Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2022-2023

prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

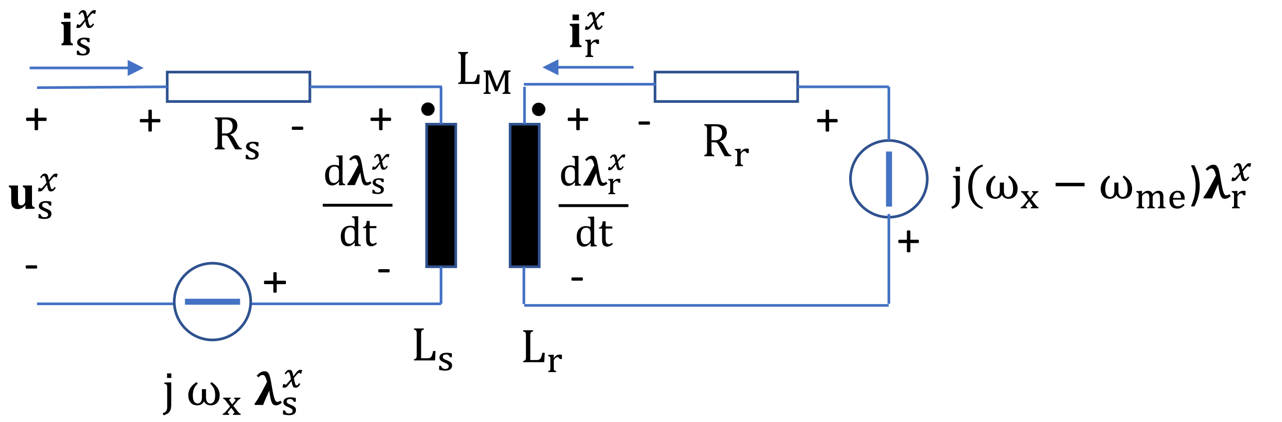
Macchina asincrona
(Macchina a induzione)

Introduzione al controllo ad orientamento di campo (Field Oriented Control: FOC)

Modellazione a partire dalle equazioni in $d^x q^x$

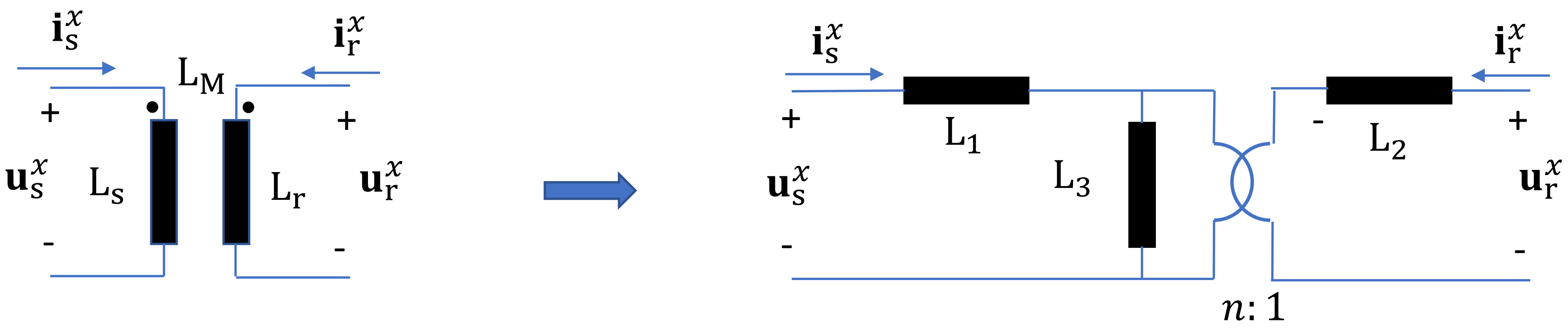
$$\begin{cases} \boxed{\mathbf{u}_s^x = R_s \mathbf{i}_s^x + \dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_s^x}{dt} + j\omega_x \boldsymbol{\lambda}_s^x} \\ \boxed{0 = R_r \mathbf{i}_r^x + \dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_r^x}{dt} + j(\omega_x - \omega_{me})\boldsymbol{\lambda}_r^x} \\ \boxed{\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_s^x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

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



Sono le equazioni di un mutuo induttore
con fem «mozionali» su entrambe le porte

Modellazione del mutuo induttore



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

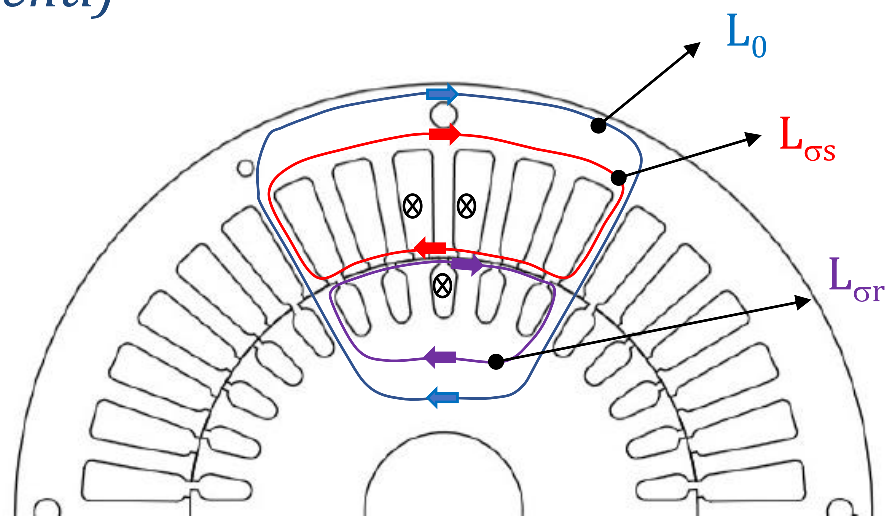
***Scelta di n** (comporta diverse configurazione «fittizie» delle mappe delle linee di campo, fermo restando i flussi concatenati per date correnti)*

$n = (N_s / N_r)$

$L_3 = (N_s / N_r)\, L_M = L_0$ = 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

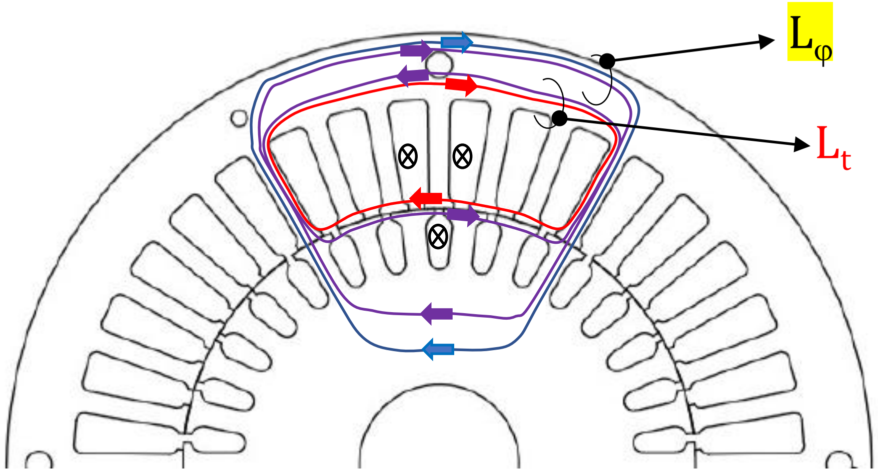


$L_3 = L^2_M / L_r = n^2 L_r = L_\varphi$ = induttanza magnetizzante (di statore)

(L_3 vista da secondario = $L_3 / n^2 = L_r$)

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

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

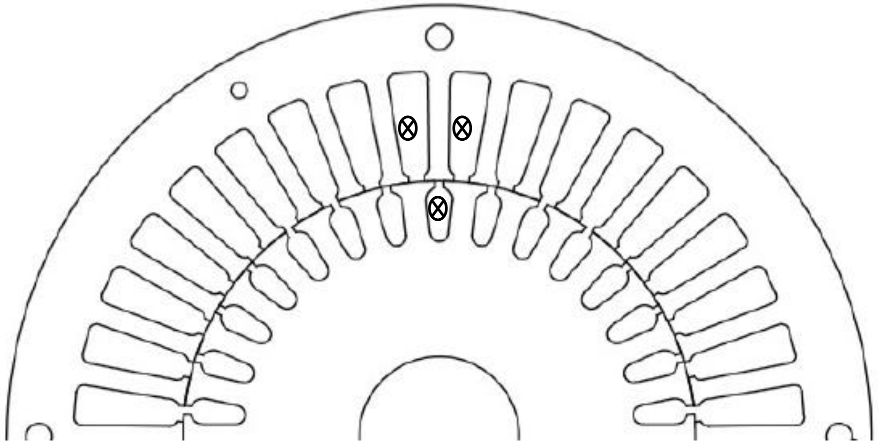


Scelta di n *(segue)*

$$L_3 = L_M\,(L_s / L_M) = L_s$$ induttanza di statore

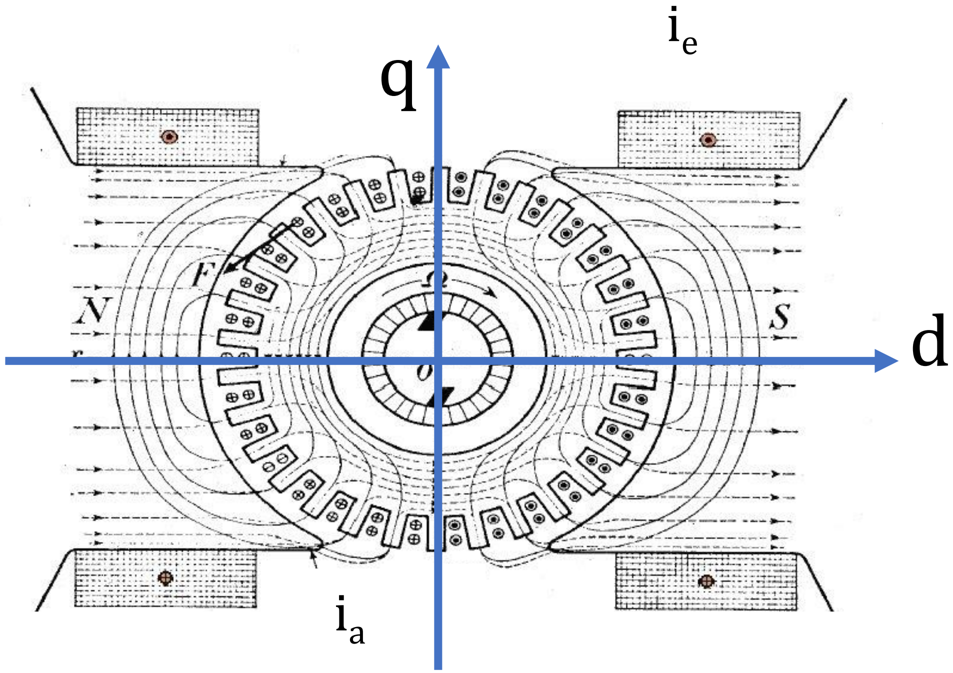
$n = L_s / L_M$ $\quad L_1 = L_M\,(L_s / L_M) = 0$ (nulla!)

$$L_2 = L_r - L_M/(L_M / L_s) = L_r - L^2_M/L_s) = L'_r$$ induttanza transitoria di rotore



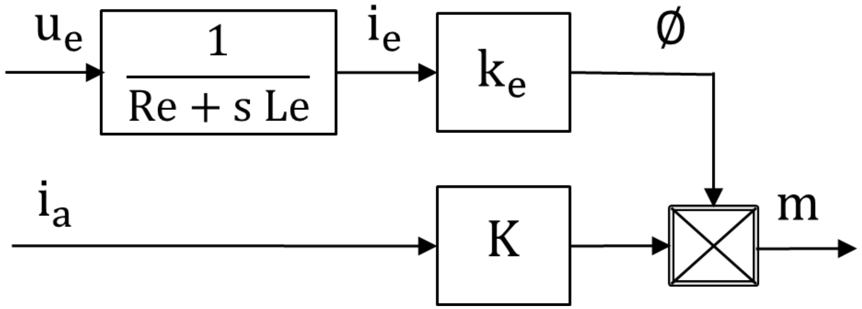
La scelta di n consente di dare significati diversi all'induttanza L_3 e quindi al suo flusso λ_3

Richiamo al motore in CC ad eccitazione indipendente



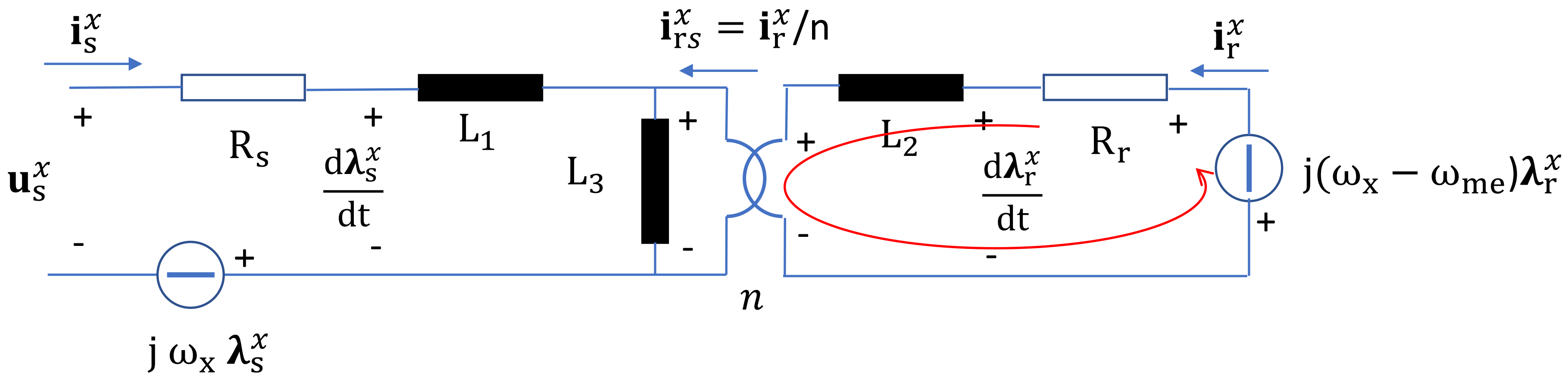
$$\emptyset = k_e\, i_e$$

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



Si può ottenere un controllo simile per una macchina asincrona? Esiste un sistema d-q che lo consente?
Assumiamo che la corrente d sia quella che crea il flusso e la corrente q quella proporzionale alla coppia (dato il flusso)

Equazioni in d^xq^x (generico)



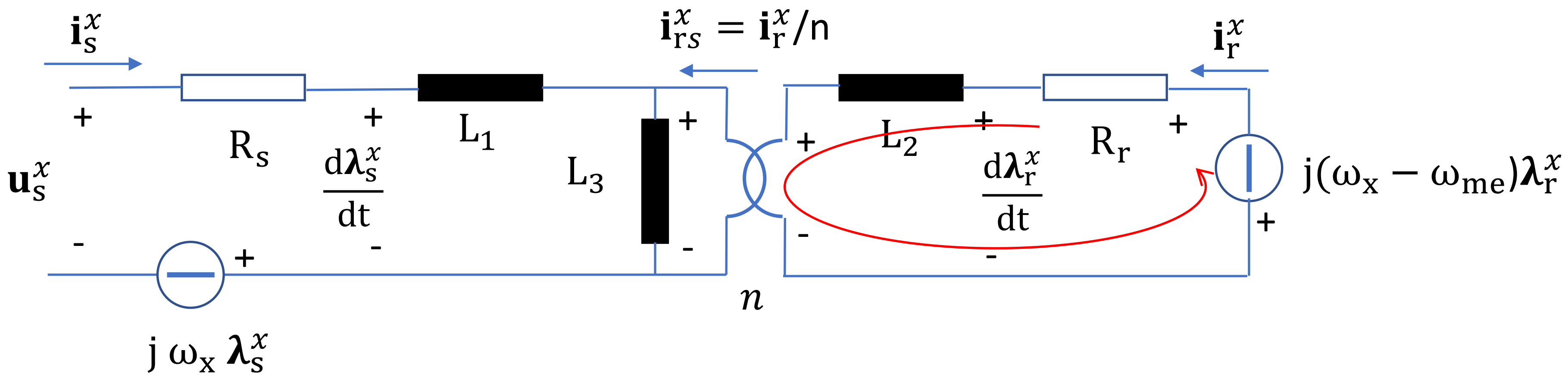
Assumiamo la corrente statorica $\mathbf{i}_s^x$ come grandezza di comando (impressa) e assumiamo come flusso principale della macchina quello $\boldsymbol{\lambda}_3^x$ in L_3. Scriviamo poi l'equazione di bilancio delle tensioni rotoriche nelle due grandezze scelte.

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

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 (qui di seguito riportata)

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

$m = \frac{3}{2}p(\ \mathrm{i}_{sq}^x\lambda_{sd}^x - \mathrm{i}_{sd}^x\ \lambda_{sq}^x)=\frac{3}{2}p\left[\ \mathrm{i}_{sq}^x(L_1\mathrm{i}_{sd}^x + \lambda_{3d}^x) - \mathrm{i}_{sd}^x(L_1\mathrm{i}_{sq}^x + \lambda_{3q}^x)\ \right]$ si ottiene:

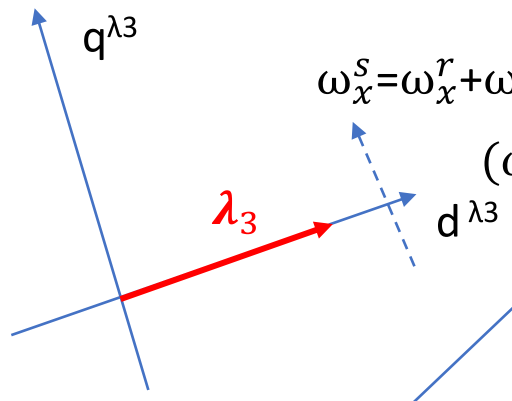
$$m = \frac{3}{2}p(\ \mathrm{i}_{sq}^x\lambda_{3d}^x - \mathrm{i}_{sd}^x\ \lambda_{3q}^x)$$

Sia la coppia m che l’ampiezza λ_3 del flusso 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 $\lambda_{3d}^{x} = \lambda_3$

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



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

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

Affinché λ_3 dipenda solo da i_{sd}^{x} cerco un appropriato valore di *n*

(un appropriato significato di λ_3)

$\lambda_{3q}^{\lambda 3} = 0$

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

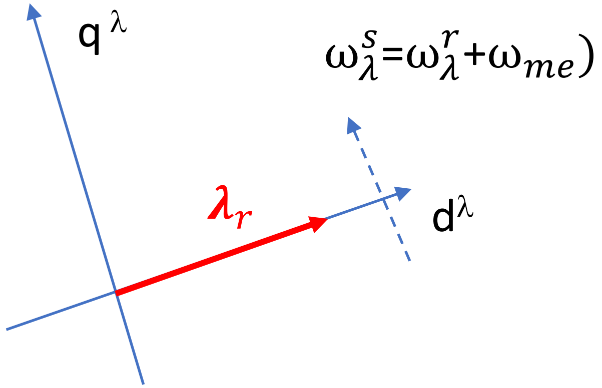
$\lambda_{3d}^{\lambda 3} = \lambda_3$

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

$$\boldsymbol{\lambda}_3^{\lambda 3} = n\,\boldsymbol{\lambda}_r^{\lambda 3} = \frac{L_M}{L_r}\,\boldsymbol{\lambda}_r^{\lambda 3} = \boldsymbol{\lambda}_{rs}^{\lambda 3}$$ <u>è il flusso rotorico riportato a statore</u>

Field Oriented Control (FOC)
Gli assi sono indicati con d^λ q^λ per brevità

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

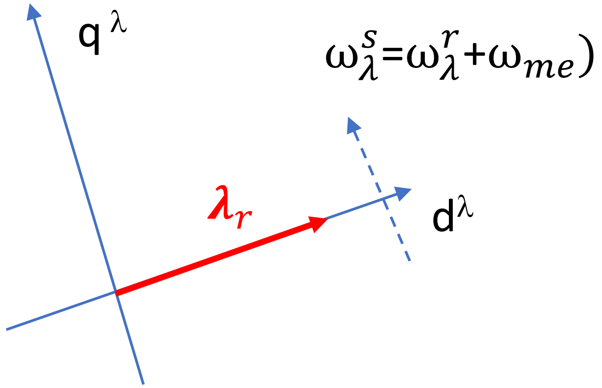
$$R_r \frac{n}{L_3}\lambda_3^2 + \frac{1}{2}\left(\cancel{L_2 \frac{n}{L_3}} + \frac{1}{n}\right)\frac{\mathrm{d}\lambda_3^2}{\mathrm{dt}} = R_r n(\mathrm{i}_{sd}^x \lambda_3) \Rightarrow \boxed{\lambda_{rs} + \frac{L_r}{R_r}\frac{\mathrm{d}\lambda_{rs}}{\mathrm{dt}} = \frac{L_M^2}{L_r}\mathrm{i}_{sd}^\lambda}$$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

Equazioni in $d^x q^x$ orientato con λ_r (FOC)

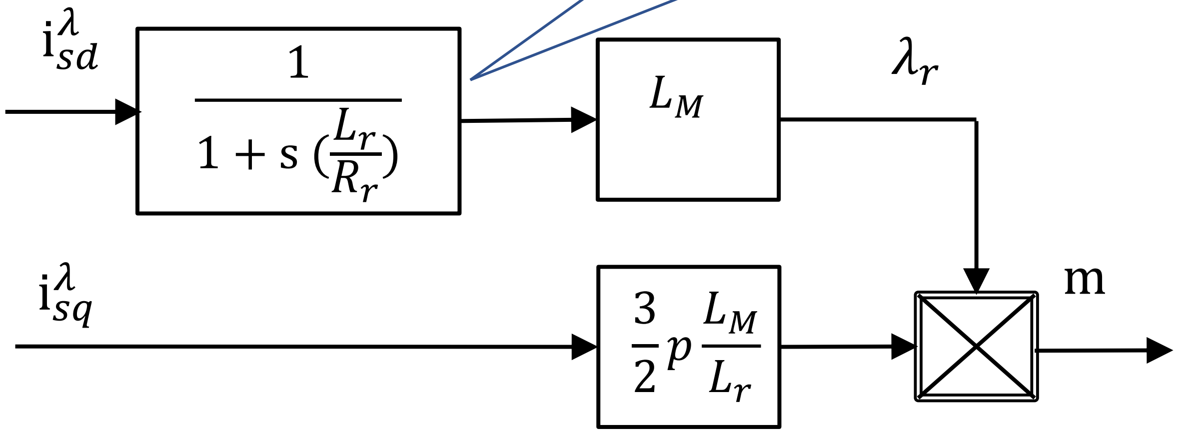
In definitiva

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

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



Costante di tempo «grande»

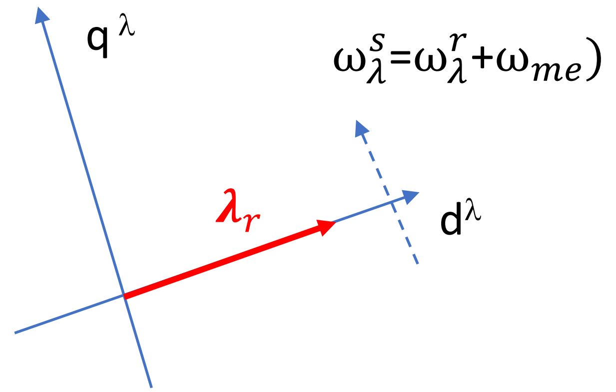


Field Oriented Control (FOC)
Controllo ad orientamento di campo

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)

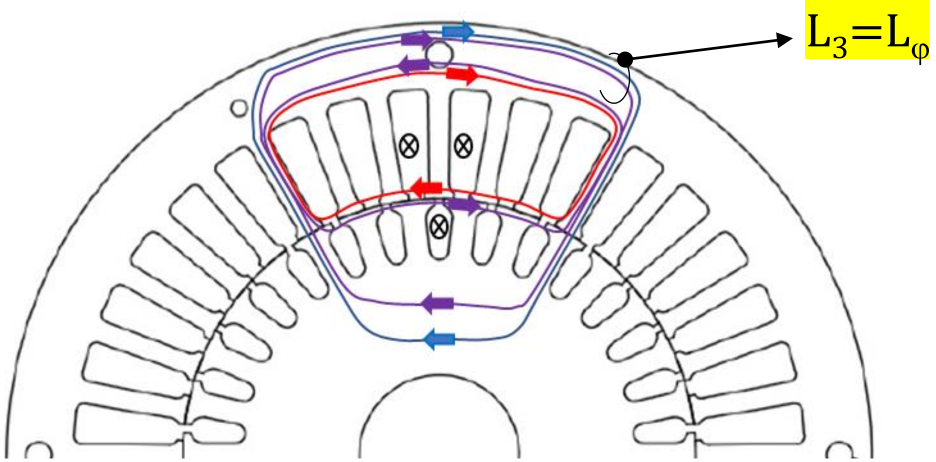
Il controllo ad orientamento di campo consente di controllare separatamente l'ampiezza del flusso (rotorico), con la componente diretta della corrente statorica in un sistema di riferimento orientato con il flusso rotorico, e l'intensità della coppia, con la componente in quadratura della corrente statorica.



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 e correnti (statoriche) e/o velocità.



Controllo ad orientamento di campo ***statorico*** *– Stator Field Oriented Control (SFOC)*

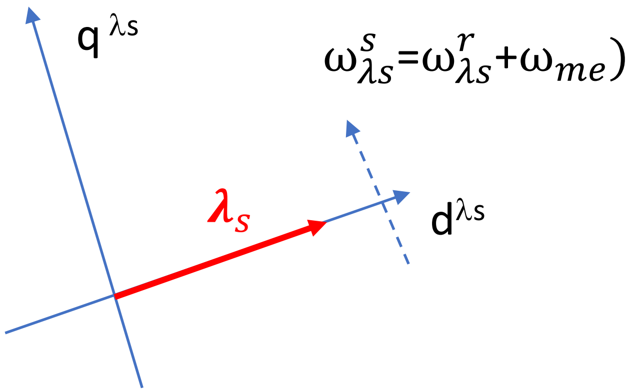
Il controllo ad orientamento di campo basato sul flusso rotorico, Rotor Field Oriented Control (RFOC) richiede di stimare la posizione del vettore del flusso rotorico, che è operazione complessa.

Ci si può chiedere cosa succeda se invece si usasse il flusso statorico, Stator Field Oriented Control (SFOC): $\boldsymbol{\lambda}_3 = \boldsymbol{\lambda}_s$.

Per esaminare la questione basta usare le posizioni:

$n = L_s / L_M$ $\quad L_1 = 0$ $\quad L_2 = L'_r$ $\quad L_3 = L_s$ $\quad \lambda_{sq}^{\lambda s} = 0$ $\quad \lambda_{sd}^{\lambda s} = \lambda_s$

Nell'equazione della dinamica del flusso $\lambda_3 = \lambda_s$ *qui di seguito riportata:*



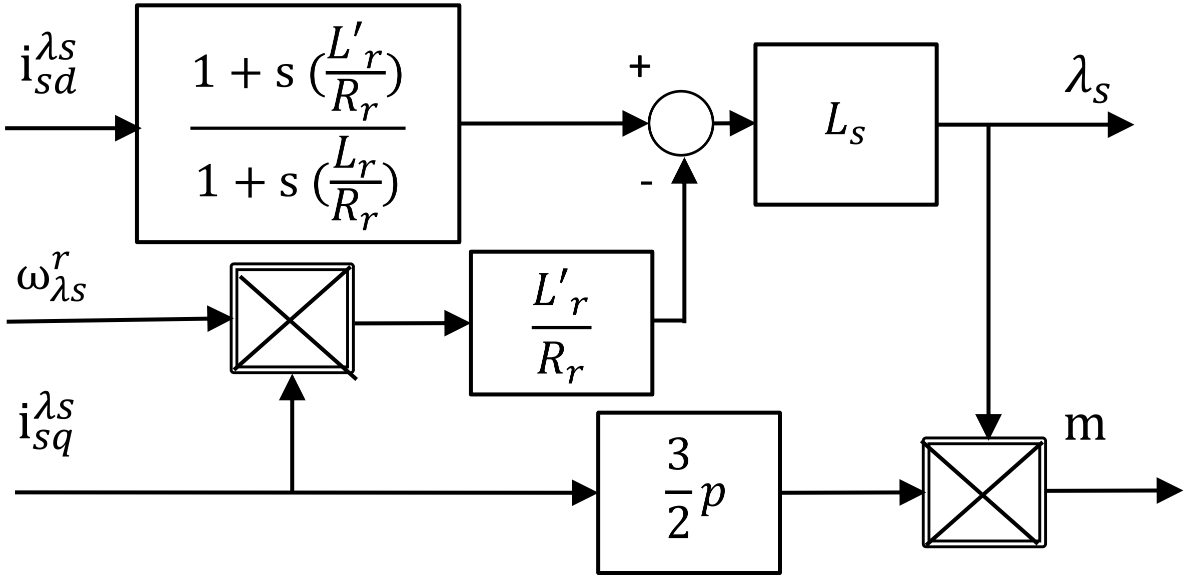
$$\boxed{m = \frac{3}{2} p \, i_{sq}^{\lambda s} \lambda_s}$$

Controllo ad orientamento di campo statorico – Stator Field Oriented Control (SFOC)

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

Essa diventa:

$$\lambda_s + \frac{L_r}{R_r}\frac{\mathrm{d}\lambda_s}{\mathrm{dt}} = L_s\left(\mathrm{i}_{sd}^{\lambda s} + \frac{L'_r}{R_r}\frac{\mathrm{di}_{sd}^{\lambda s}}{\mathrm{dt}} - \omega_{\lambda s}^r\frac{L'_r}{R_r}\mathrm{i}_{sq}^{\lambda s}\right)$$



Motore asincrono a corrente impressa in coordinate $d^{\lambda s}$ - $q^{\lambda s}$ (orientamento con il flusso statorico)