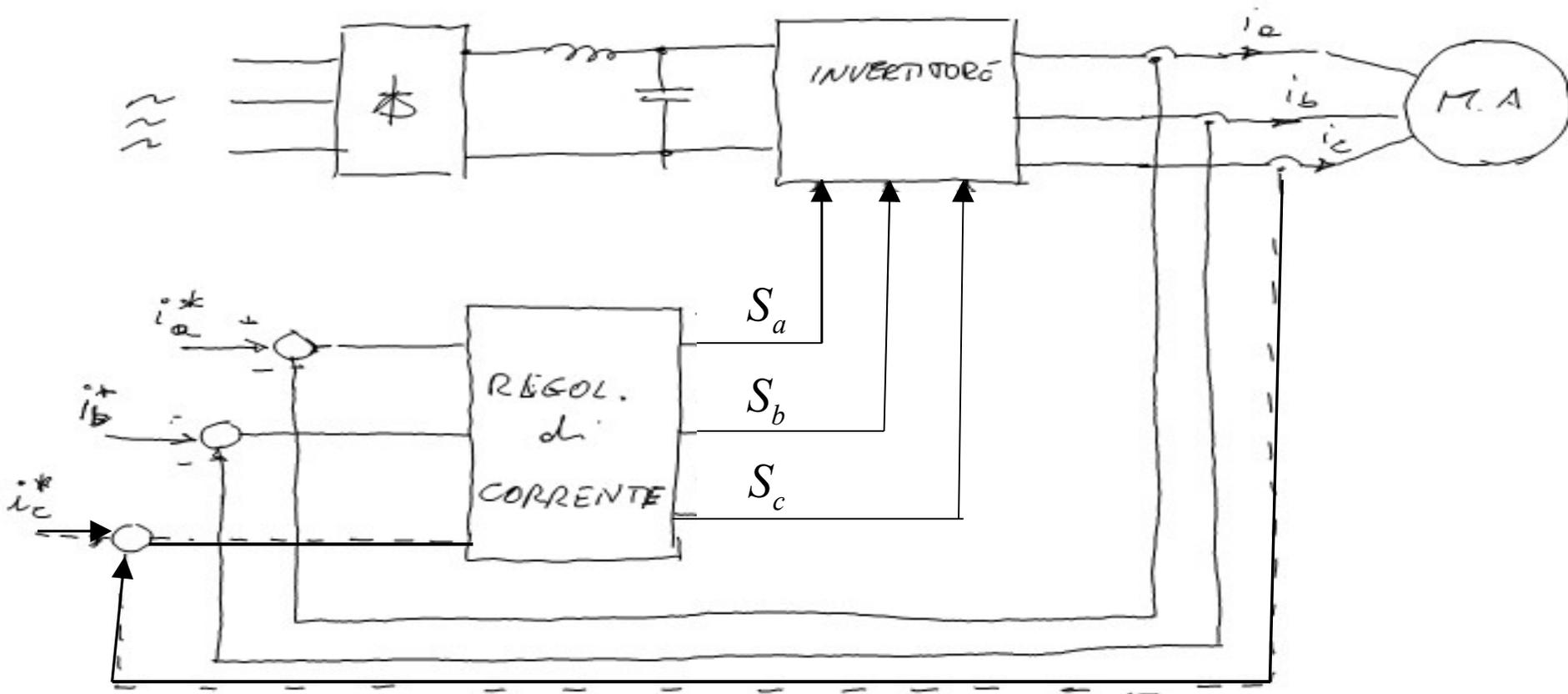
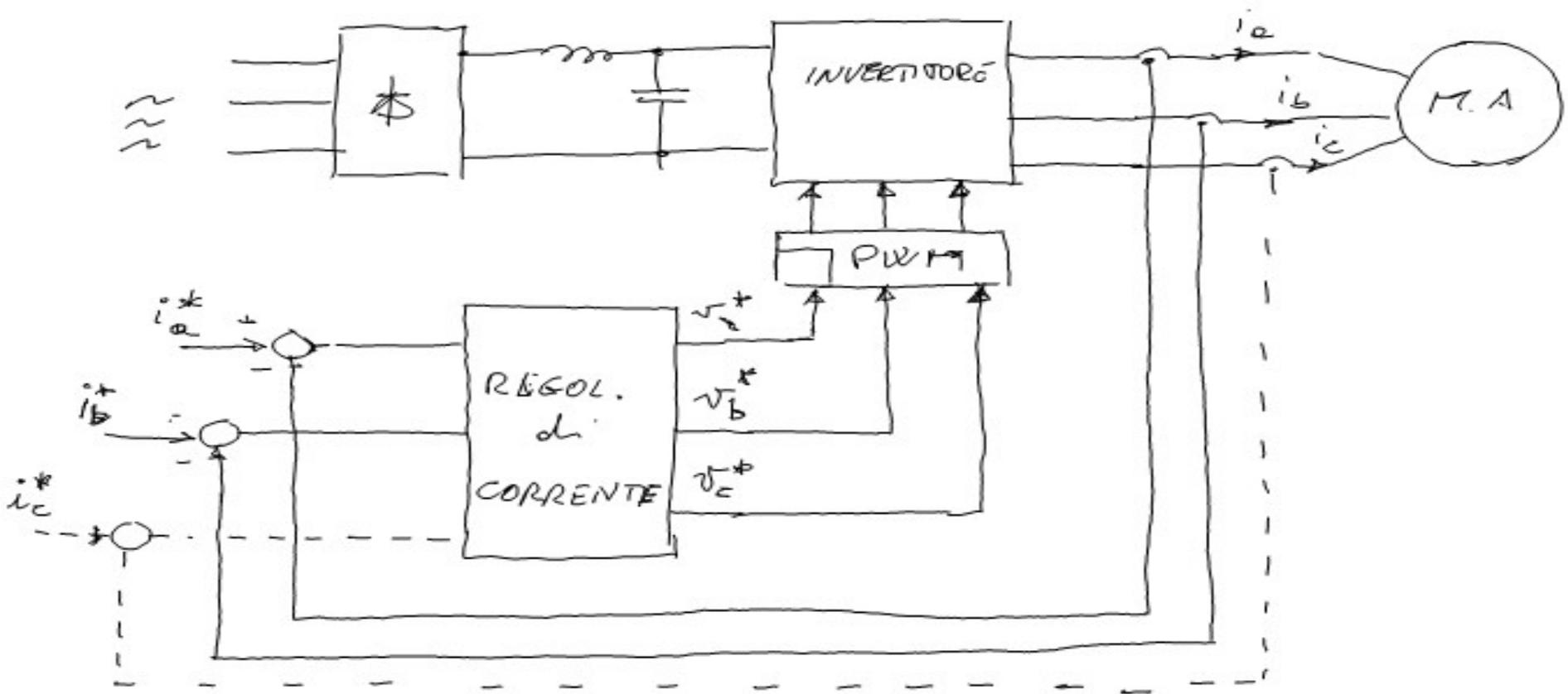


Regolazione di corrente
per azionamenti in alternato (asincroni)

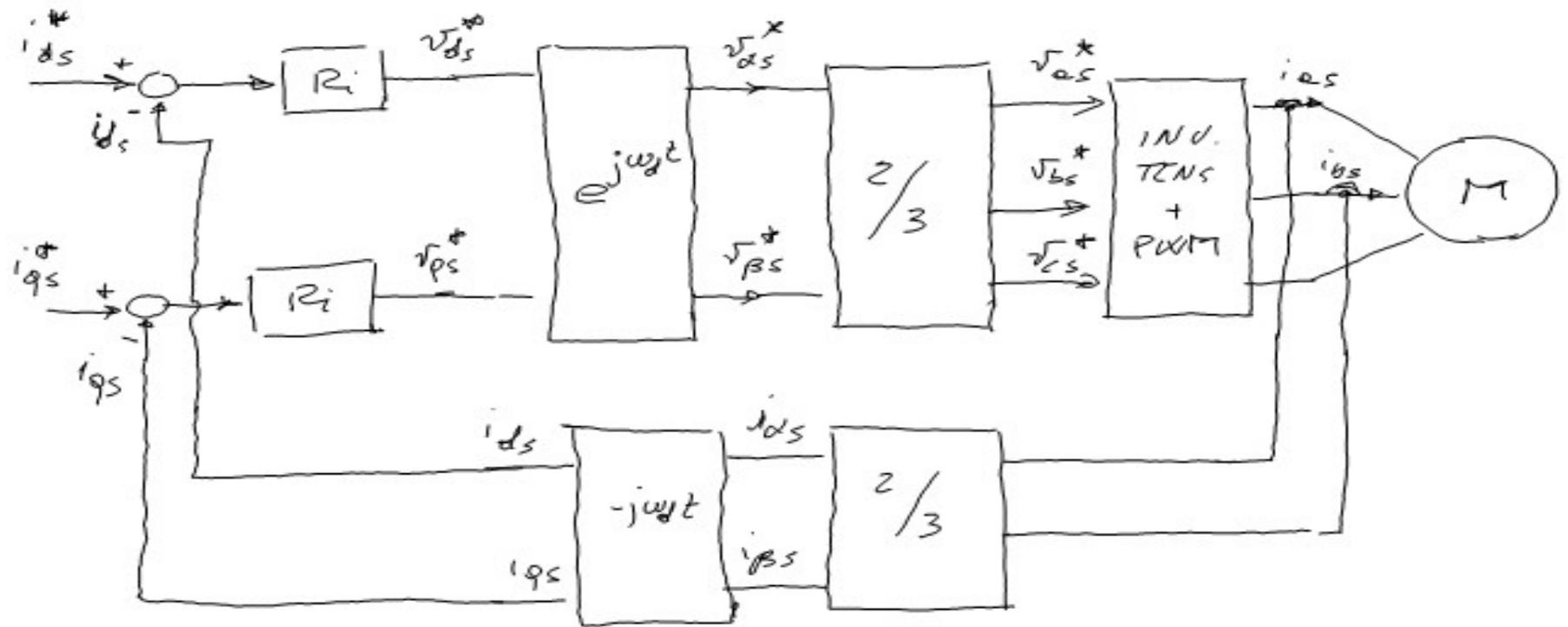


Regolazione di corrente per azionamenti in alternato (commutazione)



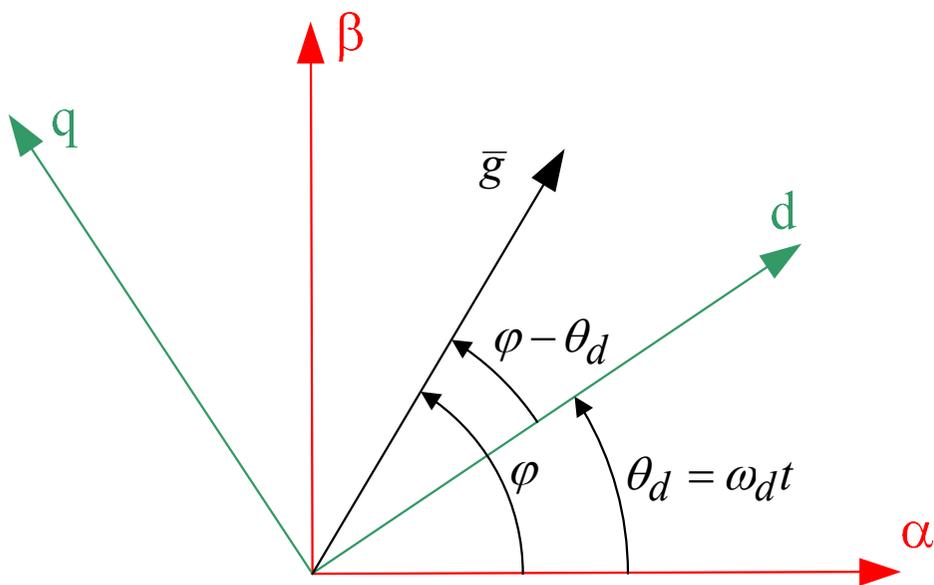
PER I REGOLATORI AD INTERESI SI VEDA LA
PRESENTAZIONE DEDICATA A QUESTO ARGOMENTO

Regolatori di corrente realizzati in un sistema di ref. rotante a pulsazione ω_d



Le due soluzioni più importanti sono quelle relative alle scelte $\omega_d = 0$ (ref. stazionaria)
 $\omega_d = \omega_s$ (ref. sincrona)

PASSAGGIO TRA SISTEMI DI RIFERIMENTO



Espressioni cartesiane:

$$\begin{cases} g_d = g_\alpha \cos \theta_d + g_\beta \sin \theta_d \\ g_q = -g_\alpha \sin \theta_d + g_\beta \cos \theta_d \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_\alpha = g_d \cos \theta_d - g_q \sin \theta_d \\ g_\beta = g_d \sin \theta_d + g_q \cos \theta_d \end{cases}$$

\bar{g} è un vettore qualsiasi che ha le seguenti rappresentazioni:

$$\bar{g}_{\alpha\beta} = Ge^{j\varphi} \text{ nel riferimento } \alpha\beta$$

$$\bar{g}_{dq} = Ge^{j(\varphi - \theta_d)} \text{ nel riferimento } dq$$

Ne viene che

$$\bar{g}_{dq} = Ge^{j(\varphi - \theta_d)} = (Ge^{j(\varphi)})e^{j(-\theta_d)}$$

da cui

$$\bar{g}_{dq} = \bar{g}_{\alpha\beta} e^{j(-\theta_d)}$$

oppure

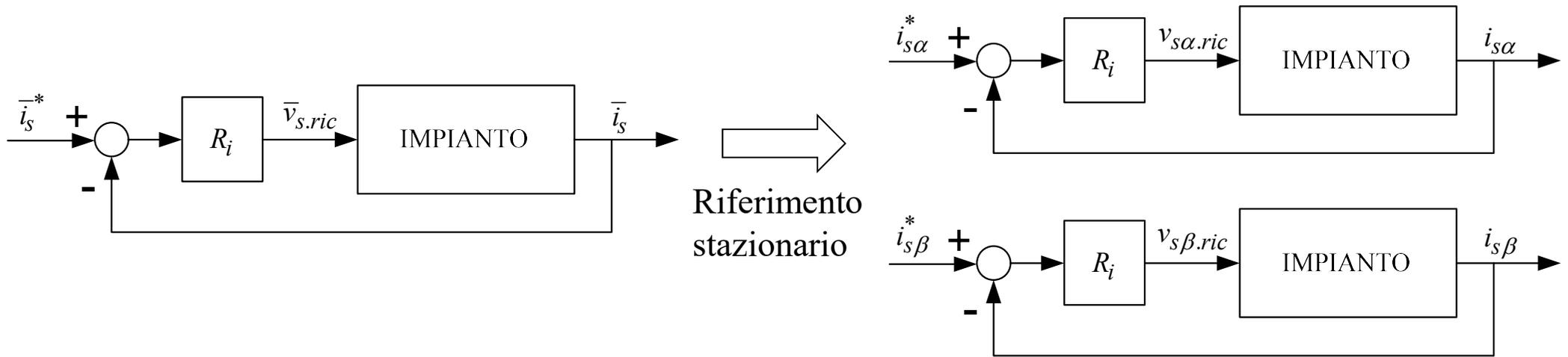
$$\bar{g}_{\alpha\beta} = \bar{g}_{dq} e^{j(\theta_d)}$$

Ragionamento intuitivo:

- un osservatore su dq vede «quello che vede $\alpha\beta$ » **meno** θ_d o viceversa:
- un osservatore su $\alpha\beta$ vede «quello che vede dq» **più** θ_d

REGOLATORI LINEARI

I regolatori di tipo "lineare" hanno uno schema classico rappresentato dalle figure sottostanti



Il regolatore R_i tipicamente è uno dei regolatori standard (il più comunemente usato è il PI)

$$R_i = K_i \frac{1 + s\tau_i}{s\tau_i}$$

INDIVIDUAZIONE DELL'IMPIANTO

L'impianto che vede il regolatore di corrente è costituito dal convertitore (compreso del modulatore) e dal motore. Il primo ha una dinamica molto veloce per cui lo si può modellizzare con un semplice guadagno G_{conv} (senza dinamica). Quindi la dinamica dell'impianto coincide con quella del motore.

La trasferimento dell'impianto si può trovare determinando la trasferimento tra tensione e corrente del motore. La si calcola a partire dalle equazioni dinamiche vettoriali del motore espresse in un sistema di riferimento stazionario e nella forma "operazionale".

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + p \bar{\lambda}_s$$

$$0 = R_r \bar{i}_r + p \bar{\lambda}_r - j\omega_{me} \bar{\lambda}_r$$

dove l'operatore
 $p = d/dt$.

utilizzando le

equazioni di legame:

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + L_M \bar{i}_r$$

$$\bar{i}_r = \frac{1}{L_r} \bar{\lambda}_r - \frac{L_M}{L_r} \bar{i}_s$$

si esprima il modello matematico del motore in funzione delle corrente di statore e del flusso di rotore:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s - \sigma L_s p \bar{i}_s - \frac{L_M}{L_r} p \bar{\lambda}_s$$

$$0 = \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me} \right) \bar{\lambda}_r + p \bar{\lambda}_r - \frac{L_M}{\tau_r} \bar{i}_s$$

INDIVIDUAZIONE DELL'IMPIANTO

Ricavando il flusso di rotore dalla seconda:

$$\bar{\lambda}_r = \frac{\frac{L_M}{\tau_r} \bar{i}_s}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

e sostituendo nella prima si ottiene

$$\bar{v}_s = \left\{ \left(R_s - \sigma L_s p \right) + \frac{L_M^2}{L_r \tau_r} \frac{p}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}} \right\} \bar{i}_s$$

Da questa si può determinare, con opportune e semplici elaborazioni, l'impedenza operativa:

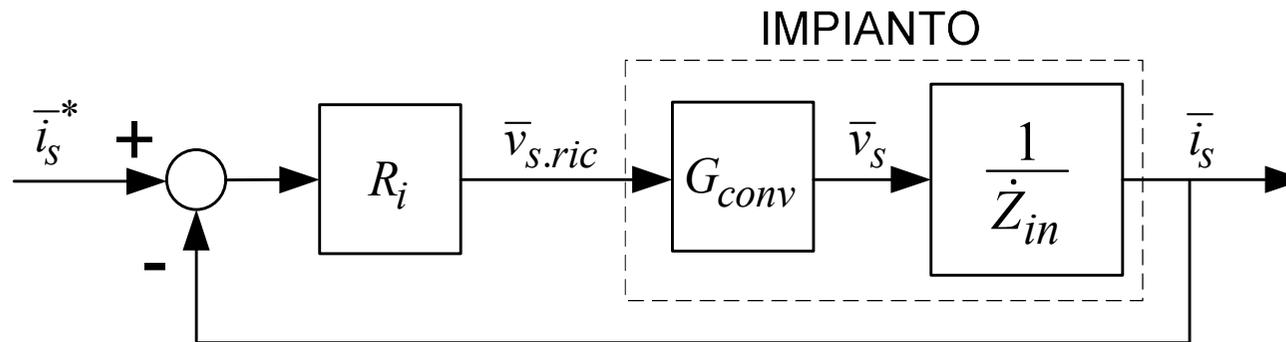
$$\dot{Z}_{in} = \frac{\bar{v}_s}{\bar{i}_s} = \frac{p^2 \sigma L_s + p \left(R_s + \frac{L_s}{\tau_r} - j\omega_{me} \sigma L_s \right) + R_s \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me} \right)}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

Si osservi che vale:

$$\sigma L_s + \frac{L_M^2}{L_r} = L_s$$

INDIVIDUAZIONE DELL'IMPIANTO

L'inverso della \dot{Z}_{in} moltiplicato per il guadagno del convertitore (G_{conv}) è la trasferenza dell'impianto visto dal regolatore di corrente.



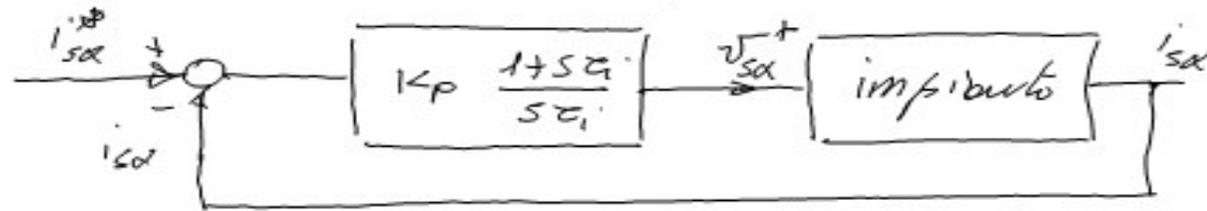
Da questa si può determinare, con opportune e semplici elaborazioni, l'impedenza operativa:

$$\dot{Z}_{in} = \frac{\bar{v}_s}{\dot{i}_s} = \frac{p^2 \sigma L_s + p \left(R_s + \frac{L_s}{\tau_r} - j\omega_{me} \sigma L_s \right) + R_s \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me} \right)}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

Si osservi che vale:

$$\sigma L_s + \frac{L_M^2}{L_r} = L_s$$

Determinazione dell'impianto



(STAZIONARIO)

impianto = convertitore + motore

↑
quasi statico
(dinamica veloce)

↑
dinamica

Rif. quadranti

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + (p + j\omega_d) \bar{\lambda}_s \\ 0 = r_n \bar{i}_n + [p + j(\omega_d - \omega_{me})] \bar{\lambda}_n \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{L_{m1}}{L_n} \bar{\lambda}_n \\ \bar{i}_n &= \frac{1}{L_n} \bar{\lambda}_n - \frac{L_{m1}}{L_n} \bar{i}_s \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + (p + j\omega_d) \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{L_{m1}}{L_n} (p + j\omega_d) \bar{\lambda}_n \\ 0 = \frac{1}{L_n} \bar{\lambda}_n - \frac{L_{m1}}{L_n} \bar{i}_s + [p + j(\omega_d - \omega_{me})] \bar{\lambda}_n \end{cases}$$

ref. stazionario $\omega_d = 0$

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \sigma L_s p \bar{i}_s + \frac{L_{m1}}{L_n} p \bar{\lambda}_n \\ 0 = \left(\frac{1}{L_n} - j\omega_{me} \right) \bar{\lambda}_n + p \bar{\lambda}_n - \frac{L_{m1}}{L_n} \bar{i}_s \end{cases} \rightarrow \bar{\lambda}_n = \frac{\frac{L_{m1}}{L_n} \bar{i}_s}{p + \frac{1}{L_n} - j\omega_{me}}$$

$$\bar{v}_s = \left\{ (R_s + \sigma l_s p) + \frac{L_m^2}{L_2 \epsilon_2} \cdot \frac{p}{p + \frac{1}{\epsilon_2} - j\omega_{me}} \right\} \bar{i}_s$$

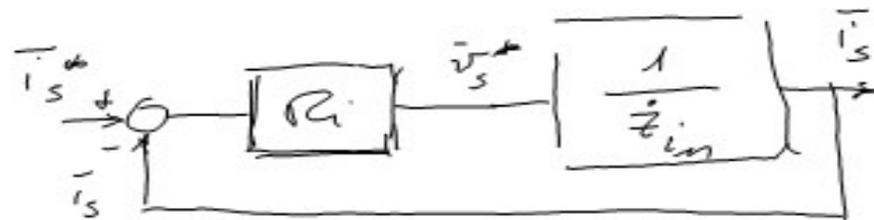
$$\bar{z}_{in} = \frac{\bar{v}_s}{\bar{i}_s} = \frac{(R_s + \sigma l_s p) \left(p + \frac{1}{\epsilon_2} - j\omega_{me} \right) + \frac{L_m^2}{L_2 \epsilon_2} p}{p + \frac{1}{\epsilon_2} - j\omega_{me}}$$

$$\sigma l_s + \frac{L_m^2}{L_2}$$

$$\frac{L_s L_2 - L_m^2}{L_2 L_2} R_s + \frac{L_m^2}{L_2}$$

$$= \frac{p^2 \sigma l_s + p \left(R_s + \frac{\sigma l_s}{\epsilon_2} + \frac{L_m^2}{L_2 \epsilon_2} - j\omega_{me} \sigma l_s \right) + R_s \left(\frac{1}{\epsilon_2} - j\omega_{me} \right)}{p + \frac{1}{\epsilon_2} - j\omega_{me}}$$

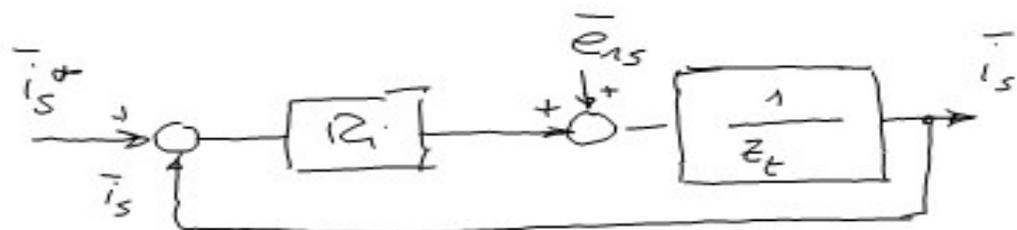
$$\omega_{me} = (1-s)\omega_s = \omega_s - \omega_{sce}$$



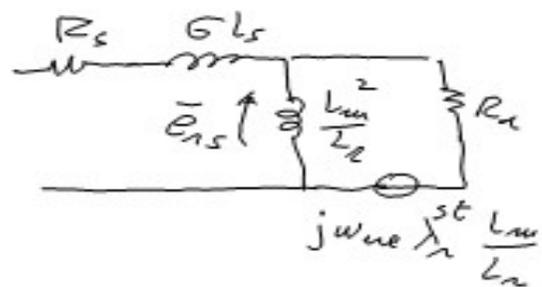
$$\bar{v}_i = \frac{1-s}{1+s} \bar{i}_s$$

$$\frac{R_i \cdot \frac{1}{\bar{z}_{in}}}{1 + \frac{R_i}{\bar{z}_{in}}} = \frac{1}{1 + \frac{\bar{z}_{in}}{R_i}}$$

$$\bar{v}_s = \underbrace{(R_s + \sigma L_s p)}_{z_t} \bar{i}_s + \bar{e}_{1s}$$



$$z_t = R_s + \sigma L_s p$$

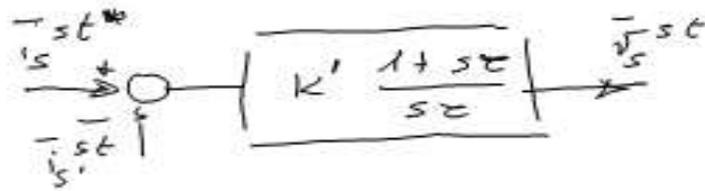


$$z_{\sigma s} = \frac{\sigma L_s}{R_s}$$

$$z_{\sigma s} = \sigma L_s$$

$$p_{\sigma s} = \frac{1}{z_{\sigma s}}$$

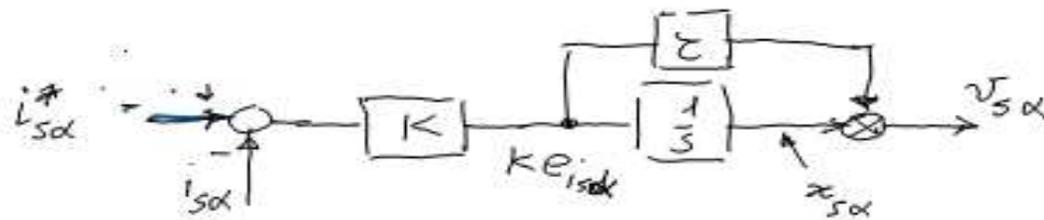
Regolatore stazionario (quel regolatore realizzato in un sist. r.f. stazionario)



$$\bar{v}_s^{st} = K' \frac{1 + s\tau}{s\tau} \underbrace{\left(\bar{i}_s^{st*} - \bar{i}_s^{st} \right)}_e$$

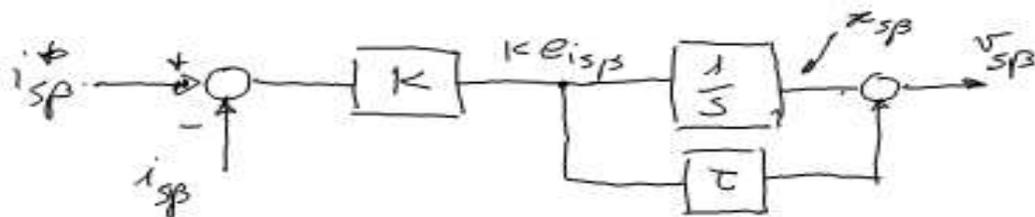
$$K = \frac{K'}{\tau} \quad K' = K\tau$$

$$\bar{v}_s^{st} = \left(K\tau + \frac{K}{s} \right) \left(\bar{i}_s^{st*} - \bar{i}_s^{st} \right) = K\tau \left(\bar{i}_s^{st*} - \bar{i}_s^{st} \right) + \underbrace{\frac{K}{s} \left(\bar{i}_s^{st*} - \bar{i}_s^{st} \right)}_{\bar{x}_s^{st}}$$



$$\bar{x}_s^{st} = \frac{K}{s} \bar{e}_{is}$$

$$s \bar{x}_s^{st} = K \bar{e}_{is}$$



$$\bar{v}_s^{st} = KZ \left(\bar{i}_s^{st*} \cdot \bar{i}_s^{st} \right) + \bar{x}_s^{st}$$

Trasformare l'equazione sopra rappresentata in un sist. di ref. sincrono (sr) cioè rotante alla pulsazione di sincronismo ω_s

$$\bar{g}^{st} = \bar{g}^{sr} e^{j\omega_s t}$$

$$\bar{v}_s^{sr} e^{j\omega_s t} = KZ \left(\bar{i}_s^{sr*} - \bar{i}_s^{sr} \right) e^{j\omega_s t} + \bar{x}_s^{sr} e^{j\omega_s t}$$

$$P(\bar{x}_s^{sr} e^{j\omega_s t}) = K \left(\bar{i}_s^{sr*} - \bar{i}_s^{sr} \right) e^{j\omega_s t}$$

$$P(\bar{x}_s^{sr}) e^{j\omega_s t} + \bar{x}_s^{sr} j\omega_s e^{j\omega_s t} = K \left(\bar{i}_s^{sr*} - \bar{i}_s^{sr} \right) e^{j\omega_s t}$$

$$\bar{x}_s^{sr} = \frac{K}{s} \left(\bar{i}_s^{sr*} - \bar{i}_s^{sr} \right) - \frac{1}{s} j\omega_s \bar{x}_s^{sr}$$

Funzioni
di
tempo

Trasf. di
Laplace

Sostituendo l'espresso qui sopra in quella iniziale (pensata come funzione in Laplace) si ottiene

$$\bar{v}_s^{st} = \left(KZ + \frac{K}{s} \right) \left(\bar{i}_s^{sr*} - \bar{i}_s^{sr} \right) - \frac{1}{s} j\omega_s \bar{x}_s^{sr}$$

ipotesi.
L'azionamento
inferiore
inverso

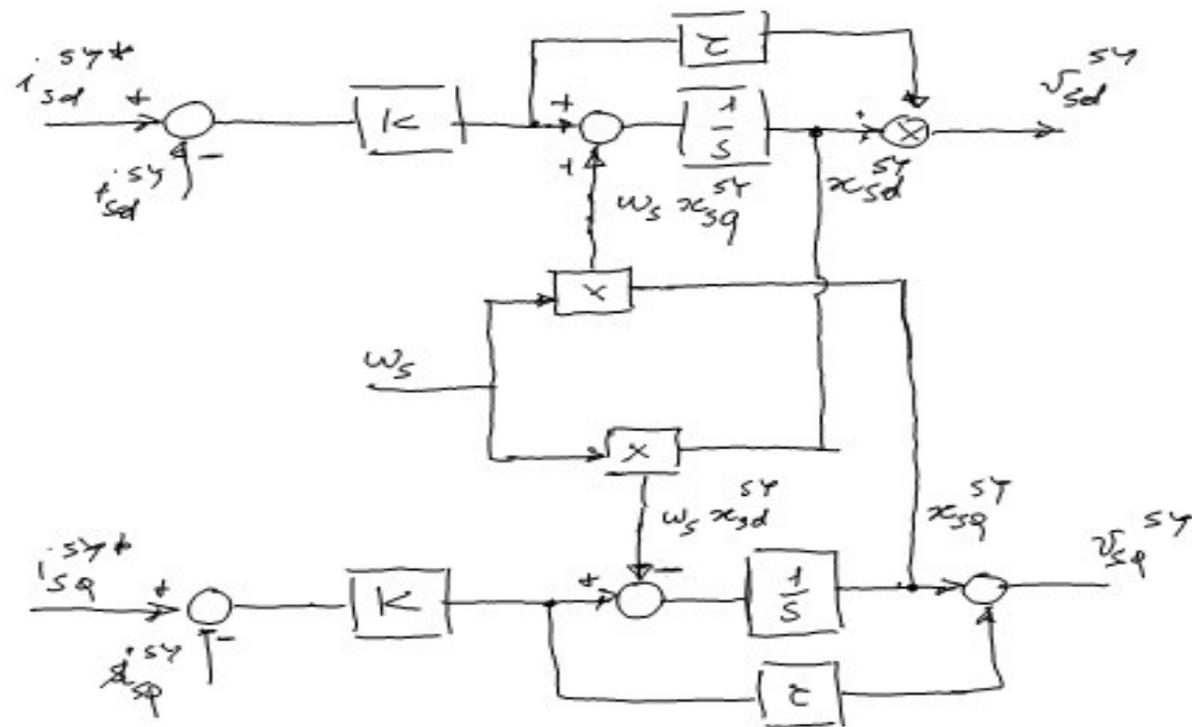
$$\begin{cases} \sqrt{v_{sd}^{sy}} = k \left(\tau + \frac{1}{s} \right) \left(i_{sd}^{sy*} - i_{sd}^{sy} \right) + \frac{1}{s} \omega_s x_{sq}^{sy} \\ \sqrt{v_{sq}^{sy}} = k \left(\tau + \frac{1}{s} \right) \left(i_{sq}^{sy*} - i_{sq}^{sy} \right) - \frac{1}{s} \omega_s x_{sd}^{sy} \end{cases}$$

si riarrange nel seguente modo

$$\begin{cases} \sqrt{v_{sd}^{sy}} = k \tau \left(i_{sd}^{sy*} - i_{sd}^{sy} \right) + \frac{1}{s} \left[k \left(i_{sd}^{sy*} - i_{sd}^{sy} \right) + \omega_s x_{sq}^{sy} \right] \\ \sqrt{v_{sq}^{sy}} = k \tau \left(i_{sq}^{sy*} - i_{sq}^{sy} \right) + \frac{1}{s} \left[k \left(i_{sq}^{sy*} - i_{sq}^{sy} \right) - \omega_s x_{sd}^{sy} \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{sd}^{sy} = \frac{k}{s} \left(i_{sd}^{sy*} - i_{sd}^{sy} \right) + \frac{1}{s} \omega_s x_{sq}^{sy} \\ x_{sq}^{sy} = \frac{k}{s} \left(i_{sq}^{sy*} - i_{sq}^{sy} \right) - \frac{1}{s} \omega_s x_{sd}^{sy} \end{cases}$$

Schema o blocchi del regolatore stazionario rappresentato in un riferimento sincrono



Conseguenze del mutuo accoppiamento tra i due assi della rappresent.

- in regime stazionario si ha una risposta $\neq 0$ nel canale mutuo (che dipende dallo ω_s) anche se nel suo ingresso è nullo.

es. $v_{sq}^{*} \neq 0$ anche se $i_{sq}^* = 0$

La risposta di corrente non segue fedelmente il comando

- esiste la possibilità di insorgere di un fenomeno di risonanza il mutuo accoppiamento produce un oscillatore locale

$$x_{sd}^{sy} = \frac{1}{s} \omega_s x_{sq}^{sy}$$

$$x_{sq}^{sy} = -\frac{1}{s} \omega_s x_{sd}^{sy}$$

sostituendo la seconda nella prima si ha:

$$x_{sd}^{sy} = -\frac{1}{s^2} \omega_s^2 x_{sd}^{sy}$$

$$s^2 x_{sd}^{sy} = -\omega_s^2 x_{sd}^{sy}$$

una soluzione di questa equazione è:

$$x_{sd}^{sy} = A \cos(\omega_s t + \varphi)$$

$$x_{sq}^{sy} = -A \sin(\omega_s t + \varphi)$$

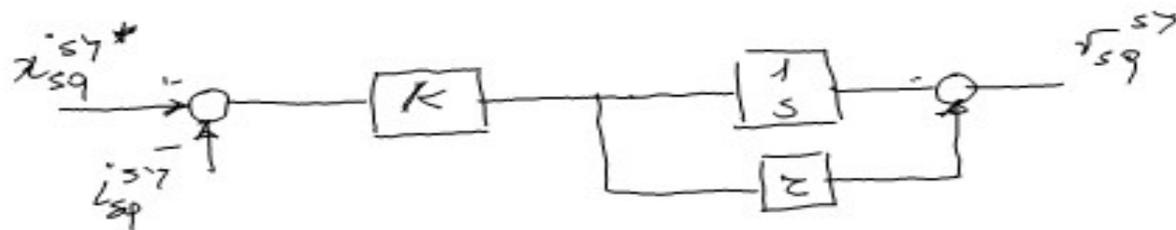
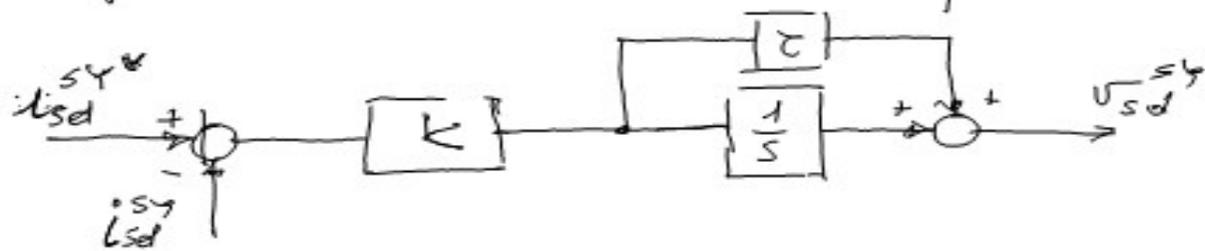
$$\begin{aligned} \Rightarrow \bar{x}_s^{sy} &= x_{sd}^{sy} + j x_{sq}^{sy} = \\ &= -A e^{-j(\omega_s t + \varphi)} \\ &\text{sist. invariante} \end{aligned}$$

ritornando in un sist. di rf. stazionario si ha

$$\bar{x}_s^{st} = \bar{x}_s^{sy} e^{j\omega_s t} = -A e^{-j\varphi}$$

In un rf. stazionario l'oscillazione persistente è in realtà una costante la quale è compensata dal regolatore PI stesso

Regolatore mancino in cf mancino



Eq. vettoriale corrispondente e^- $\bar{v}_s^{sy} = K \left(\tau + \frac{1}{s} \right) \left(\frac{-i_{sd}^{sy*}}{s} - \frac{-i_{sd}^{sy}}{s} \right)$

Regolatore sincrono in rif. stazionaria

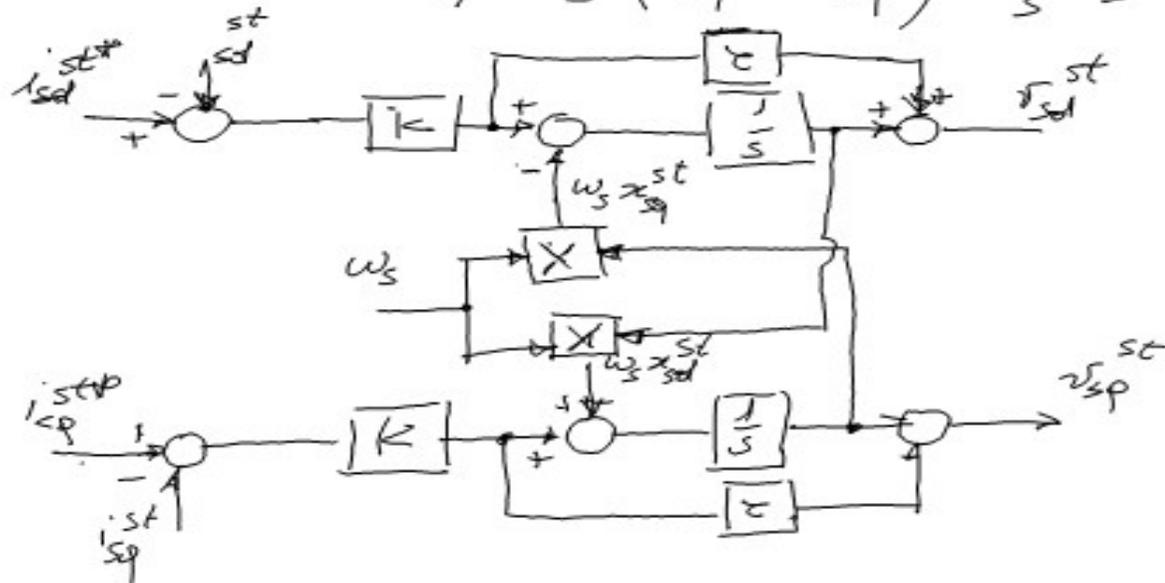
Si ottiene dall'equaz. del reg. sincrono in rif. sincrono trasformando le variabili in un rif. stazionario
si ottengono:

$$v_{sd}^{st} = K \left(c + \frac{1}{s} \right) (i_{sd}^{st*} - i_{sd}^{st}) - \frac{1}{s} \omega_s x_{sq}^{st}$$

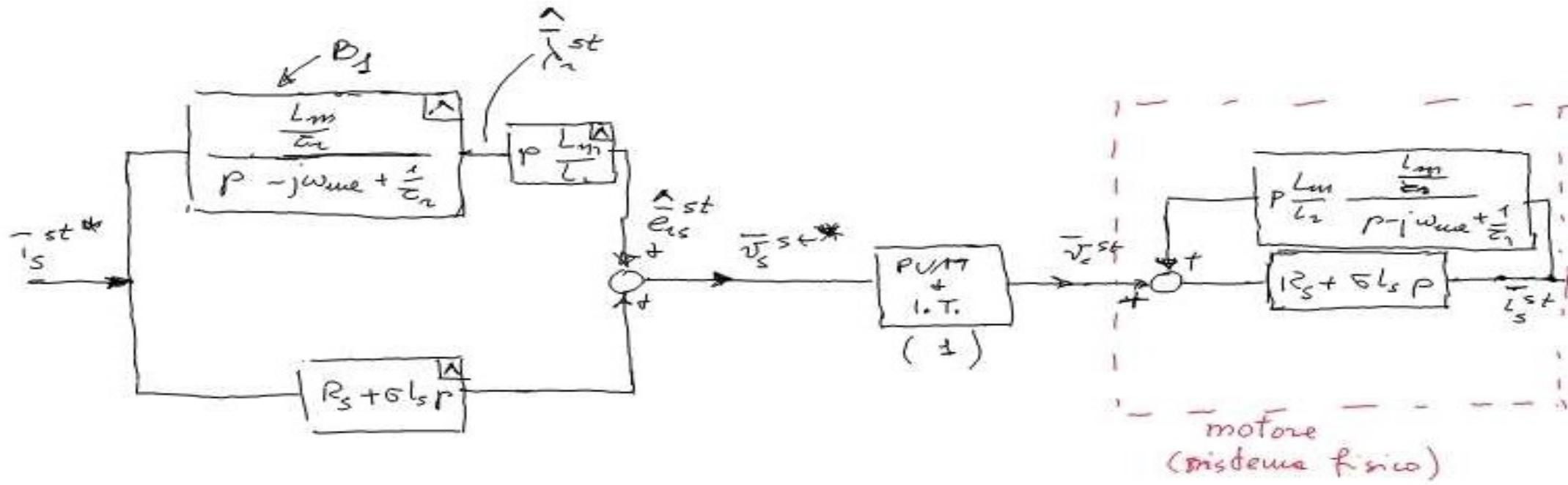
$$v_{sq}^{st} = K \left(c + \frac{1}{s} \right) (i_{sq}^{st*} - i_{sq}^{st}) + \frac{1}{s} \omega_s x_{sd}^{st}$$

$$x_{sd}^{st} = \frac{K}{s} (i_{sd}^{st*} - i_{sd}^{st}) - \frac{1}{s} \omega_s x_{sq}^{st}$$

$$x_{sq}^{st} = \frac{K}{s} (i_{sq}^{st*} - i_{sq}^{st}) + \frac{1}{s} \omega_s x_{sd}^{st}$$

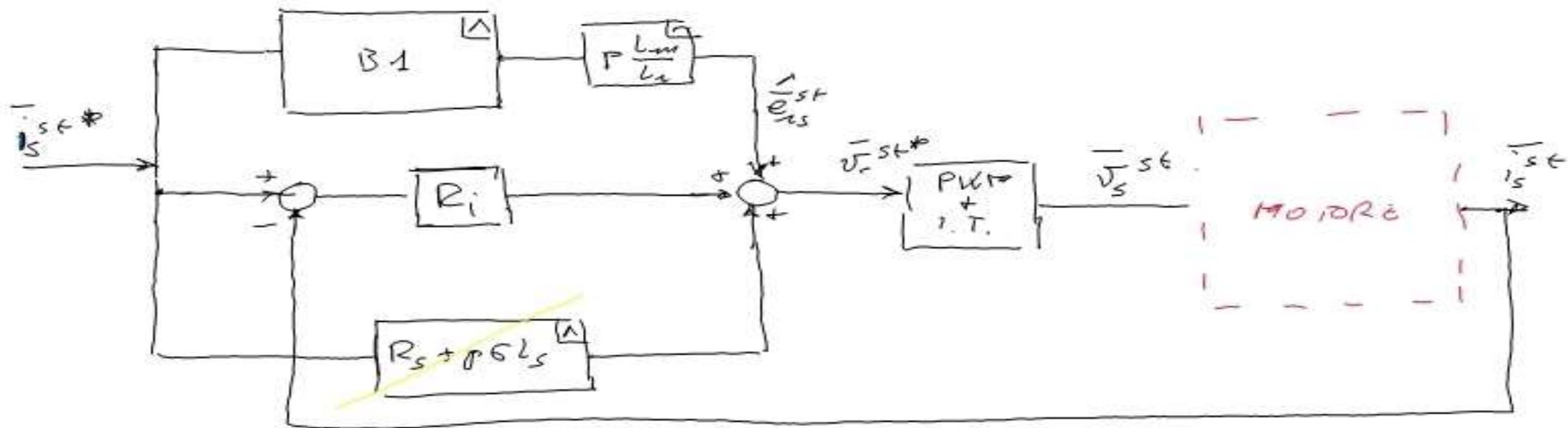


Controllore di corrente e corrente di riferimento



100

motore
(sistema fisico)



R_i può essere un regolatore stazionario o sinusale ma entrambi realizzati in sist. di rif. stazionario

Controllo di corrente di tipo predittivo

referim. stazionaria.

Equazione di stato del motore in cui si trascura $R_s \ll \omega L_s$
Circ. equiv. a J rovescia

$$\frac{d\bar{i}_s}{dt} \approx \frac{1}{\sigma L_s} [\bar{v}_s - \bar{e}_{rs}]$$

si consideri un int. di tempo $[0, T]$ sufficientemente piccolo

$$\bar{i}_s(T) - \bar{i}_s(0) \approx \frac{T}{\sigma L_s} [\bar{v}_s(0) - \bar{e}_{rs}(0)]$$

Supponendo di conoscere $\bar{e}_{rs}(0)$ e sapere qual è il valore finale in T
della corrente $\bar{i}_s(T) = \bar{i}_s^*(T)$

allora si può calcolare

$$\bar{v}_s(0) = \frac{\sigma L_s}{T} [\bar{i}_s^*(T) - \bar{i}_s(0)] + \bar{e}_{rs}(0)$$