

AZIONAMENTI CON MOTORE ASINCRONO

II

LEGGE V/f (semplificazione)

La legge V/f (a vuoto e a carico) considerata in precedenza mantiene il flusso di statore "perfettamente" costante ma ha alcune controindicazioni pratiche:

- è complicata da realizzare a causa della sua complessità,
- è fortemente dipendente dai parametri del motore i quali non sono mai noti con precisione assoluta.

Ci si accontenta allora di utilizzare delle leggi più semplici ciascuna delle quali però ha delle controindicazioni.

LEGGE V/f

(semplice proporzionalità)

Una prima soluzione è quella di scegliere una semplice legge di proporzionalità

$$V_s = K \omega_s$$

dove

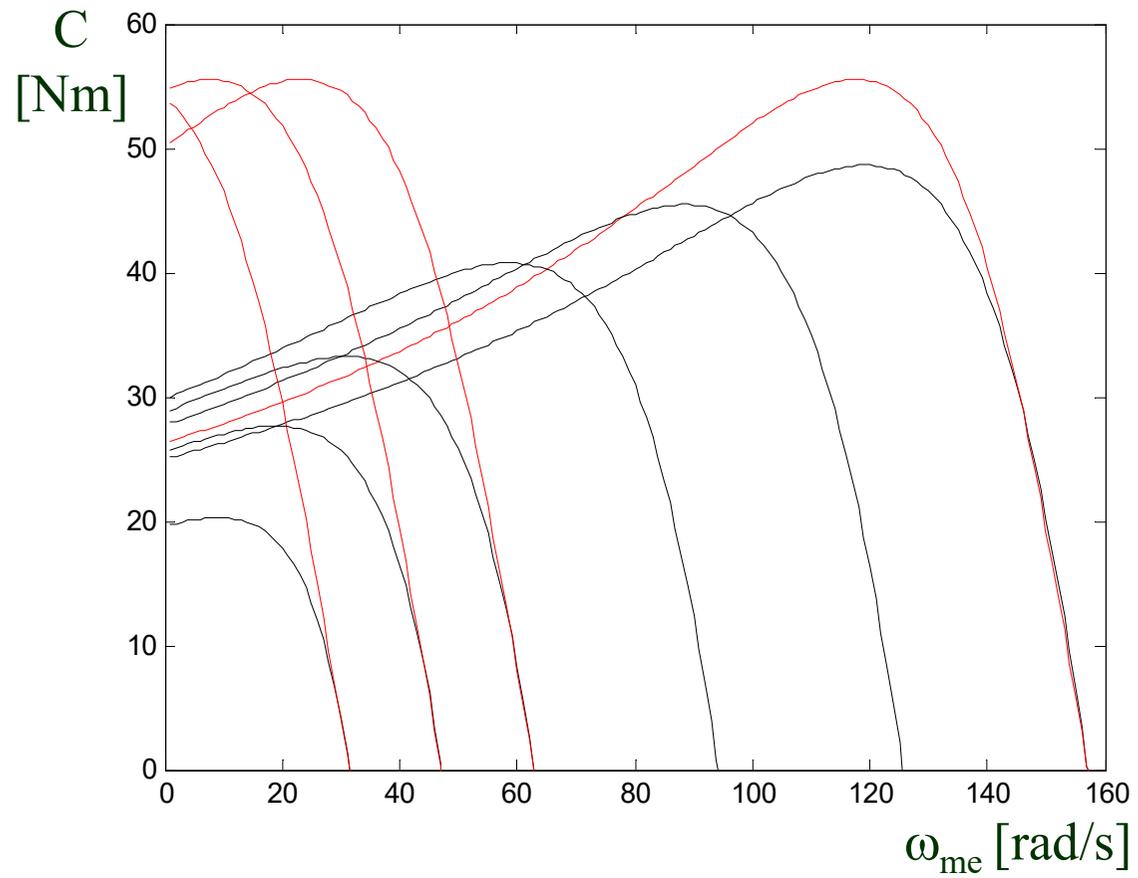
$$K = \frac{V_{sN}}{\omega_{sN}}$$

Legge molto semplice che però a bassa velocità comporta una diminuzione del flusso di statore a causa della c.d.t. sulla resistenza di statore (basta osservare il circuito equivalente a “Γ”).

Nella figura successiva sono riportate:

- in rosso, le caratteristiche di coppia al variare di ω_s con flusso di statore costante;
- in nero, le caratteristiche di coppia al variare di ω_s quando si usi la legge V/f semplicemente proporzionale. Si vede chiaramente l'effetto della c.d.t. sulla R_s a basse frequenze (velocità).

LEGGE V/f (semplice proporzionalità)

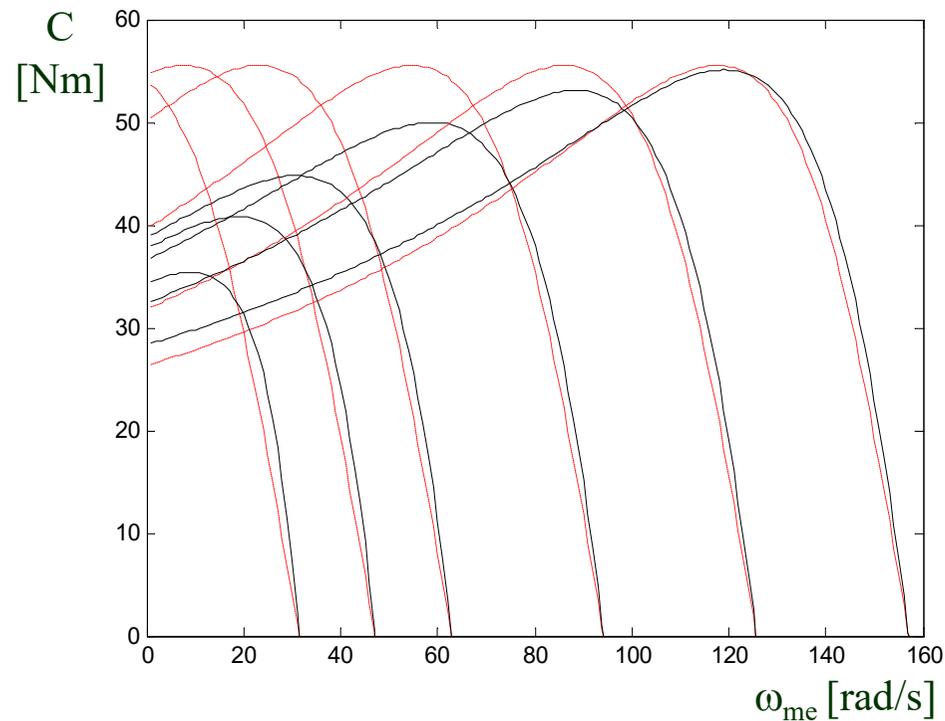


LEGGE V/f (con “boost” di tensione)

Per compensare la c.d.t. sulla R_s si può introdurre una legge del tipo

$$V_s = K\omega_s + V_{s0}$$

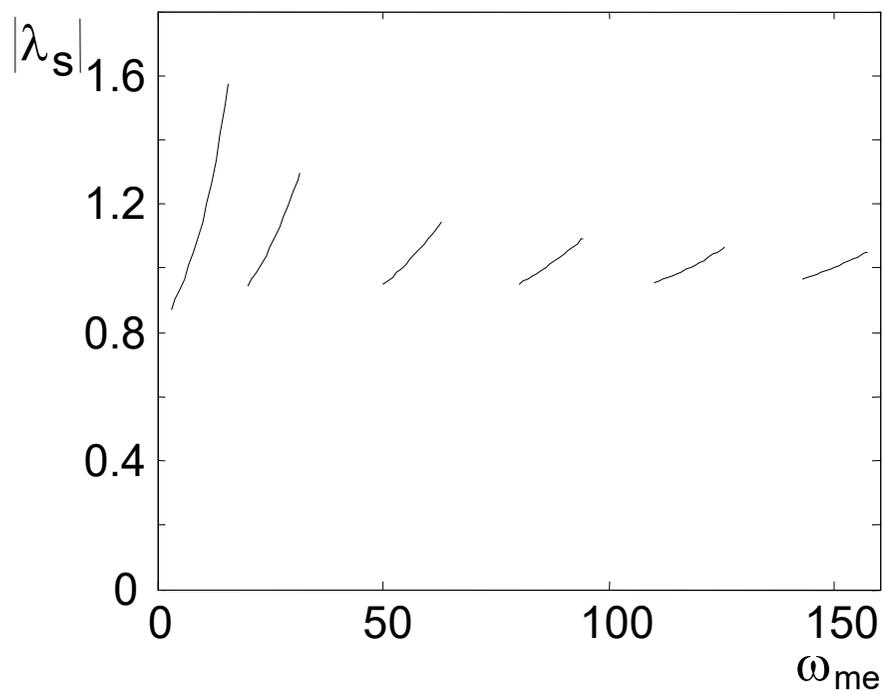
Il “boost” di tensione V_{s0} agisce soprattutto a basse velocità.



Il grafico mostra le caratteristiche di coppia (in nero linea continua) al variare di ω_s con questa legge V/f.

LEGGE V/f (con “boost” di tensione)

Questa legge però ha una importante controindicazione:
una notevole differenza del valore dell'ampiezza del flusso fra il
funzionamento a vuoto e a carico (vedi grafico sottostante).



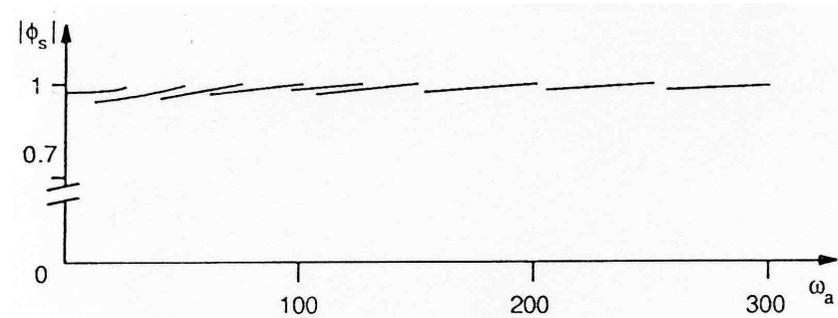
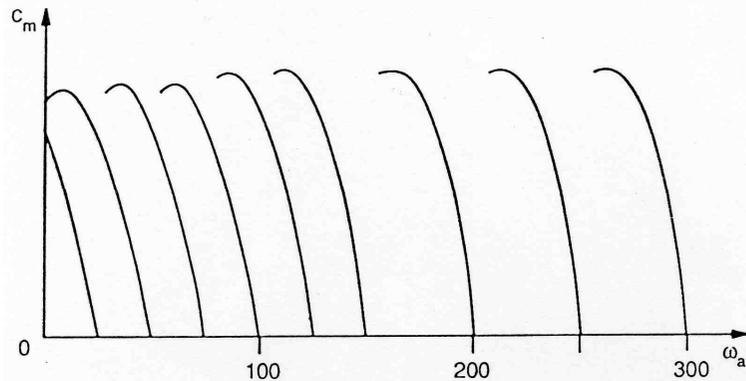
LEGGE V/f

(con compensazione di corrente)

Per cercare di porre rimedio al difetto del “boost” di tensione si può usare una legge in cui il “boost” di tensione sia proporzionale alla corrente di statore, così come è in realtà la c.d.t. su R_s .

$$V_s = K\omega_s + K_i I_s$$

Al posto della I_s conviene usare la I_{dc} , in quanto essa, di solito, è già misurata per motivi di protezione dell’invertitore.



CONTROLLO DI FLUSSO E COPPIA

Si è visto che l'adozione di leggi V/f semplificate comporta variazioni dell'ampiezza del flusso di statore.

Ma anche la legge V/f corretta non garantisce appieno la costanza del flusso che può subire delle variazioni a causa di variazione del carico, variazioni della tensione di linea, variazioni dei parametri del motore.

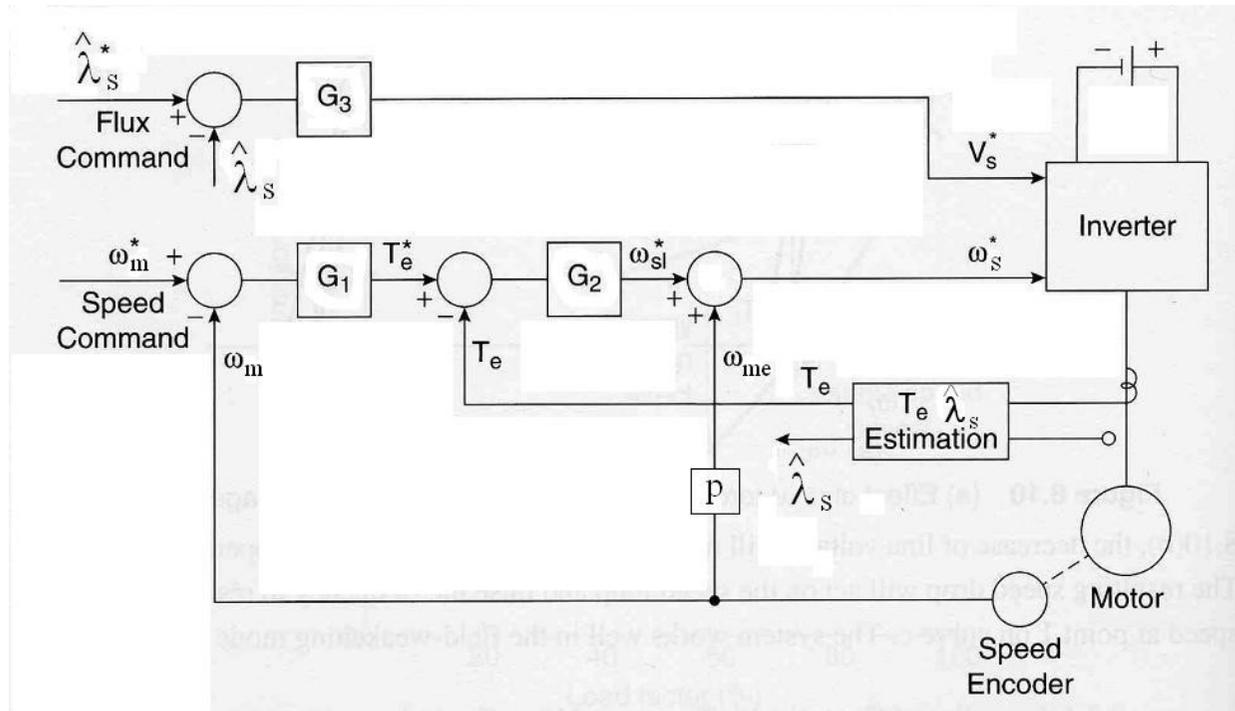
Nel controllo di scorrimento visto precedentemente, nelle circostanze suddette, varia il valore g_c del legame tra pulsazione di scorrimento e coppia (ipotizzato costante).

Un modo per superare questi problemi è quello di adottare uno schema con due anelli: uno di flusso ed uno di coppia, all'esterno di quest'ultimo si realizza poi l'anello di velocità.

I valori di flusso e coppia da portare in reazione possono venire stimati per mezzo del modello di tensione del motore asincrono.

Se il controllo di coppia chiede un aumento della pulsazione ω_s , mantenendo costante il comando del flusso, consegue un aumento proporzionale della tensione V_s attraverso il controllo del flusso. Quando V_s raggiunge e supera il valore nominale la tensione deve rimanere costante e si entra nella modalità con indebolimento di campo.

CONTROLLO DI FLUSSO E COPPIA

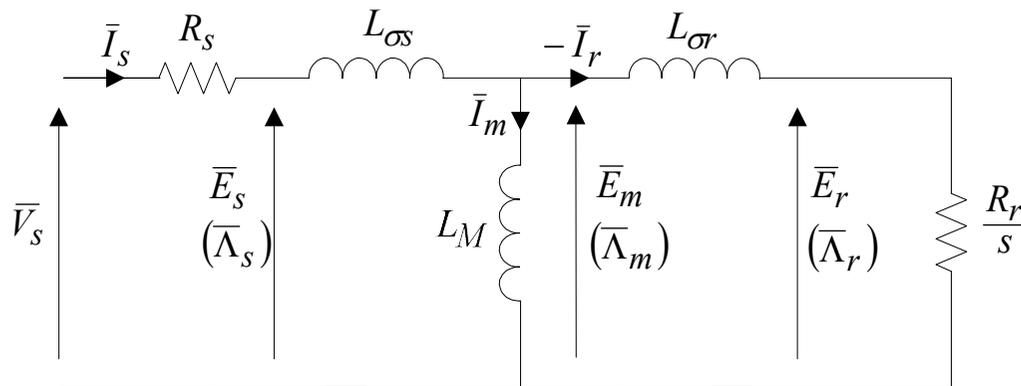


In indebolimento di campo il flusso di riferimento deve essere diminuito man mano che la velocità aumenta.

Poiché il controllo del flusso è più lento di quello di coppia, quando sia richiesta, nel controllo scalare, una variazione di ω_s , inizialmente si ha una diminuzione del flusso finché esso non viene compensato dal controllore del flusso (più lento di quello di coppia). Questa interazione rende lenta anche la risposta di coppia (problema superato con il controllo ad orientamento di campo).

MOTORE ASINCRONO ALIMENTATO A CORRENTE IMPRESSA

Il funzionamento di un motore asincrono alimentato con una terna impressa di correnti sinusoidali di ampiezza costante può essere analizzato utilizzando il circuito equivalente a “T”.



Si noti che l'impedenza di statore è influente sul funzionamento dal momento che è percorsa da una corrente impressa.

La corrente di magnetizzazione è data da

$$\bar{I}_m = \bar{I}_s \frac{1 + j\omega_{sce} \frac{L_{\sigma r}}{R_r}}{1 + j\omega_{sce} \tau_r}$$

per una data corrente di statore, la corrente di magnetizzazione dipende dalla pulsazione di scorrimento.

MOTORE ASINCRONO ALIMENTATO A CORRENTE IMPRESSA

L'espressione della coppia è
$$C = \frac{3}{2} p \frac{1}{R_r} \frac{\omega_{sce} L_M^2}{1 + (\omega_{sce} \tau_r)^2} I_s^2$$

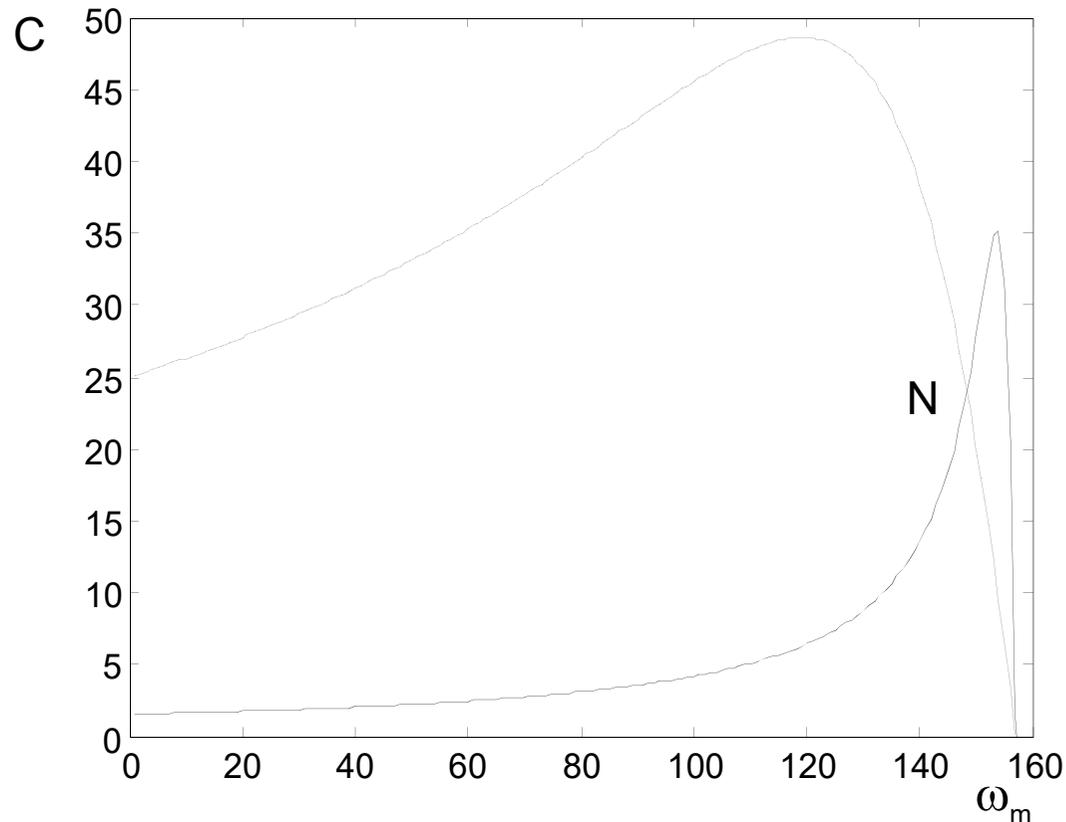
Pulsazione elettrica di scorrimento di coppia massima
$$\omega_{sce,M} = \frac{1}{\tau_r}$$

il corrispondente
valore della coppia
$$C_M = \frac{3}{2} p \frac{L_M^2}{2L_r} I_s^2 = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_s} \frac{1-\sigma}{2\sigma} \sigma L_s^2 I_s^2$$

La seconda relazione mostra che la coppia massima si raggiunge in corrispondenza di una pulsazione di scorrimento molto più piccola di quella relativa al funzionamento a tensione impressa.

MOTORE ASINCRONO ALIMENTATO A CORRENTE IMPRESSA

Caratteristica meccanica di un motore asincrono alimentato con la corrente nominale.



A titolo di confronto è riportata anche la caratteristica meccanica del motore alimentato con la tensione nominale e il punto N di funzionamento nominale.

MOTORE ASINCRONO ALIMENTATO A CORRENTE IMPRESSA

Si supponga che l'ampiezza della corrente impressa nello statore del motore sia uguale al valore nominale $I_{s,N}$. Tale valore è 3-7 volte maggiore della corrente di magnetizzazione nominale. I valori più elevati caratterizzano i motori più "tradizionali" mentre i valori inferiori si hanno per motori usati nei controlli vettoriali (orientamento di campo).

Perciò il valore massimo della coppia per l'alimentazione a corrente impressa è inferiore a quello relativo al motore alimentato a tensione impressa (entrambi ai valori nominali) per motori usati nel controllo vettoriale (come è quello dell'esempio precedente). Viceversa, è superiore nel caso di motori "tradizionali".

In ogni caso l'analisi della caratteristica meccanica mostra che il punto N cade nel tratto a pendenza positiva (tratto instabile) della caratteristica e quindi il motore non può funzionare a corrente di statore costante in questo punto (se non opportunamente controllato).

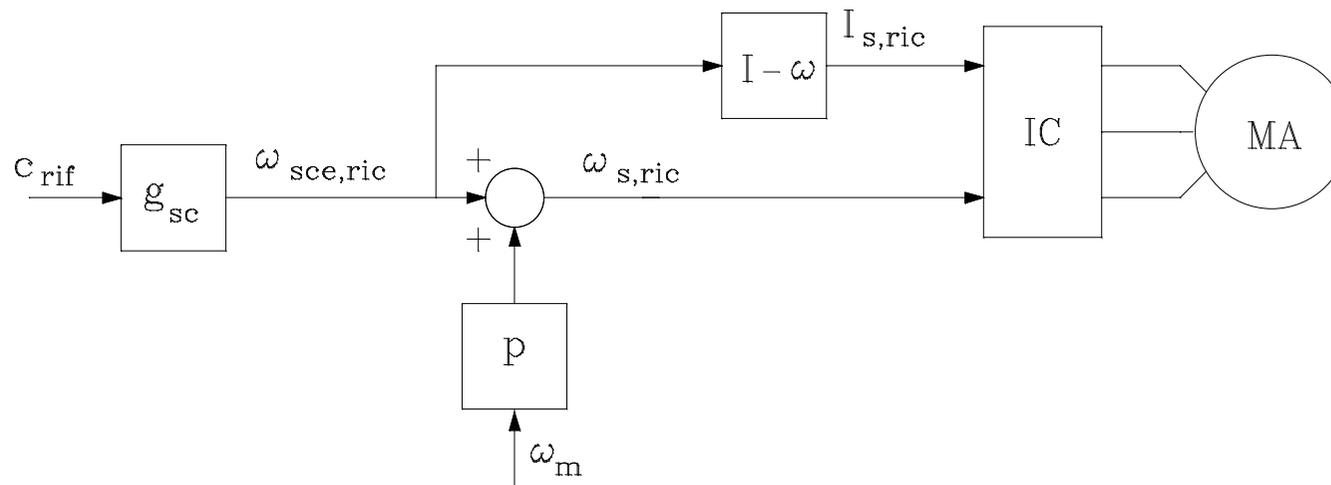
MOTORE ASINCRONO ALIMENTATO A CORRENTE IMPRESSA

- Nel tratto che va dal punto N fino al punto di funzionamento a vuoto, ossia per velocità di scorrimento $\omega_{sc} = \omega_{scc}/p$ (p =numero di coppie polari) che vanno da $\omega_{sc,N}$ a zero (dove $\omega_m = \omega_s/p$), la corrente di magnetizzazione del motore è maggiore del valore nominale (vedi la relazione I_m-I_s precedente). Ciò porta il circuito magnetico a lavorare in saturazione con un conseguente aumento delle perdite magnetiche. Pertanto il funzionamento del motore asincrono alimentato con la corrente nominale non è accettabile a meno che l'ampiezza della corrente non venga variata in funzione della pulsazione di scorrimento in modo che la corrente di magnetizzazione non superi il valore nominale. Questa tecnica di controllo del motore asincrono è detta $I-\omega$. Si noti che quando il circuito magnetico lavora in saturazione l'induttanza di magnetizzazione si riduce e la caratteristica meccanica effettiva del motore si abbassa.
- Nel tratto cosiddetto stabile della caratteristica, ossia per velocità di scorrimento che vanno da $\omega_{sc,M}$ a zero, il motore possederebbe un'ottima regolazione di velocità in quanto la ripida pendenza della caratteristica comporta una piccola variazione di velocità da vuoto a carico.

CONTROLLO DI COPPIA

Si consideri un azionamento formato da un motore asincrono trifase alimentato da un invertitore di corrente (o da un invertitore di tensione controllato in corrente).

La tecnica $I-\omega$ consente di controllare la coppia del motore per mezzo del seguente schema costruttivo:



IC rappresenta l'alimentazione in corrente e g_{sc} è un blocco statico.

Nel seguito si suppone che IC imponga esattamente ed istantaneamente in uscita i valori di ω_s e I_s richiesti.

CONTROLLO DI COPPIA

La pulsazione elettrica di scorrimento delle correnti è determinata in funzione della coppia che si desidera far sviluppare al motore mentre l'ampiezza delle correnti è calcolata in modo da mantenere il flusso di magnetizzazione costante e pari al valore nominale.

La pulsazione delle correnti è ottenuta sommando la pulsazione elettrica di scorrimento alla velocità del motore in unità elettriche.

Lo schema richiede pertanto la conoscenza della velocità del motore anche se non esegue un controllo di velocità.

LEGGE I- ω

Corrente di magnetizzazione che mantiene il flusso di magnetizzazione costante e pari al valore nominale:

$$I_{mN} = \frac{\Lambda_{mN}}{L_M}$$

Legge I- ω

$$I_s = \frac{1}{L_M} \sqrt{\frac{1 + (\omega_{sce} \tau_r)^2}{1 + \left(\omega_{sce} \frac{L_{\sigma r}}{R_r} \right)^2}} \Lambda_{mN}$$

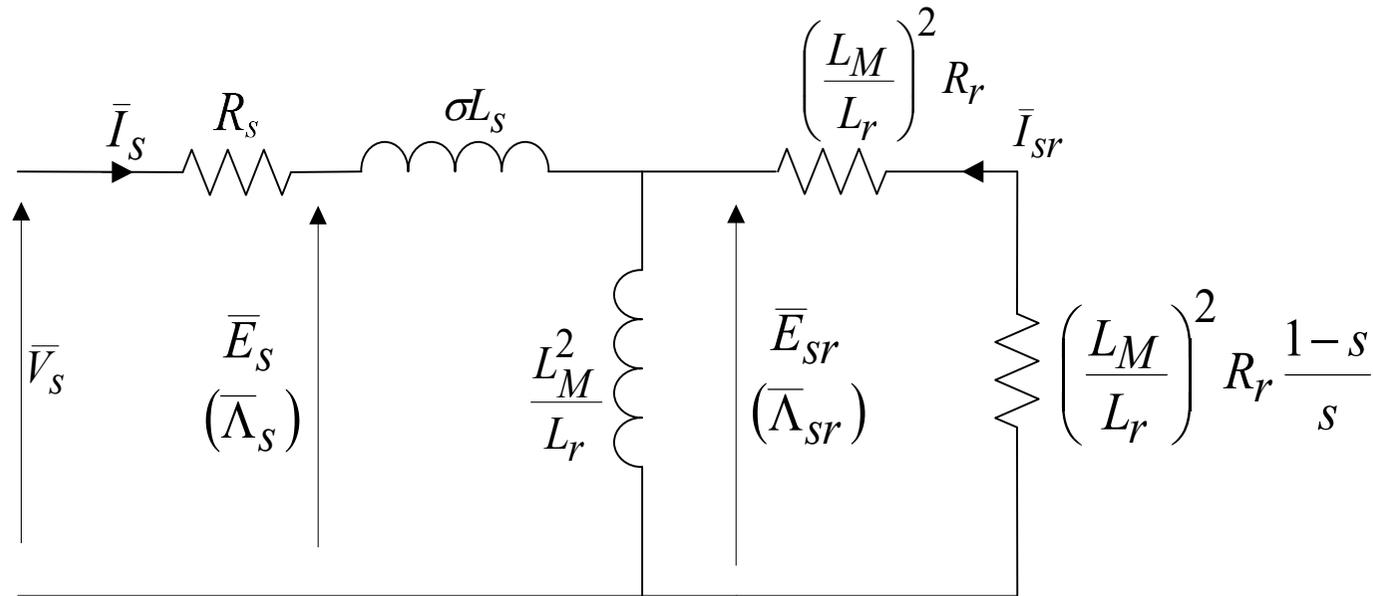
Per semplificare la relazione precedente e osservando che in pratica il flusso di rotore ha un'ampiezza poco diversa da quella del flusso di magnetizzazione

$$\bar{A}_r = L_{\sigma r} \bar{I}_{sr} + \bar{A}_m = \bar{A}_{\sigma r} + \bar{A}_m$$

si può operare in modo da mantenere costante l'ampiezza del flusso di rotore anzichè del flusso di magnetizzazione.

LEGGE I- ω

Il calcolo della legge I- ω in queste condizioni può essere eseguito per mezzo del circuito equivalente del motore asincrono a “T”-rovescia



Espressione della corrente di statore in funzione del flusso di rotore

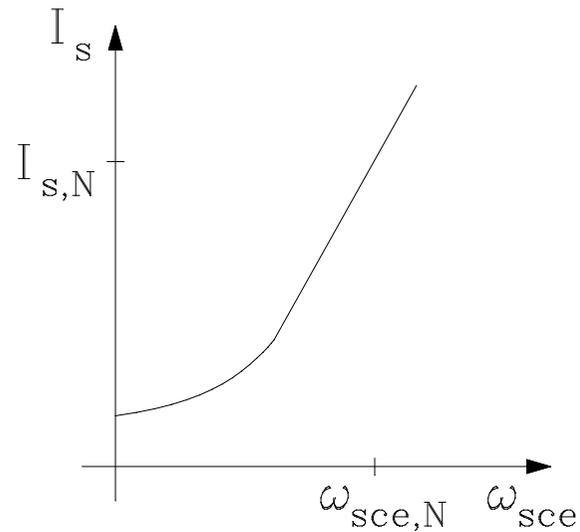
$$\bar{I}_s = \frac{L_M / L_r}{L_M^2 / L_r} \bar{\Lambda}_r + j \frac{\omega_{sce} \tau_r}{L_M} \bar{\Lambda}_r = \frac{\bar{\Lambda}_r}{L_M} (1 + j \omega_{sce} \tau_r)$$

LEGGE I- ω

Ampiezza della corrente di statore necessaria per mantenere il flusso di rotore al valore nominale Λ_{rN}

$$I_s = \frac{1}{L_M} \sqrt{1 + (\omega_{sce} \tau_r)^2} \Lambda_{rN}$$

Questa è la legge I- ω

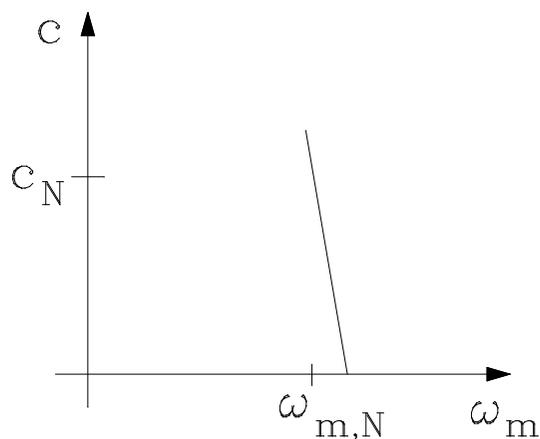


COPPIA ELETTROMAGNETICA

Espressione della coppia elettromagnetica in funzione del flusso di rotore

$$C = \frac{3}{2} p \frac{\omega_{sce}}{R_r} A_r^2$$

Mantenendo il flusso di rotore costante, la coppia risulta proporzionale alla pulsazione di scorrimento ω_{sce} e la caratteristica meccanica del motore diventa lineare.



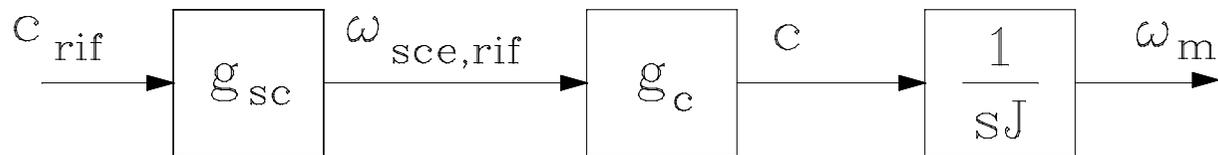
Ciò comporta che la curva di coppia non ha massimo e quindi non c'è il pericolo di incorrere nell'instabilità statica.

Quindi il blocco g_{sc} dello schema del controllo di coppia è un guadagno costante pari a

$$G_{sc} = \frac{R_r}{\frac{3}{2} p A_{rN}^2}$$

SCHEMA A BLOCCHI DELL'AZIONAMENTO

Il controllo di coppia può essere rappresentato con lo schema a blocchi di funzionamento seguente



g_c è un blocco statico che esprime la relazione intercorrente tra la coppia e la pulsazione elettrica di scorrimento.

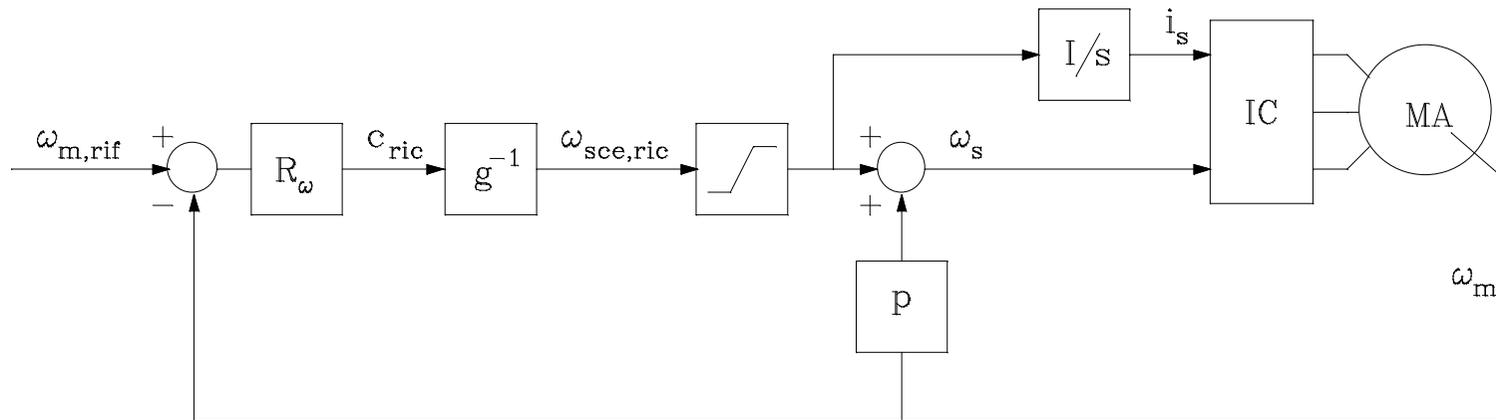
Nell'ipotesi che la dinamica di ω_s sia sufficientemente lenta (compatibile con il controllo scalare) e che il flusso di rotore sia pari al valore nominale si ha

$$g_c = \frac{3}{2} p \frac{A_{rN}^2}{R_r} = G_{sc}^{-1}$$

in tal caso

$$c = c_{rif}$$

CONTROLLO DI VELOCITA' A CATENA CHIUSA



Il funzionamento di questo schema è analogo a quello del controllo di scorrimento V/f. In questo caso

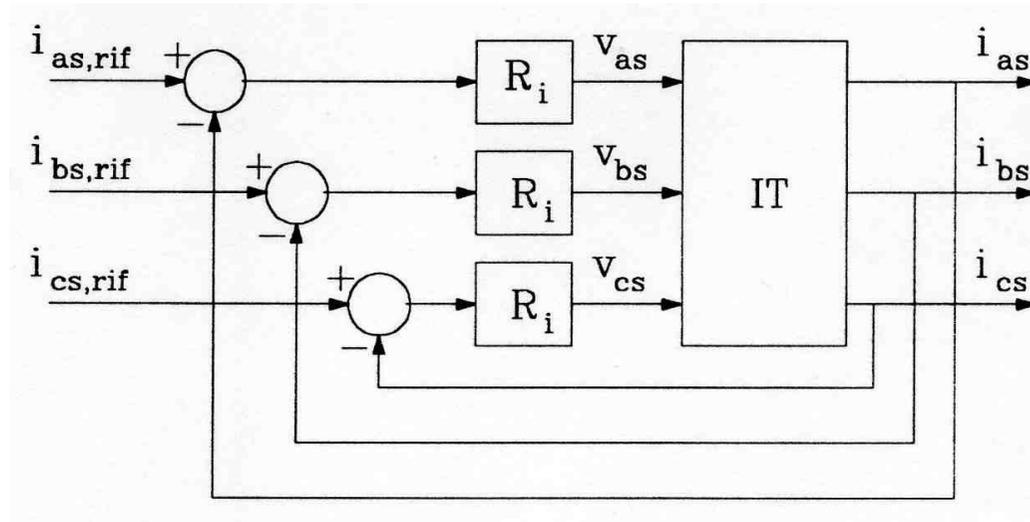
$$g^{-1} = \frac{R_r}{\frac{3}{2} p A_{rN}^2}$$

INVERTITORE “IC”

Negli schemi con motore alimentato a corrente impressa compare un blocco “IC” (Invertitore di Corrente). Che cosa è e come si realizza.

IC è un invertitore che si comporta come un generatore di corrente: impone la corrente all’uscita e la tensione è conseguenza del tipo di carico applicato.

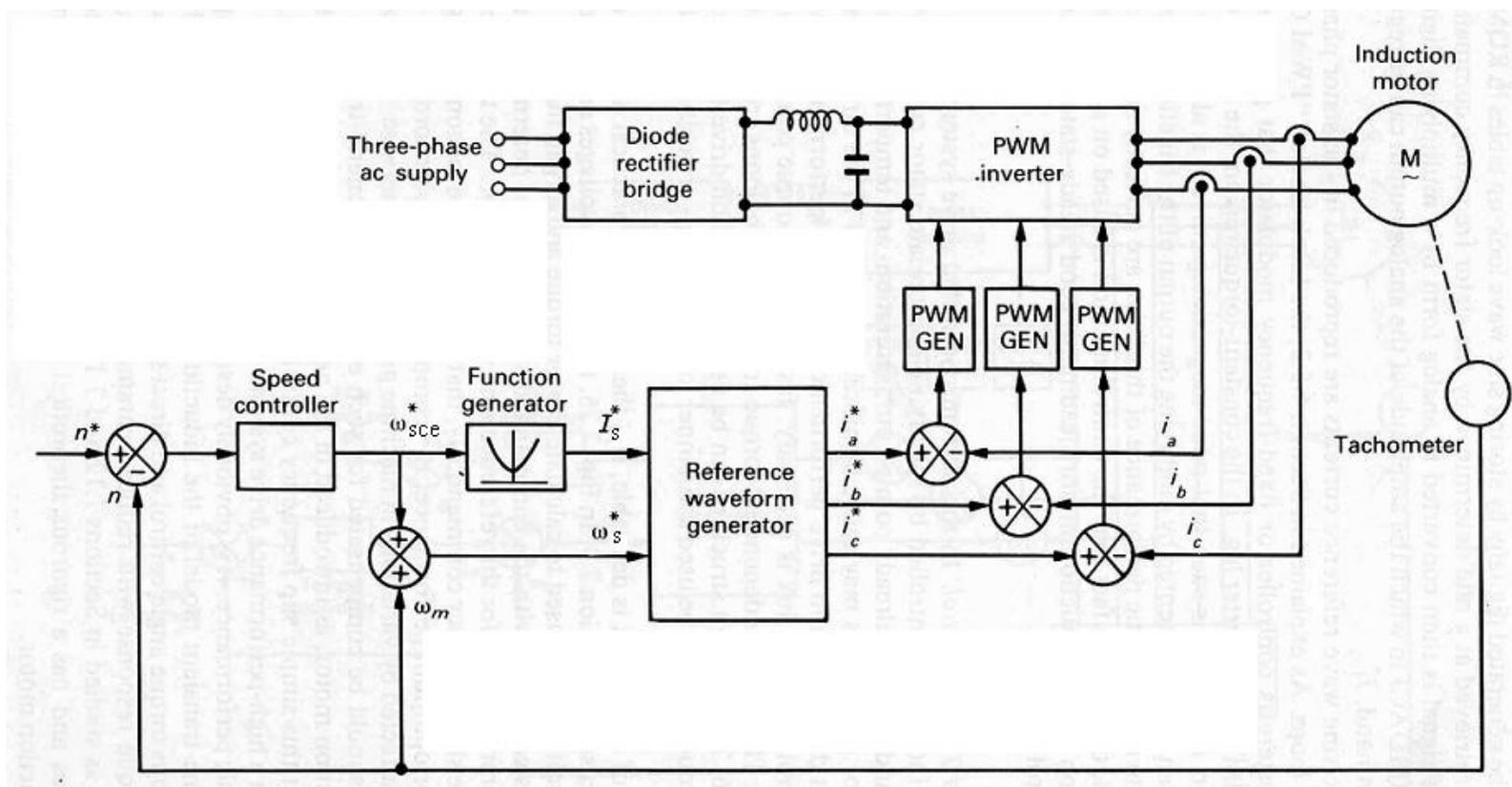
Al giorno d’oggi lo schema più usato per realizzare l’invertitore di corrente è il seguente:



È realizzato con un “IT” (Invertitore di Tensione) in cui ciascuna fase comprende un regolatore di corrente. L’uscita dei regolatori R_i è la tensione di riferimento della fase, che entra in un modulatore PWM.

CONTROLLO DI SCORRIMENTO PER M.A. A CORRENTE IMPRESSA

Uno schema costruttivo (di principio) più completo del controllo di scorrimento per motore asincrono alimentato a corrente impressa è



CONTROLLO DI FLUSSO E COPPIA PER M.A. A CORRENTE IMPRESSA

