Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

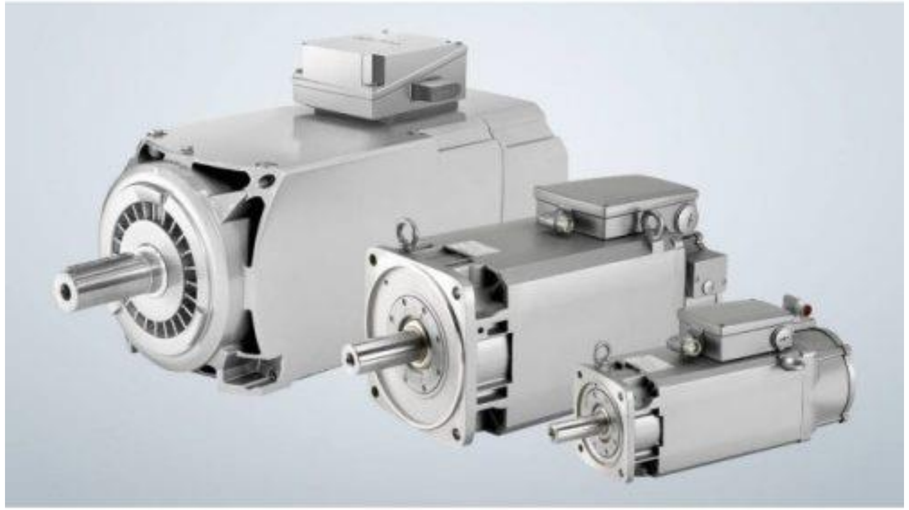
Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

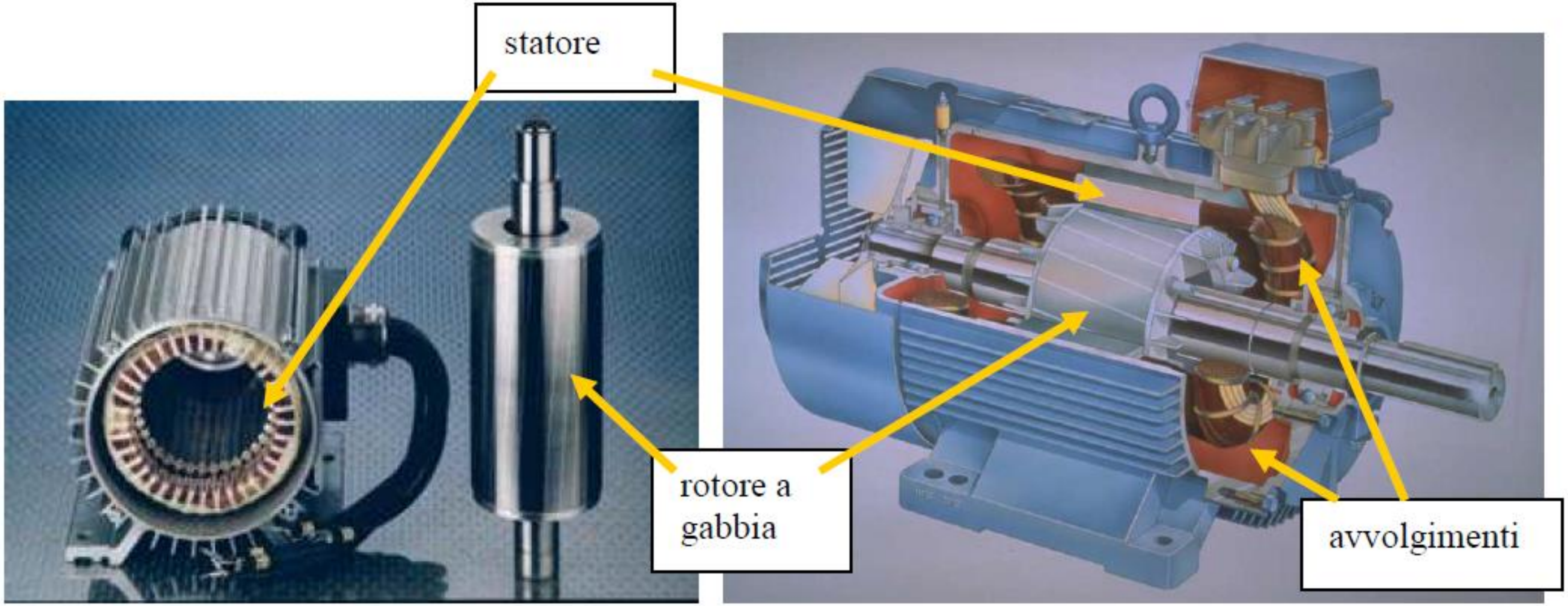
prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

Macchina asincrona (Macchina a induzione)



Statore con avvolgimento distribuito trifase, rotore a gabbia, isotropo



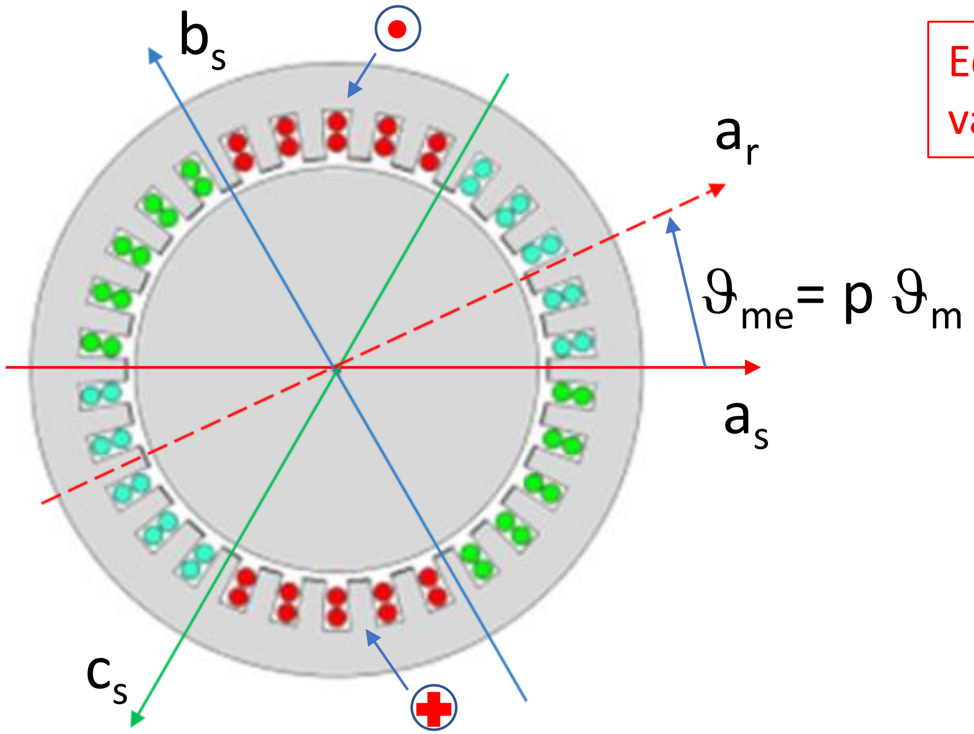
Equazioni elettriche dinamiche

(a) Rotore «equivalente» avvolto in corto circuito

(b) Statore e rotore entrambi trifase

(c) Collegamento a stella; Neutro isolato

(d) Fasi identiche, sfasate di 120 gradi elettrici



Equazioni di validità generale!

Per lo statore

Dipendente da tutte le correnti di statore e rotore

$$u_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\lambda_{sa}}{dt}$$

$$u_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\lambda_{sb}}{dt}$$

$$u_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\lambda_{sc}}{dt}$$

e per il rotore

Rotore in corto circuito

$$0 = R_r i_{ra} + \frac{d\lambda_{ra}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{rb} + \frac{d\lambda_{rb}}{dt}$$

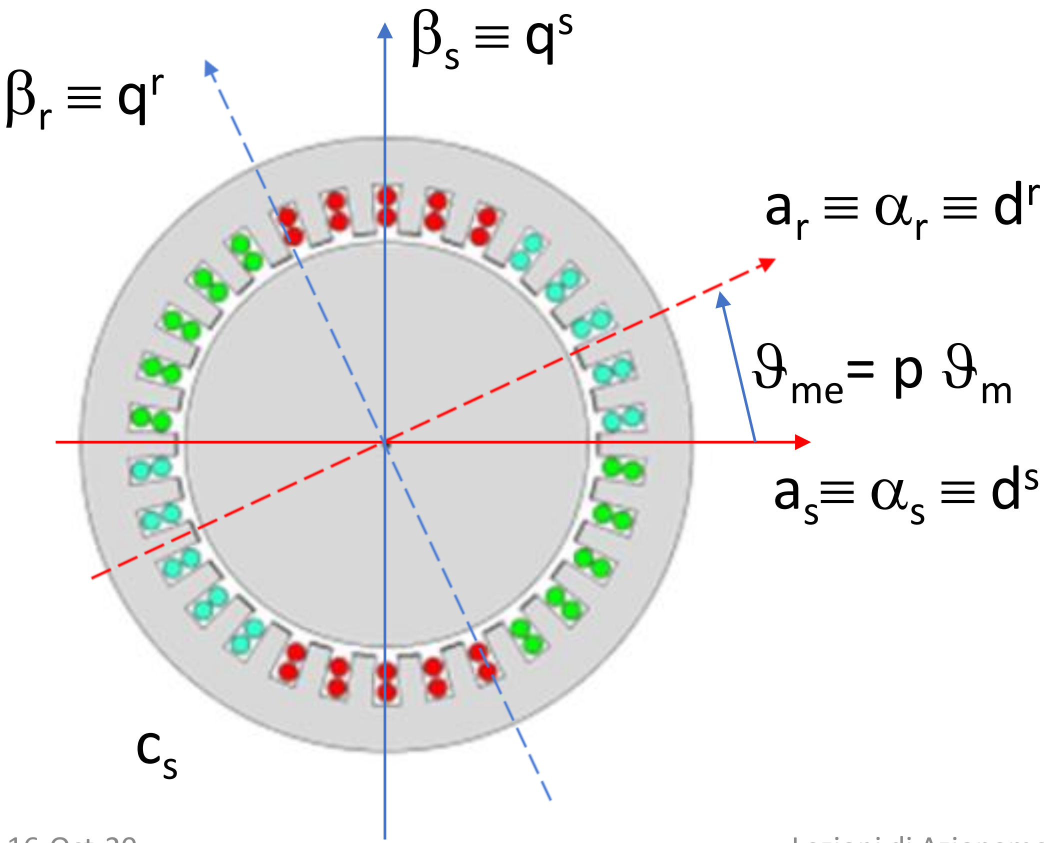
$$0 = R_r i_{rc} + \frac{d\lambda_{rc}}{dt}$$

Equazioni elettriche dinamiche

Equazioni di statore in $d^s q^s$ $(\alpha_s\ \beta_s)$

NB:
grassetto=vettori

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



Equazioni di rotore in $d^r q^r$ $(\alpha_r\ \beta_r)$

$$\mathbf{0} = R_r\,\mathbf{i}_r^r + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^r}{dt}$$

Rotore in corto circuito

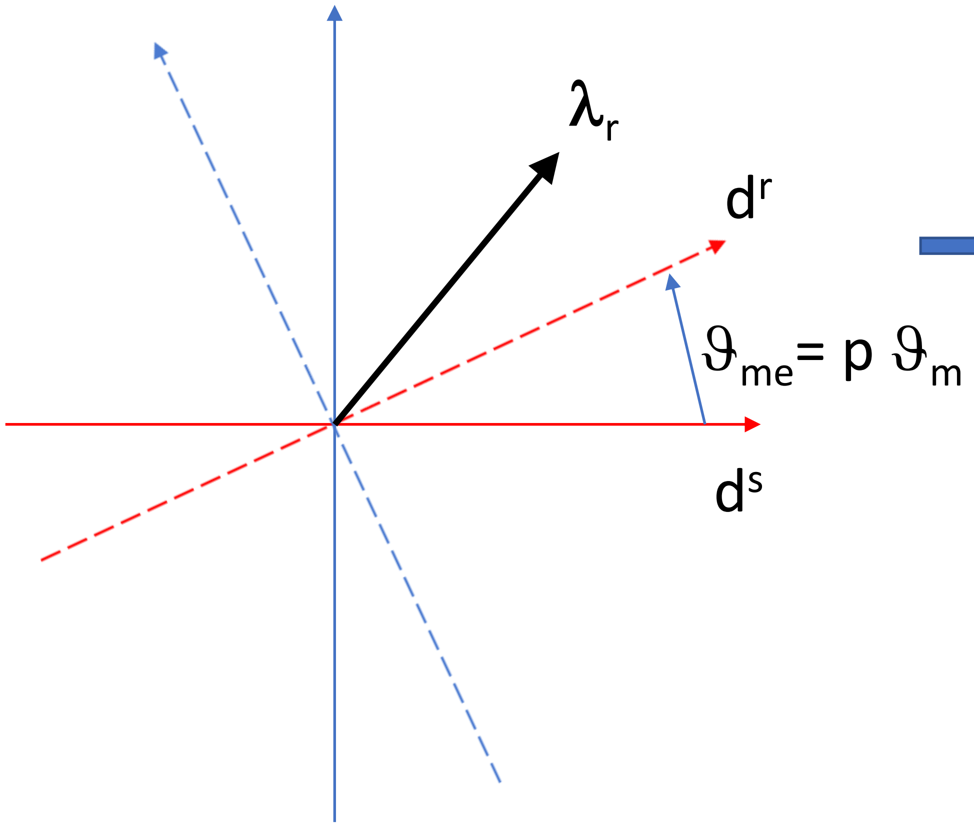
Equazioni di validità generale!

Equazioni elettriche dinamiche

Equazioni di validità generale!

Equazioni di statore e di rotore in $d^s q^s$ (stazionario, $\alpha_s\ \beta_s$)

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



$\lambda_r^s = \lambda_r^r e^{j\vartheta_{me}}$ (lo stesso per la corrente)

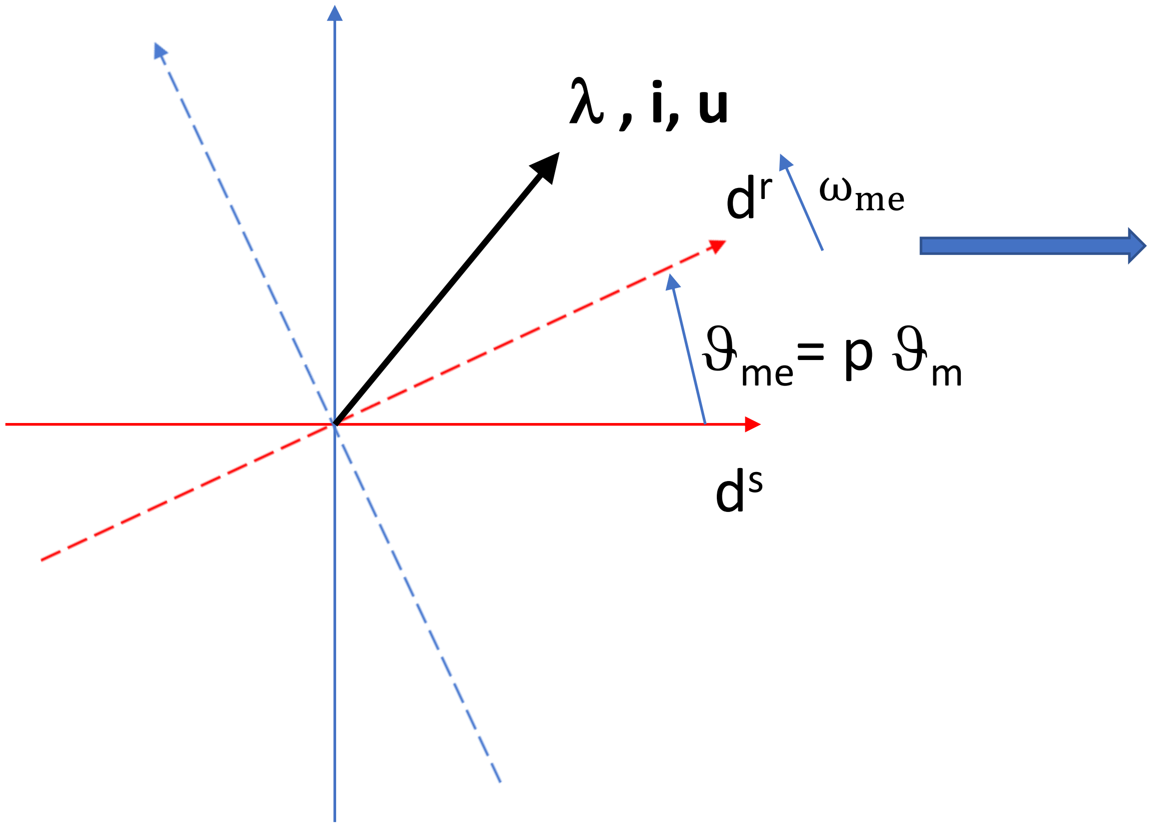
$$0 = R_r(\mathbf{i}_r^s e^{-j\vartheta me}) + \frac{d(\boldsymbol{\lambda}_r^s e^{-j\vartheta me})}{dt}$$

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

Equazioni elettriche dinamiche

Equazioni di validità generale!

Equazioni di <u>statore</u> e di rotore in $d^r q^r$ (rotante sincrono con rotore, $\alpha_r\ \beta_r$)



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

$$\mathbf{u}_s^r e^{j\vartheta me} = R_s \mathbf{i}_s^r e^{j\vartheta me} + \frac{d(\boldsymbol{\lambda}_s^r e^{j\vartheta me})}{dt}$$

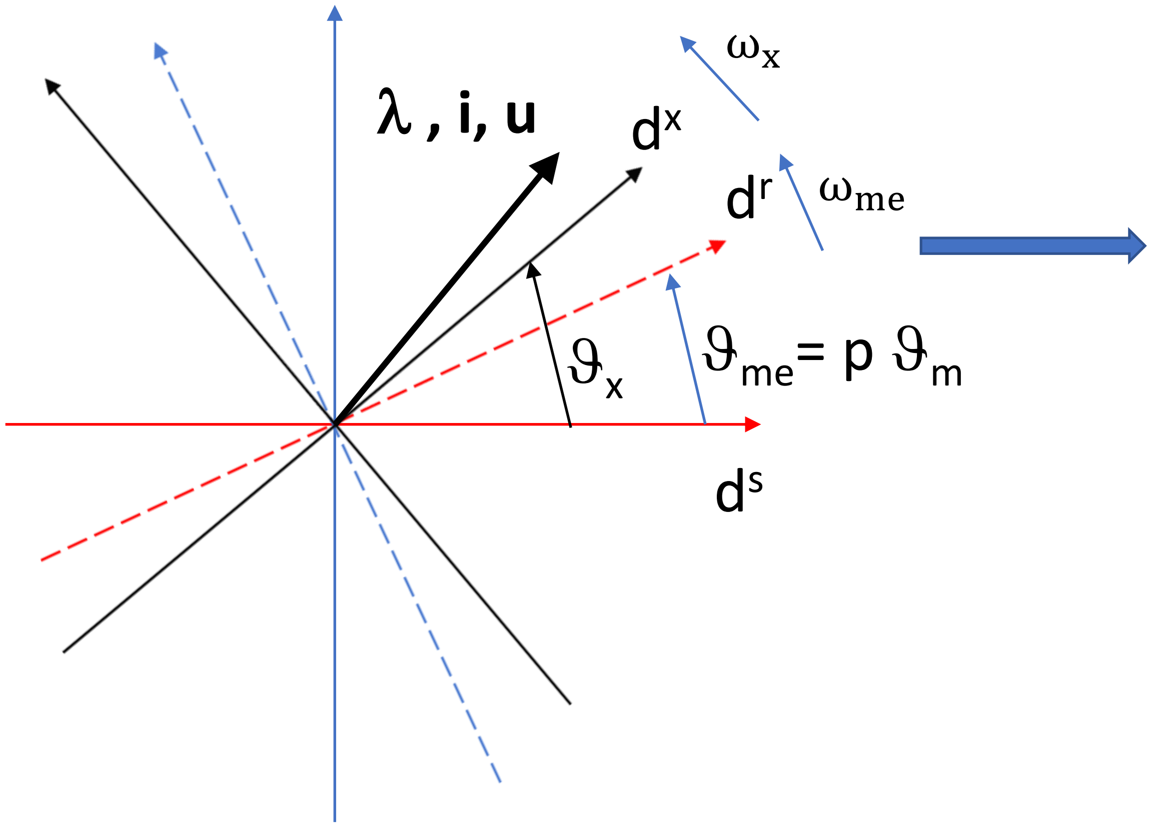
$$\boxed{\mathbf{u}_s^r = R_s \mathbf{i}_s^r + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s^r}{dt} + j\omega_{me}\boldsymbol{\lambda}_s^r}$$

$$\boxed{\mathbf{0} = R_r\,\mathbf{i}_r^r + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^r}{dt}}$$

Equazioni elettriche dinamiche

Equazioni di statore e di rotore in $d^x q^x$ rotante con velocità ω_x

Equazioni di validità generale!



$$\boxed{\mathbf{u}_s^x = R_s \mathbf{i}_s^x + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s^x}{dt} + j\omega_x \boldsymbol{\lambda}_s^x}$$

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

Equazioni dinamiche della coppia

- Si parte dalle equazioni elettriche di statore e di rotore <u>in $d^s q^s$</u> $(\alpha_s\ \beta_s)$ e si fa un bilancio delle potenze

- Si ricorda che (per esempio) valgono le espressioni:

  potenza assorbita= $(3/2)(u_{sd}^{s} i_{sd}^{s} + u_{sq}^{s} i_{sq}^{s}) = (3/2)Re(\boldsymbol{u}_s^s \check{\mathbf{i}}_s^s)$

- Moltiplichiamo l'equazione delle tensioni di statore per $\check{\mathbf{i}}_s^s$ e quella di rotore per $\check{\mathbf{i}}_r^s$ e sommiamo termine a termine. Di ogni addendo poi prendiamo $(3/2)Re(\bullet)$

Assumiamo comportamento magnetico conservativo:

- no perdite per isteresi magnetica,
- no correnti parassite.

Equazioni dinamiche della coppia

Risulta:

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

$$+ \qquad + \qquad + $$

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

(3/2)*Re*(•) Potenza assorbita

(3/2)*Re*(•) Perdite joule

(3/2)*Re*(•) d(En.magn.)/dt

(3/2)*Re*(•)
Potenza elettrica convertita in potenza meccanica
= Potenza elettromeccanica = $m\omega_m$

Equazioni dinamiche della coppia

Allora:

$$\mathrm{m}\omega_{\mathrm{m}} = \frac{3}{2} Re(-\quad \mathrm{j}\omega_{\mathrm{me}}\, \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}\ \check{\mathbf{i}}_{r}^{s}) = \frac{3}{2} Im(\omega_{\mathrm{me}}\, \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}\ \check{\mathbf{i}}_{r}^{s}) = \frac{3}{2} (\mathrm{p}\omega_{\mathrm{m}}) Im(\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}\ \check{\mathbf{i}}_{r}^{s})$$

In definitiva:

$$\boxed{\mathrm{m} = \frac{3}{2}\mathrm{p}\, Im(\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}\ \check{\mathbf{i}}_{r}^{s}) = \frac{3}{2}\mathrm{p}\left(\lambda_{rq}^{s}\, i_{rd}^{s} - \lambda_{rd}^{s}\, i_{rq}^{s}\right)}$$

Equazioni dinamiche della coppia

Ma si può anche scrivere:

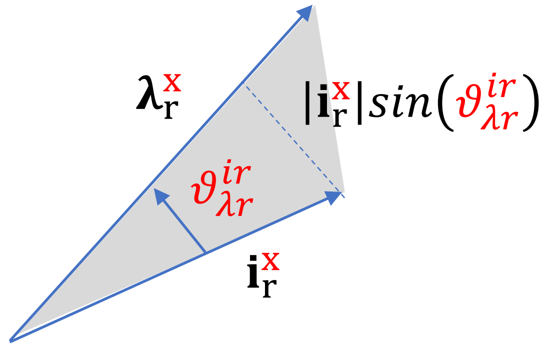
$$\mathrm{m} = \frac{3}{2}\mathrm{p}\, Im(\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}\ \check{\mathbf{i}}_{r}^{s}) = \frac{3}{2}\mathrm{p} Im\left(|\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}| e^{j\vartheta_{\lambda r}^{s}} |\mathbf{i}_{r}^{s}| e^{-j\vartheta_{ir}^{s}}\right) = \frac{3}{2}\mathrm{p} |\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}||\mathbf{i}_{r}^{s}| Im\left(e^{j(\vartheta_{\lambda r}^{s}-\vartheta_{ir}^{s})}\right)$$

Sfasamento fra flusso e corrente non dipende dal sistema di riferimento

In definitiva:

$$\mathrm{m} = \frac{3}{2}\mathrm{p} |\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}||\mathbf{i}_{r}^{s}| sin(\vartheta_{\lambda r}^{s} - \vartheta_{ir}^{s}) = \frac{3}{2}\mathrm{p} |\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{x}}||\mathbf{i}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{x}}| sin\left(\vartheta_{\lambda r}^{ir}\right)$$

I moduli non dipendono dal sistema di riferimento



m =3p*area_triangolo

Equazioni dinamiche della coppia

Se l'espressione non dipende dal sistema di riferimento, allora vale:

$$\boxed{\mathrm{m} = \frac{3}{2}\mathrm{p}\, Im(\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^\mathrm{x}\ \check{\mathbf{i}}_r^\mathrm{x}) = \frac{3}{2}\mathrm{p}\left(\lambda_{rq}^x\, i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x\, i_{rq}^x\right)}$$

Con analogo procedimento, partendo dalle equazioni in d$^\mathrm{r}$q$^\mathrm{r}$:

$$\boxed{\mathrm{m} = \frac{3}{2}\mathrm{p}\, Im(-\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{s}^\mathrm{x}\ \check{\mathbf{i}}_s^\mathrm{x}) == \frac{3}{2}\mathrm{p}|\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{s}^\mathrm{x}||\mathbf{i}_\mathrm{s}^\mathrm{x}|sin\left(\vartheta_{is}^{\lambda s}\right) = \frac{3}{2}\mathrm{p}\left(\lambda_{sd}^x\, i_{sq}^x - \lambda_{sq}^x\, i_{sd}^x\right)}$$