

**CONTROLLO DIRETTO DI  
COPPIA (DTC<sup>®</sup>)  
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

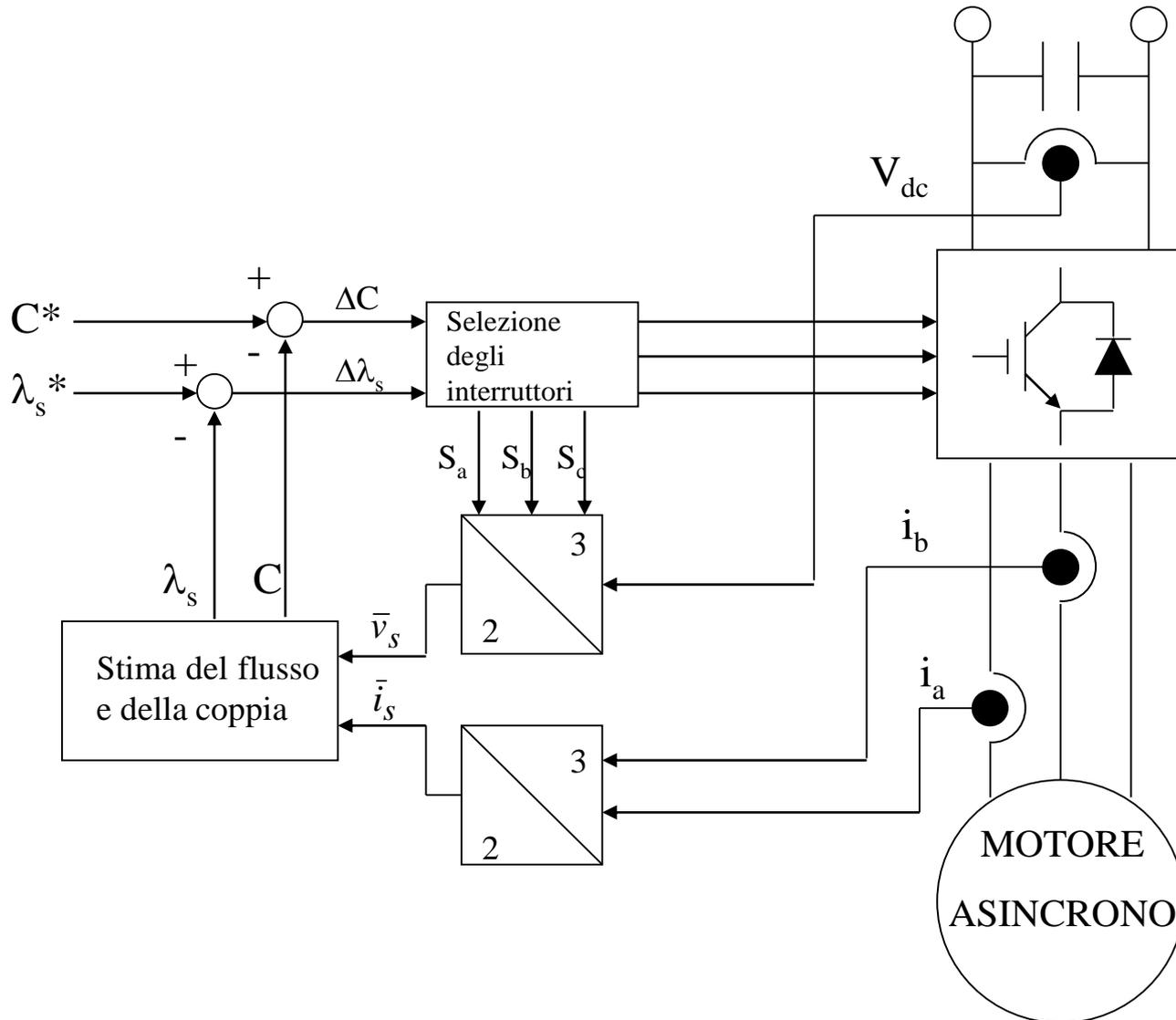
## □ Pregi:

- 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

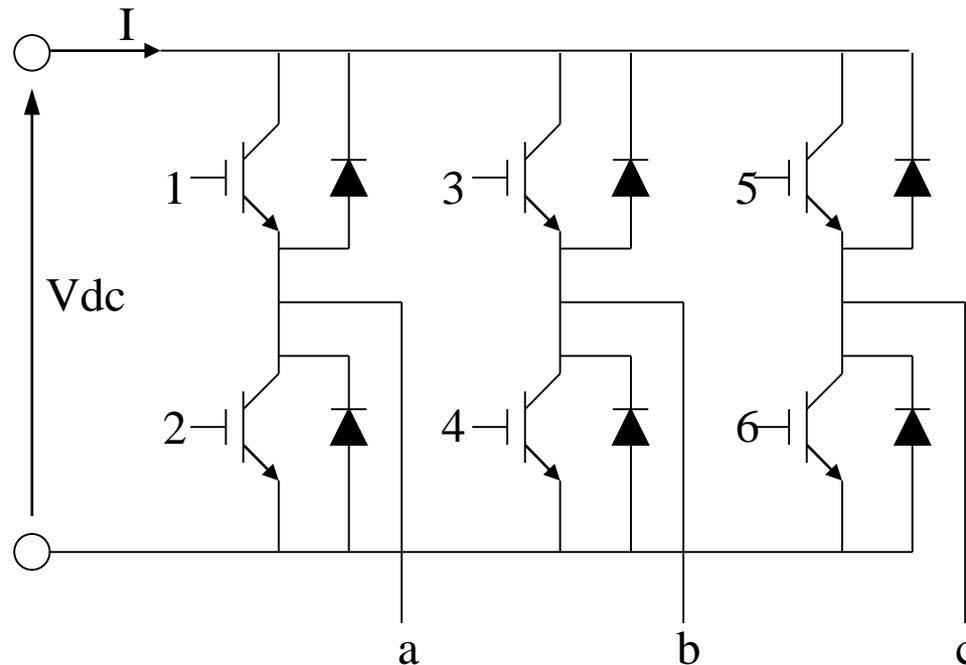


# INVERTITORE DI TENSIONE

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.

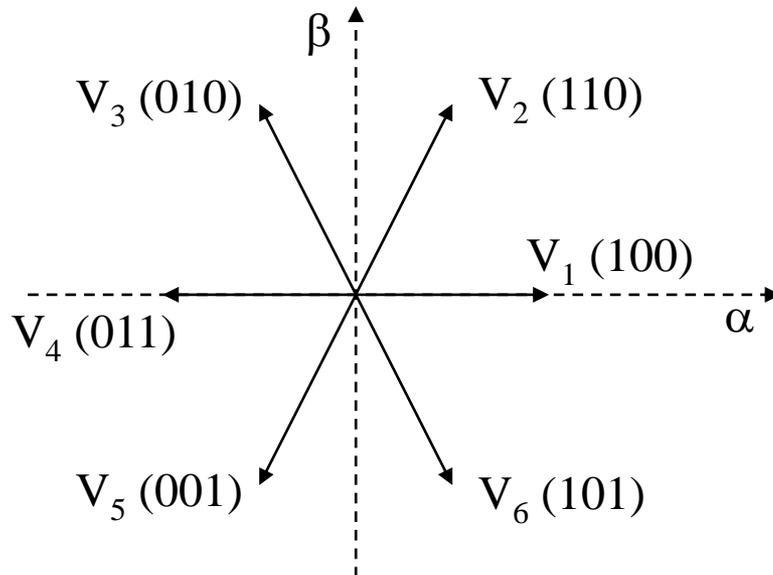


# VETTORI SPAZIALI DELLA TENSIONE $V_S$

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 magneto-motrici 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  $\Delta T$  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  $\Delta T$ ) 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  $60^\circ$  e nominati da “Settore 1” a “Settore 6”, definiti nel modo seguente:

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

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

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

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

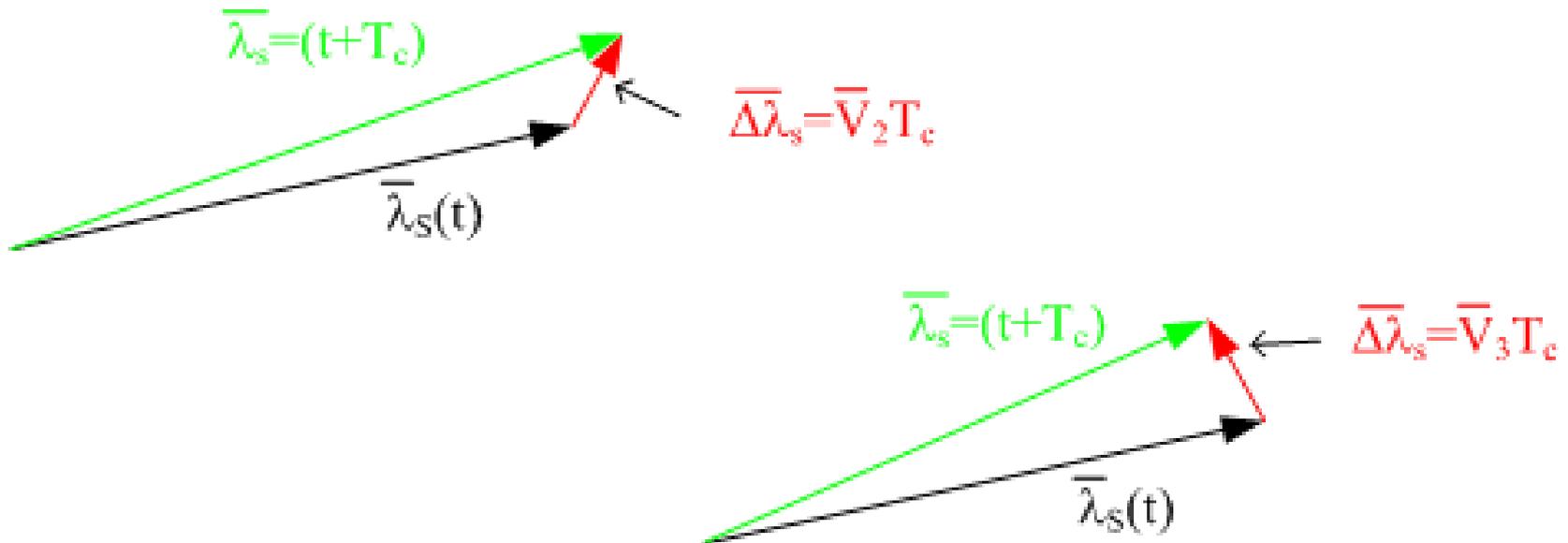
$$\text{Settore5} \quad \frac{7}{6}\pi \leq \theta_e < \frac{3}{2}\pi$$

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

# FLUSSO DI STATORE

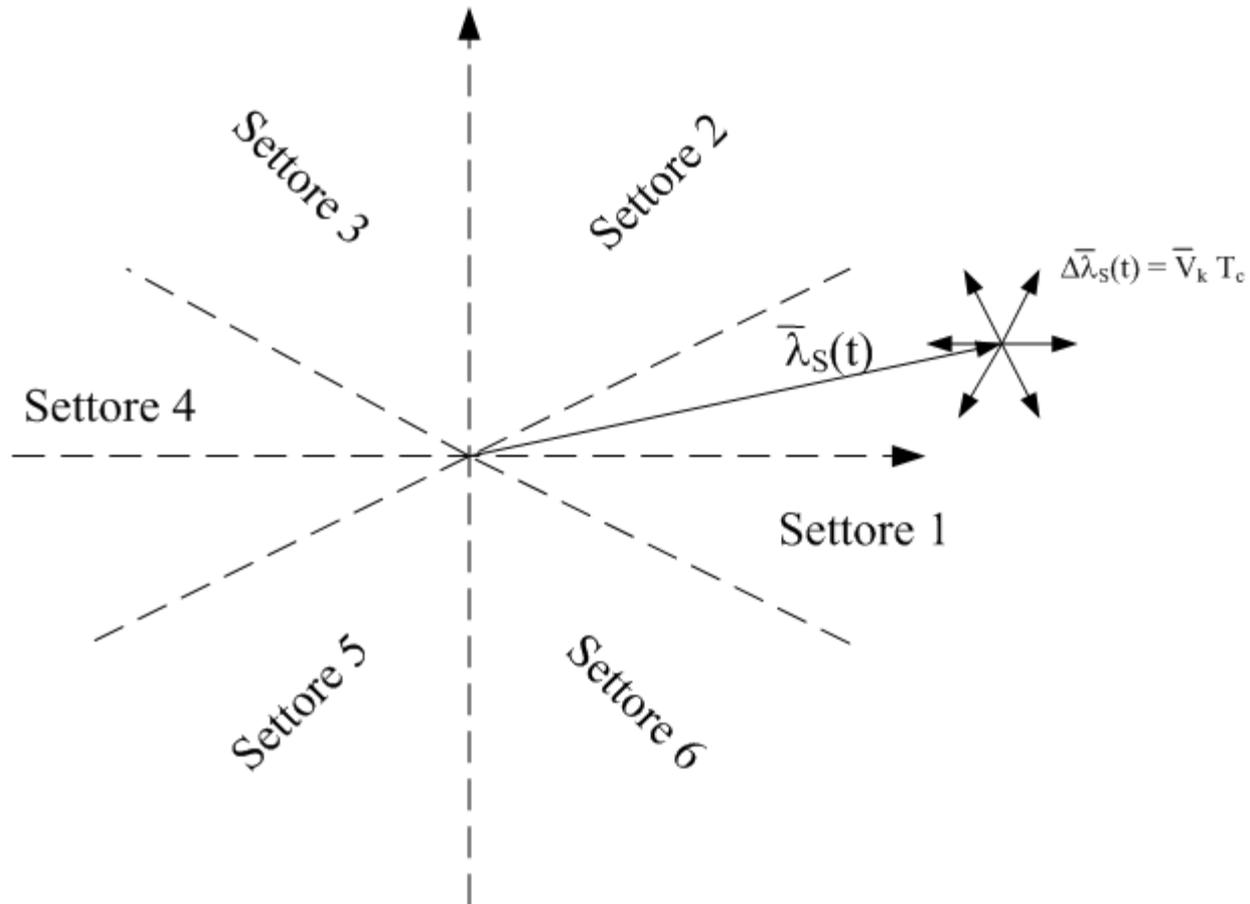
Il motore è alimentato tramite un invertitore e dunque le tensioni di statore possibili sono rappresentate dai sei vettori spaziali di tensione attivi e dai due vettori nulli prodotti dall'invertitore.

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

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

# COPPIA E FLUSSI

Osservazioni:

- 1) dall'espressione della coppia si deduce che la coppia dipende dal prodotto scalare tra il flusso di statore e quello di rotore ruotato di  $90^\circ$  elettrici, è quindi proporzionale ai rispettivi moduli ed al seno dell'angolo compreso
- 2) dall'equazione che lega i due flussi del motore si deduce che il flusso rotorico è legato a quello statorico 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 statorica, si provoca una variazione del flusso statorico ad essa proporzionale e di conseguenza una variazione della coppia dovuta a due contributi:

- 1) alla variazione del modulo del flusso statorico, che agisce sul prodotto scalare sia direttamente, in modo istantaneo, che indirettamente attraverso la variazione del modulo del flusso rotorico, con un ritardo legato alla costante di tempo di rotore;
- 2) alla variazione dell'angolo tra i due flussi di statore e di rotore, questo contributo agisce istantaneamente.

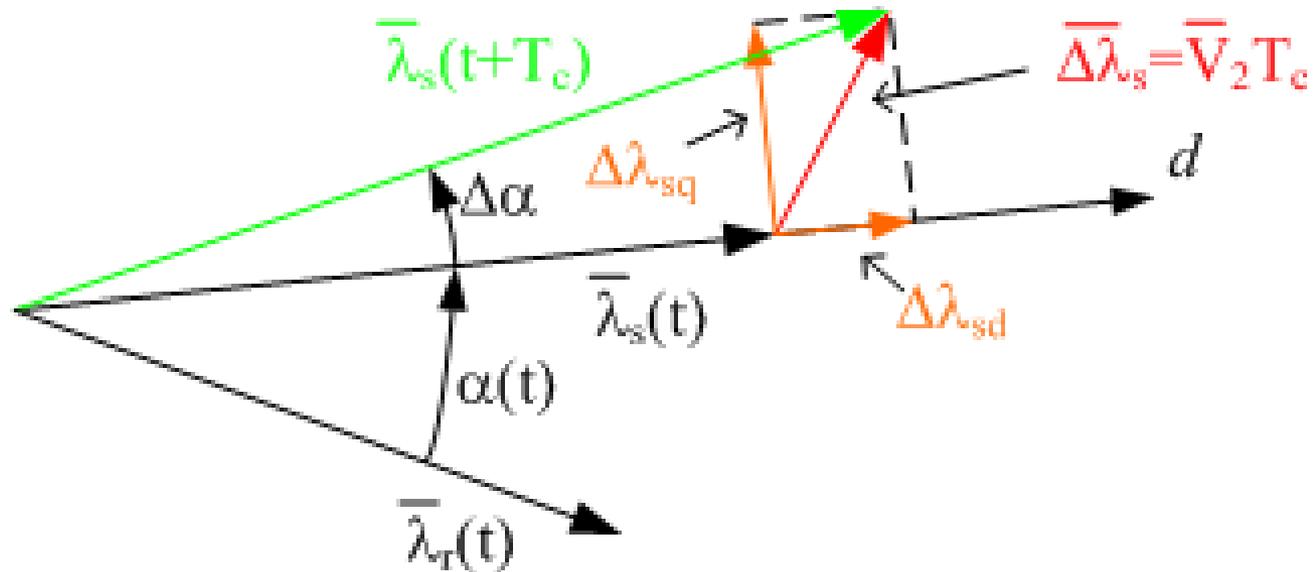
# EFFETTO SULLA COPPIA

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 poiché:

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 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 inseguire 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 interviene direttamente sul suo modulo.

# INTERPRETAZIONE GRAFICA



Il vettore spaziale rappresentativo della variazione del flusso di statore ( $\Delta\bar{\lambda}_s$ ) può essere scomposto in due componenti: una ( $\Delta\lambda_{sd}$ ) ottenuta dalla proiezione del vettore lungo la direzione di  $\bar{\lambda}_s$  stesso, e l'altra ( $\Delta\lambda_{sq}$ ) proiezione 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 dell'angolo  $\Delta\alpha$  (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 rad di un settore angolare il cui raggio è il modulo di  $\bar{\lambda}_s(t + T_c)$ ).

# TABELLA EFFETTI SU FLUSSO E COPPIA

Inizialmente si assumano le seguenti ipotesi:

- a) il vettore spaziale del flusso di rotore fermo nell'intervallo  $T_c$ ;
- b) la variazione del modulo del flusso di statore determinato solo da  $\Delta\lambda_{sd}$ ;
- c) la variazione della coppia determinata solo dalla variazione dell'angolo  $\Delta\alpha$ , cioè solo da  $\Delta\lambda_{sq}$ .

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

Supponendo inoltre che il vettore  $\bar{\lambda}_s$  si trovi sulla bisettrice del settore n.1 si può 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.

	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_0, V_7$
$\lambda_s$	↓	↑	↑↑	↑	↓	↓↓	↓↑
C	↓	↓	↓↑	↑	↑	↓↑	↓↑

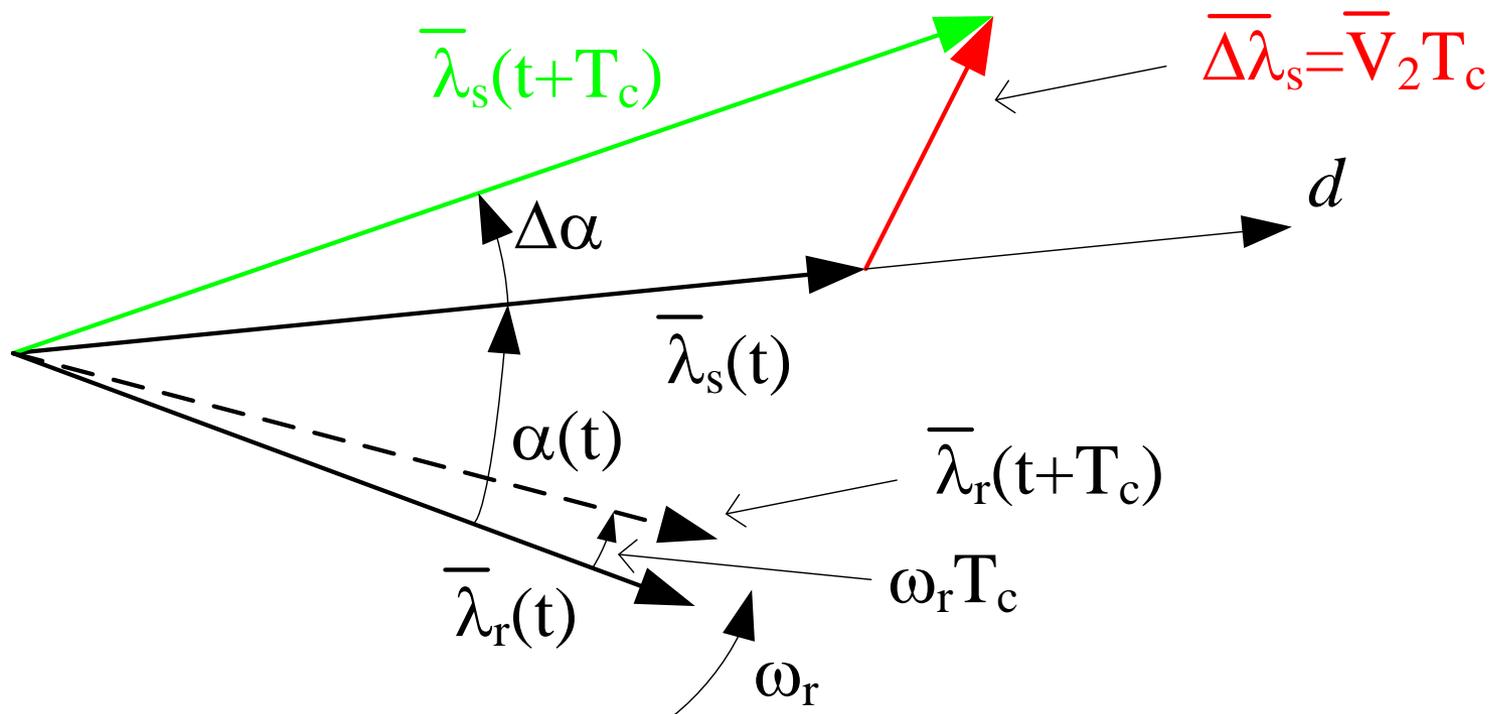
Tabelle analoghe si possono costruire nell'ipotesi che il flusso di statore  $\bar{\lambda}_s$  si trovi sulla bisettrice di ciascuno degli altri cinque settori angolari precedentemente definiti.

# EFFETTO DELLA VELOCITA'

Si tengano presenti le seguenti considerazioni:

- i) l'applicazione di un vettore di tensione di statore ha l'effetto di far «scattare» il vettore flusso di statore  $\bar{\lambda}_s(t)$  (nell'intervallo  $T_c$ ) in un nuovo vettore  $\bar{\lambda}_s(t + T_c)$  (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 il flusso di statore, muovendosi con continuità;
- iii) in condizione di regime permanente il vettore spaziale del flusso di rotore di un motore asincrono ruota alla velocità di sincronismo  $\omega_s$  per cui nell'intervallo  $T_c$  esso percorre l'angolo  $\omega_s T_c$  avvicinandosi al flusso di statore. La velocità dunque produce una riduzione dell'angolo compreso tra i due flussi con conseguente **diminuzione** della coppia;
- iv) a bassa velocità, corrispondente a  $\omega_s$  piccolo, l'angolo  $\omega_s T_c$  si può considerare trascurabile per cui, in questa condizione di funzionamento, si può supporre il vettore spaziale del flusso di rotore fermo durante l'intervallo  $T_c$ .
- v) ad alta velocità, corrispondente a  $\omega_s$  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 appunto dell'avvicinamento angolare del flusso di rotore al flusso di statore.

# INTERPRETAZIONE GRAFICA



# TABELLA MODIFICATA DALLA VELOCITA'

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

	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>0</sub> , V <sub>7</sub>
$\lambda_s$	↓	↑	↑↑	↑	↓	↓↓	↓↑
C ( $\omega_{me}$ piccola)	↓	↓	↓↑	↑	↑	↓↑	↓↑
C ( $\omega_{me}$ 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.

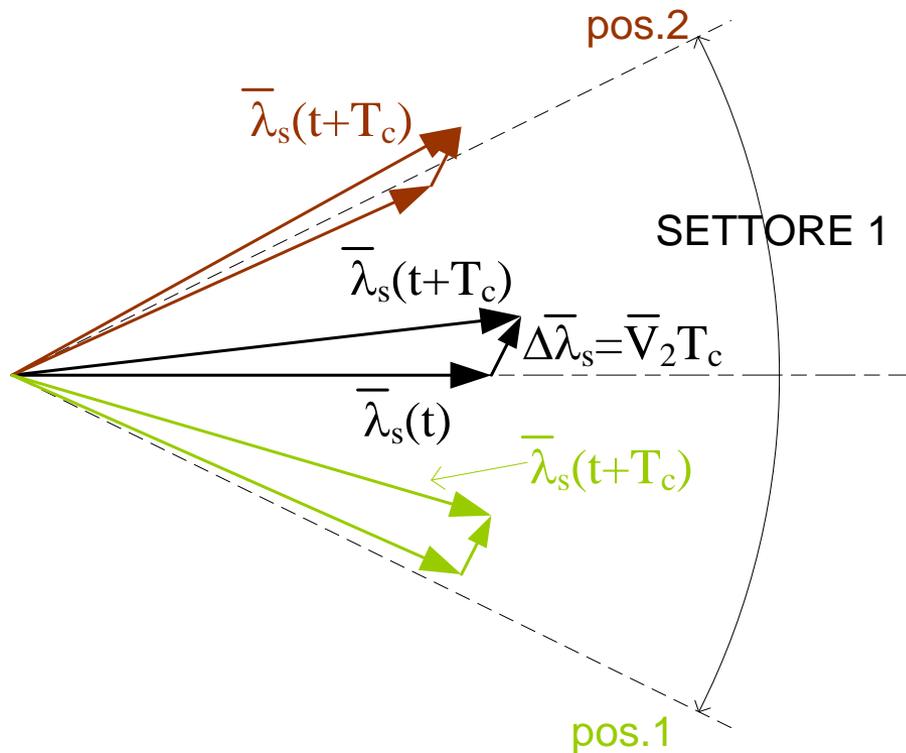
In realtà, all'interno del sestante, il vettore del flusso di statore potrebbe assumere una qualsiasi posizione con angolo compreso entro i 60 gradi dell'ampiezza del sestante.

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 (pos.1) l'effetto sulla coppia è pronunciato, mentre sul modulo del flusso è debole. Alla fine del sestante (pos.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 (coppia o modulo del flusso), mentre  $\downarrow$  indica richiesta di diminuzione. Nel primo caso i valori stimati del modulo del flusso di statore o della coppia sono minori dei corrispondenti valori dei riferimenti (errore positivo), nel secondo sono maggiori (errore negativo).

Sia  $k$  il numero del sestante angolare in cui si trova il vettore spaziale del flusso di statore in un certo istante. I pedici dei simboli del vettore di tensione riportati in tabella sono da considerarsi ottenuti tramite l'operazione modulo 6

	$C \uparrow \lambda_S \uparrow$	$C \uparrow \lambda_S \downarrow$	$C \downarrow \lambda_S \uparrow$	$C \downarrow \lambda_S \downarrow$
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	$V_{k+1}$	$V_{k+2}$	$V_{k-1}$	$V_{k-2}$

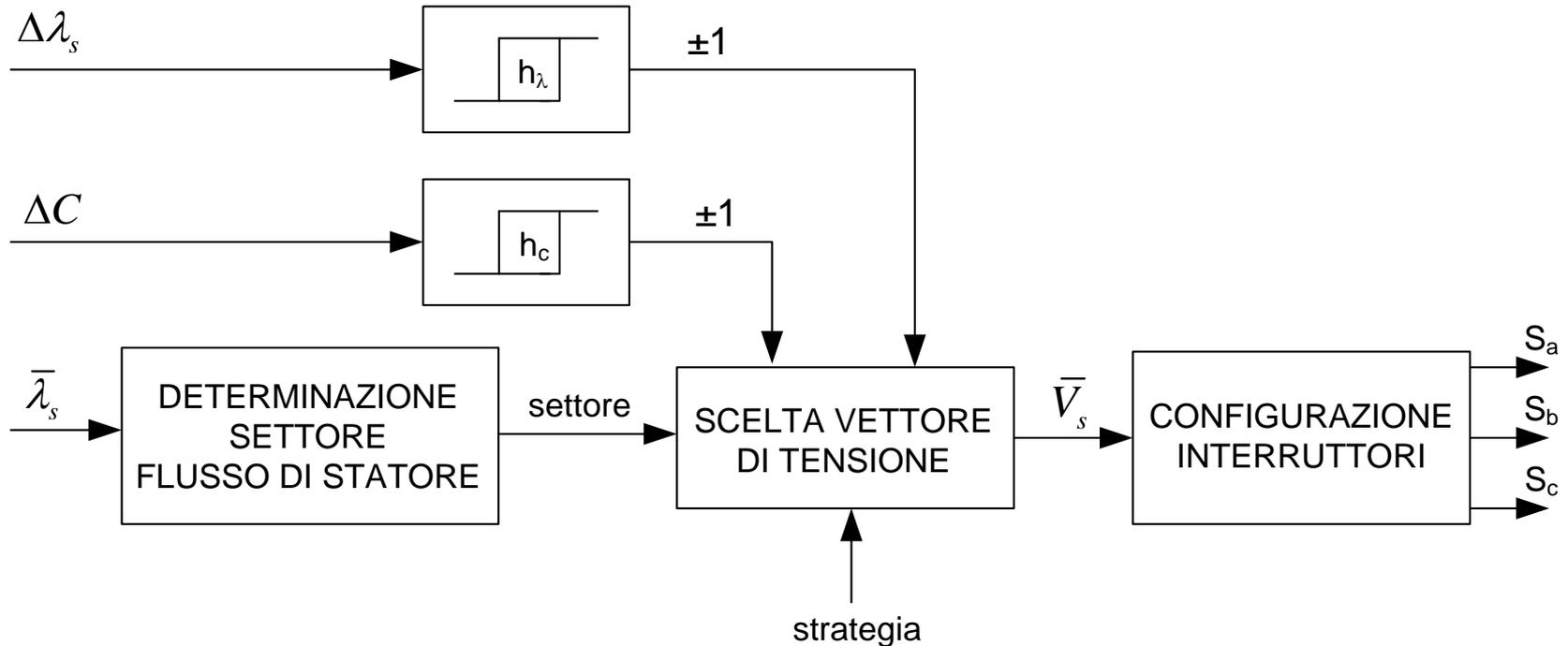
(con l'accortezza di sostituire al risultato 0 il numero 6, es. se  $k=5$  viene  $k+1 \bmod 6=0$  in tal caso si prende 6 al posto di 0)

# 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 deflussamento 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, 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 INTERRUTTORI

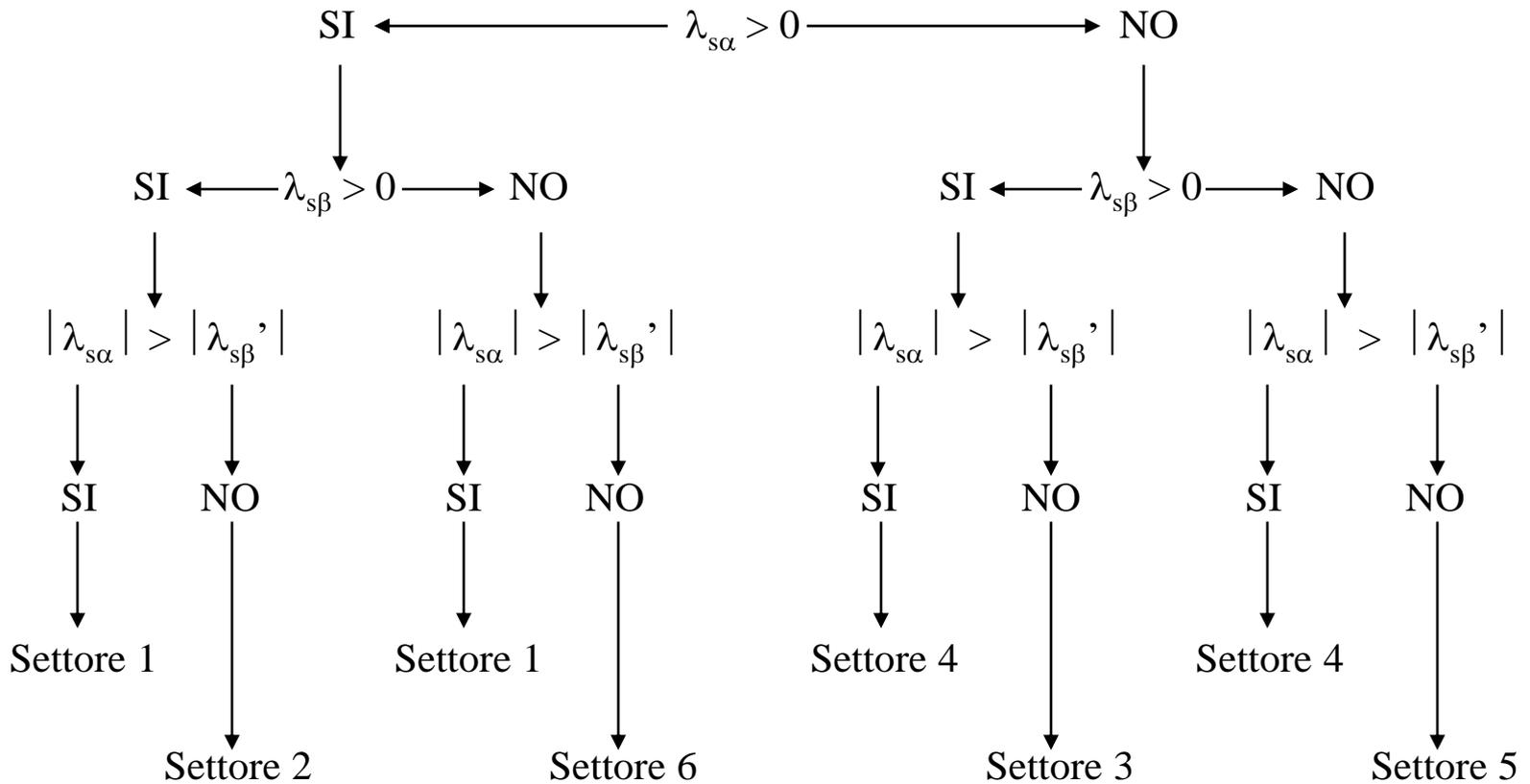


Significato dell'uscita dei blocchi di isteresi:

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

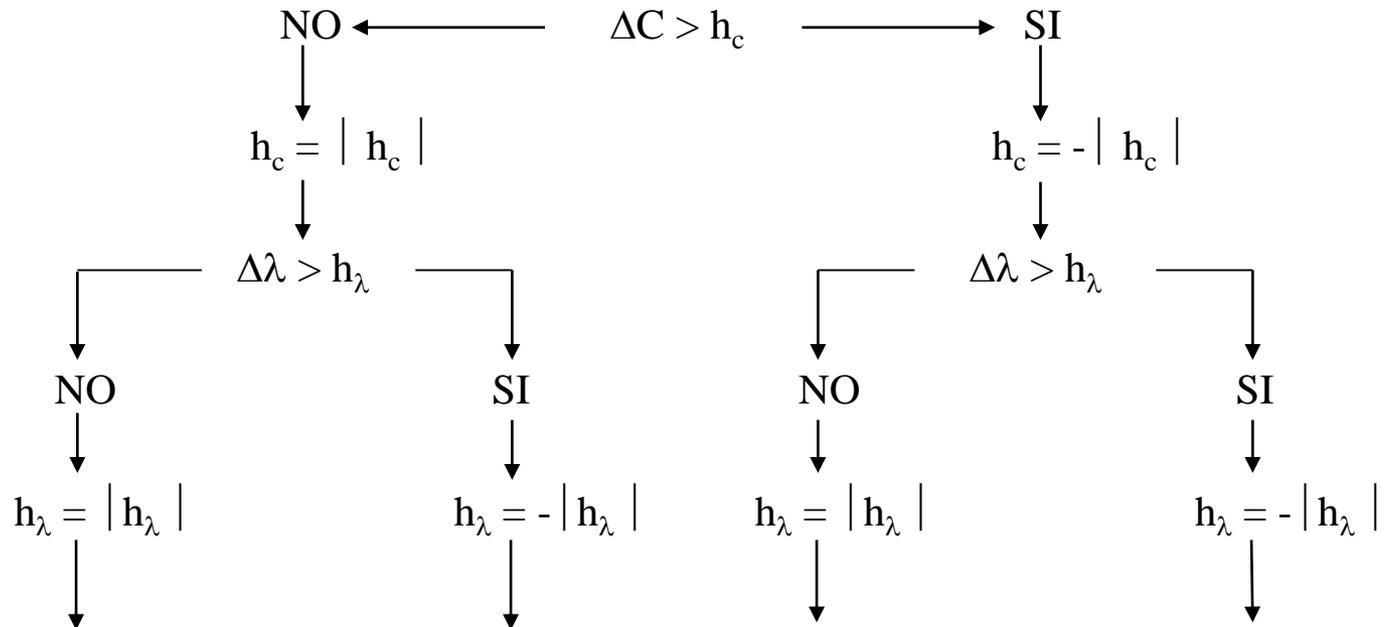
-1 : *diminuzione* del modulo del flusso o della coppia

# DETERMINAZIONE DEL SETTORE DEL FLUSSO DI STATORE



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

# 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

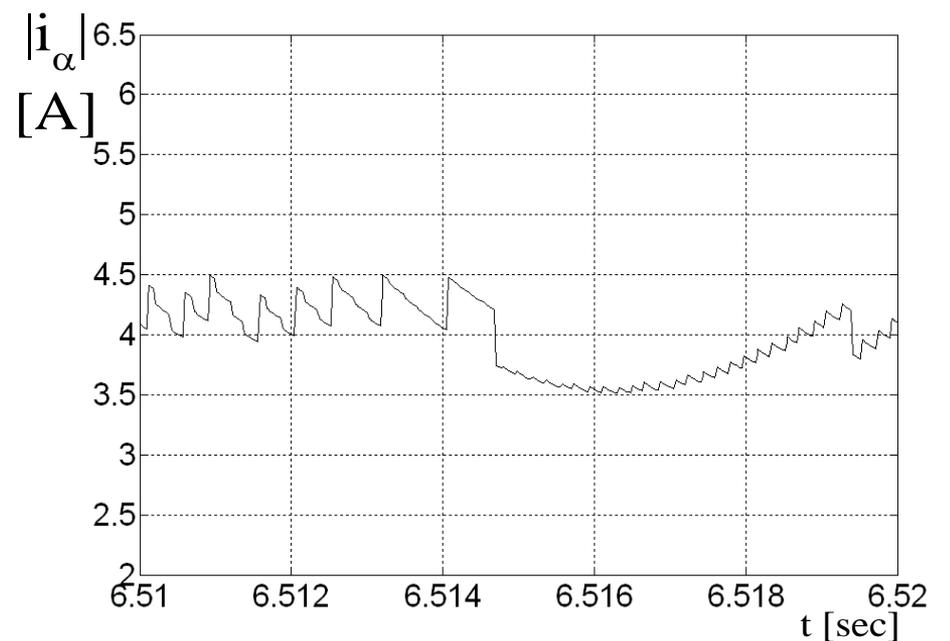
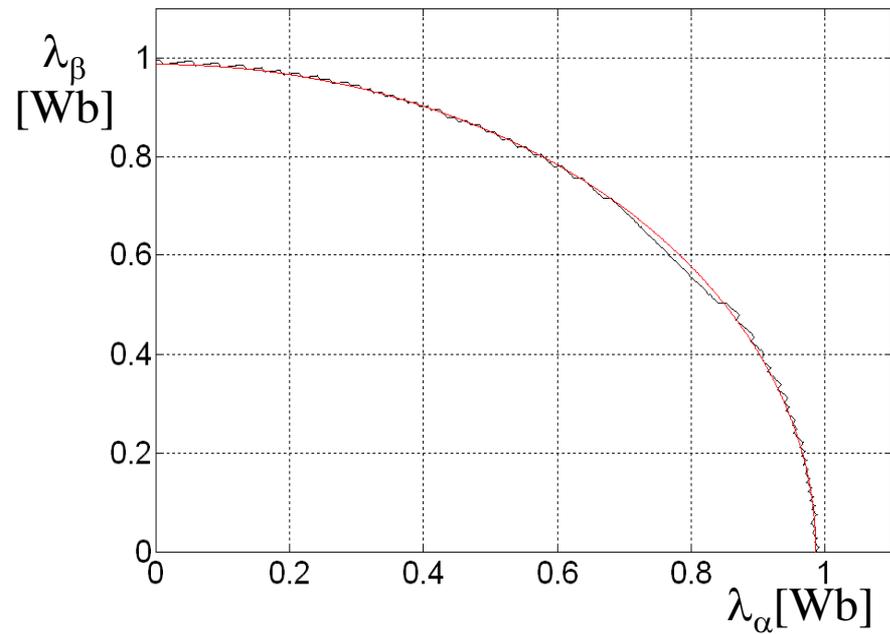
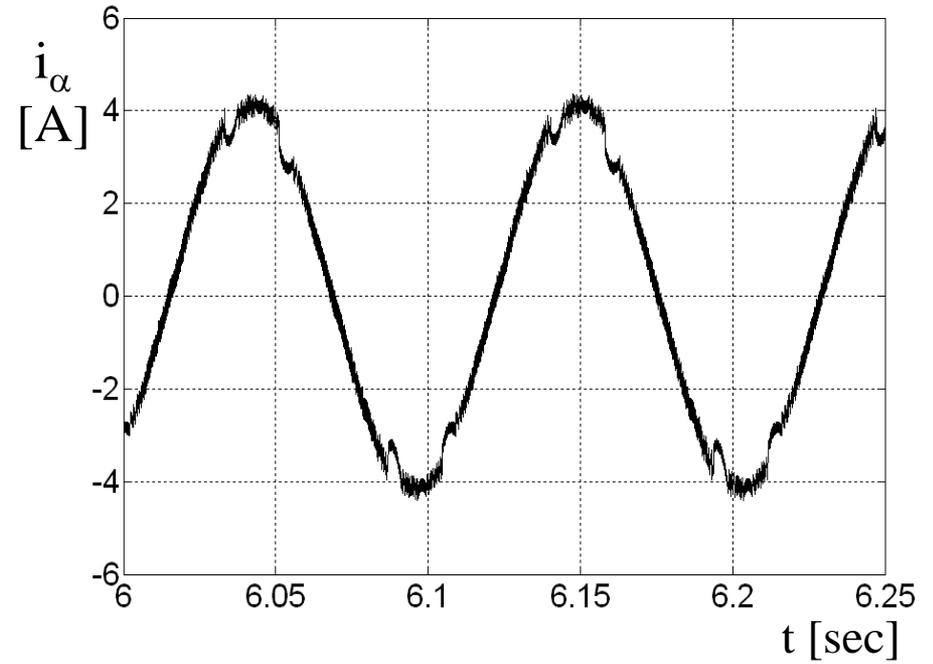
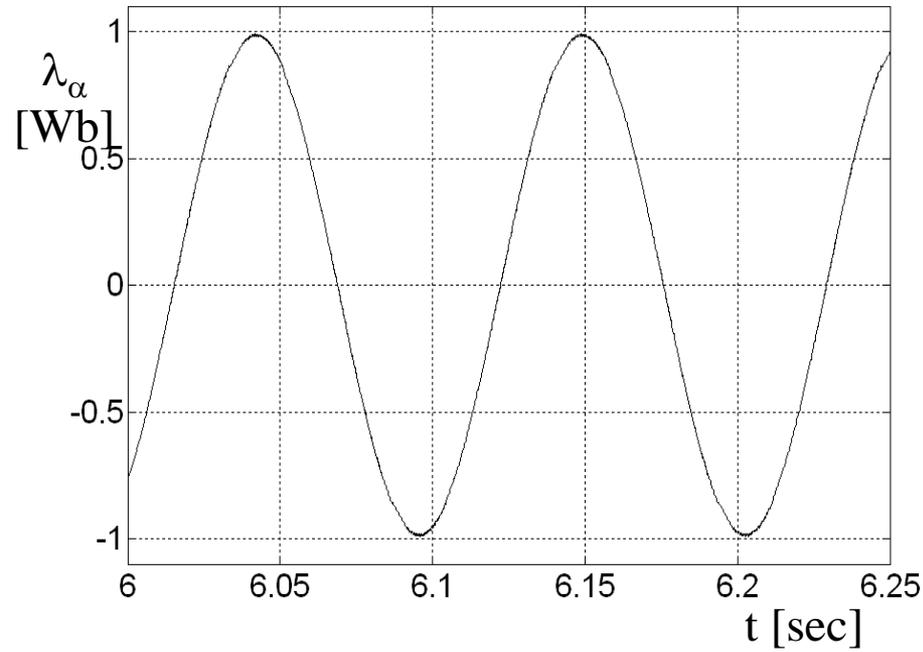
settore

$S_a$

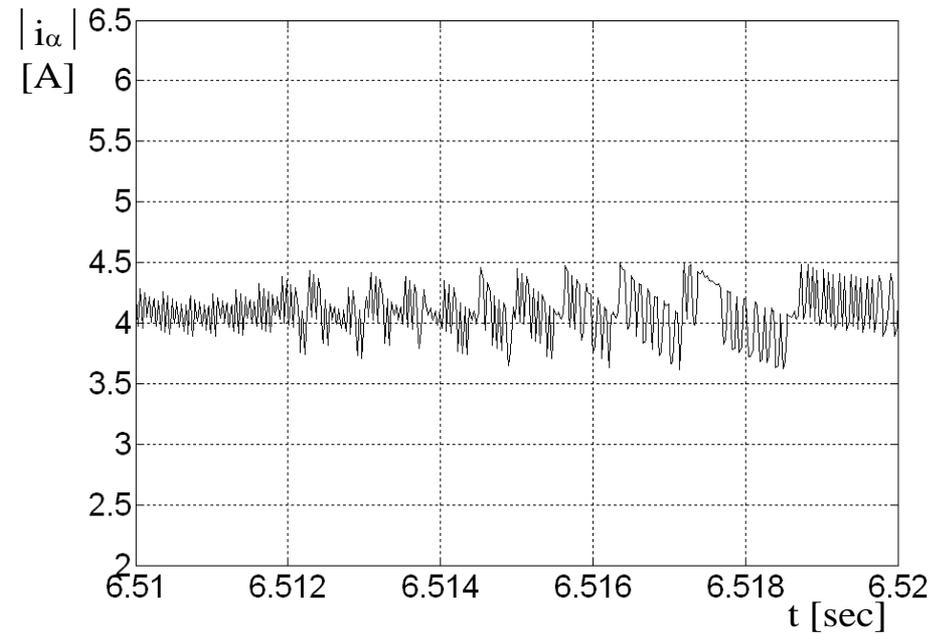
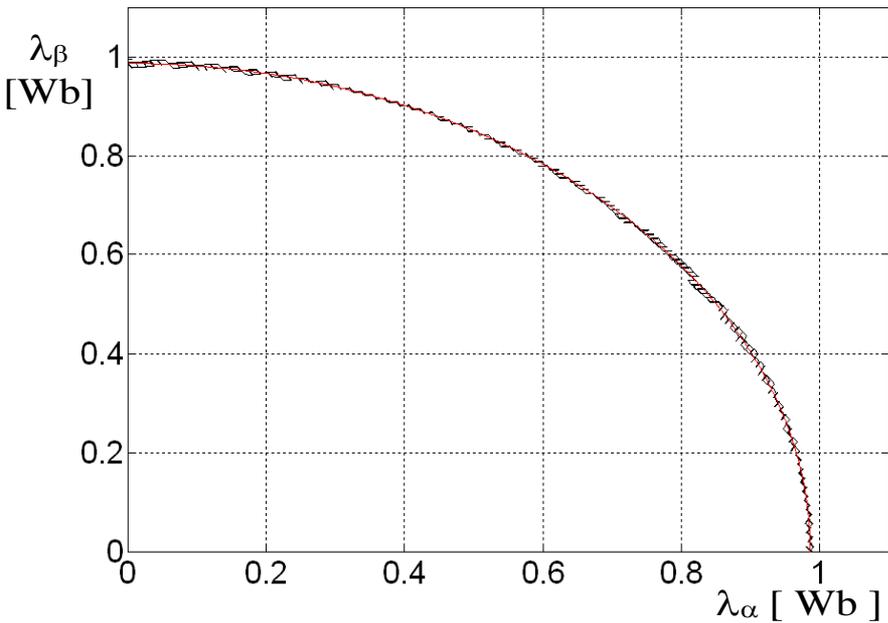
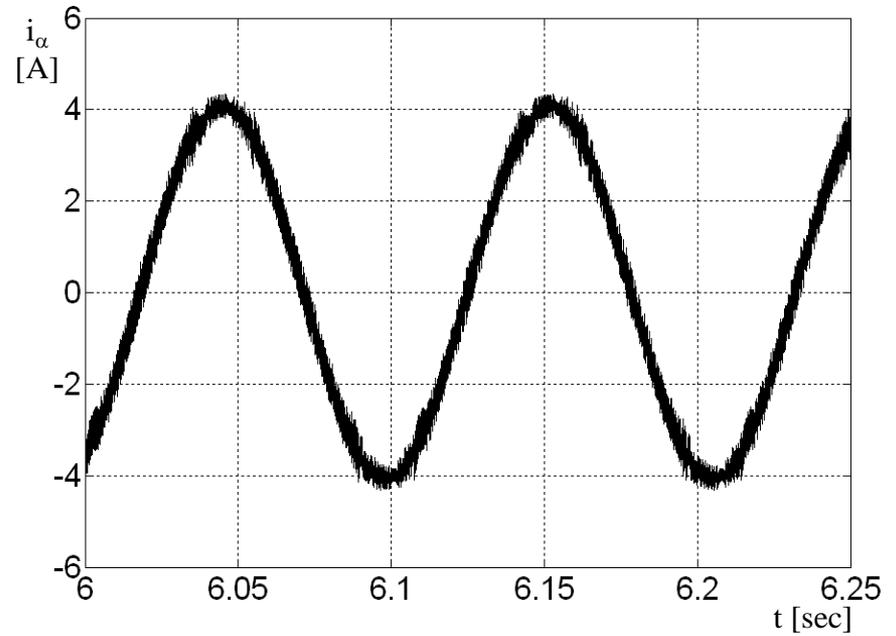
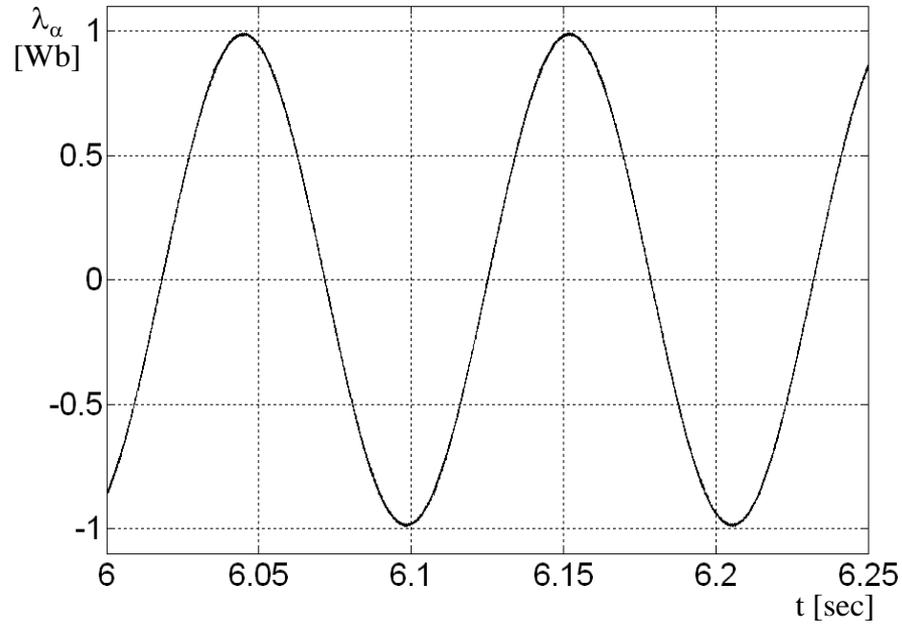
$S_b$

$S_c$

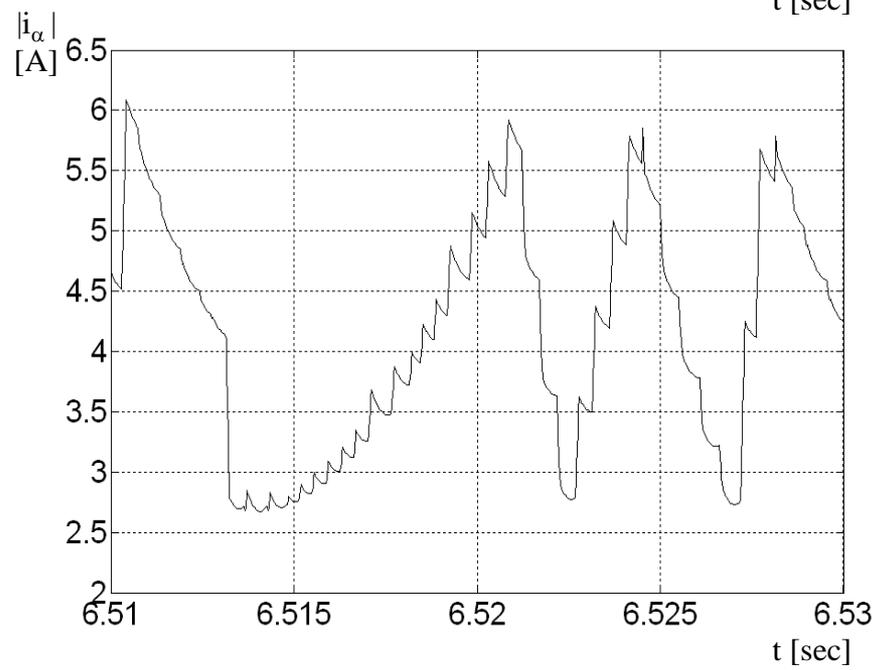
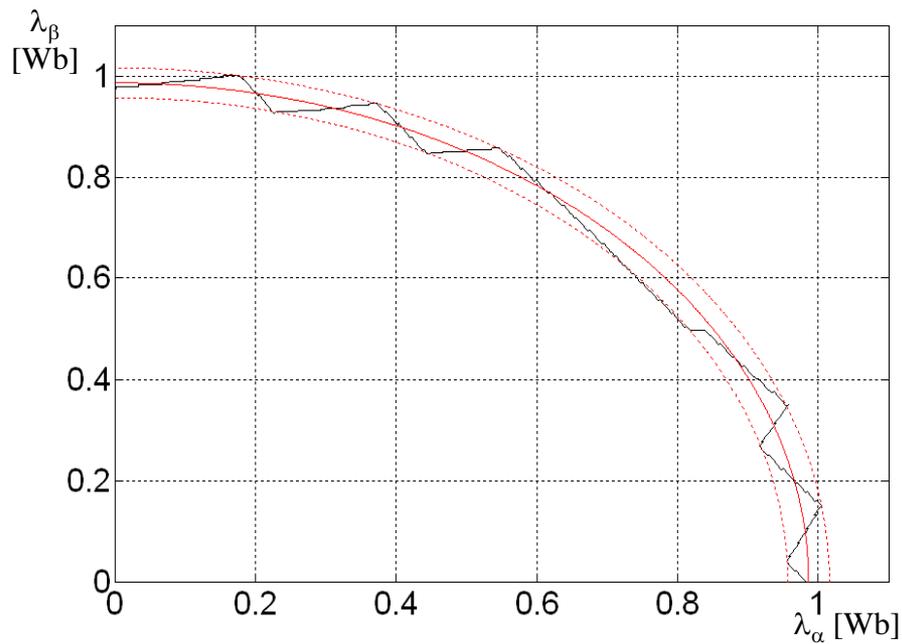
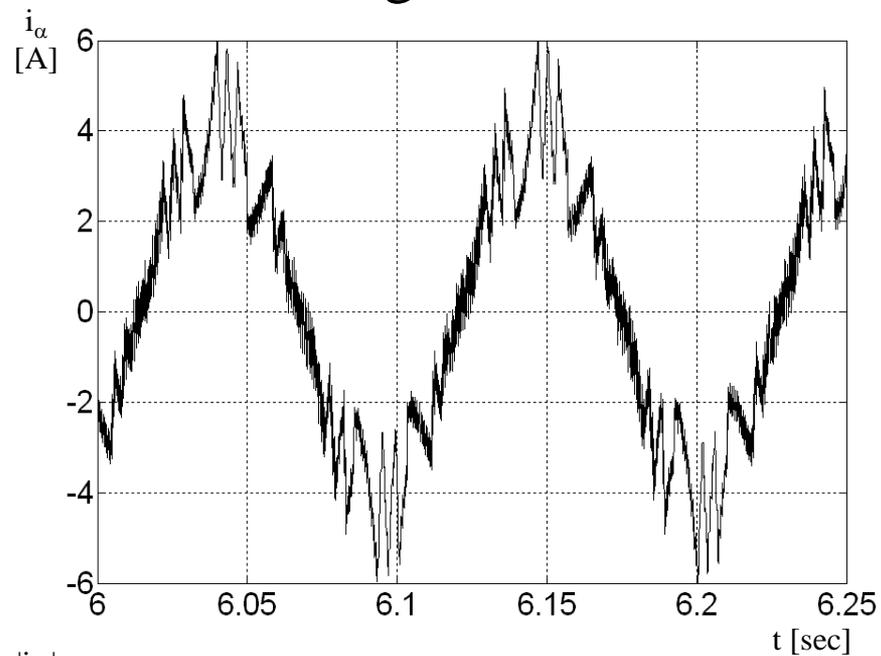
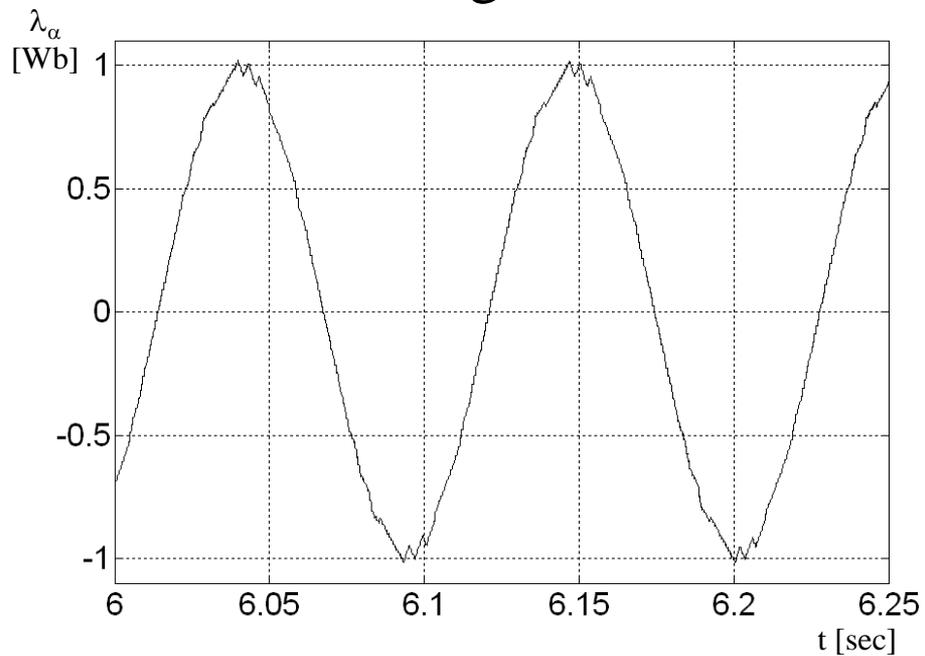
# Regime stazionario con isteresi nulle e strategia A



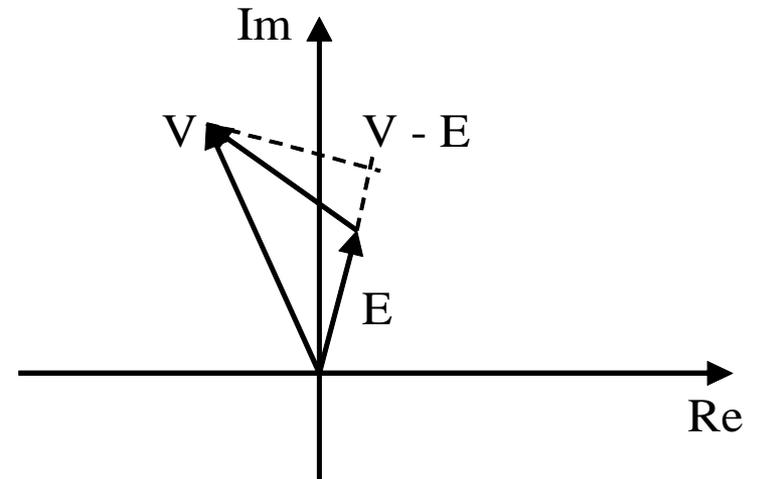
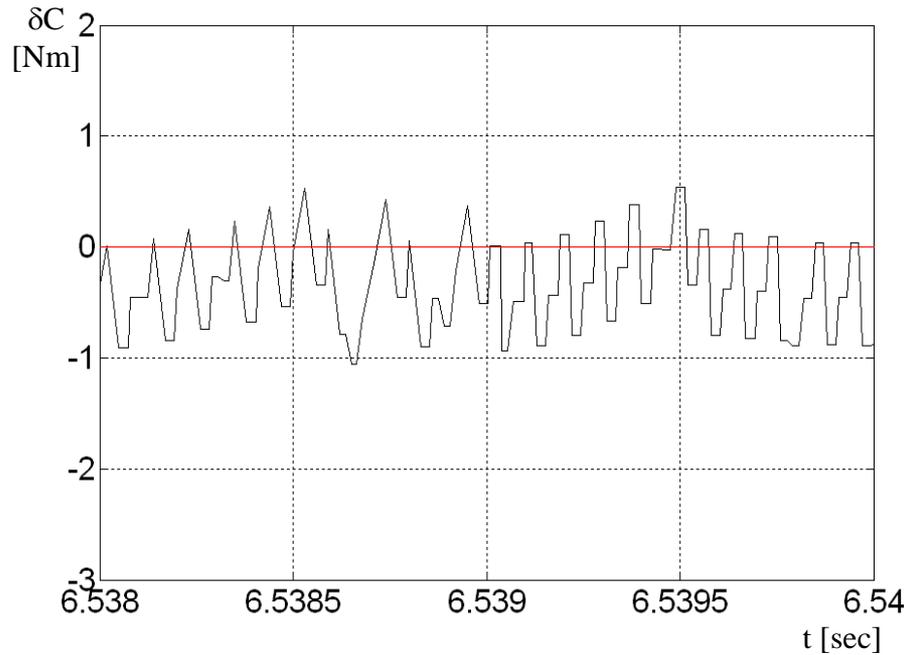
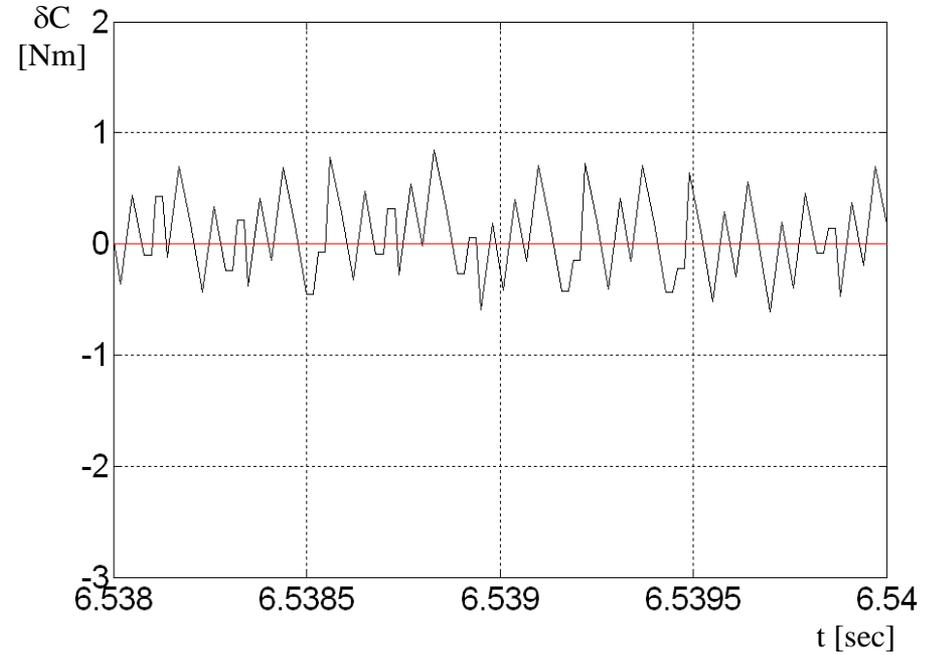
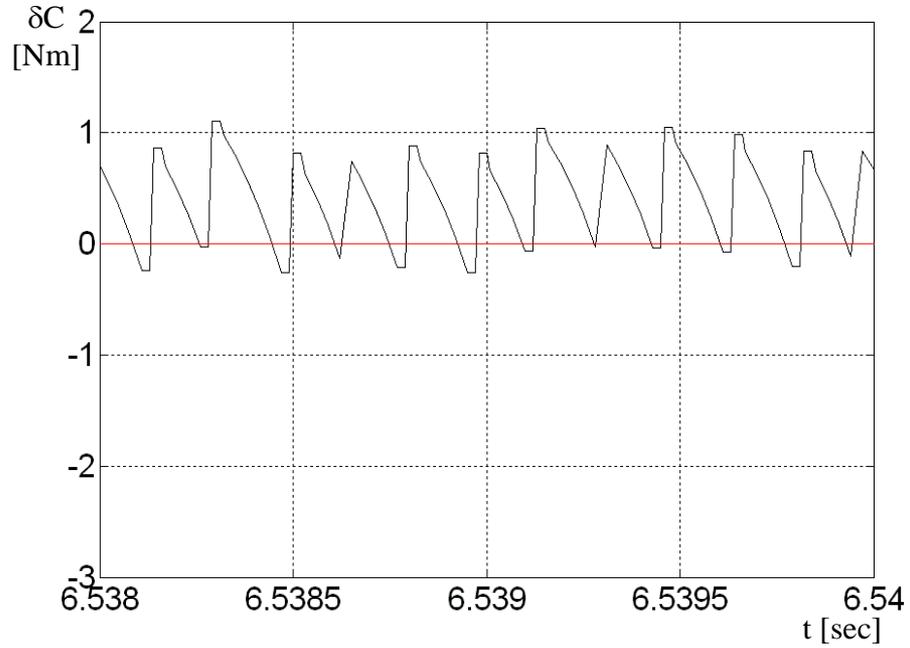
# Regime stazionario con isteresi nulle e strategia D



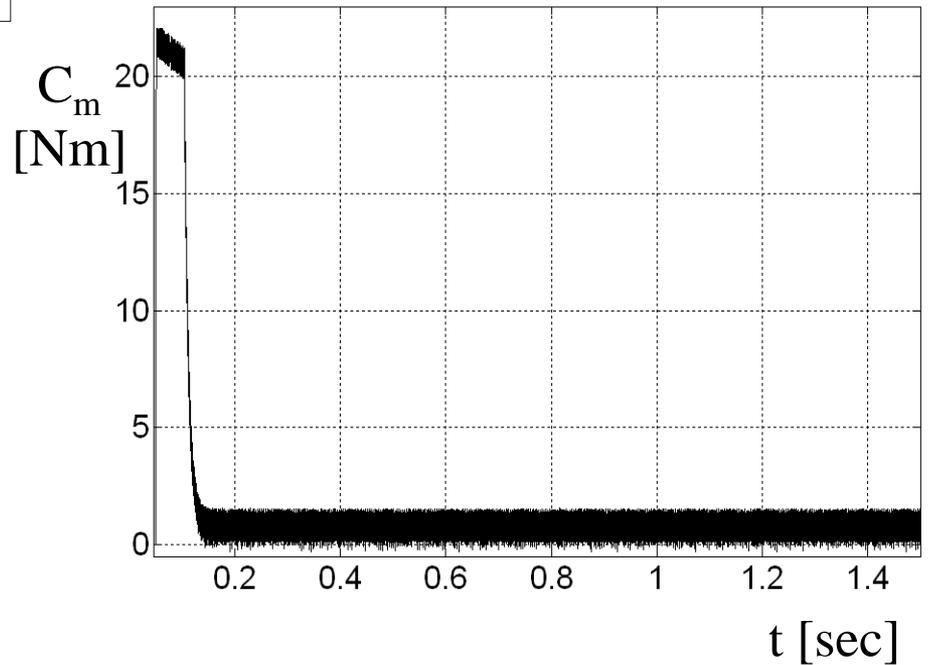
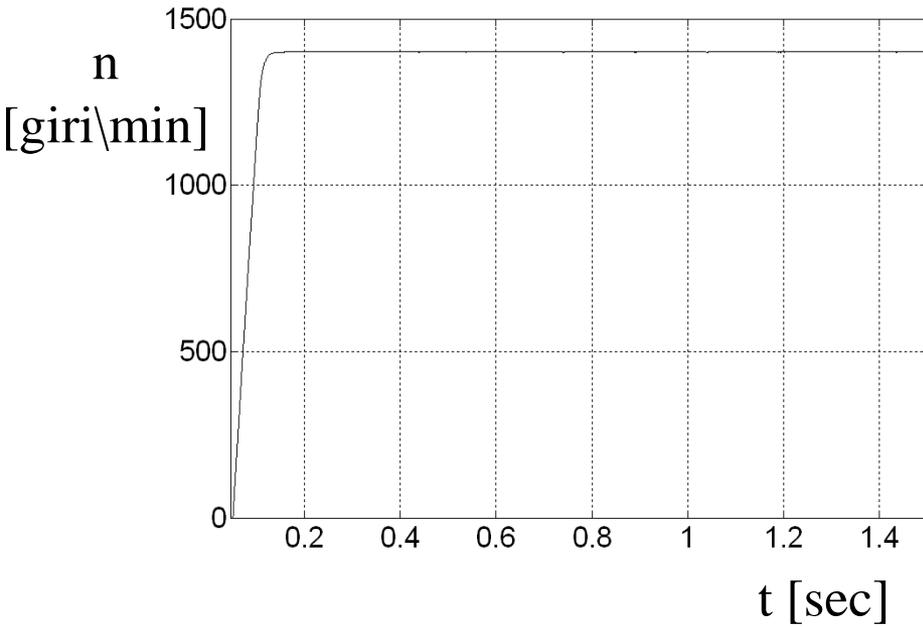
# Regime con isteresi non nulle e strategia A



# ERRORE DI COPPIA



# AVVIAMENTO DEL MOTORE A VUOTO



# Risposta ad un'onda quadra della coppia di riferimento

