

Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

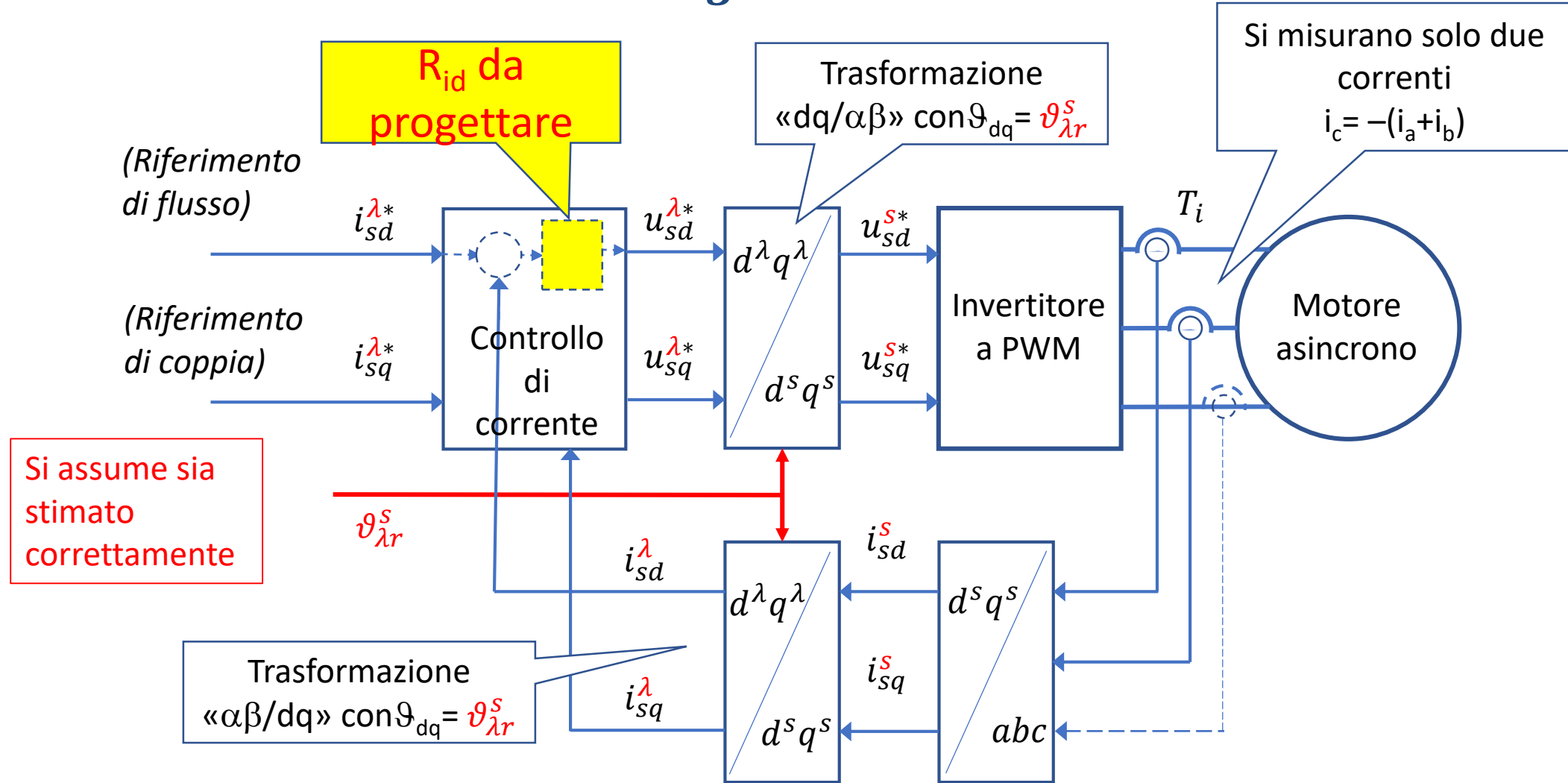
prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

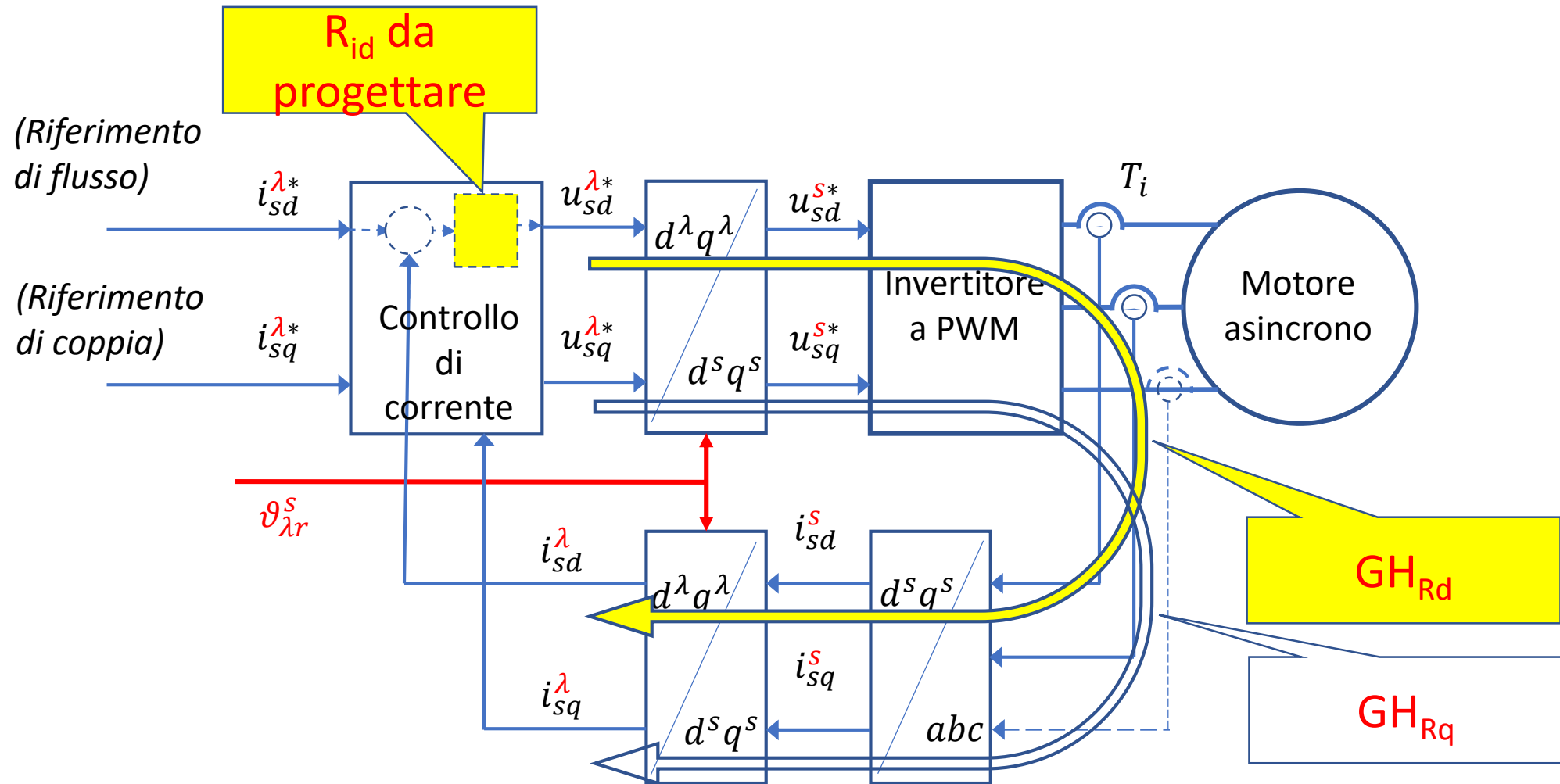
Macchina asincrona (Macchina a induzione)

Controllo di corrente dq
in azionamento FOC

Schema azionamento FOC con regolatori di corrente PID



Schema azionamento FOC con regolatori di corrente PID



Equazioni elettriche di statore in $d^{\lambda}q^{\lambda}$

$$\begin{cases} u_{sd}^{\lambda} = R_s i_{sd}^{\lambda} + \frac{d\lambda_{sd}^{\lambda}}{dt} - \omega_{\lambda}^s \lambda_{sq}^{\lambda} \\ u_{sq}^{\lambda} = R_s i_{sq}^{\lambda} + \frac{d\lambda_{sq}^{\lambda}}{dt} + \omega_{\lambda}^s \lambda_{sd}^{\lambda} \end{cases}$$

Si ottengono

$$\begin{cases} \lambda_s = L_s i_s + L_M i_r \\ \lambda_r = L_M i_s + L_r i_r \end{cases} \rightarrow i_r = \frac{\lambda_r}{L_r} - \frac{L_M}{L_r} i_s$$

$$\lambda_s = \frac{L_M}{L_r} \lambda_r + (L_s - \frac{L_M^2}{L_r}) i_s = \frac{L_M}{L_r} \lambda_r + L_t i_s$$

Equazioni elettriche di statore in $d^{\lambda}q^{\lambda}$ (in funzione di i_s e λ_r)

$$u_{sd}^{\lambda} = R_s i_{sd}^{\lambda} + \frac{L_M}{L_r} \frac{d\lambda_{rd}^{\lambda}}{dt} + L_t \frac{di_{sd}^{\lambda}}{dt} - \omega_{\lambda}^s \left(\frac{L_M}{L_r} \lambda_{rq}^{\lambda} + L_t i_{sq}^{\lambda} \right)$$

$$u_{sq}^{\lambda} = R_s i_{sq}^{\lambda} + \frac{L_M}{L_r} \frac{d\lambda_{rq}^{\lambda}}{dt} + L_t \frac{di_{sq}^{\lambda}}{dt} + \omega_{\lambda}^s \left(\frac{L_M}{L_r} \lambda_{rd}^{\lambda} + L_t i_{sd}^{\lambda} \right)$$

Annotations: $\lambda_{rd}^{\lambda} = \lambda_r$ and $\lambda_{rq}^{\lambda} = 0$ are indicated by callouts. Red lines indicate cancellations in the original image.

$$u_{sd}^{\lambda} = R_s i_{sd}^{\lambda} + \frac{L_M}{L_r} \frac{d\lambda_r}{dt} + L_t \frac{di_{sd}^{\lambda}}{dt} - \omega_{\lambda}^s L_t i_{sq}^{\lambda}$$

fem «trasformatrice»

$$u_{sq}^{\lambda} = R_s i_{sq}^{\lambda} + L_t \frac{di_{sq}^{\lambda}}{dt} + \omega_{\lambda}^s \left(\frac{L_M}{L_r} \lambda_r + L_t i_{sd}^{\lambda} \right)$$

fem «mozionale»

Equazioni elettriche di statore in $d^{\lambda}q^{\lambda}$ (*riordinate e trasformate in s*)

$$u_{sd}^{\lambda} + \omega_{\lambda}^s L_t i_{sq}^{\lambda} = u'_{sd} = R_s i_{sd}^{\lambda} + L_t \frac{di_{sd}^{\lambda}}{dt} + \frac{L_M}{L_r} \frac{d\lambda_r}{dt}$$

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

$$u_{sq}^{\lambda} - \omega_{\lambda}^s \left(\frac{L_M}{L_r} \lambda_r + L_t i_{sd}^{\lambda} \right) = u'_{sq} = R_s i_{sq}^{\lambda} + L_t \frac{di_{sq}^{\lambda}}{dt}$$

$$U'_{sd} = R_s I_{sd}^{\lambda} + L_t s I_{sd}^{\lambda} + \frac{L_M}{L_r} s \Lambda_r$$

$$s \Lambda_r + \frac{R_r}{L_r} \Lambda_r = \frac{R_r}{L_r} L_M I_{sd}^{\lambda}$$

$$U'_{sq} = R_s I_{sq}^{\lambda} + L_t s I_{sq}^{\lambda}$$

Equazioni in s che consentono di definire le fdt fra tensioni e correnti statoriche

Funzioni di trasferimento tensione-corrente

Asse q

$$\frac{I_{sq}^\lambda}{U'_{sq}} = \boxed{Y_q} = \frac{1}{R_s + sL_t} = \frac{1}{R_s} \left(\frac{1}{1 + sL_t / R_s} \right) = \boxed{\frac{1}{R_s} \left(\frac{1}{1 + s\sigma\tau_s} \right)}$$

avendo posto $\sigma = L_t / L_s$ e $\tau_s = L_s / R_s$.

Guadagno: $Y_q(0) = 1/R_s$

Polo: $p_q = -1/(\sigma\tau_s)$

Funzioni di trasferimento tensione-corrente

Asse d

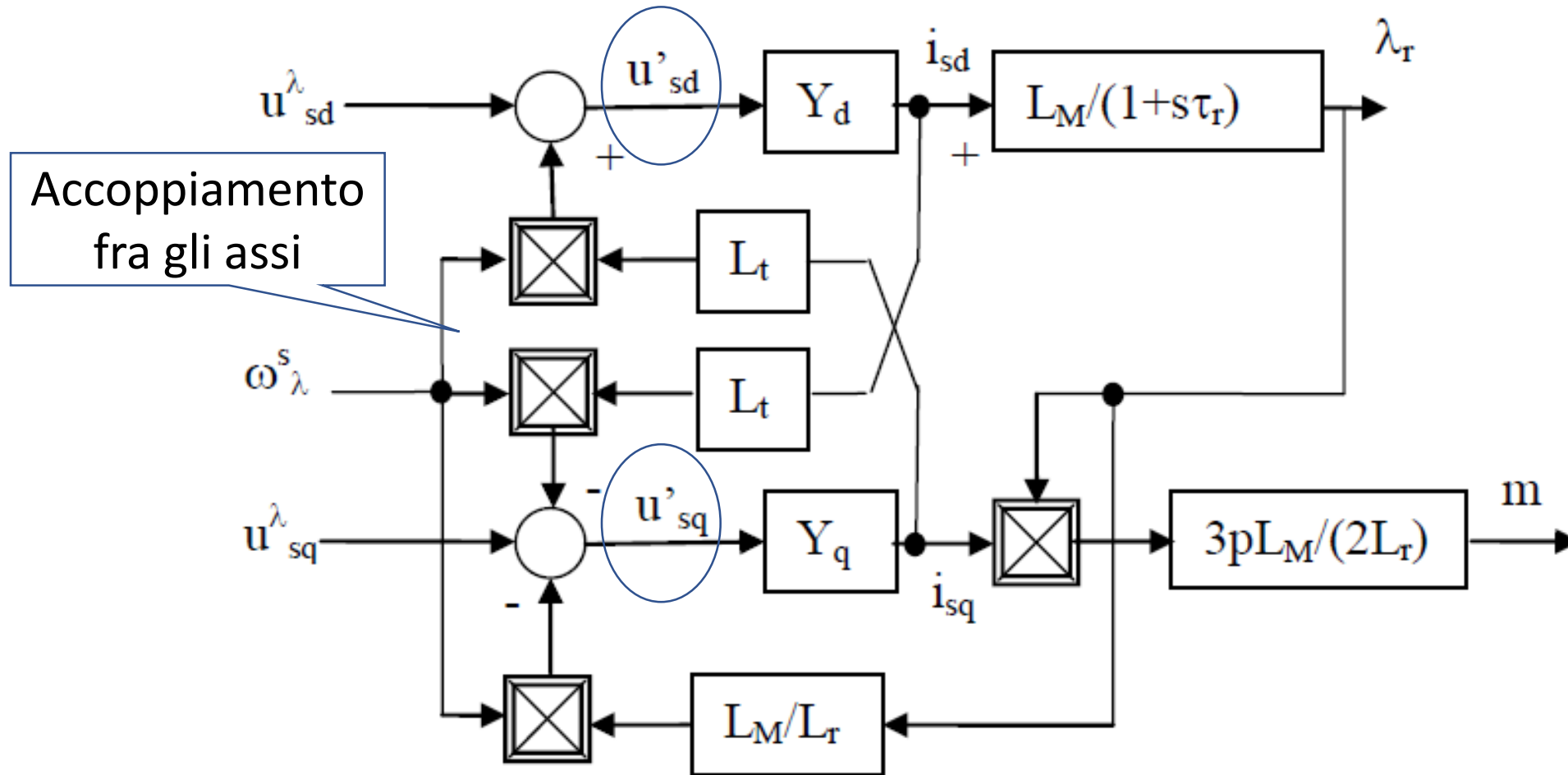
$$\frac{I_{sd}^{\lambda}}{U'_{sd}} = Y_d = \frac{1}{R_s + sL_t + \frac{L_M}{L_r} s \frac{R_r}{L_r} \frac{L_M}{(s + 1/\tau_r)}} = \frac{1}{R_s} \left(\frac{1 + s\tau_r}{1 + s(\tau_s + \tau_r) + s^2 \sigma \tau_s \tau_r} \right)$$

Guadagno: $Y_d(0) = 1/R_s$

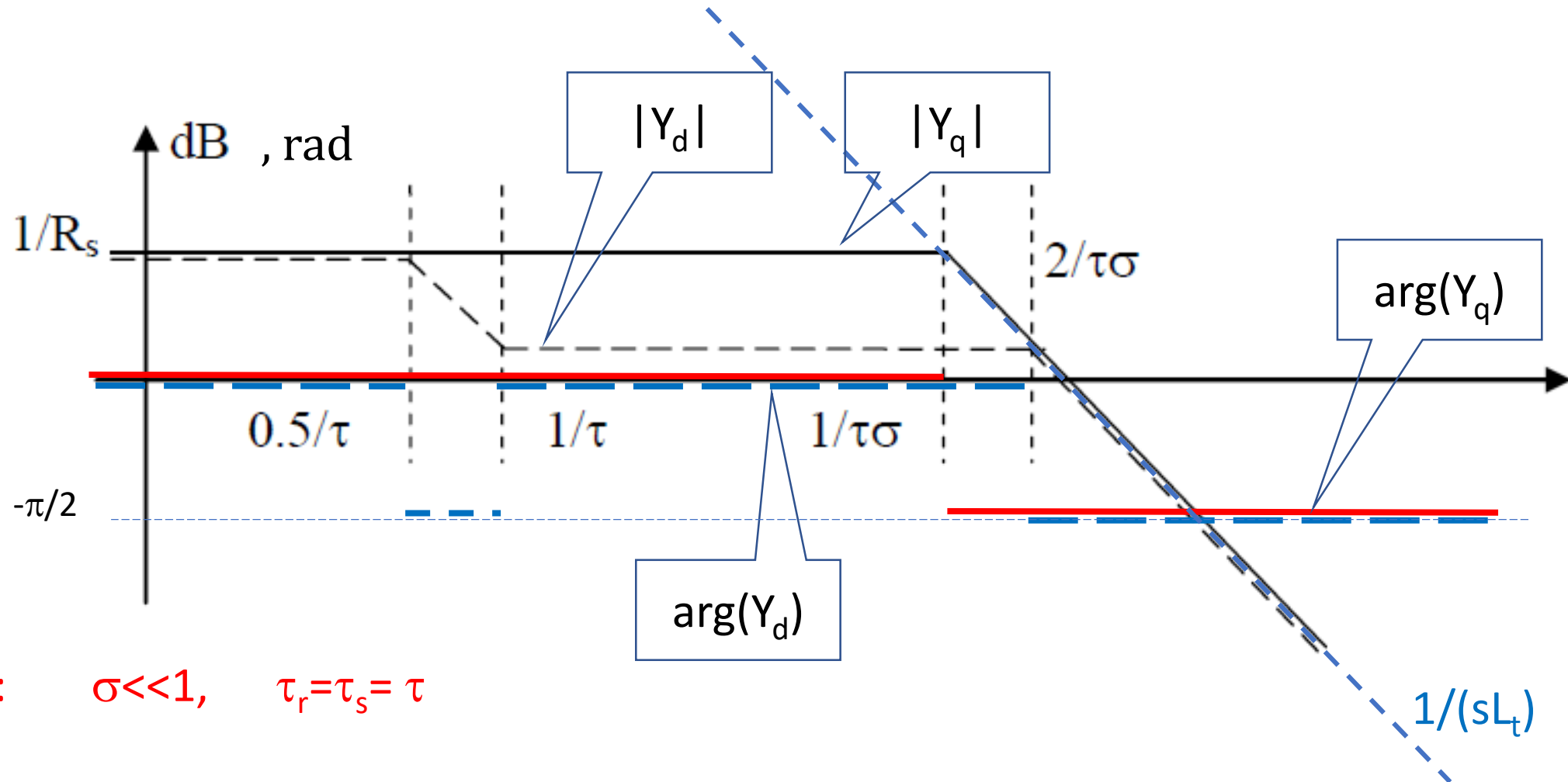
Zero: $z_d = -1/(\tau_r)$

Polo: $p_{d1,d2} =$ due, reali e distinti

Schema a blocchi del motore asincrono in $d^{\lambda}q^{\lambda}$ (*a tensione impressa*)



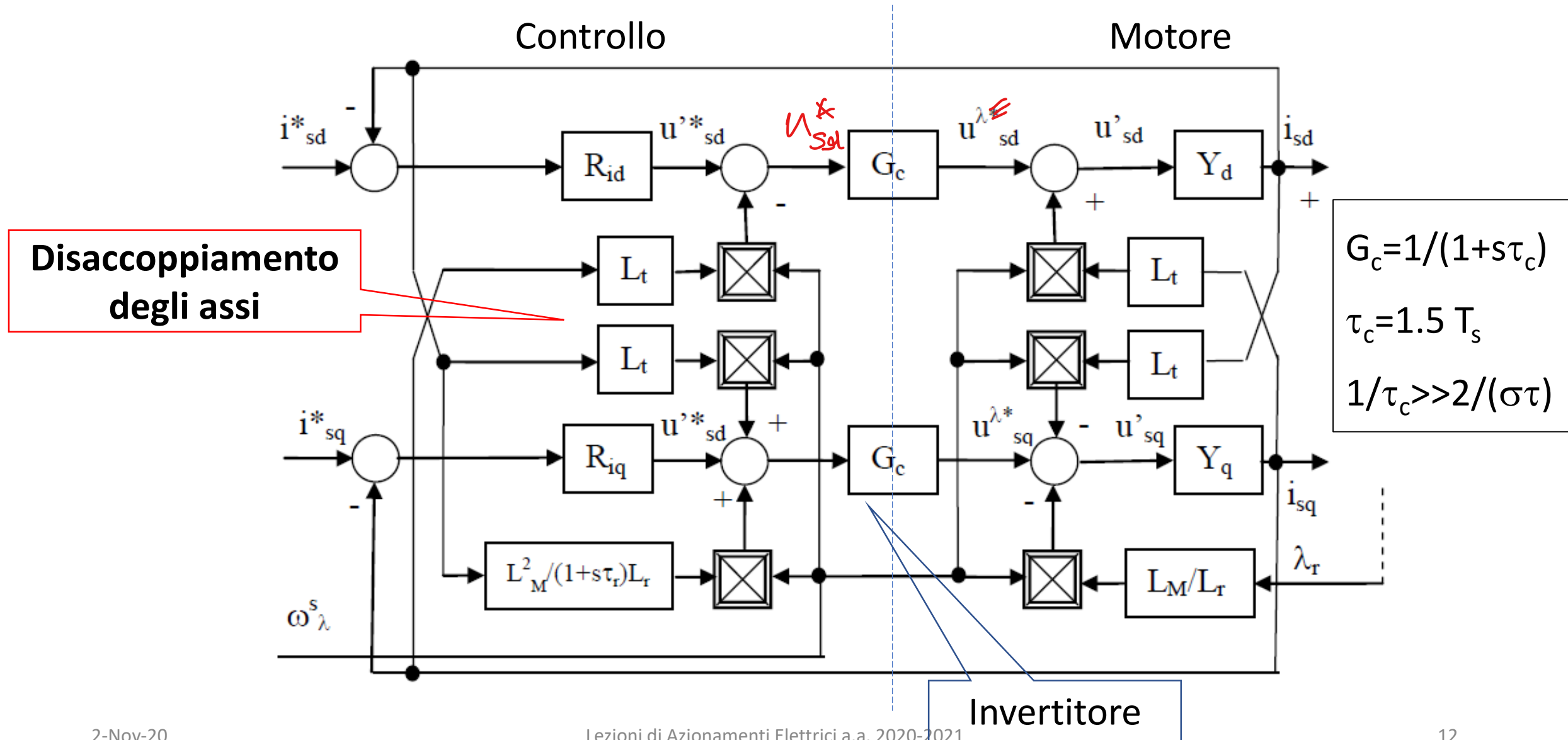
Funzioni di trasferimento tensione-corrente (*risposte in frequenza*)



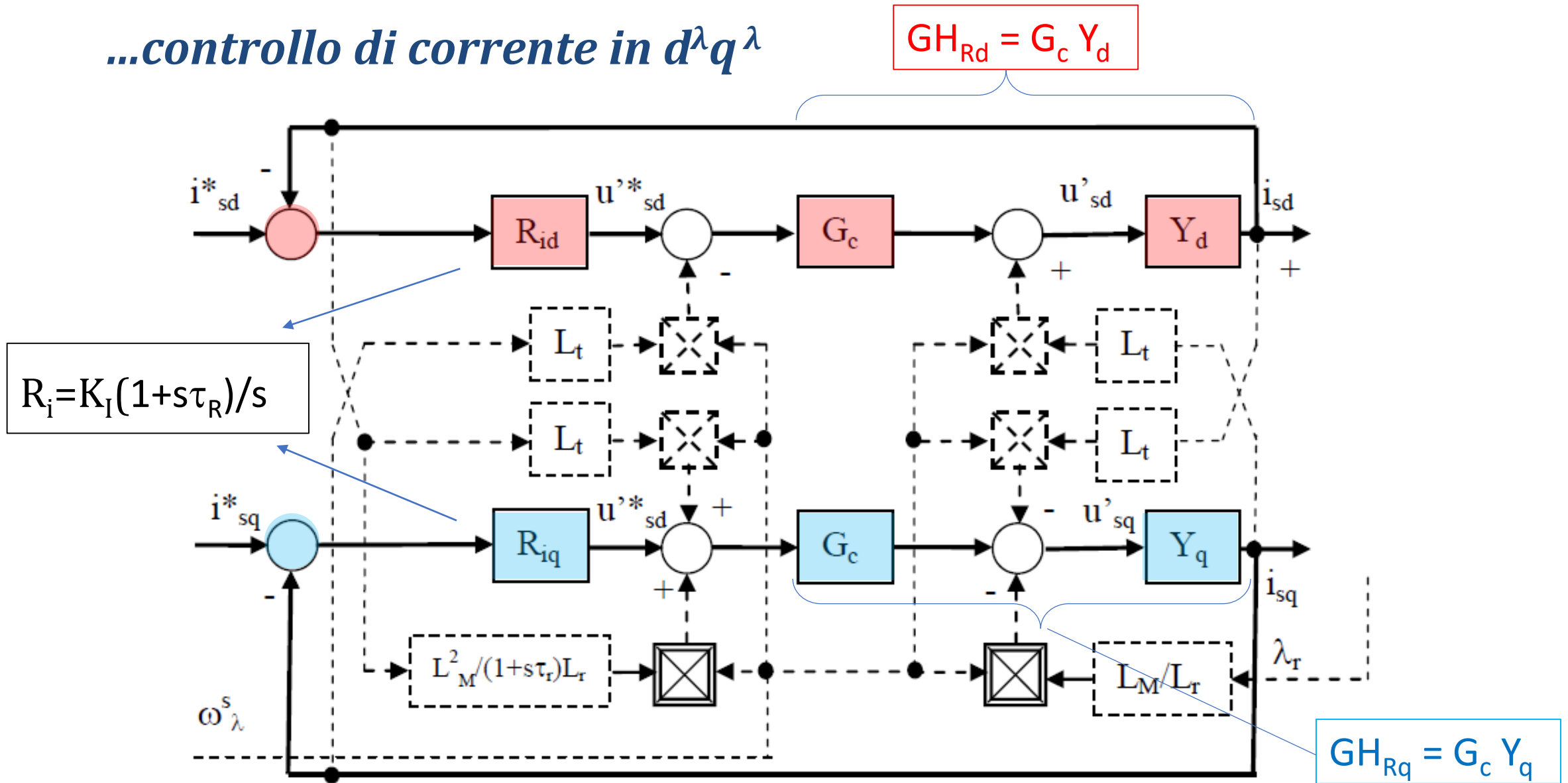
Ip.: $\sigma \ll 1$, $\tau_r = \tau_s = \tau$

$$p_q = -1/(\sigma\tau), \quad z_d = -1/(\tau), \quad p_{d1} \cong -0.5/(\tau), \quad p_{d2} = -2/(\sigma\tau)$$

Schema a blocchi del controllo di corrente in $d^{\lambda}q^{\lambda}$



...controllo di corrente in $d^{\lambda}q^{\lambda}$



Indicazioni per il progetto dei regolatori

Banda passante: $2/(\sigma\tau) < v_A < 1/\tau_c$ *(ove $Y_d \cong Y_q \cong 1/sL_t$)*

Margine di fase: $45^\circ \dots 90^\circ$

Approssimativamente

$$m_\varphi = [\arg(GH_R)] + [\arg(R_i)] + \pi \cong [-\pi/2] + [\operatorname{atan}(v_A\tau_R) - \pi/2] + \pi = \operatorname{atan}(v_A\tau_R) \Rightarrow \tau_R$$

$$1 = |GH_R| * |R_i| \cong (1/v_A L_t) * (K_i * \tau_R) \Rightarrow K_i * \tau_R = K_P \cong v_A L_t$$