Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

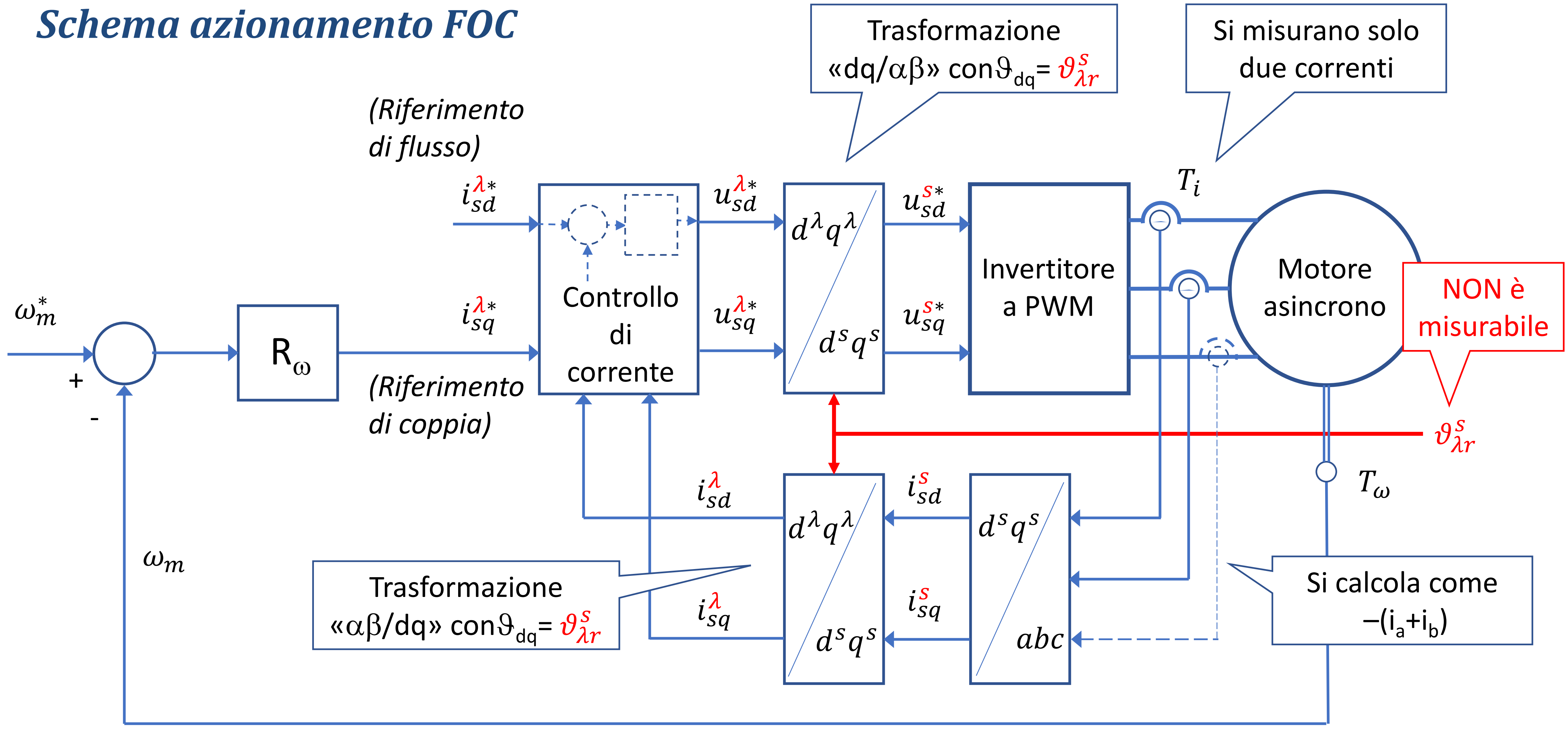
prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

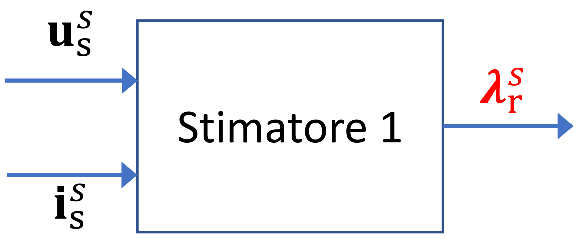
Macchina asincrona (Macchina a induzione)

Controllo ad orientamento di campo (FOC diretto)

Schema azionamento FOC



Metodo diretto 1): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}$ da $\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{s}$ e $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$



Equazione elettrica di statore nel sistema di riferimento stazionario

$$\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} = \mathrm{R}_{\mathrm{s}}\,\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}}{dt} \Longrightarrow \boxed{\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} = \int_{-\infty}^{t} (\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} - \mathrm{R}_{\mathrm{s}}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}})dt}$$

Si applica separatamente alle componenti d e q

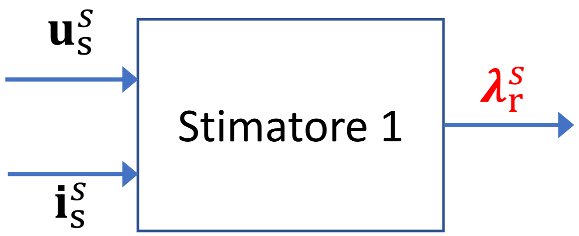
La R_s varia con la temperatura!

Equazioni dei flussi

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} = \mathrm{L}_{\mathrm{s}}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} + \mathrm{L}_{\mathrm{M}}\mathbf{i}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} \\ \boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} = \mathrm{L}_{\mathrm{M}}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} + \mathrm{L}_{\mathrm{r}}\,\mathbf{i}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \mathbf{i}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} = \frac{\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{L}_{\mathrm{M}}} - \frac{\mathrm{L}_{\mathrm{s}}}{\mathrm{L}_{\mathrm{M}}}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}$$

Metodo diretto 1): Stima del vettore λ_r^s da $\mathbf{u}_s^s$ e $\mathbf{i}_s^s$

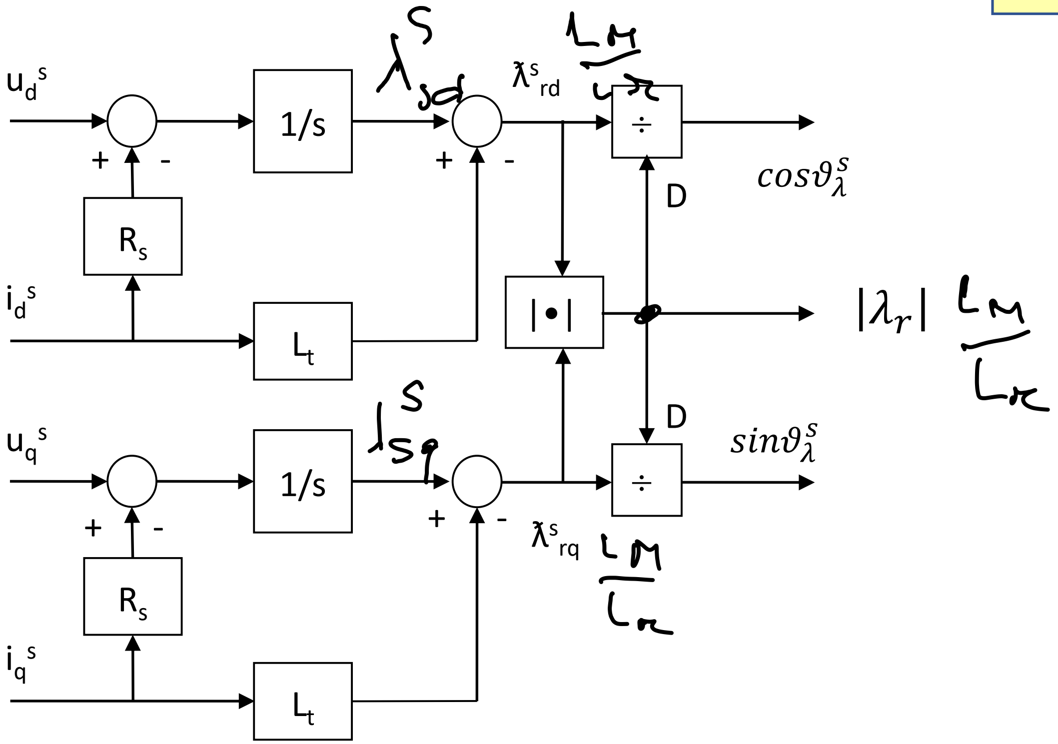


...si ottiene:

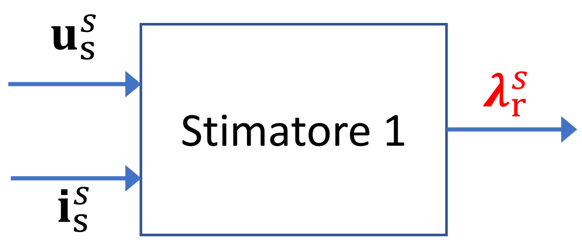
L_s'

$$\boxed{\lambda_r^s} = \frac{L_r}{L_M}\lambda_s^s - \left(\frac{L_r L_s}{L_M} - L_M\right)\mathbf{i}_s^s = \frac{L_r}{L_M}\left(\lambda_s^s - \left(L_s - \frac{L_M^2}{L_r}\right)\mathbf{i}_s^s\right) = \boxed{\frac{L_r}{L_M}\left(\lambda_s^s - \cancel{L_t}\,\mathbf{i}_s^s\right)}$$

Parametri poco influenzati dalle condizioni operative



Metodo diretto 1): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^s$ da $\mathbf{u}_\mathrm{s}^s$ e $\mathbf{i}_\mathrm{s}^s$



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

- *Dipendenza dai parametri e sensibilità alle variazioni parametriche:*

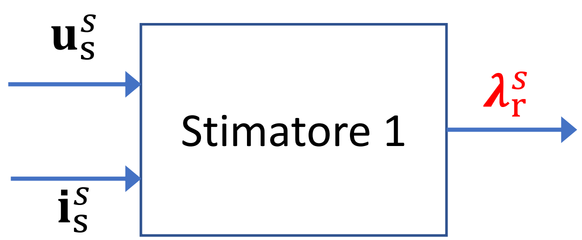
  R_s *varia molto con la temperatura;*

  $R_s\boldsymbol{i}_s$ *incide molto alle basse velocità (=tensioni)*

$\Rightarrow$ *NON funziona a basse velocità*

Le induttanze coinvolte e I rapport di induttanze variano poco con le condizioni operative

Metodo diretto 1): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}$ da $\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{s}$ e $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$



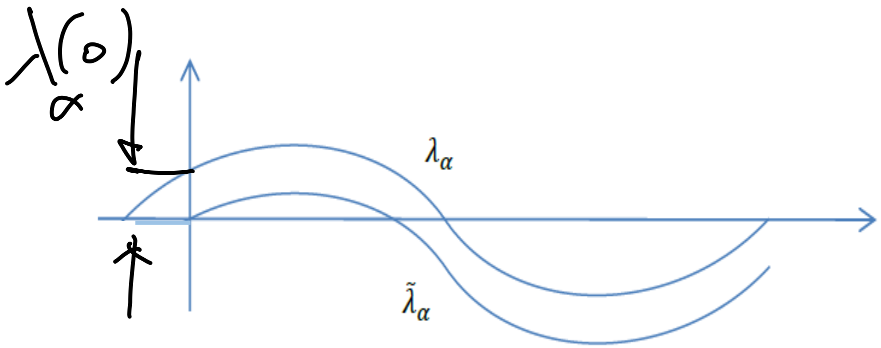
- *onerosità computazionale :*
  a) sia t=0 l'istante iniziale dell'integrazione

$$\boldsymbol{\lambda}_s^s = \boldsymbol{\lambda}_s^s(0) + \int_0^t (\mathbf{u}_\mathrm{s}^\mathrm{s} - R\mathbf{i}_\mathrm{s}^\mathrm{s})\, dt \cong \int_0^t (\mathbf{u}_\mathrm{s}^\mathrm{s} - R\mathbf{i}_\mathrm{s}^\mathrm{s})\, dt$$

Non noto quindi ignorato!

Sono soluzione dell'omogenea e integrale particolare di:

$$\frac{d\lambda}{dt} = (\mathrm{u} - \mathrm{Ri})$$

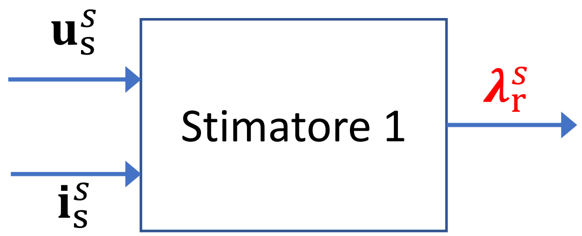


Errore costante dovuto alle condizioni iniziali non considerate

b) Inoltre un eventuale «disturbo costante all'ingresso dell'integratore puro» produce

Deriva (andamento a rampa) nell'uscita dell'integratore.

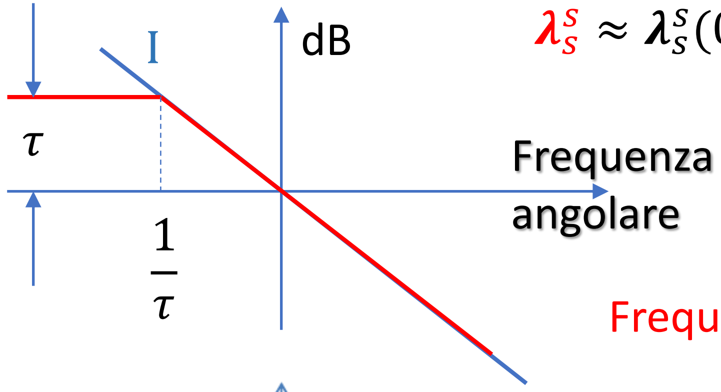
Metodo diretto 1): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_r^s$ da $\mathbf{u}_s^s$ e $\mathbf{i}_s^s$



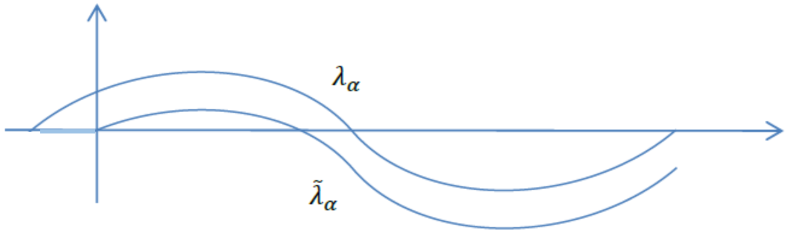
Errore per condizioni iniziali ed eventuali derive si risolvono/attenuano sostituendo l'integratore puro con un passa basso

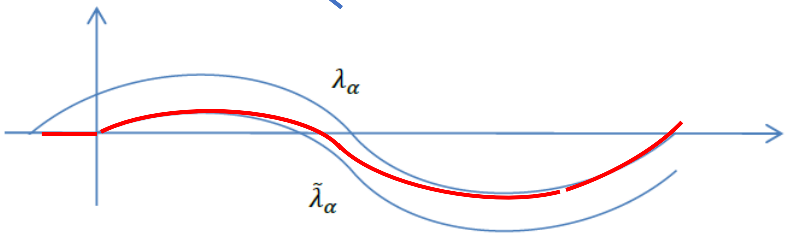
$$\boldsymbol{\lambda}_s^s \approx \boldsymbol{\lambda}_s^s(0)e^{-t/\tau} + \int_0^t (\mathbf{u}_s^s - R\mathbf{i}_s^s)\, dt$$

$$\frac{\Lambda(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} \approx \frac{\tau}{1+s\tau}$$

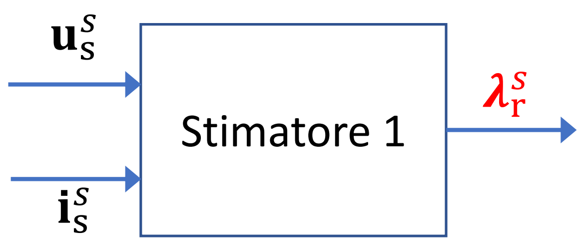


Frequenza di lavoro $\omega > \omega_{min} = 1/\tau$





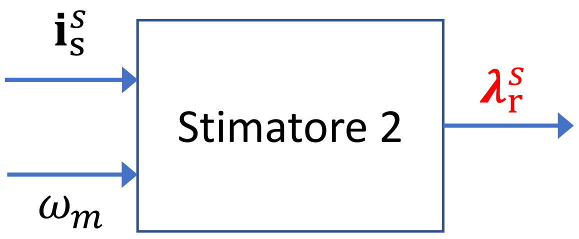
Metodo diretto 1): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}$ *da* $\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{s}$ *e* $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$



- *Onerosità delle misure: modesta*
  - *Le correnti sono già misurate per gli anelli di corrente*
  - *Per le tensioni si prendono i riferimenti di tensione che comandano l'inverter*

(vedere Parte II - Invertitore)

Metodo diretto 2): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_r^s$ da $\mathbf{i}_s^s$ e ω_m



Equazione elettrica di rotore nel sistema di riferimento stazionario

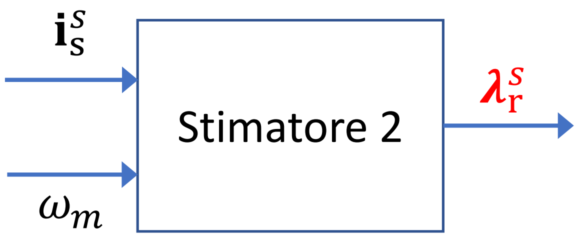
$$\mathbf{0} = R_r\,\mathbf{i}_r^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} - j\omega_{me}\boldsymbol{\lambda}_r^s$$

Dall'equazioni dei flussi

$$\bar{\lambda}_r^s = L_r\,\bar{i}_r^s + L_M\,\bar{i}_s^s$$

$$\mathbf{i}_r^s = \frac{\boldsymbol{\lambda}_r^s}{L_r} - \frac{L_M}{L_r}\mathbf{i}_s^s$$

Metodo diretto 2): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_r^s$ da e $\mathbf{i}_s^s$ e ω_m



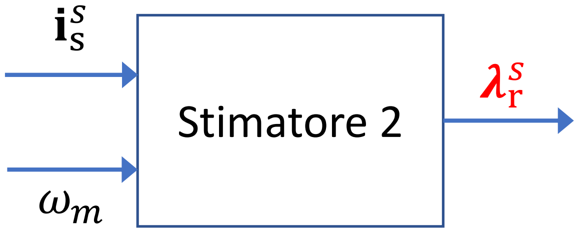
…si ottiene

$$\frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} = \left(j\omega_{me} - \frac{R_r}{L_r}\right)\boldsymbol{\lambda}_r^s + \frac{R_r L_M}{L_r}\mathbf{i}_s^s \quad \longrightarrow \quad \frac{d\bar{\lambda}_r^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r}\bar{\lambda}_r = j\omega_{me}\bar{\lambda}_r + \frac{R_r L_M}{L_r}\bar{i}_s$$

…ossia

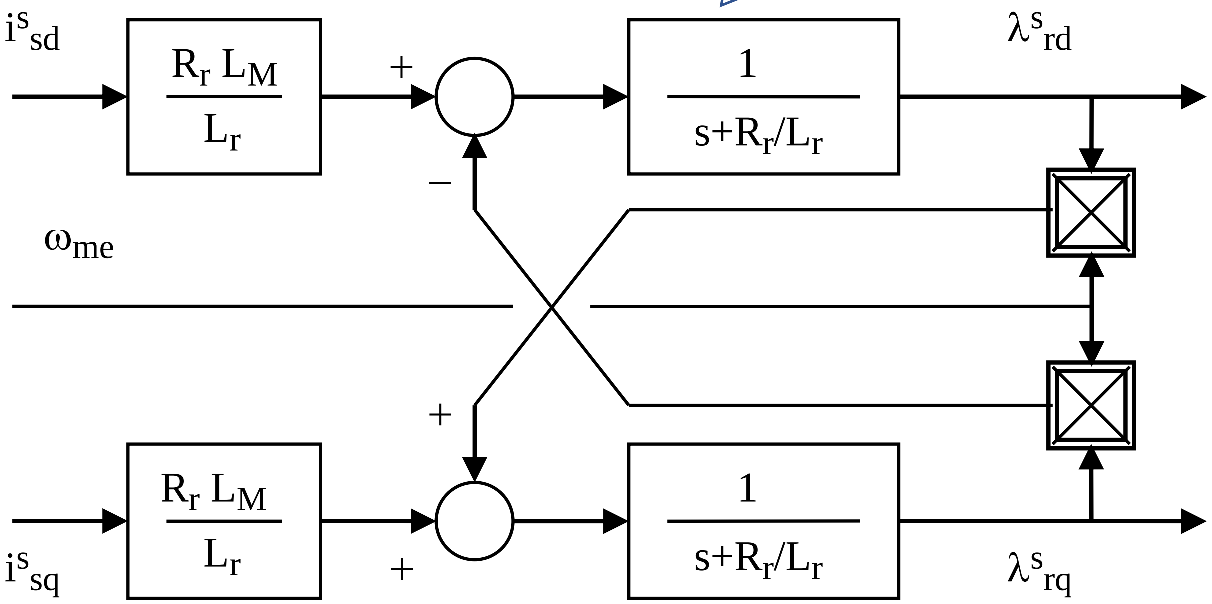
$$\begin{cases} \dfrac{d\lambda_{rd}^s}{dt} + \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rd}^s = -\omega_{me}\lambda_{rq}^s + \dfrac{R_r L_M}{L_r} i_{sd}^s \\[2ex] \dfrac{d\lambda_{rq}^s}{dt} + \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rq}^s = \omega_{me}\lambda_{rd}^s + \dfrac{R_r L_M}{L_r} i_{sq}^s \end{cases}$$

Metodo diretto 2): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_r^s$ da e $\mathbf{i}_s^s$ e ω_m

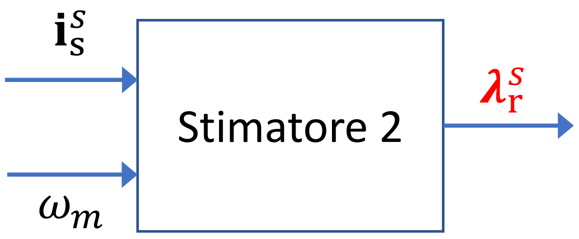


Schema a blocchi (implementativo)

E' un passa-basso: non ci sono i problemi dell'integratore puro



Metodo diretto 2): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}$ da e $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$ e ω_m



Analisi delle prestazioni

- *dipendenza dai parametri e sensibilità alle variazioni parametriche:*

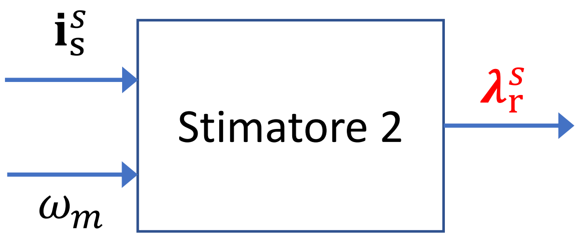
  -- *il parametro che più varia è la resistenza rotorica;*

  -- *errori nella resistenza rotorica comportano errori di stima;*

  -- *gli errori non si esaltano al diminuire della velocità.*

$\Rightarrow$ Lo stimatore funziona anche a velocità basse o nulle!

Metodo diretto 2): Stima del vettore $\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{s}$ da e $\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{s}$ e ω_m



- *onerosità computazionale:*

  -- *Nessuna criticità!*

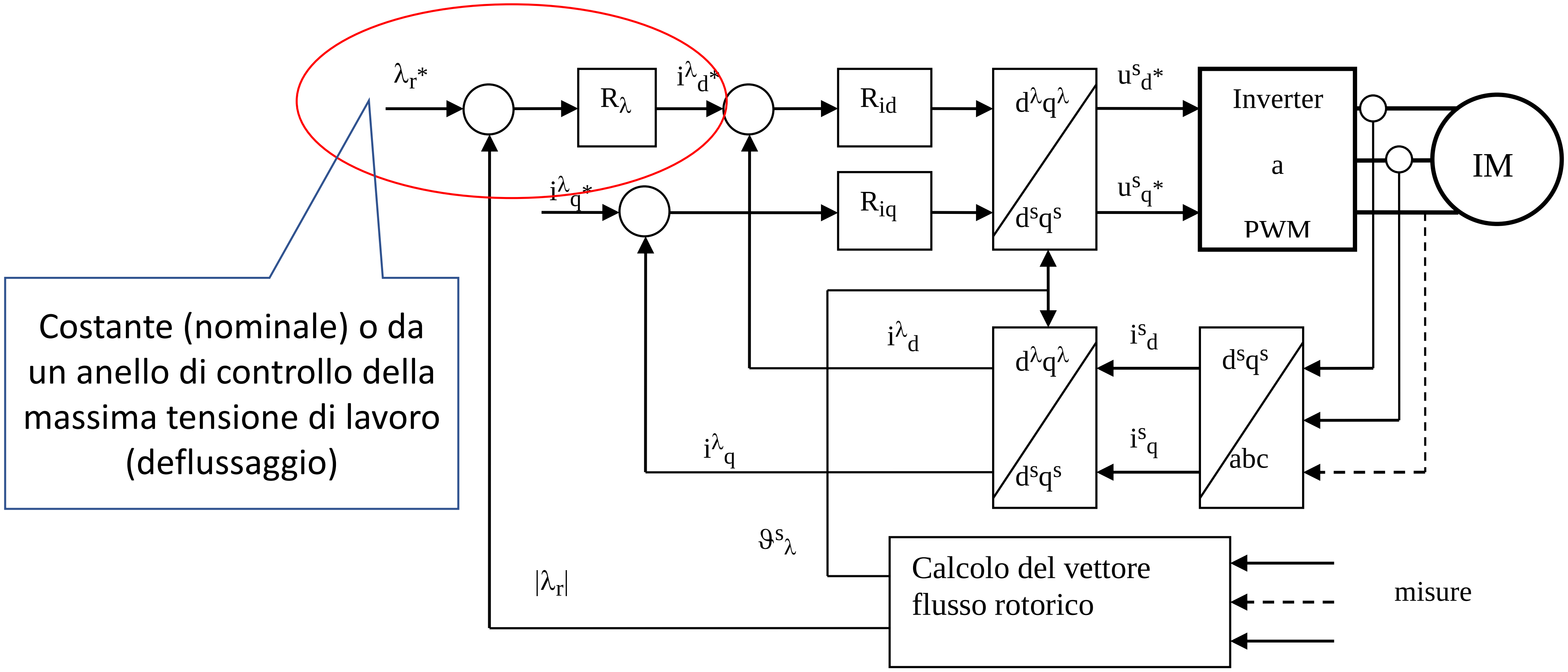
- *onerosità della misura:*

  -- *Richiede la misura della velocità anche se non è previsto un anello di velocità!*

  -- *E' molto sensibile agli errori di velocità.*

  -- *Esigenza onerosa!*

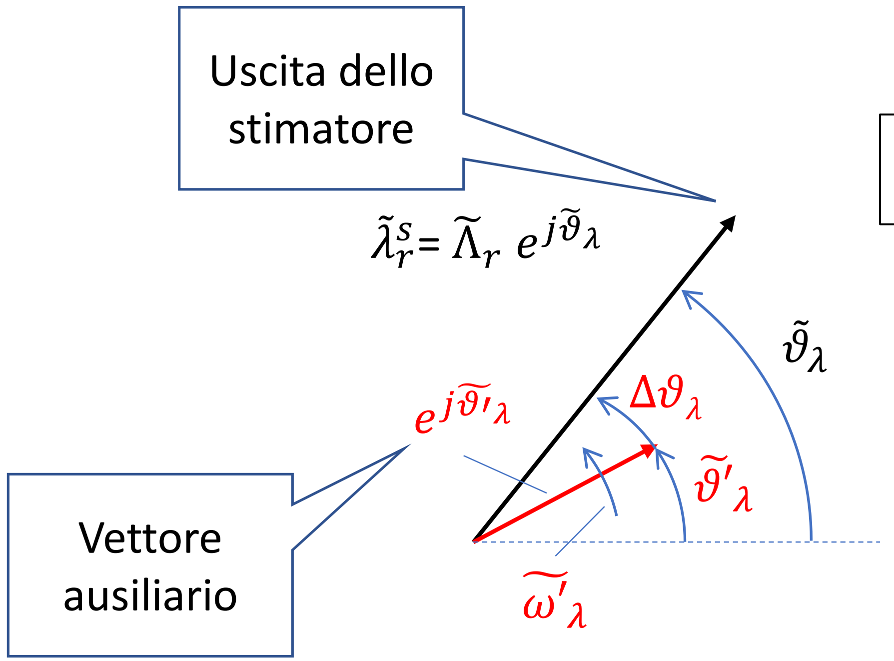
Schema a blocchi di azionamento FOC diretto: particolare dell'anello di flusso

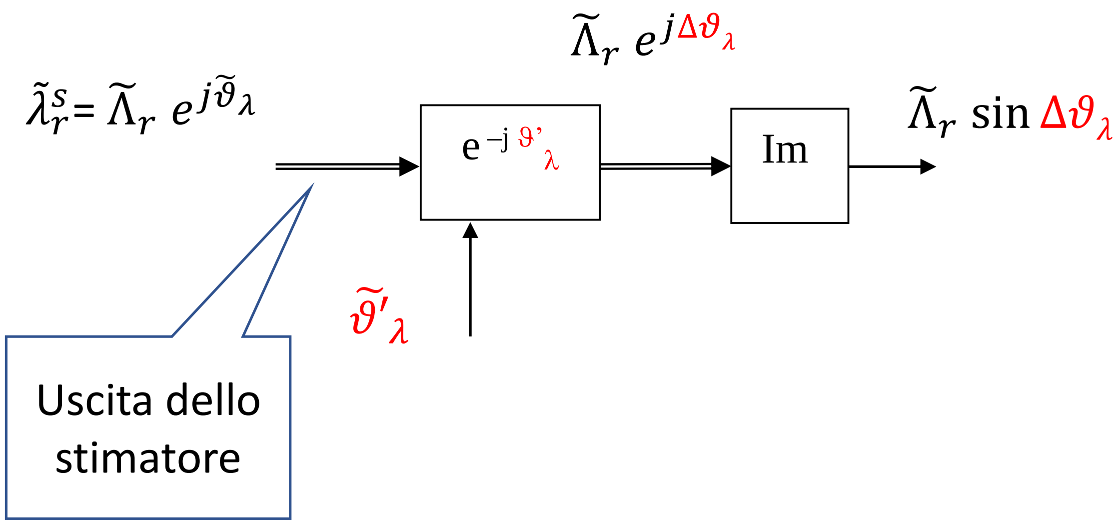


Estrazione della posizione (e della velocità) di λ_r^s

Metodo del PLL (Phase Locked Loop (Anello ad aggancio di fase))

NB: apice «s» omesso per semplicità)



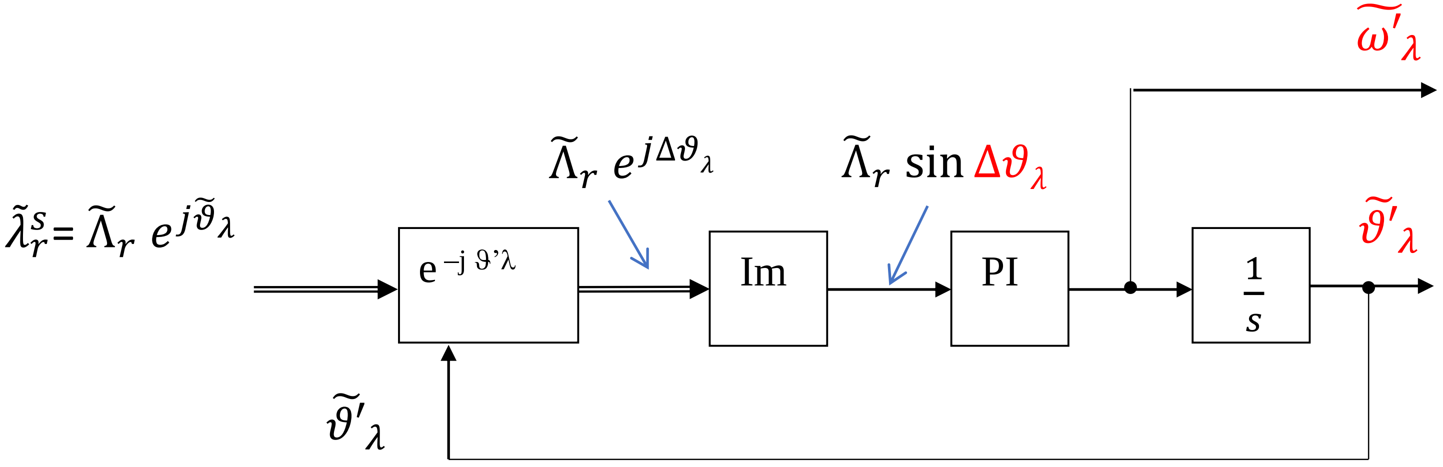


Se $\Delta\vartheta_\lambda = \tilde{\vartheta}_\lambda - \tilde{\vartheta}'_\lambda$ è positivo,

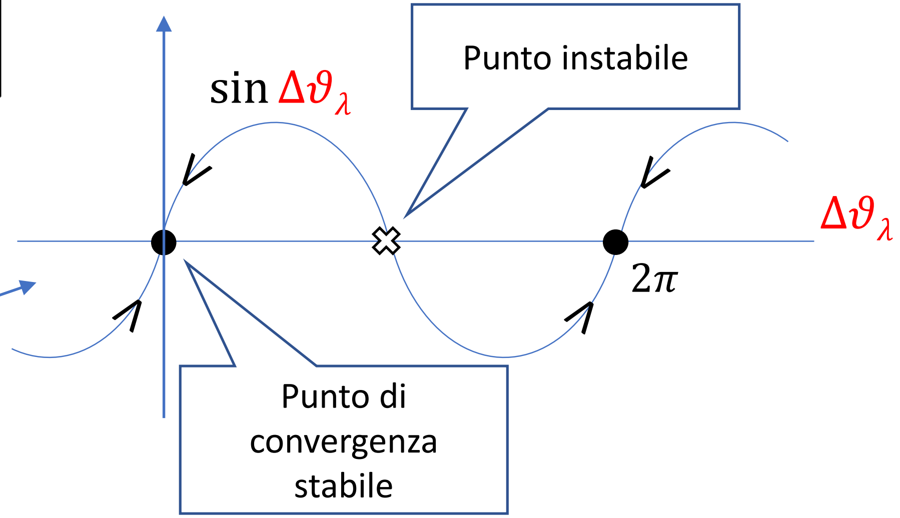
allora $\widetilde{\omega}'_\lambda$ deve aumentare

Estrazione della posizione (e della velocità) di λ_r^s

Metodo del PLL (Phase Locked Loop (Anello ad aggancio di fase))



Se $\sin\Delta\vartheta_\lambda$ è positivo, allora $\tilde{\omega}'_\lambda$ è aumentata dal controllore PI (cioè $\Delta\vartheta_\lambda$ è diminuita) e viceversa.



Estrazione della posizione (e della velocità) di λ_r^s

Metodo del PLL (Phase Locked Loop (Anello ad aggancio di fase))

Per il progetto del PI si può fare riferimento al seguente schema valido attorno al punto di convergenza stabile ove sin x $\cong$ x.