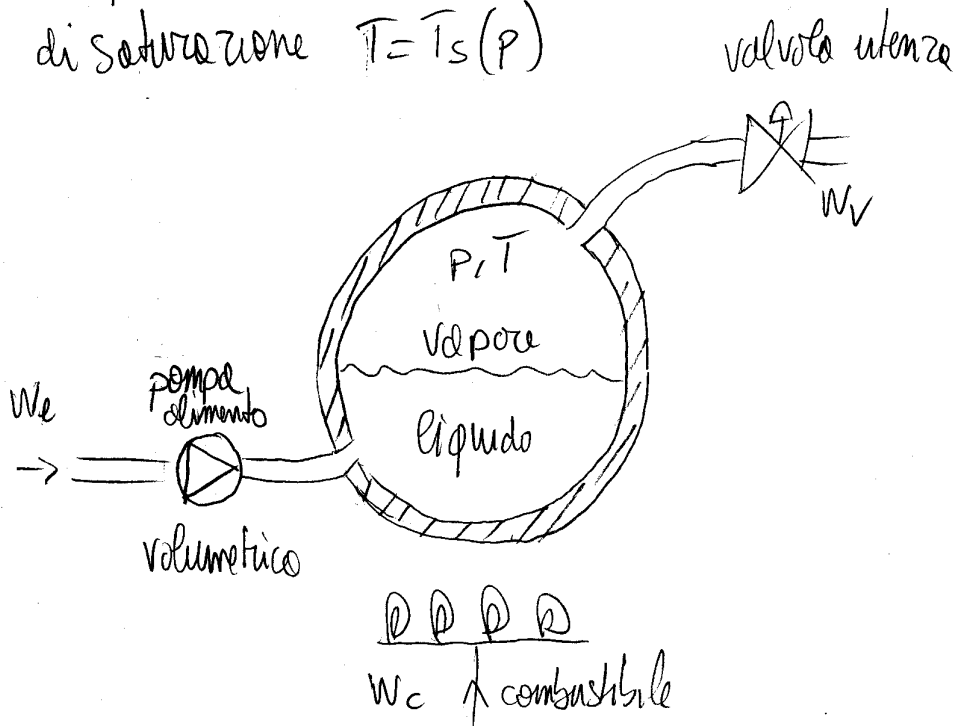


DINAMICA GENERATORI VAPORE

1

- INTRODUZIONE

- Per comprendere quali sono le dinamiche fondamentali dei generatori di vapore, iniziamo considerando un esempio idealizzato, che metterà in evidenza alcuni dei fenomeni fondamentali
- Consideriamo quindi una cavità con pareti metalliche, contenente acqua e vapore all'equilibrio termodinamico. Poiché siamo in presenza di una sola sostanza con due fasi, la regola di Gibbs stabilisce che abbiamo solo una variabile intensiva indipendente - temperatura e pressione sono legate dalla relazione di saturazione $T = T_s(P)$



- La caldaia è alimentata da una pompa volumetrica (o da una pompa controllata in portata, equivalentemente)

DINAMICA GENERATORI VAPORE

(2)

- Una sorgente termica (tipicamente un processo di combustione) genera un flusso di calore, che viene trasmesso alle pareti della caldaia, con un rendimento che supponiamo costante

$$Q_c = \eta \cdot w_c \cdot PCI$$

- L'utenza è rappresentata da una valvola, che regola l'efflusso di vapore saturo verso i processi a valle. Se il rapporto di pressione a cavallo della valvola è superiore al rapporto critico α_c (circa 0.5), nel punto di massimo strozzamento della vena fluida si crea un'onda d'urtoonica, per cui la portata diventa indipendente dalla pressione a valle, e vale

$$w_v = A_v \gamma_c \sqrt{P_{monte} P_{monte}} \left(\frac{P_{monte} - P_{valle}}{P_{monte}} > \alpha_c \right)$$

si noti che, per il vapore saturo, $P_{rs} \cdot P_s \cong K P_s^2$, quindi

$$w_v \cong K_v P$$

- Equazioni di conservazione a regime

$$\bar{w}_e - \bar{w}_v = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{w}_e = \bar{w}_v = \bar{w}$$

$$\bar{w}_e h_e - \bar{w}_v h_{vs} + \bar{Q}_c = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{Q}_c = \bar{w} (h_{vs} - h_e)$$

$h_{vs} = h_{vs}(P)$ entalpia di vapore saturo

DINAMICA GENERATORI VAPORE

(3)

- Si evidenziano da subito due possibili politiche di gestione al variare del carico (cioè della potenza termica trasferita al vapore):

- Pressione costante: Q_c e A_v vengono impiegate entrambe, per modulare il carico mantenendo fissa la pressione in caldaia a \bar{P}^0 (carichi ridotti la valvola viene chiusa parzialmente).

$$\bar{Q}_c = \bar{w} \underbrace{(h_{vs}(\bar{P}^0) - h_e)}_{\text{cost}}$$

Q_c è proporzionale a \bar{w}

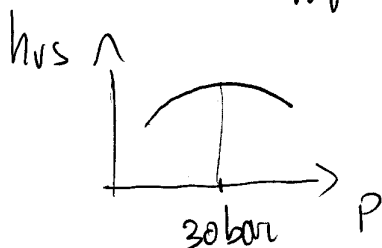
$$\bar{w}_v = K_v \bar{P}^0$$

\bar{w} è proporzionale a K_v

- Pressione variabile: la valvola viene tenuta spalancata al max si modula il carico con Q_c . A carichi ridotti, cala la pressione.

$$\bar{Q}_c = \bar{w} (h_{vs}(\bar{P}) - h_e)$$

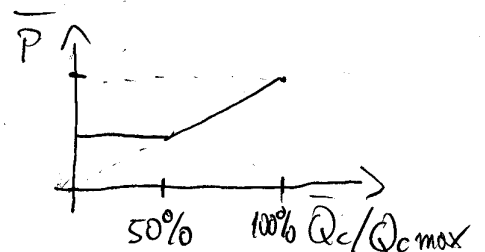
$$\bar{w}_v = K_{vmax} \bar{P}$$



\bar{w} è proporzionale a \bar{P}

Q_c è ~ proporzionale a \bar{w}

- Ovviamente sono possibili politiche miste miste pressione fissa / pressione variabile



DINAMICA GENERATORI VAPORE

(4)

- MODELLO DINAMICO

- Scriviamo le equazioni di conservazione di massa ed energia per il fluido e il metallo. Banelizziamo la φ -d.m., assumendo pressione \sim uniforme in tutta la condotta (trascuriamo $\rho g z$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM}{dt} = w_e - w_v \quad (1) \\ \frac{dE}{dt} = w_e h_e - w_v h_{vs} + Q_{mp} \quad (2) \\ \frac{dE_m}{dt} = Q_c - Q_{mp} \quad (3) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{scambio fluido/metallo} \\ Q_{mp} = \gamma S (T_m - T) \end{array}$$

- Supponendo che γ sia elevato, grazie al rimescolamento e all'ebollizione superficiale sulle pareti, possiamo assumere $T_m \sim T$, e sommare le due eq. dell'energia

$$\frac{d(E + E_m)}{dt} = w_e h_e - w_v h_{vs} + Q_c \quad (4)$$

- Scriviamo l'equazione dell'energia netta $(4) - h_e \cdot (1)$

$$\frac{dE}{dt} = \underbrace{\frac{dE}{dt} + \frac{dE_m}{dt}}_{\uparrow \text{accumulo}} - h_e \frac{dM}{dt} = - \underbrace{w_v (h_{vs} - h_e)}_{\uparrow \text{potenza generata}} + \underbrace{Q_c}_{\uparrow \text{potenza immessa}}$$

DINAMICA GENERATORI VAPORE

(5)

- Esprimiamo tutte le derivate in funzione delle variabili di stato P ed α

$$\alpha = \frac{V_v}{V} \quad (\text{grado di vuoto})$$

$$M = M_e + M_v = \rho_e V_e + \rho_v V_v =$$

$$= V [(1-\alpha) \rho_{es}(P) + \alpha \rho_{vs}(P)] = M(P, \alpha)$$

$$E = E_e + E_v = e_e M_e + e_v M_v =$$

$$= V [(1-\alpha) \rho_{es}(P) e_{es}(P) + \alpha \rho_{vs}(P) e_{vs}(P)] = E(P, \alpha)$$

$$E_m = c_m M_m T_m = c_m M_m T_s(P) = E_m(P)$$

$$\frac{d\pi}{dt} = \frac{\partial \pi}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial \pi}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} = & \left(\frac{\partial E}{\partial P} + \frac{\partial E_m}{\partial P} - h_{es}(P) \frac{\partial \pi}{\partial P} \right) \frac{dP}{dt} + \\ & + \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} - h_{es}(P) \frac{\partial \pi}{\partial \alpha} \right) \frac{d\alpha}{dt} \end{aligned}$$

- Se $h_e \approx h_{es}$ (acqua alimento preriscaldato), si verifica che l'energia netta dipende essenzialmente dalla pressione, e lo stesso dal grado di vuoto

DINAMICA GENERATORI VAPORE

(6)

$$\frac{dE_t}{dt} = \frac{\partial E_t}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{\partial E_t}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{\partial E_t}{\partial P} \frac{dP}{dt}$$

$$\frac{d\dot{W}}{dt} = \frac{\partial \dot{W}}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{\partial \dot{W}}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{\partial \dot{W}}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

- DINAMICA DELLA PRESSIONE

- l'accumulo di energia netto è essenzialmente legato alla pressione

$$\frac{dE_t}{dt} \approx \frac{\partial E_t}{\partial P} \frac{dP}{dt} = Q_c - P_g$$

$$P_g = W_v (h_{vs}(P) - h_e) = K_v P \underbrace{(h_{vs}(P) - h_e)}_{\text{circo cost}}$$

- ESERCIZIO A PRESSIONE VARIABILE

- Valutiamo la dinamica nell'esercizio a pressione variabile

$K_v = K_{vmax} = \text{cost}$, per piccole variazioni attorno all'equilibrio

$$\frac{d\Delta E_t}{dt} = \Delta Q_c - \Delta P_g$$

con $\Delta E_t \approx \frac{\partial E_t}{\partial P} \Delta P$ $\Rightarrow \Delta P_g = \frac{\partial P_g / \partial P}{\partial E_t / \partial P} \Delta E_t$

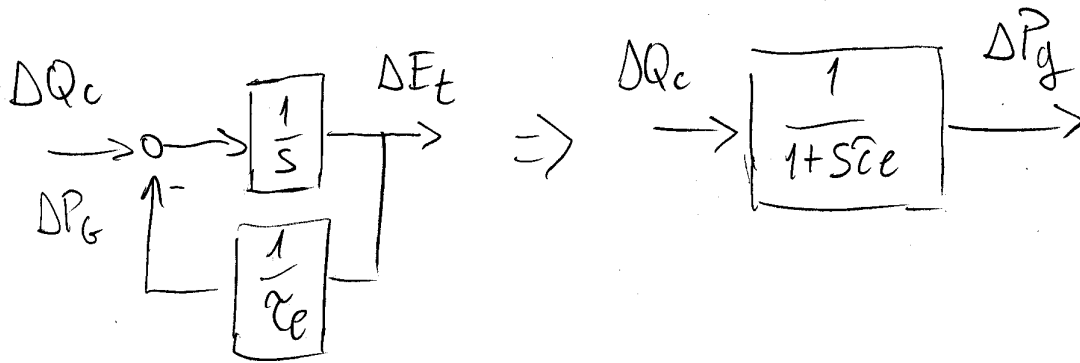
$$\Delta P_g = \frac{\partial P_g}{\partial P} \Delta P$$

$$\tau_e = \frac{\partial E_t / \partial P}{\partial P_g / \partial P} \text{ tempo di accumulo dell'energia} = \frac{1}{\tau_c} \Delta E_t$$

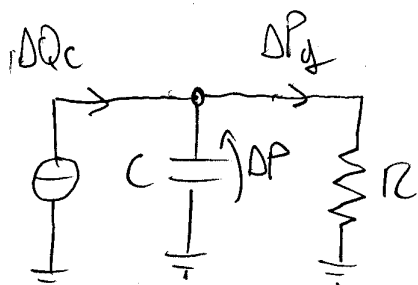
DINAMICA GENERATORI VAPORE

(7)

- Interpretazione (1) (schema a blocchi)



- Interpretazione (2) (circuito equivalente)



$$V = \Delta P$$

$$I = P_g, Q_c$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial P} \cdot \frac{d\Delta P}{dt} = \Delta Q_c - \frac{\partial P_g}{\partial P} \Delta P$$

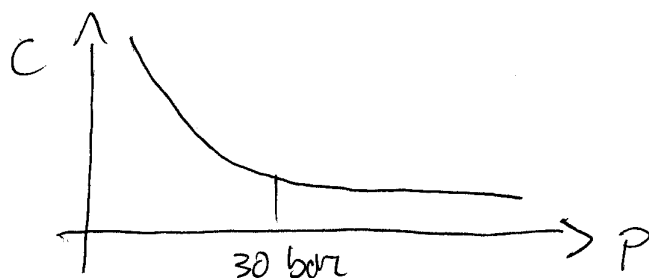
$$R = \frac{1}{\frac{\partial P_g}{\partial P}} \approx \frac{1}{K_{vmax}(h_{vs} - h_e)}$$

$$C \frac{d\Delta P}{dt} = \Delta Q_c - \frac{1}{R} \Delta P$$

$$C = \frac{\partial E_t}{\partial P} ; \tau_c = RC$$

- La produzione di energia P_g segue la potenza immessa con una costante di tempo $\tau_c = 200 \div 1000$ s (lenta)

- Al diminuire del carico (equivaldi di P e w_v), R resta circa costante, mentre C tende ad aumentare, soprattutto sotto i 30 bar

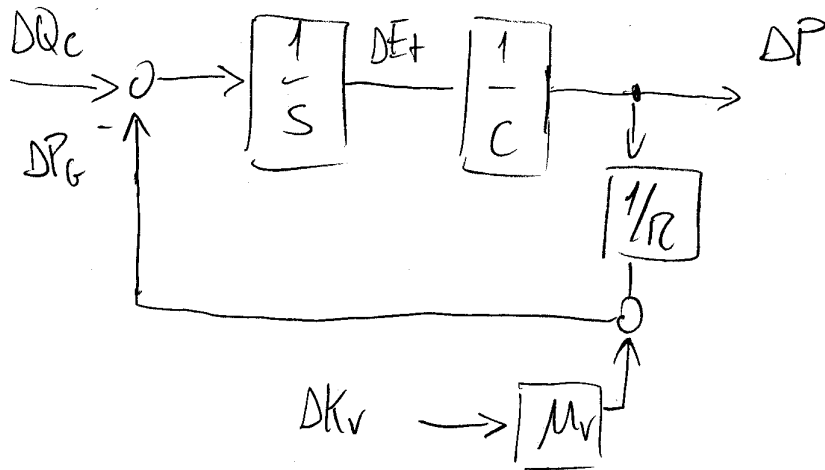


DINAMICA GENERATORI VAPORE

(8)

- ESERCIZIO A PRESSIONE COSTANTE

- In questo caso occorre agire anche sull'apertura della valvola. Lo schema a blocchi della dinamica alle variazioni diventa



$$\mu_v = \frac{\partial P_g}{\partial K_v} = \bar{P}(\bar{h}_{vs} - h_e)$$

- Stavolta è possibile variare istantaneamente la potenza prodotta: se voglio una variazione a scalino ΔP_g^0 , basta porre

$$\begin{aligned} \Delta Q_c &= \Delta P_g^0 \\ \Delta K_v &= \frac{1}{\mu_v} \Delta P_g^0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \Delta P &= 0 \\ \Delta P_g &= \Delta P_g^0 \end{aligned}$$

- Ovviamente questo può essere fatto con una regolazione feedback, feedforward o mista

DINAMICA GENERATORI VAPORE

(9)

- CONFRONTO PRESS. COST / PRESS VAR

• Pressione costante

- (+) Possibile variare rapidamente la potenza prodotta
- (+) Temperatura in caldaia costante al variare del carico \rightarrow no stress termici
- (-) A carichi ridotti il consumo delle pompe alimento rimane inutilmente elevato

• Pressione variabile

- (-) Variazioni rapide della potenza prodotta richiedono forti sovraelevazioni di Q_c (over firing)
- (-) Temperatura variabile in caldaia \rightarrow stress termici
- (+) Ridotti consumi pompe a carico parziale
- (+) Assenza di valvole vapore regolanti

- DINAMICA DEL LIVELLO (GRADO DI VUOTO)

$$\frac{dM}{dt} \approx \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = w_e - w_v$$

$$M = V [\alpha p_{vs} + (1-\alpha) p_{ve}]$$

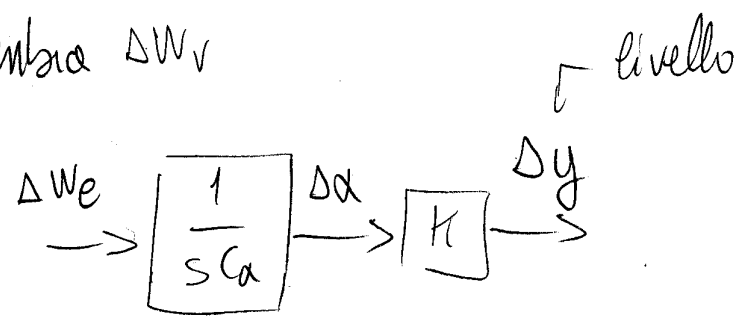
$$\frac{\partial M}{\partial \alpha} = V (p_{vs} - p_{ve}) \approx -V p_{ve} = -\frac{V_e}{1-\alpha} p_{ve} = -\frac{M_e}{1-\alpha}$$

$$C_\alpha \frac{d\alpha}{dt} = W_e - W_v$$

- alle variazioni, si ottiene $C_\alpha \frac{d\Delta\alpha}{dt} = \Delta W_e - \Delta W_v$

- Se diamo una variazione solo a ΔW_e , la pressione (che dipende essenzialmente da Q_c) non cambia
 → non cambia ΔW_v

- Morale:



→ la dinamica è la stessa del serbatoio a pelo libero