

IMPIANTO TERMOELETRICO

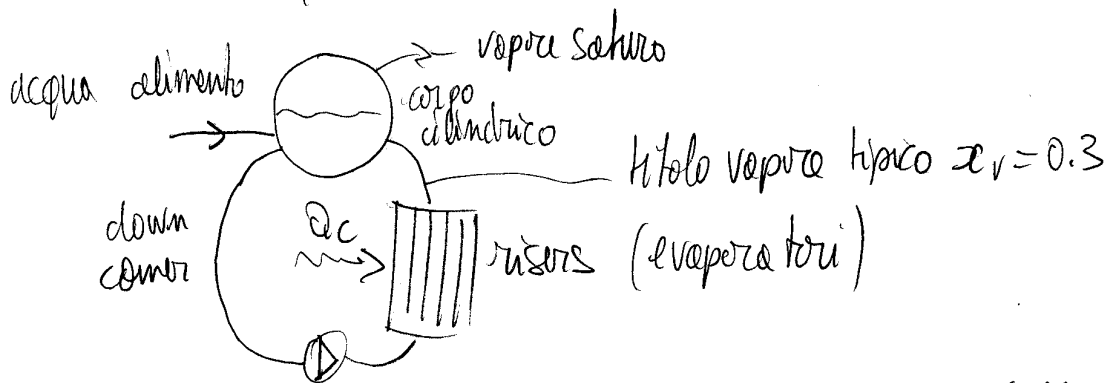
1

- TIPOLOGIE GENERATORI DI VAPORE

- Generatori di vapore per usi industriali (termici)
- Generatori accoppiati a turbine con condensatore (generazione di energia elettrica)
- Impianti di cogenerazione (utilizzo misto)

- Tipologie di caldaia

- A tubi di fumo (piccola taglia): la caldaia è attraversata da tubi percorsi dai fumi della combustione si genera vapore saturo.
- A circolazione (grande taglia): la superficie dei tubi interni diventa insufficiente \rightarrow si portano fuori i tubi d'acqua



a seconda dei casi la circolazione può essere naturale (effetto termosifone) o forzata (pompe di circolazione)

Dai riser esce una miscela bifase che viene separata nel corpo cilindrico

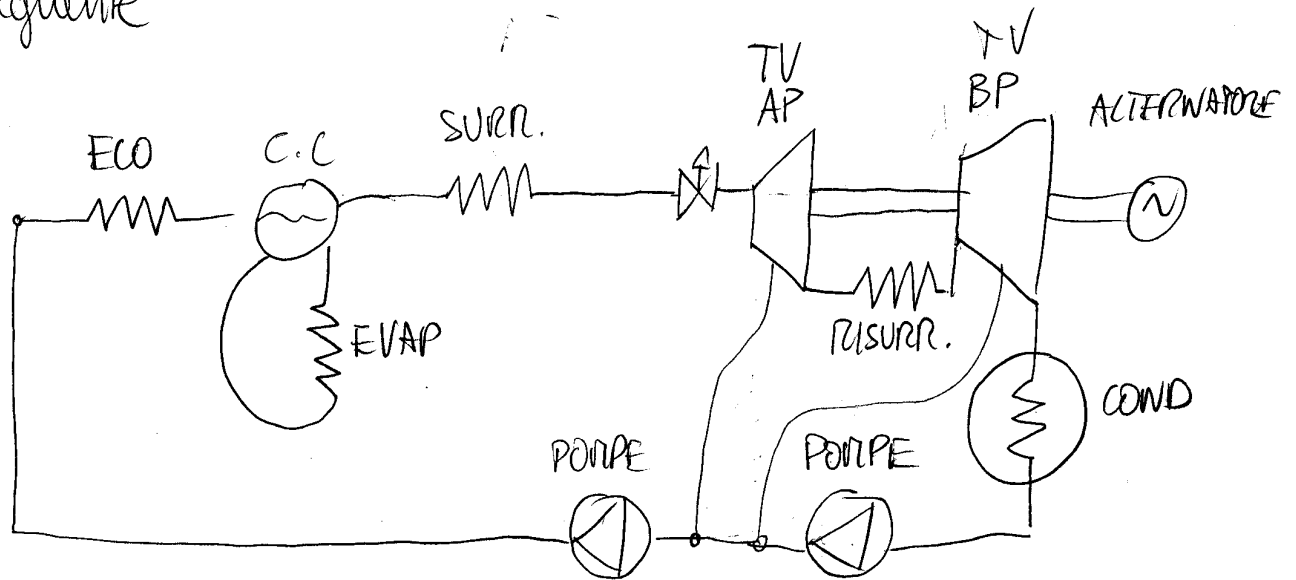
- Ad attraversamento diretto (once-through) l'acqua evapora completamente nel fascio di tubi



IMPIANTO TERMOELETTRICO

(2)

- CICLO RANKINE CON CALDAIA A CIRCOLAZIONE
- Uno schema di principio del circuito acqua/vapore è il seguente



- L'acqua viene preriscaldata negli economizzatori, sfruttando i fumi a bassa temperatura vicino al camino. L'evaporazione avviene nella caldaia a circolazione. Il vapore viene surriscaldato fino a $550^{\circ} \div 600^{\circ} \text{C}$ ed espeso nella turbina ad alta pressione. Viene poi ri-surriscaldato, ed espeso nella turbina a bassa pressione. Allo scarico si trova il condensatore, che riporta il fluido allo stato liquido, e quindi un sistema di pompe che lo portano alla pressione di caldaia ($90 \div 150 \text{ bar}$)
- L'acqua alimento può anche essere preriscaldata da vapore spillato dagli stadi intermedi di turbina

IMPIANTO TERZO ELETTRICO

(3)

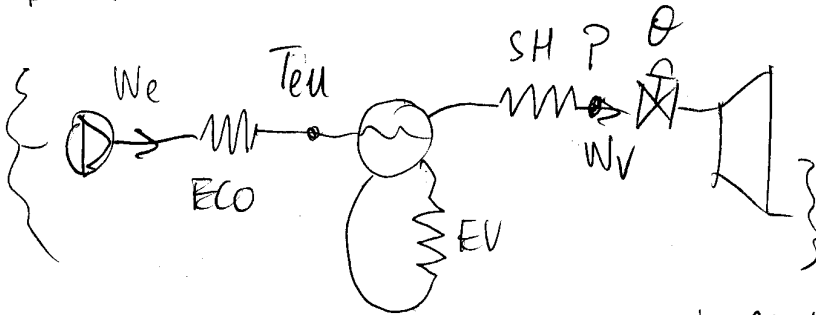
- Gli scambiatori (ECO, EVAP, SURR/RISURR) ricevono calore da fumi caldi, risultato di un processo di combustione:
 - caldaie a gas/olio combustibile
 - termocombustori (biomasse, rifiuti urbani)
 - scorcio di turbine a gas (cicli combinati)
- Gli impianti ad attraversamento diretto sono privi del corpo cilindrico; il confine tra la zona di preriscaldamento, evaporazione e surriscaldamento è meno definito, portando a difficoltà di esercizio maggiori; per contro, la dinamica di pressione è più larga, ed è possibile superare la pressione critica (221 bar per l'acqua) ottenendo un rendimento termodinamico + elevato
- Per motivi di tempo, ci concentriamo sul controllo del circuito acqua/vapore degli impianti a circolazione.

IMPIANTO TERMOELETTRICO

④

- DINAMICA DELLA PRESSIONE

- Possiamo delimitare il circuito di collettore tra l'uscita delle pompe alimento e l'emissione della turbina vapore di AP



- Il sistema di pompe è di solito controllato in portata, e quindi assimilabile ad un generatore ideale di portata; la temperatura di uscita degli ECO T_{eu} è lentamente variabile a causa delle elevate inerzie di economizzatori e condensatore - lo consideriamo V costante per semplicità
- La caldaia a circolazione è percorso da liquido saturo, liquido evaporante e vapore; il fluido si trova quindi tutto alla temperatura di saturazione $T_{sat}(P)$ - possiamo assumere valida l'analisi del generatore idealizzato vista in precedenza estendendo il volume di controllo ai riser e downcomer, e interpretando α come grado di vuoto totale
- I surriscaldatori sono dimensionati in modo che la perdita di pressione sia di qualche bar (su circa 100) a pieno carico - questo ha sicuramente un effetto sensibile sul rendimento termodinamico del ciclo, ma è in primo battuta trascurabile rispetto al controllo anche l'accumulo di massa è trascurabile

IMPIANTO TERMOELETRICO

(5)

- In prima approssimazione, la portata del vapore che entra in turbina vale

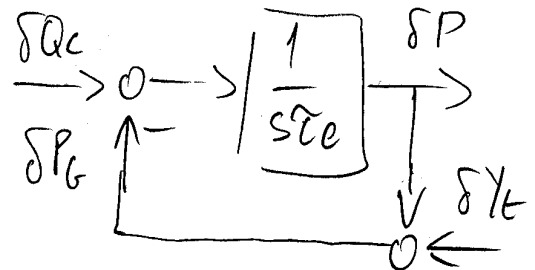
$$W_v = K_v(\theta) \sqrt{\rho P}$$

\hat{K}_v condizioni a monte valvole ammissione
 \hat{K}_v coeff di efflusso turbina, inclusiva di valvole di ammissione

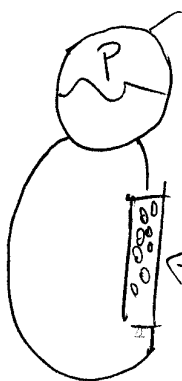
e non dipende dalle condizioni a valle (approx valida per elevato numero di stadi e rapporto di pressione). Se la temperatura del vapore è costante, possiamo scrivere

$$W_v = Y_t(\theta) \cdot P$$

→ L'analisi condotta sul generatore idealizzato rimane valida: in termini di var. normalizzate, si trova lo schema:



- DINAMICA DEL LIVELLO



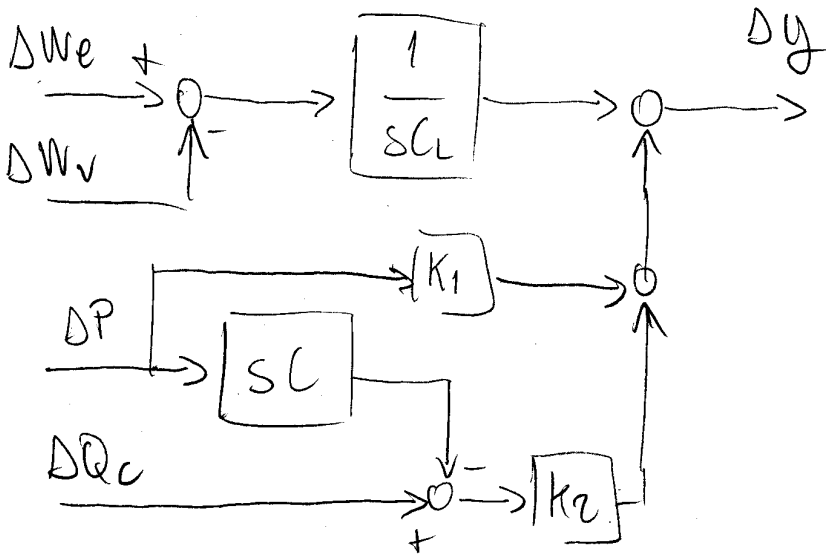
- I riser contengono una miscela bifase; quindi sono caratterizzati da un certo grado di vuoto α

- Al variare della pressione P e della potenza termica Q_c , il grado di vuoto cambia

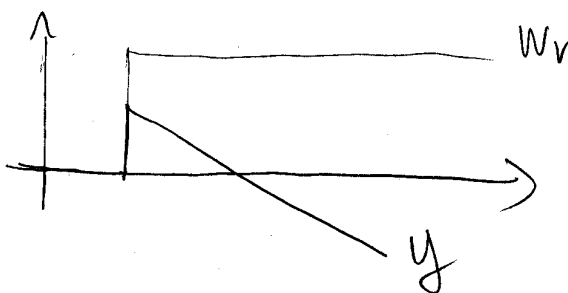
IMPIANTO TERMOELETRICO

(6)

- Corrispondentemente, una parte del liquido viene trasferita dal verso il corpo cilindrico, provocando una variazione del livello
- Una analisi in bassa frequenza del modello linearizzato porta alla seguente dinamica del livello y nel corpo cilindrico



- le portate alimento e vapore hanno un'effetto di tipo integrale
- la potenza termica ha un effetto diretto (\rightarrow aumento del titolo di vapore nel riser)
- la pressione ha un effetto diretto (compressibilità) e un effetto che dipende dalla derivata (effetto "champagne")
- risposta a scatto di w_v (o di P_g)



all'inizio prevale l'effetto della derivata di P , poi prevale l'effetto integrale

IMPIANTO TERMOELETTRICO

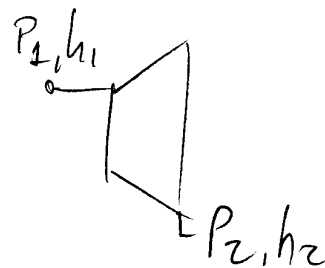
(7)

- DINAMICA DELLA POTENZA GENERATA IN TURBINA

- La potenza generata da una turbina a vapore può essere espressa come

$$P_t = W_v \cdot (h_1 - h_2) =$$

$$= W_v \cdot \eta_{iso} \cdot (h_1 - h_{2iso})$$



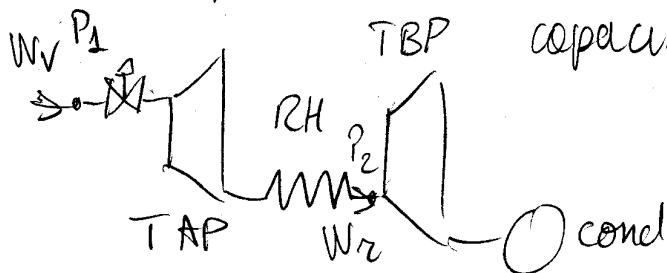
$$h_{2iso} = h(P_2, S(P_1, h_1)) \quad \text{entalpia di una trasformazione isentropica}$$

- La trasformazione in realtà non è isentropica, a causa degli attriti e delle irreversibilità. Per variazioni di carico tra il 50% e il 100%, nelle grandi turbine $\eta \approx 0.92$. Per semplicità assumiamo $h_1 \approx \text{cost}$ (la temperatura del vapore saturo è regolata) e $h_{2iso} \approx \text{cost}$

$$P_t = P_t^0 \cdot \frac{W_v}{W_v^0}$$

- Il volume del vapore all'intorno della turbina è modesto, quindi possiamo banalizzare la dinamica e usare la relazione algebrica anche in transitorio

- Questo però non vale per la turbina di BP, a causa della capacità dei riscaldatori



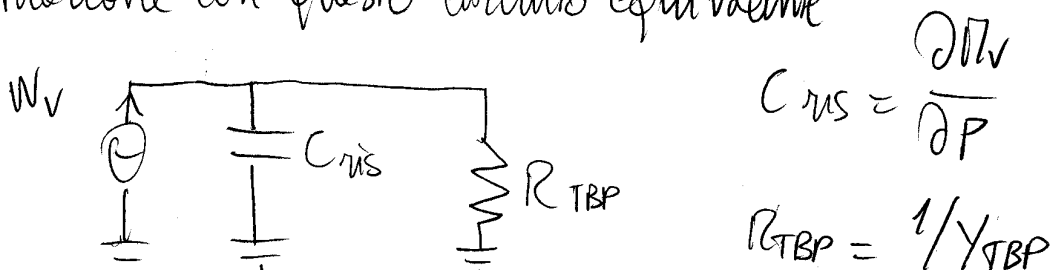
IMPIANTO TERMO ELETTRICO

(8)

- La portata W_V dipende solo dalle condizioni a monte turbina

$$W_V = Y_{TAP}(\theta) \cdot P_1$$

quindi la TAP allo scarico si comporta come un generatore ideale di portata. Per la TBP vale una relazione analoga; se trascuriamo le perdite di carico nel surriscaldatore, questo si comporta come un serbatoio di volume V . Possiamo descrivere la situazione con questo circuito equivalente



$$C_{ris} = \frac{\partial W}{\partial P}$$

$$R_{TBP} = 1/Y_{TBP}$$

- Totale:

$$W_z = W_V \frac{1}{1 + s\hat{\tau}_z}$$

$$\hat{\tau}_z = R_{TBP} C_{ris} = 3 \div 10 \text{ s}$$

$$P_{TBP} = P_{TBP}^0 \cdot \frac{W_z}{W_0} = P_{TBP}^0 \cdot \frac{W_V}{W_0} \cdot \frac{1}{1 + s\hat{\tau}_z}$$

- In definitiva, possiamo descrivere approssimativamente il processo di generazione del gruppo AP+BP con le equazioni

$$W_V = Y_{TAP}(\theta) P_1$$

$$P_t = P_t^0 \cdot \frac{W_V}{W_0} \cdot \left(\mu_{AP} + \frac{\tau_{MAP}}{1 + s\hat{\tau}_z} \right) = P_t^0 / W_0 \cdot W_V \cdot \frac{1 + s\hat{\tau}_z'}{1 + s\hat{\tau}_z}$$

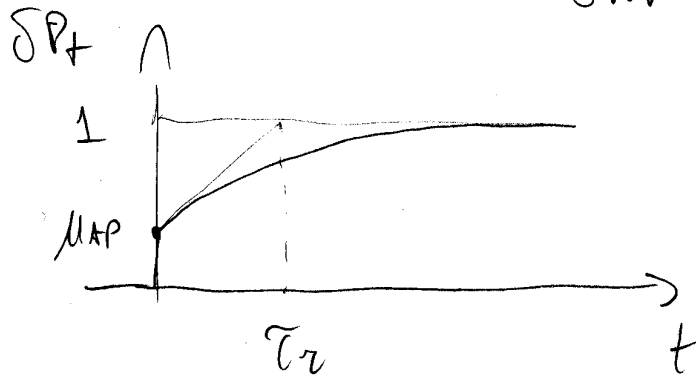
$$\mu_{AP} = \frac{P_{TAP}^0}{P_t^0} = 0.2 \div 0.4$$

$$\hat{\tau}_z' = \mu_{AP} \hat{\tau}_z$$

IMPIANTO TERMOELETRICO

(9)

- Risposta a scalino di $\frac{\delta P_t}{\delta W_v} = \frac{\Delta P_t}{W_v} \cdot \frac{W_v^0}{P_t^0}$



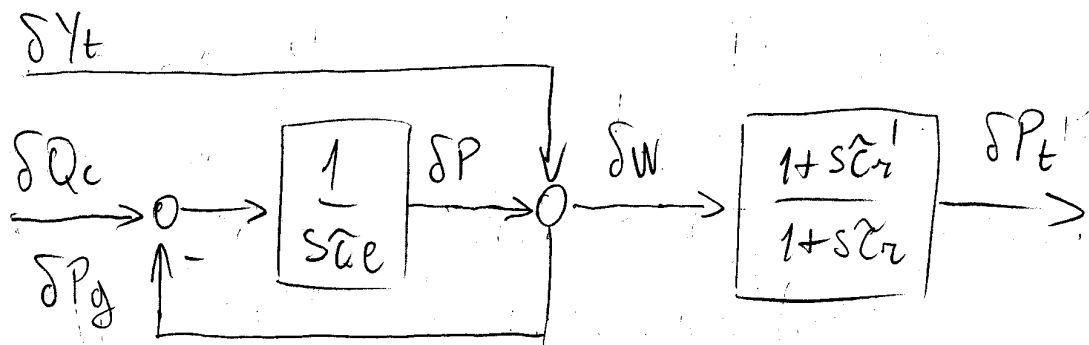
- Nota 1 è di sicuro interesse accoppiare questo risultato con l'analisi del generatore a circolazione vista in precedenza dove consideravamo: $P_g = \frac{W_v (h_{vs}(P) - h_e)}{\eta_{cost}}$ la potenza generata

- la potenza generata dalla turbina vale

$$P_t = \frac{W_v (h_{vsurr}(T_{surr}) - h_{iso}(h_{vsurr}, P_{cond}))}{\eta_{cost}}$$

per variazioni di carico 50% - 100%, se la temperatura di surriscaldamento è controllata

→ P_g e P_t sono proporzionali a W_v ; schema complessivo:



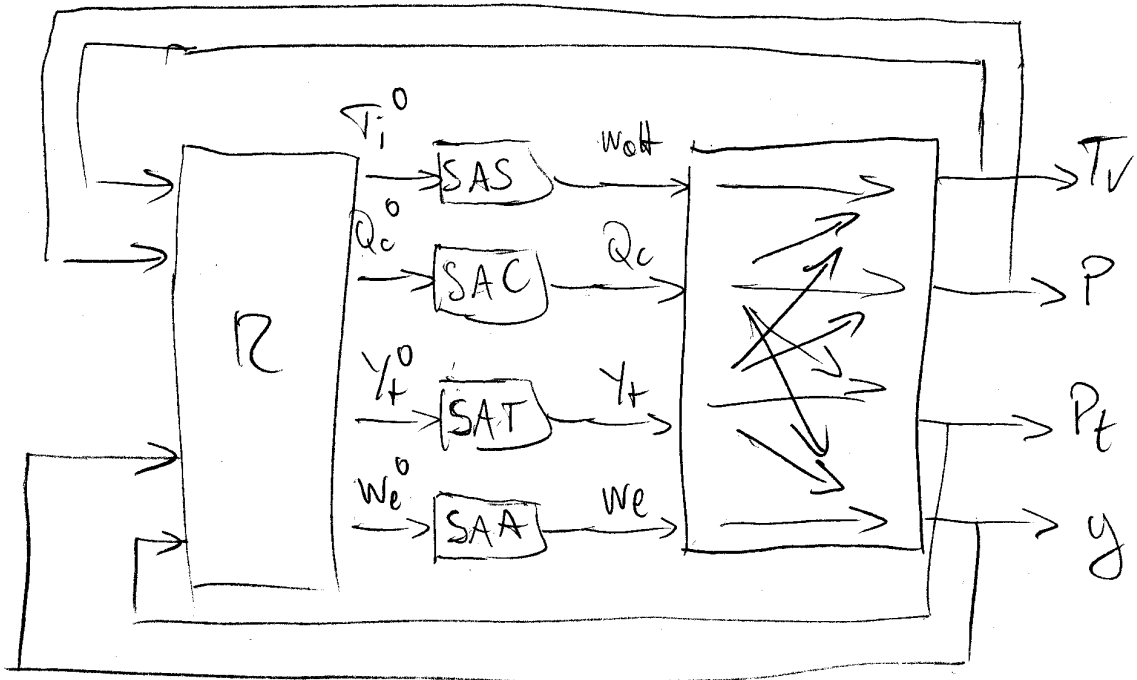
IMPIANTO TERMOELETTRICO

(10)

- Nota 2 : In un ampio intervallo di carichi, la potenza P_t generata dalla turbina a vapore risulta circa proporzionale alla cosiddetta pressione di camera ruota, o valle delle valvole di regolazione e degli ugelli del primo stadio. Tale segnale può quindi essere usato come misura indiretta della potenza meccanica erogata dalla turbina, sia in rete sia su carichi isolati.

- CONTROLLO DI UN GENERATORE TERMOELETRICO

- Schema di principio



P, T_v : pressione e temperatura vapore ammissione turbina

P_t : potenza generata turbina

y : livello corpo cilindrico

w_{att} : portata all'impoveritori

Q_c : potenza termica bruciatori

Y_+ : ammettenza turbina

w_e : portata alimento

- A livello più basso si trovano il sistema di controllo acqua alimento (SAA), il sistema di controllo valvole turbina (SAT) il sistema di controllo combustione (SAC) e il sistema di controllo della temperatura all'ingresso dei surriscaldatori (SAS)

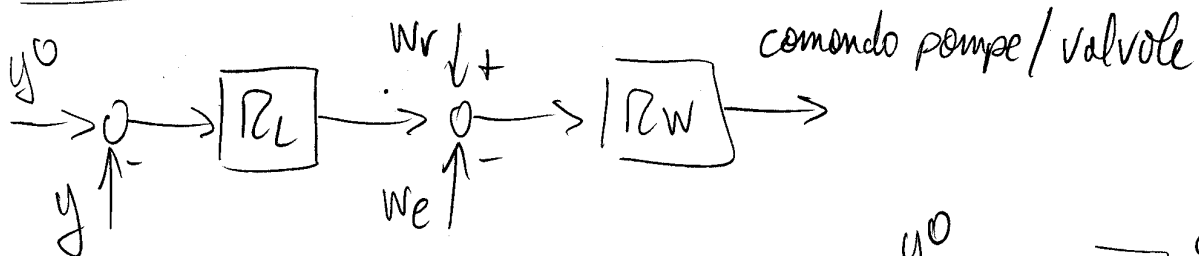
IMPIANTO TERMOELETTRICO

(12)

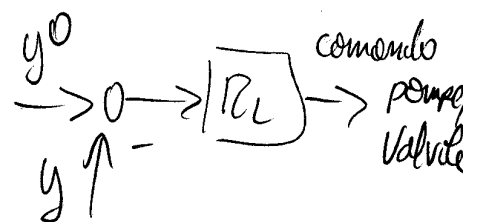
- I set-point di questi sottosistemi, che sono decentralizzati, sono le variabili di controllo per le regolazioni di potenza, pressione, livello e temperatura (P). Queste possono essere decentralizzate o centralizzate
- Nota: il processo è essenzialmente triangolare, rispetto agli accoppiamenti $w_{th} \leftrightarrow T_v$ e $w_e \leftrightarrow y$; pertanto queste due regolazioni sono di norma decentralizzate. Per le altre due, sono possibili soluzioni differenti

- CONTROLLO DI LIVELLO

- la portata alimento agisce essenzialmente solo su $y \rightarrow$ schema monovariabile
- la misura di livello è molto rumorosa \rightarrow bande dell'ordine del centesimo di rad/s \Rightarrow occorre controllo incasata e compensazione per avere prestazioni accettabili
- controllo a 3 elementi (\times ché ci sono tre misure)



- A bassi carichi le misure di portata sono poco affidabili, e i disturbi di minore intensità \rightarrow schema 1 elemento



IMPIANTO TERMOELETRICO

(13)

- CONTROLLO DELLA TEMPERATURA VAPORE SURRISCALDATO

- Sono possibili due strategie

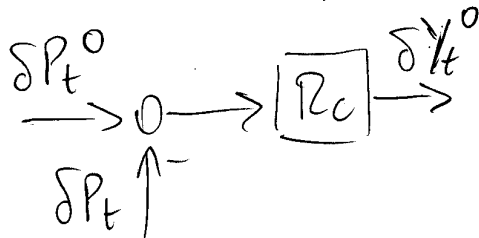
(A) Modulare il flusso termico che investe i surriscaldatori (ricircolo fumi / brondiglio bruciatori)

→ problema: si va ad influenzare $Q_c \rightarrow P, WV$

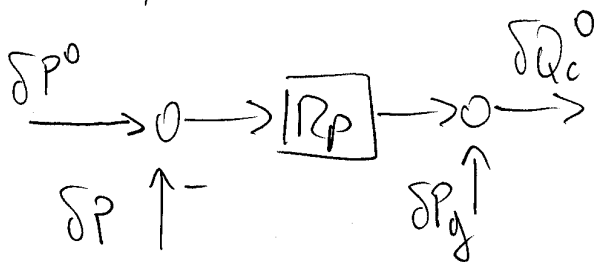
(B) Uso di attemperatori (→ vedi esercitazione)

- CONTROLLO CARICO / PRESSIONE : CALDAIA SEGRE

- Idea base: la pressione varia lentamente grazie all'accumulo in caldaia \Rightarrow moduliemo P_t agendo sulle valvole turbine, e usiamo Q_c per tenere fissa la pressione



• Il regolatore "vede" solo la dinamica del SAT (tempi di risposta $\ll 1$ secondo) \rightarrow regolazione veloce



• Inserendo la compensazione di δP_g , il regolatore "vede" $\frac{1}{sT_c} \cdot G_{SAC}(s)$. Il SAC è lento \rightarrow regolazione lenta

• pro: risposta $\frac{\delta P_t^0}{\delta P_t}$ rapidissima anche se il SAC è lento (si sfrutta l'accumulo in caldaia)

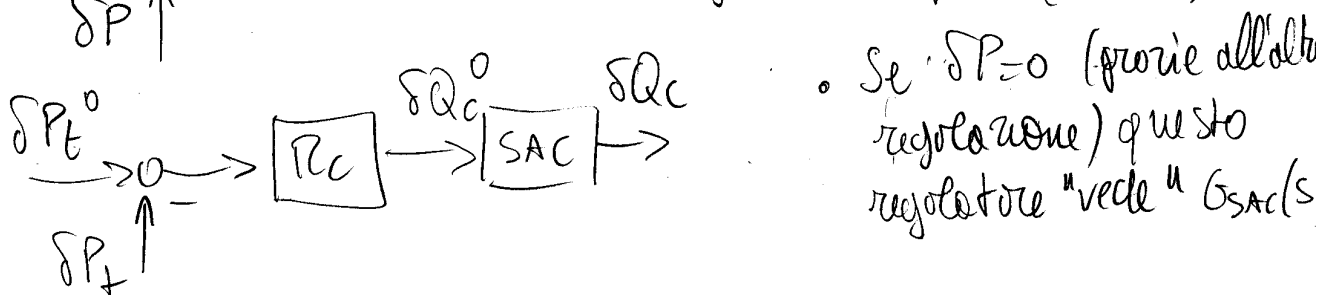
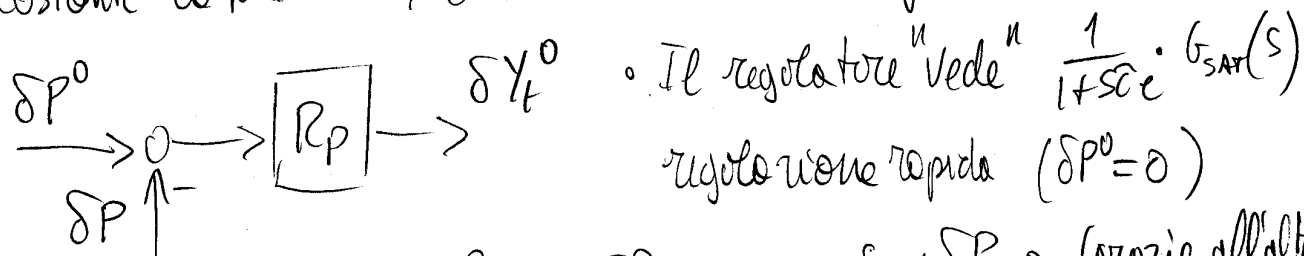
• contro: variazioni di pressione significative

IMPIANTO TERMOELETRICO

(14)

- CONTROLLO CARICO/PRESSIONE: TURBINA SEGUE

- Idea base: si varia l'ammontare di turbina Y_t per tenere costante la pressione, e si modula il carico agendo su Q_c



- pro: migliore regolazione di pressione
- contro: variazioni di carico + lente (limitate dalla dinamica del SAC)

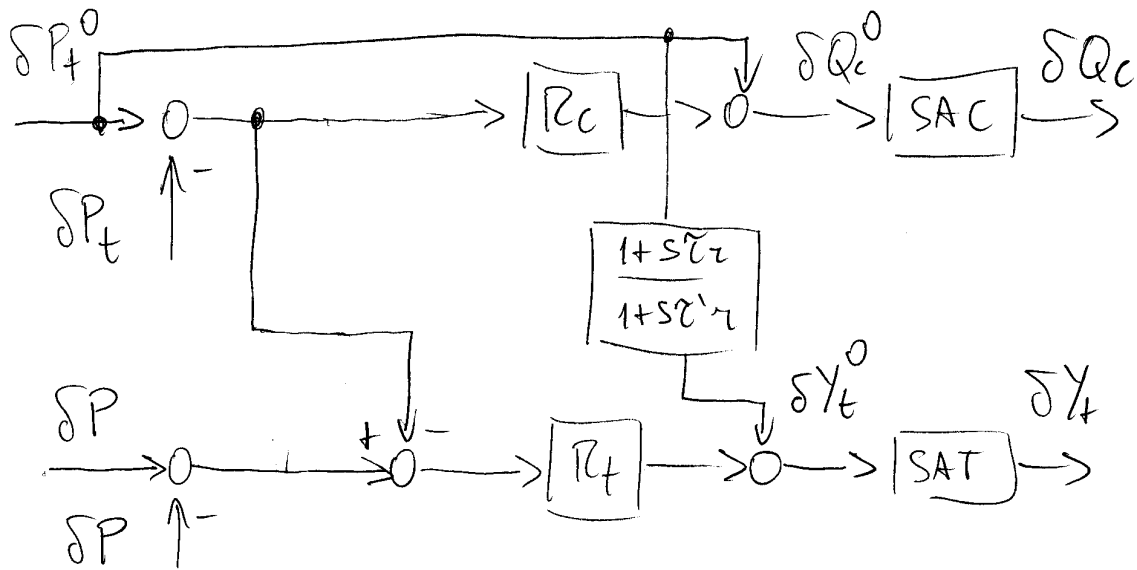
- CONTROLLO COORDINATO

- Possiamo progettare un controllore multivariabile introducendo un disaccoppiatore; possiamo anche introdurre azioni di feed-forward per migliorare le prestazioni dinamiche

- Lo schema qui mostrato è solo uno dei tanti possibili. Le azioni di feed-forward possono essere migliorate introducendo filtri dinamici e/o caratteristiche non-lineari per una compensazione più precisa

IMPIANTO TERMOELETRICO

15



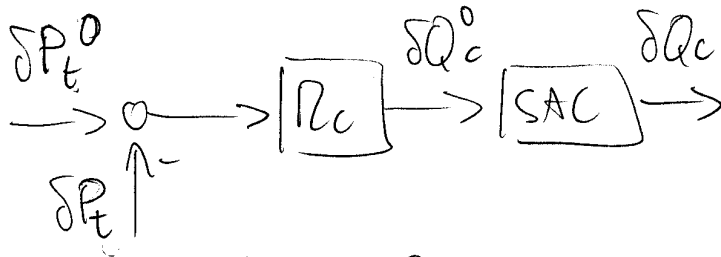
- Sistemi di questo genere (basati sulla teoria classica del controllo) garantiscono buone prestazioni, dopo una attenta messa a punto delle azioni feed-forward
- Sistemi basati su teorie di controllo più avanzate (es controllo predittivo MPC) potrebbero migliorare ulteriormente le prestazioni, ma finora il vantaggio potenziale della loro introduzione non è stato sufficiente a giustificare la "rivoluzione" che la loro introduzione comporta, a livello sia di progettazione che (soprattutto) di esercizio

IMPIANTO TERMOELETTRICO

(16)

- CONTROLLO A PRESSIONE VARIABILE

- Non si controlla la pressione $\Leftrightarrow Y_t = Y_{tmax}$



- la risposta a δP_t^0 è molto lenta: $\frac{\delta P_t}{\delta Q_c} = \frac{1}{1 + \tilde{S}e} \cdot G_{sac} \cdot \frac{1 + \tilde{S}r}{1 + \tilde{S}r}$

impedisce di allargare la banda molto oltre $1/\tau_c$

se non si vuole avere overfiring significativo

- Questa strategia minimizza le sollecitazioni sulla turbina o vapore