Lez. del 13.5.2021

① Usare l'altro inverter per comandare motore con encoder

- ABILITARE ENABLE CON GPIO 52

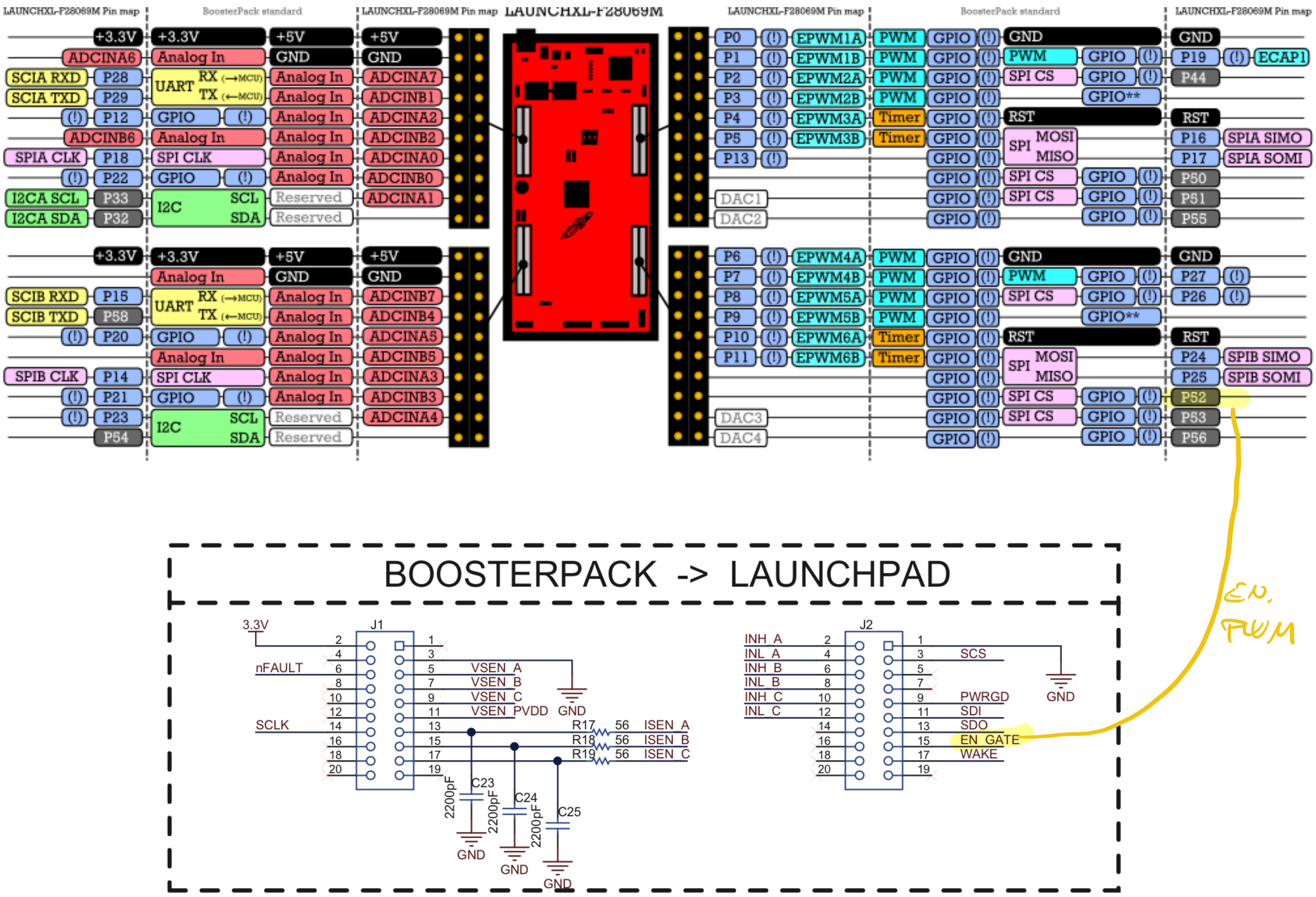



**Figure 2. BoosterPack Header Signals**

- USARE PWM GIUSTI
- USARE ADC GIUSTI CON TRIGGER SU PWM CORRETTO
- REGOLARE OFFSET CORRENTE
- CONTROLLARE SU SCOPE SENSO CICLICO DELLE CORRENTI

② LEGGERE ENCODER E VISUALIZZARE POSIZIONE ($\vartheta_m^e$)

QEP1 su GPIO 20 GPIO 21

Position counter 2048 - 1

③ TRASFORMARE LE CORRENTI $i_a, i_b, i_c$ NEL SISTEMA DI RIFERIMENTO ROTORICO

$$i_\alpha = \frac{2}{3}\left[i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}\right]$$

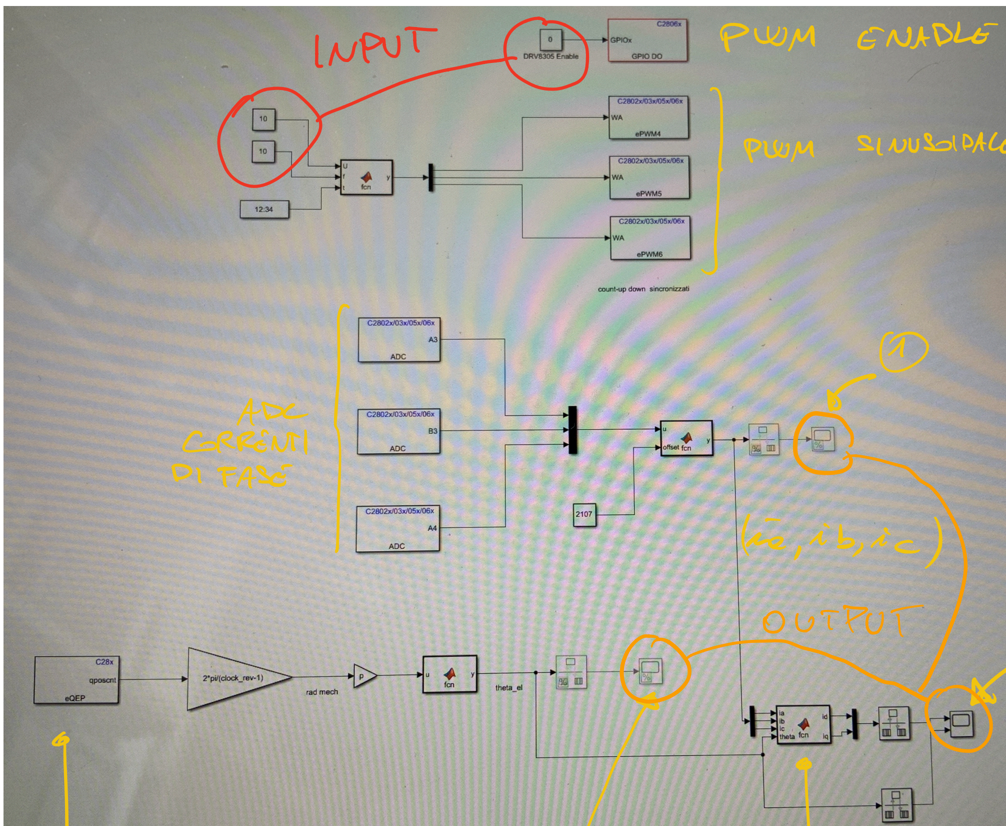
$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[i_b - i_c\right]$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$i_d = i_\alpha \cos\vartheta_m^e + i_\beta \sin\vartheta_m^e$$

$$i_q = -i_\alpha \sin\vartheta_m^e + i_\beta \cos\vartheta_m^e$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_m^e & \sin\vartheta_m^e \\ -\sin\vartheta_m^e & \cos\vartheta_m^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$




PWM ENABLE

PWM SINUSOIDALE

CONTROLLO DELLE 3 CORRENTI DI FASE

③ GRAFICO $i_d, i_q$

Note: USARE 1 SCOPE ALLA VOLTA IN EXTERNAL MODE

LETTURA ENCODER


②

abc → dq

Note: CAMPIONARE A 100Hz, tutto il resto a 5 kHz

④ MODIFICARE MODELLO 3 CON HOST/TARGET

TARGET:

INPUT $\begin{cases} \text{PWM ENABLE} \\ U \\ f \end{cases}$

OUTPUT $\begin{cases} i_a, i_b, i_c \\ i_d, i_q \\ \vartheta_m^e \end{cases}$

HOST:

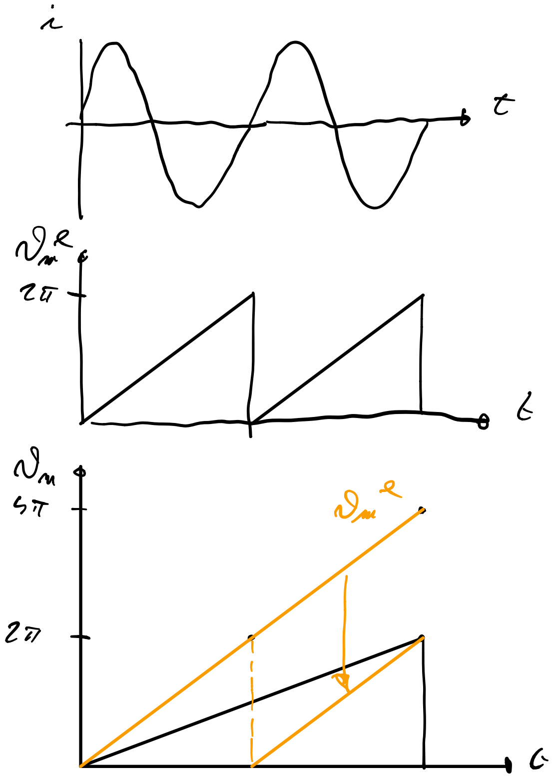
RICEVO E VISUALIZZO GLI OUTPUT DEL TARGET

SPEDISCO I SUOI INPUT

$\vartheta_m \qquad \vartheta_m^e = p\,\vartheta_m$

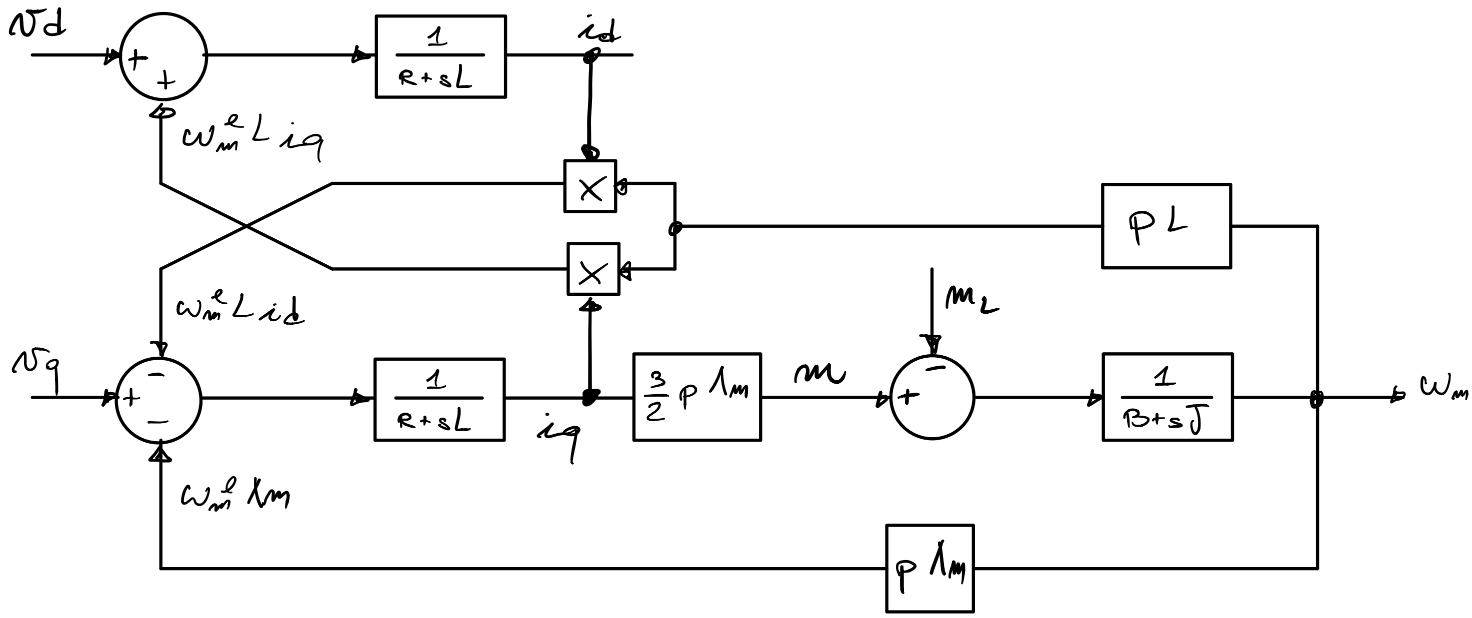
$\omega_m^e = 2\pi \cdot f_0$

$\omega_m = \dfrac{2\pi f_0}{p}$



# Dimensionamento anelli di corrente e velocità motore SPM

Schema a blocchi motore sincrono isotropo




Corrisponde alle seguenti equazioni dinamiche nel sistema di riferimento dq:

$$\begin{cases} v_d = R i_d + L \dfrac{di_d}{dt} - \omega_m^e L i_q \\ v_q = R i_q + L \dfrac{di_q}{dt} + \omega_m^e L i_d + \omega_m^e \lambda_m \end{cases} \qquad \begin{aligned} L i_q &= \lambda_q \\ L i_d + \lambda_m &= \lambda_d \end{aligned}$$

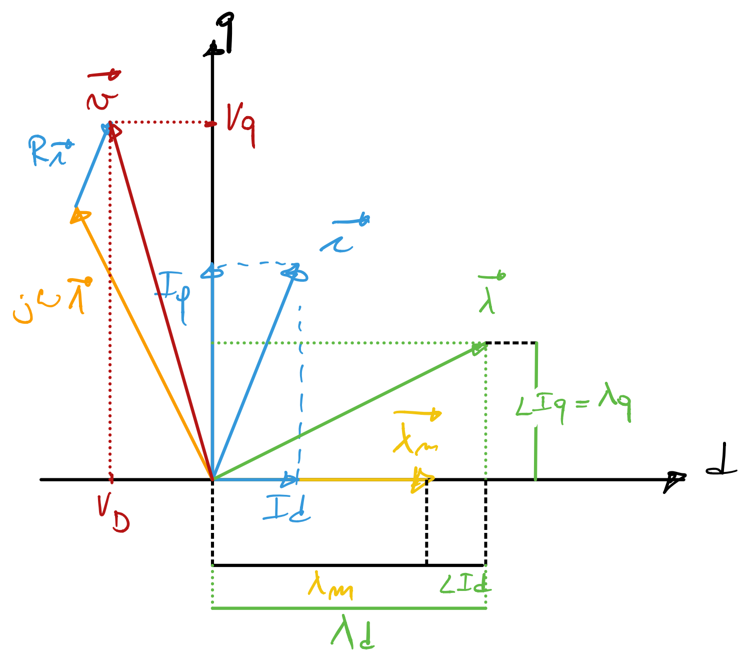
$$m = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q = m_L + B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

## Funzionamento a regime

$$\begin{cases} V_d = R I_d - \omega_m^e \lambda_q \\ V_q = R I_q + \omega_m^e \lambda_d \end{cases}$$

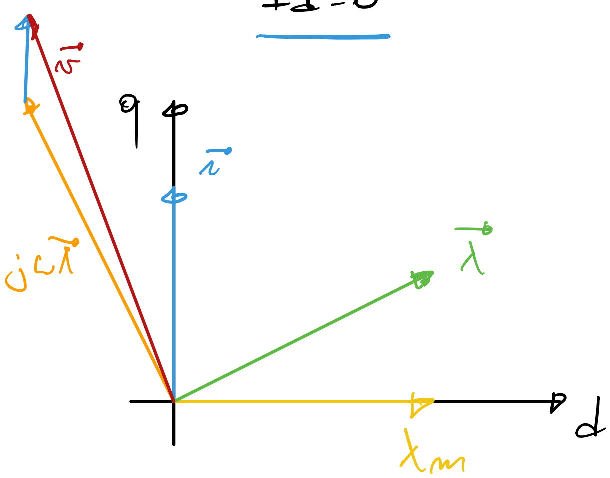
$$\begin{cases} \lambda_q = L I_q \\ \lambda_d = \lambda_m + L I_d \end{cases}$$

$$m = \frac{3}{2} p \lambda_m I_q$$



## Funzionamento in MTPA

$I_d = 0$




## Dati del motore:

$2p = 4$ poli

$\lambda_m = 0{,}027$ Vs

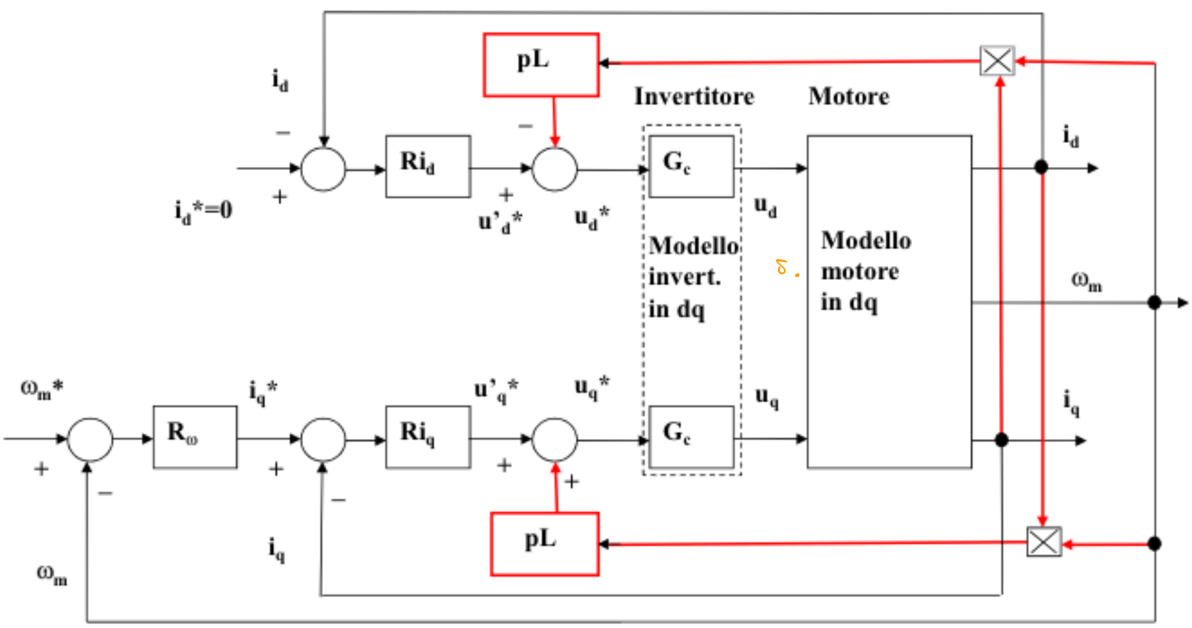
$R = 0{,}6\ \Omega$

$L = 2$ mH

## Disaccoppiamento assi e Feed-Forward delle BEMF

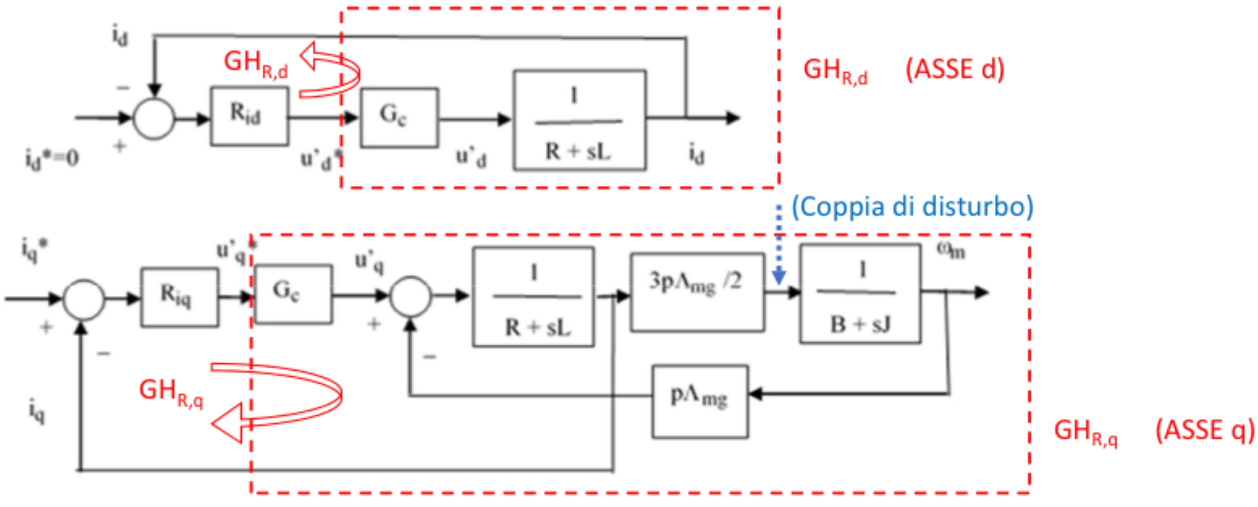
Se implemento entrambe queste "correzioni" il dimensionamento degli anelli di corrente sui due assi si semplifica:

### *Schema a blocchi del controllo di un azionamento brushless isotropo (SPM)*

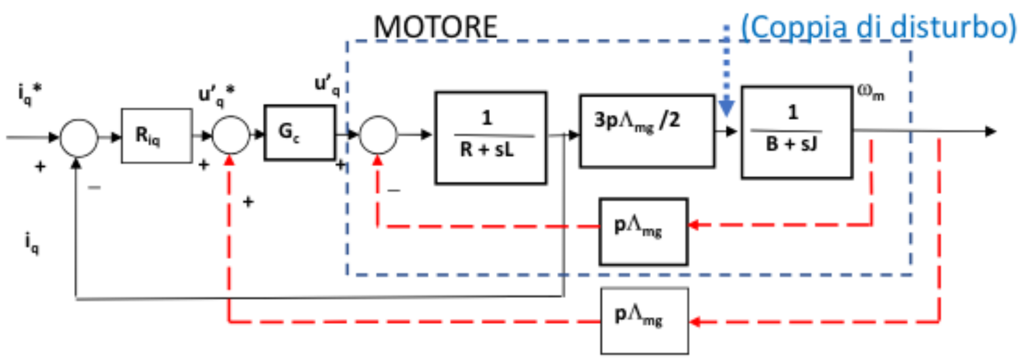



In rosso le azioni di disaccoppiamento degli assi
per trasformare il sistema 2_IN/2_OUT in due sistemi 1_IN/1_OUT

## *Anelli di controllo delle correnti dq dopo disaccoppiamento degli assi*

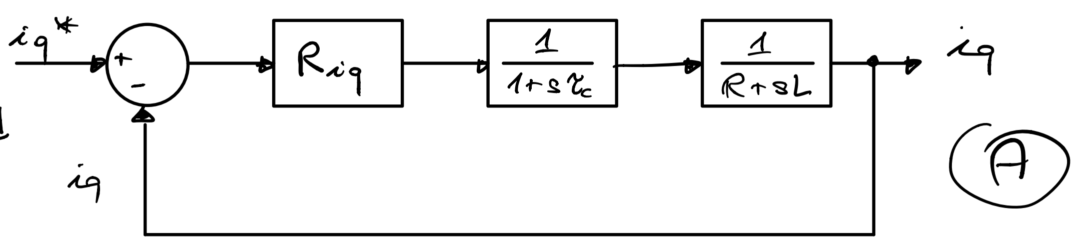



## *Schema a blocchi del controllo della corrente in quadratura dopo disaccoppiamento e compensazione della fem*




In rosso l'azione di compensazione della fem
Le fdt dell'anello di asse q non risente del parametri meccanici e dell'effetto della coppia di disturbo.
Con motore SPM diventa identica a quella dell'asse d.

Lo stesso vale anche per asse d



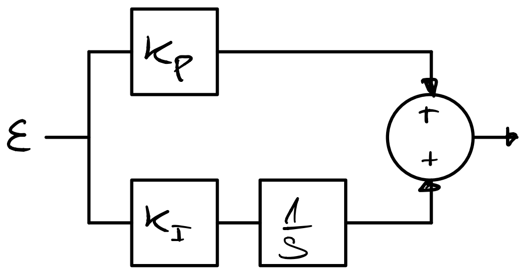
$R_{iq}$ : Regolatore da dimensionare

$$\tau_c = \frac{3}{2} T_c = 1{,}5 \cdot \frac{1}{\underbrace{10 \cdot 10^3}_{10\ kHz}} = 15 \cdot 10^{-5} = 150\ \mu S$$

Ritardo del Convertitore

$$\frac{1}{R+sL}=\frac{1/R}{1+s\frac{L}{R}}=\frac{1/R}{1+\tau_e s} \qquad \tau_e=\frac{L}{R}=\frac{2}{0,6}10^{-3}=3,3\,mS$$

Scelgo un regolatore PI (no errore a regime)




$$\varepsilon\left[k_P+\frac{k_I}{S}\right]$$

$$fdt: k_P+\frac{k_I}{S}=k_P\left[1+\frac{k_I/k_P}{s}\right]=k_P\left[\frac{S+k_I/k_P}{S}\right]$$

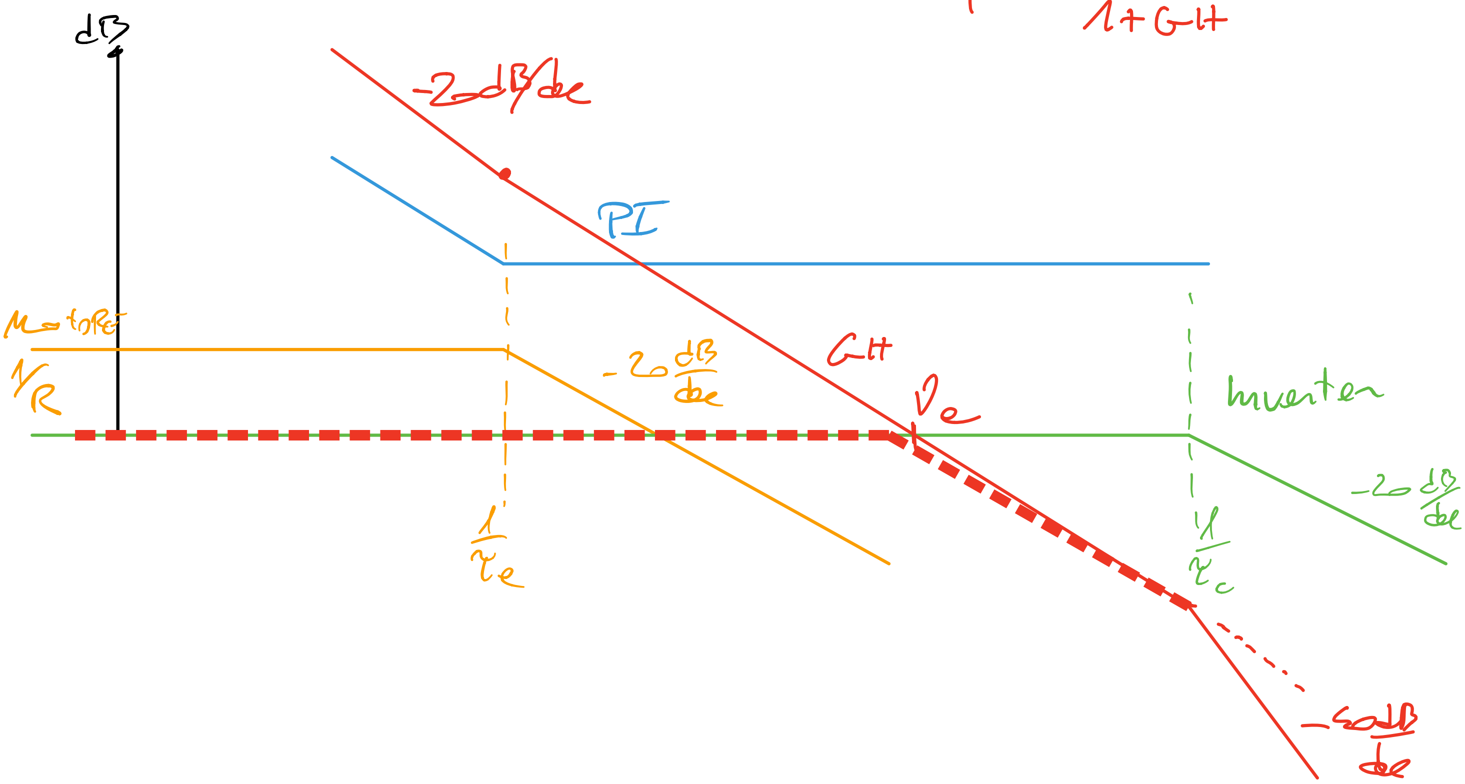
$$\frac{k_P}{k_I}=\tau_{Ri} \;:\; fdt=k_P\left[\frac{S+1/\tau_{Ri}}{S}\right]=k_P\left[\frac{1+S\tau_{Ri}}{S\tau_{Ri}}\right]=k_I\left[\frac{1+S\tau_{Ri}}{S}\right]$$

Diagrammi di Bode:

$$\frac{1}{\tau_e}=\frac{1}{3,3\cdot10^{-3}}=303\ \frac{Rad}{S}$$

$$\frac{1}{\tau_c}=\frac{1}{150\cdot10^{-6}}=6666,7\ \frac{Rad}{S}$$

$$W_{iq}=\frac{GH}{1+GH}$$



# Progetto #1

$BW = 260\ Hz$ $\qquad \omega_c = 2\pi \cdot 260 = 1363\ \frac{rad}{s}$

$M\varphi = 75\ deg$

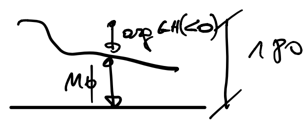
$$GH = K_p \frac{1+s\tau_{Ri}}{s\tau_{Ri}} \frac{1}{1+s\tau_c} \frac{1/R}{1+s\tau_e} \qquad \tau_{Ri} = \frac{K_P}{K_I}$$

$\tau_c = 150\ \mu s \qquad \tau_e = 3{,}3\ ms$

$$|GH| = \frac{K_I}{R} \frac{\sqrt{1+(\omega\tau_{Ri})^2}}{\omega} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_c)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_e)^2}}$$

$$\arg(GH) = \operatorname{atan}(\omega\tau_{Ri}) - \frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}(\omega\tau_c) - \operatorname{atan}(\omega\tau_e)$$

Impongo che $M\varphi = 75°$ per $\omega = \omega_c = 1363\ \frac{rad}{s}$




$$75 \frac{\pi}{180} = \pi + \arg(GH) = \pi + \operatorname{atan}(\omega_c\tau_{Ri}) - \frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}(\omega_c\tau_c) - \operatorname{atan}(\omega_c\tau_e)$$

$$-0{,}2617 = \operatorname{atan}(\omega_c\tau_{Ri}) - 0{,}2 - 1{,}35$$

$$\tau_{Ri} = \frac{\tan(1{,}35+0{,}2-0{,}2617)}{1363} = 2{,}55\ ms$$

Posso ora determinare $K_p$ e $K_I$ imponendo il modulo di $|GH|$

$$|GH|_{\omega_c} = 1 = \frac{K_I}{R} \frac{\sqrt{1+(\omega_c\tau_{RI})^2}}{\omega_c} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega_c\tau_c)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega_c\tau_e)^2}}$$

$$= \frac{K_I}{0{,}6} \frac{\sqrt{1+(1363 \cdot 2{,}55\ 10^{-3})^2}}{1363} \frac{1}{\sqrt{1+(1363\ 150\ 10^{-6})^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(1363\ \frac{3{,}3}{1000})^2}}$$

$$= K_I \frac{3{,}62}{817{,}8} \frac{1}{1{,}021} \frac{1}{4{,}608}$$

$$K_I = 1060\ [V/As]$$

$$K_p = \tau_{RI} \cdot K_I = 2{,}55 \cdot 1{,}06 = 2{,}7\ [V/A]$$

## PROGETTO #2

Uso il PI per cancellare il polo "più lento"

$$\tau_{Ri} = \frac{k_P}{k_I}$$

Pongo $\tau_{RI} = \tau_e = 3{,}3\ mS = \frac{k_P}{k_I}$

$\tau_c = 150\ \mu S \qquad \tau_e = 3{,}3\ mS$

$$GH = k_P \frac{\cancel{1+s\tau_{Ri}}}{s\tau_{Ri}} \frac{1}{1+s\tau_c} \frac{1/R}{\cancel{1+s\tau_e}}$$

$$= \frac{k_I}{s} \frac{1}{R} \frac{1}{1+s\tau_c} \approx 0$$

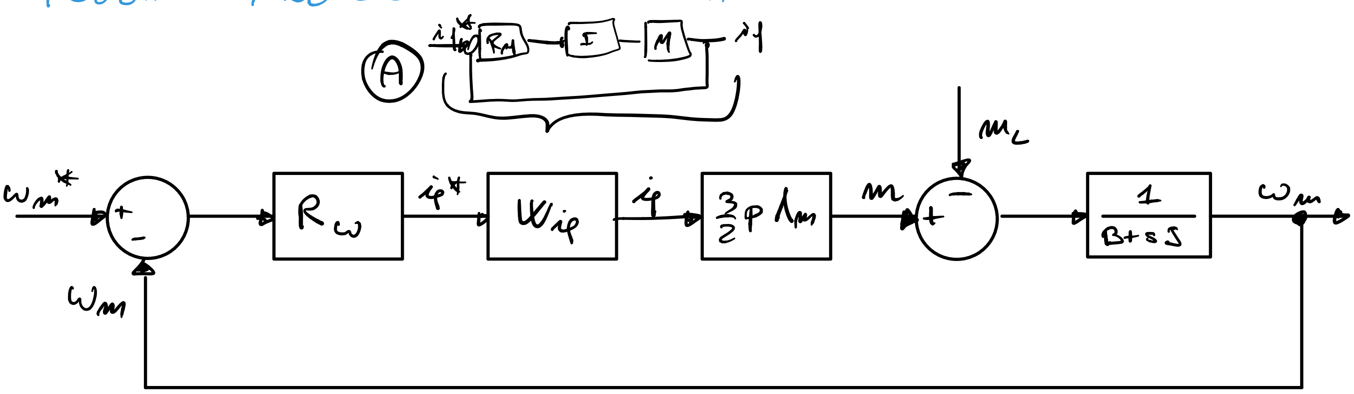
posso di trascurare questo termine

$$|GH| = \frac{k_I}{\nu_e} \frac{1}{R} = 1$$

$\nu_e = 1363\ \frac{rad}{S} \qquad k_I = 1363 \cdot 0{,}6 = 817{,}8\ \ V/As$

$K_P = \tau_{RI} k_I = 2{,}69\ \ \frac{V}{A}$

## # PROGETTO ANELLO DI VELOCITA'




$$W_{iq} = \frac{1}{1+s\frac{1}{\nu_e}} \frac{1}{1+s\tau_c}$$

$$\frac{1}{B+sJ} = \frac{1/B}{1+s\frac{J}{B}}$$

$$R_\omega = K_{P\omega} \frac{1+s\tau_{R\omega}}{s\tau_{R\omega}}$$

(PI)

$$\tau_m = \frac{J}{B} = \frac{25\ 10^{-6}}{1\ 10^{-3}} = 25\ mS$$

$\Lambda_m = 0{,}027\ Vs$

Trascuro convertitore, compenso polo meccanico con il regolatore di velocità

$$GH_\omega = K_{P\omega} \frac{\cancel{1+s\tau_{R\omega}}}{s\tau_{R\omega}} \frac{1}{1+s\frac{1}{\nu_e}} \frac{3}{2} p \lambda_m \frac{1}{B} \frac{1}{\cancel{1+s\tau_m}}$$

$$\tau_{R\omega} = \tau_m$$

$\tau_m = 25\,ms$

$\frac{1}{\nu_e} = \frac{1}{1363} = 0{,}734\,ms$

$$GH_\omega = K_{P\omega} \frac{3}{2} p \frac{\lambda_m}{B} \frac{1}{s\tau_m} \frac{1}{1+s\frac{1}{\nu_e}}$$

$$|GH_\omega| = K_{P\omega} \frac{3}{2} p \frac{\lambda_m}{B} \frac{1}{\nu\tau_m} \frac{1}{\sqrt{1+(\nu/\nu_e)^2}}$$

$$\arg(GH_\omega) = -\frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}(\nu/\nu_e)$$

Impongo $M\phi = 80\frac{\pi}{180} = \pi - \frac{\pi}{2} - \operatorname{atan}\left(\nu \cdot \frac{0{,}735}{1000}\right)$

$$\nu = \tan\left[\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{80\pi}{180}\right] \cdot \frac{1000}{0{,}734}$$

$$= 240\,\frac{rad}{s} \simeq 38{,}3\,Hz$$

Impongo che $|GH_\omega|_{\nu=240} = 1$

$$1 = K_{P\omega} \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0{,}027}{10^{-3}} \frac{1}{240\,\frac{25}{1000}} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{240}{1363}\right)^2}}$$

$$= K_{P\omega}\,13{,}3 \qquad K_{P\omega} = 0{,}075\,\frac{A}{rad/s}$$

$$K_{I\omega} = \frac{K_{P\omega}}{\tau_{R\omega}} = \frac{0{,}075}{0{,}025} = 3 \quad \frac{A}{rad/s} \cdot \frac{1}{s}$$