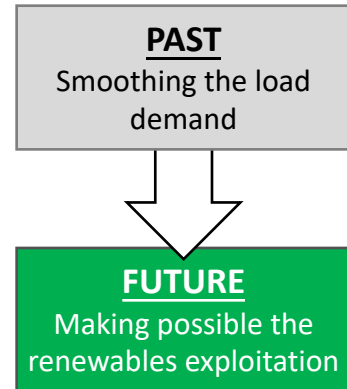


Impianti di pompaggio

- Gli impianti di pompaggio possono costituire la risposta a diverse esigenze presenti nel sistema elettrico (alcune tradizionali, altre attualissime):
 - Spostamento nel tempo dell'utilizzazione dell'energia prodotta dalle centrali convenzionali durante le ore di bassa richiesta
 - Traslazione di energia di base in energia di punta (**Generation time shift**)
 - Polmone energetico per accogliere le produzioni intermittenti e irregolari da fonti rinnovabili → **Capacity Firming of Intermittent Renewable Resources**
 - Riserva rapida pronta a bilanciare improvvisi aumenti di carico o perdita di generazione → **Primary and secondary reserve**
 - Utilizzo dei gruppi, nei periodi di non pompaggio/produzione, come compensatori sincroni di rifasamento → **Voltage regulation**
- Tutti questi possibili contributi vengono definiti **servizi ancillari** per la gestione del sistema elettrico



117

Impianti di pompaggio – Convenienza economica

Criteria di convenienza economica

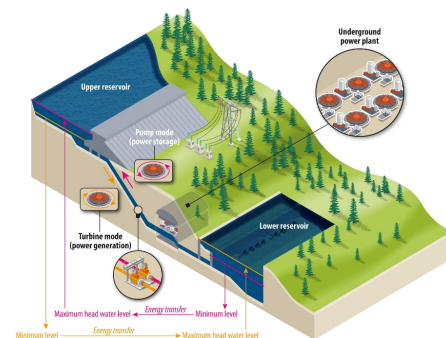
- **Time shift:**
 - Il costo dell'energia di base assorbita sia inferiore al costo dell'energia di punta prodotta (considerando il **rendimento del ciclo di carica/scarica**, o **rendimento round-trip η_p**)

$$c_b \leq c_p \cdot \eta_p$$

- Tale differenziale di prezzo deve generare un introito annuo che compensi la differenza tra il costo annuo dell'impianto di pompaggio (C_p) ed il costo annuo di un impianti di punta di pari potenza (P_{PT})

$$C_p - K_p \cdot P_{PT} \leq (\eta_p \cdot c_p - c_b) \cdot \sum_j W_{Pbj}$$

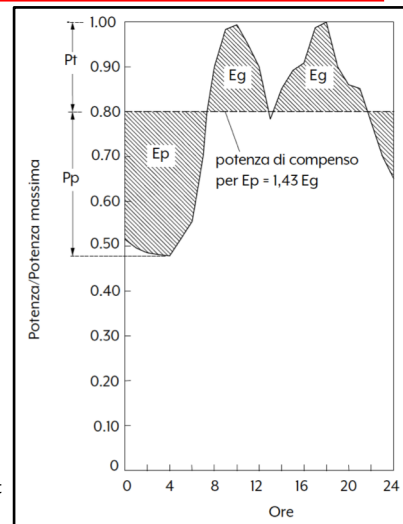
- **Remunerazione degli altri servizi ancillari?**



118

Impianti di pompaggio – Dimensionamento potenza/energia

- **Criteri di dimensionamento:** far funzionare le unità termiche tradizionali a potenza costante
 - L'impianto di pompaggio deve compensare le fluttuazioni giornaliere di carico
 - Definire l'**ordinata di compenso** del diagramma di carico, noto il rendimento round-trip dell'impianto di pompaggio
 - Per ottenere in generazione 1 kWh, è necessario assorbire dalla rete in pompaggio $1/\eta_p = 1.43$ kWh (hp. $\eta_p = 70\%$)
 - Ordinata di compenso energetico, tale che $E_g = E_p \cdot \eta_p$
 - Dimensionamento del sistema di pompaggio:
 - **Potenza nominale in produzione** (turbine) P_t
 - **Energia generata** E_g
 - **Potenza nominale in pompaggio** (pompe) P_p rapporto P_p/P_t
 - **Energia prelevata dalla rete in pompaggio** E_p
- **Quali risultati si otterrebbero nel caso italiano?**

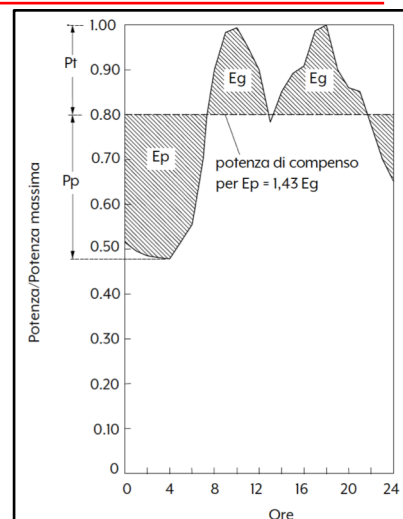


► Figura 4.49 Diagramma di carico giornaliero e compensazione delle punte mediante impianti di pompaggio.

119

Impianti di pompaggio – Dimensionamento potenza/energia

- L'applicazione del criterio al caso italiano comporterebbe:
 - $P_p \cong 20\%$ Picco di carico \rightarrow 10-11 GW
 - $P_p/P_t \cong 1.5$
- Nelle applicazioni reali, un sovradimensionamento delle pompe rispetto alle turbine è difficile da ottenere
 - Differenza tra le potenze limite ottenibili per le pompe e per le turbine a parità di tipo di impianto
 - Se si usasse la stessa macchina elettrica, essa funzionerebbe in modo non ottimizzato in una delle due fasi
 - Sarebbe necessario realizzare impianti separati per turbina e pompaggio \rightarrow Aggravio ingiustificato di costi
- Nella maggior parte delle applicazioni $P_p/P_t = 1$

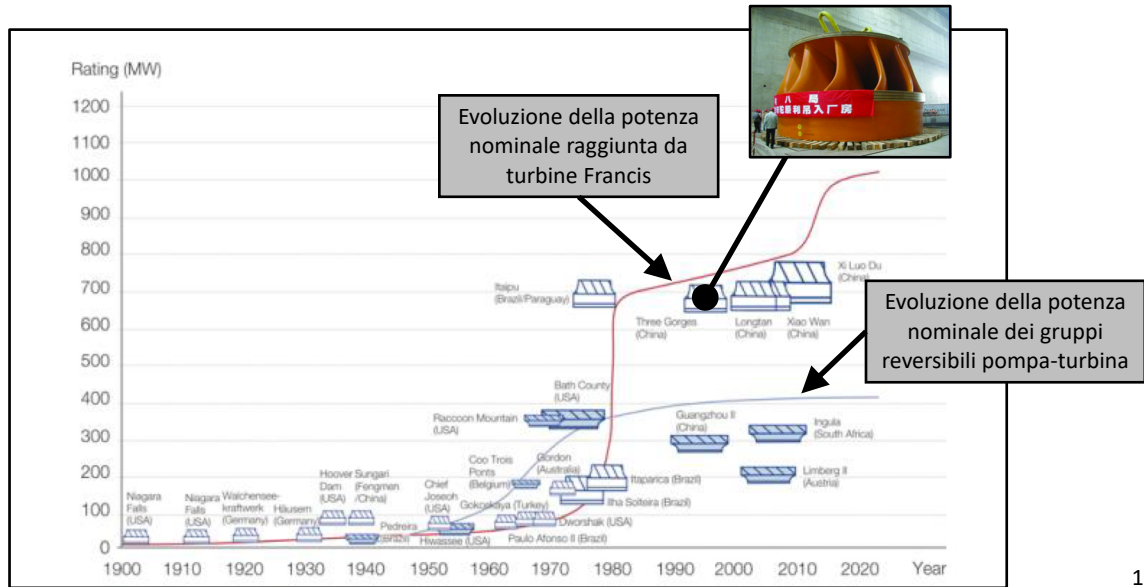


► Figura 4.49 Diagramma di carico giornaliero e compensazione delle punte mediante impianti di pompaggio.

120

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Dimensionamento potenza/energia



121

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

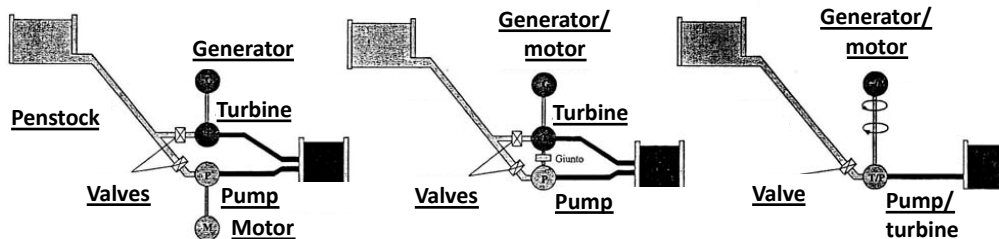
Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

- Contenere il volume dei serbatoi → Esigenza di utilizzare salti elevati (100s → 1.000s m)
 - Uso quasi esclusivo di pompe centrifughe
- 3 soluzioni possibili

Gruppi indipendenti (o quaternari), ovvero gruppo turbina-generatore e gruppo motore-pompa separati
4 macchine complessive (2 idrauliche e 2 elettriche)

Gruppi ternari, ovvero turbina e pompa connesse a un'unica macchina sincrona
3 macchine complessive (2 idrauliche e 1 elettrica)

Gruppi binari, ovvero macchina idraulica reversibile connessa a macchina sincrona
2 macchine complessive (1 idraulica e 1 elettrica)



122

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

- **Vincolo sulla disposizione delle macchine**
 - Problema comune a tutte le disposizione costruttive
 - I vari macchinari dovrebbero essere posizionati in modo **relativamente vicino**
 - Ridurre l'estensione delle opere idrauliche (collegamenti di alta e bassa pressione)
 - Limitare la lunghezza dell'albero di rotazione meccanica (solo per gruppi ternari e binari)
- **Quota di installazione dei macchinari idraulici** → Necessità funzionali per evitare cavitazione
 - Per **pompe ad alta pressione** → Forte battente di aspirazione
 - Es.: per pompe multistadio di grande potenza e ad alta velocità (500÷600 giri/minuti) il battente richiesto si avvicina ai 30 m
 - In caso di **turbina Pelton**
 - Scarico in un bacino a pelo libero (altezza di installazione positiva, $H_a > 0$)
 - **Nonostante i salti medio-alti, si cerca di usare turbine Francis da installarsi sotto-battente in prossimità delle pompe (fino a 600-700 m di salto)**

123

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

- **Gruppi indipendenti**
 - PRO:
 - Maggiore flessibilità di esercizio
 - Pompaggio e generazione hanno in comune solo i bacini, le gallerie e le condotte forzate
 - Le macchine possono essere scelte con caratteristiche indipendenti (es. velocità di rotazione)
 - Entro certi limiti, pompa e turbina potrebbero avere potenze nominali sensibilmente diverse
 - CONTRO:
 - Maggiore complessità impiantistica
 - Volume complessivo della centrale
 - **Costi di installazione** (2 macchine elettriche)
 - Rara diffusione

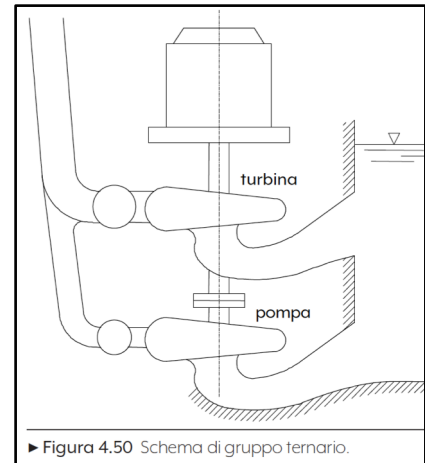
124

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

• Gruppi ternari

- Lo scavo può essere realizzato in unica caverna
- L'installazione più comune è ad **asse verticale** (dall'alto, macchina elettrica, turbina, pompa)
- Vincoli legati alla lunghezza dell'albero di rotazione meccanica, soprattutto se si usa turbina Pelton
- Alberi meccanici comunque di lunghezza fino a 50 m
 - Vincoli logistici e di montaggio
 - Vibrazioni su velocità critiche (anche attraversate dalla macchina in fase di avviamento/arresto)
- Per mantenere elevati rendimenti in generazione è necessario installare un **giunto di accoppiamento** tra turbina e pompa
 - Se la pompa girasse in acqua → Perdite 40% a bocca chiusa
 - Se la pompa fosse disannegata → Perdite alcuni punti % (dimensione della macchina)
 - Perdita di rendimento nelle ore di punta ([€/MWh] ↑)



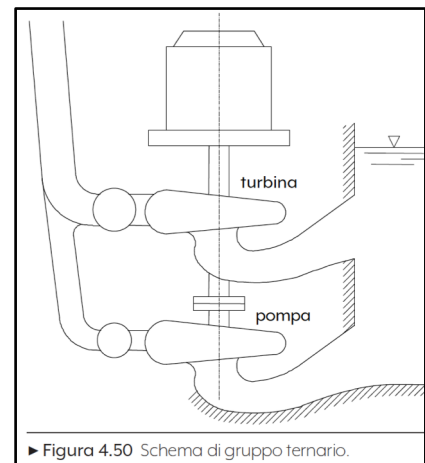
125

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

• Gruppi ternari

- La presenza del giunto meccanico impone l'installazione di 2 supporti di spinta
 - Uno per il gruppo generatore-turbina
 - Uno per la pompa sottostante
- Nel funzionamento in pompaggio, la turbina non può essere esclusa dalla rotazione → Elevate perdite?
 - Se Pelton → Perdite modeste (ventilazione ed attrito dei supporti)
 - Se Francis → Disannegata (perdite % per rotazione in aria molto minori di una pompa a parità di potenza)



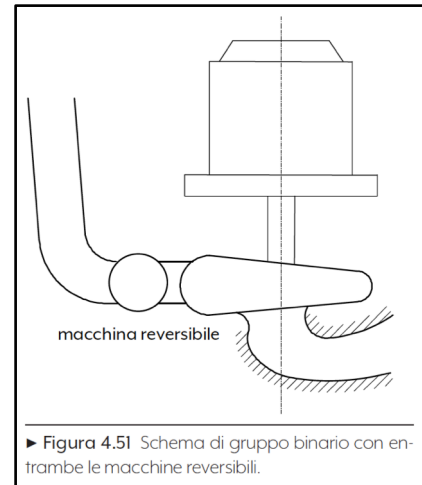
126

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

• Gruppi binari con macchine entrambe reversibili

- PRO:
 - Ingombri e lunghezza dell'albero di trasmissione meccanica molto contenuti
 - Geometria di opere idrauliche e centrale sono molto simili ad una macchina di pura generazione
 - Minore costo di installazione (opere civili e macchinario idraulico)
- CONTRO:
 - Le macchine idrauliche reversibili richiedono un disegno particolarmente studiato → Massimizzare il rendimento idraulico delle macchine nei due stati di esercizio
 - Le giranti di macchine reversibili hanno geometria più simile alle pompe
 - Diagrammi collinari piuttosto chiusi in generazione
 - Calo di rendimento marcato per condizioni di lavoro leggermente diverse dalla configurazione ottimale



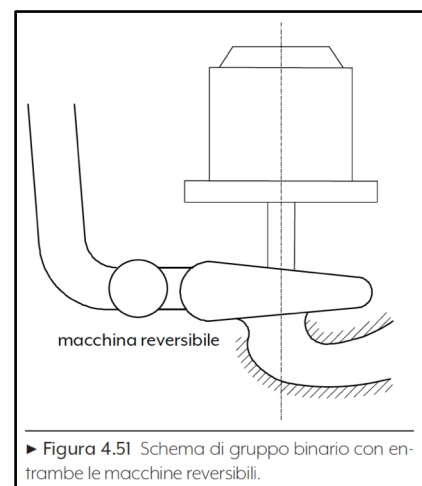
127

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Disposizioni costruttive

• Gruppi binari con macchine entrambe reversibili

- PRO:
 - Ingombri e lunghezza dell'albero di trasmissione meccanica molto contenuti
 - Geometria di opere idrauliche e centrale sono molto simili ad una macchina di pura generazione
 - Minore costo di installazione (opere civili e macchinario idraulico)
- CONTRO:
 - Rendimento complessivo più basso in pompa e in turbina (soprattutto se operanti allo stesso numero di giri)
 - Cambio stato di esercizio (pompa ↔ turbina) → Necessità di invertire il senso di rotazione → Arresto del gruppo, tempo di inversione della potenza
 - Difficoltà nell'avvio del gruppo in modalità pompaggio
 - Maggiore complicazione dei circuiti elettrici



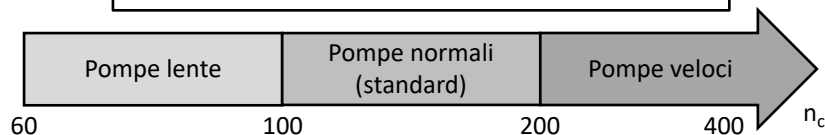
128

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Dimensionamento della pompa

- Analogamente alle turbine, si definisce un **numero di giri caratteristico** n_c anche per le pompe
 - Tale valore è pari alla velocità di rotazione che dovrebbe essere attribuita ad una pompa geometricamente simile per dare luogo ad una prevalenza manometrica di 1 m, utilizzando la potenza di 1 HP (cavallo)
- È possibile meglio correlare n_c con la portata (1 HP = 745 W)

$$n_c = \frac{n\sqrt{P(cv)}}{H^4\sqrt{H}} = n \cdot \frac{\sqrt{\frac{1000 QH}{75}}}{H^4\sqrt{H}} = 3,65 n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$$



- Si fa uso di **pompe centrifughe** senza regolazione della portata tramite distributore
- Possibile costruzione pluristadio → Raggiungimento di grandi prevalenze

129

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso
- Transitori idraulici:
 - Interruzione del carico in funzionamento da turbina
 - Interruzione dell'alimentazione in funzionamento da pompa
- Cavitazione

130

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- **Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso**
 - Opere idrauliche di adduzione e di scarico
 - Gallerie in pressione
 - Se si applica il dimensionamento di massima convenienza economica, la velocità dell'acqua che corrispondono al diametro di massima convenienza risultano alquanto superiori a quelle usuali per gli impianti di sola produzione (fino a 5 m/s)
 - La perdita di energia dovuta alle perdite di carico può essere compensabile con un aumento di portata
 - Maggiore volume d'acqua che è necessario pompare
 - Condotte forzate
 - Anche in questa sezione di impianto, si ha il medesimo problema di aumento della velocità dell'acqua (fino a superare i 10 m/s)
 - Necessaria analisi in relazione ai transitori idraulici (es. entità del colpo d'ariete)

131

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

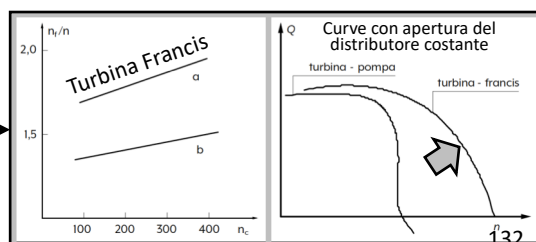
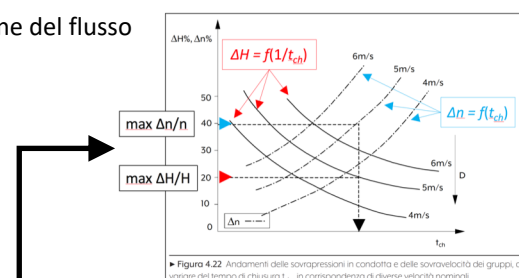
Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso

- **Transitori idraulici:**

- **Interruzione del carico in funzionamento da turbina**

- Turbina classica
 - Tipo di funzionamento in corrispondenza all'interruzione del carico è ben definito
 - Se la manovra di chiusura della valvola avviene regolarmente → Previste **sovra-pressioni** e **sovra-velocità**, in funzione dei dati caratteristici del progetto (t_{ch})
 - Se la valvola non interviene → Il gruppo rotante si porta alla **velocità di fuga** con variazione di portata relativamente lenta



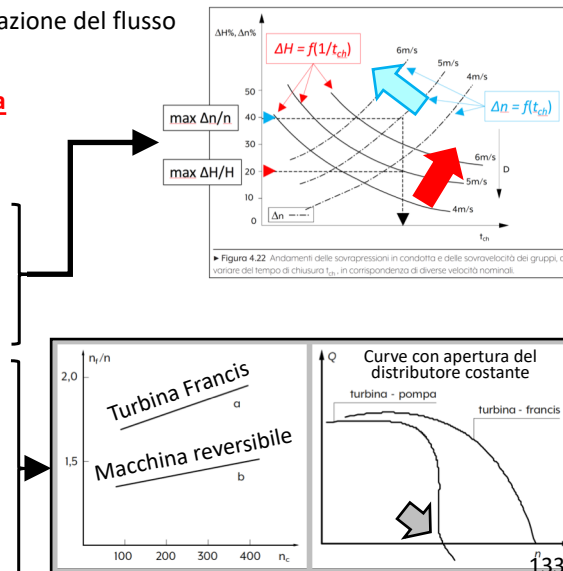
Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso

- **Transitori idraulici:**

- **Interruzione del carico in funzionamento da turbina**

- Macchina reversibile
 - Comportamento molto diverso
 - Se la valvola interviene → La maggiore velocità dell'acqua nelle condotte aumenta il **colpo d'ariete** e riduce il tempo per il raggiungimento delle **velocità di fuga**
 - Se la valvola non interviene → Il gruppo rotante si porta alla velocità di fuga
 - Brusco calo della portata in prossimità della velocità di fuga
 - La portata si può invertire → Funzione di pompaggio



Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

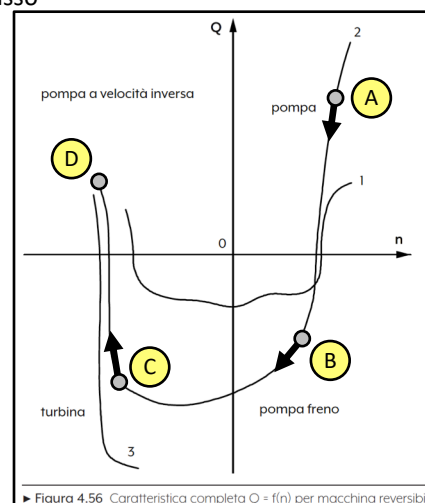
- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso

- **Transitori idraulici:**

- Interruzione del carico in funzionamento da turbina

- **Interruzione dell'alimentazione in funzionamento da pompa**

- Con macchina reversibile, se non intervengono gli organi di intercettazione (valvole)
 - A. La macchina rallenta, tanto più velocemente quanto più piccola è l'inerzia della macchina
 - B. Si inverte la direzione del flusso → La macchina funziona da pompa freno
 - La girante ruota in direzione pompa
 - Il flusso d'acqua scende verso valle
 - C. Si inverte la direzione di rotazione della macchina → La macchina funziona come turbina
 - Dopo poco tempo si raggiunge la velocità di fuga
 - D. Pompaggio con velocità di rotazione inversa (come nella slide precedente)



► Figura 4.56 Caratteristica completa $Q = f(n)$ per macchina reversibile
Le curve 1, 2, 3 corrispondono a diverse aperture del distributore

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso
- Transitori idraulici:
 - Interruzione del carico in funzionamento da turbina
 - Interruzione dell'alimentazione in funzionamento da pompa
- **Cavitazione**
 - Quota di installazione della ruota
 - La **cifra di Thoma** può essere espressa in funzione delle velocità assoluta (V_1) e relativa (W_1) all'ingresso della ruota
 - Energia totale NPSH (Net Positive Suction Head)
 - Altezza barometrica H_b
 - Tensione di vapore dell'acqua H_v
 - Battente di aspirazione $-H_a$

$$NPSH = H_b - H_v - H_a$$

$$\sigma = \frac{NPSH}{H} = \frac{\lambda_1 \cdot V_1^2}{H \cdot 2g} + \frac{\lambda_2 \cdot W_1^2}{H \cdot 2g}$$

135

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Aspetti idraulici

- Dimensionamento delle condotte e modalità di intercettazione del flusso
- Transitori idraulici:
 - Interruzione del carico in funzionamento da turbina
 - Interruzione dell'alimentazione in funzionamento da pompa
- **Cavitazione**
 - I due parametri λ_1 e λ_2 sono sperimentali
 - Pompa: 1.2 e 0.25
 - Turbina (riferendosi alle grandezze in uscita): 0.8 e 0.03
 - Le condizioni di **battente di aspirazione** sono molto più severe per la pompa (decine di metri)
 - Corretto disporre la **pompa più in basso della turbina**

$$NPSH = H_b - H_v - H_a$$

$$\sigma = \frac{NPSH}{H} = \frac{\lambda_1 \cdot V_1^2}{H \cdot 2g} + \frac{\lambda_2 \cdot W_1^2}{H \cdot 2g}$$

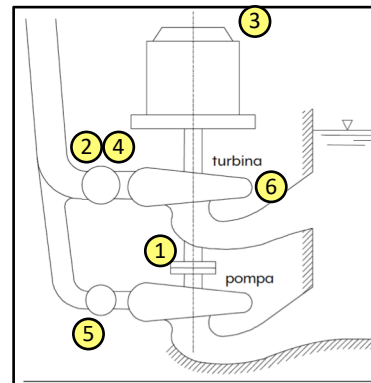
136

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- **In caso di gruppi ternari**
 - Macchine idrauliche separate → Possono avere lo stesso senso di rotazione
 - È possibile avviare la modalità pompaggio usando la turbina dell'impianto come motore primo
 - Sequenza:
 1. Innesto della pompa all'asse del gruppo (in caso di grosse macchine, questo richiede l'arresto completo della turbina) → alcuni minuti
 2. Avviamento del gruppo completo fino alla velocità nominale mediante la turbina
 3. Esecuzione del parallelo con la rete
 4. Chiusura della turbina
 5. Apertura della valvola di mandata della pompa
 6. Pneumatizzazione della ruota di turbina (se si tratta di macchine a reazione) per limitare le perdite dovute al trascinarsi in acqua

1s - 10s
minuti



► Figura 4.50 Schema di gruppo ternario.

137

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi binari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - Avviamento elettrico asincrono
 - Avviamento elettrico sincrono (back-to-back)

138

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - **Avviamento mediante motore ausiliario**
 - È necessario che la macchina idraulica venga avviata quando disannegata (mediante iniezione di aria compressa)
 - Potenza nominale del motore primo $\sim 5-10\% P_p$
 - L'attrito dei cuscinetti allo spunto può essere rilevante → Viene inviato olio sotto pressione nei supporti portanti
 - Possibili motori primi ausiliari:
 - Piccola turbina ausiliaria di piccole dimensioni
 - Uso dell'eccitatrice della macchina sincrona come motore
 - Motore asincrono coassiale al gruppo principale

139

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

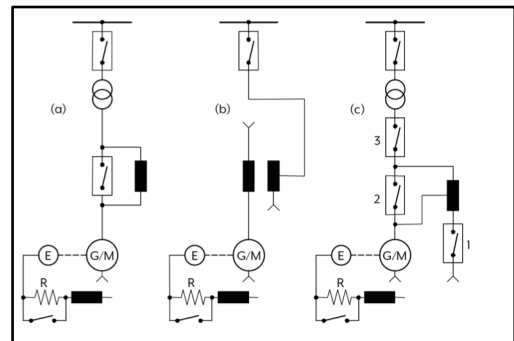
- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - **Avviamento elettrico asincrono**
 - Criticità per la costruzione del motore e per l'impatto sulla rete della procedura di avviamento
 - Corrente di spunto superiore a $5 I_n$, basso $\cos\phi$ e tempi di avviamento variabili in funzione dell'inerzia del gruppo (soprattutto se immerso in acqua)
 - Se rete debole → $I \uparrow \rightarrow \Delta V \uparrow \rightarrow$ Coppia motrice $\downarrow \downarrow$
 - Metodo applicabile solo in centrali connesse a rete forte ($S_{cc} \uparrow$)

140

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - **Avviamento elettrico asincrono**
 - In caso di reti non forti ($S_{cc} \downarrow$), è necessario effettuare un avviamento a tensione ridotta
 - Reattanze in serie (cortocircuitate in prossimità del regime di rotazione nominale)
 - Trasformatori con prese ausiliarie
 - Autotrasformatore cortocircuitabile
 - In generale la procedura di avviamento diventa molto più lenta



► Figura 4.58 Avviamento asincrono a tensione ridotta di macchine reversibili: (a) con inserzione di reattanze; (b) con trasformatori a prese ausiliarie; (c) con autotrasformatore di regolazione.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

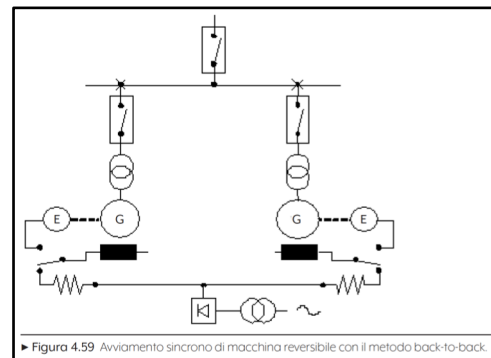
- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - Avviamento elettrico asincrono
 - **Avviamento elettrico sincrono (back-to-back)**
 - Non ha impatti significativi sulla rete
 - Richiede la disponibilità di un altro generatore in servizio separato o di un gruppo di avviamento statico
 - Necessaria eccitazione separata delle macchine sincrone (da regolare anche a gruppi fermi)

142

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

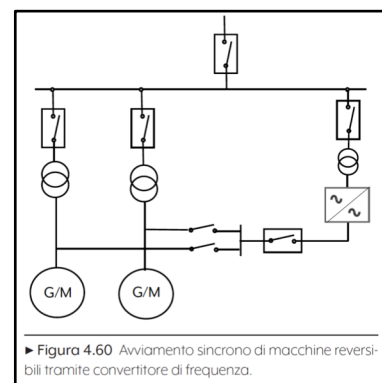
- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - Avviamento elettrico asincrono
 - **Avviamento elettrico sincrono (back-to-back)**
 - Con centrale sconnessa dalla rete, si avvia un gruppo in modalità generatore (eccitazione ridotta) e si alimenta l'avviamento del secondo gruppo
 - Alla velocità di sincronismo, viene attivata l'eccitazione di servizio normale dei gruppi
 - Parallelo con la rete
 - Sconnessione del generatore → Funzionamento pompa



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti di pompaggio – Avviamento e arresto

- Processi molto più complessi rispetto ad un impianto idroelettrico di sola generazione
- In caso di gruppi ternari
- **In caso di gruppi binari**
 - Unica macchina idraulica → Necessario invertire il verso di rotazione
 - Non è possibile usare la turbina come motore primo nel processo di avviamento in funzione pompa
 - Avviamento mediante motore ausiliario
 - Avviamento elettrico asincrono
 - **Avviamento elettrico sincrono (back-to-back)**
 - In alternativa, l'avviamento può essere fatto con un convertitore di frequenza AC/AC (inverter)
 - È possibile avviare in successione tutti i gruppi dell'impianto controllando in modo preciso la corrente assorbita dalle macchine elettriche in funzionamento da motore



144

