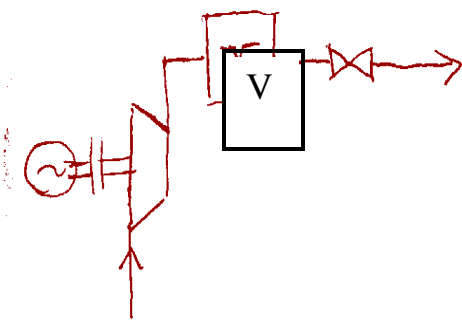


FENOMENI DI INSTABILITÀ

Sono fenomeni che hanno luogo soltanto quando la portata risulti, per un numero di giri a cui lavora la macchina, troppo modesta per cui riguardano soltanto il primo campo di valori della curva caratteristica della macchina. I fenomeni sono riscontrabili quando le condizioni di funzionamento siano provocatorie, cioè quando volutamente all'interno si costringa la macchina a condizioni anomali. Sono fenomeni riscontrabili sia nelle macchine centrifughe che nelle macchine assiali anche se le caratteristiche con le quali i fenomeni si presentano possono essere molto diverse a seconda del tipo di macchina. Per esempio per un compressore centrifugo può risultare difficile separare il fenomeno dello stallo dal fenomeno del pompaggio, però è più facile provocare l'uno, oppure l'altro operando opportunamente dall'esterno per ridurre la portata, per esempio effettuando repentinamente una strozzatura in corrispondenza della sezione d'uscita. Si tratta di fenomeni purtroppo difficilmente interpretabili dal punto di vista del modello matematico, nonostante il grandissimo impegno negli ultimi decenni che è stato dato a questo settore. Una codificazione teorica del fenomeno non è stata ancora determinata e ben difficilmente lo sarà in futuro in quanto i parametri sia funzionali che geometrici della macchina oltre che cinematici sono talmente numerosi e talmente difficili da codificare in un modello unico che difficilmente si potrà arrivare ad una teoria completa dello stallo e del pompaggio, tutto al più si potrà descrivere il fenomeno e quindi anche controllarlo limitatamente ad alcune famiglie di macchine tipiche di una determinata filosofia costruttiva.

POMPAGGIO

Il fenomeno del pompaggio può essere analizzato in laboratorio abbastanza facilmente in quanto si tratta di un fenomeno connesso con la più o meno rapida diminuzione della portata a cui si costringe la macchina quando si strozzi l'efflusso a valle, cioè al di là della sezione di mandata, attraverso una valvola, provocando un brusco restringimento di sezione. Succede in definitiva che la macchina inizialmente tende ad elaborare la medesima portata che aveva prima della perturbazione ma nell'ambiente a valle a causa della strozzatura si accumula una sovrappressione che consente alla macchina di continuare ad elaborare la portata in una misura prossima a quella regolare sino a quando la pressione accumulata nell'ambiente a valle non raggiunge valori tali da vincere la capacità della macchina ad elaborare portata e si ha alla fine un efflusso della portata dalla zona di mandata alla zona di aspirazione, cioè si arriva ad avere una portata negativa. Questo fenomeno dipende dalla quantità di fluido accumulabile nella linea di mandata dipende dal volume V che è a disposizione del fluido nell'ambiente di mandata.

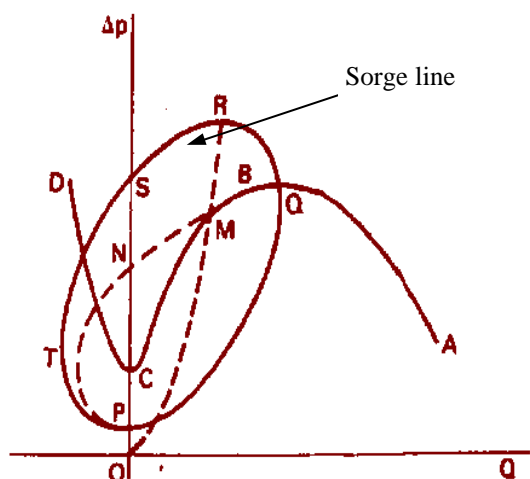


A seconda del volume a disposizione, che può essere ridotto al semplice volume del tronco di tubazione interposto tra la mandata della macchina e la valvola attraverso la quale si regola la condizione di esercizio, si influenza il fenomeno in quanto a maggiori volumi corrisponde una maggiore elasticità di risposta del gas compresso. Il fenomeno è tipicamente instabile, si produce una situazione ciclica caratterizzata da un andamento ciclico sia della portata che del Δp misurabile con opportuni manometri a monte e a valle della macchina.

Qualitativamente il fenomeno si può schematizzare in una maniera che è accettata da molti autori anche se ci sono alcune perplessità.

Ci riferiamo soprattutto ad una macchina centrifuga con una caratteristica a giri costanti che si può estendere alla zona instabile cioè la zona caratterizzata da pendenze negative.

La caratteristica statica della macchina in condizioni al di fuori del campo di stabilità può essere interpretata in questa maniera.



Nel caso delle portate negative la macchina funziona se pure con rendimenti scandalosi come una turbina in quanto si inverte il flusso rimanendo inalterata la geometria della macchina.

Il Δp va inteso come caduta di pressione da monte a valle nel campo delle portate negative. Supponiamo di essere passati per un motivo qualsiasi ad un funzionamento sempre a giri costanti su un punto posto sul ramo instabile della curva caratteristica.

Quello che si riscontra sperimentalmente ponendo un manometro differenziale oppure due manometri separati a monte e a valle in corrispondenza della capacità del volume a disposizione del gas, è l'andamento mostrato in figura in cui ad una prima caduta di Δp corrisponde una caduta di portata sino a quando addirittura non inverte il proprio segno.

Se cioè facciamo l'integrale delle portate sulle aree elementari, ad esempio interrogando con un manometro, vediamo che le zone in cui defluisce il fluido dalla mandata verso la aspirazione danno un contributo di portata negativa maggiore in valore assoluto nelle zone in cui ancora abbiamo ingresso di fluido nella macchina. Ad un certo punto abbiamo una inversione di tendenza che finisce col rivelare un vero e proprio percorso ciclico che prende il nome di ciclo di pompaggio, non in senso termodinamico, in cui si alterna per così dire il predominio della pressione nel ricevitore e quando predomina tale pressione abbiamo per l'appunto un riflusso complessivo del fluido da monte verso valle, poi quando la capacità a valle si è in un certo senso scaricata di fluido e quindi la pressione nell'ambiente a valle è scesa sotto un determinato valore la macchina è capace di nuovo ad elaborare una portata positiva. Ovviamente nel corso di un funzionamento del genere la macchina funziona in condizioni pessime da tutti i punti di vista e non ha senso parlare di rendimento. Il diagramma del ciclo di pompaggio dà un'idea della dissipazione energetica che può essere intesa come l'area racchiusa da detto ciclo ed è proporzionale all'energia dissipata nella macchina. Ciò che preoccupa maggiormente risiede nella stessa vita della macchina, poiché è sottoposta ad un cimento meccanico di fatica. A lungo andare può deteriorarsi irreparabilmente. Una macchina che funziona in condizioni di questo genere è soggetta a vibrazioni che possono raggiungere livelli non solo pericolosi ma addirittura paurosi. Non è possibile mantenere una macchina in condizioni di funzionamento del genere soprattutto con grandi perdite di elasticità del fluido cioè con grandi volumi di raccolta a valle per tempi prolungati.

Il fenomeno dal punto di vista delle applicazioni pratiche è facilmente superabile dato che è sufficiente, per evitarlo, far sì che non si raggiungano i valori a sinistra della soglia di tranquillità che grosso modo possiamo identificare come il luogo dei punti di massimo della curva caratteristica. Il problema sorge quando per motivi di esercizio, per motivi di esigenza tipiche dell'utenza, si è costretti a lavorare con basse portate, cioè a sinistra della soglia di tranquillità e allora occorrerà operare in una maniera opportuna per evitare comunque di entrare a lavorare nel campo dell'instabilità della macchina. Il fenomeno del pompaggio è stato investigato nel senso che esistono diversi modelli più o meno complessi che cercano di determinare le caratteristiche del ciclo di pompaggio in funzione delle caratteristiche del compressore, della capacità introdotta a valle e delle caratteristiche di funzionamento stabile. Alcune formule sono state determinate e sono valide per alcune famiglie di macchine allo scopo di determinare i parametri da cui dipende principalmente la frequenza del ciclo di pompaggio. Alcuni autori hanno determinato leggi che sono esprimibili come una costante diviso una certa potenza della capacità V . Altri sono concordi nel ritenere che la capacità intervenga con potenza $-1/2$ e quindi si hanno formule empiriche o semi empiriche come ad esempio :

$$f = \frac{A}{\sqrt{V}} \quad V : \text{volume}$$

$$f = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{k \bar{p} s^2}{Vm}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

\bar{p} : la pressione media del fluido nel ricevitore

S : area della sezione del condotto

m : massa media contenuta nel ricevitore

Il pompaggio è un fenomeno che si manifesta con frequenze piuttosto modeste possiamo avere da frazioni di Hz a qualche Hz , raramente si arriva alla decina.

Per macchine grandi con modeste capacità in mandata si arriva a 4-5 Hz.

Il fenomeno del pompaggio è facilmente evitabile proprio perché si manifesta con una grande evidenza durante il funzionamento della macchina .

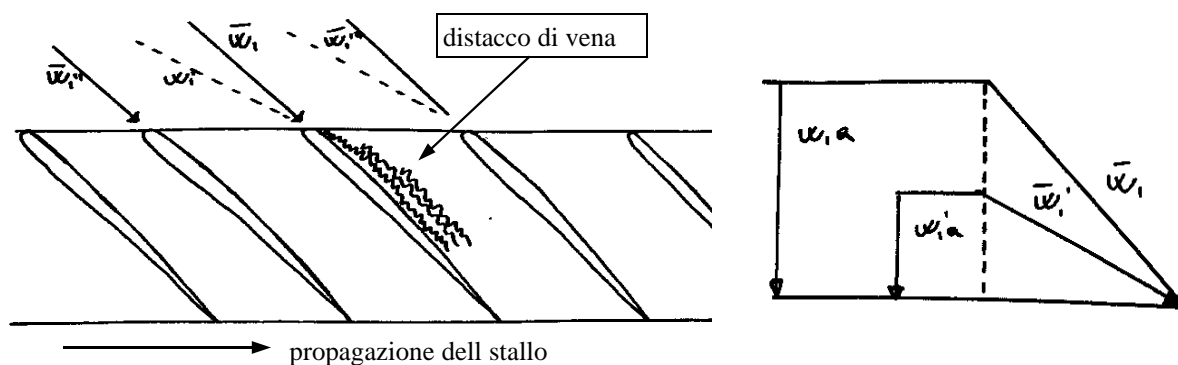
Il rumore, gli scuotimenti a cui la macchina è soggetta sono talmente macroscopici che il fenomeno può essere controllato ed evitato senza problemi particolari, se mai il problema è quello di ridurre la portata facendo in maniera di non sconfinare nel campo proibito.

Quindi si tratterà o di cambiare artificialmente le caratteristiche della macchina oppure si sacrificherà una parte della portata della macchina stessa .

A questi problemi torneremo quando parleremo della regolazione.

STALLO

Il fenomeno dello stallo interessa anch'esso sia le macchine centrifughe che le macchine assiali. E' un fenomeno cattivo nel senso che può sorgere più facilmente in quanto è meno avvertibile all'esterno in termini di rumore e di vibrazione o per lo meno determinante forme di stallo possono essere più trasparenti nei confronti degli strumenti di misura che fanno parte della strumentazione base dell'impianto. In altri termini lo stallo può manifestarsi in maniera tale da non essere rilevato né dai sensi umani né talvolta dagli strumenti predisposti sul circuito. Vediamo in cosa consiste lo stallo. Anche qui possiamo parlare sia per macchine centrifughe che assiali. Facciamo riferimento alle macchine assiali perché il fenomeno interviene con una manifestazione forse più ricca ed entro certi limiti più interessante dal punto di vista scientifico, in quanto può essere investigato meglio e controllato dall'esterno della macchina. Per una macchina assiale che sotto certi aspetti si lascia interrogare qualitativamente in maniera più spettacolare, supponiamo di considerare una schiera rotorica, anche se il fenomeno può interessare anche le schiere statoriche, facendo riferimento alla sezione cilindrica della macchina e consideriamo un funzionamento caratterizzato da una diminuzione della portata introducendo dall'esterno una riduzione della sezione della macchina.



A seguito della regolazione il vettore velocità relativa w_u assumerà in genere un β_1 acuto più piccolo proprio perché la riduzione di portata ha provocato una riduzione della componente della velocità da w_1 a w_1' con riduzione della componente assiale della velocità per cui in definitiva siamo passati ad un vettore w_1' . Questa variazione di incidenza può dare luogo ad un incipiente distacco di vena in corrispondenza del naso, del bordo d'ingresso, ed ecco che possiamo vedere la generazione di un distacco di vena che è accompagnato da una zona di turbolenze localizzate sul' estradosso della pala. Improvvisamente non appena passiamo ad una situazione del genere (vedi figura), situazione che avviene più o meno a gradino, cioè al di là di una determinata soglia, ecco che ha luogo il distacco di vena. Non appena il fenomeno ha luogo immediatamente abbiamo, entro una certa misura, una caduta del Δp della macchina quindi sia in termini della prevalenza che della portata. Ora se il fenomeno interessa l'intera palettatura allora è accompagnato di solito da un rumore e da vibrazioni sufficientemente avvertibili, anche gli strumenti di misura rilevano un calo di portata e di Δp denunciando abbastanza chiaramente il sorgere dello stallo. Lo stallo totale, cioè quello che interessa tutta la palettatura, può essere facilmente identificato dalle apparecchiature di controllo. Un insidia più pericolosa è costituita dallo stallo rotante che ha luogo quando il fenomeno appena descritto viene ad interessare pochi canali palari, addirittura uno soltanto.

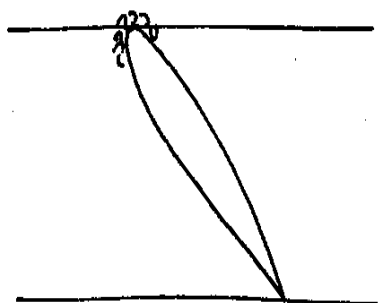
Il fatto che lo stallo interessa soltanto una sola pala si tratta di fortuna o di sfortuna dal punto di vista della precisione meccanica con cui sono stati realizzati i vari pezzi.

Supponiamo che la pala per un piccolo errore costruttivo o di montaggio sia calettata con una incidenza un tantino difettosa, a volte basta anche una anomalia dell'ordine del grado.

In corrispondenza di quella pala, può insorgere un modesto fenomeno di stallo, cioè si può creare una modesta scia sull'estradosso, prodotta da un locale distacco di vena, oppure può esserci una anomalia generata a monte in corrispondenza dell'elemento statorico o rotorico che precede l'elemento in questione.

Questi sono i casi in cui il fenomeno dello stallo è più insidioso e non si riesce tanto facilmente a scoprire. Oltre tutto lo stallo rotante simula sé stesso in maniera veramente furba in quanto la formazione dei vortici localizzati interessa di solito anche una limitata zona dell'intradosso, l'intero naso della pala viene ad essere sede di turbolenze localizzate.

Succede in definitiva che la pala che precede quella malata nel senso della rotazione del fluido viene a lavorare non solo in condizioni di sicurezza nei confronti dello stallo ma addirittura viene avvantaggiata perché il vettore w_1'' su questa pala per effetto del ristagno della turbolenza del fluido sulla pala malata subisce un certo deprezzamento, in poche parole lo angolo β_1 aumenta e può aumentare al di sopra del β_1 teorico (corretto).

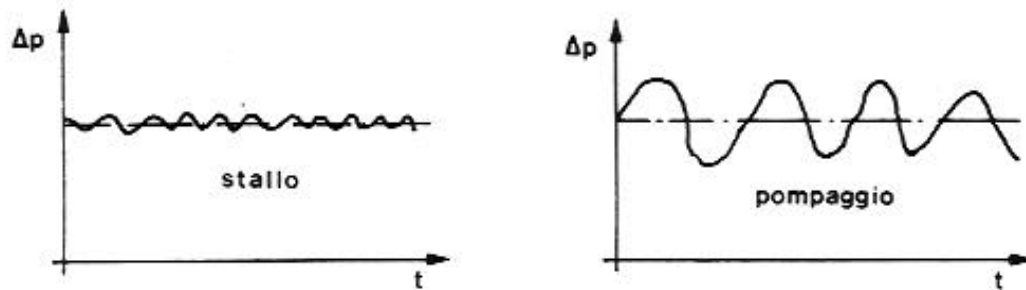


Il fenomeno protegge la pala dall'insorgere dello stallo. Invece lo stallo si propaga ordinariamente nel senso opposto a quello del moto relativo perché la grande scia prodotta dalla turbolenza sull'estradosso induce al vettore velocità w_1'' sulla pala che segue quella malata (vedi figura alla pagina precedente) una ulteriore diminuzione di β_1 si ha quindi luogo lo stallo rotante che interessa istante per istante un numero molto limitato di pale, che possono essere 1 o 2 soltanto e si propaga in direzione opposta a quella della

velocità della girante. Lo stallo può essere generato da una anomalia locale che può interessare anche una paletta solamente. Lo stallo rotante è il più insidioso proprio perché opera "silenziosamente", anche se il vano palare interessato istantaneamente dallo stallo rotante dà luogo ad una caduta locale di pressione e di portata. Gli strumenti che rilevano il Δp e la portata globale della macchina a monte e a valle non sono capaci di segnalare la presenza dello stallo in quanto il Δp e il dQ o ΔM complessivi sono tanto modesti che non possono essere attribuiti per la loro modesta entità con sicurezza al sorgere dello stallo. Una ricerca sistematica dello stallo di una macchina può essere condotta soltanto attraverso l'inserimento in corrispondenza dei vari elementi statorici e rotorici di una opportuna strumentazione e in particolare dei sensori di pressione. Una ricerca del genere è molto costosa e la si può fare in un ambiente di ricerca. Normalmente il problema viene risolto in termini preventivi con controlli di qualità sulle geometrie e sulla precisione dei vari componenti della palettatura. Dal punto di vista dei valori pratici numerose ricerche sono state condotte e sono stati fatti numerosi tentativi di razionalizzazione teorica sempre però ottenendo risultati parziali. Uno degli aspetti più accreditati è il seguente: in base alla ricerca sperimentale si può ritenere che la frequenza per una determinata macchina sia proporzionale attraverso una certa costante al numero di giri, ovvero alla velocità angolare.

La formula è " $f = B \cdot n$ ". L'ordine di grandezza di tale frequenza è considerevolmente più elevata rispetto all'ordine di grandezza della frequenza che interessa il pompaggio dai 10 ai 40 Hz.

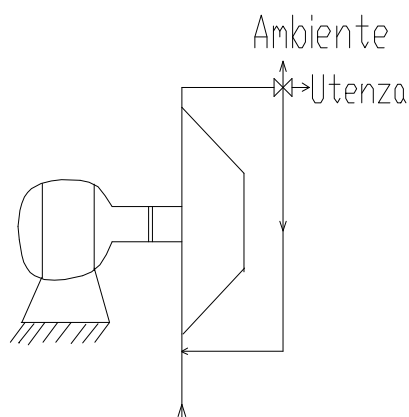
La frequenza delle oscillazioni è un indice abbastanza preciso dell'insorgere dello stallo. Se infatti confrontiamo i due diagrammi che riportano nel tempo le oscillazioni, ad esempio di pressione mentre per il pompaggio abbiamo oscillazioni abbastanza grandi con bassa frequenza per lo stallo abbiamo oscillazioni piccole con frequenze più elevate.



Le prime sono dell'ordine di qualche Hz al massimo, le seconde dell'ordine di alcune decine di Hz. Infine da segnalare che la velocità con la quale si propaga lo stallo rotante è dell'ordine della metà della velocità periferica della ruota.

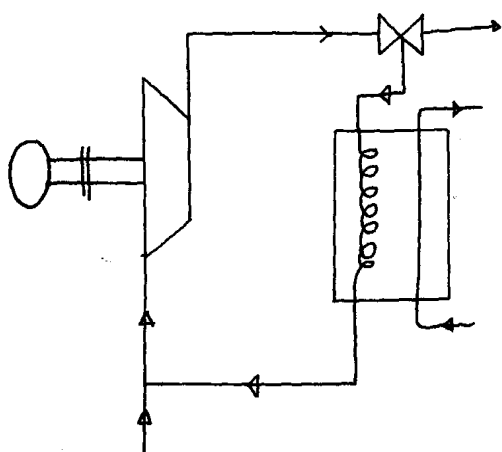
REGOLAZIONE DELLE MACCHINE OPERATRICI

La maniera più semplice di regolare una macchina è quella di operare a valle un restringimento di sezione. Ciò si può fare penalizzando ovviamente il rendimento della macchina e correndo comunque il rischio, se la riduzione di portata è troppo repentina, cioè se la portata si riduce di una quantità troppo elevata rispetto alla portata nominale, di fare entrare la macchina in stallo o pompaggio. Per evitare il pompaggio la regolazione più semplice che si può fare è quella di introdurre una valvola a valle della macchina, la cui apertura crei un tre vie sacrificando una parte del fluido compresso mandando all'utenza soltanto la portata che si desidera.



In questa maniera il compressore come tale non si accorge di nulla in quanto continua a lavorare nelle stesse condizioni iniziali cioè non varia il punto di lavoro della sua caratteristica, soltanto che veniamo a pagare una portata di gas compresso maggiore della portata utilizzata. Economicamente è una regolazione infelice che può essere più che plausibile quando la macchina sia piccola e cioè quando l'economia generale dell'impianto non risenta in maniera pesante della regolazione oppure può essere fattibile anche per macchine grandi, per grandi potenze in gioco quando la portata sacrificata sia molto modesta.

In altri termini quando il campo di regolazione richiesto dall'utenza lo consente, il fluido può essere indifferentemente riversato nell'ambiente, se si tratta di aria pulita, ma se invece si tratta di fluido non sacrificabile, ad esempio di un gas diverso dall'aria, con un elevato costo, lo si fa rifluire in aspirazione. Naturalmente a questo ricircolo è connesso un più o meno elevato riscaldamento del gas stesso nel circuito di by-pass. Quando è necessario si refrigererà il gas con un opportuno refrigeratore.



Sistemi di regolazione più fini e più costosi possono essere realizzati per i turbocompressori e per le turbopompe utilizzando palettature a calettamento variabile.

Nelle macchine più prestigiose possiamo avere palettature fisse a calettamento variabile, soprattutto nel campo dei compressori assiali.

Nel campo sia degli assiali che dei centrifughi possiamo avere palettature di prerotazione o palettature raddrizzatrici finali anch'esse a calettamento variabile.

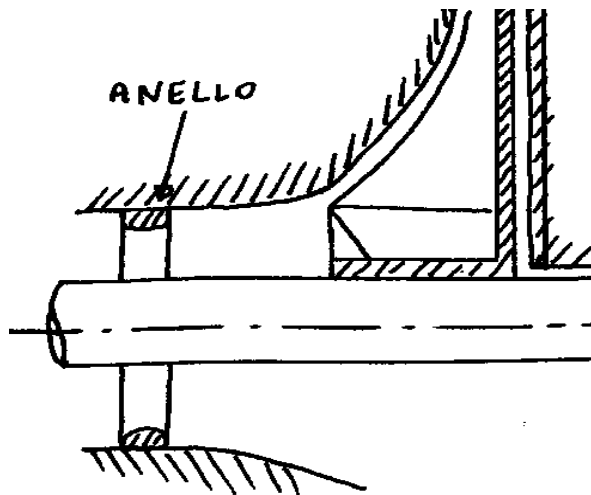
Con tali sofisticazioni si riesce a regolare la portata scongiurando la caduta del punto di funzionamento lungo il tratto instabile della curva caratteristica.

Lavorando con palettatura a calettamento variabile si viene a variare la caratteristica della macchina in modo che campi di portata che sono instabili per un certo calettamento diventano stabili per un calettamento diverso, che consente, per portate minori, di rimanere in zona stabile.

Un altro tipo di regolazione che talvolta viene effettuato su alcuni compressori centrifughi di elevata tecnologia è l'introduzione di un anello in corrispondenza della sezione d'ingresso . In prossimità della sezione d'ingresso della macchina si può porre un anello suscettibile di una regolazione di posizione assiale il quale non fa altro che variare artificialmente la sezione di ingresso del fluido nella macchina.

Si ha così una regolazione di portata facendo variare la caratteristica della macchina, rendendo così certe portate di basso valore tranquille dal punto di vista del pompaggio.

Schematicamente possiamo avere una cosa del genere indicato in figura:

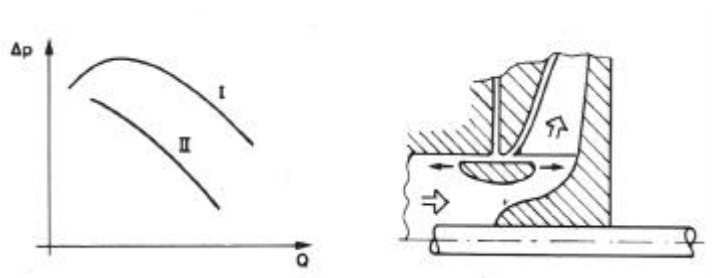


Immaginiamo di predisporre un anello dotato di un posizionamento regolabile in senso assiale. Ciò produce una locale variazione di sezione utile per la macchina capace di regolare a giri costanti la portata entro certi limiti. Talune case costruttrici operano con sistemi di questo genere in quanto non risultano molto costosi e sono abbastanza efficienti ma limitatamente ad un certo campo di portata .

Il sistema di regolazione più felice per tutte le turbomacchine operatrici sarebbe quello fondato sulla regolazione della velocità angolare in quanto consentirebbe

di passare da una curva caratteristica a giri costanti ad una altra mantenendo i rendimenti della macchina pressoché ottimali .

Tuttavia la regolazione a giri costanti è anche la più costosa e la più difficile , in quanto con macchine elettriche è necessario porre un gruppo Van Leonard e, a parità di potenza , risulta di gran lunga più costoso.



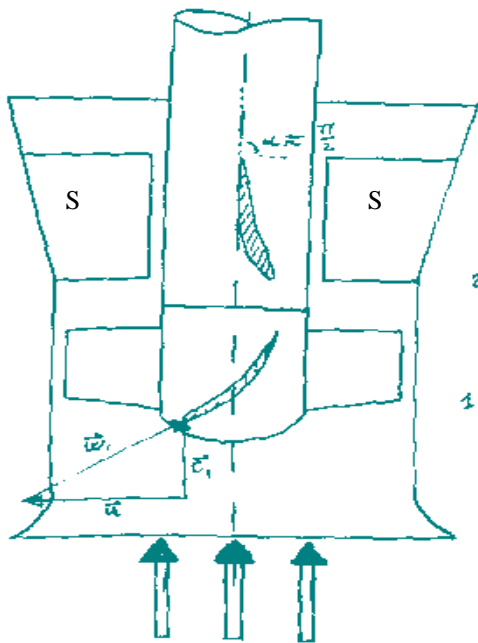
TURBOPOMPE ASSIALI

Tali macchine sono caratterizzate dalla esigenza di convogliare grandissime portate con prevalenze basse a volte bassissime. Hanno una importanza notevole ma limitata a determinati campi di applicazioni. Nel caso degli impianti che ci interessano maggiormente abbiamo visto come tipico esempio applicativo, la pompa di circolazione dell'acqua di refrigerazione, di un impianto a vapore la dove le portate sono colossali in quanto alle 1500-2000 t/h di vapore viene a corrispondere in acqua di circolazione una portata in massa di 50-60 volte maggiore. In quel caso abbiamo la richiesta di prevalenze minime, dato che si tratta di una pompa, e quindi si richiede il superamento solo delle perdite di carico nel circuito dell' acqua e un modesto salto geodetico che può essere dovuto al dislivello tra il pelo libero dell' acqua prelevata dal mare o da lago e la sezione d' ingresso nella girante.

Le turbopompe sono macchine assiali per eccellenza con un grado di assialità estremamente spinto, come possiamo capire a seguito della teoria della similitudine.

L' aspetto della turbopompa assiale è estremamente simile a quello della turbina Kaplan dato che si tratta né più né meno della versione operatrice della stessa macchina.

Schematicamente la macchina si può rappresentare come in figura.



Il numero delle pale è di solito contenuto proprio perché si tratta di una macchina con grado di assialità tipicamente unitario. Abbiamo da 2 a 6 pale sulla girante e da 4 a 8 sul diffusore, normalmente, sempre un numero piuttosto limitato. Nella figura possiamo osservare in vista alcune pale, una della girante e una del diffusore, il triangolo di velocità in ingresso nel rotore w_1 conforme alla tangente costruttiva, la velocità c_1 perfettamente assiale, l'angolo costruttivo α_3 della palettatura statorica sia pari a 90° in modo che anche l'uscita dell'efflusso sia perfettamente assiale.

Le pale rotoriche per macchine di una certa importanza, e lo sono quasi tutte perché siamo nel campo di grandissime portate, sono normalmente orientabili, a calettamento variabile per potersi adeguare alle varie esigenze di portata, facendo quindi in maniera che a portate diverse il fluido entri nella palettatura rotorica con la migliore angolazione, rispettando il più possibile quelli che sono gli angoli fluidodinamici nei confronti degli angoli costruttivi.

Per questo che le pale rotoriche orientabili sono molto usate.

Ultima caratteristica di queste macchine è il loro funzionamento in immersione quando vengono installate completamente immerse nel liquido prelevato e quindi non presentano problemi di avviamento iniziale.