



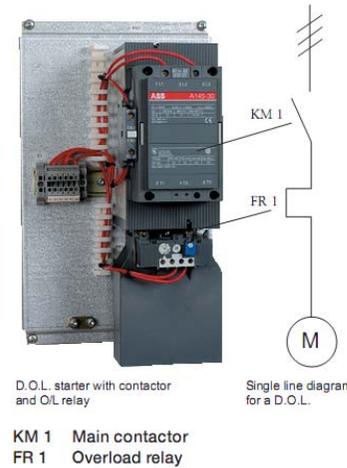
Il motore asincrono (4° parte): metodi di avviamento, funzionamento da generatore

Lucia FROSINI

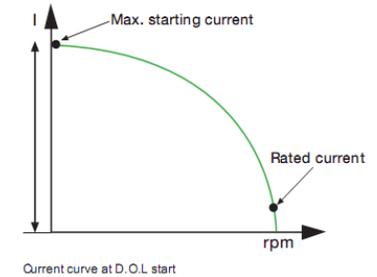
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

Avviamento del motore asincrono

L'equipaggiamento standard a monte di un motore asincrono è costituito da un contattore e un relè termico (o elettronico) di sovraccarico.



Senza accorgimenti specifici per l'avviamento del motore, la corrente di avviamento è in genere 5÷8 volte quella nominale (ma può anche assumere valori superiori).



Avviamento del motore asincrono

Abbiamo visto che, per ridurre la corrente di avviamento di un motore asincrono, è possibile:

- 1) Inserire reostati di avviamento, per aumentare la resistenza di rotore solo in fase di avviamento ed escluderli durante il funzionamento normale, al fine di ottenere un buon rendimento a carico nominale: questo metodo è possibile solo con rotori di tipo avvolto.
- 2) Utilizzare rotori a doppia gabbia o a barre alte: in questo modo si ottiene un comportamento analogo al precedente, con resistenza di rotore elevata all'avviamento e bassa a carico nominale.

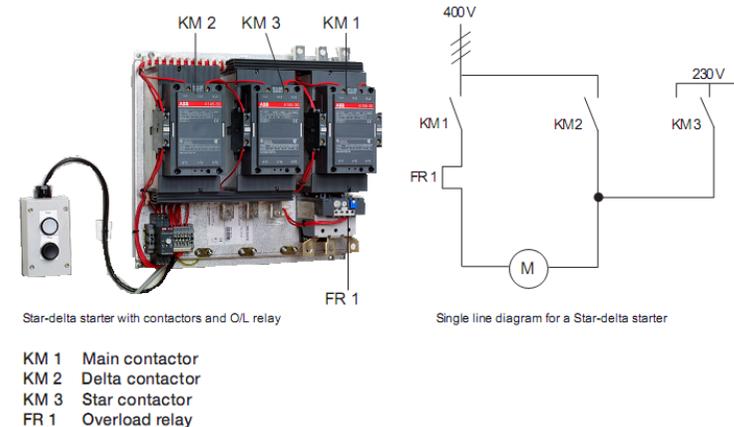
Altri metodi utilizzabili per ridurre la corrente di avviamento sono:

- a) Avviamento stella-triangolo.
- b) Avviamento a tensione ridotta (con soft-starter).
- c) Avviamento con inverter (a frequenza ridotta).

Avviamento stella-triangolo

È un metodo che riduce la corrente di avviamento e la coppia di avviamento.

L'equipaggiamento è costituito da tre contattori, un relè di sovraccarico e un timer per settare il tempo in cui il collegamento deve rimanere a stella (tempo di avviamento).



Avviamento stella-triangolo

Questo tipo di avviamento consiste nell'avviare un motore, realizzato per funzionare normalmente a triangolo, connettendolo a stella.

Se il collegamento è a stella, le tensioni concatenate sono uguali a $\sqrt{3}$ volte le tensioni di fase e le correnti di linea sono uguali alle correnti di fase.

Se il collegamento è a triangolo, le tensioni concatenate sono uguali alle tensioni di fase e le correnti di linea sono uguali a $\sqrt{3}$ volte le correnti di fase.

Detta V la tensione concatenata di alimentazione (per es. 400 V), con il collegamento a stella, le tensioni di fase sono $1/\sqrt{3}$ di quella di alimentazione (230 V), quindi le impedenze di fase assorbono una corrente che è $1/\sqrt{3}$ inferiore.

Ma poiché le correnti di linea a stella sono $1/\sqrt{3}$ rispetto a quelle di linea a triangolo:

la corrente di spunto risulta 1/3 di quella che si avrebbe con l'inserzione a triangolo.

5

Avviamento stella-triangolo

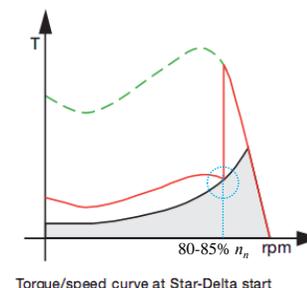
In questo modo la tensione applicata ad ogni fase del motore viene ridotta di un fattore pari a $\sqrt{3}$ con una conseguente riduzione della corrente assorbita di linea di un fattore 3 rispetto all'avviamento a piena tensione con connessione a triangolo.

Ovviamente anche la coppia di avviamento diminuisce di un fattore 3, perché la coppia è proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione di fase.

Quindi questo metodo funziona solo se il carico è basso all'avviamento.

Per es., quando si avviano pompe o ventilatori, la coppia di carico è bassa all'inizio dell'avviamento e aumenta col quadrato della velocità.

Quando il motore raggiunge approssimativamente l'80-85% della velocità nominale, la coppia di carico è uguale alla coppia del motore e l'accelerazione cessa.



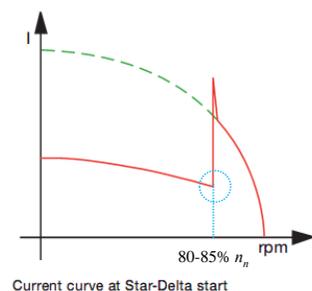
6

Avviamento stella-triangolo

A questo punto, per raggiungere la velocità nominale, è necessario commutare verso l'alimentazione con collegamento a triangolo, in modo che la tensione di fase aumenti di un fattore $\sqrt{3}$ e la coppia aumenti di un fattore 3: questa commutazione provoca molto spesso un elevato picco di corrente.

In alcuni casi la corrente di picco può raggiungere un valore che è anche maggiore di quello per l'avviamento diretto: questo è il principale difetto di questo metodo.

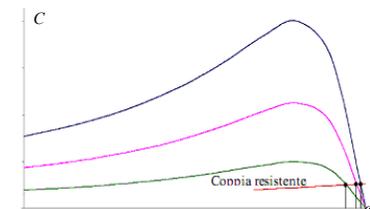
Si noti che, se il carico iniziale è troppo elevato, il motore non avrà coppia sufficiente per accelerare prima di commutare a triangolo.



7

Avviamento a tensione ridotta (soft-starter)

La corrente di avviamento può essere ridotta riducendo la tensione in fase di avviamento: la corrente si riduce proporzionalmente alla tensione, ma la caratteristica di coppia si riduce con quadrato della tensione.



Questo metodo può essere utilizzato anche per variare la velocità del motore a carico, anche se, come si può notare dalla figura, esso consente regolazioni in un campo abbastanza ristretto.

Al variare della tensione, cambia la pendenza della caratteristica di coppia nel tratto stabile: per basse tensioni, il punto di equilibrio tra coppia motrice e coppia resistente si ottiene a velocità più basse.

Non si modifica invece lo scorrimento di coppia massima, che non dipende, in prima approssimazione, dalla tensione.

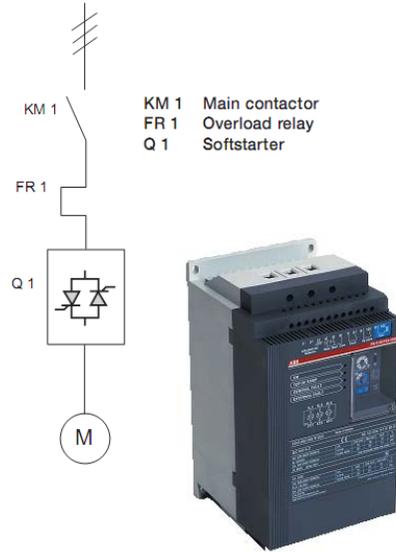
8

Avviamento a tensione ridotta (soft-starter)

La tensione di alimentazione può essere variata con un parzializzatore a tiristori, detto soft-starter.

A partire dall'avviamento, effettuato a bassa tensione, viene gradualmente aumentata la tensione (e di conseguenza la corrente e la coppia), così la macchina inizia ad accelerare.

Un altro impiego del soft-starter è la cosiddetta fermata "soft", molto utile per es. per fermare una pompa ed evitare il colpo d'ariete che si avrebbe con una fermata diretta e per fermare nastri trasportatori ed evitare una fermata troppo veloce.



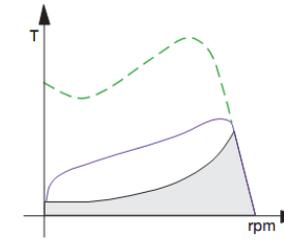
Avviamento a tensione ridotta (soft-starter)

Curva di carico tipica per pompe, ventilatori, compressori

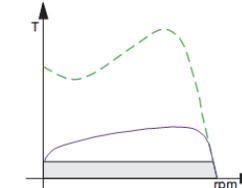
Curve di carico tipiche per nastri trasportatori

Low braking torque

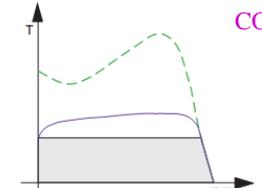
High braking torque



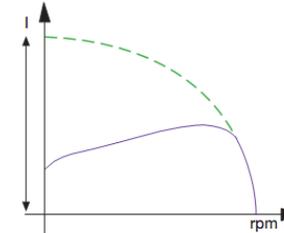
Torque/speed curve when using a softstarter



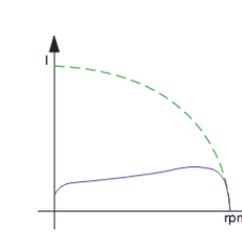
Torque/speed curve when using a softstarter



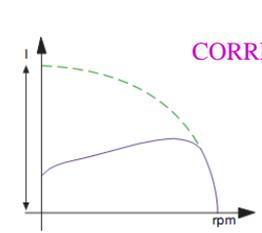
COPPIA



Current curve when using a softstarter



Current curve when using a softstarter



CORRENTE

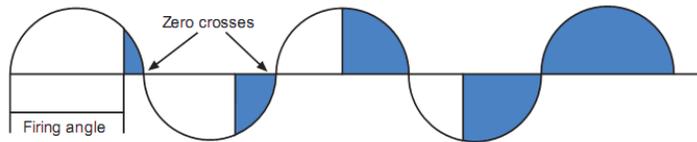
Avviamento a tensione ridotta (soft-starter)

L'accensione dei tiristori è opportunamente pilotata in modo da aumentare o diminuire il valore medio di tensione durante l'avviamento o la fermata del motore.

Durante il funzionamento normale del motore, i tiristori conducono completamente.

Naturalmente la forma d'onda si discosta molto da quella sinusoidale, ma questo non crea particolari problemi, essendo l'impiego previsto solo in transitorio.

Questo metodo è molto più semplice e molto più economico rispetto all'impiego di un inverter, ma consente variazioni di velocità molto limitate.



Start: The thyristors let part of the voltage through at the beginning and then increase it, according to the set ramp time for the start.

Stop: The thyristors are fully conducting and when soft stopping, they decrease the voltage according to the set ramp time for stop.

Off : Thyristor is non-conducting

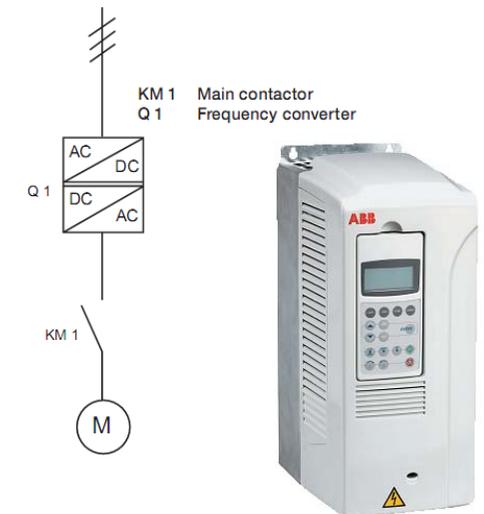
On : Thyristor is conducting

Avviamento a frequenza ridotta (inverter)

Il convertitore di frequenza è costituito principalmente da due parti: la prima converte l'AC (50 Hz) in DC e la seconda converte la DC in AC, con una frequenza variabile in un range 0÷250 Hz.

Il convertitore di frequenza è impiegato vantaggiosamente quando è necessario regolare la velocità del motore durante il suo normale funzionamento.

Attraverso la modifica della frequenza di alimentazione, si modifica la velocità di sincronismo e, con essa, l'intervallo di velocità consentito nella zona stabile della caratteristica del motore.



Avviamento a frequenza ridotta (inverter)

Le relazioni fondamentali di cui tenere conto sono:

$$V_1 \propto f \cdot \Phi$$

$$C_{MAX} \propto (V_1/f)^2$$

Dalla prima relazione si osserva che, diminuendo la frequenza e mantenendo costante la tensione di alimentazione, il flusso magnetico aumenta: ciò provocherebbe problemi di saturazione del nucleo e maggiori perdite nel ferro, legate al quadrato dell'induzione magnetica.

In realtà la diminuzione della frequenza farebbe diminuire le perdite nel ferro, ma non in modo tale da compensarne l'aumento dovuto al flusso (infatti, le perdite per correnti parassite sono proporzionali a f^2 , mentre quelle per isteresi sono proporzionali ad f).

Per evitare questo inconveniente, per f minore della frequenza nominale, vengono ridotte proporzionalmente sia la tensione che la frequenza, in modo che il rapporto V/f , proporzionale al flusso, rimanga costante (REGOLAZIONE A FLUSSO COSTANTE).

13

Avviamento a frequenza ridotta (inverter)

Quando invece f è maggiore della frequenza nominale, se si mantenesse il flusso costante, aumenterebbero le perdite nel ferro, legate alla frequenza.

Quindi si preferisce mantenere costante la tensione, in modo che rimanga invariato il prodotto $f\Phi$: si aumenta la frequenza e si diminuisce il flusso magnetico (REGOLAZIONE A TENSIONE COSTANTE).

Dalla seconda relazione si deduce che:

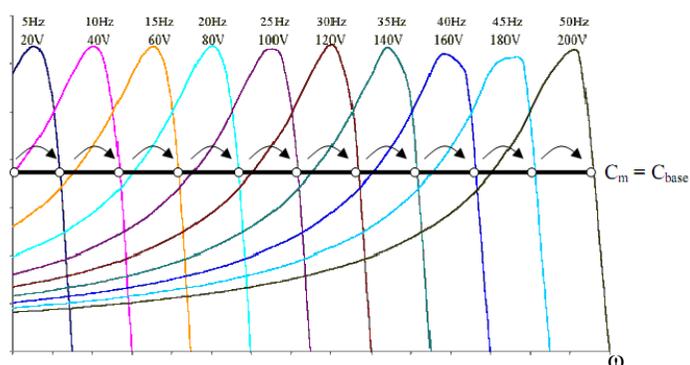
A) Per f minore della frequenza nominale, REGOLAZIONE A FLUSSO COSTANTE: anche la coppia massima si mantiene costante.

B) Per f maggiore della frequenza nominale, REGOLAZIONE A TENSIONE COSTANTE: la coppia massima diminuisce all'aumentare della frequenza (rimane costante la potenza, entro certi limiti).

14

Avviamento a frequenza ridotta (inverter)

Per $f < f_n$, vengono ridotte proporzionalmente sia la tensione che la frequenza, in modo che il rapporto V/f , proporzionale al flusso, rimanga costante (regolazione a flusso costante e a coppia massima costante):



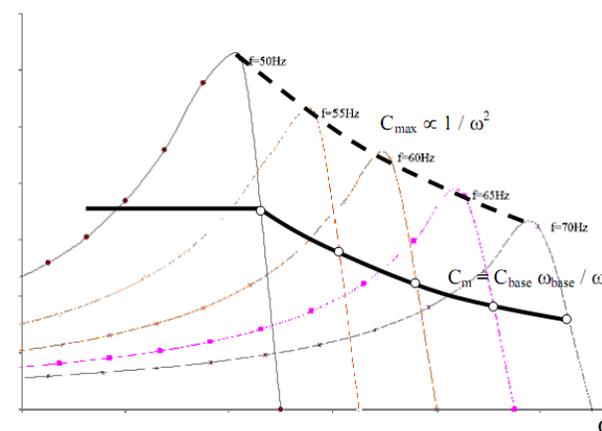
Campo di regolazione a coppia costante (regolazione $V/f = \text{cost}$)

Tale regolazione permette di far fronte, con corrente limite non superiore al valore nominale, a coppie massime di carico costanti e pari a C_m (per questo è detta, in generale, regolazione a coppia costante).

15

Variazione della frequenza di alimentazione (inverter)

Per $f > f_n$, regolazione a potenza costante:



Campo di regolazione a potenza costante ($V = \text{costante}$)

Si osserva che la coppia massima decresce col quadrato di ω , quindi non è la potenza massima che si mantiene costante.

Invece, la coppia massima di carico C_m applicabile senza superare la corrente nominale è approssimativamente proporzionale all'inverso di ω , che giustifica la definizione di funzionamento a potenza costante.

Questo funzionamento a potenza costante presenta un limite superiore di frequenza, oltre il quale la potenza decresce in modo inversamente proporzionale ad ω .

16

Avviamento a frequenza ridotta (inverter)

In questo modo il motore può compiere escursioni di velocità ben più ampie di quelle ottenibili attraverso tecniche di regolazione rotorica o tramite soft-starter.

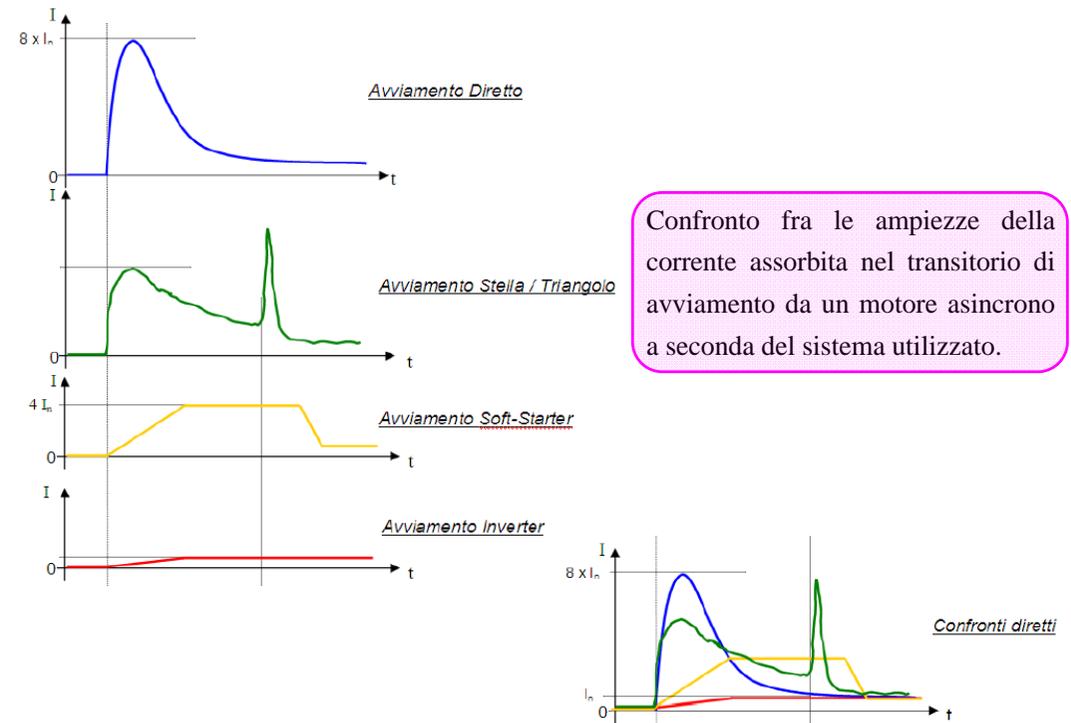
In alcune applicazioni, il convertitore di frequenza è usato unicamente per l'avviamento e la fermata del motore: in questi casi, il costo del convertitore può risultare eccessivo (ma talvolta non se ne può fare a meno, se ad es. la scelta del motore non è stata progettata adeguatamente).

Riducendo la frequenza, la coppia nominale del motore è disponibile a bassa velocità e la corrente di avviamento è relativamente bassa (perché è bassa la tensione di alimentazione), nell'intorno del valore della corrente nominale.

La regolazione a $V/f = \text{costante}$ permette di risolvere i problemi di avviamento della macchina: la corrente assorbita a velocità nulla è praticamente uguale al valore assorbito alla velocità nominale.

Ne consegue che, **usando un inverter, il motore può essere avviato sotto carico.**

17

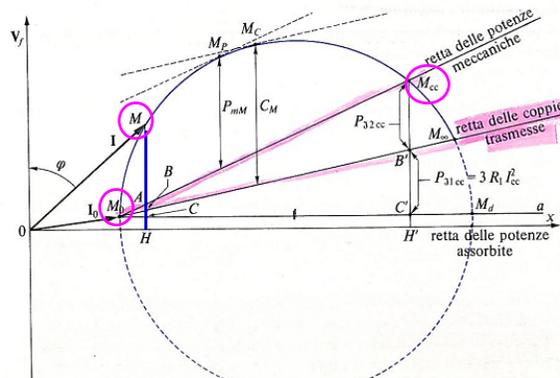


Il diagramma circolare

Riprendiamo il diagramma circolare, dove avevamo visto che il segmento OM rappresenta la corrente assorbita dal motore $I = I_1$.

Il segmento MH è pari a $I \cos \varphi$ e quindi è proporzionale alla **potenza attiva assorbita** dal motore (per tensione di alimentazione costante), mentre il segmento OH è proporzionale alla potenza reattiva assorbita dal motore.

L'**asse delle ascisse** rappresenta la retta di riferimento per la misura delle potenze assorbite dal motore e per questo è denominato **retta delle potenze assorbite** (nel funzionamento da motore).



19

Il diagramma circolare

Nel funzionamento **a vuoto** (punto M_0), la potenza attiva assorbita è rappresentata dal segmento CH ed è costituita essenzialmente dalle **perdite nel ferro** e dalle perdite meccaniche (**per attrito e ventilazione**). La potenza meccanica resa è nulla.

Nel funzionamento **a rotore bloccato** (M_{cc}), la potenza assorbita è rappresentata dal segmento $M_{cc}H'$: in queste condizioni, la potenza resa dal motore è nulla, mentre l'intera potenza assorbita viene dissipata in piccola parte dalle perdite nel ferro (segmento $C'H'$) e per la restante parte dalle perdite per effetto Joule, che diventano predominanti, dato che le correnti in gioco sono molto intense: le **perdite per effetto Joule compressive** (statore + rotore) sono quindi rappresentate dal segmento $M_{cc}C'$.

Nelle condizioni di **carico generico** (punto M), è possibile dimostrare con una similitudine che il segmento AC è proporzionale alle **perdite per effetto Joule compressive** (statore + rotore), mentre il segmento AH rappresenta le **perdite totali** del motore nelle stesse condizioni.

20

Il diagramma circolare

Di conseguenza, il segmento **MA** rappresenta la **potenza meccanica resa disponibile all'asse del motore**, ossia la potenza resa, depurata di tutte le perdite.

In questo modo, la **retta M_0M_{cc}** costituisce la retta di riferimento per la misura della potenza resa dal motore e viene perciò detta **retta delle potenze meccaniche**.

Le perdite per effetto Joule complessive si possono separare in perdite per effetto Joule di statore e di rotore: questa separazione è data dalla retta passante per il punto a scorrimento infinito (M_{∞}), per il quale le perdite per effetto Joule di rotore sono nulle (perché $R_2/s = 0$).

Si ha di conseguenza, per un generico punto di funzionamento M, che il segmento **CB** rappresenta le perdite per effetto Joule di statore, mentre il segmento **BA** rappresenta le perdite per effetto Joule di rotore.

Ne consegue che la potenza P_{em} trasmessa da statore a rotore è rappresentata dal segmento BM.

21

Il diagramma circolare

Essendo: $P_{em} = C_{em}\omega_0$

si ha che il segmento BM è anche proporzionale alla coppia elettromeccanica C_{em} .

Per questo motivo, la **retta M_0M_{∞}** è detta **retta delle coppie trasmesse**.

Si noti che P_{em} dovrebbe comprendere anche le perdite meccaniche per attrito e ventilazione, che invece si ritengono comprese nel segmento CH.

Dal diagramma circolare si osserva infine che il fattore di potenza $\cos\phi$ varia al variare della corrente assorbita dal motore, una volta fissate le proporzioni del diagramma circolare.

Il fattore di potenza dipende quindi, oltre che dalla corrente assorbita, anche dai parametri costruttivi della macchina, che determinano le proporzioni del diagramma circolare, ossia i valori della corrente a vuoto I_0 e della corrente di avviamento I_{cc} (a rotore bloccato), con i rispettivi sfasamenti rispetto alla tensione V.

22

Il generatore asincrono

È possibile utilizzare la macchina asincrona anche come generatore di energia, in due modalità:

collegata a una rete di potenza infinita;

collegata a un carico isolato.

In generale, per funzionare come generatore, la macchina asincrona deve lavorare nella zona in cui la velocità del suo rotore è maggiore di quella del campo magnetico rotante di statore:

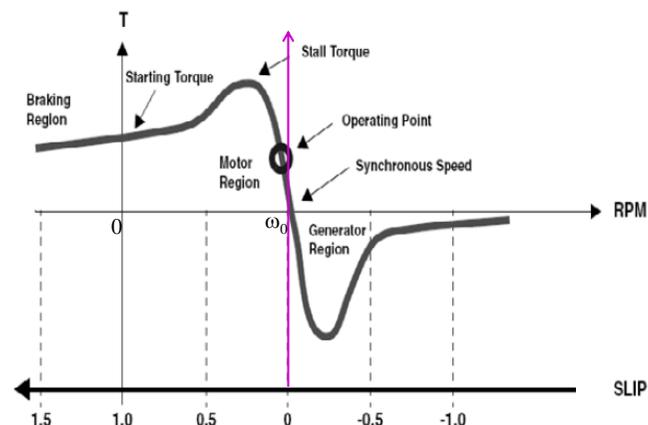
$$\omega_r = (1 - s)\omega_0 \quad \Rightarrow \quad \omega_r > \omega_0 \Rightarrow s < 0$$

Rimangono valide tutte le formule, tenendo conto che lo **scorrimento è sempre negativo**, per cui, ad es., si inverte il segno di E_2 , dato che:

$$f.e.m. \text{ indotta a rotore in movimento } (s \neq 1) \quad E_2 = s E_{20}$$

23

Il generatore asincrono



- primo quadrante ($0 < \omega_m < \omega_s$ e quindi $0 < s < 1$) funzionamento da motore;
- secondo quadrante ($\omega_m < 0$ e quindi $s > 1$) funzionamento da freno;
- quarto quadrante ($\omega_m > \omega_s$ e quindi $s < 0$) funzionamento da generatore.

24

Il generatore asincrono

Cambiano di verso anche le correnti di rotore e di statore.

Quel che non cambia (o quasi) è la corrente a vuoto I_0 , perché la macchina deve continuare ad assorbire dalla rete a cui è collegata la corrente necessaria per generare il flusso principale Φ .

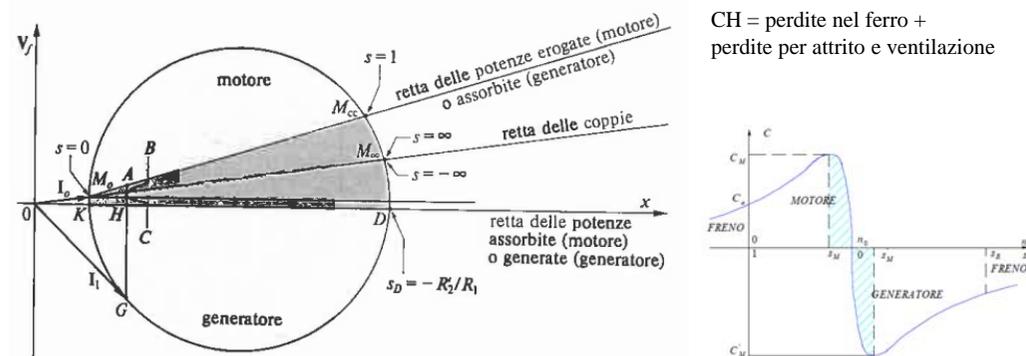
Quindi, in pratica, si invertono di segno solo le componenti attive delle correnti di rotore e statore, mentre non cambia la componente reattiva.

Naturalmente la macchina, per poter fornire effettivamente potenza attiva, deve prima sopperire alle proprie perdite meccaniche (per attrito e ventilazione) e nel ferro: sul diagramma circolare, occorre superare la velocità corrispondente al punto K (nella figura seguente).

Le ordinate del cerchio rispetto all'asse x sono proporzionali alla potenza elettrica fornita: l'asse delle x prende il nome di **retta delle potenze elettriche generate** (nel funzionamento da generatore).

25

Il generatore asincrono



Mentre la retta che va dal punto $s=0$ al punto $s=1$ (retta M_0M_{cc}) prende il nome di **retta delle potenze meccaniche assorbite**.

Sulla caratteristica meccanica, risulta stabile solo il tratto tra coppia nulla e coppia massima (in valore assoluto), come nel funzionamento da motore.

26

Il generatore asincrono

Caratteristica fondamentale del generatore asincrono è di assorbire potenza reattiva dalla rete a cui è collegato: la rete impone il valore di tensione e frequenza e la macchina asincrona si adegua (entro certi limiti) alle condizioni imposte dalla rete stessa e dal motore primo.

Quando invece la macchina è collegata a un carico isolato, la potenza reattiva induttiva deve essere fornita da una batteria di condensatori.

L'impiego di un generatore asincrono è spesso preferito ad un generatore sincrono nel caso di una fonte di energia con notevole discontinuità oppure nel caso in cui venga richiesta una notevole affidabilità assieme ad una ridotta necessità di manutenzione (per esempio in presenza di ambienti particolarmente disagiati e/o pericolosi.)

La mancanza di un avvolgimento rotorico isolato, di contatti striscianti e di regolatori elettronici, rendono il generatore asincrono particolarmente adatto per essere impiegato in mini centrali (< 1000 kW) idroelettriche non presidiate.

27

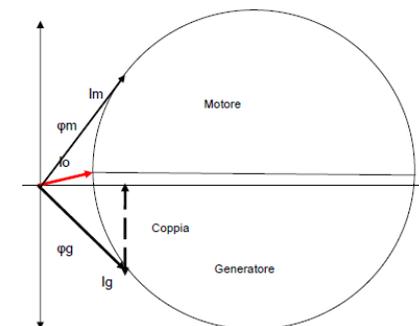
Il generatore asincrono

I principali vantaggi del generatore asincrono rispetto al sincrono sono risiedono quindi nella sua maggior semplicità di costruzione e nei minori costi.

Un altro impiego del generatore asincrono, soprattutto in passato (anni '80 e '90), è nel campo delle turbine eoliche.

Il generatore asincrono funziona a velocità praticamente fissa, a meno che si interponga un inverter tra di esso e la rete.

Nella macchina asincrona si osserva che, a parità di corrente (assorbita come motore o erogata come generatore), l'angolo φ_m (motore) è inferiore all'angolo φ_g (generatore), ovvero il fattore di potenza nel funzionamento come generatore risulta sempre inferiore al fattore di potenza nel funzionamento come motore.



28

Il generatore asincrono

Esempio di generatore asincrono trifase installato in una mini centrale idroelettrica (215 kW, 400 V, 12 poli, 504 giri/min, raffreddamento con scambiatore aria-acqua).

ELECTRO ADDA SPA COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE BEVERATE DI BRIVIO (LC) ITALY			
GENERATORE ASINCRONO TRIFASE			
Tipo	G-FW355L	Matr.	2014
IEC 60034 - 1	IP 55	IC 7A1W7	Serv 51
kW 215	Volt 400	Hz 50	Amp 393
cos φ 0.79	rend. 94.9	Coll. TR	Is. Cl. F/B
rpm 504	rpm max 1100	MR 26	PE50
MILLIWATT - NAVIGLIACCIO 2			
Tipo 6324-C3	Intervallo di lubrificazione 2000 ore		
Q.ta 71 gr	Grasso tipo SKF LGHP2		



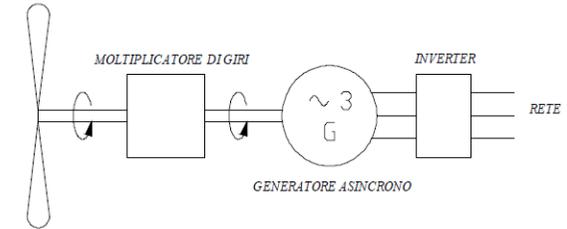
29

Il generatore asincrono

Per eliminare il limite della velocità fissa, la macchina asincrona può essere interfacciata con la rete interponendo un inverter, che ha il compito di convertire tensione e corrente in uscita dallo statore (che non risultano a frequenza fissa) alla frequenza imposta dalla rete. In questo modo è possibile uno sfruttamento della risorsa eolica sia per velocità maggiori che minori di quella imposta dalla frequenza di rete.

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

- elevato costo dell'inverter, che deve avere una potenza nominale corrispondente a quella del generatore;
- necessità di appositi filtri in uscita, per limitare le armoniche immesse in linea;
- abbassamento del rendimento complessivo del sistema.

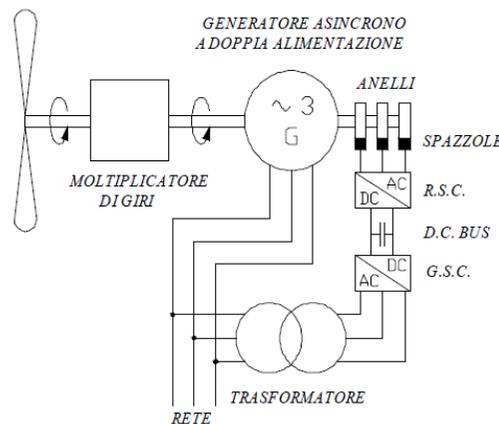


30

Double Fed Induction Generator (DFIG)

Attualmente, in campo eolico, si può utilizzare il *Double Fed Induction Generator* (DFIG), una macchina asincrona doppiamente collegata alla rete elettrica: dallo statore direttamente verso la rete e dal rotore tramite un apposito convertitore statico.

Il rotore è dotato di un avvolgimento trifase collegato a stella, simile a quello di statore: i capi delle fasi vengono connessi ad anelli conduttori, calettati sull'albero motore, ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole.

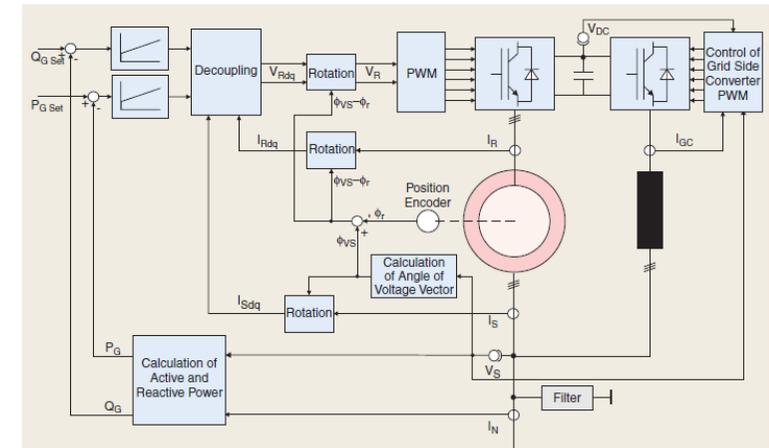


31

Double Fed Induction Generator (DFIG)

Il circuito di rotore è collegato a un convertitore elettronico di potenza, in grado di modificare sia la frequenza che la fase delle correnti di rotore: in questo modo il convertitore consente di variare il fattore di potenza e quindi di assorbire o produrre potenza reattiva.

In pratica il convertitore permette una compensazione dinamica della potenza reattiva, simile a quella che si può ottenere con un generatore sincrono.



32

Double Fed Induction Generator (DFIG)

La tensione di rotore può essere utilizzata come variabile di controllo per la regolazione della potenza attiva e reattiva generata dalla macchina.

La potenza nominale del convertitore elettronico non risulta essere quella nominale del generatore, bensì quella che fluisce attraverso il rotore; tale potenza è molto inferiore (valori tipici sono intorno al 30% di quella nominale del generatore), 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 sono intorno 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.

33

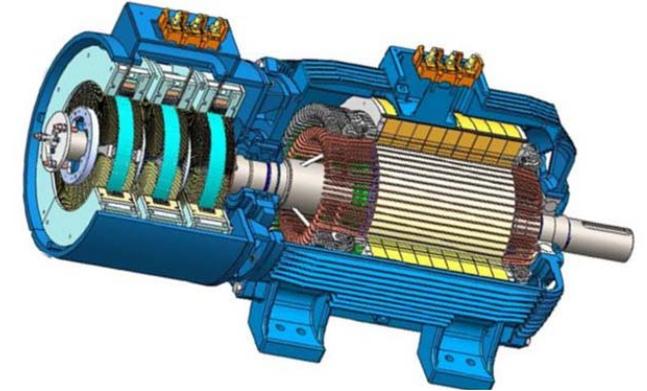
Double Fed Induction Generator (DFIG)

Il **punto delicato** dei DFIG è costituito dal **rotore avvolto ad anelli**, che richiede specifica manutenzione.

Una particolarità di questa macchina è data dal fatto che l'avvolgimento di rotore ha un numero di spire decisamente più elevato rispetto allo statore (2 o 3 volte): in questo modo la f.e.m. di rotore è molto più alta di quella di statore.

Di conseguenza, sono più basse le correnti di rotore.

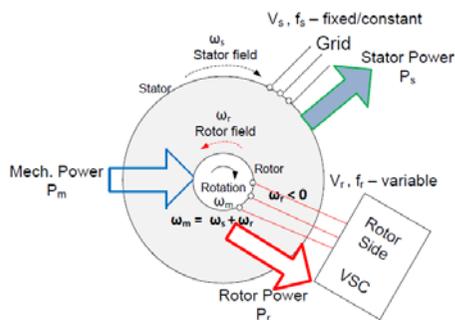
Sono però necessari sistemi di protezione del convertitore dalle sovratensioni (crowbar).



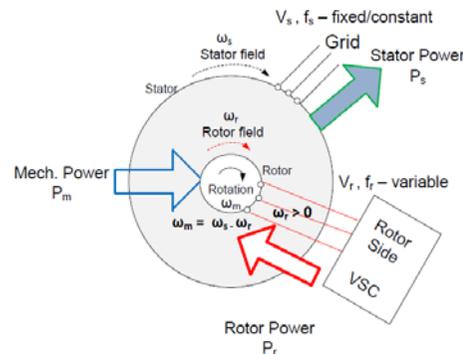
34

Double Fed Induction Generator (DFIG)

Funzionamento super-sincrono:



Funzionamento sub-sincrono:



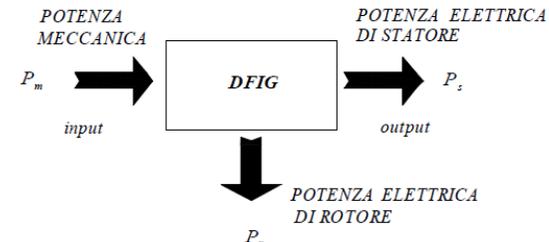
C. Subramanian, *Grid connected Doubly Fed Induction Generator based wind turbine under LVRT*, Tesi di dottorato, 2014, Università di Bologna

35

Double Fed Induction Generator (DFIG)

Nel caso di funzionamento super-sincrono, il rotore gira ad una velocità maggiore rispetto a quella di sincronismo. Per una macchina asincrona standard, questa condizione corrisponde già al funzionamento come generatore.

Nel DFIG, 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.



La potenza reattiva del rotore è induttiva

$$\omega_r > \omega_0 \Rightarrow s < 0$$

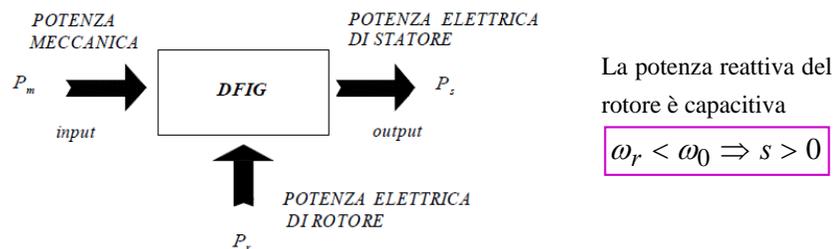
Flussi di potenza nel DFIG nel caso di funzionamento super-sincrono ($s < 0$)

T. Pradella, *Generatore asincrono a doppia alimentazione*, Tesi di laurea, a.a. 2009/10, Università di Padova

36

Double Fed Induction Generator (DFIG)

Nel caso di funzionamento sub-sincrono, il rotore gira ad una velocità minore rispetto a quella del campo rotante di statore. Normalmente, per una macchina asincrona, questa condizione 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 questo modo è possibile ottenere un flusso di potenza uscente dallo statore.



Flussi di potenza nel DFIG nel caso di funzionamento sub-sincrono ($s > 0$)