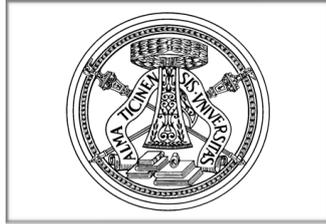


Università degli studi di Pavia



Facoltà di Ingegneria

*Dipartimento di Ingegneria industriale e
dell'informazione*

Corso di laurea in Ingegneria industriale meccanica

Tesi di laurea triennale

ITEG

Integrated Turbine Electric Generator

Relatore:

Prof. Stefano Farnè

Correlatore:

Dott. Vito Lavanga

Candidato:

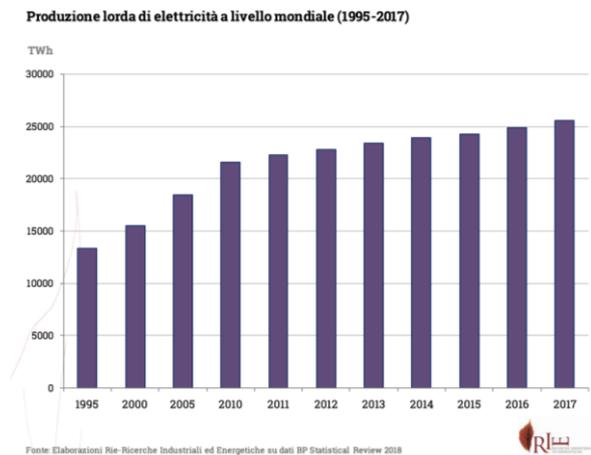
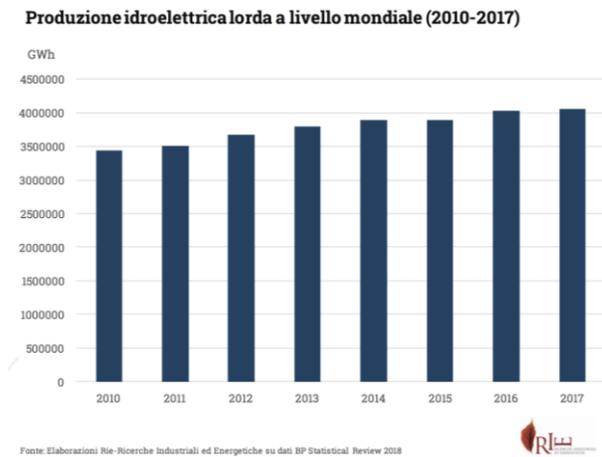
Alessandro Baston

Indice

1. Introduzione	Pag. 4
2. Descrizione	Pag. 6
3. Analisi	Pag. 9
3.1. Forze	Pag. 9
3.2. Rendimento	Pag. 13
3.3. Velocità	Pag. 13
4. Ricerca bibliografica	Pag. 15
4.1. Sistemi integrati nelle condotte	Pag. 15
4.2. Sistemi turbina-generatore	Pag. 18
5. Magneti	Pag. 18
6. Statore	Pag. 18
6.1. Dimensionamento statore	Pag. 21
7. Possibili impieghi	Pag. 21
7.1. Fluidi incomprimibili	Pag. 27
7.2. Fluidi comprimibili	Pag. 27
8. Conclusioni	Pag. 30
9. Bibliografia e sitografia	Pag. 30

Introduzione

L'idroelettrico è una risorsa energetica economicamente vantaggiosa e gioca un ruolo fondamentale tra le varie fonti di energia dei giorni odierni, contribuendo per più del 16% sulla generazione di energia elettrica globale e per circa l'85% su quella prodotta da fonti rinnovabili (figure 1.1 e 1.2).¹



Livelli così alti di produzione di energia idroelettrica sono giustificabili dal fatto che tale metodo presenta numerosi vantaggi rispetto alla maggior parte delle altre fonti di energia elettrica, tra cui un alto livello di affidabilità grazie a tecnologie ampiamente collaudate, alta efficienza (in alcuni impianti si arriva al 90%)², costi operativi e di manutenzione molto bassi, flessibilità e notevole capacità di stoccaggio. Inoltre, i sistemi di energia idroelettrica possono

(Fig. 1.1 andamento produzione energia idroelettrica mondiale)

(Fig. 1.2 andamento produzione energia elettrica mondiale)

¹ Fonte: RIE, Ricerche Industriali e Tecnologiche

² Fonte: Wikipedia https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_idraulica

aiutare a stabilizzare le fluttuazioni tra domanda e offerta a supporto della variabilità delle altre fonti di energia rinnovabile come l'energia eolica e fotovoltaica, la cui produzione è in rapida crescita in tutto il mondo ma entrambe presentano una produzione decisamente imprevedibile ed incostante. La grande varietà di dimensione delle centrali idroelettriche consente a questa tecnologia di adattarsi in base alle esigenze di energia richiesta. Recentemente, grazie allo sviluppo di piccole turbine idroelettriche, compatte e specifiche per i vari usi, è possibile sfruttare l'energia idraulica in loco contribuendo nella produzione di energia nazionale o per il fabbisogno di distretti industriali e agricoli oppure abitativi. Negli ultimi decenni le installazioni di grandi impianti idroelettrici hanno subito un rallentamento a differenza di quelle dei sistemi di piccole dimensioni. L'ingente spesa economica per la costruzione di una diga e l'inondazione e la resa inutilizzabile di vaste aree di terra per contenere la grande quantità di acqua richiesta possono essere le cause del decentramento dai sistemi tradizionali per questo tipo di produzione di energia. Inoltre, l'insufficiente profondità dell'acqua, di volume d'acqua e di velocità del flusso sono fattori che limitano significativamente le aree in cui può essere impiegata l'attuale generazione di energia idroelettrica. Tenendo conto di queste limitazioni, esistono numerose aree del Paese e del mondo che dispongono di risorse idriche che potrebbero essere utilizzate per generare energia idroelettrica in grandi quantità se tali ostacoli fossero superati.

Il sistema Integrated Turbine Electric Generator (ITEG) per produrre energia elettrica non necessita di considerevoli portate o di sbarramenti artificiali; inoltre, grazie all'estrema semplicità di installazione e la scarsa richiesta di manutenzione, risulterà sicuramente più conveniente rispetto agli impianti tradizionali. Per questi motivi l'ITEG rappresenta un'ottima soluzione ai problemi appena descritti. Esso è ancora in via di sviluppo ed è stato ideato per la produzione di energia idroelettrica dal Prof. Stefano Farnè e dal Dott. Vito Lavanga. L'ITEG permette di integrare una macchina fluidodinamica ed un motore elettrico in un unico apparecchio; questa caratteristica, che sarà esaminata nel corso della tesi, porta diversi vantaggi in confronto alle turbine più comuni.

Nella prima parte, dopo l'introduzione, sarà spiegato il meccanismo di funzionamento dell'ITEG e nel capitolo successivo, denominato "analisi", ne verrà studiata la dinamica di funzionamento. A quest'ultimo segue il capitolo della "ricerca bibliografica" dove saranno riportati esempi di sistemi già in commercio, brevetti ed articoli, che verranno messi a confronto con ITEG. Nel capitolo "magneti" si tratteranno delle tipologie di magneti adatti ed alle modalità di fissaggio di questi alla turbina. Nel sesto capitolo saranno affrontati gli

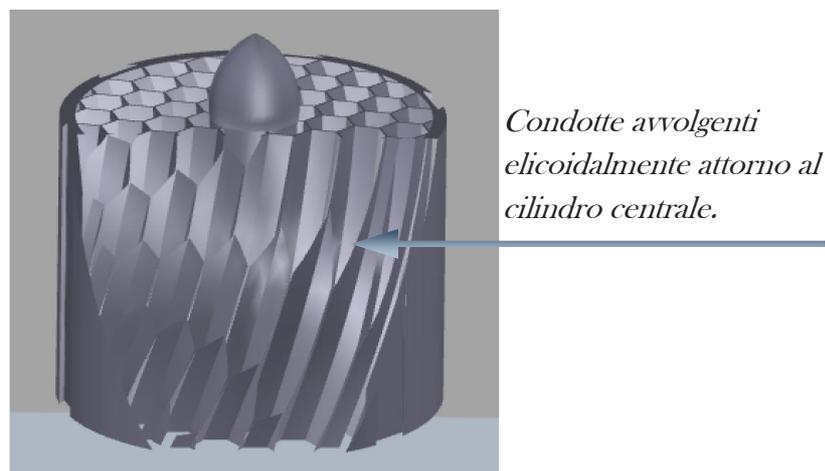
accorgimenti necessari a livello dello statore ed il dimensionamento di quest'ultimo. Infine, nell'ultimo capitolo, vi sono alcune applicazioni che il sistema può avere evidenziandone la versatilità.

Essendo ancora in fase di progetto ciò che segue poggia sulle conoscenze acquisite durante gli anni di studio e sull'ausilio dei sopraccitati ideatori del sistema.

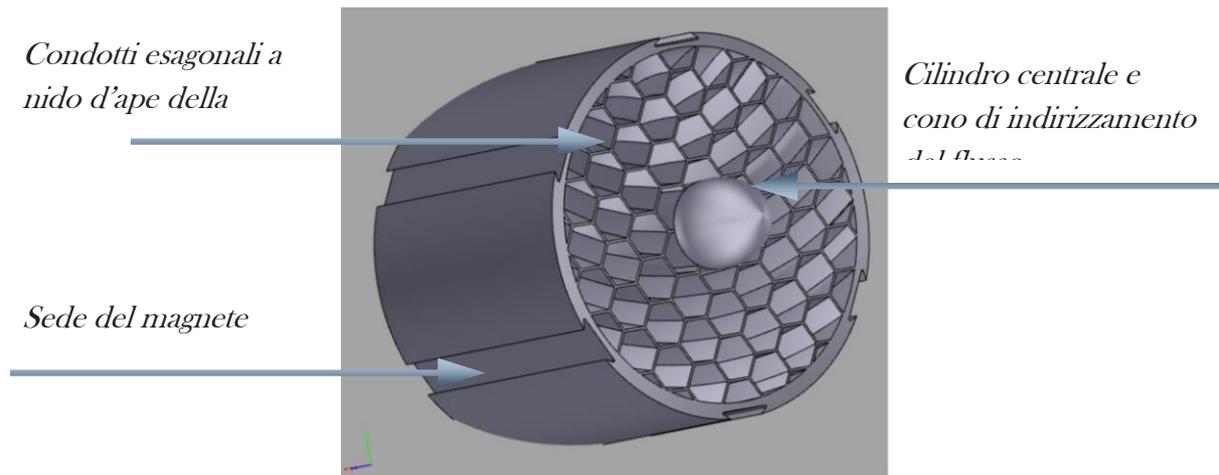
Descrizione

Come si può dedurre dal nome per esteso, l'ITEG è un sistema che unisce turbina e generatore a loro volta integrati nel condotto.

La turbina, che funge anche da rotore, ha una forma che ricorda quella di una matita un po' tozza. Essa inizia a cono e prosegue con un cilindro entrambi cavi e sigillati; lungo il perimetro esterno presenta delle serpentine (dei cavedi) che si avvolgono in direzione dell'altezza creando degli avvolgimenti (figura 2.1). Quando essa viene attraversata da un fluido in movimento, la parte iniziale a forma di cono indirizza il flusso all'interno dei condotti che si riempiono e la reazione delle forze tra il fluido in movimento e le pareti delle condotte avvolgenti la fa ruotare. Il particolare profilo della sezione della turbina rotore, visibile in figura 2.2, cosiddetta "a nido d'ape", consente di diminuire gli interstizi tra una condotta e le adiacenti aumentandone il rendimento, in quanto riesce ad intercettare più efficacemente il fluido, e ne diminuisce il peso.

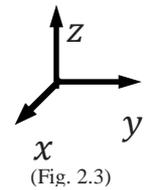


(Fig. 2.1 turbina ITEG)



Facendo riferimento alla terna di vettori xyz in figura 2.3:

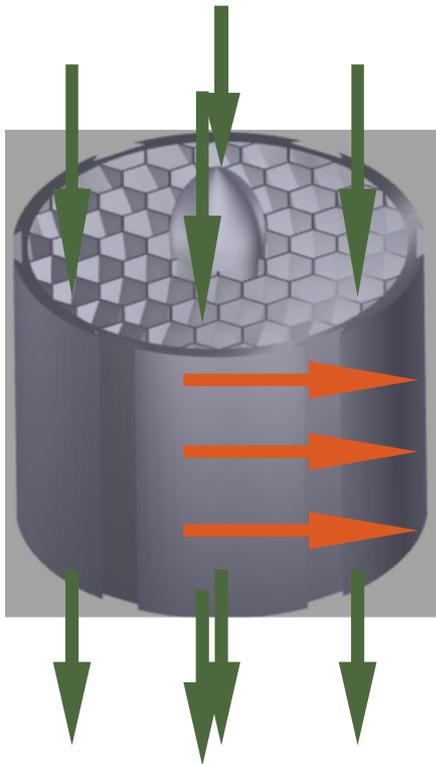
La forza di gravità G muove il fluido verso il basso in direzione z e lo scontro con le pareti inclinate dei cavedi che si avvolgono attorno al corpo centrale, determina la spinta sul piano xy , come in figura 2.4.



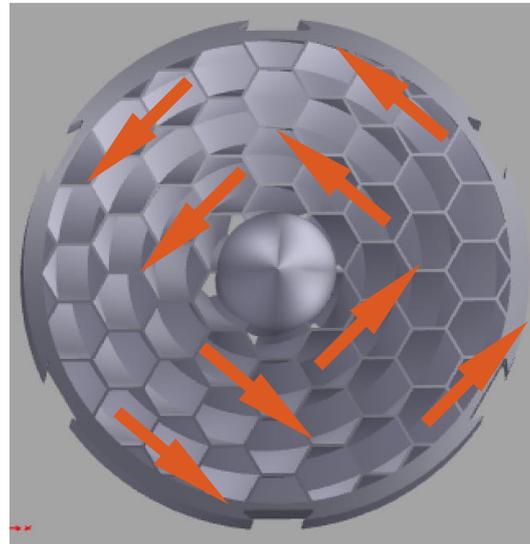
Le forze generate dallo scontro tra il fluido e le pareti delle condotte sono ad una certa distanza radiale dal corpo centrale (a seconda del cavedio preso in considerazione) (figura 2.5). Per questo motivo nascerà un momento torcente attorno all'asse z e, non essendo vincolata la rotazione attorno a questo asse, la turbina ruoterà.

(Fig. 2.2 turbina ITEG)

Nel terzo capitolo, ovvero il successivo a questo, nel paragrafo 3.1 (“forze”) si entrerà maggiormente nel dettaglio della direzione delle forze e del loro modulo.



(Fig. 2.4 ITEG attraversato dal fluido in verde e forze in rosso)



(Fig. 2.5 forze sul piano x-y)

La cavità sigillata, che, al contrario dei cavedi, non si riempirà di fluido, svolge il compito di mantenerla nella giusta posizione assiale senza la necessità di alberi o cuscinetti, sfruttando la spinta di Archimede per cui un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto pari al peso del volume di fluido spostato.

Nel caso di una condotta posta in verticale e dentro la quale scorre il fluido dall'alto verso il basso (per caduta), basterà che la forza generata dalla spinta di Archimede sia pari alle altre forze agenti nella stessa direzione in verso opposto come la forza peso della turbina stessa e la componente verticale della forza generata dallo scontro del fluido con le superfici.

Questa parte è di particolare importanza ed è la chiave innovativa dell'ITEG in quanto consente di evitare l'utilizzo di cuscinetti e alberi di sostegno che sono le parti più critiche nei tradizionali impianti.

La macchina appena descritta viene munita di magneti sul perimetro così che possa fungere anche da rotore (parte rotante di un motore elettrico) ed inserita in una tubazione che ha il compito di statore (parte fissa); il risultato finale è un motore elettrico. La turbina-rotore

girando fa variare il campo magnetico attraverso il circuito (lo statore), il quale è fisso, di conseguenza per la legge di Faraday - Neumann - Lenz ($f_{em} = \Delta\phi/\Delta t$) si genererà una forza elettromotrice (f.e.m.) indotta la quale è proporzionale alla velocità di variazione del campo magnetico, cioè direttamente proporzionale alla velocità di rotazione della turbina ed al numero di magneti presenti su di essa. Allo stesso modo si può generare una rotazione della turbina (che in tal caso prenderebbe il nome di pompa o compressore a seconda delle proprietà del fluido coinvolto) dando corrente allo statore; maggiore è la potenza data allo statore maggiore sarà la velocità di rotazione della pompa. In questo modo sarà il fluido ad essere mosso dalla turbina trasformando l'energia elettrica in energia meccanica.

Analisi

Il caso che sarà analizzato tratta il sistema ITEG posto in una condotta verticale dentro la quale il fluido (in questa circostanza acqua) scorre per caduta. Si considererà che il fluido non scambi calore con l'esterno e che non subisca passaggi di fase o reazioni chimiche ma scambia soltanto lavoro meccanico con la turbina.

Calcolo delle forze

Conseguentemente alle ipotesi appena definite, è possibile descrivere le interazioni tra la massa di fluido e le pareti della turbina in modo indipendente dalle trasformazioni termodinamiche,

chimiche o fisiche eventualmente subite dal fluido; partendo dalla conservazione della quantità di moto o equazione dell'impulso³ si giunge alla seguente relazione:

$$\vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_0} \rho \vec{v} d\Omega + \int_{S_1, S_2} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS - \int_{S_1, S_2} p \vec{n} dS - \int_{S_1, S_2} \vec{\tau} t dS + \int_{\Omega_0} \rho \vec{g} d\Omega \quad [1]$$

Dove:

τ e p sono i moduli delle risultanti degli sforzi rispettivamente tangenziali e normali agenti sulla superficie dS con versori \vec{t} e \vec{n} .

* Il primo termine $\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_0} \rho \vec{v} d\Omega$ rappresenta l'effetto delle inerzie del sistema alle variazioni locali nel tempo di densità e velocità ed è nullo per regimi permanenti.

* Il secondo termine $\int_{S_1, S_2} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS$ indica il flusso della quantità di moto del fluido attraverso S_1 e S_2 .

* Il termine $\int_{S_1, S_2} p \vec{n} dS$ rappresenta la spinta che la superficie di contorno esercita sul fluido che quindi è uguale e contraria a quella che la parete riceverà del fluido.

* $\int_{S_1, S_2} \vec{\tau} t dS$ è il contributo dato dagli attriti viscosi generati dallo scorrimento del fluido sulle pareti.

* $\int_{\Omega_0} \rho \vec{g} d\Omega$ rappresenta il peso della massa di fluido nel volume Ω .

Nelle ipotesi di regime stazionario e di assenza di effetti viscosi, valide con buona approssimazione per macchine operanti con aria o acqua (come nel caso in questione), e trascurando le forze di volume, è possibile scrivere:

$$\vec{F} = \int_{S_1, S_2} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS + \int_{S_1, S_2} p \vec{n} dS$$

Considerando il flusso, in questo caso, monodimensionale si ottiene:

$$\vec{F} = \dot{m}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) + p_1 S_1 \vec{n}_1 - p_2 S_2 \vec{n}_2 \quad [1] \quad \text{con } \vec{v}_1 \text{ e}$$

\vec{v}_2 si sono indicate le componenti delle velocità normali alle sezioni S_1 e S_2 e con \dot{m} la portata massica (ρQ).

³ Dispense Sala R. corso di macchine, capitolo 3: "elementi di termofluidodinamica applicata alle macchine".

Osservato che il fluido entra nelle condotte della turbina con velocità \vec{v}_1 in direzione verticale e scontra la parete della condotta inclinata di un angolo α rispetto all'orizzontale, considerando la differenza di pressione nulla ($p_1 - p_2 = 0$), l'equazione [1], l'ultima scritta, può essere scritta come:

$$\vec{F} = \dot{m}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)$$

La forza \vec{F} rappresenta la spinta che la parete della condotta della turbina imprime sul fluido ed è uguale e contraria a quella che la stessa subirà. Tale forza è scomponibile in due componenti: una lungo x' (ortogonale alla parete della condotta) ed una lungo y' (parallela alla condotta) (figura 3.2):

Se la parete fosse fissa, la velocità \vec{v}_1 devierebbe in \vec{v}_2 parallela alla condotta in quanto scivolerebbe lungo essa.

Perciò:

$$\vec{F} = \dot{m}(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = \dot{m}(\vec{v}_1 + (-\vec{v}_2))$$

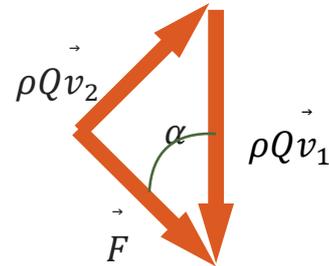
Poiché sono trascurati gli attriti tra fluido e parete, non ci saranno forze in direzione di quest'ultima, di conseguenza la spinta che la parete subisce è diretta ortogonalmente ad essa.

$$\vec{F}_{y'} = 0$$

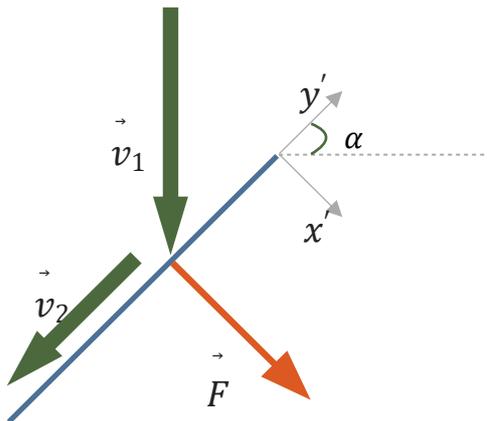
$$\vec{F} = F_{x'} = \rho Q v_1 \cos \alpha$$

Affinché sia assicurato il galleggiamento della turbina, la sommatoria delle forze dirette lungo l'asse y (riferimento agli assi in figura 3.3) deve risultare nulla ($F_y - F_g + F_p = 0$). Tale condizione dipende dal volume del cilindro cavo interno e dal peso della turbina stessa. Al fine

di minimizzare quest'ultimo la scelta del materiale di cui sarà composta la turbina deve ricadere su materiali con un peso specifico molto basso. Per tale motivo si presentano ottimi candidati i materiali plastici che, oltre ad avere mediamente una densità inferiore ad 1 kg/dm^3 , sono utilizzati dalle stampanti 3D, le quali rappresentano un metodo di produzione della turbina preciso ed efficace, e probabilmente l'unico a causa della sua forma



(Fig. 3.1 somma vettoriale per trovare la forza F)



(Fig. 3.2 forza (in rosso) generata dallo scontro del fluido (in verde) contro la parete di una condotta della turbina)

complessa.

$$\vec{F}_g = V_{iteg} \rho g = S_{iteg} h_{iteg} \rho g$$

$$\vec{F}_P = V_{iteg} \rho_{iteg} g = S_{iteg} h_{iteg} \rho_{iteg} g$$

con

$$h = Pn = \pi D_{est} (\tan \alpha) n$$

n numero di giri degli avvolgimenti

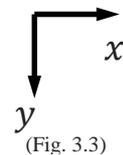
P passo degli avvolgimenti

Si ha quindi che:

$$\vec{F}_g = S_{int} \pi D_{est} (\tan \alpha) n \rho g$$

Come si può capire dalla scomposizione di \vec{F} in figura 3.4:

$$\vec{F}_y = \rho Q v_1 \cos^2 \alpha$$



(Fig. 3.3)

La spinta in direzione x è responsabile della rotazione della turbina in quanto ortogonale all'asse di rotazione e distante R da esso.

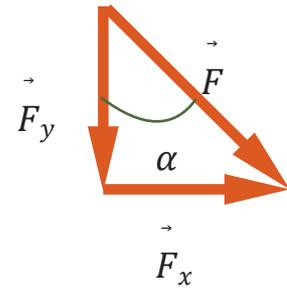
$$\vec{F}_x = \rho Q v_1 \cos \alpha \sin \alpha \quad [2]$$

Poiché la forza diretta lungo x è la responsabile della rotazione della turbina, e la velocità angolare di questa aumenta con l'aumentare della forza in questione, è d'interesse trovare l'inclinazione delle condotte del rotore che massimizzi la spinta in questa direzione.

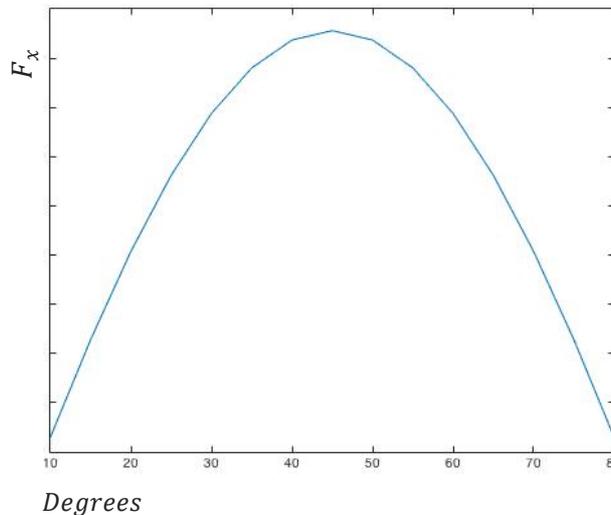
Derivando la [2] rispetto all'angolo α ed eguagliandola a zero, è possibile trovare il valore di α per cui la forza F_x è massima:

$$\frac{\delta F_x}{\delta \alpha} = 0 \quad \longrightarrow \quad \rho Q v_1 \cos(2\alpha) = 0 \quad [3]$$

Dalla derivata [3], e dalla rappresentazione nel grafico della [2] di figura 3.4, è facilmente deducibile che \vec{F}_x sarà massima per $\alpha = 45^\circ$.



(Fig. 3.4 scomposizione di F)



(Fig. 3.4 grafico andamento della forza in direzione x al variare dell'angolo di inclinazione delle condotte della turbina)

Rendimento

Nei sistemi tradizionali, il rendimento globale di un impianto è dato dal prodotto dei singoli rendimenti:

$$\mu_{tot} = \mu_g \mu_{el} \mu_o \mu_t$$

dove:

- * μ_t indica il rendimento della trasmissione inserita tra turbina ed alternatore,
- * μ_o è il rendimento organico che tiene conto sia dell'energia spesa per l'azionamento di organi di controllo o di regolazione necessari al funzionamento della macchina stessa, sia dell'energia assorbita da eventuali macchine accessorie ma utili al funzionamento di una data macchina e non direttamente collegate con essa,
- * μ_{el} rappresenta il rendimento globale del motore elettrico, tiene conto ad esempio dell'energia elettrica assorbita per eccitare gli elettromagneti dei rotori dei generatori utilizzando tale tecnologia,
- * μ_g è il rendimento della turbina, cioè il prodotto dei vari rendimenti:

$$\mu_g = \mu_m \mu_v \mu_i$$

- * μ_m è il rendimento meccanico contenente le perdite conseguenti allo strisciamento di parti meccaniche a contatto e in moto relativo fra di loro,
- * μ_v è il rendimento volumetrico associato alle perdite dovute alla portata di trafileamento attraverso i giochi tra parti mobili e parti fisse,
- * μ_i rappresenta le perdite idrauliche causate dall'attrito del fluido con le pareti della turbina.

Per quanto riguarda il sistema ITEG, grazie alla sua semplicità meccanica, molti coefficienti di rendimento possono essere eliminati.

Partendo dai rendimenti della turbina:

- * il rendimento meccanico μ_m sarà sicuramente maggiore rispetto ai sistemi tradizionali grazie all'assenza di cuscinetti quindi di attriti,
- * altrettanto si può affermare riguardo al rendimento volumetrico in quanto la sezione della turbina occuperà in toto la sezione della condotta, quindi la turbina intercetterà tutto il volume di fluido disponibile.
- * Il rendimento idraulico invece è inevitabilmente diverso dall'unità ma può essere limitato attraverso l'elevata accuratezza della finitura superficiale delle pareti dei condotti avvolgenti al fine di abbassare il più possibile la rugosità superficiale.

I vantaggi del sistema ITEG non sono "situati" solamente a livello della turbina ma anche al di fuori. Infatti:

- * il rendimento della trasmissione μ_t , non essendoci nessun organo di trasmissione tra turbina e rotore, può essere eliminato,

- * μ_{el} invece dipende dal comportamento dell'interazione tra magneti del rotore e statore, quindi dall'efficienza dei materiali di cui sono composti e dalla loro opportuna geometria; trattandosi di un generatore a magneti permanenti è possibile quantificare qualitativamente il rendimento tra 0.97 e 0.83⁴,
- * mentre per la valutazione del rendimento degli organi di controllo μ_o è necessario valutare quali e quante apparecchiature servono al regolare funzionamento del sistema ITEG.

Velocità

L'energia fluidodinamica ceduta alla turbina è funzione della differenza di velocità del fluido in ingresso ed in uscita da essa.

$$\Delta E_{fluido} = \frac{1}{2} \rho V_{fluido} (v_{in}^2 - v_{out}^2)$$

La scelta di un materiale “leggero”, oltre a favorire la galleggiabilità, è un vantaggio per la trasformazione di energia fluidodinamica in energia elettrica.

⁴ Fonte: Wikipedia <https://it.wikipedia.org/wiki/Alternatore>

Difatti l'energia di un rotore è direttamente proporzionale alla sua inerzia I la quale dipende dalla massa:

$$\Delta E_{fluido} = E_{iteg} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad [4]$$

con:

$$I = \int_{V_{iteg}} R^2 dm$$

R raggio, distanza della massa dall'asse di rotazione.

Dato che l'obbiettivo finale è quello di avere un rotore che giri il più veloce possibile ($f_{em} = \Delta\phi/\Delta t$); dalla formula [4] si può ricavare che la velocità angolare dei magneti è inversamente proporzionale all'inerzia della turbina. Di conseguenza minore è la massa più veloce sarà il rotore.

Il fluido entrerà nella turbina con una certa velocità v_{in} e ne uscirà con velocità inferiore alla precedente v_{out} . Osservando il tragitto del fluido durante l'attraversamento della turbina, si nota che il fluido tende a mantenere la direzione verticale di caduta e, poiché i cavetti della turbina hanno una traiettoria elicoidale, si provoca la rotazione della macchina fluidodinamica.

Considerato che la velocità angolare ω della turbina è uguale in tutti i suoi punti aventi stessa distanza dall'asse di rotazione, ne risulta che il fluido attraverserà la turbina con velocità costante ed in particolare questa velocità sarà uguale a quella di uscita v_{out} .

Successivamente a queste considerazioni possiamo scrivere la relazione tra la velocità angolare del rotore ω e la velocità di uscita dalla turbina del fluido v_{out} :

$$\omega = \frac{v_{out}}{P} = \frac{v_{out}}{\pi 2R(\tan\alpha)} \quad [5]$$

Con P si è indicato il passo e con R il raggio.

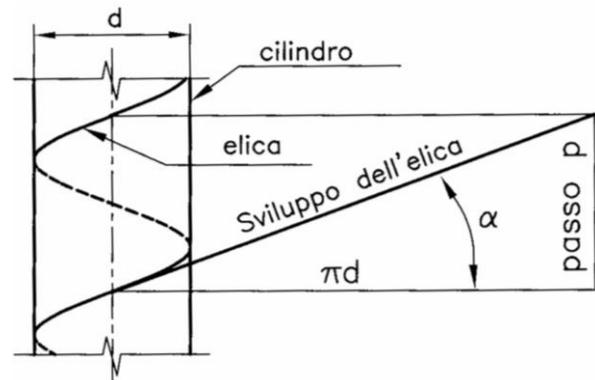
Dalla [5] se ne deriva la relazione tra velocità verticale (nonché la velocità posseduta dal fluido) con la velocità periferica della turbina rotore indicata con u :

$$u = R\omega,$$

[6]

sostituendo la [5] nella [6]:

$$v_{out} = u2\pi(\tan\alpha)$$

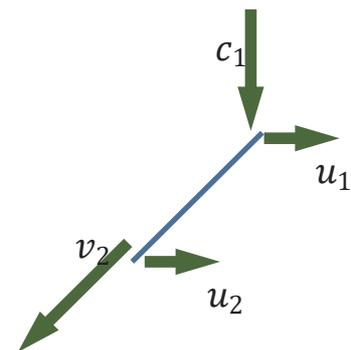


(Fig. 3.5 grandezze elica)

Indicando con:

- * u la velocità periferica della turbina assoluta,
- * c la velocità assoluta del fluido,
- * v la velocità relativa tra fluido e turbina.

Si procede costruendo il triangolo partendo dalle velocità di figura 3.6 (i pedici 1 e 2 esprimono rispettivamente le velocità di ingresso e di uscita).



(Fig.3.6 velocità di ingresso ed uscita)

Se si trascurano le lievi perdite di carico incontrate durante l'attraversamento delle condotte, la velocità relativa di uscita avrà lo stesso valore in modulo di quella di entrata:

$$v_1 = v_2$$

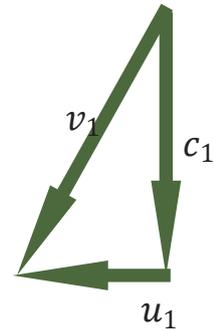
[7]

Il vettore velocità relativa di ingresso sarà la differenza tra i vettori velocità assoluta di ingresso del fluido e periferica della turbina (figura 3.7).

$$\vec{v}_1 = \vec{c}_1 - \vec{u}_1 \quad [8]$$

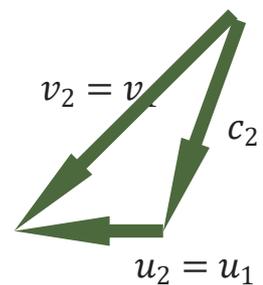
Essendo la turbina un corpo rigido, risulta che:

$$\vec{u}_1 = \vec{u}_2 \quad [9]$$



(Fig.3.7 triangolo delle velocità di uscita)

Considerato che la direzione di \vec{v}_2 sarà parallela alla condotta come in figura 3.5, e dalle relazioni [7] [8] e [9], ne consegue il triangolo delle velocità di uscita in figura 3.8.



(Fig.3.8 triangolo delle velocità di uscita)

Ricerca bibliografica

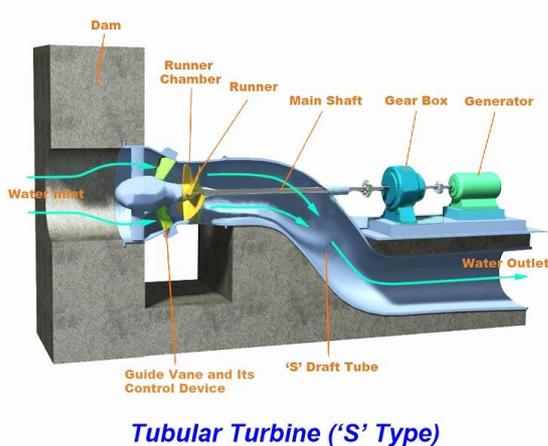
Sistemi integrati in condotte

Sono sistemi per la produzione di energia idroelettrica che, per ragioni dimensionali, in quasi la totalità dei casi non superano i 100 kW e per tanto vengono definiti “*small hydropower system*” (come stabilito dalla direttiva 2004/101/EC del parlamento Europeo in base alla quale rientrano nella categoria gli impianti che producono una potenza inferiore a 20 MW). Questa classe di impianti idroelettrici ha visto una rapida diffusione negli ultimi decenni soprattutto nelle zone in cui è difficile utilizzare altre fonti di energia rinnovabile o non (principalmente nei Paesi in via di sviluppo), grazie alla sua versatilità e semplicità di realizzazione (sono frequenti i casi di impianti integrati nelle condotte rudimentali, costruiti artigianalmente).

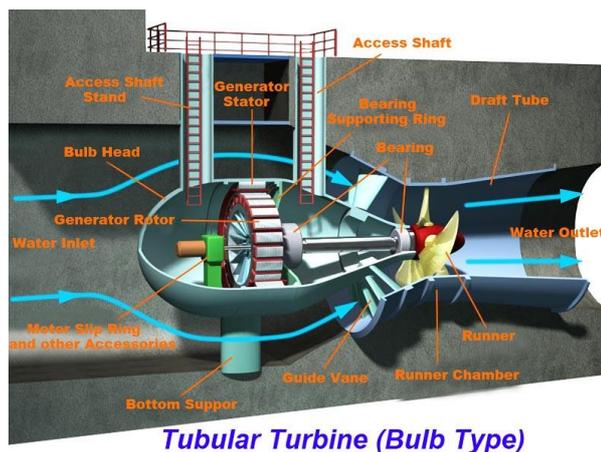
Al mondo esistono e sono in commercio già svariati sistemi di turbine integrate nelle tubazioni per una moltitudine di casi di applicazione sia per quanto riguarda sostanze gassose che liquide ma tutti i casi presentano differenze sostanziali rispetto all’ITEG.

I sistemi integrati nelle condotte più utilizzati sono: turbine tubolari ((figura 4.1) nel caso in cui il generatore sia esterno alla condotta o (figura 4.2) nel caso in cui il generatore sia anch’esso inserito nella condotta denominate in questo caso a bulbo per la particolare forma del contenitore stagno del generatore), turbine a vite di Archimede o a coclea (figura 4.3) che nello specifico caso della figura presenta un numero di avvolgimenti progressivo per unità di spostamento assiale al fine di incrementare la loro efficienza vista la diminuzione di velocità del fluido nel percorrerla (aspetto che potrebbe interessare anche gli avvolgimenti dell’ITEG), oppure le turbine sferiche ad asse verticale progettata dall’ingegnere Alexander Gorlov (figura 4.4) che si può trovare applicata all’interno delle tubazioni di scarico di città come, ad esempio, nella città di Riverside in California dove è stato installato un raccordo di tubazione su cui sono montate 3 turbine Gorlov in serie ognuna calettata ad un albero collegato con il rispettivo generatore posto assialmente⁵.

⁵ Fonte: CASINI M. (2015) - *Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale*.



(Fig. 4.1 turbina tubolare con generatore esterno)



(Fig. 4.2 turbina tubolare con generatore interno)



(Fig. 4.3 turbina a coclea Hydrocoil 600)

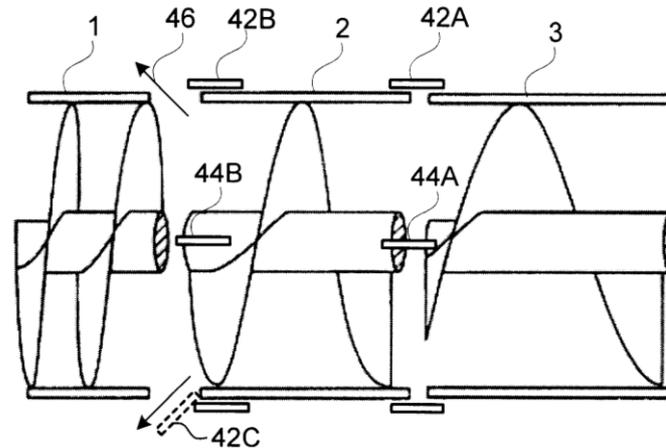


(Fig. 4.4 turbina sferica Gorlov)

In tutti questi casi la turbina trasmette il moto rotatorio al rotore per mezzo di cinghie o alberi ecc... I quali presuppongono ulteriormente la presenza di cuscinetti che hanno una vita limitata e rappresentano una perdita di energia a causa degli attriti. Al contrario l'ITEG non richiede la presenza di organi di trasmissione tra macchina fluidodinamica e macchina elettrica, garantendo così un'efficienza meccanica maggiorata ed una rilevante minore richiesta di manutenzione.

L'esempio più simile, per forma e principio di funzionamento, alla turbina utilizzata nel sistema ITEG tra quelli sopraccitati, è la turbina denominata dall'azienda titolare del brevetto, Hydrocoil 600 e riportata in figura 4.3. Anch'essa presenta degli avvolgimenti per mezzo dei quali l'energia fluidodinamica viene trasformata in energia meccanica di rotazione. Come descritto nel brevetto US6626638 di figura 4.5, l'elemento chiave della macchina in oggetto è

che vi è un cambiamento nella frequenza delle curve dell'azionamento a forma di nastro, che procede da una bassa frequenza (pochi avvolgimenti per unità di lunghezza) nella porzione iniziale dell'apparato ad una frequenza elevata (molti avvolgimenti per unità di lunghezza) nella parte posteriore dell'apparato.



(Fig. 4.5 Ribbon drive power generation brevetto US6626638)

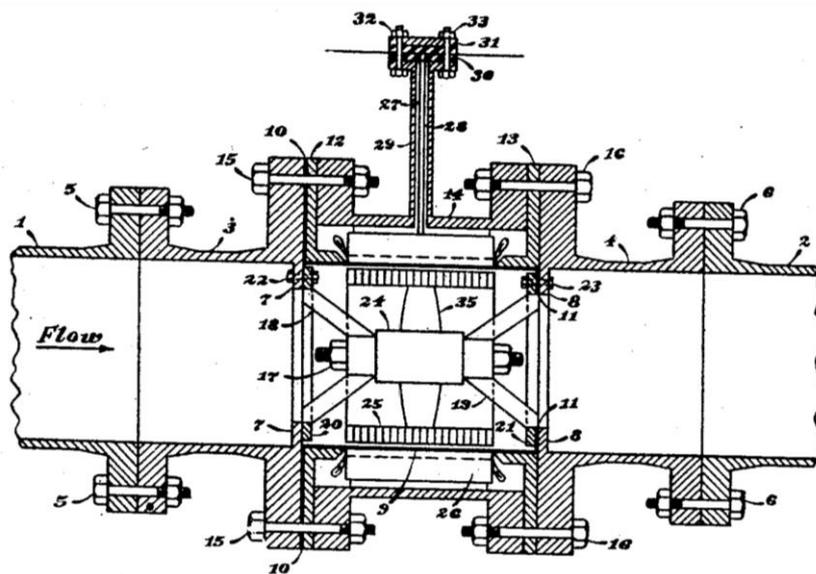
L'oggetto assomiglia ad un cavatappi ma ha una frequenza di avvolgimenti

decescente mentre si procede lungo la lunghezza dell'asse centrale. Come è facilmente deducibile, la velocità del fluido è direttamente proporzionale al passo degli avvolgimenti (cioè all'angolo di inclinazione di essi) ed alla velocità di rotazione della turbina ($v = P\omega$); perciò se si vuole mantenere costante o aumentare ω , al diminuire di v deve corrispondere una almeno egual diminuzione del passo P . La riduzione della velocità assiale dell'acqua è una conseguenza del trasferimento di energia dall'acqua all'apparecchio, così che esso ruoti attorno al suo asse centrale. Maggiore è la riduzione di velocità assiale del fluido ed altrettanto sarà la quantità di energia trasferita. Per prevenire la perdita di energia ai lati, come avviene nel caso di una turbina idraulica aperta, la vite coclea lavora all'interno di un tubo di contenimento. È chiara la somiglianza con la turbina del sistema ITEG dove il flusso in direzione assiale, scontra le pareti dei condotti che si avvolgono attorno al corpo centrale provocando la rotazione della macchina. L'efficienza della turbina dipende quindi in buona parte dall'inclinazione dei condotti avvolgenti che deve essere dimensionata in modo tale che la differenza tra l'energia del fluido in ingresso e quella in uscita sia massima. Infatti, per il principio di conservazione dell'energia, l'energia persa dal fluido è pari all'energia acquisita dalla turbina idraulica in quanto nel sistema considerato non vi sono scambi di energia con l'esterno.

Sistemi con turbine-generatori

I brevetti di sistemi in cui una turbina funge anche da rotore non sono rari. Più rari, invece, sono gli apparecchi reperibili sul mercato che utilizzano questa tecnologia forse a causa dell'elevata complessità di realizzazione di alcune parti.

Un brevetto, che risale a ben 73 anni fa (precisamente al 06 Aprile 1945), è quello numero US2436683A (figura 5.1) presentato da Jr Joseph H Wood. La turbina rotore, inserita dentro la tubazione, viene tenuta in posizione attraverso dei fili in materiale non specificato (numero 18 e 19) e ruota attorno all'albero (numero 17) grazie a dei cuscinetti. Alle estremità delle pale della turbina sono fissati dei magneti permanenti che rappresentano il rotore (numero 25), lo statore è posto sull'esterno della tubazione (numero 26) ed è isolato dal fluido in movimento attraverso uno strato di materiale impermeabile (numero 9). La corrente alternata generata nello statore viene quindi condotta, attraverso il cavo isolato (numero 28), come suggerito nella descrizione del brevetto, all'altro ramo della tubazione (figura 5.2) al fine di risolvere il fenomeno dell'elettrolisi. Infatti, per evitare l'elettrolisi basta una scarsa intensità di corrente per cui non è un problema la perdita di carico e di portata dovuta alla biforcazione della condotta.



(Fig. 5.1 brevetto US2436683A)

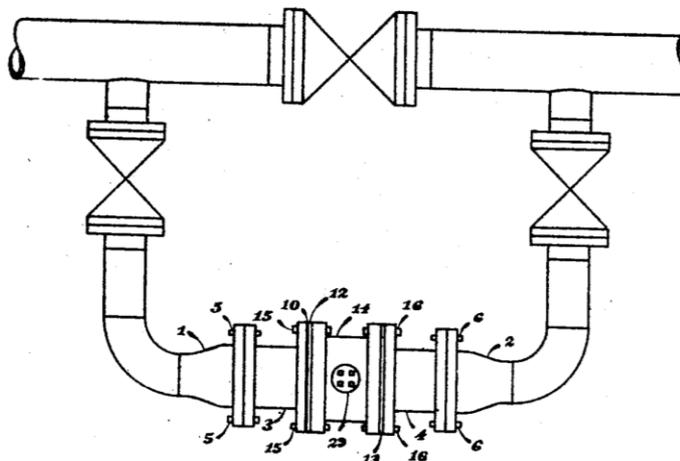
Feb. 24, 1948.

J. H. WOOD, JR

2,436,683

GENERATOR FOR PIPE LINES

Filed April 6, 1945

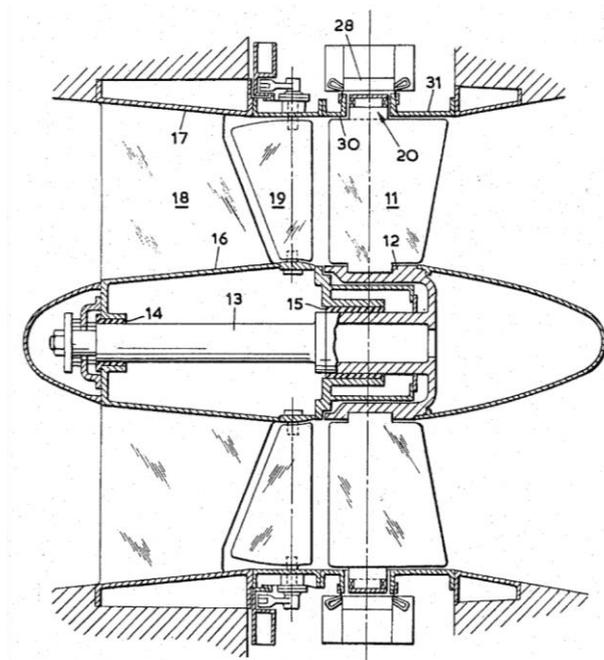


(Fig. 5.2 brevetto US2436683A)

Il brevetto US3422275A presenta un sistema simile a quello precedentemente descritto. Si tratta di una turbina reversibile, cioè utilizzabile anche come pompa centrifuga. In questo caso gli autori del brevetto (Michael Braikevitch e Bruce Donald Arthur) entrano maggiormente nel dettaglio di alcune parti: nella figura 3.4 è visibile la tecnica di accoppiamento tra rotore e statore, di particolare criticità in quanto il rotore ed i poli magnetici sono immersi nel fluido. I poli (numero 20) sono montati alle estremità delle pale e sono costituiti da diverse parti: alla base vi è un anello metallico (numero 21), sopra le bobine

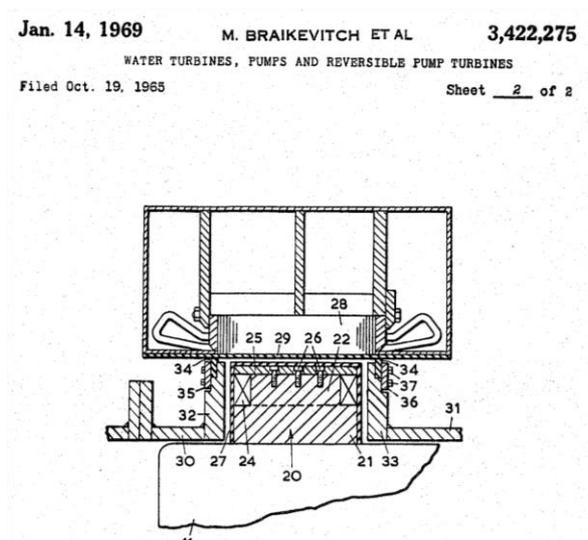
di campo (numero 24) circondano i poli (numero 22) e sono mantenute in posizione mediante punte polari (numero 25) dotate di fori a testa svasata in cui alloggiavano viti (numero 26) che collegano le punte polari (numero 25) ai poli (numero 22). L'intero polo è quindi incapsulato in una resina sintetica (numero 27) per isolarlo dal fluido. Lo statore (numero 28) è montato concentricamente al rotore grazie ai giunti anulari flessibili (numero 34) serrati con le viti (numero 37) tra gli anelli (numero 35 e 36) e le pareti radiali della tubazione (numero 32 e 33) ed è dotato, sul perimetro interno, di una membrana in plastica (numero 29). Viene specificato

nel brevetto che le pareti radiali (numero 32 e 33) dovranno essere realizzate in materiale isolante o almeno esserne rivestite nella parete interna più vicina al rotore, al fine di evitare o



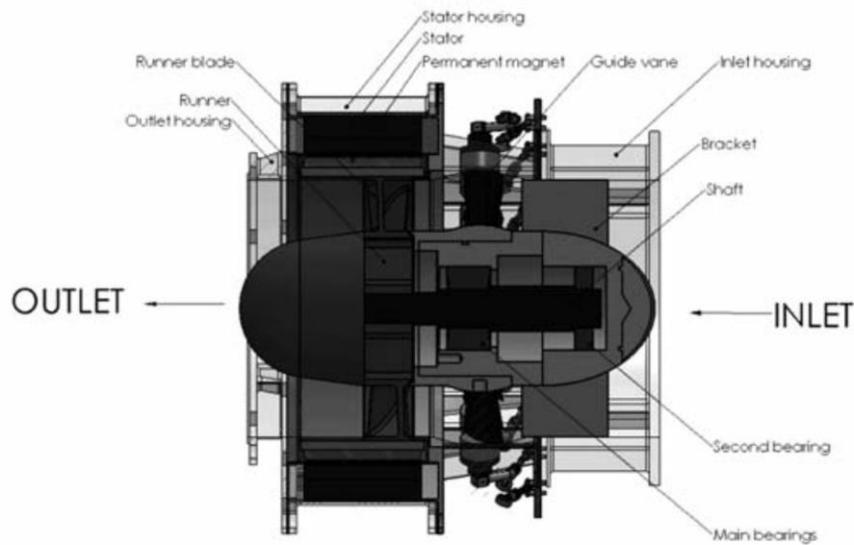
(Fig. 5.3 Turbina reversibile a pompa brevetto US3422275A)

almeno ridurre al minimo la presenza di correnti parassite indotte.



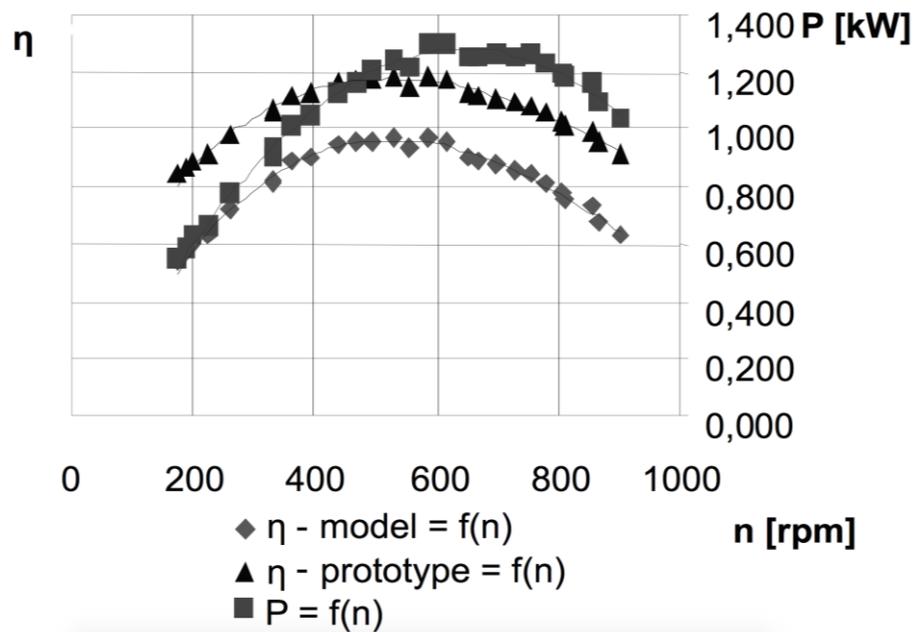
(Fig. 5.4 particolare del magnete e statore brevetto US3422275A)

Per riportare un articolo di più recente fazione, l'Università Politecnica di Cracovia ha condotto uno studio su una turbina di tipo Kaplan integrata con un generatore a magneti permanenti (figura 5.5) attraverso il fissaggio di magneti sulla estremità delle pale, evidenziando, tramite esperimenti, in cui hanno testato la potenza erogata in funzione della portata e del salto disponibile, la notevole efficienza di questo tipo di sistema, sia per quanto riguarda i valori di potenza erogata sia per la richiesta minimale di manutenzione necessaria a mantenere il micro



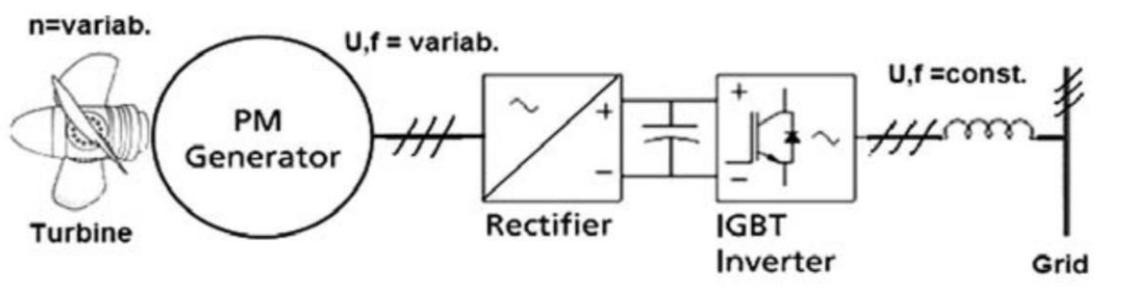
(Fig. 5.5 Turbina kaplan con magneti permanenti)

impianto operativo (figura 5.6).



(Fig. 5.6 efficienza kaplan con magneti permanenti)

In questo studio, inoltre, viene affrontato il problema della fase della corrente alternata prodotta (determinata dalla velocità di rotazione del rotore) che, per essere immessa nella rete nazionale, deve avere una frequenza stabilita (ad esempio 50 Hz in Italia). A differenza dei tradizionali sistemi in cui, per dare la giusta frequenza di rotazione, vengono adottati riduttori o moltiplicatori di giri posti tra la turbina ed il rotore del generatore, in questo caso (come nel caso dell'ITEG), essendo il numero di giri della turbina lo stesso di quello del rotore per motivi costitutivi, bisogna intervenire in altro modo. Nel documento in questione viene convertita la corrente da alternata, come esce dallo statore, a continua ed infine nuovamente alternata ma con la frequenza della rete di immissione (schematicamente: AC/DC/AC) (figura 5.7). La prima conversione (AC/DC) è attuata da un apparecchio detto raddrizzatore. I raddrizzatori possono essere di vario tipo a seconda della tecnica che utilizzano per non far cambiare verso alla corrente. Quelli al diodo vuoto, ad esempio, sfruttano la differenza di temperatura tra un catodo ed un anodo; siccome l'anodo è freddo non può trasmettere la corrente verso il catodo, così sarà condotta solamente in un verso (dal catodo all'anodo). A valle del rettificatore va posto un inverter, un dispositivo che ha come scopo quello di convertire la corrente da continua ad alternata (DC/AC). Lo schema più semplice di un inverter consiste in un oscillatore che pilota un transistor che, sfruttando le proprietà dei semiconduttori di cui è composto, funge come un interruttore: se il valore della tensione supera quello di soglia, proprio del transistor in causa, esso apre il circuito e lo richiude appena la tensione tornerà inferiore a quella di soglia. La strategia riportata nel documento ed appena descritta, è di particolare interesse per l'ITEG perché anch'esso, ugualmente alla turbina Kaplan - rotore analizzata dalla scuola Politecnica di Cracovia, produce una corrente che è in sostanza impossibile da controllare attraverso apparati meccanici (a differenza di quanto succede negli impianti tradizionali), bisogna perciò



(Fig. 5.7 schema raddrizzatore inverter)

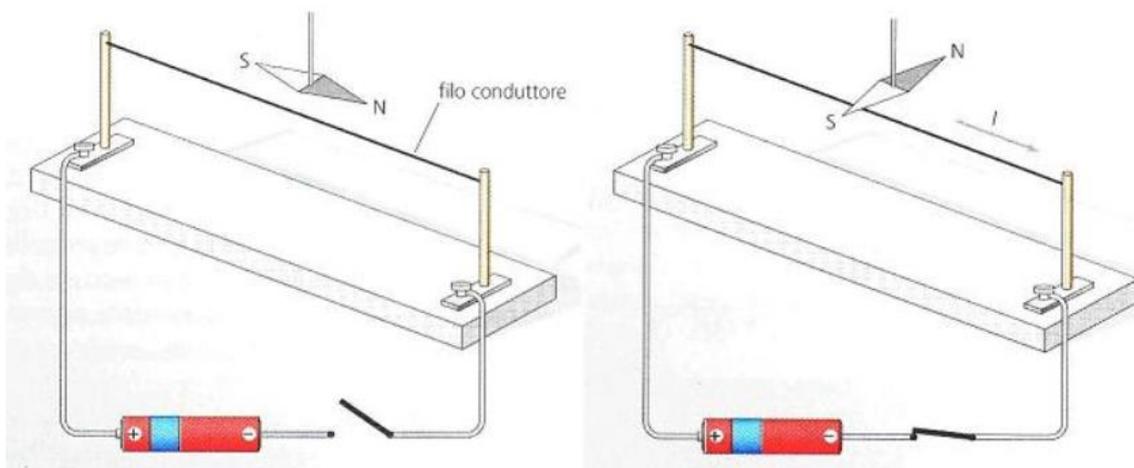
ricorrere ai dispositivi elettronici precedentemente descritti.

In tutti gli esempi affrontati le turbine - generatori sono tenute in asse con l'ausilio di cuscinetti che, seppur sensibilmente ridotti in numero rispetto ai sistemi in cui il generatore non è

integrato con la turbina, rappresentano pur sempre degli organi critici soprattutto se posti di continuo a contatto con fluidi che li deteriorano prematuramente. L'ITEG, invece, possiede la peculiarità vantaggiosa di essere completamente privo anche di questi ultimi grazie al giusto dimensionamento geometrico e di peso che lo rende stabile in asse così da evitare l'utilizzo di apparecchi di sostegno, a sfavore delle perdite di potenza ed a favore dell'efficienza.

Magneti

Nel XIX secolo ebbe una forte spinta lo studio dei fenomeni che legano magnetismo e corrente elettrica con la nascita di una branca della fisica classica denominata elettromagnetismo. Un primo esperimento in materia fu condotto da Gian Domenico Romagnosi e successivamente dal fisico danese Hans Christian Ørsted (figura 6.1) il quale osservò che un ago magnetico posto nelle vicinanze di un filo percorso da corrente ruotava fino a fermarsi in posizione perpendicolare al filo; questo esperimento ha provato che un filo conduttore percorso da corrente genera un campo magnetico. Il fenomeno inverso, ossia quello di generare una corrente a partire da un campo magnetico, venne indagato in seguito, principalmente dal chimico britannico Michael Faraday (attorno al 1830). Egli enunciò la legge di induzione elettrica detta anche Faraday-Neumann o Faraday-Neumann-Lenz attraverso la quale, come già detto in precedenza, viene definita la relazione tra forza elettromotrice generata in un circuito (solitamente un solenoide) e la variazione di flusso del campo magnetico nel tempo ($f_{em} = \Delta\phi/\Delta t$). Infatti, se il flusso del campo magnetico non variasse, non si genererebbe alcuna differenza di potenziale. Affinché il sistema possa generare energia elettrica partendo dal moto di un fluido o al contrario utilizzare energia elettrica per mettere in movimento un fluido, è necessario che la turbina o pompa sia munita di magneti che, grazie al movimento relativo tra i magneti e lo statore, facciano variare il campo magnetico su quest'ultimo.



(Fig.6.1 esperimento di Hans Christian Ørsted)

Solitamente i magneti più utilizzati per questi scopi sono gli elettromagneti. Essi sono costituiti da un nucleo composto da materiale ferromagnetico su cui è avvolto un filo conduttore (tipicamente di rame) detto solenoide. Dando corrente al filo, per il principio descritto precedentemente, il nucleo subirà un notevole aumento di intensità del campo magnetico. È

chiaro il conseguente vantaggio espresso in efficienza e la loro larga diffusione nei motori elettrici. Gli svantaggi degli elettromagneti che impediscono l'adozione di questa soluzione nel caso dell'ITEG sono: la necessità di un circuito di alimentazione, che entrerebbe in contatto con il fluido provocando cortocircuito ed il significativo aumento di ingombro e peso che, al contrario, deve essere minimizzato. La soluzione più plausibile quindi è quella di utilizzare dei magneti (detti anche calamite) o dei magneti permanenti. I primi hanno proprietà magnetiche "per natura" mentre i secondi sono materiali ferromagnetici che subiscono una lavorazione detta di magnetizzazione. Tra i più efficienti in commercio si trovano i magneti permanenti al neodimio, formati da una lega di boro (B), ferro (Fe) e neodimio (Nd) e rivestiti da uno strato antiossidante per renderli più resistenti all'usura. Questi hanno un'intensità del campo magnetico paragonabile agli elettromagneti ma presentano una temperatura di Curie (temperatura oltre la quale si ha un cambiamento delle proprietà magnetiche dei materiali) relativamente bassa (le temperature di esercizio consigliate dai produttori vanno da 80 °C per quelli più comuni fino a 180 °C per i magneti meno facili da trovare sul mercato)⁶ ed il superamento di questa temperatura provoca l'irreversibile smagnetizzazione del materiale. Una alternativa ai magneti in neodimio, valida per applicazioni particolari in cui quelli al neodimio non siano utilizzabili, sono i magneti permanenti in samario - cobalto (SmCo), composti solamente da samario e cobalto. Essi hanno lo svantaggio di avere una densità di energia del campo magnetico più debole rispetto ai magneti al neodimio (180-225 kJ/m³ per quelli con il samario contro i 260-280 kJ/m³) ma presentano una resistenza all'usura ed alla smagnetizzazione più elevata, inoltre la temperatura di Curie si aggira intorno ai 820 °C (la temperatura di esercizio consigliata dalle aziende produttrici è di c.a. 350 °C)⁷.

Il sistema di fissaggio più in linea con lo spirito di semplicità dell'ITEG dei magneti permanenti all'ITEG risulta essere l'incastro a coda di rondine (figura 7.2) in quanto garantisce un buon fissaggio ed in particolare evita l'utilizzo di organi di fissaggio come viti che possono rappresentare un punto debole sia per l'integrità della macchina che per l'efficienza. Con questa tecnica di fissaggio bisogna porre particolare attenzione alle temperature in gioco che, a causa della diversa velocità di dilatazione o di restringimento termico tra i materiali che compongono la turbina-rotore ed i magneti permanenti (la velocità è definita dal coefficiente di dilatazione

⁶ Fonte: <https://www.supermagnete.it/faq/Quanto-si-possono-scaldare-i-magneti>

⁷ Fonte: <https://www.calamite.org/magneti-in-samarium-cobalto-smco>

termica che è una caratteristica fisica propria di ogni materiale), possono aumentare pericolosamente il gioco nel sistema di fissaggio e provocare crepe con la conseguente rottura della turbina - rotore. Per una maggiore sicurezza si può ricorrere, in aggiunta all'incastro a coda di rondine, a resine, più precisamente collanti, adatte alle condizioni ambientali di utilizzo della turbina - rotore. L'utilizzo di queste ultime, oltre ad assicurare il fissaggio dei magneti, è necessario per impermeabilizzare, rendere più resistente ed isolare elettricamente la macchina. L'impermeabilizzazione rende la turbina più duratura alla corrosione ed ossidazione causate dal continuo contatto col fluido, inoltre, lo strato di resina, fungendo da cuscinetto protettivo, conferisce alla turbina un aumento di resilienza agli eventuali urti e stress meccanici in generale. L'ulteriore vantaggio derivante dalla presenza del rivestimento in resina è la diminuzione di rugosità che, come visto nel paragrafo 3.2 "rendimento", rende la turbina più efficiente in quanto abbassa l'attrito tra il fluido e la macchina.

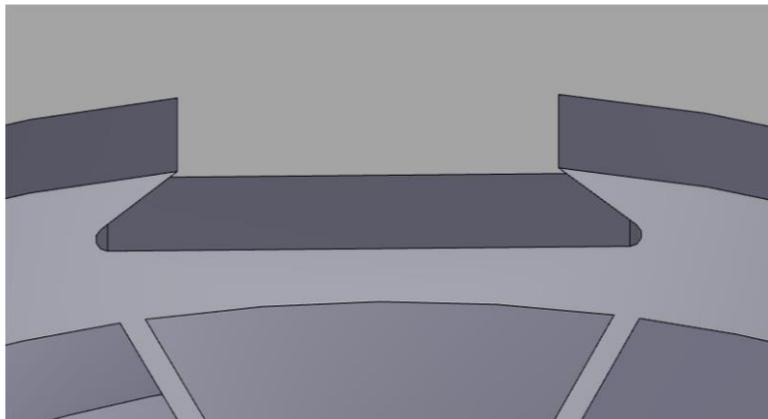


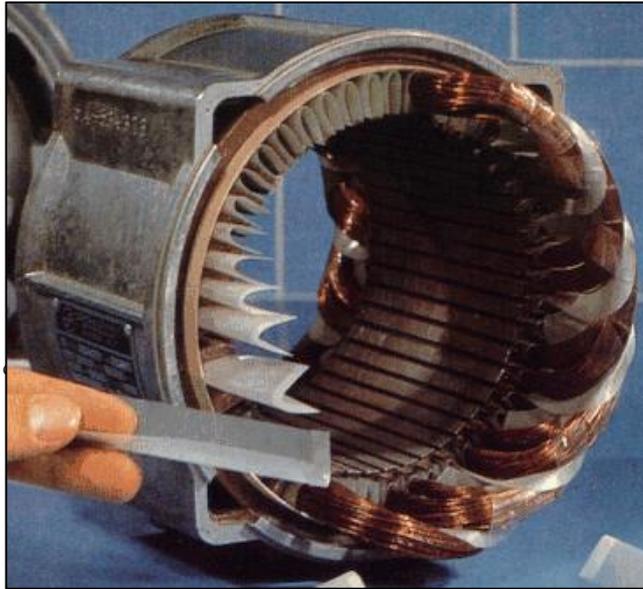
Fig. 7.2 incastro a coda di rondine

Statore

Lo statore è la parte fissa di una macchina elettrica. Esso oltre ad avere il compito di sorreggere la macchina, rappresenta il circuito indotto o induttore a seconda del senso della corrente (dal rotore allo statore è indotto, dallo statore al rotore è induttore). È costituito da un cilindro statorico composto a sua volta da tanti lamierini di acciaio discoidali che presentano nella superficie interna delle cavità ad anello aperto dette cave. I lamierini sono isolati tra loro ed hanno uno spessore variabile in base alla velocità di variazione del campo magnetico: più il flusso magnetico sarà variabile, minore sarà lo spessore dei lamierini (di solito lo spessore si aggira intorno al mezzo millimetro) (figura 7.1). Questo al fine di ridurre notevolmente la generazione di correnti parassite sul cilindro statorico. Attraverso le cave del cilindro statorico passano le matasse di filo conduttore, di solito in rame, che rappresentano il circuito su cui o da cui è indotta la corrente (figura 7.2). Il numero di avvolgimenti è correlato in maniera diretta alla frequenza di rotazione del campo magnetico ed alla frequenza della corrente desiderata in output od a quella fornitagli in input. Il dimensionamento dello statore dipende da molteplici fattori: potenza, tensione e velocità nominali, frequenza, numero di fasi ecc... Pertanto, le dimensioni per la realizzazione dovranno essere studiate in base alle situazioni che si pongono.



(Fig. 7.1 lamierini dello statore)



(Fig. 7.3 Corrente parassita (I))

(Fig. 5.2 Posa delle matasse di filo conduttore nelle cave dello statore)

Nel sistema ITEG lo statore coincide con la condotta che deve contenere il fluido ed è concentrico alla turbina-rotore. Come nel brevetto US3422275A, riportato nel quarto capitolo, poiché nella quasi totalità dei casi il fluido è conduttore di elettricità, è bene che lo statore sia isolato da esso onde evitare cortocircuito. Per isolarlo è possibile utilizzare del materiale plastico di opportuno spessore, in modo tale che il fluido, non potendo attraversare questo materiale, non entri in contatto con lo statore. Se la condotta su cui è montato lo statore dovesse essere di materiale conduttore (situazione molto probabile), sarà necessario intervenire per isolare la tubazione dal campo magnetico generato dai magneti del rotore. Infatti, dall'interazione tra il campo magnetico rotante e la tubazione, su quest'ultima si genererebbero correnti parassite dovute al movimento relativo dei magneti rispetto alla condotta, con la conseguente dissipazione d'energia sotto forma di calore (difatti queste correnti vengono sfruttate nei fornelli ad induzione) quindi riduzione di efficienza (figura 7.3). Per isolarlo è sufficiente interporre tra statore e tubazione una guarnizione di gomma abbastanza spessa in modo tale da distanziare sufficientemente la condotta dal campo magnetico oppure, se non dovesse essere sufficiente, creando delle flange, si può installare un raccordo di tubazione in materiale plastico ad esempio in PVC e montarvi sopra lo statore.

Dimensionamento statore

Come detto in precedenza, sulla turbina saranno montati magneti permanenti per motivi costruttivi. Questa scelta implica che il generatore, costituito dalla turbina-generatore con lo statore posto sulla condotta, sarà di tipo sincrono in quanto la pulsazione delle forze elettromotrici è uguale alla velocità angolare del rotore. Quindi il campo magnetico rotante ruoterà in perfetto sincronismo con il rotore (da qui la definizione di macchina sincrona).

Il primo passo per dimensionare lo statore del motore a magneti permanenti è quello di determinare le coppie polari P_p nota la frequenza f [Hz] desiderata in uscita e la velocità di rotazione del rotore n [giri/min], nonché della turbina nel caso dell'ITEG.

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

Per il dimensionamento preliminare si utilizzano delle relazioni ricavate da leggi dell'elettrotecnica e da diagrammi empirici. In particolare, per un alternatore, la potenza attiva è legata alla coppia T_n ed alla velocità angolare del rotore ω_r secondo la relazione:

$$S_n \cos\phi = T_n \omega_r = T_n \frac{2\pi n}{60}$$

La coppia T_n è data dalla forza tangenziale al traferro F per raggio al traferro $D/2$:

$$T_n = F \frac{D}{2} = \sigma \pi D L \frac{D}{2} = \frac{\pi}{2} \sigma D^2 L$$

dove σ indica la forza tangenziale specifica per unità di superficie del traferro e dipende principalmente dall'induzione al traferro B_t , caratteristica propria del tipo di magneti applicati alla turbina, e dalla densità lineare di corrente A , che rappresenta la corrente nei conduttori dello statore per unità di lunghezza della circonferenza misurata al traferro [A/m].

Per le relazioni precedenti è possibile scrivere:

$$S_n \cos\phi = \frac{\pi}{2} \sigma D^2 L \frac{2\pi n}{60}$$

di conseguenza

$$D^2 L = \left(\frac{60 \cos\phi}{\pi^2 \sigma} \right) \frac{S_n}{n}$$

Il termine tra parentesi tonde è detto coefficiente di dimensionamento c_d tabellato ricavabile in base a S_n e P_p .

$$D^2 L = c_d \frac{S_n}{n}$$

D = diametro al traferro, L = lunghezza lato attivo

Fermandoci a questo punto, senza entrare in dettagli costruttivi dello statore, è possibile evincere, dalle formule sopracitate, le differenze del sistema ITEG rispetto agli altri sistemi idroelettrici della precedente generazione. In questi ultimi il rotore viene messo in rotazione attraverso un albero di trasmissione che li collega e, grazie all'assemblaggio dell'albero con ruote dentate, è possibile modificare la velocità e la coppia in base alle caratteristiche del generatore che è "esterno" alla turbina (cioè indifferente alle caratteristiche costruttive della turbina). Nel sistema ITEG invece, la turbina stessa funge da rotore, per cui la velocità angolare e la coppia fornita dalla turbina è la stessa di quella agente al generatore. Inoltre, il diametro dello statore non rappresenta una scelta arbitraria ma deve avere obbligatoriamente le stesse dimensioni della tubazione, essendo lo statore montato sulla condotta contenente la turbina - rotore. Anche la scelta della lunghezza L è influenzata dalle dimensioni del rotore cioè della turbina. Infatti, non ha senso che lo statore prosegua oltre la lunghezza dei magneti. Solitamente nei generatori sincroni il rapporto tra lunghezza e diametro varia tra $\frac{0.75|1.68}{\sqrt{p}}$ (p numero di poli), un campo accettabile anche per il rapporto tra lunghezza e diametro della turbina.

Possibili impieghi

Fino ad ora si è trattato, maggiormente, del più lampante utilizzo del sistema come turbina per la generazione di energia elettrica, l'ITEG però si presta a diversi impieghi che sfruttano l'energia elettrica per trasformarla in energia fluidodinamica. A seconda della funzione a cui deve adempire, l'ITEG, esigerà delle modifiche.

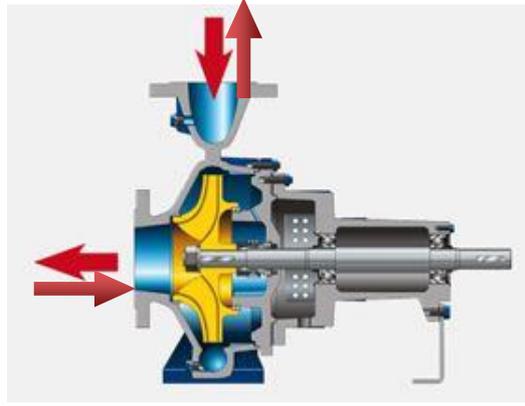
Fluidi incomprimibili

Un primo esempio può essere l'utilizzo come pompa per mettere in moto un fluido incomprimibile. È da notare che il sistema sarà diverso se si tratta di una condotta verticale od orizzontale. Nel primo caso si ha ancora la possibilità di sfruttare la spinta di Archimede per mantenere la pompa - rotore in posizione in direzione assiale come nel caso della turbina, mentre nel secondo non ci sono forze che compensino quella impressa sulla pompa dal fluido (la stessa forza che la pompa esercita sul fluido) in direzione assiale. Perciò è opportuno utilizzare una struttura di sostegno fissata alla condotta a cui è fissata la pompa - rotore per

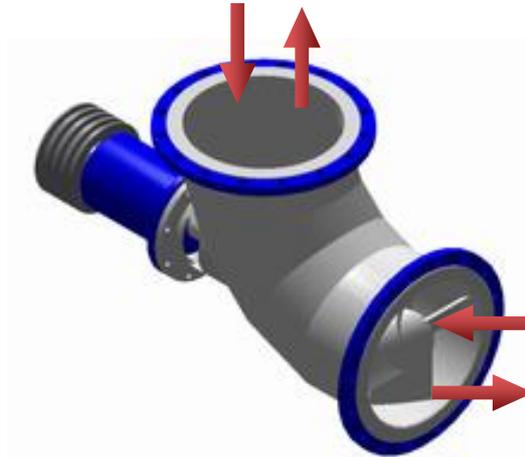
⁸ FROSINI L. - *Dispense di costruzioni elettromeccaniche*.

mezzo di un cuscinetto. Questa modifica è indispensabile attuarla non solo nel caso in cui si voglia pompare del liquido, ad esempio, da un serbatoio ad un altro attraverso un condotto ma anche se si volesse sfruttare la spinta ricevuta alla pompa dal fluido, cioè il principio di azione reazione, nonché il principio di funzionamento delle eliche delle barche in nautica e dagli aerei in campo aeronautico. Questi particolari ambiti d'applicazione richiedono conoscenze specifiche poiché risulta opportuno considerare la necessità di uno studio fluidodinamico per l'analisi delle turbolenze generate che possono provocare forti vibrazioni nello scafo di un'imbarcazione o nella fusoliera di un aereo.

Per quanto riguarda la geometria delle spire della pompa - rotore, come già succede per le turbine così dette PAT (Pump As Turbine, pompe centrifughe (figura 6.1) o assiali (figura 6.2) convertibili a turbine senza apporto di modifiche) non sono necessari cambiamenti rispetto alla configurazione per l'utilizzo come turbina.



(Fig. 6.1 KSB Etanorm pompa centrifuga PaT)



(Fig. 6.2 Pompa assiale PaT)

Tuttavia, può essere utile variare la sezione dei cavedi che si avvolgono attorno al corpo centrale per aumentare la velocità del fluido incomprimibile. Infatti, per la conservazione della portata (Q), restringendo la sezione (A), ne conseguirà un aumento di velocità (u) ($Q = v \cdot A = cost$) ed una riduzione di pressione (p) come deducibile dall'equazione di Bernoulli ($\rho gh + 1/2\rho v^2 + p = cost$ dove ρ è la densità del fluido che deve mantenersi costante e h è l'altezza rispetto ad una quota di riferimento).

Più precisamente, svolgendo i calcoli:

$$Q_{in} = Q_{out} = Q;$$

$$Q = v_{in} \cdot A_{in} = v_{out} \cdot A_{out};$$

$$\rho gh_{in} + \frac{1}{2}\rho u_{in}^2 + p_{in} = \rho gh_{out} + \frac{1}{2}\rho u_{out}^2 + p_{out};$$

sostituendo le velocità:

$$\rho gh_{in} + \frac{1}{2}\rho(Q/A_{in})^2 + p_{in} = \rho gh_{out} + \frac{1}{2}\rho(Q/A_{out})^2 + p_{out};$$

considerando $\Delta h = 0$:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_{in}^2} - \frac{1}{A_{out}^2} \right).$$

Essendo il termine $\frac{1}{2} \rho Q^2$ invariante, è possibile definirlo attraverso una costante k , quindi la pressione dipenderà solamente dalla grandezza della sezione:

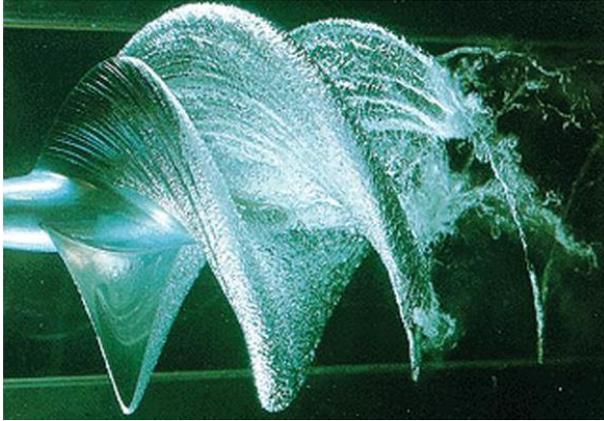
$$\Delta p = k \left(\frac{1}{A_{in}^2} - \frac{1}{A_{out}^2} \right);$$

mentre la velocità sarà inversamente proporzionale alla sezione e definita dall'equazione di conservazione della portata:

$$v = \frac{Q}{A}.$$

Un problema comune a tutte le applicazioni trattate finora è il fenomeno della cavitazione. La cavitazione si genera quando avviene un brusco calo di pressione al di sotto del valore cosiddetto di pressione critica. L'abbassamento di pressione provoca la formazione di bolle di gas all'interno del liquido che implodono. Le zone di bassa pressione sono causate dal moto della macchina, di conseguenza le bolle si formano vicino alla sua superficie ed implodendo provocano il distaccamento di frammenti dell'organo solido accorciandone, di molto, la durata (figura 6.3). Teoricamente come valore di pressione critica si prende la pressione di vapore (o

tensione di vapore) del liquido alla definita temperatura ma si è rivelato più preciso calcolarlo

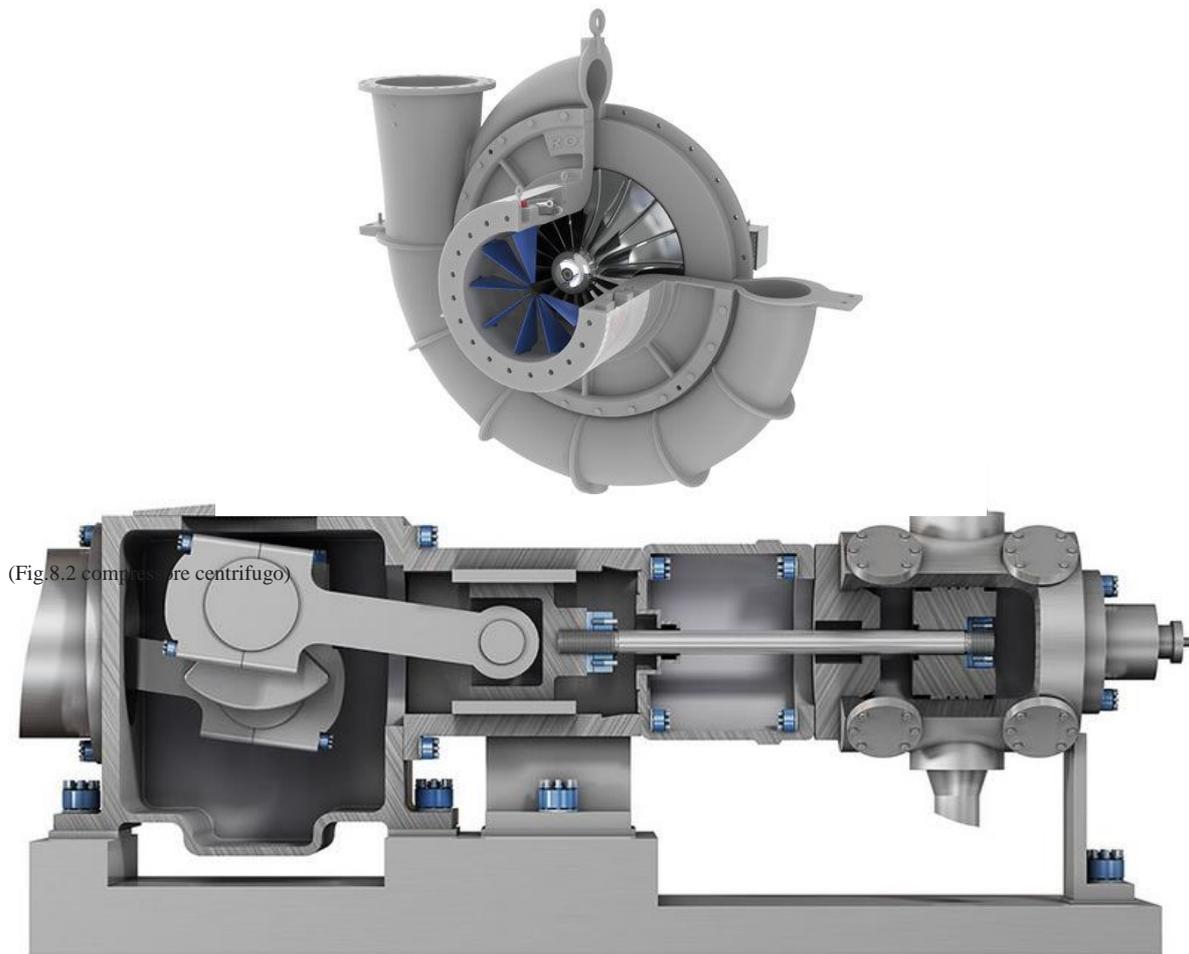


(Fig. 6.3 Fenomeno della cavitazione ed effetto sull'elica)

sperimentalmente a causa del numero elevato di fattori che influenzano il fenomeno.

Fluidi comprimibili

Le considerazioni appena fatte valgono per fluidi incompressibili (in genere i liquidi) mentre per i fluidi comprimibili (i gas) le precedenti notazioni non sono valide, in quanto, per lo stato diverso a cui si trovano, essi si comportano diversamente e seguono leggi differenti dai primi. Quindi, se opportunamente modellato, l'ITEG può fungere da compressore, cioè come macchina operatrice che converte l'energia elettrica in energia potenziale di pressione sfruttando la comprimibilità del gas e passando attraverso la trasformazione in energia cinetica. La sostanziale differenza con i fluidi incompressibili è che quest'ultimi non variano la propria densità (se non di valori assolutamente trascurabili) mentre quelli comprimibili possono alterare facilmente la loro densità al variare di temperatura e pressione. Sul mercato si trovano



(Fig. 8.1 compressore alternativo)

diversi tipi di compressori, da quelli a stantuffo alternato, in cui la compressione è dovuta al movimento alternato di un cilindro all'interno di una camera cilindrica che fa variare il volume a disposizione del gas, quindi la sua densità (figura 8.1), a quelli centrifughi, che sfruttano l'effetto centrifugo della girante e lo conferiscono al fluido (figura 8.2), passando per quelli a vite (figura 8.3), dove il processo di compressione è realizzato da due rotori elicoidali accoppiati, il fluido entra dall'apertura di aspirazione e viene intrappolato nello spazio esistente tra i lobi dei rotori che ruotando provocano una riduzione dello spazio disponibile al gas.



(Fig. 8.3 compressore a vite)

La modifica principale che l'ITEG deve subire per lavorare come compressore è una progressiva diminuzione della sezione delle condotte, comportante l'aumento di densità del fluido comprimibile. Girando, l'ITEG, grazie ai suoi avvolgimenti, risucchia il fluido all'interno delle cavità aperte (funzionamento simile a quello di una pompa centrifuga), ne aumenta l'energia cinetica e, contemporaneamente, grazie alla progressiva diminuzione di sezione, quindi di volume a disposizione, comprime il fluido così da aumentarne l'energia potenziale di pressione.

Conclusioni

Questa tesi ha cercato di far emergere la rivoluzione che in futuro il sistema ITEG porterà nel mondo delle macchine fluidodinamiche. Come è stato evidenziato nel corso della discussione, l'estrema semplicità costruttiva, derivante dall'idea di funzionamento, conduce all'apporto di importanti vantaggi non soltanto per quanto concerne la necessità di manutenzione, che è considerevolmente ridotta, ma anche in termini di efficienza. Questi aspetti rendono ITEG una macchina senza eguali, conclusione frutto del confronto della stessa ed altri sistemi più o meno diffusi ed aventi le stesse funzioni. Se tutta la teoria scientifica alla base dovesse essere comprovata dall'esperienza è fuori discussione il successo che si potrà ottenere. A sostegno di questa affermazione vi sono i dati riportati nell'introduzione che mostrano la continua crescita

in positivo della produzione di energia idroelettrica, di conseguenza anche il relativo mercato degli impianti idroelettrici presenta lo stesso comportamento. La continua espansione del campo delle macchine fluidodinamiche assicura un futuro prospero al sistema oggetto della tesi.

Fonti bibliografiche e sitografia

CASINI M. (2015) - *Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale*, Department of Planning, Design, and Technology of Architecture (PDTA), Sapienza Università di Rome. Disponibile presso: International Journal of Smart Grid and Clean Energy [Ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

FARNÈ S. - *Macchine. Macchine idrauliche*. Synopsis, Libreria Universitaria Medea.

FROSINI L. - *Dispense di costruzioni elettromeccaniche*. Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università degli studi di Pavia, inedito.

MICHAEL BRAIKEVITCH, BRUCE DONALD ARTHUR - *Water turbines, pumps and reversible pump turbines* [online]. Disponibile a: <<https://patents.google.com/patent/US3422275A/en>> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

JR JOSEPH H WOOD (1945) - *Generator for pipe lines* [online]. Disponibile a: <<https://patents.google.com/patent/US2436683A/en>> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

ROCCO V. - *fluidodinamica delle macchine*. Dipartimento di ingegneria industriale e dell'informazione, Università degli studi di Roma Tor Vergata.

ROSEFSKY JONATHAN B. (1999) - *Ribbon drive power generation for variable flow conditions* [online]. Disponibile a: <<https://patents.google.com/patent/US6626638B2/en?q=US6626638>> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

SACCANI C., BIANCHINI A., PELLEGRINI M., GOLFERA L. - *Dimensionamento Coclee* [online], Department of Industrial Engineering (DIN), Università di Bologna. Disponibile a: <[http://www.diem.ing.unibo.it/personale/saccani/index_files/Impianti%20Meccanici%20M%20\(dal%202014-2015\)/Impianti%20Meccanici%20M_modulo%201.Esercitazione_Dimensionamento%20Coclee.pdf](http://www.diem.ing.unibo.it/personale/saccani/index_files/Impianti%20Meccanici%20M%20(dal%202014-2015)/Impianti%20Meccanici%20M_modulo%201.Esercitazione_Dimensionamento%20Coclee.pdf)> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

SALA R. - *dispense del corso di macchine*. Dipartimento di idraulica, Università di Pavia.

SOBCZYK T., WEGIEL T., GRAHL-MADSEN M., STYRYLSKI M. (2010) - *Integrated turbine with pm generator for small hydro-power plants*. Dipartimento di ingegneria elettronica, Università politecnica di Cracovia. Disponibile presso: Biblioteka Politechniki Krakowskiej [Ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

CALAMITE.ORG - *Magneti in Samario Cobalto (SmCo)* [online], “confronto con i magneti al neodimio”, disponibile a: <<https://www.calamite.org/magneti-in-samarium-cobalto-smco>> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

WIKIPEDIA (2018) - *Interazione elettromagnetica* [online], “cenni storici”, disponibile a: <https://it.wikipedia.org/wiki/Interazione_elettromagnetica> [ultimo accesso 07 Ottobre 2018].

WIKIPEDIA (2018) - *Alternatore* [online], “generatore sincrono”, disponibile a: <<https://it.wikipedia.org/wiki/Alternatore>> [ultimo accesso 09 Ottobre 2018].