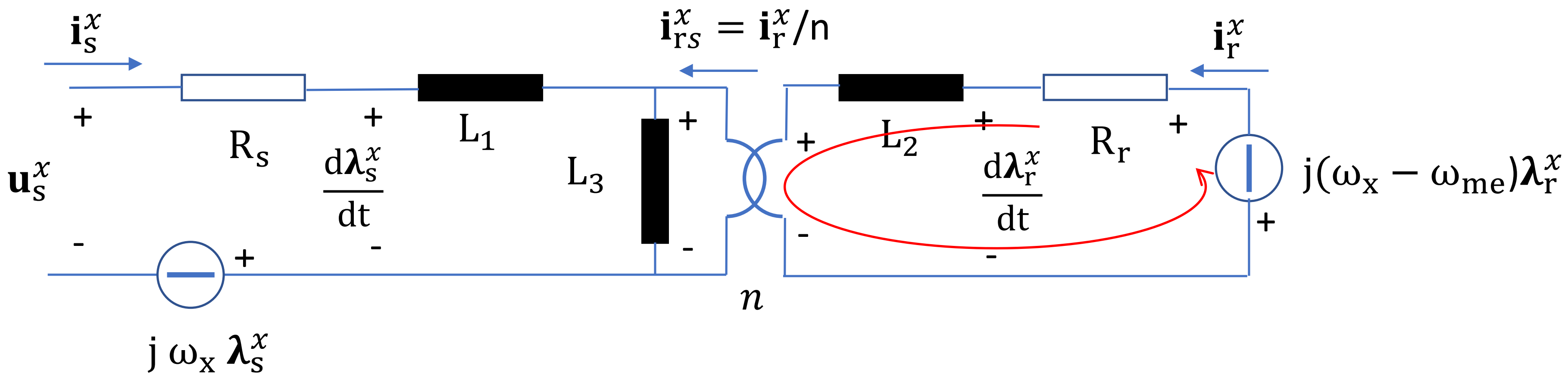
$$\emptyset = k_e \, i_e$$

$$m = K \, \emptyset \, i_a$$



Si può ottenere un controllo simile per una macchina asincrona? Esiste un sistema d-q che lo consente?

Equazioni in $d^x q^x$ (generico)



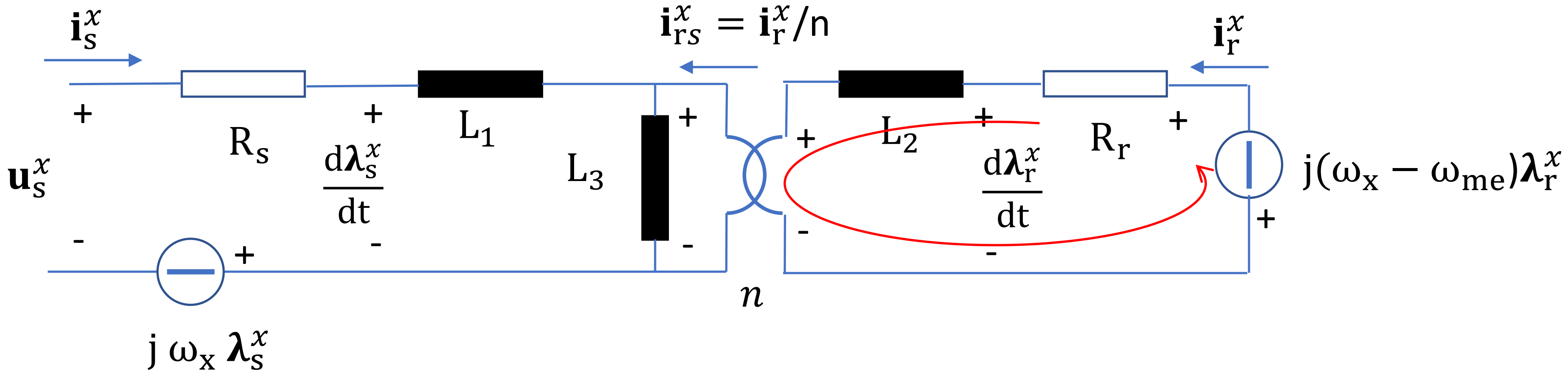
Assumiamo la corrente statorica $\mathbf{i}_s^x$ come grandezza di comando (impressa) e assumiamo come flusso principale della macchina quello $\boldsymbol{\lambda}_3^x$ in $\mathrm{L_3}$. Scriviamo poi l'equazione di bilancio delle tensioni rotoriche nelle due grandezze scelte.

$$0 = R_r \mathbf{i}_r^x + L_2 \frac{d\boldsymbol{i}_r^x}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_3^x}{dt}\frac{1}{n} + j(\omega_x - \omega_{me})\boldsymbol{\lambda}_r^x = R_r \mathbf{i}_r^x + L_2 \frac{d\boldsymbol{i}_r^x}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_3^x}{dt}\frac{1}{n} + j(\omega_x^r)\boldsymbol{\lambda}_r^x$$

con

$$\boldsymbol{\lambda}_3^x = L_3\left(\mathbf{i}_s^x + \frac{\mathbf{i}_r^x}{n}\right) \qquad \text{da cui} \qquad \mathbf{i}_r^x = n\left(\frac{\boldsymbol{\lambda}_3^x}{L_3} - \mathbf{i}_s^x\right)$$

Equazioni in $d^x q^x$ (generico)



Inoltre

$$\boldsymbol{\lambda}_r^x = L_2\mathbf{i}_r^x + \frac{1}{n}\boldsymbol{\lambda}_3^x = L_2 n\left(\frac{\boldsymbol{\lambda}_3^x}{L_3} - \mathbf{i}_s^x\right) + \frac{1}{n}\boldsymbol{\lambda}_3^x = \left(\frac{L_2 n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\boldsymbol{\lambda}_3^x - L_2 n\mathbf{i}_s^x$$

Equazioni in $d^x q^x$ (generico)

Sostituendo $\mathbf{i}_\mathrm{r}^x$ e $\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^x$ nell'equazione delle tensioni prima ricavata

$$0 = R_r\mathbf{i}_\mathrm{r}^x + L_2\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_\mathrm{r}^x}{\mathrm{dt}} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_3^x}{\mathrm{dt}}\frac{1}{n} + \mathrm{j}(\omega_x^r)\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^x$$

e riordinando, essa risulta:

$$0 = (R_r\frac{n}{L_3}\boldsymbol{\lambda}_3^x - R_r n\,\mathbf{i}_\mathrm{s}^x) + (L_2\frac{n}{L_3} + \frac{1}{n})\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_3^x}{\mathrm{dt}} - L_2 n\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_\mathrm{s}^x}{\mathrm{dt}} + \mathrm{j}(\omega_x^r)\left[\left(\frac{L_2 n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\boldsymbol{\lambda}_3^x - L_2 n\mathbf{i}_\mathrm{s}^x\right]$$

Moltiplico per i fattori indicati e sommo termine e a termine

Ossia, separando parte reale (d) da parte immaginaria (q):

$$0 = (R_r\frac{n}{L_3}\lambda_{3d}^x - R_r n\,\mathrm{i}_{sd}^x) + (L_2\frac{n}{L_3} + \frac{1}{n})\frac{d\lambda_{3d}^x}{dt} - L_2 n\frac{di_{sd}^x}{dt} - (\omega_x^r)\left[\left(\frac{L_2 n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\lambda_{3q}^x - L_2 n\mathrm{i}_{sq}^x\right] \qquad (*\,\lambda_{3d}^x)$$

$$0 = (R_r\frac{n}{L_3}\lambda_{3q}^x - R_r n\,\mathrm{i}_{sq}^x) + (L_2\frac{n}{L_3} + \frac{1}{n})\frac{d\lambda_{3q}^x}{dt} - L_2 n\frac{di_{sq}^x}{dt} + (\omega_x^r)\left[\left(\frac{L_2 n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\lambda_{3d}^x - L_2 n\mathrm{i}_{sd}^x\right] \qquad (*\,\lambda_{3q}^x)$$

Equazioni in $d^x q^x$ (generico)

…ottenendo (ricordando : $\lambda_{3\mathrm{d}}^2 + \lambda_{3\mathrm{q}}^2 = \lambda_3^2$)

$$R_r \frac{n}{L_3}\lambda_3^2 + \frac{1}{2}\left(L_2 \frac{n}{L_3} + \frac{1}{n}\right)\frac{\mathrm{d}\lambda_3^2}{\mathrm{dt}} = R_r n\left(\mathrm{i}_{sd}^x\ \lambda_{3d}^x + \mathrm{i}_{sq}^x\ \lambda_{3q}^x\right) + L_2 n\left(\lambda_{3d}^x \frac{\mathrm{di}_{sd}^x}{\mathrm{dt}} + \lambda_{3q}^x \frac{\mathrm{di}_{sq}^x}{\mathrm{dt}}\right) + \omega_x^r L_2 n\left(\mathrm{i}_{sd}^x\ \lambda_{3q}^x - \mathrm{i}_{sq}^x\ \lambda_{3d}^x\right)$$

Per la coppia si ha (dall'espressione in funzione delle grandezze statoriche):

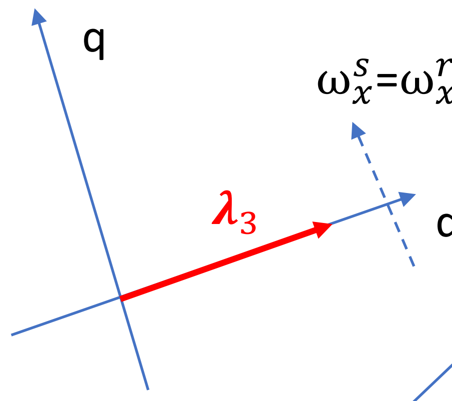
$$m = \frac{3}{2}p(\ \mathrm{i}_{sq}^x \lambda_{3d}^x - \mathrm{i}_{sd}^x\ \lambda_{3q}^x)$$

Sia la coppia m che l'ampiezza λ_3 del flusso principale dipendono in generale da entrambe le componenti della corrente statorica

Equazioni in $d^x q^x$ orientato con λ_3

Per riprodurre l'equazione di coppia della macchina a corrente continua scelgo dq tale che $\lambda_{3q}^x \equiv 0$ e allora $\lambda_{3d}^x = \lambda_3$

$$m = \frac{3}{2} p\left(i_{sq}^x \lambda_{3d}^x - \cancel{i_{sd}^x \lambda_{3q}^x}\right) = \frac{3}{2}\, p i_{sq}^x \lambda_3$$



$\omega_x^s = \omega_x^r + \omega_{me}$

$(\omega_{\lambda 3}^s = \omega_{\lambda 3}^r + \omega_{me})$

Affinché λ_3 dipenda solo da i_{sd}^x scelgo opportunamente *n*

$$R_r \frac{n}{L_3} \lambda_3^2 + \frac{1}{2}\left(L_2 \frac{n}{L_3} + \frac{1}{n}\right) \frac{d\lambda_3^2}{dt} = R_r n\left(i_{sd}^x\, \lambda_{3d}^x + \cancel{i_{sq}^x\, \lambda_{3q}^x}\right) + L_2 n\left(\lambda_{3d}^x \frac{di_{sd}^x}{dt} + \cancel{\lambda_{3q}^x \frac{di_{sq}^x}{dt}}\right) + \omega_x^r L_2 n\left(\cancel{i_{sd}^x\, \lambda_{3q}^x} - i_{sq}^x\, \lambda_{3d}^x\right)$$

$\lambda_{3d}^x = \lambda_3$

Deve essere $L_2 = 0$, cioè $n = L_M / L_r$!

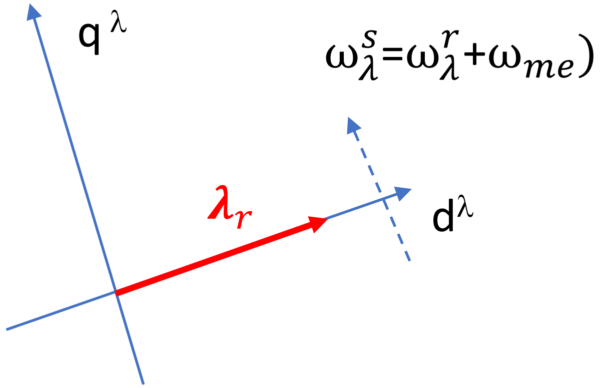
Equazioni in $d^x q^x$ orientato con λ_r

Cos'è λ_3 con la scelta di n $= L_M / L_r$ fatta, cioè con $L_2=0$ e $L_3 = L^2_M / L_r = n^2 L_r = L_\varphi$? Si era scritto:

$$\boldsymbol{\lambda}_r^x = \cancel{L_2 \mathbf{i}_r^x} + \frac{1}{n}\boldsymbol{\lambda}_3^x$$ (per ogni sistema di riferimento!)

Quindi

$$\boldsymbol{\lambda}_3^x = n\,\boldsymbol{\lambda}_r^x = \frac{L_M}{L_r}\,\boldsymbol{\lambda}_r^x = \boldsymbol{\lambda}_{rs}^x$$ è il flusso rotorico riportato a statore



Field Oriented Control (FOC)

$$\boxed{m = \frac{3}{2}p\,\mathrm{i}_{sq}^x\lambda_{rs} = \frac{3}{2}p\frac{L_M}{L_r}\,\mathrm{i}_{sq}^\lambda\lambda_r}$$

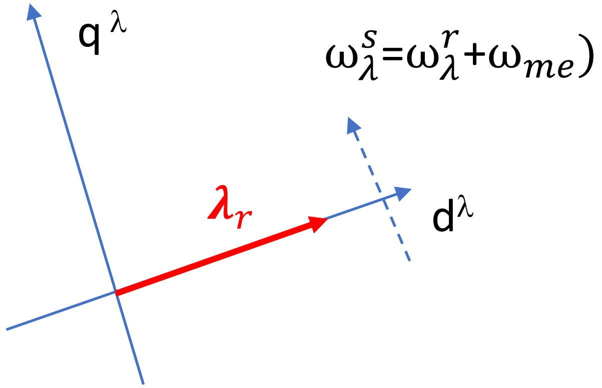
$$R_r\frac{n}{L_3}\lambda_3^2 + \frac{1}{2}\left(\cancel{L_2\frac{n}{L_3}} + \frac{1}{n}\right)\frac{\mathrm{d}\lambda_3^2}{\mathrm{dt}} = R_r n(\mathrm{i}_{sd}^x\lambda_3) \Longrightarrow \boxed{\lambda_{rs} + \frac{L_r}{R_r}\frac{\mathrm{d}\lambda_{rs}}{\mathrm{dt}} = \frac{L_M^2}{L_r}\mathrm{i}_{sd}^\lambda}$$

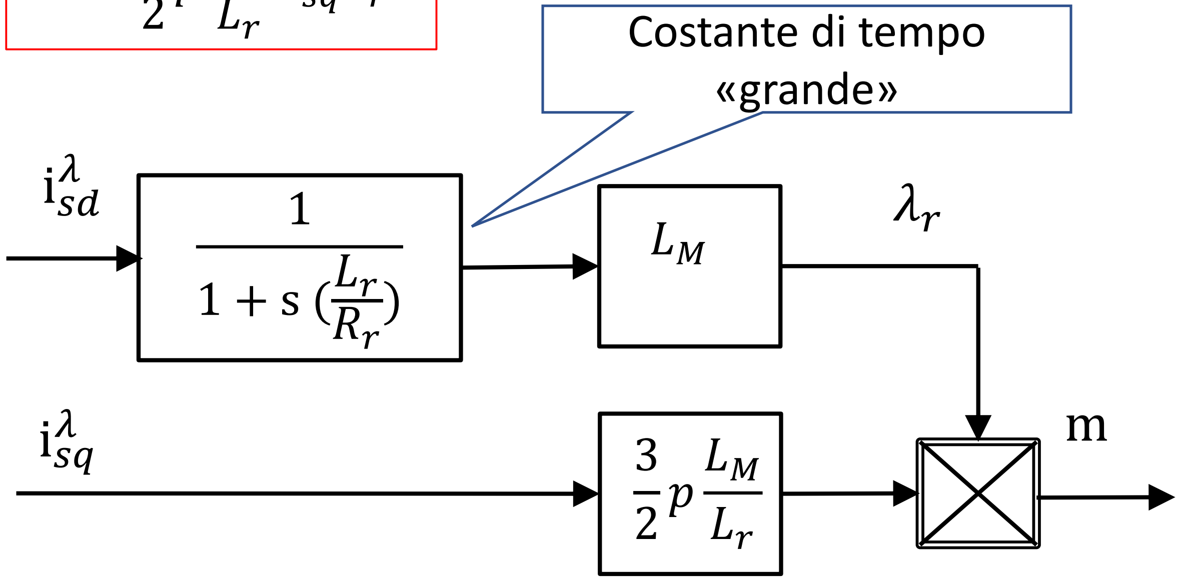
Equazioni in $d^x q^x$ orientato con $\boldsymbol{\lambda_r}$ (FOC)

Altra forma dell'equazione di flusso

$$\boxed{\lambda_r + \frac{L_r}{R_r}\frac{d\lambda_r}{dt} = L_M i_{sd}^{\lambda}}$$

$$\boxed{m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} i_{sq}^{\lambda} \lambda_r}$$



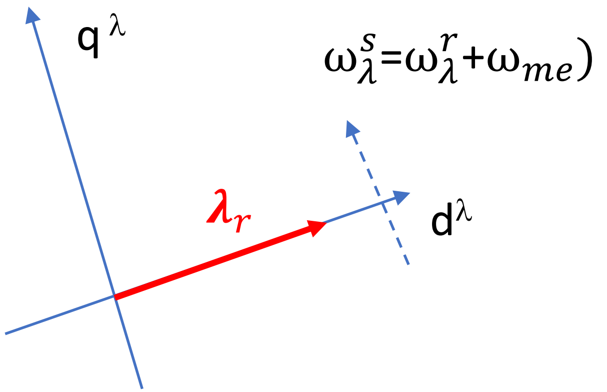


Field Oriented Control (FOC)
Controllo ad orientamento di campo

Motore asincrono a corrente impressa in coordinate d^λ - q^λ (orientamento con il flusso rotorico)

Controllo ad orientamento di campo - Field Oriented Control (FOC)

Il controllo ad orientamento di campo consente di <u>controllare separatamente</u> l'ampiezza del <u>flusso</u> (rotorico), con la componente diretta della corrente statorica in un sistema di riferimento orientato con il flusso rotorico, e l'intensità della <u>coppia</u>, con la componente in quadratura della corrente statorica.



Field Oriented Control (FOC)
Controllo ad orientamento di campo

Serve la conoscenza della posizione del vettore del flusso rotorico che NON è una grandezza misurabile!

Si ricorre a stime del vettore spaziale del flusso rotorico a partire da misure accessibili come tensioni, correnti, velocità.