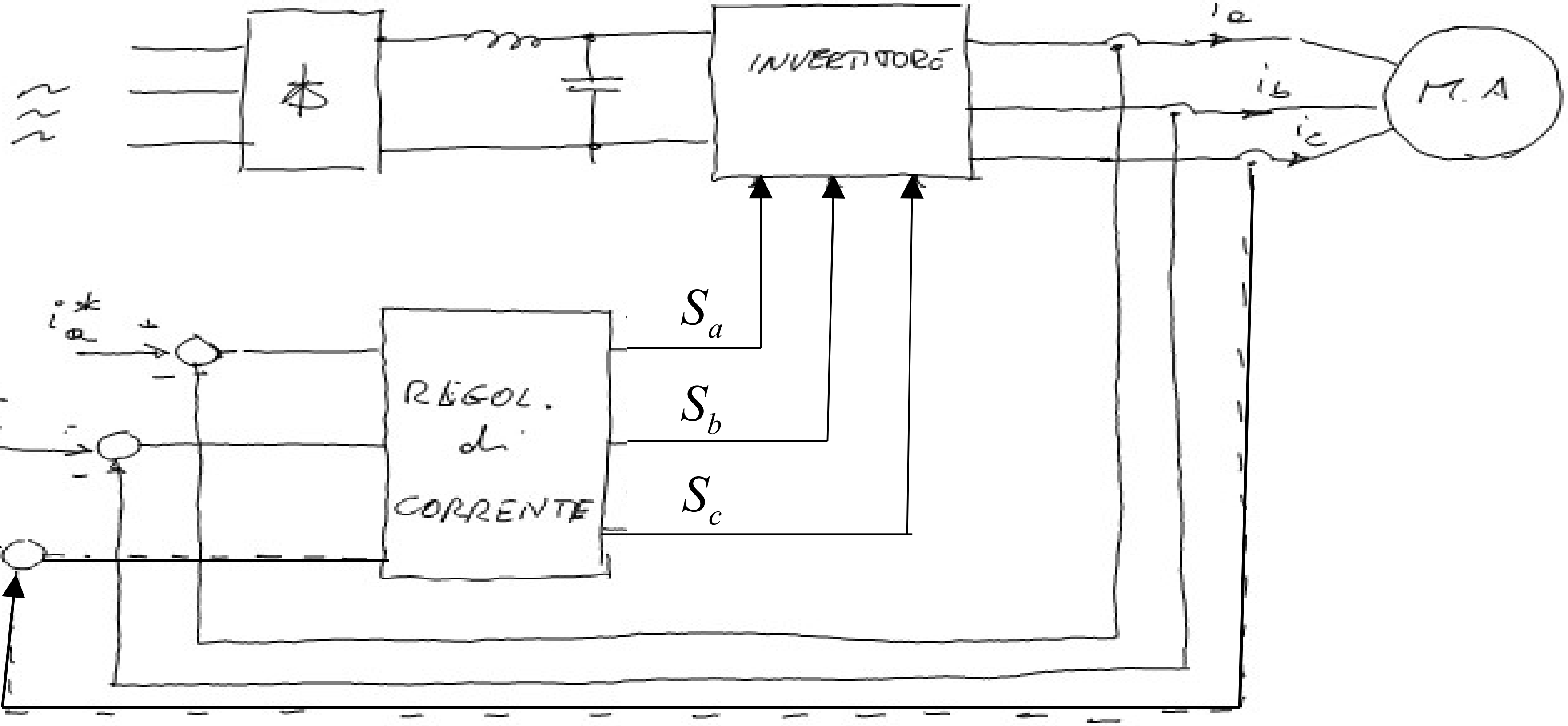
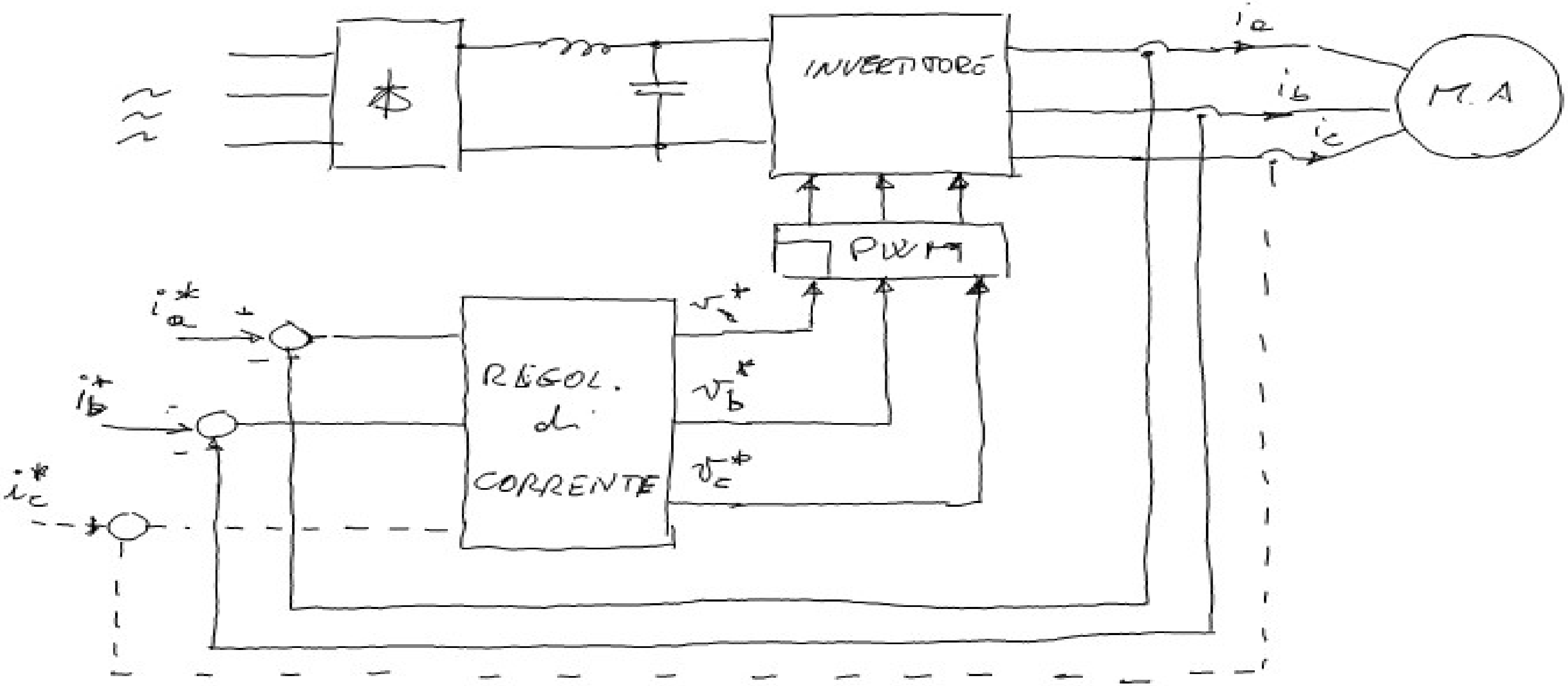
Regolazione di corrente per azionamenti in alternata (asincroni)

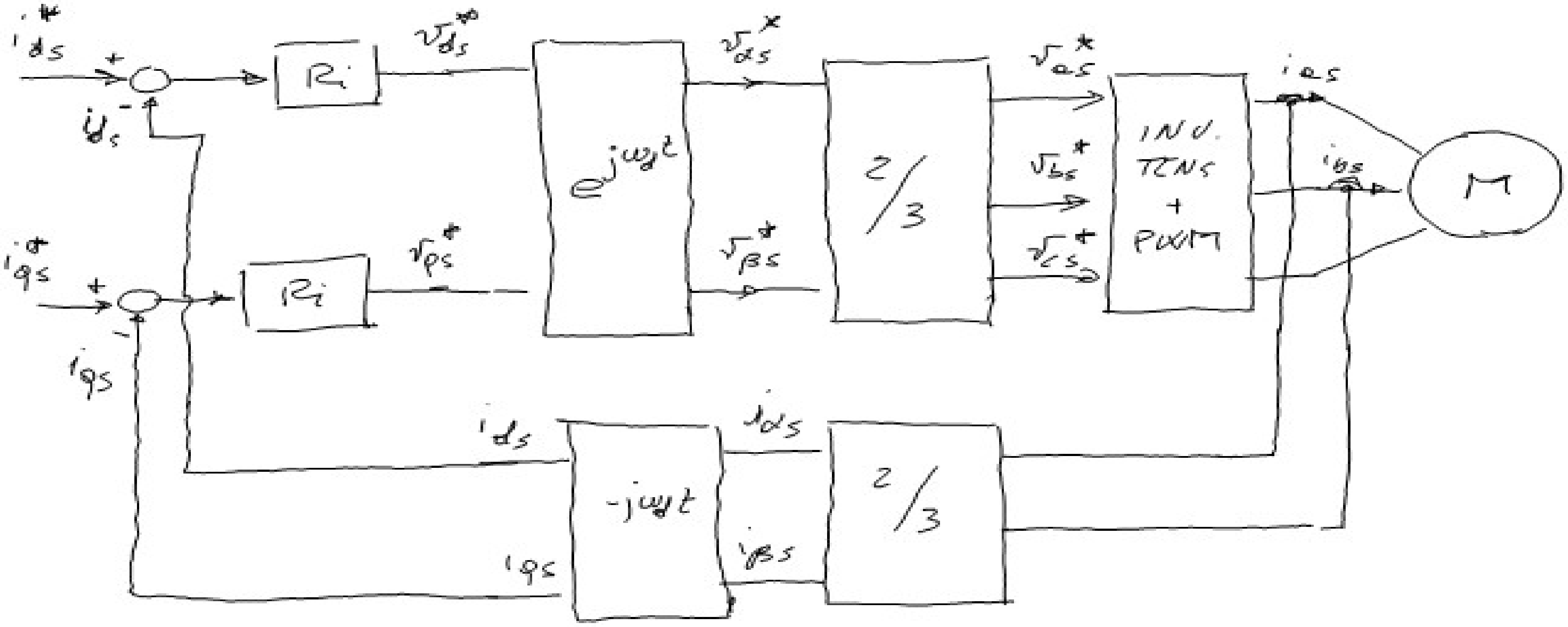


Regolazione di corrente
per azionamenti in alternata (asincroni)



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

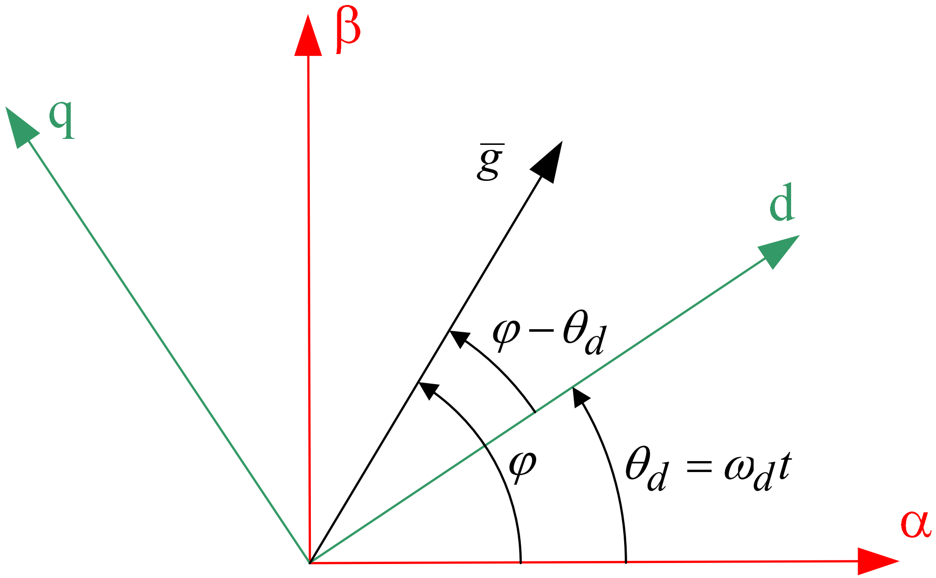
Regolatori di corrente realizzati in un sistema di rif. rotante a pulsazione ω_d



Le due soluzioni più importanti sono quelle relative alle scelte $\omega_d = 0$ (rif. stazionario)

$\omega_d = \omega_s$ (rif. sincrono)

PASSAGGIO TRA SISTEMI DI RIFERIMENTO



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

$\bar{\mathrm{g}}_{\alpha\beta} = \mathrm{G}e^{j\varphi}$ nel riferimento αβ

$\bar{\mathrm{g}}_{\mathrm{dq}} = \mathrm{G}e^{j(\varphi-\theta_d)}$ nel riferimento dq

Ne viene che

$\bar{\mathrm{g}}_{\mathrm{dq}} = \mathrm{G}e^{j(\varphi-\theta_d)} = \left(\mathrm{G}e^{j(\varphi)}\right)e^{j(-\theta_d)}$

da cui

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

oppure

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

Espressioni cartesiane:

$$\begin{cases} \mathrm{g_d} = \quad \mathrm{g}_\alpha \cos\theta_d + \mathrm{g}_\beta \sin\theta_d \\ \mathrm{g_q} = -\mathrm{g}_\alpha \sin\theta_d + \mathrm{g}_\beta \cos\theta_d \end{cases}$$

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

Ragionamento intuitivo:

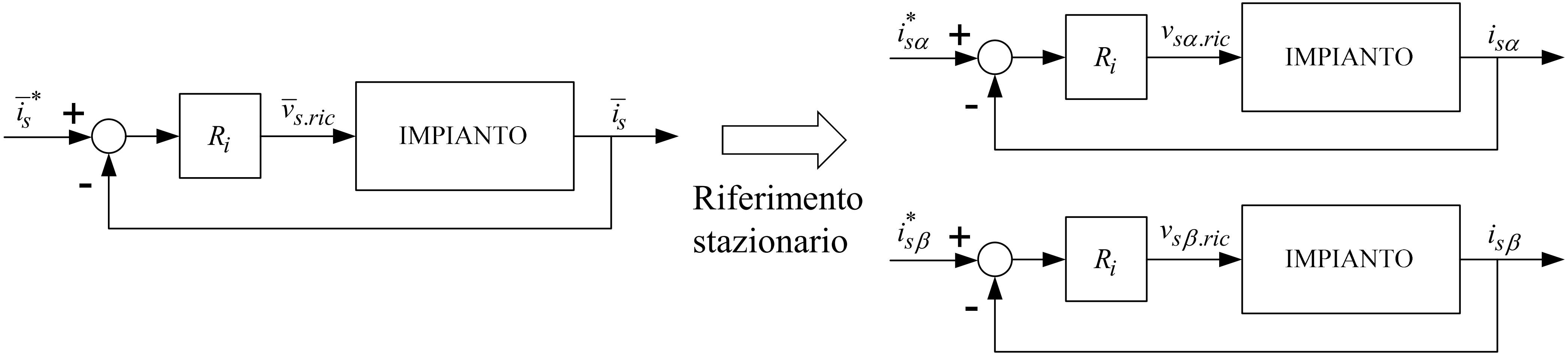
- un osservatore su dq vede «quello che vede αβ» **meno** θ_d

o viceversa:

- un osservatore su αβ 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 (comprensivo 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 trasferenza dell'impianto si può trovare determinando la trasferenza 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".

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

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

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

utilizzando le equazioni di legame:

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

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

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

$$\overline{v}_s = R_s \overline{i}_s + \sigma L_s p \overline{i}_s + \frac{L_M}{L_r} p\overline{\lambda}_r$$

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

INDIVIDUAZIONE DELL'IMPIANTO

Ricavando il flusso di rotore dalla seconda:

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

e sostituendo nella prima si ottiene

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

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

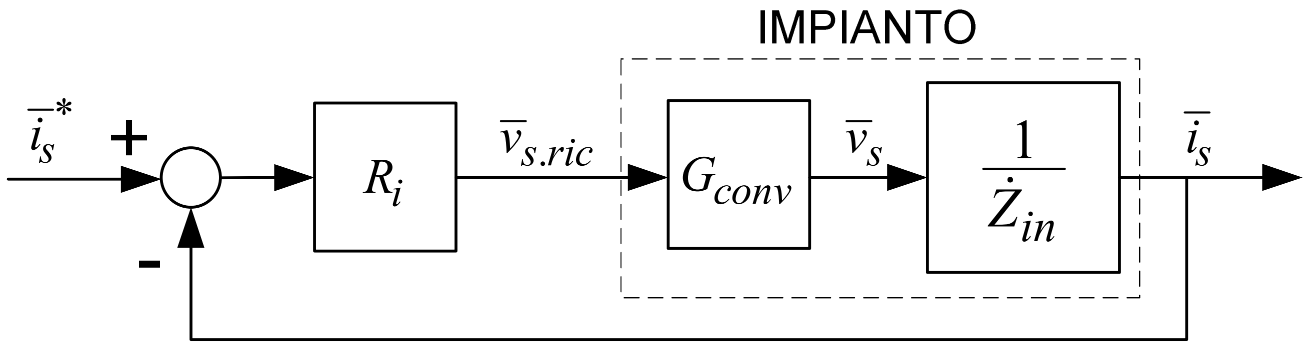
$$\dot{Z}_{in} = \frac{\overline{v}_s}{\overline{i}_s} = \frac{p^2 \sigma L_s + p\left(R_s + \dfrac{L_s}{\tau_r} - j\omega_{me}\sigma L_s \right) + R_s\left(\dfrac{1}{\tau_r} - j\omega_{me} \right)}{p + \dfrac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

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.



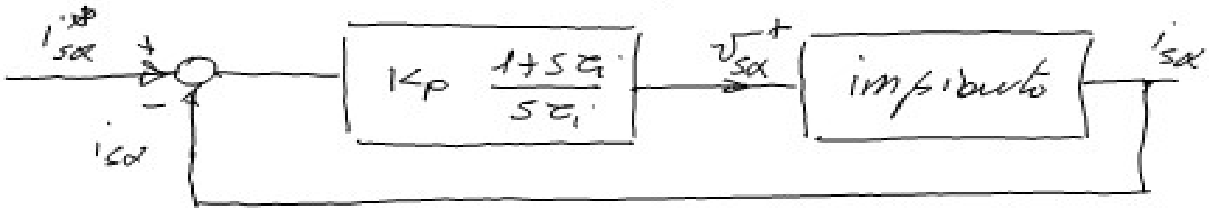
Da questa si può determinare, con opportune e semplici elaborazioni, l'impedenza operazionale:

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

Si osservi che vale:

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

Determinazione dell'impianto



(STAZIONARIO)

impianto = convertitore + motore

↑ guadagno (dinamica veloce)   ↑ dinamica

Rif. qualsiasi

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

$$\bar{\lambda}_s = \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r}\bar{\lambda}_r$$

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

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + (p + j\omega_d)\sigma L_s \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r}(p + j\omega_d)\bar{\lambda}_r \\ 0 = \frac{1}{\tau_r}\bar{\lambda}_r - \frac{L_m}{\tau_r}\bar{i}_s + [p + j(\omega_d - \omega_{me})]\bar{\lambda}_r \end{cases}$$

rif. stazionario $\omega_d = 0$

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \sigma L_s p \bar{i}_s + \frac{L_m}{L_r} p \bar{\lambda}_r \\ 0 = \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}\right)\bar{\lambda}_r + p\bar{\lambda}_r - \frac{L_m}{\tau_r}\bar{i}_s \end{cases} \longrightarrow \bar{\lambda}_r = \frac{\frac{L_m}{\tau_r}\bar{i}_s}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

$$\bar v_s = \left\{ (R_s + \sigma l_s p) + \frac{L_m^2}{L_r \tau_r} \cdot \frac{p}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}} \right\} \bar i_s$$

$$\dot Z_{in} = \frac{\bar v_s}{\bar i_s} = \frac{(R_s + \sigma l_s p)\left(p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}\right) + \frac{L_m^2}{L_r\tau_r}\, p}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

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

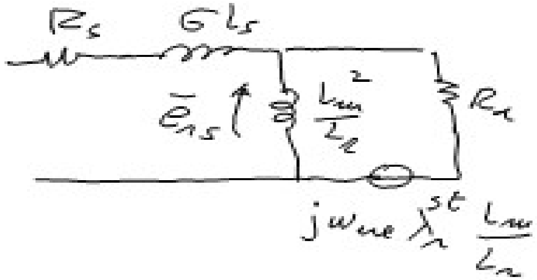
$$\frac{l_s l_r - l_m^2}{l_s l_r}\, l_s + \frac{L_m^2}{L_r}$$

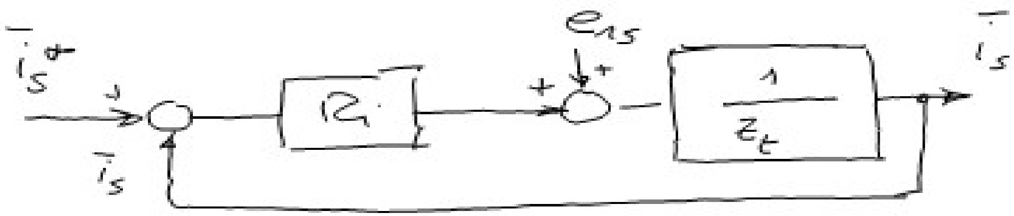
$$= \frac{p^2 \sigma l_s + p\left(R_s + \overbrace{\frac{\sigma l_s}{\tau_r} + \frac{L_m^2}{L_r \tau_r}}^{\frac{l_s}{\tau_r}} - j\omega_{me}\sigma l_s\right) + R_s\left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}\right)}{p + \frac{1}{\tau_r} - j\omega_{me}}$$

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

$$\bar H_i = \frac{\bar i_s}{\bar i_s^*} = \frac{R_i \cdot \frac{1}{\dot Z_{in}}}{1 + \frac{R_i}{\dot Z_{in}}} = \frac{1}{1 + \frac{\dot Z_{in}}{R_i}}$$

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





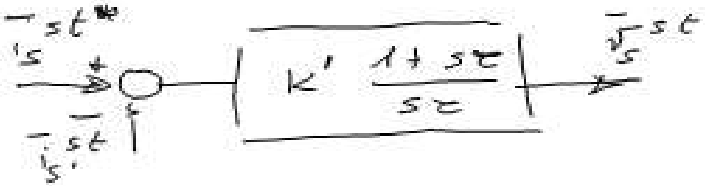
$$Z_t = R_s + \sigma L_s p$$

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

$$\tau_{\sigma s} = \sigma \tau_s$$

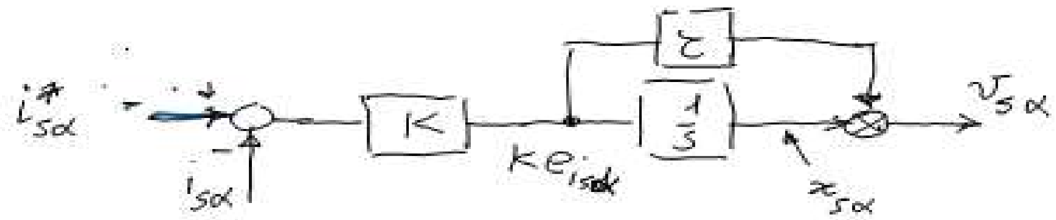
$$p_{\sigma s} = \frac{1}{\tau_{\sigma s}}$$

Regolatore stazionario (quel regolatore <u>realizzato</u> in un sist. rif. stazionario



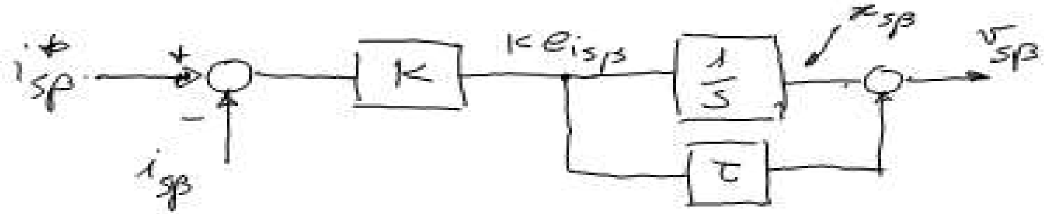
$$\bar v_s^{st} = K' \frac{1+s\tau}{s\tau}\underbrace{\left(\bar i_s^{st*} - \bar i_s^{st}\right)}_{e} \qquad K = \frac{K'}{\tau} \qquad K' = K\tau$$

$$\bar v_s^{st} = \left(K\tau + \frac{K}{s}\right)\left(\bar i_s^{st*} - \bar i_s^{st}\right) = K\tau\left(\bar i_s^{st*} - \bar i_s^{st}\right) + \underbrace{\frac{K}{s}\left(\bar i_s^{st*} - \bar i_s^{st}\right)}_{\bar x_s^{st}}$$



$$\bar x_s^{st} = \frac{K}{s}\,\bar e_{is}$$

$$s\,\bar x_s^{st} = K\,\bar e_{is}$$



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

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

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

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

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

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

funzioni di tempo

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

← Trasf di Laplace

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

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

← regolat. stazionario riferimento sincrono

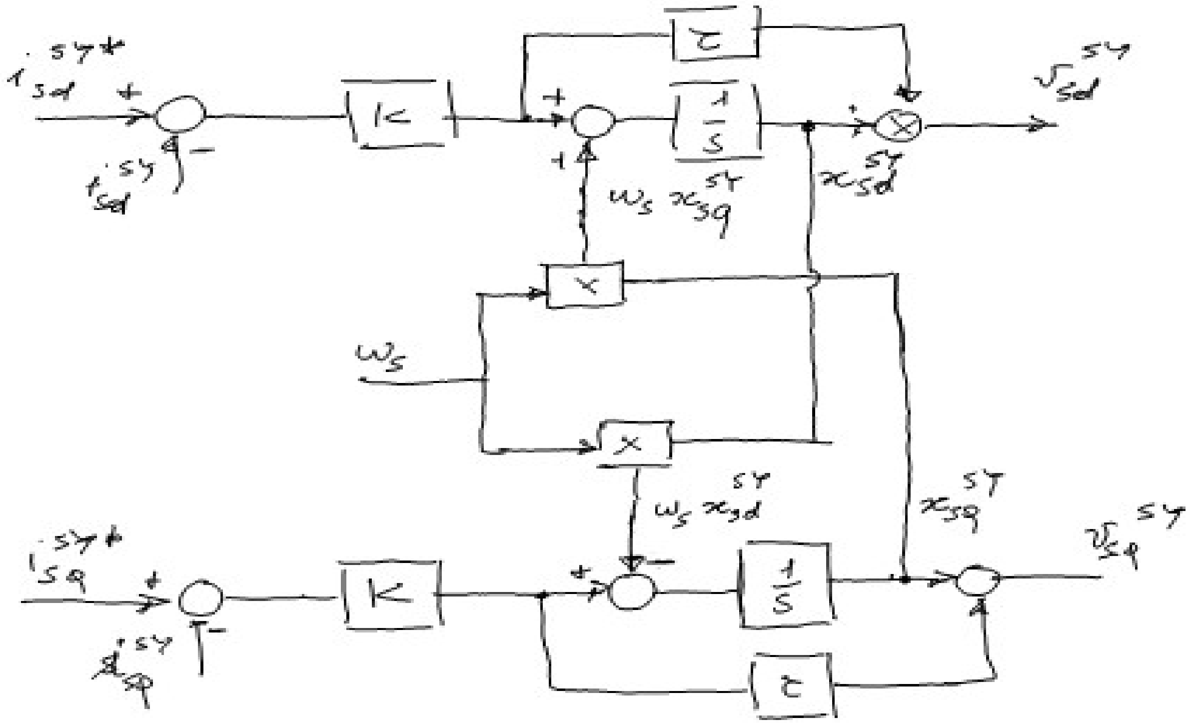
$$\begin{cases} v_{sd}^{sy} = K\left(\tau + \frac{1}{s}\right)\left(i_{sd}^{sy*} - i_{sd}^{sy}\right) + \frac{1}{s}\,\omega_s\, x_{sq}^{sy} \\ v_{sq}^{sy} = K\left(\tau + \frac{1}{s}\right)\left(i_{sq}^{sy*} - i_{sq}^{sy}\right) - \frac{1}{s}\,\omega_s\, x_{sd}^{sy} \end{cases}$$

si riscrivono nel seguente modo

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

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

Schema a 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 dalla ω_s) anche se nel suo ingresso è nullo.

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

  la risposta di corrente non segue fedelmente il comando

- esiste la possibilità di innesco 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:

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

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

una soluzione di questa equazione è

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

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

$\Rightarrow \bar{x}_s^{sy} = x_{sd}^{sy} + j\,\bar{x}_{sq}^{sy} = -A\,e^{-j(\omega_s t+\varphi)}$

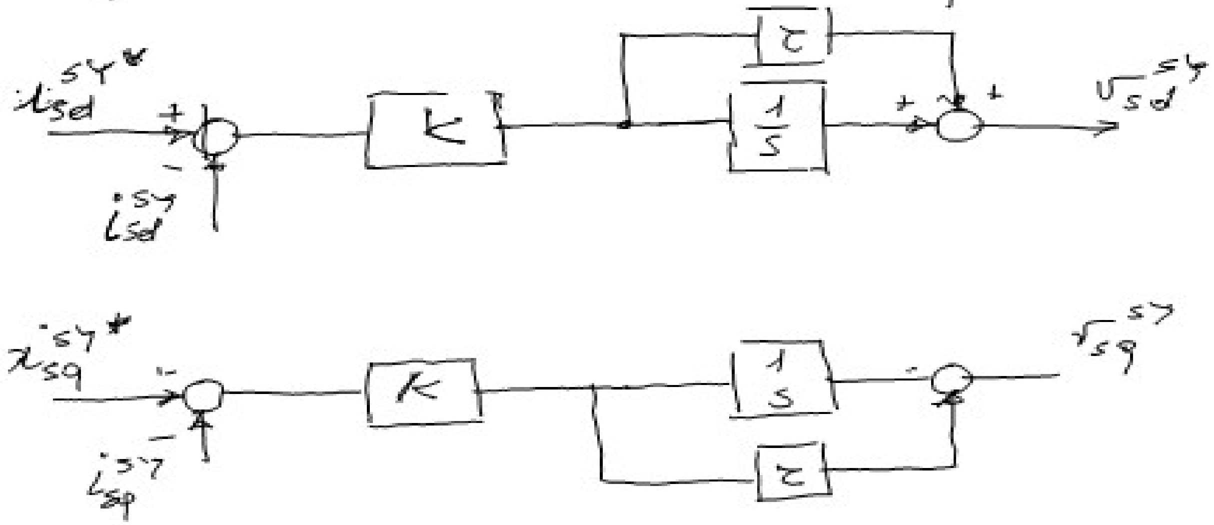
sist. sincrono

ritornando in un sist. di rif. stazionario si ha

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

In un rif. stazionario l'oscillazione persistente è in realtà una <u>costante</u> la quale è compensata dal regolatore PI stesso

Regolatore sincrono in rif sincrono



Equaz. vettoriale corrispondente è $\bar{v}_s^{sy} = K\left(\tau + \frac{1}{s}\right)\left(\bar{i}_s^{sy*} - \bar{i}_s^{sy}\right)$

Regolatore sincrono in rif. stazionario

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

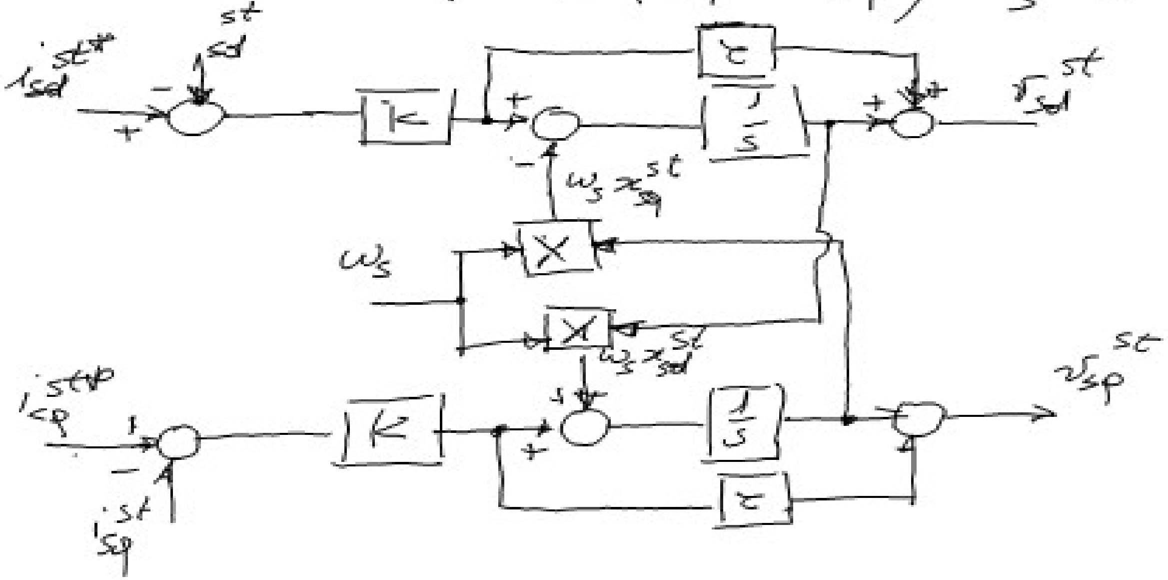
si ottengono:

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

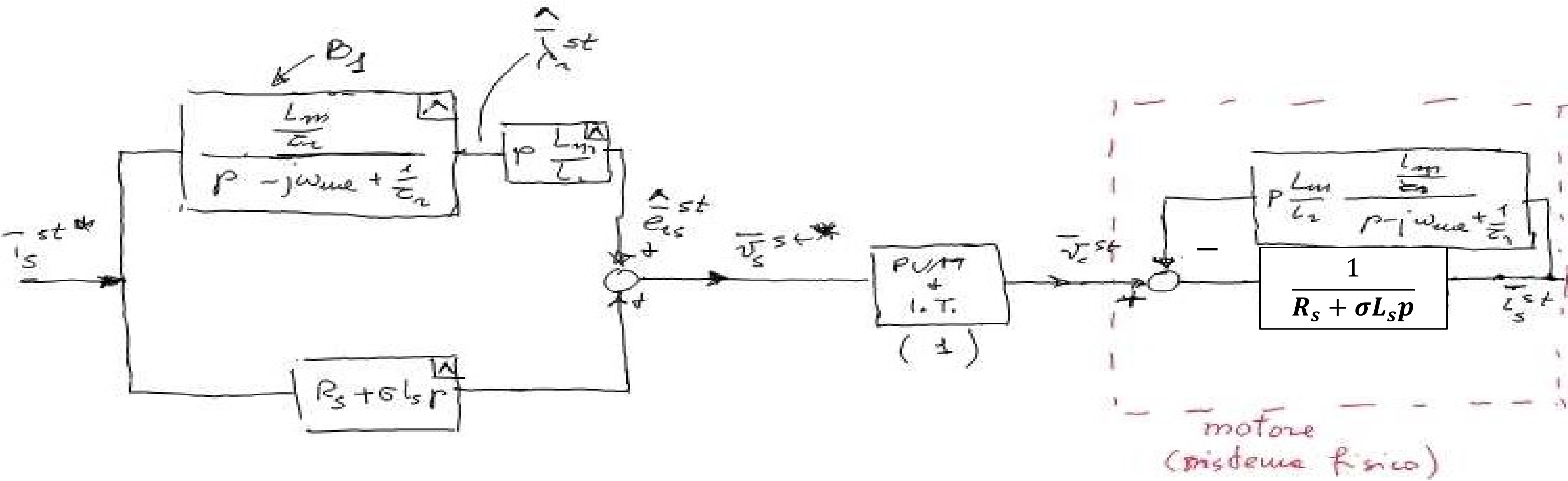
$$v_{sq}^{st} = K\left(\tau + \frac{1}{s}\right)\left(i_{sq}^{st*} - i_{sq}^{st}\right) + \frac{1}{s}\,\omega_s\, x_{sd}^{st}$$

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

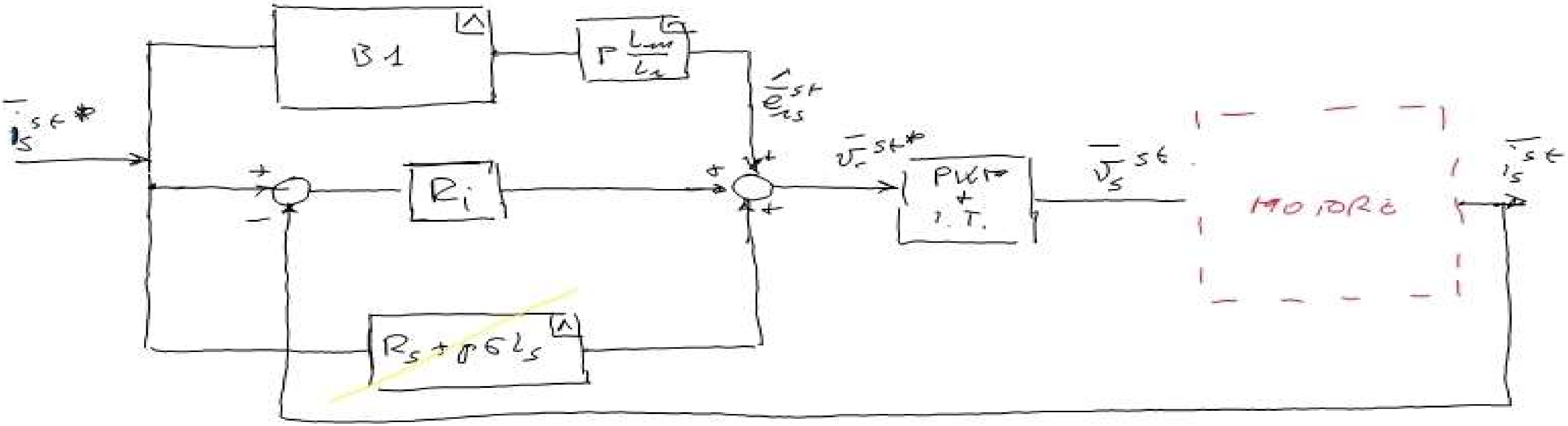
$$x_{sq}^{st} = \frac{K}{s}\left(i_{sq}^{st*} - i_{sq}^{st}\right) + \frac{1}{s}\,\omega_s\, x_{sd}^{st}$$



Controllore di corrente a catena aperta



$\hat{\rho}$



Ri può essere un regolatore stazionario o sincrono ma entrambi realizzati in sist. di rif. stazionario

Controllo di corrente di tipo predittivo

riferim. stazionario.
Equazione di statore del motore asincrono in cui si trascura R_s co
circ. equiv. a T rovescia

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

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

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

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

allora si può calcolare

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