

Centrali idroelettriche

Alberto Berizzi,
Dipartimento di Elettrotecnica
Politecnico di Milano

1

Macchinario idraulico

- Turbine a azione:
 - turbina Pelton
- Turbine a reazione:
 - turbina Francis
 - turbina Kaplan
 - eliche

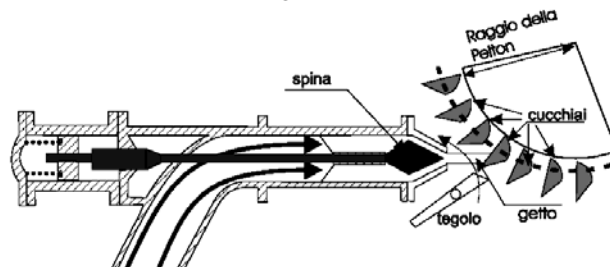
2

Turbine a azione

- L'energia potenziale si trasforma totalmente in energia cinetica in un ugello (distributore) che proietta la vena liquida ad alta velocità contro le pale
- Poiché $p=0$, all'uscita del distributore $H=v^2/2g$ e quindi $v = \sqrt{2gH}$
- La ruota non deve mai essere sommersa, e quindi deve essere a quota superiore al massimo livello di valle
- L'acqua, dopo che ha colpito le pale, cade nel canale di scarico con una piccola energia residua, al limite con velocità nulla
- La cassa turbina può essere leggera e ha solo lo scopo di evitare danneggiamenti e la fuoriuscita dell'acqua
- I tipi più diffusi sono:
 - Turbina Pelton
 - Turbina Turgo
 - Turbina cross-flow

3

Turbina Pelton



- Asse orizzontale o verticale
- Uno o più ugelli (nelle turbine ad asse verticale, fino a sei, con interferenza fra i getti che diminuisce il rendimento) trasformano totalmente in energia cinetica la pressione dell'acqua, la cui portata è regolata da una valvola a spillo
- La ruota è installata 1.5-3 m sopra il pelo dell'acqua: salto perso, ma trascurabile rispetto agli alti salti con cui è impiegata

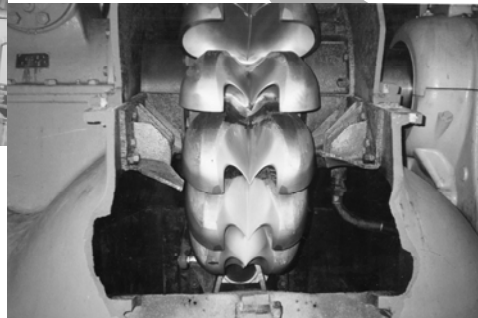
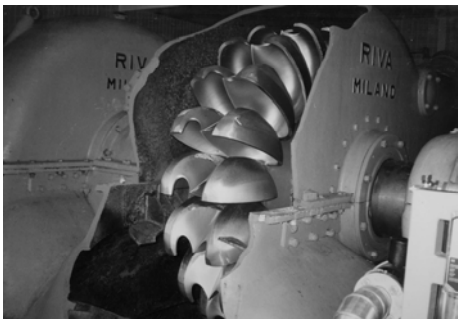
4

Girante Pelton



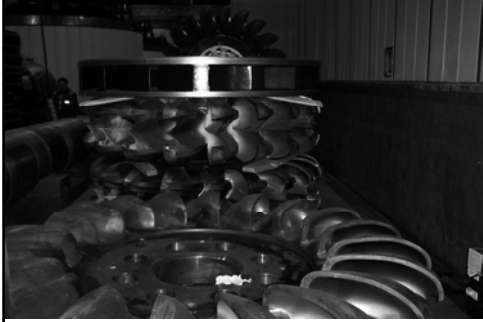
5

Spaccato di una Pelton



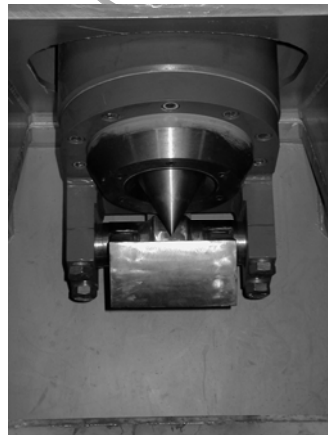
6

Pelton da 125 MW



7

Tegolo deviatore



8

Altre caratteristiche

- La parzializzazione si ottiene con la spina, che varia la portata, ma non la velocità (né il triangolo)
- Un tegolo deviatore ha lo scopo di deviare il flusso dalle pale, in caso di brusco distacco di carico (0.5-1 s), in modo da evitare la fuga della turbina senza dover chiudere troppo velocemente la valvola di macchina
- La spina chiude in circa 20-60 s
- Controgetto per la frenatura in pochi minuti invece che alcune ore (vantaggio per i cuscinetti)
- Il doppio cucchiaio serve per evitare interferenze dello scarico con il getto
- Il taglio centrale serve perché il getto interessi più cucchiai (spinta più delicata)

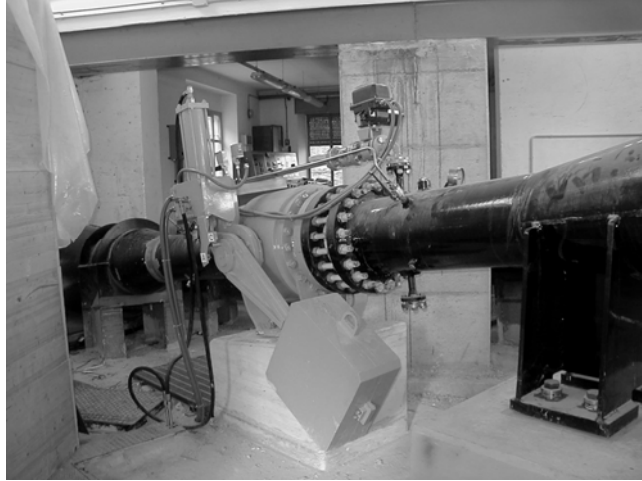
9

Spina della Pelton



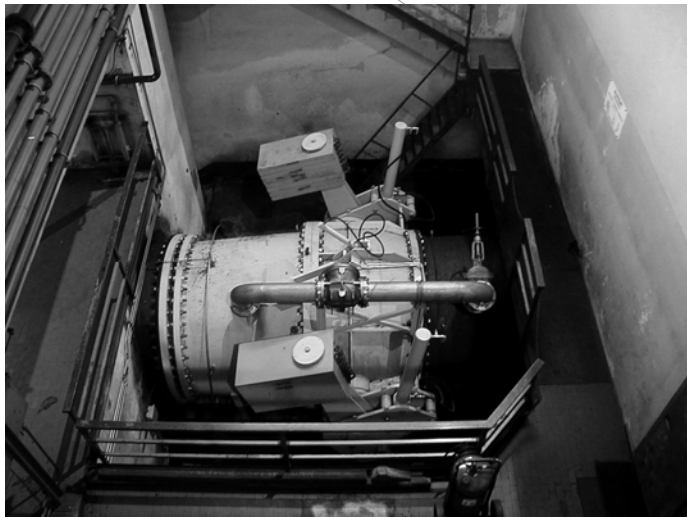
10

Valvola rotativa



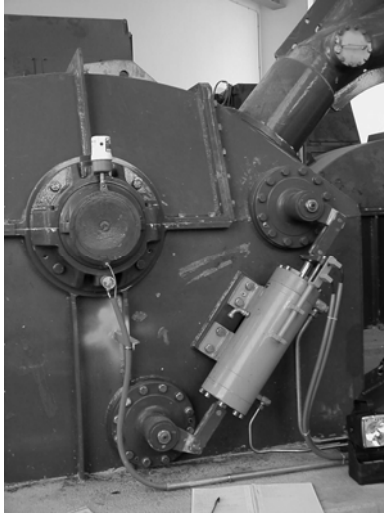
11

Valvola a farfalla



12

Comando del tegolo e messa a terra dell'albero



13

Turbine a reazione

- La pressione dell'acqua agisce direttamente sulla superficie delle pale, diminuendo di valore man mano che avanza

- $H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$ I termini sono entrambi non nulli, e si definisce il grado di reazione

- $$\varepsilon = \frac{H - v^2/2g}{H}$$

- La cassa turbina deve essere abbastanza robusta, poiché la ruota è completamente sommersa e sottoposta alla pressione di monte dell'acqua
- I tipi più diffusi sono:
 - Francis
 - Kaplan
 - eliche

14

Turbina Francis

A asse orizzontale (ma se di grande potenza, sono a asse verticale)

In generale è la meno costosa



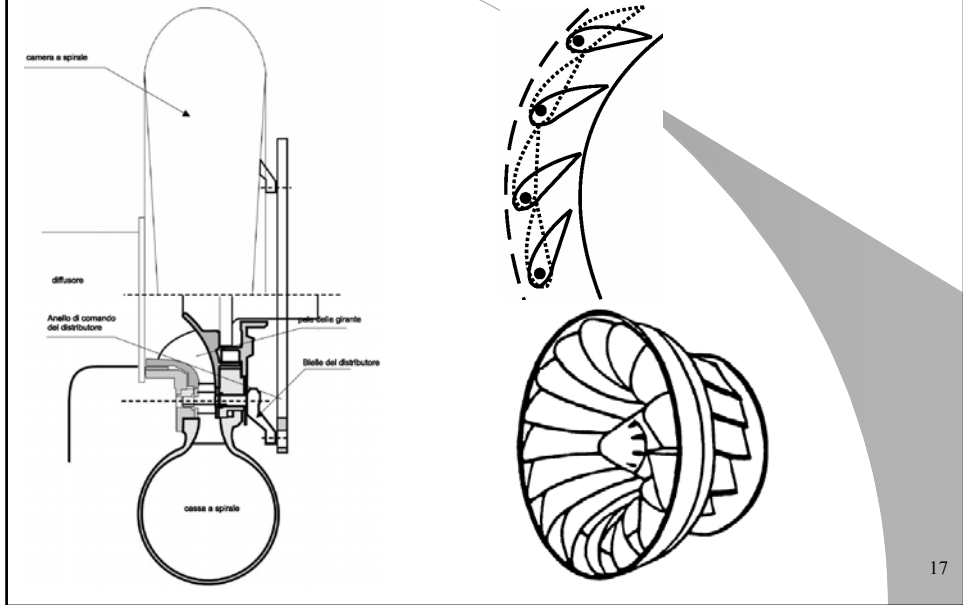
15

Turbina Francis

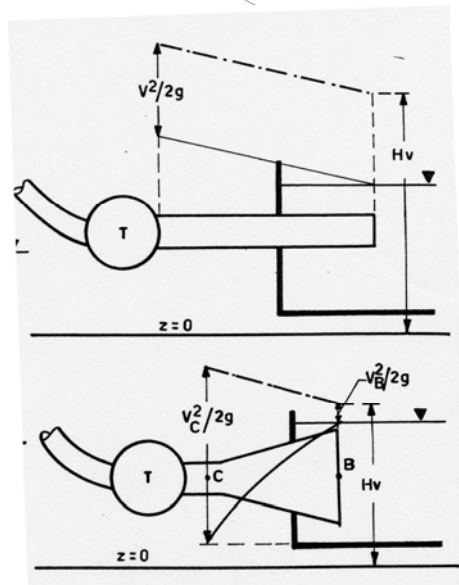
- A flusso radiale, con distributore a pale regolabili, sincronizzate da un anello, e girante a pale fisse, utilizzate per i salti medi
- L'acqua cede energia alla girante senza contatto con l'atmosfera
- La cassa a spirale è a sezione decrescente (v costante) e consente l'alimentazione radiale e lo scarico assiale
- Il distributore può funzionare da valvola di intercettazione
- Parzializzazione ruotando le pale del distributore
- Più ingombrante di una Pelton (pressioni)
- Il diffusore:
 - generalmente è di forma tronco-conica per ridurre la velocità di scarico, il che fa diminuire le perdite di carico nello scarico
 - la pressione allo scarico è inferiore a quella atmosferica
 - consente di installare la macchina sopra il livello allo scarico, senza sacrificare salto (opere civili meno costose)
 - c'è una massima altezza (di aspirazione, H_a) per evitare la cavitazione
 - può essere tronco-conico (H_a alta) oppure a gomito

16

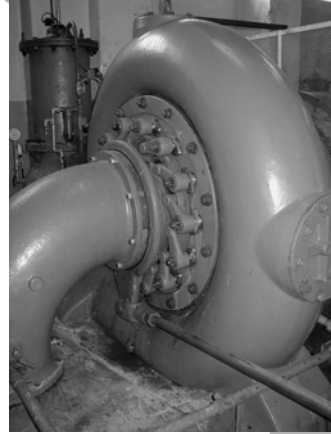
Turbina Francis



Ruolo del diffusore

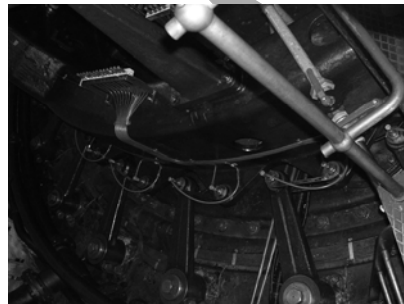


Valvola e Regolazione palette



19

Regolazione palette Francis



20

Scarico sincrono

- E' una valvola collegata alla camera a spirale che si apre durante le brusche manovre, per mantenere quasi costante Q e evitare il colpo d'ariete
- La sua chiusura avviene in 20-30 s

21

Turbina Kaplan

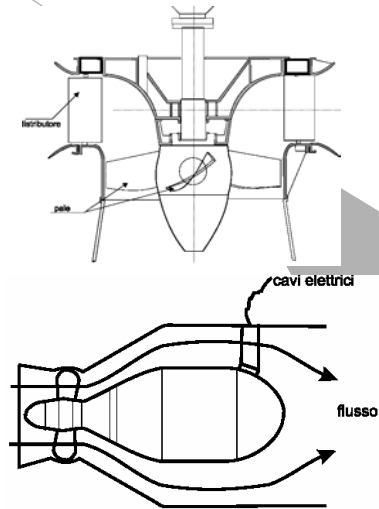
- Turbine a reazione a flusso assiale, utilizzate generalmente per bassi salti
- Le pale della ruota sono sempre regolabili, quelle del distributore possono essere fisse (semi-Kaplan) o regolabili (Kaplan)
- Le pale della ruota si muovono girando intorno ad un perno solidale con un sistema di bielle-manovelle collegate ad un tirante verticale, posto all'interno dell'albero cavo della turbina, azionato da un servomotore idraulico



22

Eliche

- Le turbine a elica hanno distributore e ruota a pale fisse
- Sono utilizzate quando il salto e la portata sono praticamente costanti
- La turbina a bulbo ha il generatore e il moltiplicatore (se esiste) contenuti in una cassa impermeabile, immersa nell'acqua
- Dal bulbo escono solo i cavi elettrici, debitamente protetti



23

Numero di giri caratteristico n_s

- Caratterizza diversi tipi di turbina che si possano considerare simili geometricamente
- E' il numero di giri ideale che avrebbe una turbina che sviluppasse 1 kW con un salto di 1 m
- Turbine con lo stesso n_s sono simili

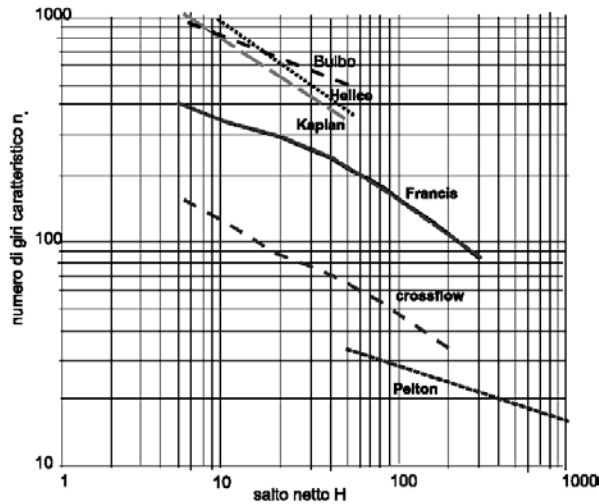
$$n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^4 \sqrt{H}}$$

- Da n_s si deducono le dimensioni della macchina

ATTENZIONE: n_s dipende dalle unità di misura !!!

24

Caratteristiche delle turbine



25

Turbina Pelton

- Aumentando il numero di getti, n_s cresce con la radice quadrata del numero di getti: n_s di una Pelton a quattro getti è il doppio di quello di una Pelton ad un getto
- In ogni caso, il numero giri caratteristico di una Pelton non supera 60.
- Il diametro di una girante Pelton dipende dalla velocità periferica
- L'acqua esce dall'ugello alla velocità $v_{ch} = 0.97\sqrt{2gH}$
- In teoria, la velocità periferica V_0 di rendimento massimo è $v_{ch}/2$. In pratica, il rendimento massimo si ottiene ad una velocità $v_0 = 0,47 v_{ch}$
- n_s è proporzionale al rapporto d/D (diametro del getto/diametro della girante)

26

Turbina Francis e Kaplan

- Per le turbine a reazione, n_s dipende da:
 - α_1 , angolo formato da u e v_1
 - ε , il grado di reazione
 - b_0 , altezza del distributore
 - D_1 , diametro di ingresso della girante
- La turbina Francis copre una vasta gamma di
 - n_s : 60 (Francis lenta)-400 (ultra-veloce)
 - salti: 30-350 m
- Le turbine Kaplan sono caratterizzate da
 - n_s : 250-1000
 - salti: 5-60 m

27

Scelta del numero di gruppi

- L'ideale è un solo gruppo generatore: meno opere civili e meno perdite
- Altri fattori:
 - potenza massima (fino a 200 MW)
 - collegamento con il sistema (problemi in caso di *contingency*)
 - se le portate variano, il rendimento può essere penalizzato

28

Scelta della turbina

- Dipende da:
 - salto netto
 - portata
 - problemi di cavitazione
 - velocità di rotazione
 - costo

29

Salto netto

- Scelta critica per i piccoli salti e le grandi portate, dove i costi delle opere civili sono molto elevati

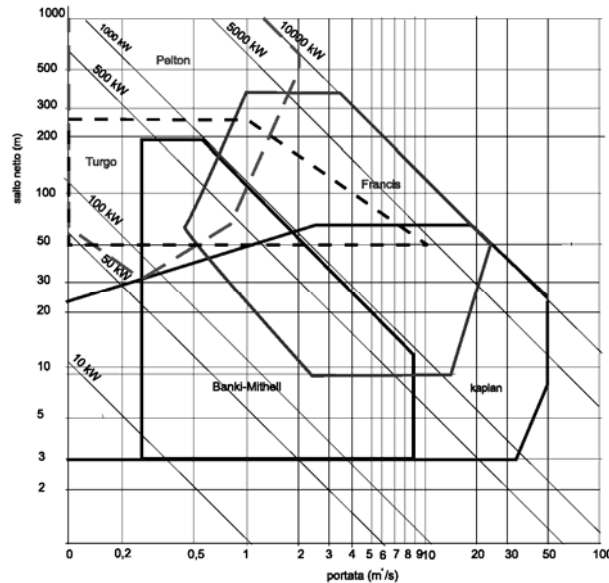
Tipo di turbine	Campo dei salti
Kaplan e elica	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Michell-Banki	$3 < H < 200$
Turgo	$50 < H < 250$

30

Portata

Portata utile:
bisogna considerare

- il deflusso minimo vitale
- la portata minima della turbina



Numero di gruppi

- Il numero minimo tale da garantire un elevato rendimento al variare delle condizioni idrauliche, tenendo conto anche delle durate
- Bisogna anche tener conto di
 - aspetti pratici come l'entità delle opere civili e gli spazi disponibili
 - velocità degli alternatori: se fosse troppo bassa, conviene suddividere la portata

Numero di giri caratteristico

- Esempio 1:
 - salto= 100 m
 - potenza=800 kW
 - n=1500 rpm

$$n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}\sqrt{H}} = 1500 \frac{\sqrt{800}}{100^{\frac{5}{4}}\sqrt{100}} = 134$$

- quindi si sceglie una Francis
- Esempio 2
 - Se c'è un riduttore, n=500-1500
 - Risulta $n_s=45-134$
 - Si può scegliere una Francis oppure una Pelton a due getti

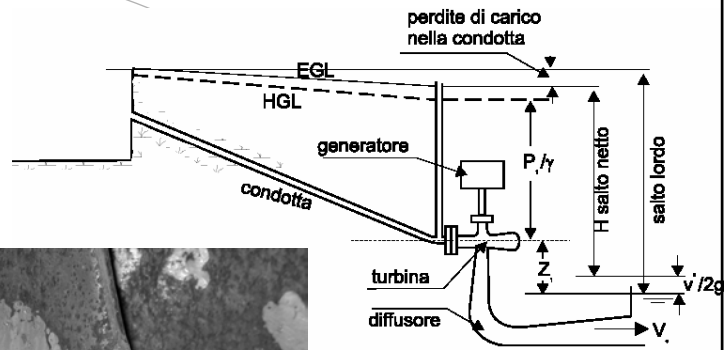
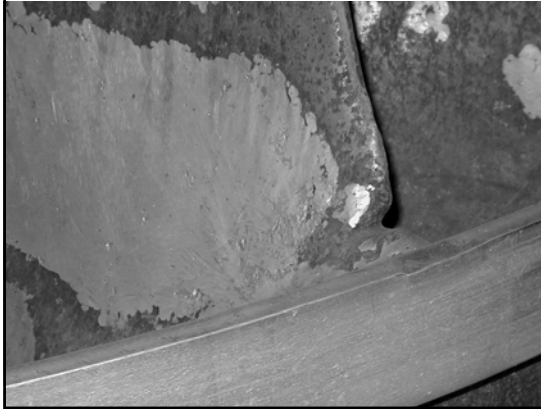
33

Cavitazione

- Quando la pressione scende sotto la sua tensione di vapore, ha luogo l'evaporazione del liquido, con la formazione di bolle, che collassano quando giungono nelle zone a pressione maggiore, dando luogo alla cavitazione
- Si creano impulsi di pressione molto elevati, con forte rumore (come se la turbina fosse attraversata da ghiaia)
- Col tempo, si ha erosione diffusa che forma cavità nel metallo e cricche con asportazione del metallo
- Le temperature elevate generate dagli impulsi di pressione e la presenza di ossigeno nei gas rilasciati aggravano il fenomeno, dando origine a corrosione
- Per evitare la cavitazione, bisogna tenere bassa la turbina (al limite, annegata), il che aumenta i costi

34

Cavitazione



35

Velocità di rotazione

- Si deve tenere conto delle possibili velocità di sincronismo
- Rispetto ai turboalternatori, le macchine idrauliche ruotano più lentamente: gli alternatori sono a poli salienti
- 300-750 rpm è l'intervallo in cui gli alternatori costano meno

$$n = \frac{60 f}{pp}$$

Numero di poli	Frequenza		Numero di poli	Frequenza	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	16	375	450
4	1500	1800	18	333	400
6	1000	1200	20	300	360
8	750	900	22	272	327
10	600	720	24	250	300

36

Riduttore di velocità

- Non sempre la velocità ideale della turbina è quella di minimo costo per l'alternatore
- In alcuni casi, è opportuno interporre un moltiplicatore di giri
- Tipicamente: piccoli impianti con bassi salti, in cui la macchina gira molto piano (meno di 300 rpm): in accoppiamento diretto l'alternatore risulterebbe grosso e costoso
- L'introduzione del moltiplicatore (vita utile: 10 anni) porta i seguenti problemi:
 - Minori rendimenti globali
 - Maggiori costi di manutenzione
 - Maggiore rumorosità
 - Maggiori rischi di guasto
 - Complicazione impiantistica (raffreddamento del moltiplicatore)

37

Velocità di rotazione

- A pari n_s e a pari portata complessiva dell'impianto, per aumentare n , bisogna suddividere la portata, cioè avere più gruppi, peraltro meno costosi e di minor inerzia

$$n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^4 \sqrt{H}}$$

- La velocità di ingresso dell'acqua è sostanzialmente inversamente proporzionale alla velocità di rotazione della macchina
- Più veloce è l'acqua in uscita, più lungo deve essere il diffusore

38

Velocità di fuga

Tipo di turbina	Velocità normale n (rpm)	Velocità di fuga n_{max}/n
Kaplan a semplice regolazione	75-100	2,0-2,4
Kaplan a doppia regolazione	75-150	2,8-3,2
Francis	500-1.500	1,8-2,2
Pelton	500-1.500	1,8-2,0
Cross-flow	60-1.000	1,8-2,0
Turgo	600-1.000	2

- In caso di distacco improvviso di carico bisogna:
 - evitare la velocità eccessiva delle macchine (di fuga)
 - evitare il colpo di ariete per la chiusura repentina delle valvole

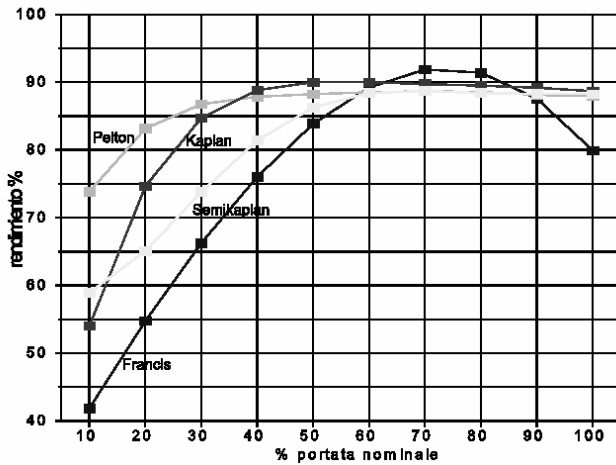
39

Rendimento delle turbine

- E' il rapporto tra la potenza meccanica trasmessa all'asse turbina e la potenza idraulica assorbita
- Le turbine a azione perdono un po' di salto rispetto alle turbine a reazione
- Di contro, le turbine a reazione hanno perdite di carico nella cassa spirale e soprattutto nel diffusore, necessario per diminuire la velocità all'uscita, per cui il salto utile è minore di quello netto
- Le turbine sono fatte per avere il massimo rendimento all'80% della portata nominale

40

Rendimento

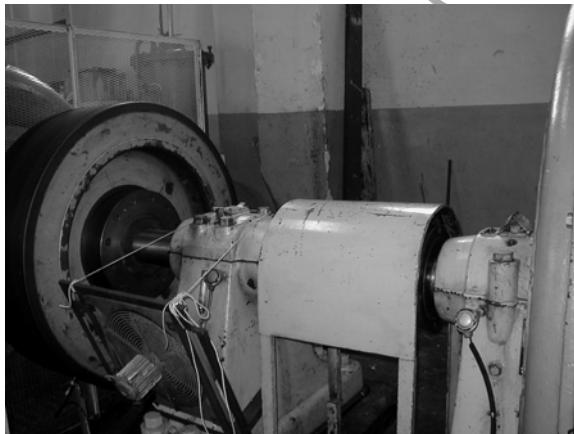


Kaplan e Pelton:
rendimenti elevati
su un range ampio

Francis: rendimenti
elevati su un range
ridotto (oltre 50%);
Sotto il 40% si
possono verificare
vibrazioni che
costringono alla
fermata

41

Volano e "raffreddamento"



42

Disposizione del gruppo

- A asse verticale:
 - facile lo smontaggio del rotore dell'alternatore
 - ispezione e smontaggio della turbina difficoltosi
 - scarico asimmetrico (Pelton)
- A asse orizzontale:
 - due supporti con ruota a sbalzo
 - l'albero non attraversa lo scarico (Francis)
 - semplicità di manutenzione

43

Cuscinetti portanti e reggispinta

- Asse orizzontale:
 - portante: regge il peso
 - reggispinta: compensa (Francis) gli sforzi assiali; nelle Pelton tale spinta è assente se il getto è ben centrato
- Asse verticale:
 - cuscinetti guida (reagiscono a squilibri dinamici)
 - Michell: installato in cima all'albero, sopra lo statore dell'alternatore, regge tutto il peso dell'alternatore e della turbina

44

Generatori elettrici

- L'energia meccanica disponibile all'asse viene convertita in energia elettrica
 - Alternatori sincroni: generano energia in modo sincrono con la rete, possono generare/assorbire potenza reattiva e funzionare in isola. Tipicamente per le potenze più elevate ($>5\text{MVA}$), generalmente sono più costosi degli asincroni
 - Generatori asincroni: non ruotano sincroni con la rete, assorbono Q e non possono funzionare in isola; solitamente per potenze $<500\text{ kVA}$, ma anche fino a 5 MVA

45



Alternatore da
140 MVA

46

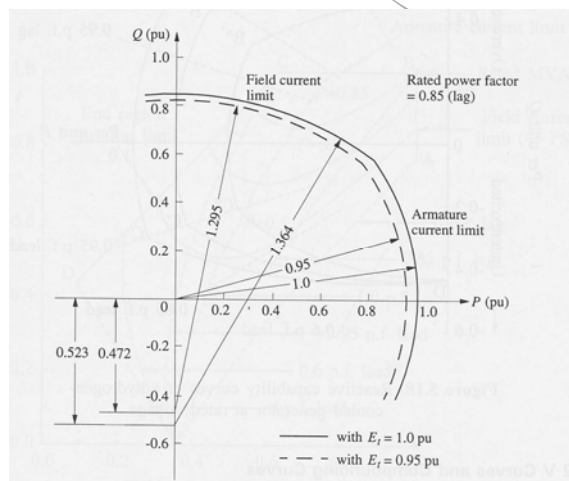
Caratteristiche elettriche

$$A_n = \frac{P_{resa}}{\cos \varphi}$$

- Tipicamente, il fattore di potenza nominale è 0.8-0.9 (diminuendo il $\cos \varphi$ aumentano i costi del rame e dell'eccitazione)
- Il rendimento è 98-99%
- Altri dati:
 - tensione nominale (3, 6, 10, 15, 20 kV)
 - massime temperature degli avvolgimenti di statore e rotore
 - Sovraccarico (es. $1.5 I_n$ per 30 s)
 - Sovravelocità (e verifica delle temperature dei cuscinetti)
 - Squilibrio di corrente (correnti inverse)
 - Tenuta al corto circuito (3 s)
 - Regolarità della forma d'onda

47

Capability chart



48

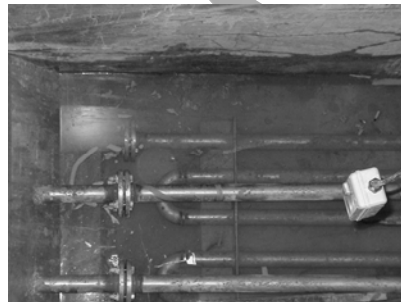
Avvolgimenti statore



49

Raffreddamento

- Alternatore:
 - Piccola potenza: a aria esterna con ventilatori calettati sull'albero
 - Fino a 30 MVA, aria chiusa raffreddata con acqua; scambiatori immersi nello scarico e circuito chiuso
 - Grande potenza: idrogeno - turboalternatori
- Cuscinetti: la portata di raffreddamento deve essere disponibile anche quando la macchina sta ruotando senza produrre (compensatore sincrono)
- Elettronica in centrale



50

Alternatore, cuscinetti e anelli



51

Funzioni e caratteristiche del sistema di eccitazione

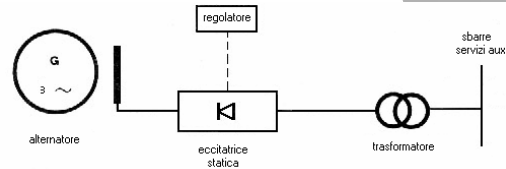
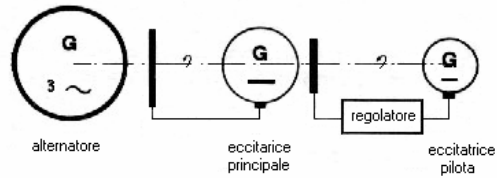
- regolatore di tensione
- regolatore di fattore di potenza con impostazione esterna
- limitatore di sovra e sotto eccitazione
- limitatore di corrente statorica

- precisione della regolazione
- campo di funzionamento della regolazione automatica (80-110%)
- *ceiling* ($2 V_n$)
- tempo di risposta (eccitrici statiche)
- velocità di risposta
- controeccitazione
- Potenza assorbita: $0.5-1\%A_n$; $V_{ecc}=200-500 V$

52

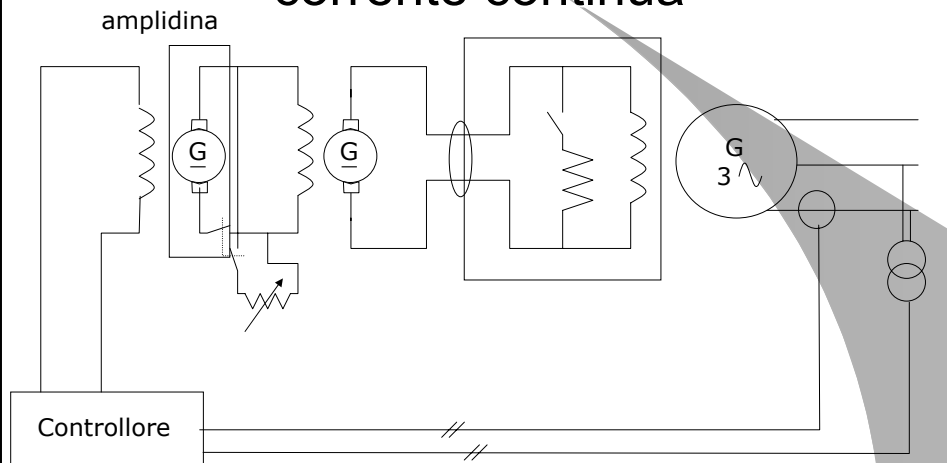
Eccitazione degli alternatori

- Eccitrici rotanti in c.c.: possibile anche l'eccitatrice pilota
- Sistemi brushless: piccolo alternatore il cui indotto è nel rotore e la cui corrente viene raddrizzata; senza presenza di spazzole
- Eccitrici statiche: alimentazione mediante raddrizzatore e anelli



53

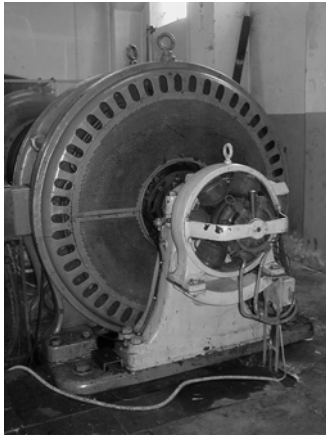
Schema di una eccitatrice in corrente continua



Al posto dell'amplidina ci può essere un piccolo alternatore a magneti permanenti che alimenta un raddrizzatore

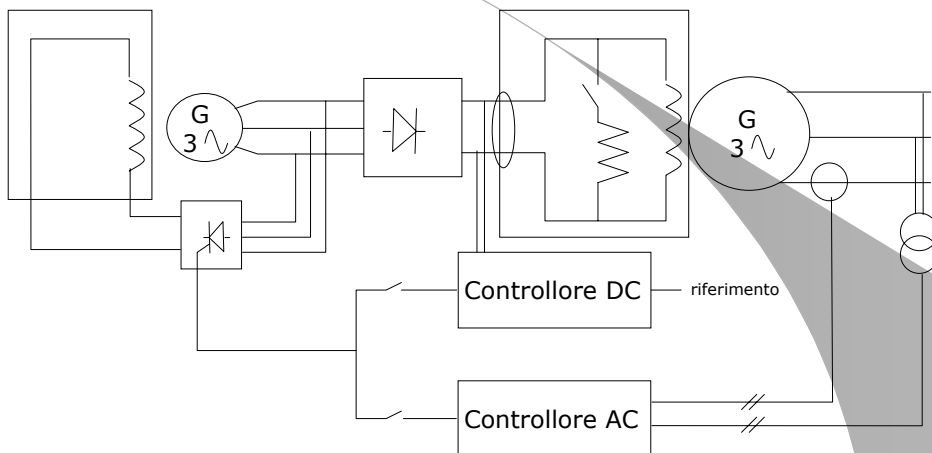
54

Alternatore e eccitazione



55

Eccitatrice AC con ponte a diodi

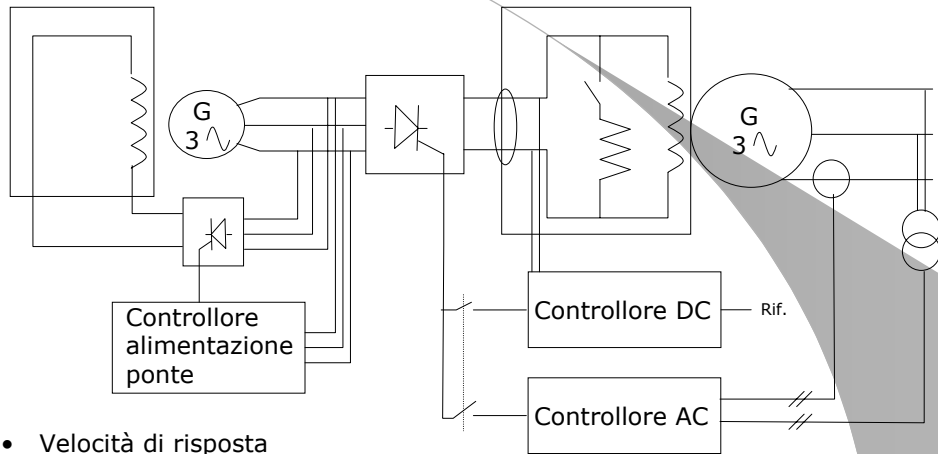


- Velocità di risposta
- Modularità
- Sicurezza della fonte di alimentazione
- Niente spazzole

Non è consentita l'inversione di v_{ecc} né la controeccitazione

56

Eccitatrice AC con ponte controllato

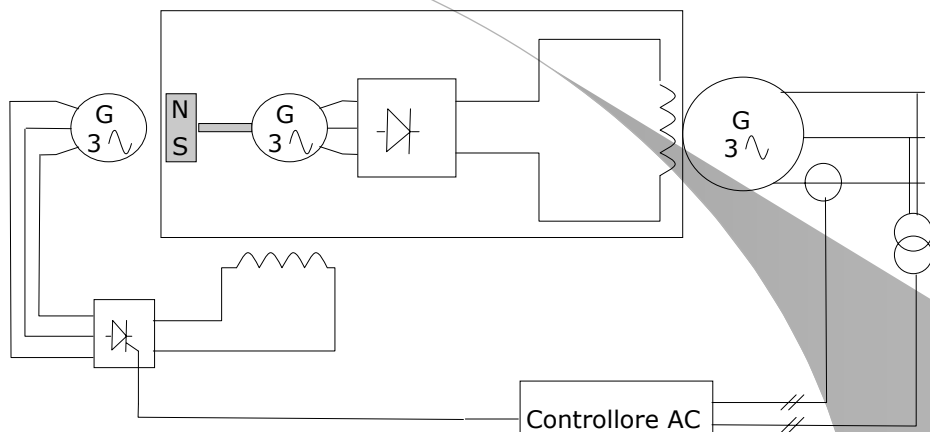


- Velocità di risposta
- Modularità
- Sicurezza della fonte di alimentazione
- Niente spazzole
- Si può invertire v_{ecc}

Non è consentita la controeccitazione

57

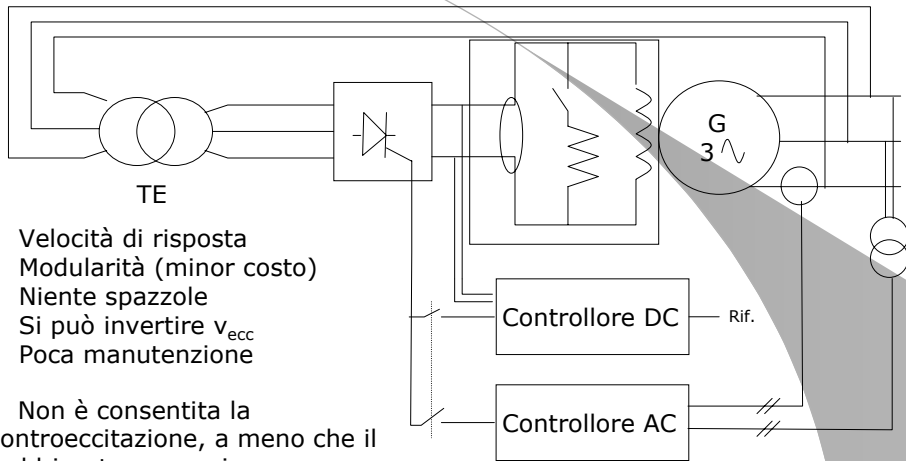
Eccitatrice *brushless*



- Si sono affermati quando gli alternatori hanno raggiunto potenze rilevanti (660 MW)
- Eliminazione di tutti i contatti striscianti
- Limitate possibilità di regolazione
- Adatti a impianti con rischio di incendio e esplosione, sistemi navali, piccolo idroelettrico

58

Eccitatrice statica



- Velocità di risposta
- Modularità (minor costo)
- Niente spazzole
- Si può invertire v_{ecc}
- Poca manutenzione

- Non è consentita la controeccitazione, a meno che il raddrizzatore non sia bidirezionale

59

Trasformatori

- E' sempre bene che ci siano, quanto meno per proteggere gli alternatori da sovratensioni (anche con $k=1$)
- Sono sempre stella-triangolo:
 - la stella in AT per contenere il costo degli isolamenti e consentire la messa a terra (non sempre, e solo se centro stella accessibile, isolamento graduale o meno)
 - il triangolo in MT blocca le correnti di III armonica prodotte dagli alternatori
- Trasformatori monofasi: tre trasformatori collegati opportunamente:
 - costo complessivo maggiore
 - possibilità di riserva con un solo trasformatore monofase
 - è possibile organizzare meglio l'occupazione degli spazi, ma complessivamente ingombrano di più
 - trasporto meno oneroso

60

Trasformatore di centrale



61

Caratteristiche dei trasformatori di centrale

- Tensioni nominali: dipendono dalla tensione di rete e da quella dell'alternatore
- Rendimento: circa 99%
- Solitamente è inserito un variatore lato AT (tipicamente $\pm 2 \times 2.5\%$), per compensare le variazioni di tensione in rete
- Raffreddamento: ONAN, ONAF, OFWF (in caverna, necessità di pompa)
- Problema dell'olio isolante e delle barriere in caso di incendio

62

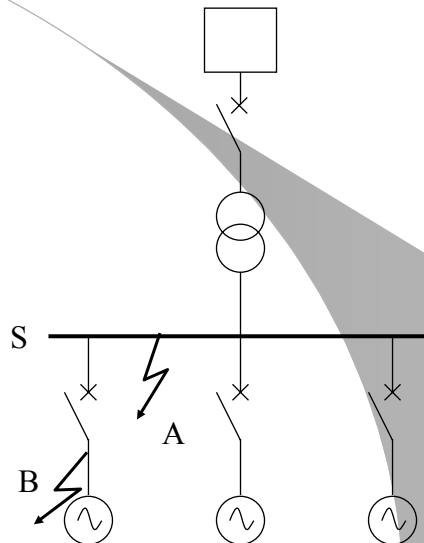
Schemi di potenza

- Potenza delle macchine presenti
- Sicurezza delle persone
- Livello di affidabilità
- Facilità e flessibilità di esercizio
- Rendimenti

63

Più macchine in parallelo

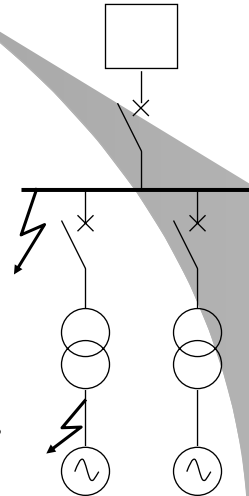
- Si risparmia sul trasformatore e sulle relative apparecchiature
- P_{cc} sulle sbarre aumenta all'aumentare della potenza (la reattanza in pu del trasformatore è circa la stessa, aumenta I_n)
- Oneroso dimensionamento interruttori MT: devono essere dimensionati per la piena I_{cc} di sbarra
- Energizzazione brusca del trasformatore all'accensione
- Oscillazione delle macchine



64

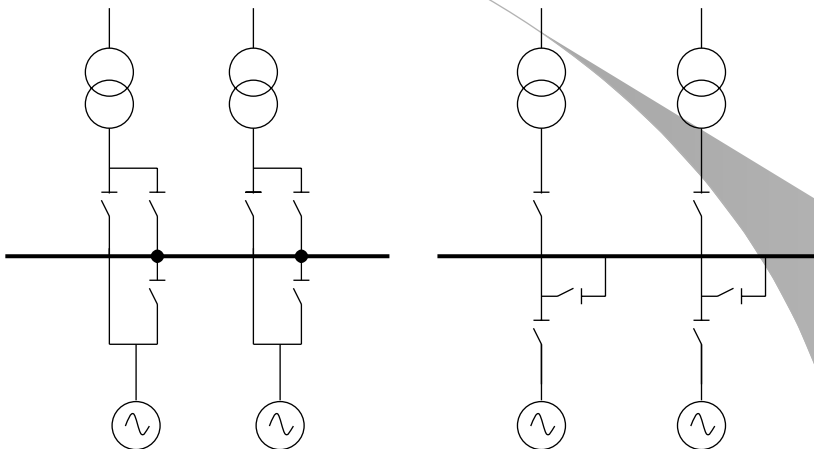
Montante rigido

- Soluzione più economica al crescere della potenza
- Si suppone il montante rigido infallibile
- I due gruppi sono indipendenti (guasto MT)
- Si risparmia il costo dell'interruttore di macchina; gli interruttori sono installati sulla AT
- I tre interruttori presenti sono uguali, come potere di interruzione
- Il parallelo avviene sulla AT, con energizzazione *soft* dei trasformatori, che sono in tensione solo quando il gruppo produce (guadagno sulle perdite a vuoto) e sono ottimizzati per il proprio carico
- Esempio:
 - Sbarra singola: 2 gruppi da 20 MVA, a 15 kV, $I_n=770$ A; Un trasformatore da 40 MVA, $v_{cc}=0.1$, $I_{cc15kV}=15$ kA
 - Montante rigido: 2 gruppi da 20 MVA, a 15 kV, $I_n=770$ A; Due trasformatori da 20 MVA, $v_{cc}=0.1$, $I_{cc15kV}=7.7$ kA



65

Scambio di sbarra

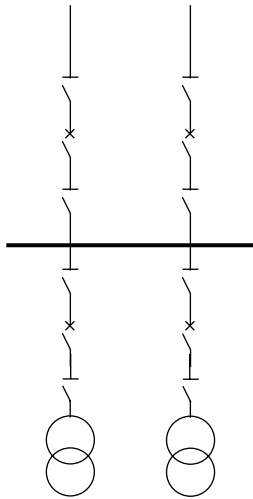


Soluzioni con i vantaggi del montante rigido, ma possibilità di scambiare alternatori-trasformatori
I trasformatori devono essere dimensionati opportunamente

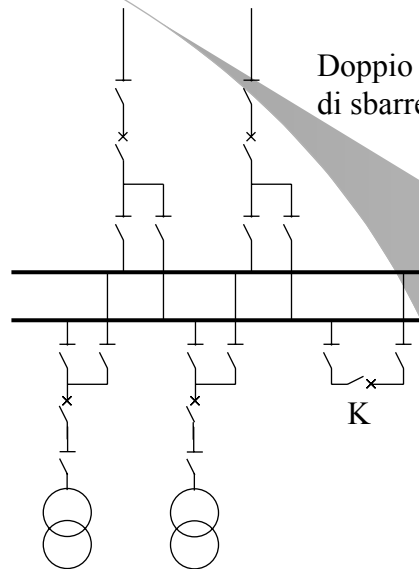
66

Schemi di stazione

Singolo sistema di sbarre



Doppio sistema di sbarre



67

Sezionatori di terra

- Ogni parte dell'impianto deve poter essere messa a terra per consentire lavori in sicurezza. In particolare:
 - partenza delle linee
 - sbarre AT
 - trasformatore/i
 - celle dei quadri
- Devono essere previsti interblocchi per evitare che si possa accedere a parti in tensione, nei quadri

68

Stazione elettrica di trasformazione



69

Sezionatore e morsetti



70

Servizi ausiliari

- Comprendono diversi tipi di utenze, con gradi diversi di disponibilità e continuità dell'alimentazione
- Secondo le caratteristiche, possono essere:
 - in c.a. o in c.c. (110V – potenza - oppure 24V – telecomandi e telemisure), alimentati da batterie caricate da raddrizzatori in tampone
 - utenze tassate e utenze esenti
- In totale sono qualche millesimo della potenza
- Solitamente c'è una sbarra ausiliari unica per tutti i gruppi
- Quasi tutti i servizi devono essere alimentati anche a centrale ferma

71

Tipologie di S.A.

- Servizi in c.a. che tollerano brevi interruzioni:
 - illuminazione
 - sollevamento e trasporto
 - forza motrice
 - apparecchiature trattamento olio
 - servizi generali
 - pompe di aggotamento
 - carica batterie
- Servizi in corrente continua in continuità:
 - circuiti di regolazione
 - circuiti di comando
 - circuiti di segnalazione
 - circuiti di protezione
 - luci di sicurezza
 - utenze di emergenza in c.c.
- Servizi in c.a., con riserva in c.c.:
 - pompa dell'olio del regolatore di velocità
 - compressore del polmone d'aria del regolatore
 - pompe olio cuscinetti e trasformatori (se presenti)
 - pompe acqua raffreddamento trasformatori (se presenti)
 - servizi antincendio

72

Sistema in corrente continua

- Pompa in c.c. per l'avviamento in isola, per mettere in pressione il circuito oleodinamico per il regolatore di velocità e i comandi (a volte anche i cuscinetti, per le macchine più grandi)
- Batteria di accumulatori con raddrizzatore caricabatterie, di capacità sufficiente almeno a mettere in sicurezza l'impianto

73

Alimentazione dei S.A.

- dal montante di macchina MT, con un trasformatore dei S.A.
 - problema della corrente di c.c. elevata (interruttore)
- dal montante AT della centrale
- da rete MT esterna indipendente
- da gruppo ausiliario (elettrogeno oppure idraulico)
- alimentazioni diverse se previsto il funzionamento in isola

74

Regolazione e automazione

- Avviamento
- Regolazione tensione e frequenza
- Distacco di carico
- Protezioni
- Telecontrollo

75

Come si avvia una macchina

- Avvio delle pompe di lubrificazione cuscinetti (se presenti) e regolatore velocità
- Apertura del *by-pass* della valvola di turbina per equilibrare le pressioni a cavallo della valvola
- Apertura del distributore della turbina per metterla in moto fino alla velocità nominale (in questa fase, il carico è costituito dagli attriti)
- A questo punto entra in gioco il regolatore di velocità

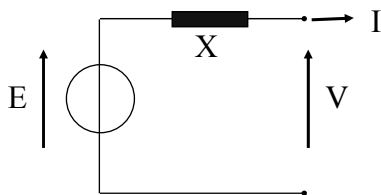
76

Avviamento

- Generatore asincrono:
 - non ha bisogno di eccitazione
 - la turbina è portata al 90-95% della velocità
 - si chiude l'interruttore di gruppo
- Alternatore:
 - si eccita la macchina e si regola la tensione
 - si chiude l'interruttore quando tensione e fase sono circa uguali a quelli di rete (zerovoltmetro)
 - aprendo ulteriormente, la macchina prende carico
 - agendo sull'eccitazione, si regola la Q

77

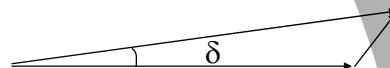
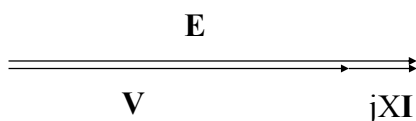
Avviamento



$$E = V + jXI$$

$$P = EV/X \sin \delta$$

$$Q = V(E \sin \delta - V)/X$$



78

Fermata del gruppo

- Si apre l'interruttore: la macchina tende a accelerare e il regolatore chiude il distributore della turbina (equivalente a un distacco di carico)
- Si potrebbe prima chiudere il distributore, ma si avrebbe un'azione di trascinamento con intervento del relè ritorno energia
- Alle basse velocità, le macchine più grandi hanno frenatura idraulica (controgetto), frenatura elettrica (si chiude il generatore in corto circuito o su una resistenza) o meccanica, perché i cuscinetti lavorano male alle basse velocità

79

Automazione

- Possibilità di funzionare non presidiata
- Accesso da punto di controllo remoto
- Diagnostica e protezioni
- Necessaria la possibilità di effettuare manovre indipendentemente dall'automatismo (servizio manuale, utile durante i malfunzionamenti e i collaudi)
- Possibilità di commutare da un tipo di servizio a un altro (necessario che il sistema "ricordi" il proprio stato)
- Necessario che la scelta del servizio avvenga solo localmente, per ragioni di sicurezza

80

Quadri protezione

- Allarme: anomalie o guasti che consentono di mantenere il servizio
 - terra-rotore
 - primo contatto relè Buchholz
- Scatto: apertura interruttore di macchina e diseccitazione, il gruppo rimane a giri:
 - guasti esterni (sovraccarico o corto circuito) in cui rimane presenza tensione per continuare a alimentare la centralina oleodinamica
- Blocco: apertura interruttore, diseccitazione, chiusura valvola turbina arresto delle macchine:
 - guasto interno al generatore (protezione differenziale, corto circuito tra spire, terra statore)
 - massima temperature dei cuscinetti
 - livello e circolazione del raffreddamento (se presente)
 - livello e circolazione dell'olio in pressione
- Blocco centrale: come sopra ma con chiusura valvola (il sensore rileva la posizione "non aperta" e manda automaticamente in blocco la/le macchine) in testa alla condotta:
 - minima pressione condotta
 - velocità di fuga della turbina
 - allagamento centrale

81

Esempio di taratura protezioni GRTN

- Generatori da 2.5 MW a 6 kV, su rete 132 kV
 - Massima corrente 50/51: $I=1.5 I_n - t=2s$
 - Minima tensione: $V=0.7 V_n - t=2s$
 - Squilibrio 46:
 - 1 soglia $6.5\% I_n - 5s - \text{Allarme}$
 - 2 soglia $7\% I_n - \text{Apertura interruttore di macchina}$
 - Massima tensione omopolare:
 - $V_0=10V$ secondari – $t=2s$ separazione impianto dalla rete
 - $V_0=70V$ secondari – $t=1s$ separazione impianto dalla rete

82

Regolazione della velocità

- Quando c'è uno squilibrio di coppia all'albero, in accordo con la

$$C_m - C_e = J \frac{d\Omega}{dt}$$

cambiarebbe la velocità, se la macchina fosse isolata

- Il regolatore di velocità mantiene costante Ω , e quindi la frequenza

85

Regolazione della velocità

- Problema: mantenere la velocità di rotazione al variare della portata (variazione lenta) o del carico (può essere veloce)
- Diversi tipi di regolazione possono imporre come *set point*:
 - potenza attiva
 - livello del bacino di carico
- La regolazione avviene controllando il distributore della turbina, cioè la portata
- Il generatore asincrono non necessita di regolatore di velocità

86

Caratteristiche del regolatore

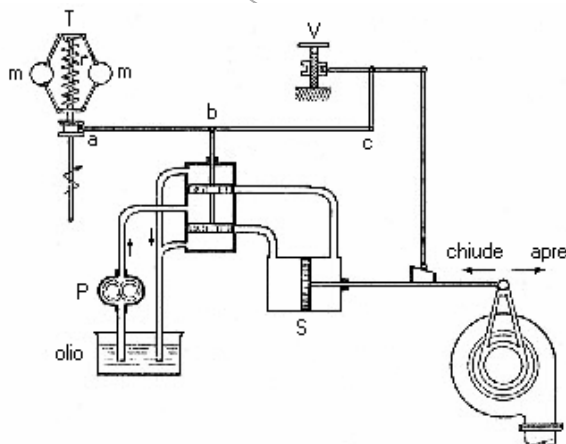
- Stabilità
- Grado di statismo
 - variabile tra 0.5% e 5%
- Energia regolante: $\Delta P = -k\Delta f$
- Precisione della regolazione
- Insensibilità: variazione percentuale di velocità occorrente per far intervenire il regolatore ($i=0.1\%$)
- Rapidità di intervento: tempo che il regolatore, sollecitato da una piccola variazione di velocità, impiega per produrre una uguale variazione percentuale della P erogata dalla turbina (es.: 0.2 s)

$$\sigma = \frac{f_1 - f_2}{f_0}$$

87

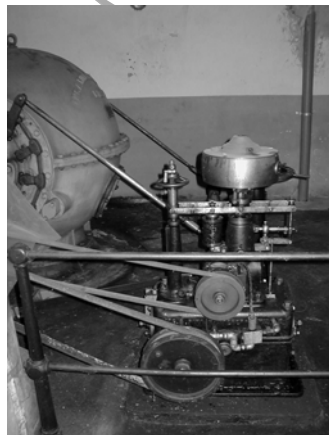
Regolatore di velocità

- Sensore che misura la velocità (oggi: ruota fonica)
- Amplificatore
- Servomotore alimentato da una centralina oleodinamica



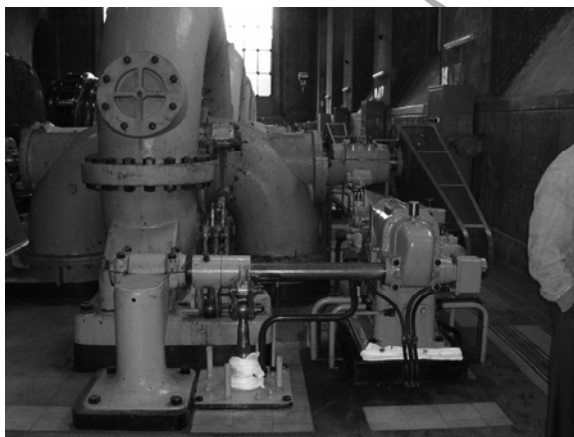
88

Regolatore di velocità



89

Regolatore e comando Francis



90

Distacco carico a P massima

- Variazione significativa della velocità
- La velocità si ristabilisce in funzione dei regolatori e delle inerzie (colpo d'ariete)
- La diminuzione avviene in T_0 : c'è un eccesso di energia $P_0 T_0/2$ che accelera il gruppo (diminuzione lineare della potenza motrice)

- La sovravelocità è:
$$\frac{1}{2} J(\omega_1^2 - \omega_0^2) = \frac{P_0 T_0}{2}$$

- Definito il tempo di avviamento (5-10s) $T_\omega = J\omega_0^2/P_0$

- Si ottiene:
$$\frac{(\omega_1^2 - \omega_0^2)}{\omega_0^2} = \frac{T_0}{T_\omega}$$

- Tegolo o scarico sincrono: 1-4 s

91

Connessione alla rete

- Tensioni di macchina: 400 V, 3-6-(10-20) kV
- Connessioni alla rete:
 - fino a 3 MW: sistemi MT
 - da 3 MW a 200 MW: 132-150 kV
 - oltre 200 MW: 400 kV

92

Collaudo generatori

- verifica della resistenza degli avvolgimenti;
- controllo delle vibrazioni;
- controllo dei rilevatori di temperatura;
- verifica della resistenza di isolamento degli avvolgimenti statorici (5kV c.c.) e rotorici (100 V c.c.), a macchina ferma;
- verifica della tenuta dielettrica verso massa dei componenti rotorici e statorici con tensione alternata applicata e successiva nuova verifica della resistenza di isolamento (macchina ferma e separata dalla rete);
- misura dell'impedenza rotorica totale e per singolo polo (ferma e in moto), per riferimento;
- misura della tensione d'albero;
- rilevamento della caratteristica di magnetizzazione;
- prova in corto circuito trifase permanente con rilievo della caratteristica;
- rilievo della forma d'onda di tensione (Norma CEI 2-3);
- verifica del senso ciclico delle fasi;

93

Collaudo trasformatori (Norme CEI 14-8; IEC 726)

- misura della resistenza di isolamento di entrambi gli avvolgimenti;
- misura della rumorosità;
- misura del rapporto di trasformazione e verifica del collegamento;
- prova di isolamento con tensione applicata a frequenza industriale;
- prova di isolamento con tensione indotta;
- misura della resistenza ohmica degli avvolgimenti;
- misura delle perdite e della corrente a vuoto;
- misura delle perdite dovute al carico e della tensione di corto circuito;
- misura delle scariche parziali

94

Collaudo

- Misura dei rendimenti a diversi valori di potenza:

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{P_{el}}{\eta_a} \frac{1}{\gamma HQ}$$

- P_{el} si misura elettricamente, η_a si conosce dal collaudo dell'alternatore
- H si misura con manometri di precisione
- Q si misura con mulinelli o ultrasuoni
- Alternativamente c'è il metodo termodinamico, che però richiede misure di differenze di temperature dell'ordine del centesimo di grado