

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTROROTTECNICA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA

GENERATORE ASINCRONO
A DOPPIA
ALIMENTAZIONE

RELATORE: PROF. MARTINELLI GIOVANNI ATTILIO

LAUREANDO: PRADELLA TOMAS

MATRICOLA N°: 563205-IE

ANNO ACCADEMICO 2009 – 2010

Sommario	III
Introduzione	V

Capitolo 1

MACCHINA ASINCRONA

1.1	Introduzione alla macchina asincrona	2
1.2	Elementi costruttivi	2
1.2.1	Statore.....	3
1.2.2	Rotore.....	3
1.3	Principio di funzionamento	4
1.3.1	Ipotesi iniziali e definizioni delle grandezze in gioco.....	4
1.3.2	Funzionamento con circuiti rotorici aperti e rotore bloccato.....	5
1.3.3	Funzionamento con circuiti rotorici in corto circuitato e rotore in movimento.....	6
1.4	Circuito equivalente di una fase	9
1.4.1	Trasposizione dei parametri dal lato rotore allo statore.....	9
1.4.2	Circuito equivalente semplificato.....	10
1.5	Potenze, coppia e caratteristica meccanica	11
1.5.1	Definizione delle grandezze.....	11
1.5.2	Caratteristica meccanica.....	13
1.6	Generatore asincrono	15
1.6.1	Diagramma fasoriale di rotore.....	15
1.6.2	Considerazioni sull'uso della macchina asincrona come generatore.....	16
1.6.3	Generatore a velocità fissa.....	16
1.6.4	Generatore a velocità totalmente variabile.....	18

Capitolo 2

GENERATORE ASINCRONO A DOPPIA ALIMENTAZIONE

2.1	Aspetti generali	22
2.1.1	Introduzione.....	22
2.1.2	Differenze costruttive rispetto alla macchina asincrona.....	22
2.1.2	Vantaggi della tecnologia DFIG.....	23
2.2	Principio di funzionamento	24
2.2.1	Introduzione al funzionamento del DFIG.....	24
2.2.2	Equazioni di regime permanente.....	26
2.2.3	Circuito equivalente.....	27
2.2.4	Potenza di statore, di rotore, meccanica e massima.....	29
2.2.5	Flussi di potenza reattiva nel DFIG.....	32
2.2.6	Diagrammi fasoriali.....	32
2.3	Funzionamento in parallelo	38
2.3.1	Operazioni di inserzione.....	38
2.3.2	Gestione dei flussi di potenza attiva e reattiva.....	38
2.3.3	Funzionamento del DFIG in condizioni di guasto in linea.....	45
2.4	Esempio applicativo di turbina eolica	46
	Conclusioni	49
	Bibliografia	51

Sommario

In questo elaborato descriviamo il funzionamento del generatore asincrono a doppia alimentazione, analizzando i pregi introdotti rispetto alla macchina ad induzione classica nello sfruttamento di risorse caratterizzate da un flusso energetico discontinuo; in particolare ci concentriamo sull'utilizzo dell'energia eolica.

Nel primo capitolo presentiamo la macchina asincrona; inizialmente definiamo il principio di funzionamento e discutiamo le equazioni di regime permanente con l'obiettivo di tracciare la caratteristica meccanica. Proseguiamo poi focalizzando sul funzionamento della macchina come generatore; grazie ad esempi concreti approfondiamo le caratteristiche che la contraddistinguono e concludiamo tracciando un bilancio che valuta gli aspetti caratteristici del funzionamento in parallelo alla rete.

Alla fine del primo capitolo risulteranno chiari il concetto di circuito equivalente e il significato dei parametri concentrati in esso rappresentati, il comportamento della macchina a induzione nei suoi vari punti di funzionamento e i principali pregi e difetti caratteristici del funzionamento da generatore in alcune tipiche configurazioni di impiego.

Il secondo capitolo viene dedicato al generatore asincrono a doppia alimentazione (DFIG). Iniziamo con una descrizione fisica per poi passare all'elenco delle migliorie introdotte da questa tecnologia. Utilizzando come punto di partenza la teoria della macchina a induzione classica, illustrata nel primo capitolo, procediamo nella descrizione del suo principio di funzionamento, prima intuitivamente e poi tramite le equazioni di regime permanente. Concludiamo il paragrafo con la costruzione del nuovo circuito equivalente, dove andiamo a valutare le differenze presenti rispetto alla macchina a induzione.

Proseguendo con la trattazione esaminiamo i flussi di potenza che interessano il DFIG in diverse condizioni di lavoro, anche tramite l'uso di diagrammi fasoriali. In questo modo si mettono le basi per poi analizzare il funzionamento in parallelo alla rete.

Il paragrafo successivo viene quindi dedicato interamente agli aspetti che riguardano il DFIG connesso alla rete; si parte con l'operazione di inserzione, si tracciano gli andamenti della potenza attiva e reattiva di statore in funzione dell'angolo di carico e si considera il funzionamento in condizioni di guasto.

Per concludere esponiamo un esempio applicativo di una turbina eolica equipaggiata con un DFIG. Tramite i dati di targa forniti dal costruttore esaminiamo gli aspetti teorici visti in precedenza riscontrando un effettivo vantaggio nell'utilizzo di questa tecnologia.

Introduzione

Per riuscire a far fronte all'aumento dell'inquinamento e alla costante crescita dei consumi energetici sono necessari profondi cambiamenti nelle modalità di produzione ed utilizzo dell'energia.

L'incremento dello sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili mette in evidenza la ricerca di soluzioni alternative nella produzione di energia più sostenibili dal punto di vista ambientale soprattutto nei Paesi sviluppati. L'impiego di queste risorse alternative è tuttavia poco diffuso poiché non garantisce un flusso costante di energia. E questo rappresenta il principale deterrente al loro sfruttamento su larga scala.

E' pur vero che negli ultimi decenni si è lavorato molto nella ricerca di soluzioni tecnologiche che rendano l'utilizzo di queste potenzialità più vantaggioso dal punto di vista energetico, incentivando il loro impiego a scapito delle fonti classiche.

In quest'elaborato si analizzano e si valutano pregi e difetti introdotti da una soluzione, per altro già diffusa commercialmente, indirizzata ad aumentare lo sfruttamento della risorsa eolica, tramite un generatore a velocità variabile derivato dall'evoluzione della macchina asincrona classica. Grazie ad alcune modifiche infatti si può espandere il campo di utilizzo, mantenendo comunque un elevato rendimento anche alle velocità medio-basse. Un enorme passo avanti per questo tipo di risorsa.

Per merito di questa innovazione è possibile installare aereogeneratori anche in località dove prima non risultava conveniente, poiché non erano presenti i requisiti sufficienti. In questo modo l'impiego di turbine eoliche è aumentato anche al di fuori delle zone classiche come la Danimarca o la Germania, che grazie alle caratteristiche di vento favorevole sono state tra le prime nazioni a sviluppare lo sfruttamento di questa risorsa.

1

MACCHINA ASINCRONA

1.1 Introduzione alla macchina asincrona

Grazie a caratteristiche come l'affidabilità, la semplicità, l'elevato rendimento e il basso costo di investimento, la macchina asincrona o a induzione rappresenta il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come "forza motrice".

Nella macchina asincrona la velocità di rotazione non risulta univocamente legata alla frequenza, ma dipende dal carico meccanico applicato; da questa particolarità ne deriva il suo nome.

Come tutte le macchine elettriche il suo funzionamento è reversibile, quindi può funzionare anche come generatore, con opportune condizioni di lavoro. In passato, a causa di alcune limitazioni, l'uso della macchina asincrona per la produzione di energia elettrica non era frequente. Grazie allo sviluppo dell'elettronica di potenza è stato possibile risolvere alcuni aspetti problematici aumentandone l'efficienza. E questo ha portato ad un maggiore impiego rispetto al passato.

1.2 Elementi costruttivi

Per comprendere meglio com'è strutturata una macchina asincrona trifase (figura 1.1) di seguito viene fornita una breve descrizione delle principali parti che la compongono e nelle quali si generano i fenomeni elettromagnetici da cui scaturisce il funzionamento.

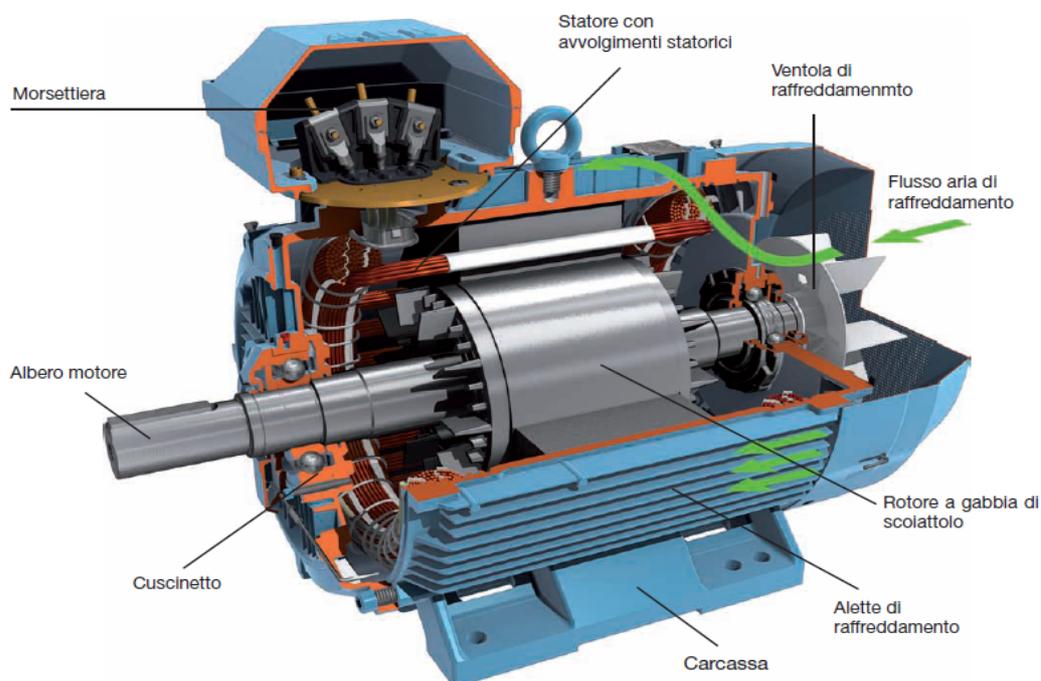


FIGURA 1.1 Principali componenti della macchina asincrona con rotore a gabbia di scoiattolo.

1.2.1 Statore

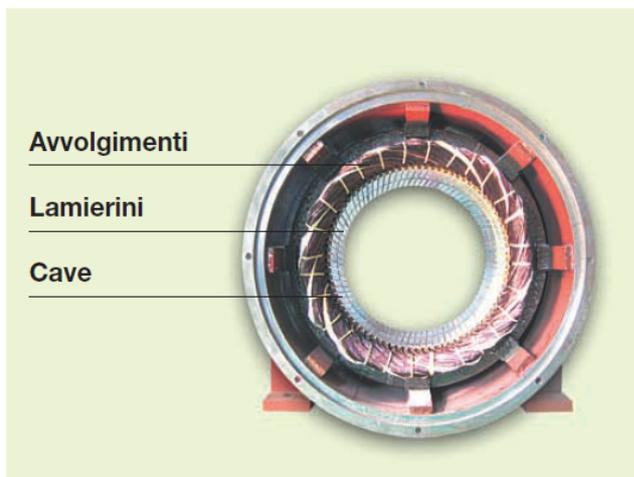


Figura 1.2 Statore di un motore asincrono trifase

Viene definito come l'insieme delle parti fisse della macchina asincrona ed ha funzione di sostegno almeno parziale. Di fatto però costituisce la parte del circuito magnetico che contiene gli avvolgimenti induttori alloggiati in cave generalmente di tipo semichiuso ricavate in corrispondenza della sua superficie interna.

Lo statore (figura 1.2), è costituito da lamierini in lega d'acciaio-silicio a forma di corona circolare, isolati tra di loro tramite un'apposita vernice. Nelle cave ricavate nella struttura dei lamierini sono inseriti i tre avvolgimenti primari (ognuno costituito da

più bobine opportunamente collegate tra di loro), ai quali applicando un sistema di tensioni trifase viene generato il campo magnetico rotante che interagendo con gli avvolgimenti di rotore crea la coppia necessaria per mettere in rotazione la macchina.

1.2.2 Rotore

Viene posizionato all'interno dello statore e costituisce il circuito di indotto della macchina; a seconda della tipologia con cui vengono realizzati gli avvolgimenti rotorici, esistono diversi tipi di macchina asincrona.

Gabbia di scoiattolo (figura 1.3): il rotore è costituito da un sistema di sbarre conduttrici coassiali all'asse di rotazione e pressofuse direttamente nelle cave ricavate lungo tutta la periferia esterna del nucleo ferromagnetico. Le sbarre sono chiuse in cortocircuito da due anelli conduttori posti agli estremi che costituiscono anche un fissaggio meccanico per le sbarre stesse. I vantaggi di questo tipo di rotore sono la semplicità di realizzazione, la robustezza e l'economicità; c'è da aggiungere che esso non ha un numero fisso di poli ma si adatta autonomamente al numero di poli di statore rendendolo utilizzabile per motori con numero di giri nominale diverso tra loro. Tra gli svantaggi si registrano una ridotta coppia di avviamento ed un'elevata corrente di spunto, a causa della bassa resistenza rotorica indispensabile per non



Figura 1.3 Rotore a gabbia di scoiattolo

compromettere il rendimento a regime. Per queste ragioni il rotore a gabbia di scoiattolo viene utilizzato per potenze basse (fino a qualche kW). Per potenze superiori si preferisce adottare particolari accorgimenti nel realizzare le cave, in modo da mantenere i pregi eliminando i difetti sopra elencati. Si realizzano delle gabbie speciali (a sbarre profonde o a doppia gabbia) in grado di sfruttare gli effetti che il flusso di dispersione alle cave ha sulla distribuzione della corrente nelle sbarre rotoriche; in questo modo si riesce ad ottenere una resistenza rotorica variabile con la velocità di rotazione.

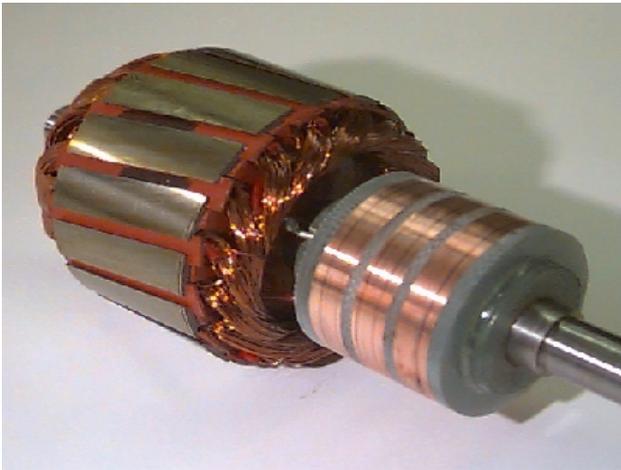


Figura 1.3 bis rotore avvolto

Rotore avvolto (figura 1.3 bis): in questo tipo di macchina vi è un normale avvolgimento, simile a quello di statore, di tipo trifase collegato a stella. I capi delle fasi vengono connessi a degli anelli conduttori, calettati sull'albero motore ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole collegate ad un reostato esterno che può essere utilizzato per la messa in moto. Andando ad aumentarne la resistenza rotorica si diminuisce la corrente di spunto e si incrementa la coppia di avviamento. Il reostato, completamente inserito all'atto di chiusura dell'interruttore sulla linea, viene

disinserito gradualmente all'aumentare della velocità di rotazione e completamente escluso in condizioni di normale funzionamento. E' possibile operare anche una regolazione grossolana della velocità: variando la resistenza di rotore, si modifica infatti anche la caratteristica meccanica della macchina. Con l'avvento dell'elettronica di potenza si preferisce ottenere la regolazione della velocità tramite inverter. Risulta importante precisare che il numero delle fasi del rotore può essere diverso da quello di statore, ma è indispensabile che il numero di poli sia eguale per i due avvolgimenti.

1.3 Principio di funzionamento

1.3.1 Ipotesi iniziali e definizioni delle grandezze in gioco

Passiamo ora ad esaminare i fenomeni che avvengono negli avvolgimenti che creano il campo magnetico rotante. Si consideri una macchina a rotore avvolto con avvolgimenti di statore e rotore collegati a stella senza neutro, aventi lo stesso numero di coppie polari; l'avvolgimento di statore o "primario" collegato alla rete avrà una terna simmetrica di tensioni ai suoi capi, con un certo valore efficace V_1 . Procediamo per passi nel capire cosa accade nell'avvolgimento di rotore e di statore utilizzando la convenzione dell'utilizzatore.

Indicate le grandezze di statore e di rotore rispettivamente con i pedici "1" e "2" siano:

p	numero di coppie polari;
V_1	valore efficace della tensione sinusoidale concatenata di alimentazione;
ω_0, f	pulsazione e frequenza della tensione di alimentazione;
ω_2, f_2	pulsazione e frequenza della tensione di rotore;
I_0	valore efficace della corrente in una fase di statore con circuiti di rotore aperti;
Φ_o	flusso utile per polo con circuiti di rotore aperti;
Φ	flusso utile per polo con circuiti di rotore corto circuitati;
E_1, E_2	valori efficaci delle fondamentali delle f.e.m. indotte in una fase;
I_1, I_2	valori efficaci delle fondamentali delle correnti in una fase a carico;
N_1, N_2	numero di conduttori di una fase;
K_1, K_2	coefficienti di avvolgimento complessivi riferiti alle fondamentali;
K_f	fattore di forma (per l'onda sinusoidale $K_f=1,11$);
R_1, R_2	resistenza di una fase;
L_1, L_2	induttanza di dispersione di una fase.

1.3.2 Funzionamento con circuiti rotorici aperti e rotore bloccato

Sotto l'aspetto elettrico un motore asincrono trifase con rotore fermo si comporta sostanzialmente come un trasformatore trifase, in cui lo statore assume il ruolo di avvolgimento primario ed il rotore quello secondario. Questo è valido nell'ipotesi in cui i relativi assi magnetici siano allineati. Data la completa simmetria della macchina, sia dell'alimentazione sia della struttura elettromagnetica, è possibile schematizzarla facendo riferimento ad una sola fase, dove si è supposto che tanto l'avvolgimento di statore che quello di rotore siano connessi a stella e con il circuito rotorico aperto (vedi figura 1.4).

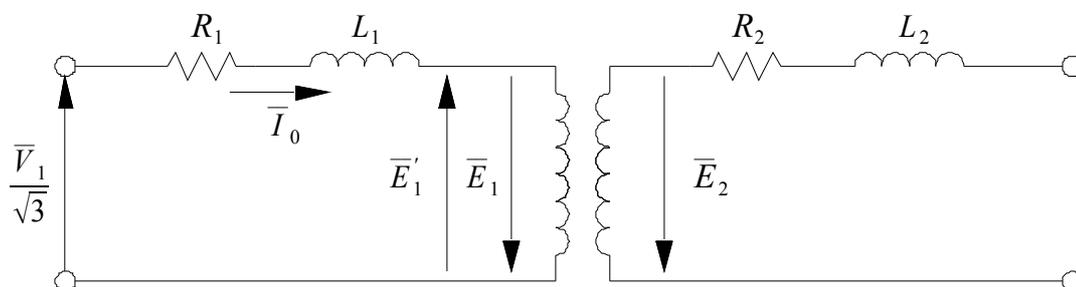


Figura 1.4 Circuito elettrico di una fase di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto nel funzionamento con circuiti rotorici aperti e rotore bloccato.

In questo caso la macchina assorbe dalla rete soltanto le correnti magnetizzanti \bar{I}_0 , necessarie per creare il campo magnetico rotante che si muove alla velocità di sincronismo pari a:

$$n_0 = \frac{60 f}{p} \quad (1.1)$$

mentre non circola alcuna corrente indotta nel rotore, essendo questo aperto. Il campo magnetico rotante, tramite il flusso per polo che si ha al traferro, induce negli avvolgimenti di statore e di rotore una f.e.m. indotta pari rispettivamente a:

$$E_1 = 2 K_f K_1 \Phi_0 f N_1 \quad (1.2)$$

$$E_2 = 2 K_f K_2 \Phi_0 f N_2 \quad (1.3)$$

A rotore fermo la frequenza di entrambe le f.e.m. indotte è pari a quella di alimentazione. Come per il trasformatore, al rapporto tra E_1 ed E_2 si dà il nome di rapporto di trasformazione del motore che risulta:

$$t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \quad (1.4)$$

Si può notare che le relazioni (1.2) e (1.3) sono formalmente analoghe a quelle di un trasformatore a vuoto con rapporto spire t . Come per il trasformatore e le macchine sincrone, oltre al flusso principale che si concatena con le spire degli avvolgimenti di statore e di rotore, è presente un flusso disperso, che si chiude in aria, per cui la tensione applicata in ogni fase di statore sarà pari a:

$$\frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = -\bar{E}_1 + (R_1 + j \omega_0 L_1) \bar{I}_0 = \bar{E}'_1 + (R_1 + j \omega_0 L_1) \bar{I}_0 \quad (1.5)$$

1.3.3 Funzionamento con circuiti rotorici in corto circuito e rotore in movimento

Prima di addentrarci nello studio, introduciamo una grandezza caratteristica di questo tipo di macchina: lo scorrimento; esso lega la velocità n del rotore con quella di sincronismo del campo magnetico rotante n_0 dato dalla (1.1). Si definisce scorrimento il numero adimensionale:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.6)$$

Il numeratore della (1.6) $n_0 - n$ esprime la velocità relativa tra campo magnetico rotante e rotore. Per convenzione, la velocità del rotore è positiva se questo ruota nello stesso verso del campo rotante.

Ora, poiché la velocità del rotore in via teorica può assumere qualsiasi valore, lo scorrimento potrà variare da più a meno infinito. In particolare, quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo, $n = n_0$, dalla relazione (1.6) risulta $s = 0$. Quando è fermo, cioè $n = 0$, si avrà $s = 1$.

Introdotta il concetto di scorrimento, passiamo ora ad esaminare i fenomeni connessi con le tensioni e le correnti di statore e rotore.

Supponiamo di alimentare l'avvolgimento di statore con un sistema trifase simmetrico di tensioni con valore efficace V_1 e frequenza f nominali e di avere l'avvolgimento rotorico chiuso in corto circuito senza alcun carico resistente applicato.

In queste condizioni l'albero del motore inizia a girare "trascinato" da una coppia prodotta dalle correnti indotte nei circuiti rotorici. Tale coppia tende, per la legge di Lenz, a far diminuire la velocità relativa tra campo e rotore; si osserva un'accelerazione fino al raggiungimento di una velocità molto prossima a quella di sincronismo ma non coincidente a causa delle perdite meccaniche. È questa la condizione di funzionamento a vuoto del motore, in cui esso assorbe dalla rete una terna di correnti, di valore efficace compreso tra il 20% ed il 40% della corrente nominale.

Nei conduttori di statore come si può vedere dalla (1.2) si inducono f.e.m. di valore efficace E_1 , mentre negli avvolgimenti di rotore, nell'ipotesi di trascurare le perdite per attrito e ventilazione, non si induce ancora alcuna f.e.m. in quanto non si ha movimento relativo, di conseguenza neppure flusso concatenato, tra campo magnetico e conduttori. In questo caso possiamo assumere che il motore ruoti alla velocità di sincronismo. Per ogni fase di statore è possibile scrivere nuovamente l'equazione (1.5).

Da notare che la corrente a vuoto I_0 risulta molto più grande rispetto quella di un trasformatore a vuoto principalmente per due motivi:

- la componente magnetizzante aumenta per effetto del notevole traferro necessario per motivi meccanici;
- la componente attiva è incrementata dalla presenza di perdite meccaniche per attrito e ventilazione;

Ipotizziamo ora di applicare all'albero motore una coppia resistente che lo rallenti: le correnti rotoriche I_2 assumono un valore tale da sviluppare una coppia motrice pari a quella resistente. Questo equilibrio si stabilisce ad una velocità inferiore a quella di sincronismo, in corrispondenza di uno scorrimento tanto elevato, quanto maggiore è la coppia resistente. Non solo: le f.e.m. rotoriche hanno ampiezza e frequenza in funzione della velocità del rotore. Le variazioni di flusso concatenato avvengono infatti con frequenza:

$$f_2 = \frac{n_0 - n}{60} p = \frac{n_0 - n}{n_0} \frac{p n_0}{60} = s f \quad (1.7)$$

La f.e.m. indotta in ogni fase dell'avvolgimento di rotore assume il valore efficace:

$$E_{2s} = 2 K_2 N_2 \Phi f_2 = 2 K_2 N_2 \Phi s f = s E_2 \quad (1.8)$$

Come si può vedere dalle (1.7) e (1.8), sia la f.e.m. indotta E_{2s} che la frequenza f_2 sono direttamente proporzionali allo scorrimento s .

Durante il normale funzionamento, con le fasi rotoriche chiuse in cortocircuito, le f.e.m. indotte faranno circolare correnti a frequenza f_2 , che, costituendo un sistema polifase simmetrico, creano un campo magnetico rotante alla velocità:

$$\frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f}{p} s = n_0 s = n_0 - n \quad (1.9)$$

Poiché l'albero motore si muove con velocità n , il campo magnetico creato dal rotore gira, rispetto allo statore, alla velocità:

$$n + n_0 - n = n_0 \quad (1.10)$$

vale a dire alla stessa velocità del campo magnetico di statore. I due campi magnetici si muovono in maniera sincrona. Sono dunque immobili l'uno rispetto all'altro e dalla loro risultante ha origine il flusso al traferro.

Ogni fase di statore e di rotore è caratterizzata dalla presenza di una componente ohmica R_1 ed R_2 e di una reattanza di dispersione X_1 ed X_2 . Quella di statore rimane costante al variare delle condizioni di funzionamento, essendo soggetta alla frequenza di rete; possiamo scriverla come:

$$X_1 = \omega_0 L_1 = \text{cost} \quad (1.11)$$

mentre la reattanza di dispersione di rotore risulta variabile in funzione della velocità (o scorrimento); dalla (1.7) possiamo esprimerla come:

$$X_{2s} = \omega_2 L_2 = \omega_0 s L_2 = X_2 s \quad (1.12)$$

dove X_2 è la reattanza di dispersione di ciascuna fase di rotore considerandolo fermo, quindi alla stessa frequenza a cui è soggetto lo statore.

Dalle relazioni (1.8) e (1.12) nel rotore chiuso in corto circuito circola la corrente:

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{2s}}{R_2 + j \omega_2 L_2} = \frac{\bar{E}_2 s}{R_2 + j s \omega_0 L_2} = \frac{\bar{E}_2}{\frac{R_2}{s} + j \omega_0 L_2} \quad (1.13)$$

L'equazione (1.13) risulta interessante perché consente di esprimere la corrente che circola negli avvolgimenti di rotore alla frequenza f_2 come una corrente dello stesso valore

efficace ma a frequenza f di statore. Supponendo che il circuito rotorico sia caricato su una resistenza equivalente funzione dello scorrimento andiamo a esprimerla in due componenti:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s} \quad (1.14)$$

dove $R_2 \frac{1-s}{s}$ rappresenta il carico meccanico del motore. Pertanto, nei confronti della rete, il carico si comporta come un utilizzatore puramente resistivo e variabile con lo scorrimento.

Considerando la (1.14) possiamo riscrivere la (1.13) come:

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{\frac{R_2}{s} + j\omega_0 L_2} = \frac{\bar{E}_2}{R_2 + R_2 \frac{1-s}{s} + j\omega_0 L_2} \quad (1.13 \text{ bis})$$

a cui corrisponde il circuito equivalente (figura 1.5) della macchina asincrona alla frequenza di rete:

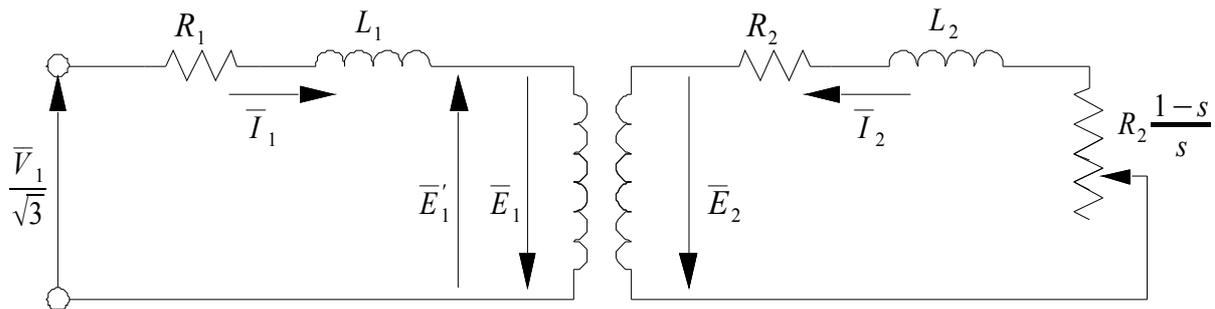


Figura 1.5 Circuito elettrico di una fase di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto nel funzionamento con circuiti rotorici corto circuitati e con rotore in moto a scorrimento s qualsiasi.

1.4 Circuito equivalente di una fase

1.4.1 Trasposizione dei parametri dal lato rotore allo statore

Come si può vedere dalle relazioni scritte precedentemente e dal circuito di figura (1.5), è marcata l'analogia con il trasformatore. Considerando la (1.4) definiamo:

$$R_{12} = R_2 t^2 \quad \text{resistenza di rotore riportata al lato statore;} \quad (1.15)$$

$$L_{12} = L_2 t^2 \quad \text{induttanza di dispersione } L_2 \text{ rotorica riportata al lato statore;} \quad (1.16)$$

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{I}_2}{t} \quad \text{corrente di rotore riportata al lato statore;} \quad (1.17)$$

R_0 resistenza corrispondente alle perdite nel ferro della macchina (a causa del variare della frequenza di rotore risulta variabile con la velocità);

L_0 induttanza di magnetizzazione.

Possiamo quindi disegnare il circuito equivalente di una fase (figura 1.6). Risulta ovviamente:

$$\bar{E}'_1 = \dot{Z}_0 (\bar{I}_1 + \bar{I}_{12}) \quad \text{con} \quad \dot{Z}_0 = R_0 // j\omega_0 L_0 \quad (1.18)$$

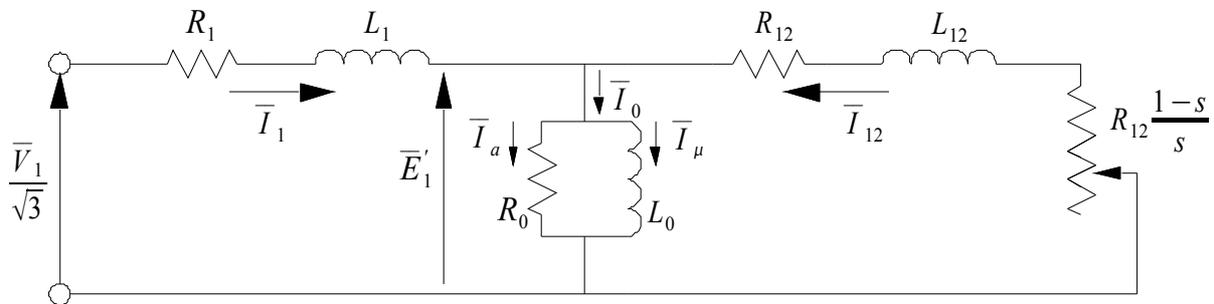


Figura 1.6 Circuito equivalente di una fase di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto.

1.4.2 Circuito equivalente semplificato

Considerando che:

- R_1 e R_{12} sono dello stesso ordine di grandezza;
- $R_1, R_{12} \ll \omega_0 L_1, \omega_0 L_{12}$;
- le perdite meccaniche P_{mp} dipendono direttamente dalla velocità;
- le perdite nel ferro P_{fp} diminuiscono con la velocità (quelle di statore sono costanti mentre quelle di rotore dipendono in maniera inversa dalla velocità).

Possiamo ipotizzare con sufficiente approssimazione che al variare della velocità della macchina la somma delle perdite nel ferro e di quelle meccaniche sia praticamente costante:

$$P_{fp} + P_{mp} = \text{cost} \quad (1.19)$$

A tale somma viene dato il nome di perdite a vuoto P_0 . In particolare si assume che le perdite a vuoto siano costanti e pari a:

$$P_0 = P_{fp0} + P_{mp0} = 3R_0 I_a^2 \quad (1.20)$$

con P_{fp0} e P_{mp0} perdite nel ferro e meccaniche quando la macchina funziona senza coppia esterna applicata all'albero.

Grazie a queste approssimazioni si può ulteriormente ridurre il circuito equivalente (figura 1.6) nel circuito equivalente semplificato (figura 1.7). Sfruttando la sua semplicità ma tenendo sempre in considerazione le approssimazioni introdotte, esso verrà utilizzato nei paragrafi successivi per la determinazione della coppia e per eseguire i bilanci energetici nei vari punti di funzionamento.

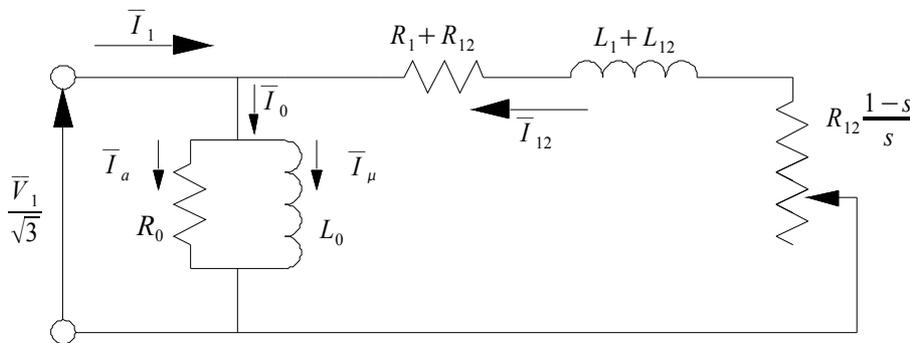


Figura 1.7 Circuito equivalente semplificato di una fase di una macchina asincrona trifase a rotore avvolto.

1.5 Potenze, coppia e caratteristica meccanica

1.5.1 Definizione delle grandezze

Facendo riferimento al circuito elettrico semplificato (figura 1.7) e supponendo di trascurare le perdite a vuoto P_0 sono:

P_e	potenza elettrica attiva ai morsetti di statore;
P_t	potenza trasmessa elettromagneticamente al rotore;
P_m	potenza meccanica all'albero;
$P_{ep} = P_{ep1} + P_{ep2}$	potenza persa per effetto joule nello statore e nel rotore;

$$\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} \quad \text{velocità angolare del campo rotante di statore;} \quad (1.21)$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \Omega_0(1-s) \quad \text{velocità angolare dell'albero motore;} \quad (1.22)$$

$$C = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_m}{\Omega} \quad \text{coppia elettromagnetica.} \quad (1.23)$$

Il modulo della corrente di rotore è dato da :

$$I_{12} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + [\omega_0(L_1 + L_{12})]^2}} = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2}} \quad (1.24)$$

$$\text{con} \quad \omega_0(L_1 + L_{12}) = X$$

Tenendo conto del significato dei vari parametri concentrati presenti nel circuito equivalente semplificato (figura 1.7), dalla funzione (1.24) è possibile esprimere in funzione dello scorrimento:

- la potenza elettrica P_e ;
- la potenza elettrica persa P_{ep} ;
- la potenza trasmessa elettromagneticamente P_t ;

$$\begin{aligned} P_e &= 3 \left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right) I_{12}^2 = 3 \left(R_1 + R_{12} + R_{12} \frac{1-s}{s}\right) I_{12}^2 = \\ &= (R_1 + R_{12}) \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} + R_{12} \frac{1-s}{s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$P_{ep} = P_{ep1} + P_{ep2} = 3 R_1 I_{12}^2 + 3 R_{12} I_{12}^2 = (R_1 + R_{12}) \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} \quad (1.26)$$

$$P_t = 3 \frac{R_{12}}{s} I_{12}^2 = \frac{R_{12}}{s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} = P_e - P_{ep1} \quad (1.27)$$

Ricordando dalla (1.14) il significato di carico meccanico equivalente, possiamo definire la potenza meccanica P_m come:

$$P_m = 3 R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2 = R_{12} \frac{1-s}{s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} = P_t (1-s) = P_t - P_{ep2} \quad (1.28)$$

Dalle equazioni (1.22), (1.23) e (1.28) possiamo esprimere la coppia elettromagnetica come:

$$C = \frac{P_m}{\Omega} = 3 R_{12} \frac{1-s}{\Omega s} I_{12}^2 = 3 \frac{R_{12}}{\Omega_0 s} I_{12}^2 = \frac{P_t}{\Omega_0} \quad (1.29)$$

Dalla (1.29) risulta dunque che la coppia è proporzionale alla potenza trasmessa elettromagneticamente P_t . Ponendo:

$$Z^2 = R_1^2 + X^2 \quad (1.30)$$

l'espressione della coppia elettromagnetica (1.29) può essere quindi riscritta così:

$$C = 3 \frac{R_{12}}{\Omega_0 s} I_{12}^2 = \frac{R_{12}}{\Omega_0 s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} = \frac{V_1^2}{\Omega_0 Z \left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2 \frac{R_1}{Z}\right)} \quad (1.31)$$

1.5.2 Caratteristica meccanica

Partendo dall'equazione (1.31) analizziamo i valori assunti dalla coppia elettromagnetica in funzione dello scorrimento, in modo da tracciare la caratteristica meccanica. Andiamo di seguito a riassumere i risultati ottenuti.

- $\infty < s < 1$ La coppia parte da zero e cresce al diminuire dello scorrimento; la macchina assorbe sia potenza meccanica sia potenza elettrica che vanno entrambe a compensare le perdite: la macchina funziona da freno.
- $s = 1$ La coppia è positiva e viene chiamata coppia di avviamento (C_a) in quanto il rotore in questo caso risulta fermo.
- $1 < s < 0$ La coppia è positiva; partendo da C_a raggiunge il suo valore massimo C_M per $s_M = R_{12}/Z$ e poi decresce molto rapidamente fino ad annullarsi per $s = 0$. In questo intervallo la macchina funziona come motore, assorbendo sia la potenza per compensare le perdite joule sia la potenza che verrà convertita in meccanica.

- $s=0$ La coppia è nulla, la macchina non assorbe né eroga potenza.
- $0 < s < s_r$ La coppia è negativa; partendo da zero diminuisce rapidamente fino a raggiungere il suo valore minimo C'_M per $s'_M = -R_{12}/R_1$ per poi aumentare restando comunque minore di zero. La macchina funziona da generatore, la potenza meccanica assorbita viene convertita in potenza elettrica che in parte compensa le perdite e in parte viene erogata alla rete.
- $s_r < s < -\infty$ La coppia è negativa; la macchina assorbe sia potenza elettrica che potenza meccanica che vanno a compensare le perdite; la macchina funziona da freno.

In base ai risultati ottenuti possiamo tracciare (figura 1.8) l'andamento qualitativo della coppia elettromagnetica C in funzione della velocità n o dello scorrimento s .

Le aree indicate in tratteggio corrispondono a campi di funzionamento stabile come motore e come generatore; ad esempio quando la macchina opera da generatore, ad ogni aumento della coppia motrice esterna, cresce la velocità di rotazione. Così la macchina si porta a funzionare stabilmente ad un nuovo scorrimento cui corrisponde una coppia resistente maggiore, di valore pari a quello della coppia motrice fornita.

Come si può osservare dalla figura (1.8), le zone di funzionamento stabile sia da generatore che da motore sono caratterizzate da bassi valori di scorrimento e quindi da velocità molto prossime a quelle di sincronismo, che rendono la macchina asincrona una macchina praticamente a velocità costante, a dispetto del nome.

Esistono tuttavia diversi modi di variare la velocità e la coppia per ottenere una macchina più versatile, tecniche che sono state sviluppate soprattutto grazie all'avvento dell'elettronica di potenza.

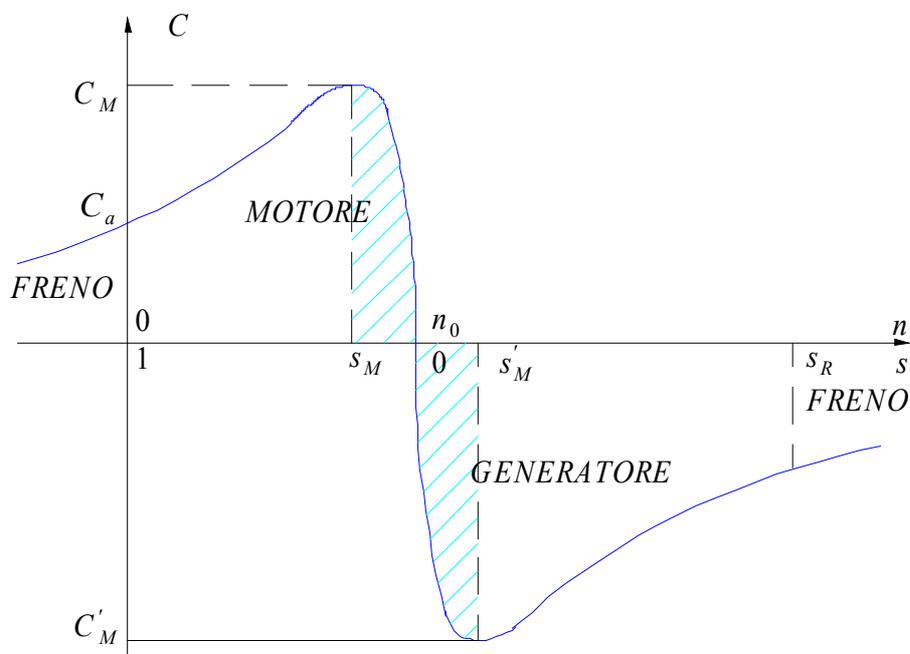


Figura 1.8 Caratteristica meccanica della macchina asincrona.

1.6 Generatore asincrono

1.6.1 Diagramma fasoriale di rotore

Andiamo ad approfondire il funzionamento della macchina asincrona da generatore. Come visto nei paragrafi precedenti, le condizioni di funzionamento in cui la macchina si comporta da generatore si verificano quando la velocità del rotore supera quella del campo magnetico rotante $\Omega > \Omega_0$, di conseguenza $s < 0$ e dunque in condizioni di velocità supersincrona.

Affinché la macchina generi potenza attiva ai morsetti di statore e quindi non funzioni da freno, oltre che $P_m < 0$, bisogna pure che $|P_m|$ sia maggiore delle perdite interne della macchina $P_{ep} + P_0$ associate a R_1, R_{12}, R_0 .

Per produrre il campo rotante inoltre, alla macchina funzionante da generatore deve essere fornita potenza reattiva induttiva, cioè magnetizzante, che l'induttanza L_0 deve necessariamente assorbire, altrimenti il funzionamento non può aver luogo in quanto la macchina non viene magnetizzata.

Partendo dall'espressione della corrente rotorica (1.13):

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{\frac{R_2}{s} + j\omega_0 L_2} = \frac{\bar{E}_2 s}{R_2 + j s \omega_0 L_2} \quad (1.13)$$

si può vedere che la f.e.m. indotta nel rotore $E_{2s} = s E_2$ diventa negativa per valori di $s < 0$, come pure risulta negativo il rapporto tra $s \omega_0 L_2$ ed R_2 , per cui la tangente dell'angolo φ_2 compreso tra \bar{I}_2 e \bar{E}_{2s} cambia segno (figura 1.9), e la corrente \bar{I}_2 è in anticipo rispetto a \bar{E}_{2s} :

$$\tan \varphi_2 = \frac{s X_2}{R_2} \quad (1.32)$$

Il generatore asincrono richiede quindi che la rete si comporti come un carico ohmico-capacitivo. In sostanza, passando da motore a generatore, si inverte solamente la componente attiva della corrente di rotore e di statore, mentre, la componente reattiva non cambia.

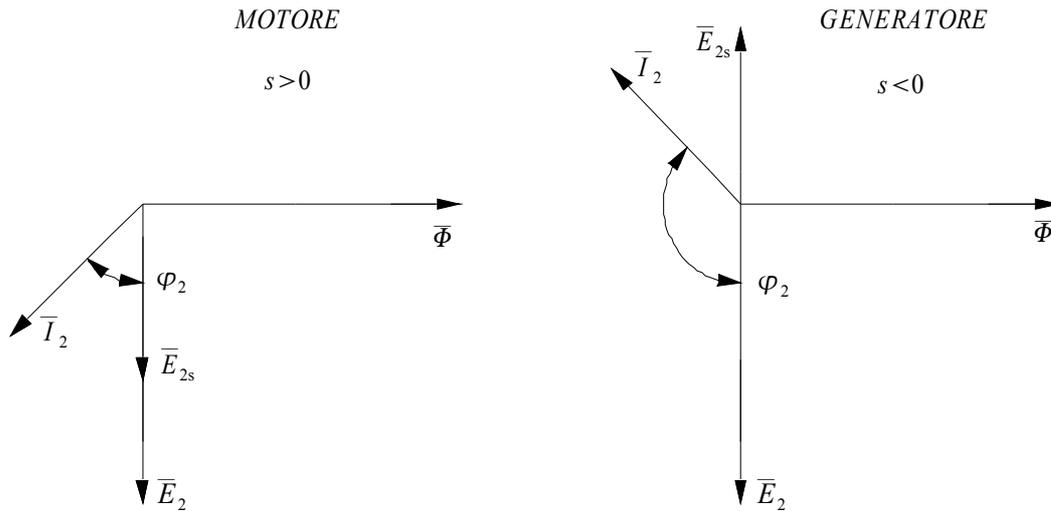


Figura 1.9 Diagramma fasoriale che mostra le differenze tra il funzionamento da motore rispetto a generatore in una macchina asincrona.

1.6.2 Considerazioni sull'uso della macchina asincrona come generatore

Di seguito andiamo a trattare alcuni esempi pratici di impiego della macchina asincrona come generatore, analizzando qualitativamente gli elementi positivi e negativi che derivano dal suo utilizzo. Per completezza introduciamo anche gli aspetti che riguardano l'interfacciamento con la linea.

1.6.3 Generatore a velocità fissa

Esempi pratici dell'utilizzo di generatori asincroni a velocità fissa sono le turbine eoliche di concezione danese sviluppate tra gli anni ottanta e novanta. Esse si basano sul semplice impiego della macchina asincrona con rotore a gabbia di scoiattolo che ruota a velocità supersincrona e collegata direttamente in parallelo alla rete (figura 1.10).

Come si può notare dalla caratteristica meccanica (figura 1.8), la macchina funziona da generatore a velocità praticamente fissa, in quanto la zona di funzionamento stabile è limitata a bassi valori di scorrimento (1-2%) che garantiscono un buon rendimento; scorrimenti più elevati fino al 10% si possono accettare solo transitoriamente, per ridurre le sollecitazioni sugli organi meccanici, come nel caso di improvvise raffiche di vento.

La velocità del rotore dipende dal moltiplicatore di giri e dal numero di poli della macchina che verranno opportunamente scelti in base alle caratteristiche del vento nel sito di installazione.

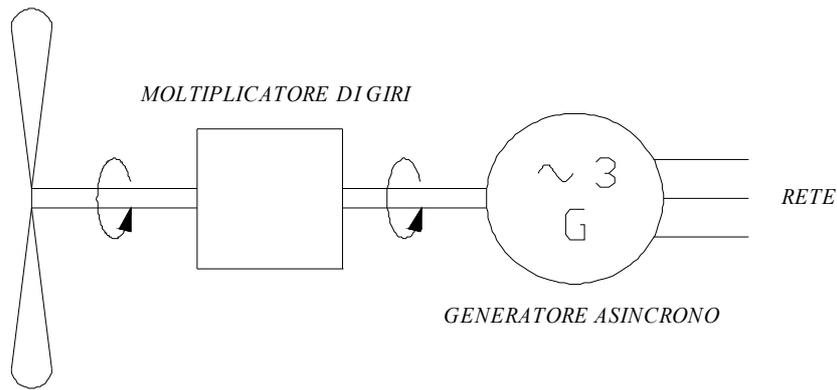


Figura 1.10 Turbina eolica equipaggiata con generatore asincrono direttamente collegato alla rete.

I vantaggi offerti da questo tipo di generatore sono:

- basso costo di investimento ed elevato rendimento (alla velocità nominale);
- robustezza e affidabilità;
- possibilità di essere messo in rotazione come motore e successivamente passare a generatore senza bisogno di particolari accorgimenti per il collegamento in parallelo alla rete;
- buona risposta ai guasti: in caso di abbassamento improvviso della tensione sulla rete, il generatore non contribuisce attivamente alla corrente di guasto, in quanto il calo di tensione comporta una smagnetizzazione della macchina.

Tra gli svantaggi troviamo:

- limitato intervallo di velocità del vento che è in grado di sfruttare: rappresenta sicuramente la restrizione maggiore;
- assorbimento dalla rete della potenza reattiva induttiva necessaria alla magnetizzazione; ne consegue che a meno di particolari accorgimenti, come l'inserzione di opportuni banchi di condensatori il generatore non può lavorare in isola;
- impossibilità di effettuare servizi di rete come per esempio il controllo della potenza attiva (regolazione primaria di frequenza) e reattiva (regolazione primaria di tensione) erogata, oppure l'inserimento graduale della potenza immessa;

- elevata sensibilità agli abbassamenti di tensione: se la tensione ai terminali di statore si abbassa rispetto a quella nominale (ad esempio sotto al 70% per più di 100ms) bisogna disconnettere il generatore per proteggerlo da eventuali aumenti pericolosi di velocità causati dal crollo della coppia resistente.

Per espandere l'intervallo di velocità utile è possibile equipaggiare le turbine di grossa potenza con due generatori asincroni con diverso numero di poli oppure con un'unica macchina con numero di poli variabili che possono essere commutati in modo da sfruttare sia le situazioni di bassa che di alta velocità del vento. Questa soluzione presenta comunque parecchie limitazioni.

1.6.4 Generatore a velocità totalmente variabile

Una soluzione per rendere più versatile il generatore asincrono, eliminando il limite della velocità, fissa è rappresentata in figura (1.11).

La macchina non viene interfacciata direttamente con la rete, ma viene interposto un inverter che ha il compito di convertire alla frequenza imposta dalla rete tensione e corrente in uscita dallo statore, che non risultano a frequenza fissa. In questo modo è possibile uno sfruttamento della risorsa eolica più intensivo sia per velocità maggiori che minori di quella “nominale”.

Gli svantaggi introdotti da questo tipo di interfacciamento con la rete risultano essere:

- elevato costo dell'inverter che deve avere una potenza nominale corrispondente a quella del generatore;
- necessità di prevedere appositi filtri in uscita per limitare le armoniche immesse in linea con relativi costi;
- abbassamento del rendimento complessivo del sistema, in quanto il rendimento dell'inverter gioca un ruolo importante;

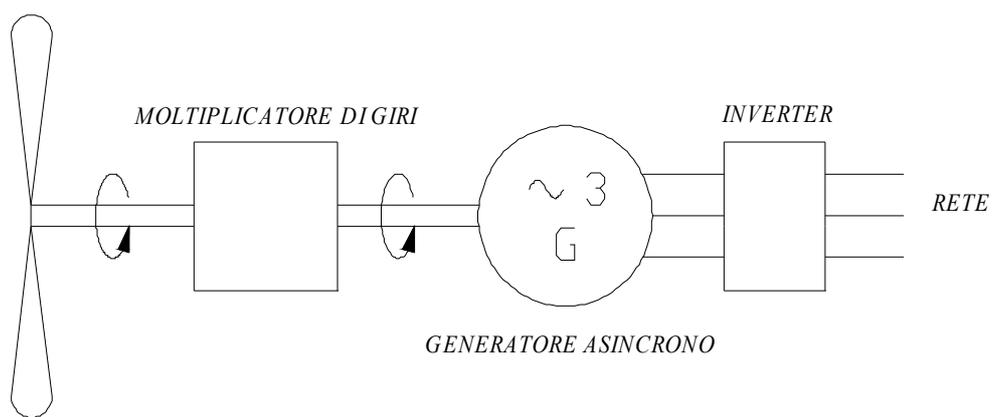


Figura 1.11 Turbina eolica equipaggiata con generatore asincrono interfacciato alla rete tramite inverter.

2

GENERATORE ASINCRONO

A DOPPIA

ALIMENTAZIONE

2.1 Aspetti generali

2.1.1 Introduzione

Il generatore a doppia alimentazione (doubly fed inductor generator – DFIG) è un'evoluzione del generatore asincrono; il termine “doubly fed” riflette il fatto che la macchina è doppiamente alimentata: dallo statore attraverso la rete e dal rotore tramite un apposito convertitore statico. In figura (2.1) viene rappresentato un tipico sistema di turbina eolica equipaggiata con un DFIG.

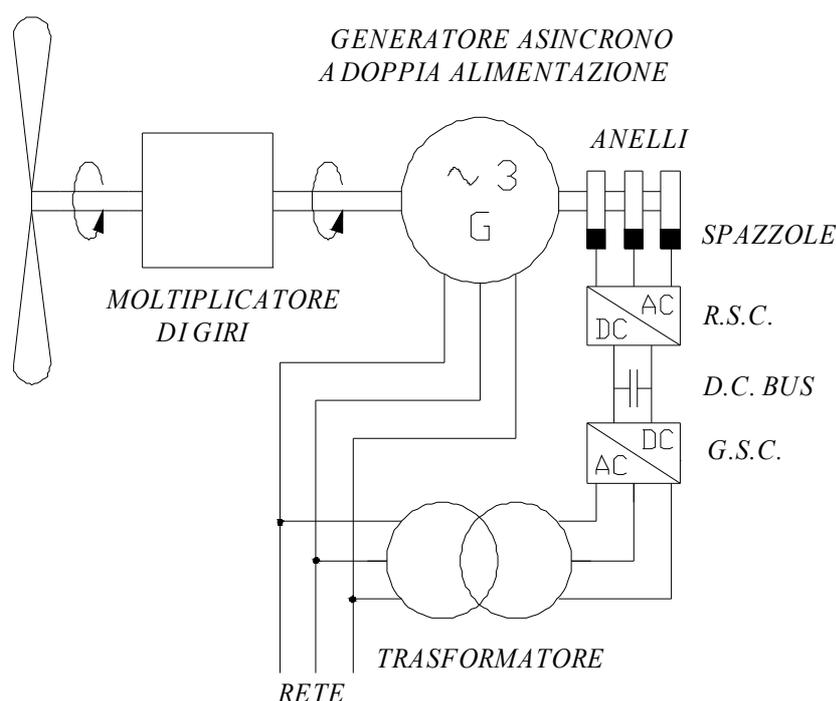


Figura 2.1 Turbina eolica equipaggiata con generatore asincrono a doppia alimentazione.

2.1.2 Differenze costruttive rispetto alla macchina asincrona

Lo statore non presenta differenze, mentre il rotore deve essere necessariamente di tipo avvolto e non a gabbia; a parte questa imposizione esso non è stato comunque modificato.

Come si può notare in figura (2.1), le principali caratteristiche che distinguono il DFIG rispetto alla macchina asincrona classica sono:

- i circuiti rotorici non vengono cortocircuitati, ma anch'essi alimentati;
- la presenza del convertitore statico offre la possibilità di interfacciare i circuiti rotorici con tensione e frequenza variabili.

2.1.2 Vantaggi della tecnologia DFIG

Le limitazioni del generatore asincrono a velocità fissa esposte nel capitolo precedente sono:

- limitato intervallo di velocità utile;
- assorbimento dalla rete di potenza reattiva induttiva;
- instabilità nel caso di funzionamento in isola soprattutto con carichi variabili;
- impossibilità di effettuare servizi di rete come il controllo della frequenza e della tensione oppure l'inserimento graduale della potenza immessa.

Nel seguito si verificherà che il DFIG ha la possibilità di espandere il campo di velocità attorno a quello nominale grazie agli scambi energetici che avvengono tra il rotore e la rete di alimentazione attraverso il convertitore. Di conseguenza si dimostrerà che può funzionare come generatore anche con scorrimento positivo (configurazione subsincrona). Questa condizione è indispensabile per riuscire a sfruttare ottimamente fonti rinnovabili, come per esempio il piccolo idroelettrico oppure l'eolico, che per loro natura non garantiscono un flusso energetico costante.

Un'altra miglioria introdotta grazie al convertitore statico, fa sì che tutto avvenga come se sul rotore fosse presente un generatore di tensione, analogamente a quanto succede nel motore a corrente continua. La tensione di rotore può allora essere utilizzata come variabile di controllo nel problema di regolazione della potenza attiva e reattiva generata dalla macchina, offrendo in questo modo i servizi di rete che col generatore classico non potevano essere forniti.

In questo caso non risulta critica la presenza dell'inverter che nell'ipotesi di generatore a velocità totalmente variabile introduceva un aumento considerevole del costo e un decremento della qualità del servizio a causa delle armoniche immesse in rete. Qui la potenza nominale del convertitore statico non risulta infatti essere quella nominale del generatore, bensì quella che fluisce attraverso il rotore; tale potenza è molto inferiore (valori tipici si attestano attorno al 30% di quella nominale), con costi di investimento minori, minore immissione di armoniche in rete e minor impatto sul rendimento del sistema.

In definitiva i vantaggi introdotti con l'uso del DFIG sono:

- ampio campo di variazione della velocità (valori tipici si trovano attorno al $\pm 30\%$ rispetto alla nominale);
- costo moderato dell'inverter e bassi valori di armoniche immesse in rete;
- possibilità di erogare sia potenza attiva sia reattiva in base alla richiesta dei carichi;
- possibilità di funzionamento in isola.

2.2 Principio di funzionamento

2.2.1 Introduzione al funzionamento del DFIG

Come affermato in precedenza, dal punto di vista costruttivo il DFIG è una macchina asincrona con rotore avvolto, in cui è possibile iniettare al rotore tensioni di opportuna ampiezza e frequenza fornite dall'inverter. Vediamo come si può espandere il campo di funzionamento della macchina senza dover rinunciare ai suoi pregi.

Per chiarezza riproponiamo il significato di alcuni simboli che verranno riutilizzati in seguito:

f, ω_0, n_0	frequenza, velocità angolare e numero di giri del campo di statore (rete);
f_2, ω_2	frequenza e velocità angolare del campo di rotore;
ω, n	velocità angolare e numero di giri meccanici di rotore;
P_s, Q_s	potenza attiva e reattiva che fluisce attraverso lo statore;
P_r, Q_r	potenza attiva e reattiva che fluisce attraverso il rotore;
P_e	potenza elettrica totale che interessa la macchina;
P_n	potenza nominale;
P_m	potenza meccanica;
P_{conv}	potenza di dimensionamento del convertitore statico;
RSC	convertitore che interfaccia il rotore con il dc bus (rotor side converter);
GSC	convertitore che interfaccia il dc bus con la rete (grid side converter).

Il concetto principale su cui basa il funzionamento del DFIG è che per ottenere una frequenza f costante in uscita dallo statore, la frequenza f_2 di rotore deve essere variata dal convertitore in modo da “adattarsi” alla velocità effettiva di rotazione ω , così da non fare uscire la macchina dalla sua zona di funzionamento stabile da generatore. L'imposizione da parte del RSC di una determinata frequenza agli avvolgimenti di rotore determina dei flussi di potenza che in base allo scorrimento possono essere sia entranti (positivi) che uscenti (negativi); per meglio comprendere le dinamiche di funzionamento sono tracciati in figura (2.2) e (2.3) i flussi di potenza che interessano la macchina funzionante da generatore nei due casi che riservano maggiore interesse, vale a dire il funzionamento subsincrono ($s > 0$) e il funzionamento supersincrono ($s < 0$).

Nel caso di funzionamento subsincrono (figura 2.2), il rotore gira ad una velocità minore rispetto a quella del campo rotante. Normalmente, per una macchina asincrona, questo punto di funzionamento corrisponde al funzionamento come motore: per passare a generatore, il DFIG, oltre ad assorbire la potenza meccanica P_m deve assorbire tramite il rotore anche la potenza elettrica P_r necessaria a compensare la differenza, in termini di frequenza, tra la velocità

elettrica di statore e la velocità meccanica di rotore: in questo modo è possibile ottenere un flusso di potenza uscente dallo statore.

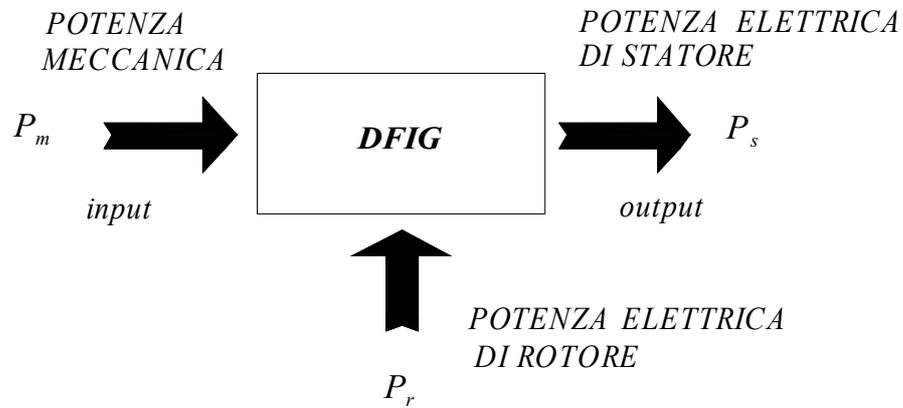


Figura 2.2 Flussi di potenza nel DFIG nel caso di funzionamento subsincrono ($s > 0$).

Nel caso di funzionamento supersincrono (figura 2.3) il rotore si muove ad una velocità maggiore rispetto a quella di sincronismo. Per una macchina asincrona questo corrisponderebbe già al funzionamento come generatore. C'è tuttavia da notare che oltre al flusso di potenza immesso dallo statore verso la rete, ne esiste anche un altro proveniente dal rotore, con un aumento dell'effettiva potenza immessa in rete.

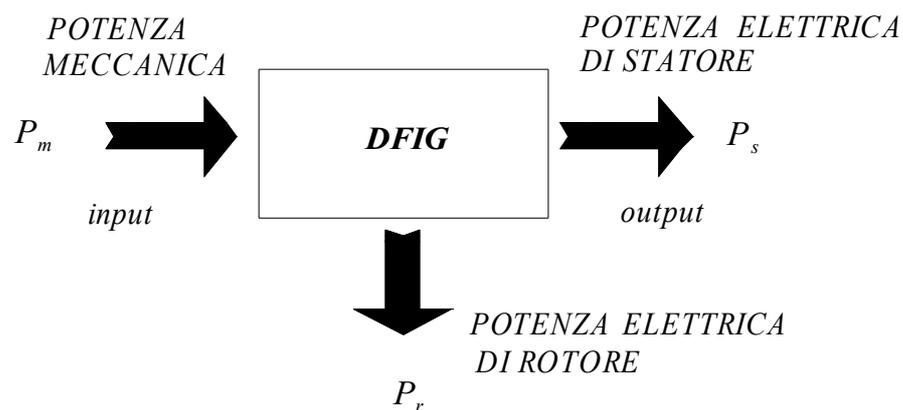


Figura 2.3 Flussi di potenza nel DFIG nel caso di funzionamento supersincrono ($s < 0$).

2.2.2 Equazioni di regime permanente

Supponiamo che il rotore ruoti alla velocità ω e definiamo lo scorrimento come:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (2.1)$$

Le f.e.m. indotte \bar{E}_1 alla frequenza f e \bar{E}_{2s} alla frequenza $f_2 = s f$ hanno valore efficace rispettivamente:

$$E_1 = 2 K_f K_1 \Phi f N_1 \quad (2.2)$$

$$E_{2s} = 2 K_f K_2 \Phi f_2 N_2 = 2 K_f K_2 \Phi s f N_2 = s E_2 \quad (2.3)$$

Di conseguenza possiamo definire il rapporto tra E_{2s} e E_1 come:

$$\frac{E_{2s}}{E_1} = \frac{2 K_f K_2 \Phi s f N_2}{2 K_f K_1 \Phi f N_1} = \frac{s}{t} \quad (2.4)$$

$$t = \frac{N_1 K_1}{N_2 K_2} \quad (2.5)$$

I circuiti di statore e rotore sono caratterizzati da una resistenza R_1 e R_2 e da un'induttanza di dispersione L_1 e L_2 . Si ha pertanto:

$$(R_1 + j \omega_0 L_1) \bar{I}_1 - \frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = \bar{E}_1 \quad (2.6)$$

$$(R_2 + j s \omega_0 L_2) \bar{I}_2 - \frac{\bar{V}_2}{\sqrt{3}} = \bar{E}_{2s} \quad (2.7)$$

Come fatto per la macchina asincrona, è opportuno riportare l'equazione (2.7) lato statore. Posto:

$$R_{12} = R_2 t^2 \quad L_{12} = L_2 t^2 \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_{12} = \bar{V}_2 t \quad \bar{I}_{12} = \frac{\bar{I}_2}{t}$$

si ha:

$$(R_{12} + j s \omega_0 L_{12}) \bar{I}_{12} - \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} = \bar{E}_{2s} t \quad (2.9)$$

Essendo per la relazione (2.4):

$$E_{2s} = s \frac{E_1}{t} \quad (2.10)$$

si ottiene:

$$(R_{12} + j s \omega_0 L_{12}) \bar{I}_{12} - \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} = s \bar{E}_1 \quad (2.11)$$

e quindi, dividendo per lo scorrimento:

$$\left(\frac{R_{12}}{s} + j \omega_0 L_{12}\right) \bar{I}_{12} - \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3} s} = \bar{E}_1 \quad (2.12)$$

Nella (2.12) sia la tensione V_{12} che la corrente I_{12} sono espresse alla frequenza di statore, e tutto avviene come se il rotore fosse fermo.

Possiamo inoltre affermare che, a differenza del generatore asincrono, la corrente di magnetizzazione I_μ non è più assorbita esclusivamente dal lato statore ma anche dal lato rotore grazie al RSC. Risulta ovviamente:

$$\bar{E}_1 = -j \omega_0 L_0 (\bar{I}_1 + \bar{I}_{12}) = -j \omega_0 L_0 \bar{I}_\mu \quad (2.13)$$

con L_0 induttanza di magnetizzazione e avendo trascurato la resistenza R_0 associata alle perdite a vuoto.

2.2.3 Circuito equivalente

Considerando le equazioni (2.6), (2.12) e (2.13) è possibile tracciare il circuito equivalente di figura (2.4), che risulta molto simile a quello della macchina asincrona, con l'unica differenza che ora il rotore è aperto e ai suoi capi è presente una data tensione.

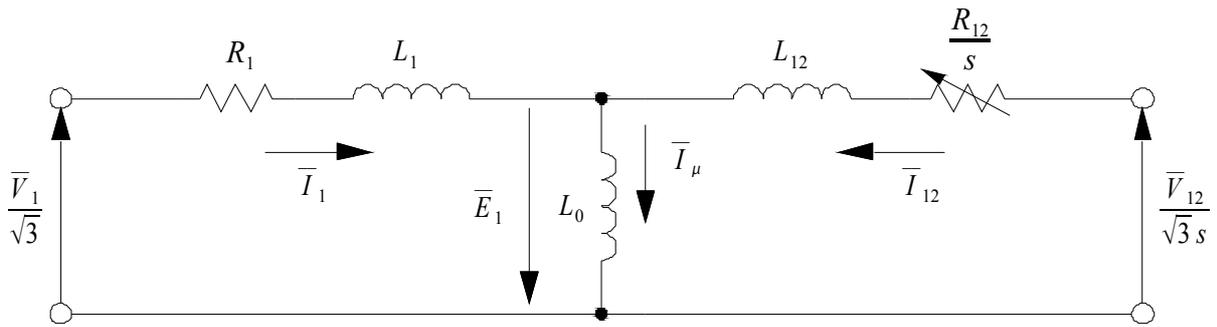


Figura 2.4 Circuito elettrico equivalente del generatore asincrono a doppia alimentazione

E' possibile scomporre la tensione ai morsetti di rotore in due componenti, una fissa e una variabile in funzione dello scorrimento:

$$\frac{\bar{V}_{12}}{s\sqrt{3}} = \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} \frac{1-s}{s} + \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

Analogamente per quanto fatto per la macchina asincrona, (1.14) la resistenza variabile di rotore viene scomposta in due componenti, una che rappresenta le perdite nel rame e l'altra la potenza meccanica.

Il circuito di figura (2.4) diventa allora quello di figura (2.5), utilizzato come riferimento per proseguire nella trattazione:

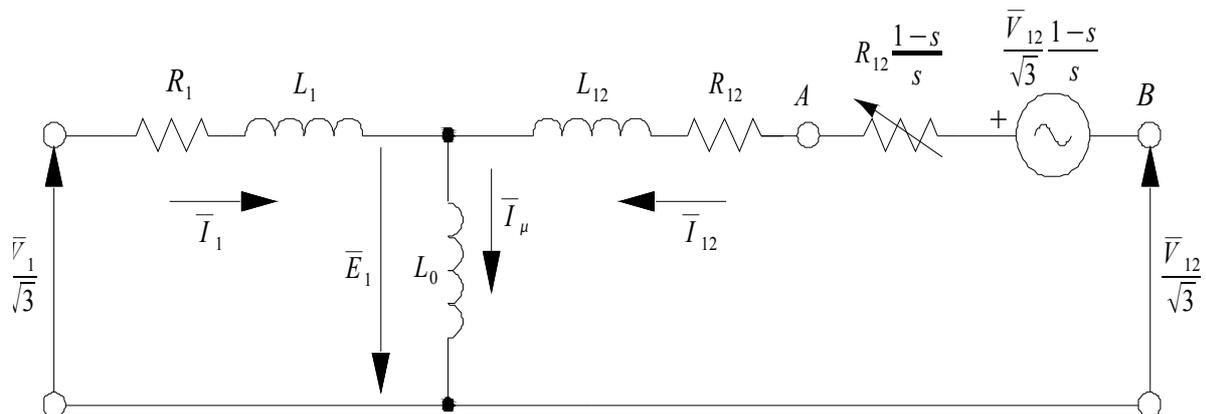


Figura 2.5 Circuito equivalente del generatore asincrono a doppia alimentazione

2.2.4 Potenza di statore, di rotore, meccanica e massima

Con riferimento al circuito equivalente di figura (2.5), consideriamo una condizione generica di funzionamento caratterizzata da un valore s dello scorrimento.

La potenza meccanica corrisponde alla potenza elettrica attiva associata al bipolo A-B. Si ha pertanto:

$$P_m = \left[3 \frac{R_{12} I_{12}^2}{s} - \sqrt{3} \frac{I_{12} V_{12} \cos \varphi_{12}}{s} \right] (1-s) \quad (2.15)$$

con $\cos \varphi_{12}$ fattore di potenza relativo alla corrente I_{12} .

Il verso della potenza meccanica non è più unicamente definito, come nella macchina asincrona, dal segno dello scorrimento (vedi 1.28), ma è legato a due termini. Si riesce quindi a capire come il DFIG riesca a generare potenza elettrica anche in condizioni di subsincronismo.

Se per esempio ipotizziamo di lavorare con scorrimento positivo, è possibile ottenere potenza meccanica assorbita e quindi negativa facendo in modo che:

$$\sqrt{3} I_{12} V_{12} \cos \varphi_{12} > 3 R_{12} I_{12}^2 \quad (2.16)$$

con V_{12} tensione con cui RSC alimenta i circuiti di rotore: è quindi immediato il suo controllo in modo da verificare la relazione (2.16). Anche nel funzionamento subsincrono la macchina può pertanto assorbire potenza meccanica.

Dal momento che la macchina asincrona a doppia alimentazione è reversibile, sarà possibile farla lavorare come motore anche in condizione di scorrimento negativo, semplicemente regolando il segno del flusso di potenza che attraversa il rotore.

Le potenze attive sia di statore sia di rotore sono date da:

$$P_s = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (2.17)$$

$$P_r = \sqrt{3} V_{12} I_{12} \cos \varphi_{12} \quad (2.18)$$

Se trascuriamo le perdite nel rame sia di statore sia di rotore e la corrente a vuoto si ha:

$$P_m \simeq P_s + P_r \simeq P_e \quad \text{e} \quad I_1 = I_{12} \quad (2.19)$$

Si ricava quindi in base alla (2.15):

$$P_m \simeq -P_r \frac{1-s}{s} \quad (2.20)$$

per cui risulta:

$$P_s = P_m - P_r = \frac{P_m}{1-s} \quad (2.21)$$

$$P_r = -sP_s \quad (2.22)$$

Il funzionamento della macchina come motore o generatore dipende quindi sia dal segno dello scorrimento sia dal segno della potenza attiva P_r assorbita dal rotore. In tabella (2.1) sono riportati i segni delle potenze messe in gioco dalla macchina, tenendo in considerazione le varie condizioni di funzionamento.

Scorrimento	Subsincrono $0 < s < 1$		Supersincrono $s < 0$	
	Motore	Generatore	Motore	Generatore
P_m	>0	<0	>0	<0
P_s	>0	<0	>0	<0
P_r	<0	>0	>0	<0

Tabella 2.1 Modalità di lavoro della macchina asincrona a doppia alimentazione sia come motore sia come generatore in funzione del segno dello scorrimento.

Dalla funzione (2.22) si vede che più elevato è il modulo dello scorrimento a cui la macchina si porta a lavorare, maggiore è il flusso di potenza che interessa i convertitori statici; di conseguenza la potenza di dimensionamento dei convertitori (RSC, GSC) deve essere tanto maggiore quanto più ampio è il campo di velocità ottenibile:

$$P_{conv} \simeq |s_{max}| P_s \quad (2.23)$$

Valori tipici di s_{max} sono compresi tra $\pm 0,2$ e $\pm 0,3$ a cui corrisponde una potenza del convertitore statico compresa tra il 20-30% della potenza erogata dallo statore. Tale potenza di dimensionamento garantisce un intervallo di regolazione della velocità compreso tra il 20-30% rispetto alla nominale.

Per una condizione generica di funzionamento il principale contributo alla potenza attiva in uscita è dato dallo statore e corrisponde alla potenza nominale della macchina $P_n = P_s$. Fissato un valore allo scorrimento, conosciamo anche il valore della potenza di rotore che, sommato a quello di statore dà la potenza totale che interessa la macchina:

$$P_e = P_s + P_r = P_s - sP_s = (1-s)P_s = (1-s)P_n \quad (2.24)$$

Analizzando la relazione (2.24) ci si rende conto che per valori di scorrimento positivi (funzionamento subsincrono) la potenza reale erogata dalla macchina è minore rispetto a quella

nominale (o di statore). Per valori negativi (funzionamento supersincrono), invece la potenza fornita è maggiore rispetto a quella nominale. Nel grafico di figura (2.6) è mostrato l'andamento della potenza in uscita dallo statore, dal rotore e la loro somma al variare dello scorrimento:

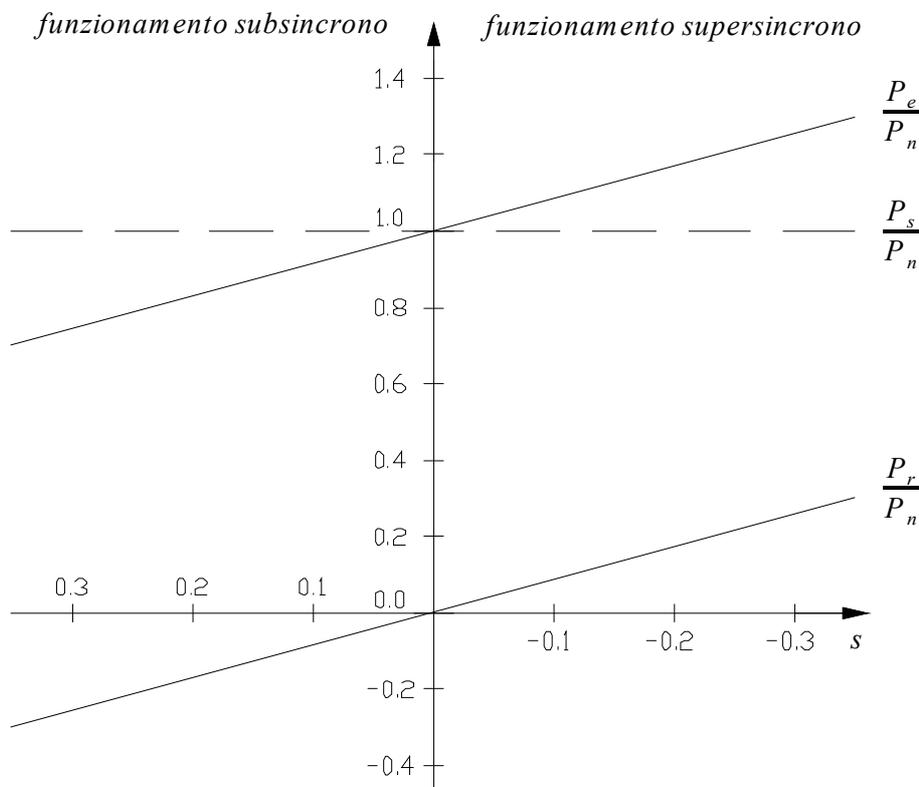


Figura 2.6 Andamento delle potenze attive scambiate al variare dello scorrimento, espresse come rapporti rispetto al valore P_n di dimensionamento.

Particolarizzando l'equazione (2.24) per il funzionamento alla velocità massima ($-s_{max}$), il DFIG avrà una potenza in uscita pari a:

$$P_{max} = P_n + s_{max} P_n \quad (2.25)$$

Come si può notare dalla figura (2.6), l'aumento (o decremento) di potenza dipende dal valore assunto dallo scorrimento, mentre la potenza allo statore si può assumere costante e corrispondente a quella di un normale generatore asincrono a velocità nominale. Di conseguenza la macchina è progettata elettricamente per sostenere P_s , ma meccanicamente per lavorare a ω_{max} e P_{max} .

Ecco quindi la particolarità del DFIG: pur essendo dimensionato per sopportare le correnti nominali da un punto di vista termico può arrivare a erogare una potenza incrementata del 30% circa in particolari condizioni di scorrimento.

2.2.5 Flussi di potenza reattiva nel DFIG

Riscrivendo per comodità l'equazione (2.13) si vede come la corrente I_μ necessaria alla magnetizzazione può essere fornita sia dal lato statore sia dal lato rotore:

$$\bar{E}_1 = -j\omega_0 L_0 (\bar{I}_1 + \bar{I}_{12}) = -j\omega_0 L_0 \bar{I}_\mu \quad (2.13)$$

Quando la macchina viene eccitata solo dal lato statore si dice che è sottoeccitata e si può assumere che il flusso sia praticamente costante e imposto dalla tensione e dalla frequenza di rete. La potenza reattiva nello statore sarà quindi entrante come nella macchina asincrona classica, mentre il rotore viene fatto lavorare con fattore di potenza pressoché unitario.

Un caso più interessante per il funzionamento del DFIG è quello della macchina eccitata anche dal lato rotore; qui la macchina si dice sopraeccitata, in quanto la corrente di magnetizzazione, fornita dal RSC, può essere impostata a piacimento. E' possibile anche decidere che il flusso di potenza reattiva sia in uscita dal lato statore, andando così ad operare una regolazione di tensione sulla linea. La potenza reattiva che il RSC deve fornire ai circuiti di rotore per la magnetizzazione va però ad incrementarne la potenza di dimensionamento. Per non fare lievitare i costi e gli inconvenienti connessi ad inverter di potenza elevata, solitamente si dimensiona il convertitore in modo che la potenza reattiva erogata sia sufficiente a garantire il fattore di potenza di statore unitario nel funzionamento a pieno carico.

E' possibile fornire in rete, quando richiesto, elevati valori di potenza reattiva. Lavorando con il rotore in moto alla velocità di sincronismo n_0 ed eccitandolo tramite il RSC in corrente continua si raggiunge una magnetizzazione con bassa potenza reattiva; la situazione è analoga a quella di un generatore sincrono nel suo funzionamento come condensatore rotante, che contribuisce totalmente alla regolazione della tensione sulla rete senza generare potenza attiva. Il passaggio dall'eccitazione in alternata a quella in corrente continua viene gestito senza problemi dal RSC, che grazie alla sua logica di controllo opera la sincronizzazione del rotore e il passaggio all'eccitazione continua.

2.2.6 Diagrammi fasoriali

Per comprendere i flussi di potenza attiva e reattiva che interessano il DFIG, è opportuno tracciare i diagrammi fasoriali.

Introduciamo nelle equazioni di regime permanente i flussi concatenati Ψ_s (di statore), Ψ_m (al traferro) e Ψ_r (di rotore). Risulta:

$$\bar{\Psi}_m = L_0 \bar{I}_\mu \quad (2.26)$$

$$\bar{I}_\mu = \bar{I}_1 + \bar{I}_{12} \quad (2.27)$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_m + L_1 \bar{I}_1 = L_0 \bar{I}_\mu + L_1 \bar{I}_1 = L_s \bar{I}_1 + L_0 \bar{I}_{12} \quad (2.28)$$

$$L_s = L_1 + L_0 \quad (2.29)$$

$$\bar{\Psi}_r = \bar{\Psi}_m + L_{12} \bar{I}_{12} = L_0 \bar{I}_\mu + L_{12} \bar{I}_{12} = L_r \bar{I}_{12} + L_0 \bar{I}_1 \quad (2.30)$$

$$L_r = L_{12} + L_0 \quad (2.31)$$

Andando a riscrivere la (2.6), e tenendo presente le (2.13), (2.26) e (2.28), possiamo ottenere una nuova rappresentazione in funzione dei flussi:

$$\bar{I}_1 R_1 - \frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = -j \omega_0 (L_0 \bar{I}_\mu + L_1 \bar{I}_1) = -j \omega_0 \bar{\Psi}_s \quad (2.32)$$

Analogamente la funzione (2.12) tenendo sempre presente le (2.13), (2.26) e (2.30) diventa:

$$\bar{I}_{12} R_{12} - \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} = -j s \omega_0 (L_0 \bar{I}_\mu + L_{12} \bar{I}_{12}) = -j \omega_0 s \bar{\Psi}_r = \bar{E}'_{12} \quad (2.33)$$

Al fine di studiare il suo funzionamento in parallelo alla rete, andiamo di seguito a tracciare i diagrammi fasoriali riguardanti il funzionamento da generatore nelle quattro possibili combinazioni. Per la costruzione dei diagrammi ipotizziamo di conoscere:

- modulo e segno dello scorrimento;
- modulo della tensione V_{12} e corrente I_{12} di rotore e il loro sfasamento φ_{12} ;
- tutti i parametri della macchina.

Tramite la conoscenza di queste grandezze e attraverso opportune ipotesi è possibile risalire alla tensione di statore \bar{V}_1 partendo dall'equazione (2.26) fino alla (2.33).

Definiamo l'angolo di carico δ (figura 2.7) quello compreso tra \bar{V}_1 e \bar{V}_{12} .

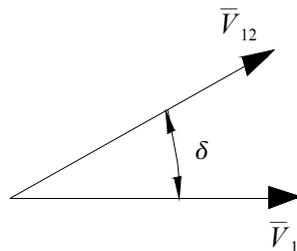


Figura 2.7 Angolo di carico.

Funzionamento con scorrimento positivo (subsincrono) sottoeccitata (figura 2.8)

La corrente di magnetizzazione è fornita dallo statore e si ipotizza che i circuiti di rotore lavorino a fattore di potenza unitario.

$$s > 0$$

$$|\bar{\Psi}_s| > |\bar{\Psi}_r| \quad |\bar{I}_1| > |\bar{I}_{12}|$$

$$P_s < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_s > 0 \text{ (assorbita)}$$

$$P_r > 0 \text{ (assorbita)} \quad Q_r = 0$$

$$\frac{\pi}{2} < \varphi_1 < \pi$$

$$\varphi_{12} = 0$$

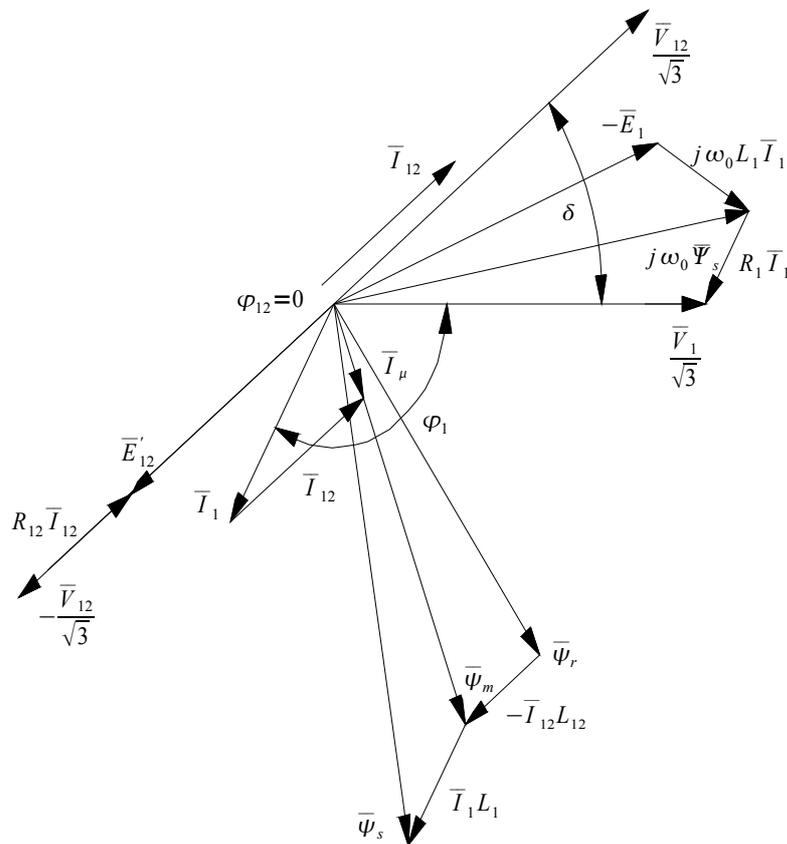


Figura 2.8 Diagramma fasoriale del DFIG con scorrimento positivo magnetizzato dallo statore.

Funzionamento con scorrimento positivo (subsincrono) sopraeccitata (figura 2.9).

La corrente di magnetizzazione è fornita dal RSC e si ipotizza che lo statore eroghi potenza a $\cos\varphi_1=1$ per non dover avere un convertitore con potenza di dimensionamento troppo elevata.

$$s > 0$$

$$|\bar{\Psi}_r| > |\bar{\Psi}_s| \quad |\bar{I}_{12}| > |\bar{I}_1|$$

$$P_s < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_s = 0$$

$$P_r > 0 \text{ (assorbita)} \quad Q_r > 0 \text{ (assorbita)}$$

$$\varphi_1 = \pi$$

$$0 < \varphi_{12} < \frac{\pi}{2}$$

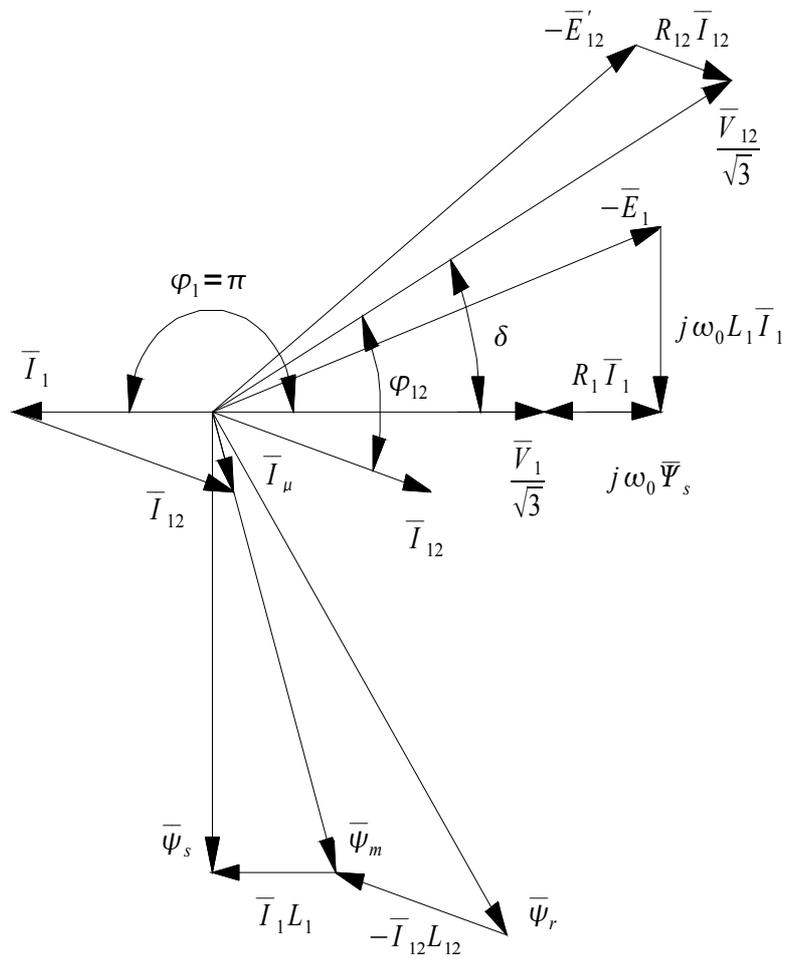


Figura 2.9 Diagramma fasoriale del DFIG funzionante con scorrimento positivo magnetizzato dal rotore

Funzionamento con scorrimento negativo (supersincrono) sottoeccitata (figura 2.10).

Il flusso di potenza dei circuiti di rotore, ipotizzando per esso fattore di potenza unitario, si inverte mentre la potenza reattiva necessaria alla magnetizzazione è assorbita dallo statore.

$$s < 0$$

$$|\bar{\Psi}_s| > |\bar{\Psi}_r| \quad |\bar{I}_1| > |\bar{I}_{12}|$$

$$P_s < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_s > 0 \text{ (assorbita)}$$

$$P_r < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_r = 0$$

$$\frac{\pi}{2} < \varphi_1 < \pi$$

$$\varphi_{12} = \pi$$

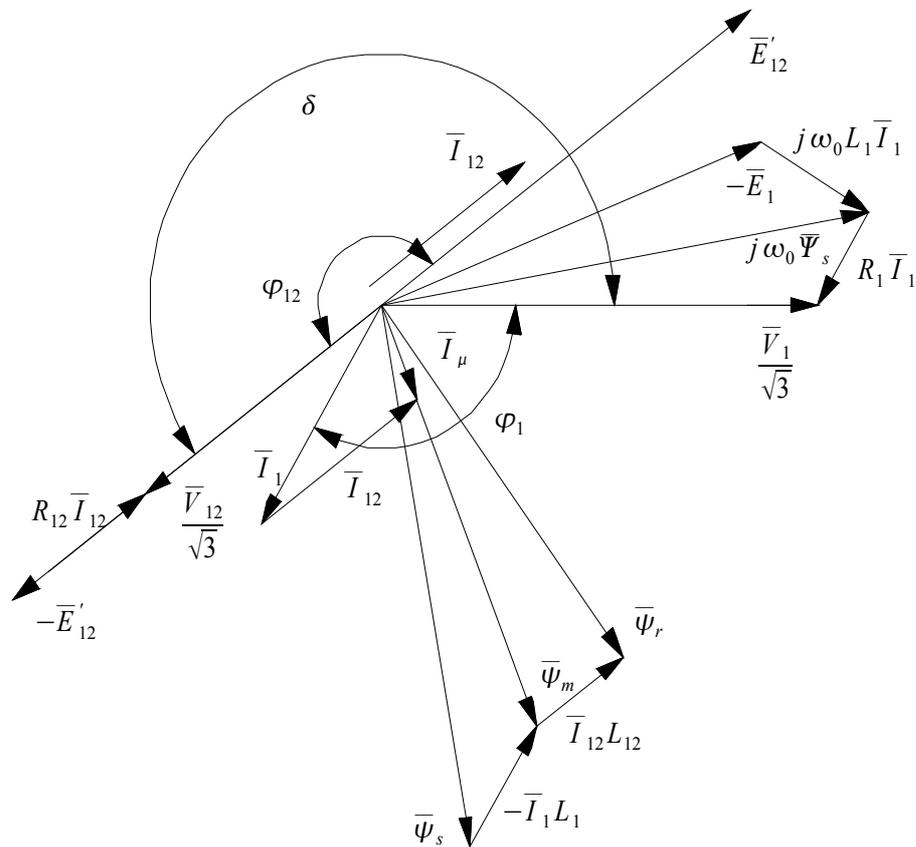


Figura 2.10 Diagramma fasoriale del DFIG con scorrimento negativo magnetizzato dallo statore.

Funzionamento con scorrimento negativo (supersincrono) sopraeccitata (figura 2.11).

La potenza attiva nei circuiti di rotore è uscente, mentre quella reattiva risulta entrante; la macchina è magnetizzata in modo che lo statore eroghi a fattore di potenza unitario:

$$s < 0$$

$$|\bar{\Psi}_r| > |\bar{\Psi}_s| \quad |\bar{I}_{12}| > |\bar{I}_1|$$

$$P_s < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_s = 0$$

$$P_r < 0 \text{ (erogata)} \quad Q_r > 0 \text{ (assorbita)}$$

$$\varphi_1 = \pi$$

$$\frac{\pi}{2} < \varphi_{12} < \pi$$

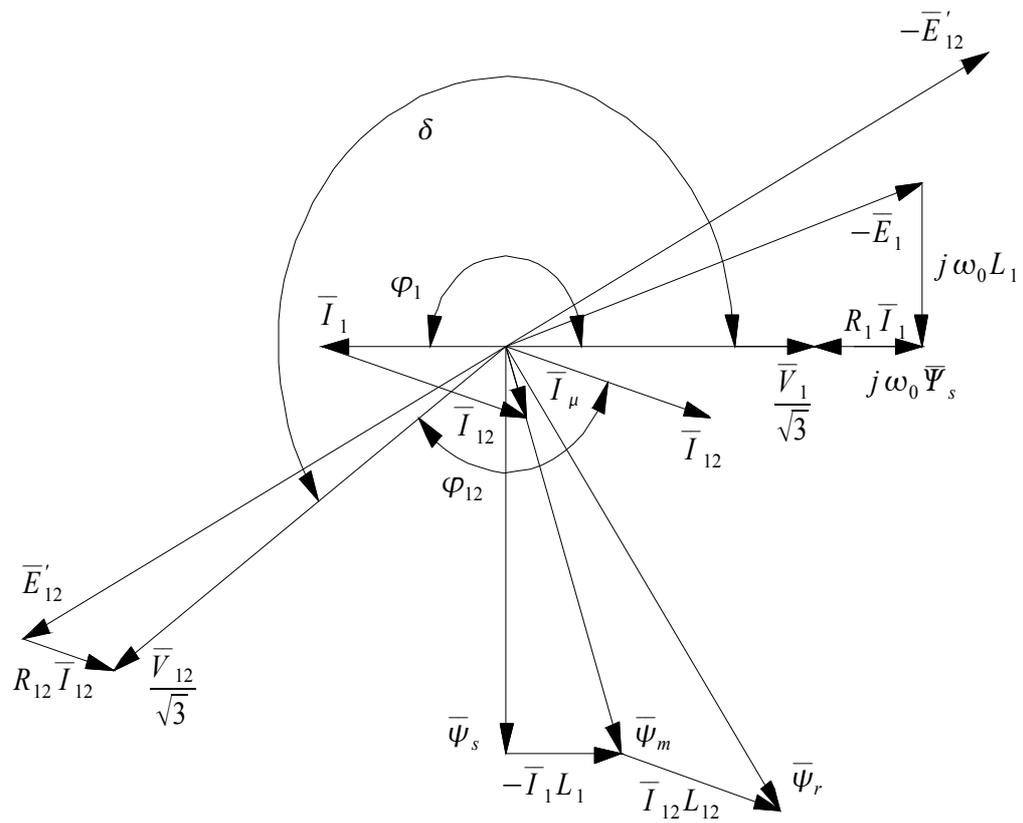


Figura 2.11 Diagramma fasoriale del DFIG con scorrimento negativo magnetizzato dal rotore.

2.3 Funzionamento in parallelo

2.3.1 Operazioni di inserzione

Rispetto al generatore sincrono, il DFIG presenta vantaggi nelle manovre di messa in parallelo con la rete, in quanto non sono più necessari organi meccanici di regolazione della velocità del motore primo. Tramite il convertitore infatti è possibile effettuare le operazioni di sincronizzazione in maniera precisa e senza l'utilizzo di componenti esterni.

La messa in moto da fermo della macchina viene eseguita come motore; i circuiti di statore vengono scollegati dalla rete e posti in cortocircuito mentre l'alimentazione viene fornita dalla parte del rotore tramite il convertitore. In questo modo si eliminano anche eventuali picchi di corrente in quanto il RSC provvede ad eseguire un avviamento graduale.

Quando la velocità raggiunge circa il campo nominale $\omega_0(1-|s_{max}|)$, i circuiti di statore vengono aperti in modo che la logica di sincronizzazione possa regolare tensione e frequenza di statore, per poi collegare la macchina in parallelo con la rete. Sarà quindi compito del RSC provvedere al raggiungimento delle condizioni favorevoli per la sincronizzazione per qualsiasi velocità compresa nell'intervallo $\omega_0(1\pm|s_{max}|)$.

2.3.2 Gestione dei flussi di potenza attiva e reattiva

Una volta collegata la macchina alla rete, è importante analizzare i flussi di potenza attiva e reattiva che la interessano e le possibilità di regolazione realizzabili. Per ottenere una descrizione qualitativa, è opportuno semplificare la trattazione introdotta mediante i diagrammi fasoriali nel paragrafo (2.2.6). Per ipotesi trascuriamo la resistenza di statore e definiamo le grandezze caratteristiche che ci interessano: P_s e Q_s . Abbiamo scelto queste perché rappresentano il maggior contributo in termini energetici che la macchina offre. Esprimiamo tali grandezze in funzione dell'angolo di carico δ tra la tensione di rotore e di statore per una data velocità di rotazione (s) e per un dato valore di tensione di rotore \bar{V}_{12} .

Trascurando la resistenza del circuito di statore, l'equazione (2.32) diventa:

$$\frac{\bar{V}_1}{\sqrt{3}} = j\omega_0(L_1\bar{I}_1 + L_0\bar{I}_\mu) \quad (2.34)$$

mentre la relazione (2.33) può essere scritta nelle coordinate di statore nel seguente modo:

$$\frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} = R_{12}\bar{I}_{12} + js\omega_0(L_{12}\bar{I}_{12} + L_0\bar{I}_\mu) = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}}(\cos\delta + jsin\delta) \quad (2.35)$$

andando ad eliminare la dipendenza da \bar{I}_1 dall'equazione (2.35) troviamo:

$$\begin{aligned}
 \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} &= R_{12} \bar{I}_{12} + js \omega_0 (L_{12} \bar{I}_{12} + L_0 \bar{I}_{12} + L_0 \bar{I}_1) = R_{12} \bar{I}_{12} + js \omega_0 (L_{12} \bar{I}_{12} + L_0 \bar{I}_{12} + L_0 \bar{I}_1 \frac{L_s}{L_s}) = \\
 &= R_{12} \bar{I}_{12} + js \omega_0 [L_r \bar{I}_{12} + (L_1 \bar{I}_1 + L_0 \bar{I}_1) \frac{L_0}{L_s}] = \\
 &= R_{12} \bar{I}_{12} + js \omega_0 [L_r \bar{I}_{12} + (L_1 \bar{I}_1 - \bar{I}_{12} L_0 + L_0 \bar{I}_\mu) \frac{L_0}{L_s}] = \\
 &= R_{12} \bar{I}_{12} + js \omega_0 (L_r - \frac{L_0^2}{L_s}) \bar{I}_{12} + js \omega_0 (L_1 \bar{I}_1 + L_0 \bar{I}_\mu) \frac{L_0}{L_s} = \\
 \frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{12}}{\sqrt{3}} (\cos \delta + j \sin \delta) = [R_{12} + js \omega_0 (L_r - \frac{L_0^2}{L_s})] \bar{I}_{12} + s \frac{V_1 L_0}{\sqrt{3} L_s} \quad (2.36)
 \end{aligned}$$

Definiamo l'induttanza di cortocircuito come:

$$L_{cc} \simeq L_r - \frac{L_0^2}{L_s} \quad (2.37)$$

inserendola nella funzione (2.36) si ottiene:

$$\frac{\bar{V}_{12}}{\sqrt{3}} = [R_{12} + js \omega_0 L_{cc}] \bar{I}_{12} + s \frac{V_1 L_0}{\sqrt{3} L_s} \quad (2.38)$$

a cui corrisponde il circuito equivalente di figura (2.12), dove si vede l'analogia con il circuito equivalente della macchina sincrona.

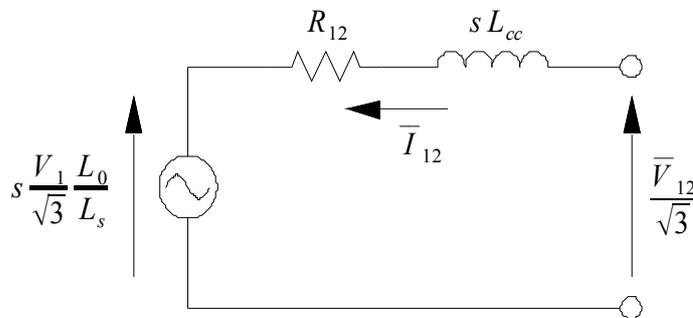


Figura 2.12 Circuito equivalente del DFIG visto dal rotore.

Raccogliendo la corrente e normalizzando la relazione (2.38) otteniamo:

$$\bar{I}_{12} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(V_{12} \cos \delta - s V_1 \frac{L_0}{L_s} + j V_{12} \sin \delta)(R_{12} - j s \omega_0 L_{cc})}{R_{12}^2 + (s \omega_0 L_{cc})^2} \quad (2.39)$$

Definiamo l'angolo $\delta_k(s)$ come:

$$\cos \delta_k(s) = \frac{s \omega_0 L_{cc}}{\sqrt{R_{12}^2 + (s \omega_0 L_{cc})^2}} \quad (2.40)$$

$$\sin \delta_k(s) = \frac{R_{12}}{\sqrt{R_{12}^2 + (s \omega_0 L_{cc})^2}} \quad (2.41)$$

$$\tan \delta_k(s) = \frac{R_{12}}{s \omega_0 L_{cc}} \quad (2.42)$$

Dalle funzioni (2.40) (2.41) e (2.42) si vede come varia δ_k in funzione dello scorrimento:

$\delta_k = 0$	per	$ s \omega_0 L_{cc} \gg R_{12}$
$\delta_k = \frac{\pi}{2}$	per	$s = 0$
$0 < \delta_k < \frac{\pi}{2}$	per	$s > 0$
$\frac{\pi}{2} < \delta_k < \pi$	per	$s < 0$

Facendo riferimento al circuito equivalente del DFIG visto dal rotore (figura 2.12), tracciamo ora i diagrammi fasoriali relativi al funzionamento subsincrono (figura 2.13) e supersincrono (figura 2.14):

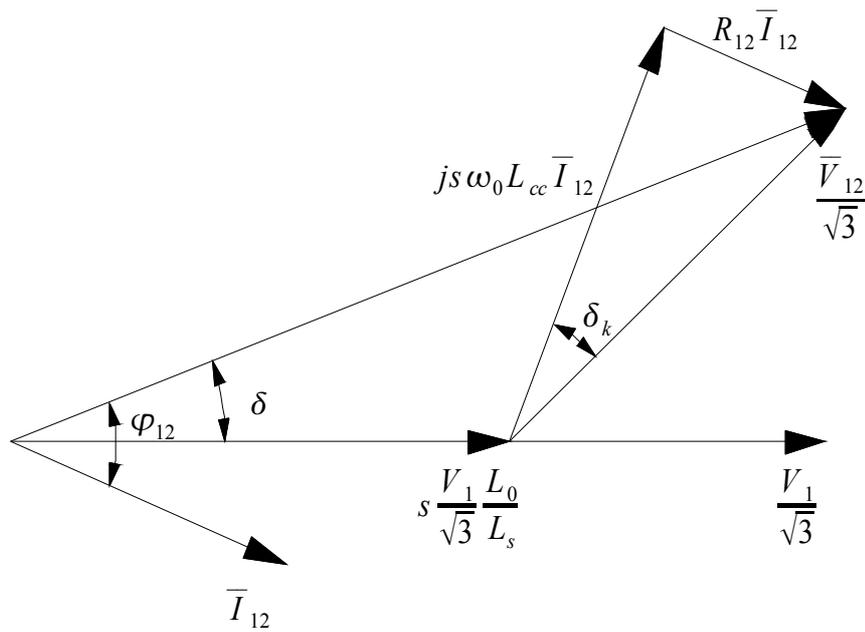


Figura 2.13 Diagramma fasoriale relativo al circuito equivalente visto dal rotore per scorrimenti positivi.

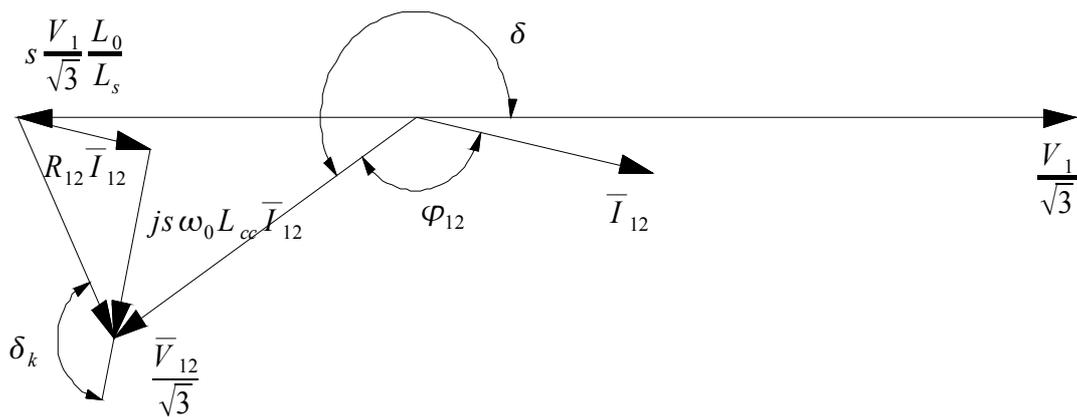


Figura 2.14 Diagramma fasoriale relativo al circuito equivalente visto dal rotore per scorrimenti negativi.

Possiamo scrivere la corrente di statore come:

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{I}_1 + \bar{I}_{12} \frac{L_0}{L_s} - \bar{I}_{12} \frac{L_0}{L_s} = \frac{\bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_1 L_0 + \bar{I}_{12} L_0}{L_s} - \bar{I}_{12} \frac{L_0}{L_s} = \\ &= \frac{\bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_\mu L_0}{L_s} - \bar{I}_{12} \frac{L_0}{L_s} = \frac{V_1}{j\sqrt{3}\omega_0 L_s} - \bar{I}_{12} \frac{L_0}{L_s}\end{aligned}\quad (2.43)$$

Tenute presenti le correnti di rotore (2.39) e di statore (2.43), si può esprimere la potenza complessa di statore come:

$$\begin{aligned}P_s + jQ_s &= \sqrt{3} V_1 \bar{I}_1^* = \sqrt{3} L_0 \frac{V_1}{L_s} \left(\frac{jV_1}{\sqrt{3}\omega_0 L_0} - \bar{I}_{12}^* \right) = \\ &= \frac{jV_1^2}{\omega_0 L_s} - \frac{(V_{12} \cos \delta - s V_1 \frac{L_0}{L_s} - j V_{12} \sin \delta)(R_{12} + js\omega_0 L_{cc})}{R_{12}^2 + s^2 \omega_0^2 L_{cc}^2} \sqrt{3} \frac{L_0}{L_s} V_1 \\ &= \frac{jV_1^2}{\omega_0 L_s} - \frac{V_{12} \sin(\delta + \delta_k) + j V_{12} \cos(\delta + \delta_k)}{\sqrt{R_{12}^2 + s^2 \omega_0^2 L_{cc}^2}} \sqrt{3} \frac{L_0}{L_s} V_1 + \frac{s V_1 R_{12} \frac{L_0}{L_s} + j s^2 \omega_0 V_1 \frac{L_0}{L_s} L_{cc}}{R_{12}^2 + s^2 \omega_0^2 L_{cc}^2} \sqrt{3} \frac{L_0}{L_s} V_1\end{aligned}\quad (2.44)$$

Mettendo in evidenza la componente attiva si ottiene:

$$\begin{aligned}P_s &= -\sqrt{3} V_1 V_{12} \frac{L_0}{L_s} \frac{\sin(\delta + \delta_k(s))}{\sqrt{R_{12}^2 + (s\omega_0 L_{cc})^2}} + \sqrt{3} V_1^2 \left(\frac{L_0}{L_s} \right)^2 \frac{R_{12} s}{R_{12}^2 + (s\omega_0 L_{cc})^2} \\ &= \text{potenza attiva sincrona } [P_{ss}] + \text{potenza attiva asincrona } [P_{as}]\end{aligned}\quad (2.45)$$

Possiamo quindi suddividere la potenza attiva in uscita in due componenti:

- la potenza attiva sincrona che per $0 < \delta + \delta_k(s) < \pi$ risulta sempre negativa e quindi erogata mentre per $\pi < \delta + \delta_k(s) < 2\pi$ risulta positiva (condizione di funzionamento analoga alla macchina sincrona);
- la potenza attiva asincrona che è funzione dello scorrimento: se negativo anch'essa sarà negativa e quindi si sommerà a quella sincrona. Se positivo andrà a sottrarsi.

A questi risultati si era già arrivati intuitivamente nei paragrafi precedenti; questa formulazione risulta essere comoda per disegnare il grafico del suo andamento al variare dello scorrimento e dell'angolo di carico grazie all'introduzione della variabile $\delta + \delta_k$.

In maniera analoga anche la potenza reattiva può essere vista come la somma di due componenti: la prima rappresenta la potenza necessaria alla magnetizzazione della macchina che in qualsiasi caso è sempre assorbita e dunque positiva. L'altra invece può essere positiva o negativa a seconda del valore assunto da $\delta + \delta_k$:

$$Q_s = \frac{V_1^2}{\omega_0 L_s} \left[1 + \frac{\sqrt{3}(s \omega_0 L_0)^2 L_{cc}}{[R_{12}^2 + (s \omega_0 L_{cc})^2] L_s} \right] - \sqrt{3} V_1 V_{12} \frac{L_0}{L_s} \frac{\cos(\delta + \delta_k(s))}{\sqrt{R_{12}^2 + (s \omega_0 L_{cc})^2}} \quad (2.46)$$

$$= \text{potenza reattiva asincrona } [Q_{as}] + \text{potenza reattiva sincrona } [Q_{ss}]$$

Dalle relazioni (2.45) e (2.46) si può notare l'analogia di funzionamento del DIFG con la macchina sincrona a rotore liscio: sia la componente di potenza attiva sia quella reattiva sincrona sono funzione di $\delta + \delta_k(s)$, una volta fissati i parametri della macchina e lo scorrimento.

Tipici della macchina a induzione sono invece i contributi di potenza attiva e reattiva asincroni, che sono funzione dello scorrimento e quindi costanti per un determinato scorrimento al variare dell'angolo di coppia.

Nelle figure (2.15) e (2.16) è riportato l'andamento della potenza attiva (2.45) e reattiva (2.46) al variare di $\delta + \delta_k(s)$:

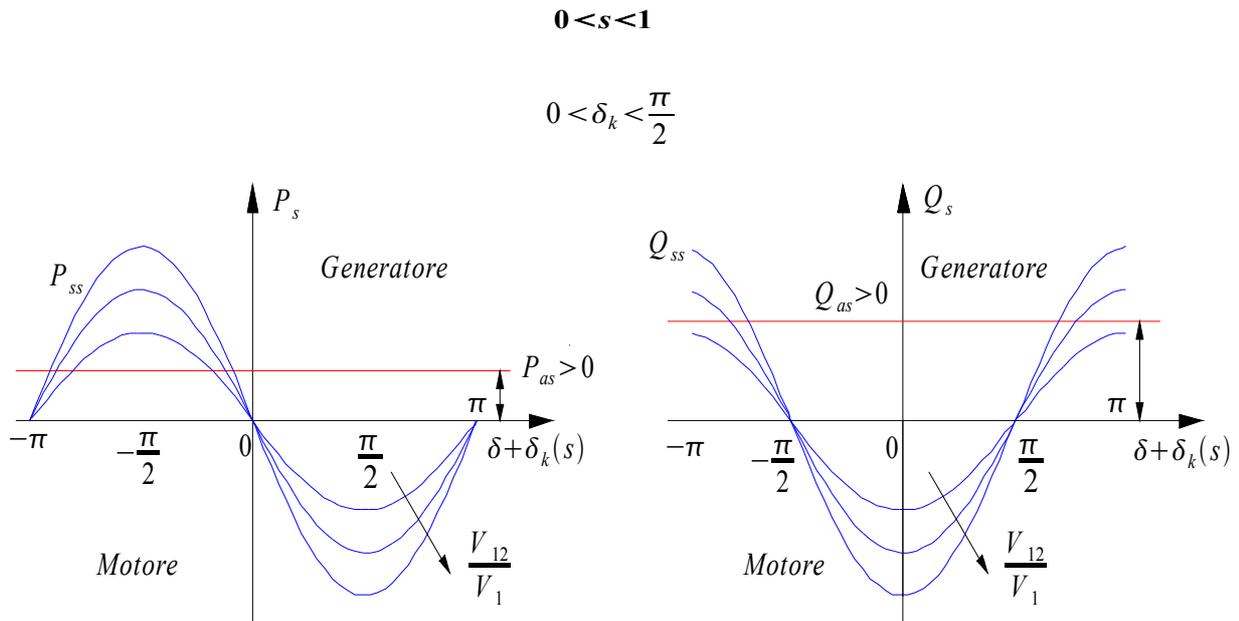


Figura 2.13 Andamento della potenza attiva e reattiva allo statore in caso di funzionamento con scorrimento positivo.

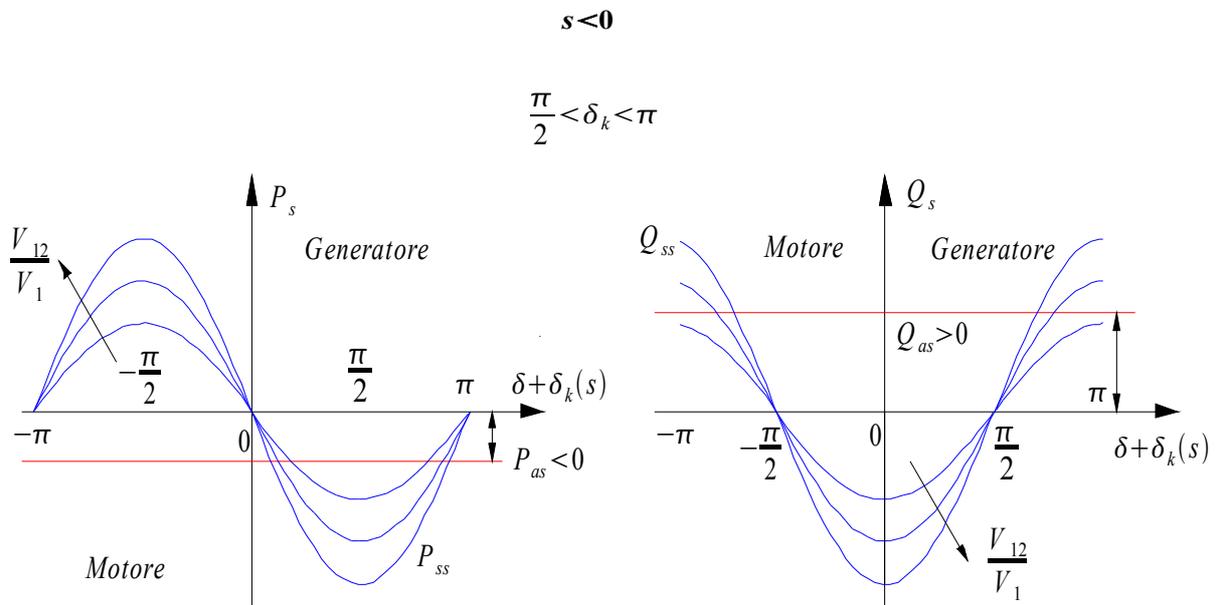


Figura 2.14 Andamento della potenza attiva e reattiva allo statore in caso di funzionamento con scorrimento negativo.

2.3.3 Funzionamento del DFIG in condizioni di guasto in linea

In questo paragrafo vengono analizzate le dinamiche che possono verificarsi in caso di un improvviso abbassamento della tensione di linea mentre è collegato il DFIG. Si tratta di valutazioni importanti, visto che questi fenomeni possono danneggiare la macchina, per cui è necessario proteggerla.

Poiché lo statore è direttamente collegato alla rete, ciò comporta una serie di problematiche in caso di guasto sulla linea.

Supponiamo un cortocircuito trifase: la macchina tramite i suoi morsetti di statore sente un abbassamento della tensione e di conseguenza correnti di elevato valore iniziano a circolare negli avvolgimenti di statore; questi ultimi, essendo magneticamente accoppiati agli avvolgimenti di rotore, inducono in essi delle f.e.m. che portano ad una rottura del convertitore RSC a causa delle scariche attraverso gli interruttori statici che non sono stati progettati per resistere a differenze di potenziale di questo ordine di grandezza.

Per evitare questo problema solitamente viene usato un circuito di blocco come da figura (2.15), costituito da un circuito resistivo che viene inserito per proteggere il convertitore durante il guasto.

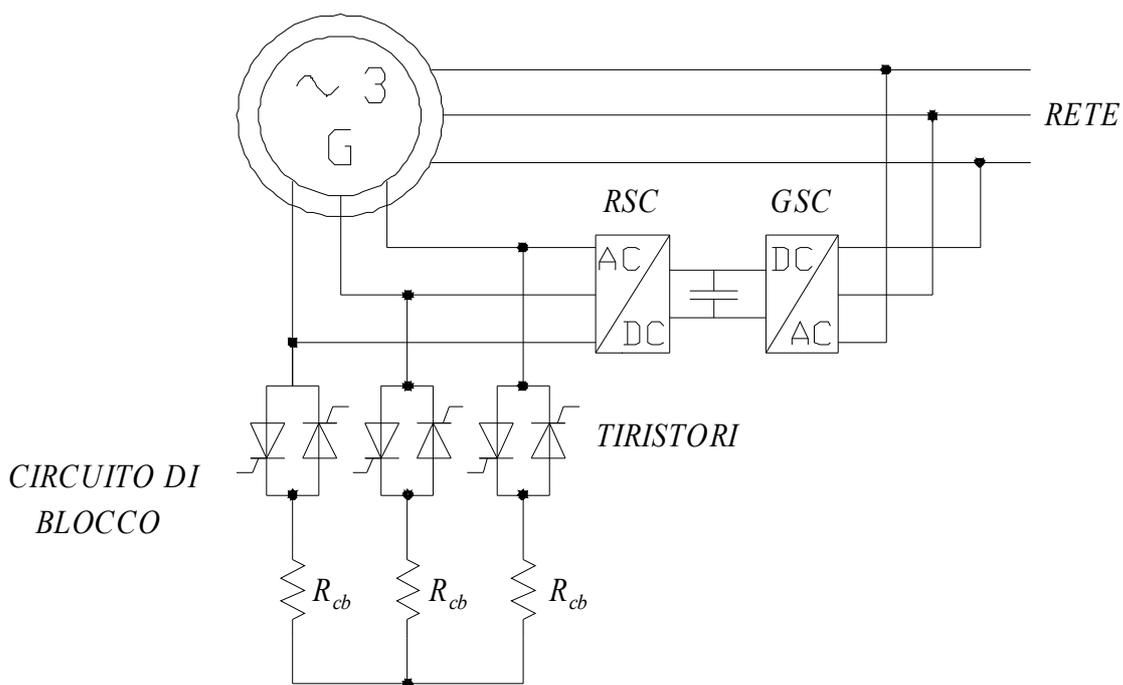


Figura 2.15 Circuito di blocco nel DFIG.

Quando l'anomalia viene identificata dalla logica di controllo, i tiristori presenti sul circuito di blocco vengono portati in conduzione e gli interruttori statici del convertitore RSC vengono aperti. La corrente di guasto nel rotore in questo modo si chiude attraverso i resistori presenti sul circuito di blocco R_{cb} che vengono opportunamente dimensionati in modo da limitare la tensione sui terminali RCS, evitandone quindi la rottura.

Bisogna inoltre tenere presente che in caso di guasto sia il rotore che lo statore sono

interessati da elevate correnti: di conseguenza ci saranno delle pericolose oscillazioni di coppia che possono danneggiare e quindi portare a rapida usura il moltiplicatore di giri. Un'ottima scelta del valore di R_{cb} deve quindi essere in grado sia di smorzare tali brusche oscillazioni di coppia sia di limitare la tensione sugli avvolgimenti di rotore.

Con questo metodo, che risulta anche rapido nell'intervento, è possibile proteggere il DFIG dalle brusche sovracorrenti di guasto, in maniera più efficace rispetto ad un classico interruttore automatico.

2.4 Esempio applicativo di turbina eolica

Come esempio di turbina eolica equipaggiata con tecnologia DFIG analizziamo il modello D9.0 della ditta Dewind. I suoi principali dati di targa sono riassunti in tabella (2.2):

Rated Power	2 MW
Cut-in wind speed	3 m/s
Nominal wind speed	12 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Nominal rotation speed	16 rpm
Rotation speed range	9.8-18.4 rpm
Rotation speed control	pitch, active blade adjustment
Power regulation	pitch
Transmission	1:106
Generator	induction, doubly-fed
Slippage	$\pm 30\%$
Rated voltage	690 V
Grid frequencies	50 Hz
Inverter	IGBT-Inverter
Nominal grid voltages	10/20 kV
Rated current	1675 A
Power factor, standard value	1
Power factor, optional	0.9 cap.-0.95 ind.
Over/ under voltage	with adjustable parameter

Tabella 2.2 Principali caratteristiche della turbina eolica DeWind D9.0

Dai dati forniti osserviamo che la turbina ha una velocità di rotazione compresa tra 9.8 e 18.4 rpm e che attraverso il moltiplicatore (1:106) si ottiene un numero di giri al rotore che varia da 1039 a 1950 rpm. Si intuisce dunque che il generatore ha quattro poli, con velocità di sincronismo $n_0=1500$ giri al minuto. I limiti forniti dal costruttore corrispondono esattamente a una variazione dello scorrimento del $\pm 30\%$.

Grazie al pitch control è possibile controllare il passo delle pale ottenendo in questo modo una regolazione della velocità. Il suo compito è quello di gestire la coppia motrice sull'albero della turbina e in particolare di ridurre la potenza estratta dalla vena fluida in regimi di vento superiori al valore nominale; in questo caso, come si può osservare anche dal grafico (2.16), è circa 12 m/s. Da questo valore in poi si ottiene la potenza nominale dichiarata dal costruttore.

Per potenza nominale in questo caso viene intesa la potenza totale che il DFIG è in grado di erogare, cioè la somma della potenza di statore e di rotore $P_s + P_r$.

Grazie al fatto che il DFIG opera a velocità variabile, e alla possibilità di modificare il passo delle pale possiamo sfruttare velocità del vento comprese tra 3 e 25 m/s. La potenza attiva, che in figura (2.16) è espressa in funzione della velocità del vento, viene erogata a fattore di potenza unitario, con la possibilità di variazione da 0.9 capacitivo a 0.95 induttivo con eccitazione in continua.

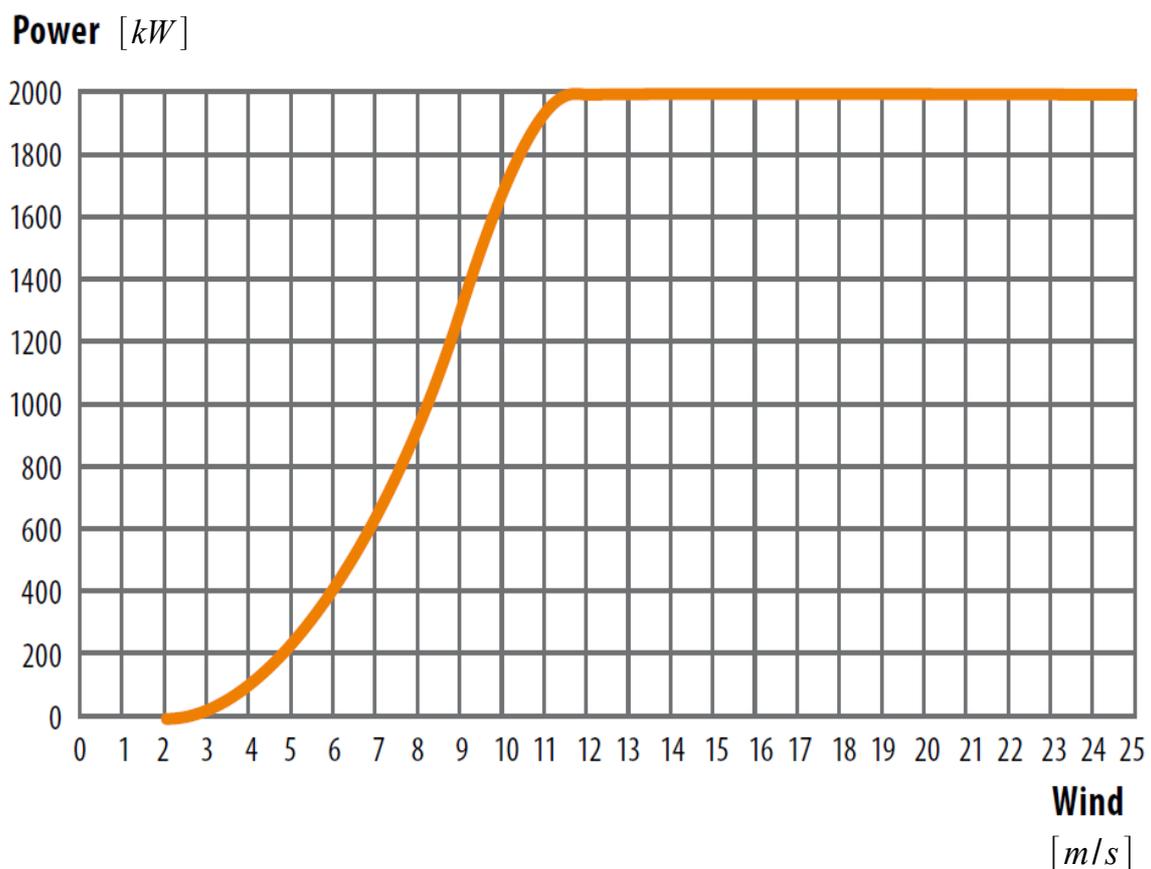


Figura 2.16 Andamento della potenza attiva in funzione della velocità del vento.

Conclusioni

Nell'elaborato si è spiegato il funzionamento della macchina a induzione e della macchina asincrona a doppia alimentazione, nell'ipotesi di regime permanente, valutandone le proprietà nelle diverse condizioni di funzionamento e focalizzando soprattutto l'attenzione nelle caratteristiche come generatore. L'obiettivo era studiare il funzionamento del DFIG in caso di ampia variabilità della velocità del motore primo, confrontarlo con il generatore asincrono e analizzarne le caratteristiche nel funzionamento in parallelo alla rete.

Si è verificato come il DFIG risulti particolarmente adatto allo sfruttamento di risorse che non offrono flussi energetici costanti, come le fonti eoliche. Grazie alla sua versatilità, il DFIG può essere usato anche in siti dove la velocità media del vento non sia sufficiente per la generazione tramite macchine asincrone classiche.

Le caratteristiche di

- economicità e robustezza;
- rendimento elevato;
- ampio intervallo di velocità utile sfruttata;
- possibilità di generare sia potenza attiva sia reattiva;
- possibilità di regolazione della potenza immessa in rete;
- insensibilità agli abbassamenti di tensione di rete,

rendono la macchina asincrona a doppia alimentazione un'ottima soluzione anche per i contributi alla stabilità di rete che essa può fornire, aumentando la qualità del servizio offerto.

Bisogna tuttavia notare che più elevata è la flessibilità che si vuole ottenere, sia in termini di velocità sia di regolazione della potenza reattiva, maggiore deve essere la potenza del convertitore statico che interfaccia i circuiti di rotore con la rete.

Convertitori di elevata potenza comportano più disturbi in rete e un minore rendimento complessivo del sistema oltre ad un aumento del costo. Per questo motivo nelle applicazioni pratiche, come si è analizzato nell'esempio applicativo, si opta per il compromesso di mantenere la potenza di dimensionamento dell'inverter pari a circa il 30% di quella nominale, ottenendo così un campo di regolazione della velocità anch'essa intorno a $\pm 30\%$ e la possibilità di avere fattore di potenza di statore unitario nel funzionamento a pieno carico.

Bibliografia

- Andreas Petersson - *Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*.
- B. Chitti Babu, K. B. Mohanty, C. Poongathai - *Wind Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator with Grid Disconnection*.
- Davide Aguglia, Philippe Viarouge, René Wamkeue, Jétome Cros - *Doubly-Fed Induction Generator Drive Optimal Design for Wind Turbines with Reduced Gearbox Stages Number*.
- F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff and M.E. Zaim - *Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Systems (2001)*.
- Hans-Rostoen - *Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine*.
- H. Karimi-Davijani, A. Sheikholeslami, H. Livani and M. Karimi-Davijani - *Fuzzy Logic Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine*.
- Ion Boldea - *Variable Speed Generators - The Electric Generators Handbook*.
- Ion Boldea - *Control of variable speed electric generators: present status and perspective*.
- M. Andriollo, G. Martinelli, A. Morini – *Macchine Elettriche Rotanti*.
- Muller,Deicke, De Doncker - *Doubly fed induction generator systems for wind turbines (2002)*.
- P. Di Leo, F. Scapino, F. Spertino - *Una migliore integrazione in rete delle turbine eoliche*.
- Samuele Grillo, Mattia Marinelli, Andrea Pitto, Federico Silvestro - *Modellazione di generatori eolici a velocità variabile con generatore asincrono a doppia alimentazione*.
- <http://www.DeWind.com> – *DeWind_Brochure_D9*.