



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

APPLICAZIONE DI MACCHINA ASINCRONA A DOPPIA
ALIMENTAZIONE PER LO SFRUTTAMENTO DI FONTI DI
ENERGIA RINNOVABILI

Doubly fed induction machines for renewable energy applications

LAUREANDO: MAHARA HETTIARACHCHIGE NUWAN SAMEERA

MATRICOLA: 1034956

RELATORE: ANDREA TORTELLA

ANNO ACCADEMICO 2014/2015

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare, innanzitutto, il professor A. Tortella. Sin dall'inizio mi ha seguito con costanza e, nonostante le difficoltà riscontrate, mi ha sempre sostenuto e guidato durante la stesura del presente lavoro.

“alla mia famiglia”

Indice

Introduzione	iii
1 Generatori a velocità variabile per fonti di energia rinnovabile	1
1.1 Fonti di energia rinnovabile	1
1.1.1 Tipi di applicazione	2
1.1.2 Tipologie di macchine elettriche	3
1.1.3 Benefici della macchina asincrona	5
1.2 Definizione dei parametri	9
1.2.1 Definizione di scorrimento	11
2 Macchina Asincrona a doppia alimentazione	15
2.1 Vantaggi e svantaggi del generatore a doppia alimentazione .	15
2.2 Evoluzione della macchina a doppia alimentazione	17
2.3 Funzionamento a velocità variabile	20
2.4 Circuito equivalente nel funzionamento a regime stazionario .	23
2.5 Esempio di calcolo	30
2.5.1 Macchina a doppia alimentazione in cascata(CDFIG) .	37
3 Strategie di controllo	39
3.1 Le trasformate	39
3.1.1 Trasformata di Clark	39
3.1.2 Trasformata di Park	40
3.2 Controllo vettoriale della macchina a doppia alimentazione . .	43
3.3 Controllo vettoriale	43
3.3.1 Circuito di Controllo	46

4	Applicazione delle macchine a velocità variabile nell'Eolico	51
4.1	Impianti Eolici	51
4.2	Componenti fondamentali di una turbina eolica	54
4.2.1	Le pale	56
4.2.2	Calcolo della potenza disponibile	56
4.2.3	Calcolo della potenza disponibile e Analisi di Betz . . .	58
4.2.4	Coefficiente di potenza C_p	60
4.3	Evoluzione delle tipologie di impianti eolici	61
4.3.1	Caratteristica potenza-velocità del vento	62
4.3.2	Confronto tra velocità fissa e velocità variabile	63
4.3.3	Sistemi in assenza di elettronica di potenza	64
4.3.4	Sistemi parzialmente integrati con l'elettronica di potenza	65
4.3.5	Configurazione mediante la regolazione della resistenza	66
4.3.6	Sistemi totalmente interfacciati tramite elettronica di potenza alla rete	68
4.4	Convertitore di potenza nella macchina a rotore avvolto	70
4.4.1	controllo della potenza prodotta	72
4.4.2	Gestione del RSC	75
5	Applicazione idroelettrica	77
5.1	Impianti idroelettrici a bacino	77
5.2	Vantaggi nell'utilizzo della macchina a doppia alimentazione negli impianti di pompaggio	78
5.3	Funzionamento a velocità variabile	84
5.3.1	Scelta dello schema d'impianto	88
5.4	Confronto strutturale di DFIG con una macchina sincrona convenzionale	90
5.4.1	Tipologie di convertitori	93
6	Conclusioni	97
	Bibliografia	99

Introduzione

Il protocollo di Kyoto è uno dei più importanti accordi giuridici a livello internazionale, approvato nel 1997 con l'intenzione di attuare delle leggi volte a combattere le alterazioni climatiche. Tale protocollo si propone da un lato di ridurre le emissioni delle sostanze ritenute responsabili del riscaldamento del pianeta e quindi di diminuire l'uso di prodotti a base di combustibili fossili, dall'altro di sostenere l'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili. In ogni caso bisogna notare che di fronte al massiccio consumo di energia, la società odierna non può dipendere solo dai metodi tradizionali che, tra altro, sono rappresentati da fonti energetiche esauribili nell'arco di 35-40 anni secondo le stime attuali. Lo sfruttamento delle fonti rinnovabili è uno dei concetti che ha avuto rilevante importanza e grande interesse negli ultimi decenni nel settore energetico. L'avanzamento tecnologico ha portato nuova attenzione su questa tematica che sta assumendo sempre di più un ruolo essenziale nella produzione dell'energia elettrica. Il rimpiazzare delle turbine eoliche a velocità fissa con quelle a velocità variabile gli impianti eolici stanno assumendo un ruolo sempre più importante nel mix energetico [28]. Lo sviluppo di questi impianti deriva principalmente dal fatto che essi rappresentano una soluzione affidabile, economica e con tempi accettabili di ritorno dell'investimento. L'introduzione di macchine elettriche operanti a velocità variabile in questo contesto ha permesso di confermare l'importanza e la maggiore usufruibilità di queste fonti, superando alcuni limiti manifestati dalle macchine a velocità fissa. L'introduzione degli impianti di pompaggio con macchine a velocità variabile rappresenta la tecnologia attualmente più adatta per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili seguendo le forti variazioni durante il loro funzionamento. In questo elaborato mi propongo di analizzare un particolare tipo di macchina rotante, la *macchina asincrona a doppia alimentazione* impiegata nello sfruttamento di fonti rinnovabili, rappresentate da fonti primarie molto variabili nel tempo.

Quindi il lavoro viene suddiviso in 5 capitoli :

- Nel primo capitolo si presenta una descrizione generale delle fonti rinnovabili e l'introduzione della macchina asincrona con una descrizione generale con gli schemi equivalenti
- il secondo capitolo espone la macchina asincrona a doppia alimentazione descrivendo in dettaglio vantaggi, svantaggi, evoluzione della macchina e infine il circuito equivalente con la definizione dei parametri che compongono la macchina stessa.
- Nel terzo capitolo vengono descritte le tecniche e le strategie di controllo del modello dinamico
- Nel quarto capitolo viene analizzato l'utilizzo della macchina a doppia alimentazione nel settore eolico collegato alla rete di alimentazione. Inoltre verranno discusso le principali componentistiche coinvolte in questo impianto. Verrà illustrata inoltre l'evoluzione degli impianti a velocità variabile con diverse configurazioni fino ad arrivare ai recentissimi impianti in costruzione.
- Nel capitolo 5° si analizza l'applicazione delle macchine asincrone a doppia alimentazione nel settore idroelettrico, evidenziando i benefici ottenuti mediante la macchina a velocità variabile. Quindi verranno discussi sia i principali vantaggi come sistema di accumulo che sistema di funzionamento a velocità variabile, confrontandoli con un sistema a velocità fissa.

Capitolo 1

Generatori a velocità variabile per fonti di energia rinnovabile

1.1 Fonti di energia rinnovabile

Con l'espressione *energia prodotta da fonti rinnovabili* si intendono quelle forme di energia, ricavate da fonti primarie, che si rigenerano o che non sono esauribili in tempi limitati nella scala dei tempi umani. L'impiego di tali fonti non danneggia le risorse naturali per le future generazioni. Quindi sono considerate fonti rinnovabili (ENEA):

1. il sole
 - (a) Solare termico
 - (b) solare fotovoltaico
2. il vento
3. il mare
 - (a) correnti marine
 - (b) a gradiente salino
 - (c) moto ondoso
4. Il Calore della terra (geotermico)
5. idroelettrico

6. biomassa

7. nucleare

Nell'ultimo ventennio si è verificato un notevole aumento dell'energia prodotta da fonti rinnovabili. Questo aumento è dovuto al fatto che il combustibile fossile è una risorsa limitata e concentrata in alcune zone della pianeta, ragion per cui il costo di tale materia prima è strettamente legato alla sua disponibilità in precise aree. Tale squilibrio può creare forti tensioni nell'ambito politico ed economico, senza dimenticare che il suo consumo provoca delle conseguenze sull'ambiente. Il maggiore utilizzo delle fonti rinnovabili è inoltre dovuto allo sviluppo tecnologico, che ha fatto in modo che i costi dell'energia prodotta dalle fonti rinnovabili diventassero molto concorrenziali rispetto ai costi dell'energia prodotta dai metodi tradizionali. Inoltre gli impianti attuali hanno rendimenti molto più elevati rispetto quelli della generazione precedente, cosa che facilita sempre più l'impiego di fonti di energia alternativa. Questo risultato si deve anche all'introduzione di macchine che eseguono la conversione elettromeccanica a velocità variabile, condizione che rispecchia la modalità operativa tipica di molte fonti caratterizzate da un'estrema variabilità dell'Energia disponibile. Nel 2013 solo in EU sono stati installati impianti rinnovabili per un totale di 25.4 GW di potenza. La figura 1.1 [28] illustra come sono distribuite le potenze tra le varie fonti rinnovabili. Com'è evidente dalla figura, quasi 50% della potenza prodotta dalle fonti rinnovabili, proviene proprio dall'eolico e dall'idroelettrico, quindi anche un piccolo aumento di efficienza di questi sistemi, contribuirebbe in modo rilevante sulla totale potenza prodotta.

1.1.1 Tipi di applicazione

Le macchine a velocità variabile sono impiegate nei impianti dove la fonte primaria è di per sé una fonte variabile nel tempo e difficilmente prevedibile in un intervallo di tempo abbastanza lungo. nonostante che ci sono diverse fonti in cui potrebbe utilizzare le macchine a velocità variabile, attuale utilizzo di questo macchina è concentrato significativamente in due applicazioni:

- Negli impianti eolici
- Negli impianti di pompaggio

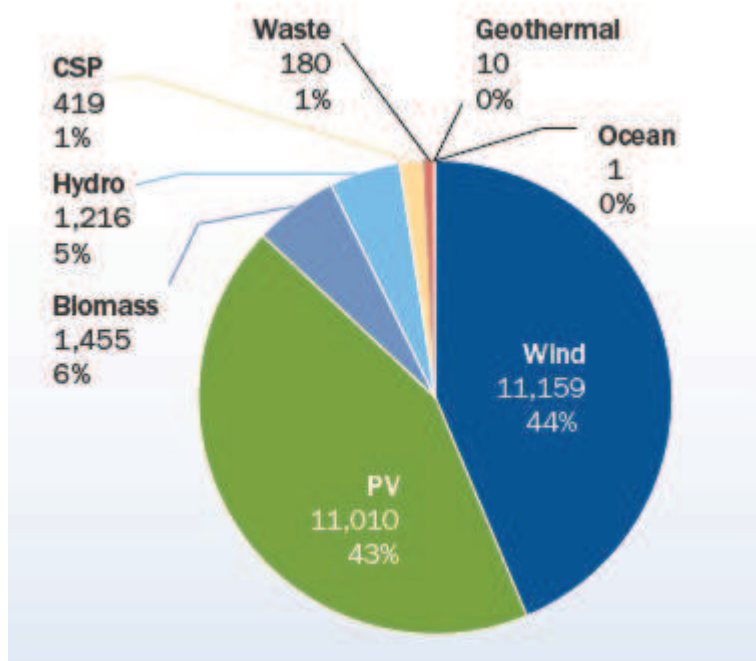


Figura 1.1: potenza prodotta dalle varie fonti rinnovabili(fonte-EWEA-annual-statistic-2013)

Questi sistemi sono preferiti per il fatto che hanno un percorso con basso numero di conversioni energetiche, quindi meno perdite.

1.1.2 Tipologie di macchine elettriche

In questa sezione verrà precisato quali tipi di macchine elettriche vengono utilizzate in qualità di macchine a velocità variabile e il loro funzionamento di base. Il termine “macchina elettrica” si riferisce a qualunque tipo di macchinario che ha la capacità di convertire energia meccanica in energia elettrica o viceversa, secondo alcuni principi della fisica. Nel primo caso, in ingresso viene prelevata energia meccanica e grazie alle leggi dell’elettromagnetismo in uscita viene consegnata energia elettrica, così la macchina sta funzionando come “generatore”. Nel caso contrario invece funziona come “motore”.

Parlando di macchine rotanti si ricorda che, in base al loro meccanismo di funzionamento, esse possono essere suddivise in due macro categorie:

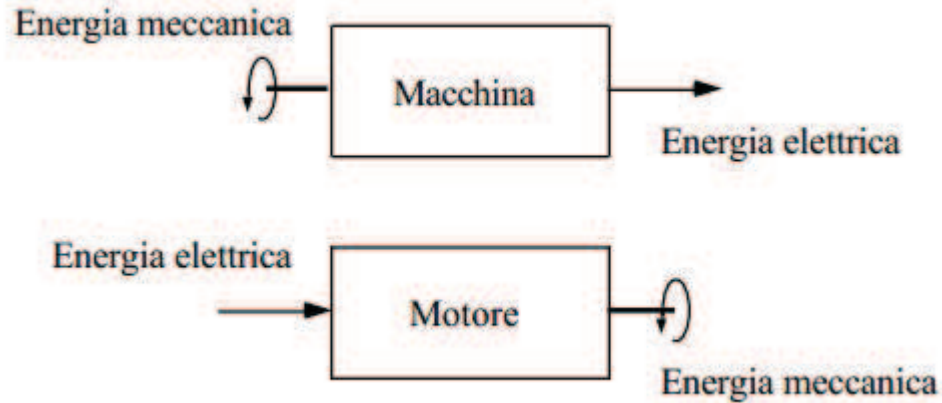


Figura 1.2: Conversione elettromeccanica

- macchine sincrone
- macchine asincrone

La differenza tra queste due macchine consiste nel fatto che la macchina sincrona “marcia” in regime sinusoidale e con velocità di rotazione fissa (velocità di sincronismo), mentre la macchina asincrona, anch’essa funzionante in regime sinusoidale, ma con una velocità di rotazione e variabile con il carico. L’usuale forma costruttiva di un generatore sincrone chiamato anche alternatore, consiste in un rotore che crea il campo magnetico e di uno statore comprendente gli avvolgimenti di armatura. Il campo magnetico di rotore è generato da una corrente continua circolante negli avvolgimenti di campo, altrimenti esistono anche generatori sincroni a magneti permanenti che non necessita di alimentazione rotorica. Il movimento del campo magnetico di rotore rispetto agli avvolgimenti di statore dovuto alla rotazione dell’albero, induce una terna di tensioni alternate negli avvolgimenti di statore con valore efficace proporzionale al flusso magnetico di rotore ed alla velocità di rotazione (n) ed essendo n una funzione della frequenza, il valore efficace della tensione indotta è: $E = K_s \Phi f$. Infatti nel funzionamento a regime permanente il moto relativo tra campo magnetico induttore e conduttori di indotto è uniforme con velocità di rotazione rigidamente legata alla frequenza della tensione della rete alla quale la macchina sincrona è collegata. Per consentire un funzionamento a velocità variabile si interpone tra alternatore e rete un convertitore di frequenza che trasforma dapprima la corrente a fre-

quenza variabile in uscita dal generatore in corrente continua attraverso un raddrizzatore elettronico e successivamente riconverte la corrente continua in corrente alternata a frequenza di rete mediante un inverter. I generatori di questo tipo sono più costosi di quelli asincroni, ma l'assenza di un moltiplicatore di giri elimina una fonte di problemi di manutenzione e riduce il rumore complessivo della turbina. Considerando che l'obiettivo di questo elaborato è quello di analizzare le macchine asincrone a velocità variabile, d'ora in poi si farà riferimento esclusivamente alle macchine asincrone.

1.1.3 Benefici della macchina asincrona

La macchina asincrona ha il privilegio di essere molto robusta e di avere bisogno di poca manutenzione. Inoltre la sua affidabilità, semplicità e l'elevato rendimento hanno fatto sì che rappresenti ancora una delle macchine elettriche più diffuse non solo nel settore della produzione dell'energia ma anche come utilizzatore. Altri vantaggi di questa macchina sono: il minor peso ed ingombro ridotto a parità di potenza. Nel caso di funzionamento sia da motore che da generatore non occorre particolari dispositivi di eccitazione, poiché preleva direttamente dalla rete la potenza magnetizzante necessaria a creare il flusso induttore della macchina. Queste macchine hanno il vantaggio di variare i collegamenti degli avvolgimenti in base alle specifiche condizioni di funzionamento, ovvero variare il numero di poli. Si adegua a diverse prestazioni in base alle esigenze essendo infatti impiegata sia nelle applicazioni di produzione che negli utilizzatori, senza dimenticare il suo più comune impiego come pompe e compressori. La macchina asincrona è caratterizzata da una velocità di sincronismo che dipende dal numero di poli e dalla frequenza di rete. La diffusione dell'utilizzo delle fonti rinnovabili con disponibilità di energia molto variabile ha permesso alle macchine asincrone di essere un'alternativa alle sincrone con prestazioni ottimali.

Funzionamento da generatore

A seconda del tipo di costruzione degli avvolgimenti del rotore la macchina asincrona può avere diverse configurazioni:



Figura 1.3: generatore asincrona a doppia alimentazione con una potenza pari a 3.5 MW

- A gabbia di scoiattolo
- Tipo avvolto con avvolgimenti in cortocircuito o connesso a delle resistenze esterne
- Tipo avvolto con alimentazione rotorica (macchina a doppia alimentazione DFIG)

In caso di generatore a rotore avvolto, si ottiene disponendo su uno statore un avvolgimento induttore distribuito di tipo aperto e su un rotore un avvolgimento di indotto distribuito. Nel caso di rotore avvolto ha gli avvolgimenti simili a quelli dello statore, con lo stesso numero di fase e di poli. Nel caso del rotore a gabbia di scoiattolo nei canali superficiali vengono inserite delle sbarre di alluminio e le terminazioni vengono chiuse da un anello di rame. In questa configurazione le resistenze hanno dei valori molto bassi e non ha un numero di poli priori, adeguandosi in maniera naturale, al numero dei poli di statore.

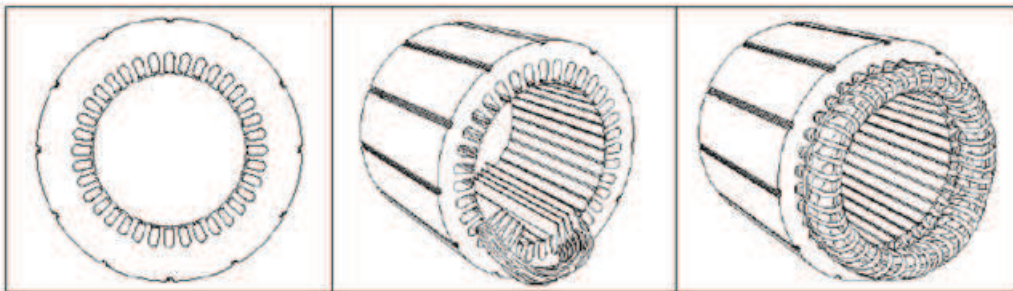


Figura 1.4: statore di una macchina asincrona

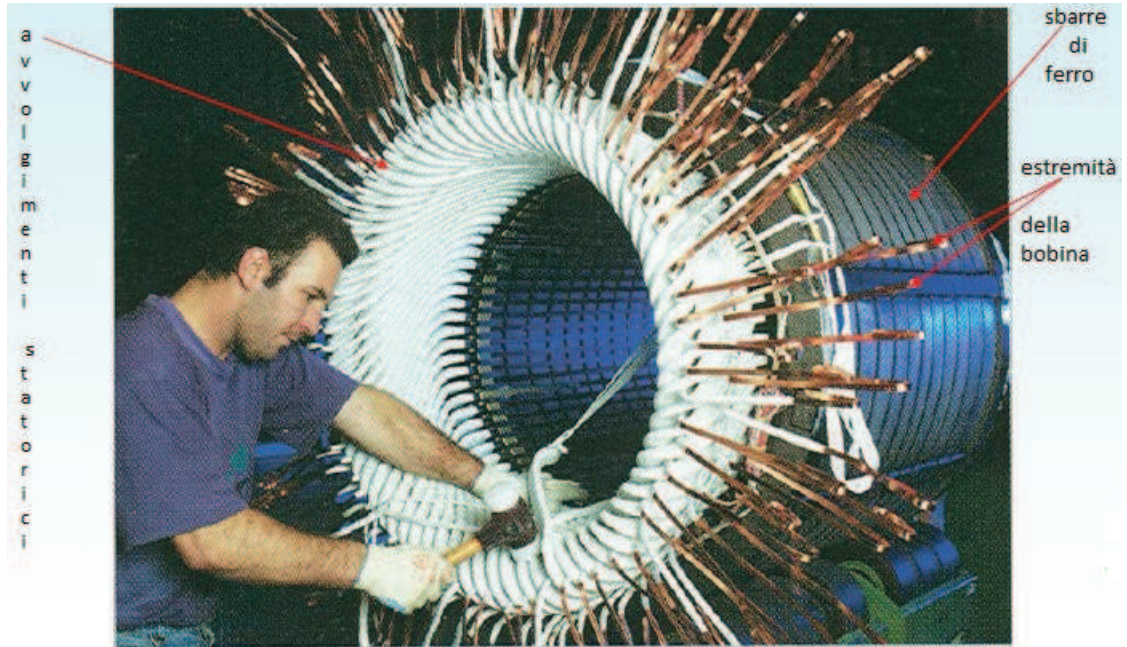


Figura 1.5: statore di una macchina asincrona a doppio layer

Funzionamento da motore: Oltre a tutti i vantaggi descritti della macchina asincrona, nel caso di funzionamento da motore è autoavviante, sviluppa spontaneamente ed automaticamente, variando la propria velocità, una coppia motrice per compensare la coppia resistente applicata all'albero motore. In questo caso l'avvolgimento statorico può essere collegato a stella o a triangolo consentendo, così di alimentare lo stesso motore con due diversi valori di tensione (di un fattore $\sqrt{3}$). Questo collegamento *stella – triangolo*, serve ad avviare il motore riducendo le sollecitazioni meccaniche e limitare la corrente d'avviamento.

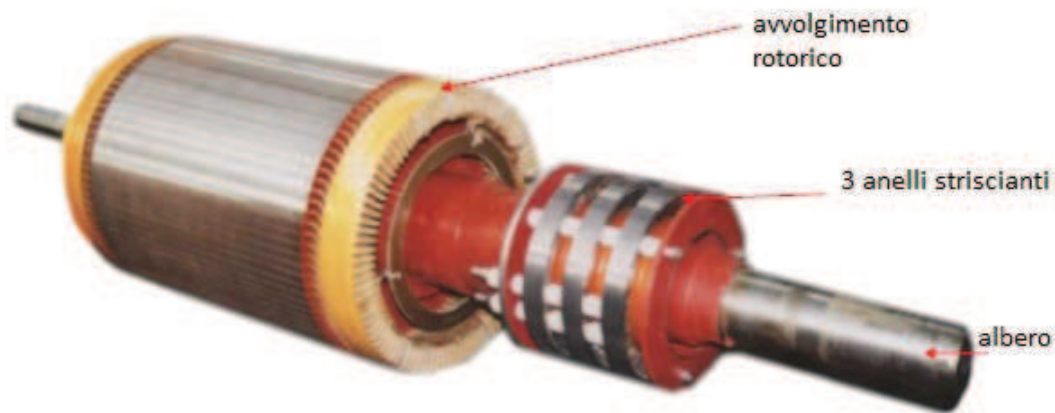


Figura 1.6: rotore avvolto di una macchina asincrona



Figura 1.7: rotore a gabbia di scoiattolo

1.2 Definizione dei parametri

E' utile fare una breve introduzione della macchina asincrona standard che servirà come base per comprendere meglio l'argomento in trattazione.

Data la completa simmetria dell'alimentazione e della struttura elettromagnetica della macchina, è possibile fare riferimento al circuito equivalente monofase con trasposizione dei parametri dal lato rotore allo statore. Procediamo per passi nel capire cosa accade nell'avvolgimento di rotore e di statore utilizzando la convenzione dell'utilizzatore. Per ricavare le grandezze del circuito equivalente, analizziamo in primo luogo lo schema del circuito con circuiti rotorici aperti e rotore bloccato e in secondo luogo con circuiti rotorici chiusi in corto circuito e rotore bloccato.

V_s = tensione di statore per fase
 I_s = corrente di statore per fase
 R_1 = resistenza statorica
 X_1 = reattanza di dispersione relativo allo statore
 p = numero di coppie polari
 ω_r = pulsazione della tensione indotta nel rotore
 ω_m = velocità elettrica del rotore
 ω_s = pulsazione della corrente di alimentazione
 R_0 = perdite nel ferro
 M = induttanza relativa al flusso di magnetizzazione
 I_0 = corrente magnetizzante
 R_2 = resistenza rotorica
 X_2 = reattanza di dispersione relativo al rotore
 I_r = corrente di rotore per fase
 f_s = frequenza di rete
 f_r = frequenza lato rotore
 K = è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche costruttive delle fasi statorica e rotorica(fattore di forma e fattori di avvolgimento)

Alimentando il circuito statorico e lasciando aperto il lato rotorico la macchina asincrona assorbe dalla rete solo la corrente magnetizzante I_0 , il quale produce un campo rotante alla velocità di sincronismo n_s :

$$n_s = \frac{f_s 60}{p} \quad (1.1)$$

Di conseguenza il flusso(Φ_0),così prodotto dal campo magnetico, induce sia negli avvolgimenti dello statore e del rotore delle forza elettromotrici proporzionale al flusso e al numero di avvolgimenti, rispettivamente:

$$E_1 = 2K f_s N_1 \Phi_0 \quad (1.2)$$

$$E_2 = 2K f_s N_2 \Phi_0 \quad (1.3)$$

Di conseguenza per ogni fase di statore si può scrivere l'equazione elettrica:

$$V_s = E_1 + (R_1 + jX_1)I_0 \quad (1.4)$$

Mentre, se alimentiamo il lato statorico quando l'avvolgimento di rotore è aperto ed è libero di muoversi con una determinata velocità ω_m , in questa specifica condizione di funzionamento la forza elettromotrice indotta sull'avvolgimento di statore rimane invariata, mentre quella indotta sull'avvolgimento di rotore subisce delle alterazioni a causa del moto relativo tra il campo magnetico rotante e il rotore.

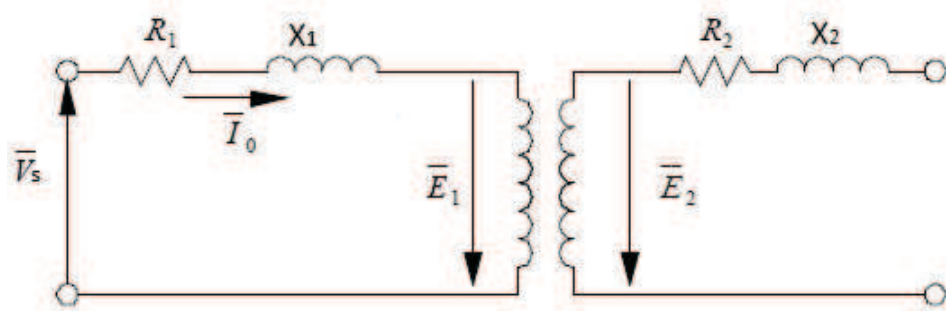


Figura 1.8: macchina asincrona ad avvolgimenti rotorici aperti

1.2.1 Definizione di scorrimento

Se si alimenta lo statore della macchina asincrona avente p coppie di poli di pulsazione ω_s il conseguente sistema di correnti determina un campo magnetico che ruota rispetto allo statore alla velocità angolare:

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \left[\frac{rad}{sec} \right] \quad (1.5)$$

Lo scorrimento (s) di una macchina asincrona è il rapporto fra velocità relativa del campo rotante di statore rispetto alla velocità meccanica di rotore e la velocità del campo rotante di statore, ovvero il numero di giri persi dal rotore rispetto al campo magnetico rotante, per ogni giro di questo.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (1.6)$$

$$= \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (1.7)$$

Dove ω_m si ricava mediante la velocità angolare meccanica Ω_m :

$$\omega_m = p\Omega_m \left[\frac{rad}{sec} \right] \quad (1.8)$$

Rielaborando i termini si può esprimere i numeri di giri del rotore nel modo seguente:

$$n_m = n_s(1 - s)[giri\ al\ minuto] \quad (1.9)$$

$$\omega_m = \omega_s(1 - s) \left[\frac{rad}{sec} \right] \quad (1.10)$$

Mentre le tensioni indotte sul rotore avranno una pulsazione:

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad (1.11)$$

Sostituendo $s = \frac{\omega_r}{\omega_s}$ la frequenza della tensione indotta nel rotore ha il seguente espressione:

$$\omega_r = s\omega_s \quad (1.12)$$

$$f_r = sf \quad [Hz] \quad (1.13)$$

Essendo le frequenze statorica e rotorica correlate alla velocità del rotore, le tensioni indotte risultano isofrequenziali con le correnti dei rispettivi avvolgimenti. Esprimendo il moto relativo in termini di velocità elettrica, l'espressione della forza elettromotrice diventa:

$$E_{2s} = sE_2 \quad [V] \quad (1.14)$$

Questa espressione indica che il campo magnetico generato dal rotore è sincrono con il campo magnetico di statore. Questa condizione permette uno scambio di coppia tra la struttura di rotore e di statore. Nella fig.1.9 dove viene esposto il circuito equivalente, tutte le grandezze sono riferite allo statore.

Osservando il circuito equivalente di una fase della macchina asincrona, si può calcolare la potenza elettromagnetica (attiva) trasmessa da statore a rotore, per ciascuna fase:

$$P_{em} = R_{12}I_{sr}^2 + R_{12}\frac{1-s}{s}I_{sr}^2 \quad (1.15)$$

La potenza meccanica totale è quella fornita all'albero meccanico, quindi deve

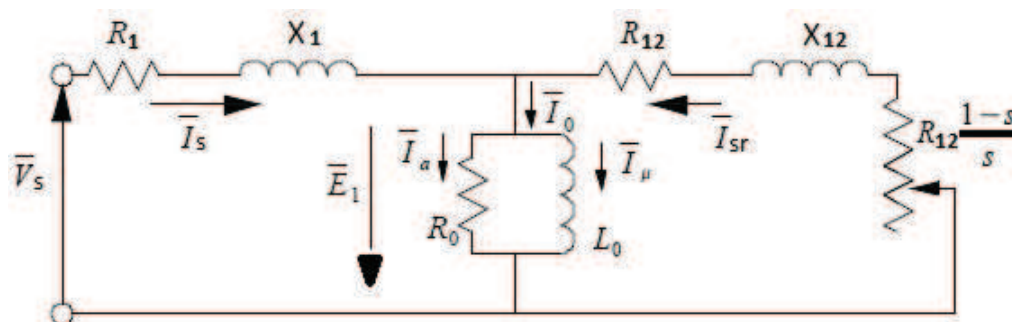


Figura 1.9: circuito equivalente monofase della macchina asincrona

essere depurata dalla potenza meccanica persa per attrito e ventilazione per ottenere la potenza meccanica utile. Mentre la potenza meccanica prodotta P_{mecc} è data da:

$$P_{mecc} = C_{em}\omega_m \quad (1.16)$$

dalla quale è possibile rintracciare la caratteristica meccanica.

La caratteristica meccanica della macchina asincrona ha l'andamento come illustrato nella fig.1.10, dove le aree tratteggiate rappresentano le zone di funzionamento stabile sia da generatore che da motore con valori di scorrimento molto piccolo.

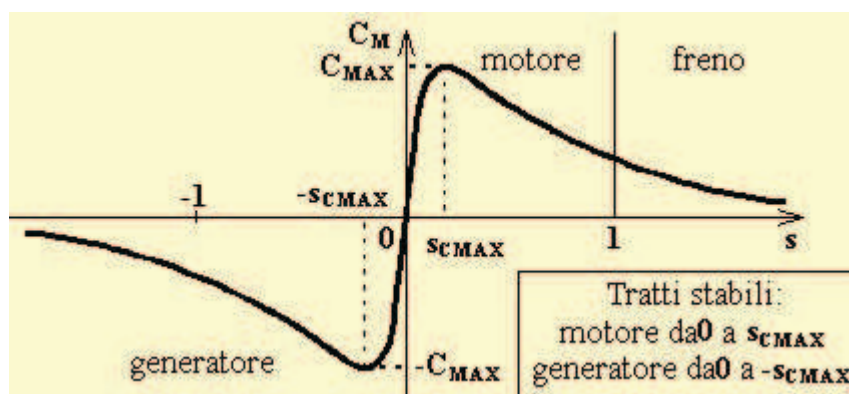


Figura 1.10: caratteristica meccanica della macchina asincrona

Capitolo 2

Macchina Asincrona a doppia alimentazione

2.1 Vantaggi e svantaggi del generatore a doppia alimentazione

Senza dubbio il vantaggio principale della macchina a doppia alimentazione è quello di sfruttare meglio la risorsa primaria nel caso di impianti eolici, mentre nel caso impianti di pompaggio permette di gestire meglio l'energia prodotta da varie fonti rinnovabili non programmabili e permettere una migliore efficienza di conversione delle macchine idrauliche. L'affacciarsi sul panorama del settore dell'energia elettrica di convertitori statici di potenza permette di mantenere costante sia l'ampiezza della tensione che la frequenza in uscita della macchina indipendentemente dalla velocità del rotore generata dal vento. Inoltre la presenza del convertitore statico offre la possibilità di interfacciare i circuiti rotorici con tensione e frequenza variabili con l'inserimento graduale della potenza immessa. Gli avvolgimenti statorici sono direttamente collegati alla rete e rimangono sincronizzati per tutto il tempo. Considerando la potenza attiva che fluisce attraverso gli avvolgimenti rotorici essa è determinata in funzione dello scorrimento, la potenza che deve gestire il convertitore è una frazione della potenza nominale (20 – 30)%, il quale comporta sia un risparmio economico sui convertitori che sui filtri eventuali per le armoniche. Risultano quindi ridotte di 1/3 anche le perdite nei componenti statici rispetto ad un convertitore che gestisce l'intera potenza. La diminuzione di potenza dissipata nel convertitore comporta un aumento

complessivo del rendimento del sistema e quindi una diminuzione del costo dell'energia prodotta da questi sistemi. Tra gli svantaggi, nel caso dell'eolico la presenza del moltiplicatore di giri richiede un certo spazio. Un altro svantaggio di questa configurazione è legato alla presenza di contatti striscianti, che necessitano di manutenzione e sostituzioni periodiche. Nella figura 2.1 illustra i componenti principali del sistema a doppia alimentazione.



Figura 2.1: componenti principali di una turbina eolica funzionante impiegando un generatore a doppia alimentazione

2.2 Evoluzione della macchina a doppia alimentazione

Le prime applicazioni a velocità variabile consistevano semplicemente nell'eguire una variazione del numero di poli per ottenere sostanzialmente due velocità operative. Questo approccio prevedeva l'utilizzo di macchine con rotore a gabbia ed un sistema di modifica delle connessioni degli avvolgimenti di statore in base ad un valore predeterminato della velocità del vento. Questa configurazione infatti aveva alcuni svantaggi:

- Costo supplementare della macchina;
- Quadro comandi supplementare con servizio di manutenzione supplementivo;
- Perdita di energia mentre il generatore è disconnesso durante il cambio di velocità;

Di conseguenza numerose sono le motivazioni che stimolano un forte interesse per il funzionamento a velocità variabile in modo continuo e su un ampio intervallo di valori:

1. variazione della velocità (valori tipici si trovano attorno al $\pm 30\%$ rispetto alla nominale);
2. Costo moderato dell'inverter e bassi valori di armoniche immesse in rete;
3. Facilitare il controllo del passo, migliorare la qualità dell'energia e ridurre i carichi sul cinematismo;

Ci sono diverse configurazioni che consentono il funzionamento del rotore a velocità variabile. Tra le varie soluzioni i più importanti sono:

- Generatori asincroni a rotore avvolto con resistore variabile esterno;
- Generatori asincroni a rotore avvolto con interposto un convertitore di potenza tra rotore e rete (configurazione doubly-fed);
- Generatori asincroni con interposto un convertitore elettronico di potenza tra statore e rete (configurazione full converter);

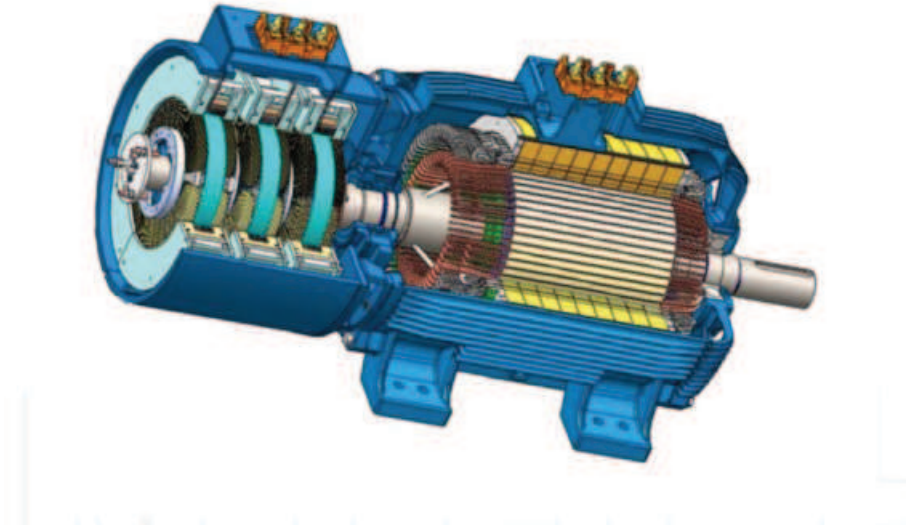


Figura 2.2: sezione della macchina a doppia alimentazione

- Generatori sincroni con interposto un convertitore elettronico di potenza tra statore e rete (configurazione full converter);

Come si evince dal nome la macchina è alimentata sia dal lato statorico che dal lato rotorico. Gli avvolgimenti statorici sono direttamente connessi alla rete, mentre gli avvolgimenti rotorici sono alimentati dalla rete attraverso un complesso di convertitori statici. Gli avvolgimenti di rotore sono collegati al convertitore di potenza mediante un sistema di anelli e contatti striscianti (slip rings). La configurazione attuale della macchina a doppia alimentazione è una derivazione dello schema con la resistenza variabile fig.2.3, sviluppata in Danimarca dalla compagnia *pioneers*, dove l'avvolgimenti rotorici erano connessi ad un resistore mediante un convertitore di potenza. In questo schema l'energia assorbita attraverso gli anelli di strisciamento viene dissipata nel resistore. Purtroppo questo circuito presenta alcuni inconvenienti: lo scorrimento infatti non può essere molto elevato per il fatto che maggiore è il campo di velocità che si vuole coprire maggiore è lo scorrimento e quindi le perdite rotoriche. Questo limita generalmente il valore massimo dello scorrimento al 10%. Questa tecnica viene però utilizzata per limitare il campo di intervento del controllo del pitch, riducendone le sollecitazioni meccaniche.

Per aggirare le limitazioni causate da questo schema vengono fatte alcune variazioni sul lato rotorico mantenendo invariata la parte statorica. Al po-

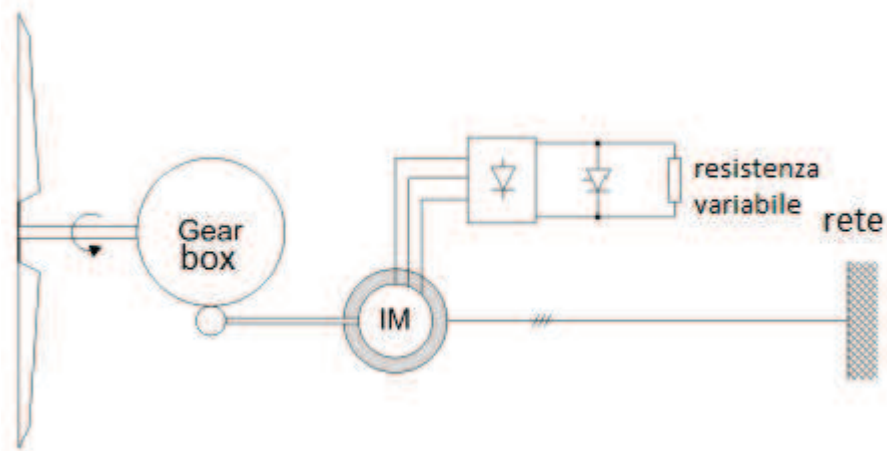


Figura 2.3: schema con la resistenza variabile

sto del resistore e il raddrizzatore vengono introdotti dei commutatori IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) e l'avvolgimento rotorico viene connesso anche esso alla rete. In questo modo l'energia prelevata mediante il rotore non viene dissipata bensì scambiata con la rete.

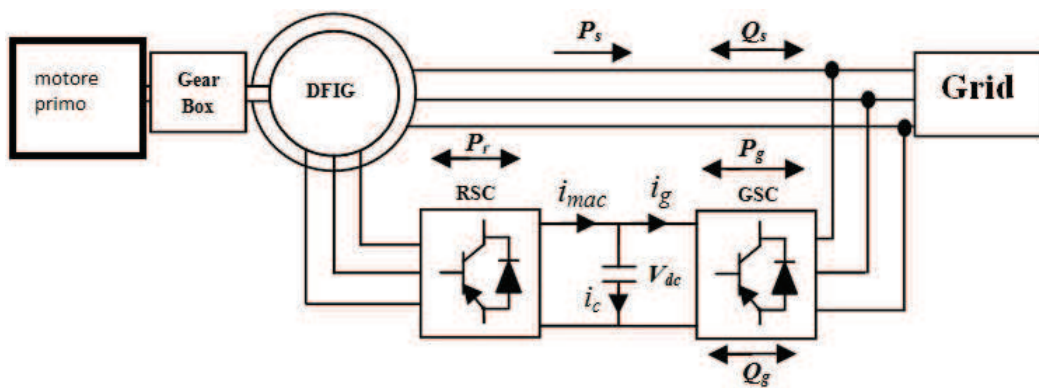


Figura 2.4: macchina a doppia alimentazione mediante convertitore back-to back

2.3 Funzionamento a velocità variabile

Considerando il settore eolico degli ultimi anni le turbine a velocità variabile sono diventate le principali turbine installate. La filosofia sulla quale si è basata la macchina a doppia alimentazione è che, la frequenza nel lato rotore deve essere in grado di variare in continuazione in base alla velocità effettiva di rotazione del rotore fornito dal motore primo per mantenere una frequenza uscente costante dallo statore pari a quella della rete di alimentazione. In questo modo si riesce sempre mantenere la macchina nella zona di funzionamento desiderato.

Attraverso RSC (rotor side converter) si può alimentare il rotore con tensioni di opportuna ampiezza e frequenza allo scopo di compensare la differenza di frequenza tra la velocità angolare del campo magnetico rotante di statore e la velocità angolare effettiva del rotore. Inoltre esso permette di disaccoppiare il controllo della potenza attiva e reattiva attraverso il controllo separato della corrente di eccitazione rotorica. Dallo statore la potenza attiva sarà sempre uscente ed immessa in rete, indipendentemente dal valore di velocità, mentre il rotore assorbirà potenza nel funzionamento in modalità sub-sincronismo e la erogherà nel funzionamento da super-sincronismo. A partire dalla configurazione di base, le modalità di funzionamento citate sono descritte in termini di bilancio di potenza nelle fig. 2.5 e fig. 2.6. Per il fatto che i numeri di poli di entrambi gli avvolgimenti, sia rotore che statore, sono medesimi in regime stazionario, la velocità elettrica ω_m è pari a:

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r \quad (2.1)$$

$$\omega_m = \Omega_m p \quad (2.2)$$

Mentre lo scorrimento è dato dalla:

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_m)}{\omega_s} \quad (2.3)$$

Per descrivere come avviene lo scambio di potenza attraverso i circuiti della macchina, si assume per semplicità di trascurare le perdite. In questo caso la potenza di rotore P_r , gestita dal convertitore RSC, chiamata anche potenza

di scorrimento, è associata alla potenza di statore dalla seguente relazione:

$$P_r = -sP_s \quad (2.4)$$

Se si chiama P_{rete} la potenza che la macchina consegna alla rete, individuata dalla somma algebrica delle potenze di statore e rotore. Per comprendere meglio i flussi di potenza verranno illustrate alcune immagini in cui viene indicato la direzione dei flussi di potenza nelle due condizioni di funzionamento.

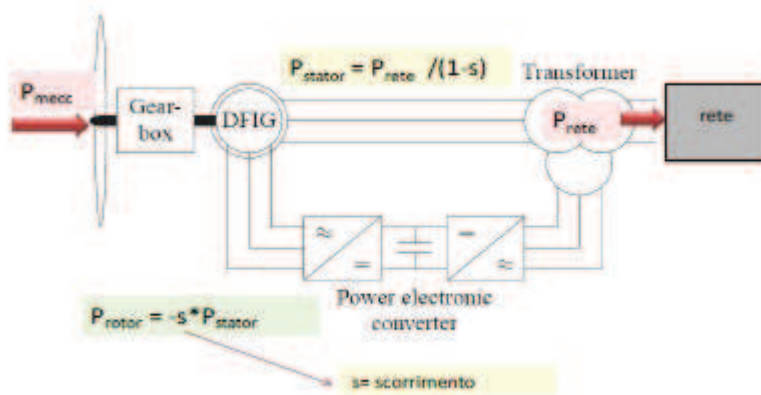


Figura 2.5: I flussi di potenza della macchina a doppia alimentazione

Le macchine attuali hanno normalmente 2 coppie polari, in modo che la velocità di sincronismo alla frequenza di rete (50 Hz) risulta 1500 giri al minuto, con un range di funzionamento che varia dai 1000 ai 2000. Alcuni produttori per minimizzare gli sforzi meccanici costruiscono macchine anche con 3 coppie polari portando velocità di sincronismo a 1000 giri. Nella condizione di funzionamento *iper-sincronismo* il rotore gira ad una velocità superiore rispetto a quella di sincronismo. Per una macchina asincrona standard questo corrisponderebbe già al funzionamento come generatore. Ma in questa configurazione particolare c'è da notare che oltre al flusso di potenza immesso dallo statore verso la rete, ne esiste anche un altro derivante dal rotore che va ad aumentare la potenza immessa in rete. Mentre nel caso di funzionamento *sub-sincrono* il rotore gira ad una velocità inferiore rispetto a quella del campo rotante. Questa condizione per una macchina asincrona standard corrisponderebbe al funzionamento come motore. Quindi per passare allo stato di generatore, la macchina a doppia alimentazione deve assorbire

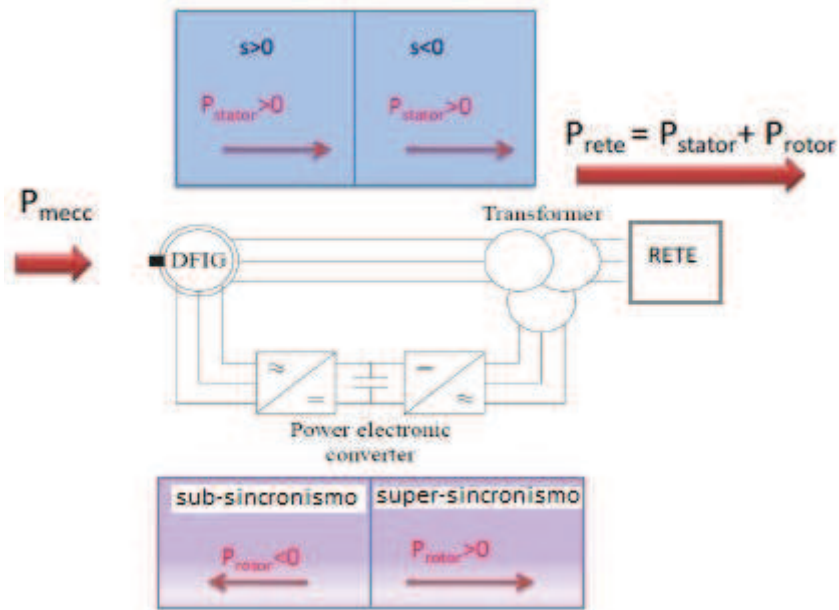


Figura 2.6: flussi di potenza in un dfig per $s > 0$ e $s < 0$

una certa quota di potenza elettrica attraverso il rotore. La fig.2.7 mette in evidenza la capacità della macchina a DF di lavorare sia come motore che generatore in un range di velocità $\pm \Delta\omega_r$ intorno alla velocità di sincronismo.

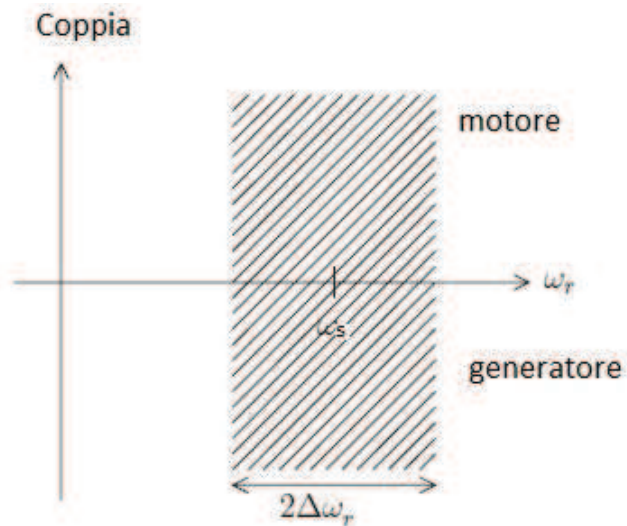


Figura 2.7: zona operativa della macchina DF sulla caratteristica coppia-velocità

2.4 Circuito equivalente nel funzionamento a regime stazionario

Considerando la completa simmetria del circuito trifase si può fare riferimento al circuito equivalente monofase fig. 1.9 descritto nel punto 1.2.1. Rispetto il circuito equivalente, ora viene aggiunto il generatore di tensione variabile in funzione dello scorrimento V_r/s fig. 2.8. La tensione impressa sul lato rotore può essere impiegata come variabile di controllo per la regolazione della potenza attiva e reattiva. La fig.2.9 riporta lo schema monofase del circuito equivalente funzionante in modalità sub-sincronismo, cioè con uno scorrimento positivo con le seguenti ipotesi:

- sia gli avvolgimenti statorici che quelli rotorici sono collegati a stella;
- l'alimentazione dal lato rete è costante ;
- costante anche la tensione lato rete indipendentemente dal valore del lato statore.

Il rotore viene eccitato alla frequenza di scorrimento sf_s , mentre lo statore è connesso alla rete con una tensione e frequenza costante. Infatti in questa condizione di funzionamento la potenza dallo statore è sempre uscente, mentre il rotore sta assorbendo una certa quantità di potenza dalla rete.

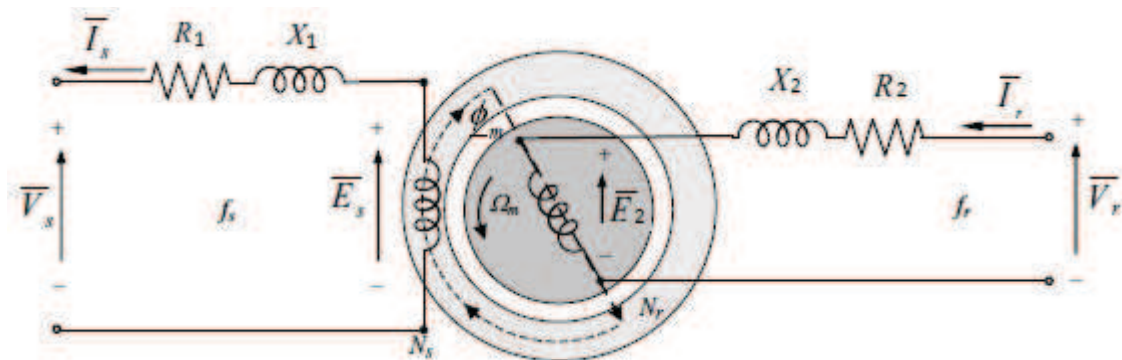


Figura 2.8: configurazione DFIG [20]

Riportando tutti i parametri sul lato statore di rotore mediante il rapporto di spire statore e rotore, il circuito equivalente riferito ad una sola fase è riportato in fig.2.9

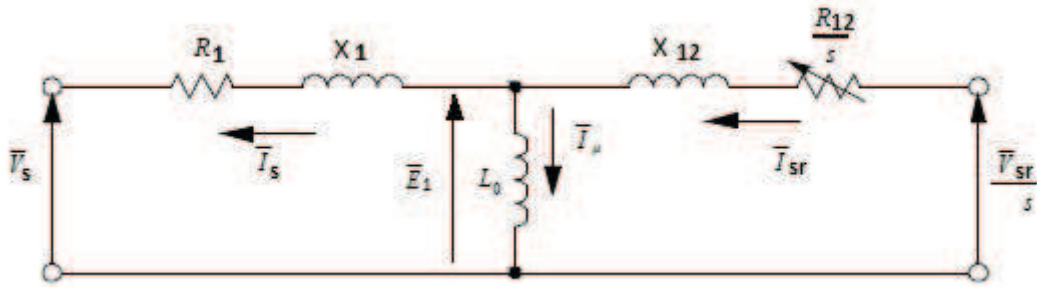


Figura 2.9: lo schema equivalente monofase DFIG riferito allo statore

Si può modificare il circuito 2.9 andando a rielaborare i termini dipendenti dallo scorrimento.

$$\frac{R_{12}}{s} = R_{12} + \frac{R_{12}(1-s)}{s} \quad (2.5)$$

$$\frac{V_{sr}}{s} = V_{sr} + \frac{V_{sr}(1-s)}{s} \quad (2.6)$$

In base a questa relazione (2.5 e 2.6) il circuito monofase equivalente risulta: fig.2.10

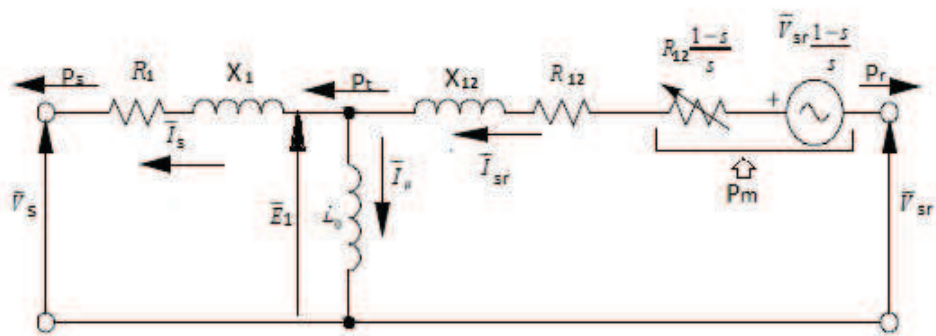


Figura 2.10: lo schema equivalente monofase DFIG

Facendo riferimento alla fig.2.10 e considerando una condizione generica di funzionamento caratterizzato da uno scorrimento s , la potenza meccanica

fornita dal motore primo corrisponde alla potenza elettrica associata ai due termini con lo scorrimento, cioè:

$$\frac{R_{12}(1-s)}{s} \quad (2.7)$$

$$\frac{V_{sr}(1-s)}{s} \quad (2.8)$$

In particolare la (2.8) descrive la conversione di energia elettromeccanica dovuta all'alimentazione rotorica. In regime stazionario l'equazione di tensioni e della potenza attiva dello statore sono i seguenti:

$$\bar{V}_s + (R_1 + jX_1)\bar{I}_s = \bar{E}_1 \quad (2.9)$$

$$P_s + P_{loss,s} = P_t \quad (2.10)$$

dove la P_t , P_s e P_r possono anche esprimere nel modo seguente:

$$P_t = \text{Re}(3\bar{E}_1\bar{I}_{sr}^*) \quad (2.11)$$

$$P_s = \text{Re}(3\bar{V}_s\bar{I}_s^*) \quad (2.12)$$

$$-P_r = \text{Re}(3\bar{V}_{sr}\bar{I}_{sr}^*) \quad (2.13)$$

Invece le perdite sulle R_1 e R_{12} possono essere espresse:

$$P_{loss,s} = 3R_1I_s^2 \quad (2.14)$$

$$P_{loss,r} = 3R_{12}I_{sr}^2 \quad (2.15)$$

Mentre l'equazione di tensione lato rotore:

$$\bar{E}_1 + \left(\frac{R_{12}}{s} + jX_{12} \right) \bar{I}_{sr} = \frac{\bar{V}_{rs}}{s} \quad (2.16)$$

$$\frac{\bar{V}_{rs}}{s} = \bar{I}_{sr} \left(\frac{R_{12}}{s} + j\omega_s L_{12} \right) + (\bar{I}_s + \bar{I}_{sr}) j\omega_s L_m \quad (2.17)$$

$$\bar{V}_{sr} = \bar{E}_1 + \bar{I}_{sr} \left(R_{12} + R_{12} \frac{1-s}{s} + jX_{12} \right) - \bar{V}_{sr} \frac{1-s}{s} \quad (2.18)$$

l'equazione della potenza lato rotore:

$$P_t + P_{loss,r} - P_m = -P_r \quad (2.19)$$

Trascurando momentaneamente le potenze dissipate, la potenza meccanica (considerata positiva quella entrante nel generatore) fornita dalla turbina eolica al albero è la seguente:

$$P_m = P_s + P_r \quad (2.20)$$

Per comprendere meglio i flussi di potenza (attiva e reattiva) facciamo riferimento alla fig.2.11. La coppia elettromagnetica T_{em} è sempre positiva

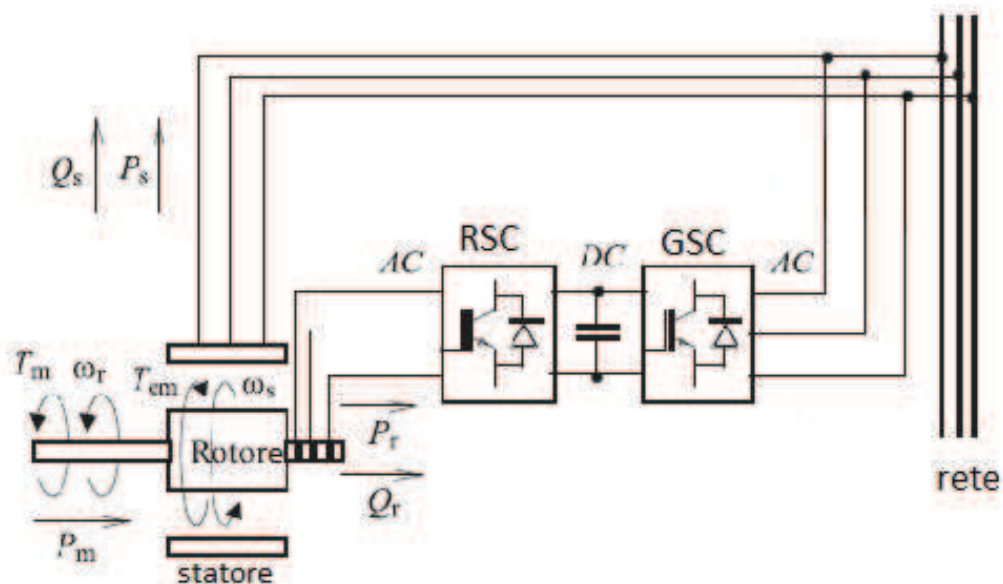


Figura 2.11: flussi di potenza

per la potenza generata, anche la ω_s è sempre positiva ed costante essendo impostata dalla rete di alimentazione, di conseguenza la potenza P_r è una funzione dello scorrimento. La P_r è positiva per gli scorrimenti negativi (modalità sub-sincronismo) e negativa per gli scorrimenti positivi (modalità super-sincronismo).

$$P_s = \frac{P_{rete}}{(1-s)} = \eta_{gen} \frac{P_m}{(1-s)} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} P_r &= P_m - P_s = T_m \omega_r - T_{em} \omega_s = -T_m \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \omega_s \\ &= -s T_m \omega_s = -s P_s \end{aligned} \quad (2.22)$$

L'espressione della potenza meccanica può esprimere anche nel seguente modo:

$$\begin{aligned} P_m &= 3|I_{sr}^2| \left(R_{12} \frac{(1-s)}{s} \right) - 3Re \left\{ V_{sr} \frac{1-s}{s} I_{sr}^* \right\} \\ &= 3|I_{sr}^2| \left(R_{12} \frac{(1-s)}{s} \right) - 3 \left(\frac{1-s}{s} \right) Re \left\{ V_{sr} I_{sr}^* \right\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Il segno del primo addendo a destra dipende sola da scorrimento, mentre il segno del secondo addendo a destra dipende da scorrimento e sfasamento tra V_{sr} e I_{sr}^*

$$\begin{aligned} P_m &= T_{em} \Omega_m \\ &= T_{em} \frac{\omega_m}{p} \\ &= P_m \frac{p}{\omega_m} \\ &= 3 \frac{p}{\omega_m} |I_{sr}^2| \left(R_{12} \frac{(1-s)}{s} \right) - 3 \frac{p}{\omega_m} \left(\frac{1-s}{s} \right) Re \left\{ V_{sr} I_{sr}^* \right\} \end{aligned} \quad (2.24)$$

P_s = Potenza uscente dallo statore

P_r = potenza che attraversa mediante avvolgimenti rotorici

P_e = potenza complessiva consegnata alla rete

$P_{loss,s}$ = potenza persa negli avvolgimenti di statore

$P_{loss,r}$ = potenza persa negli avvolgimenti di rotore

P_t = potenza trasmessa al traferro

P_m = potenza meccanica fornita dal motore primo

T_{em} = coppia elettromagnetica

T_m = coppia meccanica

Re = la parte reale del valore complesso

I_s = corrente statorica

I_{sr} = corrente rotorica riportata allo statore

I_s^* = complesso coniugato della corrente statorica

I_{sr}^* = complesso coniugato della corrente rotorica riferita al lato statore

La potenza complessa scambiata attraverso lo statore S_s e il rotore S_r vengono considerate positive se sono uscenti dal generatore.

$$S_s = \sqrt{3}V_s I_s^* \quad (2.25)$$

$$S_{sr} = \sqrt{3}V_{sr} I_{sr}^* \quad (2.26)$$

Nell'ipotesi di trascurare le perdite e considerando un convertitore ideale, lo schema unifilare della macchina a doppia alimentazione può essere il seguente: fig.2.12, mentre l'andamento della potenza in funzione di scorrimento è illustrato in fig.2.13.

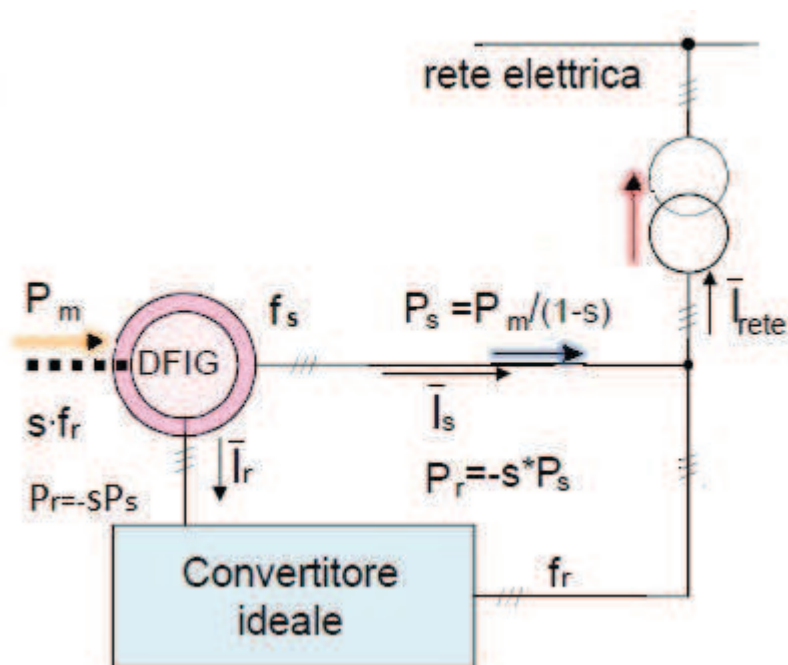


Figura 2.12: schema unifilare della DFIG

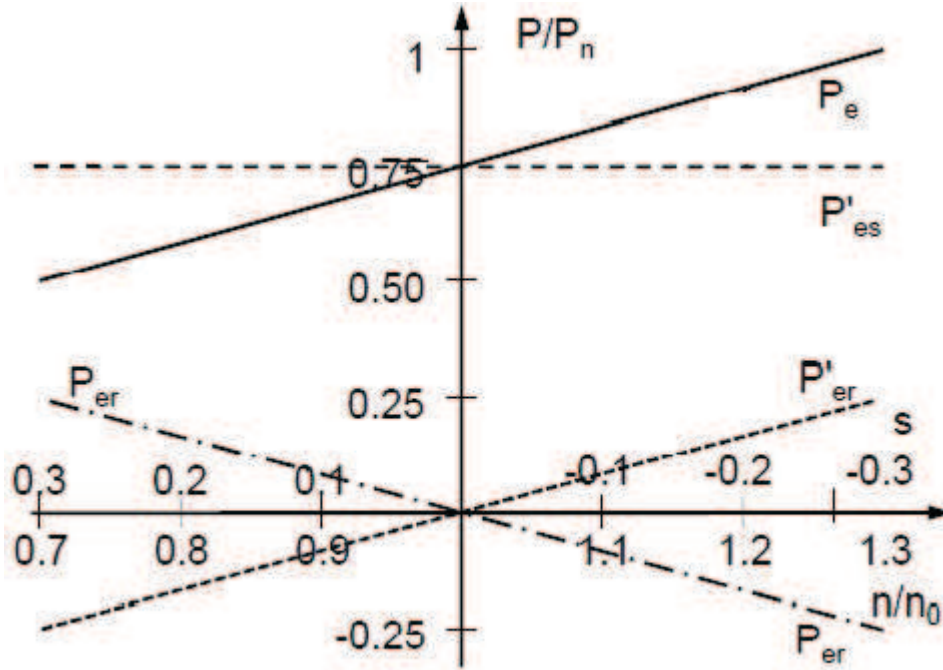


Figura 2.13: andamento della potenza in funzione di scorrimento

Dalla figura 2.14 è possibile ricavare il diagramma fasoriale considerando un specifico condizione di funzionamento. I flussi di statore e rotore possono essere calcolati nel modo seguente:

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \quad (2.27)$$

$$\bar{\Psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (2.28)$$

dove L_s e L_r l'induttanza dello statore e del rotore ricavato mediante:

$$L_s = L_m + L_{\sigma s} \quad (2.29)$$

$$L_r = L_m + L_{\sigma r} \quad (2.30)$$

Inserendo I flussi nell'espressione delle tensioni, si ricavano:

$$\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s = j\omega_s \bar{\Psi}_s \quad (2.31)$$

$$\bar{V}_r - R_r \bar{I}_r = j\omega_s \bar{\Psi}_r \quad (2.32)$$

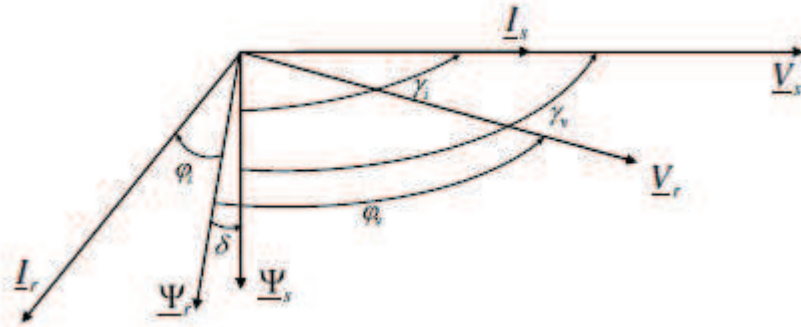


Figura 2.14: diagramma fasoriale della macchina DF operante come motore con $Q_s=0$

dove:

δ = lo sfazamento tra i due flussi

γ_v = lo sfazamento tra la tensione di statore e il flusso di statore

γ_i = lo sfazamento tra flusso e corrente di statore

φ_v = sfazamento tra il flusso la tensione del rotore

φ_i = sfazamento tra il flusso la corrente del rotore

2.5 Esempio di calcolo

Di seguito vengono illustrati i valori nominali dei vari parametri di un tipico impianto a doppia alimentazione impiegato come generatore delle turbine eoliche di potenza pari a 2MW.

grandezza	valore	unità di misura
velocità di sincronismo	1500	<i>giri/min</i>
potenza	2	<i>MW</i>
tensione statorica	690	<i>V</i>
corrente nom. statorica	1760	<i>A</i>
coppia nominale	12732	<i>Nm</i>
tipo di connessione statore	stella	
p	2	
tensione rotorica	2070	<i>V</i>
a	0.34	
R_s	2.6	<i>mΩ</i>
L_s	0.087	<i>mH</i>
L_m	2.5	<i>mH</i>
R_r	26.1	<i>mΩ</i>
L_r	2.587	<i>mH</i>

Prendendo come dati i valori del data-sheet precedente, viene illustrato un semplice esempio di generatore a doppia alimentazione per applicazioni eoliche di potenza pari a 2 MW con uno scorrimento nominale pari a ($s = -0.25$) funzionante in super-sincronismo.

1. Velocità di sincronismo:

$$\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi(50) = 314.16[\text{rad/sec}] \quad (2.33)$$

2. Tensione di fase:

$$\bar{V}_s = \frac{690}{\sqrt{3}}\angle 0 = 398.4\angle 0 \quad [V] \quad (2.34)$$

3. Corrente di linea o di statore:

$$\begin{aligned} P_s + j0 = 3\bar{V}_s\bar{I}_s^* \quad \bar{I}_s &= \left(\frac{P_s}{3\bar{V}_s}\right)^* = \left(\frac{-2 \times 10^6}{3 \times 398.4\angle 0}\right)^* \\ &= 1673.4\angle 180[A] \end{aligned} \quad (2.35)$$

4. Flusso di statore:

$$\bar{V}_s = \bar{I}_s R_1 + j\omega_s \bar{\lambda}_s \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_s &= \frac{\bar{V}_s - \bar{I}_s R_1}{j\omega_s} = \frac{(398.4\angle 0 - (1673.4\angle 180)2.6 \times 10^{-6})}{j314.16} \\ &= 1.28\angle -90[Wb]\end{aligned}\quad (2.37)$$

5. Corrente di statore:

$$\begin{aligned}\bar{I}_r &= \frac{\bar{\lambda}_s - \bar{I}_s L_1}{L_m} = \frac{1.28\angle -90 - 2.587 \times 10^{-3}(1673.4\angle 180)}{2.5 \times 10^{-3}} \\ &= 1807.4\angle 16.5[A]\end{aligned}\quad (2.38)$$

Tutti i dati così ricavati sono riferiti al lato statore, quindi per ottenere i valori riferiti al lato rotore basta utilizzare il rapporto di spire (a) in modo corretto. In questo caso essendo $a=0.34$ la corrente effettiva sul lato rotore:

$$\bar{I}_r = a \times \bar{I}_{sr} = .34 \times 1807.4\angle -16.5[A] \quad (2.39)$$

Mentre la frequenza sui circuiti rotorici risulta:

$$f_r = s f_s = .25 \times 50 = 12.5[Hz] \quad (2.40)$$

6. Flusso di rotore:

$$\bar{\lambda}_r = \bar{I}_s L_m + L_{12} \bar{I}_{12} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_r &= 2.5 \times 10^{-3} \times (1673.4\angle 180) \times 2.587 \times 10^{-3} \times 1807.4\angle -16.5 \\ &= 1.358\angle -77.4[Wb]\end{aligned}\quad (2.42)$$

7. Tensione ai capi del rotore:

$$\bar{V}_{sr} = \bar{I}_{sr} R_{12} + j s \omega_s \bar{\lambda}_r \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned}\bar{V}_{sr} &= (1807.4\angle -16.5)2.9 \times 10^{-3} + j(-.25)(314.16)(1.358\angle -77.4) \\ &= 102.2\angle -165.9[V]\end{aligned}\quad (2.44)$$

La tensione riportata sul lato rotore:

$$\bar{V}_r = \frac{\bar{V}_{sr}}{a} = \frac{102.2\angle - 165.9}{.34} = 300.6\angle - 165.9[V] \quad (2.45)$$

8. Potenza attiva e reattiva sul lato rotore:

$$P_r = 3Re\left\{\bar{V}_{sr}\bar{I}_{sr}^*\right\} \quad (2.46)$$

$$P_r = 3Re\left\{102.2\angle - 165.9 \times ((1807.4\angle - 16.5))\right\} = -.55[MW] \quad (2.47)$$

$$Q_r = 3Im\left\{\bar{V}_{sr}\bar{I}_{sr}^*\right\} \quad (2.48)$$

$$Q_r = 3Im\left\{102.2\angle - 165.9 \times (1807.4\angle - 16.5)\right\} = 23.4[KVar] \quad (2.49)$$

9. La potenza totale generata:

$$P_s + P_r = -2 - .55 = -2.55[MW] \quad (2.50)$$

10. La coppia elettromagnetica:

$$T_{em} = 3p\frac{L_m}{L_1}Im\left\{\bar{\lambda}_s\bar{I}_r^*\right\} \quad (2.51)$$

Questa espressione è stata ricavata utilizzando l'equazione dell'avvolgimento statorico:

$$\begin{aligned} T_{em} &= 3pL_mIm\left\{\frac{\bar{\lambda}_s - L_m\bar{I}_r^*}{L_s}\bar{I}_r\right\} \\ &= 3p\frac{L_m}{L_s}Im\left\{\bar{\lambda}_s\bar{I}_r - L_m\bar{I}_r\bar{I}_r^*\right\} \\ &= 3p\frac{L_m}{L_s}Im\left\{\bar{\lambda}_s\bar{I}_r - L_m\bar{I}_r^2\right\} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Quindi essendo $L_m\bar{I}_r^2$ è un valore puramente reale, di conseguenza

l'espressione della T_{em} risulta:

$$T_{em} = 3p \frac{L_m}{L_1} \operatorname{Im} \left\{ \bar{\lambda}_s \bar{I}_r^* \right\} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} T_{em} &= 3 \times 2 \frac{2.5 \times 10^{-3}}{2.587 \times 10^{-3}} = \operatorname{Im} \left\{ 1.28 \angle 90 (1807.4 \angle -16.5) \right\} \\ &= -12.9 [kNm] \end{aligned} \quad (2.54)$$

La potenza fornita dalla turbina eolica risulta quindi: $2.55 MW$

Mentre gli avvolgimenti della macchina forniscono una potenza pari a: $2 MW$

Mediante le simulazioni relative all'esempio di calcolo sono stati ricavati i seguenti andamenti di alcune grandezze:

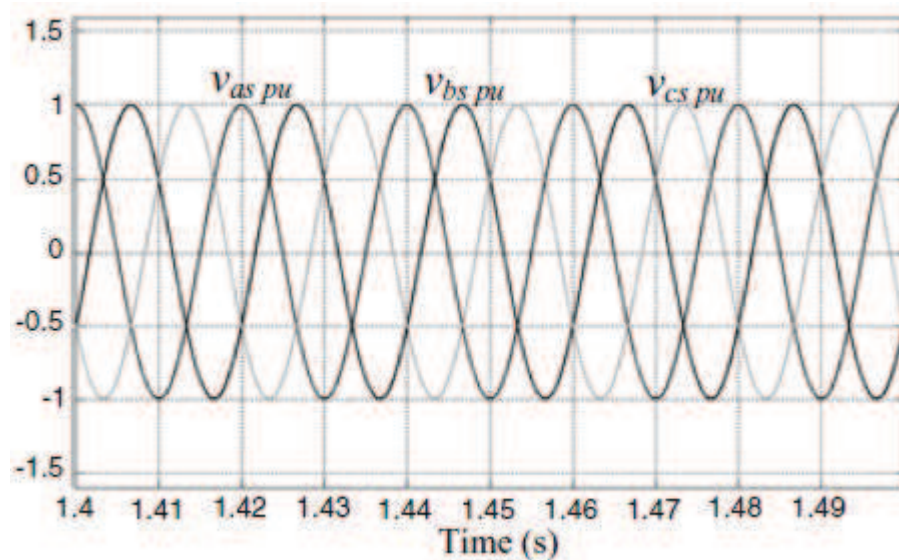


Figura 2.15: andamento della tensione statorica

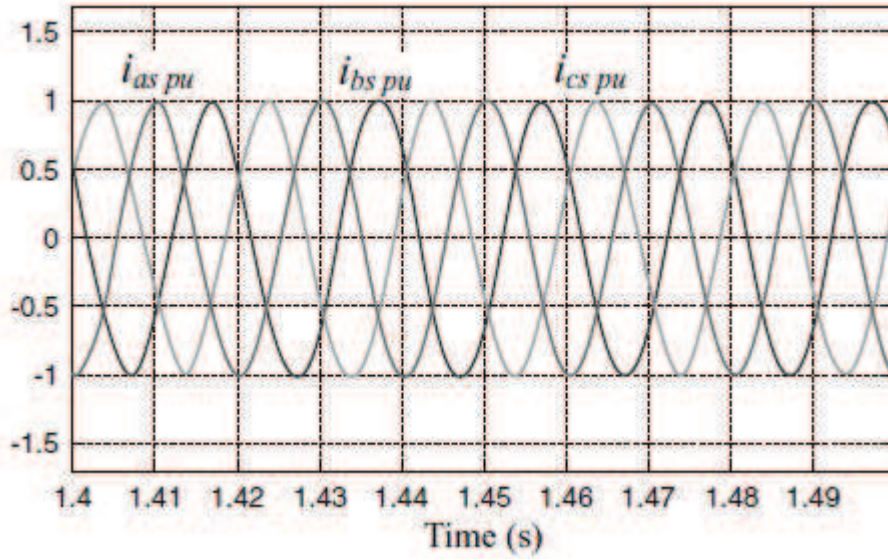


Figura 2.16: andamento della corrente lato statore

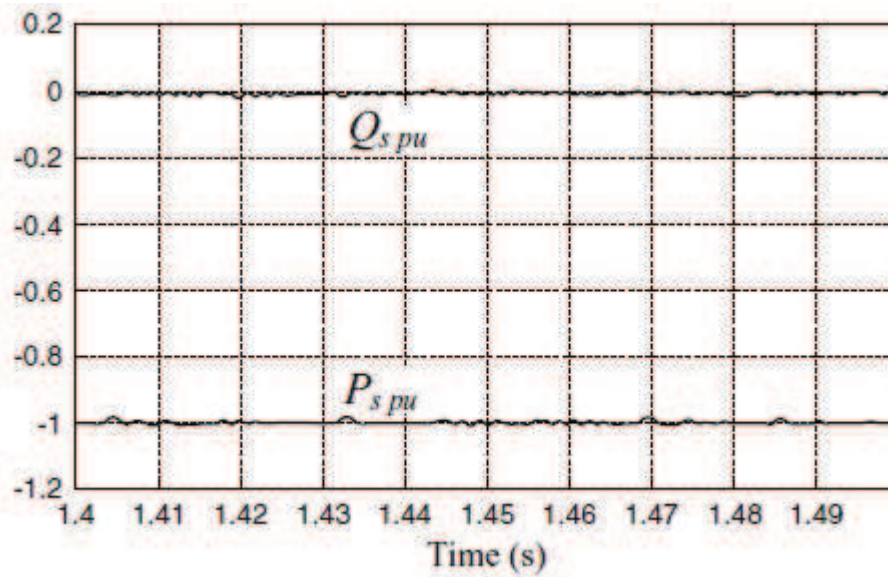


Figura 2.17: potenza attiva e reattiva fluisce attraverso lo statore

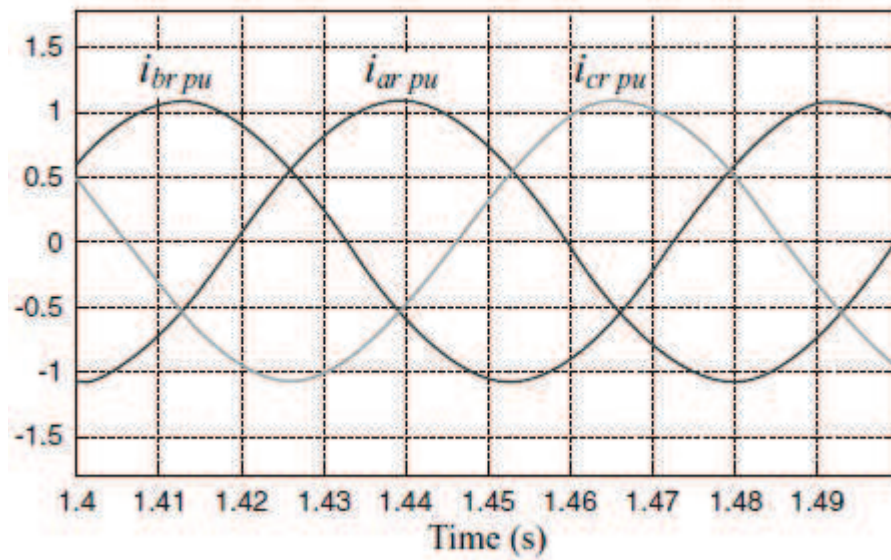


Figura 2.18: corrente rotorica

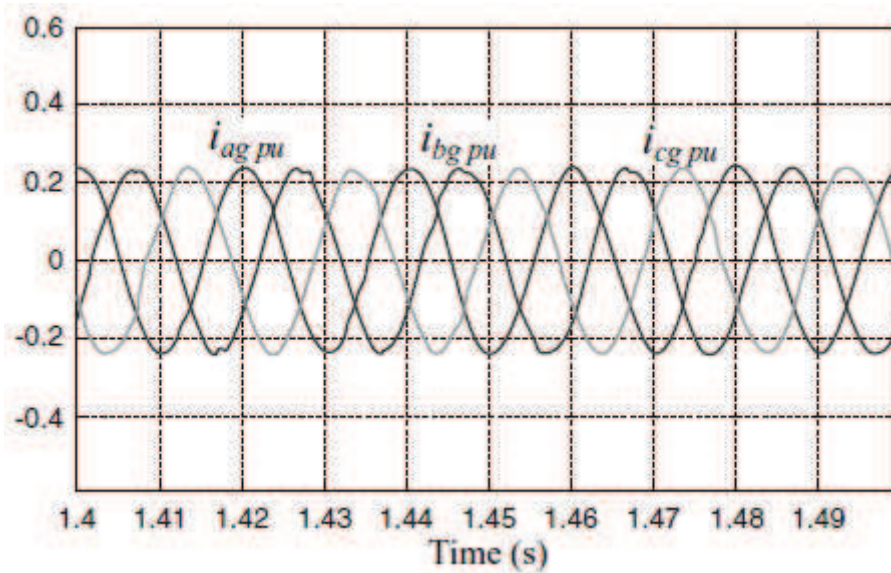


Figura 2.19: corrente della rete di alimentazione

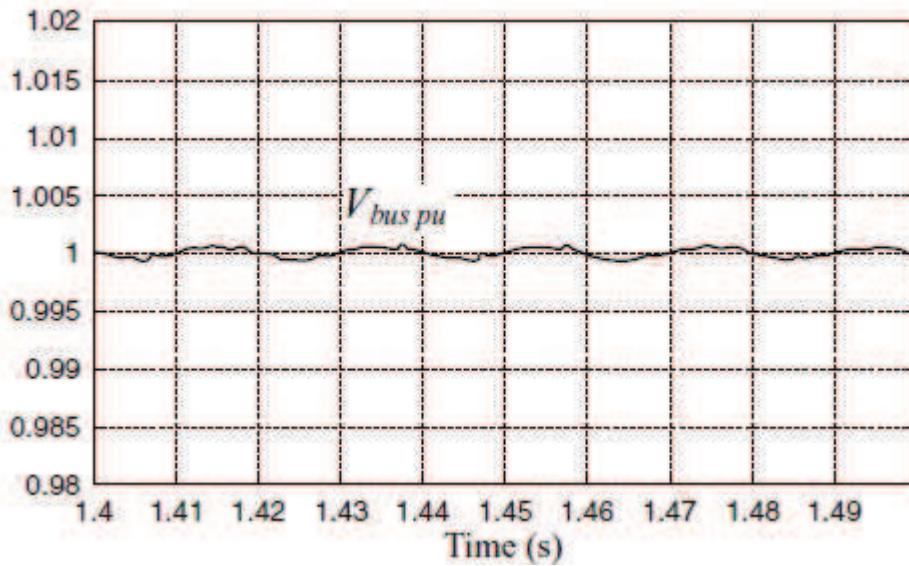


Figura 2.20: tensione della bus in continua

2.5.1 Macchina a doppia alimentazione in cascata(CDFIG)

Un'altra configurazione della macchina DF è il seguente:fig.2.21. Questa con-

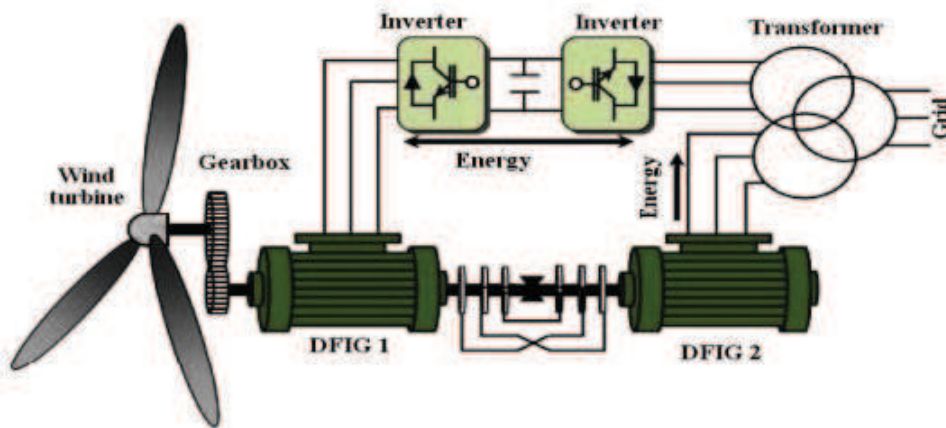


Figura 2.21: Macchina a doppia alimentazione in cascata(CDFIG)

figurazione può essere una valida alternativa ai generatori a rotore avvolto a doppia uscita. È caratterizzato da due macchine asincrone in cascata evitando l'uso degli anelli ed i contatti striscianti, di conseguenza richiede una manutenzione minore rispetto il generatore DF. In questo sistema energia

rotorica del generatore 1 viene trasferita ad un secondo generatore il quale è direttamente accoppiato al primo generatore mediante l'unico albero motore. L'energia così ricevuta viene immessa in rete mediante gli avvolgimenti statorici del generatore 2. Questo tipo di macchina non è ancora molto diffuso per il fatto penalizza dal punto di vista economico l'utilizzo di due macchine.

Capitolo 3

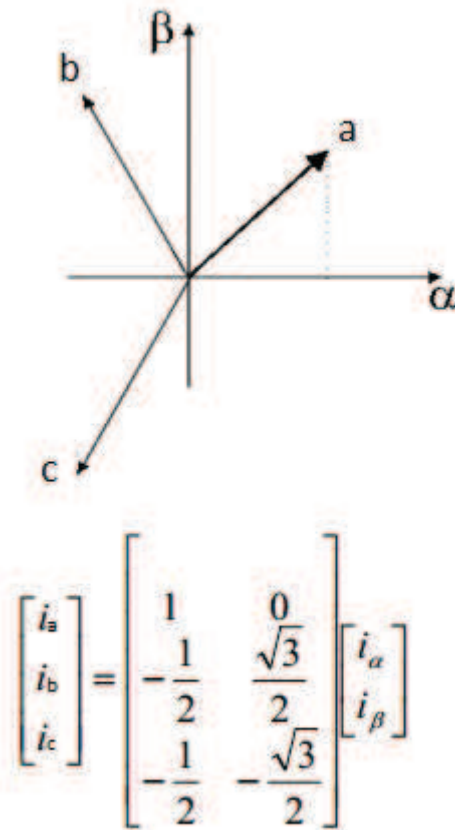
Strategie di controllo

3.1 Le trasformate

Com'è stata accennato nel capitolo precedente si effettua un controllo della tensione mediante i convertitori per massimizzare la potenza estratta al variare della velocità del vento. Il modello della macchina sia in regime stazionario che in regime transitorio viene descritto mediante il sistema di riferimento d-q che ottenuto applicando la trasformata di Park. L'utilizzo di queste trasformazioni semplifica molto il modello matematico limitando i mutui accoppiamenti e togliendo la dipendenza dei parametri elettromagnetici dalla posizione angolare. Prima di entrare in specifico sull'argomento del controllo sarebbe corretto fare un piccolo introduzione sia sulle trasformata di Clark che sulla trasformata di Park.

3.1.1 Trasformata di Clark

La trasformata di Clark non è altro che una tecnica di trasformazione che consente di passare da un sistema trifase abc costituito da tre bobine disposte a 120° l'una rispetto all'altra, ad un sistema bifase $\alpha\beta$, costituito da due bobine disposte nello spazio a 90° l'una rispetto all'altra che è solidale rispetto il sistema trifase di partenza. In questo caso prendiamo un sistema di tre correnti i_a , i_b e i_c .

Figura 3.1: trasformata di Clarke- $\alpha\beta$

3.1.2 Trasformata di Park

Questa trasformazione consiste nel passare da un sistema bifase $\alpha\beta$ assi fissi nello spazio ad un riferimento con assi rotanti $d - q$, dove α coincide con l'asse dell'avvolgimento a di partenza e θ rappresenta la posizione del rotore. Questa seconda trasformazione elimina la dipendenza dalla variabile t del sistema di partenza.

$$I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta \quad (3.1)$$

$$I_q = -I_\alpha \sin\theta + I_\beta \cos\theta \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

In questo contesto utilizzeremo il sistema di riferimento sincrono, dove la

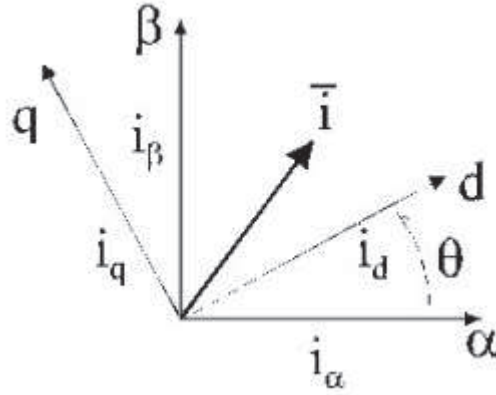


Figura 3.2: trasformata di Park -dq

velocità di rotazione del sistema dq è proprio la ω_s e di conseguenza i vettori spaziali riferiti a quel sistema non ruotano, inoltre i vettori riferiti al sistema $d-q$, possono esprimere mediante due componenti, uno in fase con asse d e l'altro con asse q .

In base a quanto espresso in precedenza si possono esprimere le equazioni differenziali della tensione riferiti al sistema dq che poi verranno richiamati poi nel paragrafo del controllo. Le equazioni della tensione sono date da:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\Psi}_s \quad (3.4)$$

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_m) \bar{\Psi}_r \quad (3.5)$$

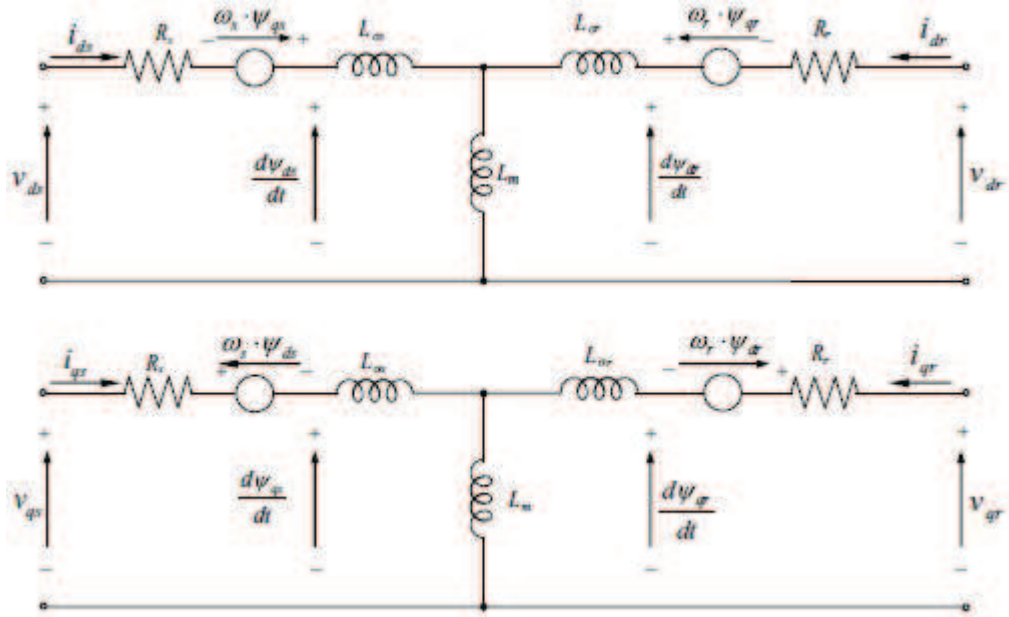
Mentre le espressioni relative ai flussi risultano rispettivamente:

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \quad (3.6)$$

$$\bar{\Psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (3.7)$$

Considerando una terna di tensioni sinusoidali di alimentazione, in regime stazionario tutte le grandezze risultano costanti (tensioni, correnti e flussi). La figura 3.3 illustra il circuito equivalente della DFIG riferito al sistema dq .

Facendo riferimento sempre al regime stazionario, la potenza attiva e

Figura 3.3: modello dq della macchina DF

reattiva possono esprimere nel modo seguente:

$$P_s = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \bar{v}_s i_s^* \right\} = \frac{3}{2} \left\{ v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \right\} \quad (3.8)$$

$$P_r = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \bar{v}_r i_r^* \right\} = \frac{3}{2} \left\{ v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \right\} \quad (3.9)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left\{ \bar{v}_s i_s^* \right\} = \frac{3}{2} \left\{ v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs} \right\} \quad (3.10)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left\{ \bar{v}_r i_r^* \right\} = \frac{3}{2} \left\{ v_{qr} i_{dr} + v_{dr} i_{qr} \right\} \quad (3.11)$$

Mentre l'espressione della coppia elettromagnetica risulta:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \operatorname{Im} \left\{ \bar{\Psi}_s i_r^* \right\} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \left\{ \Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr} \right\} \quad (3.12)$$

3.2 Controllo vettoriale della macchina a doppia alimentazione

Il sistema di controllo di per sè è un aspetto fondamentale in tutti azionamenti elettrici, ma in questo in contesto ha un ruolo ancora più importante parlando della macchina a doppia alimentazione. Mediante il controllo è possibile gestire sia le grandezze del lato rotore come ad esempio la coppia, la potenze attiva e reattiva, sia le grandezze lato rete ovvero la potenza reattiva e la tensione del bus in continua. I metodi di controlli largamente utilizzati sono due:

- la tecnica di controllo vettoriale
- la tecnica di controllo diretto

Nel seguito si farà riferimento al controllo vettoriale.

3.3 Controllo vettoriale

Il controllo vettoriale avviene mediante il sistema di riferimento dq descritto nel paragrafo 3.1.2. In questa logica di controllo vengono gestite i componenti d e q della corrente rotorica. Inoltre come è mostrato in figura 3.4 se il sistema di riferimento è allineato con il flusso statorico, mediante le due componenti q e d della corrente rotorica, si può controllare la potenza attiva e reattiva uscente rispettivamente dallo statore in modo indipendente. Le equazioni generali della macchina DF (3.1-3.12) possono essere semplificati facendo riferimento al sistema di riferimento allineato con il flusso di statore fig. 3.4. Di conseguenza le relazioni fra il flusso di statore Ψ_s e le correnti possono essere scritti nel seguente modo:

$$i_{ds}L_s + i_{dr}L_m = \Psi_s \quad (3.13)$$

$$i_{qs}L_s + i_{qr}L_m = 0 \quad (3.14)$$

Utilizzando le relazioni 3.10 e 3.11 si può scrivere il legame tra le due correnti anche:

$$i_{ds} = \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \quad (3.15)$$

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (3.16)$$

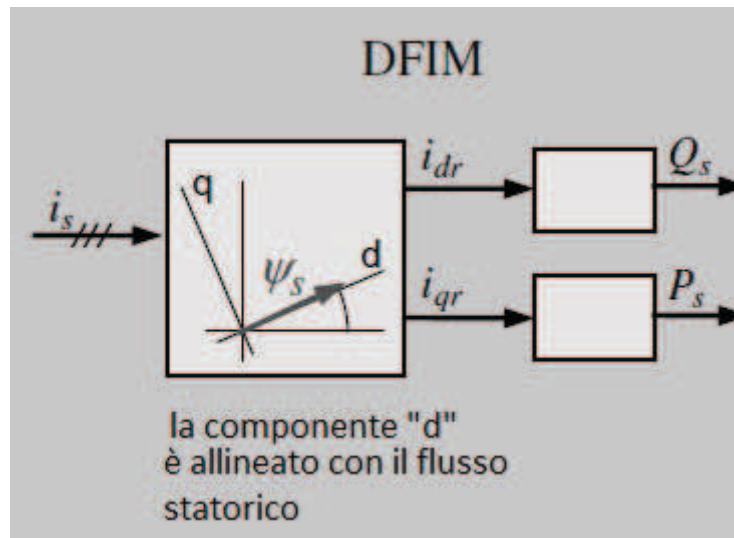


Figura 3.4

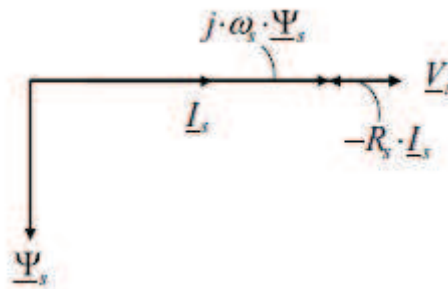


Figura 3.5

Considerando che in regime stazionario il flusso di statore Ψ_s è proporzionale alla tensione di rete \bar{V}_g e trascurando le cadute di tensioni sulle resistenze, la tensione sul lato statore può esprimere :

$$v_{ds} = 0 \quad (3.17)$$

$$v_{qs} = \bar{V}_g \approx \omega_s \Psi_s \quad (3.18)$$

Come si vede dalla figura 3.5 quando il flusso di statore è allineato con l'asse diretto, la tensione di rete deve orientata secondo l'asse in quadratura. Allora la potenza attiva e reattiva sul lato statore possono anche essere scritto:

$$P_s = \frac{3}{2} v_{qs} i_{qs} \quad (3.19)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{qs} i_{ds} \quad (3.20)$$

Sostituendo le 3.12 e 3.13 nel 3.16 e 3.17

$$P_s = -\frac{3}{2} \bar{V}_g \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (3.21)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \bar{V}_g \frac{\Phi_s}{L_s} i_{qr} - \frac{3}{2} \bar{V}_g \frac{L_m}{L_s} i_{dr} = \frac{3}{2} \frac{\bar{V}_g}{\omega_s L_s} - \frac{3}{2} \bar{V}_g \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \quad (3.22)$$

Dalle equazioni 3.18 e 3.19 è evidente che sotto l'orientamento del flusso di statore la potenza attiva e reattiva sono disaccoppiate e possono essere controllate indipendentemente mediante le due componenti della corrente rotorica. Quindi il circuito di controllo può essere del tipo (fig 3.6), dove P_s e Q_s sono i valori effettivi erogati, mentre P_s^* e Q_s^* sono i valori di riferimento. In questo modo riesce ad ottenere un controllo molto più accurato visto che istante per istante i valori effettivi vengono confrontati con quelli di riferimento. Se ora andiamo a riscrivere la coppia elettromagnetica:

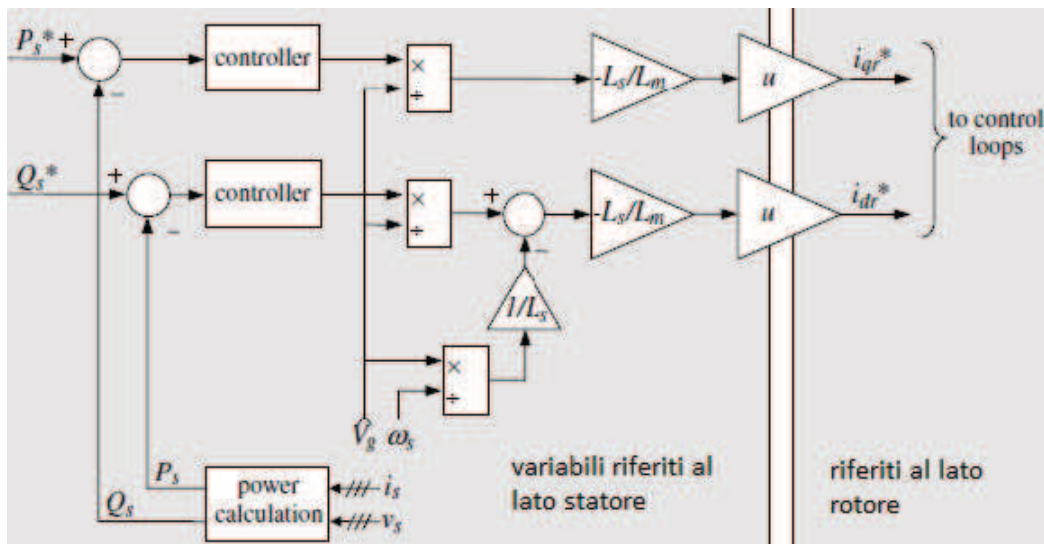


Figura 3.6

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \left\{ \Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr} \right\} \quad (3.23)$$

e considerando che il flusso di statore è allineato con l'asse d , risulta:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (-\Psi_{ds} i_{qr}) \quad (3.24)$$

Andando a Sostituire Ψ_{ds} con 3.15, l'espressione della T_{em} , si può riscrivere in questo modo:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \frac{\bar{V}_g}{\omega_s} i_{qr} \quad (3.25)$$

dalla quale è evidente che anche la coppia elettromagnetica può essere controllato attraverso i_{qr} .

3.3.1 Circuito di Controllo

Ci sono diversi tipi di controllori che possono essere impiegati in questo sistema di controllo, in questo circuito utilizzeremo un controllore PI, soprattutto per la sua semplicità. I parametri del controllore PI vengono ricavate facendo riferimento al circuito in figura 3.7, dove per semplicità viene trascurato la resistenza statorica. In questo circuito la tensione di alimentazione e il flusso di statore sono orientati come in figura 3.5, dove sia la componente d della tensione che la componente q del flusso risultano nullo. Quindi facendo riferimento al lato rotore della figura 3.7 si può scrivere:

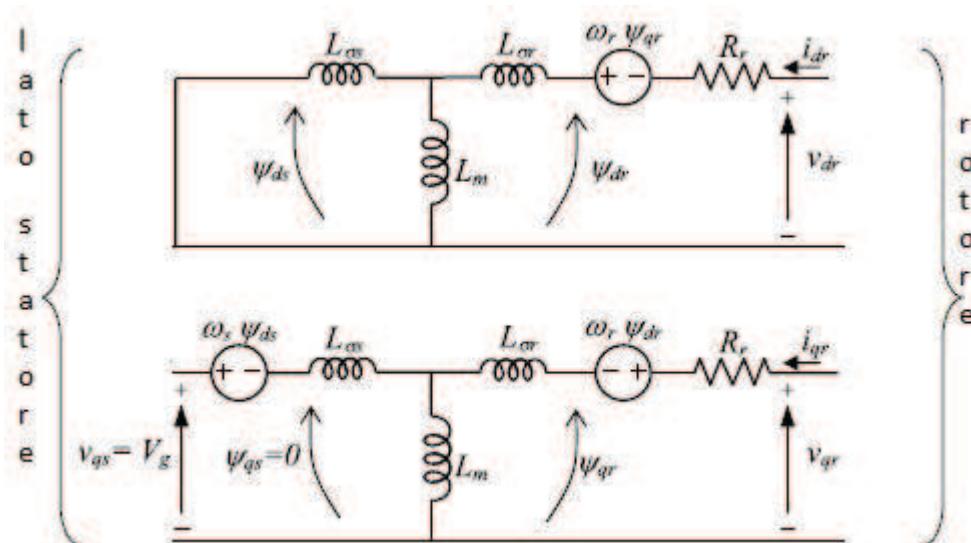
$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \quad (3.26)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_r \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \quad (3.27)$$

Mentre la relazione tra il flusso di rotore e corrente è il seguente:

$$\Psi_{dr} = \sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} \quad (3.28)$$

$$\Psi_{qr} = \sigma L_r i_{qr} \quad (3.29)$$

Figura 3.7: cir.equivalente della DF nel sistema di riferimento dq

dove, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$

Inserendo le 3.25 e 3.26 nell'espressione 3.23 e 3.24 si può mettere in evidenza il legame tra la tensione e corrente al lato rotore.

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \quad (3.30)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} \quad (3.31)$$

Le due equazioni appena scritti si possono rappresentare anche mediante uno schema a blocchi (fig. 3.8).

Il termine $\frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Psi_{ds}$ si considera nullo nel normale funzionamento per il fatto che la tensione è costante. Inoltre dal punto di vista del controllo è stato affermato che il termine $\omega_r \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds}$ entra in gioco solo in caso di funzionamento in regime perturbato, per il fatto che questo termine dipende dal flusso di statore, quindi dalla tensione di rete, perciò è una variabile indipendente esterno all'anello di controllo, di conseguenza è facilmente compensabile essendo un costante durante il normale funzionamento. I due termini $\omega_r \sigma L_r i_{qr}$ e $\omega_r \sigma L_r i_{dr}$ chiamati anche "*termini trasversali*" sono presenti per il fatto che il sistema di riferimento dq ruota, ad una velocità diversa dalla velocità

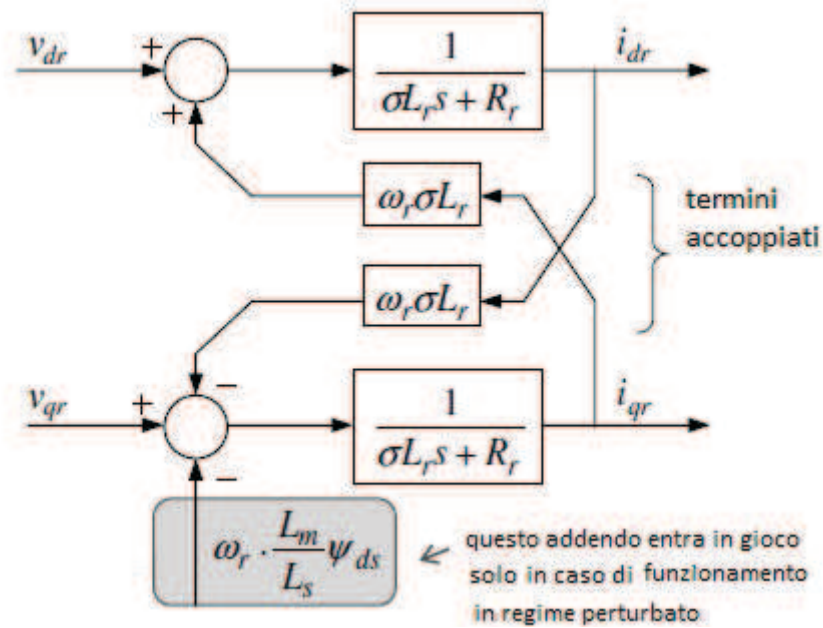


Figura 3.8: schema a blocchi con i termini accoppiati

del rotore. In regime stazionario questi termini rimangono invariati, quindi possono essere facilmente compensati all'interno degli anelli di corrente per avere una dinamica indipendente che comporta un notevole semplificazione del sistema di controllo. Infatti dopo la compensazione, entrambi gli assi risultano identiche e il loro ramo di controllo si è ridotto in una funzione di trasferimento del primo ordine (fig.3.9).

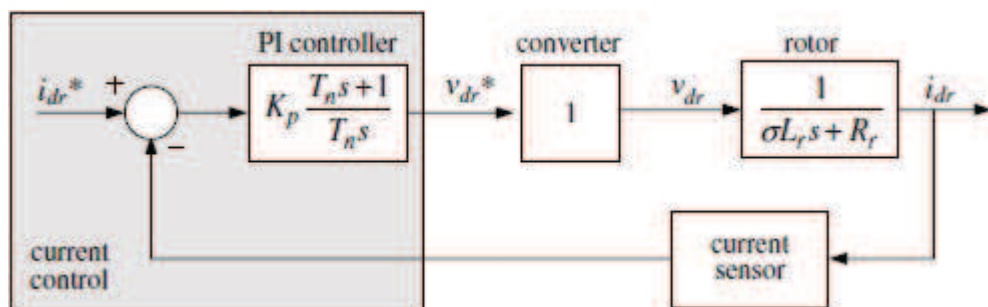


Figura 3.9: schema a blocchi del sistema di controllo della corrente

Nel caso del controllo mediante orientamento di campo del flusso di statore, questo ultimo viene stimato e viene allineato con l'asse d del sistema di riferimento, mentre la tensione di alimentazione è in anticipo di 90° rispetto il flusso. In figura 3.10 viene illustrato lo schema completo della macchina a doppia alimentazione. I blocchi $[T_{dq}]$ e $[T_{dq}]^{-1}$ sono le matrici di trasformazioni che servono per passare da un sistema all'altra. Come illustrato in figura, andiamo a controllare i due componenti della tensione a lato rotore (v_{dr} e v_{qr}) al variare della corrente i_{dr} e i_{qr} . In sostanza per ottenere il controllo desiderato, i riferimenti delle tensioni da inviare al convertitore sono:

$$v_{dr}^* = \left(K_{Qp} - K_{Qi} \int \right) (i_{dr}^* - i_{dr}) - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \quad (3.32)$$

$$v_{qr}^* = \left(K_{pp} - K_{pi} \int \right) (i_{qr}^* - i_{qr}) + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} \quad (3.33)$$

I due termini $(i_{dr}^* - i_{dr})$ e $(i_{qr}^* - i_{qr})$ sono gli errori della corrente da mandare al regolatore ovvero è la differenza tra il valore di riferimento i_{qr}^* e il valore misurato i_{qr} . I termini K_{pp} , K_{pi} , K_{Qp} , K_{Qi} sono i coefficienti proporzionali ed integrali del regolatore di potenza attiva e reattiva. L'ampiezza e la fase del vettore flusso di statore viene ricavato senza fare una misurazione diretta del flusso, ma per l'integrazione dell'equazione della tensione utilizzando misure della tensione e della corrente.

$$\Psi_{dm} = \int (v_{dm} - R_s i_{dm}) dt \quad (3.34)$$

$$\Psi_{qm} = \int (v_{qm} - R_s i_{qm}) dt \quad (3.35)$$

Una volta calcolati i due componenti del flusso di statore si può trovare il modulo e la fase mediante:

$$|\Psi_{ds}^*| = \sqrt{\Psi_{dm}^2 + \Psi_{qm}^2} \quad (3.36)$$

$$\theta_s = \arctan \left(\frac{\Psi_{dm}}{\Psi_{qm}} \right) \quad (3.37)$$

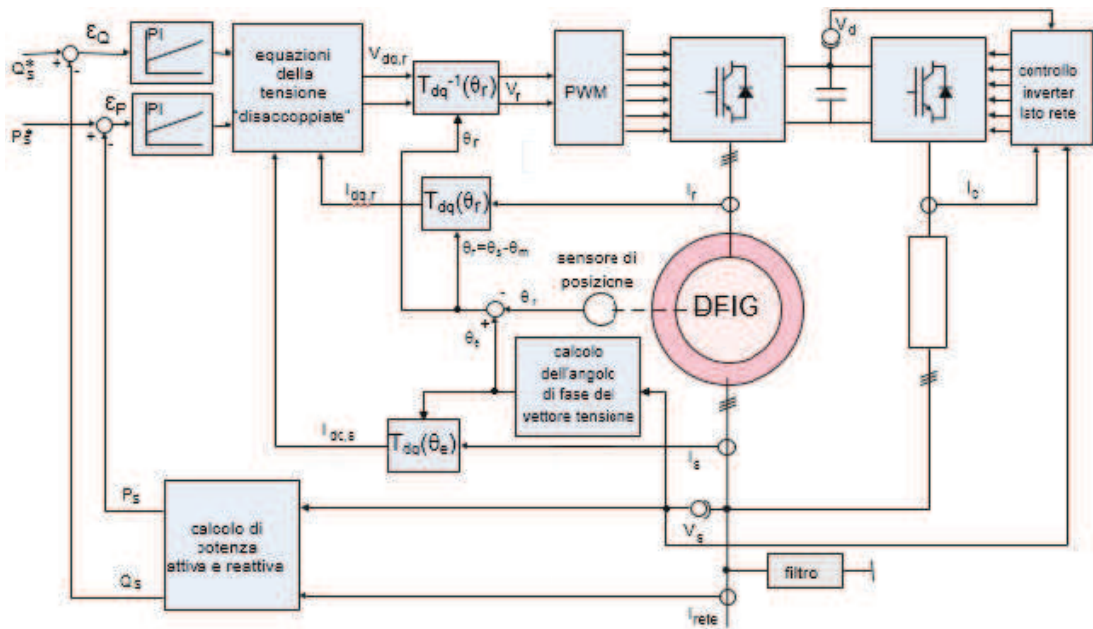


Figura 3.10: Lo schema completo del sistema di controllo

Capitolo 4

Applicazione delle macchine a velocità variabile nell'Eolico

4.1 Impianti Eolici

L'energia eolica infatti rispetto ad altre energie rinnovabili richiede investimenti molto inferiori, soprattutto per la sua disponibilità distribuita in ampie zone territoriali e per la possibilità di costruire impianti sia sulla terra ferma (on shore) che in mare aperto (off shore). Tra i vari aspetti positivi di questa fonte, presenta un buon coefficiente di utilizzazione ovvero numero di ore annue in cui funziona alla potenza nominale. Gli impianti attualmente installati in Europa dovrebbero produrre mediamente 257 TWh all'anno, cioè corrisponderebbe l' 8 % del consumo totale dell'energia. Non richiedendo alcun tipo di combustibile per il loro funzionamento, gli impianti eolici non sono soggetti ad inflazione, quindi hanno costi operativi molto bassi. Un altro aspetto molto interessante è la decentralizzazione della fonte che rende meno gravosa in caso di malfunzionamento di un singolo aerogeneratore. Gli impianti off-shore riducono considerevolmente le problematiche legate all'ambiente e la rumorosità delle pale. Altri benefici degli impianti eolici sono:

- Conversione efficiente dell'energia eolica in energia elettrica con un rendimento teorico del 59% (si tratta di una % di estrazione da energia fluidodinamica in meccanica) ,
- Assenza di emissione di sostanze inquinanti,

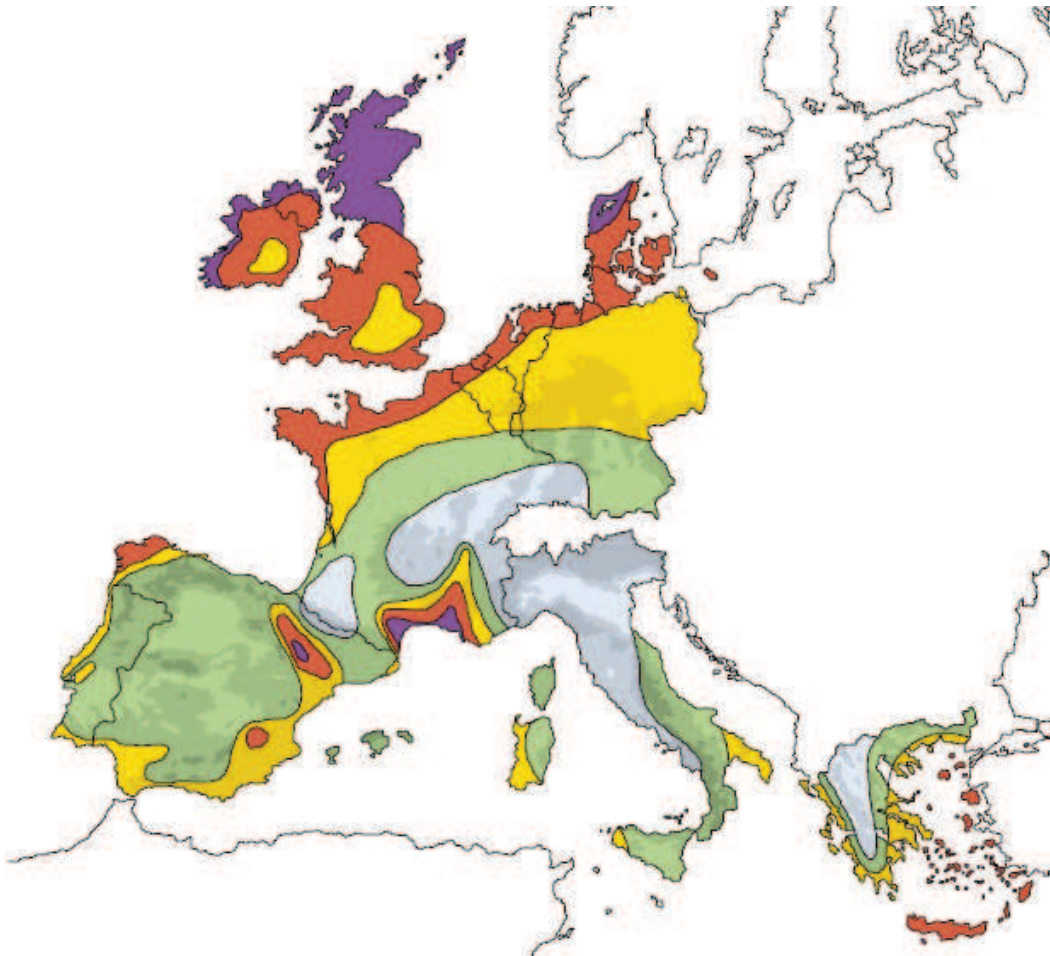


Figura 4.1: mappa eolica dell'Unione Europea(fonte- Impianti Eolici N.13 ABB)

Total EU electricity consumption	Onshore wind energy production	Offshore wind energy production	Share of EU consumption met by onshore wind	Share of EU consumption met by offshore wind	Share of EU consumption met by wind
3,280 TWh	233 TWh	24 TWh	7.1%	0.7%	7.8%

Figura 4.2: Producibilità mediante impianti eolici (fonte- EWEA-annual-statistic-2013)

- Facile smantellamento degli aerogeneratori a fine vita (20 / 25 anni)
- La capacità di produzione dell'aerogeneratore varia da poche centinaia di watt ad alcuni megawatt, venendo incontro alle esigenze sia delle singole abitazioni sia dell'uso industriale o dell'immissione in rete mediante centrali eoliche.

Nello sfruttamento del vento, vengono impiegate diverse tipologie di aerogeneratori che possono essere ripartite in turbine ad asse verticale e turbine ad asse orizzontale in base alla tecnologia costruttiva. Un'ulteriore classificazione possono essere fatte se sono turbine sopravento o turbine sottovento. In questo elaborato verrà analizzato una turbina ad asse orizzontale sopravento a tre pale che è il modello più impiegato nelle attuali impianti eolici. Sono chiamati "sopravento" per il fatto che il vento incontra prima le pale rispetto il torre. Ovviamente questo tipo di turbine hanno un'efficienza maggiore rispetto le altre per il fatto che non vi sono interferenze aerodinamiche con la torre. Nella fig.4.3 mostra una classica turbina a tre pale.



Figura 4.3: Turbina eolica con il sostegno

Generalmente gli impianti eolici vengono identificate anche per la grandezza:

- Impianti piccoli: hanno una potenza che varia dai 5 ai 100 kW
- Impianti medi: hanno una potenza che va dai 250 ai 800 kW
- Impianti grandi: hanno una potenza cha varia dai 1000 ai 8000 kW

4.4

4.2 Componenti fondamentali di una turbina eolica

La turbina eolica è una struttura complessa che comprendono sia parti meccaniche che elettriche che interagiscono in continuazione affiche la struttura funzioni correttamente. In questo struttura il rotore (ovvero l'insieme di pale e il mozzo) e il generatore elettrico costituiscono le parti essenziali del sistema. I sistemi di misura (anemometri e indicatori di direzione del vento) sono generalmente collegati sulla sommità della navicella, servono a raffigurare correttamente la macchina a seconda della direzione e dell'intensità del vento. I sistemi di controllo sorvegliano continuamente una serie di parametri della macchina, sovrintendendo al corretto funzionamento e permettono una rapida messa in sicurezza in caso di anomalie dannose della macchina.

Il rotore ha un ruolo estremamente rilevante in questo apparato, cioè quello di catturare l'energia cinetica posseduta dal vento, trasformarla in energia meccanica e renderla disponibile sotto forma di energia meccanica all'albero principale (albero lento) che ruota velocità comprese tra 6 e 25 giri al minuto sotto. Attraverso un meccanismo moltiplicatore di giri , la velocità angolare viene aumentata per ottimizzare la conversione in energia elettrica tramite il generatore (albero veloce) . Il freno meccanico ha finalità di sicurezza, ad esso è sempre accoppiato un freno aerodinamico che consente l'arresto rapido del aerogeneratore. Il sistema di controllo che riceve i segnali da centralina anemometrica ed a tutti i sensori di bordo, agisce sulle pale del rotore per la regolazione della potenza e sull'organismo di imbardata per orientare la navicella nella direzione del vento. Nella trasformazione da energia cinetica ad energia meccanica sia le pale che il sistema di trasmissione devono essere efficacemente progettati. La torre sostiene la navicella e che negli ultimi

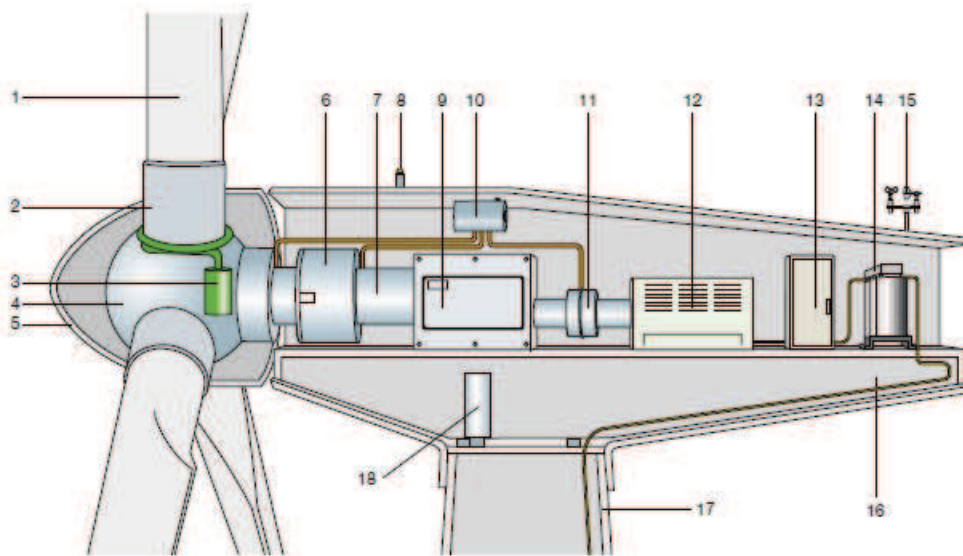


Figura 4.4: struttura del generatore

1. pala;
2. supporto della pala;
3. attuatore dell'angolo di Pitch;
4. mozzo;
5. ogiva;
6. supporto principale;
7. albero principale;
8. luci di segnalazione aerea;
9. moltiplicatore di giri;
10. dispositivi idraulici di raffreddamento;
11. freni meccanici;
12. generatore;
13. convertitore di potenza e dispositivi elettrici di controllo, di protezione e sezionamento;
14. trasformatore;
15. anemometri;
16. struttura della navicella;
17. torre di sostegno;
18. organo di azionamento per l'imbardata.

impianti ha una forma tubolare. In genere è costruito in cemento armato, in acciaio laminato o in fibre sintetiche. La torre è infissa nel terreno mediante fondazioni costituite da plinti di cemento armato collocati ad una certa profondità. La navicella è una cabina in cui sono ubicati tutti i componenti del aerogeneratore a parte il rotore.

4.2.1 Le pale

La pala è l'unico elemento interagente direttamente con la fonte primaria, quindi ogni minimo dettaglio nella sua realizzazione influenza significativamente sull'efficienza complessiva della macchina. Di conseguenza la sua realizzazione richiede particolari attenzioni e profili dinamici in base alle caratteristiche del sito dove andranno installate, ad esempio se sono sottoposti ai venti pressoché costanti oppure molto variabili in vari periodi dell'anno. Nella figura 4.5 è illustrata la forma tipica di una pala e le sue sezioni trasversali: la pala si avvolge con un angolo complessivo di circa 25° tra l'inizio e l'estremità. Come evidenziato nella figura lo spessore dei profili varia lungo il raggio della pala, mutando le caratteristiche aerodinamiche di ciascuna sezione paleare a parità di angolo di attacco. Uno delle caratteristiche fondamentali che dovrebbe possedere le pale dei aerogeneratori è quello di associare la leggerezza con la resistenza meccanica ad un costo accettabile. Le pale sono realizzate con materiali plastici leggeri rinforzati in fibra, con buone proprietà di resistenza all'usura. Le fibre sono in genere di vetro o alluminio per le pale delle turbine medio-piccoli, mentre per le pale più grandi vengono utilizzate le fibre di carbonio nelle parti in cui si manifestano i carichi più critici. Le fibre sono inglobate in una matrice di poliestere, resina epossidica o a base di vinilestere costituenti due gusci uniti insieme e rinforzati da una matrice interna. La facciata superficiale della pala viene ricoperto con uno strato levigato di gel colorato per evitare l'invecchiamento avanzato del materiale.

4.2.2 Calcolo della potenza disponibile

Energia cinetica E_c posseduta da una massa d'aria m che si muove ad una velocità V costante è data da:

$$E_c = \frac{1}{2}mV \quad (4.1)$$

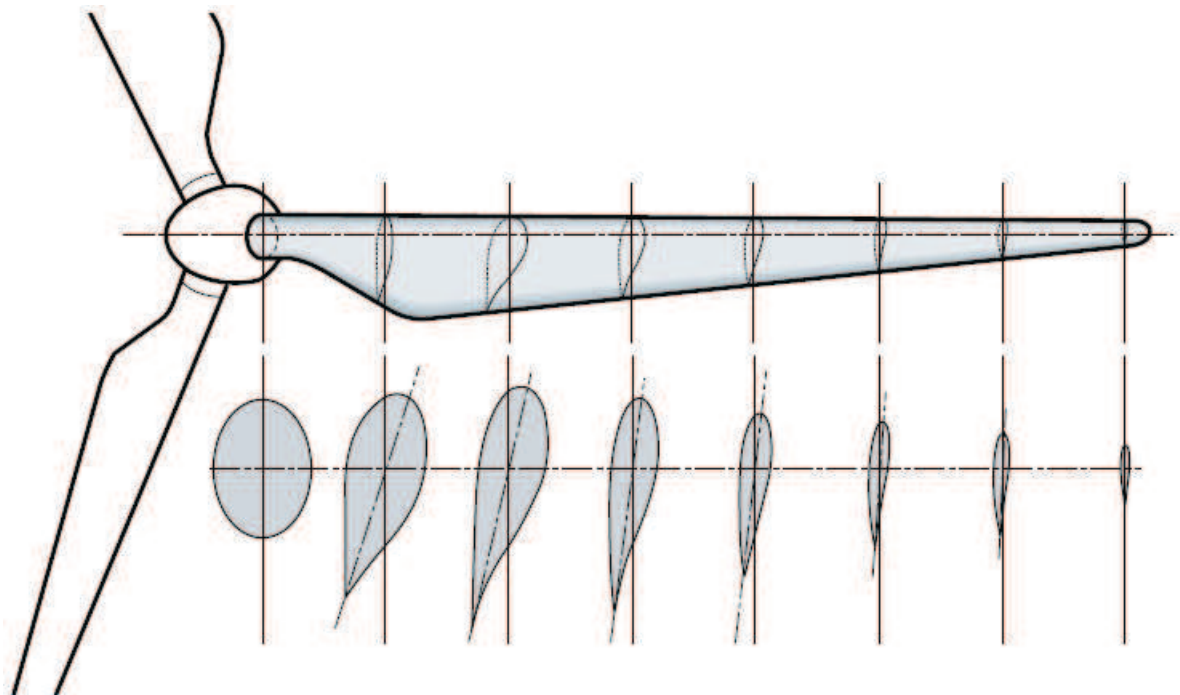


Figura 4.5: profilo di una pala eolica

Allora considerando una portata $q = dm/dt$, e la potenza meccanica associata ad una corrente d'aria può esprimere:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.2)$$

dove $\dot{m} = \rho A L \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ $V = AL \left[\frac{m}{s} \right]$ $\rho =$ densità dell'aria in $\frac{m^3}{s}$

L = lunghezza del tubo di flusso [m]

A = la sezione del tubo di flusso dell'aria considerata [m^2]

Come si può notare in fig.4.6 la potenza meccanica (P_0) disponibile varia con il cubo della velocità del vento, di conseguenza se ad esempio la velocità aumenta del 10% la potenza estratta aumenta del 33%.

Per convertire la potenza meccanica disponibile in potenza meccanica utile, ovvero per recuperarla integralmente, mediante una turbina, sarebbe teoricamente necessario:

- Poter annullare l'energia cinetica residua all'uscita della turbina,

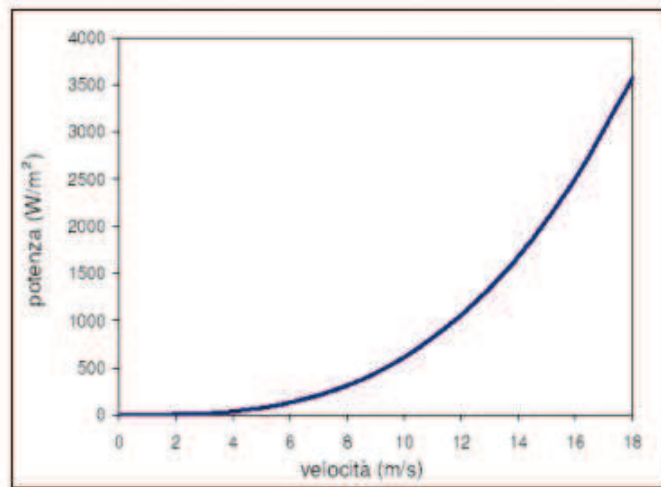


Figura 4.6: Legge di proporzionalità cubica tra la velocità e la potenza del vento

- Evitare qualsiasi interferenza fluidodinamica tra le pale e la corrente d'aria.

Considerando l'impossibilità di verificare gli aspetti sopraelencati, risulta che solo una parte della potenza meccanica teorica P_0 (59%) è realmente disponibile per la produzione di energia meccanica mediante la turbina.

4.2.3 Calcolo della potenza disponibile e Analisi di Betz

Si utilizza il seguente modello semplificato per individuare la potenza estratta da una turbina eolica ideale avente a disposizione una certa potenza del vento. Prima di procedere con la dimostrazione bisognerebbe impostare alcune ipotesi:

- Fluido incomprimibile,
- Fluido irrotazionale,
- Flusso stazionario,
- Disco attuatore con numero infinito di pale.

Dopo aver impostato queste ipotesi le uniche azioni il disco può esercitare sul fluido sono: diminuire la pressione statica e la sua quantità di moto assiale.

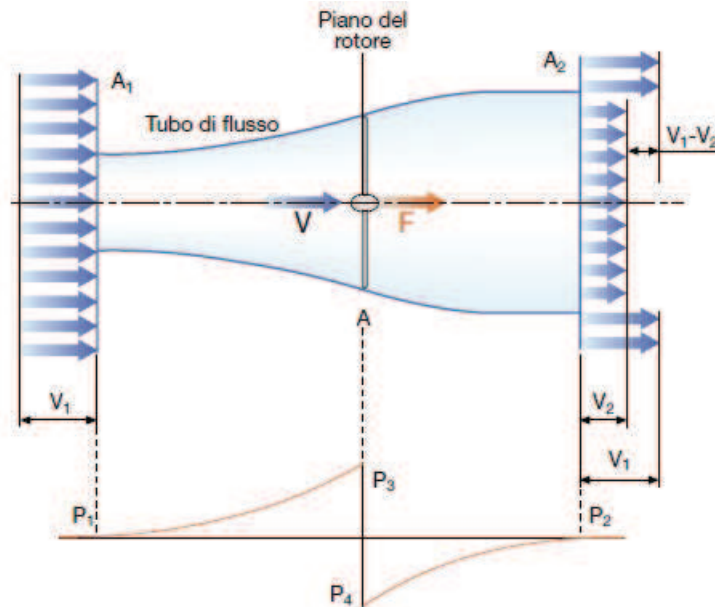


Figura 4.7: lo Schema del tubo di flusso a monte e a valle del rotore di una turbina eolica

V_1 = velocità del vento all'ingresso del tubo alla pressione atmosferica (sezione 0)

V_2 = velocità del vento dall'uscita del tubo alla pressione atmosferica (sezione 2)

V = la velocità del vento in corrispondenza del piano del rotore (sezione 1)

Applicando l'equazione di Bernoulli tra la sezione 0-1 e 1-2:

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_3 + \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.3)$$

$$P_4 + \frac{\rho V^2}{2} = P_3 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (4.4)$$

La differenza della pressione tra monte e valle del disco si può anche scrivere nel seguente modo:

$$\Delta P = P_3 - P_4 = \frac{\rho V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (4.5)$$

La forza assiale F , nella direzione del vento, sul disco attuatore di sezione A ortogonale è data dalla seguente formula:

$$F = \Delta P A = \frac{\rho A (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (4.6)$$

In base alla teorema dell'impulso la formula della forza si può anche scrivere:

$$F = \rho A V (V_1 - V_2) = \frac{d}{dt} m V \quad (4.7)$$

Si definisce "fattore di interferenza a " che rappresenta la diminuzione di velocità davanti al disco

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} = 1 - \frac{V}{V_1} \quad (4.8)$$

La potenza intercettata dalla pala può essere espressa nei seguenti modi:

$$P = F \times V = \rho A V (V_1 - V_2) \quad (4.9)$$

Oppure

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 4a(1-a)^2 \quad (4.10)$$

4.2.4 Coefficiente di potenza C_p

Si definisce il coefficiente di potenza il rapporto tra la potenza estratta e la potenza disponibile dal vento.

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_1^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (4.11)$$

Per trovare il Massimo del coefficiente di Potenza basta fare la derivata di C_p rispetto fattore di interferenza che è proprio in corrispondenza del $a = 1/3$. Da qui risulta che la massima potenza che si può estrarre da una corrente d'aria con una turbina ideale non può superare il 59% della potenza disponibile del vento incidente.

In fine la potenza estratta da una vena fluida può esprimere in funzione del coefficiente di potenza:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.12)$$

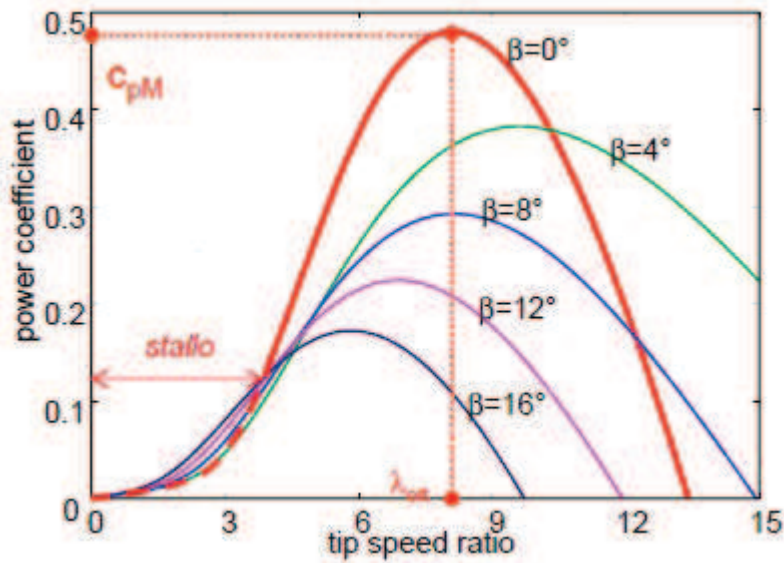


Figura 4.8: coefficiente di potenza in funzione della tip speed ratio e il passo delle pale

Indicando con η_e rendimento elettrico e η_m rendimento meccanico, la potenza elettrica generata può esprimere:

$$P = \eta_e \eta_m C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.13)$$

4.3 Evoluzione delle tipologie di impianti eolici

Lo sviluppo tecnologico negli impianti di generazione eolica ha avuto un costante incremento negli ultimi 25 anni, grazie soprattutto all'abbattimento di costi relativi a tecnologie in rapida via di sviluppo e da allora si sono susseguite molte generazioni di realizzazioni hardware dal punto di vista dell'utilizzo dell'elettronica di potenza:

- Sistemi con connessione diretta tra generatore e rete senza inserzione di elettronica di potenza;
- Sistemi parzialmente regolati dall'elettronica di potenza;

- Sistemi totalmente interfacciati tramite elettronica di potenza alla rete.

Gli impianti eolici connessi alla rete si possono a sua volta essere classificati in:

- Turbine eoliche a velocità fissa;
- Turbine eoliche a velocità variabile

Sia i generatori sincroni a magneti permanenti (PMSG) che i generatori asincroni ad induzione sono sempre stati competitivi nei impianti eolici. Ma nel caso di generatori a magneti permanenti c'è da considerare la scarsa efficienza di conversione fluidodinamica, la scarsa possibilità di regolazione della potenza che deve essere fatta solo per via meccanica, problemi di 'flickering' (oscillazioni della tensione indotta) e di sollecitazioni sulla torre prodotte dalla caratteristica rigida della coppia.

4.3.1 Caratteristica potenza-velocità del vento

Se avesse la possibilità di variare in continuazione la velocità del rotore in modo tale da mantenere costante ed ottimale il valore di "tip speed ratio" non è altro che il rapporto tra la velocità periferica delle pale ωR e la velocità del vento v , il che permette di ottenere il coefficiente potenza massimo C_p , allora riuscirebbe aumentare considerevolmente l'efficienza della turbina. Figura 4.9 illustra 2 diverse curve di potenza estraibile nel caso di un sistema a velocità variabile avanzato e un sistema solo con regolazione di stallo. Quest'ultimo è un meccanismo automatico di regolazione della potenza, dove al crescere della velocità del vento l'angolo di attacco sulle pale aumenta e al di sopra di una certa velocità il flusso d'aria inizia a distaccarsi dalla superficie esterna delle pale. La turbina inizia produrre l'energia a partire da una velocità minima del vento di 3-4 m/s (cut-in), finché la velocità si mantiene al di sotto della velocità nominale (14-16 m/s) la curva di potenza segue, la curva cubica teorica all'aumentare della velocità, mentre per le velocità superiori, fino al raggiungimento del limite "cut-off", la potenza prodotta si mantiene costante.

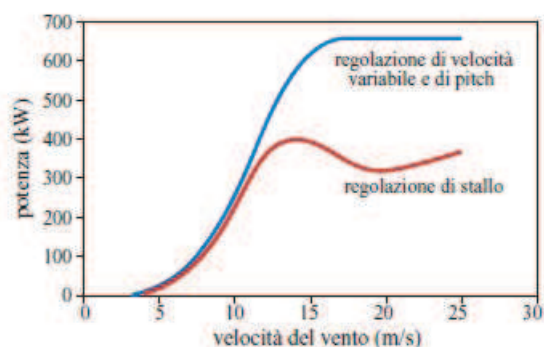


Figura 4.9: Curve di potenza per turbine con diversi sistemi di regolazione

4.3.2 Confronto tra velocità fissa e velocità variabile

Siccome le turbine eoliche hanno un elevato efficienza se lavorano in un particolare condizione di “tip speed ratio” che permette di funzionare sul massimo coefficiente di potenza in quanto con le turbine a velocità fissa è impossibile restare sul punto di massimo al variare della velocità del vento. Una soluzione iniziale era quella di lavorare con due velocità fisse che ha portato un leggero miglioramento del sistema, ma erano sempre vincolati a funzionare con velocità ben determinate. Le due linee marcate (fig. 4.10) rappresentano una turbina funzionante a due velocità prefissate, mentre la curva tratteggiata rappresenta traiettoria della massima potenza al variare della velocità del vento. La macchina a due velocità è composta da due generatori a induzione a velocità fissa, uno di dimensioni ridotte con potenza limitata nel caso di velocità del vento ridotto, l'altro con potenza elevata, funzionante con velocità elevate. Oppure le due velocità sono ottenute o mediante diversi numeri di poli o impiegando due sistemi di moltiplicatori di giri indipendenti. Nonostante qualche percentuale di efficienza guadagnata anche questo schema aveva dei seri inconvenienti:

- Aumento del costo dovuto all'ulteriore generatore o moltiplicatore
- Costante controllo della velocità
- Energia dissipata durante lo scambio dei generatori

Con l'aumento delle dimensioni delle turbine si è incrementata anche la potenza prodotta da queste ultime e di conseguenza l'energia prodotta da questi impianti ha sempre un maggior peso sulla rete elettrica, infatti negli

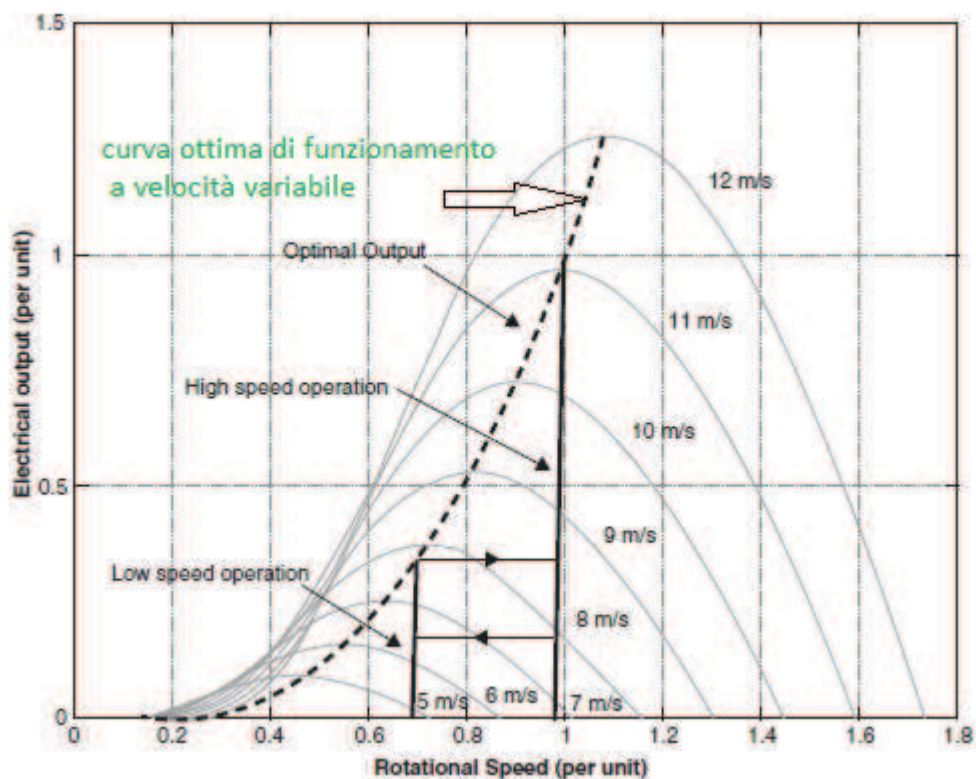


Figura 4.10: Punti di lavoro nel caso di 2 velocità e velocità variabile

ultimi anni sono stati impostati dei vincoli da rispettare se l'impianto viene allacciato alla rete. Purtroppo con impianti a velocità fissa o a due velocità è impossibile rispettare alcuni di questi vincoli, quindi gli impianti costruiti di recente e quelli che verranno costruiti si tendono di basare sulla tecnologia "impianti eolici a velocità variabile".

4.3.3 Sistemi in assenza di elettronica di potenza

La macchina asincrona ha delle diverse configurazioni nel ambito eolico, questi raggruppamenti vengono fatte sia in base alla modalità in cui il generatore è connesso alla rete sia dalle tecniche di controllo della velocità. Nella figura seguente viene riportato un generatore asincrono a velocità fissa direttamente collegato alla rete. Questa è una rappresentazione molto semplice che era impiegato nei primi impianti eolici utilizzando un generatore a induzione con rotore a gabbia di scoiattolo, che a prescindere dalla coppia presente

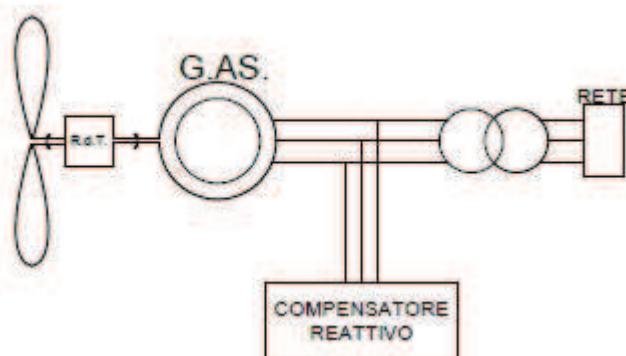


Figura 4.11: Gen. Asincrono a vel. fissa in assenza di elettronica di potenza

mantiene una velocità fissa. In questo impianto la potenza è regolata aerodinamicamente mediante stallo o dall'angolo di incidenza (pitch), mentre il compensatore reattivo, il quale solitamente è un banco di condensatori ha il compito di ridurre la potenza reattiva richiesta dal generatore alla rete. I vantaggi di questa configurazione sono la semplice realizzabilità e bassi costi di impianto. Purtroppo mediante questa tecnica di controllo non permetteva di guadagnare un aumento cosiderevole di potenza se non qualche per cento (2 -3%).

4.3.4 Sistemi parzialmente integrati con l'elettronica di potenza

Nella categoria di sistemi parzialmente regolati dall'elettronica di potenza, come mostrato in fig.4.12, appartengono alcuni azionamenti con convertitori statici, i quali sono in grado di modificare la velocità di rotazione del rotore tramite parametri di natura elettrica anzichè di natura aerodinamica.

La fig.4.12 si ottiene dalla fig.4.11, un impianto funzionante alla velocità variabile mediante lo scorrimento servendo di un rotore avvolto.

Il collegamento degli avvolgimenti rotorici con la resistenza esterna o con la rete avviene per mezzo di contatti striscianti. La potenza che fluisce mediante il rotore è proporzionale allo scorrimento, infatti questa porzione potenza viene anche chiamato potenza di scorrimento (slip power)

$$P_{slip} = sP_s \quad (4.14)$$

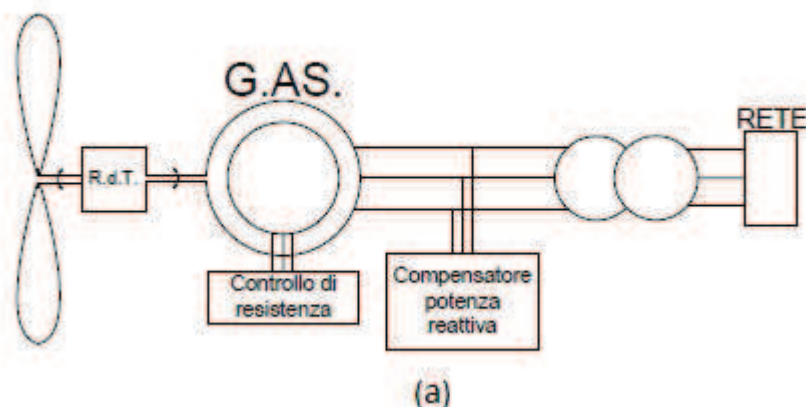


Figura 4.12: mediante controllo di resistenza

Questa quota di potenza attiva può essere gestita in diverse maniere:

- Può essere dissipata in un resistore;
- Scambiata con la rete attraverso schemi a doppia alimentazione comprendenti l'alimentazione rotorica, (brushless) o schema in cascata

4.3.5 Configurazione mediante la regolazione della resistenza

Nella figura 4.13 illustra lo schema di un impianto in cui la potenza consegnata attraverso gli avvolgimenti rotorici viene dissipato per mezzo di una resistenza variabile. Al di sotto della potenza o coppia nominale la resistenza esterna è corto circuitato e la macchina si comporta da un generatore convenzionale a velocità fissa. Al di sopra della coppia nominale variando la resistenza esterna permette di controllare la potenza/coppia consentendo un aumento della velocità della macchina. La regolazione della resistenza rotorica viene effettuato mediante un convertitore statico di potenza con switch a commutazione forzata. Uno degli svantaggi di questa configurazione è l'elevato contenuto armoniche della corrente, ma questa inconveniente può essere evitato utilizzando un raddrizzatore controllato. In ogni caso questa non è una tecnica ottimale per la variazione della velocità per il fatto che comporta delle perdite elevate nel rame e di conseguenza provoca una riduzione del rendimento complessivo del sistema. Un altro svantaggio di questo impianto

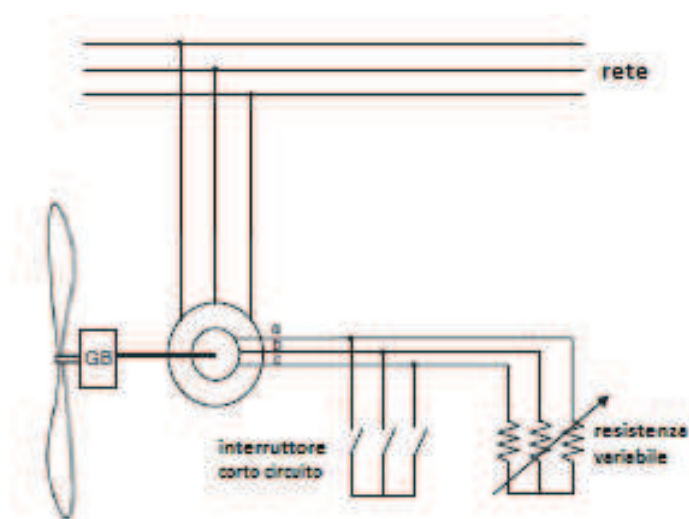


Figura 4.13: variazione velocità mediante un resistore

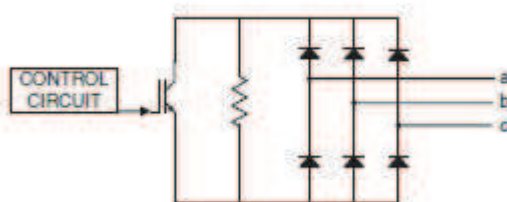


Figura 4.14: sistema di controllo

consiste nella presenza di contatti striscianti con una manutenzione periodica programmata e dei costi elevati.

Per rimediare ad alcuni inconvenienti descritti in precedenza si utilizzava il seguente schema di figura 4.15. In questa nuova disposizione che ancora oggi si trova in qualche impianto, viene inclusa la resistenza variabile all'interno del rotore evitando tutta la componentistica strisciante. Anche il sistema di controllo è incorporato nello stesso rotore che comunque mantiene un range di velocità abbastanza limitata per non incrementare la potenza dissipata. I segnali di innesco degli interruttori sono comandati mediante un dispositivo a comando ottico.

Un'ulteriore schematizzazione per evitare l'uso di striscianti è riportata in figura 4.16. Diversamente dalla precedente configurazione, viene accoppiato un avvolgimento ausiliario sul rotore il quale a sua volta è connesso con una resistenza variabile per la dissipazione della potenza. Ovviamente è

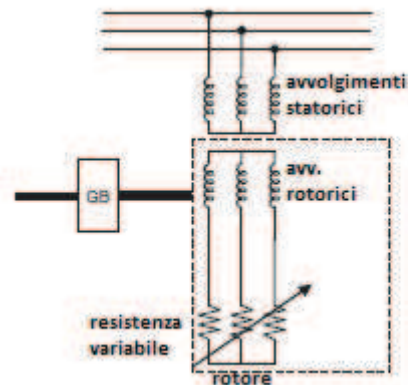


Figura 4.15: controllo in assenza di contatti striscianti (soluzione1)

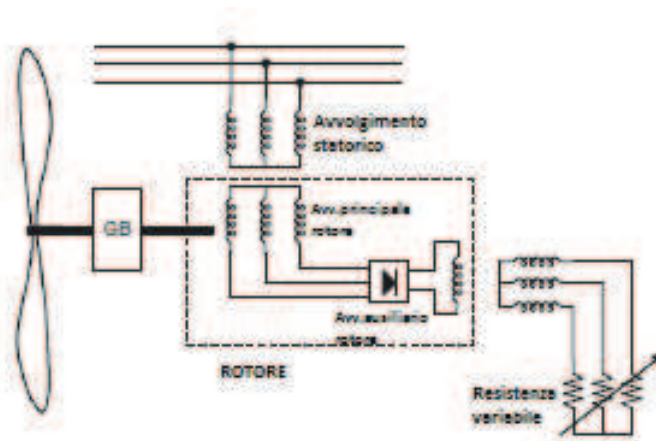


Figura 4.16: controllo in assenza di striscianti (soluzione2)

più economico rispetto un sistema a velocità variabile, ma di contro ha un intervallo di variazione molto stretto e non è in grado di controllare il fattore di potenza.

4.3.6 Sistemi totalmente interfacciati tramite elettronica di potenza alla rete

L'affacciarsi sul panorama del settore dell'energia elettrica di convertitori statici di potenza sia a commutazione naturale che a commutazione forzata ha consentito di svincolare la frequenza generata da quella fissa di rete. Infatti produrre potenza elettrica ad una frequenza diversa da quella della rete

risulta vantaggioso in molti azionamenti preposti alla fornitura della stessa. Mediante questi azionamenti è possibile variare la velocità di rotazione del rotore tramite parametri di natura elettrica anziché di natura aerodinamica. Anche i sistemi totalmente interfacciati con la rete presentano vantaggi e svantaggi.

Tra i vantaggi si possono menzionare:

- Un ampio range di controllo della velocità
- Controllo semplice del RSC
- Più potenza prodotta all'aumentare della velocità
- Possibilità di controllare la potenza reattiva

Tra gli svantaggi invece:

- Costo dei convertitori
- Perdite nei convertitori
- Condensatore intermedio nel DC-link
- Induttanze nel lato rete

La figura 4.17 illustra lo schema di un impianto eolico a doppia alimentazione che è uno dei impianti maggiormente installati negli ultimi anni, soprattutto nei impianti di grossa taglia. Questa configurazione permette di disaccoppiare la velocità di rotazione del generatore e della turbina dalla frequenza della rete.

Grazie all'impiego della macchina a doppia alimentazione riesce ad estrarre la massima potenza associata ad ogni velocità del vento. La figura 4.18 illustra le potenze in funzione della velocità del vento, dove "cut in" e "cut-off" rispettivamente il limite inferiore e superiore relativa ad una macchina standard. Con l'avvolgimenti rotorici connessi alla rete, riesce mantenere costante la potenza estratta dal vento fino al limite superiore come verrà chiarito in dettaglio nel capitolo 3.

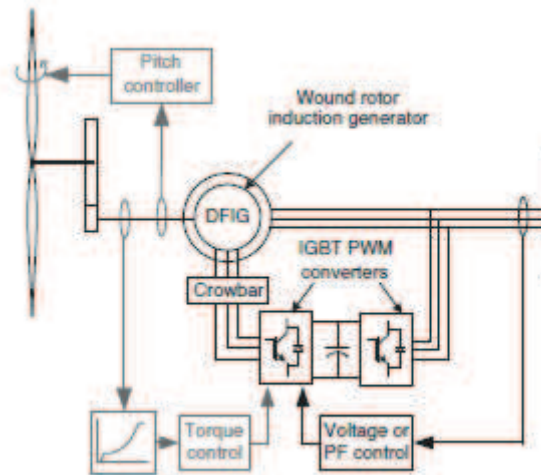


Figura 4.17: schema eolico a doppia alimentazione

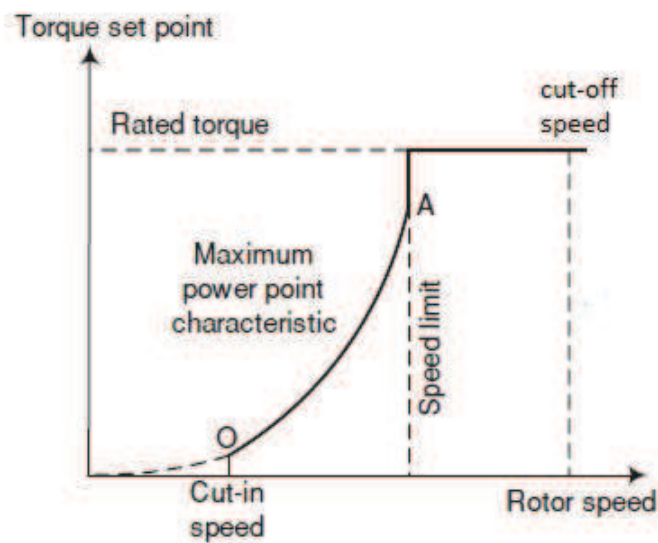


Figura 4.18: Andamento della potenza al variare della velocità mediante il controllo

4.4 Convertitore di potenza nella macchina a rotore avvolto

Nei primi convertitori di potenza impiegati nelle macchine a doppia alimentazione venivano impiegati dei interruttori di tipo BJT composta da due

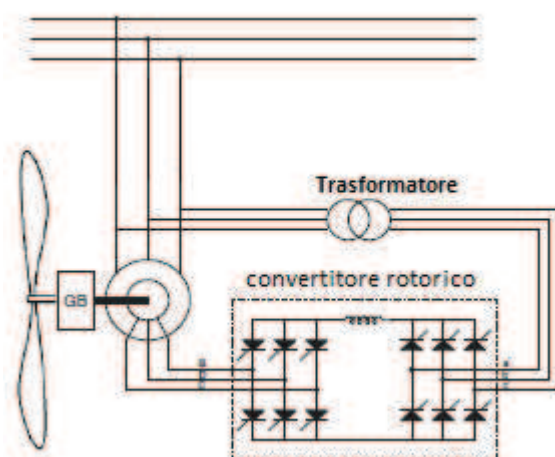


Figura 4.19: Schema di controllo mediate convertitore unidirezionale

convertitori in cascata mediante un'induttanza come mostrato in figura 4.19. Questo schema però aveva dei vincoli, quali quelli di far passare la potenza solo in un verso, cioè dal lato rotore verso la rete di conseguenza facendo funzionare la macchina solo sopra la velocità di sincronismo. Inoltre questo tipo di collegamento ha lo svantaggio di avere un basso fattore di potenza e un alto contenuto armoniche di ordine inferiore. Quando la macchina lavora in prossimità della frequenza di sincronismo si verifica un drastico calo della tensione di rotore, di conseguenza le prestazioni di questi interruttori non erano soddisfacenti. Nei moderni impianti vengono preferibilmente impiegati dei convertitori a commutazione forzata a tensione impressa (fig. 4.20). Questa soluzione permette di migliorare considerevolmente sia la potenza che corrente immessa nella rete. La nuova configurazione comprende due convertitori AC-DC e DC-AC trifase collegati attraverso un bus in continua sulla quale viene posto in derivazione un condensatore di livellamento. Questo componente ha l'importante azione di mitigare i ripple di tensione, inevitabilmente presente sul lato DC e disaccoppiare le interferenze dinamiche generate nelle grandezze di tensione e corrente dai due convertitori. Proprio per questo il condensatore deve essere dimensionato con grande precisione, tenendo conto delle sollecitazioni in tensione e corrente.

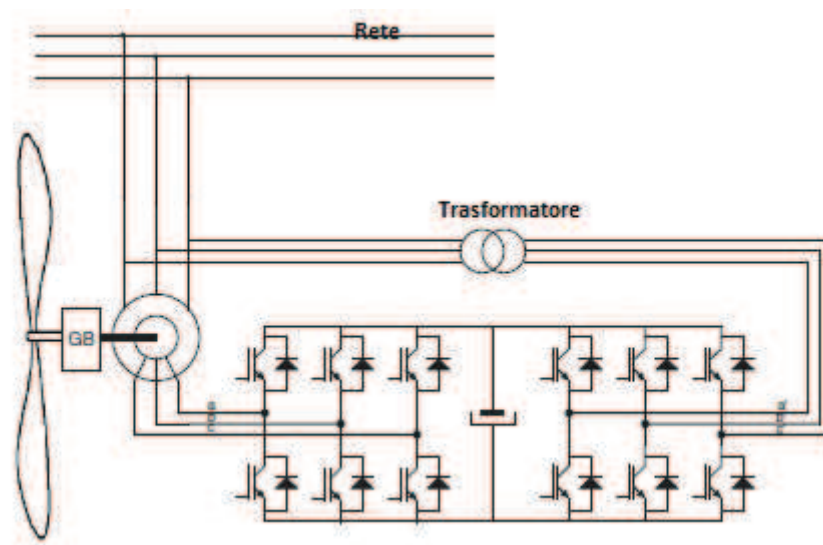


Figura 4.20: Schema di controllo mediate convertitore bidirezionale

4.4.1 controllo della potenza prodotta

Dal punto di vista del controllo della macchina a doppia alimentazione ci si riferisce alla figura 4.21. Il controllo del generatore avviene mediante i due convertitori RSC e GSC (figura 4.20). Il convertitore lato rotore ha la funzione di controllare indipendentemente la potenza attiva (P_s) e reattiva (Q_s) uscente dallo statore, mentre il compito del GSC è quello di mantenere costante la tensione del DC-link e regolare la potenza reattiva (Q_g) scambiata con la rete. Il GSC lavora alla frequenza della rete, mentre il convertitore lato rotore lavora con velocità variabile che è in funzione della velocità del vento. La disposizione “back-to-back” dei convertitori fornisce un meccanismo di conversione che permette di ottenere in uscita una tensione e frequenza fissa compatibile con le grandezza della rete avendo in ingresso una tensione e frequenza variabile. Una tipica configurazione di inverter è quella cosiddetta a *due – livelli* composta da 6 IGBT fig. 4.22. Due livelli si riferisce al numero di livelli di tensione che possono essere prodotti in uscita del ciascun ramo del convertitore. Quindi il RSC può essere considerato/ modellato come fosse una sorgente di tensione che genera un sistema di tensione trifase, dove l’ampiezza e la fase possono essere controllato (quasi istantaneamente) rispetto alla tensione di rete. È proprio questo che permette di controllare i flussi di potenza attiva e reattiva.

Dalla figura 4.23 si nota che la potenza meccanica P_m raggiunge il suo

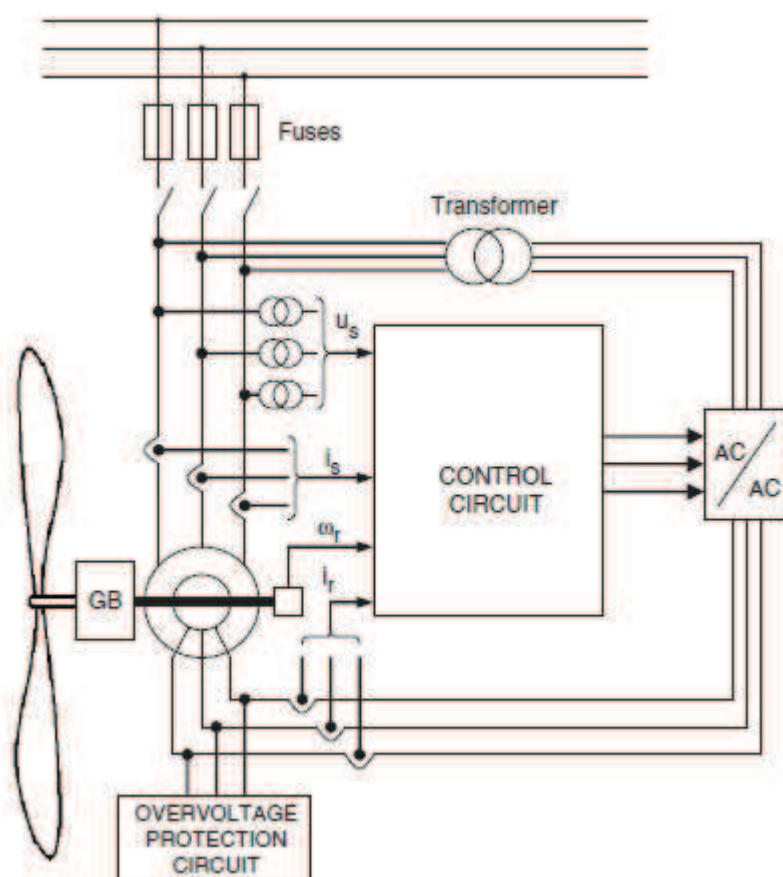


Figura 4.21: circuito complessivo di una turbina eolica

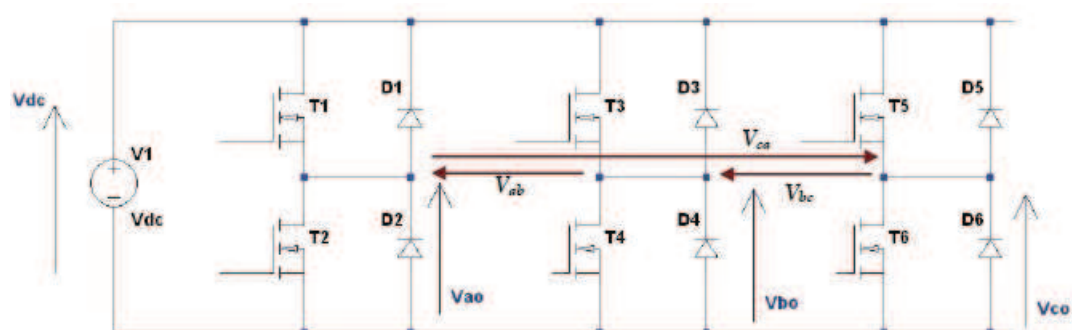


Figura 4.22: sorgente di tensione con 6 IGBT

valore di picco a velocità di super-sincrono quando lo scorrimento pari a -0.2 . ($s=-0.2$), mentre quando gira alla velocità di sincronismo ($s=0$), la

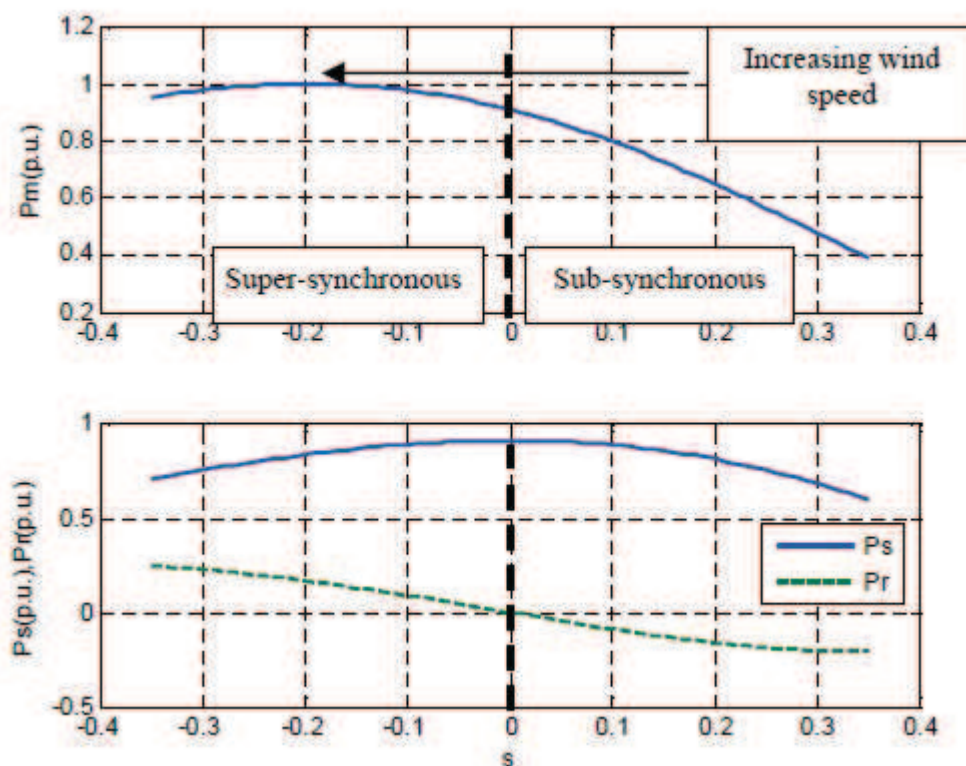


Figura 4.23: andamento delle potenze meccanica (P_m) ed elettrica ai morsetti di statore (P_s) e rotore (P_r) al variare dello scorrimento

macchina fornisce tutta la potenza attraverso gli avvolgimenti statorici. In questo specifico condizione di funzionamento il rotore viene alimentato con una tensione continua ($f_r = 0$) e la macchina funziona come un generatore sincrono. Quindi attraverso gli avvolgimenti statorici fluisce la massima potenza, mentre in quelli rotorici solo quella di eccitazione. A mano a mano che la velocità aumenta, quindi con scorrimenti negativi, deve aumentare anche la velocità di rotazione in modo da mantenere al massimo il valore del “tip speed ratio”. In queste circostanze la macchina lavora alla velocità di super-sincrono ($s < 0$), con la potenza meccanica che fluisce verso la rete da entrambi gli avvolgimenti di statore e di rotore. Per esempio allo scorrimento $s = -0.2$, la potenza che passa attraverso lo statore è $P_s = 0.8$ pu e $P_r = 0.2$ pu risultando come potenza totale 1pu. Mentre per le basse velocità la macchina lavora con gli scorrimenti positivi. In tali circostanze il rotore assorbe una quota di potenza dalla rete mediante gli invertitori necessari per l’eccitazione

degli avvolgimenti rotorici. Per esempio allo scorrimento $s=0.2$, $P_s = 0.8\text{pu}$, mentre $P_r = -0.2\text{pu}$ restituendo una potenza pari a 0.6pu .

4.4.2 Gestione del RSC

L'obiettivo di questo dispositivo è quello di controllare la corrente dell'avvolgimento rotorico tale che la posizione del fasore di spazio del flusso prodotto dal rotore sia orientato correttamente con quello prodotto dallo statore da ottenere la coppia desiderata (paragrafo 3.). Il RSC impiega un controllore di coppia per regolare la tensione e la potenza uscente ai terminali dello statore. La potenza viene regolata in modo da seguire una caratteristica potenza-velocità predeterminata che rispecchia a massima potenza. L'anello di controllo utilizza generalmente un regolatore PI 3.9 che genera la corrente di riferimento $i_{rq,ref}$ da iniettare nell'avvolgimento rotorico. La componente di asse q controlla infatti la coppia elettromagnetica T_e (equ.3.25). Il valore effettivo della corrente I_{rq} viene confrontata con la $i_{rq,ref}$ ed un eventuale errore viene gestito mediante un altro controllore PI. Quest'ultimo fornisce il valore della tensione V_{rq} che deve essere generato dal RSC (equ. 3.30 - 3.33). Nella tabella 4.24 elenca i principali produttori delle turbine eoliche a velocità variabile

Company	Model/Power	Turbine Speed		Rotor Diameter	Gearbox Ratio Type	Generator Voltage Stator/Rotor	Generator Speed Pole Number	
		Minimal-Nominal-	Maximal				Minimal-Nominal-	Maximal
Vestas	V80-2 MW	10.8-16.7 rpm	19.1 rpm	80	100.33 Three-stage planetary/helical	690 V-480 V/—	2	1083/1672 1916
Repower	MM82-2.0 MW	8.5-17.1 rpm	17.1 rpm (+12.5%)	82	Approximately 105.4 Planetary/spur wheel	690 V/—	2	900-1800 rpm
	5M-5.075 kW	7.7-12.1 rpm	12.1 rpm (+15.0%)	126	Approximately 97 Two helical planetary/one spur wheel	950 V/660 V	3	750-1170 rpm 1170 rpm (+15.0%)
Gamesa	G52-850 kW	14.6-30.8 rpm	—	52	1:61.74 One planetary/Two parallel axis	690 V/—	2	1000-1950
	G87-2.0 MW	9.0-19.0 rpm	—	87	1:100.5 One planetary/Two parallel axis	690 V/—	2	900-1680 rpm 1900 rpm
Acciona	AW 1500 1.5 MW	20.2 rpm	—	70	1:59 Four-stage planetary	12 kV/—	3	770-1320 rpm 1200
	AW 3000 3 MW	14.2 rpm	—	100	1:77	12 kV/—	3	770-1320 rpm 1.100 rpm
Ecotecnia	ECO 80 2 MW	9.7-19.89 rpm	—	80	1:100.6	690 V	2	1000-1950 rpm 1800 rpm
	ECO 100 3 MW	7.5-14.25 rpm	—	100	1:126.319	1.000 V/—	2	1000-1950 rpm 1800 rpm
Nordex	S70 1.5 MW	10.6-19 rpm	—	70	1:74	690 V	2	1000-1800 rpm 1800 rpm (+10.0%)
	N80 2.5 MW	9.6-18 rpm	—	80	1:68.7	660 V	3	740-1300 rpm
Mitsubishi	MWT92 2.4 MW	9-15 rpm	16.9 rpm	92	1:76.9 Three-stage, one planetary and two parallel	690 V	3	690-1153.5 1300 rpm

Figura 4.24: I principali produttori di impianti eolici basati sulla tecnologia DFIG

Capitolo 5

Applicazione idroelettrica

5.1 Impianti idroelettrici a bacino

L'altro contesto in cui si può trovare l'impiego delle macchine a velocità variabile è negli impianti idroelettrici a bacino. Gli impianti idroelettrici sono da molto tempo impiegati in vari ambiti, ma la costruzione di grandi impianti di pompaggio ha avuto origine in Francia con lo sviluppo degli impianti nucleari con l'obiettivo di sfruttare meglio l'energia generata da questi ultimi. Nelle ore notturne quando la domanda di energia è inferiore rispetto la produzione, gli impianti idroelettrici entrano in funzione come impianti di pompaggio immagazzinando l'energia sotto forma di energia potenziale in un bacino superiore, mentre nelle ore diurne di punta con il picco di domanda, l'acqua viene fatto fluire dal bacino superiore a quello inferiore azionando le turbine. Con la diffusione degli impianti rinnovabili l'interesse verso questo tipo di impianti si è esteso ulteriormente rendendo il sistema produttivo più efficiente.

Lo sviluppo del mercato dell'energia e la crescente diffusione delle fonti rinnovabili che producono l'energia ad intermittenza, quindi con sensibili sbalzi di produzione, sta radicalmente mutando il sistema energetico. Cambiamenti così radicali nell'architettura e nelle possibilità di controllo della rete, richiedono reti di trasmissione e distribuzione dell'energia sempre più intelligenti ed efficienti. La difficoltà di immagazzinare l'energia elettrica in modo efficiente ed economico è una questione ben nota, che determina la notevole complessità dei sistemi di regolazione impiegati per garantire istante per istante il bilanciamento fra energia prodotta e richiesta. In relazione all'incremento dell'energia prodotta da fonti rinnovabili non programmabili

(FRNP), si assiste negli ultimi anni ad un rinnovato interesse per l'accumulo elettrico. Lo stoccaggio dell'energia, infatti permette di fornire un servizio elettrico continuo compensando l'intermittenza dei FRNP. Fra le tecnologie attualmente disponibili per l'immagazzinamento (figura 5.3) di grandi quantitativi di energia, gli impianti di pompaggio idroelettrico risultano quelli più tra i più consolidati ed efficienti come verrà chiarito in seguito.

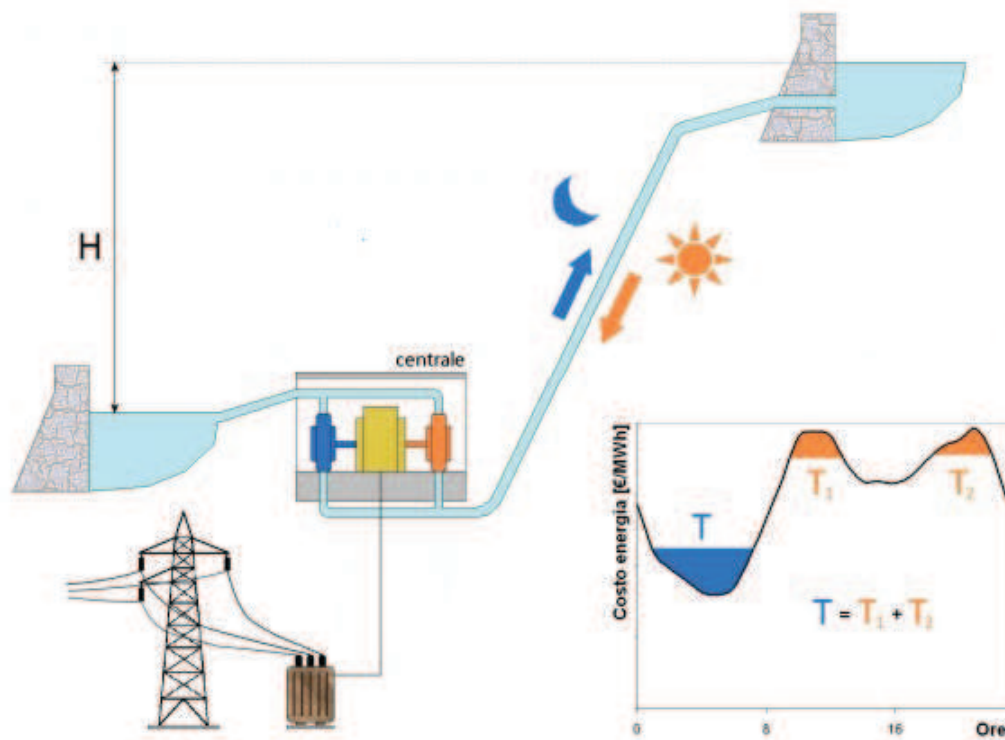


Figura 5.1: Lo schema di un impianto di pompaggio

5.2 Vantaggi nell'utilizzo della macchina a doppia alimentazione negli impianti di pompaggio

Diversamente da com'è stata introdotta all'inizio, il ruolo degli impianti d'accumulo è cambiata radicalmente con forte aumento delle FRNP. Gli impianti

costruiti inizialmente lavoravano in base al carico giornaliero- settimanale o mensile, mentre gli attuali impianti devono seguire dei andamenti molto variabili nell'arco di una giornata in base alle variazioni delle FRNP, permettendo il massimo sfruttamento della potenza prodotta e l'approvvigionamento di risorse per i servizi di dispacciamento.

Generalmente gli impianti idroelettrici di pompaggio costruiti in passato impiegavano delle macchine sincrone, dove la velocità è funzione di frequenza della rete in cui sono connessi, quindi in funzionamento a velocità fissa. Con l'aumento delle FRNP e con la loro produzione ad intermittenza, quindi con delle significative sbalzi di energia c'è necessità dei sistemi di accumulo in grado di gestire queste continue variazioni. Gli attuali impianti di pompaggio equipaggiati di macchine sincrone non sono in grado gestire queste variazioni di potenza, soprattutto quando si tratta di impianti ad elevata potenza. Di conseguenza occorrono delle tecnologie economiche ed efficienti a superare queste limitazioni senza rinunciare i benefici ottenuti dagli impianti classici. Tra le tutte le soluzioni disponibili, la tecnica più conveniente è quella di sostituire la macchina sincrona con una ad induzione a doppia alimentazione che funzioni sia da generatore che da motore. Infatti con lo sviluppo dei nuovi componenti elettronici ad alta potenza si possono costruire/gestire gli impianti di pompaggio a velocità variabile. Confrontando con una macchina sincrona, l'impiego della DFIG aumenta significativamente sia l'efficienza che flessibilità del sistema. Diversamente dai sistemi classici del pompaggio, le macchine a velocità variabile non hanno una lunga storia per il fatto che il loro funzionamento è strettamente legato ai sistemi di conversione ad alta potenza. Infatti il primo generatore-motore a velocità variabile con una potenza di 22 MVA è stata installata nel 1987 nell'impianto di Narude in Giappone. La tabella 5.2 mostra le caratteristiche dei più grandi impianti di pompaggio attualmente in costruzione. In questo tabella (5.2) si nota una variazione di $\pm 10\%$ (rispetto alla velocità di progetto) della velocità per la mancanza di motori/generatori che garantiscono elevati rendimenti in intervalli più ampi [22].

Il vantaggio principale è che gli impianti di pompaggio riescono immagazzinare una grande quantità di energia (fig. 5.3), con potenze di scarica dell'ordine delle centinaia di MW e autonomie dell'ordine decina di ore confronto con altri sistemi di accumulo e sono pertanto indicati per compensazioni su grandi reti.

Infatti è proprio per questo che sui 125 GW installati nel mondo, quasi 98%

PROJECT FEATURES	Nant de Drance 2019	Linthal 2015	Tehri 2016
Velocità di progetto [giri/min]	428.6	500.0	230.77
Campo di variazione della velocità	±7%	±6%	±6%
Campo di variazione del salto [m]	250/390	560/724	830/740
Potenza nominale della turbine [MW]	157	250	255
Generatore [MVA]	175	280	278
Motore [MW]	172	250	-
Diametro della girante [m]	6.009	4.230	-

Figura 5.2: Attuali impianti di pompaggio a velocità variabile

è costituito da impianti di pompaggio idroelettrico. Essi si basano su una tecnologia consolidata che utilizza una fonte fruibile su larga scala. Per questo, pur richiedendo investimenti importanti per le opere civili, si presentano ancora molto più vantaggiosi rispetto ad altre tecnologie per l'accumulo di energia, quali l'accumulo di aria compressa e le batterie. Nella figura 5.3 è

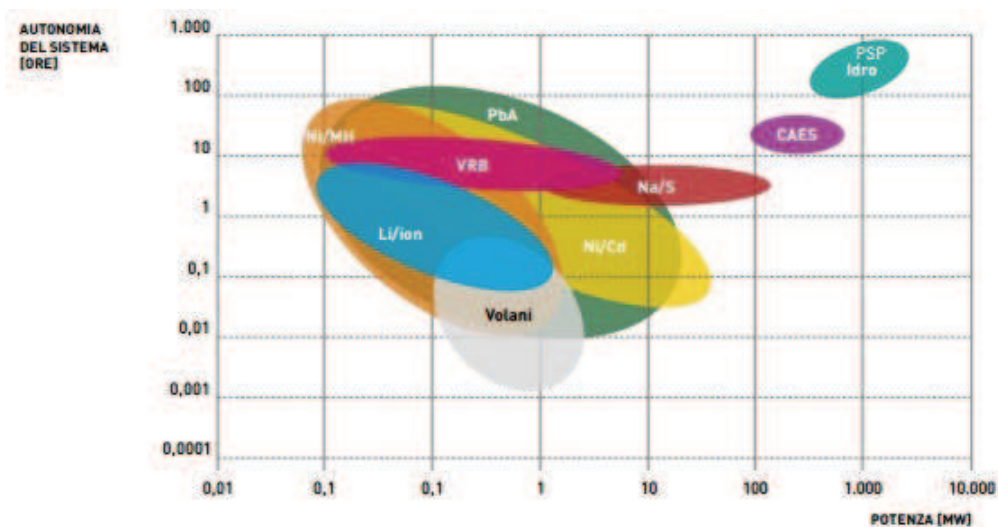


Figura 5.3: confronto in termini di potenza/tempo di scarica tra le diverse tecnologie di accumulo [23]

riportato il confronto tra:

PSP- Pump Storage Power

CAES- compressed Air Energy Storage-volani

NaS- Sodium Sulphur battery

NiCd- Nickel Cadmium

Se andiamo ad analizzare i parametri caratteristici degli impianti di accumulo, tra i quali:

- la capacità di stoccaggio
- tempo di accelerazione e arresto
- costo specifico di stoccaggio
- la potenza di carica e scarica
- l'efficienza del ciclo complessivo (carica-scarica)

sarebbe utile per comprendere meglio ciascun meccanismo.

Come è evidente dalla figura 5.3 gli impianti di pompaggi sono gli unici ad erogare una elevata quantità di potenza (superiore ad un gigawatt) per intervalli abbastanza lunghi. Inoltre confrontata con una turbina a gas, sia il tempo di accelerazione che tempo di arresto di un PSP è ben sotto di cinque minuti in entrambe le direzioni [21]. I costi di stoccaggio delle diverse tecnologie è mostrato dalle figure 5.6 e 5.7 inoltre confrontando i dati tecnici tra le diverse tecnologie tab (5.4 e 5.5) si nota subito che il ciclo di vita dell'impianto è molto superiore rispetto le altre, oltre la potenza e durata di scarica.

Dal punto di vista dell'efficienza la tabella 5.7 mette in evidenza rendimenti delle alcune tecnologie. Gli PSP vengono superati solo dagli accumulatori di tipo batterie che risultano molto convenienti, ma con una durata di vita molto bassa che dipende anche da temperatura e modalità di carica-scarica.

Infine in figura 5.7 sono posti a confronto i valori di Levelized Unit Electricity Cost (LUEC) calcolati per i diversi sistemi di accumulo dimensionati per un funzionamento, in generazione di 4 ore equivalenti a potenza massima al giorno.

Systems	Energy and power density				Life time and cycle life		Influence on environment	
	Wh/kg	W/kg	Wh/L	W/L	Life time (years)	Cycle life (cycles)	Influence	Description
PHES	0.5-1.5		0.5-1.5		40-60		Negative	Destruction of trees and green land for building the reservoirs
CAES	30-60		3-6	0.5-2.0	20-40		Negative	Emissions from combustion of natural gas
Lead-acid	30-50	75-300	50-80	10-400	5-15	500-1000	Negative	Toxic remains
NiCd	50-75	150-300	60-150		10-20	2000-2500		
NaS	150-240	150-230	150-250		10-15	2500		
ZEBRA	100-120	150-200	150-180	220-300	10-14	2500+		
Li-ion	75-200	150-315	200-500		5-15	1000-10,000+		
Fuel cell	800-10,000	500+	500-3000	500+	5-15	1000+	Negative	Remains and/or combustion of fossil fuel
Metal-Air	150-3000		500-10,000			100-300	Small	Little amount of remains
VRB	10-30		16-33		5-10	12,000+	Negative	Toxic remains
ZnBr	30-50		30-60		5-10	2000+		
PSB					10-15			
Solar fuel	800-100,000		500-10,000				Benign	Usage and storage of solar energy
SMES	0.5-5	500-2000	0.2-2.5	1000-4000	20+	100,000+	Negative	Strong magnetic fields
Flywheel	10-30	400-1500	20-80	1000-2000	~15	20,000+	Almost none	
Capacitor	0.05-5	~100,000	2-10	100,000+	~5	50,000+	Small	Little amount of remains
SuperCap	2.5-15	500-5000	10-30	100000+	20+	100000+	Small	Little amount of remains

Figura 5.4: Dati tecnici 1

Systems	Power rating and discharge time		Storage duration		Capital cost		
	Power rating	Discharge time	Self discharge per day	Suitable storage duration	\$/kW	\$/kWh	€/kWh-Per cycle
PHES	100-5000 MW	1-24 h+	Very small	Hours-months	600-2000	5-100	0.1-1.4
CAES	5-300 MW	1-24 h+	Small	Hours-months	400-800	2-50	2-4
Lead-acid	0-20 MW	Seconds-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	300-600	200-400	20-100
NiCd	0-40 MW	Seconds-hours	0.2-0.6%	Minutes-days	500-1500	800-1500	20-100
NaS	50 kW-8 MW	Seconds-hours	~20%	Seconds-hours	1000-3000	300-500	8-20
ZEBRA	0-300 kW	Seconds-hours	~15%	Seconds-hours	150-300	100-200	5-10
Li-ion	0-100 kW	Minutes-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	1200-4000	600-2500	15-100
Fuel cells	0-50 MW	Seconds-24 h+	Almost zero	Hours-months	10,000+		6000-20,000
Metal-Air	0-10 kW	Seconds-24 h+	Very small	Hours-months	100-250	10-60	
VRB	50 kW-3 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	600-1500	150-1000	5-80
ZnBr	50 kW-2 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
PSB	1-15 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
Solar fuel	0-10 MW	1-24 h+	Almost zero	Hours-months			
SMES	100 kW-10 MW	Milliseconds-8 s	10-15%	Minutes-hours	200-300	1000-10,000	
Flywheel	0-250 kW	Milliseconds-15 min	100%	Seconds-minutes	250-350	1000-5000	3-25
Capacitor	0-50 kW	Milliseconds-60 min	40%	Seconds-hours	200-400	500-1000	
Super-capacitor	0-300 kW	Milliseconds-60 min	20-40%	Seconds-hours	100-300	300-2000	2-20

Figura 5.5: Dati tecnici 2

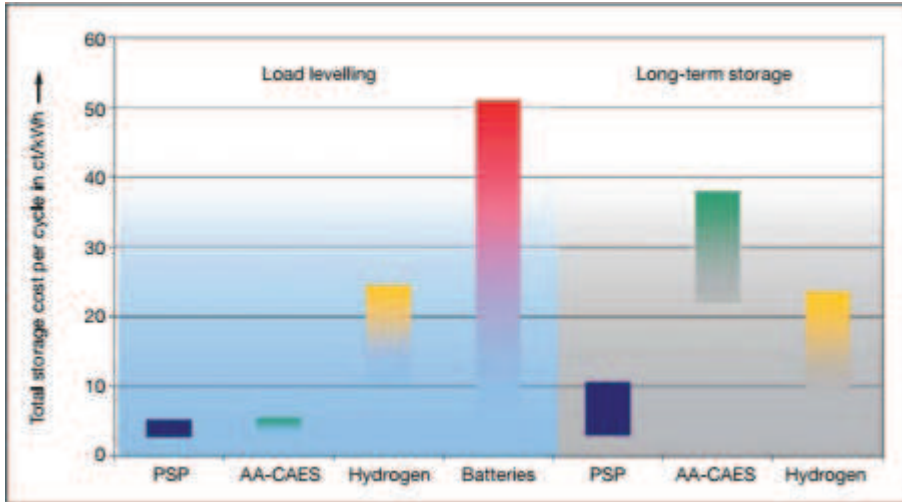


Figura 5.6: costo di stoccaggio (per ciclo) in base alle diverse tecnologie-Fonte:VGB Power Tech-Autorenexemplar

	Pompaggio puro	CAES cavità salina	CAES serbatoio esterno	Na/S	VRB	Li/ion	Na/NiCl	Pb/acido
Rendimento [%]	80	65	65	85	70	95	90	80
Costi di investimento [M€/MW]	0,715	0,625	0,880	2,950	4,000	6,000	4,000	1,700
Costi di O&M [M€/MW/anno]	0,0054	0,0096	0,0096	0,06	0,1	0,05	0,06	0,06
Costruzione [anni]	5	3	3	1	1	1	1	1
Vita [n. cicli 80% DoD]	-	-	-	4.500	10.000	4.000	3.000	800
Vita [anni]	50	30	30	12	27	11	8	2
LUEC [€/MWh]	120	121	142	389	433	603	703	832

Figura 5.7: Parametri caratteristici di alcuni sistemi di accumulo -1

5.3 Funzionamento a velocità variabile

I vantaggi della macchina a velocità variabile rispetto a quella fissa negli impianti di pompaggio è riconducibile a tre aspetti fondamentali [27]:

- risposta rapida alla domanda/offerta di energia
- elevate prestazioni/efficienza in modalità di turbina
- regolazione della potenza di ingresso durante le operazioni di pompaggio

Per quanto riguarda il primo punto, com'è già accennato all'inizio, le fonti rinnovabili sono molto aleatorie con variazione molto rapida della potenza prodotta. Quindi gli impianti a velocità variabile devono essere in grado di stabilire il sistema di potenza con tempi di regolazione molto rapide (grafico 5.8) seguendo queste variazioni. Questi sistemi hanno la capacità di reagire molto rapidamente alle variazioni di potenza in modo lavorare nelle condizioni ottimali, mentre nei sistemi tradizionali la variazione della potenza viene gestito solamente mediante dispositivi meccanici (spostamento otturatore, inclinazione delle pale, ecc). Infatti i tempi di risposta della macchina a velocità variabile è uno o due ordini di grandezza inferiore confrontata con quello meccanico.

Proprio grazie a questo fatto, gli impianti a velocità variabile riesce a seguire perfettamente le curve di produzione delle fonti di energia non programmabile (fig. 5.9). Inoltre mette in evidenza (rettangoli rossi) quale si otterrebbe con macchine a velocità fissa operante per livelli discreti di potenza (4 gruppi di potenza 100 MW).

Per quanto riguarda il secondo punto la figura 5.10 illustra le due curve di funzionamento della macchina nel caso della macchina a induzione a doppia alimentazione ed a velocità fissa in funzione dell'apertura dell'otturatore. Com'è evidente dalla curva rossa, nel caso della macchina a velocità variabile alla diverse aperture dell'otturatore, l'impianto funziona con un'efficienza maggiore grazie ad un controllo più accurato.

Riguardo al terzo punto si considera la figura 5.11, dove viene evidenziata la variazione ottenibile della potenza in fase di pompaggio

Si nota che in base al salto idraulico disponibile, la potenza assorbita dalla rete può essere variata di circa 30 %. Questo aspetto ha fondamentale importanza per i gestori dell'impianto, perché permette di contribuire alla

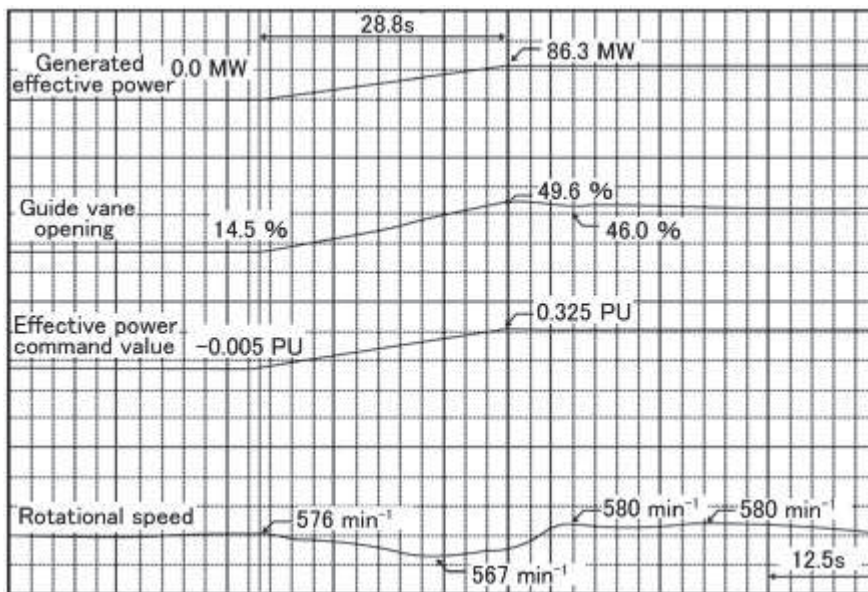


Figura 5.8: risposta della turbina ai comandi di potenza

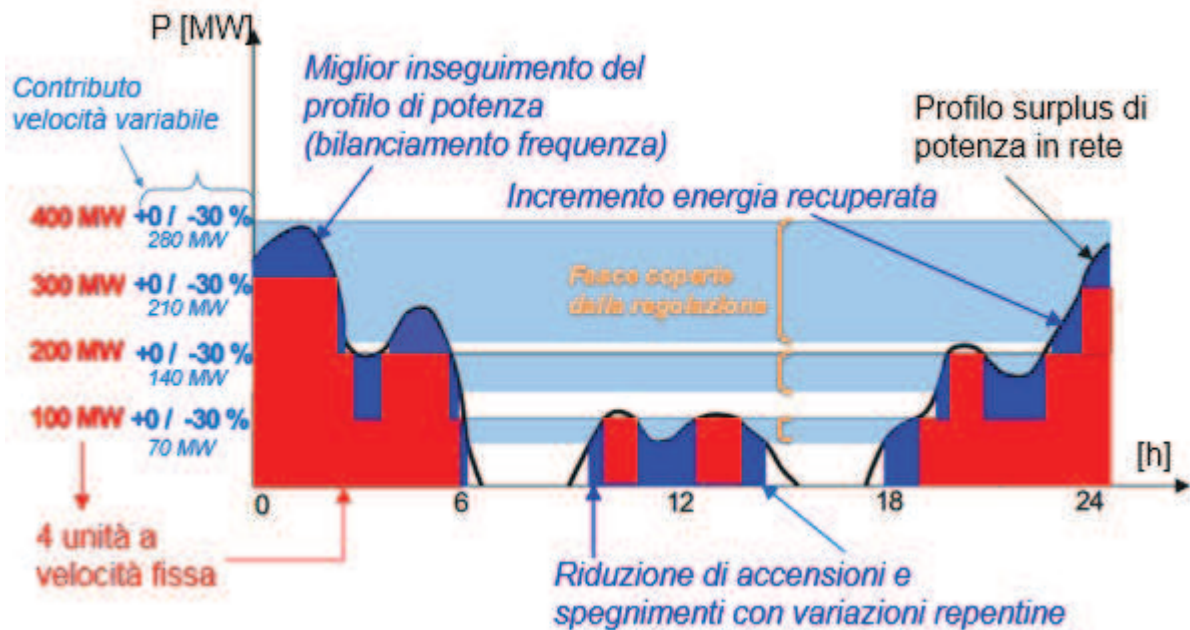


Figura 5.9: confronto in fase di pompaggio

regolazione della frequenza anche in modalità pompa rendendo più stabile il sistema. Infine la possibilità di variazione della velocità può essere utilizzato per evitare zone critiche in modalità pompa o al contrario si possono imporre

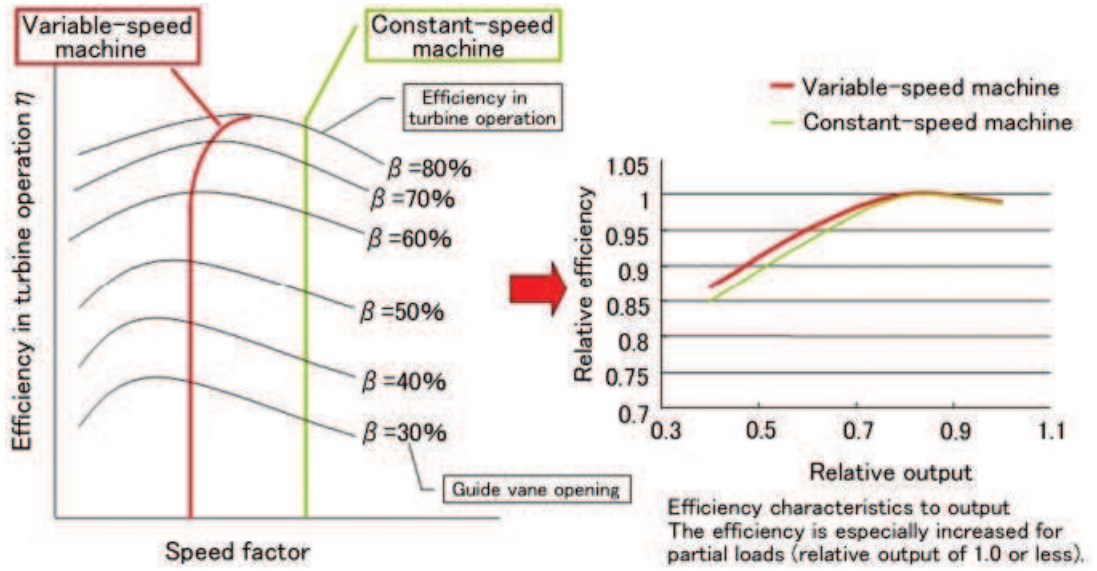


Figura 5.10: curve di efficienza

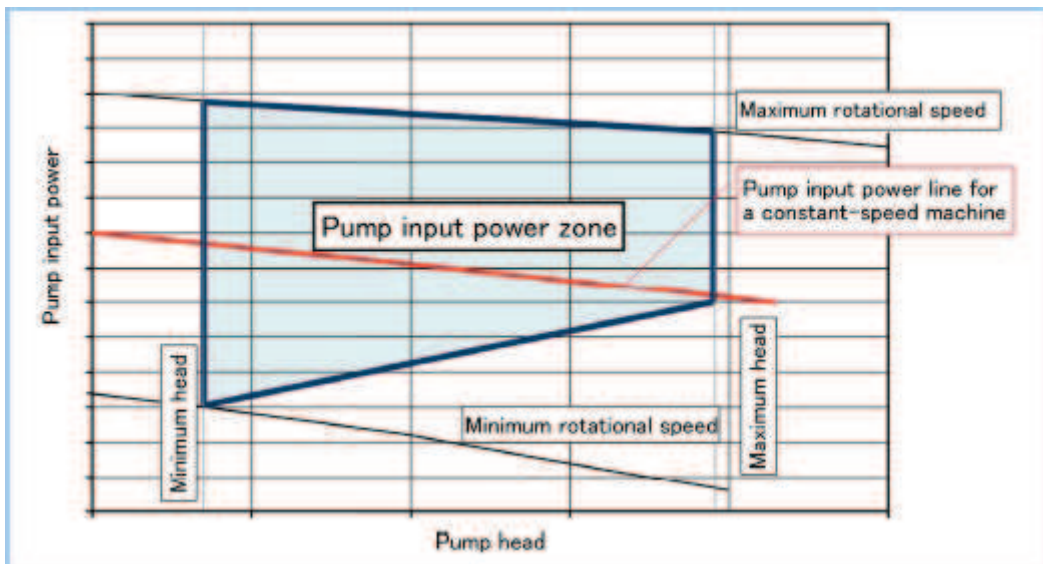


Figura 5.11: variazione della potenza nel funzionamento da pompa

dei punti di funzionamento vantaggiosi per quanto riguarda l'efficienza.

Il grafico 5.12 rappresenta funzionamento del gruppo in modalità pompa evidenziando le zone di funzionamento al variare della velocità. La variazione del regime di rotazione della macchina consente, di aumentare significativamente il campo operativo della stessa, limitato alle alte portate da problemi di cavitazione (linea tratteggiata a destra), e alle basse portate da condizioni di funzionamento instabili e pericolose per la sicurezza dell'impianto stesso (linea tratteggiata a sinistra). Grazie a velocità variabile la zona di funzionamento della pompa aumenta considerevolmente potendo variare la portata a parità di prevalenza o viceversa variare la prevalenza (variazione altezza del livello nel bacino) mantenendo la stessa portata.

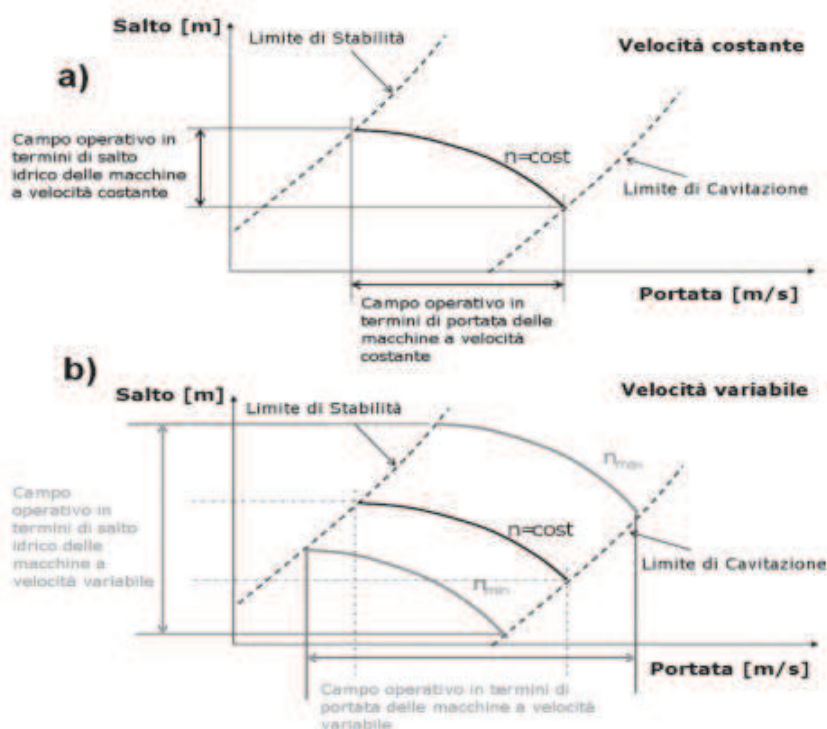


Figura 5.12: diagramma portata in funzione del salto a diverse velocità di funzionamento

Invece in figura 5.13 rappresenta i rendimenti in funzione della potenza al variare della velocità, dove si nota lo spostamento della curva verso sinistra. Quindi anche per le velocità inferiori al velocità di sincronismo si può ottenere un considerevole aumento di efficienza. La variazione fine ottenuta grazie all'elettronica di potenza permette di rispondere immediatamente alle

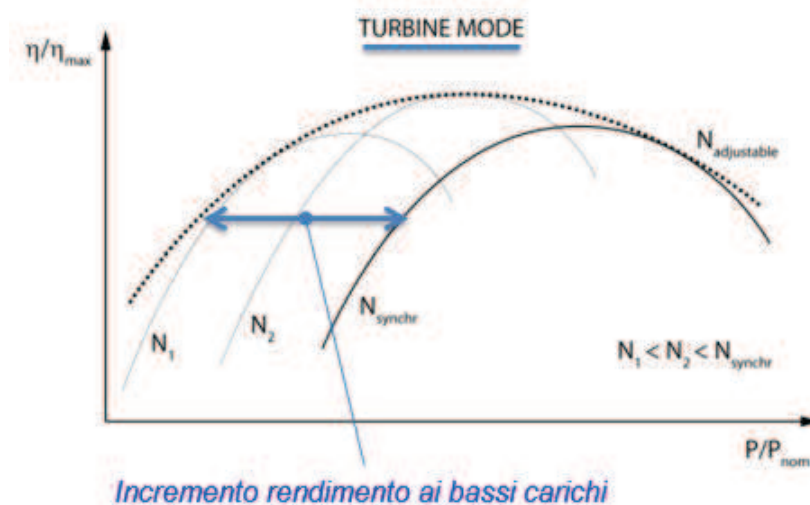


Figura 5.13: Rendimenti in funzione della potenza a diverse velocità

variazioni di potenza della rete ottenendo un miglioramento del bilancio dell'energia. Sempre grazie all'ottima risposta dinamica di queste macchine si possono evitare i continui avvii e arresti degli impianti di potenza di picco. Osservando invece i grafici collinari di efficienza (figura 5.14) si nota che alla velocità fissa in modalità di turbina il punto di lavoro è abbastanza distante dalla retta di efficienza massima. Nel caso del DFIG la variazione della velocità permette di lavorare molto vicino alla retta di efficienza sia come turbina che pompa.

Una possibile configurazione dell'impianto di pompaggio è il seguente: fig.5.15

La tabella 5.16 illustra i dati caratteristici della Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) di impianti con macchina DFIG a velocità variabile [27].

5.3.1 Scelta dello schema d'impianto

La scelta dello schema della centrale di pompaggi dipende dalle caratteristiche dell'impianto (portata massima e dislivelli tra i due bacini) ed è condizionata dall'esigenza di ottenere il più elevato rendimento nel doppio trasferimento di energia pompa-acqua e acqua-turbina che interviene nel ciclo di accumulazione ed utilizzazione. L'energia utile prodotta dalla turbina raggiunge normalmente il 70-80%, di quella utilizzata dalla pompa a causa

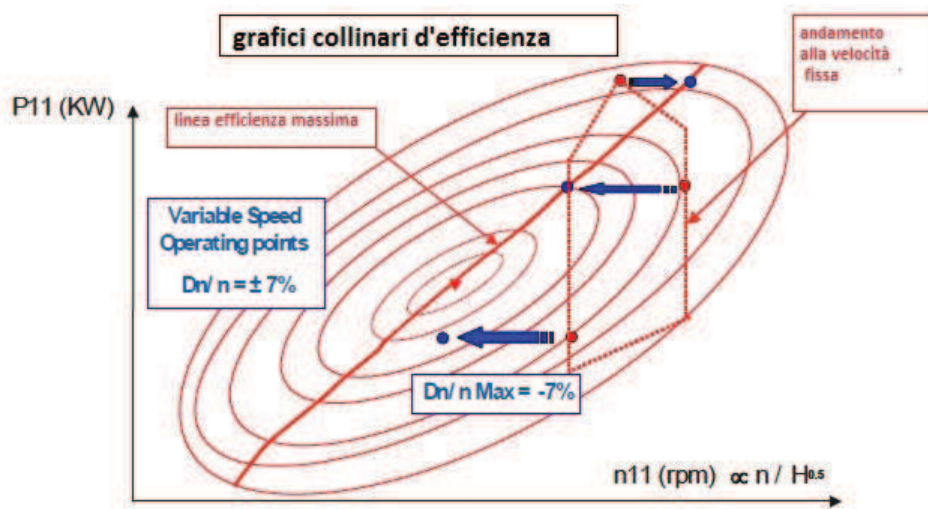


Figura 5.14: diagrammi collinari nel funzionamento da turbina

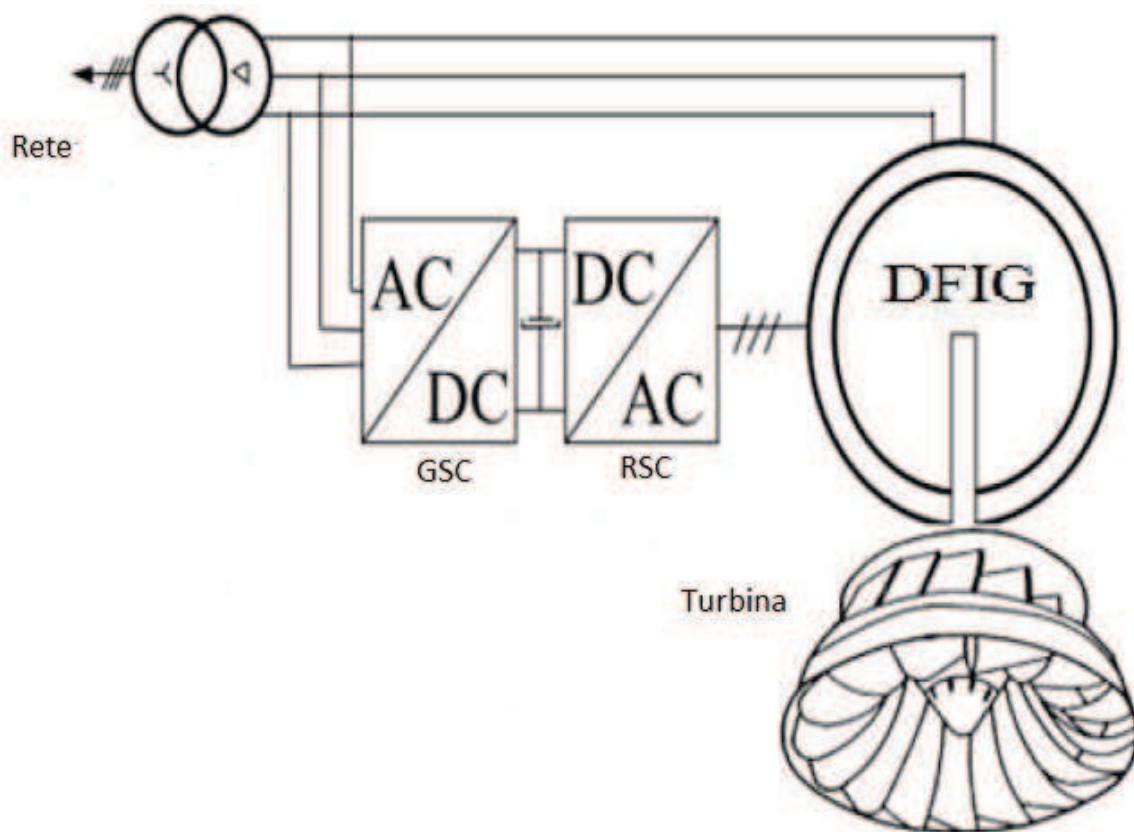


Figura 5.15: impianto di pompaggio a velocità variabile con turbina Francis

		Power station A	Power station B	Power station C
Type of pump turbine		Francis	Francis	Denaz
Generator Operation	Max. effective head (m)	671.8	508.8	115.2
	Max. output of pump turbine (MW)	310	185.4	103
	Rotational speed (min^{-1})	600 ± 24	$576 - 626$	231 ± 23
Pump Operation	Max. pump head (m)	720.4	528.8	121.8
	Max. input to pump turbine (MW)	330	180	140
	Rotational speed (min^{-1})	600 ± 24	$576 - 626$	231 ± 23

Figura 5.16: valori caratteristici

dei rendimenti delle singole trasformazioni energetiche. I gruppi macchinari possono essere installati in diverse configurazioni:

- un gruppo motore-pompa e un gruppo turbina-generatore;
- un gruppo turbina-pompa-generatore/motore (gruppi ternari);
- un gruppo pompa/turbina- generatore/motore (gruppi binari)

5.4 Confronto strutturale di DFIG con una macchina sincrona convenzionale

La figura 5.17 illustra un confronto tra la macchina sincrona e DFIG sia dimensionale che strutturale. Come descritto in dettaglio nei capitoli precedenti il DFIG non è altro che una macchina ad induzione con rotore avvolto. La differenza sta nel fatto che c'è un aumento della potenza in uscita mediante i collegamenti rotorici. In questo caso tutta la componentistica dell'elettronica di potenza è situato sul lato rotore. In entrambe le macchine la parte statica è identica, mentre la differenza si verifica sul lato rotore come mostrato in figura 5.18. Dal punto di vista dell'eccitazione, nella macchina sincrona il campo viene prodotto da una tensione e corrente in continua e con valori non molto elevati, mentre nel DFIG è richiesta una tensione rotorica elevata specialmente ai bassi scorrimenti, comportando un leggero aumento del volume del rotore per motivi di isolamento. A parità di potenza e velocità la macchina a doppia alimentazione è più grande, possiede un'inerzia maggiore e un traferro più piccolo per limitare la corrente magnetizzante.

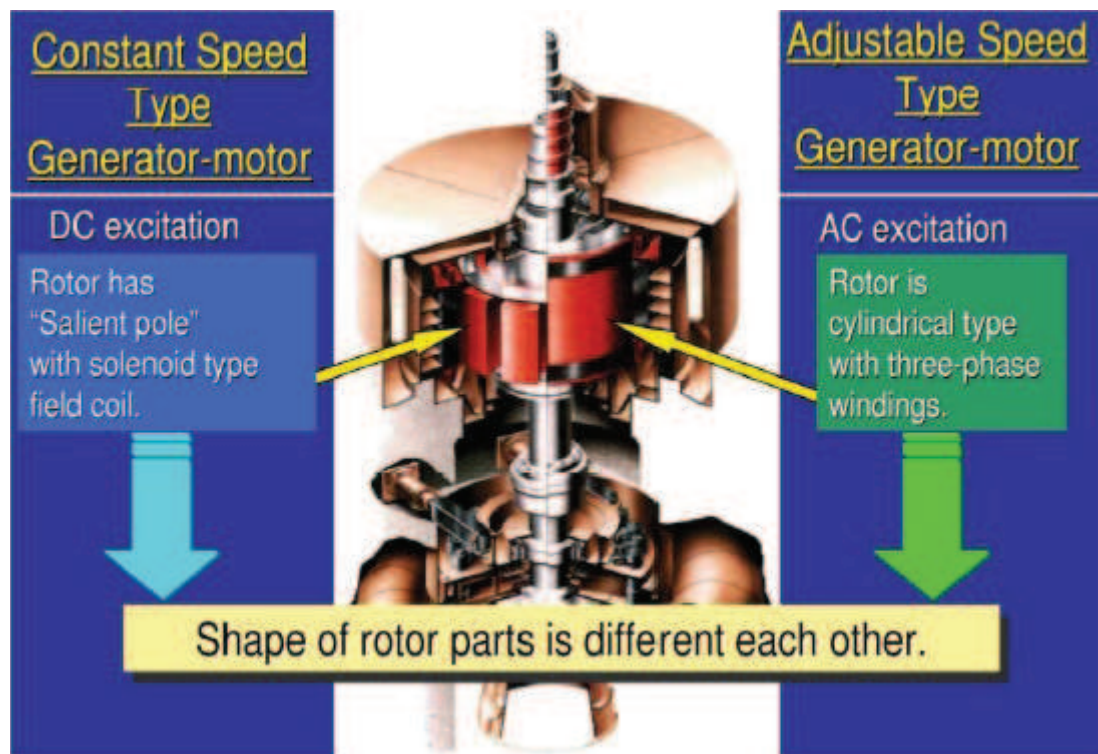


Figura 5.18: confronto strutturale tra la macchina sincrona e macchina a velocità variabile

5.4.1 Tipologie di convertitori

Come accennato in precedenza a lato rotore viene utilizzato un convertitore back-to-back composto da due inverter trifase con un bus DC intermedio. Allo stato attuale molte turbine sono dotate di convertitori a due livelli al fine di ridurre il costo delle turbine (fino a 3MW), ma per le turbine con potenze superiori(3-6MW) è conveniente impiegare dei convertitori a 3 livelli. La taglia dei convertitori dipendono in base tipo di eccitazione . Se la macchina viene magnetizzata mediante gli avvolgimenti rotorici allora RSC deve essere dimensionato per il quadrato della componente che produce la coppia elettromeccanica e corrente di magnetizzazione (un 30% della corrente nominale della macchina), mentre GSC deve consegnare solo la componente della corrente correlata alla potenza attiva. Nel caso in cui la macchina venisse magnetizzato dagli avvolgimenti statorici, il RSC deve essere dimensionato per il quadrato della componente che produce la coppia elettromeccanica, mentre GSC deve essere dimensionato in base alle componenti della corrente che produce la potenza attiva e reattiva. In figura 5.19 viene illustrato un classico inverte utilizzato nelle turbine DF.



Figura 5.19: convertitore back-to-back a due livelli

Considerando che la taglia delle grandi pompe-turbine va dai 100 ai 350 MW è necessario un convertitore per una potenza che va dai 15 ai 60 MW ottenendo quindi un sensibile risparmio nella scelta delle apparecchiature elettroniche. Note le potenze in gioco generalmente le tre fasi vengono gestite singolarmente come illustrato in fig. 5.21. In questo caso facciamo riferimento ad un ciclo convertitore di potenza nominale pari a $P_n=100\text{MVA}$ della *ALSTOM* che è il più grande convertitore esistente nel mondo.

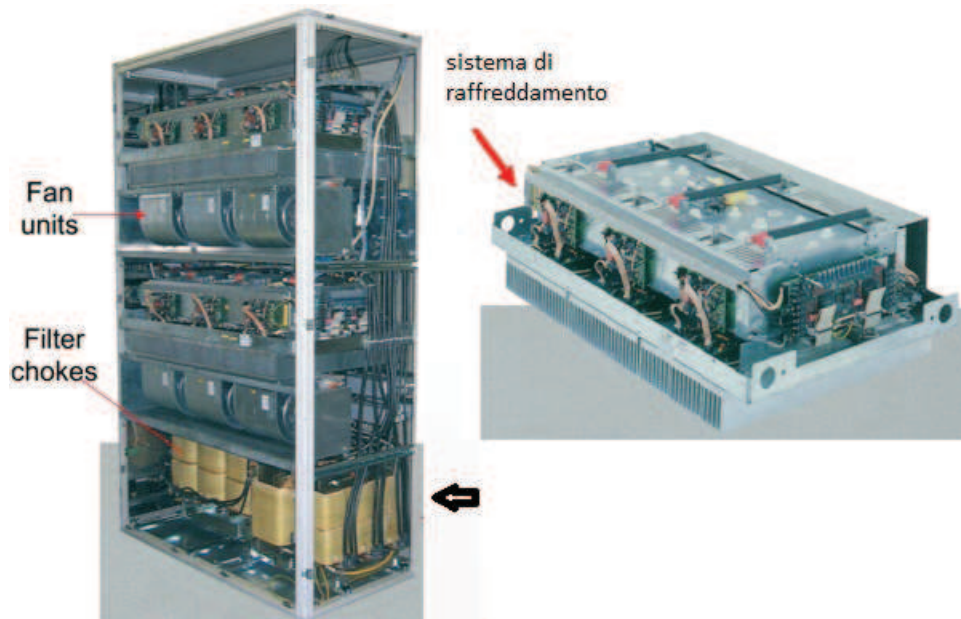


Figura 5.20: sistemi raffreddamento

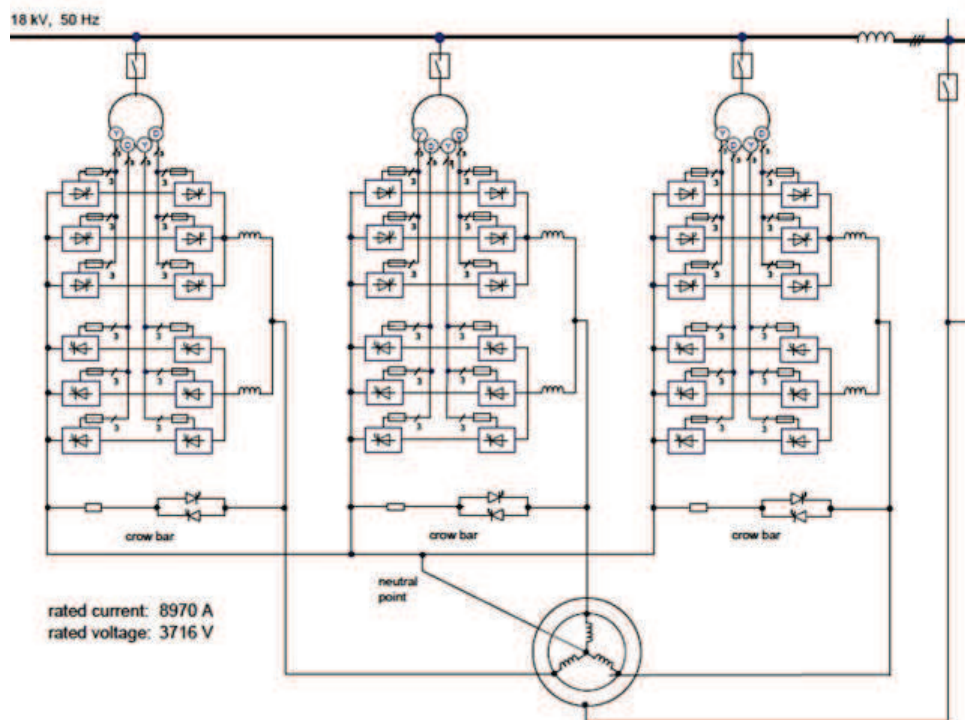


Figura 5.21: sistema di convertitori

5.4 Confronto strutturale di DFIG con una macchina sincrona convenzionale 95

Ciascuna fase del rotore della macchina è alimentato da due ponti in anti-parallelo, dove ciascuno ponte è costituito da 6 tiristori. I ponti in anti parallelo vengono controllati mediante correnti circolanti inserendo in serie un'induttanza (reattanza di limitazione) onde evitare le sovratensioni. I tre rami di tiristori in parallelo sono dimensionati per la corrente nominale. La tabella 5.22 illustra un confronto tra una macchina ad induzione controllato da un ciclo convertitore e una macchina sincrona dove vengono messi in evidenza alcune grandezze del convertitore.

	Cyclo-converter Driven Induction Machine	Synchronous Machine with Standard Excitement
Step response time (P, Q) (zero to rated)	150 ms	several seconds
Synchronisation time	10 s	20 s or more depending on mechanical load conditions
Synchronisation transient reactions	damped after 500 ms	damped after several seconds
Average efficiency of the whole storage unit (turbine + drive)	80 %	70 %

Figura 5.22

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è rivolto all'analisi di una macchina asincrona a doppia alimentazione impiegata sia nell'ambito delle turbine eoliche che negli impianti di pompaggio. Per quanto riguarda gli impianti eolici abbiamo notato che confrontandoli con gli impianti precedenti a velocità fissa, l'applicazione della macchina a velocità variabile permette di sfruttare meglio la risorsa primaria comportando una serie di vantaggi. Quindi questo aspetto va ad aumentare la potenza complessivamente prodotta dalla macchina comportando in termini economici un maggior profitto. Inoltre poiché il convertitore di potenza è stato dimensionato per una frazione di potenza (20-30)% della potenza nominale, ne deriva sia un beneficio economico diretto sul convertitore sia un beneficio indiretto per la minore potenza dissipata nel convertitore stesso. Tutti i questi vantaggi vanno ad aumentare la potenza totale prodotta, quindi un maggiore profitto, comportando inoltre un aumento complessivo del sistema di conversione.

Nell'ambito degli impianti di pompaggio si nota che l'utilizzo delle macchine a velocità variabile contribuisce in modo rilevante a rivoluzionare il sistema complessivo di produzione e trasmissione, perché mediante questi impianti si riesce ad integrare meglio l'energia prodotta dalle fonti rinnovabili (che sono spesso imprevedibili) [5.9]. Si evitano così sia i picchi di domanda che la richiesta di energia. Tutto questo rende molto più efficiente e flessibile tutto il sistema energetico. L'affermazione di questi impianti nel sistema energetico comporta dei benefici sia in ambito economico dato che permette sfruttare tutta la potenza prodotta dalle fonti rinnovabili, sia nel settore ambientale per il fatto che aumenta la quota di energia pulita, riducendo l'immissione dei prodotti inquinanti rilasciati dai metodi classici.

Bibliografia

- [1] Muhammad H. Rashid, *POWER ELECTRONICS HANDBOOK-Third Edition*, 2011
- [2] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook-second Edition* 2011
- [3] G.L. Johnson, *Wind Energy Sistem. Englewood Cliffs, NJ*
- [4] Dr John Fletcher and Jin Yang *Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications*
- [5] J.mccalley *double-fed electric machines-steady state analysis*
- [6] Phan Dinh Chung *Comparison of Steady-State Characteristics between DFIG and SCIG in Wind Turbine*
- [7] Zoheir Tir1, Hammoud Rajelai and Rachid Abdessemed *Analysis and vector control of a cascaded doubly fed induction generator in wind energy applications-2010*
- [8] Sloopweg, J. G.; Polinder H.; Kling, W. L. *Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator. IEEE Trans. on Power Systems- 2001*
- [9] M. Andriollo, G. Martinelli, A. Morini *Macchine elettriche rotanti*
- [10] Samuele Grillo, Mattia Marinelli, Andrea Pitto, Federico Silvestro *modellazione di generatori eolici a velocita' variabile equipaggiati con generatore asincrono a doppia alimentazione*
- [11] Liyan Qu, Member, IEEE, and Wei Qiao *Constant Power Control of DFIG Wind Turbines With Supercapacitor Energy Storage-IEEE*

-
- [12] Dr John Fletcher and Jin Yang *Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications-University of Strathclyde, Glasgow United Kingdom*
- [13] Jörg Janning, Alexander Schwery *Next generation variable speed pump-storage power stations*
- [14] Mahdi Johar¹, Ahmad Radan, Mohammad Reza Miveh and Sohrab Mirsaeidi *Comparison of DFIG and Synchronous Machine for Storage Hydro-Power Generation-Research Paper*
- [15] Gabriel Dan CIOCAN, Olivier TELLER, Francois CZERWINSKI *variable speed pump-turbines technology*
- [16] I.Ya. Dovganyuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, and P. Yu. Tuzov *Analysis of Systems for Excitation of Variable Speed Pumped Storage Power Plant Hydrogenerators*
- [17] By Jean Marc Henry, Frederic Maurer, Jean-Louis Drommi, and Thierry Sautereau *Converting to Variable Speed at a Pumped- Storage Plant*
- [18] Docente Andrea Tortella *Appunti di Generazione e accumulo di Energia Elettrica da fonti rinnovabili*
- [19] Roberto Caldon *Impianti produzione dell'Energia Elettrica Padova: Libreria Progetto, 2013*
- [20] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel A. Rodriguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski *doubly fed induction machines*
- [21] Peter Vennemann, Karl Heinz Gruber, Jon Ulrik Haaheim, Andreas Kunsch, Hans-Peter Sistenich and Hans -Rudolf Thoni *Pumped storage plants-Status and perspectives*
- [22] Anna Stoppato, Giovanna Cavazzini, Alberto Benato *Influenza degli impianti alimentati da fonti rinnovabili sulle strategie di gestione del sistema energetico*
- [23] RSE view *L'accumulo di energia elettrica*
- [24] A Report from the APS Panel on Public Affairs Committee on Energy and Environment *Challenges of Electricity Storage Technologies*

-
- [25] Paul Denholm, Erik Ela, Brendan Kirby, Michael Milligan *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation - Technical Report, January 2010*
- [26] Karl Scherer, Hydro Generators, *ANDRITZ-VATECHHYDRO*
- [27] Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 3 (September 2011) *Advantages of Variable Speed Pump Turbines for adjusting Power Supply*
- [28] <http://www.ewea.org/> *EWEA annual report 2013*
- [29] <http://www.rinnovabili.it/energia/idroelettrico/imbrigliare-lenergia-verde>
- [30] <http://www.anev.org/wp-content/uploads/2013/05/Anev-brochure-2013-x-5.pdf>
- [31] <http://www.EWEA:> *Wind in power 2013 European statistics*
- [32] <http://www.abb.com-ABB> – *Quaderni di applicazione tecnica n. 13 – Energia eolica*
- [33] <http://www.Terna.it>
- [34] <http://www.APS.org>
- [35] <http://www.powerconv.alstom.com>
- [36] <http://www.indar.net>