

# *Convertitore bidirezionale trifase*

Il convertitore bidirezionale a commutazione forzata trova ampio impiego anche in versione trifase.

In questa versione, anzi, non è necessario impiegare il filtro risonante  $L_1C_1$ , in quanto il trasferimento di energia dalla rete trifase al circuito in c.c. avviene in maniera quasi continua. Il ripple della corrente di uscita è periodico a frequenza pari a  $6f$  e l'ampiezza della sua prima armonica è ridotta rispetto al caso monofase.

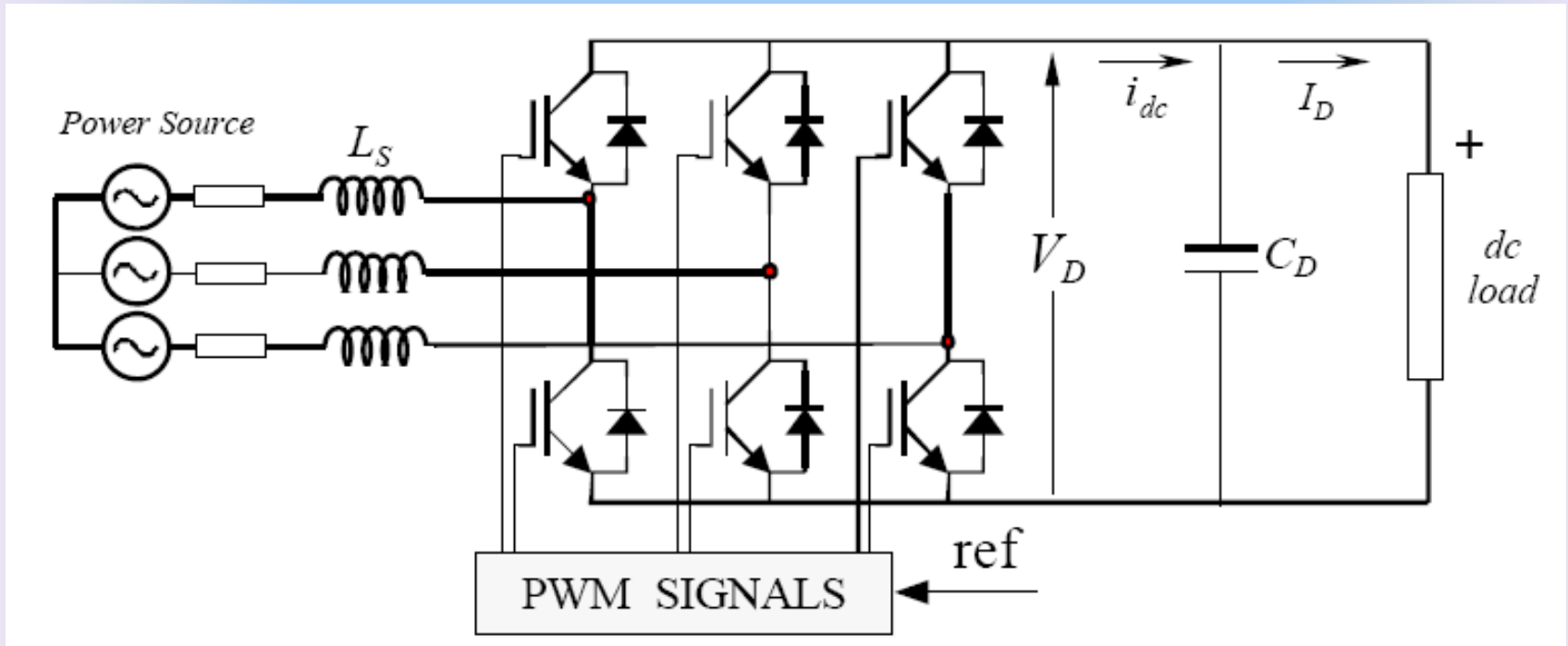
Due possibili configurazioni circuitali:

- a tensione impressa;
- a corrente impressa.

I convertitori a corrente impressa hanno una struttura duale di quelli a tensione impressa e sono meno diffusi.

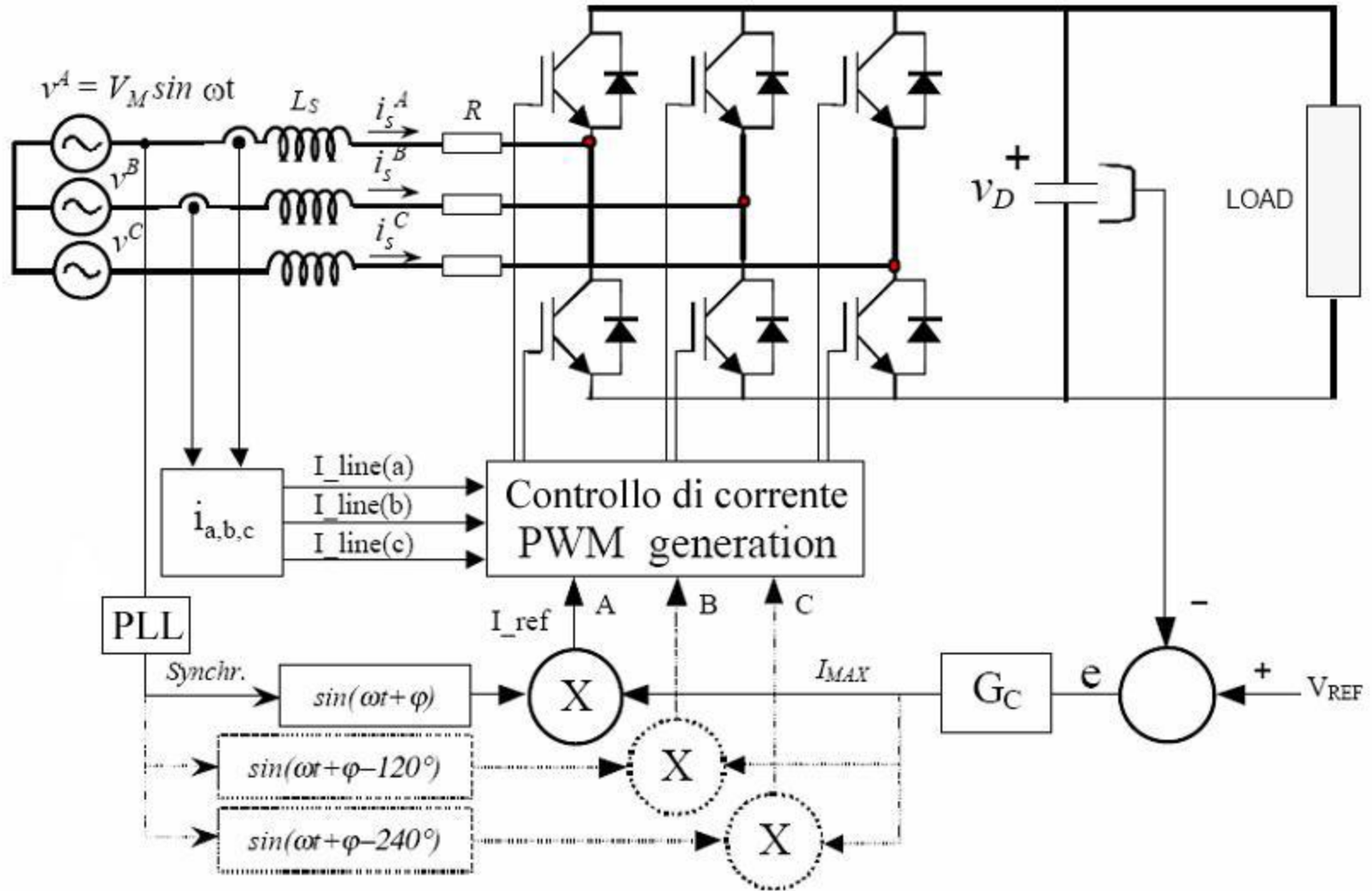
# Convertitore bidirezionale trifase

## A tensione impressa



Come nel caso monofase,  $L_S$  viene progettata per ridurre le armoniche di corrente nella rete, mentre  $C_D$  per ridurre le armoniche di tensione sul carico.

# Convertitore bidirezionale trifase



# *Convertitore bidirezionale trifase*

Lo schema di controllo presenta la stessa struttura in cascata del caso monofase: un loop di tensione esterno per regolare la tensione continua in uscita e un loop di corrente interno per controllare la corrente in ingresso ed il fattore di potenza.

Il loop di tensione utilizza nella maggior parte delle applicazioni un controllore PI (o qualsiasi altra struttura contenente un integratore) che assicura errore a regime nullo per grandezze continue. Il loop di tensione è inoltre responsabile del controllo del flusso di potenza attiva necessaria a caricare il condensatore ed alimentare il carico.

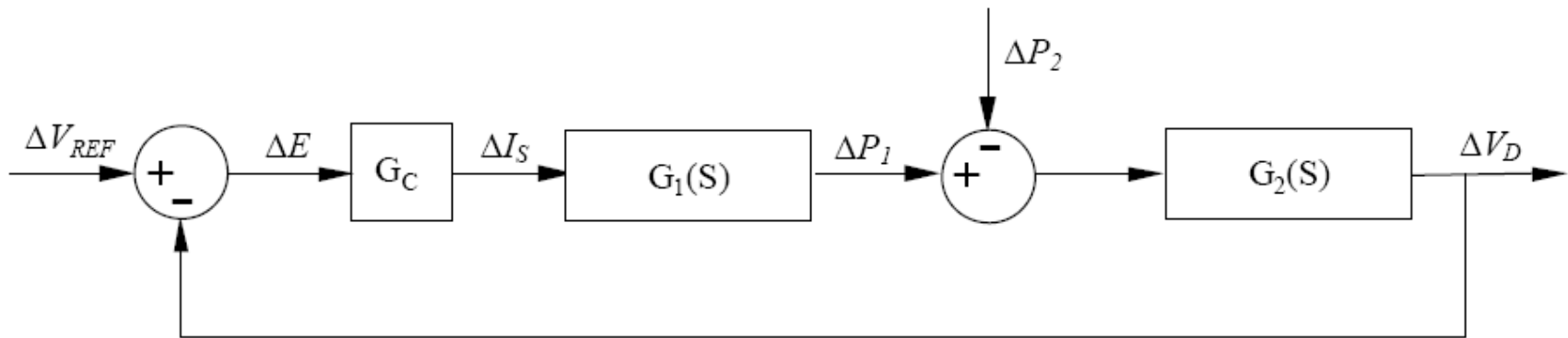
L'uscita del controllore rappresenta l'ampiezza del riferimento AC di corrente:

$$I_{MAX} = G_C \cdot e = G_C \cdot (V_{REF} - v_D)$$

# Convertitore bidirezionale trifase

Il loop di tensione può essere progettato nella stessa maniera vista per il caso monofase.

È interessante stabilire delle linee guida per il progetto di  $K_p$  e  $K_i$  in base a considerazioni sulla stabilità del controllo del flusso di potenza attiva.



$$G_1(S) = \frac{\Delta P_1(S)}{\Delta I_S(S)} = 3 \cdot (V \cos \varphi - 2RI_S - L_S I_S S)$$

Funzione di trasferimento del convertitore linearizzata mediante circuito equivalente di piccolo segnale intorno ad un punto di equilibrio.

# Convertitore bidirezionale trifase

$$G_2(s) = \frac{\Delta V_D(s)}{\Delta P_1(s) - \Delta P_2(s)} = \frac{1}{V_D \cdot C_D \cdot s}$$

Funzione di trasferimento del condensatore

$\Delta P_1(s)$  e  $\Delta P_2(s)$  potenza all'ingresso e all'uscita del raddrizzatore

$V$  e  $I_S$  valori efficaci della tensione di alimentazione e della corrente di ingresso

Se  $G_c$  è un controllore PI, la stabilità di questa catena di controllo in retroazione impone le seguenti relazioni che possono essere usate in fase di progetto e/o di verifica del regolatore e assicurano che la tensione di uscita inseguia il riferimento per ogni valore di carico:

$$I_S \leq \frac{C_D \cdot V_D}{3K_P \cdot L_S}$$

$$I_S \leq \frac{K_P \cdot V \cdot \cos \varphi}{2R \cdot K_P + L_S \cdot K_I}$$

# *Convertitore bidirezionale trifase*

Il riferimento del loop di corrente è ottenuto moltiplicando  $I_{max}$  per un template sinusoidale trifase isofrequenziale ed in fase con la tensione di alimentazione, ottenuto tramite una PLL, se si vuole assicurare un fattore di potenza unitario. Altrimenti il controllo del flusso di potenza reattiva è ottenuto tramite la regolazione dell'angolo di sfasamento  $\varphi$ .

## *Controllo di corrente/Generazione PWM*

Diversi sono i metodi per il controllo di corrente che possono essere impiegati alcuni di loro già visti per il caso monofase.

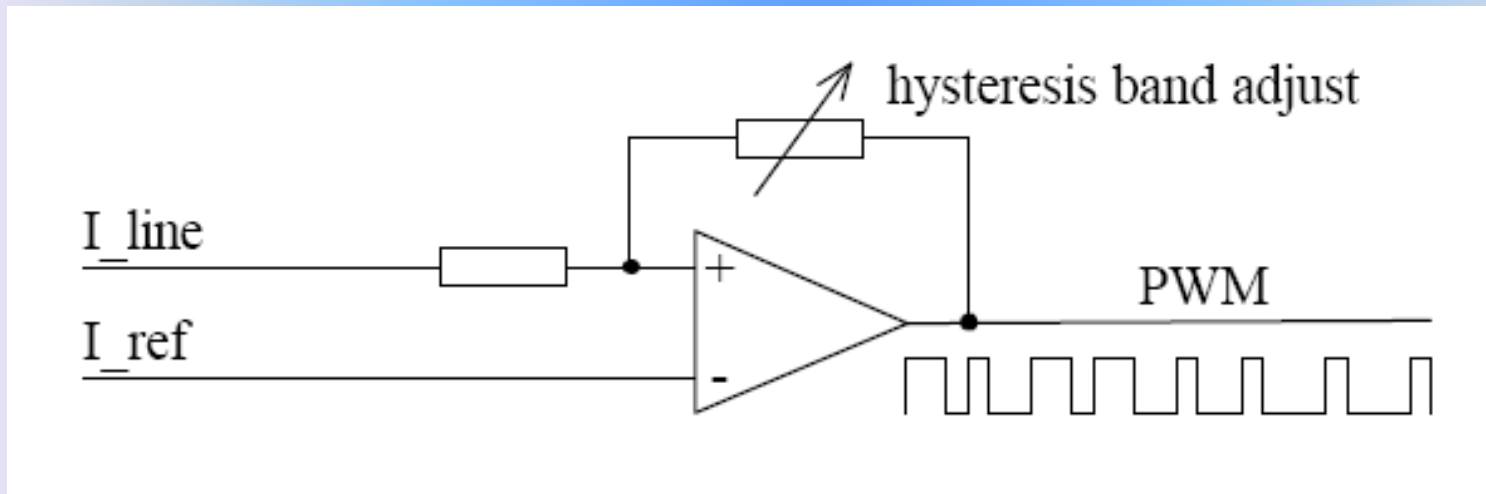
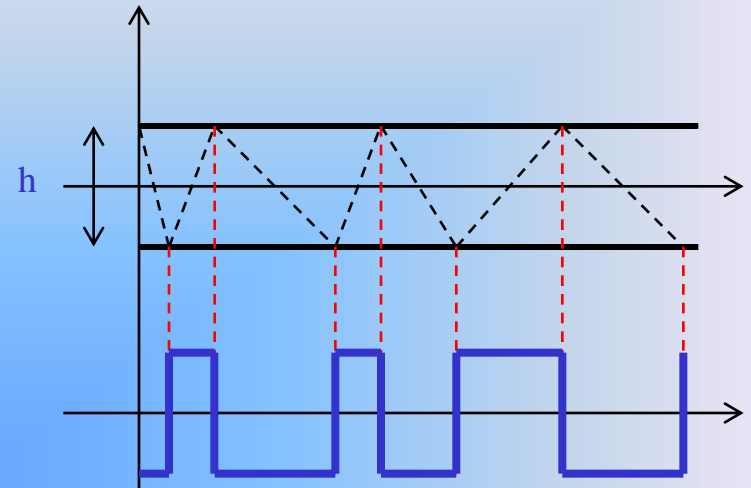
Ci possono essere diverse configurazioni sia per la struttura di controllo, che genera il segnale di riferimento per la modulazione, sia per la generazione del segnale PWM.

# Convertitore bidirezionale trifase

## Metodo di controllo ad isteresi (HB)

Nel metodo HB quando l'errore tra la corrente di linea ed il riferimento supera la banda, il convertitore viene commutato su uscita bassa, viceversa su uscita alta

Tre strutture identiche, una per ogni fase (controllo in a,b,c)

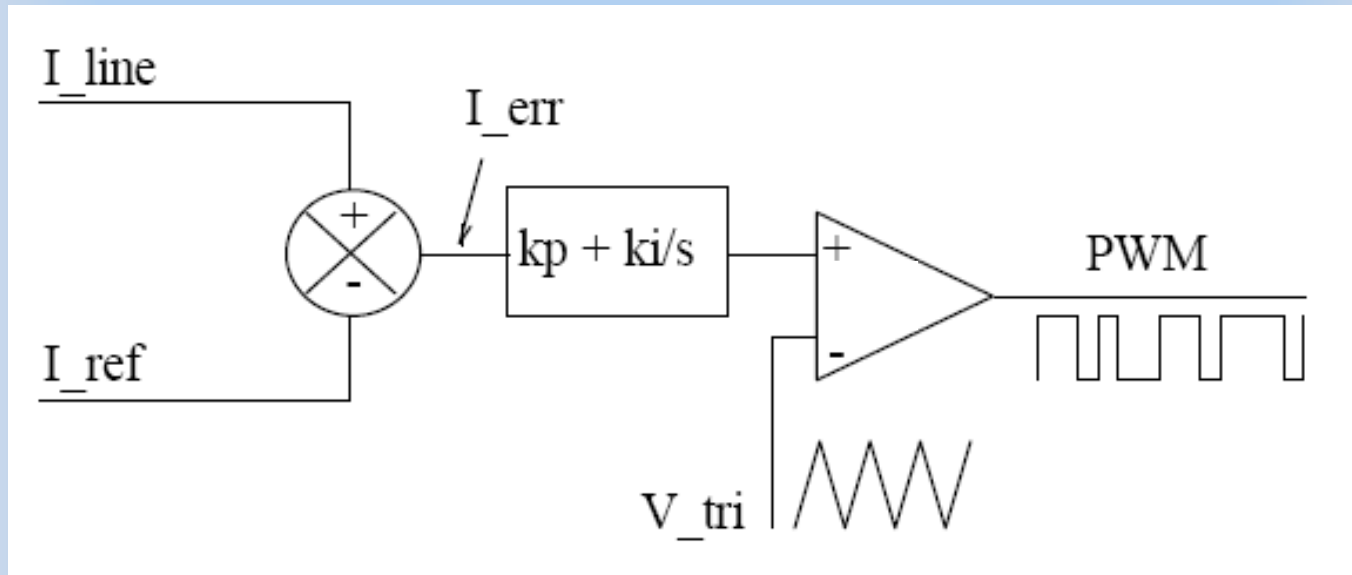


Frequenza di switching variabile con valore max:

$$f_s^{\max} = \frac{V_D}{4h \cdot L_S}$$

# Convertitore bidirezionale trifase

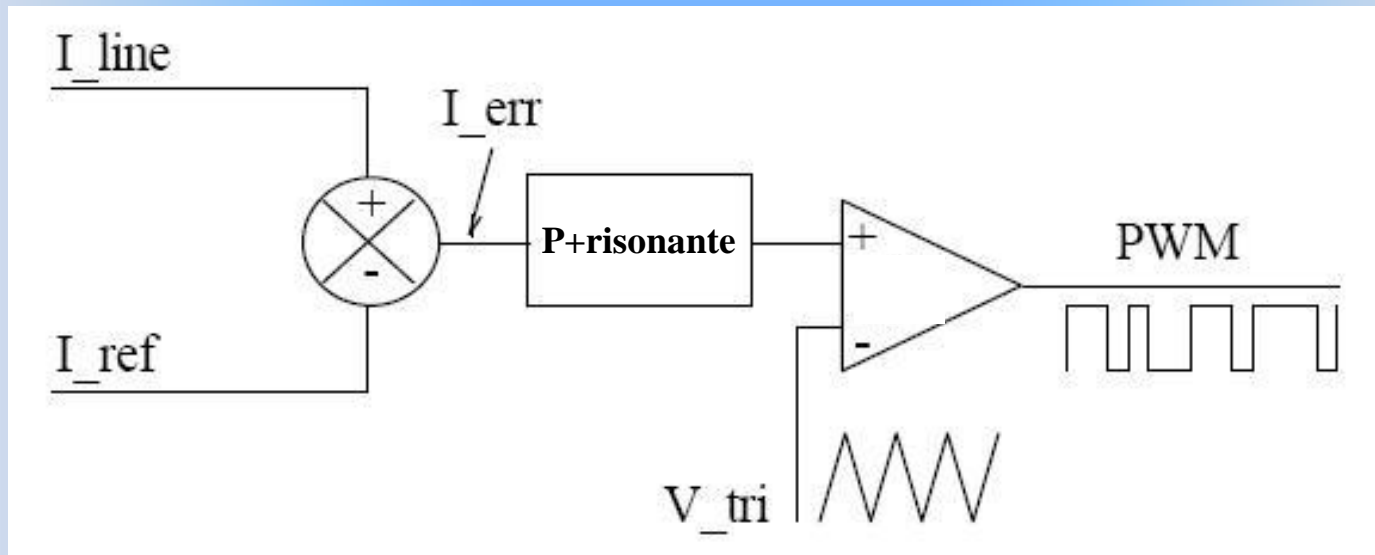
Metodo di controllo con PWM a portante modulata



- Tre strutture identiche, una per ogni fase (controllo in a,b,c);
  - Vantaggi: semplicità;
  - Svantaggi: Errore a regime presente sia in sfasamento che in attenuazione come nel caso monofase. Miglioramenti si possono ottenere usando altri tipi di regolatori di ordine superiore avente larghezza di banda maggiore.
- Tecniche per il progetto del controllo simili a quelle del caso monofase

# Convertitore bidirezionale trifase

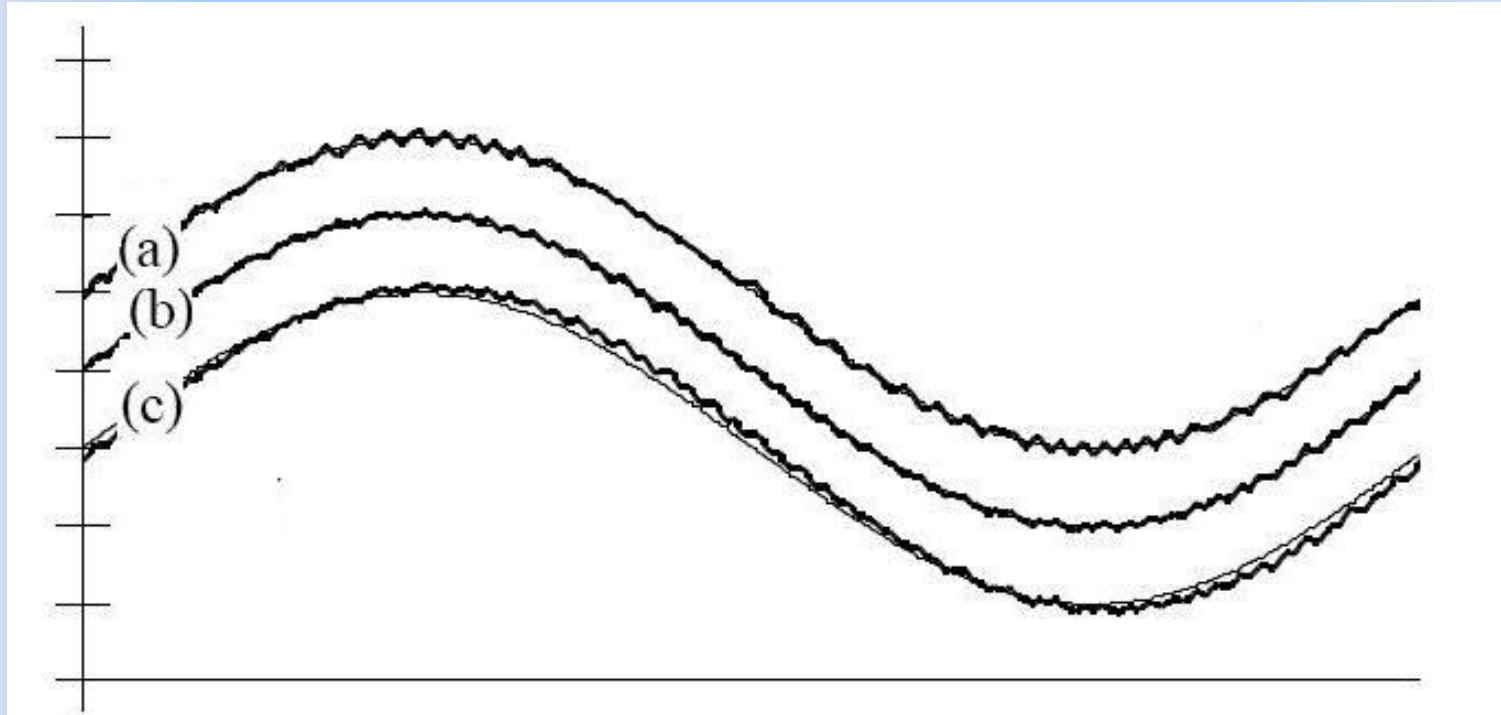
Invece di un semplice regolatore Proporzionale Integrale, anche in questo caso puo` essere impiegata un compensatore Proporzionale + risonante in tre strutture identiche ciascuna su ogni fase.



$$C(s) = K_p + \frac{K_r \omega s}{s^2 + (\omega / Q)s + \omega^2}$$

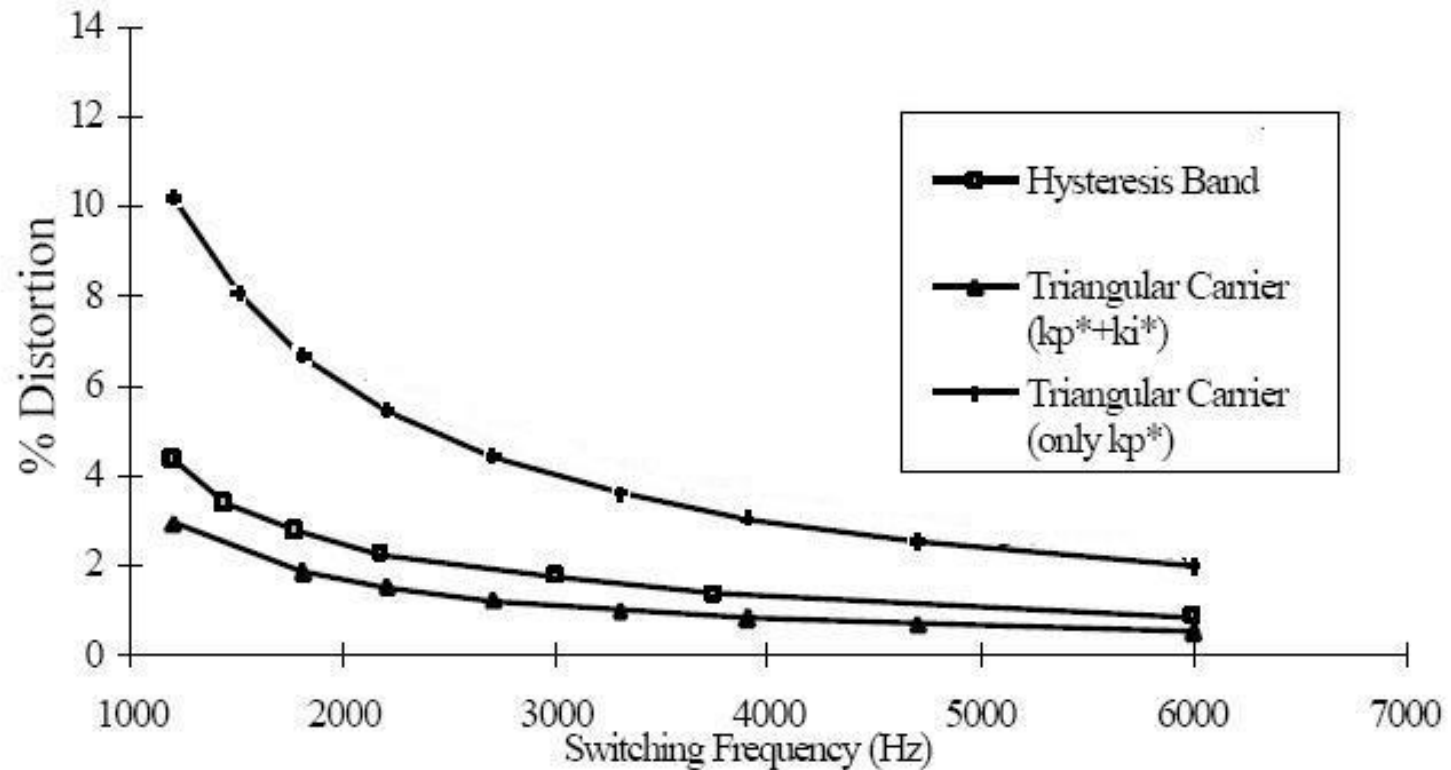
Progetto dei parametri  $K_p$ ,  $K_r$  e  $Q$  come nel caso monofase.

# Convertitore bidirezionale trifase



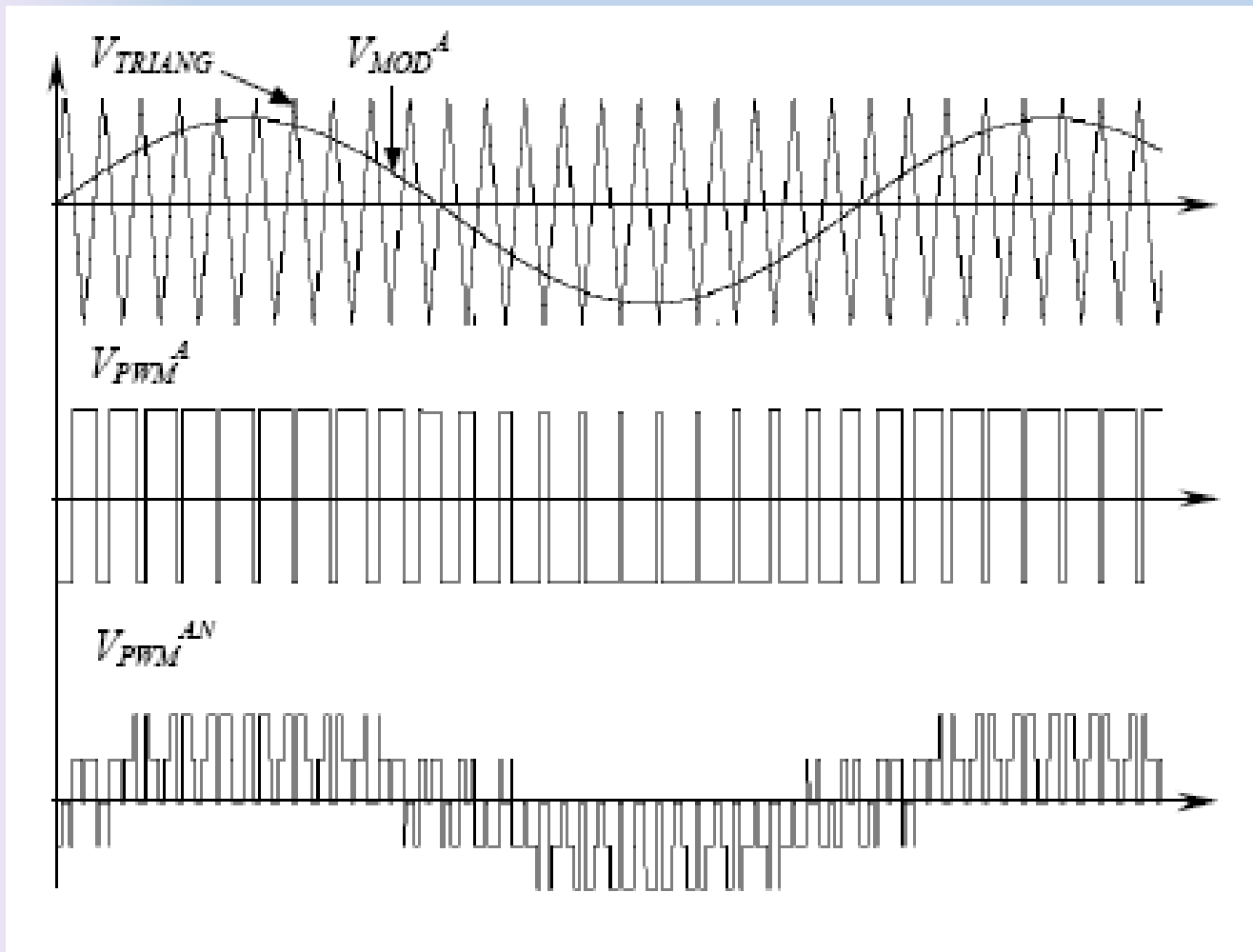
Waveforms obtained using 1.5 kHz switching frequency and  $L_S=13$  mH.  
(a) HB method (b) TC method ( $kp+ki$ ) (c) TC method ( $kp$  only)

# Convertitore bidirezionale trifase



Distortion comparison for a sinusoidal current reference.

# Convertitore bidirezionale trifase



Sinusoidal modulation method based on triangular carrier

$$m = \frac{V_{MOD}^{MAX}}{V_{TRIANG}^{MAX}}$$

$$p = \frac{f_T}{f_s}$$

$f_T$  = frequenza della portante

$f_s$  = frequenza della rete e della modulante

$m = 0.8$

$P = 21$

$m > 1$ :

overmodulation

# *Convertitore bidirezionale trifase*

Il contenuto armonico cambia con  $m$  e  $p$

Il sistema è ripetuto identicamente sui tre rami del circuito trifase con modulanti sfasate simmetricamente di 120 gradi l'una dall'altra.

Preferibilmente si sceglie per  $p$  un numero intero per evitare la presenza di subarmoniche ed interarmoniche nel segnale di uscita.

Se  $p$  è dispari, le armoniche pari vengono eliminate dal segnale di uscita e se è anche multiplo di 3, la modulazione PWM sulle tre fasi sarà identica.

All'aumentare di  $m$  l'ampiezza della fondamentale aumenta proporzionalmente, ma il contenuto armonico invece diminuisce.

In regime di sovrarmodulazione, la ampiezza della tensione fondamentale non cresce linearmente al crescere dell'indice di modulazione ed inoltre il contenuto armonico peggiora notevolmente.

# Convertitore bidirezionale trifase

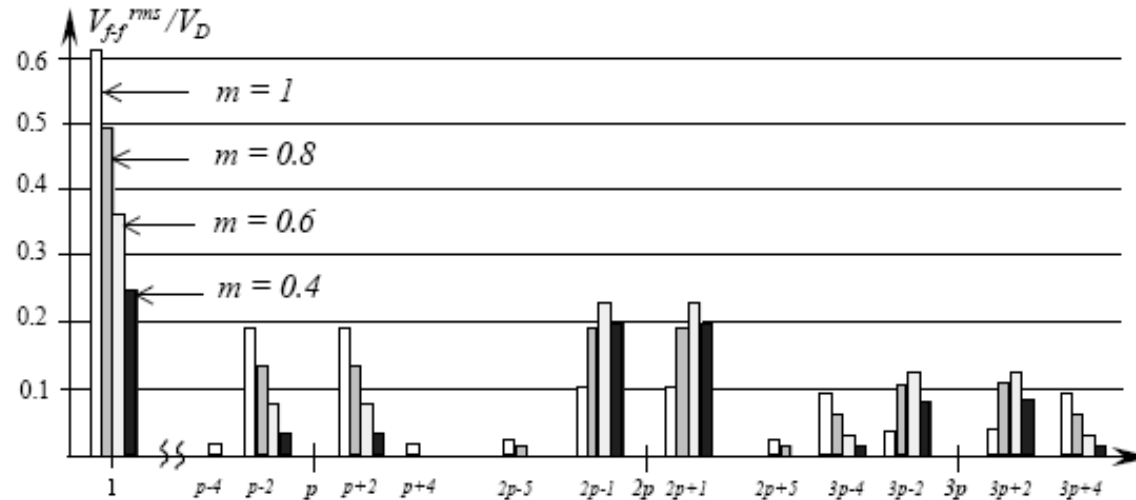
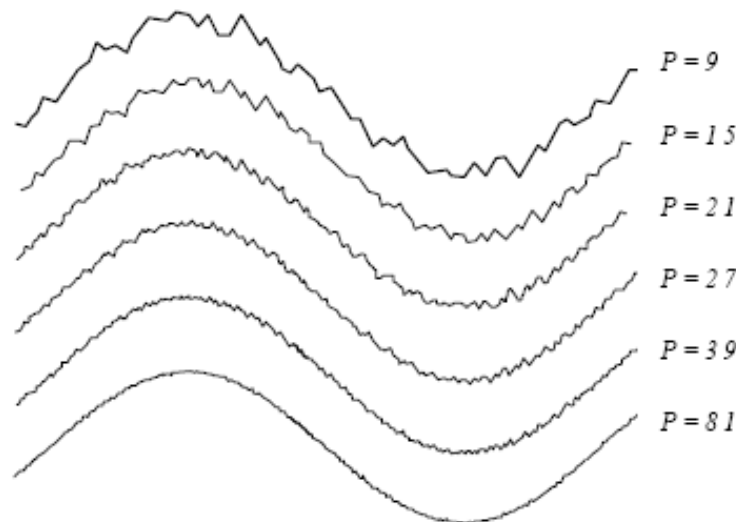


Fig. 12.52 Harmonic spectrum for SPWM modulation



$V_D=450\text{Vdc}$   
 $V_M=220\text{Vac}$   
 $L_S=2\text{mH}$   
 $I_S=80\text{Arms}$

$f_h=np \quad mp$   
 $n=1,2,3,\dots$

Per  $n$  dispari  
 $m=2,4,6,\dots$

Per  $n$  pari  
 $m=1,3,5,\dots$

# *Convertitore bidirezionale trifase*

Grazie alla presenza dell'induttanza  $L_s$ , le armoniche di corrente risultano proporzionalmente attenuate con l'ordine armonico. Ovviamente un più elevato valore del rapporto di frequenza  $p$  genera correnti meno distorte. Si può notare che con  $p > 21$  la distorsione di corrente è alquanto ridotta.

Analogamente aumentando il valore della induttanza  $L_s$  si può diminuire il contenuto armonico di corrente, ma di converso si riduce la larghezza di banda del controllo di corrente (costante di tempo più alta).

Un valore di  $p = 81$  produce, per il valore scelto di  $L_s$ , una forma d'onda di corrente quasi perfettamente sinusoidale. Ciò significa che, per una alimentazione a 50Hz, una frequenza di commutazione di soli 4050Hz produce questi ottimi risultati.

Moderni dispositivi di potenza (IGBT per esempio) possono lavorare anche a frequenza di commutazione che arriva ad oltre 20kHz, il che consente anche di poter perfettamente affrontare situazioni in cui, come in applicazioni aerospaziali, la frequenza di alimentazione è a 400Hz o superiore.

# *Convertitore bidirezionale trifase*

## CONTROLLO IN UN SISTEMA DI RIFERIMENTO ROTANTE SINCRO ALLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE

**Scopo:** fare in modo che anche il controllo di corrente avvenga su grandezze costanti in modo da poter con successo impiegare semplici controllori PI.

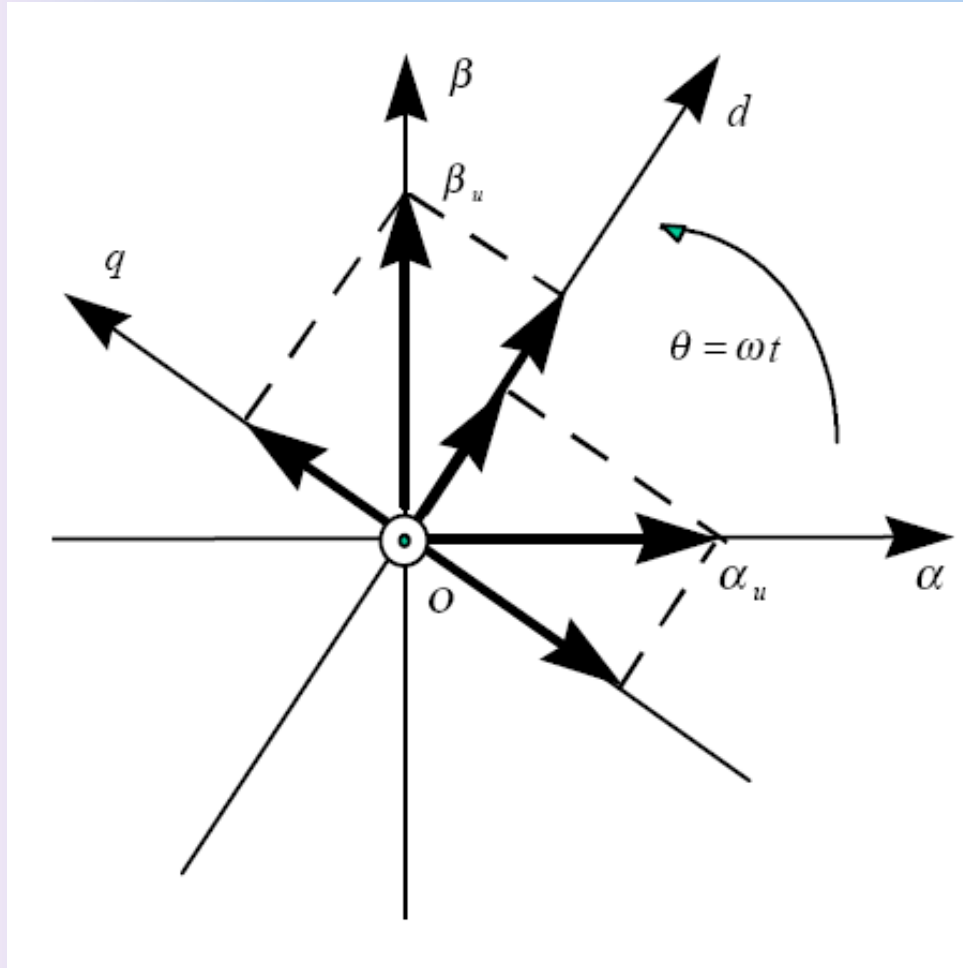
Ogni sistema di grandezze sinusoidali trifase ( $a, b, c$ ) può essere trasformato in un sistema di riferimento stazionario ortogonale ( $\alpha, \beta, 0$ ).

Se il riferimento stazionario viene scelto con uno sfasamento dell'asse a rispetto all'asse  $\alpha$  uguale a  $\theta$ , una grandezza trifase  $f$  può essere scritta:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \vartheta & \sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\vartheta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$



# Convertitore bidirezionale trifase



Trasformiamo ulteriormente la grandezza in alfa/beta in un nuovo sistema di riferimento ortogonale  $d, q$  questa volta rotante a velocità angolare  $\omega$ .

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}$$

Sincronizzando l'asse  $d$  con l'asse  $\alpha$  di una qualsiasi grandezza sinusoidale trifase, questa potrà essere rappresentata nel sistema  $d, q$  da grandezze costanti

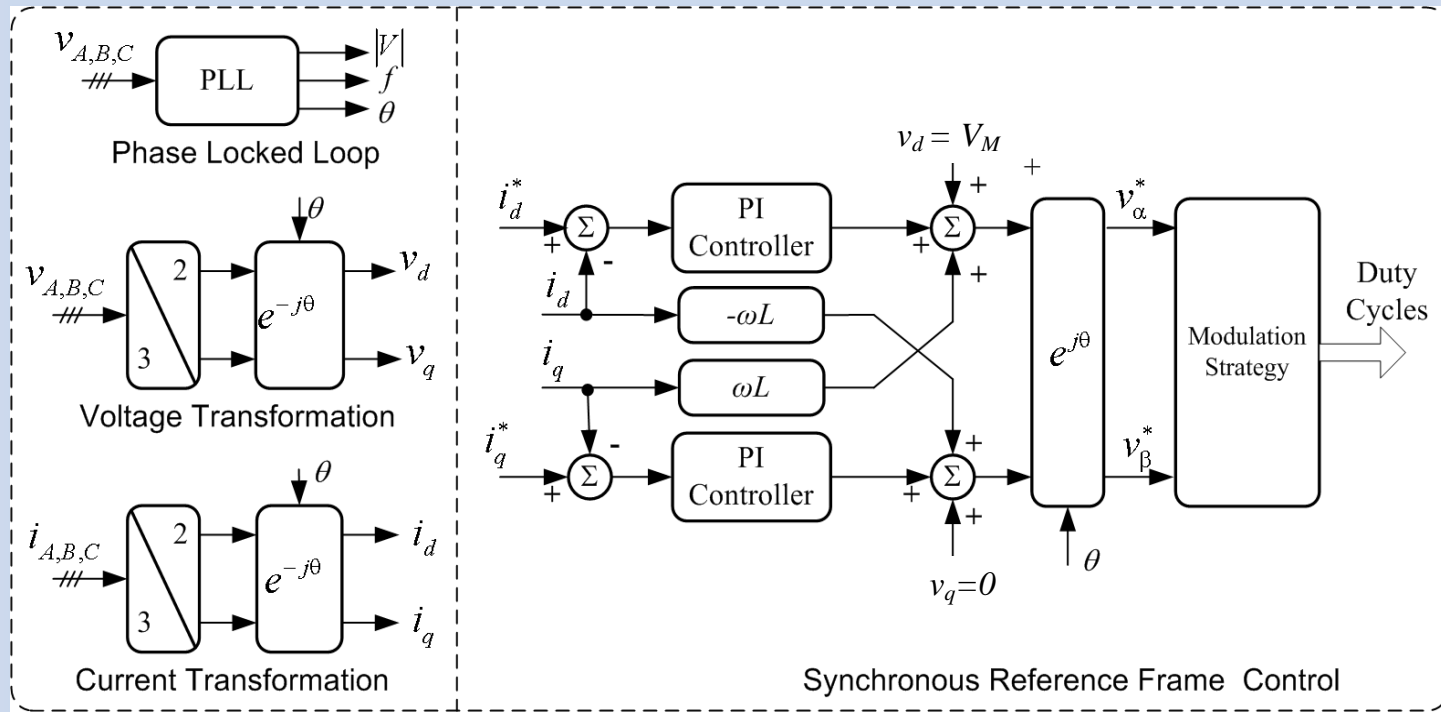
# Convertitore bidirezionale trifase

Dato per esempio un sistema di tensioni trifase, stimandone la frequenza  $\omega$ , si può imporre un sistema di riferimento  $dq$  rotante alla stessa frequenza (*sincrono*) e con l'asse  $d$  solidale all'asse  $a$ . In questo caso:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_a = V_M \sin \omega t \\ v_b = V_M \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = V_M \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right. \quad \text{abc/dq} \quad \Leftrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} v_d = V_M \\ v_q = 0 \end{array} \right.$$

- Sistema trifase bilanciato;
- Solo scambio di potenza attiva
- Asse  $d$  controlla la potenza attiva, asse  $q$  controlla quella reattiva

# Convertitore bidirezionale trifase

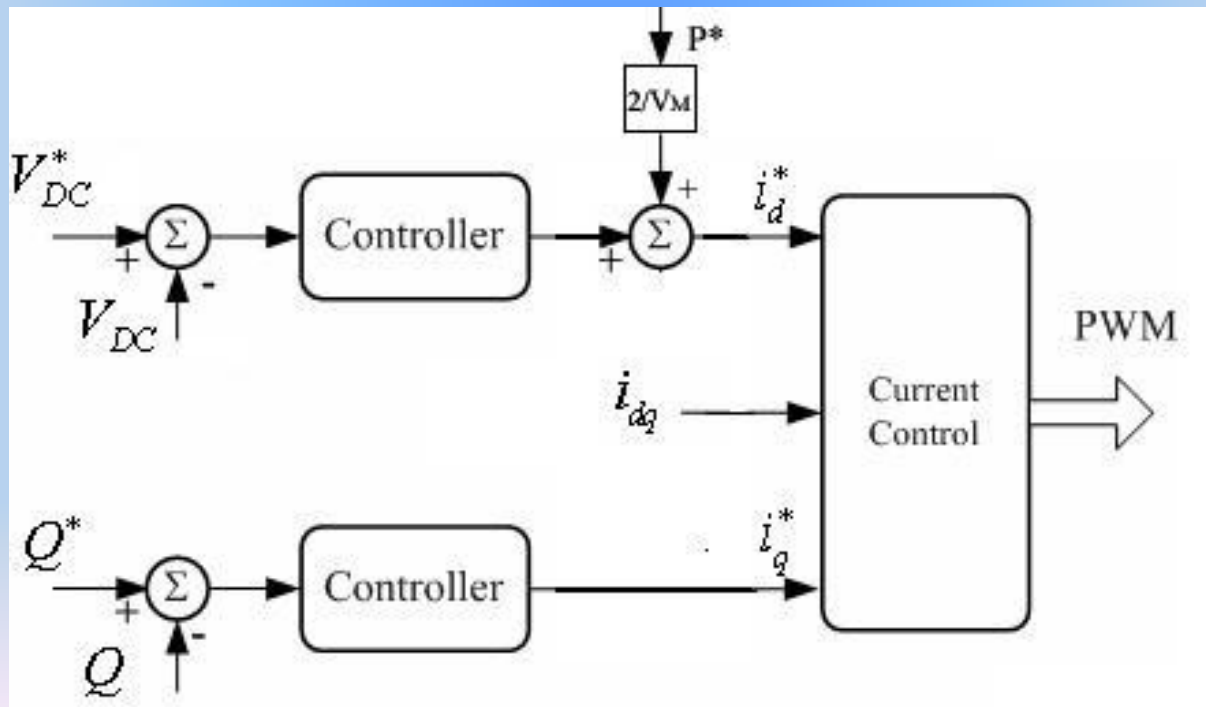


- usando un sistema di riferimento sincrono le variabili di controllo sono continue;
- richiede la compensazione dei termini  $d$  e  $q$  che interagiscono tra loro;
- se la sorgente presenta armoniche  $v_d$  e  $v_q$  non sono costanti  $\rightarrow$  forte influenza delle armoniche a bassa frequenza;
- alta sensibilità agli errori sull'angolo  $\theta$  ovvero alle prestazioni della PLL.

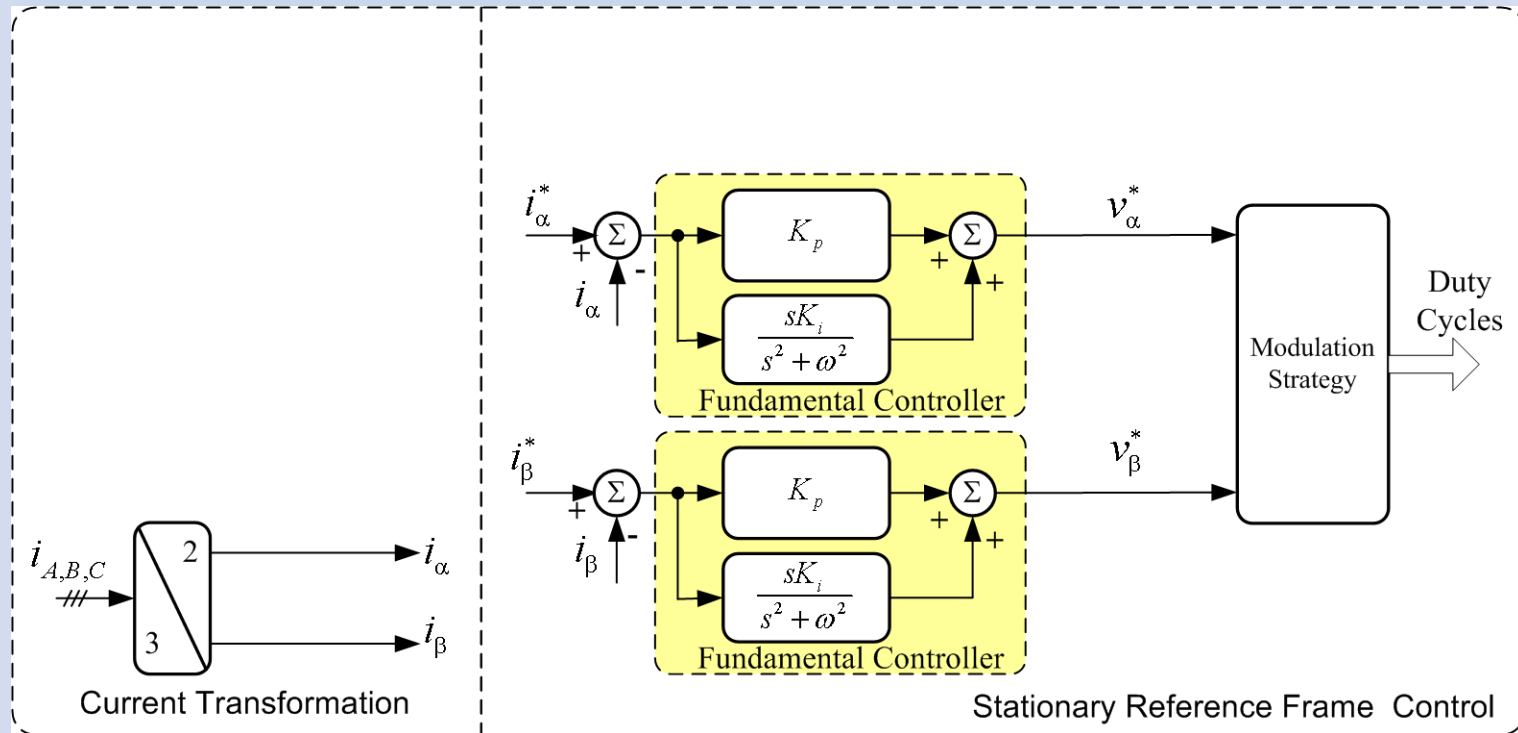
# Convertitore bidirezionale trifase

Ricordando che la corrente  $i_d$  permette il controllo della potenza attiva, mentre la corrente  $i_q$  quella agisce sulla sola potenza reattiva, è possibile aggiungere due loop esterni per effettuare:

- Controllo della tensione continua
- Controllo della potenza attiva scambiata con la rete
- Controllo della potenza reattiva scambiata con la rete.

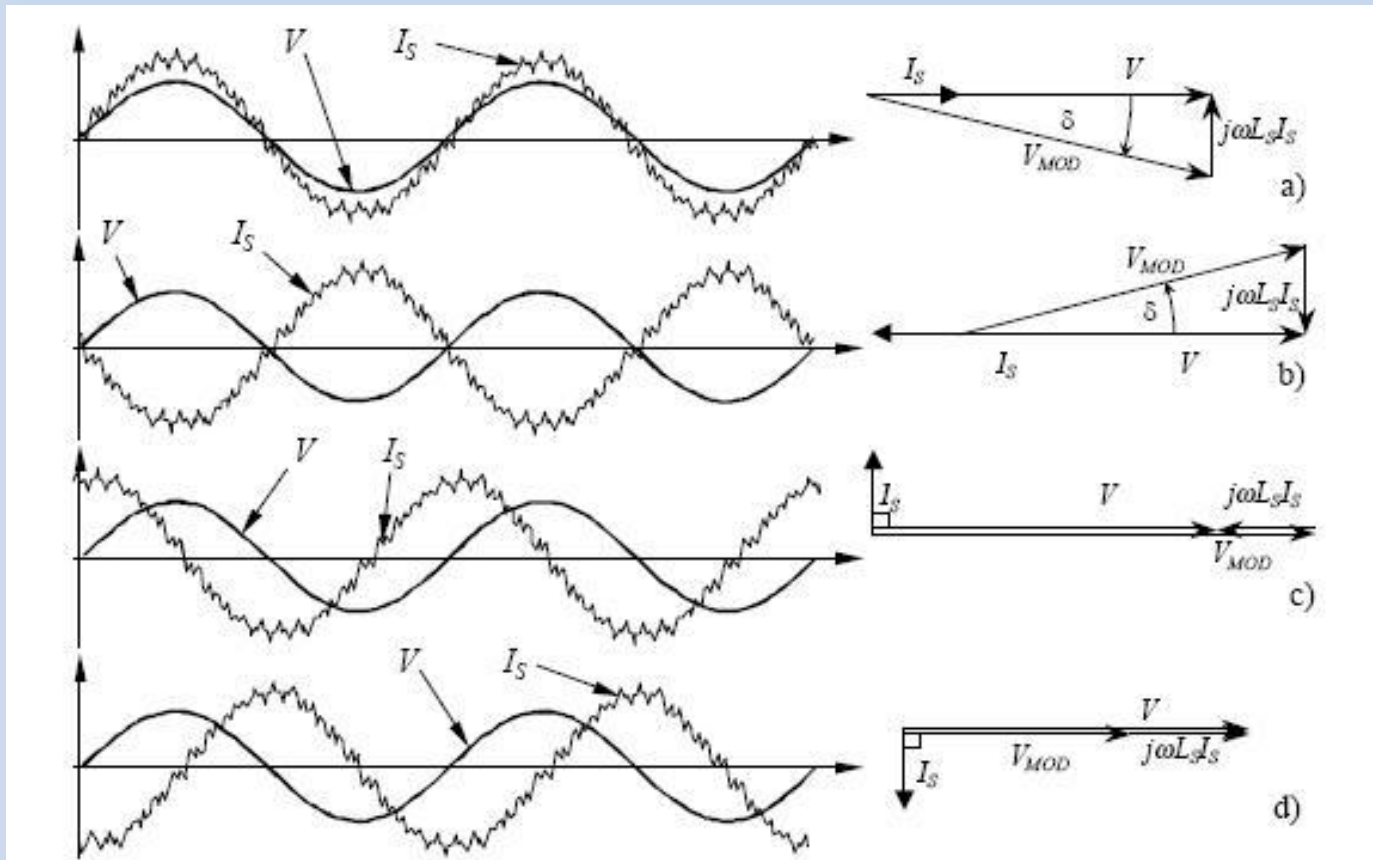


# Convertitore bidirezionale trifase



- Sistema di riferimento con assi fissi -> le variabili di controllo sono grandezze alternate;
- non richiede l'uso di PLL -> insensibile alla stima dell'angolo della tensione;
- Controllori Proporzionale+Risonante
  - elevato guadagno alla freq. di risonanza -> eliminazione di errori a regime;
  - ottima risposta dinamica.

# Convertitore bidirezionale trifase



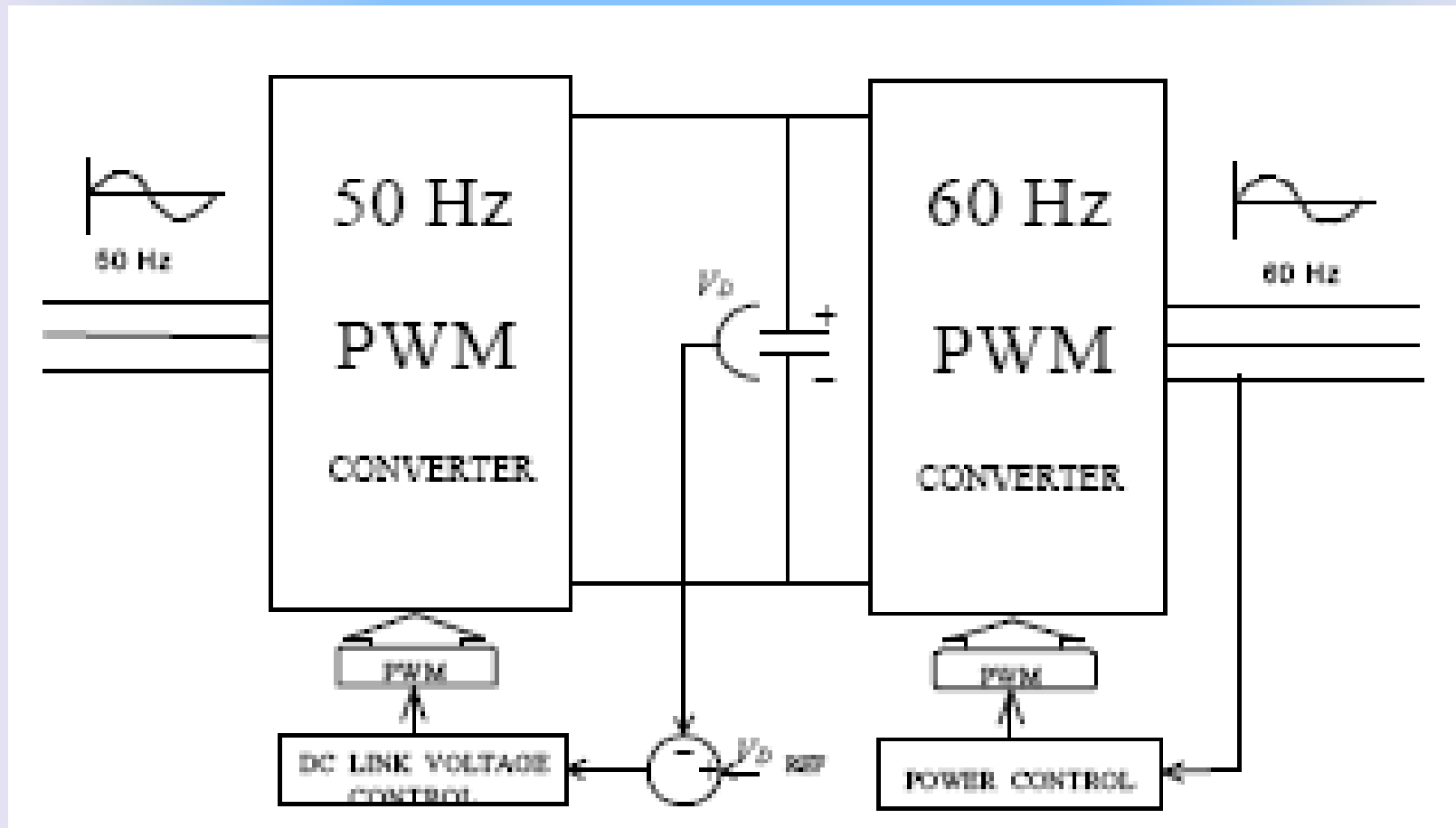
Four-quadrant operation of the force commutated rectifier

- a) rectifier operation at unity power factor
- b) inverter operation at unity power factor
- c) capacitor operation at zero power factor
- d) inductor operation at zero power factor

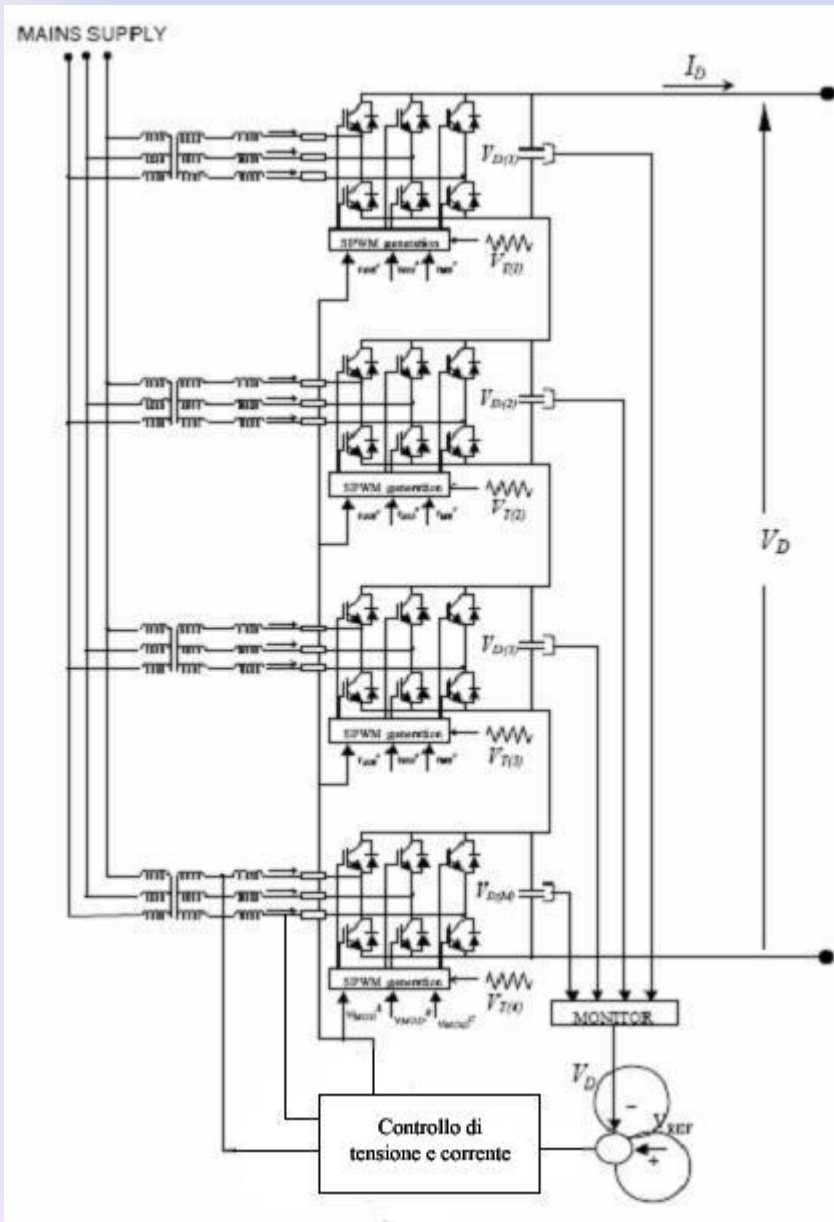
# Convertitore bidirezionale trifase

## Applicazioni

Trasformatori elettronici (Frequency links)



# Convertitore bidirezionale trifase

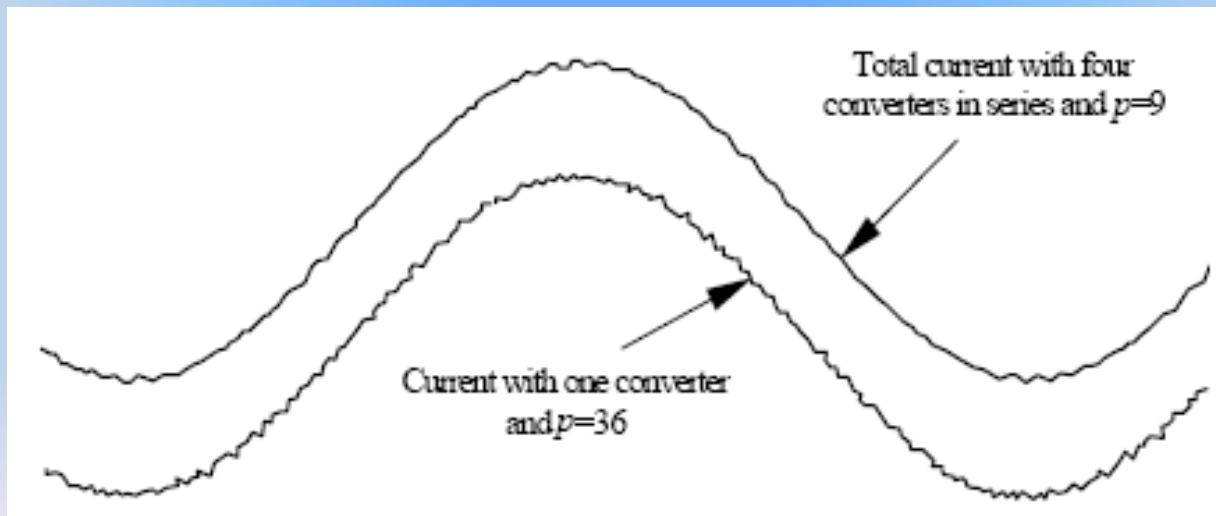
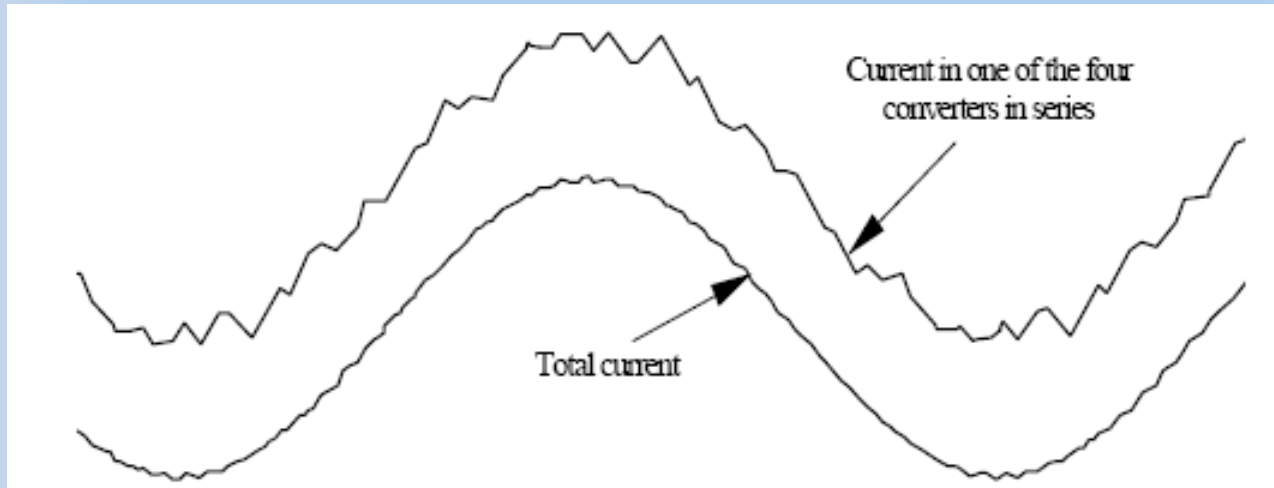


➤ Applicazioni di potenza spesso richiedono convertitori connessi in serie e/o parallelo per gestire tensioni e/o correnti più elevate senza aumentare lo stress sui dispositivi di potenza.

➤ In questo caso nelle modulazioni dei diversi ponti, le portanti sono opportunamente sfasate in modo da ridurre il contenuto armonico della tensione, e dunque della corrente, sul lato AC.

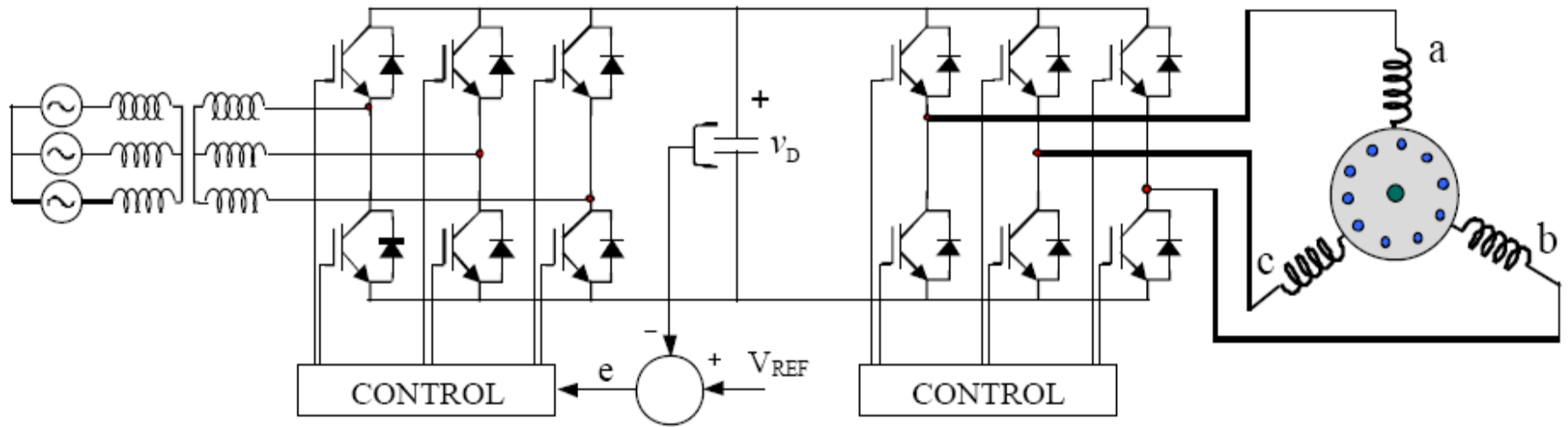
➤ Lo sfasamento  $\theta$  dipende dal numero  $n$  di convertitori connessi in serie:  $\theta = 2\pi/n$

# *Convertitore bidirezionale trifase*



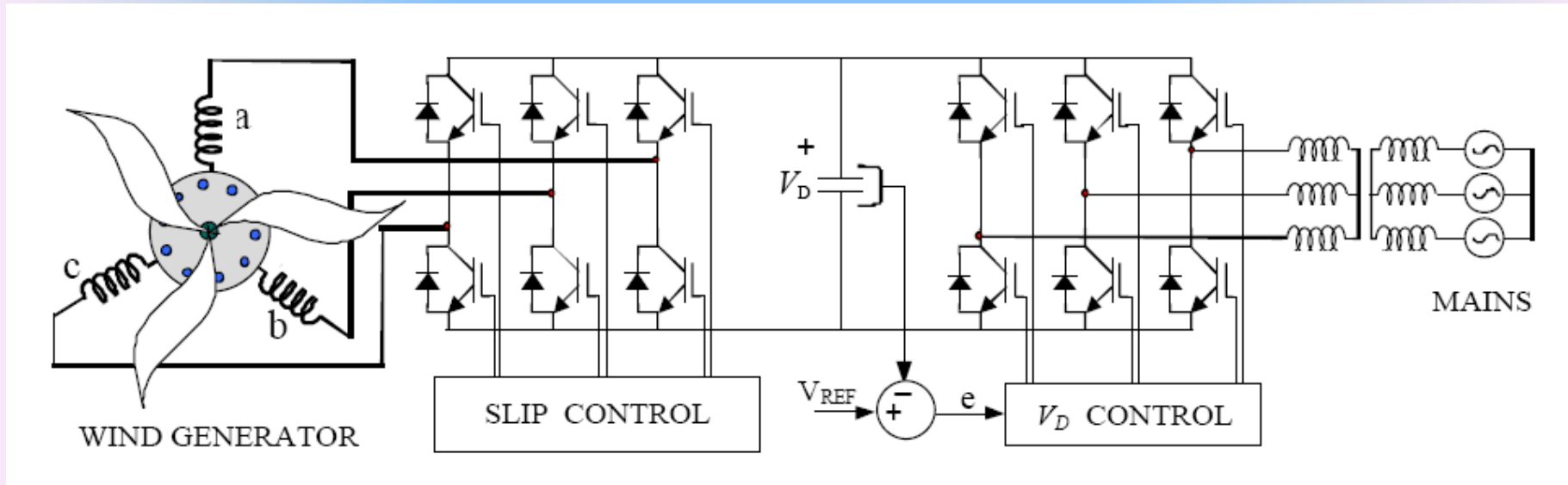
# Convertitore bidirezionale trifase

Azionamento con motore in corrente alternata



# Convertitore bidirezionale trifase

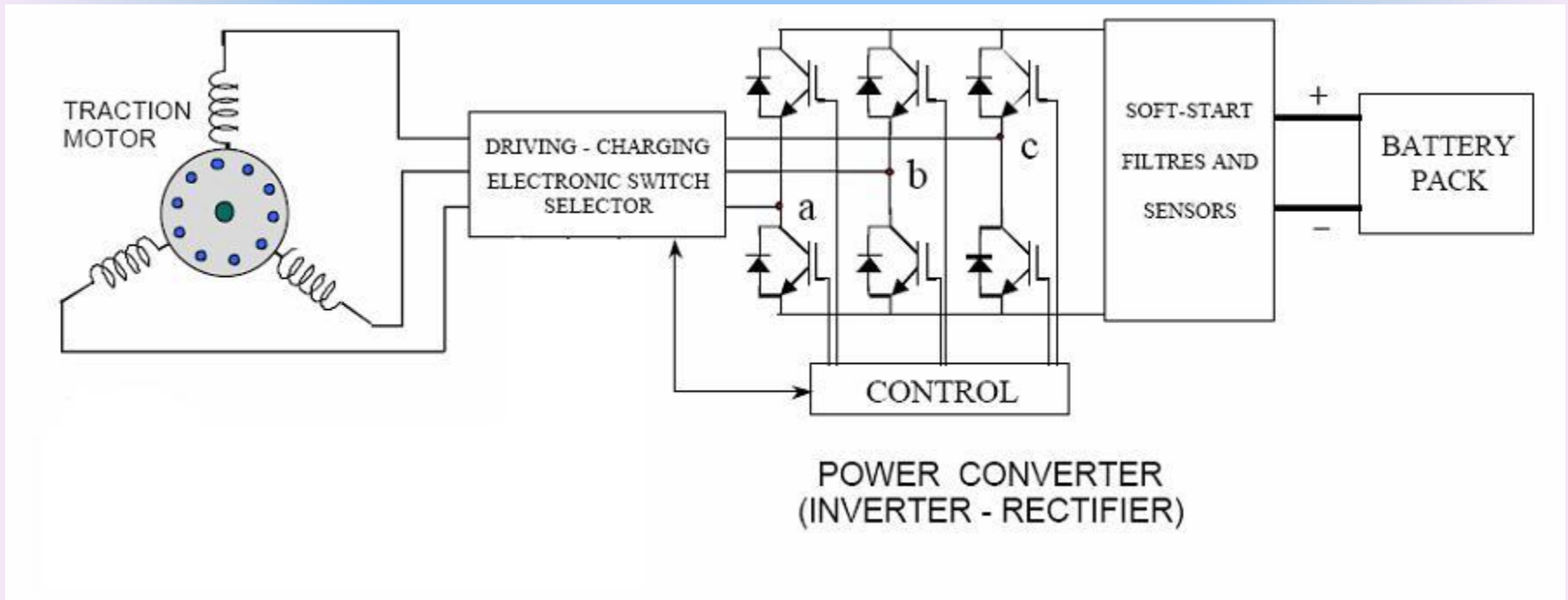
Sistema di interfaccia con la rete di un generatore eolico



- Frequenza di ingresso variabile;
- Può essere utilizzato con altre sorgenti.

# Convertitore bidirezionale trifase

Sistema di conversione DC/AC per automotive



Motor and regeneration