



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2286A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Venezia

**MATERIA: Elementi di Azionamenti - Appunti - Schemi -
Materiale Utile per l'Esame Scritto e Orale Prof. Bojoi -Belforte**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

Aziionamenti elettrici

Conversione elettromeccanica: dall'energia ottenuta con azionamenti elettrici

Azionamento elettrico: è un sistema che converte energia elettrica in energia meccanica grazie ai convertitori elettronici di potenza controllati da comandi di un sistema di controllo. Può essere regolabile o non regolabile.

REGOLABILE
 il motore può essere alimentato a potenza elettrica variabile (V e f) per variare una grandezza meccanica di interesse (ω , n , C)

elementi principali

- gruppo di alimentazione, ausiliario e controllo:
- sezione di alimentazione (intercettori, trasformatori)
 - convertitore elettronico di potenza
 - sistemi di protezione
 - sistemi ausiliari
 - controllore
 - interfaccia utente e di comunicazione

- gruppo motore:
- macchine elettriche
 - sensori motore (P , V , T)
 - sistemi di protezione ausiliaria motore

1. SORGENTE
2. PARTE DI POTENZA ELETTRICA (alimentazione, conversione, controllo)
3. GRUPPO MOTORE
4. PARTE MECCANICA (meccanico meccanico)

La sorgente alimenta il convertitore tramite una sezione di alimentazione. Il controllore in base ad un riferimento esterno (C, ω, n) e ai dati retroazioni elettrici e meccanici genera un comando al convertitore in base ad una legge di regolazione interna. Il convertitore alimenta il motore; per fornire potenza elettrica regolabile mediante variazione di V o f o ω .

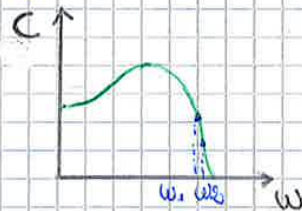
Regolazione: ω, n, s, C, f

Dinamica: bassa media alta

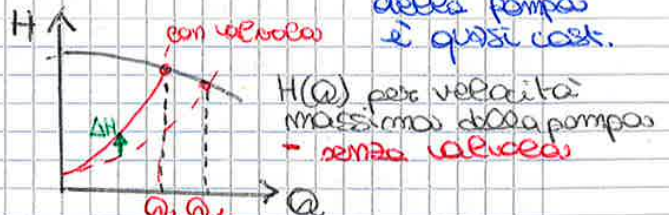
NON REGOLABILE
 alimentazione del motore a V e/o f costante

Il motore è alimentato mediante la sezione di alimentazione con lo scopo di collegare / scollegare (START-STOP) il motore dalla sorgente elettrica (eventualmente avviamento controllato)

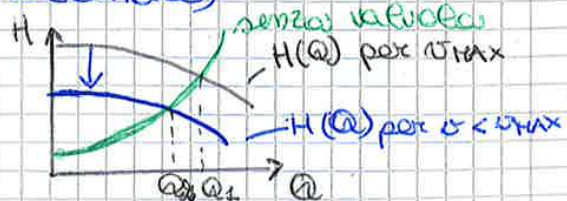
esempio: pompe a velocità non regolabile con motore ad induzione alimentato dalla rete. La valvola introduce una caduta di pressione (ΔH) per variare la portata (Q)



ω varia poco nel funzionamento
 ↓
 la curva caratteristica della pompa è quasi cost.



La valvola di regolazione si può eliminare solo se il motore lavora a velocità variabile (azionamento REGOLABILE)



Schema generale di controllo



$x^*(t)$ = grandezza di riferimento (comando)

$x(t)$ = grandezza controllata, da misurare nel sistema.

$\Sigma = x^* - x$ errore applicato all'ingresso del regolatore; questo genera un comando che viene applicato al convertitore di potenza che alimenta il motore con una tensione che idealmente deve essere pari alla tensione di riferimento. Il motore risponde alla tensione applicata e attua la conversione elettromeccanica con la variazione di $x(t)$ che idealmente deve diventare uguale a $x^*(t)$.

- modelli dinamici degli elementi del sistema (carico meccanico, motore elettrico, convertitore elettronico di potenza, misure elettriche e meccaniche)
- si considera la macchina in corrente continua

lavoro meccanico

$$dW_m = T_f d\theta$$

potenza meccanica

$$P_m(t) = \frac{dW_m}{dt} = T_f \frac{d\theta}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = J\omega \frac{d\omega}{dt}$$

energia meccanica

$$E_m = \int P_m(t) dt = \frac{1}{2} J \omega^2$$

energia cinetica

Accelerazione $\omega_m < \omega_{gin} \rightarrow$ assorbire $E_m = \frac{1}{2} J (\omega_{gin}^2 - \omega_m^2)$

Frenata $\omega_m > \omega_{gin} \rightarrow$ cedere $E_m = \frac{1}{2} J (\omega_m^2 - \omega_{gin}^2)$

Si parla di frenatura regenerativa se l'energia di frenatura è ceduta al convertitore di alimentazione mediante il motore. Se il convertitore fatto fatto non è bidirezionale l'energia di frenatura viene dissipata su una resistenza di frenatura.

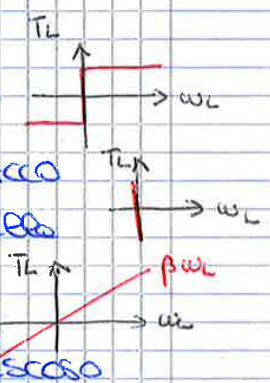
COPPIA RESISTENTE

Davata ad attriti

ATTRITO COULOMBIANO
si oppone al movimento costante

ATTRITO DI PRIMO DISTACCO
è non nulla solo per velocità del carico nulla

ATTRITO VISCOSO
proporzionale alla velocità del carico
 $\beta \rightarrow$ coeff. attrito viscoso



La coppia gravitazionale non dipende da ω (es. sistemi di sollevamento)

$$T_L = M g r$$



se sale è motore (I)
se scende è freno (II)

In ogni momento il punto di funzionamento richiesto dal carico si deve trovare nella zona di lavoro ammessa del motore. La zona di funzionamento del motore (azionamento) deve essere fornita dal produttore.

• **accoppiamento diretto** motore-carico (presa diretta)
più semplice ed economico

$\omega_M = \omega_L$; a regime $T_M = T_L$; accelerare $T_M > T_L$

- cilindro pieno $J = \frac{1}{2} M R^2$ $M = \rho \pi R^2 L$

- cilindro vuoto $J = \frac{M (R_e^2 + R_i^2)}{2}$ $M = \rho \pi (R_e^2 - R_i^2) L$

(1) (3) impianti di sollevamento pesi

- $F_c = m_p g + m_p \frac{dv}{dt}$
 $P_{out} = F_c v$
- $P_{out} = P_{in} = T_{im} \omega_m$ • $P_{out} = m_p g \omega_m R + m_p \omega_m R^2 \frac{d\omega_m}{dt}$
- $T_{im} = T_m - (J_H + J_1 + J_r) \frac{d\omega_m}{dt}$
 $T_m' = T_L' + J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt}$

(2) (1) ruote dentate

η : rendimento riduttore

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_L} = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$$

- $T_{im} = T_m - (J_H + J_2 + J_4) \frac{d\omega_m}{dt}$
- $T_{out} = T_L + (J_L + J_2 + J_3) \frac{d\omega_L}{dt}$

bilancio di potenza a livello del riduttore

$$P_{out} = T_{out} \omega_L = \eta P_{in} \quad P_{in} = T_{im} \omega_m$$

$$T_{im} = \frac{T_{out}}{\eta i}$$

Vantaggi di avere un riduttore tra il motore e il carico

se $i > 1$

$$T_L' = \frac{T_L}{\eta i}$$

La coppia resistente riferita all'albero si riduce

$$J_{eq} = J_H + J_2 + J_4 + \frac{J_1 + J_2 + J_3}{\eta i^2}$$

è l'inerzia totale lato carico riferita all'albero si riduce

Si può azionare un carico grosso con un motore più piccolo

MOTORIDUTTORE: motore più riduttore

(2) (2) cinghia dentata

analogo a (2) (1)

Esiste anche la trasmissione combinata

Modello dinamico del motore a corrente continua

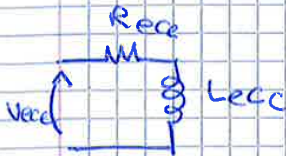


$T_m = k_t i_a \rightarrow$ contiene perdite

$$e_a = k_e \omega_m$$

(1) $T_m = k_t i_a \rightarrow$ coppia utile

$$(2) e_a = k_e \cdot \omega_m$$



$$(3) v_{ecc} = R_{ecc} i_{ecc} + L_{ecc} \frac{di_{ecc}}{dt}$$

$$(4) v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a$$

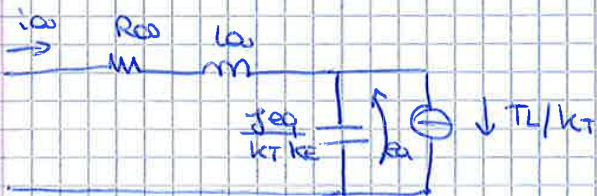
$$(5) -T_m = T_L + J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$(6) \omega_m = \frac{e_a}{k_e}$$

$$(1) (6) \quad k_t i_a = T_L + J_{eq} \frac{d}{dt} \left(\frac{e_a}{k_e} \right)$$

$$i_a = \frac{T_L}{k_t} + \frac{J_{eq}}{k_t k_e} \frac{de_a}{dt}$$

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$



variabili di stato

$$(1) (2) \quad v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega_m$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{k_e}{L_a} \omega_m + \frac{v_a}{L_a}$$

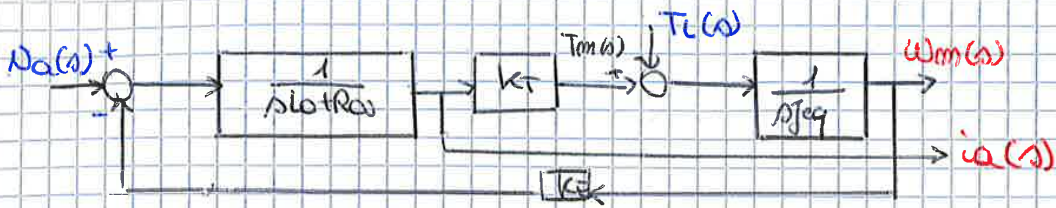
$$(5) (1) \quad k_t i_a = T_L + J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{k_t}{J_{eq}} i_a - \frac{T_L}{J_{eq}}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

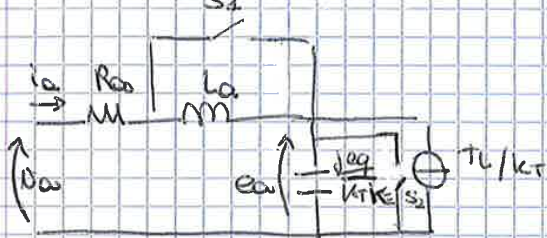
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -k_e/L_a \\ k_t/J_{eq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_a & 0 \\ 0 & -1/J_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ T_L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ T_L \end{bmatrix}$$



$N_a(s), T_L(s)$ ingressi
 $W_m(s), i_a(s)$ uscite

→ studiare relazioni ingressi - uscite per trovare tutte le interazioni. Trovare le funzioni di trasferimento tra l'ingresso e l'uscita per sovrapp. effetti



S_1 chiuso e S_2 aperto
 S_1 aperto e S_2 chiuso

circuito RC
 circuito RL

meccanica
 grandezza meccanica
 $T_m = \frac{R_{ov}(s)}{k_f k_E}$
 $T_{ea} = L_a / R_{ov}$
 armatura elettrica

$T_m \gg T_e$ dipendono da $T(k)$ variaz. inerzia deflussaggio

$$p^2 + p \cdot \frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_e T_m} = 0$$

\downarrow ω_n ω_n^2
 smorzamento ω_n^2 ω_n^2
 pulsazione naturale (ω_n)

L'analisi dei sistemi dinamici si effettua nel dominio delle frequenze; si vede la risposta del sistema quando è impresso una sinusoidale a una certa f . Un altro metodo di analisi è applicare un gradino al sistema (contiene tutte le frequenze) e quindi vedi già bene come si comporta il sistema quando applica T il sistema oscilla alla pulsazione naturale (ω_n). Se il sistema ha delle perdite di energia le oscillazioni si smorzano e si cancellano nel tempo; le oscillazioni durano di + se non ci sono perdite (es. LC con R si estinguono le oscillazioni)

Per analizzare la f.d.t si usa Bode
 (variazione in funzione di f del modulo della f.d.t. e anche della fase della f.d.t)

$\xi > 1$

$$H_1(s) = \frac{1}{k_E} \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \Delta = 0 \quad |H_1(s)| = 1$$

in decibel $20 \log_{10} \left(\frac{1}{k_E} \right)$

$f \downarrow$ del pm
 $f \uparrow$ del pe \rightarrow considero valore assoluto delle radici

$\xi < 1$
 cambio pendenza - 40 dB/decade

Risposta a regime al gradino \rightarrow T. del valore finale

$$w_{mp}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s U_a(s) H_1(s)] = \frac{V_a}{k_E}$$

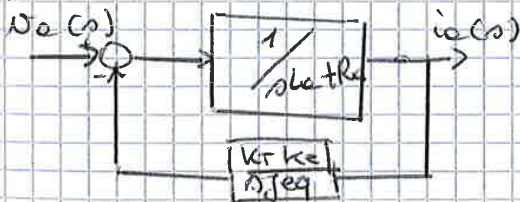
↑
uscita

↑
trasformata di Laplace del gradino applicato

② $H_2(s) = \frac{i_a(s)}{U_a(s)}$

$T_L(s) = 0$ (sistema SISO)

$w_{mp}(s)$ non interessa



$$H_2(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{sL + R_a} \frac{k_r k_e}{sJ_{eq}}}$$

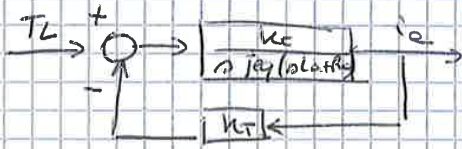
$$H_2(s) = \frac{s/L}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{compares uno zero}$$

cambio Bode

$\xi > 1$ $+20$ $+20 - 20 = 0$ $0 - 20 = -20$
 \uparrow pm \uparrow pe

Variazione di velocità in caso di presa di carico (segno opposto al segno di T_L)

① $H_u(s) = \frac{i_a(s)}{T_L(s)}$ $V_a(s) = 0$ $\omega_m(s)$ non interessa



$$H_u(s) = \frac{i_a(s)}{T_L(s)} = \frac{k_e}{1 + \frac{k_e k_T}{s J (s + R_a/L)}}$$

$$H_u(s) = \frac{\omega_0^2}{k_T} \frac{1}{(s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2)}$$

T. valore finale

$$i_a(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s T_L(s) H_u(s)] = \frac{T_L}{k_T}$$

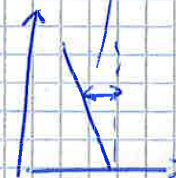
a regime $i_a = \frac{T_L}{k_T}$

$V_a = 0 \rightarrow$ cortocircuito dell'armatura

a regime V_a e T_L

$$\omega_m(\infty) = \omega_m(\omega_a)|_{\infty} + \omega_m(T_L)|_{\infty} = \frac{V_a}{k_e} - \frac{T_L}{k_T} \frac{R_a}{k_e}$$

$$i_a(\infty) = i_a(\omega_a)|_{\infty} + i_a(T_L)|_{\infty} = 0 + \frac{T_L}{k_T} = \frac{T_L}{k_T}$$



non è permesso da
(generatore rigenerativo)

Questa sposta il convertitore eato motore e
bidirezionale in potenza; iac può avere un
valore medio ≥ 0

Quando il motore genera ^{inverso} l'energia proveniente
dal motore è utilizzata per eccitare il condensatore
del ac link \rightarrow vac cresce \uparrow

Esiste una possibilità di superare il valore max
di tensione ammissibile da C:

- riduzione dimensionale C
- introduzione di un convertitore
(chopper) di generatore su ac
link

Chopper di frenatura

- resistenza di frenatura esterna
- transistor di frenatura in un polo di
commutazione tipo buck con controllo
è comandato con un comparatore a isteresi
che con genera vac con un valore di soglia.

Q_f ON \rightarrow l'energia proveniente dal motore viene
dissipata sulla resistenza di frenatura (vac)

Q_f OFF \rightarrow l'energia proveniente dal motore carica il
condensatore (vac \uparrow)

La frequenza di frenatura del transistor Q_f
dipende da:

- banda di isteresi H (differenza tra le soglie)
- energia di frenatura
- capacità C_{dc}

(2) più costosi rispetto ai realizzatori a diodi
unidirezionali in corrente
per poter frenare \rightarrow 2 unità in antiparallelo senza I_{cr}
tensione in uscita regolabile
range di potenza ampio
Per alimentare motori a inverter

(3) costosi (IGBT)
bidirezionale: in corrente
tensione in uscita regolabile
corrente sinusoidale assorbita dalla rete.
P \rightarrow kw

INGRESSO INDUTTIVO \rightarrow USCITA CAPACITIVA

\rightarrow convertitore boost
La tensione dc link è maggiore del valore
di picco delle tensioni concatenate di rete

DC LINK CAPACITIVO

il convertitore a tensione impressa (moti V_{im} e il
comando) alimenta il motore con una tensione
stantanea mota, mentre la corrente assorbita
dipende dal motore.
La tensione in uscita contiene una componente
utile (fondamentale) e un ripple

\rightarrow componente utile = tensione di media mobile
erogata

* Il raddrizzatore fornisce la tensione media V_c in base al comando ricevuto dal controllore (Vc)
 valore medio
 $V_a \leftarrow$ ripple

PUNTO DI COMMUTAZIONE \rightarrow dove lo stellato ha il valore maggiore o dove si annulla la concatenata

- P1 P4 \rightarrow V_{s13}
- P2 P5 \rightarrow V_{s21}
- P3 P6 \rightarrow V_{s32}

SFASATORE 3 canali identici corrispondenti alle 3 fasi

- #1 canale impulsi T1 e T4 (V_{s13})
- 2 " T2 e T5 (V_{s21})
- 3 " T3 e T6 (V_{s32})

Blocco simmetrizzato: genera una rampa simmetrizzata con la tensione di simmetrismo $f = 2f_{rete}$
 C'è un comparatore tra il comando V_c (tensione media desiderata in uscita con ritardo α) e il segnale rampa $V_r(t)$.
 Due impulsi di comando: uno per ogni canale +
 positivo e uno per quello negativo (T1 e T4)
 il primo impulso ritardato di α mentre il secondo è ritardato di $\alpha + \pi$

$$\alpha = \left(1 - \frac{V_c}{V_r}\right) \pi \text{ (rad)} \quad V_c \in [0, \sqrt{3}V]$$

coefficiente medio in uscita $V_a = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s \cos \alpha = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_c \cos \alpha$

Valore normalizzato rispetto al picco

$$V_{c \text{ norm}} = \frac{V_c}{V_r} \quad V_c \in [0, \sqrt{3}V] \quad V_{c \text{ norm}} \in [0, 1]$$

$$V_a \text{ norm} = \frac{V_a}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s} \rightarrow V_a \text{ norm} = f(\alpha) \text{ approssimato a}$$

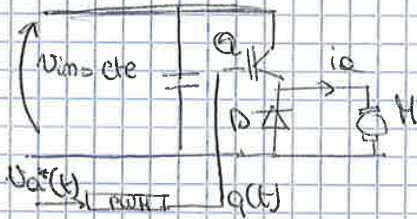
$$V_a \text{ norm} = f(\alpha) \rightarrow \text{è una retta}$$

$$V_c \text{ norm} = \frac{1}{2} V_a \text{ norm} + 0,5$$

$$V_c \text{ norm} = \frac{1}{2} \frac{V_a^*}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s} + 0,5 = \frac{1}{2} \frac{V_a^*}{V_{a \text{ max}}} + 0,5$$

Questo segnale può essere comparato con la rampa

Convertitore DC/DC buck PWM



posto unidirezionale
 con corrente
 corrente non pulsata
 fs = (5-20) kHz

PWM → tensione medio di armatura regolata con la modulazione del duty-cycle del transistor @

A regime

valore medio $I_a = \frac{T_m}{L T}$

$$V_m = \frac{V_a}{k_e} - T_m \frac{R_a}{k_t k_e} = \frac{d V_{in}}{k_e} \quad V_a = q(t) V_m$$

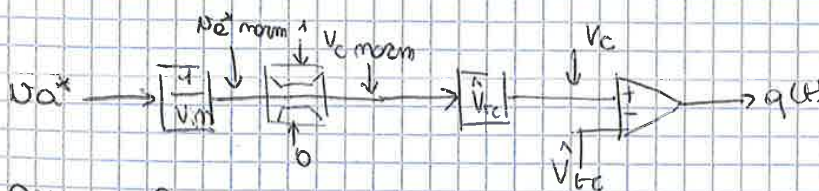
$$d = \frac{I_a}{I_s}$$

$$\Delta i_{L,PK-PK} = \frac{(V_m - V_a) d T_s}{L} = \frac{V_m (1-d) d}{L f_s}$$

↓ max
d=0.5

MODULATORE PWM → comparatore segnale portante (triangolo V_{cc}) con V_c (comando)

$$0 \leq V_c \leq \hat{V}_{tr} \quad d(f) = \frac{1}{V_{tr}} \cdot V_c(f) \quad \begin{matrix} V_{tr} > V_c & q(t) = 0 \\ V_{tr} < V_c & q(t) = 1 \end{matrix}$$



$$\frac{V_a^*}{V_m} = d$$

$$d \hat{V}_{tr} = V_c$$

Ritardi?

Convertitori a commutazione sono con controllo digitale

t campionamento = t commutazione

il comando è applicato dopo Ts ÷ 2Ts
 → $\tau_d = 1,5 T_s$ (ritardo medio)

$$H_{conv}(s) = 1 \cdot e^{-s \tau_d} = \frac{1}{1 + s \tau_d} \leftarrow \text{basso } 1,5 T_s$$

Dinamica alta dei PWM nell'attuazione di una tensione di riferimento
 corrente pulsata prima di 0.15 s (i mem può invertirsi)

sfasatore : Ottenere in uscita una tensione (V_a) media che dipende da V_c che rappresenta la tensione media desiderata in uscita

i tiristori riescono a regolare la tensione media in uscita se vengono impulsati con un angolo di ritardo opportuno \rightarrow abbiamo bisogno delle tensioni di sincronismo (tensioni concatenate per individuare i punti di commutazione) in uscita abbiamo gli impulsi di comando applicati sul gate

sfasatori: 3 canali:

canale 1 genera impulsi per	T_1	T_4	10°
2	T_2	T_5	120°
3	T_3	T_6	240°

Come funziona un canale

Dalla concatenata si ottiene la tensione di sincronismo (sono in fase; problemi di sicurezza)

Il blocco di sincronismo deve individuare la semionda + e - e deve generare gli impulsi (se ritardo \rightarrow è per quella -)
 Il blocco di sincron. comanda un generatore a tempo ($f = 2f_{rete}$)

Questo tempo è confrontato con il comando che rappresenta la tensione desiderata in uscita con un comparatore

$V_c > V_r$ segnale V_{comp} basso
 comando

$\alpha \rightarrow$ angolo di ritardo tra fronti di discesa V_{comp} e impulsi

10° impulso $\rightarrow T_1$
 20° " $\rightarrow T_2$

Esercitazioni di Elementi di Azionamenti



Controllo in cascata di corrente e tensione convertitore DC-DC

Esercizio 2

Si considera un convertitore DC-DC boost bidirezionale in corrente che alimenta il DC link di un inverter di trazione da una batteria, come mostrato nella figura:

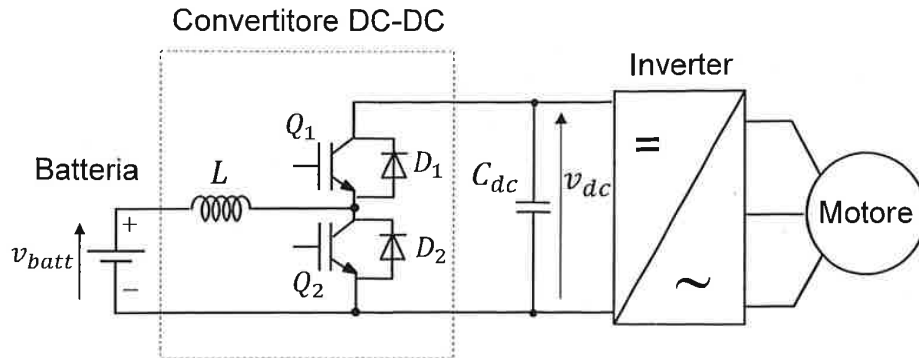


Fig. 1. Convertitore DC-DC boost di alimentazione di un inverter da una batteria di trazione.

La tensione di batteria è pari a 200V, mentre la tensione in uscita del convertitore DC-DC boost deve essere regolata ad un valore pari a 400V. L'induttanza in ingresso del convertitore è $L=1$ mH e la capacità in uscita è pari a 10000 μ F. La frequenza di commutazione del convertitore è impostata a 10 kHz.

Il sistema di controllo del convertitore DC-DC utilizza un controllo in cascata di tensione e di corrente nell'induttore L, mediante due regolatori PI. Ipotizzando una misura ideale di corrente nell'induttore e della tensione v_{dc} , dimensionare i regolatori di corrente e di tensione per ottenere:

- Frequenza di crossover dell'anello di corrente pari a 1 kHz ($k_{pi}=6.3$, $k_{ii}=4000$)
- Frequenza di crossover dell'anello di tensione pari a 100 Hz con un margine di fase pari a 60 gradi ($k_{pv}=6.3$, $k_{iv}=2268$).

*2 switch controllati Q_1 Q_2 con 2 diodi
per la bidirezionalità si aggiungono Q_1 e D_2*

Esercizio 1

Se $k_E < k_T$ Qualcosa non va \rightarrow controfase unitari di
 Minuscolo $k_E > k_T$

MOTORE A

$$\tau_n = \frac{L_{\alpha}}{R_{\alpha}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,86} = 5,814 \text{ ms}$$

$$\tau_m = \frac{R_{\alpha} J_{eq}}{k + k_E} = \frac{0,86 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3}}{0,467 \cdot 0,535} = 28,914 \text{ ms}$$

$$J_{eq} = J_m + J_L = 2,8 \cdot 10^{-3} + 5,6 \cdot 10^{-3} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg cm}^2$$

$4\tau_n = 4 \cdot 5,814 = 23,256 \text{ ms} < \tau_m$ \rightarrow è un motore smorzato

$$\omega_0^2 = \frac{1}{\tau_n \tau_m} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{5,814 \cdot 10^{-3} \cdot 28,914 \cdot 10^{-3}}} = 77,12 \text{ rad/s}$$

$$\xi \omega_0 = \frac{1}{\tau_n} \Rightarrow \xi = \frac{1}{2 \omega_0 \tau_n} = \frac{1}{2 \cdot 77,12 \cdot 5,814 \cdot 10^{-3}} = 1,115 > 1$$

(conferma il fatto che sia ~~un~~ smorzato)

$$p_1 = -\xi \omega_0 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}} \right) = -1,115 \cdot 77,12 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{1,115^2}} \right) = -124 \text{ rad/s}$$

$$p_m = -\xi \omega_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}} \right) = -1,115 \cdot 77,12 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,115^2}} \right) = -47,96 \text{ rad/s}$$

si decide se usare regolatore PI lo zero ξ \rightarrow scelta per eliminare il polo meccanico (stesso ξ)

$$H_c(s) = k_p + \frac{k_{ii}}{s} = k_p \frac{s + \omega_z}{s}$$

$\omega_z = |p_m|$ frequenza zero = ξ polo meccanico

$$\omega_{zi} = \frac{k_{ii}}{k_p} > 0 \quad \frac{k_{ii}}{k_p} = 47,96 \text{ rad/s}$$

ξ in Hz banda passante non può superare $\frac{1}{10}$ della ξ di commutazione
 (se non dato ξ dal testo)

ξ commutat. del testo

$$\omega_{ci} = 2\pi f_{ci} = 2\pi \cdot 400 = 2513,3 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{ci} = \frac{k_p}{L_{\alpha}} \rightarrow k_p = \omega_{ci} \cdot L_{\alpha} = 2513,3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 12,56 \frac{V}{A}$$

$$k_{ii} = \omega_z \cdot k_p = 47,96 \cdot 12,56 = 602,4 \frac{V}{A \cdot s}$$

$$int = k_i \int e dt \quad [V] = k_i \int e [A] dt$$

b) regolatore velocità

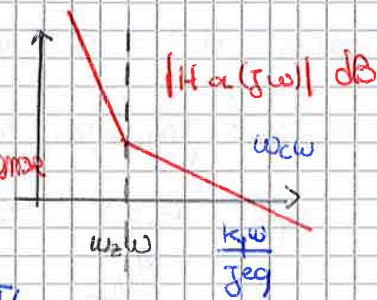
MOTORE A

f zero impone margine di fase



$$H_{ol}(s) = k_{pw} \frac{s + \omega_{zw}}{s^2 j_{eq}}$$

per vedere
due zone
 $\omega = \omega_{zw}$
al massimo frequenze



$$\omega_{zw} = 2\pi \cdot 10 = 62,83 \text{ rad/s}$$

$$k_{pw} = j_{eq} \omega_{zw} = 62,83 \cdot 8,4 \cdot 10^{-2} = 0,53 \frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}}$$

sostituire $s = j\omega$ in $H_{ol}(s)$

$$H_{ol}(j\omega) = k_{pw} \frac{\omega_{zw} + j\omega}{j_{eq} (-\omega^2)}$$

$$\angle H_{ol}(j\omega) = -180^\circ + \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_{zw}}\right)$$

← ω^2 a den
fase NPH

$$\angle H_{ol}(j\omega_{zw}) = -180^\circ + \arctan\left(\frac{\omega_{zw}}{\omega_{zw}}\right) = -180^\circ + \phi_{PH}$$

alza del
crossover
massimo di
fase

$$\tan \phi_{PH} = \frac{\omega_{zw}}{\omega_{zw}} = \sqrt{3} \rightarrow \omega_{zw} = \frac{\omega_{zw}}{\sqrt{3}} = \frac{62,83}{\sqrt{3}} = 36,27 \text{ rad/s}$$

$$k_w = \omega_{zw} \cdot k_{pw} = 36,27 \cdot 0,53 = 19,22 \text{ Nm}$$

$$k_{pw} = 0,53$$

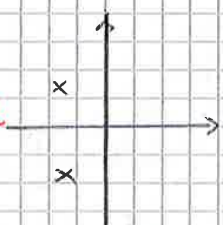
$$k_w = 19,22$$

MOTORE B

$$\tau_{co} = 8,26 \text{ ms}$$

$$\tau_m = 10,3 \text{ ms}$$

$\Delta \tau_{co} = 33 \text{ ms} > \tau_{co} \rightarrow$ B sottosmorzato, poli complessi coniugati

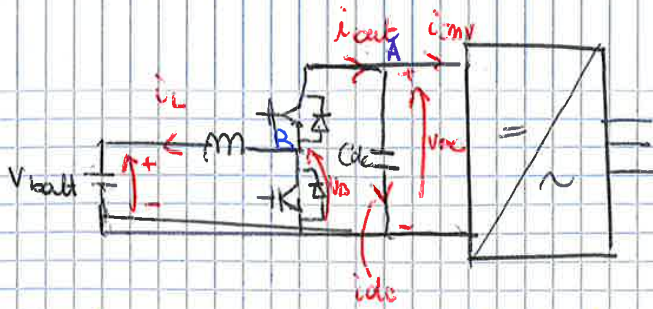


$$p_{1,2} = -\zeta \omega_0 \pm j \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_0$$

$$p_{1,2} = -60,4 \pm j90 \text{ rad/s}$$

$$\omega_0 = 108,5 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = 0,557 < 1$$



mantengo i versi del buck
 $i_m L \rightarrow$ valore medio + ripple Δ
 $i_{out} \rightarrow$ i pulsata
 i_{mv}
 → valore medio + ripple, ripple nel condensatore
 1° DC link e poi dopo ingresso boost

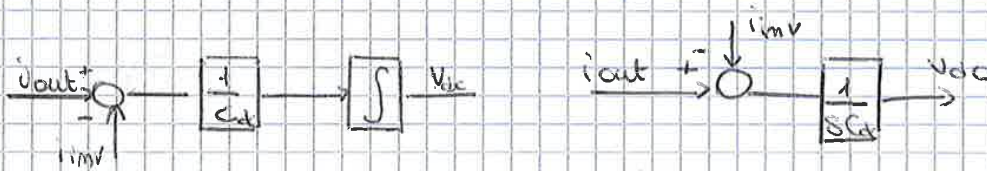
NODO A

$$i_{out} = i_c + i_{mv}$$

$$i_c = i_{out} - i_{mv} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt}$$

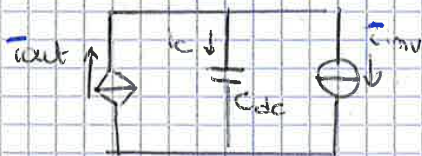
$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int (i_{out} - i_{mv}) dt$$

Schema a blocchi → ingresso i_{out}



i_{out} e i_{mv} valori di media mobile

Posso vedere il DC link come



$$\bar{I}_S = d(t) V_{dc}$$

↑
riferito a Q_1

$$I_{out} = -d(t) \bar{I}_L$$

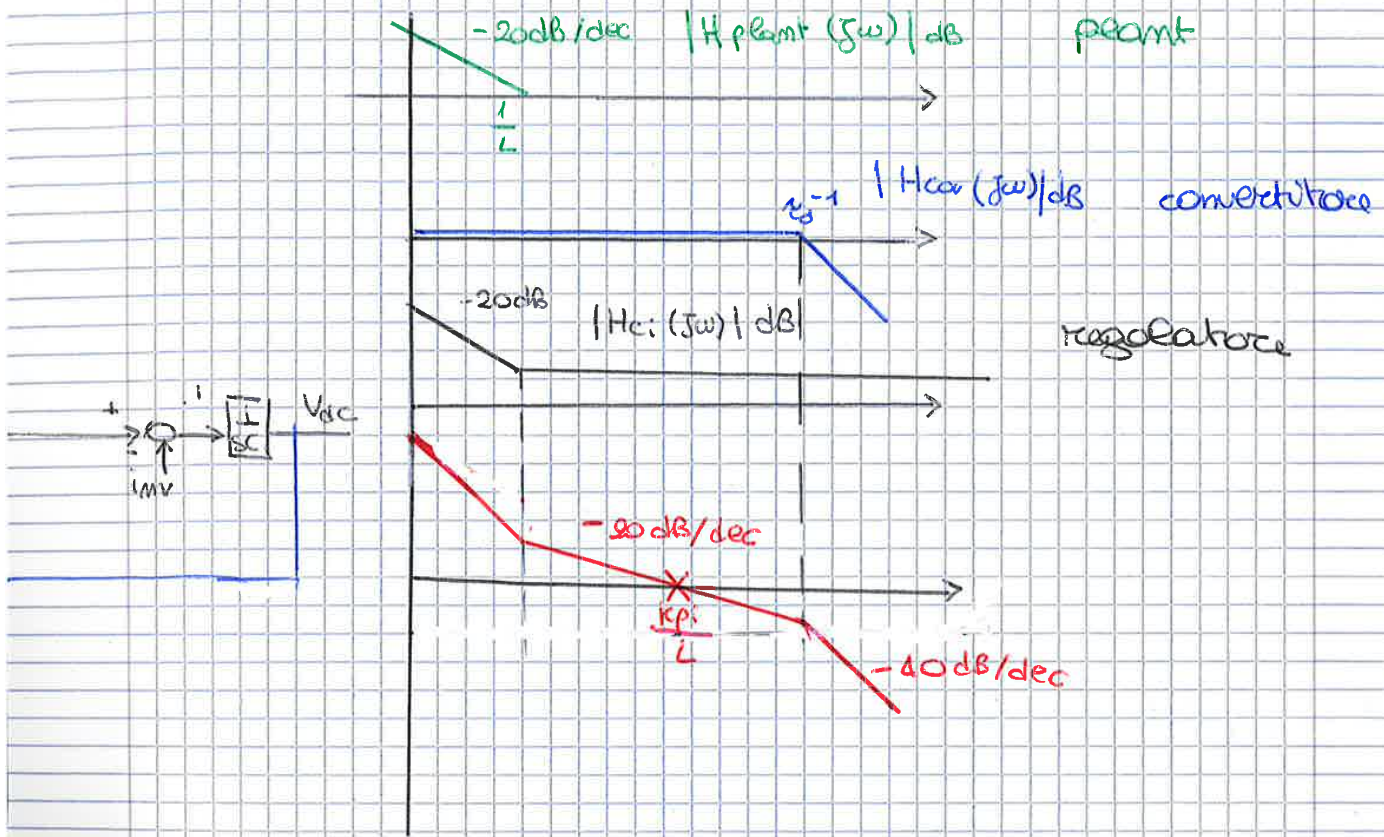
(versi non concordi)

Magica in ingresso
 \bar{V}_S e $V_{BATTERIA} \rightarrow$ in ogni momento

$$\bar{V}_S = V_{batt} + L \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int (\bar{V}_S - V_{batt}) dt$$

Diagrammi asintotici di Bode



$$\omega_{ci} = 2\pi f_{ci} = \frac{k_{pi}}{L}$$

$$\omega_{ci} = 2\pi \cdot 1000 = 6283,2 \text{ rad/s}$$

$$k_{pi} = \omega_{ci} L = 6283,2 \cdot 10^{-3} \rightarrow k_{pi} = 6,3 \text{ V/A}$$

il guadagno integrale dipende da ω_{ci}

$$\omega_{zi} = \frac{\omega_{ci}}{10} = 628,3 \text{ rad/s}$$

una decade prima

$$K_{ii} = \omega_{zi} k_{pi} = 628,3 \cdot 6,3 = 4000 \text{ V/As}$$

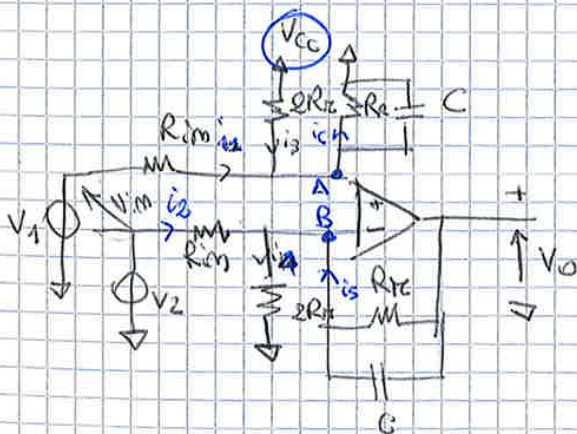
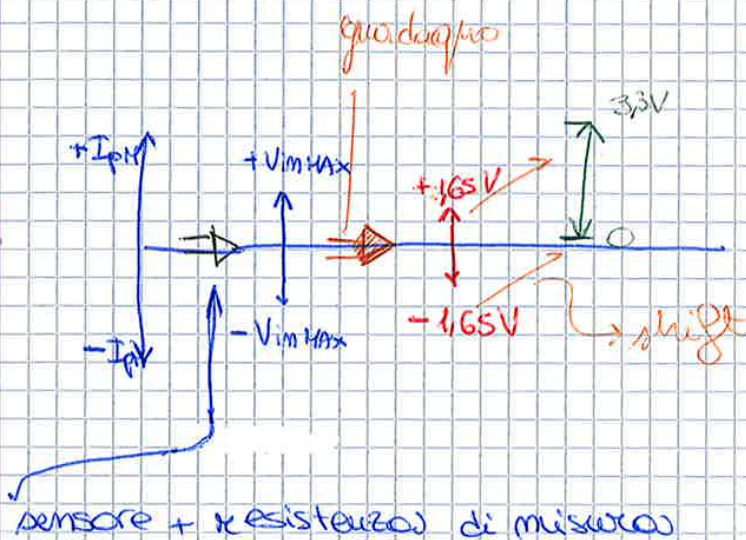
$$\omega_{2V} = \frac{\omega_{2V}}{\sqrt{3}} = 382,7 \text{ rad/s}$$

$$k_{iV} = \omega_{2V} \cdot k_{pV} = 02,8 \text{ A/Us}$$

Esercitazione 3

misura secondaria
 $V_m = R_H I_s = R_H I_p k \quad k = 1/1000 = 0,001$
 $R_H = 68 \Omega$

$V_m = 68 \cdot 0,001 \cdot I_p \rightarrow V_m = 0,068 I_p$
 max corrente misurabile col sistema?



$$Z_{re}(S) = \frac{R_{re} \cdot \frac{1}{sC}}{R_{re} + \frac{1}{sC}}$$

$$Z_{re}(S) = \frac{R_{re}}{sCR_{re} + 1}$$

$$Z_{re}(S) = \frac{R_{re}}{sCR_{re} + 1}$$

definisco tutte le correnti

$$i_a = \frac{V_1 - V_A}{R_{im}}$$

$$i_b = \frac{V_2 - V_B}{R_{im}}$$

$$i_c = \frac{V_{cc} - V_A}{2R_{re}}$$

$$i_a = \frac{V_B}{2R_{re}}$$

$$i_s = \frac{V_o - V_B}{Z_{re}}$$

$$i_G = \frac{V_A}{Z_{re}}$$

impresso unipolbank

$$I_{mis}(A) = (N - 2048) \left(\frac{I_p \cdot \max}{2048} \right)$$

51,75

0,0352
0,02527

- 0) espressioni V_{im}
- 1) espressione impedenza
- 2) espressioni correnti + eq. ai nodi
- 3) ricavo V_n e V_b che sono uguali
- 4) dall'uguagli. ricavo V_o e V_{im}
- 5) impongo V_{oMAX} ottergo $V_{im \max}$
- 6) uguaglio $V_{im \max}$ con $V_{im} \rightarrow$ trovo espressioni
 $V_{im \max} / I_{p \max} \rightarrow I_{p \max}$

$$I_{mis} \Rightarrow \text{MAX}$$

$$N = 4095$$

$$N - 2048 \approx 2048$$

$$2048 \frac{I_{p \max}}{2048} \Rightarrow I_{p \max}$$

$$I_{mis} \Rightarrow -\text{MAX}$$

$$N = 0$$

$$N - 2048 = -2048$$

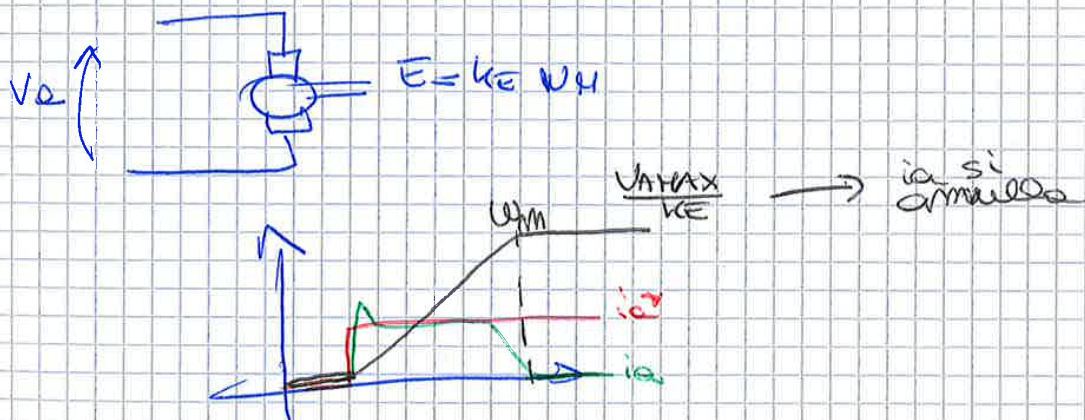
$$-2048 \frac{I_{p \max}}{2048} \Rightarrow -I_{p \max}$$

A regime coppia negativa il motore primo è (frema) $(\omega_m > \omega_{mp} < 0)$ mentre il motore controllato è motore

imposto corrente $i_p < 0$ la velocità $\omega > 0$ se la macchina vuole $T < 0$ il motore primo accelera \rightarrow motore $T > 0$

MOTORE PRIMO fornisce perdite se macchina controllata in corrente è generatore

se è ~~come~~ motore la corrente assorbita deve soddisfare perdite



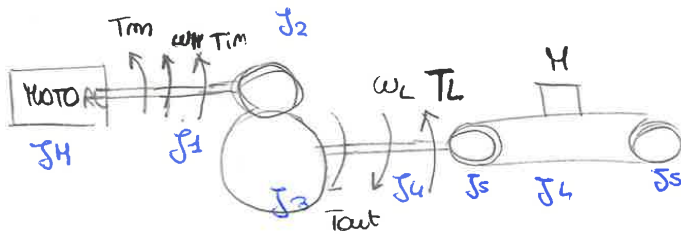
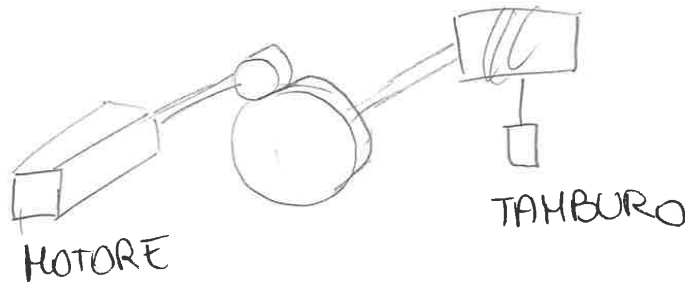
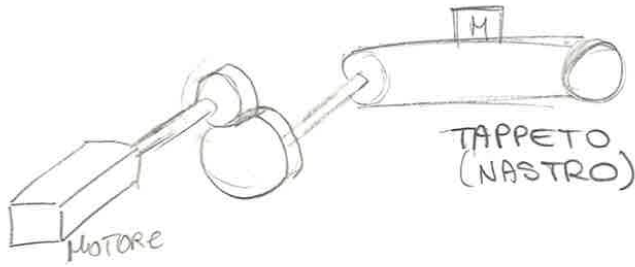
saturo
limiti V_m

caratteristica di corrente spinto al limite. Una pratica aggressiva di controllo $f_c = \frac{1}{10} f_s$ (approssio $\xi < 0,707$)

quasi per essere avere una banda passante elevata immuno ai disturbi additivi

Quadrato e il regolatore di k_p , $k_i \uparrow \uparrow$ $\omega_b \uparrow \uparrow$
Zero del regolatore per cancellare il polo meccanico
 ω_a a -20 dB/decade

PRIMA DOMANDA ALL'ORALE!!!



$$F_t = \mu (M + m_T)g + (M + m_T) \frac{dv}{dt}$$

$$T_t = \mu (M + m_T)gR + (M + m_T)R^2 \frac{d\omega_L}{dt} + 2J_5 \frac{d\omega_L}{dt}$$

$$T_L = \mu (M + m_T)gR$$

$$J_{eq1} = (M + m_T)R^2 + 2J_5$$

$$T_{aut} = T_L + (J_{eq1} + J_4 + J_3) \frac{d\omega_L}{dt}$$

$$T_{im} = T_m - (J_4 + J_1 + J_2) \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$P_{out} = T_{aut} \omega_L = \eta P_{in} = \eta T_{im} \omega_m$$

$$T_{im} = \frac{T_{aut}}{\eta_i}$$

$$T_m = \frac{T_{aut}}{\eta_i} + (J_4 + J_1 + J_2) \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$T_m = \frac{T_L}{\eta_i} + (J_4 + J_1 + J_2 + \frac{J_{eq1} + J_3 + J_5}{\eta_i^2}) \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\omega_L = \frac{\omega_m}{i}$$

CAPITOLO 1

AZIONAMENTO ELETTRICO: conversione dell'energia elettrica in meccanico

- SORGENTE
- REGOLATORE
- CONVERTITORE
- MOTORE
- RETROAZIONE

Azionamento } regolabile $\eta \approx 30\%$
} non regolabile



CAPITOLO 2 CARICHI MECCANICI



$$dW_k = F dx$$

$$p_k(t) = \frac{dW_k}{dt} = H \frac{dx}{dt} \frac{dx}{dt} = H v \frac{dx}{dt}$$

$$E_k = \int p_k dt = \frac{1}{2} H v^2$$



$$dW = T_m d\alpha$$

$$p_m = \frac{dW}{dt} = \int \alpha \frac{d\alpha}{dt} \frac{dw}{dt} = \int w \frac{dw}{dt}$$

$$E_m = \int p_m dt = \frac{1}{2} \int w^2$$

$w_{im} > w_m$ accelera
 $w_m > w_{im}$ cede energia
 dissipa → freno

Runto di funzionamento del carico \Rightarrow mezzo sono di funz. del motore

Accoppiamento diretto

Accoppiamento meccanico

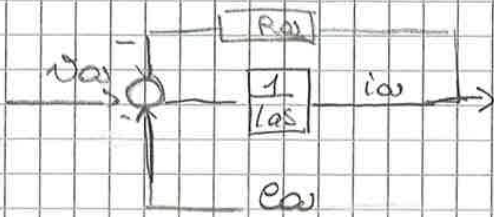
TRASMISSIONE TANGENZIALE A TAPPETO
 //
 //
 //
 RUOTE DENTATE
 PULEGGIA
 A TAPPETO
 VITE SENZA FINE
 A TAMBURO

CARICHI
 $P = T \cdot w$

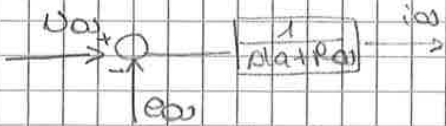
- A $P = \text{cost}$
- A $T = \text{cost}$
- A $P = w^2$
- A $P = w^3$

- $T = 1/w$
- $P = w$
- $T = w$
- $T = w^2$

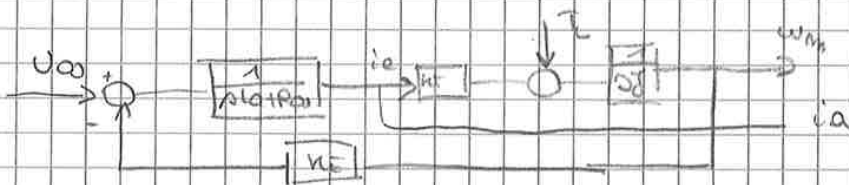
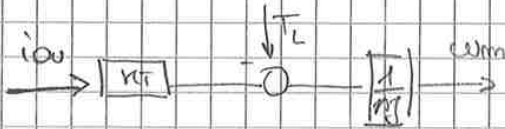
1) $U_a - R_a i_a - E_a = 0$



$$\frac{1}{\frac{R_a}{s} + 1} = \frac{1}{s(R_a + 1/s)}$$



2) $T_L = k_T i_a - J \dot{\omega}_m$



$$H_1(s) = \frac{\omega_m}{U_a}$$

$$H_2(s) = \frac{i_a}{U_a}$$

$$H_3(s) = \frac{\omega_m}{T_L}$$

$$H_4(s) = \frac{i_a}{T_L}$$

sistemi siso

H1s

$$H_a = \frac{1}{s(R_a + 1/s)} \cdot \frac{k_T}{s}$$

$$H_{cl} = \frac{k_T}{s^2(R_a + 1/s) + k_T k_e} =$$

$$= \frac{1}{k_e} \frac{k_T k_e / \omega_0^2}{s^2 + \frac{R_a}{\omega_0} s + \frac{k_T k_e}{\omega_0^2}} = \frac{1}{k_e} \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$p_{1,2} = -\zeta \omega_0 \pm \zeta \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{\zeta^2}}$$

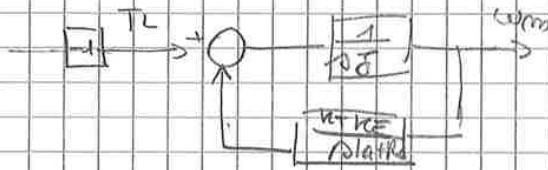
$$\zeta \geq 1$$

$$\zeta > 1$$

$$p = e = -\zeta \omega_0$$

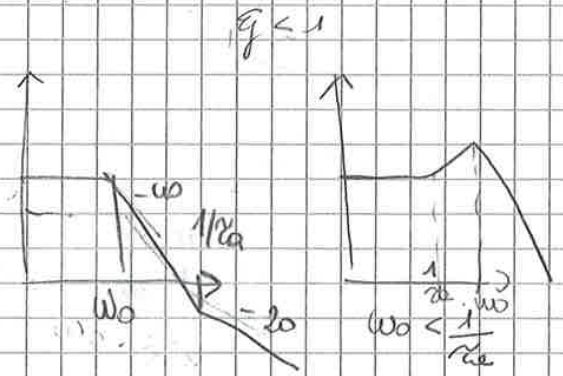
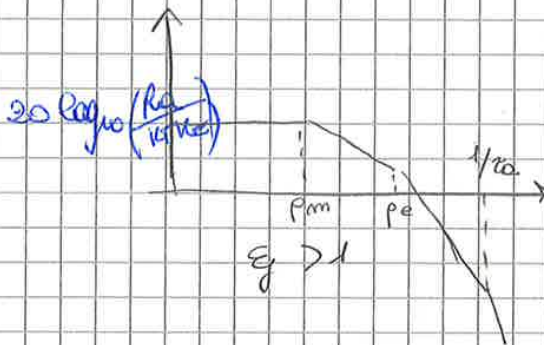
$$p = m = 0$$

$$H_3(s) = \frac{W_m(s)}{T_L(s)}$$



$$H_{CL} = \frac{\frac{1}{s\delta}}{1 + \frac{(k+K_E)}{s\tau k_E}} = \frac{s\tau a + \tau a s}{s^2 \tau \delta a + \tau \delta k a + k \tau k_E} = \frac{s\tau a + \tau a s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

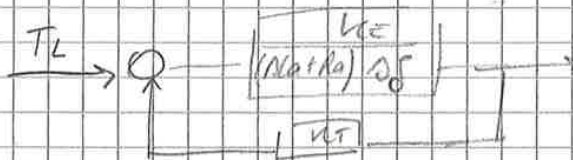
$$= -\frac{1}{\delta} \frac{s + \frac{1}{\tau a}}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$



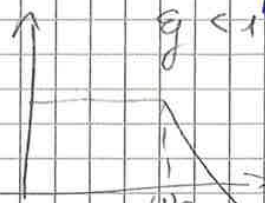
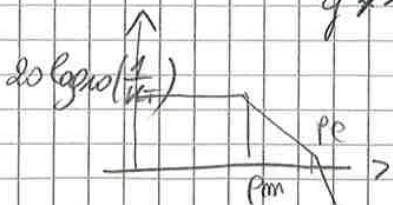
$$W_m(\omega) = \lim_{s \rightarrow j\omega} \frac{1}{s} \frac{T_L}{\delta} \frac{-1}{\delta} \frac{s + \frac{1}{\tau a}}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} = -\frac{T_L}{\delta} \cdot \frac{1}{\tau a} \cdot \frac{1}{\omega^2} = -\frac{T_L}{\delta} \frac{R_a}{k \tau k_E}$$

$$= -\frac{R_a T_L}{T_L k_E}$$

$$H_u(s) = \frac{1}{T_L}$$

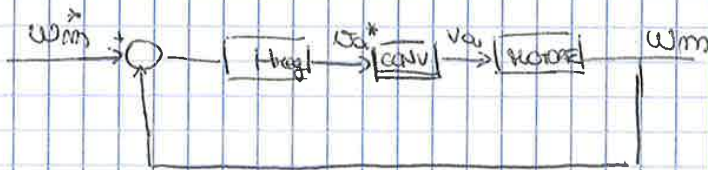


$$H_{CL} = \frac{k_E}{s\tau a s + R a s + k_E k \tau} = \frac{\omega_0^2}{k \tau} \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$



CAPITOLO 7 CONTROLLO DI UN MOTORE A CORRENTE CONTINUA

CONTROLLO DIRETTO DI VELOCITÀ



$$H_{conv} = \frac{1}{1+s\tau}$$

$$H_{motore} = \frac{\omega_m}{V_a} = \frac{1}{K_e} \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\sigma\omega_0 + \omega_0^2}$$

$$H_{reg} = k_p? \rightarrow H_a = \frac{k_p}{K_e} \frac{1}{1+s\tau} \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\sigma\omega_0 + \omega_0^2}$$

$\xi > 1$ per controllo diretto velocità
 perché è un sistema del 2° ordine in cui
 in CL nasce sempre del secondo ordine
 ma ξ diminuisce

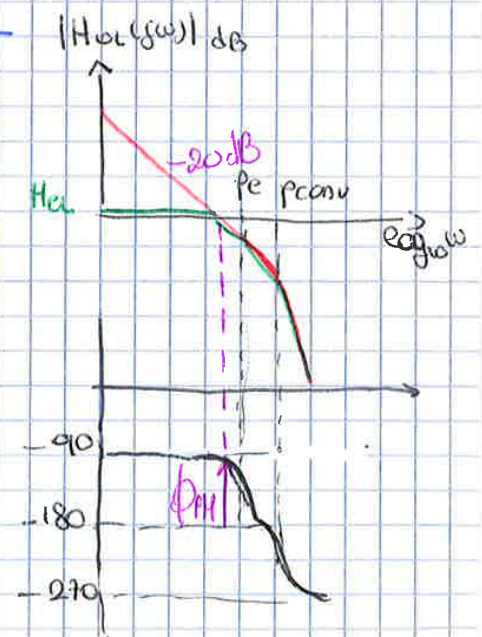
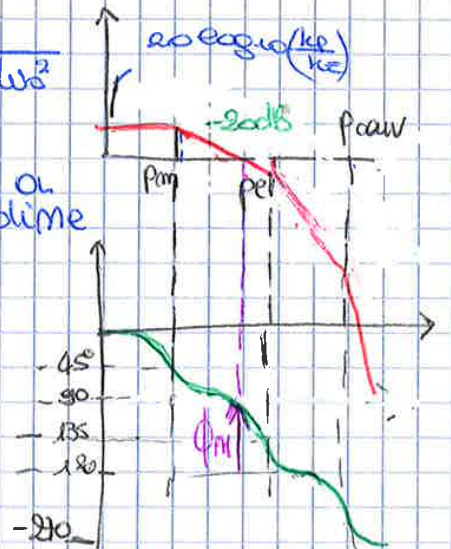
errore stazionario non nullo

$$|H_a(j\omega)|_{\omega=0} = \frac{k_p/k_e}{1 + \frac{k_p}{K_e}}$$

$$H_{reg} = k_p + \frac{k_i}{s} \rightarrow H_a = \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{K_e} \frac{1}{1+s\tau} \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\sigma\omega_0 + \omega_0^2}$$

$$H_a = \frac{k_p}{K_e} \frac{1}{1+s\tau} \frac{s + \omega_z}{s} \frac{p_m p_e}{(s - p_m)(s - p_e)}$$

Abbiamo guadagno ∞
 quindi non esiste errore
 stazionario
 il controllo diretto di velocità
 è sconsigliato \rightarrow velocità costante



$$H_a = \frac{k_p}{L_a} \frac{s + \omega_z}{1 + sT_c} \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

• $\xi_j > 1$

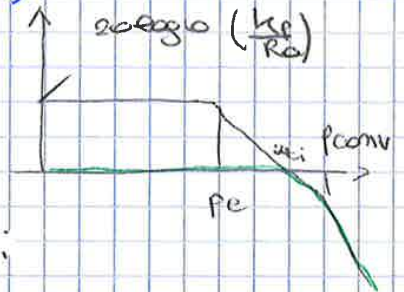
$$H_a = \frac{k_p}{L_a} \frac{s + \omega_z}{1 + sT_c} \frac{1}{(s - p_m)(s - p_e)} = \frac{k_p}{L_a} \frac{1}{(s - p_e)(1 + sT_c)}$$

$\omega_{ci} = ?$

$$H_2(s) = \frac{p/s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \xrightarrow[\omega \uparrow]{s = j\omega} \frac{1}{\omega \omega_n^2}$$

$$H_c(s) = k_p \frac{s + \omega_z}{s} \rightarrow k_p$$

$$\frac{k_p}{L_a \omega_c} = 1 \rightarrow \omega_c = \frac{k_p}{L_a}$$



il diagramma asintotico di Bode deve tagliare l'asse orizzontale con pendenza -20 dB/decade (in un anello chiuso il sistema è sottosmorzato. Non bisogna andare oltre le pole del convertitore)

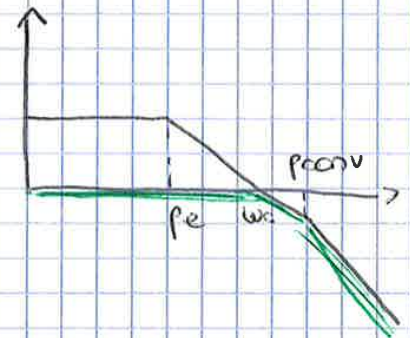
$$\omega_c = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{1.5 T_s} = \frac{f_s}{1.5} \quad f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{f_s}{3\pi} \approx \frac{f_s}{10}$$

→ anello chiuso

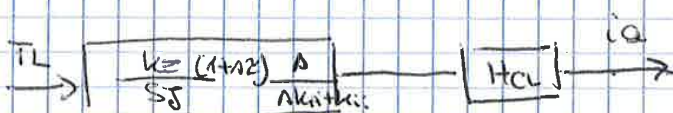
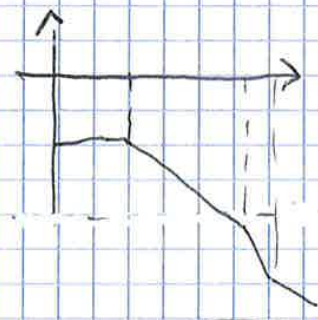
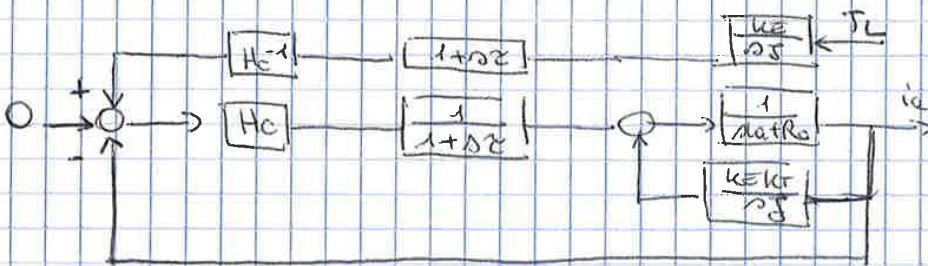
• $\xi_j < 1$

$$H_a = \frac{k_p}{L_a} \frac{s + \omega_z}{s} \frac{1}{(s - p_m)(s - p_e)}$$

$$\omega_c = \frac{k_p}{L_a}$$

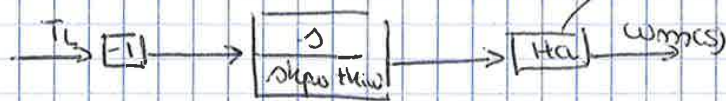


② $H_2(s) = \frac{i_a}{T_L}$



$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_a(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s T_L \frac{k_e (1+sT_c)}{s} \frac{1}{s J (1+A)} = \frac{T_L k_e}{J k_f (1+A)} = \frac{T_L A}{k_f (1+A)}$$

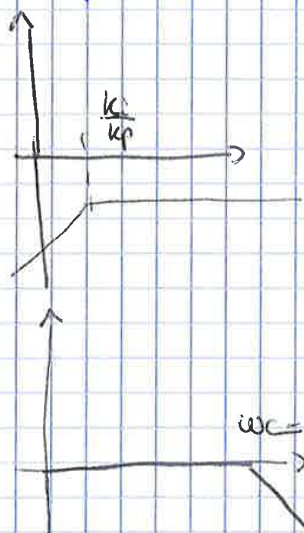
② $H_2(s) = \frac{\omega_{cm}}{TL}$



$\frac{1}{1 + \frac{s}{k_p \omega_c J}}$

Variabile a gradino

Risposta complessiva → dominata da e
 passa alto



PASSA ALTO

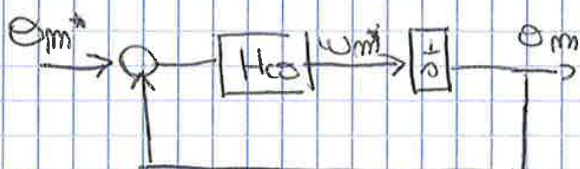
$\epsilon \uparrow$
 perché $\frac{k_i}{k_p}$ a δ piccoli $\epsilon \uparrow$

PASSA BASSO
 è veloce

$\epsilon \downarrow$
 $\frac{1}{\omega_c} = \tau$
 ω_c elevato τ piccolo

CONTROLLO POSIZIONE

Anello esterno al controllo di velocità



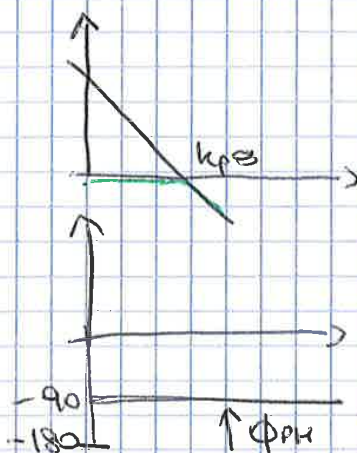
$H_{ca} = k_p$

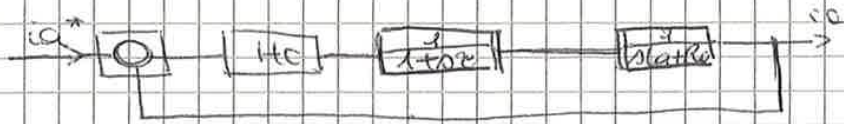
$H_{ol} = \frac{k_p s}{s}$

$H_{cl} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_p}}$

$\omega_c = k_p$

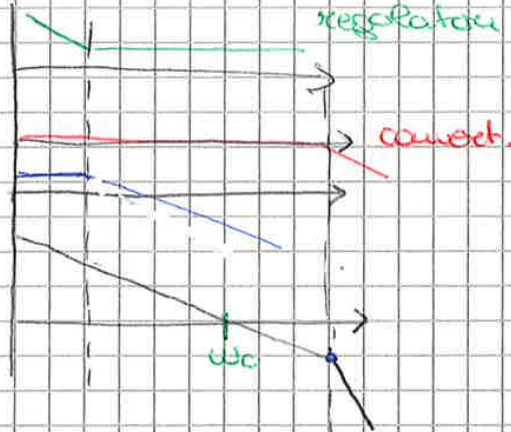
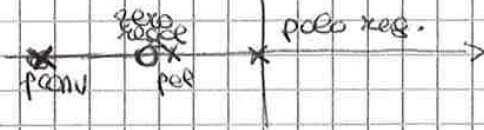
$k_p \uparrow$ risposta + veloce
 è limitata da δ
 quando presente
 dell'anello di
 velocità





$$H_a = k_p \frac{s + \omega_z}{s} \frac{1}{1 + s\tau_e} \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$H_{OL} = \frac{k_p}{s} \frac{1}{1 + s\tau_e}$$



$$\omega_c = \frac{k_p i}{L_a}$$

• Limite banda passante (per non tagliare con -40dB)

$$k_{pi} = \omega_c L_a$$

$$k_{ri} = k_p \cdot \omega_{zi} = k_p \frac{R_a}{L_a}$$

$$f_{cmax} = \frac{f_s}{3\pi}$$

TUNING

Tasatura sperimentale di parametri di un regolatore (cominciano nel tempo)

→ cambio numeri

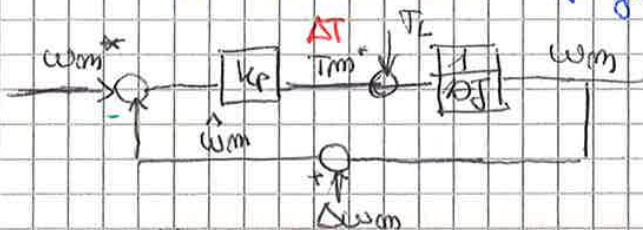
- k_p basso
- k_d ↑
- k_i ↑
- verifica banda passante
- 10% della banda no saturazione (non uffe controllo)
- fino a overshoot

Metodo Ziegler-Nichols k_p max tabelle verifica

RIPPLE DI MISURA DI VELOCITA'

$$\hat{\omega}_m = \omega_m + \Delta\omega_m$$

$$\Delta\omega_m = k_{wm} \sin(h\omega_m t) \left\{ \begin{array}{l} \text{montaggio sensore} \\ \text{funzionamento sensore} \end{array} \right.$$



$$H_1 = \frac{\Delta T}{\Delta\omega_m}$$

$$H_2 = \frac{\omega_m}{\Delta\omega_m}$$

$$|\Delta\omega_m| = k_{wm}$$

$$\omega = h\omega_m$$

$$\omega_m = \frac{\omega}{h}$$

$$|\Delta\omega_m| = k \frac{\omega}{h}$$

$$|\Delta\omega_m| = 1$$

$$\omega = \frac{h}{k}$$



$$\frac{|\Delta T|}{T_m} \leq \alpha$$

$$\frac{1}{T_m} \left(\frac{k}{h} \frac{k_p i}{j \omega q} \right) \leq \alpha$$

$$\omega_{bp} \leq \sqrt{\frac{\alpha T_m}{j \omega q} \frac{h}{k}}$$

$$\omega_{bp} = \frac{k_p i}{j}$$

Tra le bande passanti degli anelli ci deve essere una decade, il rapporto di velocità limita ancora di più

RISONANZE TORSIONALI

Accoppiamento motore - motore
" motore - carico ←

$$T_m - T_{ma} = J_H \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$T_{ma} - T_{la} = 0$$

$$T_{la} - T_L = J_L \frac{d\omega_L}{dt}$$

$$T_{ma} = T_{la} = k_e (\theta_m - \theta_L) + k_w (\omega_m - \omega_L)$$

$$H_1(s) = \frac{\omega_m}{T_m} = \frac{1}{(J_H + J_L)s^2} \frac{J_L s^3 + s k_w + k_e}{J_H J_L s^3 + s k_w + k_e}$$

$$H_2(s) = \frac{\omega_L}{T_m} = \frac{1}{(J_H + J_L)s^2} \frac{s k_w + k_e}{J_H J_L s^3 + s k_w + k_e}$$

$$H_1(s) = \frac{\omega_m}{T_m} = \frac{1}{s J_H} \frac{s^2 + 2 \xi_L \omega_L s + \omega_L^2}{s^2 + 2 \xi_e \omega_e s + \omega_e^2}$$

$$H_2(s) = \frac{\omega_L}{T_m} = \frac{1}{s J_H} \frac{2 \xi_L \omega_L s + \omega_L^2}{s^2 + 2 \xi_e \omega_e s + \omega_e^2}$$

$\xi_e \gg \xi_L$
 $\Rightarrow \xi \uparrow$

(1) interventi sul sistema meccanico per aumentare la ξ di risonanza.

(2) interventi sul controllo \rightarrow filtri NOTCH che attenuano alla loro ξ naturale (colli risonanza).

$$H = \frac{s^2 + \omega_f^2}{s^2 + 2 \xi_f \omega_f s + \omega_f^2}$$

ENCODER INCREMENTALE

una sorgente di luce
un ricevitore
una pista

$\omega_m = \text{cost} \rightarrow$ impulsi costanti:

\swarrow tra: velocità assoluta
 \searrow posizione relativa, variazione da un certo momento

Per il verso di rotazione si possono avere 2 tipi di impulsi sfasati di 90° con:

- 1 pista e sensori associati
- 2 piste e sensori in asse

1 FRONTE DI SALITA	risoluzione	N
2 FRONTI // e DISCESA		2N
4 FRONTI //		4N

- impulso di riferimento su pista 2
- eliminare i disturbi con encoder differenziale: $(A, B, Z + \bar{A}, \bar{B}, \bar{Z})$

SENSORI MAGNETICI

spuntiamo Hall

incrementale \rightarrow informa sulla p paio poli
 \swarrow differenziale

ruota unica sensibile alla variazione di L per misure di velocità

sensori di velocità \rightarrow dinamico tachimetrico
 marcato a corrente continua o magneti permanenti

$E = k_v \cdot \omega$
 misura diretta di velocità

MISURA DI VELOCITÀ

\swarrow metodo software (posizione di encoder, resolver incrementale)
 \swarrow hardware (impulsi di encoder o ruota forata)

METODO SOFTWARE

convenzionale

$$\omega_m = \frac{\theta_{m,k} - \theta_{m,k-1}}{T_s}$$

$T_s \leftarrow$ passo di campionamento

$$\approx \sin(\theta_{m,k} - \theta_{m,k-1})$$

discontinuità

approssimato

$$\omega_m = \frac{\sin \theta_{m,k} - \cos \theta_{m,k-1} - \cos \theta_{m,k} + \sin \theta_{m,k-1}}{T_s}$$

\rightarrow filtro passa basso

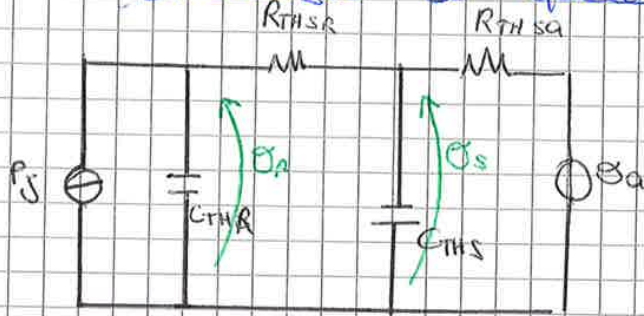
Capitolo 10 MODELLO TERMICO

θ_s STATORE
 θ_r ROTORE
 θ_a AMBIENTE

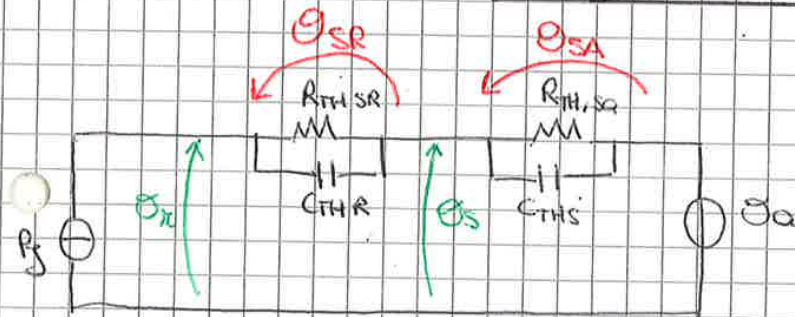
$P_g = R_a I_a^2$

$\theta \rightarrow V$
 $P_g \rightarrow I$
 $R_{TH} \rightarrow R$
 $C_{TH} \rightarrow C$

ricaviamo il modello termico in analogia a quello elettrico



3° ordine



$\theta_r = \theta_{a,r} + \theta_{s,a} + \theta_a$

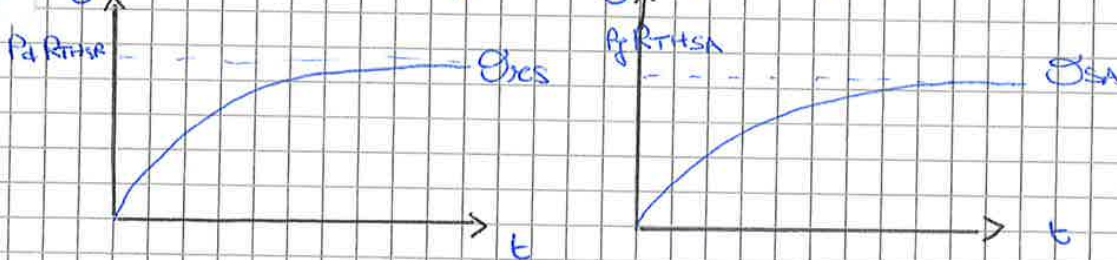
$R_{THSA} \approx R_{THSR}$
 $C_{THS} \gg C_{THR}$ $M_s \gg M_r$

→ possibile perché $R_{THSA} \cdot C_{THS} > R_{THSR} \cdot C_{THR}$

Spesso si fa riferimento alle sovratemperature $\Delta\theta_s$ e $\Delta\theta_r$



chiediamo coppia al motore



$\tau_{THR} < \tau_{THS}$

$\theta_r = \theta_a + \theta_{rs} + \theta_{sa} = \theta_a + P_g (R_{THSR} + R_{THSA})$

GRAFICI COSTRUTTORE

- ricavare τ_{THR} e τ_{THS}
- conoscere P_g e $I_a \rightarrow R_{a0}$ $R_a = R_{a0}(1 + \Delta\theta)$
- dai grafici: $\Delta\theta_s$ e $\Delta\theta_r$
- tra R_{THSR} e $R_{THSA} \rightarrow C_{THS}$ e C_{THR}
- $\theta_r = \Delta\theta_r + \theta_a$ $\theta_s = \Delta\theta_s + \theta_a$

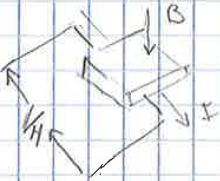
Capitolo 11 MISURA DI CORRENTE

Sensori corrente $\left\{ \begin{array}{l} \text{protezione} \\ \text{controllo azionamenti} \\ \text{corrente / coppia} \end{array} \right.$

Sensori:

- effetto Hall (anello aperto / chiuso)
- trasformatori TA
- shunt

EFFETTO HALL



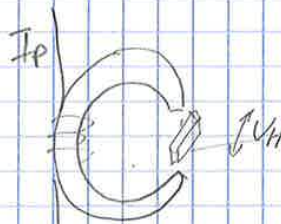
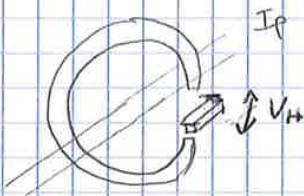
$$V_H = V_{off} + B I \frac{k}{d}$$

$\frac{I k}{d} \rightarrow$ sensibilità

$V_{off} = I k$ dipendono dalla temperatura

$I \rightarrow H \rightarrow B$

SENSORI EFFETTO HALL ANELLO APERTO

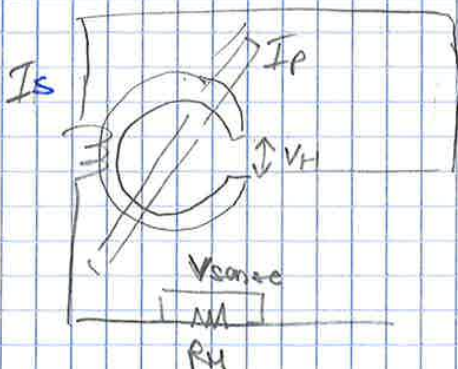


una spira per $I_p \gg$
sensori economici

+ spire per $I_p \ll$
ma soggetti a $T (^{\circ}C)$

ANELLO CHIUSO

Creazione di un flusso magnetico \rightarrow grazie alla contrapposizione di due forze magnetomotrici; una generata da I_p e l'altra da I_s



I_p genera una ΔV su R_{sh} (shunt) $\rightarrow V_{sense}$
con V_{sense} ricavato I_s e dal rapporto spire I_p

costo elevato
banda elevata
linearità

Riduzione del ripple + fase ritardata di 90° elettrici \rightarrow evita risonanza commutazione

CONTROLLO DIGITALE

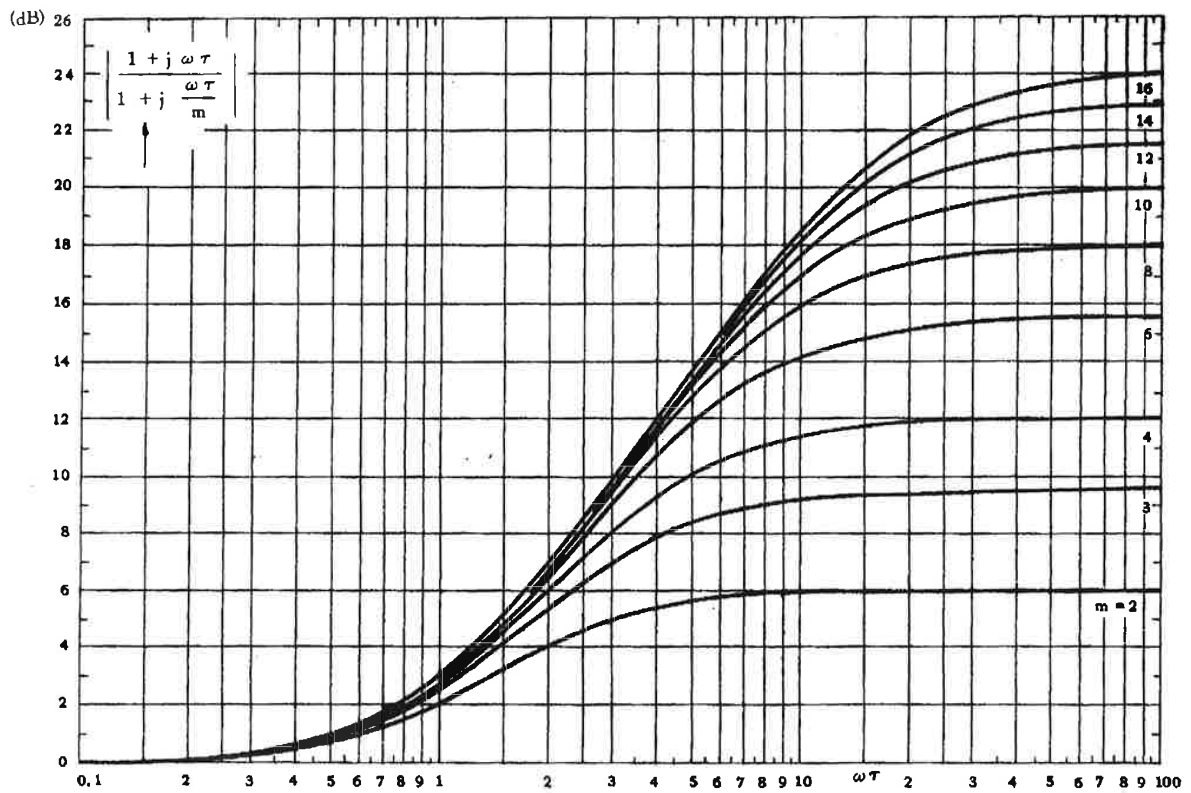
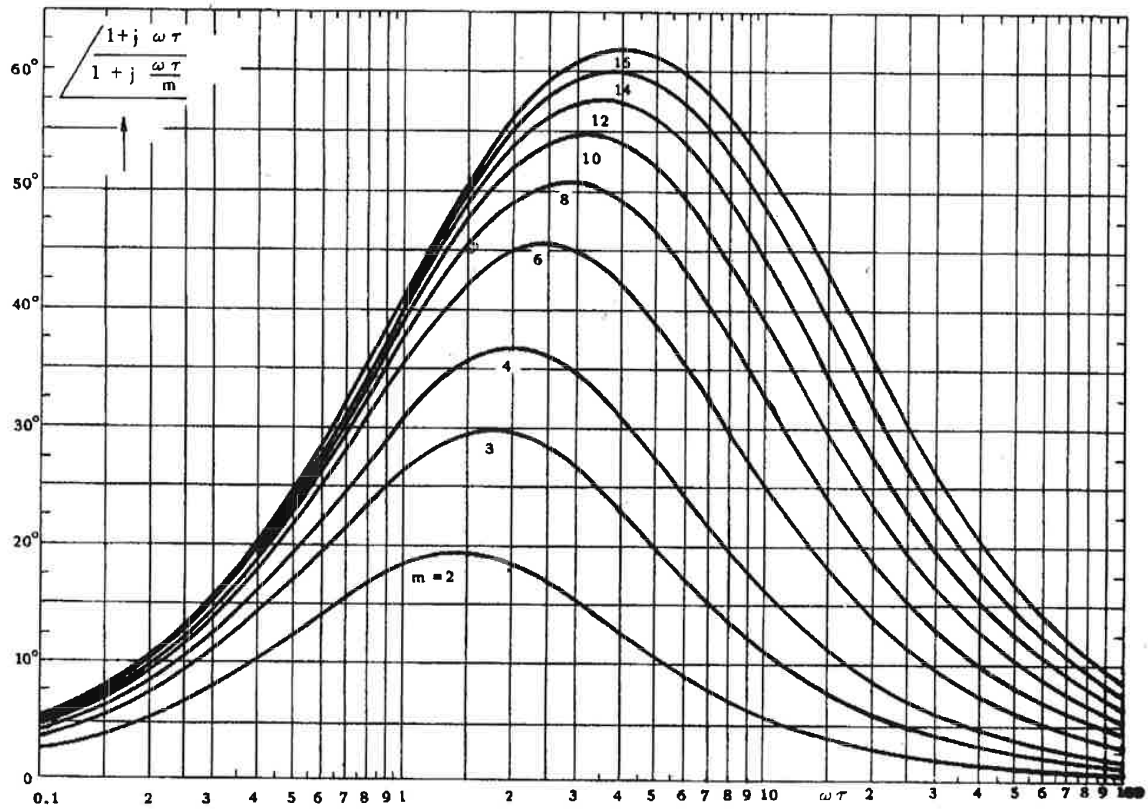
1) FILTRO con f_c taglio $< f$ commutazione e banda passante \rightarrow riduce margine di fase

2) campionamento sincro con modulazione PWM
campionare quando non ci sono commutazioni
per prendere i media
PINT
UFINT

\rightarrow campiamo in corrispondenza del max e del min

ci vede filtraggio ad alte f per eliminare il rumore e dopo legge "valore medio" (spostato)
oppure doppio campionamento e trova valore medio (sempre dopo filtraggio analogico per eliminare rumore ad alte f)

Se il motore è molto induttivo non c'è problema del rumore ad alte f (nel senso che il filtro non compromette il valore medio che non si sposta tanto)



```
-----  
Your MATLAB license will expire in 49 days.  
Please contact your system administrator or  
MathWorks to renew this license.  
-----
```

```
>> load('dati.mat')  
>> A
```

```
A =
```

```
-1.5000 -1.0000 1.0000 -1.0000 1.5000 0  
0.5000 -1.0000 -4.0000 4.0000 -0.5000 0  
-0.7500 0.5000 0 1.5000 -0.7500 -0.5000  
-0.7500 -1.5000 3.0000 -1.5000 1.2500 -0.5000  
0.5000 -1.0000 1.0000 -1.0000 -0.5000 0  
-0.7500 0.5000 -2.0000 0.5000 0.2500 0.5000
```

```
>> B1
```

```
B1 =
```

```
0.5000  
0.5000  
1.2500  
-0.7500  
0.5000  
1.2500
```

```
>> C1
```

```
C1 =
```

```
2 0 1 1 1 0
```

```
>> % M=ctrb(A,B1), Dc=rank(M)
```

```
>>
```

```
>> Dc
```

```
Dc =
```

```
3
```

```
>> % M non ha rango pieno quindi A non è completamente controllabile; Dc è quindi la  
dimensione dello spazio di controllabilità
```

```
>> % S1=obsv(A,C1), D1o=rank(S1)
```

```
>>
```

```
>> D1o
```

```
D1o =
```

```
6
```

MATLAB Command Window

```
>>
>> Ko=place(Aaa',C1',P1)

Ko =

    1.0e+05 *
   -2.9081   -2.1932    1.8095    2.5739    1.4791    0.8134

>> % verifica
>>
>> p1=eig(Aaa-C1*Ko)
Error using *
Inner matrix dimensions must agree.

>> p1=eig(Aaa'-C1'*Ko)

p1 =

    1.0e+03 *
   -4.5230
   -0.0850
   -0.0070
   -0.0050
   -0.0020
   -0.0010

>>
```

MATLAB Command Window

```
>> % la matrice A non è completamente osservabile perchè non ha rango pieno, D1c è la
dimensione dello spazio di osservabilità
```

```
>>
```

```
>> [Aa,Bb,Cc,T]=ctrbf(A,B2,C2);
```

```
>>
```

```
>> % devo analizzare solo Aa e ricordare
```

```
>> % che Dc=4
```

```
>>
```

```
>> Aa
```

```
Aa =
```

```

-3.0000    5.0000    0.0000   -0.0000         0    0.0000
-2.0000   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
-0.6746   -1.8738   -0.8652    0.5340    0.0000    0.0000
 1.4335   -1.6322    0.2816    1.6221    1.0789         0
 0.8272   -1.9156   -1.3439    0.8500   -0.7376    1.2305
-2.1308    1.6627   -0.1606    0.3517    0.7729   -1.0194
```

```
>> % bisogna calcolare gli autovalori della parte non controllabile della matrice Aa
(cicè la sottomatrice 2x2 in alto a sx)
```

```
>>
```

```
>>
```

```
>> eig(Aa(1:2,1:2))
```

```
ans =
```

```

-1.5000 + 2.7839i
-1.5000 - 2.7839i
```

```
>>
```

```
>> % la parte reale di tutti gli autovalori è minore di zero quindi posso fare la
retroazione degli stati misurati
```

```
>>
```

```
>> P=[-2 -8 -6 -17]
```

```
P =
```

```

-2    -8    -6   -17
```

```
>> P=[-2 -8 -6 -17]
```

```
P =
```

```

-2    -8    -6   -17
```

```
>> P=[-2; -8; -6; -17]
```

```
P =
```

```

-2
```


MATLAB Command Window

Page 4

```
-0.2416    0.3230    0.5646   -0.3689    0.8624    1.4438  
-1.2416    1.4354    0.6770   -0.1311   -1.2706    1.0562  
-0.0000    0.0000   -0.0000   -2.0000   -1.2247    1.0000  
-0.0000   -0.0000   -0.0000    3.2660    0.0000   -4.8990  
0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000    1.2247   -3.0000
```

```
>> % D1o=3
```

```
>>
```

```
>> eig(Aaa(1:3,1:3))
```

```
ans =
```

```
2.0000  
-1.0000  
0.0000
```

```
>> % non tutti gli autovalori della parte non osservabile della matrice A sono minori di zero quindi non posso fare la retroazione degli stati osservati
```

MATLAB Command Window

```
>> E=eig(A)
```

```
E =
```

```
    2.0000 + 0.0000i
   -0.0000 + 0.0000i
   -2.0000 + 0.0000i
   -1.0000 + 0.0000i
   -1.5000 + 2.7839i
   -1.5000 - 2.7839i
```

```
>> % il sistema è instabile, non tutti gli autovalori sono < 0
```

```
>> % (parte reale)
```

```
>>
```

```
>> % 4) il sistema è Bibostabile?
```

```
>> % bisogna guardare gli autovalori di A, non tutti hanno parte reale < 0 quindi non è Bibostabile
```

```
>>
```

```
>> % 5) Quali sono gli autovalori non controllabili?
```

```
>>
```

```
>> [Aa,Bb,Cc,T,K]=ctrbf(A,B3,C1);
```

```
>> Aa
```

```
Aa =
```

```
-1.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000
-2.8131    0.3584    2.8506   -0.0000         0         0
 0.8337    0.1253    0.1153    1.8315    0.0000   -0.0000
 3.4826    1.2717   -1.9731   -0.9308    2.3366         0
-2.6439    0.5961    2.5122   -0.7742   -1.7247    2.4052
 0.1508   -0.0688    0.6359    0.1756    0.5154   -0.8182
```

```
>> [Aa1,Bb,Cc,t]
```

```
Undefined function or variable 'Aa1'.
```

```
>> > [Aa1,Bb,Cc,t]
```

```
Undefined function or variable 'Aa1'.
```

```
> [Aa1,Bb,Cc,t]
```

```
↑
```

```
Error: Unexpected MATLAB operator.
```

```
>> [Aa1,Bb,Cc,T,K]=ctrbf(A,B3,C2);
```

```
>> Aa1
```

```
Aa1 =
```

```
-1.0000    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000
-2.8131    0.3584    2.8506   -0.0000         0         0
 0.8337    0.1253    0.1153    1.8315    0.0000   -0.0000
 3.4826    1.2717   -1.9731   -0.9308    2.3366         0
```

MATLAB Command Window

Page 4

```

-1
-8
-5
-3
-2

>> V=A(2:6,2:6);
>> R=B3(2:6,1);
>> K=place(V,R,P)

K =

    2.0901    85.7295    45.7725   -23.6976   -51.1067

>> % verifica
>>
>> p1=eig(V-R*K)

p1 =

   -8.0000
   -5.0000
   -3.0000
   -2.0000
   -1.0000

>> % 7) Si può realizzare una retroazione degli stati osservati che stabilizzi il
sistema?
>> % D1o=6 quindi per il primo sistema si può fare
>>
>> P1=[-7 -8 -5 -6 -1 -22];
>> Ko=place(A',C1',P1)

Ko =

    1.0e+03 *
    0.1001    0.0260   -0.0778   -0.0276   -0.0499   -1.7203

>> % verifica
>>
>> p2=eig(A'-C1'*Ko)

p2 =

  -22.0000
   -8.0000
   -7.0000
   -6.0000
   -5.0000
   -1.0000

```

MATLAB Command Window

Page 1

```
>> % ESERCIZIO 1
>> s=tf([1,0],[1]);
>> G1=(1*10^4)/(s+200);
>> G2=1/(s+10);
>> G=G1*G2;
>>
>> % 1) astatico rispetto al disturbo d= costante: nel grafico d è tra G1 e G2; in G1 non
c'è un polo in zero quindi lo aggiungo
>>
>> C1=1/s;
>> % AGGIORNO G
>>
>> G=C1*G;
>>
>> % errore di regime permanente inferiore al 2% per ingressi sinusoidali con w<1 rad/s
>>
>> [m,f]=bode(G,1)

m =

    4.9751

f =

   -95.9971

>> % m deve essere maggiore di 100/2 e devo prendere anche un po di margine (scelgo num
leggermente maggiore)
>>
>> K=(100/2)/m

K =

    10.0500

>> % scelgo un numero leggermete maggiore es 12
>>
>> C2=12;
>> G=G*C2;
>> % verifico
>> [m,f]=bode(G,1)

m =

    59.7015

f =

   -95.9971
```

MATLAB Command Window

Page 3

zero =

15.0796

>> %dovrei prendere zero_int=zero/10=1.5 ma non va bene perchè crolla il modulo

>>

>> zero/m

ans =

8.0901

>> zero_int=zero/7.5;

>> polo_int=zero_int/a;

C3=(1+s/zero_int)/(1+s/polo_int);

[m,f]=bode(G*C3,1)

m =

49.0024

f =

-109.2248

>> %avevo già aggiornato G

>> % in questo passaggio aggiorno G alla fine perchè C3 non è quello definitivo

>> zero_int=zero/6.5;

>> polo_int=zero_int/a;

>> C3=(1+s/zero_int)/(1+s/polo_int);

>> [m,f]=bode(G*C3,1)

m =

50.7883

f =

-108.2983

>> % modulo maggiore di 50 ok

>> margin(G)

>> margin(G*C3)

>> % Pm=mfi=56.9 e wc=22.7

>> wc

wc =

MATLAB Command Window

>> C3

C3 =

$$\frac{1.245 s + 2.887}{2.32 s + 2.887}$$

Continuous-time transfer function.

>> W=feedback(G,1)

W =

$$\frac{1.351e07 s^2 + 2.351e08 s + 4.728e08}{34.98 s^5 + 1.056e04 s^4 + 7.478e05 s^3 + 2.076e07 s^2 + 2.43e08 s + 4.728e08}$$

Continuous-time transfer function.

>> damp(W)

Pole	Damping	Frequency (rad/seconds)	Time Constant (seconds)
-2.39e+00	1.00e+00	2.39e+00	4.18e-01
-2.08e+01 + 1.31e+01i	8.45e-01	2.46e+01	4.81e-02
-2.08e+01 - 1.31e+01i	8.45e-01	2.46e+01	4.81e-02
-4.36e+01	1.00e+00	4.36e+01	2.29e-02
-2.14e+02	1.00e+00	2.14e+02	4.67e-03

>> stepinfo(W)

ans =

struct with fields:

```

    RiseTime: 0.0516
    SettlingTime: 0.2953
    SettlingMin: 0.9199
    SettlingMax: 1.1451
    Overshoot: 14.5104
    Undershoot: 0
    Peak: 1.1451
    PeakTime: 0.1288
    
```

>> bode(W)

>> % a meno 3dB guardo la bannda

MATLAB Command Window

Page 2

```
>> % mfi=40.8 wc=11.2
>> zero_int=zero/4;
>> polo_int=zero_int/a;
>> C3=(1+s/zero_int)/(1+s/polo_int);
>> margin(C3*G)
>> % mfi=43.8 wc=10.9
>> [m,f]=bode(G*C3,100)
```

m =

0.0501

f =

-137.5144

>>

```
>> [m,f]=bode(G*C3,1)
```

m =

56.3882

f =

-138.6121

>>

```

    0.9288    -0.0400    0.3188    -0.0000    0.0000    0.0000
   -1.2122    0.3010    1.6237    0.0000    0.0000   -0.0000
    0.7541   -0.4422    1.0586   -1.0186    2.2153   -0.0000
    0.5749   -2.6919    2.6260   -2.9037   -0.4603    4.0485
    0.5631    1.9053   -1.2531    1.0942   -0.5854   -2.5211

```

```

>> % Dc=3 ----> sottomatrice 3x3 in alto a sx
>>
>> G=eig(Aa(1:3,1:3))

```

G =

```

   -2.0000
    2.0000
   -0.0000

```

```

>> % quali sono gli autovalori non osservabili?
>> [Aaa,Bbb,Ccc,T,K]=obsbf(A,B1,C1);
Undefined function or variable 'obsbf'.

```

Did you mean:

```

>> [Aaa,Bbb,Ccc,T,K]=obsvf(A,B1,C1);
>> Aaa

```

Aaa =

```

   -0.6551    1.4356    0.3046   -0.1656   -0.7198    0.9327
    0.7146   -1.0420   -1.6997    2.1240    3.3318    0.1613
    0.0000    0.4730   -0.0422    1.1217    2.3610    0.8721
   -0.0000   -0.0000    2.8662   -1.6821   -3.0772   -0.1955
    0.0000    0.0000   -0.0000    2.1488   -0.2928   -0.0232
    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000    3.5138   -0.2857

```

```

>> % D1o=6 ----> non esistono autovalori NO
>> [Aaa,Bbb,Ccc,T,K]=obsbf(A,B1,C2);
Undefined function or variable 'obsbf'.

```

Did you mean:

```

>> [Aaa,Bbb,Ccc,T,K]=obsvf(A,B1,C2);
>> Aaa

```

Aaa =

```

   -0.0000   -0.1124   -1.1124    2.2622   -0.3165   -1.1124
   -0.2416    0.3230    0.5646   -0.3689    0.8624    1.4438
   -1.2416    1.4354    0.6770   -0.1311   -1.2706    1.0562
   -0.0000    0.0000   -0.0000   -2.0000   -1.2247    1.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0000    3.2660    0.0000   -4.8990
    0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000    1.2247   -3.0000

```

```

>> % D2o=3----> sottomatricein alto 3x3

```


MATLAB Command Window

```
>> A=[1 2 3 4;5 6 7 8;9 10 11 12;13 14 15 16];
>> B=[1;2;3;4];
>> C1=[1 2 3 4];
>> C2=[4 3 2 1];
>> M=ctrb(A,B);
>> Dc=rank(M)
```

Dc =

2

```
>> N=obsv(A,C1);
>> D1o=rank(N)
```

D1o =

2

```
>> O=obsv(A,C2);
>> D2o=rank(O)
```

D2o =

2

```
>> F=eig(A)
```

F =

```
36.2094
-2.2094
-0.0000
-0.0000
```

```
>> [Aa,b,c,d,e]=ctrbf(A,B,C1);
>> Aa
```

Aa =

```
0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 -2.6667 1.4907
0.0000 0.0000 -11.9257 36.6667
```

```
>> % Dc=2
>> H=eig(Aa(1:2,1:2))
```

H =

1.0e-15 *

MATLAB Command Window

Page 3

Continuous-time transfer function.

```
>> [n2,d2]=ss2tf(A,B,C2,0,1);  
>> G2=tf(n2,d2);  
>> Z2=minreal(G2)
```

Z2 =

$$\frac{20 s + 20}{s^2 - 34 s - 80}$$

Continuous-time transfer function.

```
>>
```