UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

AZIONAMENTI ELETTRICI

a.a. 2026/2027 – 9 CFU

Matteo Olivo, PhD – *matteo.olivo@units.it*

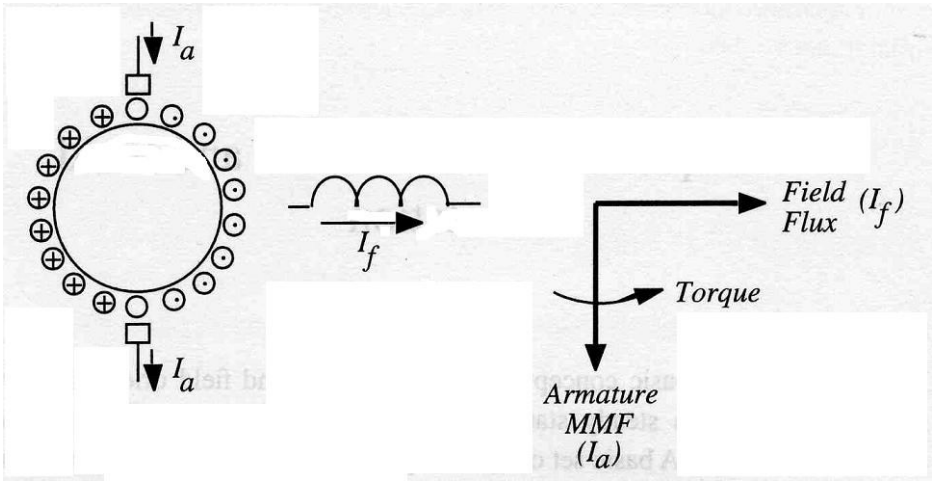
CONTROLLO A ORIENTAMENTO DI CAMPO

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

IL CONTROLLO DELLA COPPIA NEL MOTORE A C.C.

Nel motore a c.c. un campo magnetico stazionario, generato tramite un avvolgimento di eccitazione alimentato a c.c. (o tramite dei magneti permanenti) posto sullo statore, interagisce con la f.m.m. prodotta dall'avvolgimento di armatura posto sul rotore ed alimentato a c.c. tramite un commutatore e delle spazzole.

Il commutatore agisce in modo da produrre una f.m.m. di armatura fissa nello spazio e le spazzole sono poste in modo che essa sia perpendicolare rispetto al flusso prodotto dall'avvolgimento di eccitazione e indipendente dalla velocità del rotore.



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

f.c.e.m. prodotta sugli avvolgimenti di armatura $$E_a = k_\omega p \frac{L_{af}}{L_f} \lambda_f \omega_m$$

coppia elettromagnetica $$C = k_c p \frac{L_{af}}{L_f} \lambda_f I_a$$

λ_f : il flusso del campo di eccitazione, p: numero di coppie polari,

ω_m: velocità angolare meccanica, I_a la corrente di armatura.

k_c e k_ω dipendono dal motore e solitamente i loro valori si assumono uguali.

Se la f.m.m. di armatura e il flusso prodotto dall'eccitazione si mantengono sempre ortogonali e se l'avvolgimento di eccitazione è alimentato separatamente dall'avvolgimento di armatura allora il flusso di campo non è influenzato dalla corrente di armatura e viceversa.

Flusso di campo $$\lambda_f = L_f i_f$$

In questa circostanza si parla comunemente di

controllo disaccoppiato di flusso e coppia.

CONTROLLO DI COPPIA

Dall'analisi del funzionamento del motore a c.c. ad eccitazione separata si capisce che, in generale, il controllo di coppia in un motore elettrico chiede:

1. il controllo (indipendente) della corrente di armatura, per svincolarsi dall'influenza dell'impedenza di statore,
2. il controllo (indipendente e costante) della corrente di campo,
3. il controllo dell'angolo spaziale tra il flusso di campo e la f.m.m. di armatura affinché esso sia costantemente di 90°.

Se tutte tre le condizioni sono verificate istante per istante allora la coppia segue la corrente di armatura e si può ottenere un controllo istantaneo della coppia.

Se queste condizioni sono rispettate solo in regime stazionario allora si ha controllo di coppia solo in regime stazionario e in regime dinamico la coppia non segue esattamente la corrente di armatura.

CONTROLLO DI COPPIA
confronto motori c.c. e c.a.

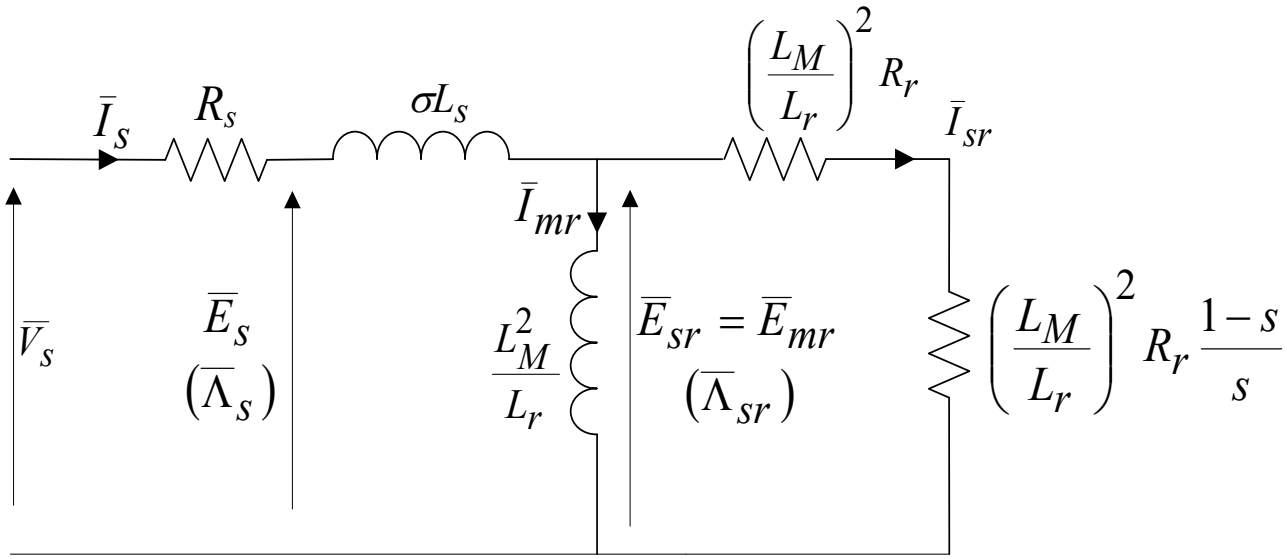
Nei motori a c.c. le condizioni 2 e 3 sono garantite dal commutatore e dal sistema di eccitazione separato e indipendente da quello di armatura.

Nei motori a c.a. invece le due condizioni devono essere ottenute tramite un opportuno controllo esterno.

In particolare nei motori asincroni si ha un'unica alimentazione (dallo statore) sia per il campo induttore che per l'indotto per cui i due campi sono strettamente interconnessi e la comprensione del fenomeno del disaccoppiamento non è così immediato come nei motori a c.c. e nei motori sincroni. Questi ultimi hanno comunque bisogno di un controllo esterno per ottenere il disaccoppiamento (che in questo caso si "limita" a garantire la condizione 3).

FLUSSO E COPPIA NEL M. A.

Si riconsideri il circuito equivalente a "Γ" rovescia del motore asincrono funzionante in regime stazionario.



Ai capi dell'induttanza L_M^2/L_r si ha la tensione

$$\bar{E}_{sr} = j\omega_s \bar{\Lambda}_{sr} = j\omega_s \frac{L_M}{L_r} \bar{\Lambda}_r$$

La corrente $\bar{I}_s$ è formata dalle due componenti $\bar{I}_{mr}$ (magnetizzante) e $\bar{I}_{sr}$ (attiva)

$$\bar{I}_{mr} = \frac{L_M / L_r}{L_M^2 / L_r} \bar{\Lambda}_r = \frac{\bar{\Lambda}_r}{L_M}$$

$$\bar{I}_{sr} = -\frac{L_r}{L_M} \bar{I}_r = j\omega_s \bar{\Lambda}_{sr} \frac{1}{\frac{R_r}{s}\left(\frac{L_M}{L_r}\right)^2}$$

FLUSSO E COPPIA NEL M.A.

La coppia è data dalla potenza trasferita al traferro (dissipata sulla resistenza totale di rotore R_r/s) divisa per la pulsazione di sincronismo in unità meccaniche ω_s/p ovvero dalla potenza dissipata sulla resistenza di carico R_r(1-s)/s divisa per la pulsazione meccanica ω_m:

$$c = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} \Lambda_r I_{sr} = \frac{3}{2} p \frac{L_M^2}{L_r} I_{mr} I_{sr}$$

Dalle relazioni precedenti si possono trarre alcune osservazioni:

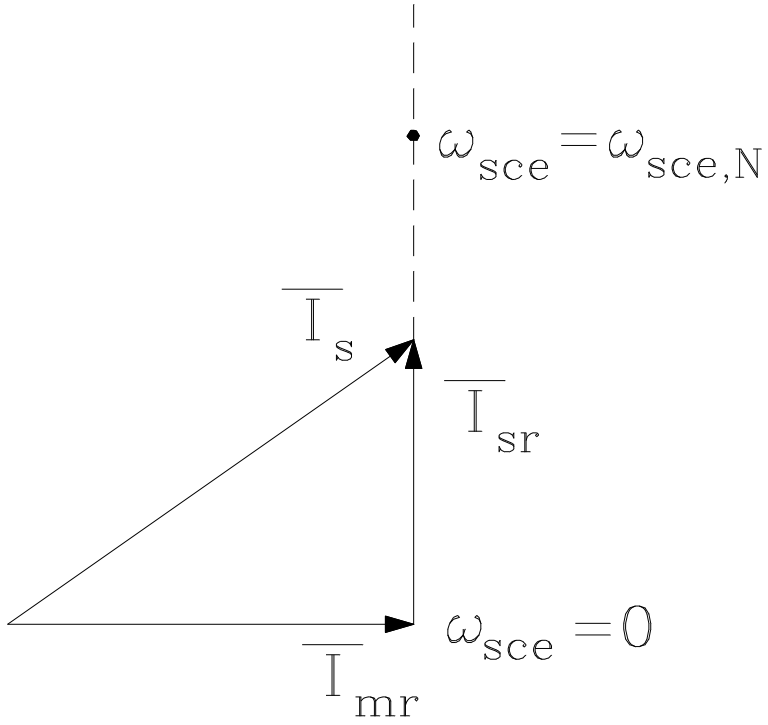
- il flusso di rotore dipende solo dalla corrente I_{mr} (*componente di flusso*),
- la coppia dipende dalla corrente I_{sr} (*componente di coppia*),
- dal circuito equivalente si vede che E_{mr} è comune ai due rami: uno che produce il flusso e uno che produce la coppia per cui le relative correnti sono legate da

$$\bar{I}_{sr} = js\omega_s \frac{L_r}{R_r} \bar{I}_{mr} = j\omega_{sce} \tau_r \bar{I}_{mr}$$

Le due correnti sono tra loro in quadratura.

FLUSSO E COPPIA NEL M.A.

- Dal confronto con l'espressione della coppia di un motore a c.c. si riconosce che la corrente I_{mr} ha lo stesso ruolo della I_f e la I_{sr} della I_a.
- L'ultima relazione mette in evidenza un legame tra le due correnti e la pulsazione di scorrimento (ovvero lo scorrimento, poiché si è a regime, cioè ω_s costante); in altri termini c'è un solo valore di pulsazione di scorrimento associato con una data coppia di componenti della corrente di statore I_{mr}, I_{sr} (ovvero, per quanto detto, con una data coppia di valori di flusso e coppia).

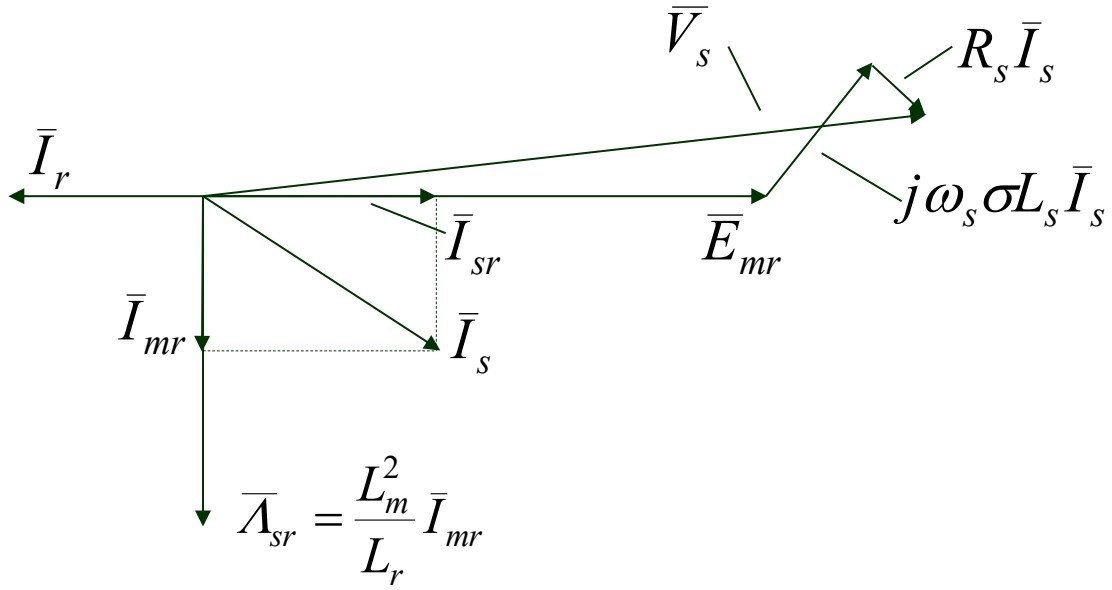


A lato è riportato il triangolo delle correnti.

Quando si voglia mantenere costante il flusso di rotore, I_{mr} va tenuta costante.

Al variare del carico varia I_{sr}, la I_s è la somma vettoriale delle due per cui il vertice di I_s, al variare del carico e per flusso costante, si muove lungo la semiretta verticale tratteggiata.

DIAGRAMMA VETTORIALE

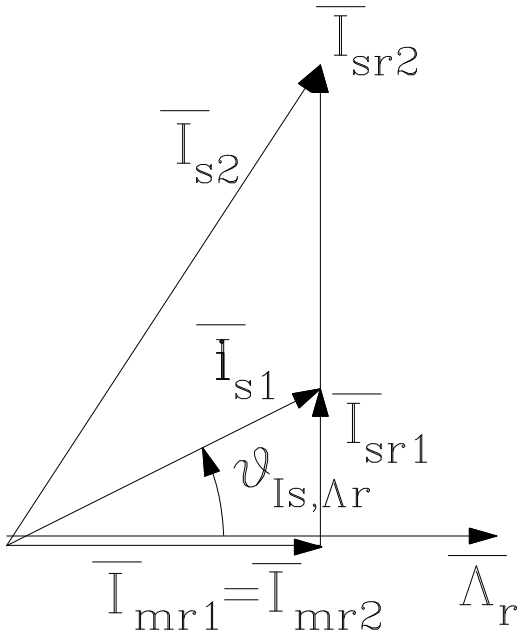


Non bisogna dimenticare che al motore in realtà si deve applicare una tensione. Dunque, date le componenti di coppia e flusso della corrente di statore, rimane determinato anche il vettore di tensione di statore da applicare al motore.

Si noti che le correnti I_{sr} e I_{mr} si riescono ad ottenere purché il corrispondente valore della tensione di statore sia ammissibile.

DAL REGIME STAZIONARIO AL TRANSITORIO

La figura mostra due punti di lavoro in regime stazionario (contraddistinti dai pedici 1 e 2) caratterizzati da due valori diversi della pulsazione di scorrimento e dallo stesso valore di flusso di rotore ovvero di corrente I_{mr}.



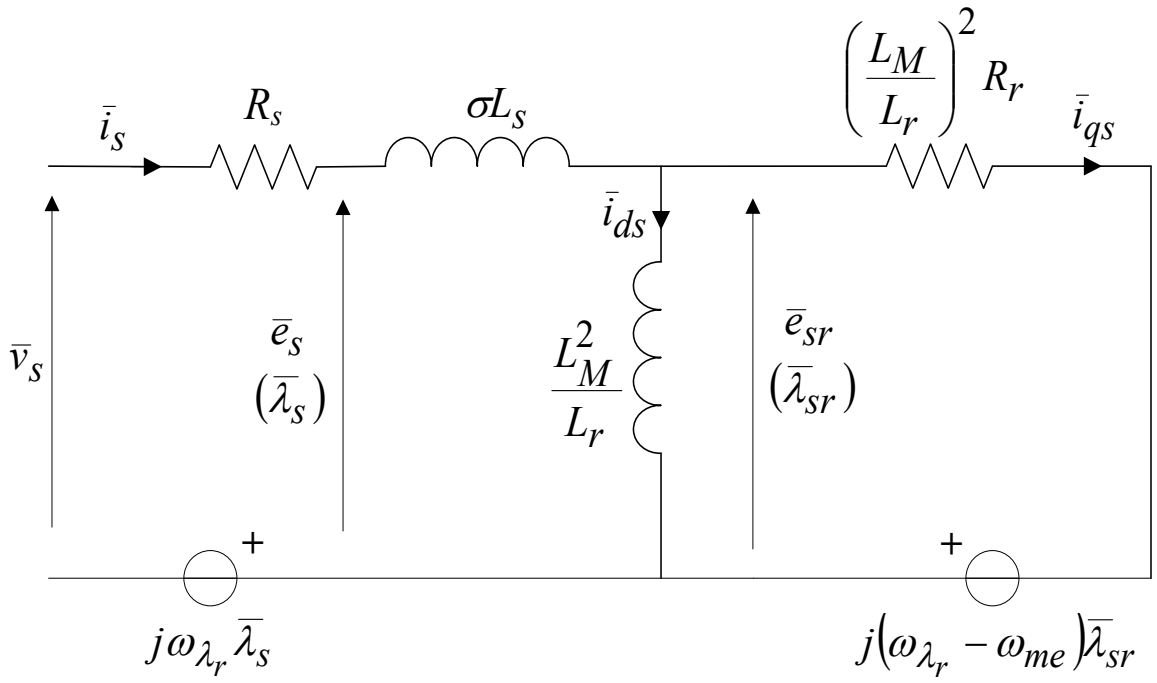
Il controllo scalare I-ω garantisce che i due punti 1 e 2 siano appunto caratterizzati dallo stesso valore di flusso di rotore.

Non garantisce nulla circa un eventuale passaggio tra i due punti di lavoro (transitorio).

Anzi si può dimostrare che il passaggio tra i due punti avviene con forti sovraelongazioni ed oscillazioni del flusso e della coppia.

NOTA: i vettori delle grandezze coinvolte in questo grafico e nelle dia precedenti possono essere formalmente interpretati alla stregua di fasori tradizionali di grandezze sinusoidali in regime stazionario. Questa corrispondenza è solo formale e vale nel caso in cui il sistema trifase sia sinusoidale e simmetrico/equilibrato, pur di considerare inoltre le ampiezze dei vettori come valori massimi.

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO



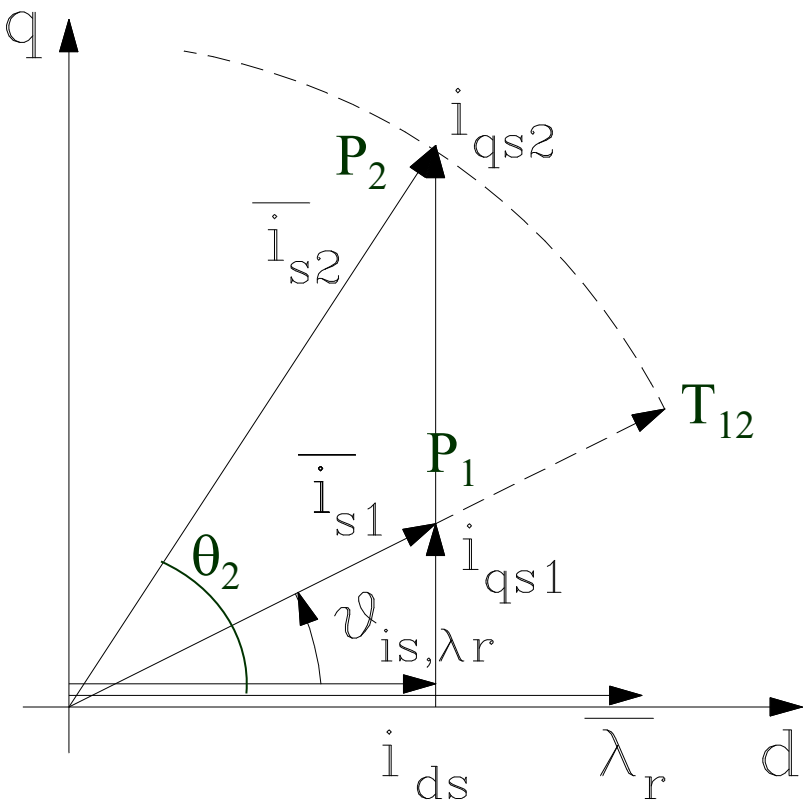
Per studiare il transitorio si deve far ricorso alle equazioni del modello dinamico (solo quelle di rotore in quanto il motore si suppone alimentato a corrente impressa); oppure si può far riferimento al circuito equivalente riportato qui a fianco.

Si assume un riferimento rotante in sincronismo con il flusso di rotore ($\omega_d=\omega_{\lambda r}$) e con l'asse *d* disposto lungo il flusso di rotore stesso.

In tal caso nel funzionamento in regime sinusoidale tutte le grandezze (tensioni, flussi, correnti) sono *continue* (e lo sono anche le componenti secondo i due assi del riferimento).

i_{ds} è la componente di flusso e i_{qs} è la componente di coppia.

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO



Nelle ipotesi fatte dal circuito equivalente si ricava il diagramma riportato a fianco. Esso è simile a quello precedente, con la sostanziale differenza che in questo le grandezze sono *funzione del tempo*. In esso sono riportati i due punti di lavoro 1 e 2, e si vuole analizzare il passaggio da uno all'altro.

Si utilizzi il controllo di coppia secondo lo schema I-ω. Si valuti in maniera grafico-qualitativa il processo che avviene in corrispondenza di una richiesta di variazione della pulsazione di scorrimento da ω_{sce1} a ω_{sce2} corrispondenti rispettivamente ai due punti di lavoro P_1 e P_2.

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO

In P_1 si hanno: $\bar{\imath}_{s1}$, ω_{sce1}, $\omega_{s1} = \omega_{me1} + \omega_{sce1}$ e l'angolo $\vartheta_1 = \vartheta_{i_s,\lambda_r}$ tra i vettori spaziali della corrente di statore e del flusso di rotore, mentre in P_2 si avranno: $\bar{\imath}_{s2}$, ω_{sce2}, $\omega_{s2} = \omega_{me2} + \omega_{sce2}$.

In corrispondenza della variazione di pulsazione di scorrimento (cioè nell'istante successivo alla variazione) il controllo I-ω impone i nuovi valori dell'ampiezza della corrente di statore i_{s2} e della pulsazione di sincronismo $\omega'_{s2} = \omega_{me1} + \omega_{sce2}$. Si osservi che le quantità elettriche (ampiezza e frequenza della corrente di statore) si modificano rapidamente (con la dinamica elettrica), mentre inizialmente la velocità del motore non cambia a causa della dinamica meccanica (più lenta di quella elettrica).

Si osservi che la frequenza del flusso di rotore si modifica anch'essa rapidamente, in quanto dipende dalla frequenza delle correnti indotte sul rotore, che varia subito perché risulta essere la differenza tra la nuova pulsazione di sincronismo ω'_{s2} e la velocità del rotore in unità elettriche ω_{me1} (che invece non subisce inizialmente variazioni).

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO

Il nuovo valore del vettore spaziale della corrente di statore sarà quindi controllato in ampiezza e in velocità ma non in fase. Dunque immediatamente dopo la richiesta di variazione della pulsazione di scorrimento le velocità dei due vettori spaziali della corrente e del flusso di rotore assumono lo stesso valore ω'_{s2}; poiché, come detto la fase del vettore di corrente non è soggetta al controllo, a causa dell'inerzia meccanica, si può ragionevolmente supporre che anche l'angolo tra i vettori spaziali della corrente stessa e del flusso di rotore inizialmente rimanga inalterato (pari a θ_1) per cui il vertice del vettore spaziale della corrente passa da P_1 a T_{12} (si veda la figura di due dia addietro; si rammenti che la figura contiene una rappresentazione relativa ad un riferimento rotante alla pulsazione del flusso di rotore).

Il punto T_{12} è caratterizzato da una coppia ed un flusso deducibili dalla figura, per altro esso NON costituisce un punto di equilibrio (in quanto non lo è la combinazione i_{ds}, i_{qs} e ω_{sce} che il motore assume in quel punto).

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO

A questo punto l'angolo $\theta_{is,\lambda r}$ tenderà a portarsi al valore finale θ_2. Nell'esempio qui descritto, il rotore tenderà a rallentare per permettere al vettore flusso di rotore di spostarsi rispetto a quello della corrente aumentando l'angolo compreso tra i due fasori spaziali. Lo farà con una dinamica legata alla meccanica del rotore. Il processo è rappresentato nella figura dall'arco tratteggiato descritto dal vertice del vettore spaziale della corrente. Quando viene raggiunto il valore finale dell'angolo $\theta_{is,\lambda r}$ il movimento relativo prosegue a causa dell'inerzia meccanica del rotore, viene oltrepassato il punto P_2, si ferma e quindi riprende all'indietro e tramite un andamento simile alle oscillazioni pendolari convergerà al punto P_2.

In tutto il processo, le proiezioni del vettore spaziale della corrente di statore, che rappresentano le due componenti di flusso (asse *d*) e di coppia (asse *q*), assumono un andamento oscillante smorzato. Così sarà anche quello del flusso e della coppia: la prima oscillerà intorno al valore $i_{d2}=i_{d1}$, la seconda intorno al valore finale i_{q2}.

TRANSITORIO TRA DUE PUNTI DI LAVORO

Contemporaneamente a questo fenomeno inizia anche la modifica della velocità meccanica del rotore ω_{me} dovuta al nuovo valore della coppia prodotta dal motore (nell'esempio descritto si ha un aumento). Essa comunque agisce sul valore della pulsazione di tutte le grandezze coinvolte nel processo in quanto si somma (vedi schema I-ω) alla pulsazione di scorrimento. Tutto si esaurisce quando la velocità raggiunge il valore finale ω_{me2}.

Per evitare questo fenomeno transitorio indesiderato è necessario comandare la corrente di alimentazione sia in ampiezza che in fase (cioè il fasore spaziale di corrente completo). Si deve cioè imprimere, contemporaneamente all'ampiezza, anche l'opportuno valore della fase della corrente affinché il vertice del vettore spaziale di corrente si mantenga costantemente sulla retta verticale rappresentata nella figura precedente.

Su questo principio è basato il controllo ad orientamento di campo.

ORIENTAMENTO DI CAMPO

Il controllo ad orientamento di campo prevede di riuscire a scomporre la corrente di statore nelle due componenti di coppia e flusso aventi valori prefissati e imposti appunto dalle richieste di coppia e flusso. Non solo, si è visto che così rimane fissata anche la pulsazione di scorrimento e quindi, una volta stabilita la velocità meccanica, anche la pulsazione del flusso di rotore e quindi delle correnti di alimentazione (le due pulsazioni dovranno coincidere).

Per studiare il funzionamento del motore in queste condizioni si consideri il motore asincrono alimentato a corrente impressa e si utilizzi un sistema di riferimento solidale con il flusso di rotore in cui l'asse *d* sia coincidente con il vettore spaziale del flusso di rotore.

Nelle equazioni che descrivono il funzionamento del motore asincrono rimangono così imposte le seguenti condizioni

$$\omega_d = \omega_{\lambda r} = \omega_s \qquad \lambda_{dr} = \lambda_r \qquad \lambda_{qr} = 0 \qquad \frac{d\lambda_{qr}}{dt} = 0$$

MODELLO DEL M.A. IN ORIENTAMENTO DI CAMPO

Sostituendo nelle equazioni generali del m.a. le condizioni precedenti e tenuto conto che il motore è alimentato a corrente impressa si hanno:

a) e b) equazioni dinamiche; c) e d) leggi di legame; e) espressione di coppia

a) $0 = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_r}{dt}$

b) $R_r i_{qr} + \omega_{sce} \lambda_r = 0$

c) $\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_M i_{qs} = 0$

d) $\lambda_r = L_r i_{dr} + L_M i_{ds}$

e) $c = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} \bar{i}_s \bullet j\bar{\lambda}_r = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} \lambda_r i_{qs}$

dove la ω_{sce} è la pulsazione di scorrimento: $\omega_d - \omega_{me} = \omega_{\lambda r} - \omega_{me} = \omega_{sce}$

MODELLO DEL M.A. IN ORIENTAMENTO DI CAMPO

Combinando la a) con la d) si ottiene

$$\text{f)} \quad \frac{d\lambda_r}{dt} + \frac{1}{\tau_r}\lambda_r = \frac{L_M}{\tau_r} i_{ds}$$

In regime *stazionario* la f) diventa

$$\lambda_r = L_M i_{ds}$$

Dall'equazione e) si riconosce che la coppia dipende dalla componente di coppia della corrente di statore oltre che dal valore del flusso di rotore. Mentre l'equazione f) mostra che il flusso di rotore dipende dalla sola componente di flusso i_{ds} della corrente.

Dalla b) si trova poi

$$\text{g)} \quad \omega_{sce} = -\frac{R_r}{\lambda_r} i_{qr} = \frac{R_r}{L_r} \frac{L_M i_{qs}}{\lambda_r}$$

MODELLO DEL M.A. IN ORIENTAMENTO DI CAMPO

La differenza sostanziale con il regime stazionario sinusoidale sta nella f). Da essa si vede che il flusso di rotore dipende dalla componente di flusso i_{ds} della corrente non in maniera strettamente proporzionale ma tramite un'equazione differenziale del primo ordine.

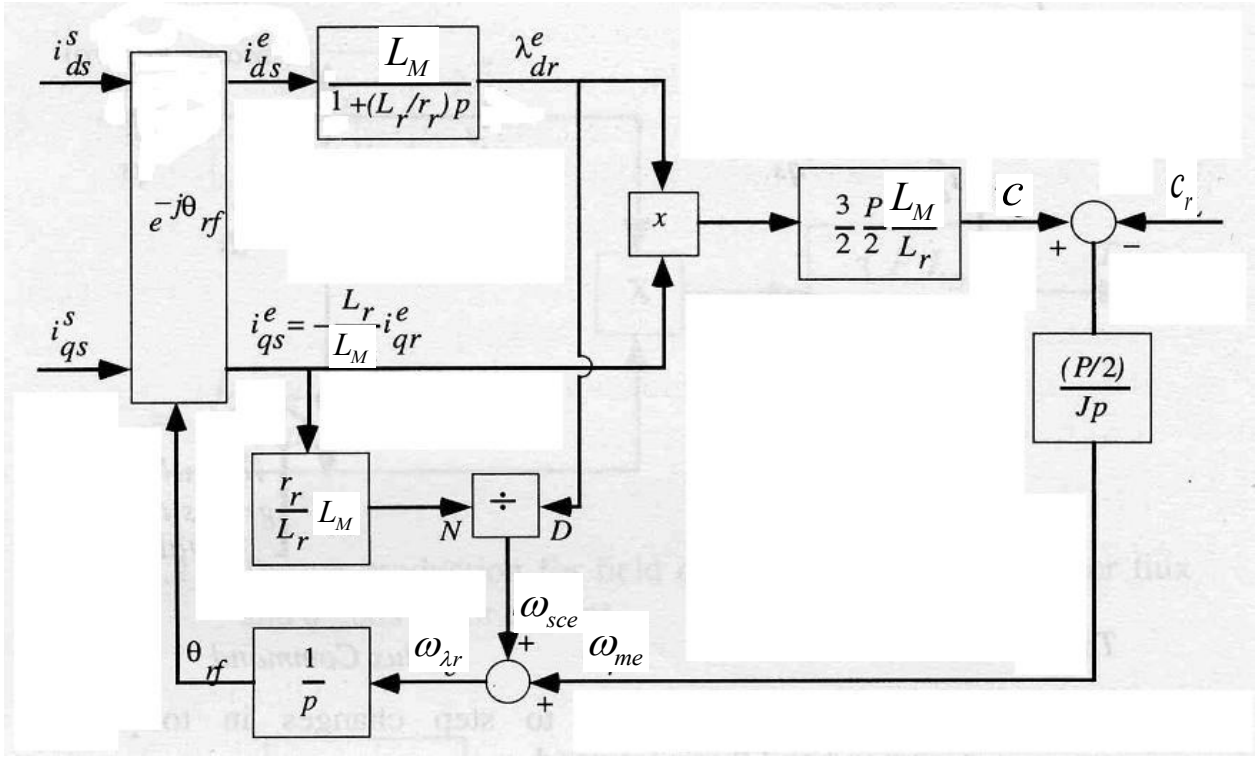
Il flusso di rotore risponde ad una variazione della i_{ds} con un certo ritardo determinato dalla costante di tempo τ_r.

La f) si può anche scrivere -sostituendo nella a) al flusso di rotore l'espressione d)-

$$L_r \frac{di_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} = -L_m \frac{di_{ds}}{dt}$$

da cui si vede che i_{dr} è diversa da zero solo quando c'è una variazione di i_{ds}.

SCHEMA A BLOCCHI DEL M.A. IN ORIENTAMENTO DI CAMPO



Il motore è alimentato in corrente (nel riferimento stazionario: apice *s*), vi è poi la trasformazione rispetto ad un riferimento rotante in sincronismo con il flusso di rotore (apice *e*), tramite l'angolo θ_{rf} (angolo del flusso di rotore). È rappresentata la parte che produce la coppia a partire dal flusso e dalla componente q della corrente di statore. Quindi è modellizzata la parte meccanica ed è mostrato il calcolo dell'angolo θ_{rf} ottenuto integrando la somma della pulsazione meccanica e di scorrimento.

REALIZZAZIONE DELL'ORIENTAMENTO DI CAMPO

È chiaro che per realizzare l'orientamento di campo si deve poter imporre le due componenti della corrente di statore: quella di flusso e quella (ortogonale) di coppia.

Perciò è necessario conoscere la posizione angolare del flusso di rotore.

Nel motore asincrono l'angolo del flusso di rotore **non** è misurabile meccanicamente (p.es. attraverso un sensore).

Sono stati ideati due schemi per determinarlo:

- uno *schema diretto* (dovuto a Blaschke di Siemens) che calcola l'angolo dalla "misura" del flusso di rotore,

- uno *schema indiretto* (dovuto a Hasse di Technische Universität Darmstadt) che risale all'angolo misurando la posizione angolare del rotore e utilizzando la relazione dello scorrimento per trovare l'angolo relativo tra il flusso e il rotore.

SCHEMA BASE PER L'ORIENTAMENTO DI CAMPO

