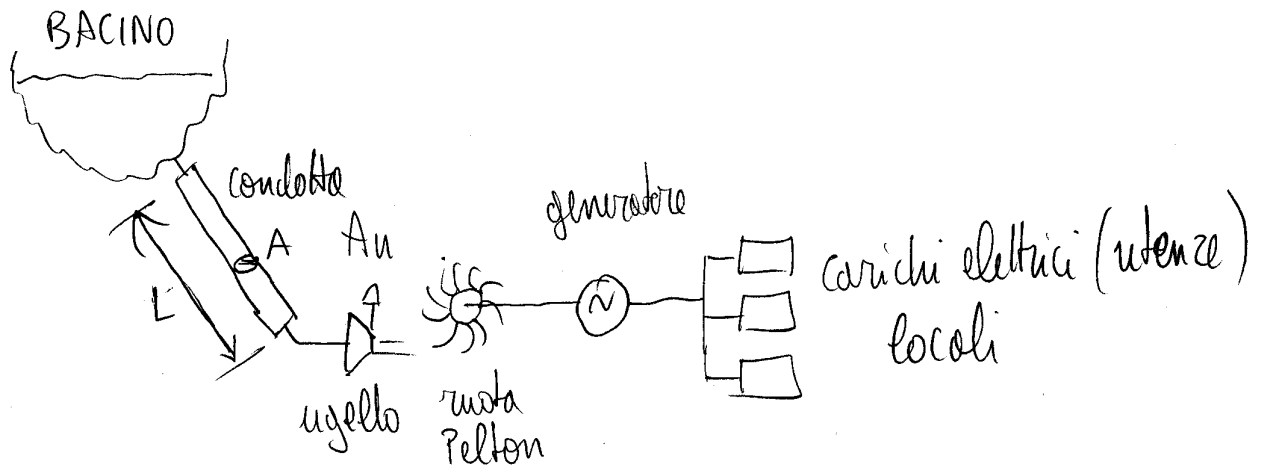


CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(1)

- SCHEMA DI PRINCIPIO

- In linea di principio, l'impianto è composto da un bacino in quota, da una condotta forzata che scende a valle, da una turbina Pelton (per dislivelli elevati, ~ 1000 m) e da un generatore statorico ad esso connesso
- Per il momento analizziamo il caso di generatore isolato, cioè connesso solo a carichi locali, ma non alla rete di trasmissione



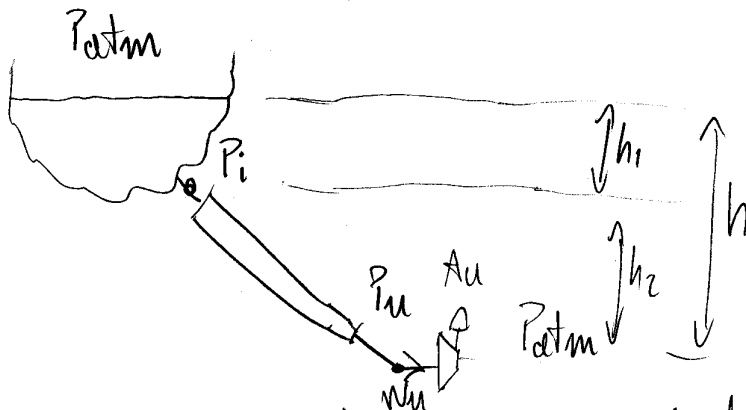
- L'obiettivo del controllo è di fornire tutta la potenza elettrica richiesta dai carichi, con una frequenza di rete di 50 Hz
- La variabile di controllo è la sezione di efflusso A_u dell'ugello modificabile variando la posizione della spina tramite un attettore oleodinamico
- Studiamo la dinamica rilevante per il controllo, per poter poi progettare il sistema di controllo

CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(2)

- MODELLO IDRAULICO

- Grazie al fatto che la turbina Pelton è a pura azione, è possibile disaccoppiare la dinamica del circuito idraulico da quella elettromeccanica



- Il livello del bacino varia su scale di tempi di molti giorni, quindi può essere considerato costante ai fini della presente analisi

- Modello regime

$$\bar{P}_i - \bar{P}_{atm} = \rho g h_1$$

$$\bar{P}_u - \bar{P}_i = \rho g h_2 - \rho \bar{w}_u^2$$

$$\bar{w}_u = \bar{A}_u \sqrt{2\rho (\bar{P}_u - \bar{P}_{atm})} = \bar{A}_u \sqrt{2\rho (\rho g h - \rho \bar{w}_u^2)}$$

La condotta è dimensionata in modo che la perdita di carico distribuita sia una piccola frazione del salto utile di pressione (altrimenti cala il rendimento dell'impianto); in prima approssimazione possiamo scrivere

$$\bar{w}_u \approx \rho \bar{A}_u \sqrt{2gh} \quad ; \quad \bar{w}_u \approx \sqrt{2gh}$$

CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(3)

- Potenza idraulica del getto

$$P_{id} = W \cdot \frac{u^2}{2}$$

a regime: $\bar{P}_{id} \approx \bar{W} \cdot g h$

in transitorio: $u_n = \sqrt{2 \frac{P_u - P_{atm}}{\rho}}$

$$P_{id} = W \cdot \frac{P_u - P_{atm}}{\rho}$$

- Equazioni linearizzate

$\Delta P_i = 0$ (bacino)

$\Delta P_u = \Delta P_i \operatorname{Ch}(s\tilde{c}) - z \Delta W_i \operatorname{Sh}(s\tilde{c})$ (condotta)

$\Delta W_u = \Delta W_i \operatorname{Ch}(s\tilde{c}) - \frac{1}{z} \Delta P_i \operatorname{Sh}(s\tilde{c})$

$\Delta W_u = \frac{1}{R_u} \Delta P_u + \mu_u \Delta A_u$ (ugello)

$\Delta P_{id} = \bar{P}_{id} \left(\frac{\Delta W}{\bar{W}} + \frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u - P_{atm}} \right)$ (pot. idraulica)

con $R_u \approx \frac{2\rho g h}{\bar{W}}$ $\mu_u = \frac{\bar{W}}{\bar{A}_u}$

$z = \frac{c}{A}$

$\tilde{c} = \frac{L}{c}$

CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(4)

- La soluzione delle prime 4 equazioni (pr condotte + valvole) è

$$\Delta W_u = \frac{M_u}{1 + \beta Th(s\sigma)} \Delta A_u =$$

$$\Delta P_u = -z M_u \frac{Th(s\sigma)}{1 + \beta Th(s\sigma)} \Delta A_u$$

- Sostituendo nella 5^{ta}, si trova

$$\Delta P_{id} = \bar{P}_{id} \left(\frac{1}{\bar{A}_u} \frac{1}{1 + \beta Th(s\sigma)} \Delta A_u + \right. \\ \left. - z \frac{\bar{w}}{\bar{A}_u (\bar{P}_u - P_{atm})} \cdot z \frac{Th(s\sigma)}{1 + \beta Th(s\sigma)} \Delta A_u \right)$$

$$\Delta P_{id} = \frac{\bar{P}_{id}}{\bar{A}_u} \frac{1 - z\beta Th(s\sigma)}{1 + \beta Th(s\sigma)} \Delta A_u$$

- Introducendo le variazioni normalizzate $\delta P_{id} = \frac{\Delta P_{id}}{\bar{P}_{id}}$; $\delta A_u = \frac{\Delta A_u}{\bar{A}_u}$

$$\frac{\delta P_{id}}{\delta \bar{A}_u} = \frac{1 - z\beta Th(s\sigma)}{1 + \beta Th(s\sigma)}$$

$$\beta = \frac{z}{\rho_u}$$

CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(5)

- ANALISI IN FREQUENZA

$$G(s) = \frac{1 - 2\beta \text{Th}(s\tau)}{1 + \beta \text{Th}(s\tau)} = \frac{(1 - 2\beta) + (1 + 2\beta)e^{-2\tau s}}{(1 + \beta) + (1 - \beta)e^{-2\tau s}}$$

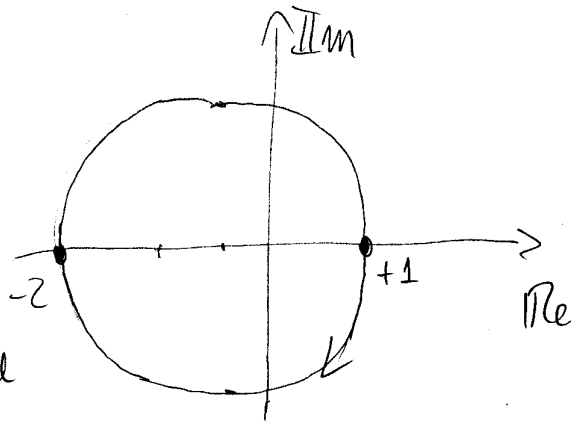
$$\tau = \frac{L}{c}$$

$$\beta = \frac{z}{R_u}$$

- Diagramma polare

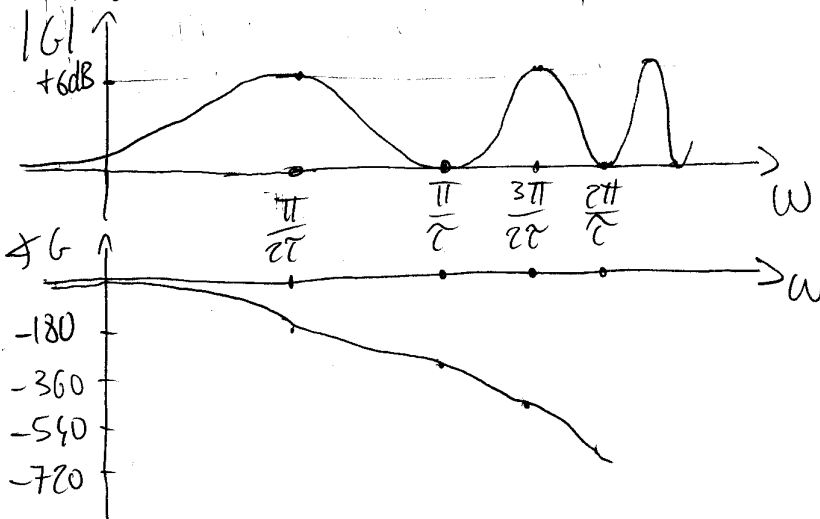
$$G(j\omega) = \frac{(1 - 2\beta) + (1 + 2\beta)e^{-j2\tau\omega}}{(1 + \beta) + (1 - \beta)e^{-j2\tau\omega}}$$

funzione periodica di periodo $\frac{\pi}{\tau}$; $G(0) = 1$
 $G(j\frac{\pi}{2\tau}) = -2$



• Il modulo oscilla tra 1 e 2
 • la fase continua a calare
 → comportamento a fase non minima

- Diagrammi Bode



- RICHIAMI: FDT A FASE NON MINIMA

- Consideriamo le funzioni di trasferimento $G(s)$ di sistemi causali (cioè tali per cui la risposta all'impulso è nulla per $t < 0$)
- Esistono infinite fdt $G_s(s)$ dotate dello stesso diagramma del modulo $|G(j\omega)|$. Quella di esse che ha il diagramma della fase più alto si dice a fase minima, o a spostamento minimo

- Esempio

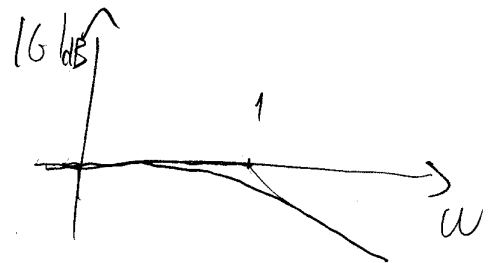
$$G_1(s) = \frac{1}{s+1}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{s-1}$$

$$G_3(s) = \frac{s-10}{(s+1)(s+10)}$$

$$G_4(s) = \frac{e^{-\tau s}}{s+1}$$

$$|G_i(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2+1}} \quad \text{per tutte}$$



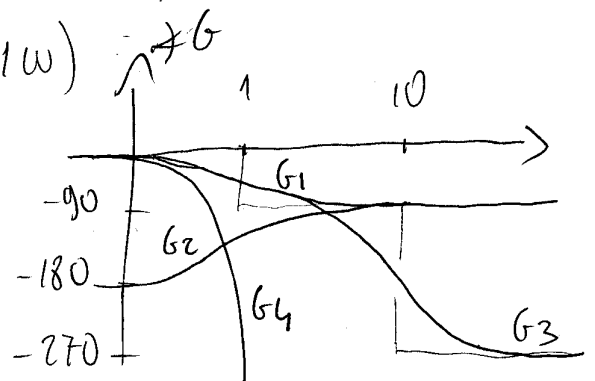
$$\angle G_1(j\omega) = -\arctan \omega$$

$$\angle G_2(j\omega) = -180 + \arctan \omega$$

$$\angle G_3(j\omega) = -\arctan \omega - 2\arctan(0.1\omega)$$

$$\angle G_4(j\omega) = -\arctan \omega - \frac{180}{\pi} \omega \tau$$

$G_1(s)$ è a fase minima



- Th Se $G(s)$ è razionale, condizione necessaria e sufficiente perché $G(s)$ sia a fase minima è che il guadagno sia positivo e che poli e zeri abbiano parte reale ≤ 0

- Th Se $G(s)$ è trascedente, tale condizione è solo necessaria ma non sufficiente (per esempio $e^{-\tau s}$ ha fase non minima). La condizione sufficiente richiede (oltre ad alcune condizioni tecniche aggiuntive) che valga la formula di Bode

$$\angle G(j\bar{\omega}) = \frac{2\bar{\omega}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\log |G(j\omega)| - \log |G(j\bar{\omega})|}{\omega^2 - \bar{\omega}^2} d\omega$$

nel caso di $G(s)$ razionale, lontano da poli e da zeri, tale condizione si riduce alla ben nota

$$\angle G(j\omega) \approx \frac{\pi}{2} \frac{d \log |G(j\omega)|}{d \log \omega} \quad \left(90^\circ \text{ per ogni } 20 \frac{\text{dB}}{\text{dec}} \right)$$

- Fattorizzazione pm/pnm

- Si può sempre scrivere $G(s) = G_{pm}(s) \cdot G_{pnm}(s)$

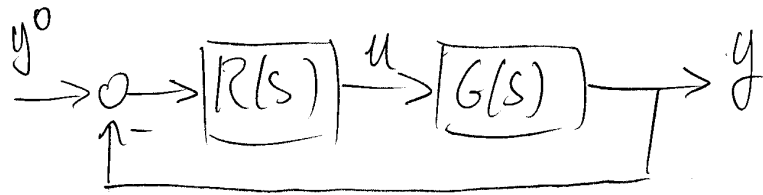
$G_{pm}(s)$ ha fase minima, e $|G(j\omega)| = |G_{pm}(j\omega)|$

$G_{pnm}(s)$ descrive lo sfasamento aggiuntivo, $|G_{pnm}(j\omega)| \equiv 1$

CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(8)

- Controllo in retroazione - pd+ a fase minima



- Se $G(s)$ è a fase minima, la sua inversa (ovvero l'inversa di una sua opportuna approssimazione di Padé, se G è trascendente) ha poli e zeri con parte reale ≤ 0
- Si può quindi porre

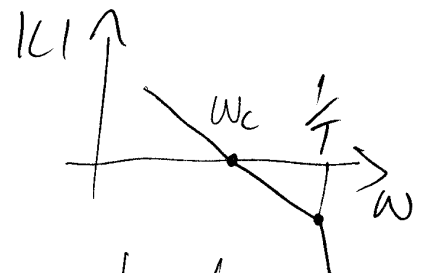
$$R(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{\omega_c}{s} \cdot \frac{1}{(1+sT)^n} \quad T \ll \frac{1}{\omega_c}$$

↑
↑
↑

cancella la dinamica del processo
azione derivativa integrabile
poli ad alta frequenza per rendere $R(s)$ propria

cosicché la funzione d'anello diventa

$$L(s) = R(s)G(s) = \frac{\omega_c}{s} \cdot \frac{1}{(1+sT)^n}$$



- In linea di principio si può quindi ottenere una banda ω_c arbitrariamente grande, con un margine di fase prossimo a 90° ,
- In pratica, se $G(s)$ è di tipo passa basso, al crescere di ω_c aumenta l'azione derivativa in $R(s)$, che può essere inopportuna in presenza di rumore di misura e saturazioni

CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(9)

- Controllo in retroazione - Pelt a fase non minima

- In questo caso, si può cancellare la parte a pm di $G(s)$ ma non quella a pnm, $G_{pnm}(s)$, la cui inversa è instabile
- Lo sfasamento aggiuntivo dato da $G_{pnm}(s)$ non può quindi essere compensato, e viene quindi sottratto al margine di fase
- Supponendo che il diagramma del modulo tagli l'asse 0dB con $-20 \frac{dB}{dec}$ di pendenza, il margine di fase è $\approx 90^\circ$ se si richiede $\phi_m \geq 40^\circ$ negativo
↓

$$\phi_m = 90^\circ + \angle G_{pnm}(j\omega_c)$$

⇓

$$\angle G_{pnm}(j\omega_c) \geq -50^\circ$$

⇒ La pulsazione corrispondente ad uno sfasamento di -50° della parte a pnm di $G(s)$ dà una indicazione della massima banda ottenibile

CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(10)

- ANALISI FT/FMT DINAMICA CONDIZIA

$$\frac{\delta P_{id}}{\delta A_u} = \frac{1 - 2\beta Th(s\tau)}{1 + \beta Th(s\tau)} = \frac{(1 - 2\beta) + (1 + 2\beta)e^{-2s\tau}}{(1 + \beta) + (1 - \beta)e^{-2s\tau}}$$

- È facile mostrare che, per $\beta > 0$ (valori fisicamente sensati)

- I poli (cioè i valori di s che annullano il denominatore ma non il numeratore) hanno parte reale negativa, o non esistono (per $\beta = 1$)
- Gli zeri invece hanno parte reale positiva \rightarrow pdt a fase non minima

- La scomposizione canonica in questo caso è la seguente

$$\frac{\delta P_{id}}{\delta A_u} = \frac{1 + 2\beta Th(s\tau)}{1 + \beta Th(s\tau)} \cdot \frac{1 - 2\beta Th(s\tau)}{1 + 2\beta Th(s\tau)}$$

$G_{pm}(s)$ $G_{pnm}(s)$

$|G_{pnm}(j\omega)| \equiv 1$, coerentemente con la definizione

- $G_{pm}(s)$:
- non ha poli $\text{Re}(p) > 0$
 - non ha zeri $\text{Re}(p) > 0$

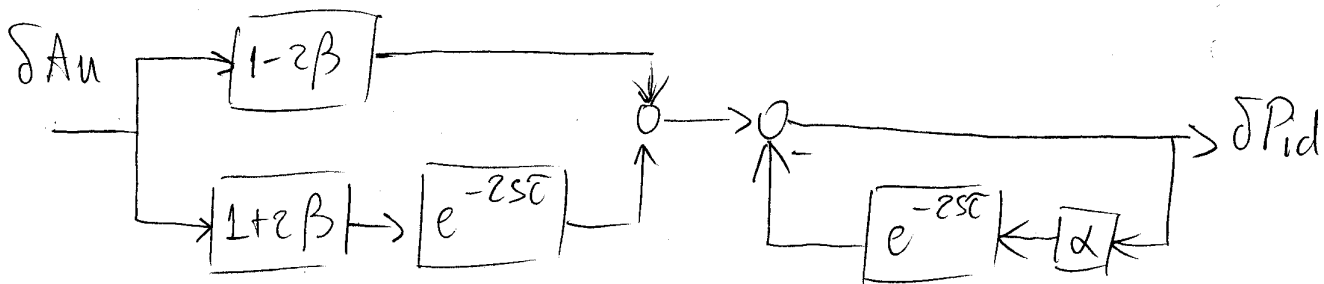
- soddisfa la formula di Bode (verifica numerica)

- Si potrà valutare la banda max del controllo come ω_c tale che

$$\angle G_{pnm}(j\omega_c) \approx -50^\circ$$

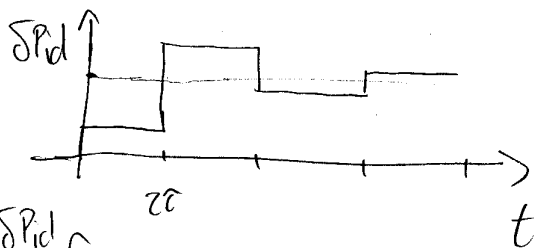
- RISPOSTA A SCALINO $\delta P_{id} / \delta A_u$

$$\frac{\delta P_{id}}{\delta A_u} = \frac{1-2\beta Th(s\tau)}{1+\beta Th(s\tau)} = \frac{1}{1+\beta} \left((1-2\beta) + (1+2\beta)e^{-2s\tau} \right) \cdot \frac{1}{1+\alpha e^{-2s\tau}}$$

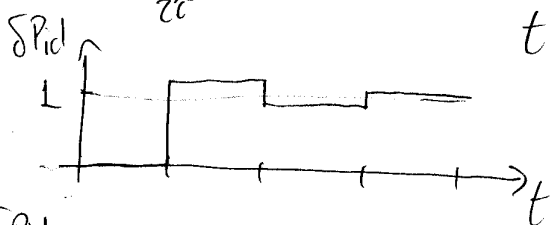


$$\alpha = \frac{1-\beta}{1+\beta} = \frac{R_u - Z}{R_u + Z}$$

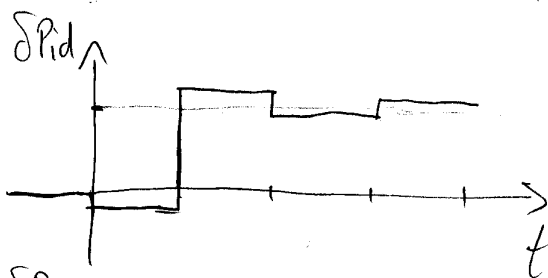
- $\beta < \frac{1}{2}$



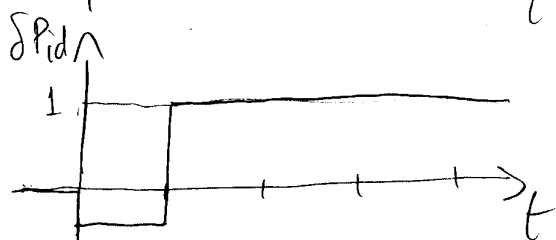
- $\beta = \frac{1}{2}$



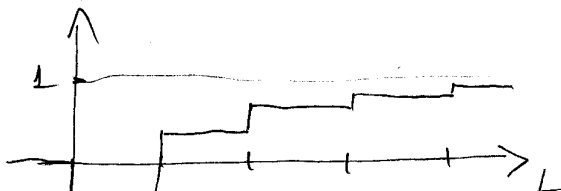
- $\frac{1}{2} < \beta < 1$



- $\beta = 1$



- $\beta > 1$



NB: β è noto
in letteratura
come
parametro
dell'Alievi

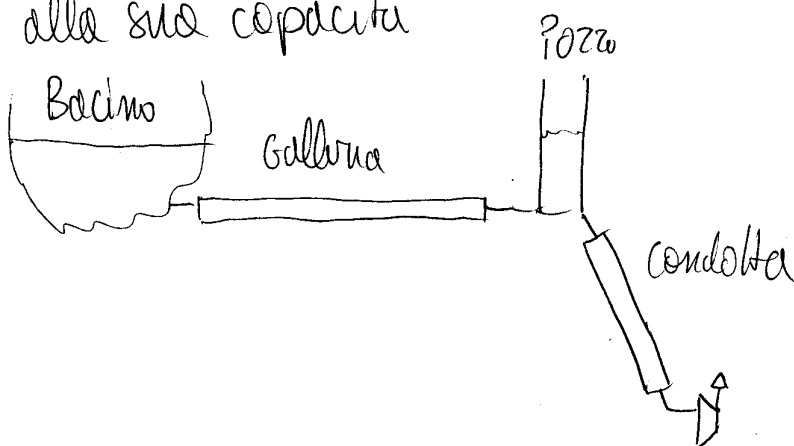
CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(12)

- Se $\beta < 1$, la risposta di potenza è oscillante, monotona altrimenti
- Se $\beta < \frac{1}{2}$, nessuna sottoelongazione, altrimenti valore immaginario negativo
- In tutti i casi la f_{cft} è a fase non minima.
- A parità di τ , lo sfasamento è tanto maggiore quanto più β è grande ($R_u \ll Z$)
- A parità di β , tanto più è grande $\tau = \frac{L}{c}$, cioè tanto più la condotta è lunga, tanto maggiore è lo sfasamento, e tanto più si riduce la banda massima del controllo

⇒ occorre tenere la condotta + corta possibile!

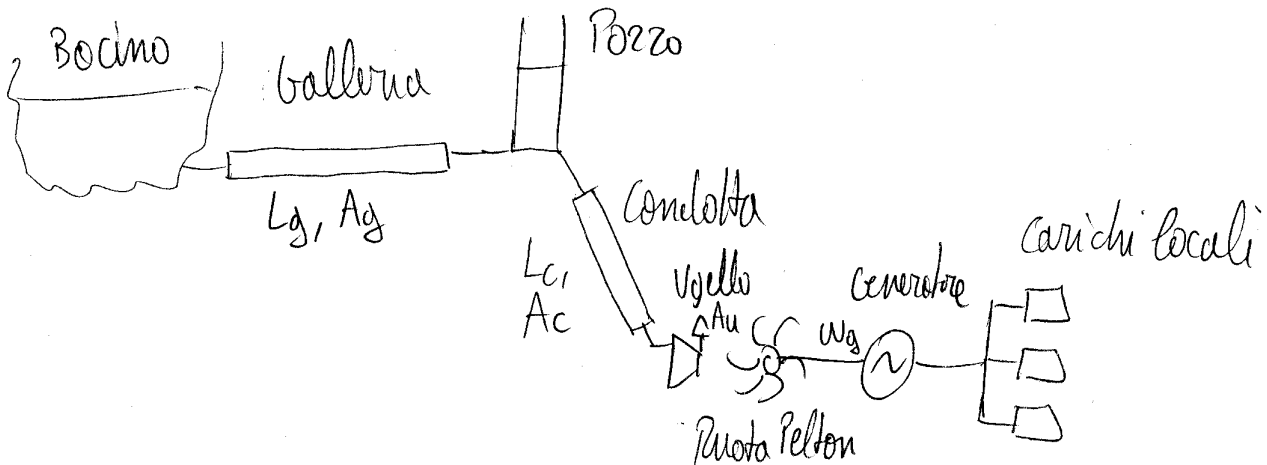
- Se il bacino è distante dal crinale, si costruisce una galleria e un pozzo piezometrico per accorciare la condotta. Il pozzo agisce da sorgente di pressione (lentamente variabile) grazie alla sua capacità



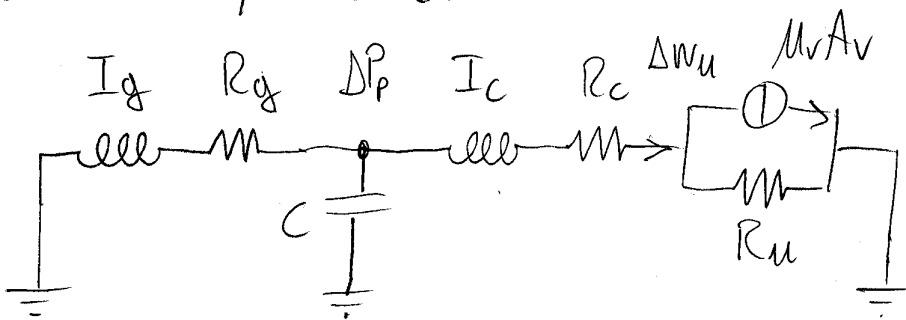
CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(13)

- MODELLO D'IMPIANTO COMPLETO



- Il bacino ha una dinamica molto lenta, grazie alle sue dimensioni. Lo approssimiamo come se il livello, e quindi la pressione all'imbocco della galleria, fosse costante
- Il sistema galleria - pozzo è dimensionato in modo che il livello del pozzo vari su scale di tempi di parecchie decine di secondi. Ai fini della sua analisi, quindi, la dinamica delle onde (ossia l'effetto di comprimibilità dell'acqua in condotta) è trascurabile
- Circuito equivalente:



$$R_c, R_g \ll R_u \quad I_g = \frac{L_g}{A_g} \quad I_c = \frac{L_c}{A_c} \quad I_g \gg I_c \quad C = \frac{A_p}{g}$$

- La fctt $\frac{\Delta P}{\Delta V}$ è del terzo ordine, e vale

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = M_v \frac{R_u}{R_u + R_c + sI_c + \frac{1}{sC} \parallel (R_g + sI_g)} \cdot \left(-\frac{1}{sC} \parallel (R_g + sI_g) \right)$$

$$(R_t = R_g + R_u + R_c \approx R_u)$$

partitore corrente \rightarrow \parallel impedenza
parz. a d.c.

$$= -M_v \frac{R_u R_g}{R_t} \cdot \frac{1 + s \frac{I_g}{R_g}}{1 + s \left(\frac{I_c + I_g}{R_t} + R_g C \frac{R_u + R_c}{R_t} \right) + s^2 C \left(I_c \frac{R_g}{R_t} + I_g \frac{R_u + R_c}{R_t} \right) + s^3 I_g C \frac{I_c}{R_t}}$$

- Supponiamo che la dinamica sia caratterizzata da una coppia di poli complessi (lenti) e da un polo reale veloce, e cerchiamo di stimarne i parametri

$$D(s) = \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \right) (1 + sT) = \quad \text{con } T \ll \frac{1}{\omega_n}$$

$$= 1 + s \left(T + \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) + s^2 \left(\frac{2\zeta}{\omega_n} T + \frac{1}{\omega_n^2} \right) + \frac{T}{\omega_n^2} s^3$$

- Valutiamo i parametri, uguagliando i coefficienti di polinomi

• Termine di \mathbb{I}^0 grado: per ipotesi $T \ll \frac{1}{\omega_n}$, quindi

il coefficiente vale circa $\frac{1}{\omega_n^2}$. Dall'altra parte

$\frac{R_g}{R_t} \ll 1$, mentre $\frac{R_u + R_c}{R_t} \approx 1$; essendo $I_g \sim I_c$, il primo

addendo è trascurabile, quindi rimane circa $I_g C$

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega_n^2} \approx I_g C \Rightarrow \boxed{\omega_n \approx \frac{1}{\sqrt{I_g C}}}$$

• Termine di III grado: $\frac{T}{\omega_m^2} = I_g C \frac{I_c}{R_t}$; sostituendo

il valore ricavato di ω_m , rimane

$$\boxed{T \approx \frac{I_c}{R_t}}$$

• Termine di I grado: poiché $\frac{R_u + R_c}{R_t} \approx 1$, abbiamo

$$\cancel{T} + \frac{z\zeta}{\omega_m} \approx \cancel{\frac{I_c}{R_t}} + \frac{I_g}{R_t} + R_g C$$

$$\zeta \approx \frac{1}{2\sqrt{I_g C}} \left(R_g C + \frac{I_g}{R_t} \right)$$

- Lo zero al numeratore ha una costante di tempo $\tau = \frac{I_g}{R_g}$ grande, essendo R_g piccola

- Valutiamo i parametri in un caso tipico, e verifichiamo che soddisfino le ipotesi ($T \ll \frac{1}{\omega_m}$)

$$\omega_m \approx \frac{1}{\sqrt{I_g C}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_g A_p}{A_g g}}} \approx \sqrt{\frac{g}{L_g} \frac{A_g}{A_p}} \approx \sqrt{\frac{10}{1000} \frac{1}{2}} = 0.07 \text{ rad/s}$$

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_m} \approx 90 \text{ s} \text{ pseudo-periodo}$$

$$T \approx \frac{I_c}{R_t} \approx \frac{L_c}{A_c} \frac{\bar{w}}{2\rho g h} = \frac{L_c}{A_c} \frac{\rho A_c \bar{u}_c}{2\rho g h} = \frac{L_c}{2h} \frac{u_c}{g}$$

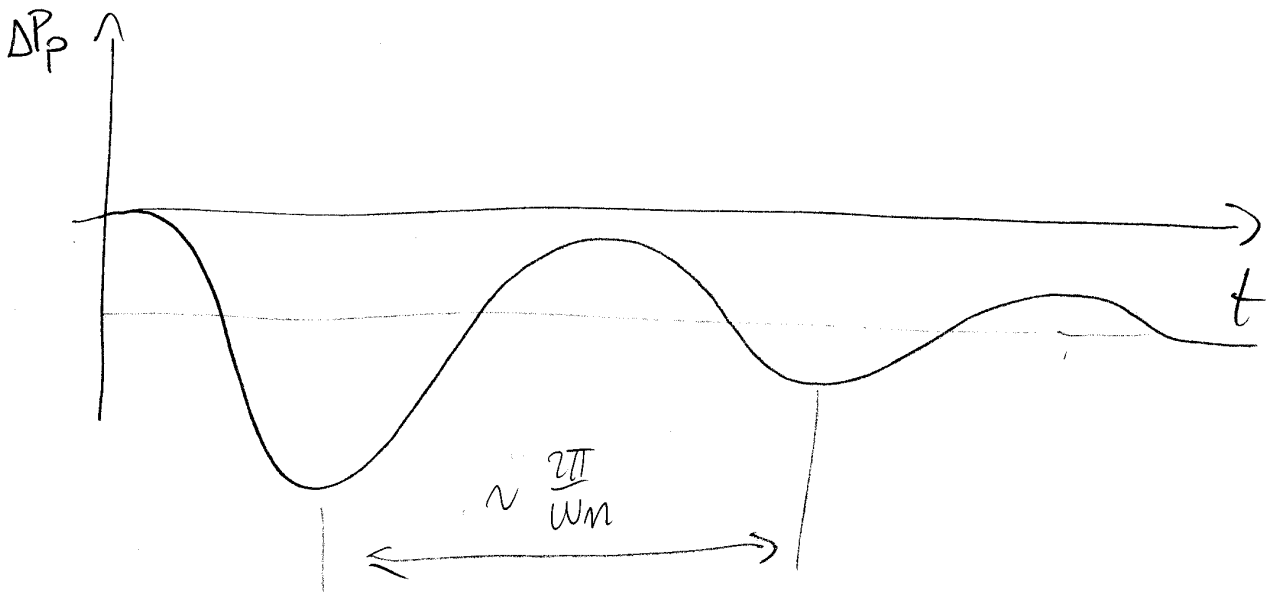
per valori ragionevoli di \bar{u}_c ($\approx 5 \text{ m/s}$)

$$T \approx 0.55 \ll \frac{1}{\omega_m} \text{ cond}$$

- Poichè $I_g \sim I_c$ ma $R_g \ll R_u$, lo zero ha una costante di tempo molto più elevata (\rightarrow ci saranno sovra elongazioni della risposta a scalino)
- ξ assume valori tipici di $0.1 \div 0.2$
- La risposta a scalino su ΔA_u ha quindi il seguente andamento tipico: $\Delta A_u = \Delta A_u \cdot s_{ca}(t)$

$$y(0) = 0 \quad \dot{y}(0) = 0 \quad \ddot{y}(0) < 0 \quad (\text{th. val. iniziali})$$

$$y(\infty) = -\mu_v \frac{R_g R_u}{R_t} \Delta A_u$$



CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(17)

- Attorno a frequenze dell'ordine di 1 rad/s (di interesse per il controllo, la fct ottenuta già pesantemente, per cui potremo analizzare la dinamica di condotta (ai fini del controllo) come se la pressione nel pozzo fosse costante, visto che le due dinamiche sono fortemente disaccoppiate in frequenza
- La dinamica della pressione (e del livello) nel pozzo piezometrico va comunque considerata in caso di forti variazioni di potenza (e quindi di ΔA_u); le oscillazioni potrebbero infatti portare alla tracimazione del pozzo, o al suo svuotamento, con ingresso d'aria in condotta, entrambi fenomeni da evitare
- In questo caso, occorre aumentare il diametro (e quindi la capacità) del pozzo
- Ai fini del controllo di potenza, possiamo quindi assumere

$$\frac{\Delta P_{id}}{\Delta A_u} = \frac{\bar{P}_{id}}{\bar{A}_u} \frac{1 - z\beta Th(s\tau)}{1 + \beta Th(s\tau)}$$

- Possiamo poi valutare le oscillazioni nel pozzo in presenza di controllo di potenza idraulica secondo il seguente ragionamento

- Supponiamo che la potenza idraulica sia controllata. Viste le dinamiche in gioco, si vedrà che il controllo di potenza va a regime in qualche secondo. Un modello approssimato di bassa frequenza può quindi assumere che la potenza idraulica sia imposta, e uguale al set point. Valutiamo la corrispondente variazione di portata in condotta

$$P_{id} = \frac{w_u}{\rho} \cdot (P_u - P_{atm}) \quad ; \text{ linearizzando attorno al punto di lavoro}$$

$$\Delta P_{id} = \bar{P}_{id} \left(\frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} + \frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u - P_{atm}} \right)$$

$$\frac{\Delta P_{id}}{\bar{P}_{id}} = \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} + \frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u - P_{atm}} = \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} + \frac{-\Delta w_u (R_c + R_g)}{\bar{P}_u - P_{atm}} =$$

$$\text{ora } R_u = \frac{z(\bar{P}_u - P_{atm})}{\bar{w}_u} \Rightarrow \bar{P}_u - P_{atm} = \frac{\bar{w}_u R_u}{z} \quad ; \text{ quindi}$$

$$\frac{\Delta P_{id}}{\bar{P}_{id}} = \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} - \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} \frac{z(R_c + R_g)}{R_u} = \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u} \left(1 - z \frac{R_c + R_g}{R_u} \right) \approx \frac{\Delta w_u}{\bar{w}_u}$$

$\ll 1$

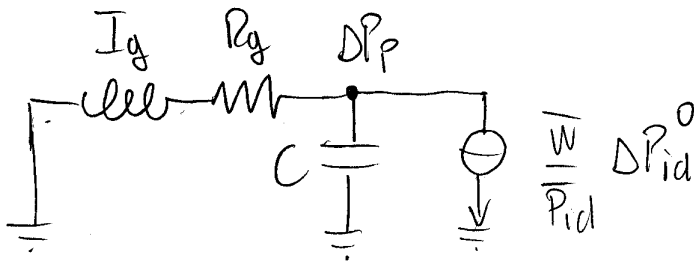
→ il fatto che la caduta di pressione per attrito lungo galleria e condotta sia \ll di quello sull'ugello ci permette di stimare la variazione di portata impressa dal controllo di potenza

$$\Delta w \approx \frac{\bar{w}_u}{\bar{P}_{id}} \Delta P_{id} \approx \frac{\bar{w}_u}{\bar{P}_{id}} \Delta P_{id}^0$$

CONTROLLO GEN. IDROELETTRICO

(19)

- Ai fini della dinamica del pozzo (molto più lenta della dinamica del controllo di potenza) possiamo quindi usare il seguente circuito equivalente



quindi
$$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_{id}^0} \approx - \frac{\bar{W}}{\bar{P}_{id}} \frac{1}{sC} \parallel (R_g + I_g) = - \frac{\bar{W}}{\bar{P}_{id}} \frac{R_g + sI_g}{1 + sR_gC + s^2I_gC}$$

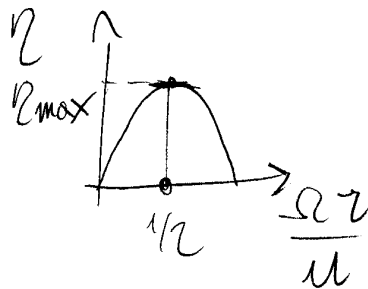
poichè $\Delta P_p = \rho g \Delta y_p$, la dinamica del livello diventa

$$\frac{\Delta y_p}{\Delta P_{id}^0} \approx - \frac{\bar{W}}{\rho g \bar{P}_{id}} \frac{R_g + sI_g}{1 + sR_gC + s^2I_gC}$$

- MODELLO DEL TURBOALTERNATORE

- Ipotesi modellistiche

- Rendimento turbina costante (OK se si lavora attorno al massimo)



- Generatore sincrono con regolazione ideale di tensione
- Trascuriamo le perdite elettromeccaniche (1-2%)
- carichi isotopi dalla rete

- Bilancio di energia meccanica all'albero del turboalternatore

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \Omega^2 \right) = P_m - P_e$$

$$P_m = \eta P_{id}$$

$$P_e = P_e^0 + K(\omega - \omega_0)$$

$$\omega = N_p \Omega$$

J : momento d'inerzia totale

P_m : potenza meccanica utile

P_e : potenza elettrica assorbita dai carichi

Ω : velocità angolare alternatore

ω : pulsazione di rete

se i carichi sono puramente resistivi, $K=0$. Carichi del tipo motore sincrono collegato a pompa o compressore hanno $K > 0$ (all'aumentare della frequenza, aumenta l'assorbimento)

- Equazioni di regime

$$\bar{P}_m = \bar{P}_e = \eta \bar{P}_{id} \text{ (bilancio di potenze rispettato automaticamente)}$$

- Equazioni linearizzate

$$J \dot{\Omega} = P_m - P_e$$

$$-J \bar{\Omega} \Delta \dot{\Omega} = \Delta P_m - P_e$$

$$\frac{J \bar{\Omega}^2}{\bar{P}_m} \delta \omega = \delta P_m - \delta P_e$$

$$\delta P_e = \frac{\Delta P_e}{P_e}$$

$$\delta P_m = \frac{\Delta P_m}{P_m} \quad \delta P_{id} = \frac{\Delta P_{id}}{P_{id}}$$

$$\delta \omega = \frac{\Delta \omega}{\bar{\omega}} = \frac{\Delta \Omega}{\bar{\Omega}}$$

$$\boxed{\delta \omega = \frac{1}{s T_A} (\delta P_m - \delta P_e)}$$

$$T_A = \frac{J \bar{\Omega}^2}{\bar{P}_m}$$

tempo di avviamento: tempo necessario per accelerare il turboalternatore da 0 a $\bar{\Omega}$ applicando la coppia di regime

$$\frac{\Delta P_m}{\bar{P}_m} = \frac{\eta}{\eta} \frac{\Delta P_{id}}{\bar{P}_{id}} \Rightarrow$$

$$\boxed{\delta P_m = \delta P_{id}}$$

$$\Delta P_e = \Delta P_e^0 + k \Delta \omega \Rightarrow$$

$$\boxed{\delta P_e = \delta P_e^0 + \gamma \delta \omega}$$

$$\gamma = \frac{\eta}{\bar{P}_m} \cdot k$$

$$\delta P_{id} = \frac{1 - z \beta \text{th}(s \tau)}{1 + \beta \text{Th}(s \tau)} \delta A_u$$

$$G_{id}(s)$$

CONTROLLO GEN IDROELETTRICO

(22)

- Per piccole variazioni (escludendo le saturazioni di posizione e velocità), l'attuatore idraulico che muove lo spina dell'ugello risponde con una costante di tempo $T_a = 0.2 \div 0.4$ s

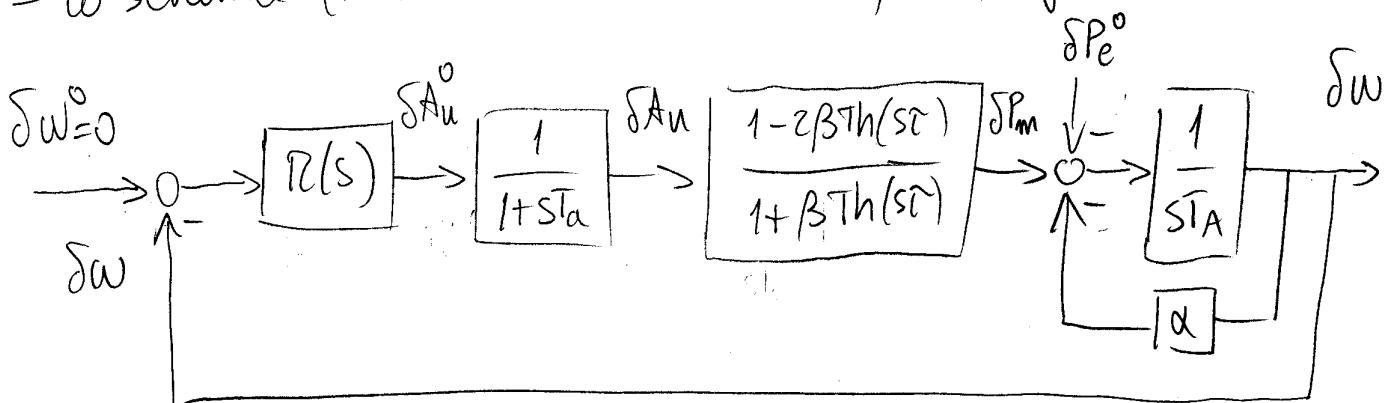
$$\delta A_u = \delta A_u^0 \frac{1}{1 + sT_a}$$

- CONTROLLO DI FREQUENZA, POTENZA

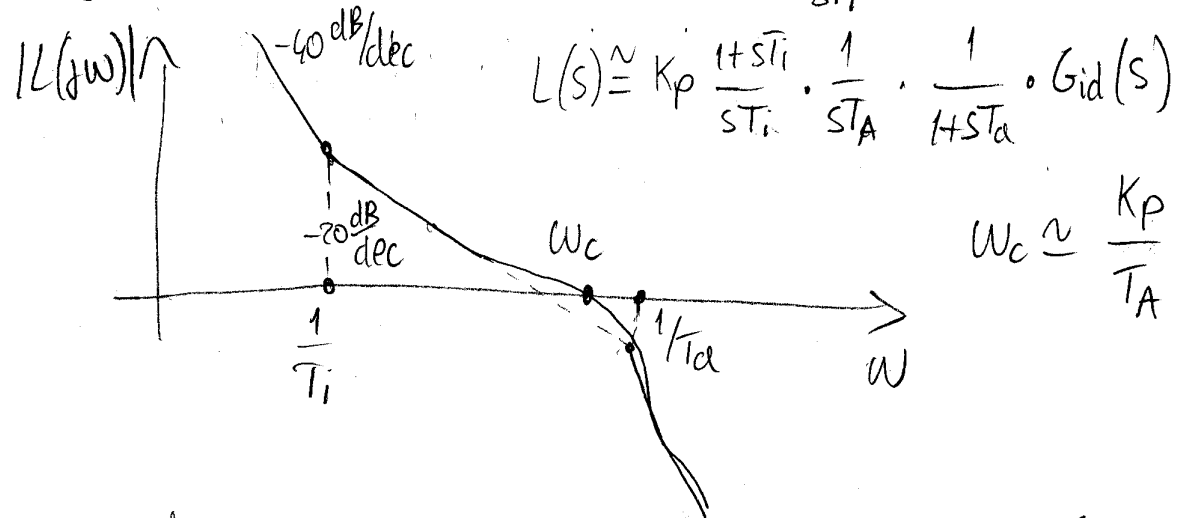
- In un sistema isolato, è indispensabile regolare la velocità di rotazione (che è proporzionale alla frequenza di rete) in modo da garantire una frequenza vicino ai 50 Hz; diversamente si possono provocare guasti anche gravi alle utenze e agli apparati

- A regime, il bilancio di potenza $\bar{P}_m = \bar{P}_e$ è rispettato automaticamente

- lo schema (in variabili normalizzate) è il seguente



- la retroazione introdotta dai carichi reattivi (α) è trascurabile rispetto all'azione del regolatore, e quindi non viene considerata nel seguito. Il regolatore vede quindi una fct complessiva con un integratore, un polo reale negativo e la fct a fase non minima della potenza idraulica
- Se si richiede errore nullo a transitorio esaurito, si può impiegare un regolatore PI: $R(s) = K_p \frac{1+sT_i}{sT_i}$



- la fct della pot. idraulica cambia di poco il modulo ($0 \rightarrow +6dB$)

$$\phi_m = 180^\circ - 90^\circ - 90^\circ + \arctan(\omega_c T_i) - \arctan(\omega_c T_a) + \angle G_{id}(j\omega_c)$$

- se si prende $T_i \gg \frac{1}{\omega_c}$ e $\omega_c \gg \frac{1}{T_a}$, $\phi_m \approx 90 + \angle G_{id}(j\omega_c)$
 si può quindi arrivare a bande ω_c che corrispondono ad uno sfasamento di $-40^\circ \div -50^\circ$

- MODELLO A FLUIDO INCOMPRESSIBILE

- Adottando un modello a fluido incompressibile per la condotta, si ottiene un risultato che è pari all'appross di bassa frequenza ottenuto ponendo $TH(s) \approx sT$ valida per $\omega \ll \frac{1}{T}$

$$T = \beta \hat{c} = \frac{I_c}{R_u}$$

$$G_{id}(s) = \frac{1 - z s T}{1 + s T} = \frac{1 + z s T}{1 + s T} \cdot \frac{1 - z s T}{1 + z s T}$$

- Il modello è chiaramente a fase non minima, anche se la sua fase scende solo fino a -180° , mentre quella esatta scende indefinitamente

$$\neq G(j\omega) = -\alpha \tan(z\omega T) - \alpha \tan(z\omega T)$$

$$\neq G(j\omega) = -50^\circ \quad \text{per} \quad \omega = \frac{0.21}{T}$$

- Se scegliessimo la banda del regolatore in base a tale modello prenderemmo $\omega_c \approx \frac{0.21}{T}$

- Il modello è accurato solo per $\omega \ll \frac{1}{T} = \frac{\beta}{T}$

\Rightarrow se $\beta \gg 0.21$, ω_c rientra nei limiti di validità dell'approssimazione, e quindi la stima di ω_c e ϕ_m fatta col modello incompressibile è corretta