

CAPITOLO 7

(continuazione)

Introduzione agli azionamenti con motore a induzione

7.7 – Classificazione degli azionamenti con motore asincrono trifase

La complessità del motore asincrono dal punto vista del suo comportamento dinamico ha determinato una gran varietà di soluzioni per il controllo della sua velocità di funzionamento, che possono essere classificate in vario modo.

Limitando la discussione ai motori con rotore a gabbia, si possono innanzitutto distinguere gli azionamenti

- a *frequenza (statorica) fissa*: controllo della sola ampiezza della tensione di statore;
- a *frequenza variabile*: controllo della frequenza e dell'ampiezza della tensione (o della corrente) di statore.

La seconda categoria consente ovviamente migliori prestazioni, mentre la prima è adatta solo a specifiche applicazioni con motori progettati allo scopo.

Storicamente gli algoritmi di controllo dei primi azionamenti a frequenza variabile trovarono la loro formulazione dallo studio a regime del motore stesso (*Controllo tensione-frequenza*). Solo nei primi anni 70, con l'adozione ormai universale della dinamica del motore mediante i vettori spaziali, fu messo a punto il *controllo vettoriale* a corrente impressa, che è oggi noto come *Controllo ad orientamento di campo (Field Oriented Control: FOC)*. Per contrapposizione le soluzioni precedenti rientrano nella categoria del *Controllo scalare*.

Qui di seguito si dà una sintetica descrizione del principio alla base di una e dell'altra delle due soluzioni a frequenza variabile.

7.8 – Azionamenti con controllo scalare (Tensione-frequenza o V/Hz)

Si consideri il circuito elettrico equivalente del motore asincrono di Fig. 7.6.5, qui riportato

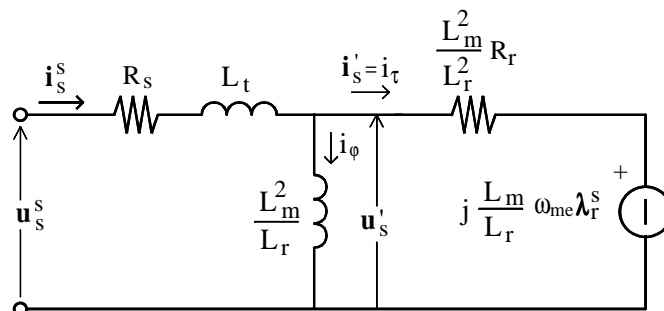


Fig. 7.8.1 Schema elettrico dinamico del motore asincrono

Alla luce di quanto espresso in conclusione del paragrafo 7.6, lo studio a regime del motore asincrono trifase può essere condotto con il circuito equivalente di Fig. 7.8.2 ricavato da quello precedente con le dovute sostituzioni.

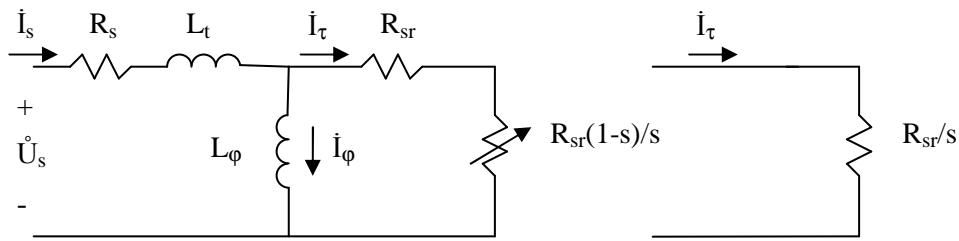


Fig. 7.8.2 Schema elettrico del motore asincrono per il regime sinusoidale

ove:

$$L_\phi = L_M^2 / L_r$$

$$R_{sr} = (L_M / L_r)^2 R_r$$

e per le tensioni e le correnti si sono usati i simbolismi delle rappresentazioni simboliche per il regime sinusoidale. La serie delle due resistenze nella maglia rotorica che appare nel circuito di sinistra (la resistenza rotorica riportata a statore e la resistenza fittizia dipendente dallo scorrimento s la cui potenza assorbita è la potenza elettromeccanica), è equivalente alla resistenza R_{sr}/s mostrata nella figura di destra.

Si assuma ora una frequenza statorica f di alimentazione tale per cui $R_s \ll \omega_s L_t = 2\pi f L_t$. Essendo anche l'induttanza $L_\phi \gg L_t$, lo schema di Fig. 7.8.2 può essere trasformato in quello di Fig. 7.8.3, avendo applicato il teorema di Thevenin al circuito a monte (a sinistra in figura) della maglia rotorica, con le approssimazioni derivanti dalle citate condizioni sui parametri

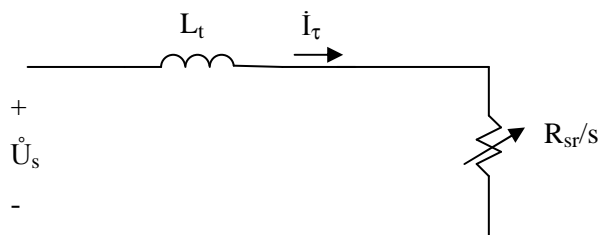


Fig. 7.8.3 Schema elettrico del motore asincrono per il regime sinusoidale approssimato per frequenze di alimentazione non piccole

La potenza trasmessa risulta pertanto:

$$P_t = 3 \frac{R_{sr}}{s} I_\tau^2 \quad (7.8.1)$$

ove I_τ è il valore efficace della corrente rotorica riportata statore. Dalla Fig. 7.8.3 si ricava:

$$I_r^2 = \frac{U_s^2}{\left(\frac{R_{sr}}{s}\right)^2 + (\Omega_s L_t)^2} \quad (7.8.2)$$

con U_s la tensione di fase efficace.

Sostituendo la (7.8.2) nella (7.8.1) e ricordando la (7.3.12) e l'espressione dello scorrimento, si ricava infine:

$$M = 3p \left(\frac{U_s}{\Omega_s}\right)^2 \frac{R_{sr} \Omega_r}{R_{sr}^2 + (\Omega_r L_t)^2} \quad (7.8.3)$$

ove $\Omega_r = \Omega_s - \Omega_{me}$ è la pulsazione delle reali grandezze rotoriche (*pulsazione di scorrimento*), come si misurerebbe stando sul rotore. L'andamento della (7.8.3) in funzione di Ω_r per un prefissato valore del rapporto (U_s/Ω_s) è mostrato in Fig. 7.8.4.

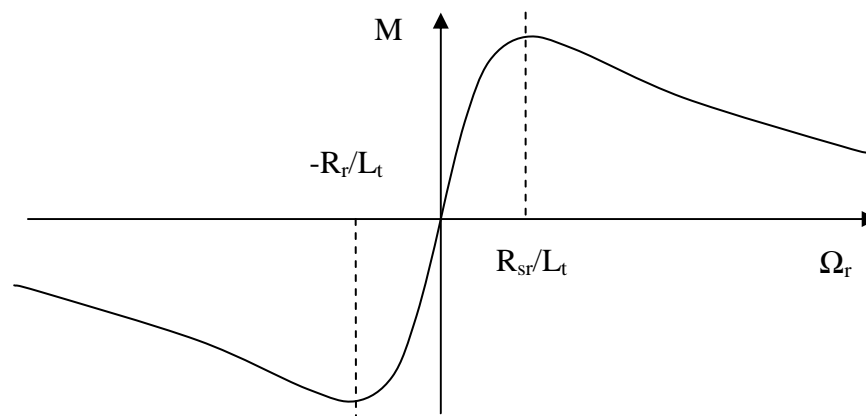


Fig. 7.8.4 – Coppia generata in funzione della pulsazione di scorrimento

La stessa coppia può essere facilmente rappresentata in funzione della velocità meccanica (*caratteristica meccanica*), per valori dati di U_s e Ω_s , come mostrato in Fig. 7.8.5. La figura riporta la coppia sia in funzione di Ω_{me} che di Ω_m , con un semplice cambio di scala. Sulla stessa figura è riportata a tratteggio, per comodità, anche la scala di Ω_r e quella dello scorrimento s .

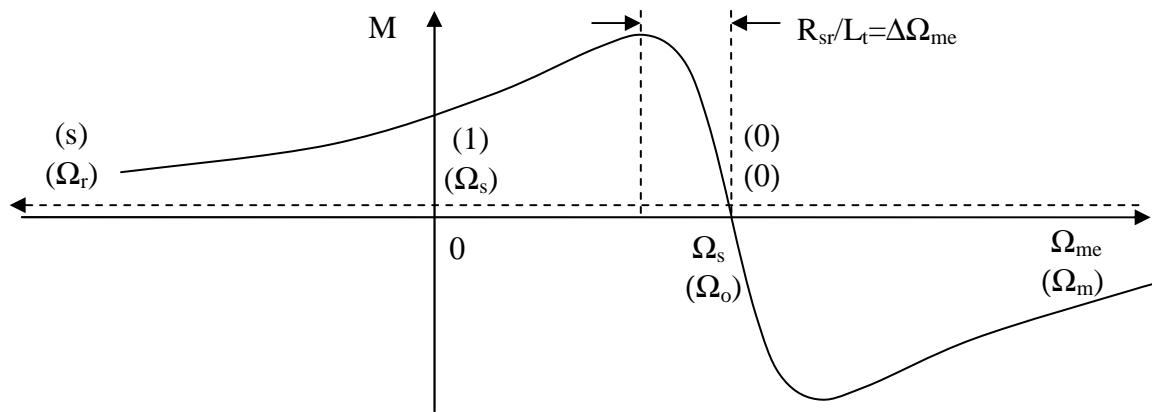


Fig. 7.8.5 – Caratteristica meccanica del motore asincrono

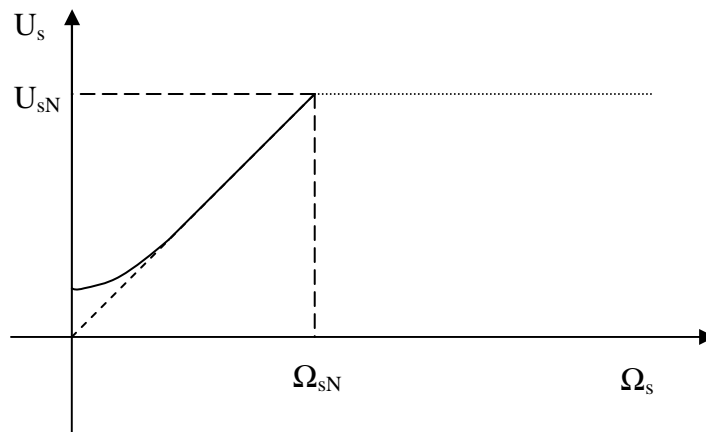


Fig. 7.8.6 – Caratteristica meccanica del motore asincrono

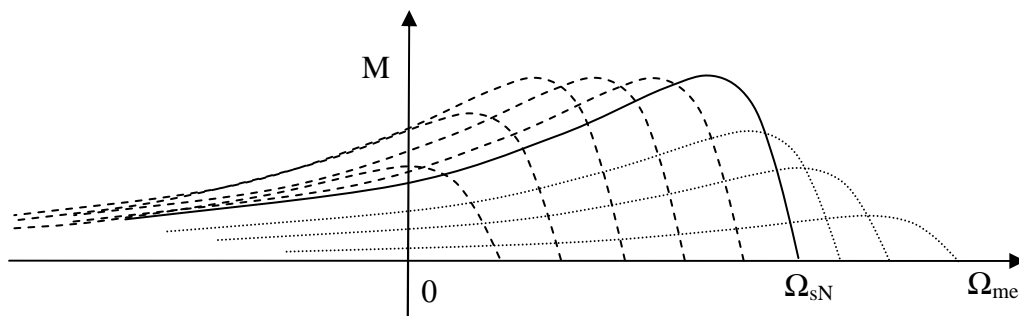


Fig. 7.8.7 – Caratteristica meccanica del motore asincrono

Fig. 7.8.8 – Schema di azionamento scalare con motore asincrono

7.9 – Azionamenti con controllo vettoriale ad orientamento di campo (Field Oriented Control: FOC)

Per individuare un efficace modo di controllare la coppia di un motore asincrono è necessario riesaminare le equazioni dinamiche ricavate nel precedente capitolo. Ancor prima tuttavia si potrà affermare che il controllo di coppia sarà di fatto un *controllo vettoriale di corrente*, riconoscendo dalle equazioni di coppia che essa è sempre espressa da una relazione fra correnti statoriche e rotoriche o fra correnti e flussi, questi ultimi essendo peraltro funzioni algebriche delle correnti.

Nel caso dell'azionamento con motore sincrono a magneti permanenti si è trovato che il controllo di coppia si può efficacemente eseguire facendo riferimento alle correnti in un sistema di riferimento fisso con il rotore, ovvero con l'asse polare dei magneti. La questione che si pone nel caso del motore asincrono è quindi quella di individuare il più comodo sistema di riferimento per un efficace controllo di coppia. A tale quesito risponde la teoria del *Controllo ad orientamento di campo* (in inglese *Field Oriented Control: FOC*) che mostra come la soluzione ottimale sia quella di scegliere un sistema di riferimento con l'asse diretto sovrapposto con il vettore spaziale del flusso rotorico. Con questa scelta infatti si hanno *controlli indipendenti di coppia e di flusso*, in modo simile a ciò che succede in un azionamento con motore in c.c.

Per meglio comprendere questo risultato si riprendano le (7.2.17) e (7.2.18), che nell'ipotesi di correnti impresse a statore sono sufficienti a descrivere la dinamica di flusso e di coppia.

$$0 = R_r \mathbf{i}_r^x + \frac{d\lambda_r^x}{dt} + j(\omega_x - \omega_{me})\lambda_r^x \quad (7.9.1)$$

$$\lambda_r^x = L_r \mathbf{i}_r^x + L_M \mathbf{i}_s^x \quad (7.9.2)$$

Dalla (7.9.2) si ricava

$$\mathbf{i}_r^x = \frac{\lambda_r^x}{L_r} - \frac{L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^x \quad (7.9.3)$$

che sostituita nella (7.9.1) porge

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^x - \frac{R_r}{L_r} L_M \mathbf{i}_s^x + \frac{d\lambda_r^x}{dt} + j\omega_x^r \lambda_r^x \quad (7.9.4)$$

ove ω_x^r è la velocità del sistema generico di riferimento rispetto al rotore e pari a $(\omega_x - \omega_{me})$.

La (7.9.4) può essere scomposta nella sua parte reale e coefficiente dell'immaginario per ottenere

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rd}^x - \frac{R_r}{L_r} L_M i_{sd}^x + \frac{d\lambda_{rd}^x}{dt} - \omega_x^r \lambda_{rq}^x \quad (7.9.5)$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rq}^x - \frac{R_r}{L_r} L_M i_{sq}^x + \frac{d\lambda_{rq}^x}{dt} + \omega_x^r \lambda_{rd}^x$$

Si moltiplichi ora la prima delle (7.9.5) per λ_{rd}^x e la seconda per λ_{rq}^x , sommandole quindi termine a termine. Sapendo che $(\lambda_{rd}^x)^2 + (\lambda_{rq}^x)^2 = |\lambda_r^x|^2 = \lambda_r^2$, si perviene a

$$\frac{1}{2} \frac{d\lambda_r^2}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^2 = \frac{R_r}{L_r} L_M (i_{sd}^x \lambda_{rd}^x + i_{sq}^x \lambda_{rq}^x) \quad (7.9.6)$$

Per quanto riguarda la coppia vale la (7.2.2.1), qui riscritta per il generico sistema di riferimento

$$m = \frac{3}{2} p (\lambda_{rq}^x i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x i_{rq}^x) \quad (7.9.7)$$

Ricordando la (7.9.3) espressa per le sue componenti d e q e sostituita nella (7.9.6) si ottiene infine

$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} (\lambda_{rd}^x i_{sq}^x - \lambda_{rq}^x i_{sd}^x) \quad (7.9.8)$$

Dall'esame delle (7.9.6) e (7.9.8) si deduce che flusso $\lambda_r = |\lambda_r|$ e coppia m possono essere separatamente controllati da i_{sd}^x e i_{sq}^x rispettivamente se $\lambda_{rq}^x = 0$. Ciò si ottiene scegliendo un sistema di riferimento il cui asse d si sovrapponga al vettore del flusso rotorico, come mostrato in Fig. 7.9.1, e per questo indicato con d^λ - q^λ .

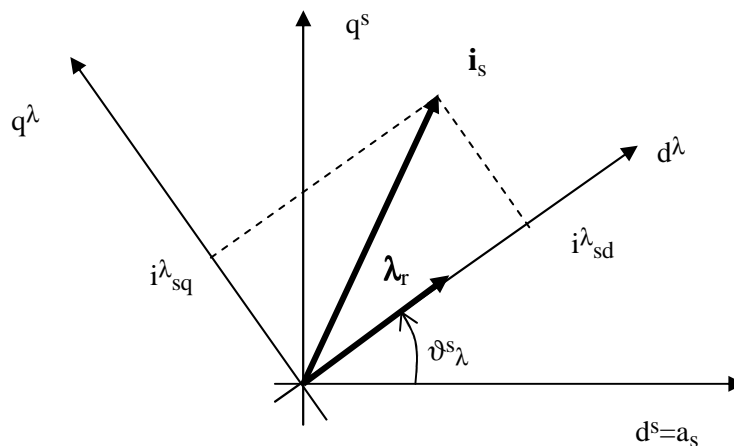


Fig. 7.9.1 – Definizione del sistema di riferimento per l'orientamento di campo

In tal caso vale infatti anche $\lambda_r = |\lambda_r| = \lambda_{rd}^\lambda$ per cui le (7.9.6) e (7.9.8) diventano

$$\frac{d\lambda_r}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r = \frac{R_r}{L_r} L_M i_{sd}^\lambda \quad (7.9.9)$$

$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} \lambda_r i_{sq}^\lambda \quad (7.9.10)$$

a cui corrisponde lo schema a blocchi di Fig. 7.9.2 che può essere confrontato con quello di Fig. 1.1.12 per riconoscere una certa similitudine fra un motore asincrono controllato ad orientamento di campo e un motore a corrente continua ad eccitazione separata, con la corrente i_{sq}^λ (detta anche corrente (statorica) di coppia e a volte indicata con i_τ) che gioca il ruolo che era della corrente di armatura i_a , e la corrente i_{sd}^λ (detta anche corrente (statorica) di flusso e a volte indicata con i_λ) che gioca il ruolo della tensione di eccitazione u_e .

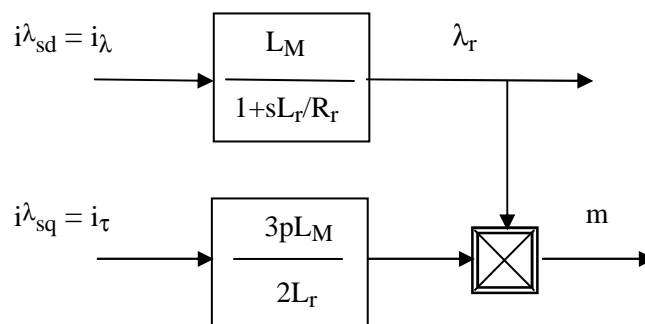


Fig. 7.9.2 – Schema a blocchi di un motore asincrono a corrente impressa in orientamento di campo.

7.10 Struttura dell’azionamento FOC con motore asincrono e controllo vettoriale delle correnti

La struttura di base di un azionamento con motore asincrono è simile a quella di un azionamento con motore sincrono a magnete permanente (o brushless sinusoidali)¹ e si presenta pertanto come in Fig. 7.10.1.

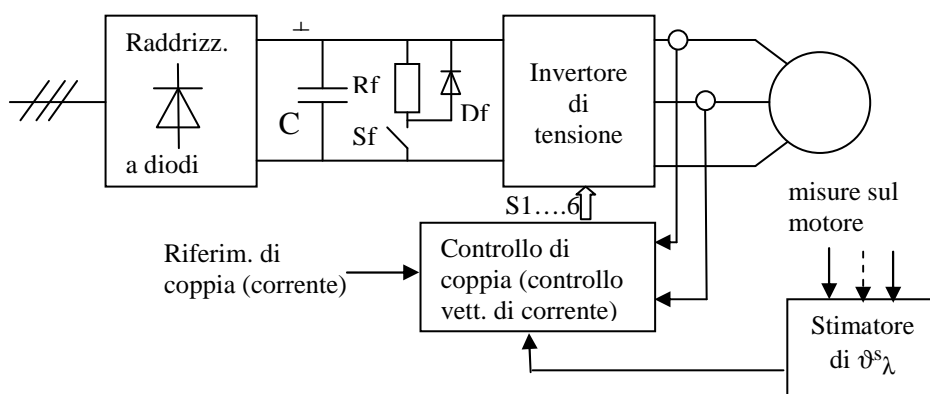


Fig. 7.10.1 – Schema di principio di azionamento con motore asincrono

Dalla sorgente di alimentazione, solitamente la rete trifase di distribuzione, si ottiene una tensione continua (U_{dc}) mediante un raddrizzatore a diodi (non controllato). La tensione continua alimenta un invertitore trifase (cfr Cap. 4) i cui comandi sono inviati dal controllo di coppia dell’azionamento. Anche in questo caso, il controllo di coppia è di fatto un *controllo vettoriale di corrente*. A differenza del caso con motore sincrono, le equazioni del motore asincrono mostrano che tale controllo vettoriale deve essere fatto in un sistema di riferimento fisso con il vettore spaziale del flusso rotorico (che *non è fisso con il rotore*) e che, in pratica, non è neanche misurabile. La posizione $\vartheta^{s\lambda}$ del vettore spaziale del flusso rotorico, e quindi del sistema di riferimento $d^{\lambda}-q^{\lambda}$, deve pertanto essere stimata o ricostruita a partire da altre misure accessibili sul motore come le tensioni, le correnti, la velocità ecc. I differenti algoritmi di ricostruzione impiegati

¹ Esistono in commercio azionamenti “universali” capaci di accettare sia motori sincroni che asincroni. Secondo il caso vengono selezionate e adeguate alcune funzionalità del sistema di controllo piuttosto che altre.

distinguono le varie versioni di FOC e i principali di essi saranno discussi nel seguito, classificati in due principali categorie che prendono il nome di

- algoritmi per il controllo ad orientamento di campo diretto
 - *Le tecniche di controllo ad orientamento di campo diretto si basano su algoritmi capaci di ricostruire il vettore spaziale del flusso rotorico λ_r^s a partire da misure elettromeccaniche accessibili al motore. L'argomento $\vartheta^s \lambda$ di tale vettore spaziale sarà quindi impiegato per stabilire la posizione dell'asse diretto del sistema di riferimento, mentre il modulo può essere usato per un eventuale controllo a catena chiusa dell'ampiezza del flusso rotorico.*

Con tutti e tre i metodi di ricostruzione del vettore flusso rotorico si perviene infine al seguente schema di azionamento con controllo ad orientamento di campo diretto.

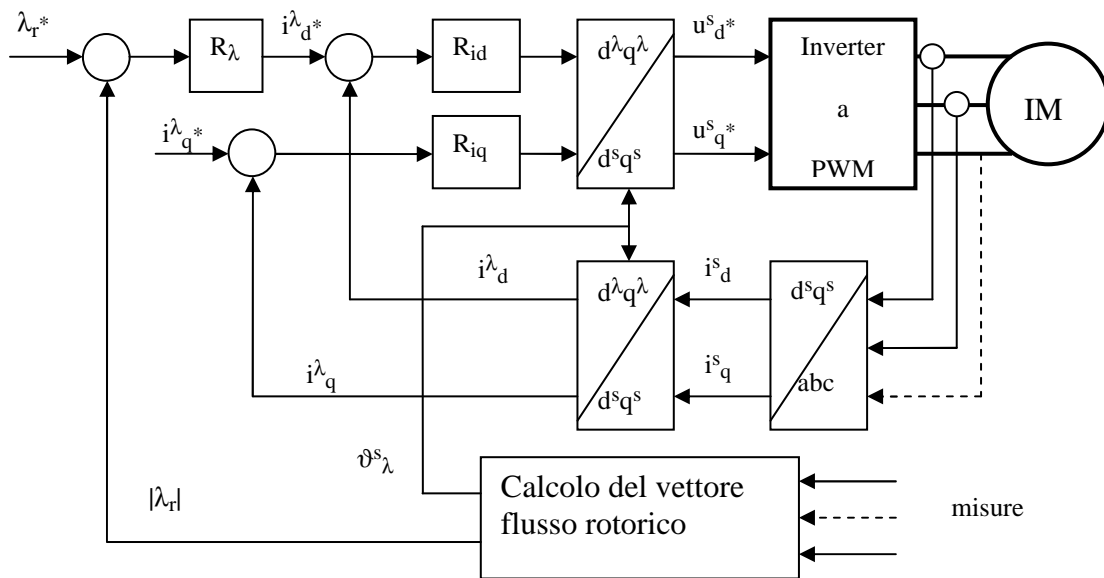


Fig. 8.3.2 – Azionamento FOC diretto per motore asincrono

Il riferimento di ampiezza (modulo) del flusso rotorico proviene in genere da un controllo della tensione ai morsetti del motore (deflussaggio), mentre quello della corrente in quadratura deriva dalla richiesta di coppia (cui la corrente è proporzionale) per esempio da un più esterno anello di velocità.

- algoritmi per il controllo ad orientamento di campo indiretto
 - *Il controllo ad orientamento di campo indiretto invece di ricostruire il vettore spaziale del flusso rotorico da far coincidere con l'asse diretto del sistema di riferimento da adottare per il controllo vettoriale delle correnti, impone precise condizioni di alimentazione al motore tali che sia il vettore spaziale del flusso rotorico a collocarsi sull'asse diretto del sistema di riferimento adottato.*

Il controllo ad orientamento di campo indiretto invece di ricostruire il vettore spaziale del flusso rotorico da far coincidere con l'asse diretto del sistema di riferimento da adottare per il controllo vettoriale delle correnti, impone precise condizioni di alimentazione al motore tali che sia il vettore spaziale del flusso rotorico a collocarsi sull'asse diretto del sistema di riferimento adottato.

Per comprendere il principio si prenda in considerazione la seconda delle (7.9.5) che può essere riordinata nel seguente modo

$$\frac{d\lambda_{rq}^x}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rq}^x = \frac{R_r}{L_r} L_M i_{sq}^x - \omega_x^r \lambda_{rd}^x \quad (8.3.12)$$

La (8.3.12) mostra che λ_{rq}^x risulta identicamente nullo, quindi $\lambda_{rd}^x = \lambda_r$, se il termine noto dell'equazione differenziale è identicamente nullo, cioè se

$$\omega_x^r = \omega_x - \omega_{me} = \frac{R_r}{L_r} L_M \frac{i_{sq}^x}{\lambda_{rd}^x} \quad (8.3.13)$$

In altre parole, l'orientamento di campo *viene indirettamente a realizzarsi* imponendo un preciso valore della velocità di scorrimento (velocità angolare rispetto al rotore) del sistema di riferimento.

Lo schema realizzativo è quello di Fig. 8.4.1. Dai riferimenti di flusso rotorico (ampiezza) e di corrente statorica in quadratura (la cui origine è la stessa di quella presunta per lo schema di Fig. 8.3.2), si ricava la velocità di scorrimento ω_x^r applicando la (8.3.13). Sommando la ω_{me} si perviene a ω_x che integrata da la posizione ϑ_x del sistema di riferimento d^x-q^x il cui asse dovrebbe coincidere con il vettore del flusso rotorico.

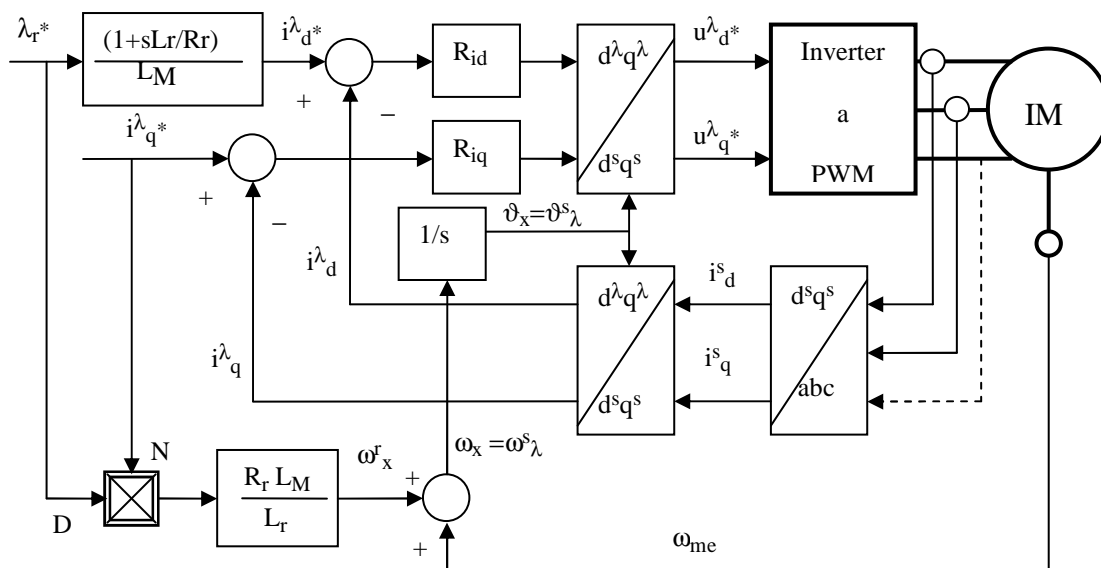


Fig. 8.4.1 – Azionamento FOC indiretto per motore asincrono

Non è presente in questo caso un anello di flusso. Il riferimento di corrente diretta statorica si ricava dal riferimento di flusso invertendo il blocco corrente-flusso presente nello schema di Fig. 7.9.2 ovvero dalla (7.10.9).

Ancora per quanto riguarda la misura delle correnti, solitamente essa viene eseguita solo su due fasi, potendosi ricavare la corrente della terza fase dal principio di Kirchhoff come somma delle prime due cambiata di segno.

Nella rete in continua fra raddrizzatore e invertitore (bus in continua) sono sempre connessi un condensatore C di livellamento della tensione raddrizzata e il sistema di dissipazione dell'energia di frenatura già discusso nel Cap. 6.

Il riferimento di coppia proviene spesso da un anello di velocità che elabora l'errore di velocità fra un riferimento di velocità e la velocità misurata sul motore o sul carico.

