

**CONTROLLO DIRETTO DI
COPPIA (DTC[®])
DI UN MOTORE ASINCRONO**

INTRODUZIONE

- ❑ Il Controllo Diretto di Coppia (DTC) fa parte della categoria dei controlli “disaccoppiati”: comanda separatamente la coppia ed il flusso di un motore asincrono.

- ❑ Principio di funzionamento:

Dati due riferimenti indipendenti di coppia e flusso, essi vengono inseguiti tramite l'applicazione di opportune tensioni, che correggono gli scostamenti tra valori di riferimento e valori “misurati”. L'algoritmo di controllo sceglie, ad ogni passo di campionamento, tra le otto configurazioni degli interruttori dell'invertitore disponibili, quella più idonea a correggere gli errori rilevati sul flusso e la coppia.

PREGI E DIFETTI

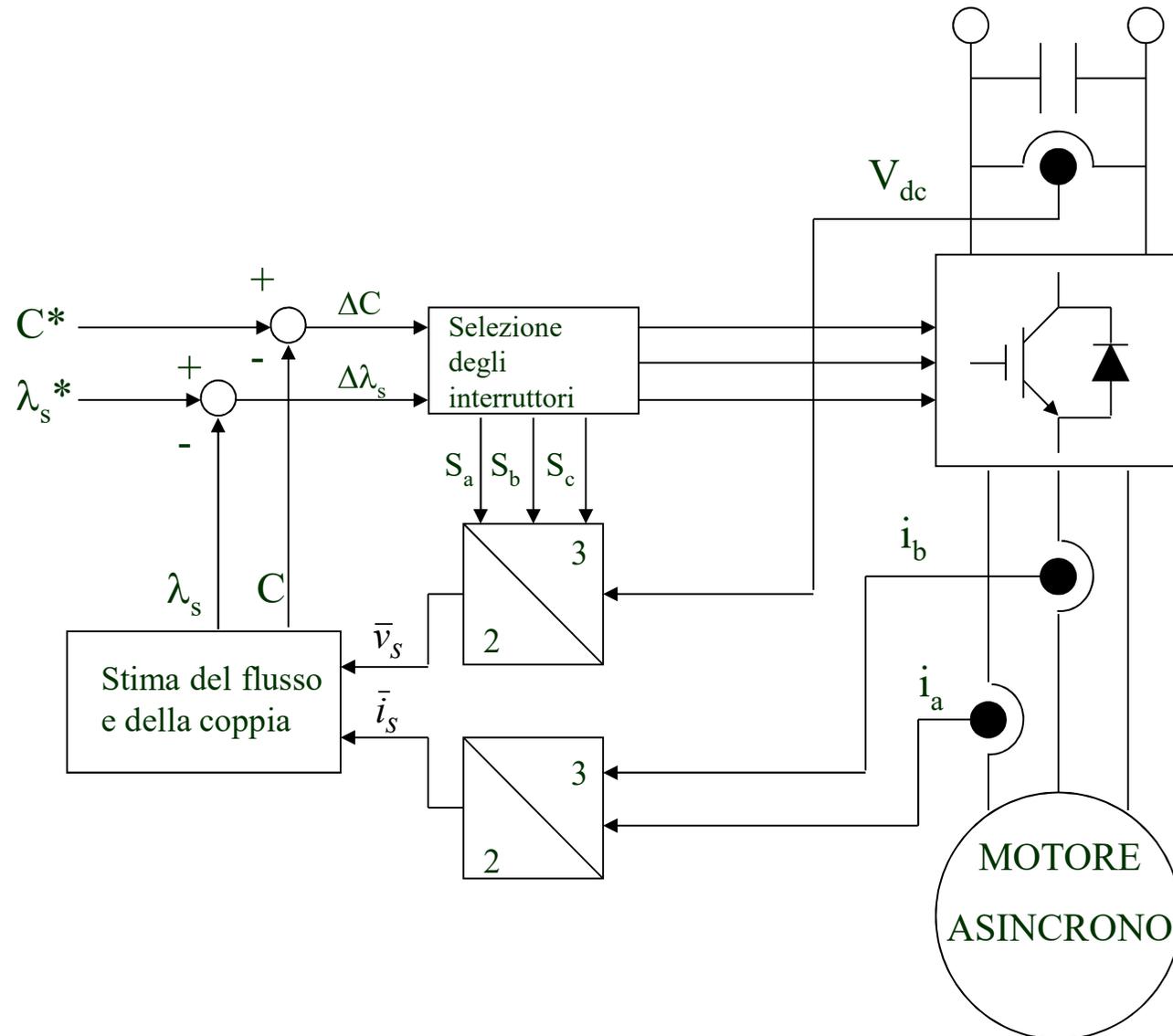
□ Pregi:

- Controllo indipendente di flusso e coppia;
- Elevata dinamica e robustezza;
- Semplicità dell'algoritmo;
- Controllo intrinsecamente “sensorless” (questo dipende dalla stima del flusso e coppia).

□ Difetti:

- Ondulazione della coppia;
- Frequenza di commutazione non prevedibile e variabile;
- Il campo di velocità dipende dalla stima del flusso e della coppia.

SCHEMA A BLOCCHI

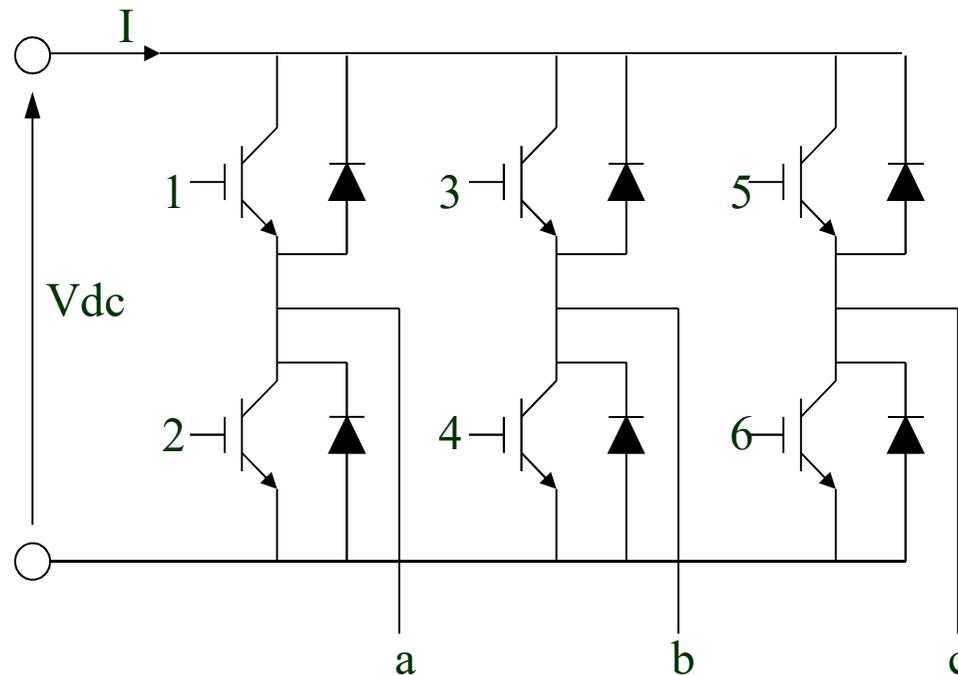


INVERTITORE DI TENSIONE

Per ogni fase si può introdurre una funzione di commutazione $S_k(t)$, così definita:

$S_k(t) = 0$ se è in conduzione l'interruttore che connette la fase k al polo negativo dell'alimentazione in continua;

$S_k(t) = 1$ se è in conduzione l'interruttore che connette la fase k al polo positivo dell'alimentazione in continua.

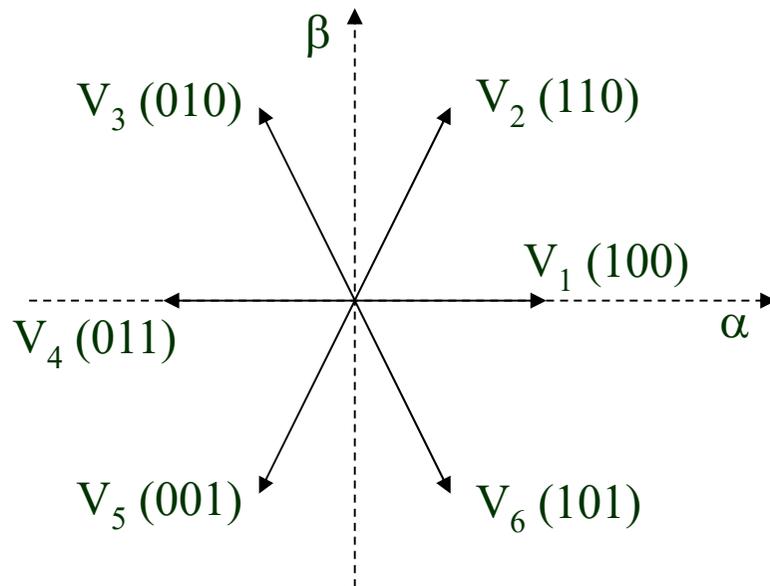


VETTORI SPAZIALI DELLA TENSIONE V_s

Note $S_a(t)$, $S_b(t)$, $S_c(t)$ e la tensione del lato in continua E , si possono ricavare facilmente le tensioni concatenate $V_{ab}(t)$, $V_{bc}(t)$, $V_{ca}(t)$, supponendo, per semplicità di trattazione, che i semiconduttori siano ideali ed in particolare che la caduta di tensione in conduzione sia nulla, come la corrente di perdita in interdizione.

Vettore spaziale della tensione di alimentazione:

$$\bar{v}_s = \frac{2}{3} \left(S_a(t) + S_b(t)e^{j\frac{2}{3}\pi} + S_c(t)e^{j\frac{4}{3}\pi} \right) V_{dc}$$



Vettori nulli:

$$V_0 = (000), V_7 = (111).$$

MODELLO DEL MOTORE

Si ipotizza un motore con superfici interne di statore e rotore lisce, il traferro di dimensioni piccole rispetto al raggio medio di macchina, effetti nulli dei conduttori di testata sul campo magnetico, rotore di tipo avvolto, materiale ferromagnetico con permeabilità tendente all'infinito, con comportamento lineare e senza correnti parassite, inoltre si considera una distribuzione sinusoidale delle forze magnetomotrici al traferro, se così non è, si considera la sola prima armonica. In un sistema di riferimento stazionario, le equazioni della parte elettrica del modello matematico del motore asincrono sono:

$$\bar{v}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt}$$

$$0 = R_r \cdot \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} - j\omega_{me} \cdot \bar{\lambda}_r$$

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + L_M \bar{i}_r$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{i}_r + L_M \bar{i}_s$$

$$L_s = L_{\sigma s} + L_M$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_M$$

$$L_M = \frac{3}{2} L_m$$

MODELLO DEL MOTORE

L'equazione della coppia meccanica prodotta dal motore è

$$C = \frac{3}{2} p \cdot \bar{i}_s \bullet j \bar{\lambda}_s$$

il simbolo \bullet sta per prodotto scalare.

L'equazione meccanica del motore è

$$C - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m$$

EFFETTO DELLA TENSIONE DI STATORE SUL FLUSSO DI STATORE

Dall'equazione di statore, trascurando la caduta di tensione sulla resistenza di statore, si ha:

$$\bar{v}_s \cong \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt}$$

da cui, mettendo in evidenza il flusso e considerando un intervallo di tempo ΔT sufficientemente piccolo, si ricava

$$\Delta \bar{\lambda}_s \cong \bar{v}_s \cdot \Delta T$$

La variazione del flusso di statore è proporzionale alla tensione applicata: il vettore che rappresenta la variazione del flusso di statore ha la stessa direzione del vettore che rappresenta la tensione di statore applicata e il modulo è proporzionale (tramite ΔT) al modulo della tensione di statore.

Dall'equazione precedente si ricava l'equazione alle differenze (dove si è scelto di usare un periodo di campionamento/controllo T_c e quindi $\Delta T = T_c$):

$$\bar{\lambda}_s (t + T_c) \cong \bar{\lambda}_s (t) + \bar{v}_s \cdot T_c$$

SETTORI ANGOLARI

Per il DTC, il piano di Gauss può essere suddiviso in sei settori angolari di ampiezza 60° e nominati da “Settore 1” a “Settore 6”, definiti nel modo seguente:

$$\text{Settore1} \quad -\frac{\pi}{6} \leq \theta_e < \frac{\pi}{6}$$

$$\text{Settore2} \quad \frac{\pi}{6} \leq \theta_e < \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Settore3} \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta_e < \frac{5}{6}\pi$$

$$\text{Settore4} \quad \frac{5}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{7}{6}\pi$$

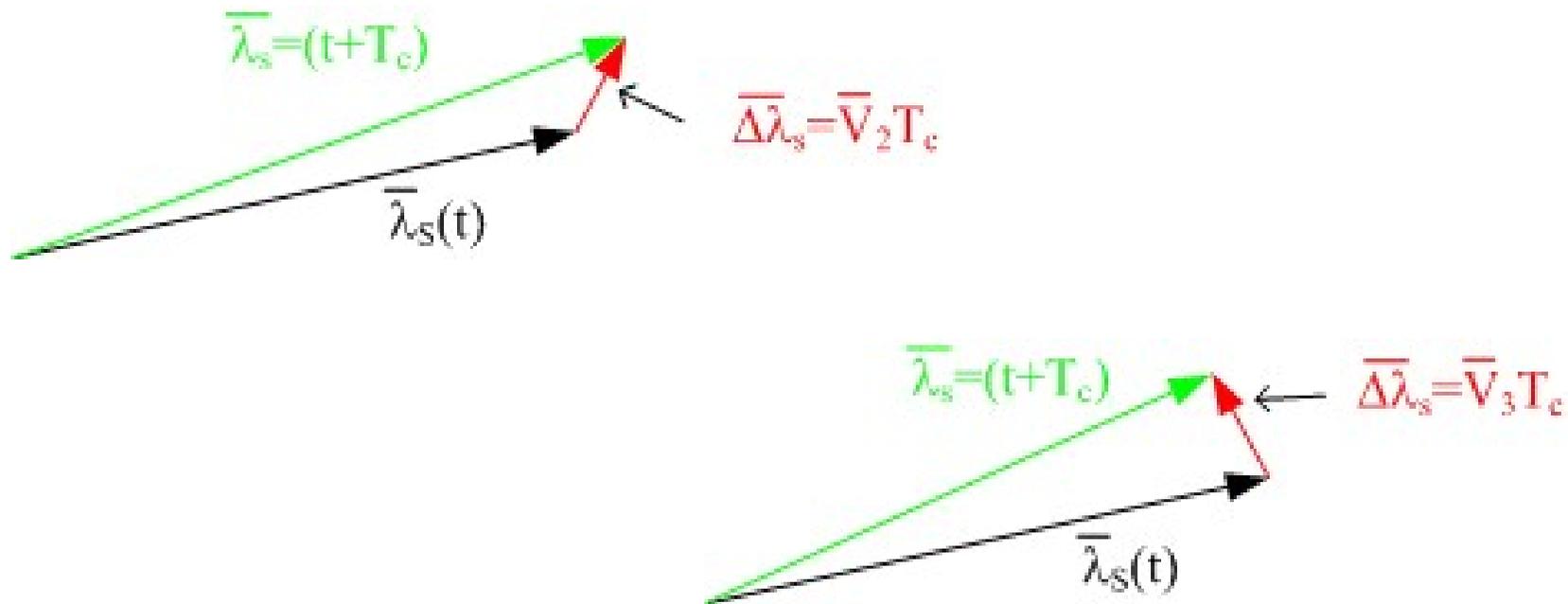
$$\text{Settore5} \quad \frac{7}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{3}{2}\pi$$

$$\text{Settore6} \quad \frac{3}{2}\pi \leq \theta_e < -\frac{\pi}{6}$$

FLUSSO DI STATORE

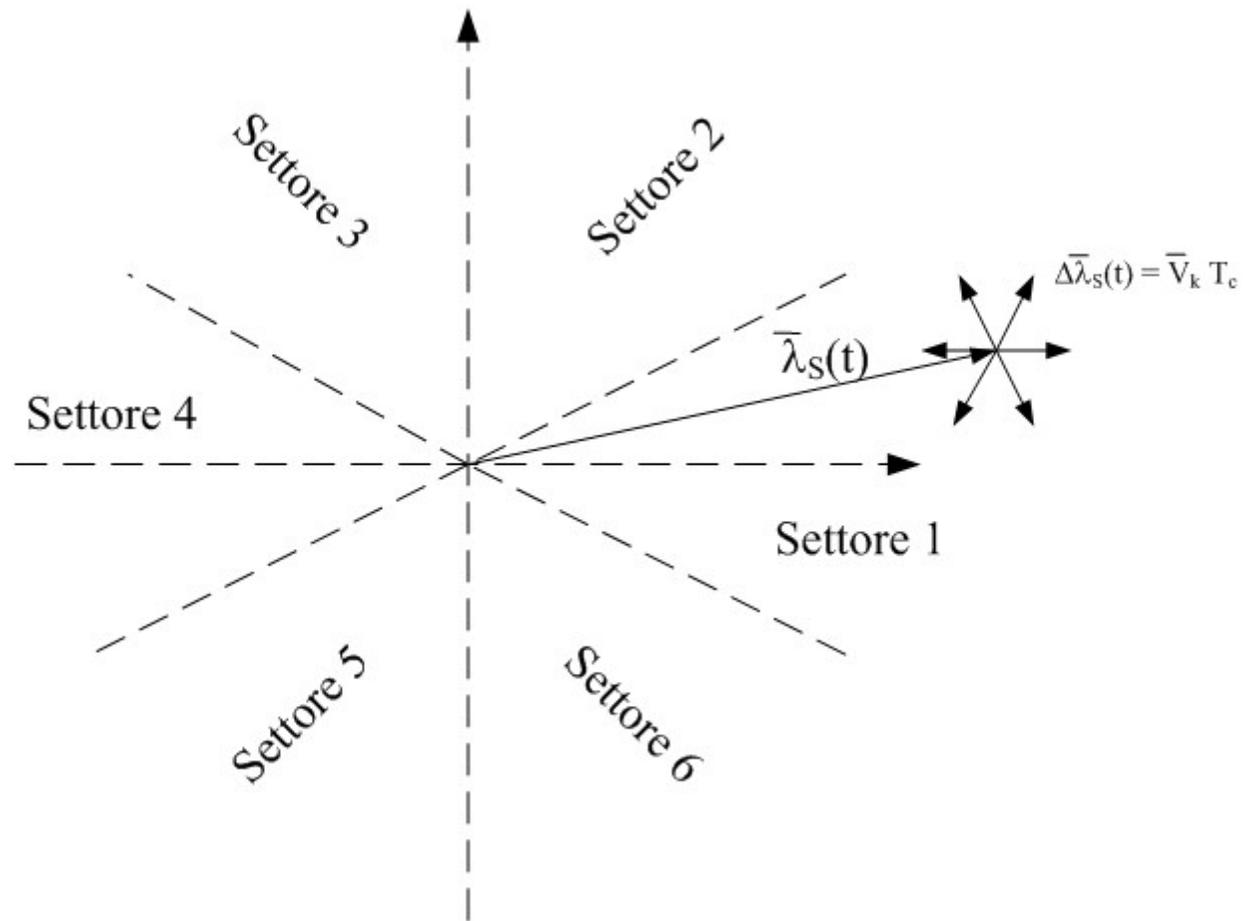
Il motore è alimentato tramite un invertitore e dunque le tensioni di statore possibili sono rappresentate dai sei vettori spaziali di tensione attivi e dai due vettori nulli prodotti dall'invertitore.

Esempi di effetto della tensione di statore sul flusso di statore



FLUSSO DI STATORE

Interpretazione grafica



ESPRESSIONE DELLA COPPIA

Utilizzando le equazioni di legame si ottiene

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\lambda}_s}{\sigma L_s} - \frac{L_M}{\sigma \cdot L_s L_r} \bar{\lambda}_r$$

Sostituendo nell'espressione della coppia si ha

$$C = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{\sigma L_s L_r} \bar{\lambda}_s \bullet j \bar{\lambda}_r$$

LEGAME TRA I FLUSSI DI STATORE E DI ROTORE DEL MOTORE

Dalle equazioni di legame (o dal circuito equivalente “a gamma”) si ottiene

$$\bar{i}_r = \frac{1}{\sigma L_r} \bar{\lambda}_r - \frac{L_M}{\sigma L_r L_s} \bar{\lambda}_s$$

Sostituendo questa espressione nell’equazione di rotore del modello matematico espresso in un sistema di riferimento solidale con il rotore si ha

$$\sigma \tau_r \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + \bar{\lambda}_r = \frac{L_M}{L_s} \bar{\lambda}_s$$

Nel dominio di Laplace l’espressione precedente diventa

$$\bar{A}_r(s) = \frac{L_M}{L_s} \frac{1}{1 + s\sigma\tau_r} \bar{A}_s(s)$$

COPPIA E FLUSSI

Osservazioni:

1) dall'espressione della coppia si deduce che essa dipende dal prodotto scalare tra il flusso di statore e quello di rotore ruotato di 90° elettrici; è quindi proporzionale ai rispettivi moduli e al seno dell'angolo compreso.

2) Dall'equazione che lega i due flussi del motore si deduce che il flusso di rotore è legato a quello di statore da una relazione dinamica del primo ordine di tipo passa-basso, per cui il primo insegue il secondo con un ritardo legato ai parametri del motore ($\sigma\tau_r$).

Da ciò consegue che, applicando una determinata tensione di statore, si provoca una variazione del flusso di statore ad essa proporzionale e di conseguenza una variazione della coppia dovuta a due contributi:

1) variazione del modulo del flusso di statore, che agisce sul prodotto scalare sia direttamente, in modo istantaneo, che indirettamente attraverso la variazione del modulo del flusso di rotore, con un ritardo legato alla costante di tempo di rotore;

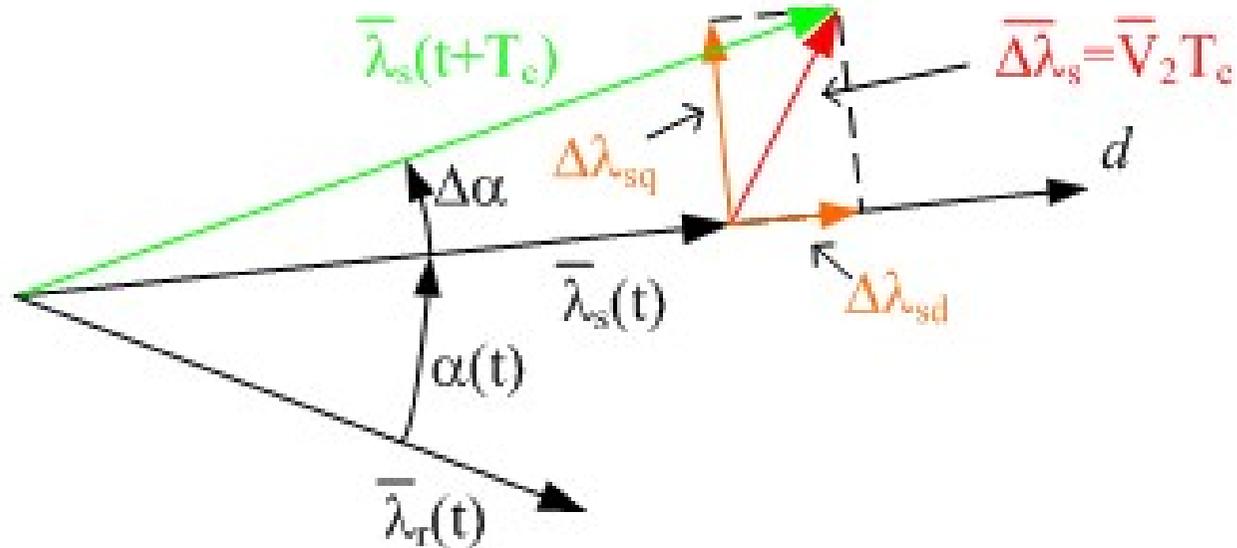
2) variazione dell'angolo tra i due flussi di statore e di rotore, che agisce istantaneamente.

EFFETTO SULLA COPPIA

Il primo contributo determina una variazione permanente della coppia, mentre il secondo una variazione solo temporanea, limitata nel tempo dalla dinamica di tipo passa-basso che tende ad annullare lo sfasamento tra i flussi, provocato dal controllo. Questo contributo è comunque importante perché il suo effetto è istantaneo e l'intervallo di tempo durante il quale agisce la tensione selezionata (periodo di campionamento) è molto piccolo rispetto alla costante di tempo $\sigma\tau_r$, che governa la dinamica tra i due flussi, per cui in tale intervallo si può supporre che l'angolo del flusso di rotore non sia variato apprezzabilmente a causa della dinamica stessa.

Si noti che in questo modo non è possibile ottenere un disaccoppiamento intrinseco dei comandi di flusso e coppia come nel controllo ad orientamento di campo, perché qualsiasi tensione applicata determina comunque una variazione di entrambe queste grandezze. Quello che si può fare è seguire due riferimenti indipendenti, scegliendo le tensioni da applicare di volta in volta per annullare gli errori tra i valori stimati e quelli di riferimento. In particolare, per correggere gli errori relativi alla coppia si agisce sullo sfasamento tra flusso di statore e di rotore, mentre per correggere il flusso si agisce direttamente sul suo modulo.

INTERPRETAZIONE GRAFICA



Il vettore spaziale rappresentativo della variazione del flusso di statore ($\Delta\lambda_s$) può essere scomposto in due componenti ottenute dalle proiezioni: una ($\Delta\lambda_{sd}$) lungo la direzione di λ_s stesso, l'altra ($\Delta\lambda_{sq}$) lungo una direzione ad esso ortogonale. In tal caso la prima componente costituisce la variazione del modulo del flusso, mentre l'altra coincide con la variazione $\Delta\alpha$ dell'angolo (infatti, nell'ipotesi di piccola variazione di angolo, la corda coincide con l'arco, che coincide a sua volta con l'angolo al centro in radianti di un settore angolare il cui raggio è il modulo di $\lambda_s(t+T_c)$).

TABELLA EFFETTI SU FLUSSO E COPPIA

Inizialmente si assumano le seguenti ipotesi semplificative:

- vettore spaziale flusso di rotore fermo nell'intervallo T_c ;
- variazione del modulo del flusso di statore determinata solo da $\Delta\lambda_{sd}$;
- variazione della coppia determinata solo dalla variazione $\Delta\alpha$ dell'angolo, cioè solo da $\Delta\lambda_{sq}$;
- il vettore flusso di statore si trovi sulla bisettrice del settore n. 1.

Ad esempio nel caso della figura della dia precedente si ha un aumento del modulo del flusso di statore e un aumento della coppia (causato da $\Delta\alpha > 0$).

Si può a questo punto costruire la seguente tabella riassuntiva degli effetti di ciascun vettore spaziale di tensione prodotto da un invertitore di tensione trifase sul modulo del flusso di statore e sulla coppia di un motore asincrono.

	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_0, V_7
λ_s	↓	↑	↑↑	↑	↓	↓↓	↓↑
C	↓	↓	↓↑	↑	↑	↓↑	↓↑

Tabelle analoghe si possono costruire nell'ipotesi che il flusso di statore si trovi sulla bisettrice di ciascuno degli altri cinque settori definiti.

EFFETTO DELLA VELOCITA'

Si tengano presenti le seguenti considerazioni:

- i) l'applicazione di un vettore spaziale di tensione di statore ha l'effetto di far "scattare" il vettore flusso di statore $\underline{\lambda}_s(t)$ (nell'intervallo T_c) in un nuovo vettore $\underline{\lambda}_s(t+T_c)$ (in sostanza il vettore flusso di statore si muove a scatti);
- ii) conseguentemente il flusso di rotore insegue il flusso di statore, a causa del suo legame dinamico con esso, muovendosi con continuità;
- iii) in condizioni di regime permanente il vettore flusso di rotore ruota alla velocità di sincronismo ω_s e quindi nell'intervallo T_c esso percorre l'angolo $\omega_s T_c$ avvicinandosi al vettore flusso di statore, per cui la velocità produce una riduzione dell'angolo compreso tra i due vettori spaziali flusso di statore e di rotore, con conseguente diminuzione della coppia;
- iv) a bassa velocità, corrispondente a ω_s piccolo, l'angolo $\omega_s T_c$ si può considerare trascurabile per cui, in questa condizione di funzionamento, si può supporre il vettore spaziale flusso di rotore fermo durante l'intervallo T_c ;
- v) ad alta velocità, corrispondente a ω_s grande, l'angolo $\omega_s T_c$ non è più trascurabile, per cui si fa sentire apprezzabilmente la diminuzione della coppia prodotta dal motore a causa dell'avvicinamento angolare del vettore flusso di rotore al vettore flusso di statore.

INTERPRETAZIONE GRAFICA

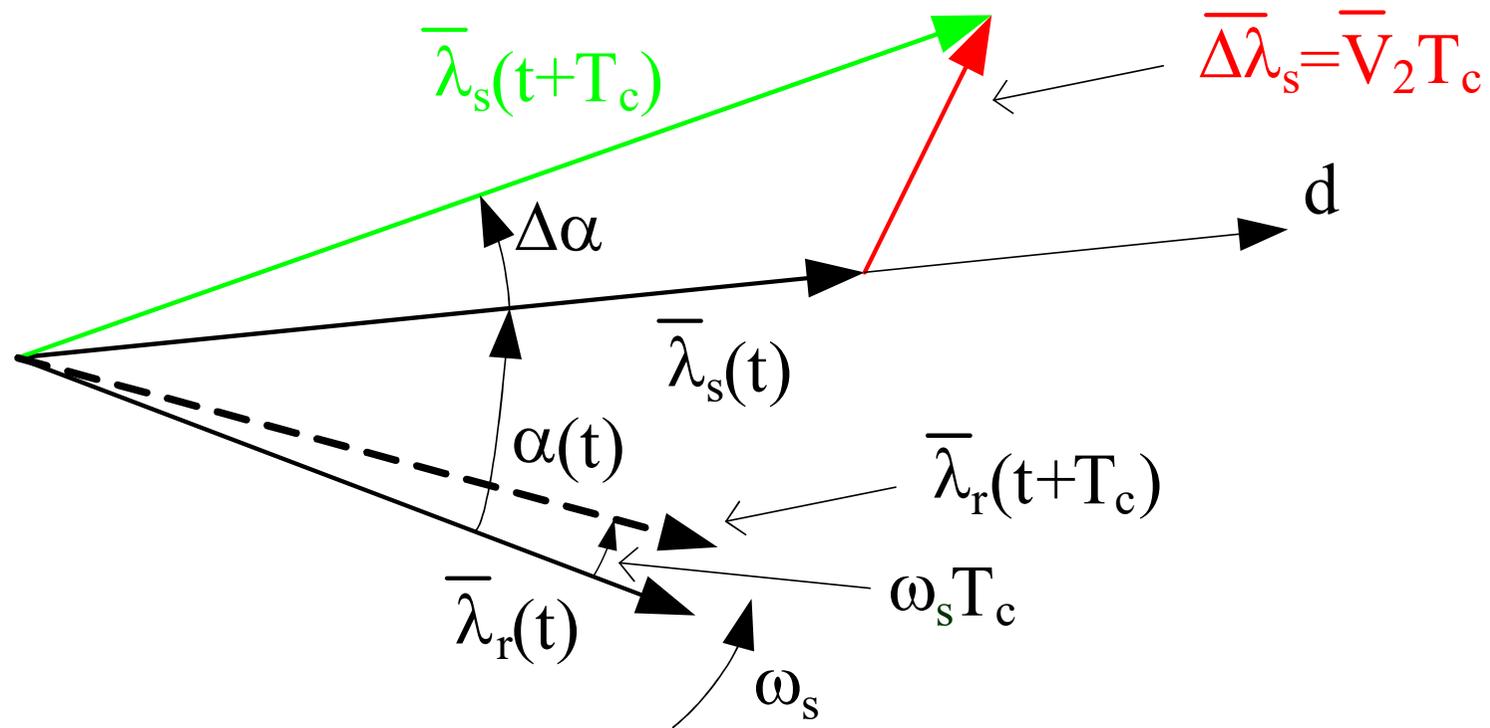


TABELLA MODIFICATA DALLA VELOCITA'

Tabella relativa al flusso di statore $\bar{\lambda}_s$ posizionato nel settore n.1.

	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₀ , V ₇
λ_s	↓	↑	↑↑	↑	↓	↓↓	↓↑
C (ω_{me} piccola)	↓	↓	↓↑	↑	↑	↓↑	↓↑
C (ω_{me} elevata)	↓↓*	↓↓*	↓	↑↓*	↑↓*	↓	↓

* La seconda freccia, in tratto meno marcato, indica che la corrispondente azione dipende dal valore della velocità: più la velocità si avvicina al valore nominale, più marcato (tendente al nero pieno) è il tratto della freccia.

EFFETTO DELLA CADUTA DI TENSIONE SULLA RESISTENZA DI STATORE

L'equazione fondamentale del DTC per il flusso di statore è stata ottenuta trascurando la c.d.t. sulla resistenza di statore prodotta dalla corrente di statore. La presenza di tale c.d.t comporta una modifica del vettore flusso di statore rispetto a quello ottenuto con l'approssimazione:

$$\bar{\lambda}_s(t + T_c) = \bar{\lambda}_s(t) + (\bar{v}_s(t) - R_s \bar{i}_s(t)) T_c$$

Se ci si limita a considerare il modulo, si ottiene un valore più piccolo del modulo del flusso di statore rispetto a quello determinato con la formula approssimata e conseguentemente anche un valore di coppia leggermente inferiore.

Quindi la c.d.t. sulla resistenza di statore influisce diminuendo leggermente sia il flusso che la coppia. L'azione comunque è debole e se ne tiene conto in seconda approssimazione, per spiegare fenomeni secondari che si riescono a giustificare solo tramite gli effetti prodotti da tale c.d.t..

FLUSSO DI STATORE NEL SESTANTE

Le tabelle delle dia precedenti, in cui sono riportati gli effetti su flusso e coppia prodotti dalla tensione di statore applicata al motore, sono costruite per uno specifico sestante con l'ipotesi che il vettore spaziale del flusso di statore sia *posizionato sulla bisettrice* del sestante.

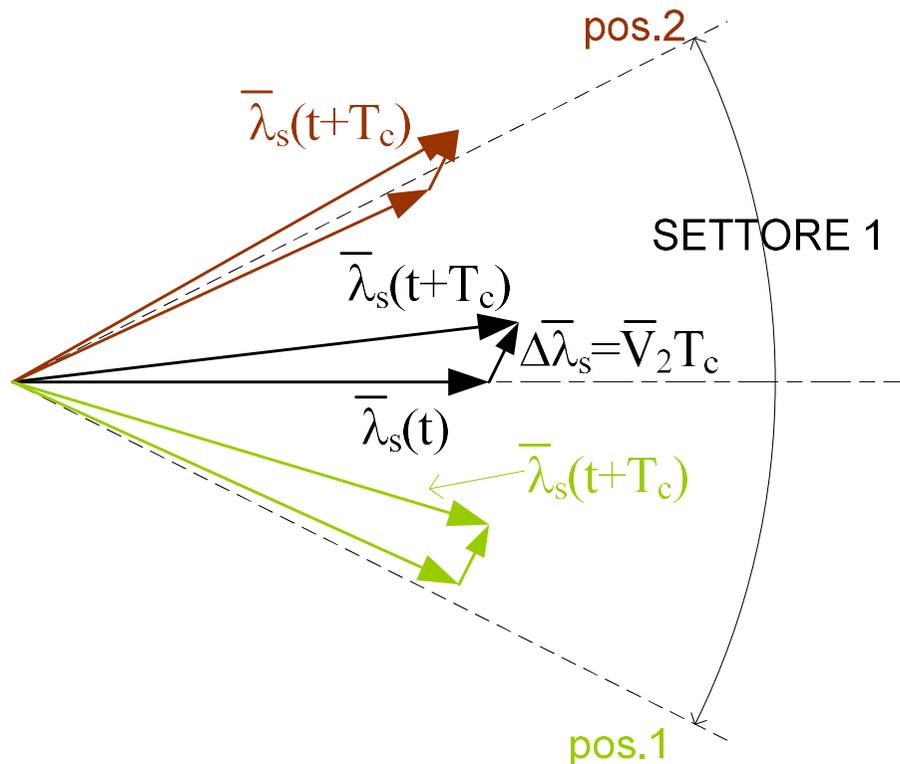
In realtà, all'interno del sestante, il vettore del flusso di statore potrebbe assumere una qualsiasi posizione con angolo compreso entro i 60 gradi dell'ampiezza del sestante.

Dunque gli effetti su flusso e coppia della tensione di statore applicata al motore dipendono dalla effettiva posizione del vettore flusso di statore all'interno del sestante. Questa circostanza non è considerata nella costruzione delle tabelle citate.

Un particolare vettore di tensione (una colonna della tabella) produrrà fenomeni leggermente diversi da quelli indicati nelle tabelle (che sono ottenute, si ricordi, con il vettore flusso posizionato sulla bisettrice del sestante) sia sul flusso che sulla coppia. Anche questi sono da considerarsi effetti di seconda approssimazione.

FLUSSO DI STATORE NEL SESTANTE

Dall'esame della figura qui riportata si riconosce che all'inizio del sestante (posizione 1) l'effetto sulla coppia è pronunciato, mentre sul modulo del flusso è debole. Alla fine del sestante (posizione 2) l'effetto sulla coppia è debole, mentre sul modulo del flusso è pronunciato.



Nel caso intermedio (flusso di statore in corrispondenza della bisettrice) gli effetti sul flusso e sulla coppia assumono un valore medio tra le prime due circostanze.

STRATEGIE DI CONTROLLO DEL DTC

Le strategie di controllo del DTC determinano la scelta del vettore spaziale di tensione di statore da applicare al motore. Ci sono quattro possibili configurazioni ottenute dal confronto tra i riferimenti del modulo del flusso di statore e della coppia con i corrispondenti valori prodotti dal motore (determinati tramite stima).

Il simbolo \uparrow indica una richiesta di aumento della coppia o del modulo del flusso di statore, mentre \downarrow indica richiesta di diminuzione. Nel primo caso i valori stimati del modulo del flusso o della coppia sono minori dei corrispondenti valori dei riferimenti (errore positivo), nel secondo caso sono maggiori (errore negativo).

STRATEGIE DI CONTROLLO DEL DTC

Sia k il numero del sestante angolare in cui si trova il vettore spaziale del flusso di statore in un certo istante. La tabella sottostante permette di ottenere il vettore da applicare.

	$C \uparrow \lambda_s \uparrow$	$C \uparrow \lambda_s \downarrow$	$C \downarrow \lambda_s \uparrow$	$C \downarrow \lambda_s \downarrow$
Strategia A	V_{k+1}	V_{k+2}	V_0, V_7	V_0, V_7
Strategia B	V_{k+1}	V_{k+2}	V_k	V_0, V_7
Strategia C	V_{k+1}	V_{k+2}	V_k	V_{k+3}
Strategia D	V_{k+1}	V_{k+2}	V_{k+5}	V_{k+4}

Se i pedici dei simboli del vettore di tensione riportati in tabella risultano maggiori di 6, sono da considerarsi ottenuti tramite l'operazione modulo 6 oppure in alternativa sottraendo 6.

CARATTERISTICHE DELLE STRATEGIE

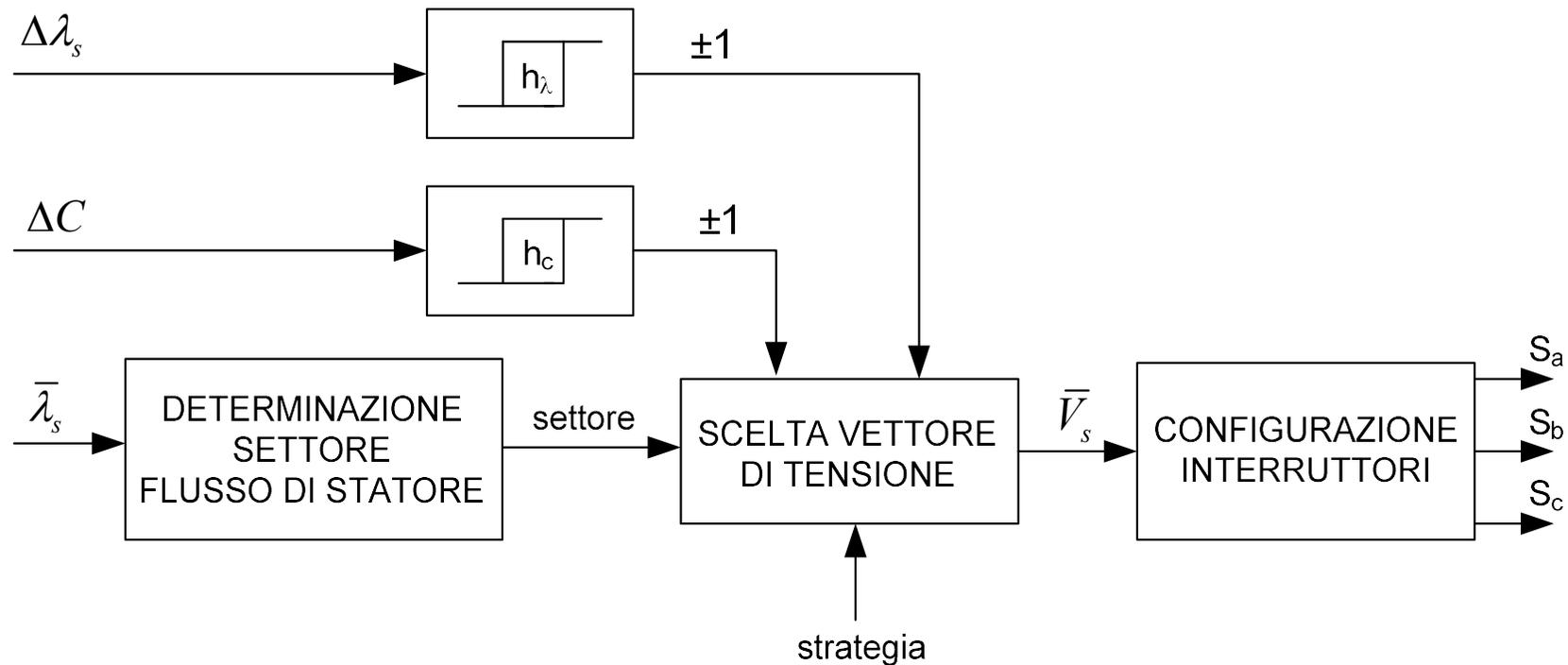
Delle quattro strategie introdotte precedentemente, le più utilizzate sono le strategie 'A' e 'D'. Pertanto solo queste due verranno poste a confronto.

Strategia A: privilegia il controllo di coppia, si ha un deflussaggio del motore alle basse velocità; buon comportamento alle alte velocità e frequenza di commutazione piuttosto bassa, con conseguente contenimento delle perdite di commutazione; come contropartita è in grado di far funzionare l'azionamento *solo nel primo quadrante*.

Strategia D: anche in questo caso le prestazioni dinamiche dipendono dalla velocità di rotazione e migliorano man mano che questa cresce; si ha una frequenza di commutazione più alta rispetto a tutte le altre strategie riportate in tabella e una ondulazione di coppia di maggiore ampiezza e frequenza; ma permette in maniera semplice ed agevole l'inversione del verso di rotazione del motore compresa la frenatura, quindi consente all'azionamento di lavorare su quattro quadranti.

SELETTORE DEGLI INTERRUTTORI

Il selettore degli interruttori svolge tre operazioni principali, rappresentate nello schema dai tre blocchi.



Significato dell'uscita dei blocchi di isteresi:

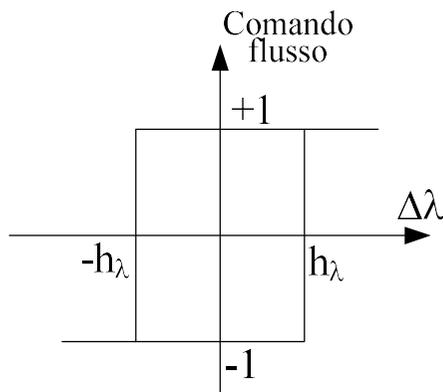
+1 : *aumento* del modulo del flusso o della coppia

-1 : *diminuzione* del modulo del flusso o della coppia

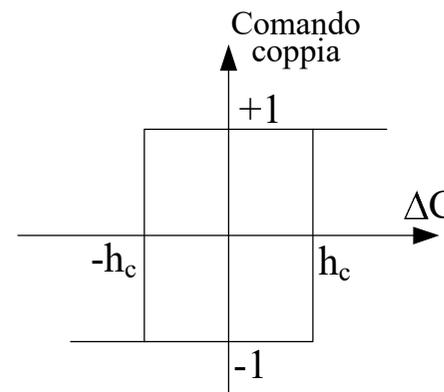
SELETTORE DEGLI INTERRUTTORI

Il primo blocco determina il settore di appartenenza del vettore spaziale flusso di statore, ottenuto quest'ultimo tramite uno stimatore (nella versione più "tradizionale" viene usato lo stimatore con modello di tensione).

Il blocco successivo sceglie il vettore di tensione in base a i) strategia, ii) settore di appartenenza del vettore flusso di statore e iii) errori di flusso e coppia ($D\lambda_s$, DC). Tali errori vengono elaborati preventivamente da due isteresi a due livelli con ampiezza h_λ e h_c rispettivamente di flusso e di coppia.



Comando di flusso:
+1 : *aumento* del modulo del flusso
-1 : *diminuzione* del modulo del flusso



Comando di coppia:
+1 : *aumento* della coppia
-1 : *diminuzione* della coppia

Infine il terzo blocco converte il vettore di tensione nella corrispondente configurazione degli interruttori dei tre rami dell'invertitore.

SCELTA DELLA STRATEGIA

Precedentemente si sono evidenziate le caratteristiche e le differenze di funzionamento del DTC quando si usino le due strategie A e D.

Se ne conclude che la strategia A è utile quando l'azionamento opera a regime, cioè quando coppia e velocità sono costanti. Mentre la strategia D è necessaria quando si voglia variare in diminuzione (frenatura) la coppia in maniera "forzata": questa circostanza può presentarsi ad esempio in risposta ad una variazione in diminuzione del riferimento di velocità oppure quando avvenga un rilascio di carico in un controllo di velocità.

L'uso della strategia A vincola l'azionamento ad operare mantenendosi in un solo quadrante coppia-velocità (il primo nel caso di "motore in avanti", il terzo nel caso di "motore indietro"); mentre la strategia C consente all'azionamento di operare su tutti i quattro quadranti (nel senso che si riesce a passare da un quadrante all'altro, in pratica consente di operare da freno oltre che da motore).

Infine val la pena ribadire le conseguenze sull'ondulazione di coppia: con la strategia A si ottiene una pulsazione di coppia avente frequenza e ampiezza decisamente inferiori rispetto a quanto si ottiene utilizzando la strategia D.

SCELTA DELLA STRATEGIA

Le considerazioni precedenti sembra conducano alla seguente conclusione: quando sia richiesto un azionamento in grado di operare su tutti e quattro i quadranti (prestazione imposta dal tipo di carico) si deve usare la strategia D; si deve quindi accettare contestualmente la corrispondente ondulazione di coppia anche in quelle quote parti del ciclo di lavoro nelle quali l'azionamento opera a regime (nel primo o nel terzo quadrante).

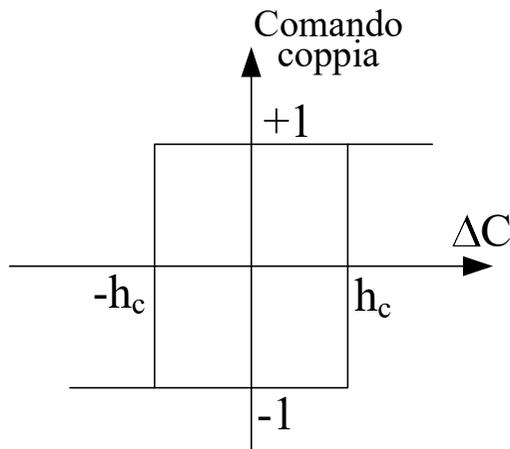
In realtà sarebbe molto più opportuno che durante il funzionamento a regime venisse utilizzata la strategia A, passando alla D solo quando fosse necessario frenare il motore (coppia di segno opposto alla velocità).

Questo è possibile se si usa ad esempio una isteresi della coppia a tre livelli, con l'uscita che assume i valori +1, 0, -1. Ai tre valori assunti dall'uscita di tale isteresi modificata corrispondono le seguenti scelte:

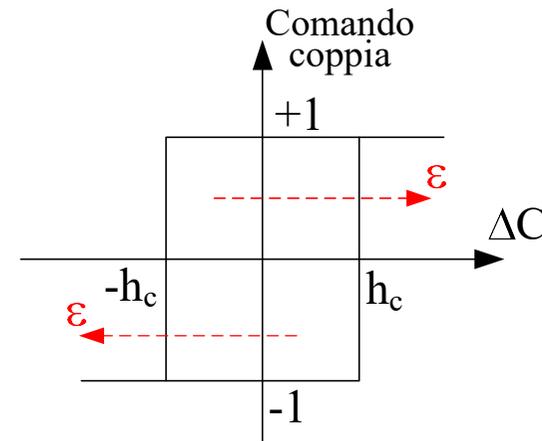
- **+1**, il selettore sceglie un vettore di tensione che faccia aumentare la coppia $\bar{V}_{k+1}, \bar{V}_{k+2}$ (scelta comune ad entrambe le strategie A e D);
- **0**, il selettore sceglie il vettore nullo \bar{V}_0, \bar{V}_7 (tipico della strategia A);
- **-1**, il selettore sceglie un vettore attivo che faccia diminuire la coppia $\bar{V}_{k-1}, \bar{V}_{k-2}$ (scelta conforme alla strategia D).

ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

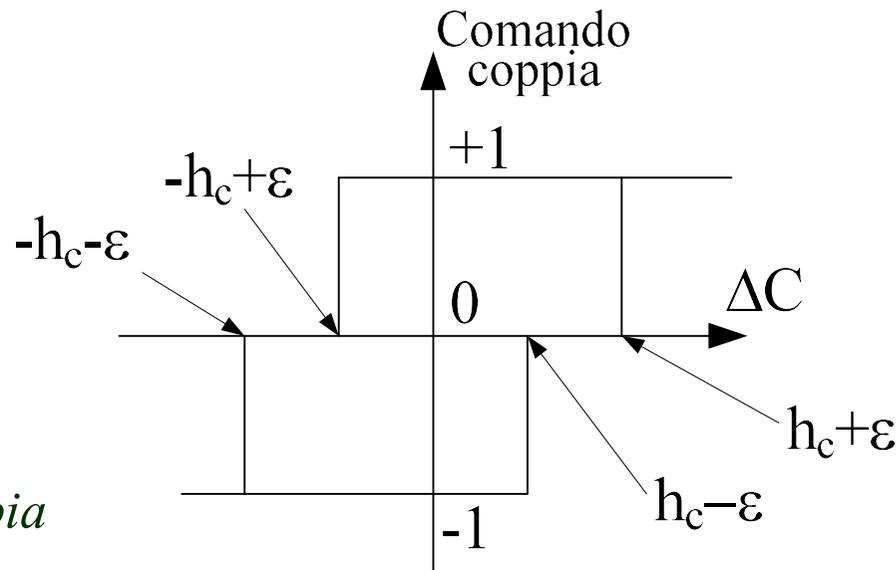
Isteresi originale (due livelli)



Modifica: spostamento di ε a dx della parte superiore e di ε a sx della parte inferiore

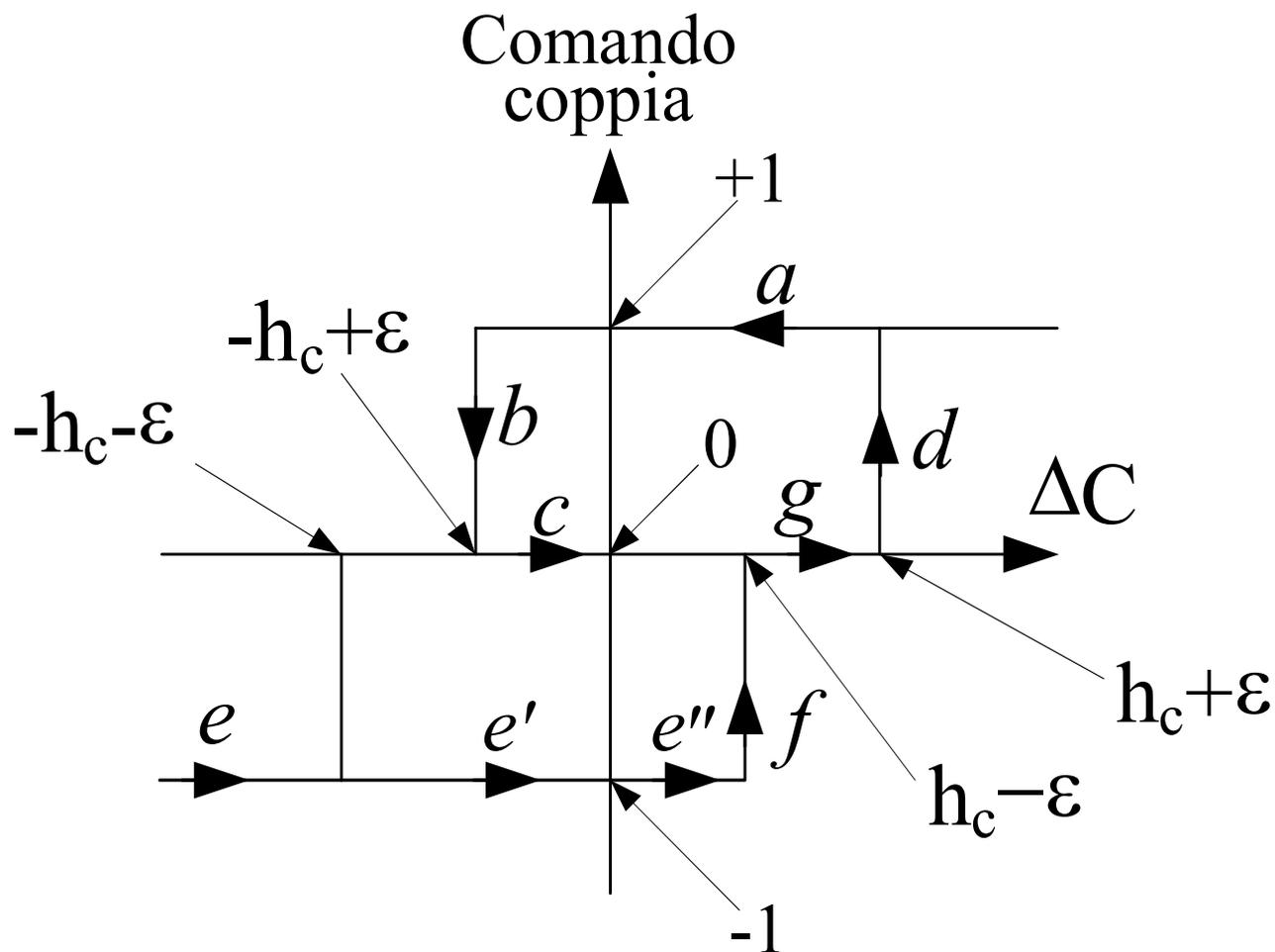


Isteresi modificata (uscita a tre livelli):
 $+1 \rightarrow$ aumento coppia
 $0 \rightarrow$ vettore nullo
 $-1 \rightarrow$ diminuzione coppia



ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

Per seguire l'evoluzione nel funzionamento dell'azionamento descritta di seguito si faccia riferimento alla seguente figura.



ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

Si supponga che l'azionamento stia operando in regime permanente nel primo quadrante coppia-velocità e di percorrere la transizione a per la quale $\Delta C > 0$ ($C_{\text{rif}} > C$), l'uscita dell'isteresi è $+1$, il controllo sta applicando un vettore di tensione affinché la coppia C aumenti e l'errore di coppia diminuisca (durante questa transizione l'errore raggiunge lo zero e si inverte di segno diventando negativo).

La richiesta di aumento di coppia continua fino a che si raggiunge $C \geq (C_{\text{rif}} + h_c - \varepsilon)$ cioè $\Delta C \leq -h_c + \varepsilon$, pertanto l'isteresi commuta sull'uscita 0 (commutazione b). Di conseguenza viene scelto il vettore di tensione nullo.

La coppia diminuisce e l'errore (negativo) torna ad aumentare in termini relativi (diminuisce in valore assoluto): si annulla e poi diventa positivo (transizione $c-g$). Il processo prosegue fino a che si raggiunge $C \leq (C_{\text{rif}} - h_c - \varepsilon)$ cioè $\Delta C \geq h_c + \varepsilon$. Questo evento produce il passaggio da 0 a $+1$ (transizione d) e si chiude il ciclo.

In questa condizione operativa il controllo DTC funziona con la *strategia A*.

ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

riduzione del carico

Si supponga che ad un certo istante si abbia una diminuzione della coppia di carico; il controllo di velocità risponde con una diminuzione della coppia di riferimento ma sempre positiva (continua ad operare nel primo quadrante).

L'errore di coppia diventa molto negativo tale che $\Delta C < -h_c - \varepsilon$.

L'uscita dell'isteresi assume il valore -1 e il controllo sceglie di applicare al motore un vettore di tensione attivo affinché la coppia del motore diminuisca (inseguendo il riferimento) secondo la convenzione introdotta sull'isteresi nella dia 32 (transizione *e*), cioè il DTC ricorre alla *strategia D*.

Il DTC continua questo processo finché l'errore di coppia si annulla, cambia di segno e raggiunge il valore $\Delta C \geq h_c - \varepsilon$ e la coppia diventa $C \leq (C_{rif} - h_c + \varepsilon)$, l'isteresi commuta la sua uscita da -1 al valore 0 (commutazione *f*).

Il DTC applica il vettore di tensione nullo e la coppia continua a diminuire finché raggiunge il valore $C \leq (C_{rif} - h_c - \varepsilon)$ e l'errore diventa $\Delta C \geq h_c + \varepsilon$; l'isteresi commuta ancora la sua uscita dal valore 0 a +1 (transizione *g*).

Alla fine si innesca nuovamente il ciclo *d-a-b-c-g*, l'azionamento riassume un comportamento di regime permanente e il DTC rientra nella *strategia A*.

ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

frenatura

In maniera analoga si può ragionare quando venga chiesta dal regolatore di velocità (o da un comando diretto della coppia di riferimento) una frenatura (funzionamento nel IV quadrante coppia-velocità), quindi la coppia di riferimento per il DTC diventa **negativa** (velocità positiva).

Si supponga che prima dell'istante in cui si passa da motore a freno l'azionamento stia percorrendo il ciclo *a-b-c-g-d* sull'isteresi di coppia. In tale ipotesi la coppia prodotta dal motore è positiva per cui l'errore di coppia iniziale è molto negativo e dunque l'uscita dell'isteresi assume il valore -1 e si innesca la transizione *e* (ancora una volta il DTC ricorre alla *strategia D*).

La coppia prima diminuisce in quanto vengono utilizzati dei vettori di tensione che tendono a far ruotare il flusso di statore "all'indietro" rispetto al verso della velocità. Poi, persistendo tali vettori di tensione, il vettore flusso di statore raggiunge e supera "all'indietro" il vettore flusso di rotore. Di conseguenza la coppia prodotta dal motore diventa negativa.

Si ricordi che il motore continua a ruotare nel verso positivo (per convenzione antiorario) e quindi anche il vettore flusso di rotore continua a ruotare nello stesso verso.

ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

passaggio da primo a quarto quadrante

La coppia poi raggiunge il valore del riferimento (negativo) e l'errore tende ad annullarsi (provenendo da valori negativi, transizione e').

A causa dell'isteresi, la coppia supera (in senso negativo) il riferimento fino a raggiungere il valore $C \leq (C_{\text{rif}} - h_c + \varepsilon)$ e l'errore diventa positivo raggiungendo il valore $\Delta C \geq h_c - \varepsilon$ (transizione e'').

A questo punto l'isteresi commuta sul valore 0 (commutazione f), il DTC applica il vettore di tensione nullo, la coppia continua a diminuire verso valori ancora più negativi ma con variazione più graduale in quanto la diminuzione è prodotta solo dalla rotazione "in avanti" del vettore flusso di rotore dovuta alla velocità (transizione g).

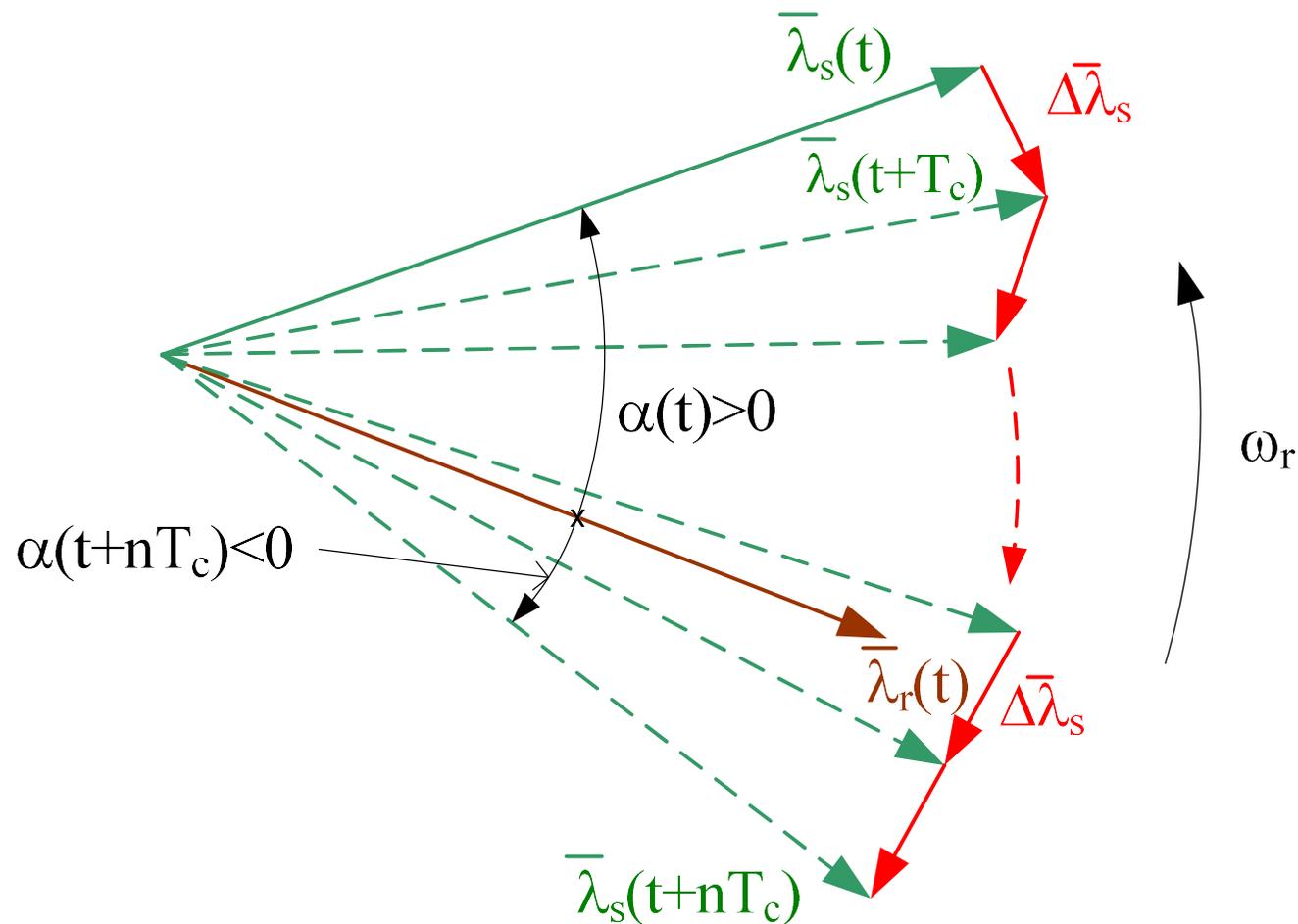
Quando la coppia raggiunge il valore $C \leq (C_{\text{rif}} - h_c - \varepsilon)$ e l'errore a sua volta $\Delta C \geq h_c + \varepsilon$, l'isteresi commuta sul valore +1 (commutazione d).

Si innesca il ciclo $a-b-c-g-d$, che permane finché la C_{rif} non cambia ulteriormente (in quanto ad esempio finisce il processo di frenatura).

Qualsiasi altra operazione dell'azionamento può essere giustificata in modo analogo a quanto fatto per i due esempi descritti, compreso il funzionamento nel terzo quadrante (motore "all'indietro").

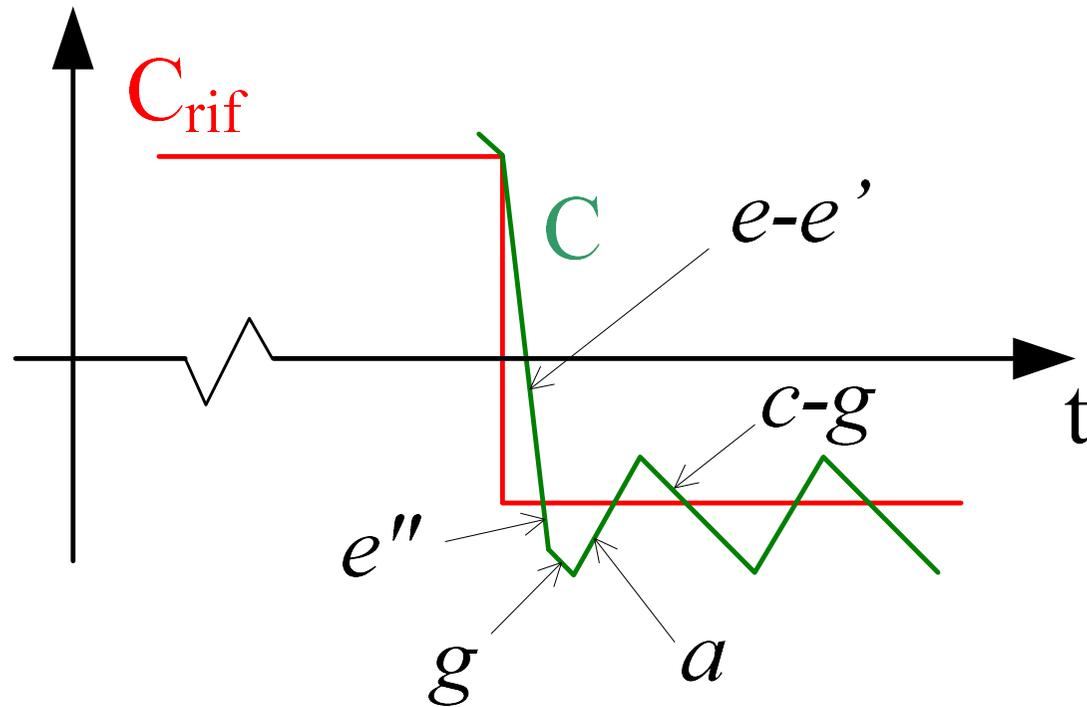
ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

passaggio da primo a quarto quadrante

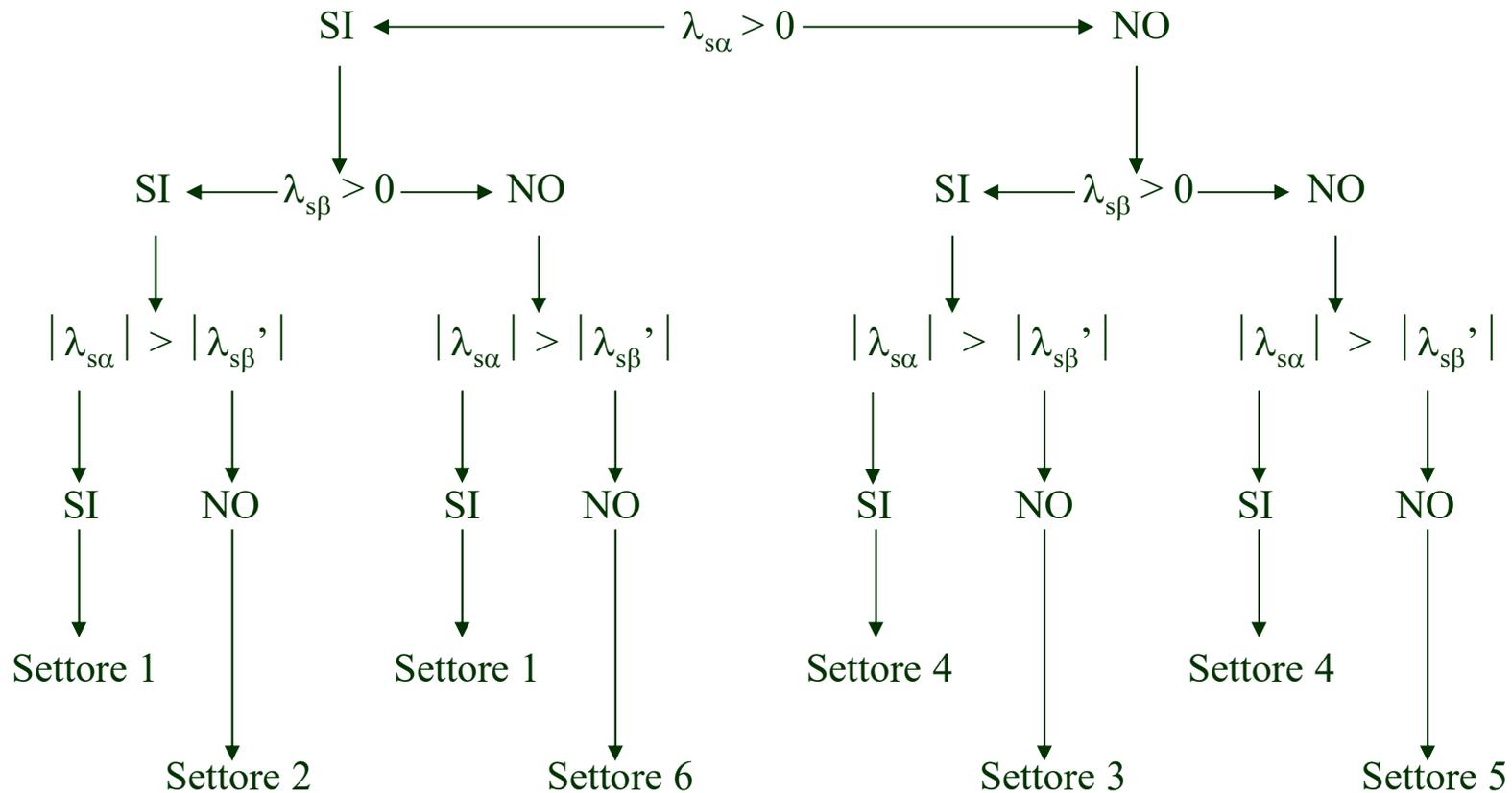


ISTERESI DELLA COPPIA A TRE LIVELLI

passaggio da primo a quarto quadrante

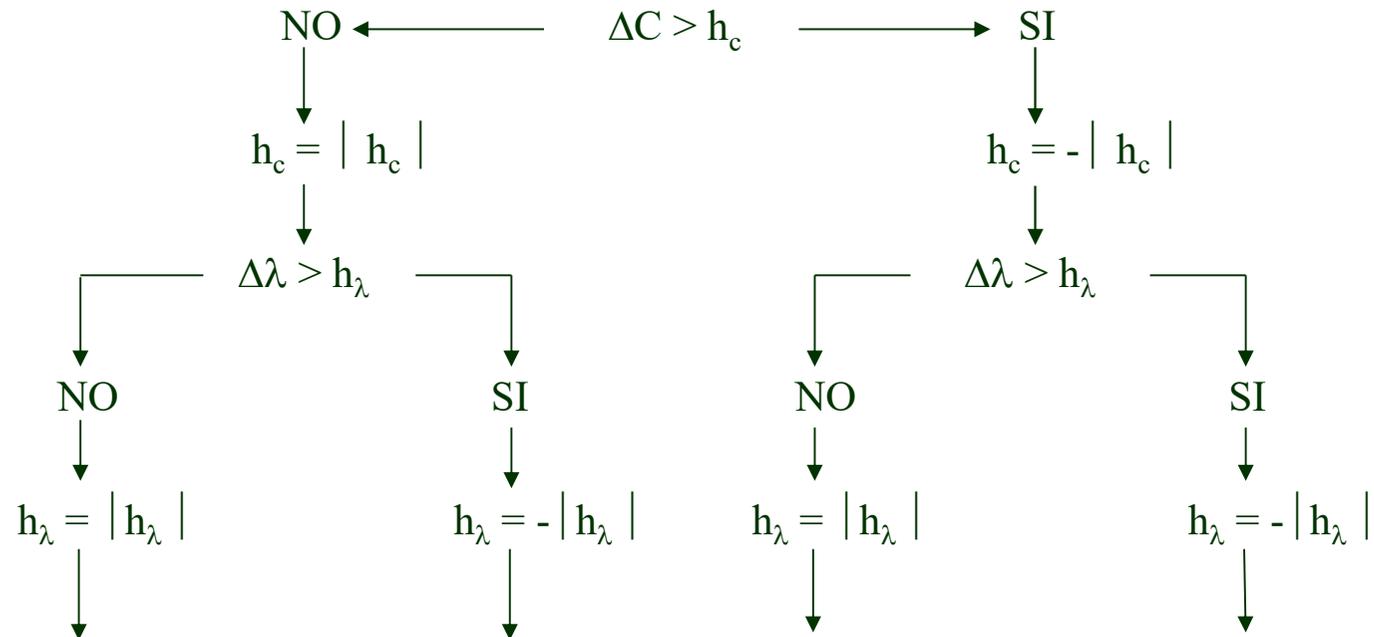


DETERMINAZIONE DEL SETTORE DEL FLUSSO DI STATORE



$$\lambda_{s\beta}' = \lambda_{s\beta} / \tan(30^\circ).$$

DETERMINAZIONE DEL VETTORE DI TENSIONE



Strategia A	V_0, V_7	V_0, V_7	V_{k+2}	V_{k+1}
Strategia D	V_{k-2}	V_{k-1}	V_{k+2}	V_{k+1}

\bar{V}_s

CONFIGURAZIONE
INTERRUTTORI

← settore

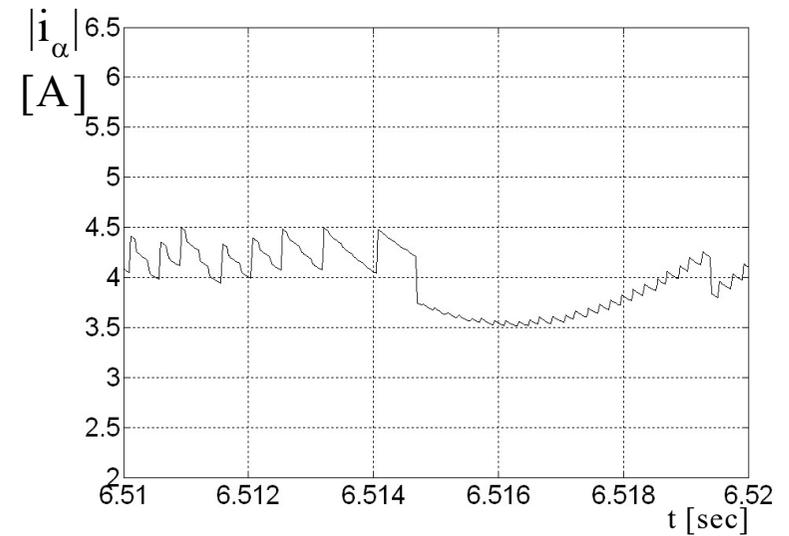
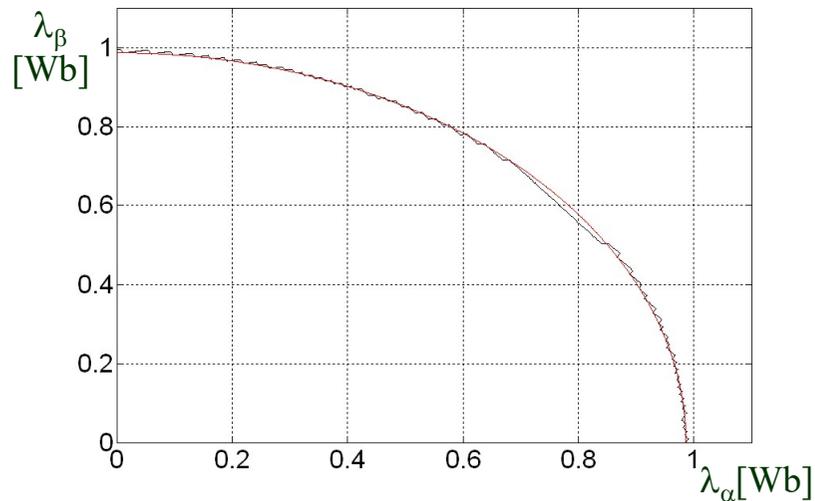
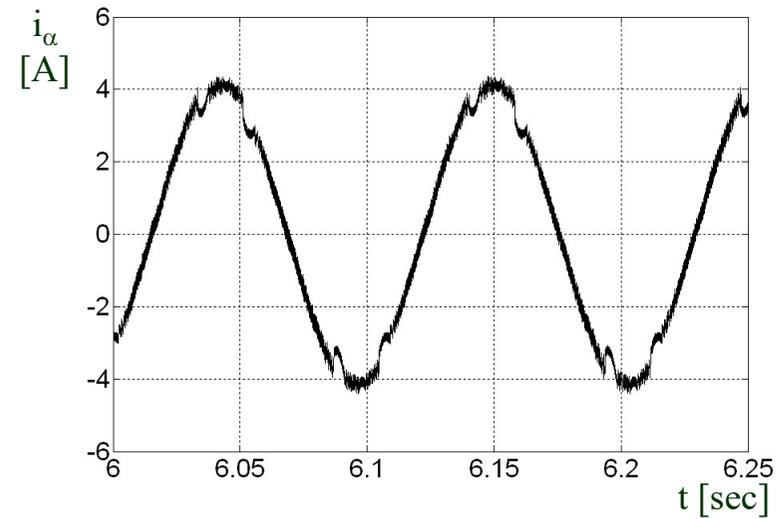
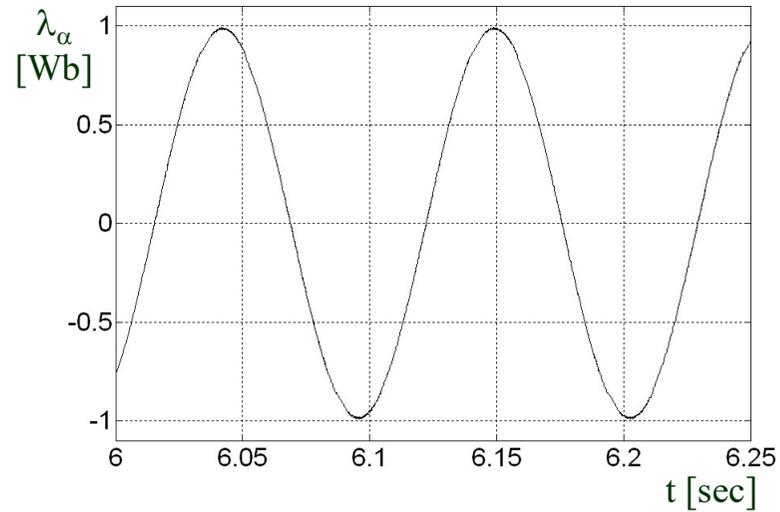
S_a

S_b

S_c

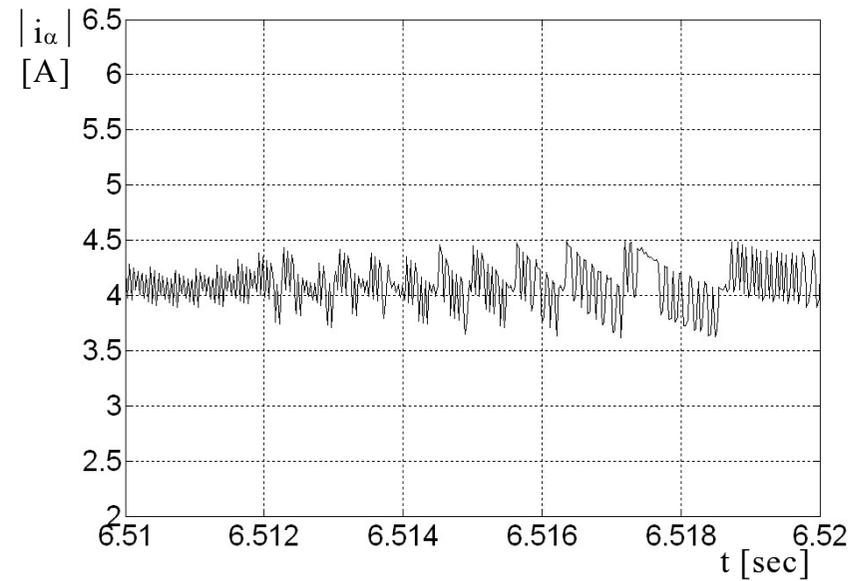
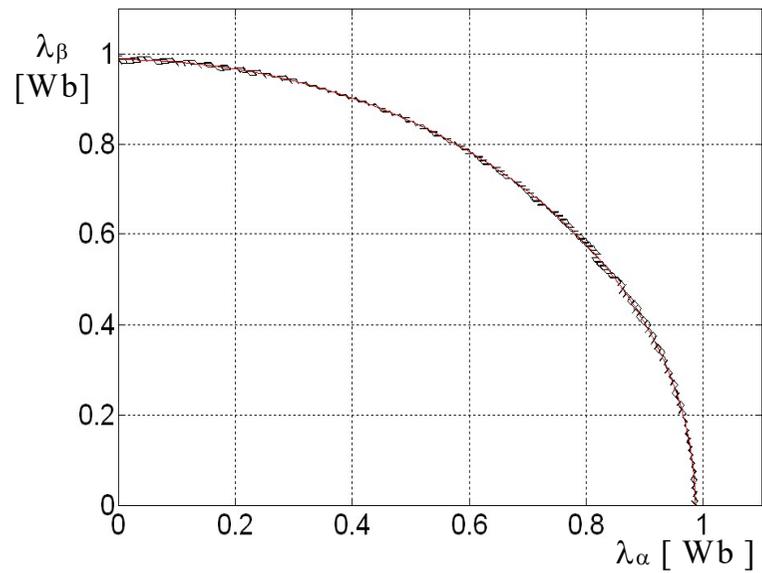
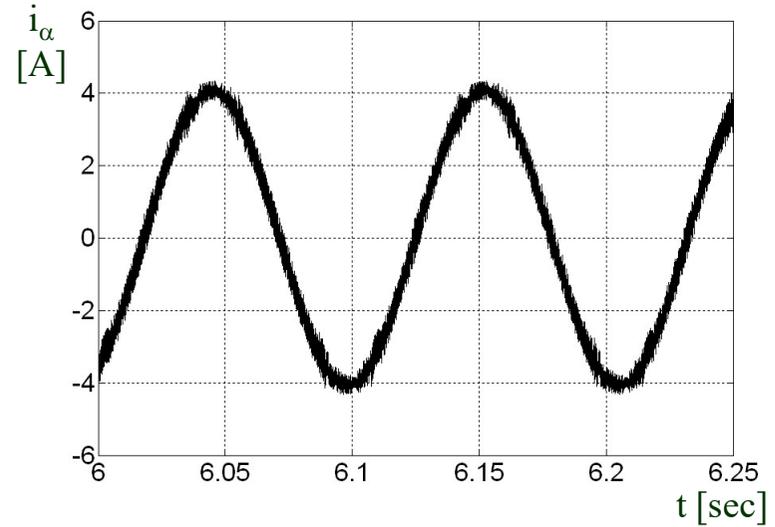
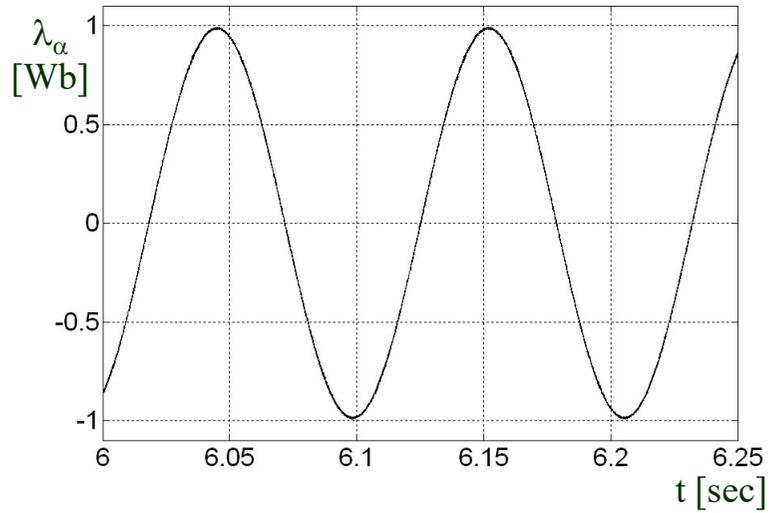
ESEMPI SPERIMENTALI

Regime stazionario con isteresi nulle e strategia A



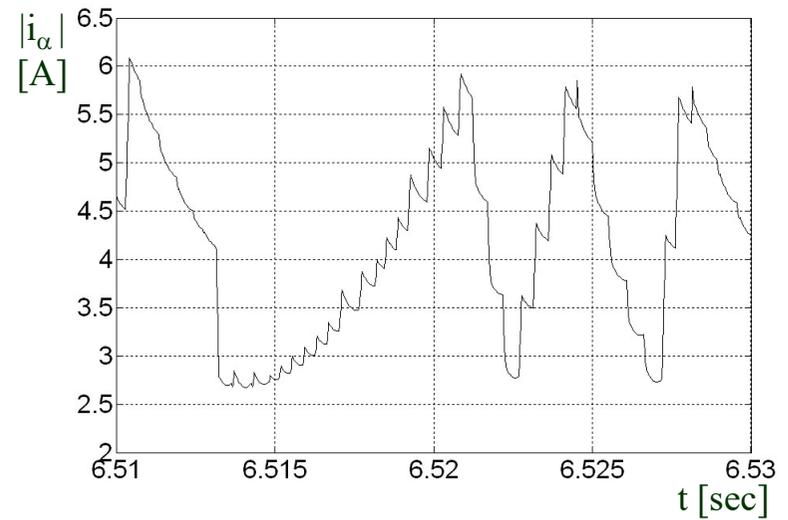
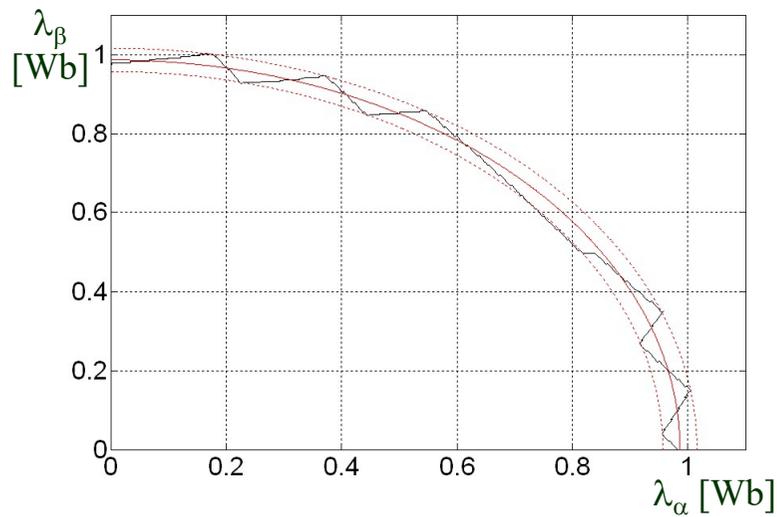
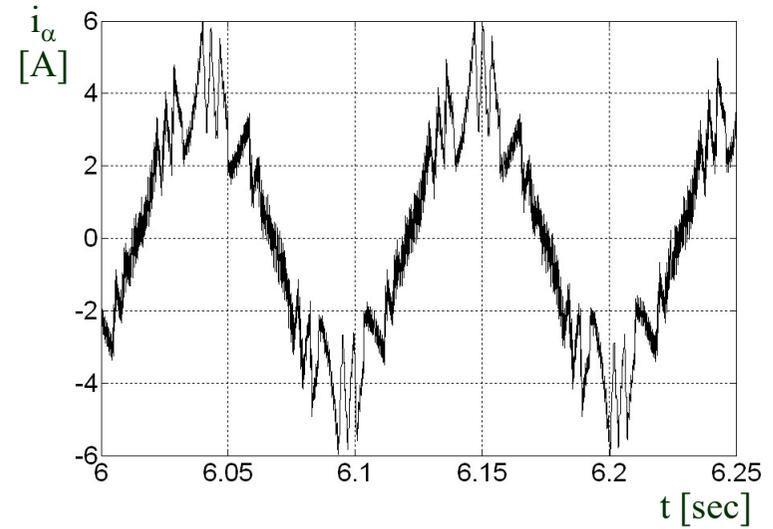
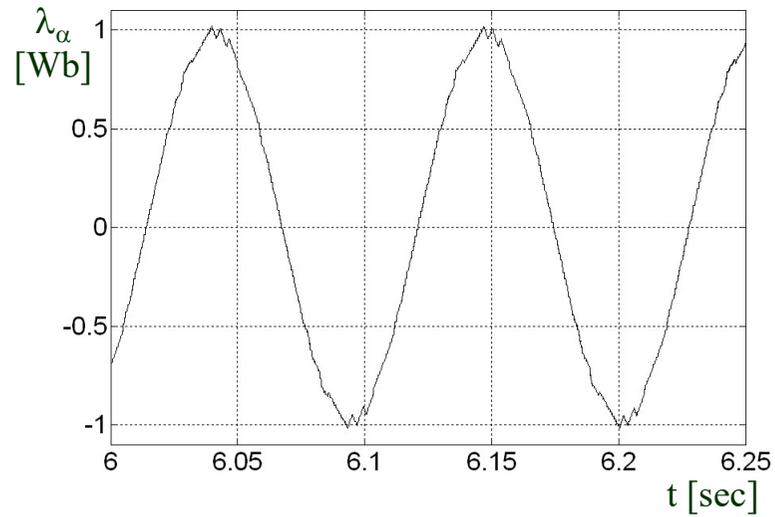
ESEMPI SPERIMENTALI

Regime stazionario con isteresi nulle e strategia D

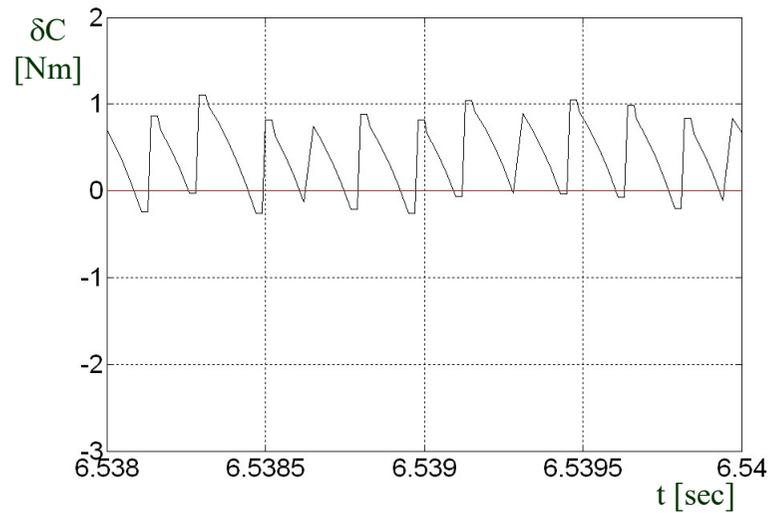


ESEMPI SPERIMENTALI

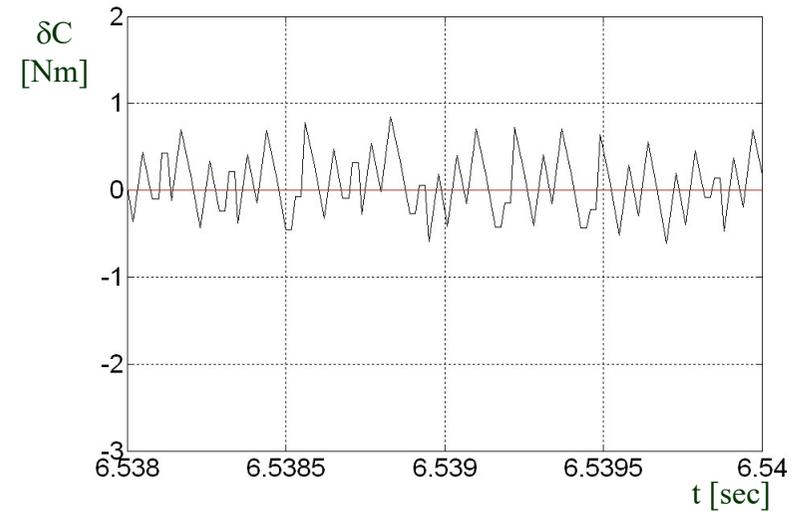
Regime con isteresi non nulle e strategia A



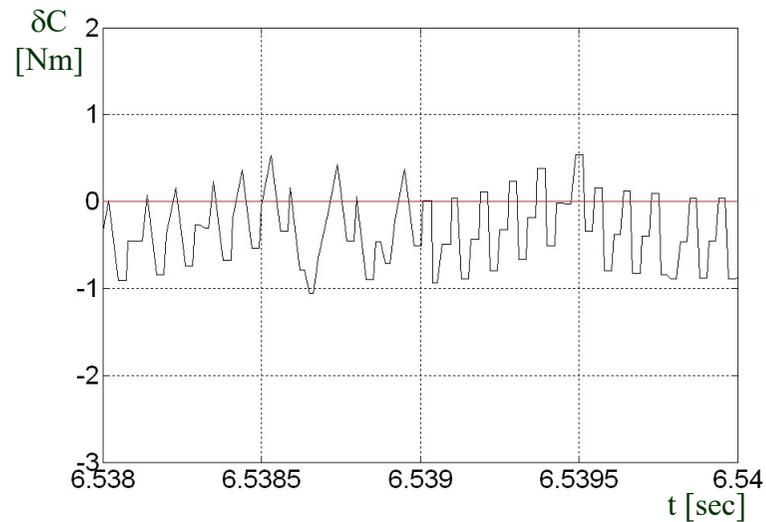
ESEMPI SPERIMENTALI: errore di coppia



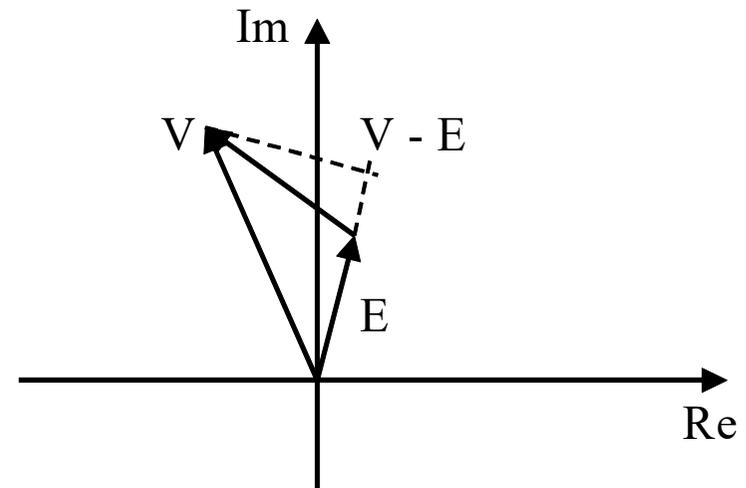
Bassa velocità



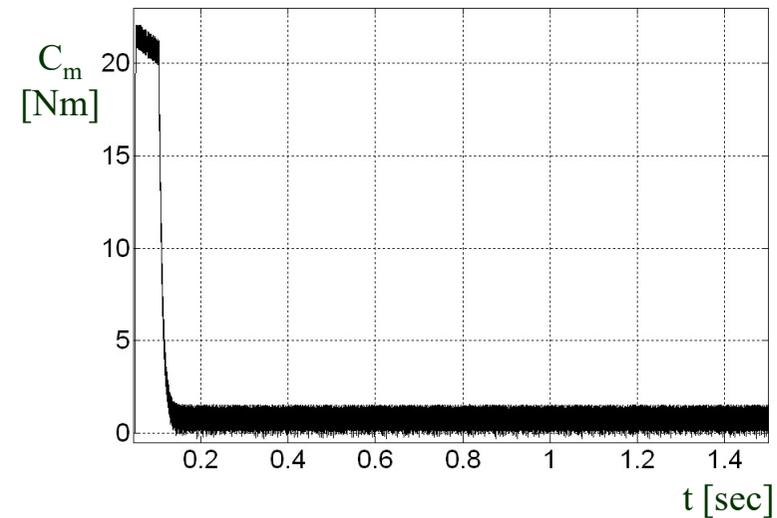
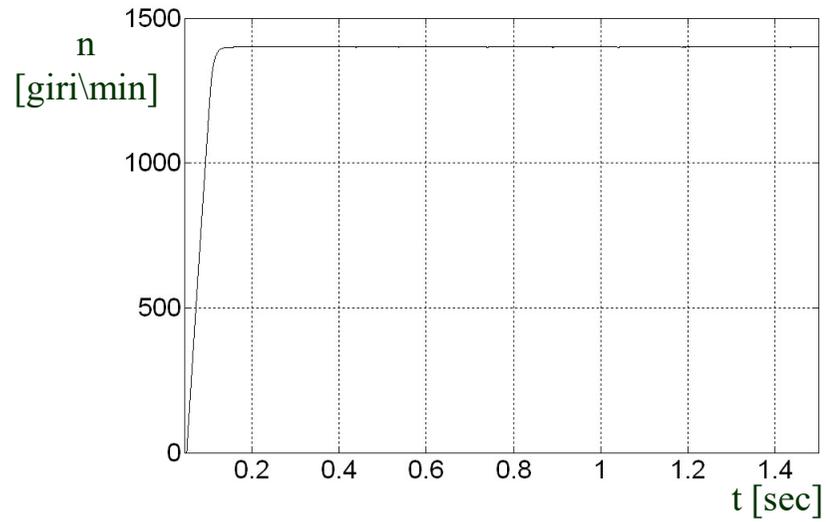
Velocità intermedia



Alta velocità



ESEMPI SPERIMENTALI: avviamento del motore a vuoto



ESEMPI SPERIMENTALI

Risposta ad un'onda quadra della coppia di riferimento

