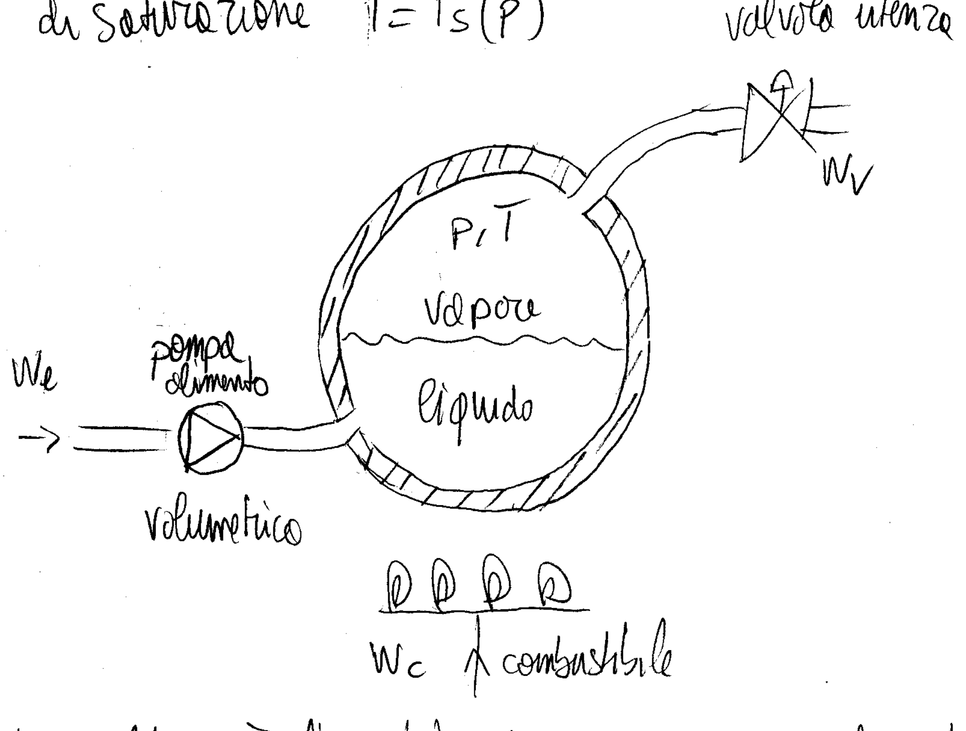
DINAMICA GENERATORI VAPORE

- 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. Poichè 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

- 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'afflusso di vapor saturo verso i processi a valle. Se il rapporto di pressione a cavallo della valvola è superiore al rapporto critico x_c (circa 0.5), nel punto di massimo strozzamento della vena fluida si crea un'onda d'urto sonica, per cui la portata diventa indipendente dalla pressione a valle, e vale

$$w_v = A_v \chi_c \sqrt{\rho_{monte} P_{monte}} \quad \left(\frac{P_{monte} - P_{valle}}{P_{monte}} > x_c \right)$$

si noti che, per il vapor saturo, $\rho_{vs} \cdot P_s \simeq K P_s^2$, quindi

$$w_v \cong K_v P$$

- Equazioni di conservazione <u>a regime</u>

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

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

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

DINAMICA GENERATORI VAPORE

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

  - <u>Pressione costante</u>: 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).

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

Q_c è proporzionale a $\bar{w}$

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

$\bar{w}$ è proporzionale a K_v

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

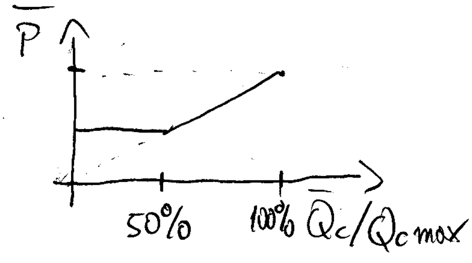
$$\bar{Q}_c = \bar{w}\,(h_{vs}(\bar{P}) - h_e)$$

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

$\bar{w}$ è proporzionale a $\bar{P}$

Q_c è $\sim$ proporzionale a $\bar{w}$

- Ovviamente sono possibili politiche miste pressione fissa / pressione variabile



DINAMICA GENERATORI VAPORE

- MODELLO DINAMICO

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

$$\begin{cases} \dfrac{dM}{dt} = w_e - w_v & (1) \\ \dfrac{dE}{dt} = w_e h_e - w_v h_{vs} + Q_{mf} & (2) \\ \dfrac{dE_m}{dt} = Q_c - Q_{mf} & (3) \end{cases}$$

scambio fluido/metallo

$$Q_{mf} = \gamma S (T_m - T)$$

- Supponendo che γ sia elevato, grazie al rimescolamento e all'ebollizione superficiale sulle pareti, possiamo assumere $T_m \simeq T$, 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 $(4) - h_e \cdot (1)$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{dE_t}{dt} = \left(\frac{\partial E}{\partial P} + \frac{\partial E_m}{\partial P} - h_{es}(P)\frac{\partial M}{\partial P}\right)\frac{dP}{dt} +$$
$$+ \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} - h_{es}(P)\frac{\partial M}{\partial \alpha}\right)\frac{d\alpha}{dt}$$

- Se $h_e \simeq h_{es}$ (acqua alimento preriscaldata), significa che l'energia netta dipende essenzialmente dalla pressione, e la massa dal grado di vuoto

DINAMICA GENERATORI VAPORE

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

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial M}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \simeq \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

- DINAMICA DELLA PRESSIONE
  - L'accumulo di energia netto è essenzialmente legato alla pressione

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

$$P_g = w_v \left(h_{vs}(P) - h_e\right) = K_v P \underbrace{\left(h_{vs}(P) - h_e\right)}_{\text{circa cost}}$$

- ESERCIZIO A PRESSIONE VARIABILE
  - Valutiamo la dinamica nell'esercizio a pressione <u>variabile</u>
    $K_v = K_{vmax} = cost$, per piccole variazioni attorno all'equilibrio

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

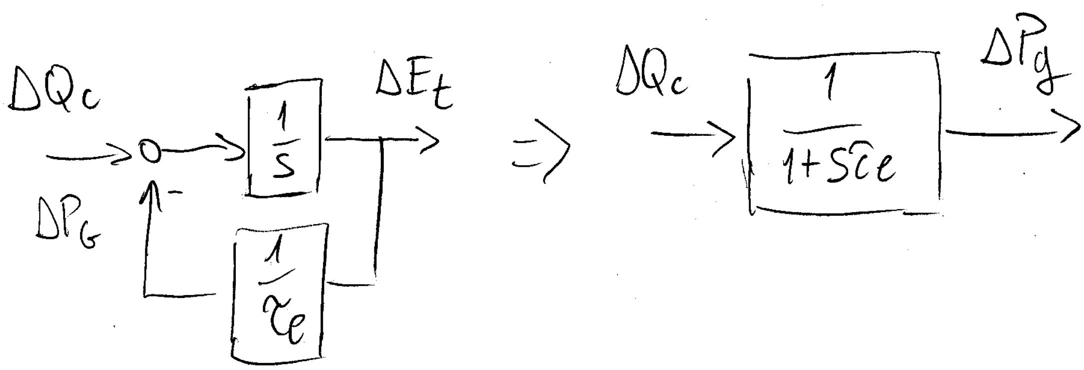
con

$$\Delta E_t \simeq \frac{\partial E_t}{\partial P} \Delta P \qquad \Delta P_g = \frac{\partial P_g}{\partial P} \Delta P \quad \Rightarrow \quad \Delta P_g = \frac{\partial P_g / \partial P}{\partial E_t / \partial P} \Delta E_t = \frac{1}{\tau_e} \Delta E_t$$

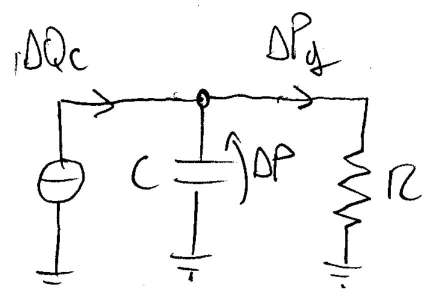
$$\tau_e = \frac{\partial E_t / \partial P}{\partial P_g / \partial P}$$ tempo di accumulo dell'energia

DINAMICA GENERATORI VAPORE

- Interpretazione ① (schema a blocchi)



- Interpretazione ② (circuito equivalente)



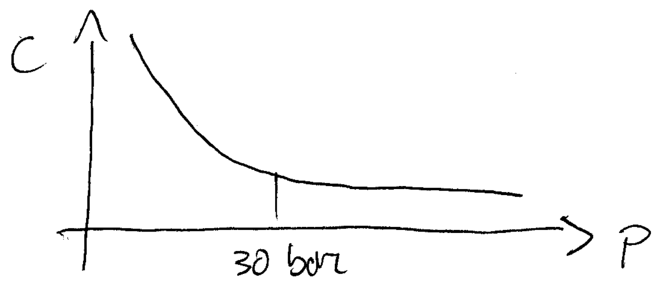
$V = \Delta P$

$I = P_g, Q_c$

$$\frac{\partial E_t}{\partial P}\cdot\frac{d\Delta P}{dt} = \Delta Q_c - \frac{\partial P_g}{\partial P}\Delta P \qquad R = \frac{1}{\partial P_g/\partial P} \simeq \frac{1}{K_{vmax}(h_{vs}-h_e)}$$

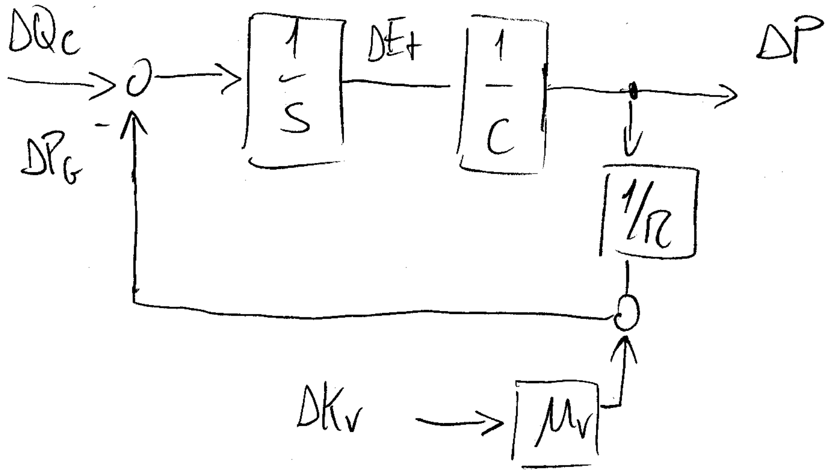
$$C\frac{d\Delta P}{dt} = \Delta Q_c - \frac{1}{R}\Delta P \qquad C = \frac{\partial E_t}{\partial P};\ \boxed{\tau_e = RC}$$

- La produzione di energia P_g segue la potenza immessa con una costante di tempo $\tau_e = 200 \div 1000$ s (lenta)
- Al diminuire del carico (e quindi di P e w_v), R resta circa costante, mentre C tende ad aumentare, soprattutto sotto i 30 bar



- ESERCIZIO A PRESSIONE COSTANTE

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



$$\mu_V = \frac{\partial P_g}{\partial K_V} = \bar{P}(h_{vs} - h_e)$$

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

$$\Delta Q_c = \Delta P_G^0 \qquad \Rightarrow \qquad \Delta P = 0$$

$$\Delta K_V = \frac{1}{\mu_V} \Delta P_G^0 \qquad \qquad \Delta P_G = \Delta P_G^0$$

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

DINAMICA GENERATORI VAPORE

- CONFRONTO PRESS. COST / PRESS VAR

  - Pressione costante

    (+) Possibile variare rapidamente la potenza prodotta

    (+) Temperatura in caldaia è costante al variare del carico -> no stress termici

    (−) A carichi ridotti il consumo delle pompe alimento rimane inutilmente elevato

  - Pressione variabile

    (−) Variazioni rapide della potenza prodotta richiedono forti sovraelongazioni di Q_c (overfiring)

    (−) Temperatura variabile in caldaia -> stress termici

    (+) Ridotti consumi pompe a carico parziale

    (+) Assenza di valvole vapore regolanti

- DINAMICA DEL LIVELLO (GRADO DI VUOTO)

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

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

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

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

- 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

livello

- Morale:

$$\xrightarrow{\Delta W_e} \boxed{\frac{1}{sC_\alpha}} \xrightarrow{\Delta \alpha} \boxed{K} \xrightarrow{\Delta y}$$

→ la dinamica è la stessa del serbatoio a pelo libero