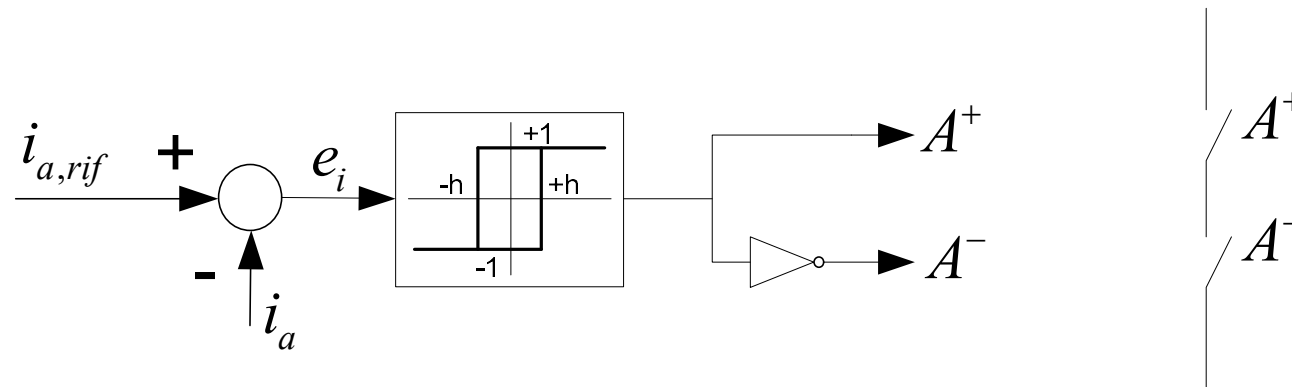


**REGOLATORI DI  
CORRENTE IN ALTERNATA  
AD ISTERESI  
(SISTEMI TRIFASE)**

# SCHEMA DEL REGOLATORE

Lo schema base del regolatore di corrente ad isteresi è il seguente:

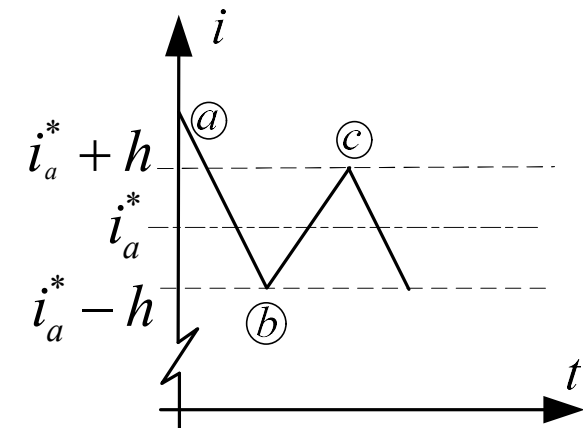
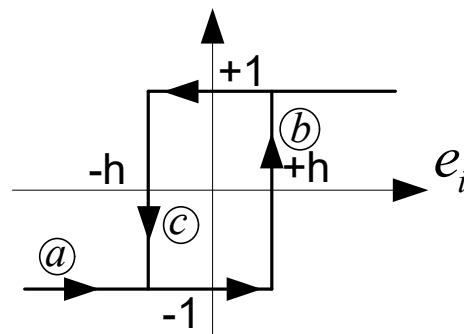
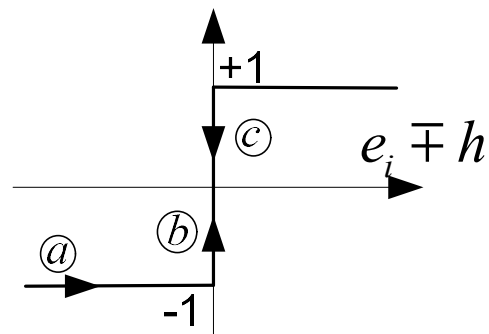
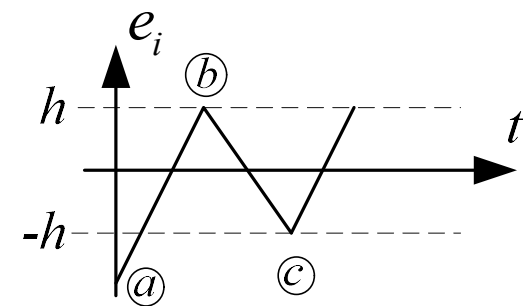
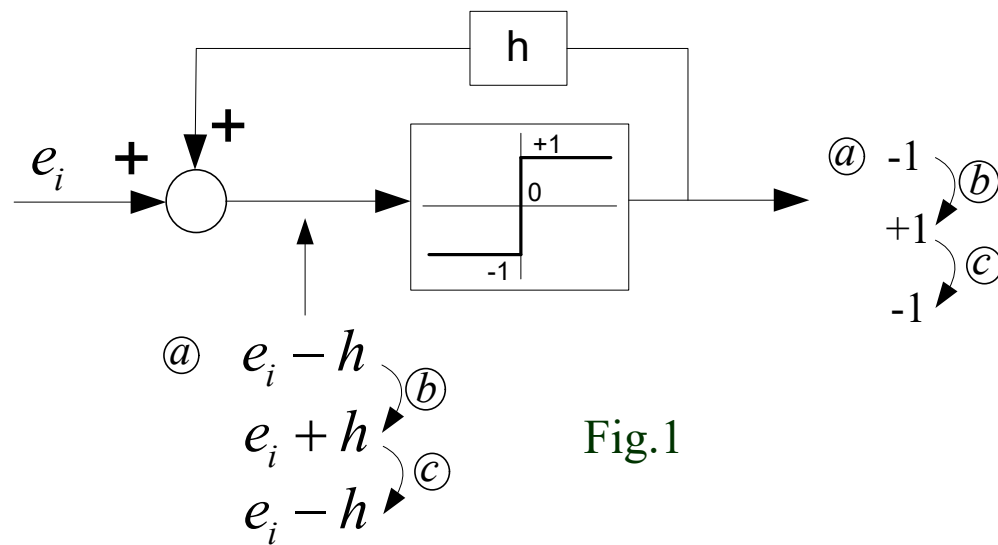


Lo schema si riferisce ad una corrente generica (nella fattispecie è quella della fase  $a$  di un motore asincrono). L'errore di corrente (differenza tra valori di riferimento e di misura) è elaborato da un blocco di isteresi di ampiezza  $h$ . L'uscita del regolatore assume, in alternativa, i valori  $+1$  e  $-1$  e comanda uno degli interruttori di un ramo dell'invertitore, l'altro interruttore del ramo è comandato dalla stessa uscita del regolatore ma opposta. I comandi rispettano la seguente regola.

In corrispondenza di un errore di corrente negativo, l'uscita del regolatore è un comando che tende a diminuire la corrente nel motore, dunque l'interruttore superiore  $A^+$  del ramo viene posto in interdizione (spento), mentre quello inferiore  $A^-$  viene posto in conduzione (acceso).

# FUNZIONAMENTO DEL REGOLATORE

Per analizzare il funzionamento del regolatore conviene espandere il blocco di isteresi come indicato nella Fig.1 sottostante.



NOTA: \* significa riferimento ( $r_{if}$ )

# FUNZIONAMENTO DEL REGOLATORE

La Fig.1 mostra che il blocco dell'isteresi può essere rappresentato dal un comparatore di zero reazionato (con un guadagno  $h$  : banda dell'isteresi). Le Figg.2 mostrano il dettaglio del comparatore di zero e del corrispondente ciclo d'isteresi. Le Fig.3 infine riportano gli ipotetici andamenti dell'errore di corrente e della corrente stessa.

Si supponga di partire con l'analisi nel punto  $(a)$  in corrispondenza del quale la corrente  $i_a$  è "molto" più grande di  $i_{a,rif}$  (vedi Fig.1 dia precedente) e produce un errore  $e_i < -h$  (vedi Figg.2 e Figg.3), in tale condizione operativa  $e_i - h < 0$ .

L'uscita del blocco comparatore ed anche del blocco d'isteresi è -1, conseguentemente gli interruttori  $A^+$  e  $A^-$  del ramo dell'invertitore comandato da quell'uscita forza la corrente a decrescere (si seguano i percorsi nelle varie figure).

Il processo di diminuzione della corrente proseguirà (per effetto dell'isteresi) oltre la condizione  $i_a = i_{a,rif}$  fino a raggiungere il valore  $i_a = i_{a,rif} - h$  (e corrispondentemente  $e_i = +h$  e  $e_i - h = 0$ ). Il comparatore di zero commuterà (vedi Figg.2) e l'uscita del regolatore passerà da -1 a +1 (transizione  $(b)$ ).

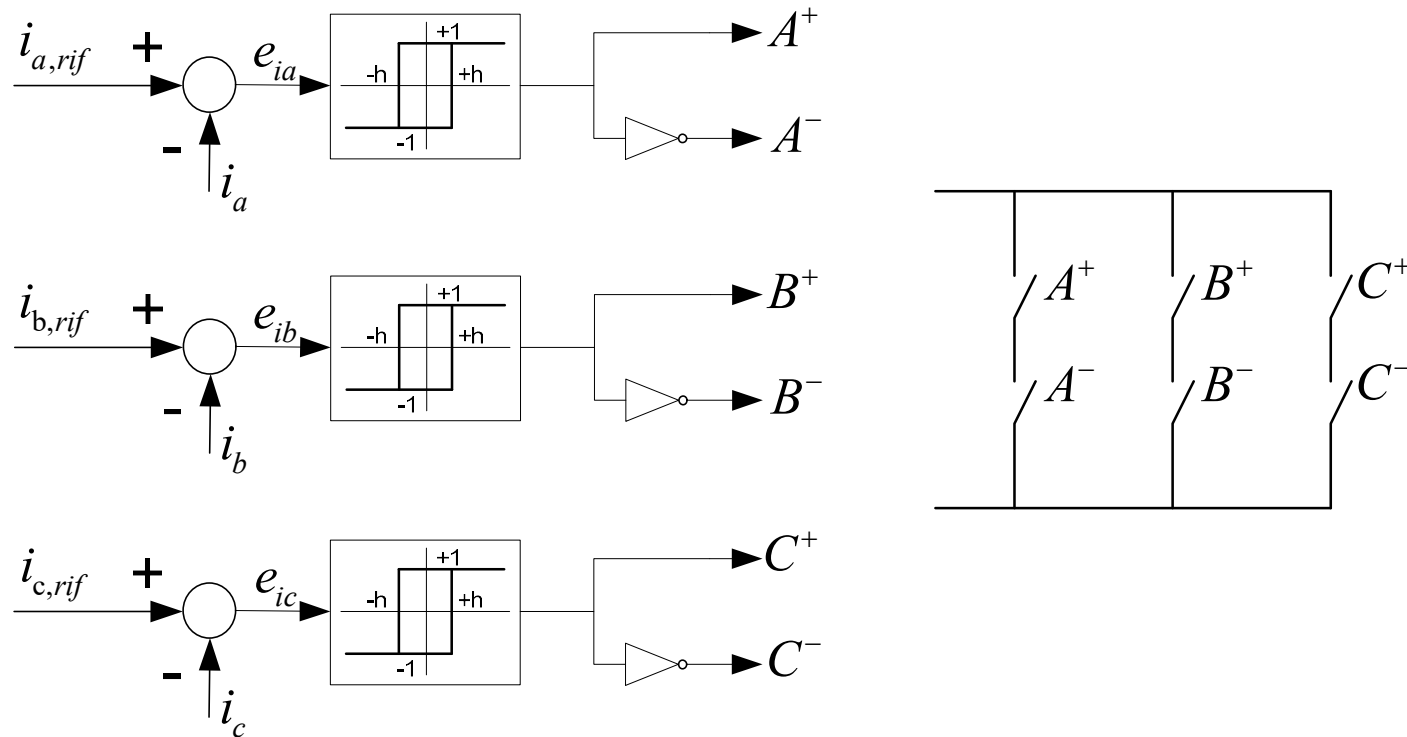
# FUNZIONAMENTO DEL REGOLATORE

Gli interruttori  $A^+$  e  $A^-$  del ramo della fase  $a$  commuteranno in maniera complementare e forzeranno un aumento della corrente della fase ( $A^+ = \text{on}$ ,  $A^- = \text{off}$ ).

Questa condizione permarrà finchè  $i_a$  eguaglierà e supererà  $i_{a,rif}$  e raggiungerà il valore  $i_a = i_{a,rif} - h$  (e corrispondentemente  $e_i = -h$  e  $e_i + h = 0$ ), Il comparatore di zero commuterà (vedi Figg.2) e l'uscita del regolatore passerà da +1 a -1 ritornando nella condizione precedente (transizione ©).

# REGOLATORI DI CORRENTE AD ISTERESI DAL MONOFASE A TRIFASE

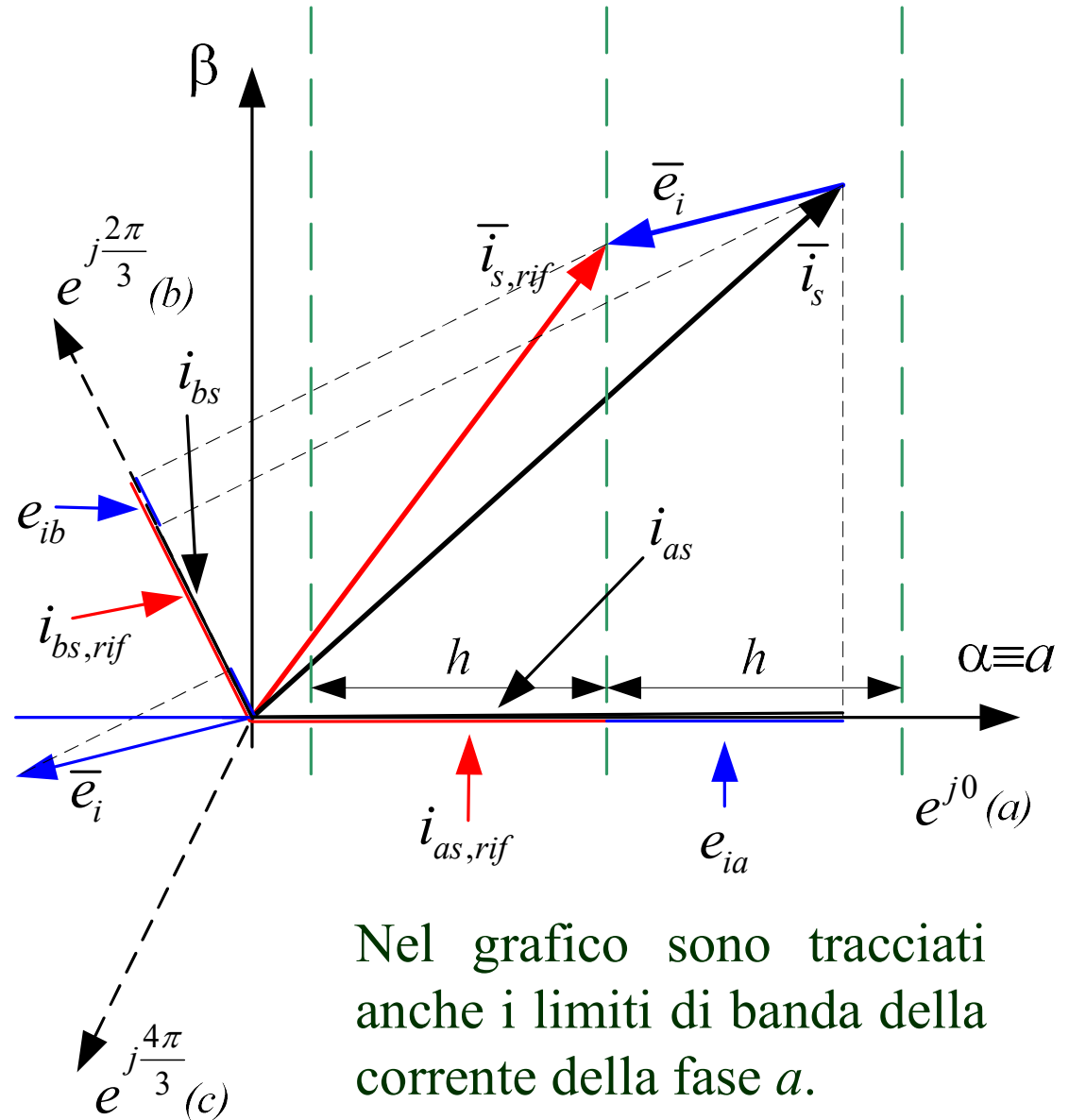
Quanto si è visto fin'ora vale per una corrente (sistema monofase), nel caso trifase si deve replicare lo schema monofase altre due volte (fasi  $b$  e  $c$ )



# REGOLATORI DI CORRENTE AD ISTERESI DAL MONOFASE A TRIFASE

Determinando i vettori spaziali della corrente di riferimento  $\bar{i}_{s,rif}$ , della corrente di statore del motore  $\bar{i}_s$  e dell'errore di corrente  $\bar{e}_{is} = \bar{i}_{s,rif} - \bar{i}_s$  si può costruire il grafico a fianco in un sistema di riferimento stazionario.

Vale la pena ricordare che le proiezioni dei vettori spaziali lungo gli assi  $e^{j0}$ ,  $e^{j2\pi/3}$ ,  $e^{j4\pi/3}$  sono le componenti delle tre fasi nell'ordine  $a, b, c$ .



Nel grafico sono tracciati anche i limiti di banda della corrente della fase  $a$ .

# REGOLATORI DI CORRENTE AD ISTERESI DAL MONOFASE A TRIFASE

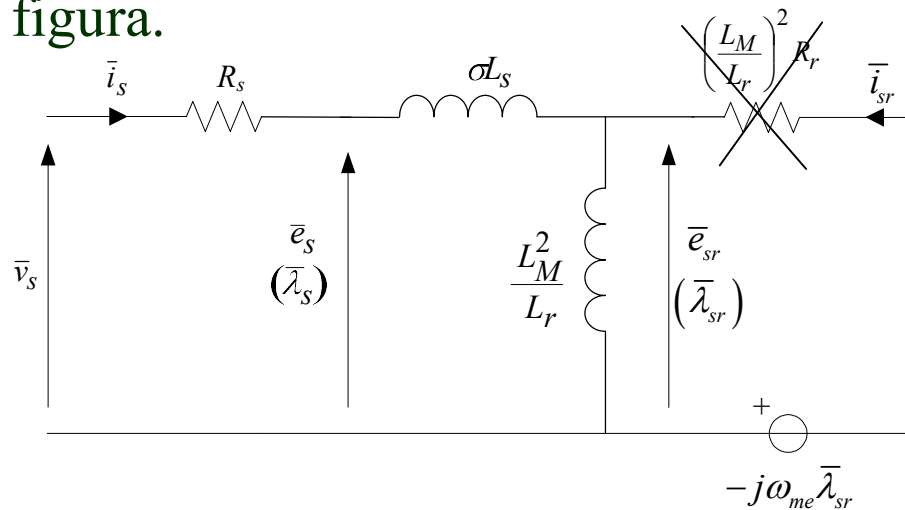
Nel grafico sono tracciati anche i limiti di banda della corrente della fase  $a$ . Sono linee perpendicolari all'asse sul quale si individuano le componenti della fase  $a$  stessa (nel grafico tale asse ha direzione orizzontale e quindi i limiti sono individuati da linee verticali, tratteggiate verdi). Le linee limite distano  $h$  dal vertice del vettore della corrente di riferimento da ambo i lati. In maniera analoga si possono tracciare le linee che rappresentano i limiti delle altre due componenti di fase della corrente di statore  $b$  e  $c$ . Esse sono linee perpendicolari all'asse  $e^{j2\pi/3}$  (per la componente  $b$ ) e all'asse  $e^{j4\pi/3}$  (per la componente  $c$ ).



# TRAIETTORIA DEL VERTICE DI $\bar{i}_s$

Conviene condurre l'analisi del funzionamento del regolatore di corrente ad isteresi trifase in un sistema di riferimento stazionario (è il riferimento delle correnti che circolano fisicamente nel motore).

Si consideri il circuito equivalente a gamma rovescia valido in regime dinamico del motore asincrono (e  $\omega_d=0$ ) e lo si semplifichi come in figura.

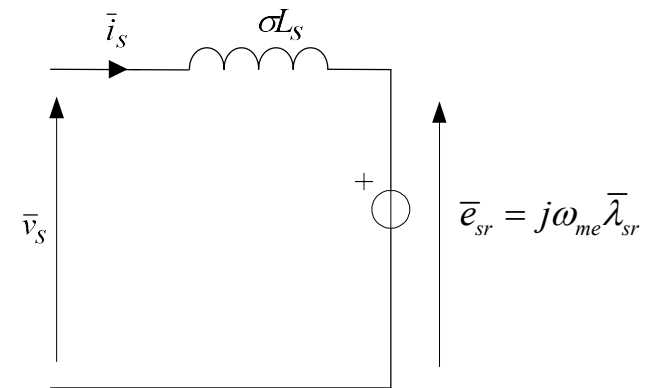


Se si trascura la resistenza di rotore, si può scrivere

$$\bar{e}_{sr} \square j\omega_{me}\bar{\lambda}_{sr}$$

Se si trascura ancora la resistenza di statore, si ottiene lo schema a fianco, per il quale si può scrivere

$$\frac{d}{dt}\bar{i}_s = \frac{\bar{v}_s - \bar{e}_{sr}}{\sigma L_s}$$



# TRAIETTORIA DEL VERTICE DI $\bar{i}_s$

Considerato che il modulo del vettore spaziale di tensione vale sempre  $2V_{dc}/3$ , alle basse velocità si può ulteriormente trascurare  $e_{sr}$  per cui rimane

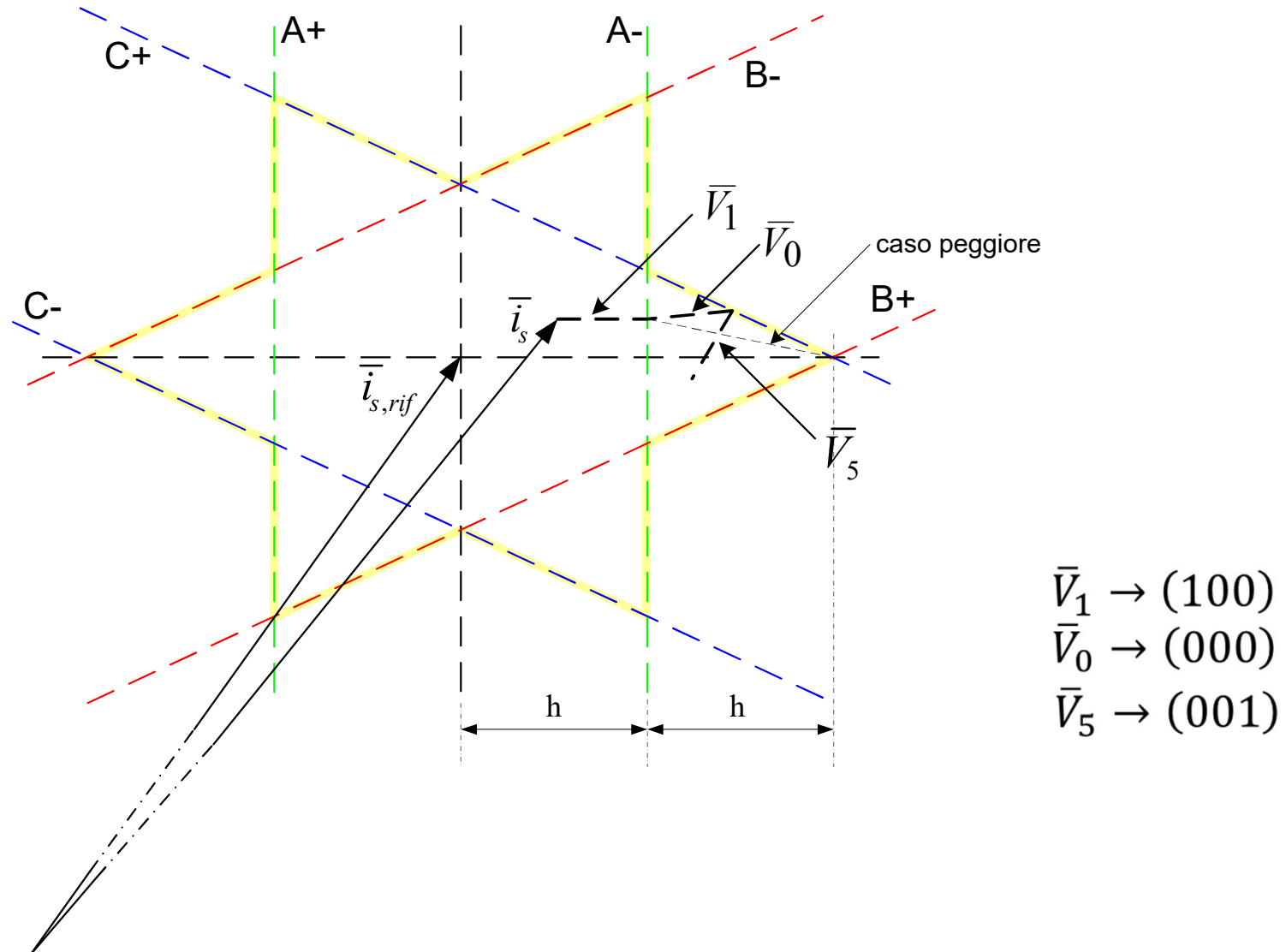
$$\frac{d}{dt} \bar{i}_s = \frac{\bar{v}_s}{\sigma L_s}$$

Da questa relazione si evince che la variazione del vettore spaziale della corrente di statore ovvero la traiettoria del vertice del vettore spaziale ha la stessa direzione e lo stesso verso del vettore spaziale di tensione applicato allo statore del motore. Nel caso di alimentazione da inverter le possibili traiettorie del vertice del vettore spaziale della corrente di statore sono sette: sei corrispondenti ai vettori "attivi"  $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_6$

ed una "nulla" corrispondente ai due vettori "nulli"  $\bar{V}_0, \bar{V}_7$ , in questo caso il vertice del vettore non si sposta (il vettore spaziale della corrente di statore rimane fermo).

Nota finale accessoria: se si volesse tener conto anche della  $e_{sr}$ , si dovrebbe valutare il flusso  $\lambda_{sr}$  facendo ricorso a considerazioni di tipo dinamico (un modo di procedere è mostrato nel testo di Novotny-Lipo suggerito e ripreso nelle presentazioni accessorie sulla dinamica del motore asincrono).

# ERRORE MASSIMO NEL SISTEMA TRIFASE (2·h)



# ERRORE MASSIMO NEL SISTEMA TRIFASE (2·h)

La situazione rappresentata nella figura della dia precedente è una eventualità possibile indotta dall'evoluzione temporale del funzionamento del sistema (nel senso che poiché non ci sono controindicazioni che la possano escludere, la si suppone possibile). In particolare si supponga che in un certo istante la terna di correnti nel motore siano rappresentate dal vettore spaziale  $\bar{i}_s$  e il vettore di tensione di statore applicato al motore sia  $\bar{V}_1$  (uscita dell'invertitore).

Si ricordi l'usuale rappresentazione delle configurazioni degli interruttori dell'inverter tramite terne ( $S_a S_b S_c$ ) con le funzioni di commutazione di ciascun ramo dell'inverter.

In tali condizioni operative il vertice del vettore spaziale della corrente (con le approssimazioni indicate nelle dia precedenti) percorre una traiettoria coincidente con la direzione ed il verso del vettore di tensione applicato (quella di  $\bar{V}_1$  (100)).

# ERRORE MASSIMO NEL SISTEMA TRIFASE (2·h)

La traiettoria prosegue fino a che il vertice del vettore raggiunge una linea limite di banda (nel grafico la linea A<sup>-</sup>).

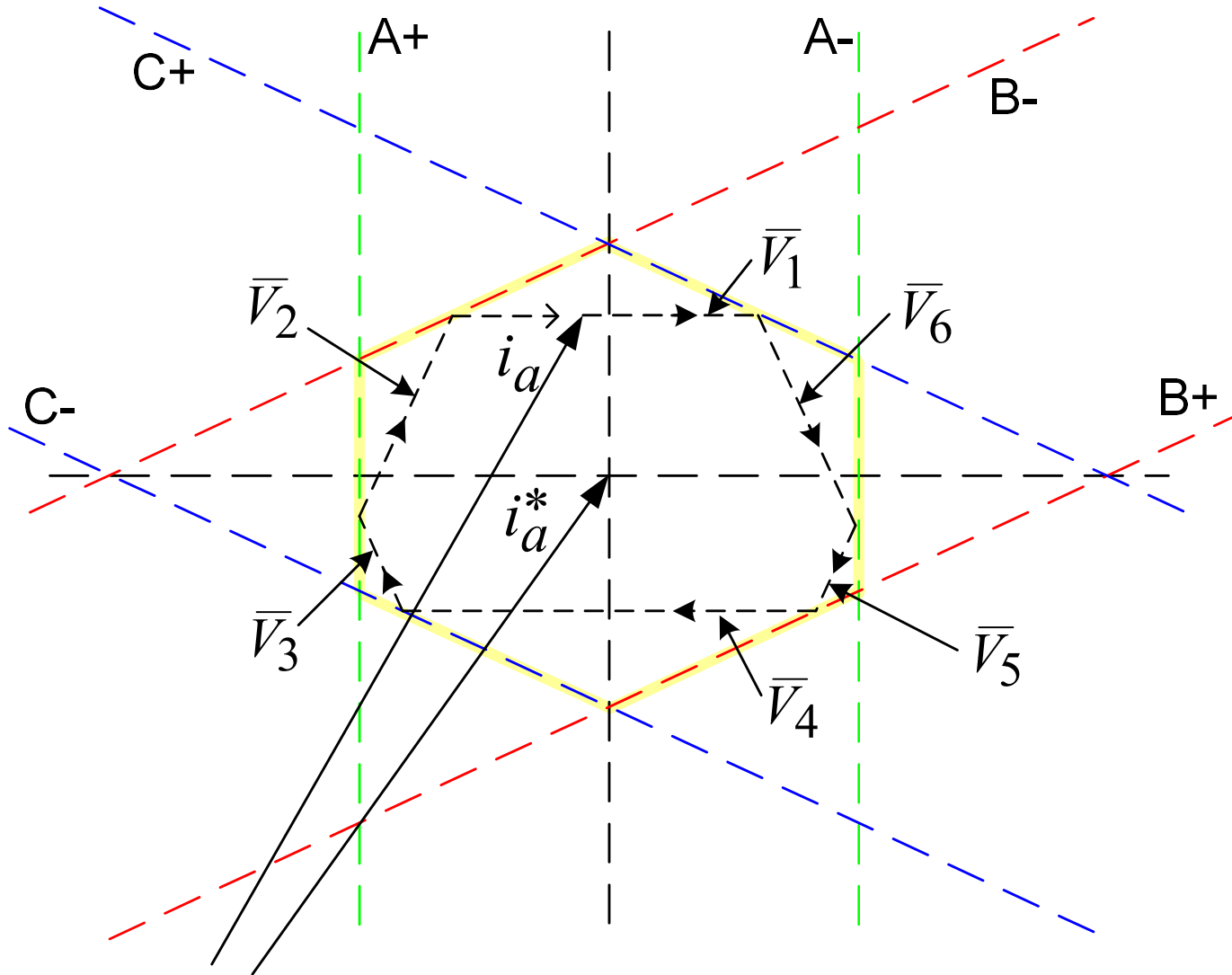
In corrispondenza di tale evento commutano gli interruttori del ramo della fase *a* (il "primo" ramo nella rappresentazione a "terne"): si apre l'interruttore del semiponte superiore e si chiude quello del semiponte inferiore. Il vettore di tensione diventa  $\bar{V}_0$  (000). Corrispondentemente i morsetti delle fasi del motore sono cortocircuitati. Il motore assume una "evoluzione libera" (forzante esterna nulla). Le correnti di fase sono sostenute dalla f.e.m. mozionale interna e dall'effetto induttivo (effetto d'inerzia elettrico) sempre interno, per cui è plausibile intuire che la traiettoria del vertice del vettore corrente possa proseguire oltre il limite di banda (come ad esempio è rappresentato nella figura precedente). La traiettoria "libera" prosegue dunque fino a intersecare un'altra linea limite di banda, nell'esempio quella C<sup>+</sup>. In questo caso commuta il terzo ramo, quello della fase *c* e dunque il vettore di tensione applicato diverrà (001) che corrisponde al vettore  $\bar{V}_5$ . La traiettoria del vertice della corrente segue la direzione ed il verso di  $\bar{V}_5$  (come mostrato della figura precedente, risulta che, in qualche modo, il vertice del vettore "torna indietro").

# ERRORE MASSIMO NEL SISTEMA TRIFASE (2·h)

Risulta evidente che l'errore sulla componente della fase  $a$  della corrente di statore supera il valore  $h$  della banda introdotta nel regolatore ad isteresi.

Tra tutte le infinite possibili traiettorie del tratto in evoluzione libera (quello in cui è applicato il vettore nullo  $\bar{V}_0$ ) la peggiore è quella in cui il vertice del vettore di corrente raggiunge (nell'esempio analizzato) il punto intersezione tra le linee limite  $C^+$  e  $B^+$ . In tale evenienza l'errore sulla corrente della fase  $a$  raggiunge il valore  $2h$  il quale dunque è l'errore massimo possibile che ciascuna corrente di fase può assumere con il controllo di corrente ad isteresi in un sistema trifase.

# CICLO LIMITE



- $\bar{V}_1 \rightarrow (100)$
- $\bar{V}_6 \rightarrow (101)$
- $\bar{V}_5 \rightarrow (001)$
- $\bar{V}_4 \rightarrow (011)$
- $\bar{V}_3 \rightarrow (010)$
- $\bar{V}_2 \rightarrow (110)$
- $\bar{V}_1 \rightarrow (100)$
- .....

# CICLO LIMITE

Un altro fenomeno anomalo è l'innescò del ciclo limite.

Si supponga che l'azionamento si trovi in una condizione operativa per la quale il vettore spaziale della corrente di statore stia nella posizione indicata in figura e che il vettore di tensione applicato sia  $\bar{V}_1$  (100).

La traiettoria segue direzione e verso del vettore di tensione (orizzontale verso destra nelle condizioni suddette). Nella sua evoluzione la traiettoria intercetta il limite di banda  $C^+$  in corrispondenza della quale commuta il ramo della fase  $c$  e il vettore di tensione diventa  $\bar{V}_6$  (101). La traiettoria si piega seguendo direzione e verso di  $\bar{V}_6$ , proseguendo fino ad intercettare la linea  $A^-$  (limite di banda della fase  $a$ ). Tale evento provoca la commutazione degli interruttori del ramo associato alla fase  $a$ . La nuova configurazione degli interruttori dell'invertitore diventa (001) corrispondente al vettore di tensione  $\bar{V}_5$ : la traiettoria del vertice del vettore di corrente si modifica seguendo direzione e verso di  $\bar{V}_5$ . L'evoluzione del funzionamento prosegue in maniera analoga a quanto fin qui descritto intercettando via via nell'ordine i limiti di banda  $B^+$ ,  $C^-$ ,  $A^+$ ,  $B^-$ .



# CICLO LIMITE

In corrispondenza a ciascuna intersezione avviene una commutazione coerente con il limite di banda toccato ed anche la traiettoria del vertice del vettore di corrente assume direzione e verso coerente con il vettore di tensione prodotto dall'invertitore. Si genera una sequenza *ordinata* di vettori di tensione (vedi figura). Al termine del processo descritto il sistema assume la stessa condizione operativa di partenza e la traiettoria forma un ciclo chiuso detto *ciclo limite*. Il fenomeno viene poi ripetuto periodicamente. La sequenza ordinata di vettori di tensione può essere assunta come uno dei sintomi dell'innescio del ciclo.

Il vertice del vettore di corrente segue un percorso che, con le approssimazioni fatte, si chiude su sé stesso a formare un esagono più o meno irregolare i cui vertici si trovano sulle linee dei limiti di banda. In queste condizioni ideali il ciclo limite verrebbe percorso indefinitamente.

# CICLO LIMITE

In realtà il ciclo non si chiude su sé stesso a causa degli elementi trascurati: cadute di tensione sulle resistenze di statore e rotore, della f.e.m.  $e_{sr}$ , delle condizioni operative di velocità e carico. Queste comportano che le traiettorie non siano parallele alle direzioni dei vettori di tensione applicati né perfettamente rettilinee. Ne consegue che il controllo esce dal ciclo limite in maniera naturale dopo aver percorso un certo numero di cicli.

Si può forzare l'uscita dal ciclo limite interrompendo la sequenza ordinata dei vettori di tensione, introducendo, da controllo, un vettore nullo (mai presente nella sequenza del ciclo limite).

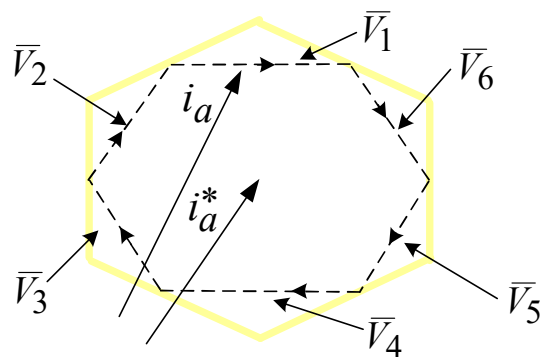
L'ingresso del ciclo limite comporta due conseguenze negative: a) l'errore di corrente non si annulla mai (il vettore della corrente di statore attuale non raggiunge mai il riferimento); b) la frequenza di commutazione dell'inverter aumenta bruscamente.

# FREQUENZA DI COMMUTAZIONE NEL CICLO LIMITE

Per valutare approssimativamente la frequenza di commutazione dell'inverter durante il ciclo limite conviene determinare il periodo del ciclo limite cioè il tempo necessario a percorrere l'intero ciclo.

Ricorrendo ad una analogia cinematica il tempo di percorrenza del ciclo può essere determinato dividendo la lunghezza del ciclo per la velocità con cui viene percorso.

Il ciclo è costituito dalle singole traiettorie del vertice del vettore di corrente dunque è un percorso di corrente. Ovviamente dipende dalla forma geometrica del ciclo (che si suppone un esagono), si può considerare un percorso medio riferendosi a quello che assume la forma di un esagono regolare (come mostrato dalla linea tratteggiata della figura sottostante).



Si può dimostrare, con semplici considerazioni geometriche, che ciascun lato dell'esagono in esame è lungo  $h$  (ampiezza dell'isteresi). Per cui la lunghezza totale del ciclo è  $6h$ .

# FREQUENZA DI COMMUTAZIONE NEL CICLO LIMITE

La velocità con cui viene percorso è data dalla velocità con cui si sposta il vertice del vettore corrente, cioè

$$\left| \frac{d \vec{i}_s}{dt} \right| \square \frac{1}{\sigma L_s} \frac{2}{3} V_{dc}$$

Dove  $2V_{dc}/3$  è l'ampiezza dei vettori di tensione applicati al motore (quelli di uscita dall'invertitore).

Quindi il periodo del ciclo è

$$T_c \square \frac{6h}{\frac{1}{\sigma L_s} \frac{2}{3} V_{dc}} = \frac{9h \sigma L_s}{V_{dc}}$$

La valutazione è palesemente approssimativa, ma la relazione mette in evidenza i legami: il periodo del ciclo dipende direttamente dall'ampiezza del ciclo d'isteresi e dall'induttanza transitoria del motore, dipende inversamente dalla tensione lato continua dell'invertitore.

# FREQUENZA DI COMMUTAZIONE NEL CICLO LIMITE

Si riconosce facilmente che in un periodo di ciclo avvengono **sei** commutazioni di interruttori dell'invertitore, lo stesso numero di commutazioni si conta anche in un periodo di portante di una modulazione a sottoscillazione sinusoidale. Pertanto, per analogia, si può ritenere che l'inverso del periodo di ciclo costituisca la frequenza di commutazione dell'invertitore quando è innescato il ciclo limite.

$$f_c = \frac{1}{T_c} = \frac{V_{dc}}{9h \sigma L_s}$$

Ad esempio per un azionamento per il quale  $V_{dc}=520V$  e  $\sigma L_s=20mH$  ed assumendo  $h=1A$ , si ottiene:

$$f_c = \frac{520}{9 \cdot 0,020} \approx 2900 Hz$$

# PREGI E DIFETTI

Il pregio più evidente è la semplicità sia realizzativa che strutturale:

- la legge di controllo è costituita semplicemente da un'isteresi (non prevede operazioni aritmetiche, ma solo confronti);
- è assente il modulatore.

Controindicazioni.

- La frequenza di commutazione è variabile in funzione delle condizioni operative (velocità e carico); per cui non è prevedibile a priori (ne consegue che non si possono prevedere le perdite di potenza causate dalle commutazioni);
- La frequenza di commutazione è prevedibilmente in controtendenza rispetto alle esigenze; infatti alle basse velocità è prevedibilmente più elevata che alle alte velocità. Ricordando la seguente relazione (dia 9)

$$\frac{d}{dt} \bar{i}_s = \frac{\bar{v}_s - \bar{e}_{sr}}{\sigma L_s}$$

la tensione che forza la variazione della corrente (numeratore) è tendenzialmente maggiore quando  $\bar{e}_{sr}$  è piccola (basse velocità) rispetto a  $\bar{e}_{sr}$  grande (alta velocità).

# PREGI E DIFETTI

Controindicazioni connesse con l'uso in sistemi trifase

- L'errore massimo su ciascuna delle componenti della corrente di fase (del sistema trifase), è  $2h$  (dove  $h$  è l'ampiezza dell'isteresi), mentre ci si sarebbe attesi un valore  $h$  (come individuato nel caso monofase).
- È possibile l'innescò del ciclo limite