

RINGRAZIAMENTI

Seduto alla mia scrivania, occupato negli ultimi sviluppi della tesi, non mi rendo conto di essere arrivato quasi alla fine di questo percorso che ha coinvolto tutto me stesso negli ultimi anni. Guardandomi indietro mi rendo conto che tante cose nella mia vita e soprattutto dentro di me sono cambiati. Ripercorrendo la mia strada non posso fare a meno di pensare a quanti mi hanno fatto da ala.

Il mio primo pensiero ovviamente va alla mia famiglia senza i quali non sarei mai potuto arrivare dove sono oggi, non parlo solo del sostegno economico ma anche di quel aiuto esplicito che tante volte è venuto dal loro cuore (i miei genitori, mio zio, le mie zie, i miei fratelli e sorelle)

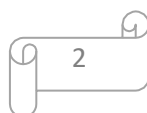
Vorrei cogliere questa occasione per ringraziare particolarmente la mia ragazza CYNTHIA che ha sempre saputo come starmi vicino ed aiutarmi in tutte le situazioni; poi un grazie sincero ad un amico, un fratello, un compagno di calcio GAEL non trovo le parole giuste per esprimere quello che penso ma questo è tutto ciò che possiedo; grazie ad un altro fratello CEVERIN che sinceramente l'ho incontrato così per caso ma ha avuto un impatto positivo nella mia vita in questi ultimi anni. Grazie a JEMMY, JOSEPH, MARIELLA, BELINDA, LEROY, ARNOLD, YVAN KEVIN, CATHY, MARIEL, FRANCK, GISCARD, OTICE, MANUELLA, VALMONT, WILLY, NELLA,

Mi sembra doveroso un ringraziamento al mio titolare dell'azienda LOCLAIN s.r.l Ing. CLAUDIO GATTAVARI con chi ho lavorato ed un grazie sincero anche a tutti i miei colleghi di lavoro perché durante questi ultimi mesi ho imparato tanto oltre su di me ma anche su di loro. Un grazie particolare va al prof GIOVANNI SERRA che è sempre stato disponibile per qualsiasi miei chiarimenti.

Dedico questo lungo cammino a mio zio KAMENI MAURICE attualmente malato in ospedale sperando che questo risultato possa avere un impatto positivo per le sue cure, dandoli coraggio, forza, gioia e soprattutto voglia di vincere questa sua sfida.

“La salute è un bene”

Eric Zeus



ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione

“Guglielmo Marconi”

IMPIEGO DI UN GRUPPO TURBINA-ALTERNATORE PER
LA REGOLAZIONE DELLA PORTATA DI UNA TUBAZIONE
IDRAULICA

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Candidato:

Eric Daniel Zeumou Tchamo

Relatore:

Prof. Giovanni Serra

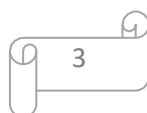
Correlatori:

Ing. Claudio Gattavari

Ph.D Gabriele Rizzoli

Sessione I

Anno Accademico 2016/2017



INDICE

Introduzione

Sommario

CAPITOLO I: MACCHINE SINCRONE NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

I.1 CLASSIFICA DEI MATERIALI USATI PER LA REALIZZAZIONE DEI GENERATORI BRUSHLESS

I.2 DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA BRUSHLESS NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

I.3 CALCOLO DELLA COPPIA ELETTROMAGNETICA ED EQUAZIONI DEL MOTO DEL ROTORE DI UN'ALTERNATORE

I.4 MODELLO DINAMICO DEGLI ALTERNATORI E RAPPRESENTAZIONE MEDIANTE CIRCUITI ACCOPPIATI MAGNETICAMENTE ED IN MOTO (STUDIO VETTORIALE)

I.4.1 TRASFORMAZIONE TRIFASE- BIFASE, ESPRESSIONE E CIRCUITO ELETTRICO DEGLI AVVOLGIMENTI DI MACCHINA

I.4.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E SCHEMA A BLOCCHI DEL BRUSHLESS IN CONDIZIONE DI ORIENTAMENTO DI CAMPO

I.4.3 SCHEMA DI UN AZIONAMENTO BRUSHLESS CON CONTROLLO IN TENSIONE ED IN CORRENTE

I.5 I VANTAGGI E GLI SVANTAGGI DEL GENERATORE BRUSHLESS

I.5.1 I VANTAGGI

I.5.2 GLI SVANTAGGI

CAPITOLO II: MACCHINE ASINCRONE NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORI

II.1 DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA ASINCRONO NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

II.2 PRINCIPALI ELEMENTI COSTITUENTI LA MACCHINA ASINCRONA (ROTORE E STATORE) E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO (A VUOTO E A CARICO)

II.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA FASE ED EQUAZIONE DI MACCHINA A REGIME PER IL CALCOLO DELLA POTENZA, COPPIA ELETTROMAGNETICA, E CARATTERISTICA MECCANICA DEL MOTORE ASINCRONO

II.4 STUDIO DINAMICO O ANALISI VETTORIALE DEL MOTORE ASINCRONO

II.5 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI GENERATORI ASINCRONI

II.5.1 I VANTAGGI

II.5.2 GLI SVANTAGGI

CAPITOLO III: I CONVERTITORI STATICI: principio di funzionamento e scopo

3.1 CLASSIFICAZIONE DEI CONVERTITORI STATICI

3.2 CONVERTITORE STATICO DC_AC (INVERTER)

3.3 CONVERTITORE STATICO AC_DC (AFE)

3.4 CIRCUITI, COMPONENTI, ED APPLICAZIONI DEL Back- to-Back

CAPITOLO IV: LE PROVE SVOLTE SUL BRUSHLESS

4.1 PROVA CON CARICO FISSO CIOE PASSIVO (LAMPADINE) DI 4,5÷9KW AL VARIARE DEL GRADO DI APERTURA DELLA VALVOLA DI CONTROLLO

4.1.1 Prova con carico (Plafoniera) da 4,5÷9 kW, e LOC POWER al 10%

4.1.2 Prova con carico (Plafoniera) da 9 kW, e LOC POWER al 20%

4.1.3 Prova con carico (Plafoniera) da 9 kW, e LOC POWER al 30%

4.1.4 prova con carico(Plafoniera) da 9 kW, e LOCPOWER al 40%

4.2 PROVA CON ALTERNATORE DA 30 kW + INVERTER ACCOPPIATO AD UNA TURBINA CON CURVA IDEALE

4.3 PROVA CON ALTERNATORE DA 30 KW + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO ATTIVO CON CURVA IDEALE

4.5 PROVA CON BRUSHLESS DA 30 KW CON COPPIA MASSIMA 214 Nm + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO ATTIVO CON CURVA IDEALE PER TEST DI CAVITAZIONE ...

4.5.A Prova di incipiente cavitazione con grado di apertura della valvola in prova tra 17,4÷20% e media del $C_v=346,76$ con OFFSET fisso a zero

4.5.B Prova di incipiente cavitazione con stesso grado di apertura in prova ma con $C_v=466,77$ con OFFSET fisso a zero

4.5.C Prova di incipiente cavitazione con grado di apertura della valvola in prova a 20%, valore medio del $C_v=348,88$ al variare dell'OFFSET tra 0-50%

4.5.D Prova di incipiente cavitazione con grado di apertura in prova a 50%, con valore di $C_v=466,97$ al variare dell'OFFSET tra 0-50%

4.5.E Test sul Brushless da 30 kW con Otturatore variabile, il C_v fisso al 63% e il parametro OFFSET fisso a zero.

CAPITOLO V: PROVA CON BRUSHLESS DA 10 kW + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO FISSO CON CURVA IDEALE

5.1 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 30%

5.2 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 35%

5.3 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 40%

CAPITOLO VI: PROVE SVOLTE CON TURBINA A VUOTO POI CON CARICO DA 9 KW

6.1.1 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 10%, valore medio del $C_v=45$, rapporto $Q/\Delta P^{0,5}= 50,7$

6.1.2 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 20%, $c_v=71,95$;
 $Q/\Delta P^{0,5}=71,45$

6.1.3 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 30%, $C_v=93,86$;

$$Q/\Delta P^{0,5}=100,1$$

6.1.4 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 40%, $C_v=110,77$;

6.2.1 Test con carico da 9kw, grado di apertura della LOC POWER a 10%, $C_v=71,95$;

6.2.2 Test con carico da 9kw, grado di apertura della LOC POWER a 20%, $C_v=71,95$;

6.2.3 Test con carico da 9kw, grado di apertura della LOC POWER a 30%, $C_v=93,86$;

6.2.4 Test con carico da 9kw, grado di apertura della LOC POWER a 40%, $C_v=110,77$

Capitolo VII: ANALISI TERMICA SUL BRUSHLESS CON E SENZA VENTOLA ALLA VELOCITA' NOMINALE

7.1 Caratterizzazione del motore e del carico

7.2 Temperatura del Brushless dopo 8 ore di funzionamento con monitoraggio periodico per la determinazione dell'efficienza dell'alternatore con ventola a velocità nominale.

7.3 Temperatura del Brushless dopo 8 ore di funzionamento con monitoraggio periodico per la determinazione dell'efficienza dell'alternatore senza ventola a velocità nominale.

CAPITOLO VIII: Test sulla valvola di recupero con Generatore impiegato alla velocità superiore della Nominale per il Recupero di Energia

8.1 Test sulla Valvola di Recupero di Energia con curva della valvola Piatta impostata dall'INVERTER con Brushless da 30 kW lavorando oltre la sua velocità nominale per la determinazione dell'efficienza.

8.2 Test sulla valvola di Recupero di Energia con curva della valvola Quadratica impostata dall'inverter con Brushless da 30 kW lavorando oltre la sua velocità nominale per la determinazione dell'efficienza.

CONCLUSIONE

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Sommario

In questo elaborato,

- Descriviamo l'impianto idraulico sul quale sono state svolte le prove in azienda,
- Commentiamo e descriviamo il principio di funzionamento della LOCPOWER e le sue applicazioni aziendali,
- Analizziamo le tipologie di alternatori che si possono usare per poter essere accoppiati al gruppo turbina – alternatore sia per la regolazione della portata che per la regolazione della pressione del sistema per massimizzare oltre l'energia elettrica recuperata ma anche l'efficienza complessivo del gruppo
- Confrontiamo le macchine Sincrone con quelle Asincrone tradizionali concentrandoci sulle caratteristiche meccaniche di ogni tecnologia nel funzionamento da Generatore.

Nel primo paragrafo, presentiamo la macchina Brushless, elencando i diversi materiali usati per la sua costruzione e suo principio di funzionamento; rappresentiamo il circuito elettrico e discutiamo le equazioni di regime permanenti con l'obiettivo di tracciare la caratteristica meccanica. Proseguiamo focalizzandoci sul funzionamento della macchina in regime dinamico per il **controllo in orientamento di campo**.

Il secondo paragrafo è dedicato al generatore Asincrono. Elenchiamo gli elementi costituendo la macchina ed analizziamo suo principio di funzionamento per poter rappresentare il circuito equivalente e discutere le equazioni di macchina nello scopo di tracciare la caratteristica meccanica della macchina. Analizziamo il funzionamento della macchina in regime dinamico per il **controllo in orientamento di campo**.

Il terzo paragrafo tratta dei convertitori statici. Una volta ottenuta la tipologia di generatore, è necessario usare i convertitori statici per garantire l'interfacciamento tra diversi componenti dell'impianto.

Il paragrafo successivo è dedicato ad una serie di prove sperimentali svolte sull'impianto dell'azienda in particolare sul gruppo turbo - alternatore.

INTRODUZIONE

Il sistema LOCPOWER: è un sistema progettato e brevettato in oltre 53 paesi per la gestione, la regolazione, ed il controllo in ambito: Acquedottistico, Idroelettrico, ed Industriale (il teleriscaldamento).

L'innovazione di questo prodotto sta nel fatto che il sistema consente di recuperare l'energia solitamente dissipata durante il servizio di controllo della pressione o della portata del fluido senza produrre il CO₂ e senza variazione del layout esistente perché il flusso è di tipo assiale rispetto alla turbazione in ingresso ed in uscita.

È quindi un sistema facilmente installabile in orizzontale ed in verticale con ingombro ridotto che usa come fluido principale l'acqua demineralizzata e filtrata ma trova anche applicazione nella regolazione di altri fluidi industriali quali:

- Il gas naturale;
- Il vapore;
- Gli idrocarburi.

Infatti, con generatore (Sincrono e/o Asincrono) collegato all'albero di potenza delle valvole, trasforma la potenza meccanica "raccolta" dal trim in energia elettrica tramite collegamento ad un quadro convertitore (INVERTER - AFE), che mette a disposizione l'energia elettrica a seconda della normativa CEI 0-21 in BT.

L'energia rigenerata può quindi essere sia:

- ❖ Consumata per i fabbisogni dell'impianto stesso, si parla **di Autoconsumo;**
- ❖ Immessa totalmente in rete, si parla **di Ritiro dedicato;**
- ❖ In parte mandata in rete ed in parte usata dai carichi dell'impianto in modo tale da ottimizzare la distribuzione di energia elettrica e minimizzare i sovraccarichi, si parla **di scambio sul posto.**

Con la funzione di doppia regolazione:

- **Regolazione Idraulica (HR)** che avviene agendo sull'attuatore tramite il corpo otturatore;
- **Regolazione Elettrica (ER)** che avviene agendo sull'inverter tramite il parametro OFFSET.

È possibile regolare e controllare rapide escursioni di portata e/o di pressione nella rete dovuti a più fattori, i cui principali sono:

- ✓ le variazioni improvvise di domanda;
- ✓ i cambiamenti di configurazione della rete.

La turbina integrata, controllata da inverter, riesce a compensare tali escursioni variando la velocità di rotazione in automatico, ottimizzando poi gli andamenti delle pressioni in tutta la rete idrica, riducendo il rischio di perdite per sovrappressione, quindi l'impianto rimane sempre in equilibrio.

L'impianto idraulico e il sistema LOCPOWER dell'azienda LOCLAIN possono essere rappresentate nelle immagini sottostanti:

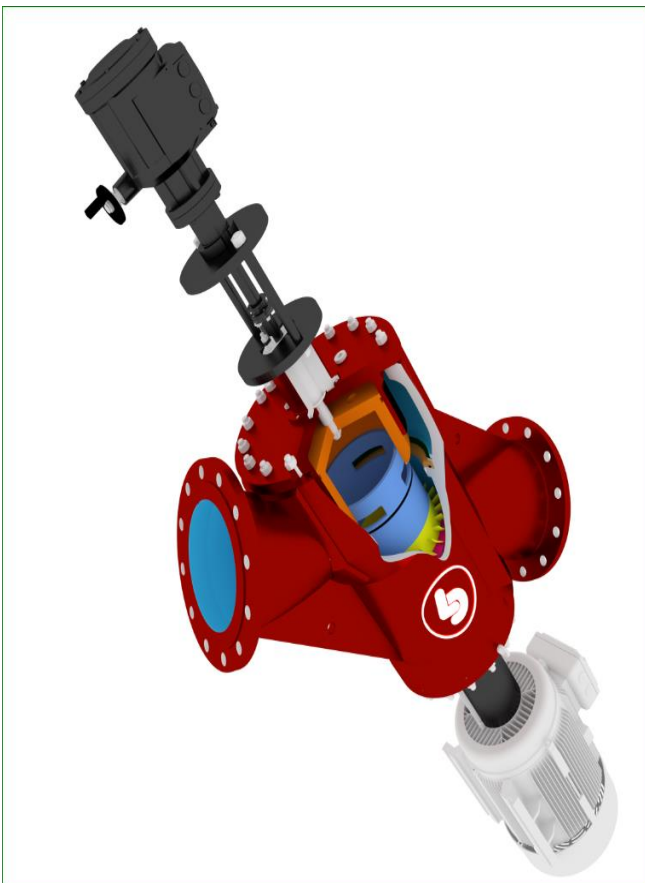


Fig.1 Gruppo turbo – alternatore della LOCLAIN

Fig.2 Impianto Idraulico

LOCLAIN

CAPITOLO I: MACCHINE SINCRONE NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

I.1 CLASSIFICA DEI MATERIALI USATI PER LA REALIZZAZIONE DEI GENERATORI BRUSHLESS

L'impiego dei magneti permanenti per la costruzione delle macchine elettriche consentono di generare un flusso magnetico evitando di dissipare potenza negli avvolgimenti di eccitazione.

Si dicono magneti permanenti, i materiali ferromagnetici caratterizzati da cicli di isteresi aventi particolari proprietà:

- Elevata induttanza residua;
- Elevato campo coercitivo.

Il comportamento di tale materiali si discute esaminando le proprietà del ciclo di isteresi nel piano **B-H** (B positivo, H negativo):

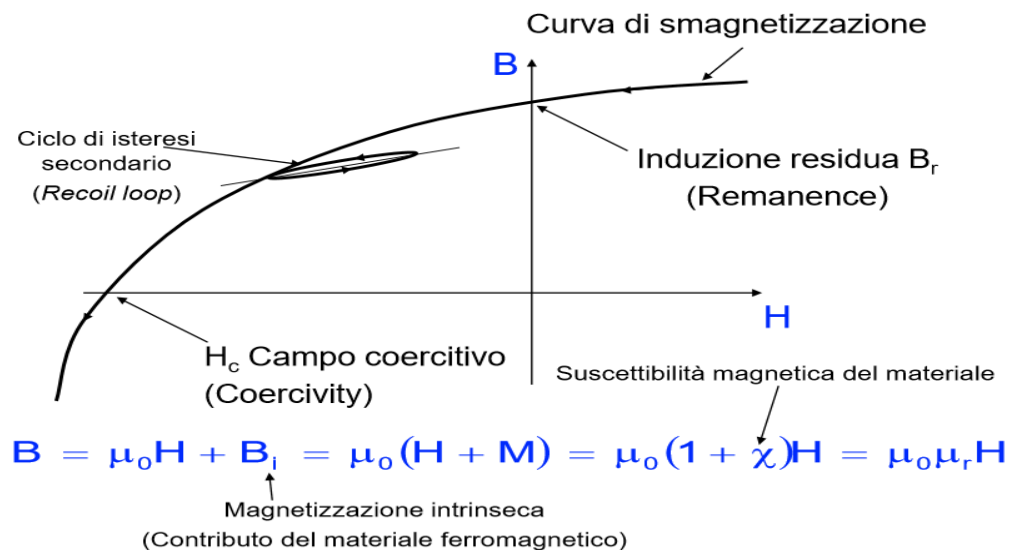


Fig.3 Curva di smagnetizzazione dei magneti permanenti

siano L_m lunghezza magnete ; δ traferro

S_m sezione magnete ; S_δ sezione del traferro

μ_{rec} permeabilità magnetica relativa della retta di carico

L'espressione della **retta di carico** per cui intersezione con la curva di smagnetizzazione individuano i punti B_m e H_m detto **punto di lavoro** vale:

$$B_m = \left(\frac{Ni}{I_m} - H_m \right) \frac{I_m}{\delta} \frac{S_\delta}{S_m} \mu_0$$

Il circuito magnetico e la rete di carico sono così espresso:

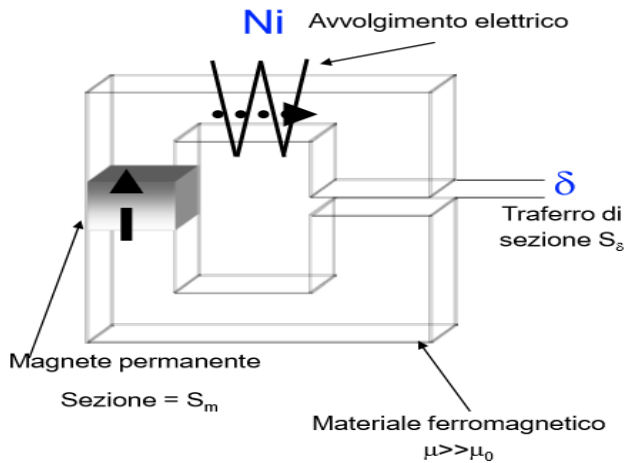


Fig.4 Circuito magnetico

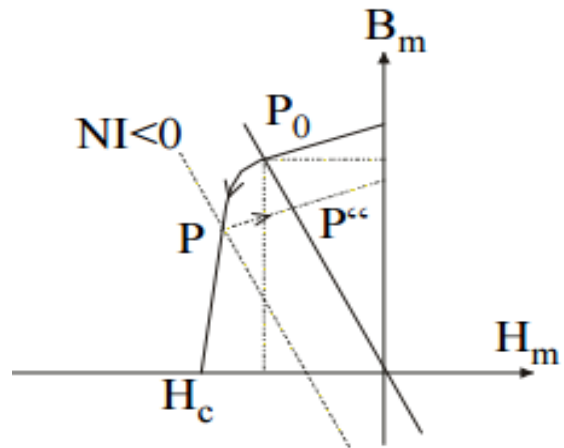


Fig.5 Caratteristica punto di lavoro

In cui:

H_m Campo magnetico del magnete usato

H_{ci} Campo magnetico coercitivo intrinseco

I magneti permanenti di più largo impiego dipendono dalle temperature e possono essere classificati nella seguente tabella:

	B_r [T]	H_c [kA/m]	$(HB)_{max}$ [kJ/m ³]
AlNiCo	0,7÷1,35	45÷110	11,5÷72
Ferriti	0,20÷0,44	130÷300	8÷35
Terre rare: SmCo	0,8÷1,2	310÷750	120÷240
Terre rare: NdFeB	1,03÷1,47	830÷1005	225÷415

la caratteristica $B-H$ dei magneti permanenti è espressa come:

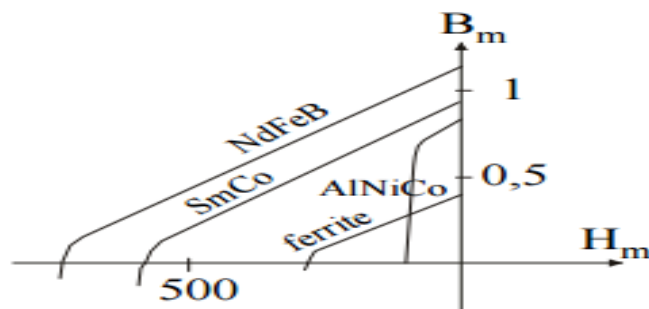


Fig.6 Caratteristiche B-H dei magneti permanenti

I.2 DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA BRUSHLESS NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

Esistono diverse tipologie di macchine sincrone che possono essere classificate in base alla forma del rotore e dalla presenza di avvolgimenti di eccitazione o di magneti sul rotore.

Queste macchine prendono il nome di **macchine Sincrone**, mentre le macchine con il rotore circolare prendono il nome di macchine isotrope, per cui è possibile fare la seguente classifica:

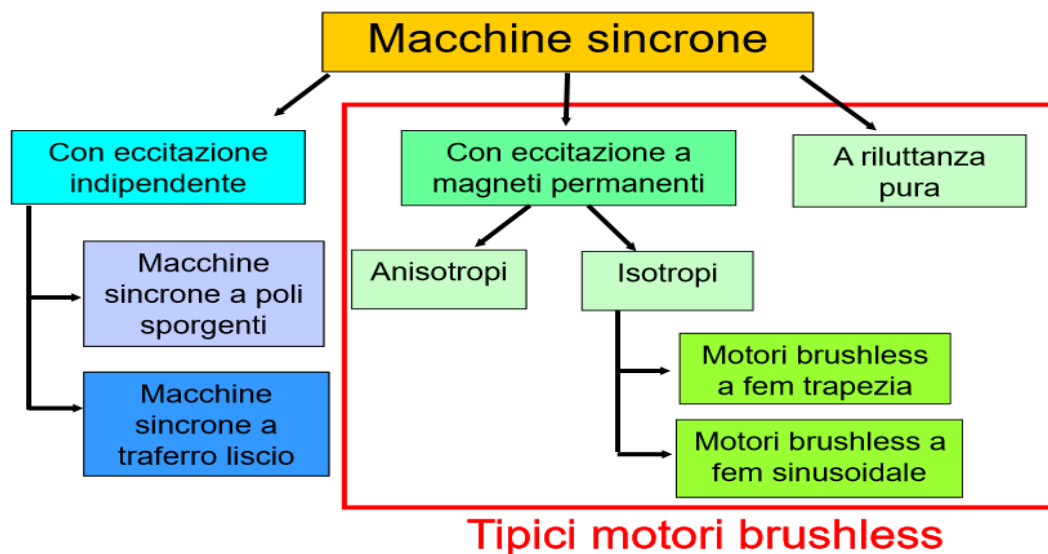
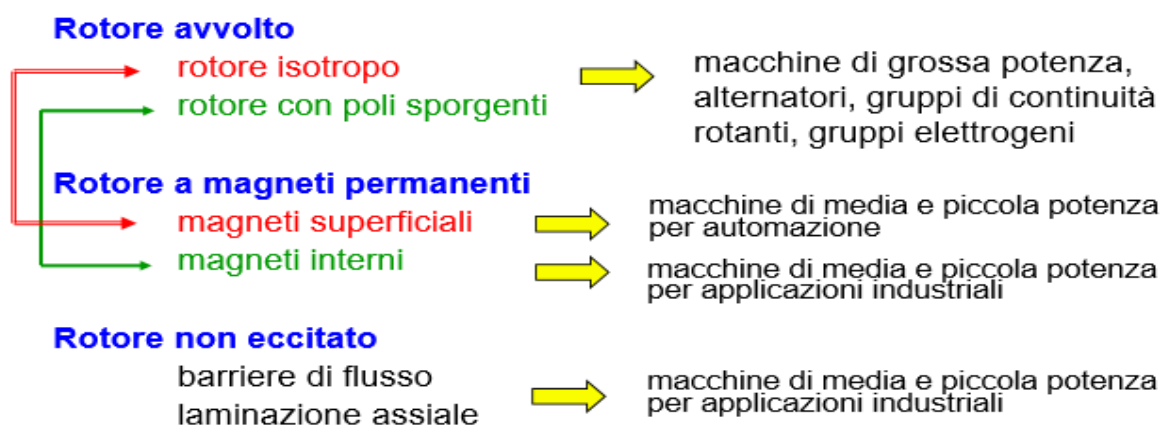


Fig.7 Tipologie di macchine Sincrone di maggiore impiego

D'altra parte in base alla geometria del rotore, le macchine sincrone si possono classificare come di seguito:



In generale nel linguaggio commerciale, le macchine sincrone isotrope, a f.e.m sinusoidale prendono il nome di **macchine Brushless**.

Sono macchine elettriche aventi la struttura di una macchina sincrona nella quale il flusso di eccitazione viene prodotto tramite un'opportuna disposizione di magneti nell'indotto e può essere rappresentato come:



Fig.8 Brushless isotropo a f.e.m sinusoidale

Un generatore Brushless, il quale è essenzialmente costituito da uno statore e da un rotore, entrambi di materiali ferromagnetico laminato.

Lo statore: è sede di avvolgimenti trifase in cui ogni fase occupa 1/3 delle cave di statore e distribuiti in funzione del numero di poli di macchina (**P**).

Il rotore: è sede dei magneti permanenti responsabile del flusso di eccitazione.

Sono quindi presenti due sorgenti differenti ed indipendenti di forza magnetomotrice:

- di rotore, sempre presente
- di statore, presente solo quando la macchina è alimentata

l'avvolgimento di statore del sincrono può essere analogo a quello dell'asincrono per cui si ha:

- **l'avvolgimento distribuito** in cui una bobina presenta un'ampiezza pari ad un passo polare. Esso presenta un numero di cave per polo e per fase **q** intero
- **l'avvolgimento concentrato** in cui ogni bobina è avvolta attorno ad un dente. Esso invece il numero di cave per polo e per fase **q** è sempre minore di

questi avvolgimenti sono generalmente utilizzati per ottenere un elevato numero di poli, ossia un'elevata coppia. Quindi in base al tipo di magneti, i lamierini del rotore a PM possono essere presentate come:

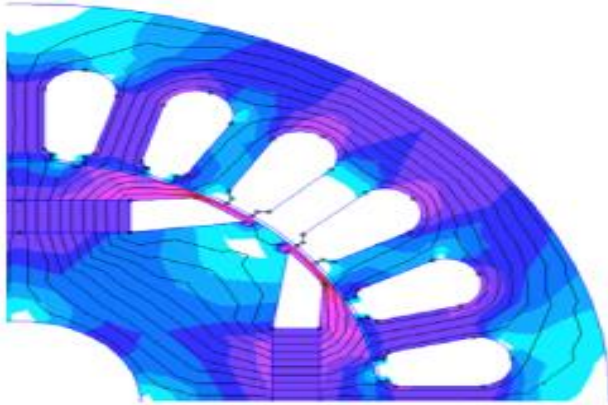


Fig.9 rotore a MPI

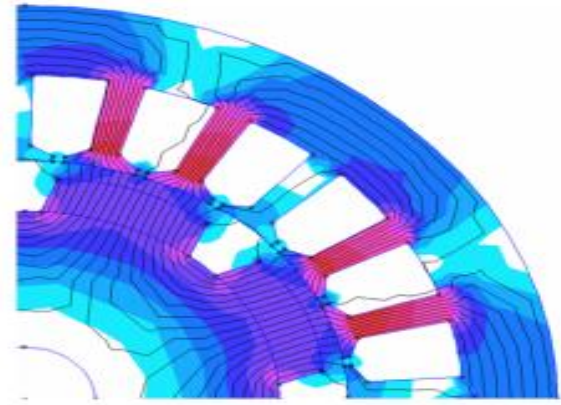


Fig.10 Rotore a MPS

Sviluppando la macchina in piano, si ottiene la distribuzione di campo al traferro generata da una fase di macchina come:

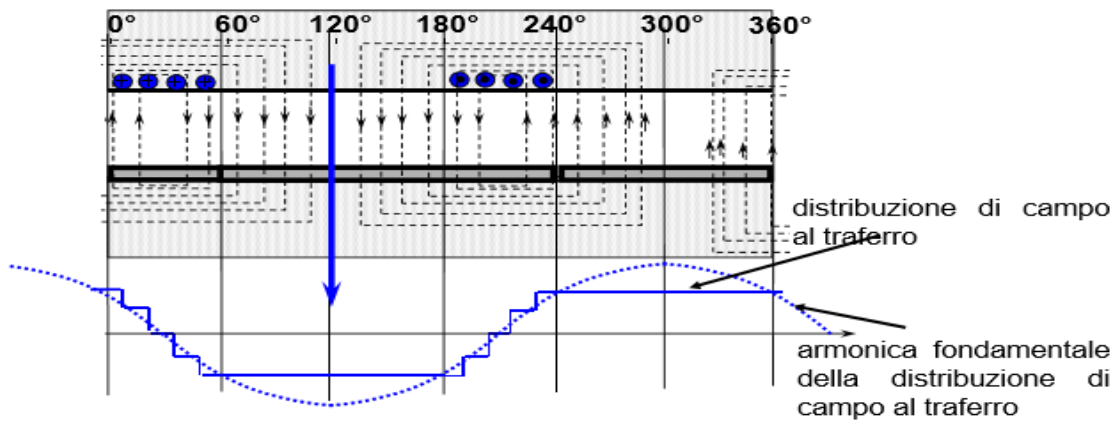


Fig.11 Distribuzione del campo al traferro

Si nota poi che al variare della pulsazione e quindi della frequenza, varia la posizione del rotore in macchina. Per una macchina con 2 poli, dopo un certo tempo pari ad un periodo T , il vettore ha compiuto un angolo giro pari a $\omega_c = \omega$

Mentre per una macchina con P coppie di poli, si ha $\omega_c = \frac{\omega}{P}$ ottenendo quindi

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

In cui : $\omega_c =$ è la velocità angolare di rotazione del campo rotante

$\omega =$ è la pulsazione elettrica

$n_c =$ numero di giri al minuto del campo rotante

$P =$ il numero di coppie di poli della macchina

Il campo magnetico prodotto dallo statore interagisce con il campo prodotto dal rotore generando una coppia elettromagnetica mentre le condizioni necessarie e sufficienti affinché si abbia un'interazione mediamente diversa da zero sono:

- I due campi devono avere lo stesso numero di coppie di poli;
- I due campi devono essere entrambi rotanti alla stessa velocità;
- I due campi devono essere sfasati.

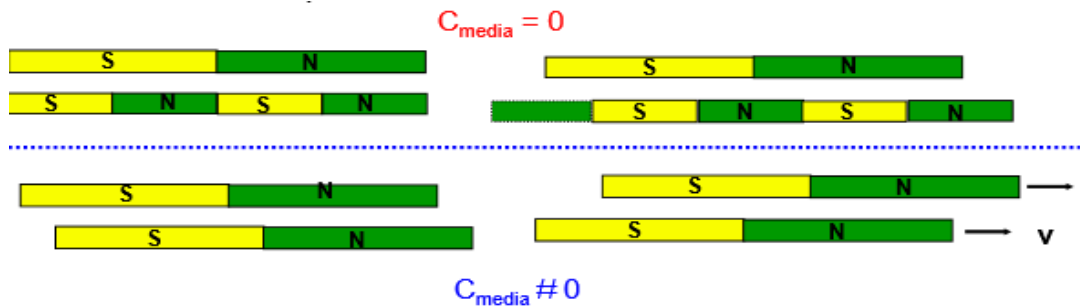


Fig.12 Disposizione dei magneti per la produzione di coppia media

I.3 CALCOLO DELLA COPPIA ELETTROMAGNETICA ED EQUAZIONI DEL MOTO DEL

Le equazioni delle macchine sincrone a rotore isotropo nella trattazione mediante l'approccio circuitale ottenute mediante la legge di LENZ nel funzionamento da generatore ci permette di ottenere:

$$-\frac{d\varphi_a}{dt} = R_a i_a + v_a$$

equazione di una fase di statore
(convenzione da generatore)

dove

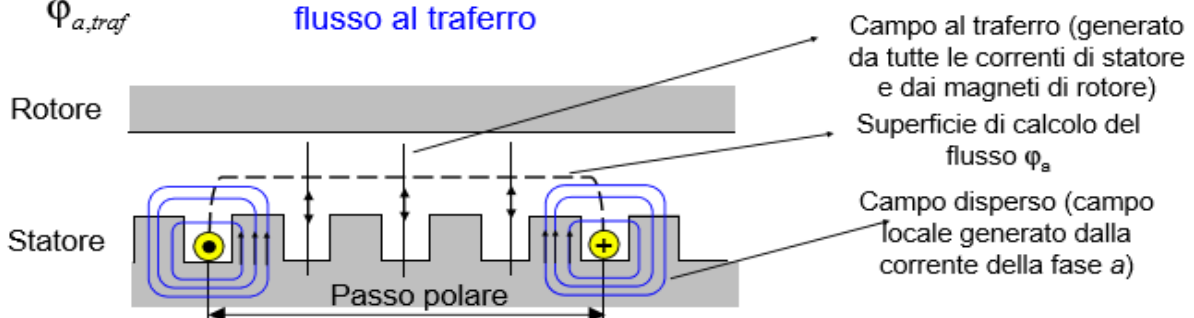
$$\varphi_a = \varphi_{a,disp} + \varphi_{a,traf}$$

$$\varphi_{a,disp} = l_s i_a$$

flusso disperso (l_s coefficiente di dispersione di statore)

$$\varphi_{a,traf}$$

flusso al traferro

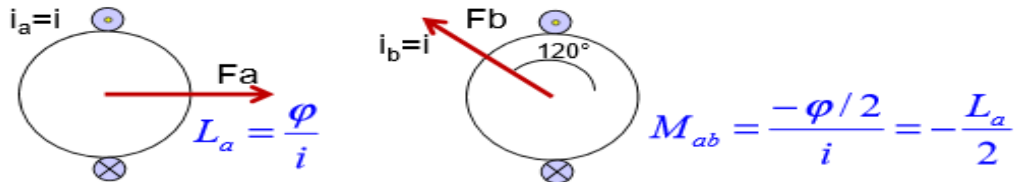


$$\varphi_{a,traf} = \varphi_{a,traf,stat} + \varphi_{a,traf,rot} = \varphi_{a,traf,reak} + \varphi_{a,ecc}$$

$$\varphi_{a,traf,reak} = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c = (L_a - M_{ab}) i_a = \frac{3}{2} L_a i_a = L_r i_a$$

Sono uguali tra loro per simmetria e pari a $-L_a/2$

induttanza di reazione



$$-\frac{d\varphi_{a,ecc}}{dt} - L_r \frac{di_a}{dt} = R_a i_a + l_d \frac{di_a}{dt} + v_a \quad \text{equazione di una fase di armatura}$$

regime sinusoidale



$$\bar{E}_0 - j\omega L_r \bar{I}_a = R_a \bar{I}_a + j\omega l_d \bar{I}_a + \bar{V}_a$$

$$\bar{E}_0 = R_a \bar{I}_a + j(X_d + X_r) \bar{I}_a + \bar{V}_a$$

$$\bar{E}_0 = R_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a + \bar{V}_a$$

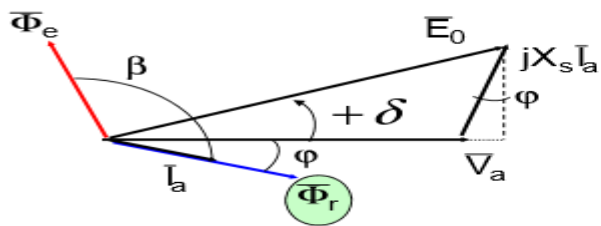
reattanza di reazione

reattanza sincrona

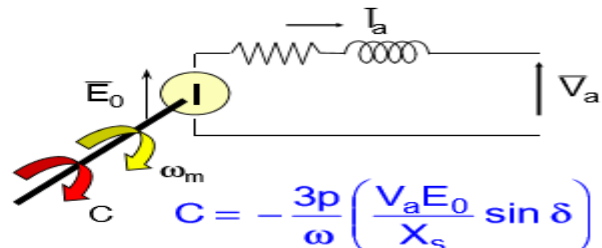
Macchine sincrone a rotore isotropo

~~$$\bar{E}_0 = R_a \bar{I}_a + jX_s \bar{I}_a + \bar{V}_a$$~~

equazione di una fase di armatura a regime (convenzione da generatore)



Il vettore flusso prodotto dalle correnti di armatura è in fase con la corrente \bar{I}_a



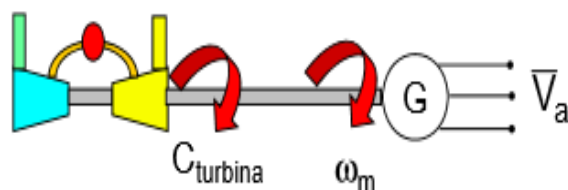
$\delta =$ angolo di calettamento

(positivo se la tensione è in ritardo sulla fem a vuoto)

$$C = -\frac{3p}{\omega} \left(\frac{V_a E_0}{X_s} \sin \delta \right)$$

l'accoppiamento turbina-alternatore per la determinazione della coppia elettromagnetica nel funzionamento da generatore può essere espresso come:

$$C = -\frac{3p}{\omega} \left(\frac{V_a E_0}{X_s} \sin \delta \right)$$



Si nota dall'altra parte che nel caso in cui la macchina è connessa ad una rete di potenza infinita cioè ($V, f = \text{costanti}$), aumentando la coppia motrice (C_m), aumenta la potenza meccanica e quindi aumenta anche la potenza convertita in elettrica (P_{el}) ed erogata in rete.

Con coppia nulla, e supponendo trascurabili le perdite, si ottiene un $\delta=0$ mentre la rappresentazione vettoriale diventa:

$$\vec{E}_0 = jX_s \vec{I}_a + \vec{V}_a$$

$$C = -\frac{3p}{\omega} \left(\frac{V_a E_0}{X_s} \sin \delta \right)$$

In queste condizioni la macchina si comporta come un compensatore di potenza reattiva.

Le macchine sincrone sono impiegate laddove vengano richieste:

- velocità di rotazione indipendenti dal carico;
- velocità di rotazione regolabili ed assolutamente proporzionali alla frequenza con esatto sincronismo per più motori appartenenti ad un unico azionamento.

Es:

- I) Nelle lavorazioni delle fibre sintetiche e naturali;
- II) Nelle macchine da stampa e nei laminatoi;
- III) Nell'industria del vetro e delle carte.

Le macchine sincrone, generatori o motori devono essere portate alla velocità di sincronismo stabilita dalla frequenza di rete ($n = 60 * f / p$) prima di essere collegate. Si distinguono pertanto tre principali metodi per l'avviamento del sincrone:

- **L'avviamento con motore di lancio:** si usa un motore asincrono di lancio montato di sbalzo sull'albero del gruppo avente una potenza dell'ordine di 1/10 di quella del sincronismo.

- **L'avviamento con eccitatrice:** facendo funzionare come motore la dinamo eccitatrice coassiale alimentata da una sorgente di corrente continua, si porta la macchina alla velocità del sincronismo.
- **L'avviamento del sincro come asincro:** esso sfrutta le correnti circolanti nella gabbia di Leblanc, la quale è una gabbia di scoiattolo identica a quella degli asincroni che porta la macchina ad una velocità molto prossima a quella del sincronismo.

E' lecito osservare che è possibile azionare un generatore sincro con due principali metodi:

- 1) L'azionamento con motore sincro controllato in tensione ed in frequenza chiamato **azionamento in catena aperta**, uno schema a blocchi può essere espresso come:

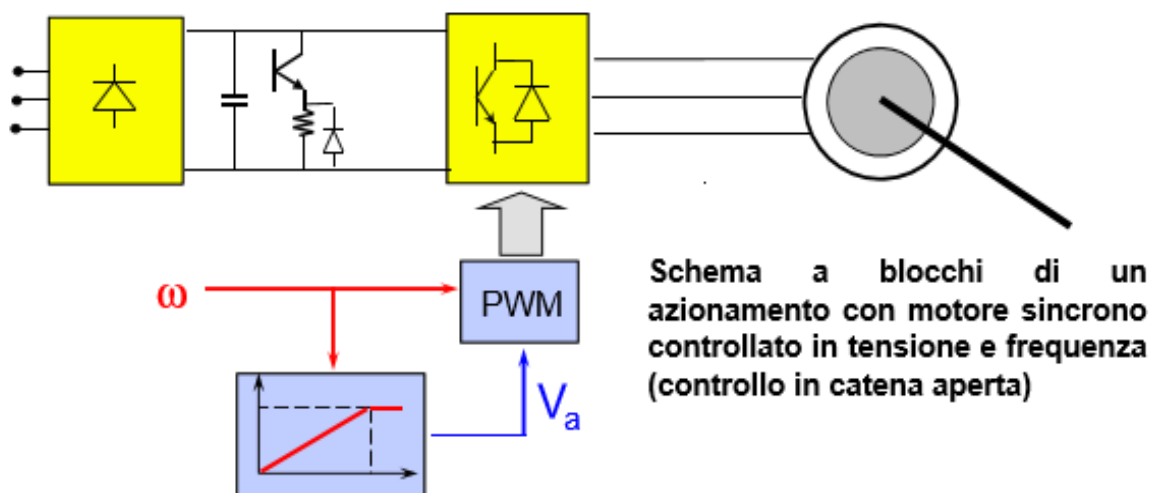


Fig.13 Schema a blocchi dell'azionamento in catena aperta del Brushless

Questo tipo di azionamento comprende le seguenti caratteristiche:

- ❖ Impiegano generatori sincroni alimentati con frequenza e tensione variabili;
- ❖ Alimentati tramite inverter consentono di lavorare a velocità prefissate e costanti nel tempo al variare della coppia di carico (C_R);
- ❖ Alimentati tramite inverter permettono di variare la velocità di funzionamento (w_m);

- ❖ Nei cambi di frequenza si perde momentaneamente il sincronismo, che viene ripreso se i cambi non sono troppo rapidi e l'inerzia del sistema non è troppo grande;
- ❖ Non è possibile controllare il valore della coppia;
- ❖ Ci vuole la gabbia per l'avviamento (avviamento del sincrono come asincrono) con collegamento a stella poiché serve il centro stella per il neutro.

Per queste problematiche, nelle applicazioni di automazione industriale, è necessario considerare il comportamento dei motori sincroni controllati in corrente.

- 2) L'azionamento di un sistema con motore sincrono e con controllo in corrente chiamato **Azionamento in catena chiusa** presenta come schema a blocchi la seguente rappresentazione:

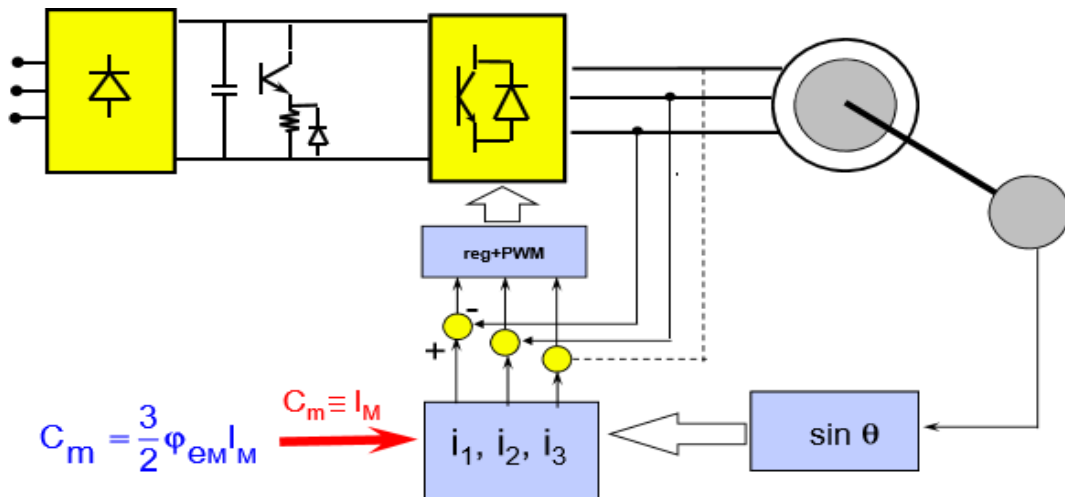


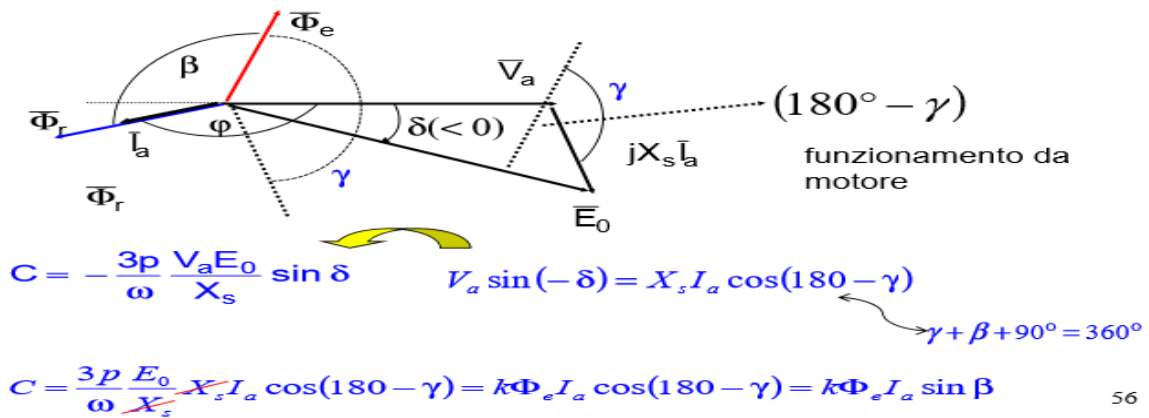
Fig.14 Schema a blocchi dell'azionamento in catena chiusa del Brushless

L'azionamento con controllo di corrente di armatura è quindi caratterizzato da:

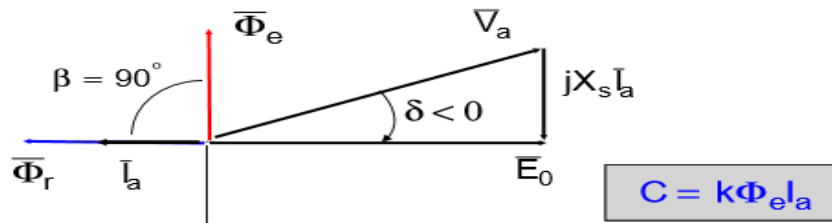
1. Un controllo diretto della coppia (C_m);
2. Una protezione degli interruttori statici presenti nel convertitore statico di alimentazione.

Riprendendo il calcolo dell'espressione della coppia, prendendo come parametro da controllare la corrente (I_a), è possibile ottenere il seguente risultato:

Motori sincroni isotropi controllati in corrente



$C = k \Phi_e I_a \sin \beta$
se si fissa $\beta = 90^\circ$ ➔ max Nm/A



Controllando la macchina in modo da avere $\beta = 90^\circ$, la coppia risulta essere direttamente proporzionale all'ampiezza della corrente di armatura e la coppia viene generata con il maggiore rapporto Nm/A (**Km** cioè la costante di macchina), questa condizione di funzionamento è quella che si realizza negli azionamenti che impiegano il Brushless a f.e.m sinusoidale. Per queste macchine, soprattutto nelle applicazioni di tipo assi cioè alle basse velocità, si utilizzano rotor isotropi con magneti permanenti superficiali e questi motori vengono chiamati **MOTORI COPPIE** ottenendo così delle prestazioni limiti a coppia costante fino alla velocità nominale con raffreddamento indipendente dalla velocità di rotazione come nelle macchine in correnti continue.

I.4 MODELLO DINAMICO DEGLI ALTERNATORI E RAPPRESENTAZIONE MEDIANTE CIRCUITI ACCOPPIATI MAGNETICAMENTE ED IN MOTO (STUDIO VETTORIALE)

I.4.1 TRASFORMAZIONE TRIFASE- BIFASE, ESPRESIONE E CIRCUITO ELETTRICO DEGLI AVVOLGIMENTO DI MACCHINA

E' possibile studiare la stessa macchina Sincrona in regine dinamico detto **studio vettoriale** o **studio dinamico del sincro**.

Questo studio viene reso possibile grazie alle trasformazioni di EDITH CLARKE e ROBERTO PARK.



Edith Clarke



Robert Park

Sono matrici che ci permettono di passare da un sistema di riferimento trifase equilibrati e simmetrici ad un sistema di riferimento bifase stazionario (**CLARKE**), e poi dal sistema stazionario ad un sistema sincrono detto rotante (**PARK**) e vengono applicate a tutte le macchine elettriche rotanti.

Le matrici di trasformazioni e gli schemi a blocchi per i diversi passaggi sono così rappresentati:

$$\begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = |D| \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$$

Trasformazione di Clarke

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix}$$

Trasformazione di Park

Trasformazioni da un sistema trifase ad uno bifase stazionario

$$\begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix} = |D| \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = |D^{-1}| \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix}$$

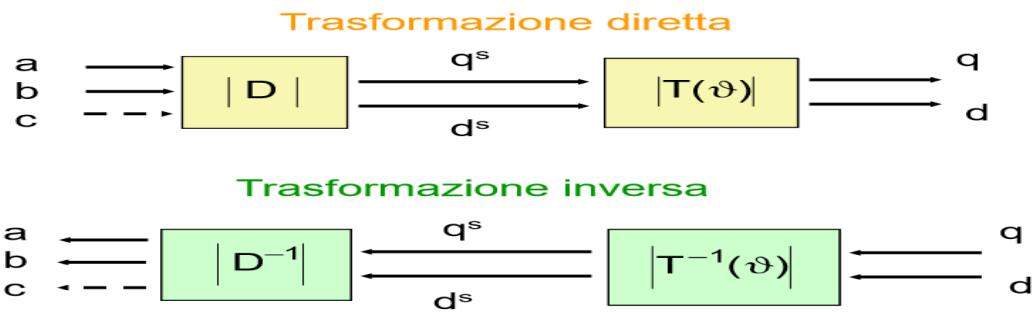
Trasformazioni da un sistema bifase stazionario ad uno bifase rotante

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = |T(\vartheta)| \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix} = |T^{-1}(\vartheta)| \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Trasformazioni da un sistema trifase ad uno bifase rotante



Nella trattazione dei Brushless sinusoidali a rotore isotropo, è opportuno nello scopo di semplificare la scrittura delle equazioni del sistema, soddisfare i seguenti requisiti:

- scegliere un sistema di riferimento rotante alla stessa velocità del rotore;
- scegliere l'asse "d" orientato secondo la direzione del flusso di eccitazione.

Per scrivere le equazioni di macchina rispetto agli assi q-d, prendiamo le equazioni degli avvolgimenti reali ed applichiamo le trasformazioni con le matrici **D** e **T(θ)**.

È sufficiente considerare le equazioni delle fasi (a) e (b), in quanto l'equazione per la fase (c) risulta una combinazione lineare delle altre due:

$$V_a = r_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt}$$

$$V_b = r_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt}$$

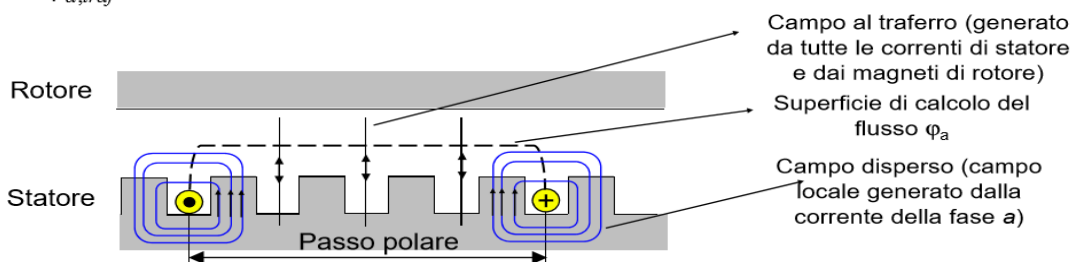
Per esprimere i flussi in funzione delle correnti, è possibile considerare la fase "a" per cui:

$$\varphi_a = \varphi_{a,disp} + \varphi_{a,traf}$$

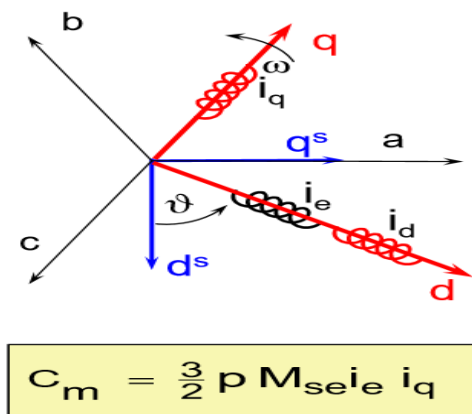
dove

$\varphi_{a,disp} = l_s i_a$ flusso disperso (l_s coefficiente di dispersione di statore)

$\varphi_{a,traf}$ flusso al traferro



A questo punto, le equazioni di macchina possono essere riassunti come:



$$\begin{cases} v_q = r_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega\varphi_d \\ v_d = r_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega\varphi_q \\ v_e = r_e i_e + \frac{d\varphi_e}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_q = L_s i_q \\ \varphi_d = L_s i_d + M_{se} i_e \\ \varphi_e = L_e i_e + \frac{3}{2} M_{se} i_d \end{cases}$$

Espressione della coppia elettromagnetica

$$P_e = \frac{dW_{em}}{dt} + P_{joule} + P_{mecc} \quad \text{bilancio energetico}$$

$$P_e = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d) \quad \text{potenza assorbita dai morsetti}$$

$$\frac{3}{2} \left[\frac{d\varphi_q}{dt} i_q + \frac{d\varphi_d}{dt} i_d \right] \quad \text{variazioni di energia magnetica}$$

$$\frac{3}{2} [r_s i_q^2 + r_s i_d^2] \quad \text{potenza dissipata per effetto Joule}$$

$$\frac{3}{2} (\omega\varphi_d i_q - \omega\varphi_q i_d) = C_m \omega_m \quad \text{potenza convertita in meccanica}$$

I.4.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E SCHEMA A BLOCCHI DEL BRUSCHLESS IN CONDIZIONE DI ORIENTAMENTO DI CAMPO

Il principio di funzionamento di un Generatore Brushless è quello di iniettare nelle tre fasi, le correnti, tali da generare un campo magnetico che ruota in sincronismo con il rotore. Per ottenere questo in funzionamento di regime, occorre alimentare la macchina con un sistema trifase equilibrato di correnti ad una pulsazione legata alla velocità angolare di rotazione. Mentre nel caso in cui si utilizza un avvolgimento bifase equivalente, che ruota in sincronismo con il rotore, per ottenere lo stesso campo rotante, occorre alimentare i due avvolgimenti con correnti costanti.

Alcune considerazioni possono essere fatte per quanto riguardano le espressioni di macchina quali:

- La coppia dipende in modo diretto dal valore istantaneo di i_q e non dipende della i_d ;
- La corrente I_d non influenza il valore di coppia, ma il valore del flusso ϕ_d e quindi la f.e.m dinamica sull'asse q;
- Per una certa velocità, più alto è ϕ_d , più alta sarà la tensione necessaria per sostenere la corrente i_q ;
- Le correnti i_d negative, riducono il valore del flusso di asse d quindi potrebbero essere usate per aumentare la velocità di funzionamento della macchina (w_m);
- Per ottenere un certo valore di coppia nelle condizioni di massimo rapporto Nm/A, si dovrà alimentare la macchina con $i_d=0$. Alimentando la macchina con $i_d=0$, il flusso di eccitazione ϕ_e e di armatura ϕ_q sono in quadratura fra loro come nella macchina in corrente continua: si parla di **controllo in orientamento di campo**.

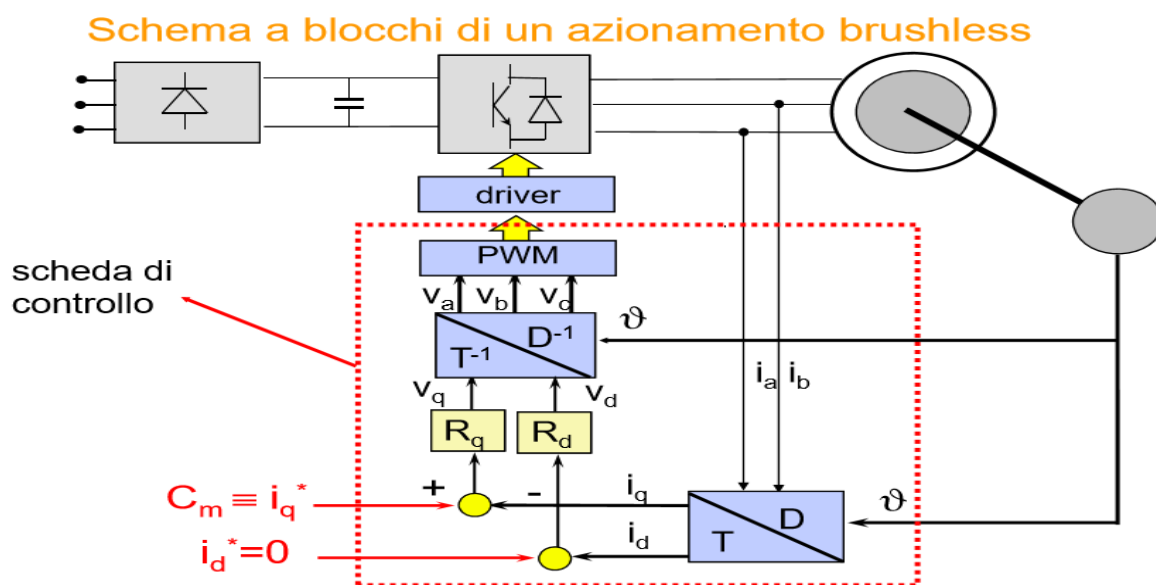
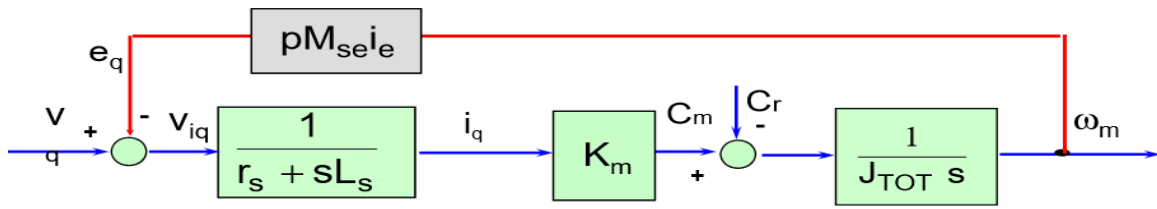


Fig.15 Schema a blocchi del controllo in orientamento di campo del Brushless

I.4.3 SCHEMA DI UN AZIONAMENTO BRUSHLESS CON CONTROLLO IN TENSIONE ED IN CORRENTE

Gli schemi a blocchi di un azionamento Brushless con controllo in tensione e in condizione di orientamento di campo (condizione in cui si ottiene il massimo rapporto coppia corrente detta costante di macchina K_m) può essere ridotto come:



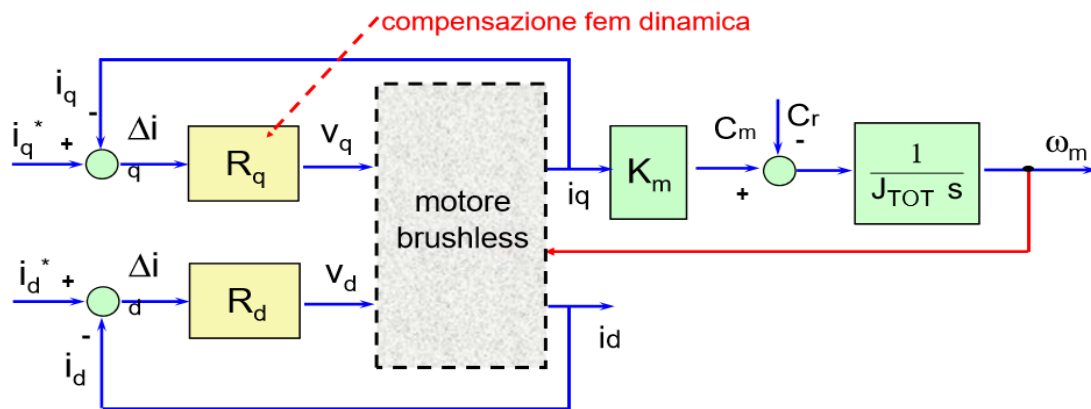
- Con $i_d=0$, il modello relativo all'asse q (asse per il controllo di coppia) è uguale a quello della macchina in corrente continua

$$v_q = r_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega M_{se} i_e$$

$$v_d = -\omega L_s i_q$$

$$v_a = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K \varphi_e \omega_m$$

Mentre gli schemi a blocchi di un azionamento Brushless con controllo in tensione ed in orientamento di campo può essere ridotto come:



Il principale problema dell'azionamento del Brushless con controllo in corrente è la saturazione dei regolatori dato che le variabili V_q e V_d non possono assumere valori qualunque, perché la tensione applicabile al motore è limitata da quella disponibile sul bus DC ($V_{dc_{BUS}}=700$ v).

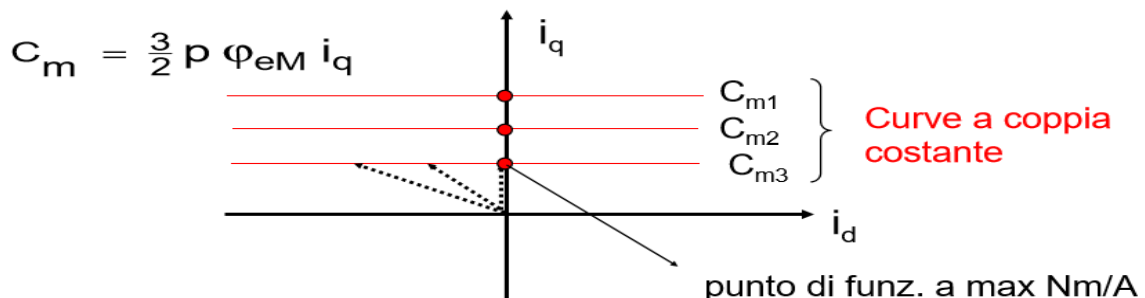
Prestazioni limite di un brushless

$$I_{aM} = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} < I_0$$

Limite in corrente della fase a stabilito dalla massima corrente dell'inverter

$$V_{aM} = \sqrt{v_q^2 + v_d^2} < V_0$$

Limite in tensione sulla fase a stabilito dalla tensione sul bus DC dell'inverter



I.5 I VANTAGGI E GLI SVANTAGGI DEL GENERATORE BRUSHLESS

I.5.1 I VANTAGGI

- 1) Presenta elevate accelerazioni dovute alle elevate velocità di rotazioni, e quindi presentano un basso momento di inerzia totale (J_{tot});
- 2) Presentano un elevato rapporto coppia – corrente (Nm/A) cioè un'elevata costante di macchina (K_m);
- 3) Presentano un 'elevato rapporto coppia – massa (Nm/Kg) ed anche un elevato rapporto potenza-peso (kW/kg);
- 4) Presentano una buona capacità di sovraccarico;
- 5) Presentano una bassa induttanza sincrona e quindi una buona dinamica;
- 6) Assenza di spazzole quindi sono ridotte le manutenzioni svolte su di esso;
- 7) Alta affidabilità dovuta al controllo di velocità del motore in modalità sensorless;
- 8) Facilità di controllo sia in catena aperta che in catena chiusa;
- 9) Controllo robusto;
- 10) Il calore si dissipa solo sullo statore in quanto il rotore è costituito da magneti permanenti;
- 11) Riduzione di peso ed ingombri con dimensioni inferiori fino al 50%, rispetto ai tradizionali motori asincroni a parità di prestazioni;
- 12) Presentano un buon funzionamento quando sono collegati in rete per cui vengono chiamati **dei veri generatori**;
- 13) Presentano una classe di efficienza alta grazie all'utilizzo dei magneti permanenti.

I.5.2 GLI SVANTAGGI

1. Subiscono il rischio del loro costo futuro, strettamente legato al mercato delle terre rare, indispensabile per la costruzione dei magneti permanenti usati nei circuiti magnetici tali: le ferriti, SmCo, AlNiCo, NdFeB;

Motore MP	Pn	Cno	Cn	Io	In	n	Prezzo
caso 1	25 kW	115 Nm	90 Nm	50,9 A	47 A	2000 (rpm)	2.250 €
caso 2	26 kW	120 Nm	100 Nm	55 A	43 A	2000 (rpm)	2.010 €

2. Presentano l'effetto di smagnetizzazione alle alte temperature o in condizione di sovraccarico;

3. Si nota la presenza di polveri ferromagnetiche che causano un pericolo inquinante quando devono essere smaltiti;

4. La velocità massima del Brushless è limitata dalla tensione;

5. Presentano un'ampia zona di deflussaggio usando magneti permanenti superficiali dipendente dalla progettazione della macchina e questo ci permette di raggiungere dei picchi di velocità della macchina.

CAPITOLO II: MACCHINE ASINCRONE NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORI

II.1 DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA ASINCRONO NEL FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

Le prime macchine asincrone dette anche macchine ad induzione furono realizzate per la prima volta da **GALILEO FERRARIS** e **NIKOLA TESLA**:



Galileo Ferraris



Nikola Tesla

Grazie alle caratteristiche come l'affidabilità, la semplicità, l'elevato rendimento e il basso costo di investimento, la macchina asincrona rappresenta il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come “forza motrice”. Nella macchina asincrona la velocità di rotazione non risulta univocamente legata alla frequenza, ma dipende dal carico meccanico applicato; da questa particolarità ne deriva il suo nome. Come tutte le macchine elettriche il suo funzionamento è reversibile (può funzionare sia da generatore che da motore), con opportune condizioni di lavoro. In passato, a causa di alcune limitazioni, l'uso della macchina asincrona per la produzione di energia elettrica non era frequente. Mentre oggi, grazie allo sviluppo dell'elettronica di potenza è stato possibile risolvere alcuni aspetti problematici aumentandone l'efficienza. Per comprendere meglio com'è strutturata una macchina asincrona trifase, di seguito viene fornita una breve descrizione delle principali parti che la compongono e nelle quali si generano i fenomeni elettromagnetici da cui scaturisce il funzionamento.

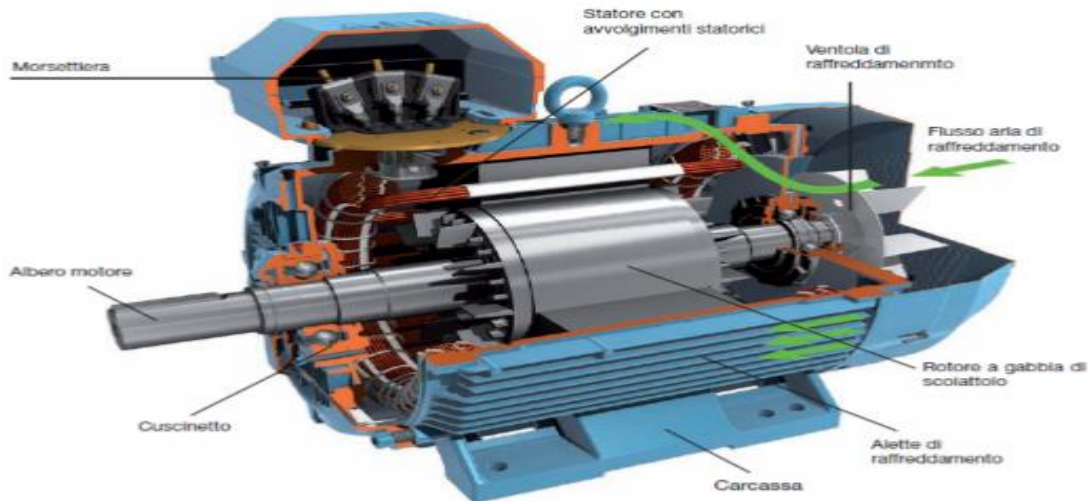


Fig.16 Rappresentazione di un motore Asincrono trifase

II.2 I PRINCIPALI ELEMENTI COSTITUENTE LA MACCHINA ASINCRONA (ROTORE E STATORE) E IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO (A VUOTO ED A CARICO)

La macchina asincrona è costituita da una parte fissa detto **statore** ed una parte mobile detto **rotore**.

Lo statore viene definito come l'insieme delle parti fissi della macchina asincrona ed ha funzione di sostegno parziale. Esso è collegato a stella e costituisce la parte di macchina in cui avviene l'alimentazione.

Il rotore invece, viene posizionato all'interno dello statore e costituisce il circuito di indotto. Esso è costituito da tre avvolgimenti, collegati a stella e cortocircuitati per questo, le correnti rotoriche sono sostenute da f.e.m indotte dal campo statorico.

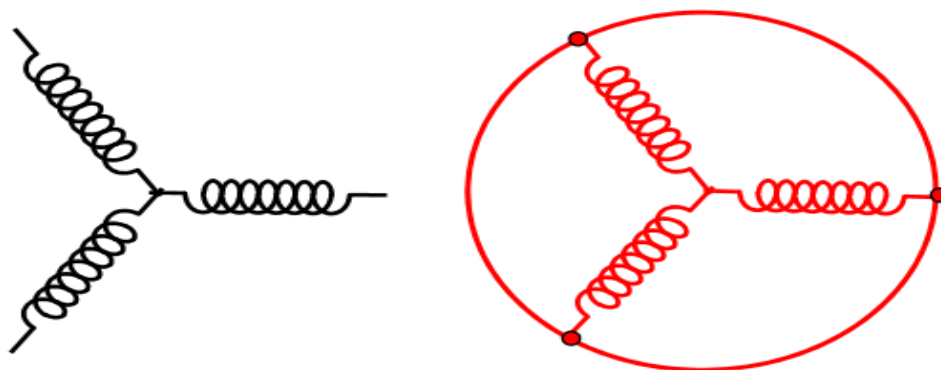
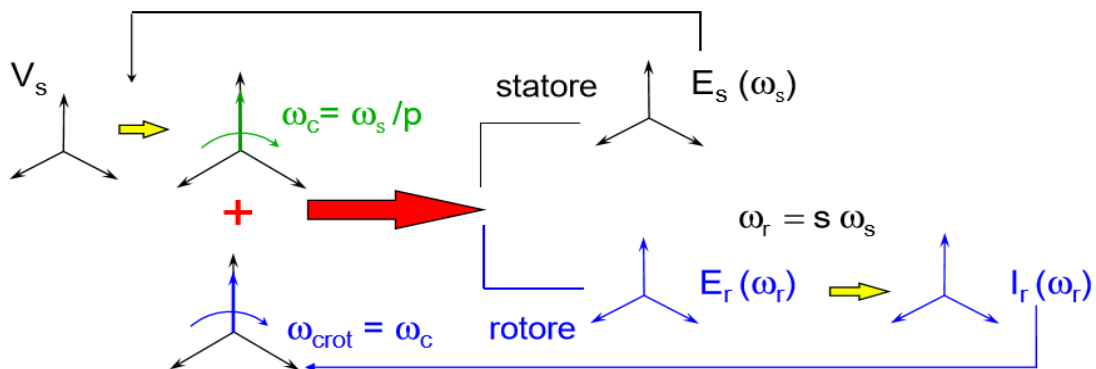


Fig.17 Avvolgimenti statorici e rotorici della macchina Asincrona

- **Nel funzionamento dell'asincrono a vuoto**, la macchina assorbe una corrente magnetizzante per generare il campo magnetico rotante di statore, mentre l'ampiezza del flusso concatenato con gli avvolgimenti statorici è imposta dalla tensione di alimentazione.
- **Nel funzionamento a carico invece**, il campo di rotore tende a ridurre il campo di statore ma essendo il flusso statorico imposto dalla tensione di alimentazione, la macchina assorbirà oltre la corrente magnetizzante ma anche la corrente di rotore riferito allo statore.

Il funzionamento a carico dell'asincrono può essere rappresentato come:



II.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DI UNA FASE ED EQUAZIONE DI MACCHINA A REGIME PER IL CALCOLO DELLA POTENZA, COPPIA ELETTROMAGNETICA, E CARATTERISTICA MECCANICA DEL MOTORE ASINCRONO

Nel funzionamento a regime delle macchine asincrone, è possibile rappresentare le seguenti equazioni di statore e di rotore con il corrispondente circuito equivalente di una fase:

$$\mathbf{V}_s = (R_s + j\omega_s l_{sd}) \mathbf{I}_s + j\omega_s K_{as} N_s \Phi$$

$$R'_r = \left(\frac{K_{as} N_s}{K_{ar} N_r} \right)^2 R_r$$

$$0 = - \left(R'_r + R'_r \frac{1-s}{s} + j\omega_s l'_{rd} \right) \mathbf{I}'_r + j\omega_s K_{as} N_s \Phi$$

$$I'_r = - \frac{K_{ar} N_r}{K_{as} N_s} I_r$$

$$j\omega_s K_{as} N_s \Phi = j\omega_s L_\mu I_\mu$$

$$P_m = 3 R_r' \frac{1-s}{s} (i_r')^2 = C_m \omega_m$$

$$\omega_m = \omega_c (1-s)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_s}{p} (1-s)$$

(p coppie di poli)

$$C_m = \frac{3 p R_r'}{\omega_s s} (i_r')^2$$

$$C_m = \frac{3 p R_r'}{\omega_s s} \frac{E_s^2}{(R_r'/s)^2 + X_{rd}'^2} = \frac{3 p R_r'}{\omega_s} \frac{s E_s^2}{R_r'^2 + s^2 X_{rd}'^2}$$

Definiamo quindi le principali grandezze caratterizzando la macchina asincrona:

- V_s**: la tensione dell'avvolgimento statorico della fase "a";
- R_s, R_r**: la resistenza statorica e rotorica;
- ω_s**: la pulsazione statorica;
- l_{sd} l_{rd}**: l'induttanza statorica e rotorica di dispersione;
- I_s I_r**: la corrente statorica e rotorica;
- K_{as}, K_{ar}**: il fattore statorica e rotorico di avvolgimento della fase "a";
- Φ**: il flusso per polo;
- N_s, N_r**: il numero di spire statorico e rotorico;
- S**: lo scorrimento. Quest'ultimo può essere definito in diversi modi: ($S = n_0 - n / n_0$; $S = W_r / W_s = f_r / f_s$; $S = W_c - W_m / W_c = 1 - W_m / W_c$)
- P_m**: la potenza meccanica erogata dal motore asincrono;
- C_m**: la coppia meccanica del motore;
- W_m, W_s**: la pulsazione meccanica e quella elettrica con ($W_s > W_m$)
- P**: numero di coppie di poli.

I risultati sopra ottenuti, sono stati riferiti alle ipotesi di tensione stellata costante e velocità di rotazione dello statore costanti per cui è possibile determinare i seguenti andamenti di macchina: (C_m-S) e (C_m- W_m).

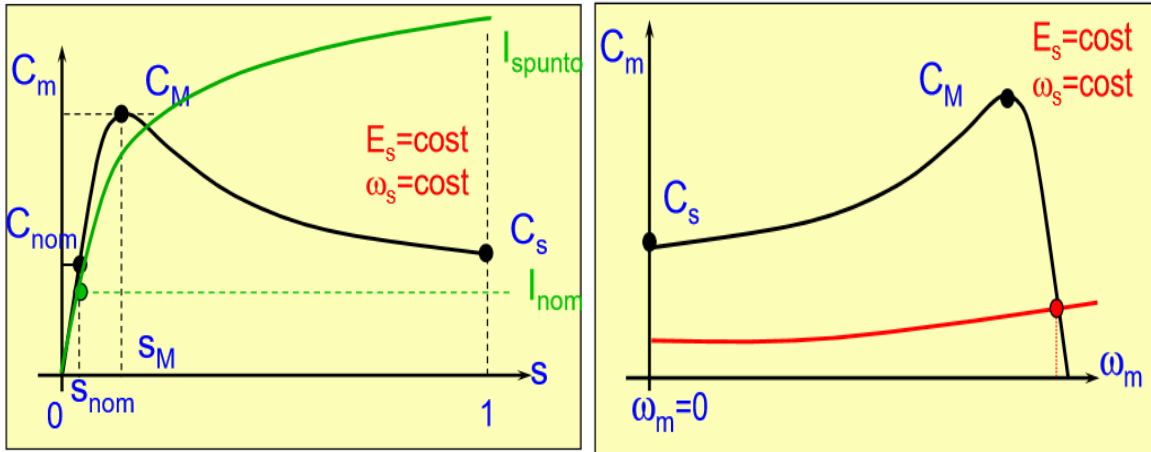
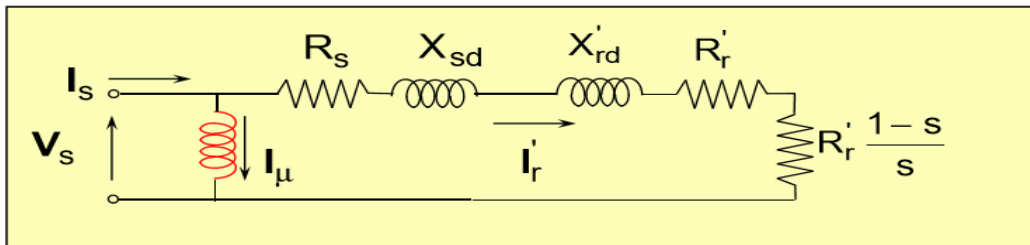


Fig.18 Andamento coppia _ scorrimento Fig.19 Andamento coppia-velocità

Quindi:

- ❖ per $\mathbf{Wc} = \mathbf{Wm}$, si ottiene uno scorrimento nullo ($S=0$) e si dice che il rotore ruota a velocità di sincronismo;
- ❖ Per $\mathbf{Wm} = 0$, lo scorrimento è unitario ($S=1$) e si dice che il rotore è fermo.

Per semplificare il legame tra la corrente rotorica riferita allo statore e la tensione concatenata di alimentazione (I_r' e V_s), si utilizza un circuito equivalente semplificato che trascura la caduta sui parametri primari della corrente a vuoto espresso come:



La caratteristica meccanica dell'asincrono nel funzionamento da motore vale:

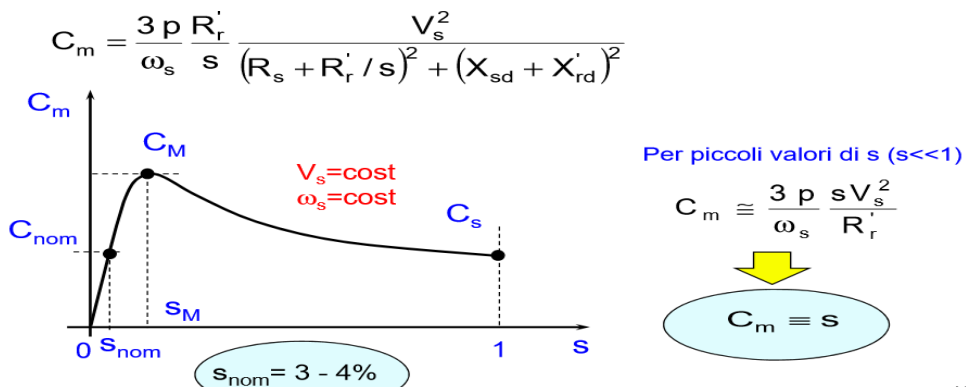


Fig.20 Caratteristica meccanica con tensione e frequenza costanti

Il valore della coppia di spunto e della coppia massima dipendono dai valori dei parametri statorici e rotorici e quindi dalla geometria delle cave di statore e rotore.

A questo punto, è possibile confrontare le caratteristiche (C_M , S_M , C_{nom} , C_S) della macchina asincrona con le ipotesi di (E_s , $W_s = \text{costanti}$ e V_s , $W_s = \text{costanti}$) ottenendo le equazioni e gli andamenti seguenti:

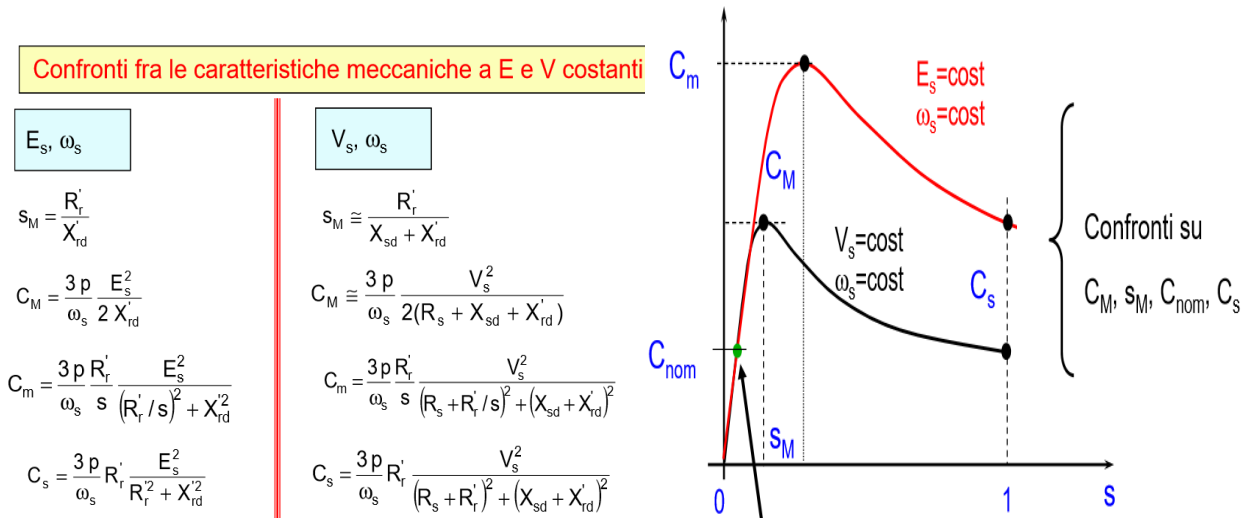


Fig.21 Caratteristica meccanica per le diverse configurazioni dell'asincrono

La macchina asincrona nell'ipotesi di tensione e frequenza costante può funzionare da motore e da generatore in funzione dello scorrimento. Per questo, la caratteristica meccanica dell'asincrono è quindi identificata facendo uno studio delle potenze meccanica ed elettrica come riportata di seguito:

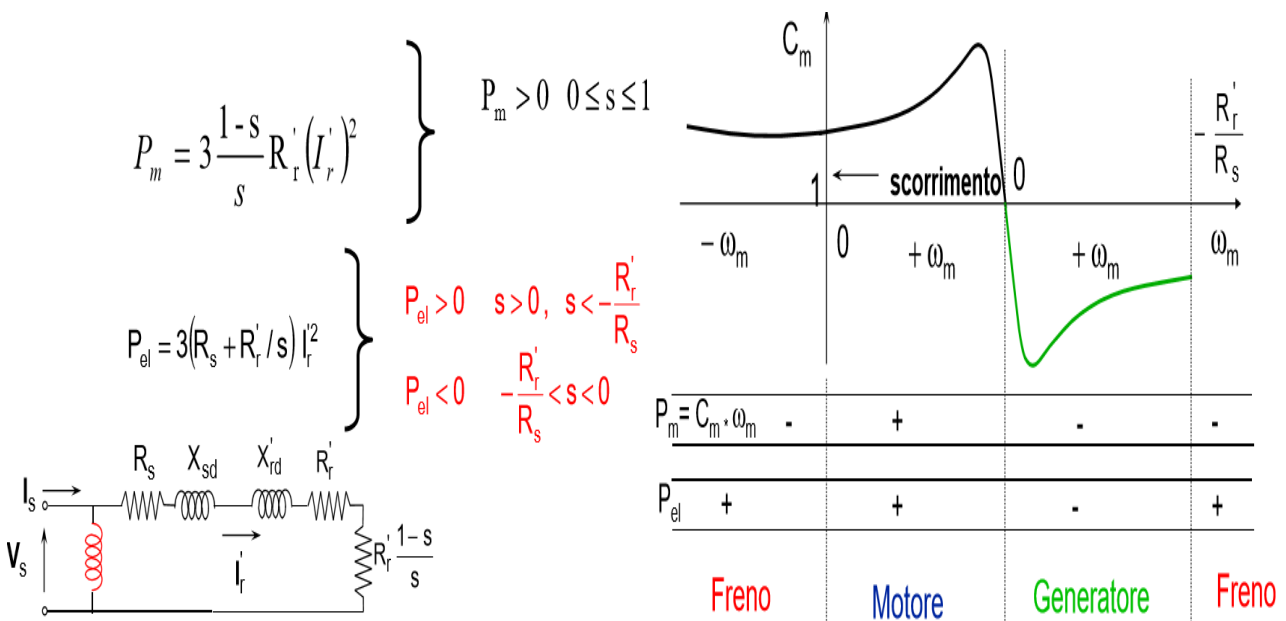


Fig.22 Zone di funzionamento della macchina Asincrona

Dall'andamento ($C_m - W_m$), con V_s e $W_s = \text{costanti}$, la caratteristica della macchina asincrono che ci interessa è quella lineare corrispondente alla regione in cui la coppia è proporzionale alla corrente.

L'avviamento della macchina asincrono presenta due principali problemi:

- Le alte correnti di spunta ($I_{\text{spunta}} = 3 \div 6 I_{\text{non}}$);
- La bassa coppia di spunta ($C_s = 1 \div 1,5 C_{\text{non}}$).

Si distinguono 3 metodi tradizionali per rimediare a queste problematiche quali:

1. **L'avviamento stella – triangolo:** in esso la corrente di linea si riduce di circa 3 volte di quella nominale e di conseguenza anche la coppia di spunta grazie al collegamento delle fasi della macchina a triangolo;
2. **L'avviamento con variazione della resistenza rotorica:** questo metodo viene reso possibile tramite un CHOPPER DC_DC;
3. **L'avviamento con commutazione del numero di coppie di poli:** in esso, all'aumentare del numero di coppie di poli (P), diminuisce la velocità mantenendo costante la coppia massima.

Per quanto riguarda le frenature del motore asincrono, si distinguono tre principali metodi tradizionali per realizzarle:

- **La frenatura in controcorrente:** in esso, si inverte il senso di rotazione del campo rotante ottenendo uno scorrimento circa pari a 2;
- **La frenatura con commutazione del numero di coppie di poli:** in esso, all'aumentare del numero di poli, diminuisce la velocità, quindi aumenta la coppia meccanica mantenendo costante la coppia massima;
- **La frenatura con iniezione di corrente continua:** questa tecnica viene realizzata mediante una terna di avvolgimenti collegati sia a stella che a triangolo in presenza di un raddrizzatore a diodi.

II.4 STUDIO DINAMICO O ANALISI VETTORIALE DEL MOTORE ASINCRONO

Come si è visto nello studio vettoriale delle macchine Brushless, anche nelle macchine asincrone la distribuzione del campo generata dall'avvolgimento trifase si

può anche ottenere con avvolgimento bifase equivalente usando le matrici di trasformazione di **CLARKE** e **PARK** come segue:

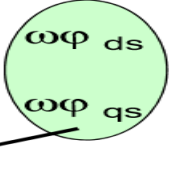
$\begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = T(\vartheta) \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} = T^{-1}(\vartheta) \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$

MATRICE DI CLARKE

MATRICE DI PARK

Per scrivere le equazioni degli avvolgimenti statorici rispetto agli assi q-d si usano le equazioni reali e si applicano le matrici D e T(θ)ottenendo:

$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt}$	$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega\varphi_{ds}$
$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt}$	$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega\varphi_{qs}$

fem dinamiche 

Per le macchine asincrone, oltre alle equazioni degli avvolgimenti statorici, esistono anche quelle rotorici le cui trasformazioni sono espresse sfruttando le matrici:

$\begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = T(\vartheta - \vartheta_{me}) \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} i_{qr}^r \\ i_{dr}^r \end{bmatrix} = T^{-1}(\vartheta - \vartheta_{me}) \begin{bmatrix} i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$

Le equazioni diventano:

$v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt}$	$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_{me})\varphi_{dr}$
$v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt}$	$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_{me})\varphi_{qr}$

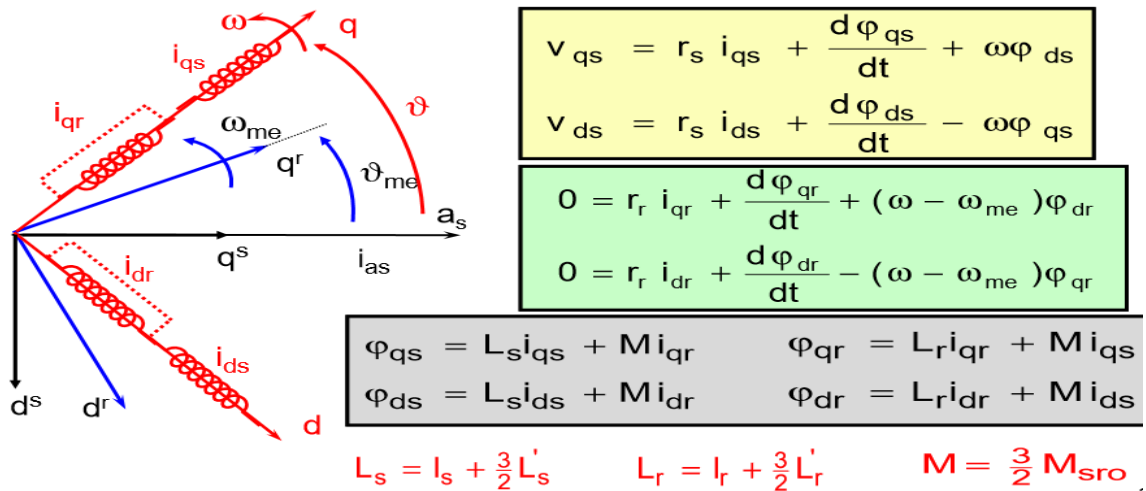
Le condizioni necessari per la descrizione a modello dell'asincrono sono:

- Ci vogliono tre circuiti di statore alimentati e tre circuiti di rotore cortocircuitati;
- I due sistemi trifasi sono stati trasformati nei rispettivi sistemi bifasi

equivalenti solidali con gli avvolgimenti reali, utilizzando le formule delle trasformazioni di coordinate (D);

- Occorre trasformare i due sistemi bifasi in un unico sistema bifase (q-d), rotante ad una generica velocità angolare ω , utilizzando le formule di trasformazione (T).

Riepilogando le equazioni a modelli, si ottiene:



In cui: ω_{me} : è a velocità di rotazione del rotore in radianti elettrici.

Sfruttando quindi il bilancio energetico, è possibile determinare l'espressione della coppia elettromagnetica dell'asincrono come:

$$P_{ass} = \frac{dW_{mag}}{dt} + P_{joule} + P_{mecc} \quad \text{bilancio energetico}$$

$$P_{ass} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds}) \quad \text{potenza assorbita dai morsetti nel tempo dt}$$

$$\frac{3}{2} \left[\frac{d\phi_{qs}}{dt} i_{qs} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} i_{qr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} i_{dr} \right] \quad \text{variazione di energia magnetica per unità di tempo}$$

$$\frac{3}{2} [r_s i_{qs}^2 + r_s i_{ds}^2 + r_r i_{qr}^2 + r_r i_{dr}^2] \quad \text{potenza dissipata per effetto Joule nel tempo dt}$$

$$\frac{3}{2} [\omega\phi_{ds} i_{qs} - \omega\phi_{qs} i_{ds} + (\omega - \omega_{me})\phi_{dr} i_{qr} - (\omega - \omega_{me})\phi_{qr} i_{dr}] = C_m \omega_m$$

potenza convertita in meccanica

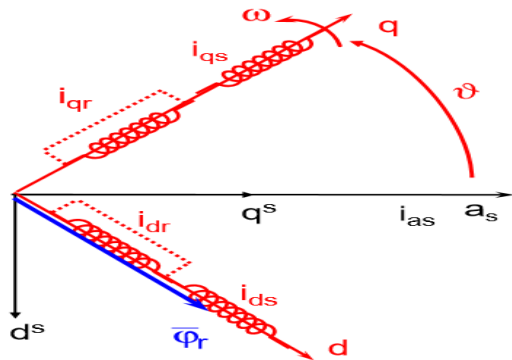
Per cui la coppia risulta:

$$C_m = \frac{3}{2} p M (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

$$C_m = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} [i_{qs} \phi_{dr} - i_{ds} \phi_{qr}]$$

Nel controllo ad orientamento di campo, generalmente si impiega una alimentazione in corrente per cui le equazioni statoriche non sono strettamente necessarie. Questa tecnica di controllo viene definita attraverso le equazioni rotoriche scritte in un particolare sistema di riferimento:

- ✓ rotante alla stessa velocità del flusso rotorico;
- ✓ Orientato con l'asse "d" nella direzione del flusso rotorico.



$$\begin{aligned} \phi_{qr} &= 0 & \phi_{dr} &= |\phi_r| \\ 0 &= r_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_{me}) \phi_{dr} \\ 0 &= r_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_{me}) \phi_{qr} \\ \phi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \phi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ C_m &= \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} [i_{qs} \phi_{dr} - i_{ds} \phi_{qr}] \end{aligned}$$

Per cui si può ottenere il seguente risultato:

$$C_m = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} [i_{qs} \phi_{dr}]$$

In questo particolare sistema di riferimento, la coppia risulta proporzionale al prodotto di un flusso e di una corrente. Per verificare le possibilità di un controllo diretto ed istantaneo della coppia, occorre verificare se I_{qs} e ϕ_{dr} sono variabili indipendenti.

Svolgendo i calcoli, si ottiene che ϕ_{dr} dipende unicamente da i_{ds} e non da i_{qs} allora si deduce che I_{qs} e ϕ_{dr} sono indipendenti fra di loro.

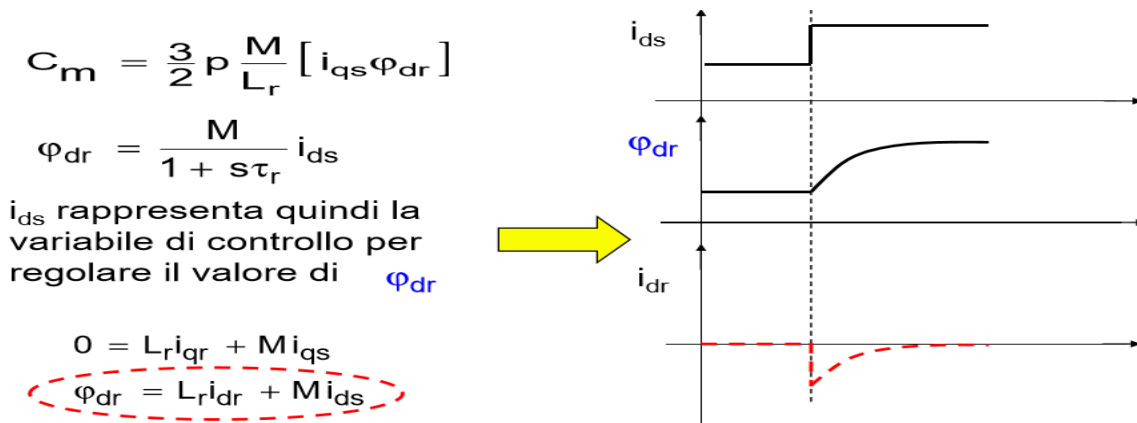
$\phi_{dr} = \frac{M}{1 + s\tau_r} i_{ds}$	→	ϕ_{dr} dipende solo da i_{ds} $i_{ds} \equiv$ comando di flusso
$C_m = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} [i_{qs} \phi_{dr}]$	→	con $\phi_{dr} = \text{cost}$ $i_{qs} \equiv$ comando di coppia

Quindi: i_{qs} rappresenta la variabile di controllo per regolare il valore di coppia

i_{ds} rappresenta la variabile di controllo per regolare il flusso ϕ_{dr}

τ_r rappresenta la costante di tempo rotorica

l'andamento del flusso al variare della corrente può essere formulato come:



A questo punto possono essere fatte alcune osservazioni quali:

- A i_{ds} costante, i_{qs} risulta il comando di coppia, mentre controllando i_{qs} si ottiene un controllo diretto ed istantaneo di coppia;
- Le variazioni di i_{qs} porta a variazioni istantanee di i_{ds} e quindi a variazioni di velocità ($W - W_{me}$);
- È anche possibile controllare la coppia agendo sulla corrente i_{ds} , ma la risposta in coppia risulta ritardata dal transistore del flusso φ_{dr} ;
- Nel controllo in orientamento di campo, la condizione di quadratura esiste tra il flusso rotorico ed il flusso generato dalla corrente i_{qs} . Mentre con la macchina asincrona, non si può lavorare con i_{ds} nullo, sarebbe nullo il flusso φ_{dr} e quindi anche la coppia C_m .

Lo schema a blocchi generale del controllo della coppia in orientamento del campo è espresso come:

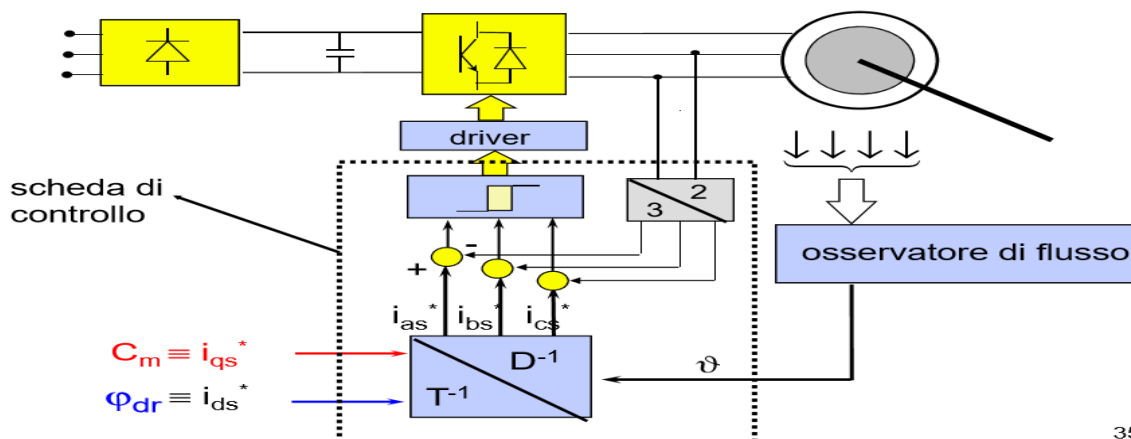


Fig.23 Schema a blocchi dell'azionamento della macchina asincrona in orientamento di campo

Per implementare il blocco osservatore di flusso, occorre stimare il flusso rotorico e cioè l'angolo Θ . L'implementazione del controllo ad orientamento di campo è basato sulla determinazione dell'angolo Θ che individua la posizione angolare del flusso rotorico.

Per determinare Θ , si possono usare 2 metodi:

- ❖ **Il metodo diretto:** in esso si calcola Θ misurando le grandezze elettriche e magnetiche (I_s , V_s , ϕ_{to});
- ❖ **Il metodo indiretto:** in esso si misura la corrente e la velocità, per poi sfruttare l'equazione di una fase rotorica di macchina.

Il campo operativo delle macchine asincrone può essere diviso in tre zone:

- 1) **Zona a coppia massima costante (sino a ω_1):** in essa, la tensione disponibile è sufficiente per iniettare in macchina tutta la corrente ammissibile. La massima coppia si ottiene quando il flusso è pari a quello nominale;
- 2) **Zona a potenza massima costante:** in essa, la tensione disponibile non è più sufficiente per vincere la f_{cem} della macchina se il flusso rimane pari a quello nominale. Per poter iniettare la corrente ammissibile, occorre dunque ridurre il valore del flusso in proporzione alla velocità. Anche la coppia massima generabile diminuisce in proporzione alla velocità;
- 3) **Zona a potenza decrescente:** la tensione disponibile non è sufficiente in alcun modo per iniettare la corrente massima in macchina. La coppia diminuisce in proporzione al quadrato della velocità.

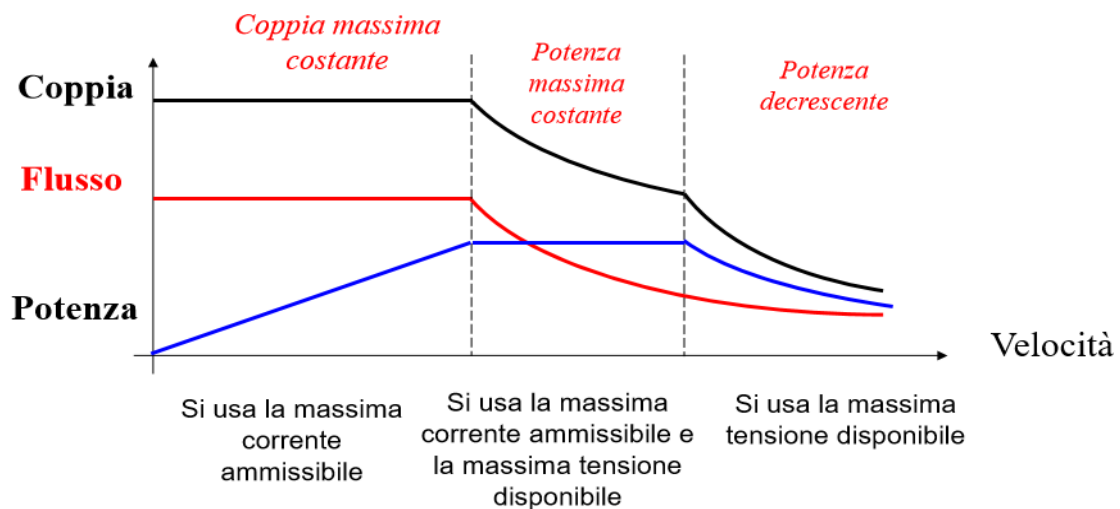


Fig.24 Caratteristica meccanica per la determinazione del campo operativo dell'asincrono

III.5 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI GENERATORI ASINCRONI

III.5.A) I VANTAGGI

1. Presentano la loro alimentazione sullo statore (in corrente ed in tensione);
2. Presentano un buon funzionamento in ambiente ostile;
3. Sono macchine a basso costo ciò favorisce il loro uso in industria;
4. Non presentano nessun problema alle alte temperature quindi assenza totale di smagnetizzazione dei circuiti magnetici e di sovraccarico del convertitore;
5. Presentano un'elevata capacità di sovraccarico;
6. Presentano elevate prestazioni in esecuzione speciali e con azionamenti idonei;
7. Danno la possibilità di funzionamento a velocità superiore a quella nominale (**azionamento mandrino**) con coppia ridotta e prestazioni limite in potenza costante: si parla di deflussaggio della macchina;
8. Presentano una coppia massima circa pari a $(1,5 \div 2,5) C_{non}$;
9. L'assenza dell'utilizzo dei materiali non critici e resistenti lo rende durevole e affidabile e questo costituisce il motivo per il quale le macchine asincroni sono molto famose con alta efficienza energetica in accordo alle norme vigenti e future (IE4*).

III.5.B) GLI SVANTAGGI

- I. Presentano una dissipazione di calore sul rotore che può essere rimediato impiegando un inverter per avviare l'asincrono. Questo avviene mantenendo la velocità del campo rotante (W_c) poco superiore a quella di rotazione del rotore grazie alla possibilità di regolare con continuità la frequenza di alimentazione;
- II. Presentano un'inerzia relativamente elevata (J_{tot}) a causa della presenza del ferro sul rotore (Fe) e perciò maggiori difficoltà in accelerazioni;
- III. Presentano un controllo dei parametri di macchina difficile;
- IV. Funzionano solo in parallelo ad una rete già in sé stabile.

CAPITOLO IV: I CONVERTITORI STATICI: principio di funzionamento e scopo

4.1 CLASSIFICAZIONE DEI CONVERTITORI STATICI

Lo scopo principale dei convertitori statici è quello di interfacciare sistemi elettrici tra loro elettricamente non compatibile.

Sono indicati: **DC**-corrente continua **AC**-corrente alternata

Il nome del convertitore è strettamente collegato alla tipologia di conversione che effettua per cui abbiamo la seguente rappresentazione:

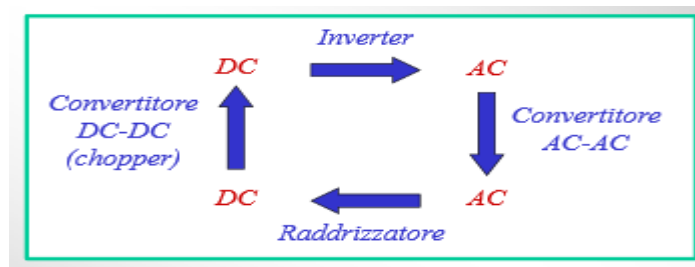


Fig.25 classifica delle tipologie dei convertitori

4.2 CONVERTITORE STATICO DC_AC (INVERTER)

Gli inverter sono dei convertitori statici impiegati per generare forme d'onda di tensione o di corrente alternata, controllate in ampiezza e frequenza, utilizzando una sorgente di tensione o corrente continua.

Si distinguono pertanto due tipologie di inverter:

Gli CSI: Inverter a Corrente Impressa che utilizzano sorgenti di corrente continua. Gli CSI sono utilizzati soprattutto per elevate potenze, non possono funzionare senza carico e sono caratterizzati da una dinamica molto lenta.

Gli VSI: Inverter a Tensione Impressa che utilizzano sorgenti di tensione continua. Gli VSI possono essere sia monofase (costituito da 2 rami in parallelo) o trifase (costituito da 3 rami) collegati a stella. I parametri da controllare sono di 2 tipi:

- ❖ La tensione di uscita all' inverter;
- ❖ La corrente di carico in ingresso.

Il controllo di un ramo di inverter può essere fatto usando diverse tecniche tale:

- **La tecnica di regolazione PWM** (Pulse Width Modulation) controlla il valore medio della tensione in uscita, in T_c detto **tempo di commutazione** ($T_c = 50 \mu s \div 2ms$). Dato che il ramo di un inverter può assumere solo due stati, il suo comportamento viene descritto mediante una funzione di commutazione $S_A = (0,1)$. Questa tecnica si suddivide in due rami:
 - **La PWM regular sampled**, usato per l'implementazione di tipo digitale;
 - **La PWM natural sampled**, usato per l'implementazione di tipo analogico.
- **La tecnica di regolazione ad onda quadra**: essa è caratterizzata dall'alternarsi di stati (1,0), (0,1) ad intervalli uguali, il cui nome deriva dalla forma d'onda della tensione applicata al carico. Con questa tecnica, è possibile regolare solo la frequenza della tensione di uscita, ma non la sua ampiezza.
- **La tecnica SVM** (Space Vector Modulation)
- **La tecnica PWM generalizzata**
- **La tecnica PWM sinusoidale**

Un inverter trifase collegato ad un carico trifase equilibrato può essere spiegato come:

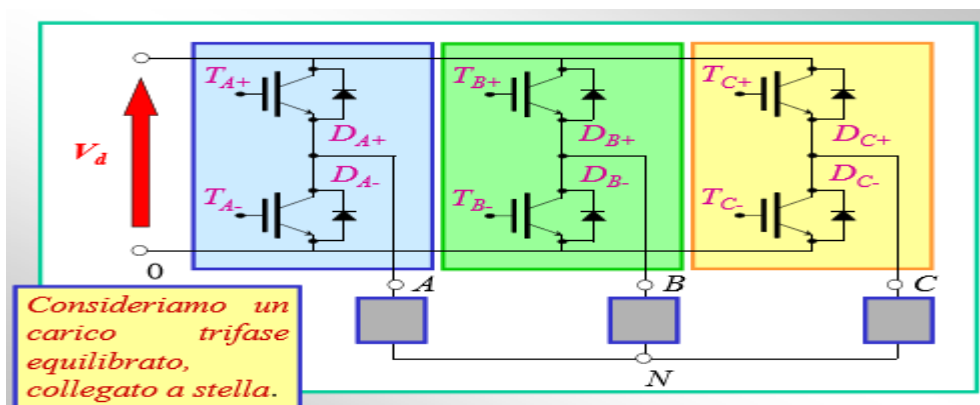


Fig.26 Rappresentazione circuitale di un inverter trifase

Nei moderni sistemi di conversione elettrica ed elettromeccanica dell'energia è di fondamentale importanza la possibilità di poter controllare il comportamento delle correnti nel sistema stesso. Può essere fatto in due modi:

- **Usando un regolatore di corrente ad isteresi** la cui componente fondamentale è il comparatore ad isteresi. Questo sistema è caratterizzato da

un'ottima velocità di risposta, e può inseguire anche correnti di riferimento variabili nel tempo (sinusoidali), ma presenta alcuni inconvenienti dovuti all'interdipendenza tra le tensioni di fase.

- **Usando un regolatore di corrente a modulatori** il cui componente fondamentale è il regolatore proporzionale Integratore (**PI**) che ha lo scopo di eliminare gli errori delle correnti di ingresso fornendo in uscita i valori delle tensioni di riferimento da sintetizzare nel modulatore. Questo sistema è caratterizzato da un errore di corrente a regime nullo.

L'azienda produttrice di convertitori tra i più importanti in Italia è **La TDE MACNO**: essa progetta e produce convertitori statici di energia su richiesta ed è in grado di produrre quadri elettrici e sistemi completi di controllo dell'impianto.

- **La REEL (SSP e/o SUPREME)**: realizza più tipologie di convertitori sia per il montaggio a parete che per quello in quadro elettrico tali: La KSB 202; La FlexiMova® cm; La FlexiMova® mm;
- **LA PHASE MOTOR CONTROL e LA SICMEMOTORI** usano convertitori realizzati dalla TDE.

Questi convertitori devono rispettare le normative CEI 0-21 per la distribuzione in BT e la CEI 0-16 per quella in MT e garantiscono il controllo efficiente e flessibile dei generatori sincroni e asincroni.

4.3 CONVERTITORE STATICO AC_DC (AFE)

I Convertitori DC_AC industriali detti AFE cioè **“Active Front End Drives”** ad IGBT sono convertitori statici capaci di convertire l'energia continua fornito dal Bus DC in energia alternata che verrà mandata in rete nel funzionamento della macchina elettrica dal generatore.

Possono essere monofase o trifase controllati (a IGBT) o non controllati (a Diodo). In funzionamento da motore essi agiscono come dei raddrizzatori con tensione di ingresso di fase (L1, L2, L3) e quella di uscita V_{Bus} DC imposta dall'utente ed al contrario nel funzionamento da generatore. La potenza scambiata con la rete può fluire nei due sensi a secondo dell'esigenza del carico: **in assorbimento** se alimentato **da motore** o **in rigenerazione** se alimentato **da generatore**. Il controllo si compone di un anello di tensione (V_{Bus} DC) ed uno di corrente che fornisce corrente sinusoidale sotto qualsiasi condizione di carico.

In particolare, ponendo a zero (dall'utilizzatore) la quota di potenza reattiva scambiata con la rete, si ottiene solamente lo scambio di potenza attiva con il fattore di potenza unitario ($\cos \phi=1$). L'unità AC_DC Rigenerativa necessita di un circuito di precarico esterno per limitare le correnti di carico del condensatore del Bus DC all'inserzione dalla rete. L'unità AFE è composta da un ponte a IGBT trifase con diodi in antiparallelo, mentre la ricarica del bus DC avviene anche con il convertitore fuori marcia, raggiungendo valore di tensione pari alla tensione di ingresso lato AC raddrizzata. Al suo interno, il regolatore di tensione ha il compito di generare la richiesta di corrente necessaria a mantenere la tensione del Bus DC al valore dell'utilizzatore. Le costanti del regolatore di tensione sono fissate in unità ingegneristiche dai seguenti parametri:

K_P: guadagno proporzionale

T_a: costante di anticipo pari a $T_a = T_i \cdot K_p$ (ms)

T_i: costante di tempo del regolatore integrale (ms)

T_f: costante del filtro di primo grado sull'errore

V_{rif}(s): riferimento di tensione normalizzata alla tensione nominale

V_{bus}(s): tensione del bus letto normalizzato alla tensione nominale

I_{-rif}(s): richiesta di corrente normalizzata alla corrente nominale di linea

La funzione di trasferimento complessiva del regolatore di tensione è spiegata come:

$$I_{-rif}(s) = [V_{rif}(s) - V_{bus}(s)] \cdot K_p \cdot \left[\frac{1}{1 + sT_f} + \frac{1}{sT_a} \right]$$

I valori delle costanti sono calcolati per garantire la stabilità del sistema in tutte le condizioni di funzionamento tale per cui:

- ❖ Per macchine **troppo nervose**, è sufficiente agire sulla **K_P** riducendola;
- ❖ Per macchine **troppo lente**, si agisce sulla **K_p** aumentandola.

Il controllo della corrente da parte dell'AFE permette di compensare eventuali potenze reattive esterne sia di natura induttive che capacitive mediante la parte reattiva della corrente di riferimento (**I_{q-rif}**). Fissato il valore **I_{q-rif}**, si può compensare "Q" inserendo una richiesta di corrente reattiva pari e contraria dove:

- ✓ Per $I_q\text{-rif} > 0$, si ha un assorbimento di corrente capacitivo;
- ✓ Per $I_q\text{-rif} < 0$, si ha un assorbimento di corrente induttivo;
- ✓ Per $I_q\text{-rif} = 0$, si ha lo scambio con la rete di sola potenza attiva con potenza reattiva nulla e $\cos \phi = 1$ (fattore di potenza).

IV.4 CIRCUITI, COMPONENTI, ED APPLICAZIONI DEL Back- to-Back

Noto il comportamento dei singoli convertitori AFE ed Inverter, si può pensare di fare uno studio complessivo che congiunge i due componenti e viene chiamato **AC_AC Back-to-Back** detto anche **Front-End** (FE).

Un convertitore back-to-back consente di interfacciare con flussi di potenza bidirezionale una rete trifase a tensione e frequenza fissate, con un sistema trifase a tensione e frequenza regolabile. Esso è costituito principalmente da due inverter (AC_DC; DC_AC), collegati fra loro con uno stadio in continua in comune. Sullo stadio in continua, è presente un condensatore che ha lo scopo di attenuare le oscillazioni di tensioni mentre sul lato rete, ci sono delle induttanze di disaccoppiamento che hanno lo scopo di interfacciare la rete con l'inverter.

Questo componente può essere rappresentato come:

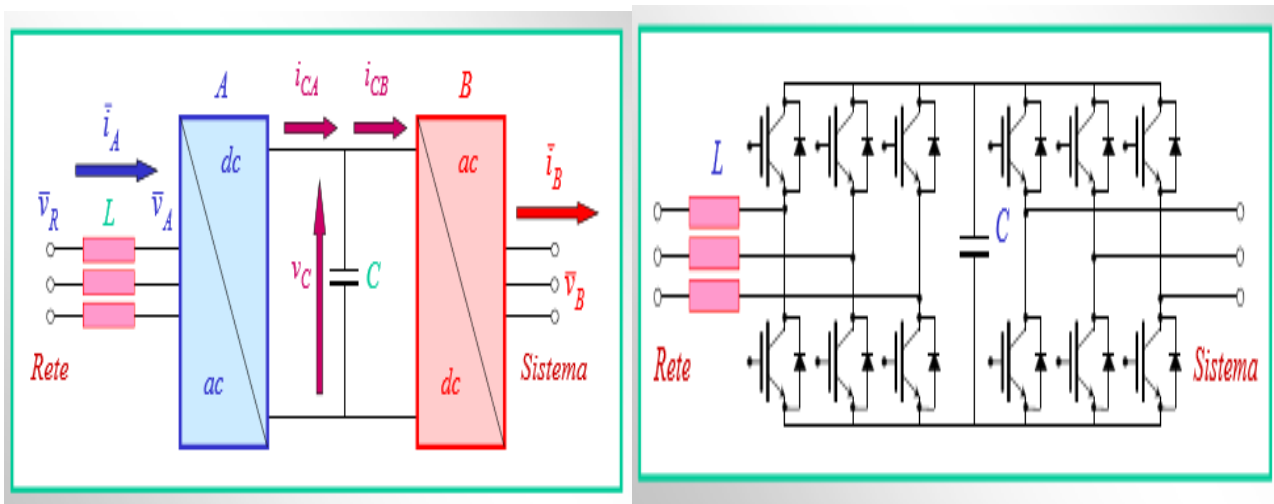


Fig.27 Circuito elettronico del back – to – back con i diversi componenti e le grandezze espresse in termine di vettore di spazio

I due inverter vengono controllati con la **tecnica PWM** (modulazione a larghezza di impulso) o **SVM** (modulazione di spazio vettoriale).

L'INVERTER B, garantisce i seguenti ruoli:

- Misura la tensione dello stadio in continuo $V_{dc \text{ BUS}}$;
 - Determina la natura della corrente lato generatore con cui alimentare il sistema.
- i. **Nel caso in cui il generatore è sotto-eccitato**, la corrente prodotta dal convertitore è sfasata in anticipo rispetto alla tensione con la conversione del generatore: si ha l'assorbimento di potenza reattiva induttiva.
- ii. **Nel caso in cui il generatore è sovra-eccitato**, la corrente prodotta dal convertitore è sfasata in ritardo rispetto alla tensione con la convenzione del generatore: si ha un assorbimento di potenza reattiva capacitivo.

L'INVERTER A, svolge le seguenti funzioni:

- Genera tensione sincronizzata alla rete;
 - Fornisce corrente con fattore di potenza unitario ($\cos\phi=1$) e distorsione armonica nulla (**THD =0**) grazie al filtro presente alla sua uscita;
 - Controlla e regola il circuito intermedio DC in relazione all'energia prodotta dal generatore elettrico grazie alla regolazione ad IGBT dell'INVERTER;
 - Oltre all'interfacciamento con la rete, realizza un risparmio di energia caratterizzato da: Una riduzione di perdita; Una rigenerazione di energia; ed infine incrementa l'efficienza dell'impianto grazie all'innovazione delle valvole di controllo.
- ✓ Per le **Pompe, i Ventilatori, i Compresore**, l'AFE si usa per l'abbattimento delle armoniche(THD);
- ✓ Per Le **applicazioni Pompa/Turbina, Banchi prove, Nastri trasportatori, Sollevamento, Macchine complesse**, l'AFE si usa per la rigenerazione di energia.

Il sistema all'uscita del convertitore può essere ad esempio:

1. Lo statore di una macchina a corrente alternata;
2. Lo statore di un generatore sincrono a velocità variabile (Idroelettrica, Eolica);
3. Il rotore di un generatore asincrono a doppio alimentazione (Double Fed).

lo schema a blocchi del sistema Alternatore-convertitore-rete è espresso come:

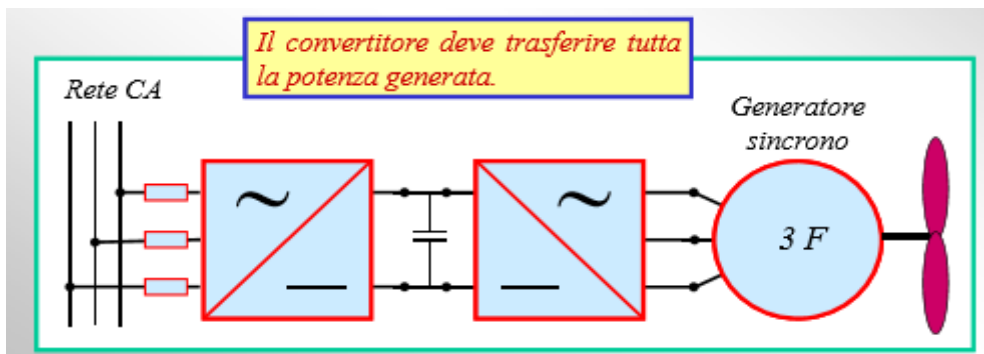


Fig.28 Collegamento di un generatore sincrono a velocità variabile

Si nota quindi che, il convertitore statico elettronico a doppia conversione (AC_DC_AC) con il bus DC, scambia potenza direttamente con la rete con un campo di regolazione che ci permette di ottenere il migliore rendimento della turbina idraulica a giri variabili in ogni fase di lavoro.

Per quanto riguarda l'azienda **TDE MACNO**, i componenti di potenza usati per la realizzazione del quadro di conversione sono rappresentati in figura:

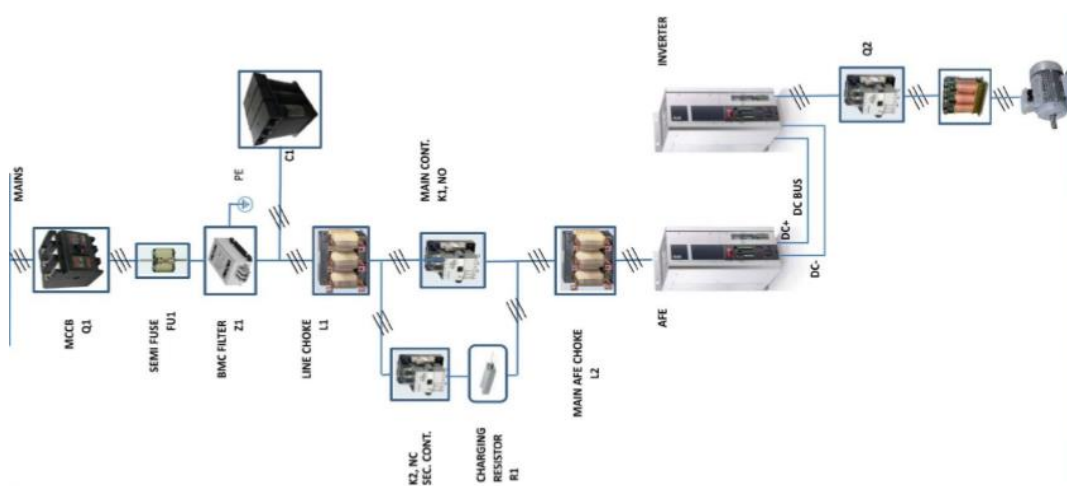


Fig.29 Componenti del quadro convertitore statico

Alcuni impianti idraulici con inverter **TDE MACNO** esistenti possono essere elencati come:

- Impianto San Martino sul sile, generatore asincrono torque sensorless da 36 poli e 250 kW in presa diretta su turbina Kaplan
- Impianto Prato, generatore asincrono da 110 kW;
- Impianto Sestola, generatore asincrono da 200 kW;
- Impianto Montebelluna, generatore asincrono da 132 kW.

CAPITOLO IV: LE PROVE SVOLTE SUL BRUSHLESS

4.1 PROVA CON CARICO FISSO CIOE' PASSIVO (PLAFONIERA) DI 4,5÷9KW AL VARIARE DEL GRADO DI APERTURA DELLA VALVOLA DI CONTROLLO

Le prove sperimentali svolte sulla valvola di controllo (LOCPOWER) per il recupero di energia diversamente dissipata dall'impianto e la regolazione della portata del fluido sono costituiti dai seguenti componenti:

1) **Un Attuatore:** è un dispositivo che genera lo spostamento consentendo la variazione della grandezza fisica desiderata (la portata e/o la pressione). L'organo principale di questa componente è chiamato **otturatore** e svolge la funzione di regolazione secondaria (**Regolazione idraulica**). L'attuatore usato viene controllato con un segnale da 4 – 20 mA restituendo sempre un segnale di ritorno di posizione (feedback). Si distinguono gli otturatori a piattello, lineare, ed equipercentuale. Mentre gli attuatori vengono classificati come:

- **gli attuatori elettrici:** es.un motore elettrico a bassa tensione;
- **gli attuatori con pistone detti elettropneumatici;**
- **gli attuatori pneumatici;**
- **i solenoidi, i servo-idraulici.**

2) **La valvola di controllo (CV)** chiamata in questo caso **LA LOC POWER:** è una soluzione aziendale per il recupero dell'energia diversamente dissipata dell'impianto in determinate condizioni, permettendo di:

- Raggiungere valori intermedie della portata(Q) e della perdita di carico (ΔP);
- Controllare la portata e la perdita di carico;
- Consente poi il recupero di energia sviluppata dal motore primo (turbina).

Esiste poi un'altra categoria di valvole quali: **le valvole a globo, valvole a scaracinesca, valvole a farfalla, valvola cilindrica** che non consentono il recupero di energia ma svolgono solo le operazioni di apertura e chiusura completa o parziale.

3) All'interno della nostra LOC POWER, si trova una turbina con ingresso assiale rispetto alla tubazione in ingresso ed in uscita.

La Turbina Assiale controllata da inverter, possiede al suo interno “un trim” di regolazione per compensare le escursioni di pressione e portata variando la velocità di rotazione in automatica, ottimizzando gli andamenti delle pressioni in tutta la rete idrica.

4) **Il Torsiometro**: è uno strumento di misura per rilevare il valore di coppia effettivamente sviluppata dalla turbina. Esso è importante per migliorare ulteriormente l'efficienza e il rendimento dell'alternatore. Si distinguono:

- ❖ I torsimetri rotanti ad albero ed a flangia;
- ❖ I torsimetri non rotanti per rilevare la coppia di reazione.

Tra la turbina e l'alternatore, viene accoppiato il torsiometro mediante **i giunti di accoppiamento** e vengono usati come componenti di compensazione dei carichi parassiti dovuti ad errori di allineamento.

5) **L'Alternatore**: è una macchina elettrica trifase, capace di convertire l'energia meccanica fornita dal motore primo in energia elettrica in AC. Nel nostro caso è montato a sbalzo e provato per diverse taglie e diverse tipologie (**ALTERNATORE SINCRONO** ed **ALTERNATORE ASINCRONO**). Solitamente, viene scelto un generatore con classe di efficienza IE4, flangiato, grado di protezione IP54, auto e/o servo ventilato in base alle richieste del cliente.

6) **Il Convertitore statico**: la macchina elettrica viene collegata al convertitore statico per la conversione dell'energia (AC/DC_DC/AC) secondo la normativa CEI 0-21 e l'energia ottenuta viene mandata direttamente alle tre pompe: si parla di **AUTOCONSUMO**.

7) **Il SOFTWARE**: il software usato per osservare il comportamento dell'impianto è stato fatto con l'ambiente di simulazione **LABVIEW**. È quindi una soluzione che ci permette di monitorare in tempi reali il comportamento dell'impianto. È costituito da più finestre: **la Diagnostica, il Funzionamento Manuale, la Configurazione, il Test, l'Arresto e la Messa in Sicurezza, l'Uscita**.

- 8) **Due serbatoi atmosferici:** di cui una è di calma e l'altra di alimento pompe.
- 9) **Tre pompe centrifughe:** che lavorano con configurazione serie e/o parallelo grazie al sistema di turbazione e/o di valvole di intercettazione.

Quindi l'impianto idraulico dell'azienda LOCLAIN è stato usato per esplorare il comportamento del gruppo Turbina – Alternatore. Tramite il software, si riesce a controllare il comportamento di ogni componente del sistema inserendo in ingresso i dati richiesti dal cliente e fornendo in uscita quelli ottenuti dalla simulazione. La caduta di pressione detta anche perdita di carico (ΔP) generata a monte e a valle della condotta (TUBAZIONE), viene convertita in energia cinetica poi in energia meccanica dalla LOCPOWER, e infine in energia elettrica dall'alternatore, viene mandata al convertitore e consumato dalle pompe centrifughe. Con queste valvole di recupero di energia, è possibile regolare due parametri (la portata e la pressione a valle) agendo prima sul parametro OFFSET molto veloce, poi sull'Otturatore.

La figura dell'impianto e quella del software usati dall'azienda sono riportati di seguito:



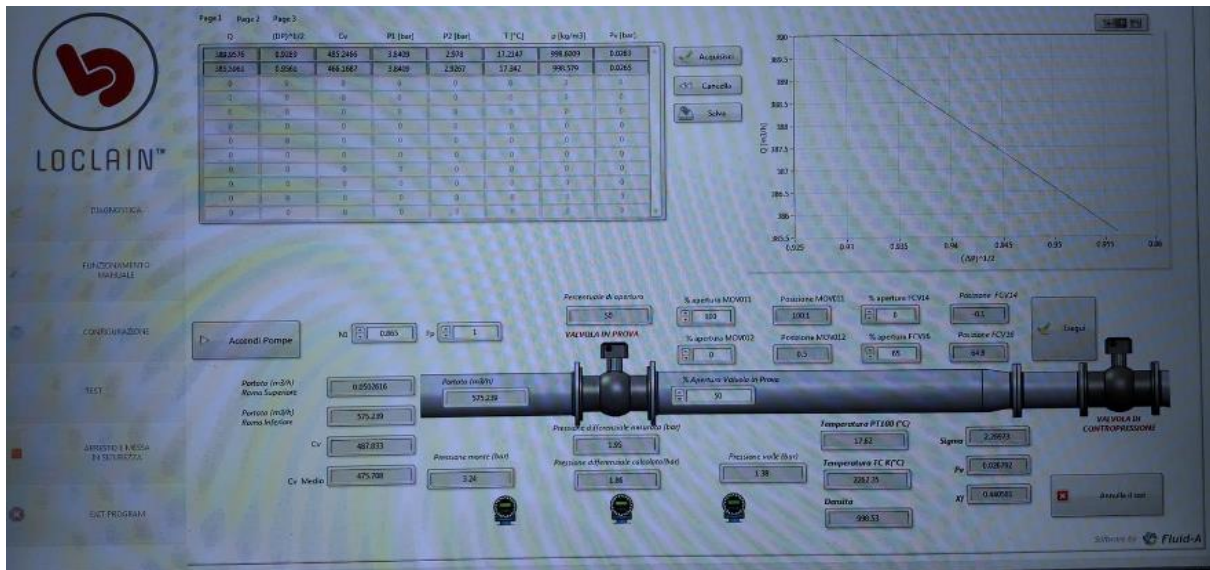


Fig.30 immagine del gruppo Turbo – Alternatore con figura di simulazione

I valori più importanti da valutare per un “trim” di regolazione sono due:

- Il Cv e/o Kv detto capacità massima della valvola;
- La curva inerente di regolazione (Cm - rpm).

Il calcolo del Cv quando il fluido è l’acqua, si ottiene dalla nota formula :

$$Cv = \frac{Q}{N1 \times \sqrt{\Delta P_{valve}}} \quad \text{in cui le grandezze sono descritte come:}$$

Cv = la capacità della valvola ad una certa condizione di apertura della LOCPOWER

Q = la portata del fluido nella tubazione in L/s o in m³/h

N1 = una costante di conversione

$\sqrt{\Delta P_{valve}}$ = la perdita di carico imputabile alla sola valvola

- Nel caso della valvola di controllo a piena apertura, la variazione della pressione di valvola è espressa come $\Delta P_{valve} = \Delta P_{tot} - \Delta P_{pipe}$

ΔP_{tot} = perdita di carico a monte ed a valle della tubazione

ΔP_{pipe} = perdita di carico dovuto ai materiali con cui sono stati realizzati i tubi e di solito pari a circa 0,002 bar.

- Nel caso in cui il fluido usato è l’acqua impostata a temperatura ambiente, la portata volumetrica di quest’ultimo vale :

$$q = N1 Fp Fr Cv \sqrt{\frac{P1 - P2}{Gf}}$$

Fp = fattore di riduzione per diametro di valvola

Fr = coefficiente derivato dal numero di Reynolds (**Fr=1** se è rispettata la turbolenza)

Gf = densità specifica del fluido (**Gf=1** se il fluido è lo stesso che quello del test)

q = portata volumetrica dell'acqua (Q/m³)

A questo punto, è possibile scrivere la relazione tra la portata e la perdita di carico:

$$Q = C_v \times \sqrt{\Delta P_{valve}} \quad \text{e quindi} \quad \Delta P_{valve} = \left(\frac{Q}{C_v}\right)^2$$

Il calcolo della velocità del fluido in base alla portata richiesta dai carichi e del diametro stimato dalla valvola può essere espressa con la seguente formula :

$$v = 354 \times \frac{Q}{D^2} \quad \text{in cui : } v = \text{velocità del fluido in (m/sec);}$$

D = diametro della valvola in (mm).

Le dimensioni e gli ingombri della LOCPOWER possono essere riassunti nella tabella sotto riportata:

DN	L (mm)	H (mm)	M (kg)
80	400	1200	185
100	480	1450	270
125	550	1450	273
150	640	1500	350
200	830	2000	500

In cui **S = π d H** la sezione di passaggio del fluido (Acqua demineralizzata e filtrata); **P1** la pressione a monte fissata mentre **P2** la pressione a valle variabile.

4.1.1 Prova con carico (Plafoniera) da 4,5÷9kw, e LOC POWER al 10%

Per questa prova, sono stati usati come carichi, delle plafoniere (Resistenze) dette carico passivo in cui ogni plafoniera contiene al suo interno tre lampade di potenza 500/1000/1500w. Per ottenere 9 kW di carichi, è stata usata una lampada di ogni plafoniera collegate tra di loro a stella con centro stella a terra tramite una scatola di derivazione. Poi con un Wattmetro, si misura la potenza del carico fisso. Ai capi di quest'ultimo, vengono collegati per ogni fase un TA. Il banco prova può essere rappresentato come segue:

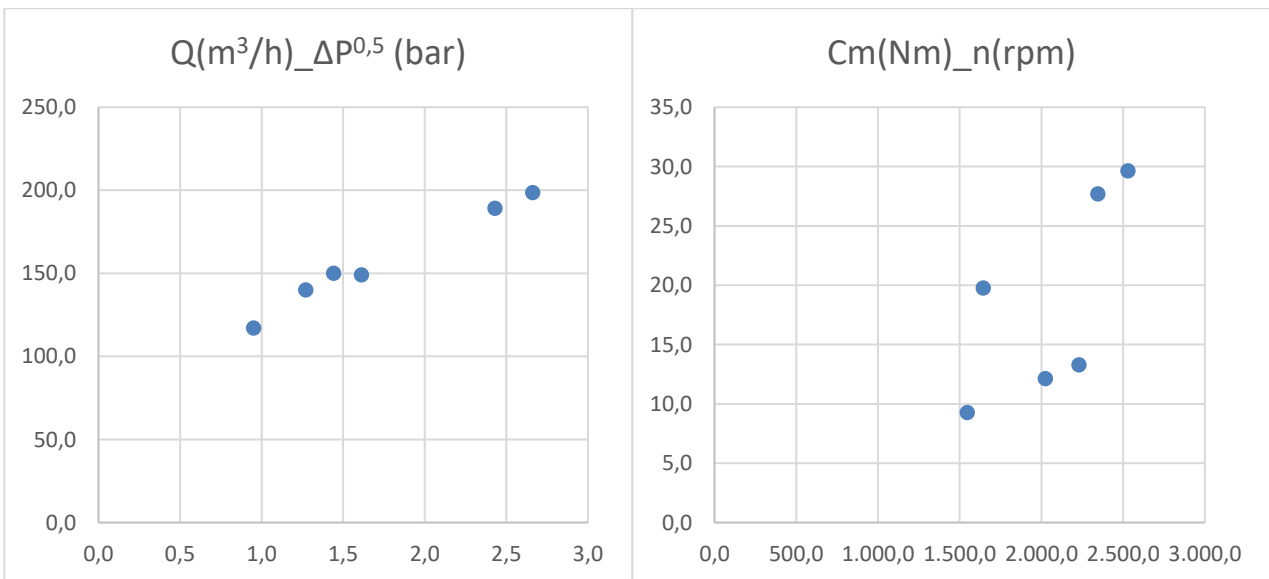


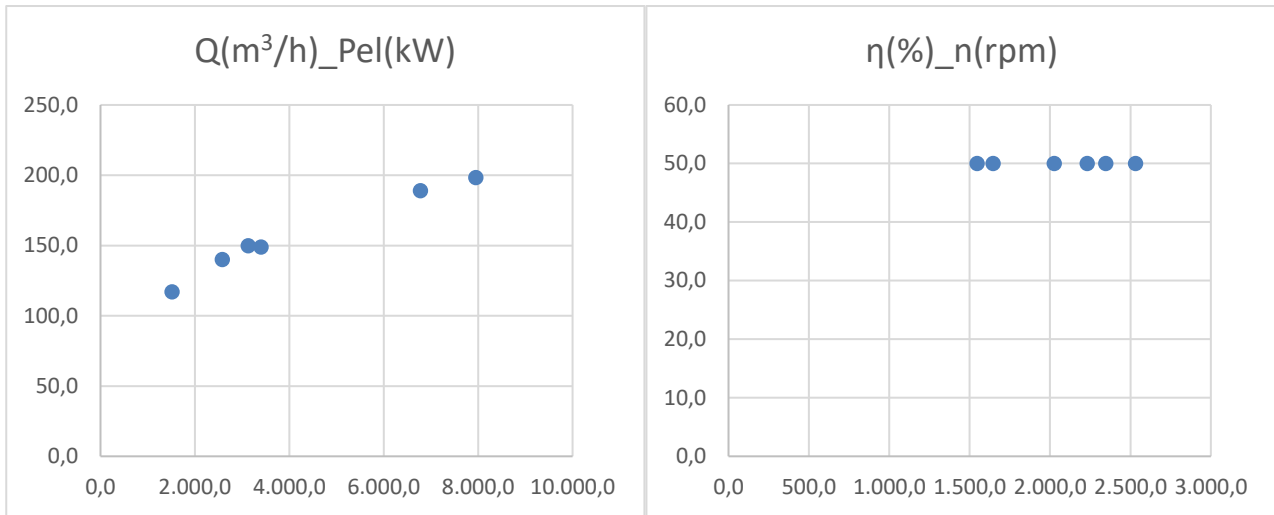
Fig.31 Banco prova per la prova con carico fisso

I dati ottenuti dalle simulazioni vengono raccolti ed inseriti su un foglio Excel in cui vengono tracciati i grafici per poi essere analizzati:

CASE	ΔP	Q (m ³ /h)	P1	P2	ρ (kg/m ³)	Pteo(kW)	Pmis(kW)	η_e	Vcon(V)	Vfas(V)	I (A)	Cos phi	PeI (W)	Coppia(Nm)	rpm	Carico kW
1,0	1,0	117,0	3,8	2,9	997,6	3,0	1,5	0,5	230,0	132,8	3,8	1,0	1.513,8	9,3	1.546,0	4,5
2,0	1,3	140,0	3,6	2,3	997,5	4,8	2,6	0,5	299,0	172,6	5,0	1,0	2.579,1	12,1	2.024,0	4,5
3,0	1,4	150,0	3,5	2,1	997,5	5,9	3,1	0,5	329,0	189,9	5,5	1,0	3.122,7	13,3	2.230,0	4,5
4,0	1,6	149,0	6,3	4,7	997,4	6,5	3,4	0,5	242,0	139,7	8,1	1,0	3.395,2	19,7	1.644,0	9,0
5,0	2,4	189,0	6,6	4,2	997,3	12,5	6,8	0,5	343,0	198,0	11,4	1,0	6.772,7	27,7	2.346,0	9,0
6,0	2,7	198,5	6,4	3,8	997,1	14,3	7,9	0,5	370,0	213,6	12,4	1,0	7.946,6	29,6	2.530,0	9,0

CASE	ΔP	Q (m ³ /h)	P1	P2	ρ (kg/m ³)	Pteo(kW)	Pmis(kW)	η_e	Vcon(V)	Vfas(V)	I (A)	Cos phi	PeI (W)	Coppia(Nm)	rpm	Carico kW
9,0	5,1	282,2	6,4	3,8	997,1	14,3	7,9	0,5	370,0	213,6	12,4	1,0	7.946,6	29,6	2.530,0	9,0





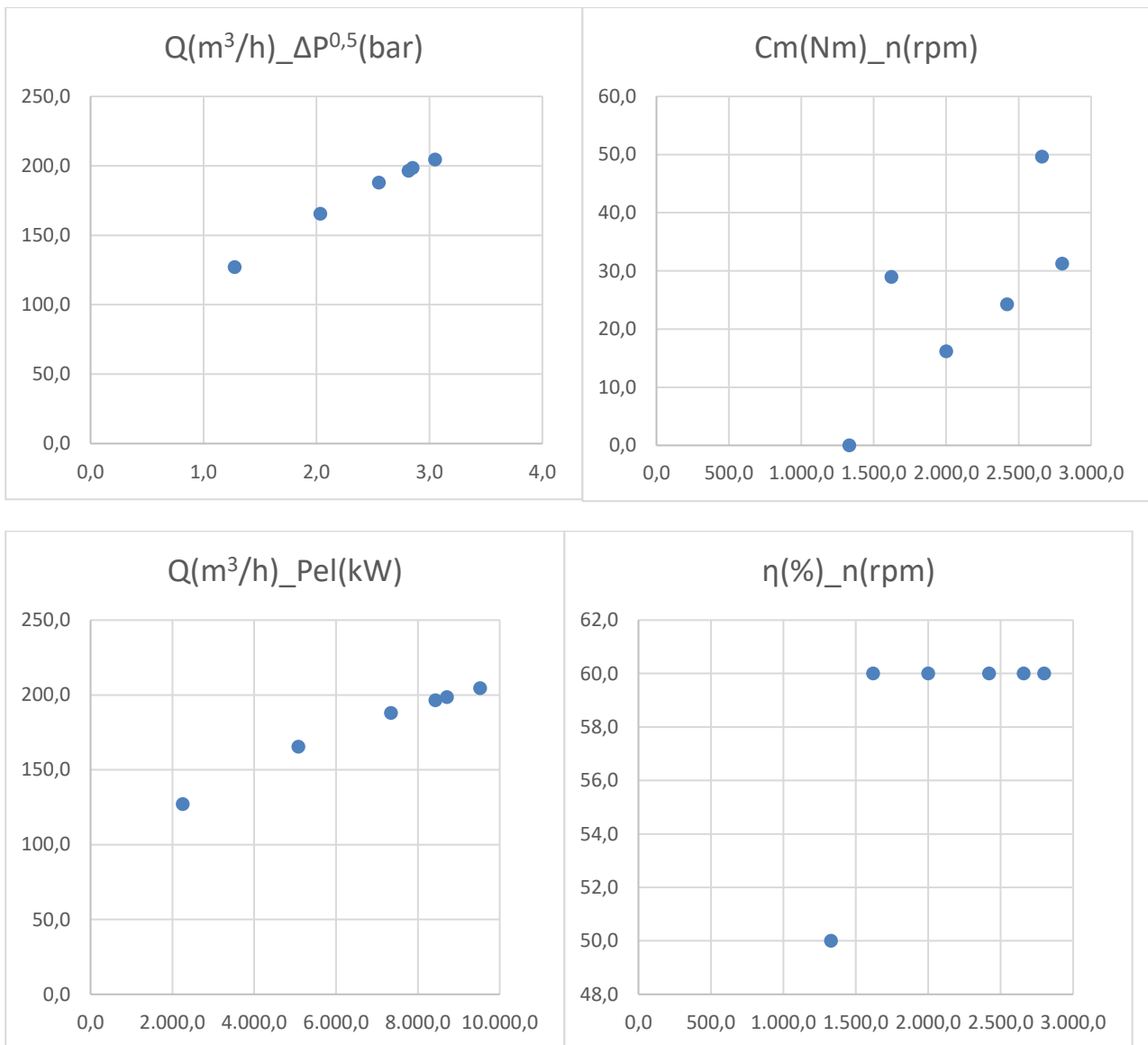
OSSERVAZIONI:

- Questa prima prova è stata realizzata sui carichi passivi, con apertura della valvola di controllo al 10%. Con portata massima a questa apertura pari a $Q_{max} = 198,5 \text{ m}^3 / \text{h}$ si è ottenuta una potenza di $P_{el} = 8 \text{ kW}$;
- Dato che la portata del fluido che attraversa la valvola di controllo varia proporzionalmente con la variazione di pressione delle tubazioni, si nota che all'aumentare della portata, aumenta la caduta di carico, la potenza misurata dal Wattmetro è via via crescente, la velocità di rotazione dell'albero anch'essa è crescente per cui l'energia rigenerata e convertita è crescente;
- Essendo dei carichi fissi, il rendimento è costante al 50%, mentre si osserva un perfetto allineamento tra la tensione e la corrente giustificata dal $\cos\phi = 1$ e dovuta alla presenza del convertitore.

4.1.2 Prova con carico (Plafoniera) da 9 kW, e LOC POWER al 20%

Questa prova è realizzata con un numero uguale di carichi e con apertura della valvola di controllo a 20%. I dati ottenuti sono riportati in tabella:

CASE	ΔP	Q (m³/h)	P1	P2	ΔP_{val}	P2 turb	ρ (kg/m³)	Pteo (W)	Pmis(kW)	η_{el}	Vcon(V)	Vfas(V)	I (A)	Cos phi	Pel(W)	Coppia(Nm)	rpm	Carico(kW)
1,0	1,3	127,0	6,6	4,4	0,9	5,3	997,7	4.399,2	2,3	0,5	197,0	113,7	6,6	1,0	2.252,0	16,2	1.330,0	9,0
2,0	2,0	165,5	6,4	2,9	1,5	4,4	997,7	9.145,1	5,0	0,6	296,0	170,9	9,9	1,0	5.075,6	24,2	2.000,0	9,0
3,0	2,6	188,0	6,7	2,3	1,9	4,2	997,6	13.035,6	7,3	0,6	356,0	205,5	11,9	1,0	7.337,7	29,0	2.420,0	9,0
4,0	2,8	196,5	6,6	1,7	2,1	3,8	997,5	15.025,8	8,5	0,6	383,0	221,1	12,7	1,0	8.424,9	49,7	1.620,0	9,0
5,0	2,9	198,5	6,6	1,6	2,1	3,7	997,5	15.378,9	8,7	0,6	388,0	224,0	13,0	1,0	8.702,9	31,2	2.660,0	9,0
6,0	3,0	204,5	6,7	1,4	2,3	3,7	997,4	16.946,5	9,5	0,6	407,0	235,0	13,5	1,0	9.516,8	32,5	2.800,0	9,0



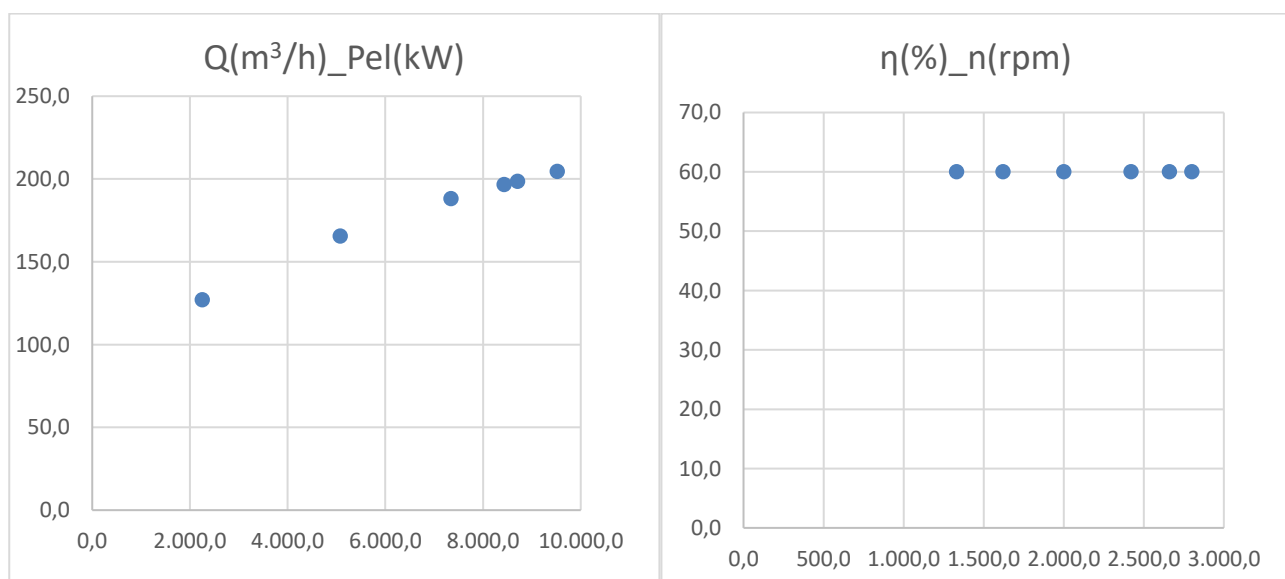
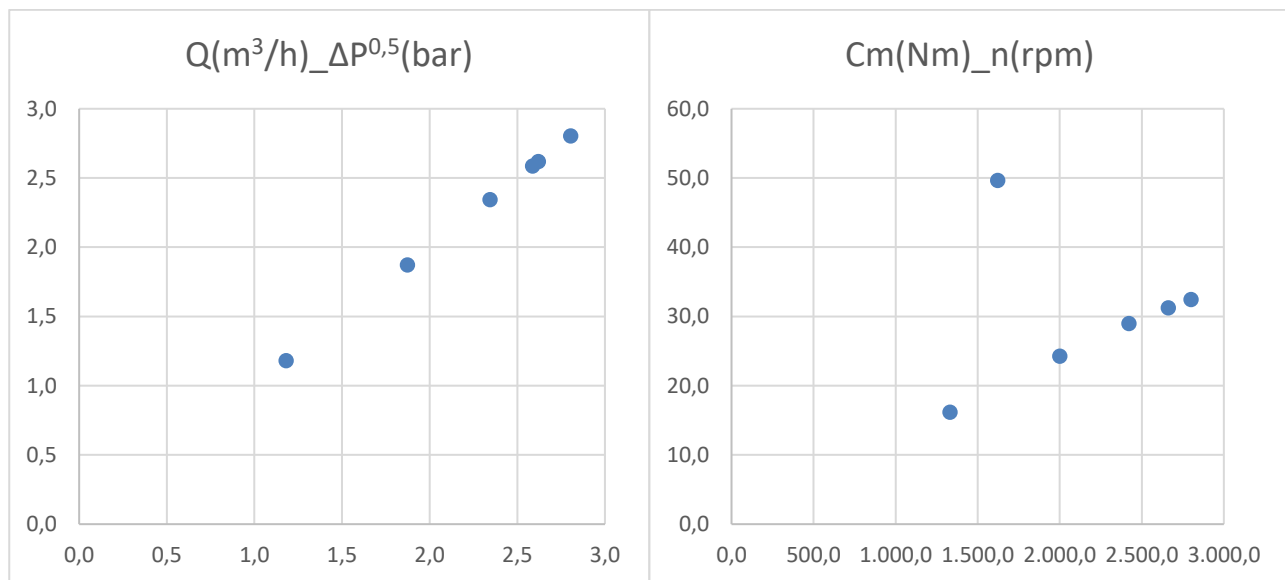
OSSERVAZIONI:

- Anche in questo caso si nota la proporzionalità esistente tra la portata e la caduta di pressione, ma essendo al 20% di apertura la portata misurata risulta essere maggiore di quella ottenuta al 10%;
- Si nota lo stesso comportamento di ciò che è successo nel caso precedente, ma in esso, si è raggiunta una portata massima pari a $Q_{max} = 204,5 \text{ m}^3 / h$ corrispondente ad una potenza rigenerata di $P_{el} = 9,5 \text{ Kw}$;
- Si evince inoltre che raggiunta una certa condizione di funzionamento, l'efficienza complessiva del gruppo inizia ad aumentare raggiungendo il 60%, buono rispetto al caso precedente.

4.1.3 Prova con carico (Plafoniera) da 9 kW, e LOC POWER al 30%

Questa prova è realizzata con un numero uguale di carichi e con apertura della valvola di controllo al 30%. I dati ottenuti sono riportati in tabella:

CASE	Δp (bar)	Q (m ³ /h)	Δp (bar)	ρ (kg/m ³)	Pteo(kW)	Preale(kW)	η_{el}	Vconc(V)	Vfase(V)	I (A)	Pel(W)	Coppia (Nm)	rpm	Carico(kW)
1,0	5,4	127,0	1,2	997,7	4.071,7	2,3	0,6	197,0	113,7	6,6	2.252,0	16,2	1.330,0	9,0
2,0	4,5	165,5	1,9	997,7	8.420,4	5,0	0,6	296,0	170,9	9,9	5.075,6	24,2	2.000,0	9,0
3,0	4,4	188,0	2,3	997,6	11.973,3	7,3	0,6	356,0	205,5	11,9	7.337,7	29,0	2.420,0	9,0
4,0	4,0	196,5	2,6	997,5	13.812,9	8,5	0,6	383,0	221,1	12,7	8.424,9	49,7	1.620,0	9,0
5,0	4,0	198,5	2,6	997,5	14.128,6	8,7	0,6	388,0	224,0	13,0	8.702,9	31,2	2.660,0	9,0
6,0	3,9	204,5	2,8	997,4	15.579,5	9,5	0,6	407,0	235,0	13,5	9.516,8	32,5	2.800,0	9,0



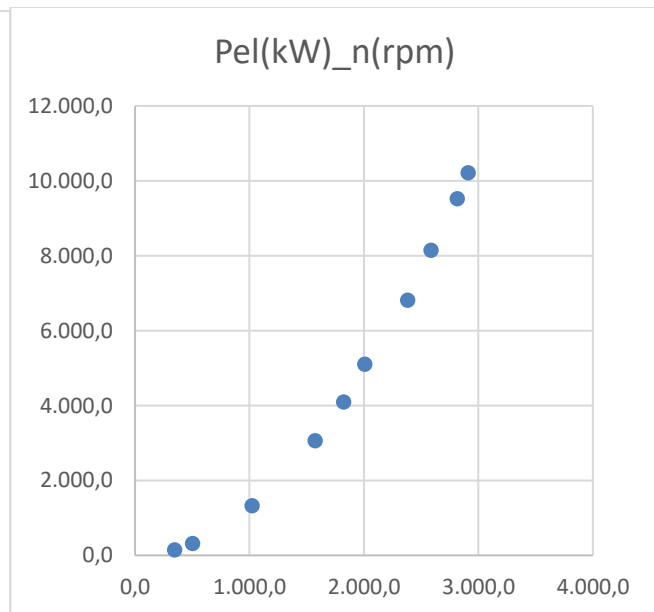
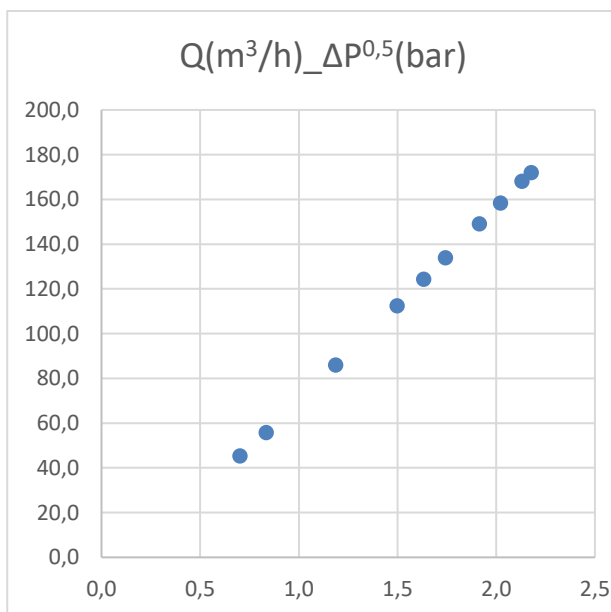
OSSERVAZIONI:

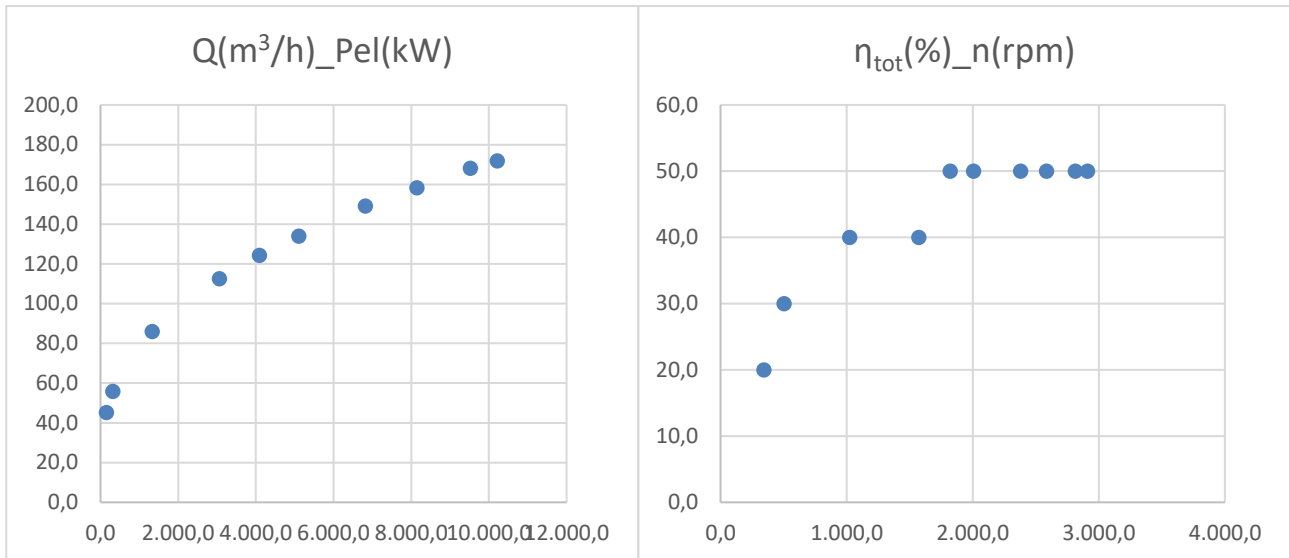
- per questa prova, la valvola di controllo è aperta al 30%, la portata è sempre proporzionale alla caduta di pressione. In questo caso, a differenza del caso precedente, la caratteristica meccanica inizia ad avere un comportamento continuo, la potenza non è cambiata poiché non è cambiata né la coppia né la velocità di rotazione, ma si nota una piccola variazione di pressione a monte ed a valle delle tubazioni.

4.1.4 prova con carico(Lampadina) da 9 kW, e LOCPOWER al 40%

Questa prova è realizzata con un numero uguale di carichi e con apertura della valvola di controllo a 40%. I dati ottenuti sono riportati in tabella:

Q(m3/h)	ΔP	Cv	Pmonte	Pvalle	Vconc (V)	Vfase(V)	I (A)	rpm	Pele(kW)	Pteo(kW)	η turb	η Tot	Carico(kW)
45,3	0,7	74,6	7,6	7,1	50,5	29,2	1,7	344,0	145,2	466,0	31,2	0,2	9,0
55,9	0,8	77,3	7,5	6,9	73,5	42,4	2,5	502,0	313,2	795,2	39,4	0,3	9,0
86,0	1,2	83,6	7,2	5,8	150,0	86,6	5,1	1.022,0	1.325,0	2.342,4	56,6	0,4	9,0
112,5	1,5	86,7	6,9	4,7	229,0	132,2	7,7	1.572,0	3.054,1	4.738,7	64,5	0,4	9,0
124,4	1,6	87,9	6,8	4,1	266,0	153,6	8,9	1.821,0	4.091,2	6.138,4	66,7	0,5	9,0
134,0	1,7	88,7	6,6	3,6	297,5	171,8	9,9	2.005,0	5.101,3	7.474,6	68,2	0,5	9,0
149,2	1,9	89,9	6,4	2,7	345,0	199,2	11,4	2.380,0	6.812,2	9.931,0	68,6	0,5	9,0
158,4	2,0	90,4	6,3	2,2	376,0	217,1	12,5	2.585,0	8.140,6	11.687,4	69,7	0,5	9,0
168,1	2,1	91,0	6,1	1,6	407,0	235,0	13,5	2.814,0	9.516,8	13.679,5	69,6	0,5	9,0
171,9	2,2	91,1	6,1	1,3	421,0	243,1	14,0	2.910,0	10.208,7	14.585,0	70,0	0,5	9,0





OSSERVAZIONI:

- Si parte inizialmente con una portata e caduta di pressione molto basse, è quindi piccolissimo il valore di potenza rigenerata al 40% di apertura della valvola. All'aumentare della portata, aumenta la caduta di pressione, e quindi la potenza recuperata per cui i valori sono $Q_{max} = 171,9 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta P = 2,2 \text{ bar}$, $P_{el} = 10,2 \text{ kW}$;
- Si noti poi l'aumento crescente dell'efficienza della turbomacchina fino al raggiungimento del 70% ottenendo un rendimento complessivo del gruppo pari al 50%.

Conclusioni

Per questa prova è stato studiato il comportamento della valvola di controllo a diversi gradi di apertura. Si può quindi affermare che la condizione che ci permette di lavorare nelle condizioni migliori è quella in cui la LOCPOWER è aperta al 40%.

4.2 PROVA CON ALTERNATORE DA 30 KW + INVERTER, ACCOPPIATO ALLA TURBINA CON CURVA IDEALE

Per quest'altra prova, si è usato un alternatore a magneti permanenti da 30 kW, con raffreddamento in aria, grado di protezione IP55, in servizio S1, flangiata B5, con classe di efficienza IE4. Quest'ultimo converte l'energia meccanica prodotta dalla turbina in energia elettrica che viene mandata all'inverter per la regolazione ed infine arriva alle pompe per il consumo. In questo caso la regolazione della turbina è fatta solo dall'otturatore (HR).

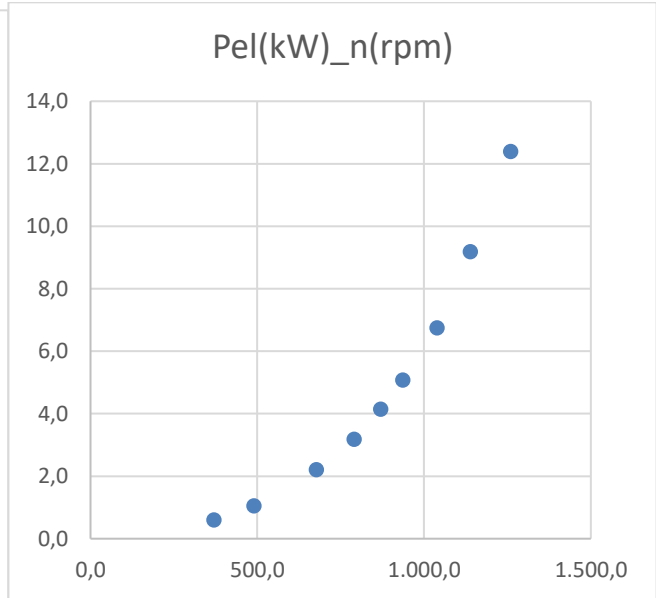
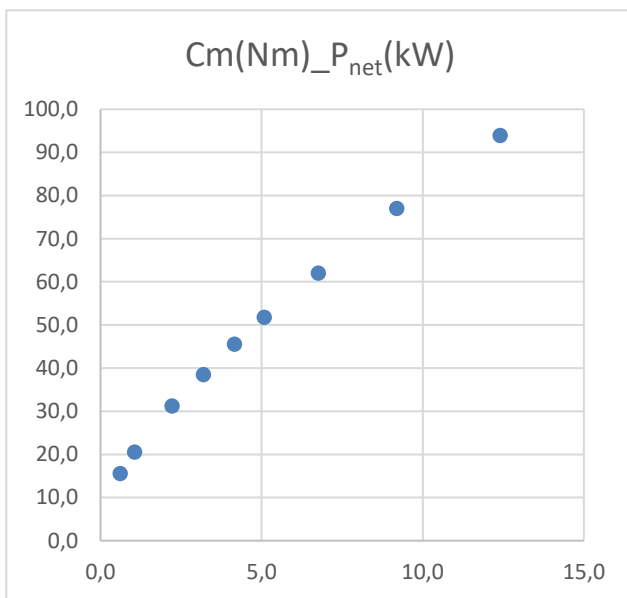
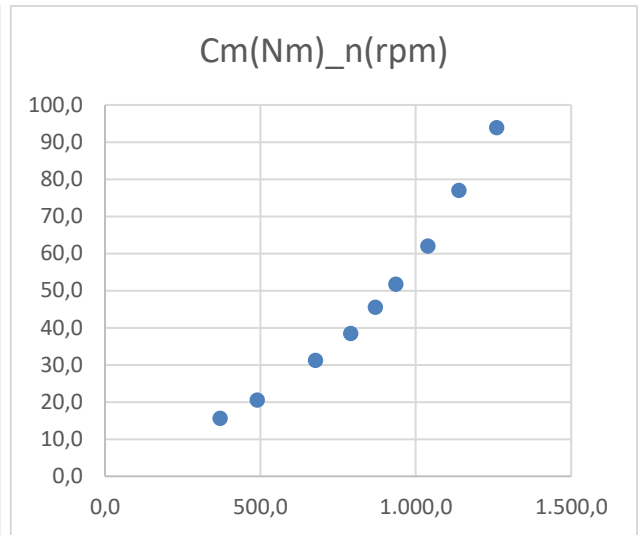
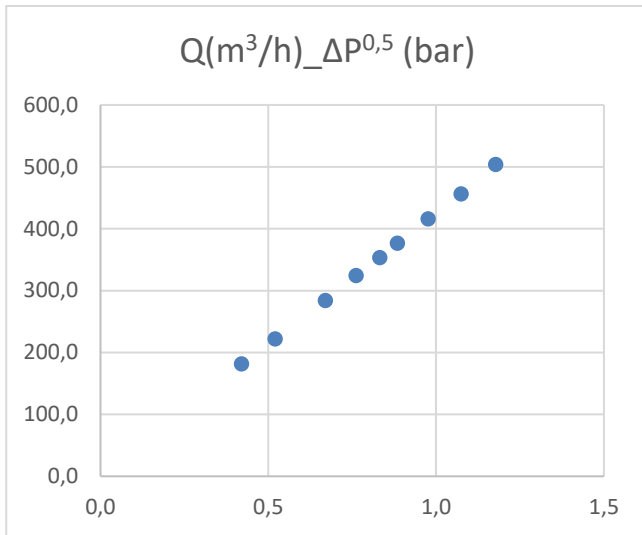
Il quadro del convertitore e delle pompe con i loro componenti reali possono essere rappresentati come:



Fig.32 quadro convertitore e quadro pompe

Per questa prova, si parte subito con apertura della LOCPOWE al 50% mentre i risultati ottenuti sono riassunti nella tabella sotto riportata:

Q [m ³ /h]	ΔP	Cv	P _{monte}	P _{valle}	Cv CALC	T _{H2O}	Densità	P _v	rpm	I(A)	Torque (Nm)	P _{AFF} (kW)	P _{INV} (kW)	P teorica	Pnetta
181,8	0,4	500,2	4,0	3,9	500,4	25,8	996,8	0,0	370,0	3,3	15,6	-0,1	0,6	0,9	0,6
222,0	0,5	493,1	4,0	3,7	493,3	25,9	996,7	0,0	490,0	4,3	20,5	0,3	1,1	1,7	1,1
284,2	0,7	489,9	3,8	3,4	490,1	26,0	996,7	0,0	677,0	6,3	31,2	1,4	2,1	3,5	2,2
324,6	0,8	492,8	3,8	3,2	493,0	26,1	996,7	0,0	790,0	7,8	38,5	2,4	3,1	5,2	3,2
353,7	0,8	491,2	3,7	3,0	491,4	26,2	996,7	0,0	870,0	9,3	45,6	3,3	4,0	6,8	4,2
376,9	0,9	492,2	3,6	2,8	492,4	26,3	996,6	0,0	936,0	10,3	51,8	4,2	4,8	8,2	5,1
416,4	1,0	492,7	3,5	2,5	492,9	26,4	996,6	0,0	1.039,0	12,5	62,1	5,8	6,5	11,0	6,8
456,6	1,1	490,8	3,4	2,2	491,0	26,5	996,6	0,0	1.139,0	15,3	77,0	8,0	8,7	14,6	9,2
503,8	1,2	494,5	3,2	1,8	494,7	26,7	996,5	0,0	1.260,0	18,7	93,9	11,1	11,7	19,3	12,4



Osservazioni:

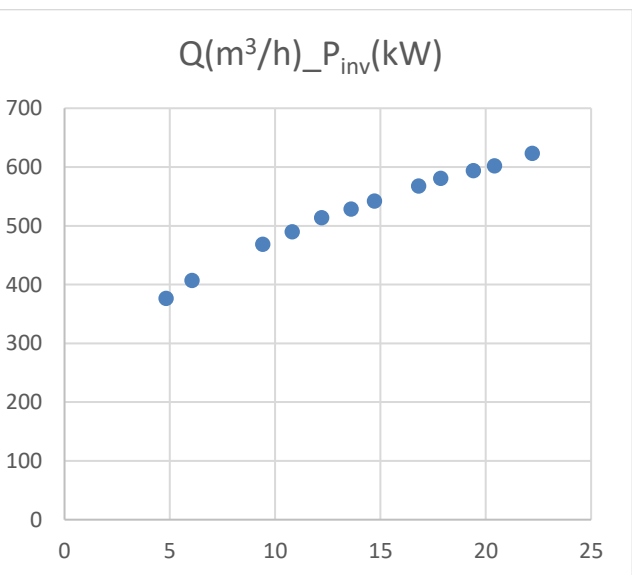
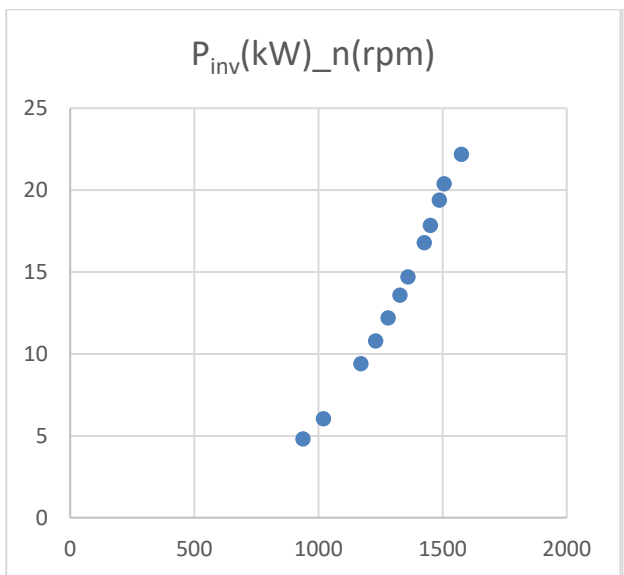
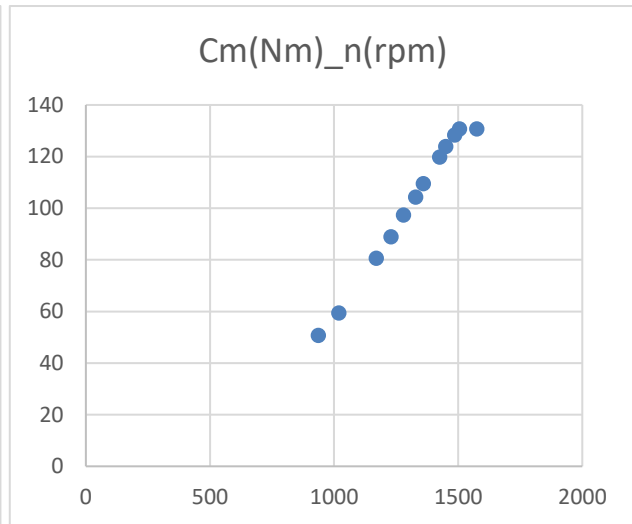
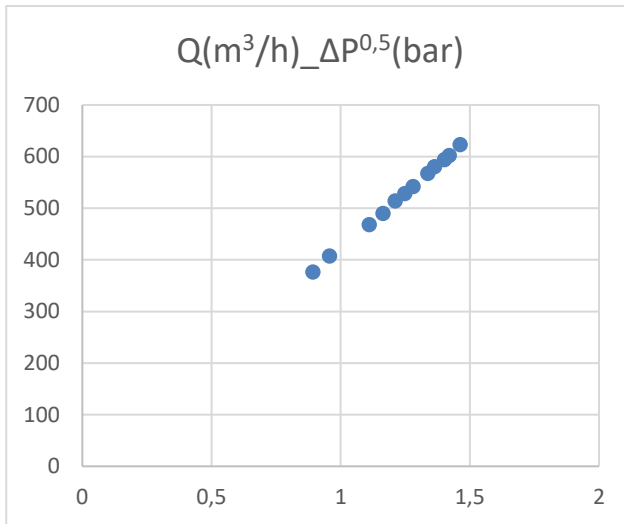
- Essendo la regolazione elettrica (ER) molto più veloce di quella idraulica (HR), dovuto al fatto che l'inverter presenta una costante di tempo più breve agendo sul parametro OFFSET rispetto alla costante di tempo dell'otturatore, la prima regolazione viene effettuata dall'inverter.
- Dato che la portata che attraversa la valvola di controllo varia proporzionalmente con la caduta di pressione della tubazione, si nota che all'aumentare della portata, aumenta la perdita di carico, e quindi anche il numero di giri dell'alternatore, ottenendo una maggiore energia rigenerata;
- Inizialmente le caratteristiche del gruppo sono $Q_{\min}=181,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta P_{\min}=0,4 \text{ bar}$, $n_{\min}=370 \text{ rpm}$, $P_{\text{INV}} = 0,6 \text{ Kw}$ che poi al 50% di apertura della valvola di controllo si ottiene i seguenti risultati $Q_f=503,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta P_f=1,2 \text{ bar}$, $n_f = 1260 \text{ rpm}$, $P_{\text{INV}} = 12\text{kW}$;

- Il coefficiente del flusso di valvola (C_v) essendo il rapporto tra la portata e la caduta di pressione decresce man mano perché nonostante la Q e la ΔP crescenti, la portata cresce più in fretta rispetto alla perdita di carico;
- Si è realizzata la prova al 50% di apertura della valvola perché è la condizione che ci garantisce le caratteristiche migliori cioè la massima potenza recuperata dalla valvola (LOCPOWER). La caratteristica meccanica ($C_m - w_m$) è crescente ma è sempre lontano della condizione nominale di funzionamento dell'alternatore.
- Si nota infine che essendo un alternatore da 30Kw, a velocità nominale di 1500 rpm, dopo la prima regolazione, non sono ancora raggiunti le condizioni nominali per cui deve intervenire la seconda regolazione (HR).

4.3 PROVA CON ALTERNATORE DA 30 KW + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO VARIABILE CON CURVA IDEALE

Questa prova viene fatta nell'obbiettivo di aumentare la portata, e quindi la caduta di pressione e cioè la potenza generata dall'alternatore ed ottenendo un recupero migliore facendo lavorare l'alternatore nelle sue condizioni nominali. Essa viene svolta in presenza del torsiometro che misura la coppia della turbina alla sua uscita e quella dell'alternatore per poi mandare in uscita un valore di coppia superiore al caso precedente. Per la regolazione della turbina essa viene fatta agendo sull'otturatore e viene chiamata regolazione idraulica (HR), un po' più lenta ma molto più precisa rispetto alla regolazione elettrica.

Q [m ³ /h]	\sqrt{Dp}	C_v	P_{monte}	P_{valle}	Temp. acqua	Densità	P_v	rpm	T_{inv} (Nm)	T_{tors} (Nm)	Pafe	P_{inv}
376,6428	0,8917	487,5722	3,8445	3,0493	28,8081	995,9524	0,042	937	50,718	53,2	4,05	4,81
407,346	0,9565	491,6015	3,7682	2,8533	29,125	995,8622	0,0426	1019	59,492	61,6	5,6	6,05
468,5305	1,1097	487,3468	3,607	2,3754	29,2772	995,8186	0,0429	1170	80,678	82	8,7	9,4
490,1769	1,1626	486,6697	3,5441	2,1925	29,4139	995,7792	0,0431	1229	89,024	90	10,1	10,8
514,0712	1,2103	490,2853	3,4747	2,01	29,5451	995,7413	0,0433	1280	97,37	96	11,7	12,2
528,5524	1,2475	489,0486	3,4168	1,8606	29,7524	995,681	0,0437	1328	104,325	103	13	13,6
542,4388	1,2794	489,3517	3,3661	1,7292	29,8731	995,6457	0,044	1360	109,568	108	14,3	14,7
567,8518	1,3368	490,2882	3,2917	1,5047	29,9841	995,6132	0,0442	1425	119,84	117	16,3	16,8
580,786	1,3625	491,9833	3,2418	1,3854	30,1067	995,5771	0,0444	1450	123,906	123	17,5	17,85
593,9864	1,4016	489,1314	3,1834	1,2191	30,1977	995,5502	0,0446	1486	128,4	130,2	19,2	19,4
602,1099	1,4194	489,5681	3,1413	1,1265	30,3694	995,4993	0,0449	1505	130,754	134	20,2	20,4
623,3893	1,4624	491,9782	3,0605	0,9219	30,491	995,4631	0,0451	1575	130,754	139,8	22	22,2



Osservazioni:

- Anche in questo caso la prova è stata fatta al 50% di apertura della valvola di controllo nell'obiettivo di venire in aiuto alla regolazione primaria;
- Si osserva quindi che rispetto al caso precedente, oltre a raggiungere condizioni nominali, è anche possibile lavorare a velocità superiore alla velocità nominale usando un'alternatore Brushless a coppia crescente, fino a raggiungere la regione a coppia costante;
- La caratteristica portata caduta di pressione è perfettamente proporzionale, ed lineamente crescente caratterizzata da una pendenza detta coefficiente di flusso di valvola (Cv);
- Con quest'ultima regolazione, si raggiunge una portata finale di $Q_f = 623,389$ m³/h, $\Delta P = 1,46$ bar, $n_f = 1575$ rpm, $P_{INV} = 22,2$ kW di energia rigenerata.

Conclusione

Per questa prova (prova con carico variabile detto anche carico attivo), si è visto che il grado di apertura migliore della valvola di controllo è raggiunto quando essa si trova a lavorare al 50% della sua apertura. Si è visto poi mediante i risultati ottenuti che per ottimizzare la possibilità di recupero di energia bisogna prima effettuare una prima regolazione elettrica, poi una seconda regolazione idraulica.

4.5 PROVA CON BRUSHLESS DA 30 KW CON COPPIA MASSIMA 214 Nm + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO VARIABILE CON CURVA IDEALE PER TEST DI CAVITAZIONE

La cavitazione: è un flusso di liquido causata da bolle d'acqua a bassa pressione a valle ($P_2 \downarrow$) e può causare gravi danni e rumori.

I risultati della cavitazione sono:

- **Il Rumore (noise) e le vibrazioni:** sono più importanti per il fluido gas rispetto al caso di fluido liquido (H_2O) causata dall'alta velocità e causa danni, disturbi e problemi legali.
- **L'erosione dei materiali; lo strozzamento del flusso; la riduzione della capacità del flusso attraverso la valvola di controllo.**

Questo fenomeno indesiderato viene rilevato tramite due principali coefficienti inversamente proporzionale fra di loro e misurato mediante un dispositivo detto **fonometro** che registra un forte gradiente del livello di rumore. I valori sono quindi:

- **Il coefficiente di cavitazione (X_f)**
- **l'indice di cavitazione (σ)**

Si distinguono quattro principali tipi di cavitazioni tali:

- ❖ la non cavitazione,
- ❖ la cavitazione incipiente,
- ❖ la cavitazione completa,
- ❖ la super cavitazione,

L'indice di cavitazione è definito come essendo l'inverso del coefficiente di cavitazione e può essere espresso come: $\sigma = \frac{1}{X_f} = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_1 - P_v}{\Delta P}$

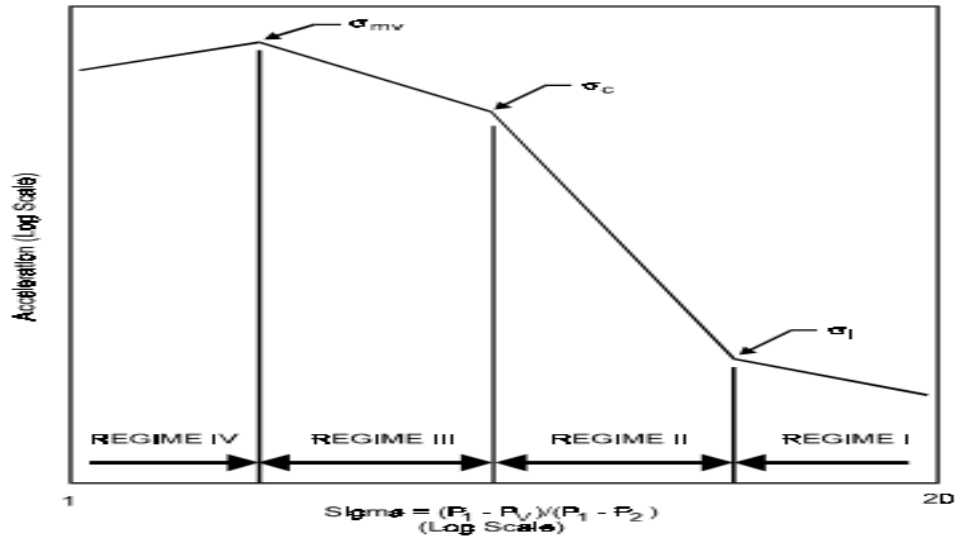
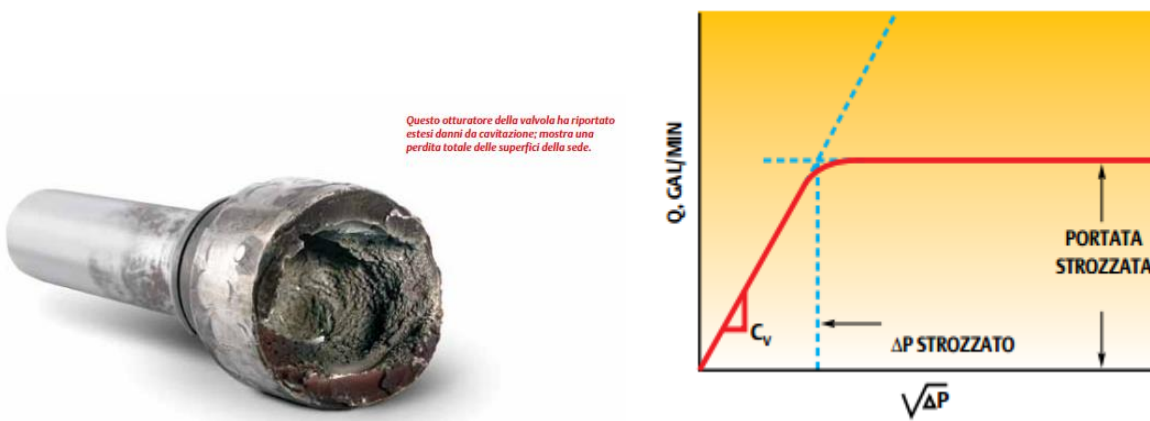


Fig.33 cavitazione della valvola di turbina

I fattori che influenzano la cavitazione sono:

- La viscosità
- La velocità del fluido (v) in m/s
- La natura del gas disciolto nel liquido
- La proprietà termica del liquido
- Il duty cycle o Ciclo di lavoro

Il problema di cavitazione può essere risolto agendo sulla perdita di carico a monte ed a valle della turbina e sulla perdita di carico dell'otturatore aumentandole e cioè aumentando la pressione a valle e riduce l'indice di cavitazione e il rumore di tubazione ($\sigma \propto 1/\Delta P$).



Questo otturatore della valvola ha riportato estesi danni da cavitazione; mostra una perdita totale delle superfici della sede.

Fig.34 danno subito dall'otturatore in seguito a successivi fenomeni di cavitazione durante la regolazione ed andamento ideale portata-caduta di pressione

4.5.A TEST SUL BRUSHLESS DA 30 KW CON OTTURATORE APERTO TRA 17-20%, IL Cv FISSO AL 50% E IL PARAMETRO OFFSET FISSO A ZERO

Questa prova viene fatta con grado di apertura della valvola di controllo detta tra 17÷20 % con coefficiente di valvola pari a $C_v=346,76$ e OFFSET fisso a zero quindi interviene solo la regolazione idraulica (HR). Le prove sono state fatte ed i risultati sono stati raccolti sul foglio Excel nel seguente modo:

Q [m ³ /h]	$\sqrt{\Delta P}$	Cv	P _{monte}	P _{valle}	T _{H2O}	ρ	P _v	D	Xf	Lp[dB]	Lp[dBA]	AccRMS	AccRMS(A)	rpm	T% _{INV}	T _{INV} (Nm)	P _{APE} (KW)	P _{INV} (KW)	OFFSET
380,33	1,18	371,31	2,83	1,42	17,94	998,47	0,03	2,72	0,37	75,02	73,07	5,47	3,05	942,00	24,20	18,31	4,25	5,00	0,00
374,71	1,21	357,91	2,86	1,40	18,01	998,46	0,03	2,63	0,38	75,08	73,22	6,19	3,51	935,00	23,90	18,08	4,05	4,80	0,00
371,37	1,22	351,47	2,87	1,38	18,14	998,44	0,03	2,59	0,39	75,64	73,59	6,77	3,89	926,00	23,30	17,62	3,95	4,75	0,00
368,12	1,24	342,82	2,90	1,35	18,20	998,43	0,03	2,52	0,40	75,46	73,88	7,34	4,24	919,00	22,90	17,32	3,85	4,65	0,00
365,66	1,26	335,44	2,93	1,34	18,27	998,41	0,03	2,47	0,41	75,43	73,80	7,91	4,66	910,00	22,60	17,10	3,75	4,50	0,00
359,06	1,29	321,63	2,96	1,30	18,40	998,39	0,03	2,37	0,42	76,01	74,62	9,01	5,38	895,00	22,00	16,64	3,55	4,31	0,00

In cui:

P_v = Pressione di vapore in bar;

L_p = la pressione sonora misurata dal fonometro ed espresso in dB;

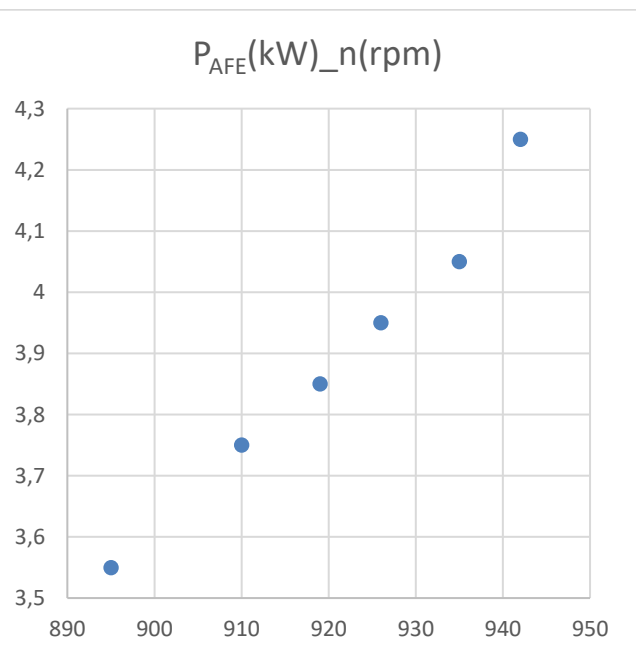
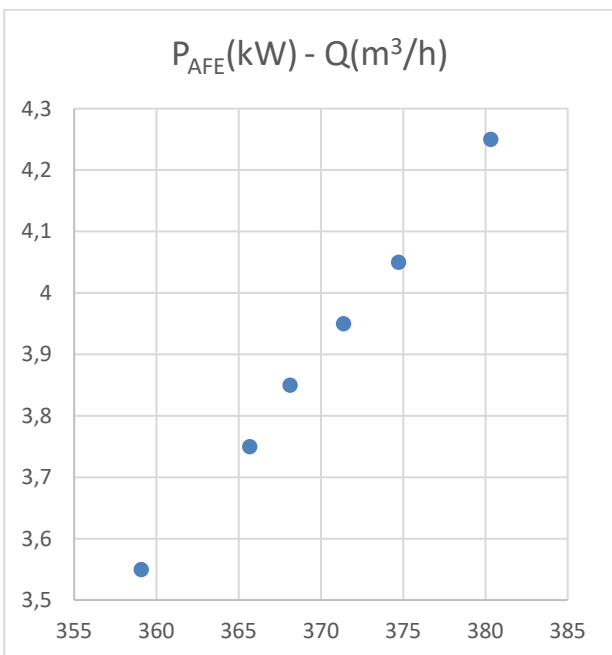
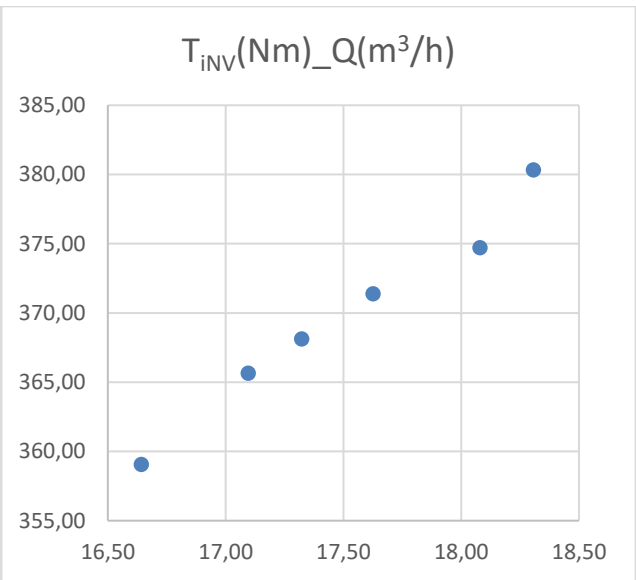
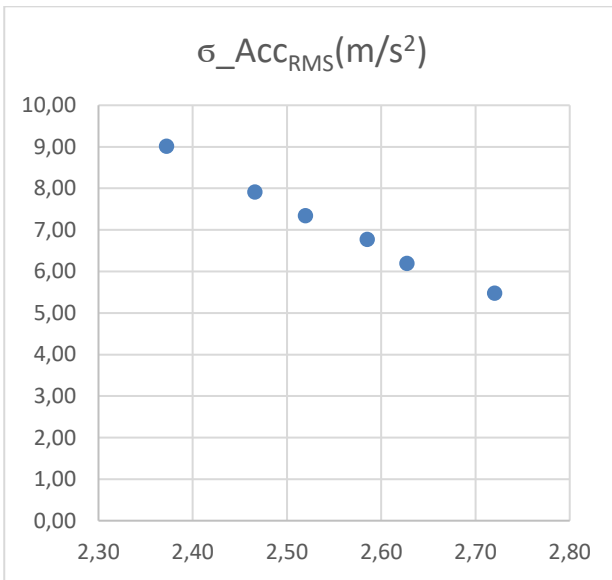
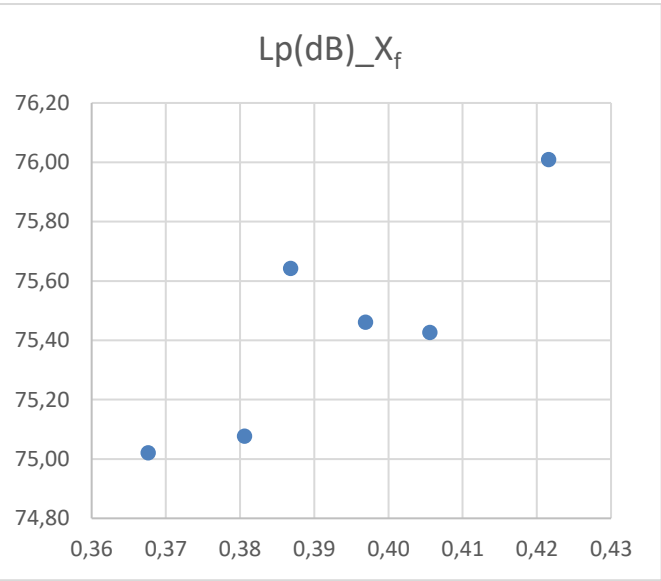
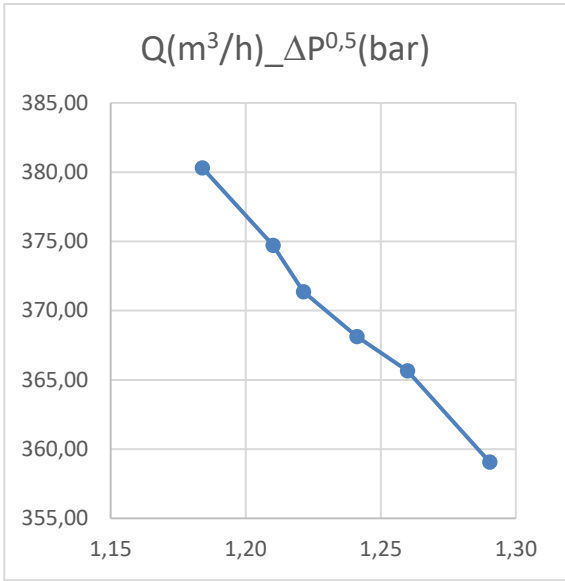
σ = indice di cavitazione con (**Xf~1/ σ**);

Xf = coefficiente di cavitazione inversamente proporzionale all'indice di cavitazione;

AccRMS = Accelerazione in m/s²;

P₁ = pressione a monte fissa;

P₂ = pressione a valle variabile.



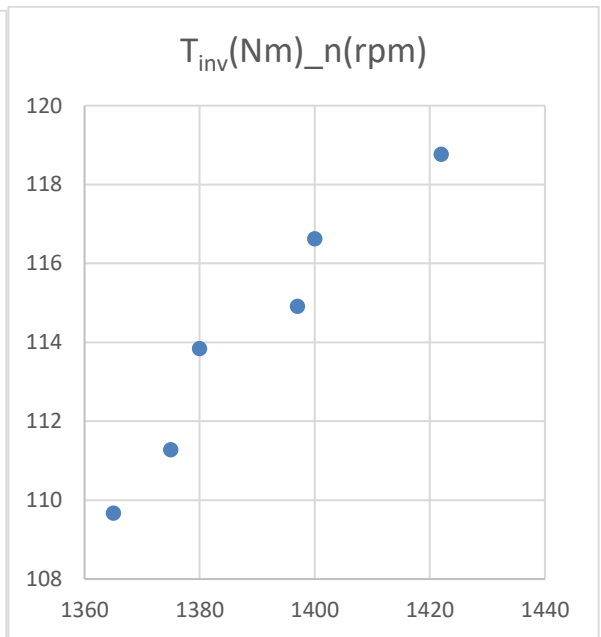
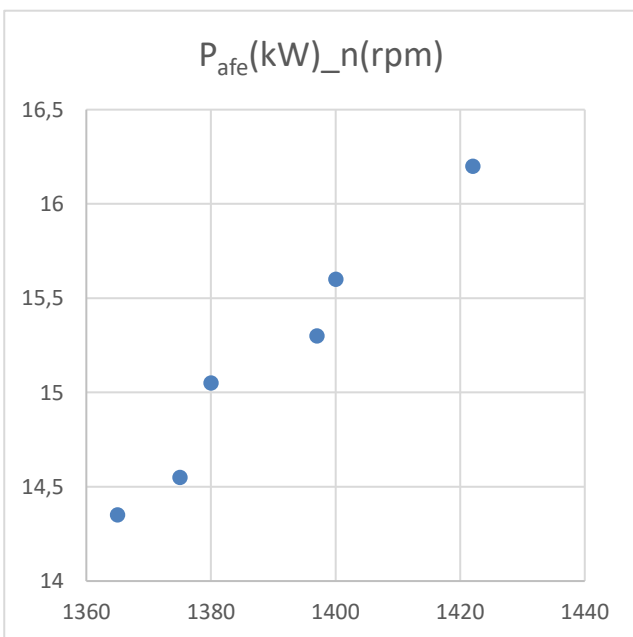
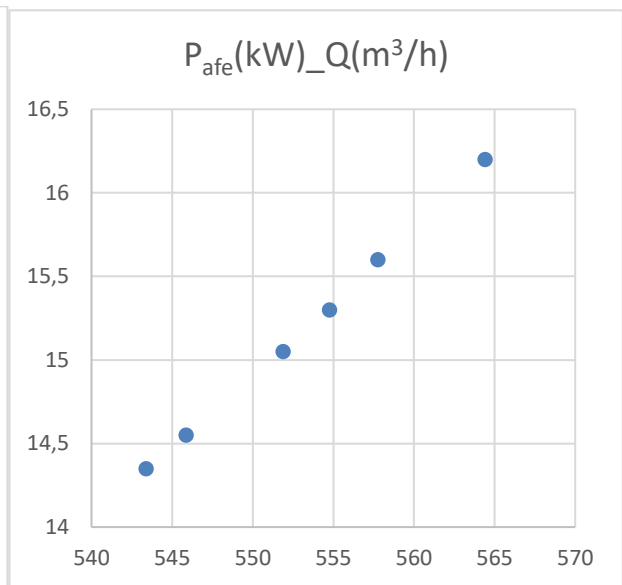
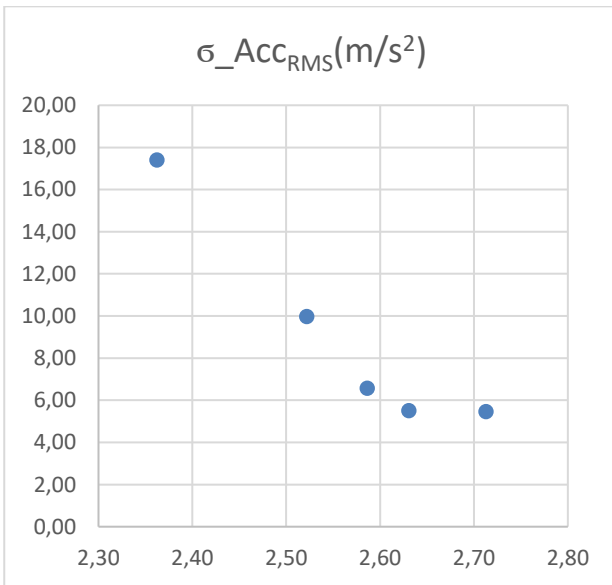
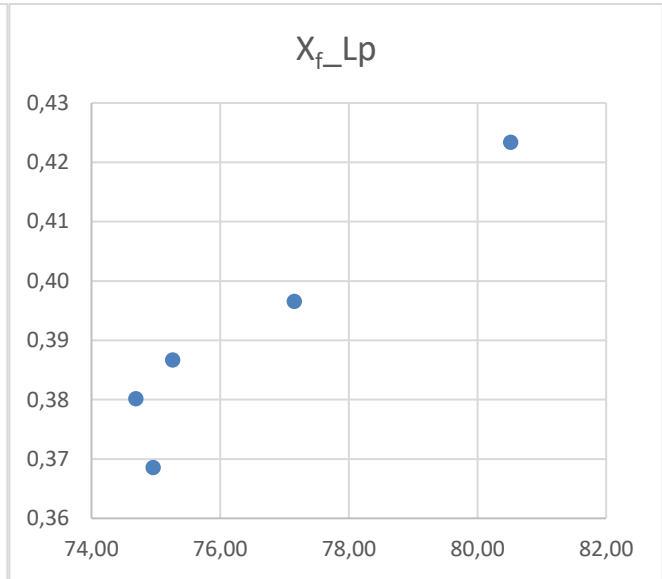
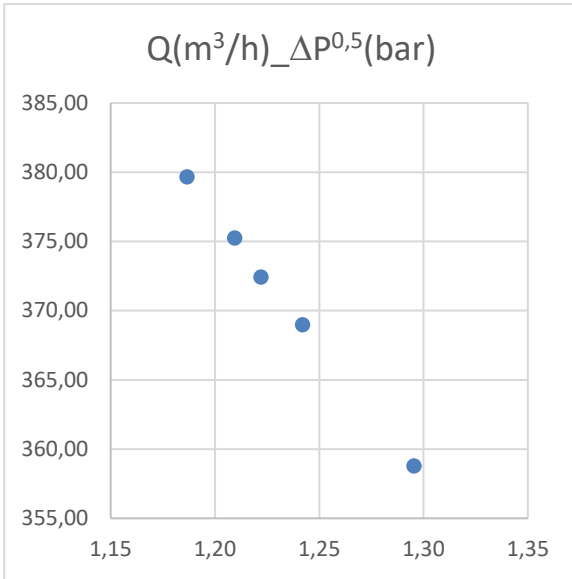
OSSERVAZIONI:

- In questa prova, si tiene fisso il coefficiente del flusso di valvola ad un valore medio $C_v = 346,76$ al 50%, si fissa a zero l'OFFSET, e quindi la regolazione della portata è sola idraulica;
- si nota quindi che la portata e la caduta di pressione non mantengono più lo stretto legame di proporzionalità come succedeva prima, ma sono fra di loro inversamente proporzionale;
- essendo la potenza convertita dall'inverter condizionata dalla quantità di flusso di fluido che attraversa la LOCPOWER, si nota una diminuzione della potenza convertita al diminuire della portata e quindi delle velocità di rotazione dell'alternatore;
- si nota poi che man mano che si svolge la prova, la temperatura dell'acqua usata inizia ad innalzarsi, mentre la densità specifica rimane pressoché costante;
- essendo l'indice di cavitazione inversamente proporzionale alla caduta di pressione, e quindi anche del coefficiente di cavitazione, quest'ultimo diminuisce all'aumentare della perdita di carico e quindi della X_f .

4.5.B TEST SUL BRUSHLESS DA 30 KW CON OTTURATORE APERTO A 20 %, IL C_v FISSO AL 50% E IL PARAMETRO OFFSET VARIBILE TRA 0-50%

Quest'altra prova viene fatta con lo stesso grado di apertura sulla valvola di recupero (LOC POWER), con il parametro offset tenuto sempre fisso ma aumentando il coefficiente della valvola fino a $C_v = 466,77$. I risultati raccolti sono presentate in tabella come

$Q [m^3/h]$	$\sqrt{\Delta P}$	C_v	P_{monte}	P_{valle}	Temp. acqua	Densità	P_v	σ	X_f	$L_p [dB]$	$L_p [dBA]$	AccRMS	AccRMS(A)	rpm	$T\%_{INV}$	$T_{INV} (Nm)$	$P_{AFE} (kW)$	$P_{INV} (kW)$	OFFSET
379,67	1,19	369,88	2,83	1,42	17,08	998,62	0,03	2,71	0,37	74,96	72,90	5,46	3,05	942,00	24,20	18,21	4,25	5,00	0,00
375,25	1,21	358,67	2,86	1,40	17,21	998,60	0,03	2,63	0,38	74,69	72,79	5,51	3,01	856,00	30,00	22,58	4,90	5,65	10,00
372,43	1,22	352,28	2,88	1,38	17,31	998,59	0,03	2,59	0,39	75,26	73,77	6,56	3,80	772,00	36,40	27,40	5,30	6,10	20,00
369,00	1,24	343,43	2,90	1,36	17,38	998,57	0,03	2,52	0,40	77,15	76,49	9,98	6,22	668,00	44,15	33,23	5,55	6,30	30,00
358,79	1,30	320,17	2,98	1,30	17,63	998,53	0,03	2,36	0,42	80,51	80,56	17,40	10,68	458,00	60,40	45,46	4,90	5,60	50,00



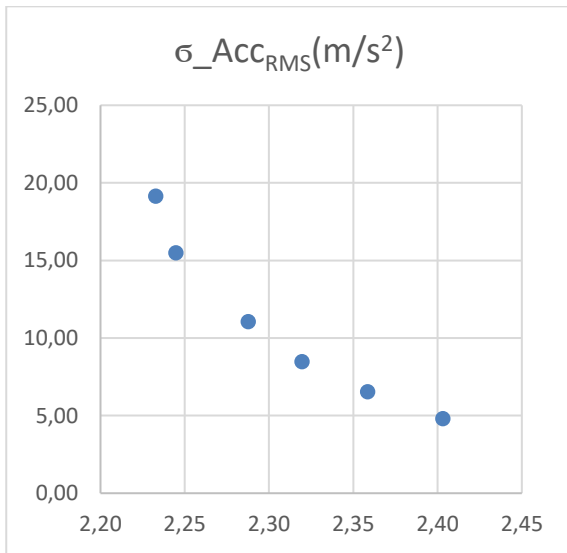
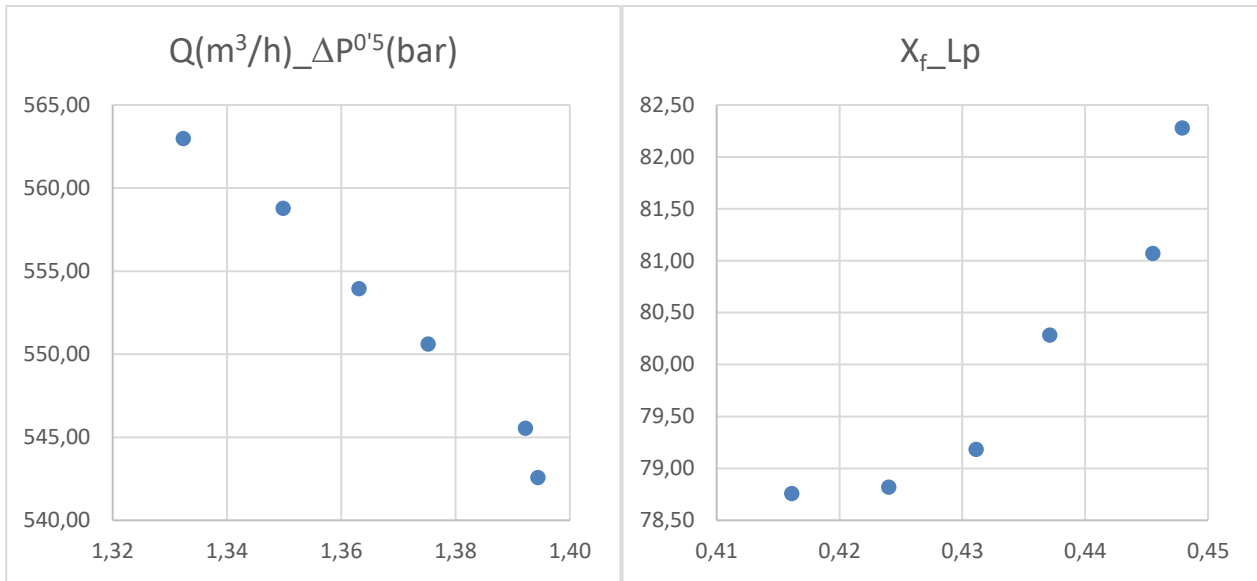
Osservazioni:

- ❖ per questa prova, la valvola di recupero è aperta al 20%, il C_v è fisso al valore medio pari a $C_v=466,77$ calcolato, la regolazione avviene agendo sull'OFFSET, cioè è una regolazione puramente elettrica;
- ❖ anche in questo caso, la portata varia inversamente proporzionale alla caduta di pressione quindi all'aumentare della Q , aumenta la ΔP , cala la velocità di rotazione dell'alternatore e quindi diminuisce anche la potenza recuperata dal convertitore nell'obiettivo di ridurre la cavitazione;
- ❖ la pressione di vapore è costante durante tutta la prova, mentre la ΔP essendo via via crescendo, fa sì che la X_f cresce anch'essa e quindi diminuisce l'indice di cavitazione;
- ❖ la massima potenza recuperata dall'inverter quando si realizza la sola regolazione elettrica raggiunge il $P_{INV} = 6,30$ kW al 30% di apertura della valvola di controllo corrispondente alla $Q=369$ m³/h e $\Delta P=1,24$ bar;
- ❖ si nota poi che l'acqua nel caso di sola regolazione elettrica è meno calda rispetto al caso di sola regolazione idraulica;
- ❖ sia con la regolazione elettrica che con la regolazione idraulica si riesce a ridurre il fenomeno di cavitazione anche se la sola regolazione idraulica impiega molto più tempo rispetto a quella elettrica.

4.5.C TEST SUL BRUSHLESS DA 30 KW CON OTTURATORE APERTO AL 50% IL C_v FISSO AL 63% E IL PARAMETRO OFFSET VARABILE TRA 0-50%

Per questa prova, la valvola di controllo è aperta al 50%, con un coefficiente di flusso di valvola calcolato di $C_v=348,88$. La differenza notevole di quest'altra prova è che si agisce sul parametro offset in modo gradualmente crescente cioè chiudendo man mano la valvola. I risultati sono riportati in tabella sotto riportata:

Q [m ³ /h]	ΔP ^0,5	C_v	P _{monte}	P _{valle}	Th _{2o}	Densità	P _v	σ	X _f	L _p [dB]	L _p [dBA]	AccRMS	iccRMS(A)	rpm	T% INV	TINV (Nm)	P _{AFE} (kW)	P _{INV} (kW)	OFFSET
562,99	1,33	488,40	3,28	1,51	18,63	998,35	0,03	2,40	0,42	78,76	76,92	4,80	3,44	1.418,00	55,30	118,34	16,35	16,50	0,00
558,78	1,35	478,44	3,31	1,49	18,89	998,30	0,03	2,36	0,42	78,82	77,03	6,54	4,39	1.350,00	60,60	129,68	16,95	17,20	10,00
553,95	1,36	469,67	3,32	1,47	19,07	998,27	0,03	2,32	0,43	79,18	77,88	8,47	5,52	1.295,00	66,40	142,10	17,45	17,80	20,00
550,62	1,38	462,74	3,34	1,45	19,30	998,22	0,03	2,29	0,44	80,29	79,05	11,05	7,25	1.235,00	71,20	152,37	17,85	18,30	30,00
545,55	1,39	452,87	3,37	1,43	19,35	998,21	0,03	2,24	0,45	81,07	80,37	15,50	9,68	1.175,00	78,40	167,78	18,01	18,70	40,00
542,59	1,39	449,70	3,36	1,41	19,56	998,17	0,03	2,23	0,45	82,28	81,75	19,15	11,83	1.125,00	84,70	181,26	18,35	18,90	50,00



Osservazioni:

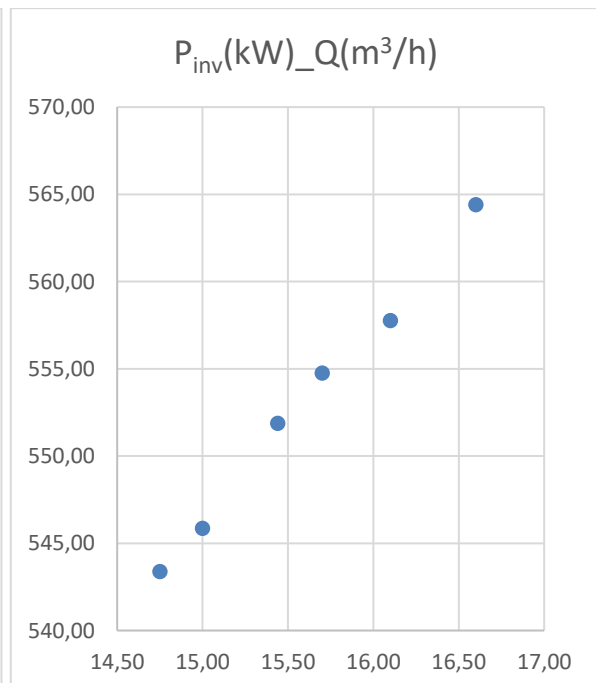
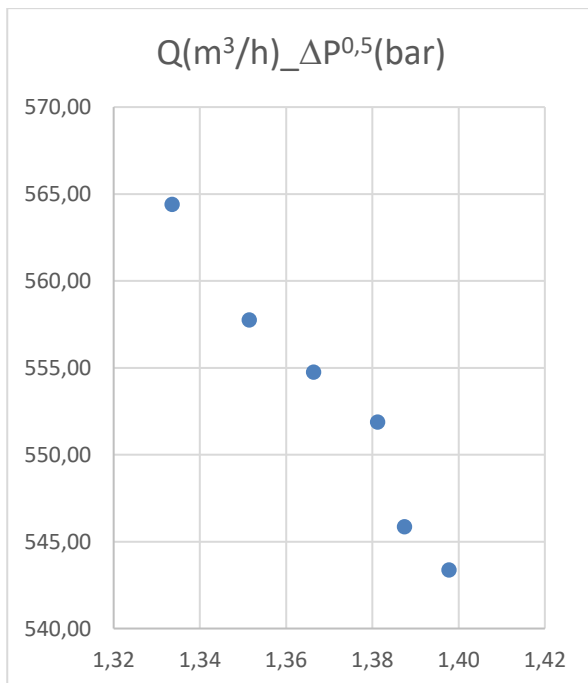
- Si nota subito una riduzione progressiva della portata dell'acqua nella condotta, corrispondente ad un aumento della caduta di pressione a monte ed a valle della valvola il che riduce il numero di giri del BRUSHLESS aumentando così la potenza dell'INVERTER alla sua uscita;
- Agendo progressivamente sull'OFFSET, si riduce la portata, si riduce il numero di giri dell'alternatore, aumenta la coppia dell'inverter e quindi anche la potenza rigenerata;
- L'indice di cavitazione diminuisce quindi all'aumentare del coefficiente di cavitazione che varia proporzionalmente con la perdita di carico;
- L'accelerazione del fluido aumenta all'aumento del parametro di regolazione mentre la pressione del vapore rimane costante.

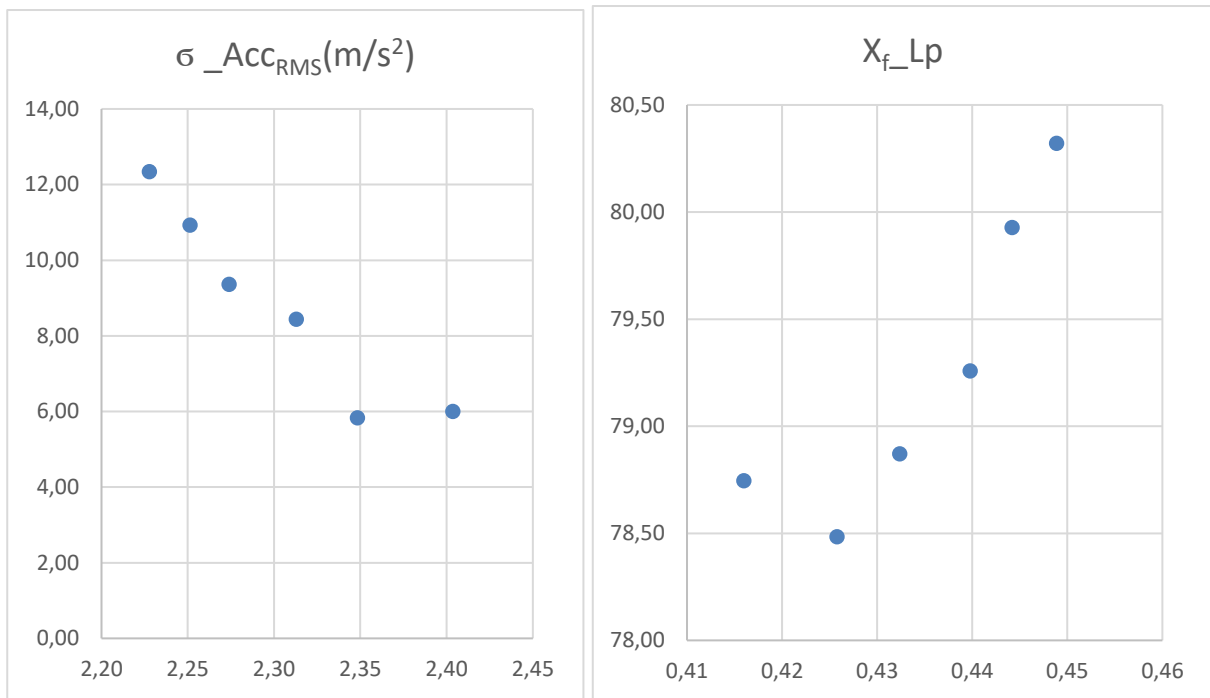
4.5.D TEST SUL BRUSHLESS DA 30 KW CON OTTURATORE VARIABILE, IL Cv FISSO AL 63% E IL PARAMETRO OFFSET FISSO

Dopo la regolazione con l'offset più veloce, si passa alla regolazione con l'otturatore meno veloce ma più precisa per determinare la zona del grafico ove si trova i punti di funzionamento che massimizzano le condizioni di lavoro della valvola mantenendo bloccato l'OFFSET.

I dati raccolti dalla prova sono riportati in tabella:

Q[m ³ /h]	$\Delta P^{0,5}$	Cv	Pmonte	Pvalle	Th2o	Densità	Pv	σ	Xf	Lp[dB]	Lp[dBA]	AccRMS	AccRMS(A)	rpm	T%INV	TINV(Nm)	PAFE(kW)	PINV(kW)	OFFSET
564,40	1,33	489,12	3,29	1,51	19,97	998,09	0,03	2,40	0,42	78,75	77,05	6,00	3,96	1.422,00	55,50	118,77	16,20	16,60	0,00
557,76	1,35	476,91	3,31	1,48	20,76	997,93	0,03	2,35	0,43	78,48	76,81	5,83	4,08	1.400,00	54,50	116,63	15,60	16,10	0,00
554,75	1,37	469,16	3,34	1,47	21,09	997,86	0,03	2,31	0,43	78,87	77,35	8,44	5,35	1.397,00	53,70	114,92	15,30	15,70	0,00
551,88	1,38	461,67	3,36	1,45	21,27	997,82	0,03	2,27	0,44	79,26	77,89	9,36	6,23	1.380,00	53,20	113,85	15,05	15,44	0,00
545,85	1,39	454,58	3,35	1,43	21,49	997,78	0,03	2,25	0,44	79,93	78,64	10,93	7,22	1.375,00	52,00	111,28	14,55	15,00	0,00
543,37	1,40	449,17	3,37	1,42	21,62	997,75	0,03	2,23	0,45	80,32	79,27	12,34	7,99	1.365,00	51,25	109,68	14,35	14,75	0,00





OSSERVAZIONI:

- Si nota che man mano che si agisce si l’otturatore chiudendolo, la portata diminuisce e la perdita di carico aumenta.
- La velocità di rotazione dell’alternatore diminuisce determinando un calo della coppia e quindi un calo della potenza rigenerata
- La pressione di vapore, l’indice di cavitazione, e l’indice di cavitazione sono identici al caso precedente

Conclusion

si è confrontato ed osservato che l’eliminazione del fenomeno di cavitazione durante il funzionamento della LOCPOWER ai bassi valori di apertura è indifferente sia usando la regolazione elettrica che la regolazione idraulica in quanto entrambi ci porta allo stesso risultato.

D’altra parte ai valori di apertura maggiori del 50%, si preferisce usare la regolazione elettrica per la risoluzione del problema.

CAPITOLO V: PROVA CON BRUSHLESS DA 10 kW + INVERTER + TORSIOMETRO A CARICO VARIABILE CON CURVA IDEALE

5.1 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 30%

È stata svolta un'altra prova con il Brushless da 10 kW sulla valvola di controllo a recupero energetico (LOC POWER). L'immagine degli avvolgimenti dell'alternatore a magnete permanente e la targa della macchina sono sotto riportati:

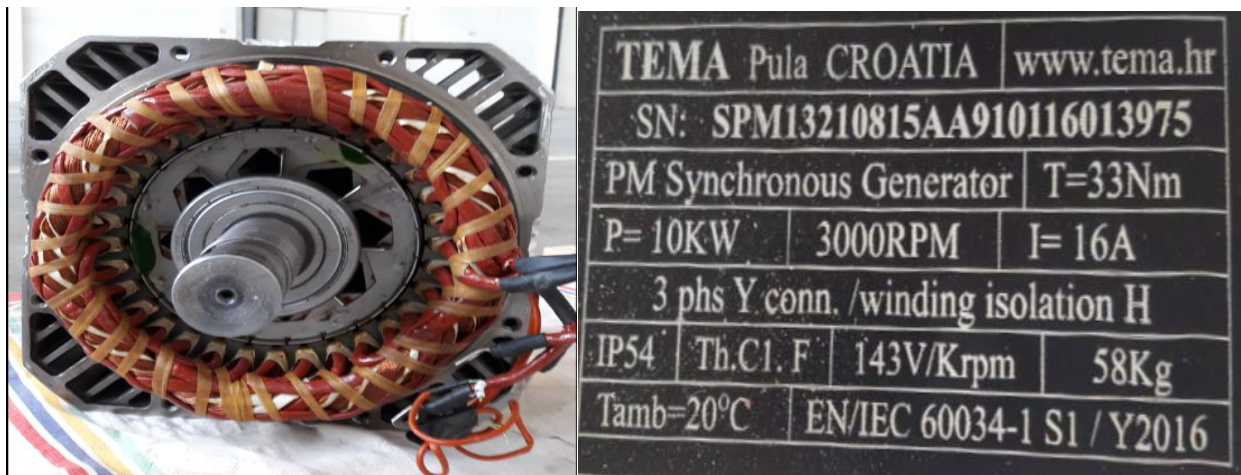
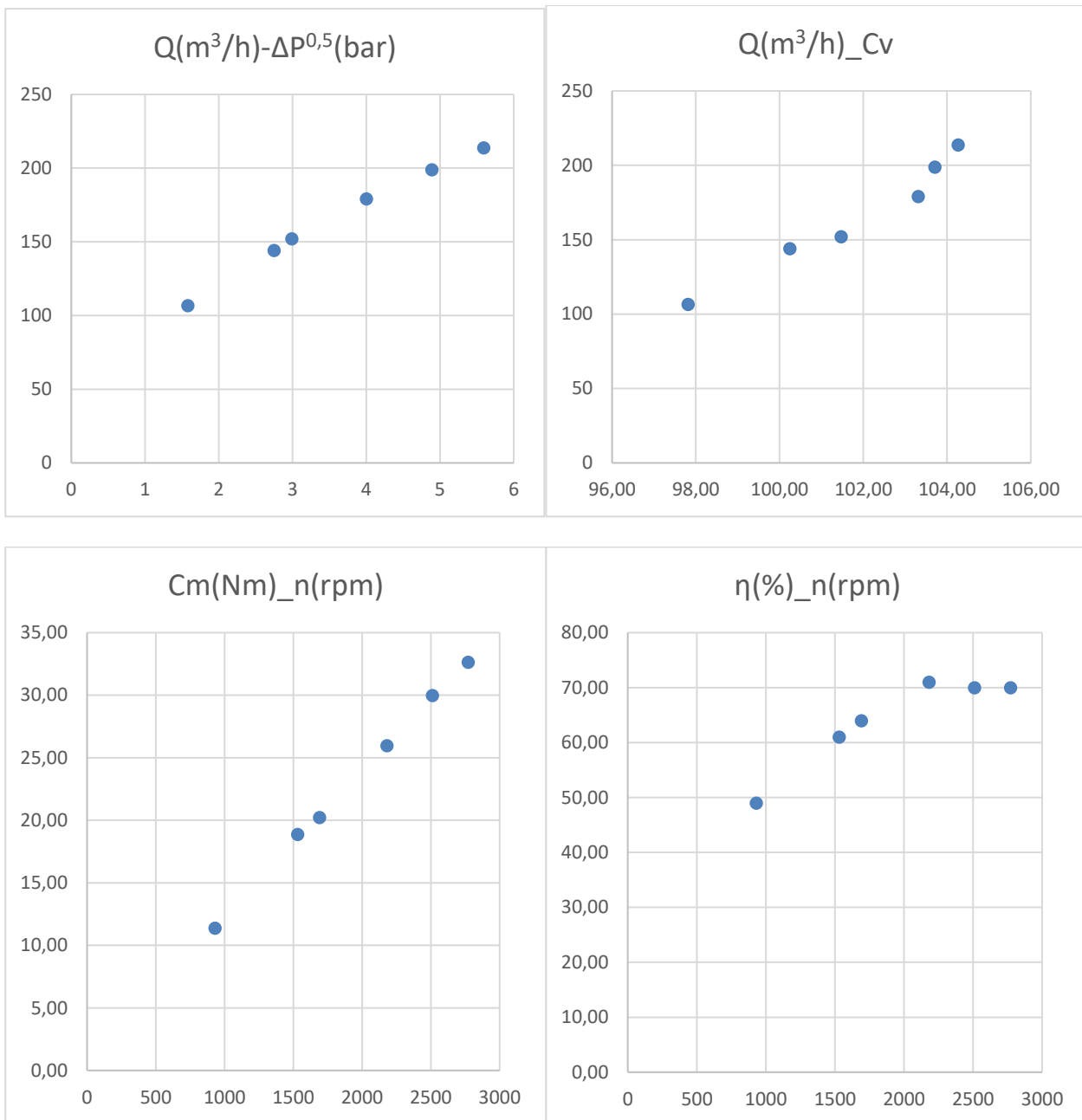


Fig. 35 Alternatore da 10kW e la sua targa

Questa è una delle prove che è stata fatta con Brushless da 10kW a MP con apertura della valvola di controllo al 30%, rapporto $Q/(\Delta p)^{0.5}$ calcolato pari al 118,73 e chiamato coefficiente del flusso di valvola. I risultati ottenuti sull'insieme del sistema di impianto sono raccolti e messi nella tabella sotto riportata:

CV	ΔP	Q m ³ /h	P1	P2	ΔP valv	Δp turb	ρ kg/m ³	Pteo(W)	Pmis(kW)	η el	Vcon(V)	V fas	I (A)	Pel(W)	Coppia	rpm	Carico kW
97,81	1,58	106,5	10,16	8,58	0,80	0,78	995,2	2.239,52	1,1	0,49	137,5	79,39	4,65	1.107,43	11,38	929	9
100,24	2,75	144	9,5	6,75	1,47	1,28	995,14	4.994,52	3	0,61	228	131,64	7,66	3.024,99	18,88	1530	9
101,47	2,99	152	9,34	6,35	1,64	1,35	995	5.568,06	3,6	0,64	249	143,76	8,3	3.579,63	20,23	1690	9
103,31	4	179	9,37	5,37	2,27	1,73	994,98	8.381,95	5,9	0,71	320	184,75	10,7	5.930,54	25,98	2180	9
103,71	4,89	198,8	11,44	6,55	2,80	2,09	993,74	11.232,05	7,9	0,70	369	213,04	12,33	7.880,43	29,98	2510	9
104,26	5,59	213,7	11,18	5,59	3,24	2,35	993,6	13.599,69	9,4	0,70	405	233,83	13,5	9.469,99	32,65	2770	9

Con questi dati, si possono ottenere le seguenti caratteristiche:



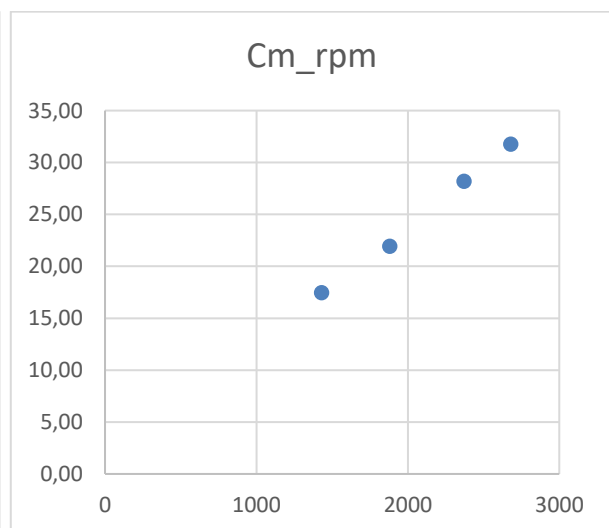
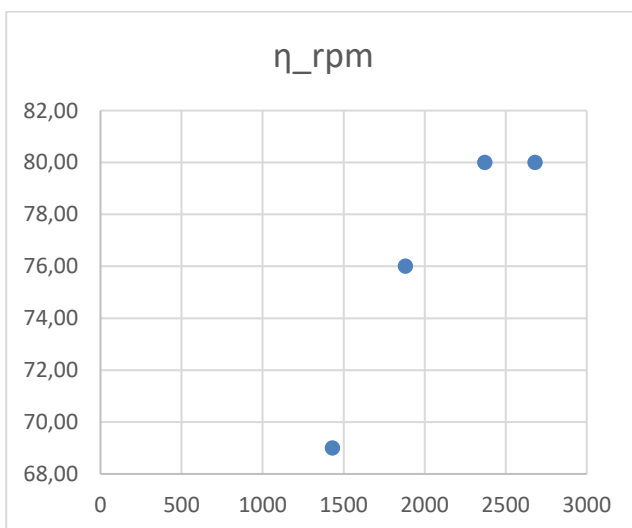
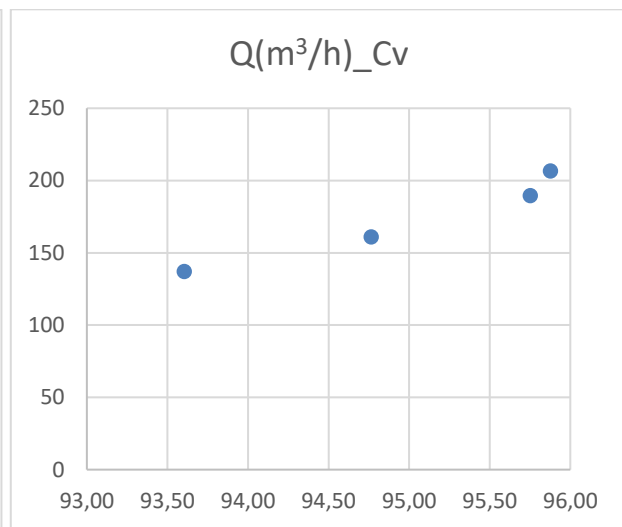
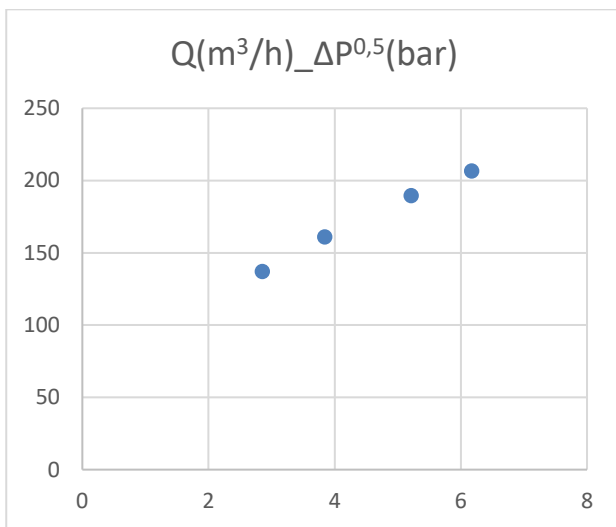
OSSERVAZIONI:

- Al 30% di apertura della valvola, con alternatore da 10kW, la portata del fluido aumenta all'aumentare della perdita di carico
- La velocità di rotazione dell'alternatore è in continuo aumento favorendo il recupero di potenza elettrica con un aumento complessivo dell'efficienza
- Si nota poi che all'aumentare della portata e quindi del numero di giri la densità specifica dell'acqua inizia a calare.

6.2 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 35%

Questa è un'altra prova fatta con Brushless da 10kW a MP con apertura della valvola di controllo del 35%, rapporto $Q/(\Delta p)^{0,5}$ calcolato pari al 101,2. I risultati ottenuti sull'insieme del sistema di impianto sono raccolte e messi nella tabella sotto riportata:

Cv	ΔP	Q m ³ /h	P1	P2	ΔP valv	ΔP turb	ρ kg/m ³	Pteo(W)	Pmis(kW)	η el	Vcon(V)	V fas	I(A)	Pel(W)	Coppia	rpm	Carico kW
93,61	2,85	137	11,4	8,55	1,8327	1,02	993,5	3.773,33	2,6	0,69	212,5	122,69	7,1	2.613,23	17,45	1430	9
94,76	3,84	161	11	7,14	2,531	1,31	993,42	5.705,16	4,3	0,76	274	158,19	9,1	4.318,70	21,94	1880	9
95,75	5,21	189,5	11,1	5,88	3,5064	1,70	993,32	8.738,58	7	0,80	348	200,92	11,6	6.991,94	28,17	2370	9
95,88	6,17	206,5	11,3	5,13	4,1637	2,01	993,23	11.213,29	8,9	0,80	393	226,90	13,1	8.917,12	31,77	2680	9



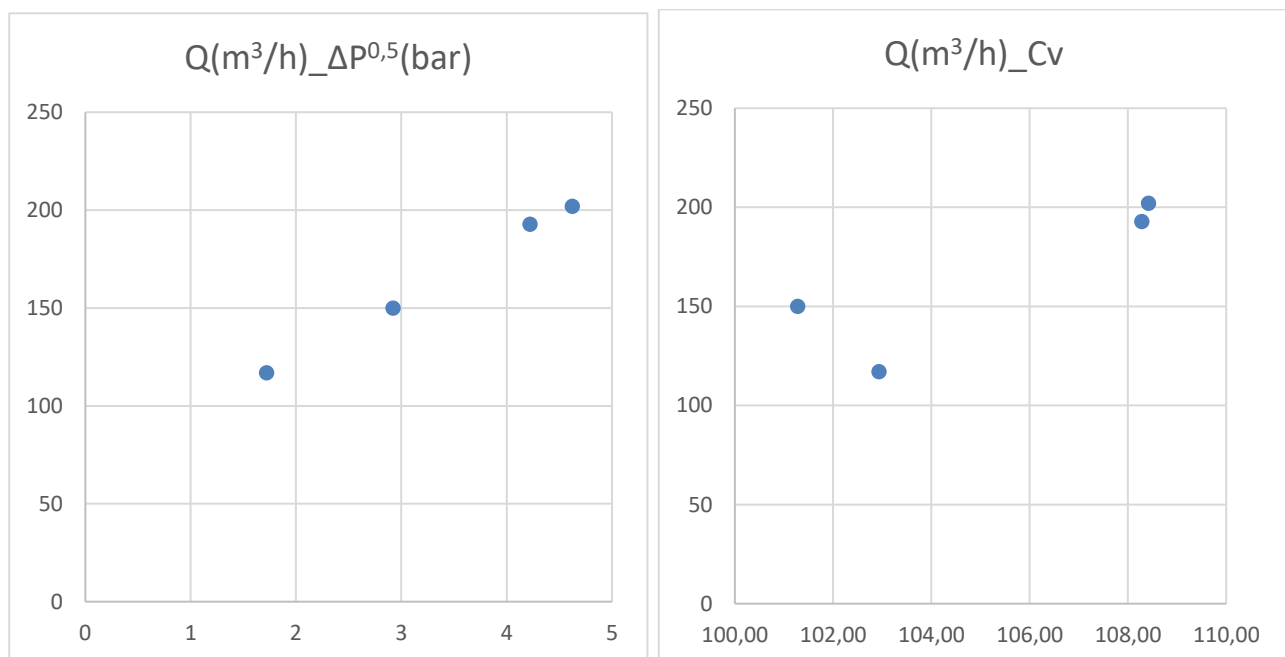
Si nota quindi che aprendo la valvola al 35%, con lo stesso alternatore, diminuisce la porta di acqua che fluisce nella tubazione, cala la perdita di carico, cala la velocità di rotazione dell'alternatore ed infine cala la potenza elettrica recuperata.

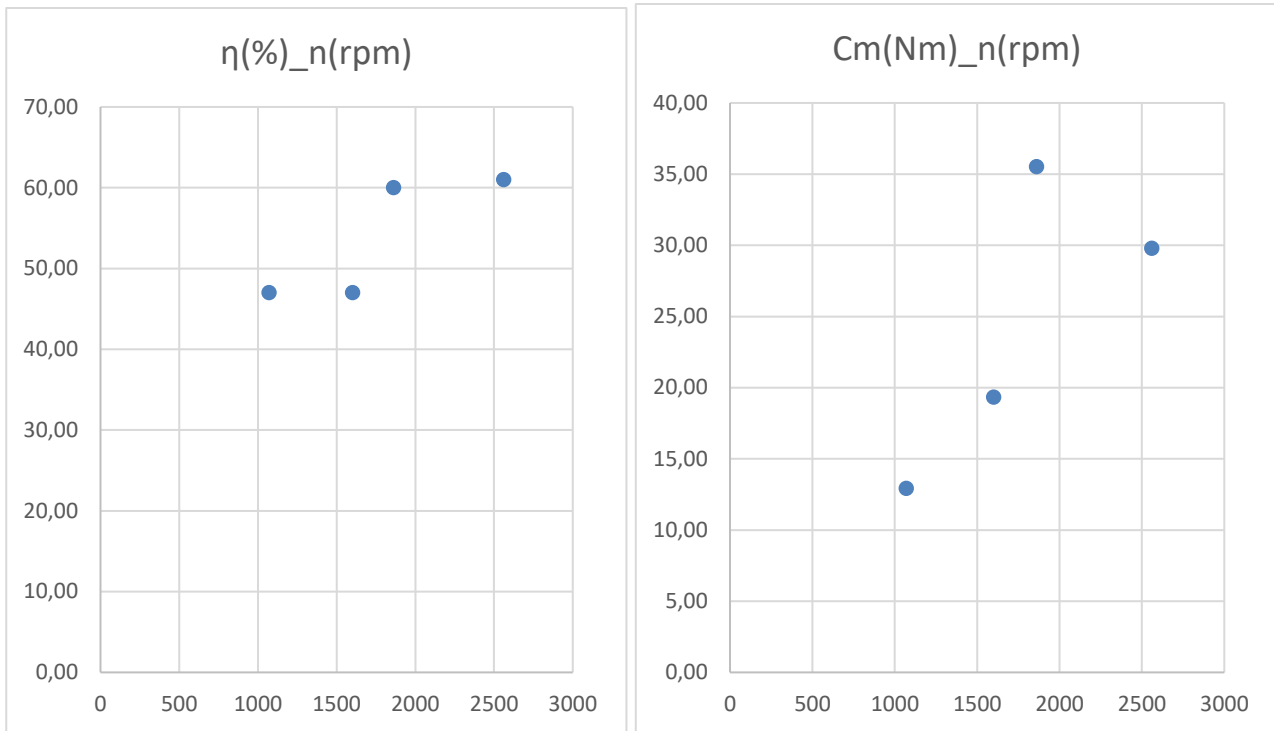
6.3 Prova con Brushless da 10 kW, con inverter e LOCPOWER aperto al 40%

Un'ultima prova viene fatta con la stessa macchina Brushless da 10kW a MP con apertura della valvola di controllo del 40%, rapporto $Q/(\Delta p)^{0.5}$ calcolato pari al 135,7. I risultati ottenuti sull'insieme del sistema di impianto sono raccolte e messi nella tabella sotto riportata:

Cv	ΔP	Q m ³ /h	P1	P2	ΔP_{valv}	Δp_{turb}	ρ_{kg/m^3}	Pteo(W)	Pmis(kW)	η_{el}	Vcon(V)	Vfas	I (A)	Pel(W)	Coppia	rpm	Carico kW
102,94	1,72	117	11,7	9,98	0,74	0,98	994,18	3.095,58	2,65	0,47	158	91,22	5,3	1.450,42	12,94	1070	9
101,28	2,92	150	11,4	8,48	1,22	1,70	994,11	6.900,25	3,6	0,47	237	136,83	7,9	3.242,92	19,35	1600	9
108,29	4,22	192,8	10,36	6,14	2,02	2,20	994,04	11.496,68	5,1	0,60	346	199,76	11,55	6.921,79	35,54	1860	9
108,42	4,62	202	11,41	6,79	2,22	2,40	993,9	13.152,84	8	0,61	372	214,77	12,4	7.989,60	29,80	2560	9

Con questi dati, si possono ottenere le seguenti caratteristiche:





- È quindi evidente che le caratteristiche della valvola sono diminuiti rispetto al caso con apertura al 35% ed ancora peggio rispetto al caso con l'apertura al 30%.
- Quindi per avere più potenza recuperata, è sufficiente tenere basso il grado di apertura della valvola e facendo scorrere più fluido oppure si può anche usare alternatori di taglia superiore.

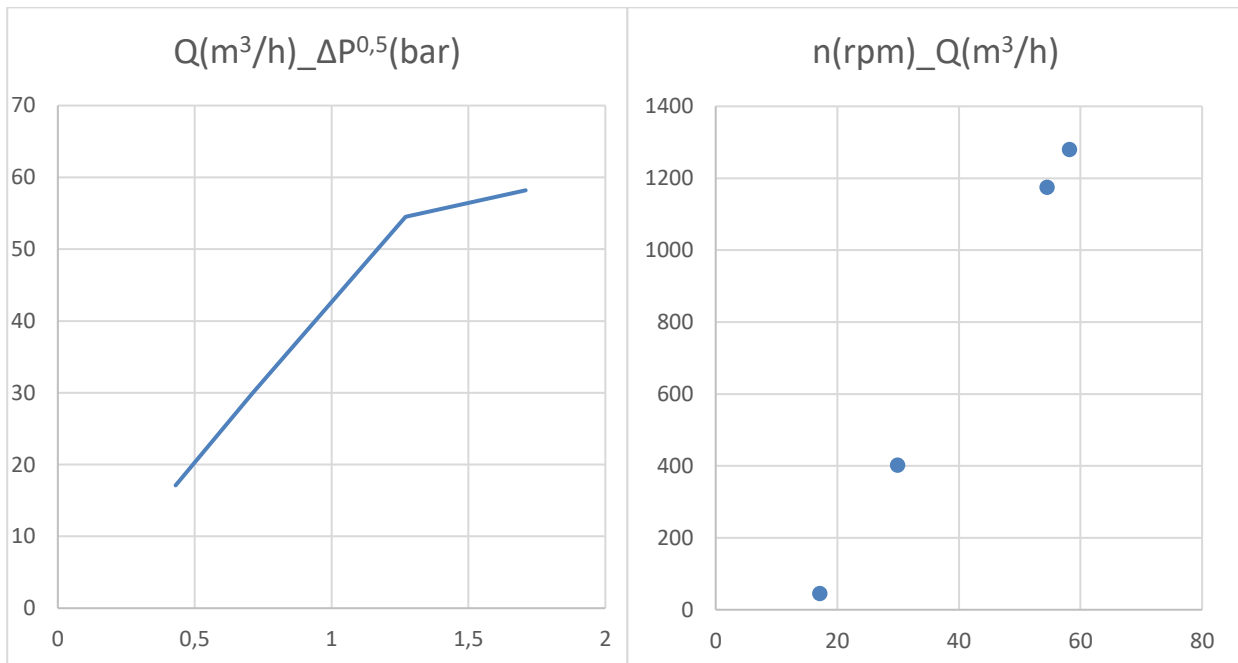
Conclusion

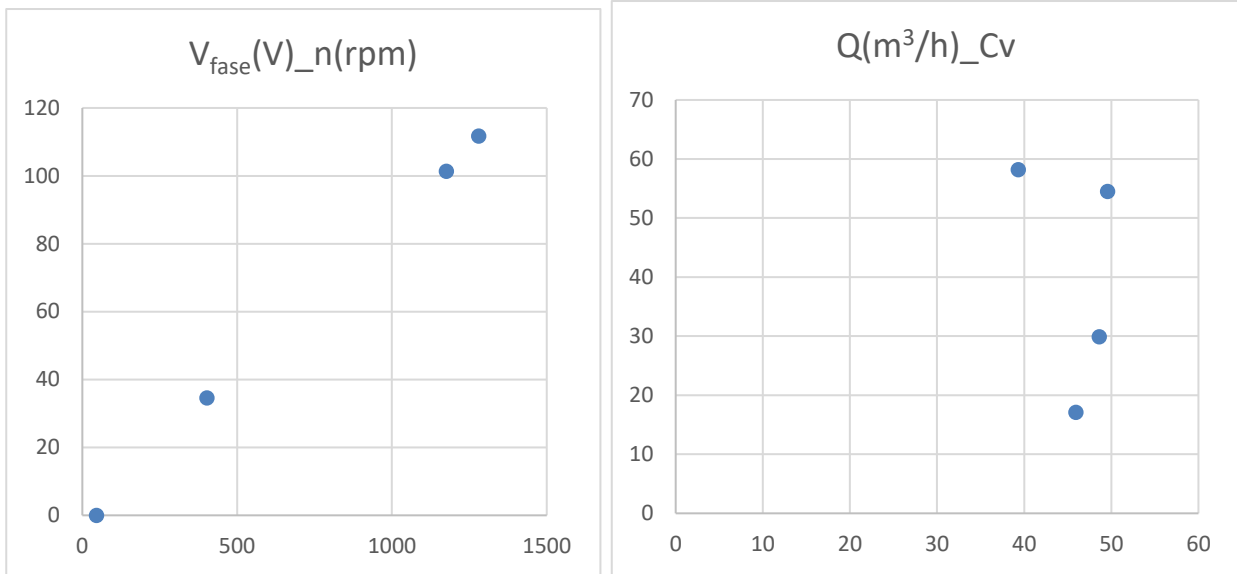
CAPITOLO VI: PROVE SVOLTE CON TURBINA A VUOTO POI CON CARICO DA 9 kW

5.1.1 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 10%, valore medio del $C_v=45,85$ e rapporto $Q/\Delta P^{0,5}=50,7$

I risultati di questa prova sono raccolti nella tabella seguente:

Q (m ³ /h)	$\sqrt{\Delta P}$	C_v	P_{monte}	P_{valle}	ΔP_{valv}	Δp_{turbom}	T_{H_2O}	Densità	P_v	Vconc.(V)	Vfase(V)	rpm
17,1016	0,43	45,928	4,1204	3,9354	0,11	0,07	27,3429	996,358	0,0396	0	0	45
29,8937	0,71	48,607	4,0751	3,5708	0,35	0,16	30,048	995,594	0,0443	60	34,64102	402
54,5277	1,271	49,555	3,9685	2,3543	1,16	0,46	30,1558	995,563	0,0445	175,6	101,3827	1175
58,199	1,709	39,325	3,9399	1,0197	1,32	1,60	30,0943	995,581	0,0444	193,6	111,775	1280

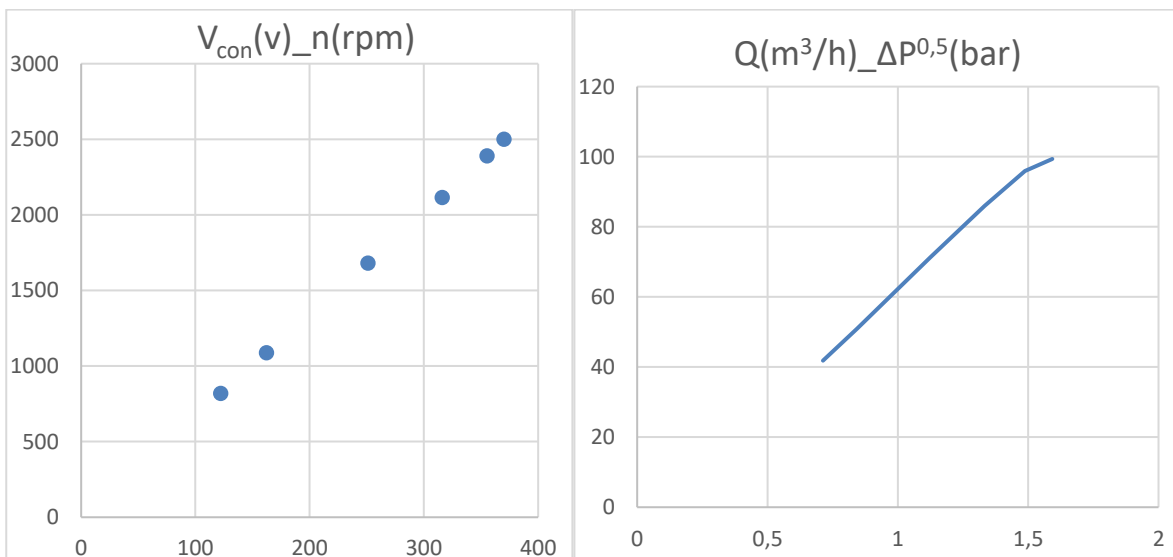


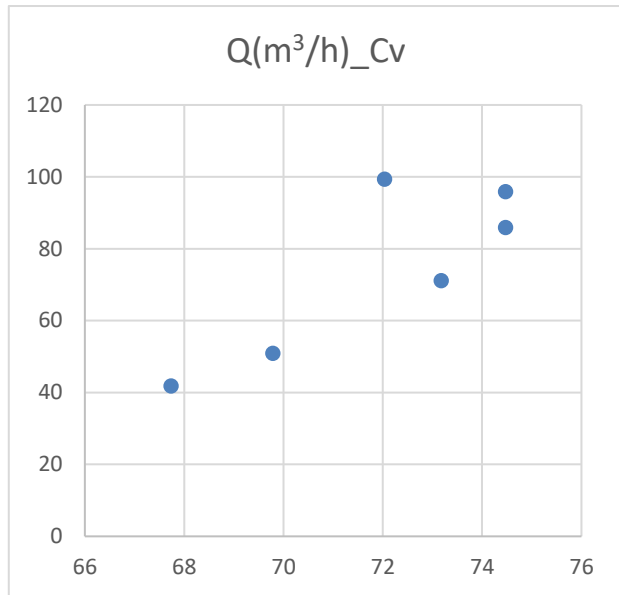
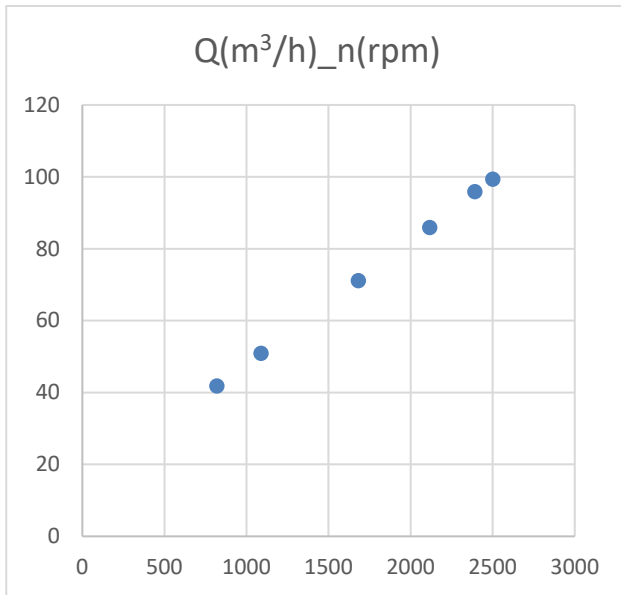


5.1.2 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 20%, $c_v=71,95$, e $Q/\Delta P^{0,5}=71,45$

I risultati all'apertura del 20% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina in assenza di carico sono dati in tabella:

Q (m³/h)	$\sqrt{\Delta P}$	C_v	P_{monte}	P_{valle}	ΔP valv	Δp turbom	T_{H_2O}	Densità	P_v	Vconc(V)	Vfase(V)	rpm
41,8226	0,7128	67,74015	4,0244	3,5162	0,34	0,17	30,162	995,5606	0,0445	122	70,43673	818
50,9227	0,8425	69,79006	3,9855	3,2757	0,51	0,20	30,199	995,5498	0,0446	162	93,53074	1088
71,1545	1,1227	73,18072	3,8747	2,6143	0,99	0,27	30,225	995,5423	0,0446	251	144,9149	1680
85,9396	1,3325	74,47179	3,7751	1,9997	1,45	0,33	30,254	995,5336	0,0447	316	182,4427	2115
95,916	1,4871	74,47159	3,708	1,4965	1,80	0,41	30,309	995,5174	0,0448	355	204,9593	2390
99,3591	1,5926	72,03451	3,6791	1,1427	1,93	0,60	30,327	995,5119	0,0448	370	213,6196	2500

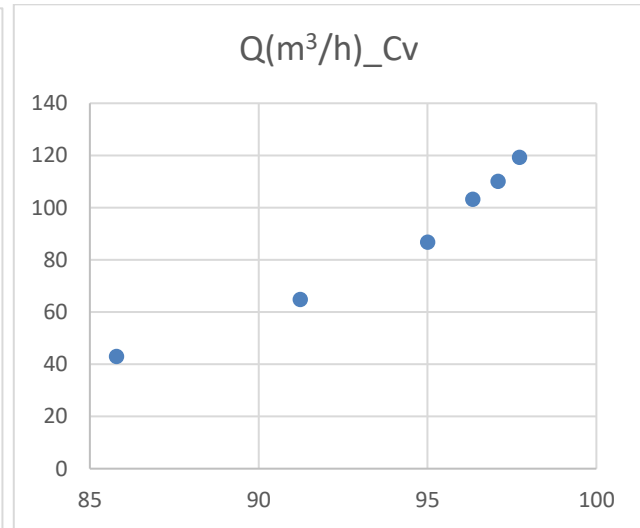
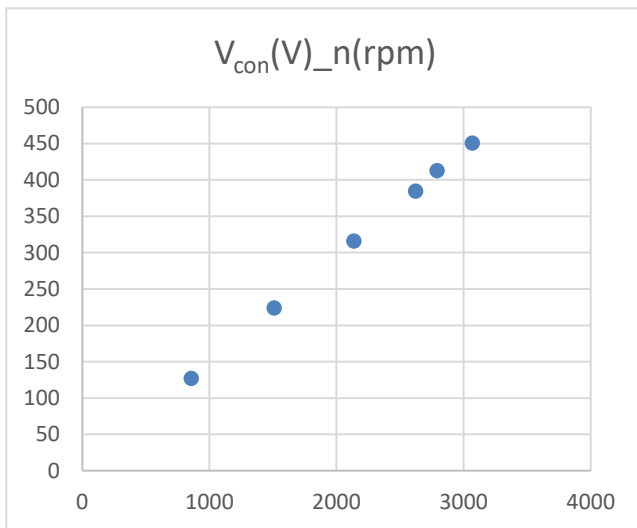
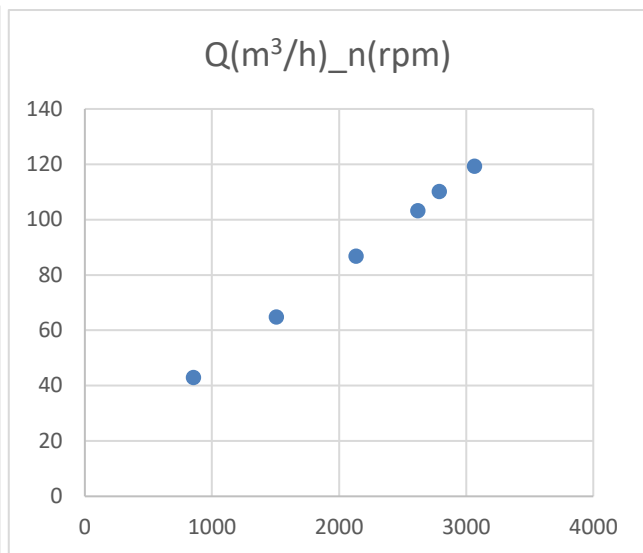
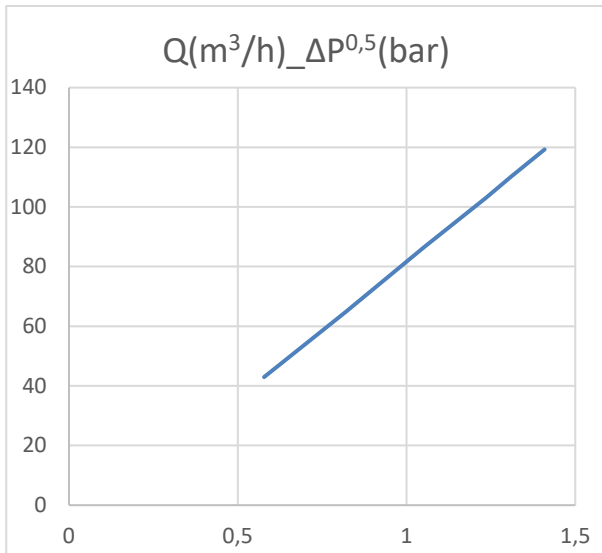




5.1.3 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 30%, Cv=93,86; $Q/\Delta P^{0,5}=100,1$

I risultati all'apertura del 30% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina in assenza di carico sono dati in tabella:

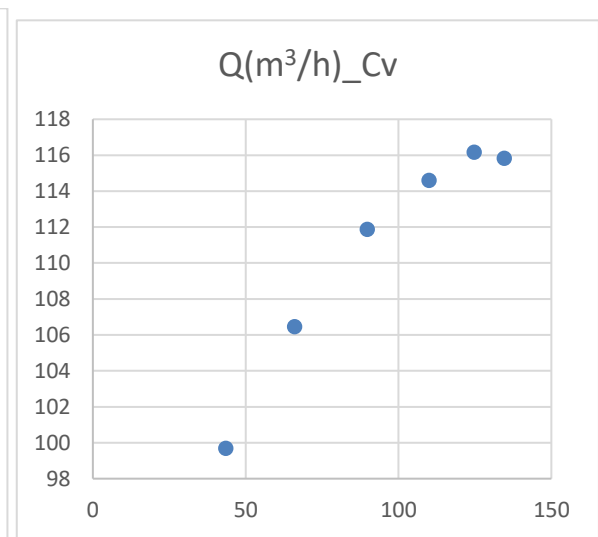
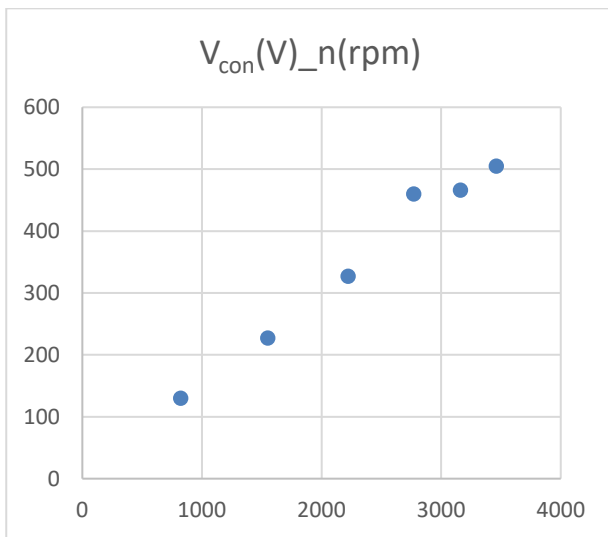
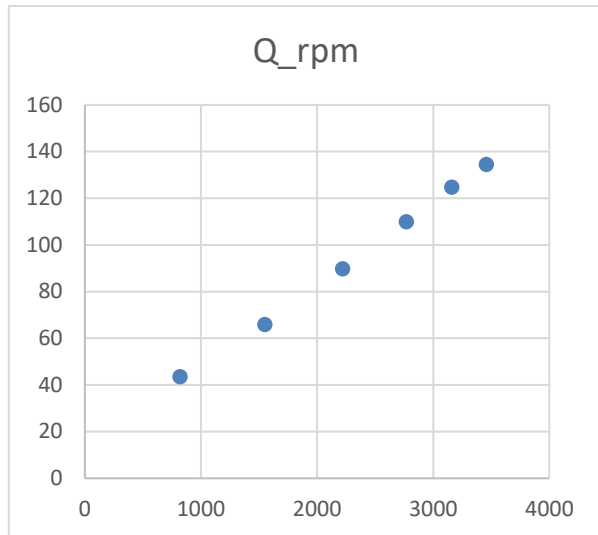
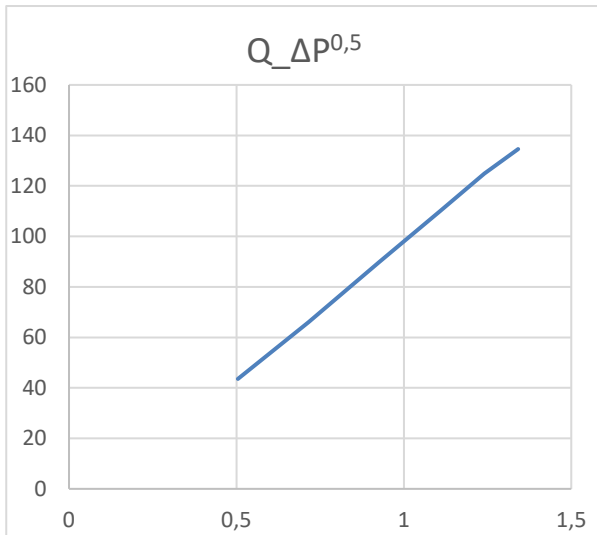
Q (m³/h)	$\sqrt{\Delta P}$	Cv	P _{monte}	P _{valle}	ΔP valv	Δp turbom	T _{H2O}	Densità	P _v	Vconc(V)	Vfase(V)	rpm
42,948	0,578	85,7905	4,0216	3,6875	0,18	0,15	30,4383	995,4788	0,045	127	494,2118	856
64,7638	0,8197	91,2315	3,9046	3,2328	0,42	0,26	30,4746	995,468	0,0451	223,8	870,6442	1508
86,7434	1,0541	95,0103	3,7799	2,6687	0,75	0,36	30,5054	995,4588	0,0451	316	1232,643	2135
103,1547	1,2362	96,3414	3,6545	2,1262	1,06	0,47	30,5396	995,4486	0,0452	385	1512,658	2620
110,0962	1,3093	97,0884	3,6129	1,8987	1,20	0,51	30,5718	995,439	0,0453	413	1610,807	2790
119,2747	1,4092	97,7244	3,539	1,5532	1,41	0,57	30,6244	995,4232	0,0454	451	1770,156	3066



5.1.4 Test con turbina a vuoto, grado di apertura della valvola al 40%, $C_v=110,77$; $Q/\Delta P^{0,5}=135,88$

I risultati all'apertura del 30% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina in assenza di carico sono dati in tabella:

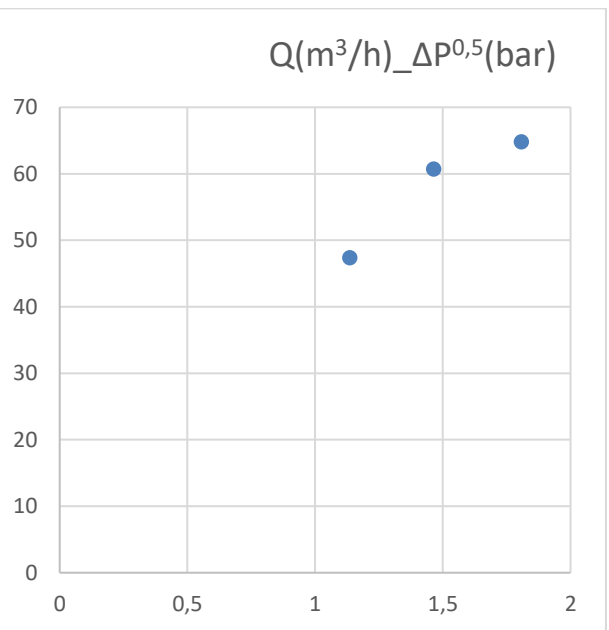
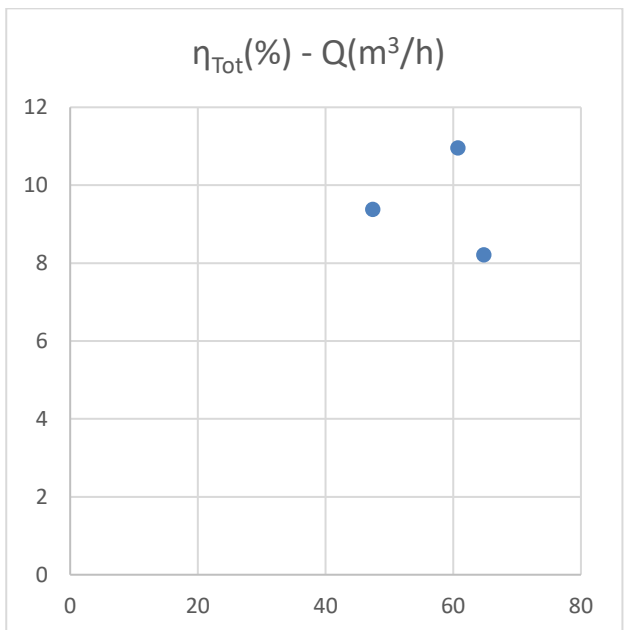
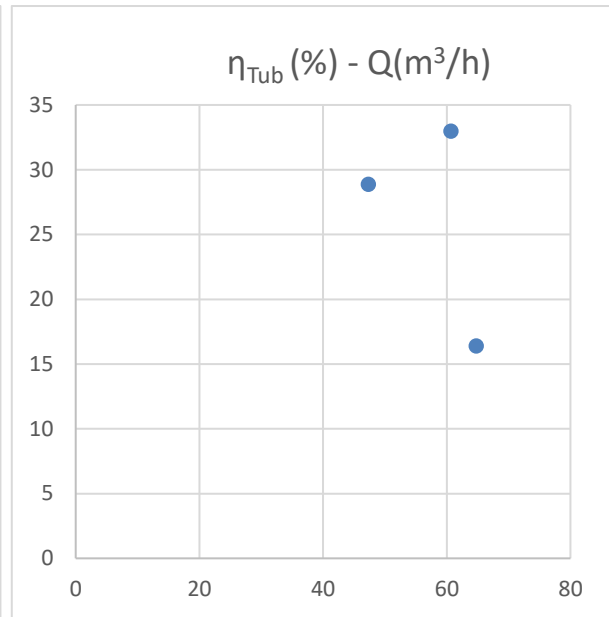
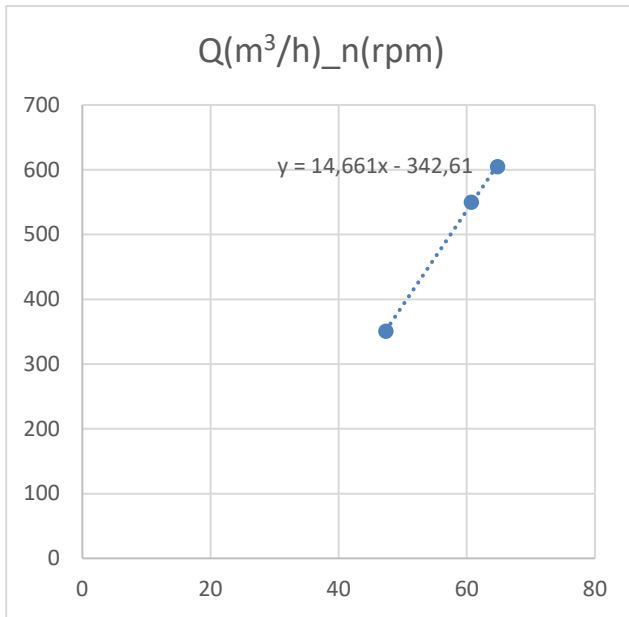
Q (m ³ /h)	$\sqrt{\Delta P}$	Cv	P _{monte}	P _{valle}	ΔP valv	ΔP turbom	T _{H2O}	Densità	P _v	Vconc(V)	Vfase(V)	rpm
43,5439	0,5044	99,688	4,0248	3,7705	0,10	0,15	31,131	995,2704	0,0464	130	75,05553	820
66,0075	0,7157	106,47	3,9074	3,3951	0,24	0,28	31,156	995,2628	0,0464	227	131,0585	1550
89,8491	0,9271	111,88	3,7484	2,8888	0,44	0,42	31,1923	995,2517	0,0465	327	188,7935	2220
110,0579	1,1087	114,6	3,6049	2,3757	0,66	0,57	31,2244	995,242	0,0466	460	265,5811	2770
124,8318	1,2405	116,17	3,4929	1,954	0,84	0,69	31,2731	995,2271	0,0467	466	269,0452	3160
134,5876	1,3414	115,83	3,4193	1,6199	0,98	0,82	31,3355	995,208	0,0468	505	291,5619	3460



5.2.1 Test con carico da 9 kW, grado di apertura della LOC POWER a 10%, $Q/\Delta P^{0,5}=50,7$

I risultati all'apertura al 10% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina accoppiato al carico sono dati in tabella:

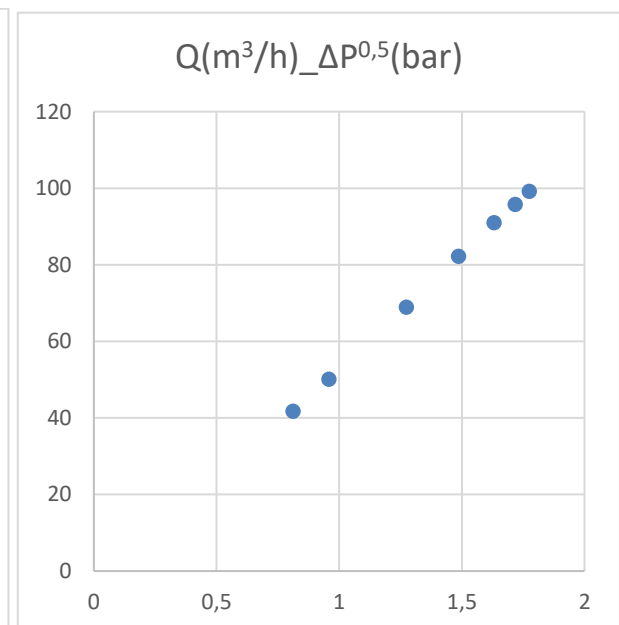
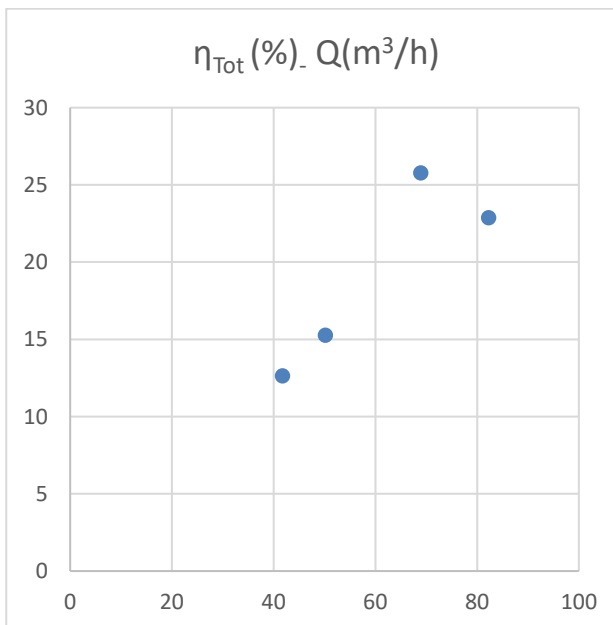
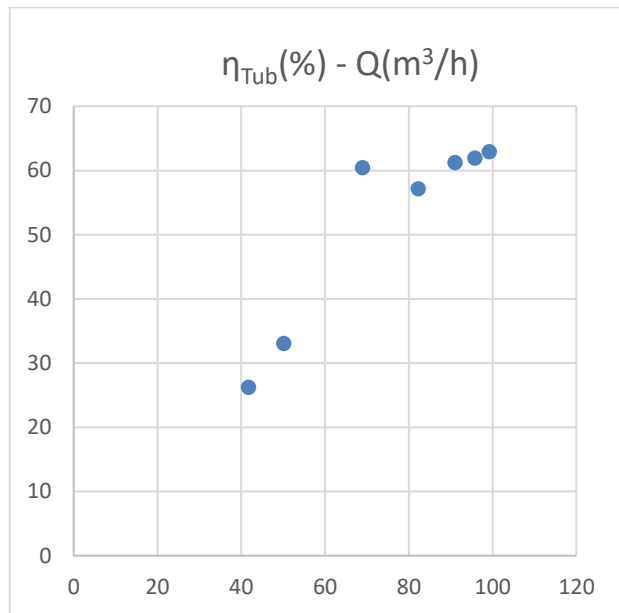
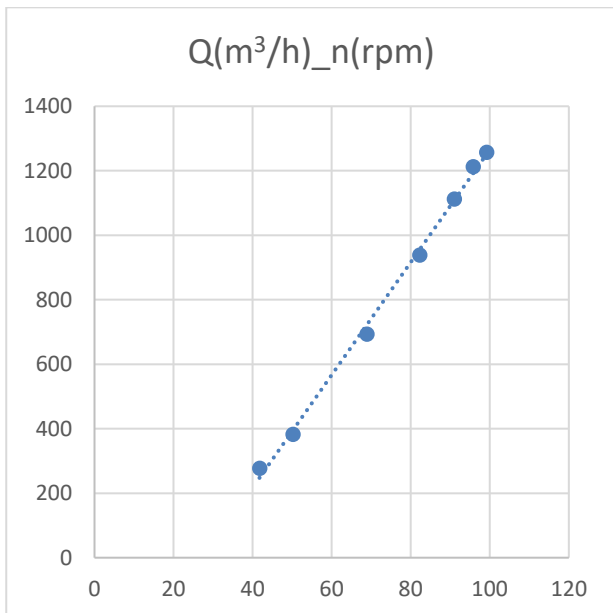
Q [m³/h]	$\sqrt{\Delta P}$	P _{monte}	P _{valle}	T _{H2O}	Densità	P _v	Δp _{val}	Δp _{turbom}	V _{con} (V)	V _{fase} (V)	I (A)	rpm	P _{ele} (W)	P _{teo} (W)	n _{turb}	η _{Tot}	Carico(kW)
47,356	1,1366	4,1364	2,8446	18,4332	998,384	0,028	0,87	0,42	53	30,5996	1,7	351	156,058	540,2894	28,884	9,377	9
60,691	1,4648	4,1002	1,9546	18,4713	998,377	0,028	1,43	0,71	83	47,9201	2,7	550	388,153	1176,704	32,986	10,96	9
64,784	1,8075	4,0846	0,8175	18,5775	998,358	0,028	1,63	1,63	91	52,5389	3	605	472,85	2880,494	16,416	8,212	9



**5.2.2 Test con carico da 9 kW, grado di apertura della LOC POWER a 20%,
C_v=71,95; Q/ΔP^{0,5}=71,45**

I risultati all'apertura del 20% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina accoppiato al carico sono dati in tabella:

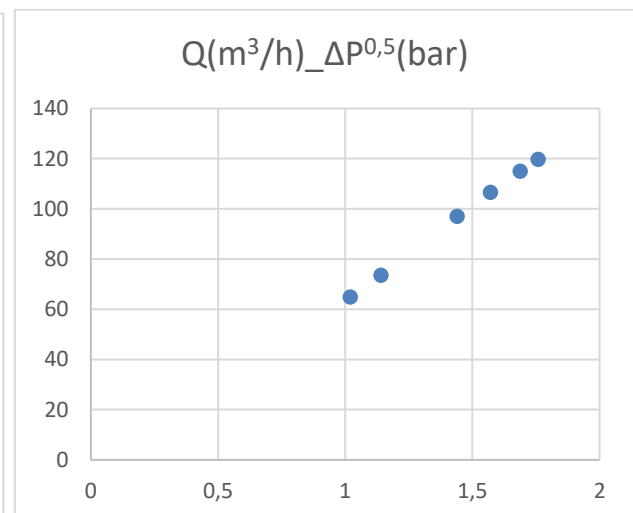
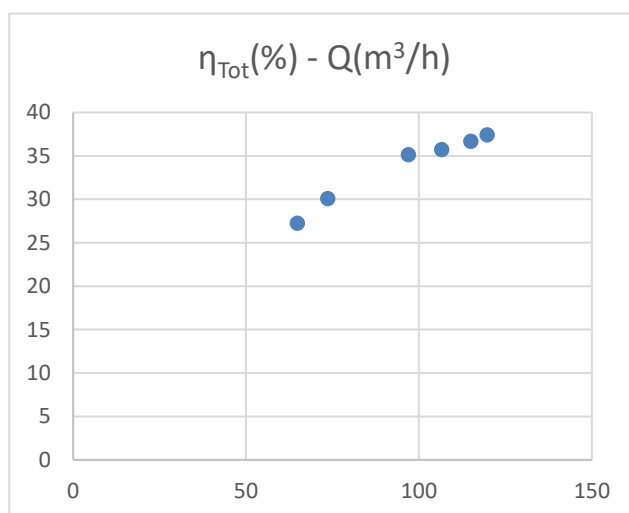
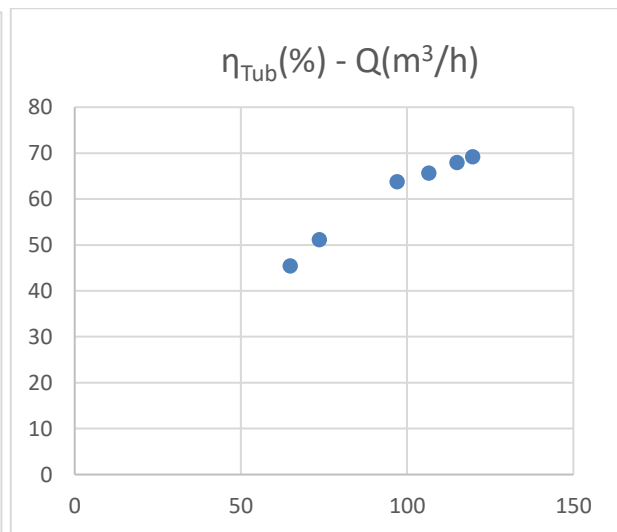
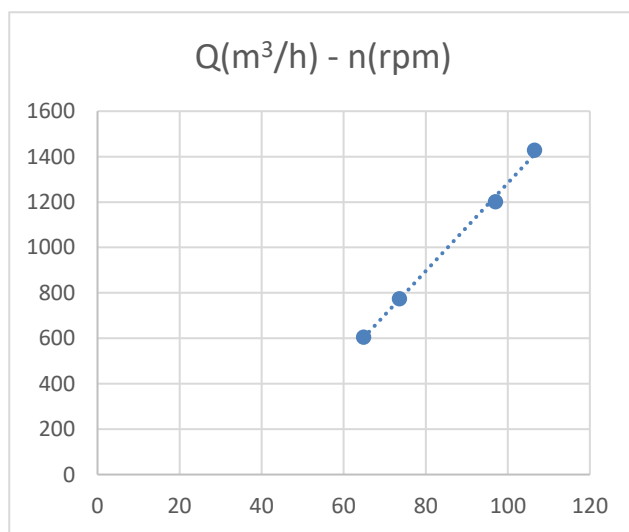
Q (m ³ /h)	$\sqrt{\Delta P}$	P _{monte}	P _{vale}	T _{H2O}	Densità	P _v	ΔP_{val}	ΔP_{turb}	V _{conc} (V)	V _{fase} (V)	I(A)	rpm	P _{el} (W)	P _{teo} (W)	η_{turb}	η_{Tot}	Carico(kW)
41,729	0,8118	4,1484	3,4894	18,8037	998,32	0,028	0,34	0,32	42	24,24871	1,3	277	94,57	360,8891	26,205	12,641	9
50,1535	0,9572	4,13	3,2138	18,8731	998,3	0,028	0,49	0,42	58	33,48632	1,9	382	190,872	577,7837	33,035	15,269	9
68,9044	1,2735	4,0847	2,4629	18,9451	998,29	0,028	0,93	0,69	133	76,78759	3,4	693	783,233	1296,706	60,402	25,765	9
82,2606	1,4869	4,0434	1,8327	19,1424	998,25	0,029	1,33	0,89	139	80,25169	4,7	938	1131,55	1980,799	57,126	22,874	9
90,995	1,6306	4,0148	1,3559	19,2771	998,23	0,029	1,62	1,04	165	95,26279	5,5	1112	1571,84	2566,736	61,239	23,883	9
95,7617	1,7175	3,9948	1,045	19,3069	998,22	0,029	1,80	1,15	179	103,3457	6	1212	1860,22	3004,703	61,91	24,21	9
99,1957	1,7745	3,9809	0,8321	19,3644	998,21	0,029	1,93	1,22	190	109,6966	6,3	1257	2073,26	3295,519	62,912	24,402	9



5.2.3 Test con carico da 9 kW, grado di apertura della LOC POWER a 30%, $C_v=93,86$; $Q/\Delta P^{0,5}=100,1$

I risultati all'apertura del 30% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina accoppiato al carico sono dati in tabella:

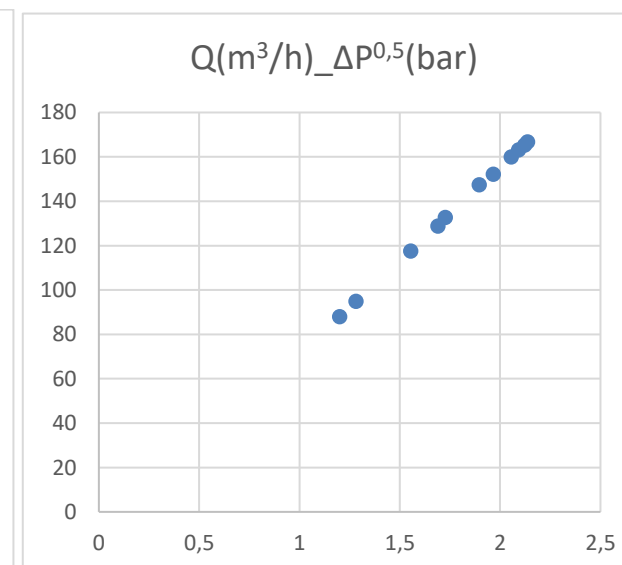
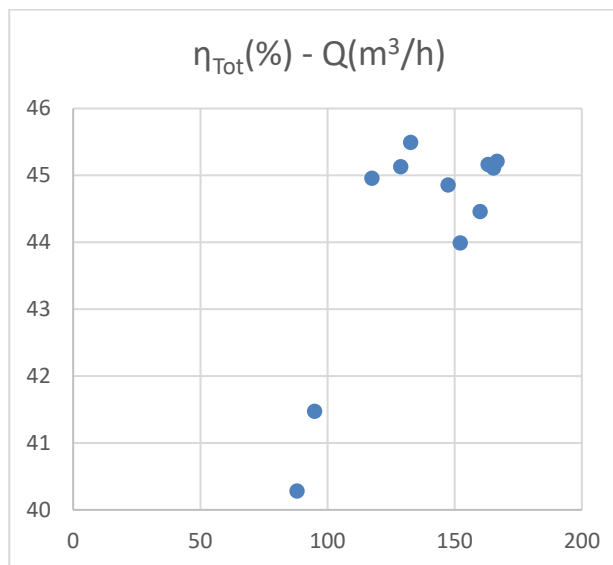
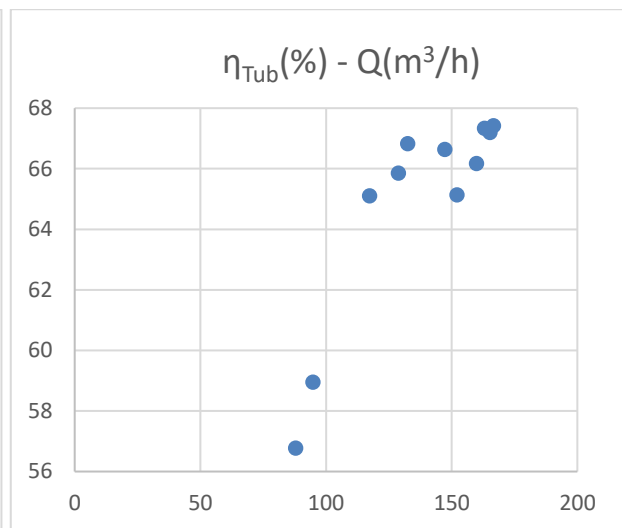
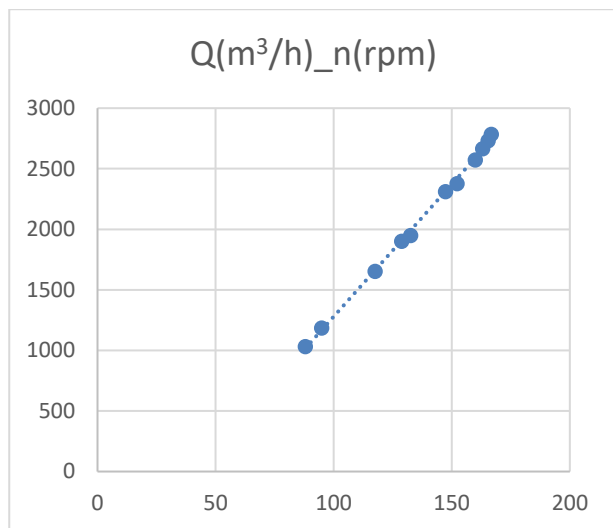
Q [m ³ /h]	$\sqrt{\Delta P}$	P _{monte}	P _{valle}	T _{H2O}	Densità	P _v	Δp_{val}	Δp_{turb}	V _{conc} (V)	V _{fase} (V)	I (A)	rpm	P _{el} (W)	P _{teo} (W)	η_{turb}	η_{Tot}	Carico(kW)
64,7865	1,0199	4,0995	3,0594	19,6668	998,15	0,029	0,42	0,62	93	53,69358	3,1	605	499,35	1099,08	45,434	27,245	9
73,5461	1,1411	4,0732	2,7711	19,7185	998,14	0,029	0,54	0,77	116	66,97263	3,9	773	783,58	1531,31	51,171	30,083	9
96,9288	1,4406	3,9888	1,9135	19,7764	998,13	0,029	0,93	1,14	182	105,0777	6,1	1201	1922,92	3014,03	63,799	35,146	9
106,516	1,5717	3,9507	1,4804	19,845	998,11	0,029	1,13	1,34	211	121,8209	7	1427	2558,24	3895,89	65,665	35,746	9
114,955	1,6881	3,9111	1,0612	19,9268	998,1	0,03	1,31	1,54	239	137,9867	7,9	1600	3270,29	4811,6	67,967	36,702	9
119,654	1,7589	3,8886	0,7949	19,9691	998,09	0,03	1,42	1,67	256	147,8017	8,5	1714	3768,94	5445,74	69,209	37,435	9



5.2.4 Test con carico da 9 kW, grado di apertura della LOC POWER a 40%, $C_v=110,77$; $Q/\Delta P^{0,5}=135$

I risultati all'apertura del 40% della valvola di controllo (LOC POWER) con turbina accoppiato al carico sono dati in tabella:

Q (m ³ /h)	$\sqrt{\Delta P}$	P _{monte}	P _{valle}	T _{H2O}	Densità	P _v	Δp_{val}	Δp_{turb}	V _{conc} (V)	V _{fase} (V)	I (A)	rpm	P _{el} (W)	P _{teo} (W)	η_{turb}	η_{Tot}	Carico(kW)
87,901	1,2002	4,0276	2,5871	20,614	997,96	0,03	0,42	1,02	154	88,91194	5,2	1032	1387,026	2443,0468	56,774	40,28082	9
94,849	1,282	4,0029	2,3595	20,679	997,95	0,03	0,49	1,16	175	101,0363	5,8	1186	1758,032	2982,0817	58,953	41,47402	9
117,43	1,5536	3,9043	1,4905	20,735	997,93	0,031	0,75	1,67	244	140,8735	8,2	1653	3465,487	5323,0803	65,103	44,95987	9
128,78	1,6893	3,8488	0,995	20,773	997,93	0,031	0,90	1,96	280	161,6581	9,3	1901	4510,26	6848,3766	65,859	45,13002	9
132,57	1,7267	6,5229	3,5414	21,474	997,78	0,031	0,95	2,03	291	168,0089	9,7	1948	4889,06	7315,8021	66,829	45,49326	9
147,29	1,8961	6,3094	2,714	21,589	997,75	0,032	1,17	2,42	339	195,7217	11	2312	6458,817	9692,853	66,635	44,85865	9
152,18	1,9656	6,2386	2,375	21,647	997,74	0,032	1,25	2,61	350	202,0726	11,6	2377	7032,126	10796,052	65,136	43,98977	9
159,93	2,0548	6,1296	1,9074	21,739	997,72	0,032	1,39	2,84	377	217,6611	12,5	2572	8162,289	12335,23	66,171	44,46097	9
163,08	2,0915	6,0821	1,7079	21,851	997,7	0,032	1,44	2,93	389	224,5893	13	2665	8758,981	13007,478	67,338	45,16363	9
165,27	2,1215	6,0435	1,5426	21,995	997,67	0,032	1,48	3,02	399	230,3628	13,2	2731	9122,365	13576,025	67,195	45,1088	9
166,65	2,1369	6,0267	1,4605	22,112	997,64	0,032	1,50	3,06	403	232,6722	13,4	2783	9353,421	13872,482	67,424	45,21236	9



Osservazioni:

- per le prove su turbina a vuoto, si ha:
 - per la prova al 10% di apertura della LOC POWER la portata cresce con la radice quadrata della caduta di pressione, le differenze di pressione della valvola e della turbomacchina crescono il che fa crescere il numero di giri della turbomacchina.
 - Al 20%, si nota il cambio di pendenza della caratteristica $Q/\Delta P$ che si riduce mentre la portata è aumentata rispetto a caso precedente
 - Al 30%, la caratteristica $Q/\Delta P$ è linearmente crescente e non presenta pendenza, non solo anche tutte le altre caratteristiche sono lineari crescenti con portata maggiore
 - Al 40%, si osserva alcuni discontinuità notevole della $Q/\Delta P$ che passa dalla rete ad una curva.
- Per la prova su turbina con carico da 9kw (Lampadine), si ha:
 - ✓ Al 10%, si osserva che la turbomacchina presenta un rendimento basso del 17% e quindi un rendimento dell'impianto bassissimo di 10%.
 - ✓ Al 20%, la turbina ha un picco del 62% di efficienza e quindi un rendimento complessivo migliore del precedente del 25%.
 - ✓ Al 30%, si raggiunge il 70% di efficienza con la turbina e il 38% di rendimento complessivo del sistema.
 - ✓ Al 40%, si raggiunge il 70% di efficienza con la turbina con un 45% del rendimento totale dell'impianto dovuto al flusso di portata sempre più maggiore.

Capitolo VIII: ANALISI TERMICA SUL BRUSHLESS CON E SENZA VENTOLA ALLA VELOCITA NOMINALE

Durante il funzionamento, tutte le macchine dissipano potenza sotto forma di calore in quanto gli avvolgimenti in essi presenti, sono interessati dal passaggio di corrente. Tale potenza proporzionale al quadrato della corrente, durante il transitorio termico,

- Una parte determina un aumento di temperatura del motore
- Un'altra parte viene asportato dall'ambiente circostante
- Mentre al regime termico, viene ceduto completamente all'esterno

L'equazione differenziale che rappresenta la conservazione dell'energia per unità di tempo è:

$$\boxed{Cth \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{Rth} = Wd}$$

in cui: $Cth \frac{d\theta}{dt}$ è l'energia immagazzinata nell'unità di tempo

$\frac{\theta}{Rth}$ è l'energia ceduta all'ambiente nella medesima unità di tempo

Wd la potenza dissipata sotto forma di calore

$\theta(t)$ la differenza di temperatura tra parte della macchina sede di avvolgimenti elettrici e ambientale all'istante t

Cth = capacità termica del motore

Rth = resistenza termica del motore

Ipotizzando un funzionamento a coppia e velocità costante, la soluzione dell'equazione differenziale diventa: $\theta(t) - \theta_i = (\theta_r - \theta_i) (1 - e^{-\frac{t}{\tau th}})$ Con $\theta_r = Rth wd$ la sovratemperatura di regime

θ_i la temperatura iniziale del motore

$\tau th = Rth Cth$ la costante di tempo termica e viene fornito dal costruttore del motore per cui si deduce che la costante di tempo è un indice della rapidità con cui si esaurisce il transitorio.

La sovratemperatura massima θ_{max} è funzione del materiale isolante degli avvolgimenti elettrici (punto più caldo della macchina), presenti nella macchina ed individuata dalla **classe di isolamento**. La caratteristica dei motori in base alla temperatura può essere data dalla seguente fig.

classe di isolamento insulation class	temperatura massima ammissibile per classe di isolamento in °C max temperature allowed for insulation class in °C
B	130
F	155
H	180

Fig.38 classe di isolamento dei motori

Il limite di temperatura determinano il valore della potenza del motore e/o del generatore e dipende da due fattori:

- La temperatura esterna o ambientale (**T_{amb}**)
- La resistenza termica del motore (**R_{th}**)

Dato **W_n** la potenza nominale del motore

η il rendimento corrispondente

W_{in} = $\frac{W_n}{\eta}$ la potenza entrante nel motore

W_d = $\frac{1}{\eta-1} W_n$ la potenza dissipata o perduta

Allora si può avere **$W_n = \frac{\eta \theta_{max}}{(1-\eta)R_{th}}$** la potenza nominale del motore dove **$W_n = f(\theta, R_{th})$**

Per cui si deduce che a pari classe di isolamento, e rendimento, si ha:

$$W_n \propto \frac{1}{R_{th}}$$

La resistenza termica (**R_{th}**) dipende da più fattori tali:

- ❖ Le caratteristiche costruttive della macchina
- ❖ La presenza di alettatura sulla superficie dovuta al fatto che **$R_{th} \propto \frac{1}{Scambio}$**
- ❖ Dal tipo di ventilazione per cui si distinguono:
 - ✓ Il raffreddamento ad aria naturale
 - ✓ Il raffreddamento ad aria forzata (F)

✓ Il raffreddamento ad acqua (C)

Il tipo di ventilazione del motore e quindi la sua efficienza dipende soprattutto **DAL GRADO DI PROTEZIONE** che si vuole dare alla macchina stessa dato dalla sigla **IP** seguiti da 2 cifre tale: **IP23, IP44, IP55**

L'andamento temporale della potenza richiesta viene detta **ciclo di lavoro** o **ciclo di carico** ed è indispensabile per due principali motivi:

- Sia per **il tipo di servizio richiesto** (S1=continuo, S2=di durata limitata, S3= intermittente periodico, S6=ininterrotto periodico).
- Sia per **la determinazione della taglia del motore da impiegare nell'applicazione.**

L'analisi termica degli avvolgimenti dell'alternatore è stata studiata in due modi:

- ❖ In presenza della ventola;
- ❖ In assenza della ventola.

Sullo stesso alternatore per cui dati di targa è espressa come:

Manufacturer		O.M.E. SRL
Motor type/Frame		OMG 200
Rated power	KW	30
Rated speed	RPM	1500
Mechanical arrangement	FORM	B3
Rated voltage	V	400
Rated frequency	HZ	50
Rated torque	Nm	203
* Starting torque	Nm	4,0
Phase number		3 phase
Degree of protection	IP	54
Insulation class		F
Temperature rise class		B
Cooling method		Air cooling
Motor weight	KG	250
Rated current	A	43
Winding connection		Y
Rated efficiency	%	94
Rated power factor	COS	0.98
Plant altitude		1000m
Amb. Temp.		40°C
Duty		S1
Bearing type (DE/NDE)		ball bearings (SKF)
Lubrication		grease
Terminal box		yes
Fan		yes
Fan cover		yes
Direction of rotation looking at drive end		BIDIRECTION
Painting		GREY RAL 7030
ACCESSORIES		
Windings thermals detectors		PT 100

8.1 Temperatura del Brushless dopo 08 ore di funzionamento con monitoraggio periodico T_{ciclo} per la determinazione dell'efficienza dell'alternatore **senza ventola.**

Questa prova è stata fatta sull'alternatore Brushless da 30 kW alla sua velocità nominale con la ventola esterna del capannone spenta. Si tratta di un alternatore di tipo **F/B** dove con **F** si indica la classe di isolamento termico e con **B** la sovratemperatura ammessa all'interno degli avvolgimenti. Con la

termocoppia (PT 100) esterna alla macchina, si è misurata la temperatura iniziale dell'ambiente e con sonda presente all'interno del generatore, si misura la temperatura degli avvolgimenti. Con tempo di ciclo non regolare sono stati raccolti i dati di temperatura degli avvolgimenti per cui sono ottenuti i seguenti valori in assenza di ventola dell'alternatore ed il corrispondente andamento Temperatura-Tempo:

T_{AMB} (Iniziale)	26,1	°C
T_{MOT} (Iniziale)	31	°C
T_{AMB} (finale)	28,1	°C

T (°C)	t (min)	t _{TOT} (min)	P _{INV} (kW)	P _{AFE} (kW)	C (Nm)	rpm	P _{MOT} (kW)	η_{INV}	Q (m ³ /h)	P1 (bar)	P2 (bar)	T _{ACQUA} (°C)	ρ (kg/m ³)
31	0	0	21	20,5	137	1500	21,51991	0,976	602,58	3,14	1,04	29,32	995,81
41	2	2	21,3	20,6	138	1500	21,67699	0,967	604,32	3,12	1,04	30,85	995,36
51	2	4	21,3	20,6	137	1506	21,60599	0,967	604,26	3,11	1,04	33,16	994,63
61	3	7	21	20,6	135	1506	21,29057	0,981	606,92	3,10	1,04	43,28	990,95
61	3	10	21	20,6	135	1506	21,29057	0,981	606,92	3,10	1,04	43,28	990,95
86	42	52	21	20,75	135	1530	21,62987	0,988	608,83	3,09	1,04	48,05	988,94
91	30	82	20,7	20,3	133	1530	21,30942	0,981	608,79	3,10	1,05	48,49	988,74
94	33	115	20,5	20,5	133	1530	21,30942	1,000	610,12	3,08	1,04	51,03	987,60
99	18	133	20,7	20,2	123	1540	19,83602	0,976	608,95	3,09	1,04	51,03	987,60
104	18	151	20,4	20,3	124	1540	19,99728	0,995	610,37	3,08	1,04	52,01	987,14

L'andamento temperatura-tempo di funzionamento dell'alternatore dopo 8 ore è di tipo esponenziale dato come:

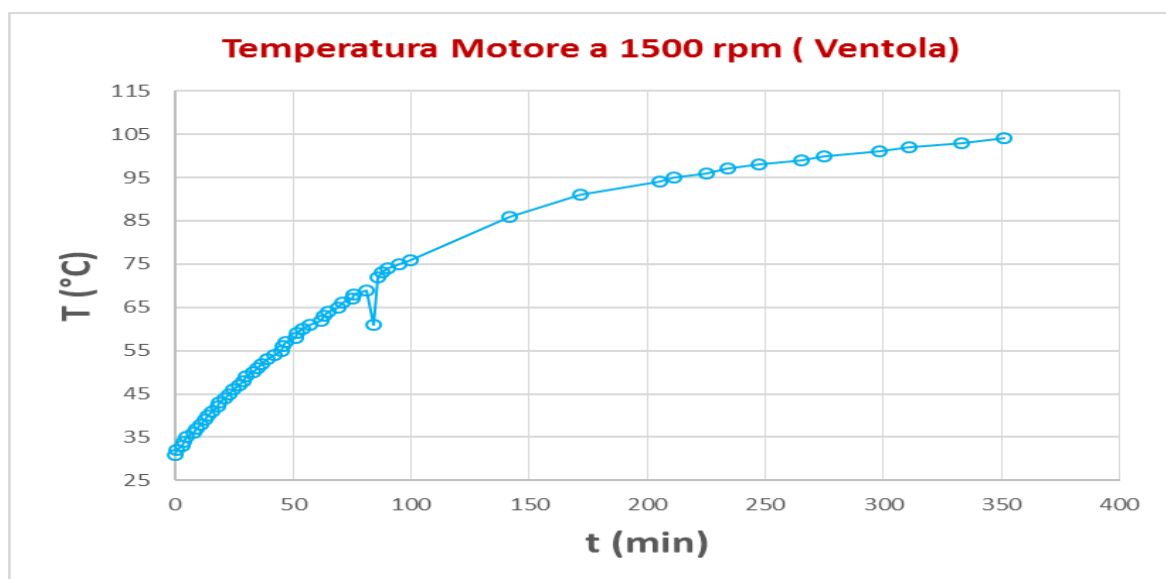


Fig.39 Caratteristica temperatura – durata della prova con ventola

P_{MOT} = Potenza meccanica del motore primo cioè la turbina

P_{INV} = Potenza dell'inverter trasmessa dall'alternatore

- Si nota quindi dei risultati che la temperatura di regime è raggiunta a 104 gradi corrispondente ad un tempo di continuo servizio dell'alternatore.
- Si nota una piccolissima perdita di potenza per effetto joule al passaggio dall'inverter all'AFE
- Il rendimento del gruppo turbo-alternatore è alto ma subisce delle fluttuazioni dovute alle oscillazioni di correnti e le perdite per effetto joule
- La temperatura dell'acqua nelle tubazioni è in continuo aumento con riduzione della sua densità specifica

8.2 Temperatura del Brushless dopo 08 ore di funzionamento con monitoraggio periodico T_{ciclo} per la determinazione dell'efficienza dell'alternatore con ventola a velocità di rotazione nominale.

Questa prova viene fatta sullo stesso alternatore ma con una ventola di raffreddamento all'interno del capannone. Inizialmente viene presa la temperatura dell'ambiente esterna e quella degli avvolgimenti come mostrato sotto:

T_{AMB} (Iniziale)	22,3	°C
T_{AMB} (Finale)	28,3	°C
T_{MOT} (Iniziale)	31	°C

T (°C)	t (min)	t_{TOT} (min)	P_{INV} (kW)	P_{AFE} (kW)	C (Nm)	rpm	P_{MOT} (kW)	η_{INV}	Q (m ³ /h)	P1 (bar)	P2 (bar)	T_{ACQUA} (°C)	ρ (kg/m ³)
30	0	0	20,3	20,2	130	1500	20,42035	0,995	601,50	3,15	1,04	28,10	996,23
42	3	154	20,4	20,1	130	1500	20,42035	0,985	603,81	3,14	1,04	29,88	995,71
52	22	176	20,5	20,2	131	1505	20,64602	0,985	606,84	3,11	1,04	48,51	988,73
53	27	203	20,3	20,1	132	1507	20,83127	0,990	608,95	3,10	1,04	48,76	988,61
54	30	233	20,5	19,9	137	1500	21,51991	0,971	609,30	3,09	1,04	49,02	988,50
56	130	363											

L'andamento temperatura-tempo di funzionamento della macchina con ventola può essere rappresentato da un'esponenziale crescente con il tempo:

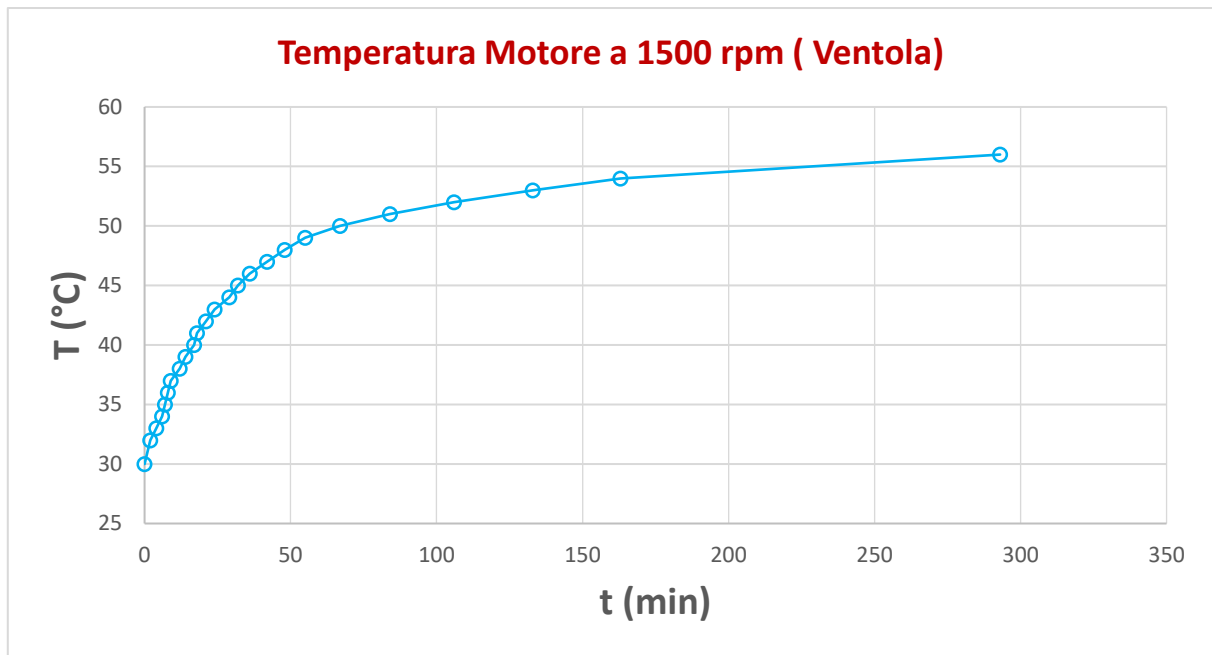


Fig.40 Caratteristica temperatura – durata della prova senza ventola

Per quanto riguarda il rendimento esso non varia molto perché vengono raffreddati gli avvolgimenti per cui non saranno ideali a causa delle diverse perdite presente in macchina. Quindi in presenza della ventola non si riesce a stabilire la temperatura di regime mentre è evidente che con la ventolo si ottiene una vita utile della macchina migliore rispetto al caso senza ventola ma con un'efficienza leggermente bassa.

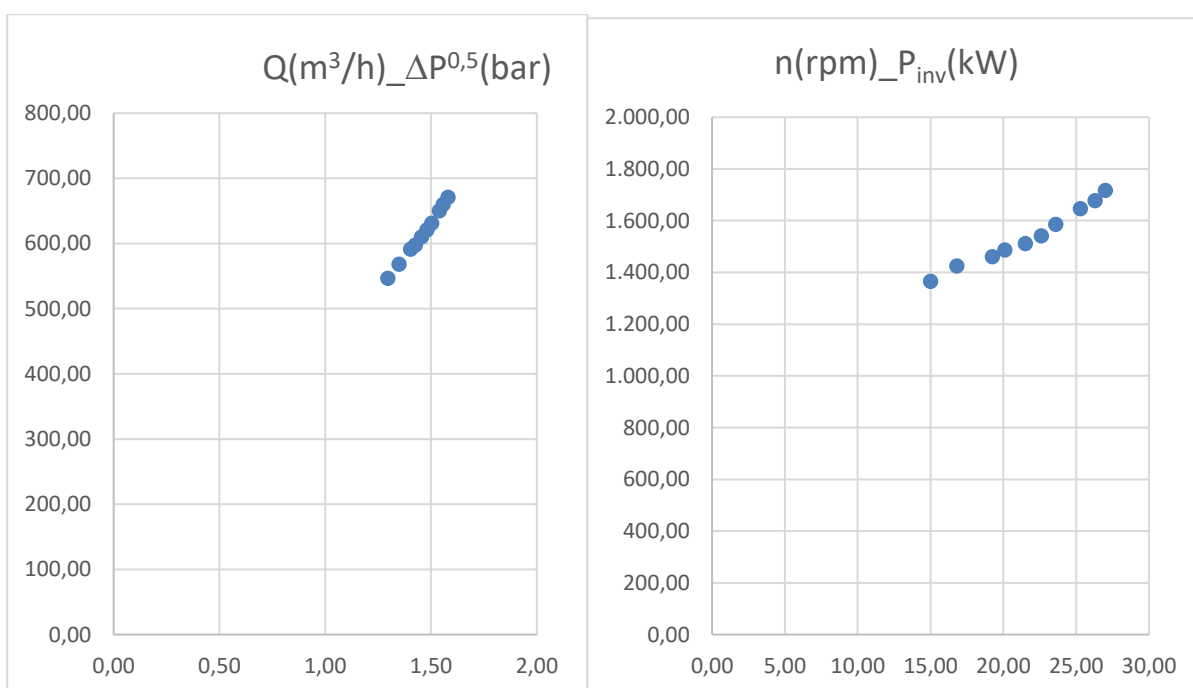
CAPITOLO IX: Test sulla valvola di recupero con Generatore impiegato alla velocità superiore della Nominale per il Recupero di Energia

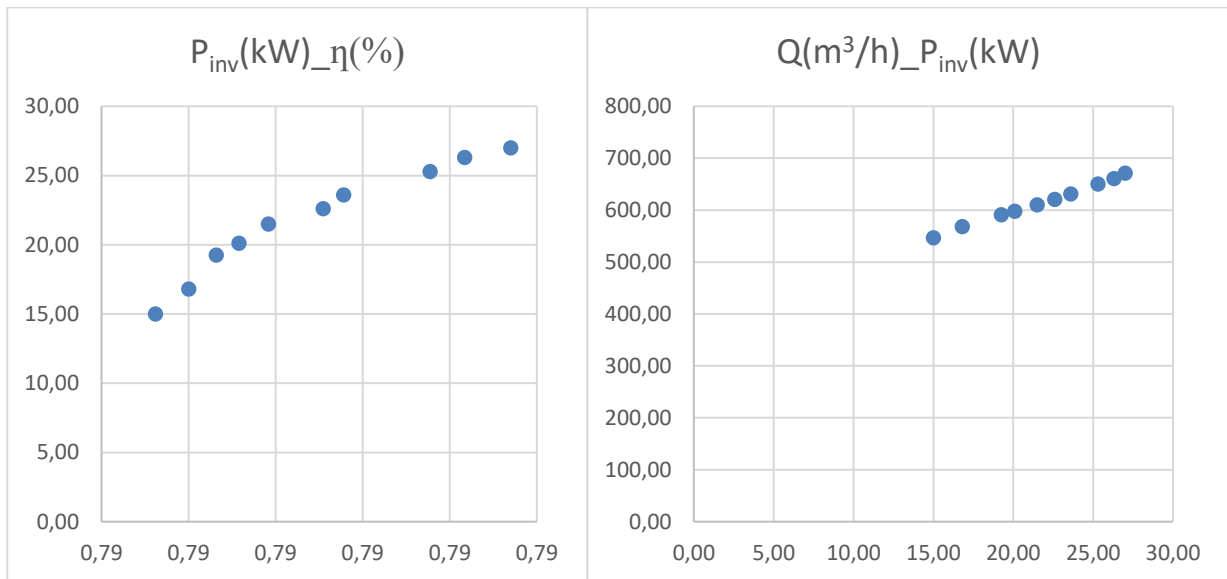
9.1 Test sulla Valvola di Recupero di Energia con curva della valvola piatta impostata dall'INVERTER con Brushless da 30 kW lavorando oltre la sua velocità nominale per la determinazione dell'Efficienza.

Per questa prova, viene inserito sul display del convertitore il tipo di curva che si vuole ottenere in questo caso la curva piatta, facendo lavorare l'alternatore a velocità superiore della nominale cioè in regime di deflussaggio. I dati ottenuti da questa prova sono riportati in tabella:

Q [m ³ /h]	$\sqrt{\Delta P}$	P _{monte}	P _{valle}	ΔP_{tur}	Th _{2o}	Densità	P _v	RPM	P _{afe}	P _{inv}	Dp turb (eta 0.83)	Dp corpo	η_{Tot}
546,87	1,29	3,36	1,68	1,68	20,61	997,96	0,03	1.365,00	14,50	15,00	1,25	0,42	0,79
568,48	1,35	3,26	1,44	1,82	20,72	997,94	0,03	1.425,00	17,10	16,80	1,35	0,46	0,79
591,31	1,40	3,19	1,22	1,97	20,82	997,92	0,03	1.460,00	19,00	19,25	1,49	0,48	0,79
598,06	1,42	3,15	1,12	2,03	20,90	997,90	0,03	1.486,00	20,10	20,10	1,54	0,49	0,79
610,03	1,45	3,11	1,00	2,12	21,00	997,88	0,03	1.511,00	21,30	21,50	1,61	0,50	0,79
620,79	1,48	3,06	0,87	2,19	21,19	997,84	0,03	1.541,00	22,40	22,60	1,66	0,52	0,79
631,17	1,50	3,02	0,76	2,26	21,26	997,82	0,03	1.586,00	23,60	23,60	1,71	0,55	0,79
650,43	1,54	2,94	0,58	2,37	21,56	997,76	0,03	1.646,00	25,10	25,30	1,78	0,59	0,79
660,54	1,56	2,89	0,47	2,42	21,67	997,74	0,03	1.677,00	26,00	26,30	1,82	0,60	0,79
671,03	1,58	2,85	0,36	2,49	21,83	997,70	0,03	1.717,00	27,00	27,00	1,84	0,65	0,79

Gli andamenti ottenuti sono riportati sotto:





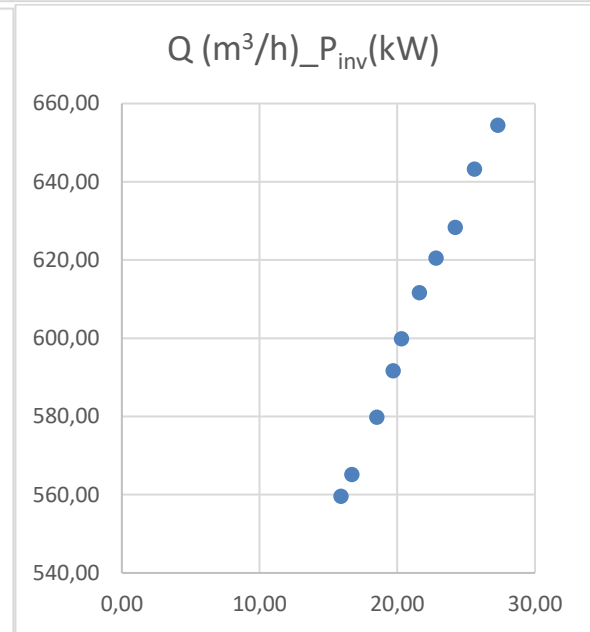
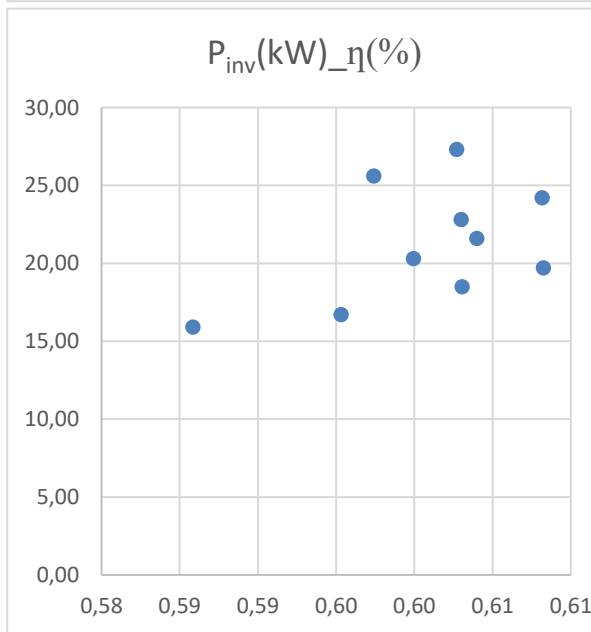
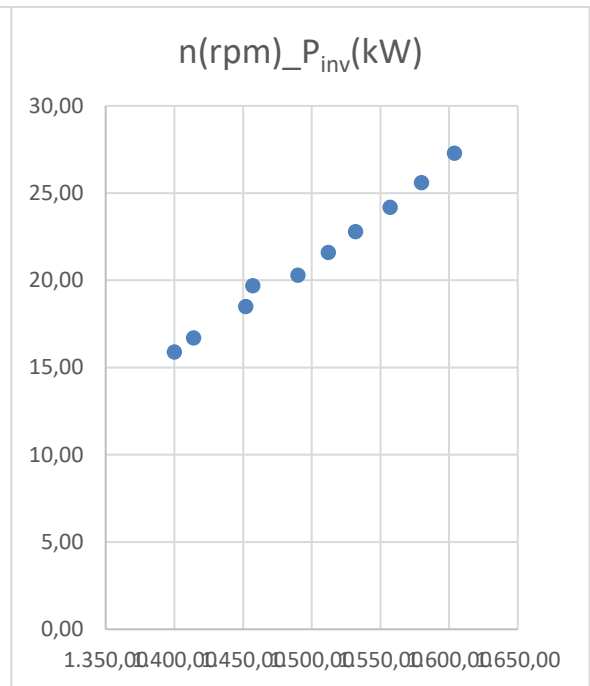
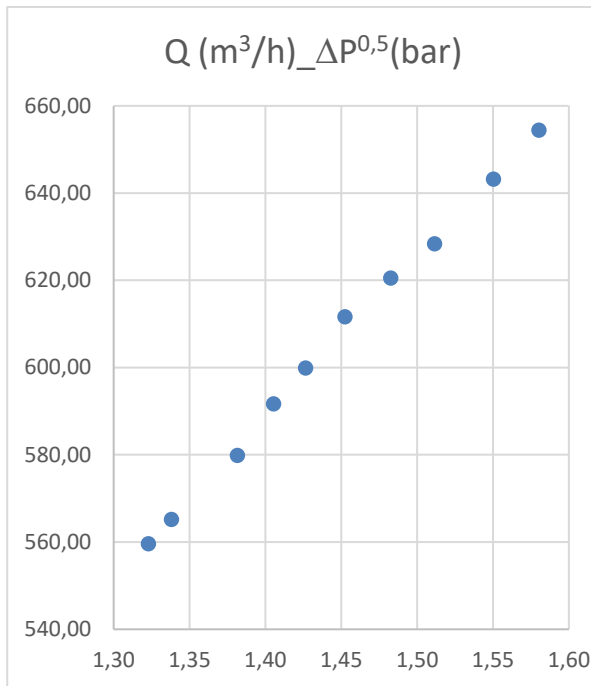
Osservazioni:

- Avendo quindi notato che più portata viene fornita al sistema, più grande è la caduta di pressione al monte e a valle della turbazione, esso genera quindi velocità di rotazione molto alta con potenza recuperata via via crescente;
- Essendo 83% il rendimento della turbomacchina, il rendimento complessivo del gruppo turbina-alternatore viene mantenuta costante al 79% anche a velocità più elevate essendo in presenza di un generatore Brushless con efficienza pari a 97%;
- Si nota comunque che non è stato raggiunto i 30kW di potenza massima del convertitore e del generatore stesso a causa delle perdite presente nel sistema;
- In condizioni di funzionamento a mandrino del generatore Brushless, il fluido presente nelle tubazioni iniziano ad innalzarsi raggiungendo i 22°C mentre nel funzionamento assi questo valore è circa pari a 17°C.

9.2 Test sulla valvola di Recupero di Energia con curva della valvola Quadratica impostata dall'inverter con Brushless da 30 kW lavorando oltre la sua velocità nominale per la determinazione dell'efficienza.

Per questa prova, la curva inserita al display è la curva quadratica e i dati ottenuti da questa prova sono riportati in tabella:

Q [m3/h]	$\sqrt{\Delta P}$	Pmonte	Pvalle	dp	Th2o	Densità	Pv	RPM	Pafe	Pinv	Dp turb (eta 0.83)	Dp corpo	eta	rad/s	Coppia Calc. Nm
559,61	1,32	3,32	1,57	1,75	22,09	997,65	0,03	1.400,00	15,50	15,90	1,32	0,43	0,59	146,61	108,45
565,22	1,34	3,28	1,49	1,79	22,15	997,63	0,03	1.414,00	16,40	16,70	1,37	0,42	0,60	148,07	112,78
579,87	1,38	3,22	1,31	1,91	22,22	997,62	0,03	1.452,00	18,10	18,50	1,48	0,43	0,60	152,05	121,67
591,70	1,41	3,18	1,21	1,97	22,28	997,60	0,03	1.457,00	19,30	19,70	1,54	0,43	0,61	152,58	129,12
599,91	1,43	3,15	1,12	2,03	22,38	997,58	0,03	1.490,00	20,30	20,30	1,57	0,47	0,60	156,03	130,10
611,64	1,45	3,10	0,99	2,11	22,47	997,56	0,03	1.512,00	21,40	21,60	1,63	0,47	0,60	158,34	136,42
620,51	1,48	3,07	0,87	2,20	22,50	997,55	0,03	1.532,00	22,60	22,80	1,70	0,50	0,60	160,43	142,12
628,38	1,51	3,03	0,75	2,28	22,57	997,54	0,03	1.557,00	24,10	24,20	1,78	0,50	0,61	163,05	148,42
643,24	1,55	2,97	0,57	2,40	22,69	997,51	0,03	1.580,00	25,60	25,60	1,84	0,56	0,60	165,46	154,72
654,44	1,58	2,92	0,42	2,50	22,79	997,49	0,03	1.604,00	27,10	27,30	1,93	0,57	0,60	167,97	162,53



Osservazioni:

- Lavorando quindi con curva quadratica la massima velocità raggiunta dall'alternatore Brushless è 1604 rpm con massima potenza convertita dall'inverter pari a 27,3kW rispetto ai 1717 rpm con massima potenza convertita dall'inverter pari a 27kW;
- In rendimento complessivo del gruppo nel caso si usa la curva quadratica è circa uguale a 61 in certi casi, mentre nel caso si usa la curva piatta si raggiunge un valore di efficienza pari a 79%;
- Si osserva inoltre che con la curva quadratica, il massimo valore di portata che si riesce a raggiungere è 654,44 m³/h mentre con la curva piatta si raggiunge i 671,03 m³/h.

Conclusione

Si è dimostrato quindi con queste prove che è possibile fare lavorare l'alternatore oltre le sue condizioni nominali, regolando la portata ed ottenendo maggiore potenza rigenerata dall'alternatore.

Questo processo viene reso possibile aggiungendo sulla caratteristica meccanica della macchina impostando al display del convertitore un determinato andamento:

- Andamento a curva piatta;
- Andamento a curva quadratica.

La caratteristica che ci permette quindi di massimizzare il recupero di potenza rigenerata è la caratteristica con la curva quadratica.

CONCLUSIONE

Questo elaborato è stato realizzato dopo tanti mesi nell'azienda Imolese LOCLAIN s.r.l. Il nostro compito, di tipo sperimentale su un impianto idraulico, era quello di regolare la portata di un gruppo turbo – alternatore per poter recuperare l'energia solitamente dissipata durante il servizio di controllo.

La LOCPOWER è quindi un dispositivo che fornisce molte informazioni utili alla sala controllo tramite dispositivi integrati sviluppati dall'azienda produttrice, monitorando lo stato di salute della valvola e l'integrità dell'impianto stesso.

I principali motivi per cui la LOCPOWER risulta una soluzione innovativa a livello di gestione e di controllo dei fluidi sono:

- L'ingombro ridotto sebbene sia presente una turbomacchina integrata attivamente nel trim di regolazione e in grado di lavorare in condotte in pressione;
- La capacità di recuperare energia elettrica, trasformando l'energia meccanica tramite il collegamento di un generatore all'albero di trasmissione della potenza;
- Il sistema di controllo industriale e il sistema di diagnostica avanzata nell'ottica dell'industria 4.0.

Grazie ai convertitori statici elettronici a doppia conversione (INVERTER – AFE), separati da uno stadio in continuo in comune (V_{dcBUS}), si realizza uno scambio di potenza direttamente con la rete con un campo di regolazione che ci permette di ottenere il migliore rendimento della turbina idraulica a giri variabile.

Per la realizzazione delle prove sul dispositivo sono state usati diversi strumenti sia elettrici che meccanici tra i quali i più significativi sono:

- Il Wattmetro per la misura della potenza durante la prova sui carichi passivi;
- Il fonometro per la misura della rumorosità durante il passaggio dell'acqua nella tubazione;
- Il PLC (Programmable Logic Controller oppure Controllore a Logica Programmabile) per la conversione del segnale da analogica all'uscita dell'alternatore a digitale all'ingresso del convertitore;
- Le pinze amperometriche per la misura della corrente (concatenata e di fase) ai morsetti del magnetotermico all'interno del quadro dell'inverter e delle pompe;
- Il torsionmetro per la misura esatta della coppia all'uscita della turbomacchina;

- Il software usato per la simulazione è stato realizzato in ambiente LABVIEW e per motivi di privacy non è stato possibile associarlo al nostro elaborato;
- Le termocoppie tali: la **PT100**, la **PTC** detta anche termoresistenza (tre in serie), per la misura della temperatura.

Per comprendere il comportamento di questo sistema innovativo, numerose sono state le prove svolte tra le quali:

- ❖ **La prova con carichi passivi:** per questa prova, è stato studiato il comportamento della valvola di controllo a diversi gradi di apertura per poi affermare che la condizione che ci permette di lavorare nelle condizioni migliori è quella in cui la LOCPOWER è aperta al 40%.
- ❖ **La prova con l'alternatore da 30kW, con curva dell'alternatore ideale impostata dall'inverter:** per questa prova si è visto come la portata varia in modo proporzionale con la caduta di pressione
- ❖ **La prova con alternatore da 30 kW, con curva ideale per l'eliminazione del fenomeno di cavitazione:** in quest'altro caso, la portata varia inversamente proporzionale alla caduta di pressione nello scopo di aumentare la pressione a valle, riducendo l'indice di cavitazione e quindi la cavitazione stessa
- ❖ **La prova con Brushless da 10 kW a diverse condizioni di apertura:** per questa prova la condizione migliore di funzionamento della LOCPOWER è quando è aperto al 40%
- ❖ **La prova con la turbina a vuoto e a carico:** queste prove sono state fatte per vedere il comportamento della turbomacchina quando funziona a vuoto e quando viene collegato un carico
- ❖ **L'analisi termica sul Brushless in presenza di ventola ed in assenza di ventola:** come risultato di questa prova si è visto che la macchina in assenza di ventola presenta una maggiore efficienza rispetto al caso con la ventola
- ❖ **La prova con Brusless da 30kW lavorando a velocità superiore di quella nominale con curva dell'alternatore piatta e quadratica:** per quest'ultima prova, si è dedotto che la scelta tra il funzionamento con

curva piatta o quadratica non cambia di molto con l'unica differenza che la curva quadrata ci permette di recuperare di più ma con basso rendimento e basso velocità di rotazione rispetto alla curva piatta.

La LOCPOWER lavorando su un gruppo Turbo – Alternatore, gli alternatori devono presentare altissime prestazioni, per cui esiste un accordo per la costruzione delle macchine elettriche che definiscono 3 classe di efficienza EFF1, EFF2, EFF3 mentre la normativa CEI 640/2009 ha introdotto una nuova classificazione dell'efficienza energetica IE1, IE2, IE3, e IE4. Essendo l'efficienza delle turbine tra 0,7÷0,8 nell'accoppiamento turbo-alternatore, occorre quindi un alternatore con le elevate prestazioni. La scelta del tipo di alternatore per uso industriale di solito dipende dai seguenti parametri: l'efficienza dell'alternatore, il peso, l'ingombro, il costo, flangiato o no, il luogo di installazione, il tempo di consegna

Attualmente, le principali aziende produttrici delle macchine elettriche in Italia sono:

LA PHASE U₃; LA ABB; La SICMEMOTORI; La REEL; La EOS; Il BRUSATORI; La LOVATO.....

La seguente tabella ci permette di fare un confronto tra le tipologie di alternatori esistenti con lo scopo di scegliere quello che massimizza le esigenze aziendali.

CONFRONTO TRA DIVERSE TIPOLOGIE DI ALTERNATORI TIPO IP54, FLANGIATO B5, AUTO-VENTILATO REEL ; PHASE; EOS ;									
Tipologie di generatori	modello	peso(kg)	L _{tot} (mm)	$\eta_{\text{alternatore}}$ (%)	n(rpm)	Coppia (Nm)	Inerzia (kgm ²)	Potenza (kW)	Costo (€)
REEL	A180M4	151	635	94,4	1500	117,8	ND	18,5	850
PHASE U ₃	1010	64	400	95	2000	88	0,13	15	1510
SICME MP SRQ	SRQCp132L	122	685	93,8	1500	118	0,092	18,5	1320
SICME SRCa	SRCa180M	151	635	94,4	1500	ND	0,109	18,5	1010
EOS	EOS 160La6	98	530	94,4	1500	130	0,116	20	1550

Bibliografia

- REEL SUPREME, “Synchronous reluctance motor drive package”
- REEL SSP MOTOR, “ high-output synchronous reluctance motors”
- PHASE U3 servoMotors ”Motore Sincrono a magneti permanenti o Motore Brushless ”
- SICMEMOTORI “ Synchronous reluctance motors”
- L. Taponecco, “ Motori elettrici ”
- CNA Energia, “ Motori ad alta efficienza ed inverter”
- Boffa, “ Motori elettrici ad alta efficienza”
- ABB, “ Tecnologia del SynRM”
- TDE Macno SPA “ Tecnologia Digitale Elettronica”
- Marco Dal prà, “Inverter per motori asincroni trifasi. Appunti di elettrotecnica”
- Ned Mohan, “Elettronica di potenza; Convertitori ed Applicazioni”
- Ion Boldea, “Variable Speed Generators - The Electric Generators Handbook”
- Federico Silvestro, “Modellazione di generatori eolici con generatore asincrono.
- B. Chitti Babu, “Wind Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator with Grid Disconnection.
- www.valve-word.net/news-italy/69192/loclain-valvola-a-recupero-energetico.html

