

# CICLOCONVERTITORI

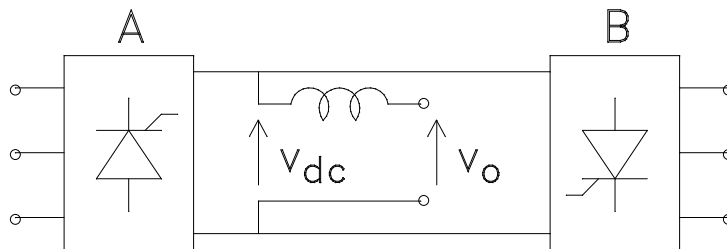
*Prof. Simone CASTELLAN*

[1] M.H.Rashid, *Power electronics: circuit, devices and applications*, Pearson Education – Prentice Hall, 2004.

[2] B.K. Bose, *Modern power electronics and AC drives*, Prentice – Hall, 2002.

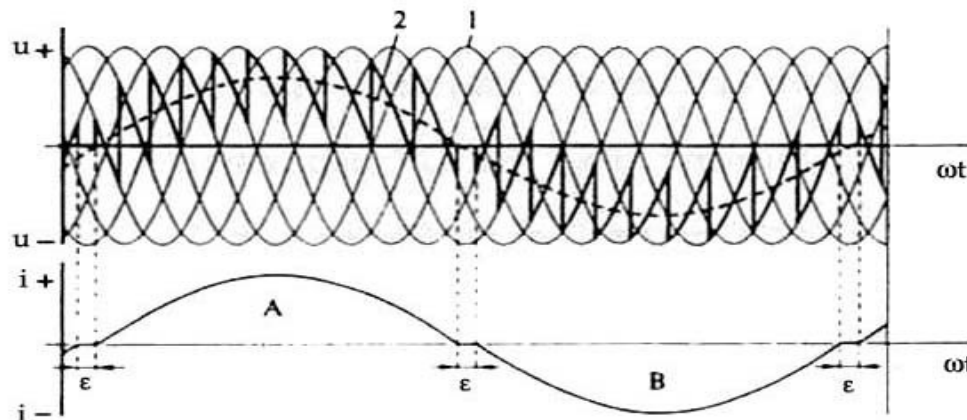
# PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Gli azionamenti con cicloconvertitore sono utilizzati per potenze elevate, oltre i 20MW, e con velocità massima fino a 900 giri/min. Sono particolarmente adatti per motori con velocità molto basse e quando sono richieste regolazioni di velocità fini anche a bassi giri.



Convertitore a tiristori a doppio ponte

$V_o = V_{do} \cdot \cos\alpha \rightarrow$  può variare da  $V_{do}$  a  $-V_{do}$ , è quindi possibile far variare nel tempo la tensione di uscita del convertitore a doppio ponte regolando opportunamente il ritardo di accensione dei tiristori, in modo da approssimare un andamento sinusoidale della tensione applicata al carico.



1: tensioni di ingresso  
2: tensione di uscita

# PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Se  $\alpha$  viene fatto variare lentamente in rapporto alla pulsazione di ingresso  $\omega_i$  il valore medio  $\langle v_{dc}(t) \rangle$  di  $v_{dc}$  in  $1/6$  di periodo ( $2\pi/6\omega_i$ ) varia nel tempo e quindi la media in  $1/6$  di periodo della tensione di uscita varia nel tempo, cioè  $v_o(t) = \langle v_{dc}(t) \rangle$ . Se  $\omega_o \ll \omega_i$  l'induttanza è in grado di filtrare le armoniche di  $v_{dc}$  e quindi  $v_o$  approssima bene una sinusoide.

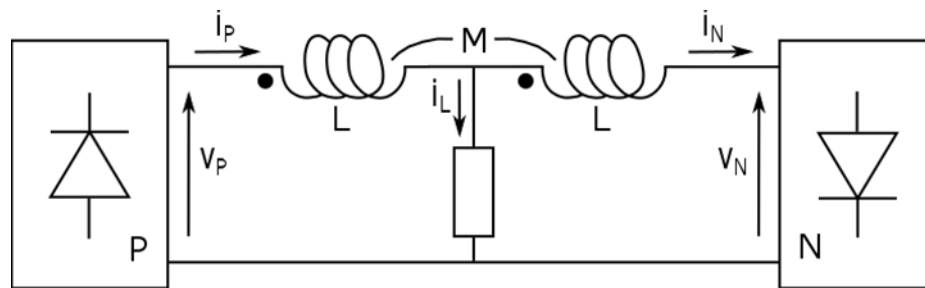
L'angolo di ritardo di accensione dei tiristori ( $\alpha$ ) può essere fatto variare ogni  $T_i/p$  secondi ( $p$  = numero di impulsi del convertitore). A causa di ciò risulta evidente che la frequenza di uscita del cicloconvertitore non può che essere inferiore a quella di ingresso. Tanto più piccola è la frequenza di uscita rispetto a quella di ingresso tanto più bassa risulta la distorsione della tensione di uscita. Dovendo mantenere la distorsione della tensione di uscita entro limiti accettabili, le massime frequenze ottenibili in uscita dal cicloconvertitore dipendono dalla struttura dei convertitori elementari: per un convertitore a 6 impulsi la massima frequenza di uscita risulta circa  $1/3$  di quella di ingresso mentre per un convertitore a 12 impulsi si può arrivare a  $2/3$ .

Il sistema può funzionare su quattro quadranti e sia l'ampiezza che la frequenza della tensione di uscita sono regolabili.

In presenza di uno sfasamento fra le fondamentali della tensione e della corrente del carico, nell'ambito di un periodo della tensione di uscita ogni convertitore funziona sia da raddrizzatore (negli istanti in cui tensione e corrente di carico sono equiverse) sia da invertitore (negli istanti in cui tensione e corrente di carico hanno verso opposto). Naturalmente in ogni istante è funzionante uno solo dei due convertitori, mentre l'altro è bloccato.

# PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La scelta del tipo di convertitori a doppio ponte da impiegare può cadere teoricamente sia su quelli senza corrente di circolazione, sia su quelli con corrente di circolazione. Tuttavia i convertitori con circolazione di corrente vengono impiegati solo rarissimamente per realizzare cicloconvertitori. Infatti i sistemi a circolazione di corrente tendono a mantenere costante e pari al massimo valore istantaneo assunto dalla corrente di carico la somma delle correnti dei due convertitori. Nel caso dei convertitori destinati ad alimentare carichi in c.c. le perdite nei circuiti provvedono a smorzare la corrente di circolazione, cosicché gli effetti di eventuali sovracorrenti di carico vengono a sparire dopo alcuni periodi della tensione di rete. Nel caso dei cicloconvertitori invece la corrente di carico ha un andamento sinusoidale, sicché ad ogni periodo della tensione di uscita la corrente raggiunge il suo valore di picco. Si comprende allora che nella maglia costituita dai due convertitori tende a stabilirsi una corrente di circolazione tale che la somma delle correnti dei due convertitori sia pari al valore di picco della corrente di carico.



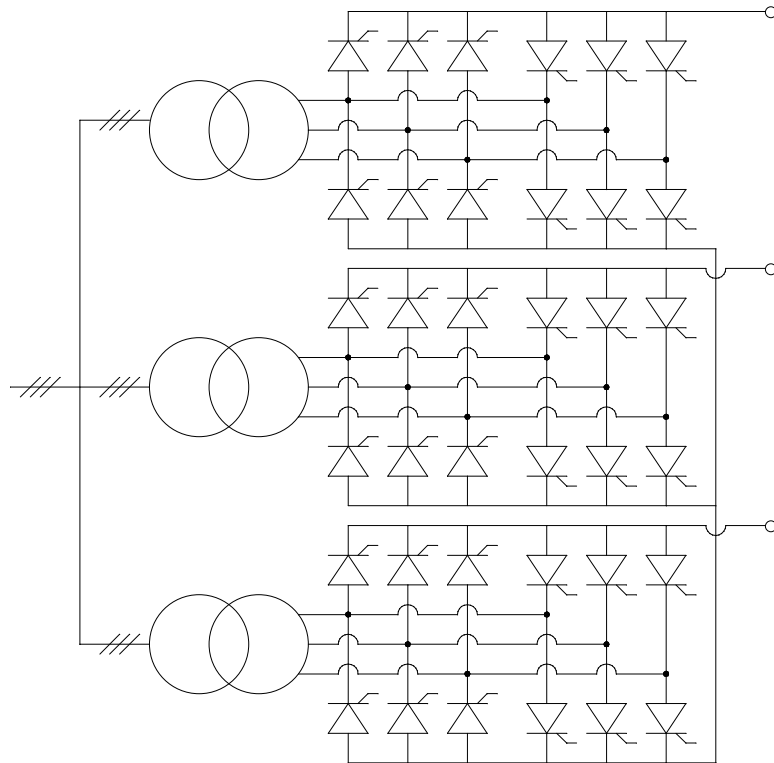
$$v_P - v_N = (L + M) \frac{d(i_P + i_N)}{dt} \geq 0$$

$$i_P + i_N = i_L + 2i_{circ} = \hat{I}$$

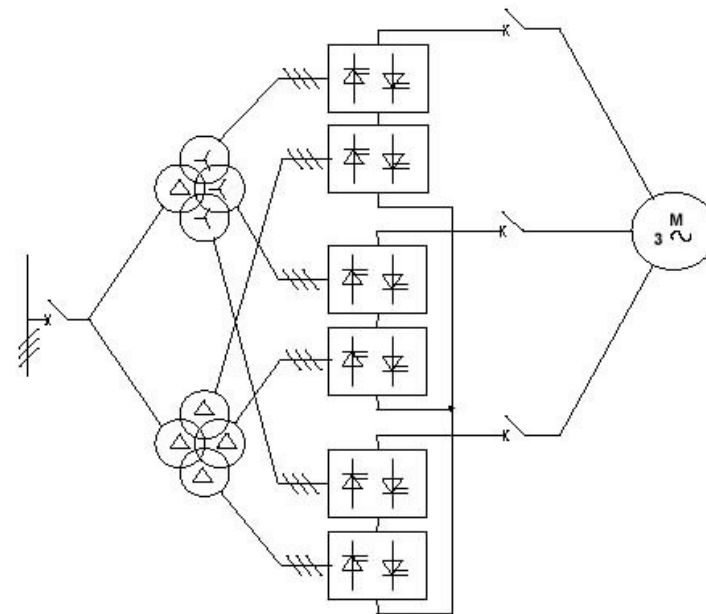
Ciò provoca l'erogazione da parte dei due convertitori di una corrente mediamente assai superiore a quella richiesta dal carico e quindi induce da un lato un sovradimensionamento dei convertitori stessi e dall'altro una riduzione sensibile del rendimento del sistema.

# CICLOCONVERTITORE TRIFASE A 6 E 12 IMPULSI

Un cicloconvertitore trifase è costituito da tre convertitori bidirezionali, uno per fase. Questi sono alimentati da tre trasformatori o da un trasformatore a triplo secondario con l'induttanza di dispersione concentrata soprattutto nel secondario. Questo allo scopo di disaccoppiare i tre convertitori bidirezionali durante la commutazione. Sfasando opportunamente l'accensione dei tre convertitori bidirezionali, che sono collegati a stella, è possibile ottenere un sistema di tensioni trifase.



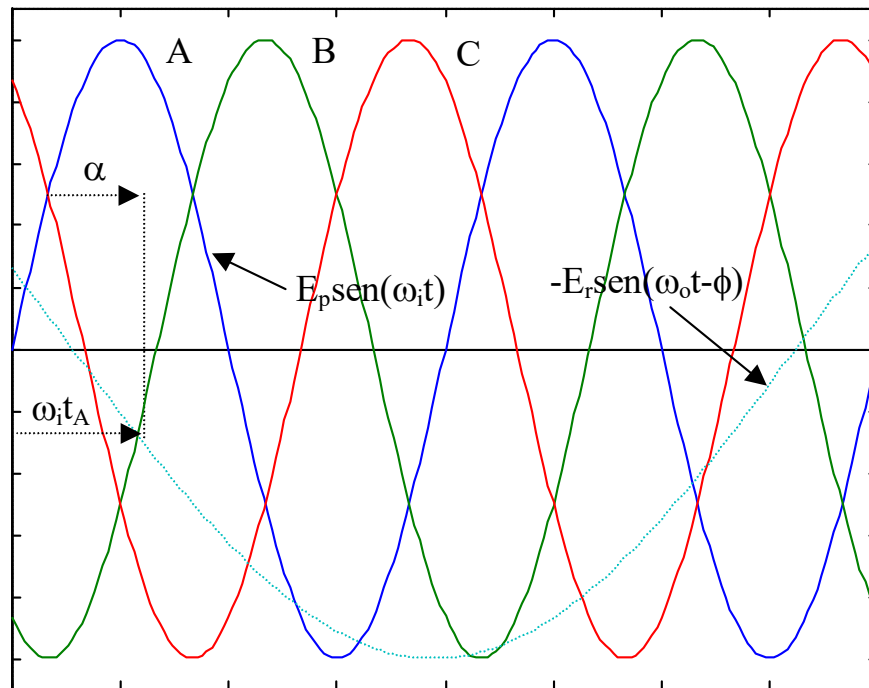
Cicloconvertitore trifase a 6 impulsi



Cicloconvertitore trifase a 12 impulsi

# SEGNALI DI COMANDO DEI TIRISTORI

È stato dimostrato che il metodo per produrre i segnali di comando per i tiristori che produce la tensione di uscita con il minor contenuto armonico possibile è costituito dall'intersezione fra un segnale di riferimento  $e_r$  sinusoidale alla frequenza di uscita  $f_o$  e un segnale portante cosinusoidale  $e_p$  alla frequenza di ingresso  $f_i$ . Il segnale portante per la fase A è costituito dalla tensione della fase B, per la fase B dalla tensione della fase C, per la fase C dalla tensione della fase A.



In un cicloconvertitore a 6 impulsi l'impulso di comando per il tiristore superiore del ramo collegato alla fase A dell'alimentazione viene determinato dall'intersezione del segnale di riferimento, cambiato di segno, con la tensione della fase B di alimentazione. Dal disegno si deduce che questo equivale ad imporre  $\alpha = \omega_i t_A - 30^\circ$ .

# SEGNALI DI COMANDO DEI TIRISTORI

Nel punto di intersezione fra la tensione della fase B e il segnale di riferimento si ha

$$E_p \operatorname{sen}(\omega_i t_A - 120^\circ) = -E_r \operatorname{sen}(\omega_o t_A - \phi)$$

che equivale a

$$\cos(\omega_i t_A - 30^\circ) = (E_r / E_p) \operatorname{sen}(\omega_o t_A - \phi)$$

Da cui, essendo  $\alpha = \omega_i t_A - 30^\circ$ , risulta

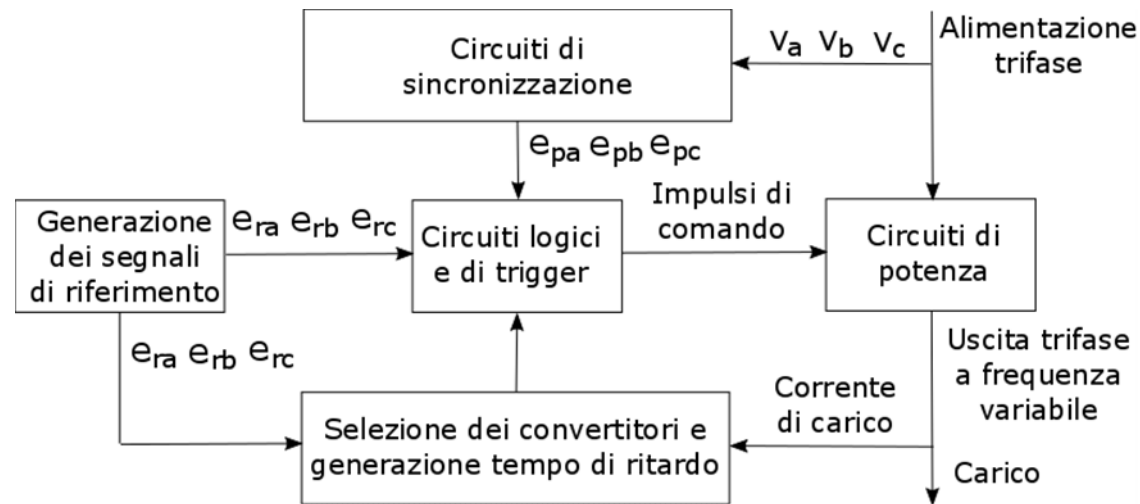
$$\cos \alpha = (E_r / E_p) \operatorname{sen}(\omega_o t - \phi)$$

La tensione di uscita del cicloconvertitore è quindi

$$V_{do} \cos \alpha = V_{do} (E_r / E_p) \operatorname{sen}(\omega_o t - \phi)$$

L'ampiezza, la frequenza e la fase della tensione di uscita del cicloconvertitore possono quindi essere variate controllando i corrispondenti parametri del segnale di riferimento, rendendo perciò lineare la caratteristica di controllo.

# CONTROLLO DEL CICLOCONVERTITORE



Il *circuito di sincronizzazione* genera i segnali portanti ( $e_{pa} = -Kv_b$ ,  $e_{pb} = -Kv_c$ ,  $e_{pc} = -Kv_a$ ), sincronizzati con le tensioni di rete, acquisite tramite trasformatori di misura e filtrate.

Il blocco *circuiti logici e di trigger* contiene comparatori per il confronto fra i segnali di riferimento e i segnali portanti. Le uscite dei comparatori costituiscono i segnali di clock per circuiti flip-flop le cui uscite, assieme ai segnali provenienti dal blocco *selezione convertitori e generazione tempo di ritardo*, costituiscono gli ingressi per porte AND, le cui uscite rappresentano gli impulsi di comando dei tiristori.

Il blocco *selezione convertitori e generazione tempo di ritardo* provvede alla selezione del ponte che deve condurre utilizzando le logiche di controllo tipiche dei convertitori a selezione del banco.



# CONTROLLO DEL CICLOCONVERTITORE

In base alla forma d'onda dei segnali di riferimento generati si possono distinguere due modi di funzionamento: funzionamento sinusoidale e funzionamento trapezoidale.

Il *funzionamento sinusoidale* viene utilizzato per i campi di velocità più basse, in cui le tensioni di macchina, e di conseguenza le tensioni di uscita del cicloconvertitore, sono basse. Un inconveniente è dato dalla potenza reattiva elevata assorbita.

Nella gamma superiore di velocità per migliorare il fattore di potenza viene impiegato il *funzionamento trapezoidale*. Nel modo di funzionamento trapezoidale i convertitori funzionano ai loro limiti di accensione per tutto il tempo possibile, cioè  $1/3$  di periodo della tensione di uscita (questo per far sì che solo un convertitore alla volta sia nella sua posizione limite, in modo che il sistema delle tensioni di macchina rimanga controllabile). La forma d'onda trapezoidale, oltre alla componente fondamentale, contiene una terza armonica di ampiezza rilevante. Tuttavia, poiché non vi è collegamento di neutro tra macchina e cicloconvertitore, le tensioni di macchina mantengono la loro forma sinusoidale. Oltre alla ridotta potenza reattiva assorbita dal convertitore, un ulteriore vantaggio del funzionamento trapezoidale è che il valore di picco della fondamentale supera del 15% il valore istantaneo massimo della tensione erogata dal convertitore.

# ARMONICHE ASSORBITE DAI CICLONVERTITORI

Nonostante la corrente erogata possa essere considerata sinusoidale (affermazione tanto più vera quanto più alto è il numero di impulsi del cicloconvertitore), la corrente assorbita da un cicloconvertitore ha una forma d'onda costituita da impulsi. Si può dimostrare che la corrente assorbita da un cicloconvertitore trifase contiene le armoniche di ordine

$$h = (k \cdot p \pm 1) \pm 6n \cdot f_o / f_i$$

$k = 1, 2, 3 \dots$ ,  $p =$  numero di impulsi lato rete del convertitore,  
 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ,  $f_o =$  frequenza di uscita,  $f_i =$  frequenza di rete

Vi è la comparsa di interarmoniche la cui ampiezza e frequenza sono funzioni della velocità della macchina. Ciò rende difficile l'utilizzo di filtri passivi.

## APPLICAZIONI DEI CICLOCONVERTITORI

I cicloconvertitori hanno due campi principali di applicazione:

1) azionamenti a velocità variabile di grandi macchine in c.a. lente. Tipici esempi di tali applicazioni sono i frantumatoi per cementifici, i sistemi di propulsione delle grandi navi, ecc...

2) Sistemi VSCF (variable speed - constant frequency). Sono sistemi, di uso prevalentemente aeronautico, in cui un generatore sincrono è calettato all'albero di un motore (rotante a velocità variabile entro un certo ambito) ed eroga pertanto una frequenza di uscita variabile con la velocità del motore. Il cicloconvertitore preleva questa frequenza variabile e fornisce in uscita una frequenza fissa (per usi aeronautici è di 400Hz).

# PREGI E DIFETTI DEI CICLOCONVERTITORI

I principali pregi dei cicloconvertitori sono:

- 1) la reversibilità ed invertibilità: essi consentono infatti il funzionamento rigenerativo e l'inversione delle fasi (che consente di invertire la velocità delle macchine in c.a.);
- 2) sono adatti all'impiego in sistemi di potenza molto elevata;
- 3) l'elevato rendimento tipico dei sistemi a commutazione da rete.

I principali difetti dei cicloconvertitori sono invece:

- 1) basse frequenze ottenibili in uscita, in rapporto alla frequenza di alimentazione;
- 2) elevato numero di componenti richiesti;
- 3) complessità del circuito di controllo, derivante dall'elevato numero di tiristori da innescare coordinatamente;
- 4) assorbimento di potenza reattiva dalla rete di alimentazione;
- 5) notevole impatto sulla "power quality" della rete di alimentazione, a causa dell'assorbimento di armoniche ed interarmoniche di corrente e di potenza reattiva fluttuante che possono provocare la distorsione della tensione di rete e il fenomeno del flicker.