

Turbine a vapore e ciclo condensato

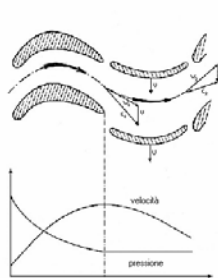
Alberto Berizzi
Dipartimento di Elettrotecnica
Politecnico di Milano
alberto.berizzi@polimi.it

1

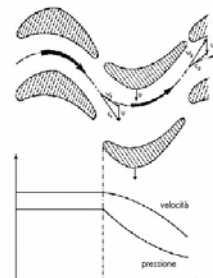
Turbine a vapore

- Sono di tipo assiale, miste azione-reazione, a albero orizzontale
- Turbine a azione: la trasformazione del salto entalpico in energia cinetica avviene solo nel distributore: la velocità all'uscita è la massima compatibile con il salto entalpico. La girante è a p costante.
- Turbine a reazione: la stessa trasformazione non si completa nel distributore: rimane un salto di pressione nella girante, che comporta una accelerazione (aumento di w) del fluido lungo i canali mobili

azione



reazione pura

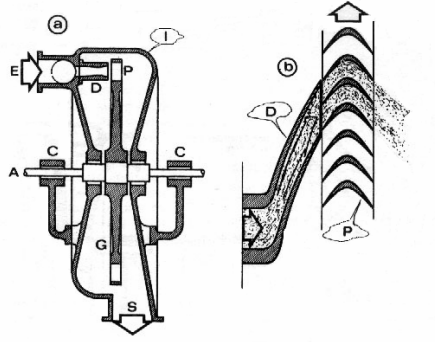


diagrammi p , velocità assoluta

2

Turbine ad azione: principio

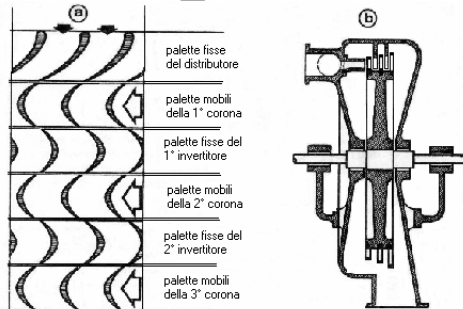
- L'ugello del distributore è di tipo convergente-divergente
- Il distributore è fatto in modo che il vapore perda pressione per acquistare in velocità
- Le palette della girante sono generalmente a profilo simmetrico per rendere costante la componente assiale della velocità; la sezione è costante
- $w_2 = w_1$ perché l'energia cinetica non subisce variazioni attraverso la girante
- La v_2 sarà assiale, per minimizzare le perdite allo scarico
- Il rendimento aumenta al diminuire di α_1
- Questa macchina (monostadio) ruoterebbe a alte velocità, troppo elevate per i 3000 giri/min di un turboalternatore
- Il distributore può incidere anche solo su un arco della girante (parzializzazione)



3

Turbine a azione a salti di velocità (turbina Curtiss)

- Per ridurre la velocità, si suddivide il salto in più stadi
- Nel distributore di ciascuno stadio avviene l'espansione di una parte del salto totale di pressione
- In ciascuna camera, la pressione rimane la stessa: si alternano salti di pressione (distributori) a salti di velocità (girante)



4

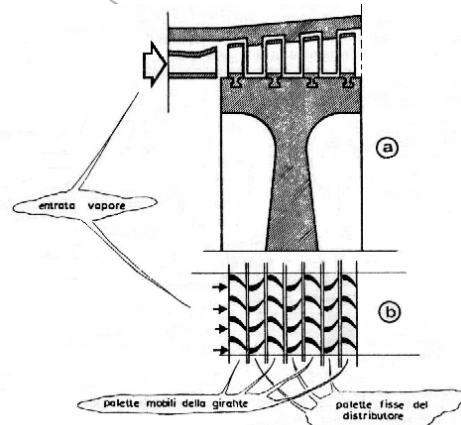
Turbine a reazione

- Il grado di reazione è il rapporto tra il Δh della girante e il Δh totale
- Il salto entalpico è suddiviso tra distributore e girante, in funzione del grado di reazione:
 - nel distributore c'è un gradiente di pressione che accelera il fluido, incrementandone l'energia cinetica assoluta
 - nella girante un altro gradiente di pressione incrementa l'energia cinetica relativa: $w_2 > w_1$ grazie alla particolare forma delle palette della girante
- Il fluido si espande all'uscita dell'ugello del distributore e acquista velocità v , facendo spostare la girante
- La spinta che induce la rotazione è causata dal cambiamento di direzione del flusso e dalla espansione del vapore (diminuzione di p)
- Ogni stadio della turbina deve essere a ammissione totale e non può essere parzializzato perché altrimenti, a causa della differenza di pressione, si avrebbe una circolazione disordinata del vapore

5

Turbine a reazione

- Anche nelle turbine a reazione, il salto di pressione è suddiviso in più stadi
- All'aumentare del grado di reazione, aumenta il rendimento ma diminuisce il salto entalpico sfruttabile: l'elemento a reazione ha velocità periferica superiore del 50% rispetto a una turbina a azione, e a pari velocità può sfruttare un salto entalpico minore del 50%
- Pertanto, a pari salto, occorre un numero maggiore di elementi a reazione e le macchine saranno più lunghe e costose



6

Scelta del tipo di turbina

- **Turbine ad azione** a salti di velocità :
 - salti elevati salti in confronto alle turbine a reazione;
 - minori difficoltà costruttive (leggerezza, compattezza) dovute alla bassa pressione a valle del distributore;
 - possibilità di parzializzare l'ammissione del vapore, e quindi di regolazione;
 - elevato rendimento volumetrico, dovuto all'assenza di fughe tra stadio e stadio.
 - minor rendimento termodinamico.
- **Turbine a reazione:**
 - maggiore regolarità di afflusso del vapore (condotti convergenti);
 - miglior rendimento
 - riduzione delle perdite per ventilazione (ammissione totale).
 - negli elementi ad alta pressione l'ammissione totale comporta sezioni estremamente piccole e di conseguenza altezze delle palette inaccettabili;
 - il rendimento volumetrico è minore di quello delle turbine ad azione;
 - la differenza di pressione tra le due facce della girante comporta una notevole spinta assiale, che deve essere opportunamente equilibrata.

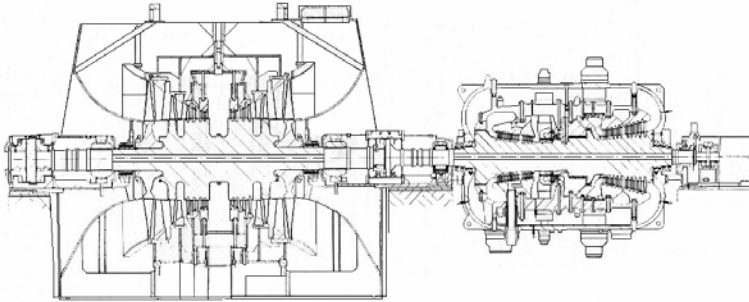
7

Disposizione delle ruote

- Di solito le prime due ruote sono ad azione a salti di velocità, cui segue un elevato numero di stadi a reazione
- **Vantaggi:**
 - possibilità di avere palette abbastanza alte grazie alla parzializzazione
 - elevato salto entalpico elaborato con rapido abbassamento della pressione e la temperatura
 - il minore rendimento causa dissipazioni che non sono comunque completamente perse, ma possono aumentare il contenuto termico del fluido per gli stadi successivi
- **Soluzioni costruttive:**
 - Tandem compound: i diversi stadi sono calettati sullo stesso albero
 - Cross compound: due alberi, uno più veloce per l'alta pressione, uno più lento per la bassa pressione
- Sulla BP si ha lo sdoppiamento dei flussi per le elevate portate volumetriche in gioco, contrapposti per bilanciare gli sforzi assiali

8

Turbina Tosi-Westinghouse da 320 MW

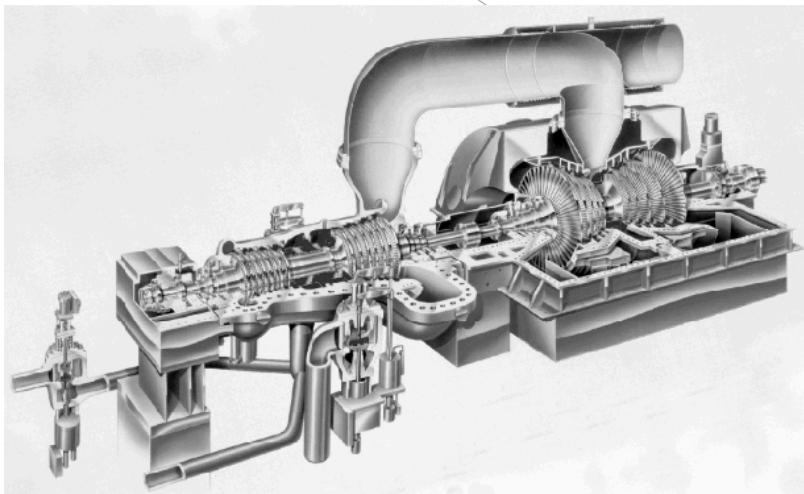


Turbina TOSI - WESTINGHOUSE da 320 MW

- Sviluppo 30 m
- Cuscinetti a strisciamento, lubrificati e raffreddati da olio in pressione
- Cuscinetti reggispinta Michell
- Viratore per evitare deformazioni dell'albero

9

Turbina Ansaldo 320 MW



10

Perdite nelle turbine

- perdite fluidodinamiche nei condotti fissi e mobili
- perdite all'imbocco di ogni schiera di palette e del condensatore
- perdite per fughe
- perdite per attriti e effetto ventilante (velocità, densità, diametro, arco)
- perdite per separazione del liquido
- perdite per attriti dovuti a incrostazioni sulle palette (silice)
- perdite allo scarico:
 - perdite di distacco
 - raccordo tra turbina e condensatore
 - vortici ai bassi carichi o con alta pressione allo scarico
 - perdite meccaniche nei supporti

11

Rendimenti

- A causa degli attriti, il salto entalpico effettivamente sfruttato è minore di quello teorico (nel diagramma di Mollier l'espansione si sposta verso destra, nel senso delle entropie crescenti)
- Il rendimento è circa 0.9, maggiore nelle turbine a reazione
- Nelle turbine a azione, η è più costante al variare del carico

12

Verifica del rendimento

- Si ricava dal bilancio termico
- Consumo specifico lordo: rapporto tra la potenza termica entrante e la potenza all'alternatore
- Si misurano:
 - pressioni e temperature agli ingressi e alle uscite della turbina e dei riscaldatori del condensato e dell'alimento
 - la portata del condensato all'ingresso del degasatore
 - le fughe più importanti, mediante diaframmi

13

Controllo dello stato della turbina

- Sono oggetto di controllo continuo:
 - eccentricità dell'albero in avviamento e arresto
 - variazione di lunghezza dell'albero rispetto allo statore
 - dilatazione della cassa
 - vibrazione nei supporti
 - velocità della turbina
 - temperatura del metallo della cassa turbina
- Protezioni
 - da sovralimentazione: interviene al 110%
 - basso valore di depressione nel condensatore
 - cedimento del cuscinetto reggispinta
 - bassa pressione olio cuscinetti
 - alta temperatura all'uscita della turbina BP

14

Impianti di condensazione

- Servono per effettuare la condensazione dell'acqua di alimento e consentire lo sfruttamento quanto più elevato del salto entalpico
- Possono consistere in:
 - Condensatori
 - Torri di raffreddamento

15

Condensatore

- E' sostanzialmente uno scambiatore di calore tra l'acqua di raffreddamento (fiume, mare, ecc.) e il vapore uscente dalla turbina
- Poiché la condensazione avviene a circa 30°C, la pressione è molto bassa e il condensatore deve resistere a forti pressioni (sotto vuoto)
- E' costituito da due serie di fasci tubieri (per questioni di manutenzione) nei quali circola l'acqua di raffreddamento; il vapore condensa e viene raccolto nel pozzo caldo
- Caratteristiche:
 - modesto salto termico fra i due fluidi (vapore a 30-40°C, acqua a 5-25°C)
 - grande quantità di calore scambiato (600 t/h di vapore con $\Delta h=560$ kcal/kg)
 - grandi superfici di scambio termico (17000 tubi, per 16000 m²)
 - grande portata di acqua (10-12 m³/s)

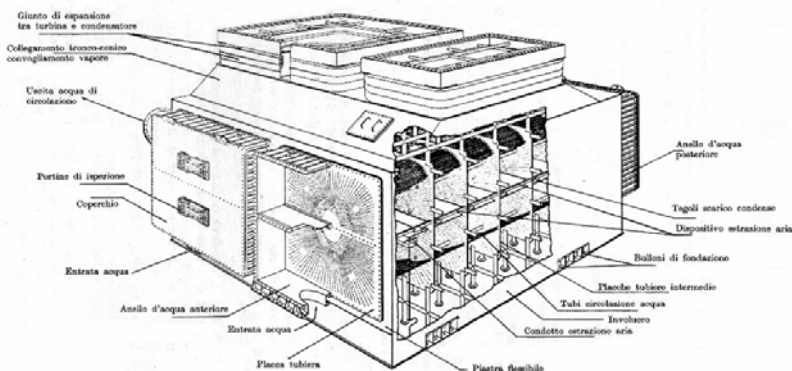
16

Utilità del condensatore

- diminuisce la p e la T di condensazione, aumentando il salto entalpico a disposizione della turbina
- aumenta il rendimento del ciclo
- è una riserva di acqua utile per i transitori del ciclo termico
- Per mantenere il vuoto, è necessario avere pompe del vuoto che servono a eliminare gli incondensabili e i rientri d'aria

17

Condensatore



18

Bilancio termico del condensatore

- Calore scambiato: $Q = G_v(h_v - h_c) = G_A c(T_u - T_e)$
- Conoscendo il calore da scambiare, è possibile dimensionare il superficie del condensatore
- Ci sono due pompe, una di riserva all'altra; sono verticali per evitare problemi di cavitazione
- Si controlla costantemente la conducibilità dell'acqua, per verificare la eventuale rottura di tubi
- La manutenzione si effettua utilizzando una sola cassa e facendo passare aria calda nei tubi: in questo modo li si pulisce dai fanghi
- Per esigenze ambientali, in un fiume la ΔT a monte e a valle non deve superare 3°C ; per i canali, la temperatura allo scarico non deve superare i 35°C e ΔT non deve superare 3° a 1 km di distanza

19

Torri di raffreddamento

- Sono caratterizzate da un minor rendimento e maggiori costi: pertanto sono utilizzate quando non è disponibile la portata di raffreddamento
- Sfruttano la cessione di calore per convezione aria-acqua e per evaporazione di una parte dell'acqua, che poi ricondensa
- Sistemi a tiraggio naturale (meno costi, maggiori dimensioni), o forzato (consumo ventilatori)

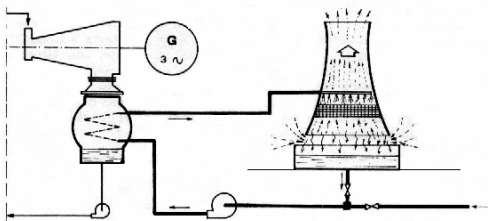
20

Tipologie di torri

- Torri a secco: scambiatori di calore a aria con fasci tubieri entro cui scorre l'acqua da raffreddare
- Torri a umido: scambiatori di calore acqua-aria a miscelazione, in cui una parte di acqua evapora aumentando l'umidità dell'aria raffreddatrice

21

Torre di raffreddamento a umido, tiraggio forzato

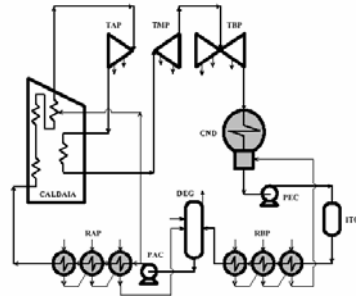


- l'acqua calda dal condensatore viene distribuita nella parte alta della torre
- l'acqua viene ridotta in piccole gocce (splash) o film d'acqua
- L'acqua infine cade in un serbatoio di raccolta

22

Ciclo condensato-alimento

- Comprende le apparecchiature per:
 - aspirare l'acqua condensata
 - trattarla per renderla pura
 - preriscaldarla prima dell'invio in caldaia (290°C all'ingresso dell'ECO)
- In particolare:
 - Pompe estrazione condensato (PEC)
 - Impianto trattamento condensato (ITC)
 - Condizionamento del condensato
 - Riscaldatori (AP e BP)
 - Degasatore
 - Pompe alimento caldaia (PAC)



Schema del ciclo acqua/vapore

CND	condensatore
PEC	pompa estrazione condensato
ITC	impianto trattamento condensato
RBP	riscaldatori bassa pressione
DEG	degasatore
PAC	pompa alimento caldaia
RAP	riscaldatori alta pressione
TAP	turbina alta pressione
TMP	turbina media pressione
TBP	turbina bassa pressione

23

Pompe estrazione condensato

- Sono due pompe, una di riserva all'altra, centrifughe, accoppiate a un asincrono a 4 poli
- Il dimensionamento consente di vincere le perdite di carico tra condensatore e degasatore e forniscono il primo salto di pressione
- Di solito sono verticali,
 - per aumentare il battente e diminuire problemi di cavitazione
 - limitare le spinte assiali
 - garantire minor ingombro

24

Impianto trattamento del condensato

- L'acqua di alimento deve garantire sempre un elevato grado di purezza
- Inizialmente essa è fornita dall'impianto di demineralizzazione, ma con il tempo viene contaminata da particelle metalliche o acqua esterna
- L'impianto è costituito da
 - prefiltri in cellulosa (Powdex a freddo)
 - letti misti: resine a scambio ionico + post filtri
 - iniezione di idrazina a ammoniaca per aumentare il PH
 - filtri Powdex a caldo tra RBP3 e degasatore per filtrare i drenaggi dei riscaldatori AP: sono filtri a candela con resine polverizzate cationiche e anioniche (la cellulosa non resisterebbe alle alte temperature)

25

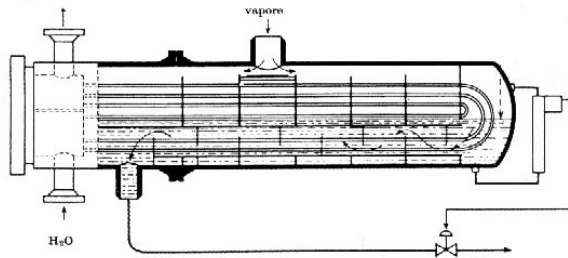
Impianto condizionamento del condensato

- Serve per evitare problemi di corrosione per ossidazione
- Ciò si ottiene creando uno strato di ossidi sottile aderente ai tubi (passivazione)
- Esistono diversi metodi, ad esempio aggiungendo all'acqua ammoniaca NH_3 e idrazina N_2H_4 , le quali fanno sì che si formi uno strato di magnetite (Fe_3O_4) all'interno dei tubi
- Altri metodi prevedono la formazione di ematite aggiungendo acqua ossigenata o ossigeno

26

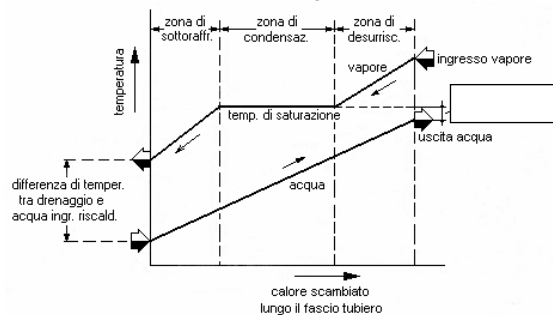
Riscaldatori BP

- Sono solitamente 3, posti il più possibile vicino alla turbina BP, per diminuire la lunghezza dei collegamenti più ingombranti
- I primi due sono scambiatori a superficie, orizzontali
- RBP3 è a superficie, verticale
- Ricevono
 - vapore spillato
 - acqua principale
 - drenaggi dai riscaldatori precedenti



27

Bilancio termico di un riscaldatore



$$(h_u - h_e) G_A = (h_{ve} - h_{cu}) G_v + (h'_{cu} - h_{cu}) G'_c$$

h_u è l'entalpia dell'acqua all'uscita del riscaldatore,

h_e è l'entalpia dell'acqua all'entrata del riscaldatore,

h_{ve} è l'entalpia del vapore spillato,

h_{cu} è l'entalpia del condensato uscente dal riscaldatore,

h'_{cu} è l'entalpia del drenaggio proveniente dal riscaldatore adiacente a pressione maggiore,

G_A è la portata d'acqua che attraversa il riscaldatore,

G_v è la portata del vapore spillato,

G'_c è la portata del drenaggio proveniente dal riscaldatore adiacente a pressione maggiore.

28

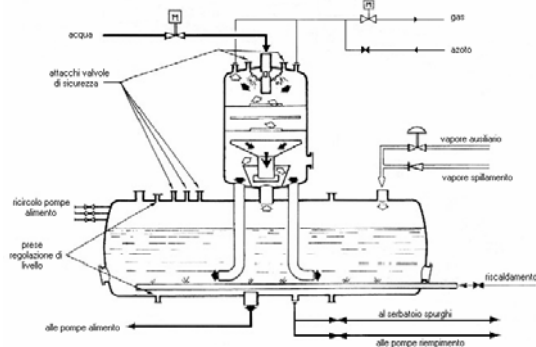
Degasatore

- E' uno scambiatore di calore a miscelazione
- Serve per eliminare i gas e gli incondensabili:
 - riscalda il condensato per diminuire la solubilità dei gas nell'acqua, in particolare O_2 (la solubilità è direttamente proporzionale a p e inversamente alla temperatura)
 - separa l'acqua in goccioline
 - impedisce che l'acqua bollente riesca a trattenere i gas
 - scarica in atmosfera i gas
 - Inoltre, costituisce un significativo polmone di accumulo acqua, per i transitori

29

Funzionamento del degasatore

- L'acqua viene introdotta in alto nella torre degasante a spruzzi e piatti, viene frazionata, riscaldata e degasata
- Il vapore è prelevato da uno spillamento
- I getti di acqua attraversano la miscela di vapore e gas proveniente dalla zona sottostante: il vapore condensa e solo una piccola parte di esso viene scaricata in atmosfera con i gas
- Nella parte inferiore, l'acqua si mescola con il vapore e raggiunge una temperatura prossima a quella di saturazione a quella pressione
- Poi cade nel serbatoio da dove viene convogliata all'aspirazione delle pompe alimento



30

Ruolo delle pompe alimento

- Servono per
 - aspirare l'acqua dal degasatore
 - pompare l'acqua in caldaia attraverso i riscaldatori AP, fino a una pressione di 170 ata
 - Sono caratterizzate da pressione massima 220 ata (per vincere anche le perdite di carico)
- Sono di tipo centrifugo a più giranti
- Calcolo della prevalenza:

$$\Delta p = p_m - p_a = p_v - p_0 + \gamma_1 h_1 - \gamma_2 h_2 + \zeta_t + \zeta_c + \zeta_r$$

dove:

- p_v è la pressione del vapore alla ammissione in turbina
- p_0 è la pressione all'interno del degasatore
- γ_1 e γ_2 sono i pesi specifici dell'acqua alla p e T di entrata e uscita
- ζ sono le perdite di carico nei tubi, in caldaia e nei riscaldatori AP

31

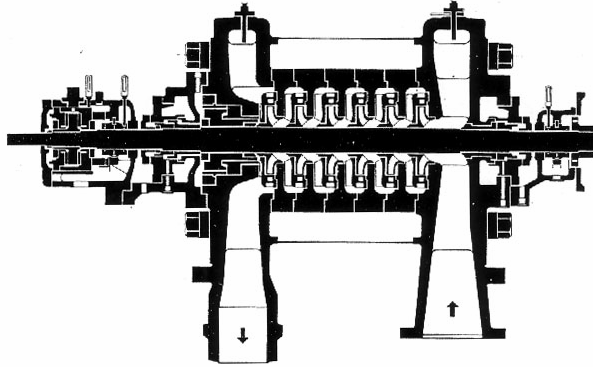
Problematiche delle pompe alimento

- Per evitare la cavitazione, bisognerebbe che il serbatoio del degasatore fosse molto alto (di solito invece è circa a 20 m)
- Si preferisce installare il serbatoio a una quota minore e utilizzare una pompa *booster* (6000 giri/min) per fornire il battente necessario alla pompa alimento e evitare la sua cavitazione
- La regolazione della pompa alimento può essere effettuata con una valvola oppure agendo sulla velocità di rotazione della pompa
- La pompa alimento può essere alimentata da un motore elettrico (asincrono a 1500 giri/min, 6 kW) o da una turbina a vapore
- A portate basse, si potrebbe avere il surriscaldamento e la vaporizzazione dell'acqua: perciò è prevista la possibilità di ricircolare al degasatore

32

Pompa acqua alimento

Costruttivamente è costituita da un corpo con più giranti



Problemi: equilibratura delle spinte assiali
Raffreddamento delle tenute con acqua dalle PEC

33

Lavoro della pompa

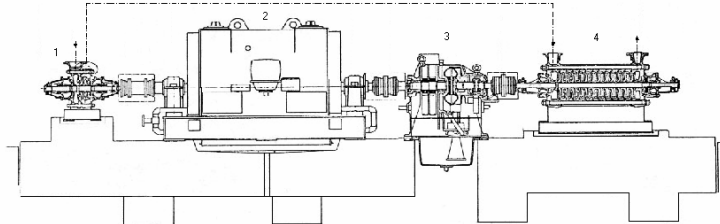
- Considerando il fluido praticamente incompressibile (v costante) si ha
- $L = v_1(p_m - p_a) / \eta_p$
- L'aumento di temperatura corrispondente alla compressione è sostanzialmente dovuto alle perdite della pompa $\Delta T = (1 - \eta)L / c_p$; esso è molto piccolo
- Le PA di solito sono tre, ciascuna al 50% della portata nominale
- Normalmente sono in funzione due pompe su tre

34

Gruppo di alimentazione di pompa alimento per caldaie di grande potenzialità

Gruppo di alimentazione per caldaie ad alta potenzialità

- 1 pompa booster
- 2 motore elettrico
- 3 giunto moltiplicatore e variatore di velocità
- 4 pompa alimento

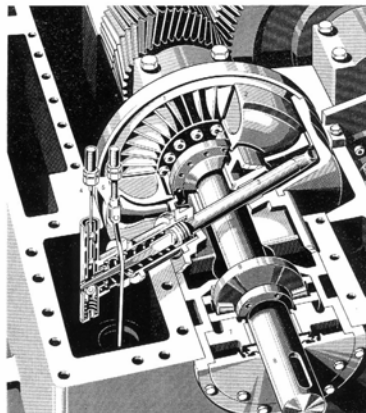


La regolazione può essere ottenuta con un motore a f variabile oppure con un giunto idraulico, come in questo caso

35

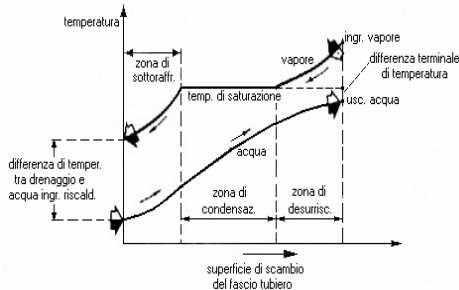
Giunto idraulico

- Consente di variare con continuità la velocità della pompa
- E' seguito da un moltiplicatore, tale da far ruotare la pompa a 6000 giri/min quando il giunto è al massimo accoppiamento



36

Riscaldatori AP

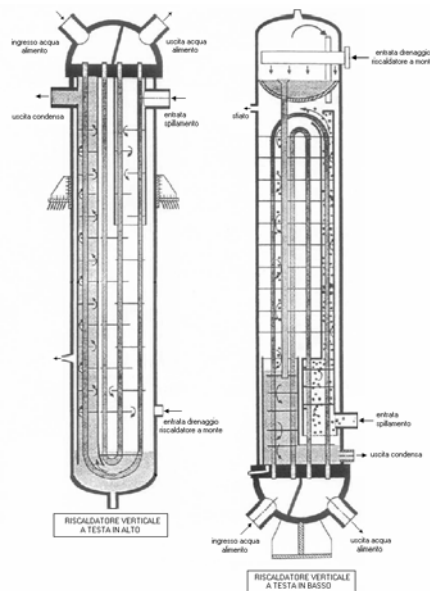


Sono tre oppure sei su due linee parallele
 All'uscita l'acqua è a 290°C, avendo guadagnato 260°C durante la rigenerazione

- Il vapore dagli spillamenti è surriscaldato, ragion per cui è necessaria una zona desurriscaldante e una sottoraffreddante
- I drenaggi sono trasmessi al precedente riscaldatore
- Il bilancio è dato da:
- $G_a h_e + G_v h_v + G_d h_d = G_a h_u + G_D h_D$
- $G_D = G_v + G_d$

Riscaldatori AP (riscaldatore 5)

- L'acqua alimento entra dal basso, percorre i tubi a U e esce riscaldata
- lo spillamento viene desurriscaldato nel tratto verticale verso l'alto, poi condensa, cedendo la maggior parte del calore e cade
- nella parte superiore arriva il drenaggio del riscaldatore 6 che si espande in un ambiente a p inferiore, vaporizza miscelandosi al vapore di spillamento e cade anch'esso



Spillamenti e drenaggi

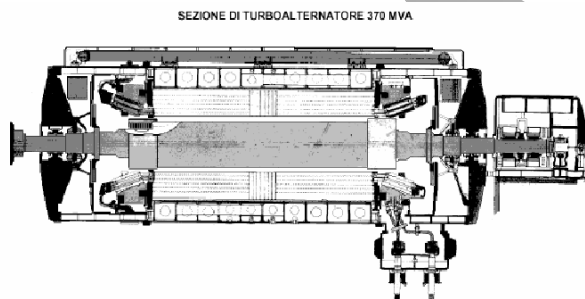
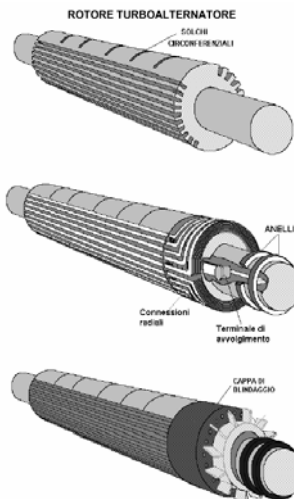
- Valvole di non ritorno automatiche sullo scatto turbina:
 - negli spillamenti RBP1 e RBP2 non ci sono: il vapore dello spillamento invece che andare nel riscaldatore torna indietro in turbina e nel condensatore e contribuisce, modestamente, alla sovravelocità
 - presenti sugli altri spillamenti
 - i drenaggi di RAP5 sono i più consistenti, e giustificano la presenza di due valvole in serie
- Drenaggi:
 - usualmente al riscaldatore precedente
 - Se interviene un troppo pieno, tutto viene convogliato al Serbatoio Espansione Drenaggi (di AP) a monte dei filtri a caldo
 - in emergenza al condensatore

39

Alternatore

Dimensioni di un turboalternatore:
 $D_{max}=1.15m$, $L/D=8-10$

La potenza è limitata dal raffreddamento



40

Servizi ausiliari elettrici

- Servizi ausiliari elettrici
 - Servizi generali: alimentano più gruppi e tollerano brevi interruzioni (pompe travaso nafta, ecc.)
 - Servizi di gruppo: indispensabili (PA, PEC, viratore, ecc.)
 - Servizi di emergenza: anche quando il gruppo è staccato dalla rete (pompe olio turbina, pompe acqua raffreddamento)
 - Servizi di sicurezza: comandi, automatismi, protezioni. Sono alimentati in c.c.
- I servizi di ogni sezione assorbono circa il 5% della potenza
- I motori di $P > 100-150$ kW sono alimentati in MT, gli altri in BT

43

Servizi ausiliari di una semisbarra 6 kV

- Una pompa alimento (6000 kW)
- Una pompa estrazione condensato (1650 kW)
- Un ventilatore aria (550 kW)
- Un ventilatore ricircolazione gas (450 kW)
- Una pompa acqua condensatrice (850 kW)
- Un trasformatore per pompe circolazione caldaia (2x250 kW)

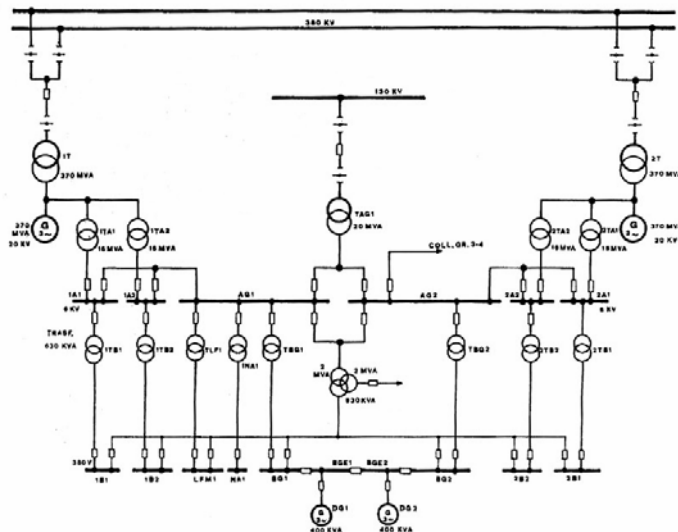
44

Alimentazione servizi di Centrale e Gruppo

- Avviene tramite due trasformatori di gruppo
 - riduzione del dimensionamento degli interruttori
 - maggiore disponibilità dell'alimentazione grazie ai congiuntori sbarre
 - indipendenza della sbarre quando si avviano potenti motori
- Sbarre 6 kV alimentano:
 - pompe alimento, ventilatori aria
 - sbarre 400 V per le utenze minori
- Sbarre AG alimentano le utenze per l'avviamento e le utenze comuni (luce, forza motrice, parco combustibili, ecc.) e sbarre BG (impianti chimici, ecc.)
- Sbarre BGE sono le sbarre di emergenza, alimentabili da GE con un commutatore automatico

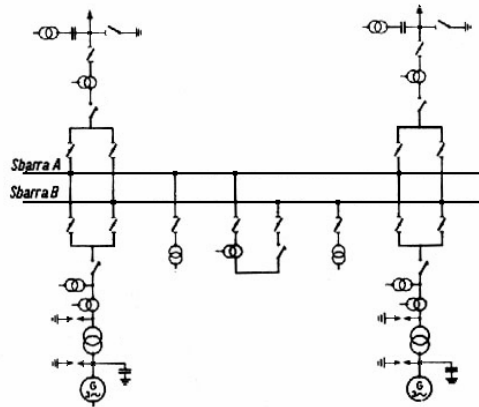
45

Alimentazioni elettriche



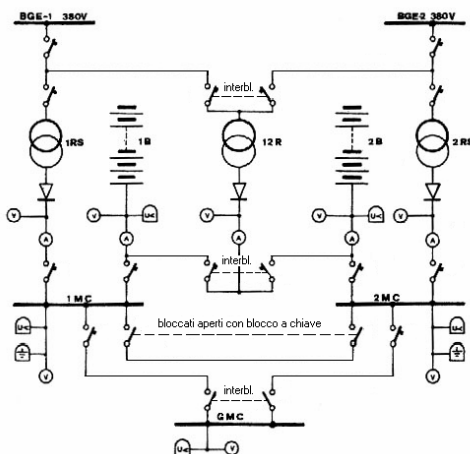
46

Stazione elettrica



47

Circuiti in corrente continua



- tre circuiti separati ed indipendenti con alimentazione propria e con tensione diversa:
 - **sistema a 220 V:** i carichi di potenza costituiti da apparecchiature che intervengono in caso di mancanza di corrente alternata (motori di emergenza in corrente continua ed illuminazione di emergenza). Nel funzionamento normale questo sistema non eroga corrente, ma in condizioni di disservizio è chiamato a sopportare carichi elevati.
 - **sistema a 110 V:** comandi degli interruttori a 6 kV e a 380 V, i sistemi di protezione, i sistemi di segnalazione e gli automatismi. E' sempre sottoposto ad un certo carico ed in caso di scatto del gruppo deve sopportare punte di richiesta dovute all'intervento degli interruttori ed alla partenza degli automatismi.
 - **sistema a 12 V e 24 V:** circuiti transistorizzati con i quali sono realizzati i comandi e le protezioni. Questo sistema è caratterizzato dalla presenza continua di carico.

48

Altri servizi ausiliari

- Servizi antincendio (a polvere o anidride carbonica)
- Ciclo acqua servizi (raffreddamenti)
- Ciclo aria compressa
- Impianto acque reflue
- Impianto di demineralizzazione