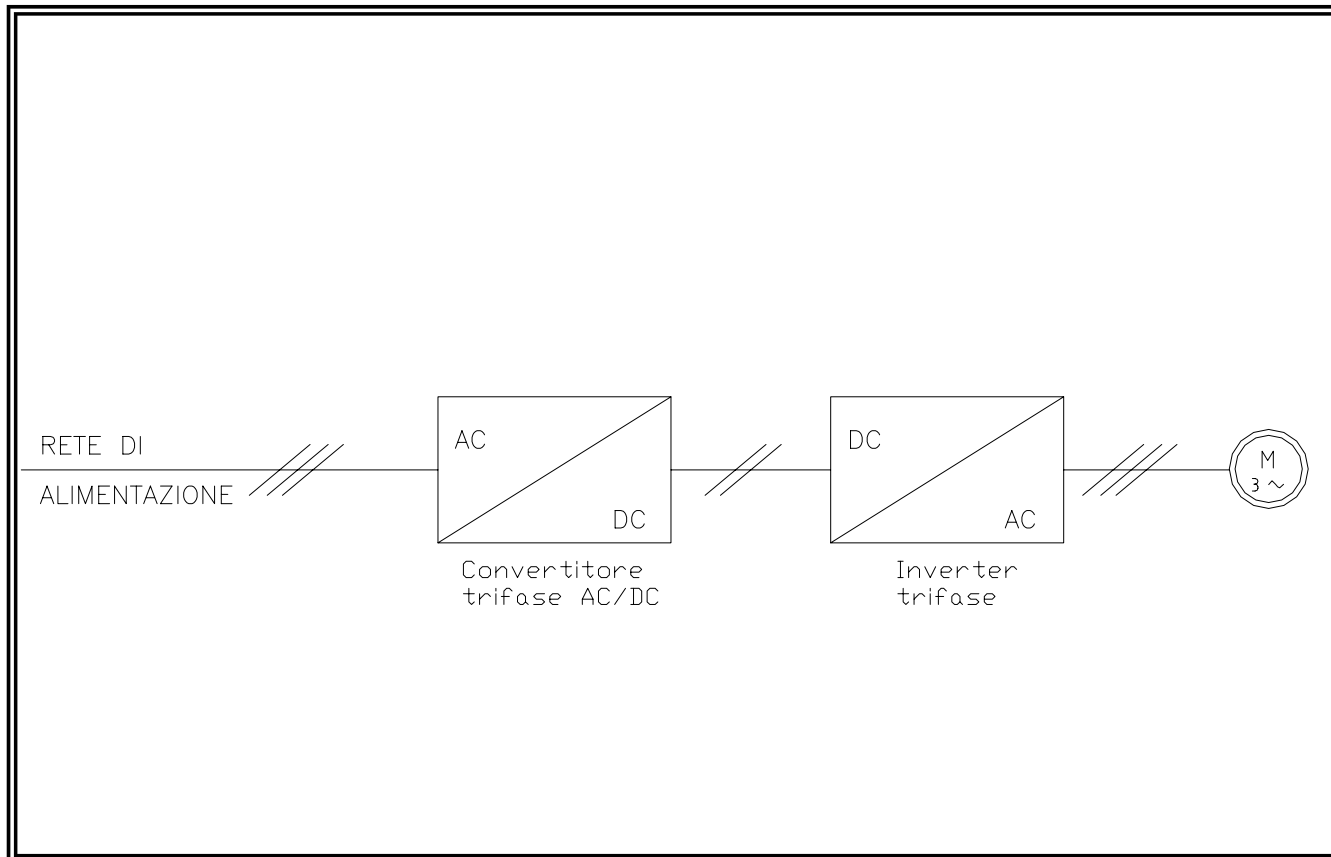


# Conversione DC/AC

## *Introduzione*

Questo tipo di convertitore trova applicazione per l'alimentazione dei motori in corrente alternata e nei gruppi di continuità (UPS), ovvero tutte le volte che sia necessaria una forma d'onda in uscita sinusoidale controllabile in ampiezza e frequenza.



# Conversione DC/AC

## *Schema di principio*

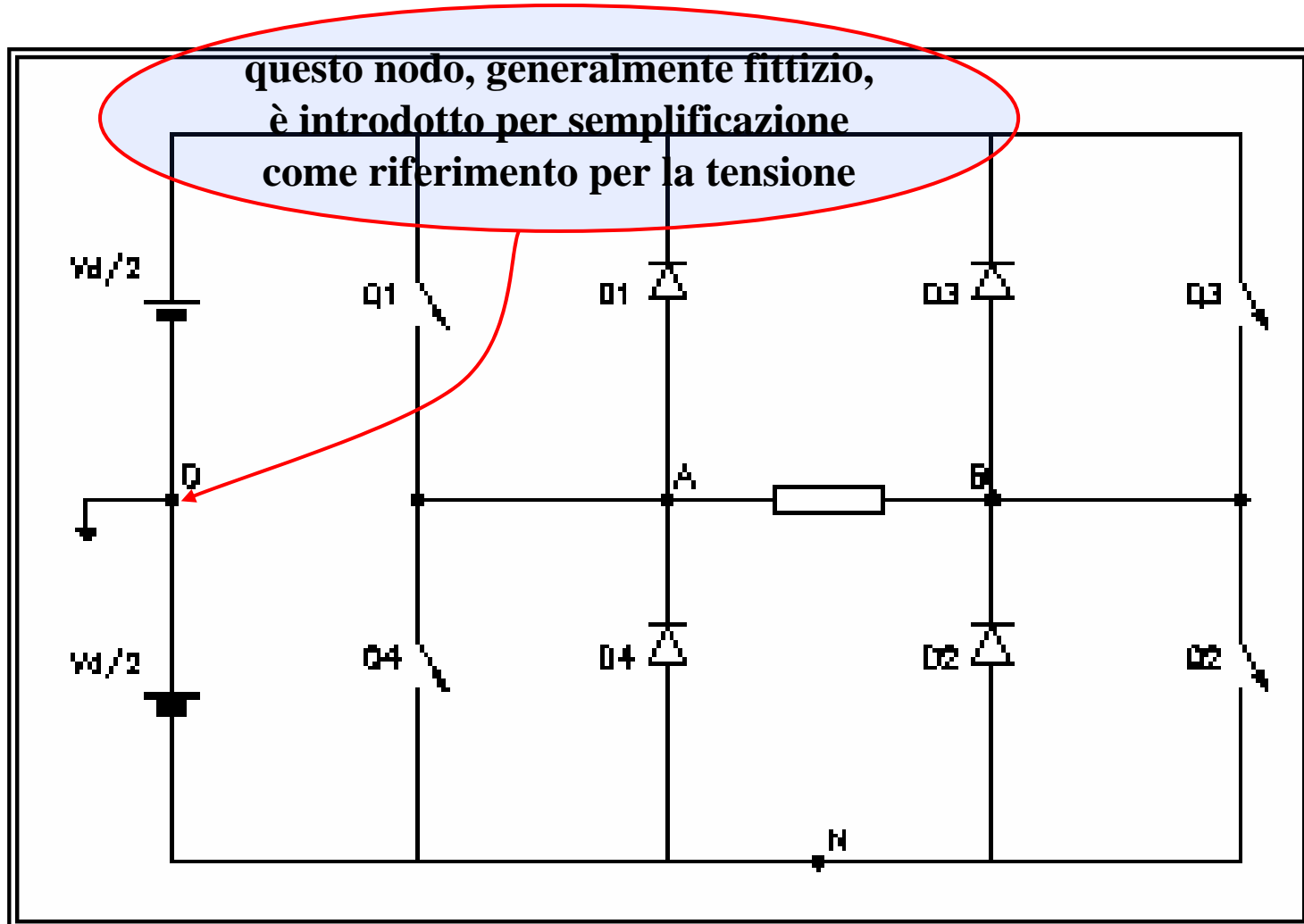
Il convertitore è costituito da un circuito raddrizzatore, alimentato dalla rete, in cui si effettua la trasformazione AC/DC e da un inverter che provvede sia alla trasformazione inversa che all'alimentazione dell'utenza a frequenza e tensioni variabili.

In realtà il circuito intermedio in DC, da un lato consente la completa indipendenza fra frequenza di uscita e frequenza di ingresso, dall'altro non permette il passaggio dalla rete della potenza reattiva necessaria per il corretto funzionamento dell'utenza. Pertanto diventa necessaria la presenza di uno o più componenti reattivi per la commutazione della corrente di carico da un ramo all'altro, in modo da ottenere in uscita una tensione con una determinata frequenza.

# Conversione DC/AC

## *Schema di principio*

Lo schema di principio di un inverter monofase è del tipo:



# Conversione DC/AC

## *Principio di funzionamento*

La sorgente ideale di tensione continua  $V_d$  è rappresentabile come una serie di due generatori ideali di valore  $V_d/2$  il cui punto di collegamento  $O$  è definito come centro virtuale.

Ipotizzando che gli interruttori  $Q_1$  e  $Q_4$  siano ideali, il potenziale del morsetto  $A$  può assumere solo i valori  $-V_d/2$  e  $+V_d/2$ , a seconda che sia chiuso rispettivamente l'interruttore  $Q_4$  o  $Q_1$ . In realtà grazie alla presenza dei diodi posti in opposizione agli interruttori, la corrente assorbita dai circuiti a valle del morsetto  $A$  può essere sia positiva che negativa, qualunque sia lo stato degli interruttori, pertanto il flusso di energia potrà essere bidirezionale.

Gli interruttori  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  a seconda del tipo di applicazione e dei livelli di potenza potranno essere scelti tra quelli messi a disposizione della tecnologia dei semiconduttori a commutazione forzata (transistor, mosfet, IGBT, GTO, IGCT).

# Conversione DC/AC

## *Principio di funzionamento*

Pilotando opportunamente la chiusura e l'apertura degli interruttori è possibile ottenere una forma d'onda quadra in uscita dall'inverter.

L'inverter più usato per l'alimentazione dei motori asincroni per i quali è necessario regolare sia la frequenza sia la tensione è quello PWM (Pulse Width Modulation, modulazione in larghezza degli impulsi).

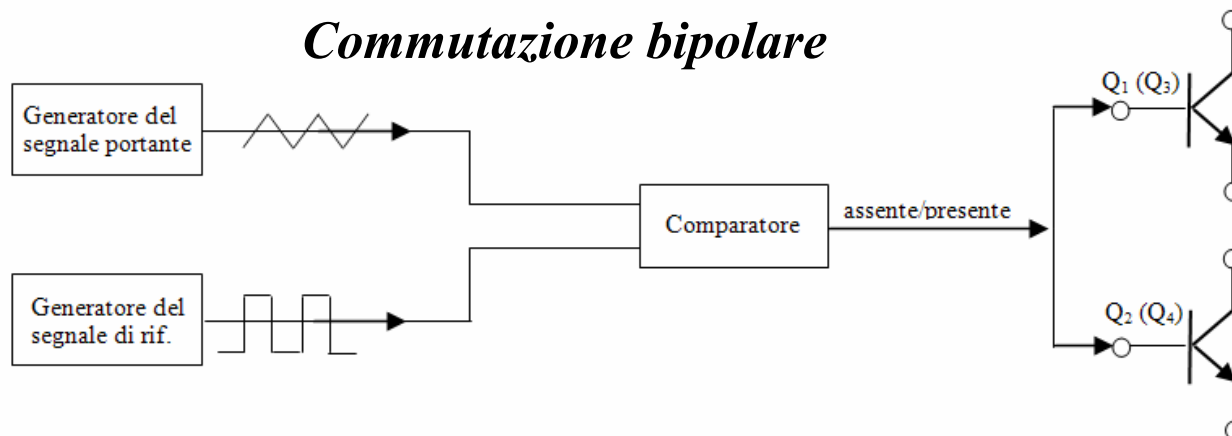
Questa tecnica, inoltre, garantisce la riduzione del contenuto armonico alle basse frequenze.

Il problema generale alla base della progettazione del sistema di controllo di un inverter PWM è quello di scegliere istante per istante, tra le grandezze consentite, quella da applicare in modo che la tensione in uscita abbia l'andamento desiderato, pertanto il compito del sistema di controllo è quello di "ritagliare" la funzione di ingresso in modo che possa assumere di volta in volta il più opportuno tra i valori permessi.

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Definendo  $V_{mod}(t)$  l'andamento desiderato dell'uscita e con  $V(t)$  la funzione di uscita, un modo per approssimare  $V(t)$  a  $V_{mod}(t)$  consiste nel dividere il periodo  $T$  di  $V_{mod}(t)$  in intervalli di uguale durata e di regolare l'apertura e la chiusura degli interruttori in modo che il valore medio di  $V(t)$  eguagli, in ciascun intervallo, il valore medio di  $V_{mod}(t)$ . Fermo restando il pilotaggio a coppie degli interruttori, gli istanti di commutazione nascono dal confronto tra due funzioni una di forma triangolare e frequenza costante chiamata *portante* e una *modulante* di forma, ampiezza e frequenza pari alla tensione desiderata in uscita dall'inverter, per esempio a onda quadra.

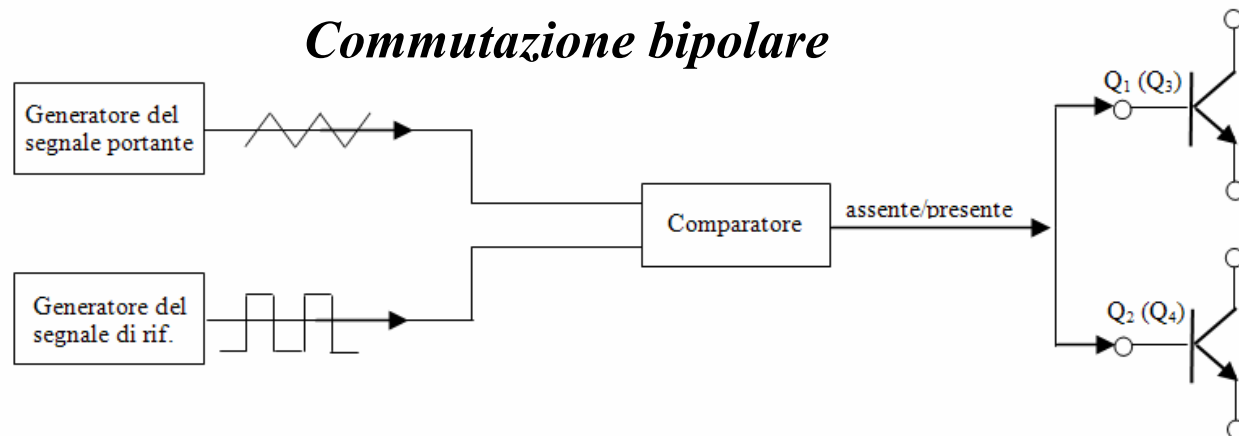


# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Quello che si ottiene è una tensione di uscita composta da una serie di impulsi, positivi e negativi, di ampiezza costante e larghezza variabile.

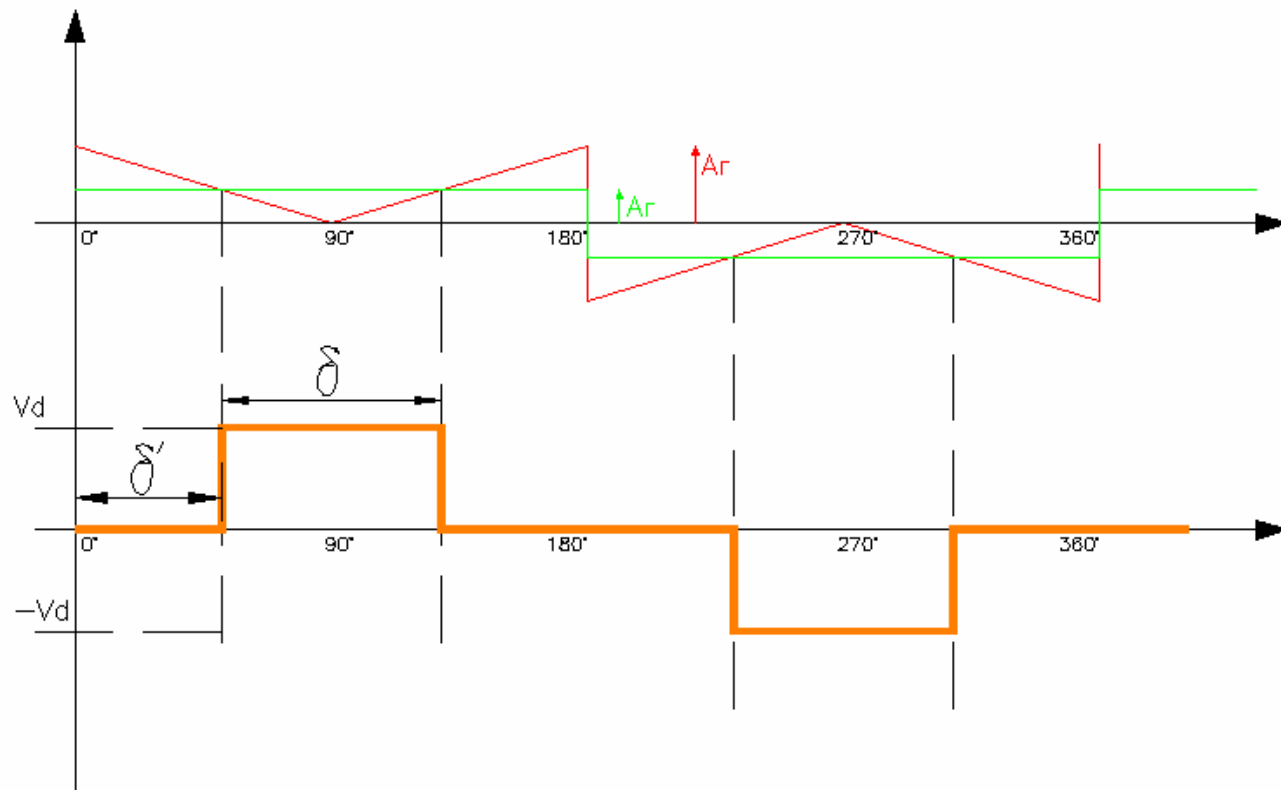
Ci saranno delle armoniche che dovranno essere filtrate e la regolazione della frequenza di uscita viene fatta agendo sul segnale della modulante, mentre la regolazione dell'ampiezza dipende dalla frequenza della portante e dal valore dell'alimentazione



# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Quando il segnale della modulante risulta maggiore della portante si portano in ON gli interruptori Q1 e Q2, viceversa il segnale è assente; analogo discorso vale per gli interruptori Q3 e Q4 durante la semionda negativa del segnale modulante, considerando i moduli dei segnali.





# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

La forma d'onda che si ottiene è quasi quadra, ma la cosa più importante è che variando l'ampiezza della modulante è possibile variare il valore di  $\delta$ , cioè la durata in termini angolari della conduzione di ciascun transistor. In particolare se indichiamo con  $A_c$  l'ampiezza del segnale portante e con  $A_r$  l'ampiezza del segnale modulante si distinguono le seguenti situazioni:

- Se  $A_r$  è uguale a zero anche  $\delta=0$  e il segnale di uscita  $v_0 = 0$ ;
- Se  $A_r$  è uguale a  $A_c$ ,  $\delta=\pi$  e il segnale di uscita  $v_0$  ha forma d'onda quadra;
- Se  $0 < A_r < A_c$ ,  $0 < \delta < \pi$  e il segnale di uscita  $v_0$  ha forma quasi quadra;

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Con la tecnica PWM, a differenza della tecnica a onda quadra, il valore medio della tensione di uscita può essere regolato, infatti se si scrive lo sviluppo in serie di Fourier di  $v_0$  che rappresenta un'onda quasi quadra si ha:

$$v_0 = \sum_{K=1}^{\infty} V_{0K} \text{sen}(k\omega t)$$

Dove:

$$V_{0K} = \frac{4V}{\pi} \frac{\cos k\delta'}{k}$$

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Essendo:

$$\delta = \frac{(\pi - \delta)}{2}$$

Sostituendo:

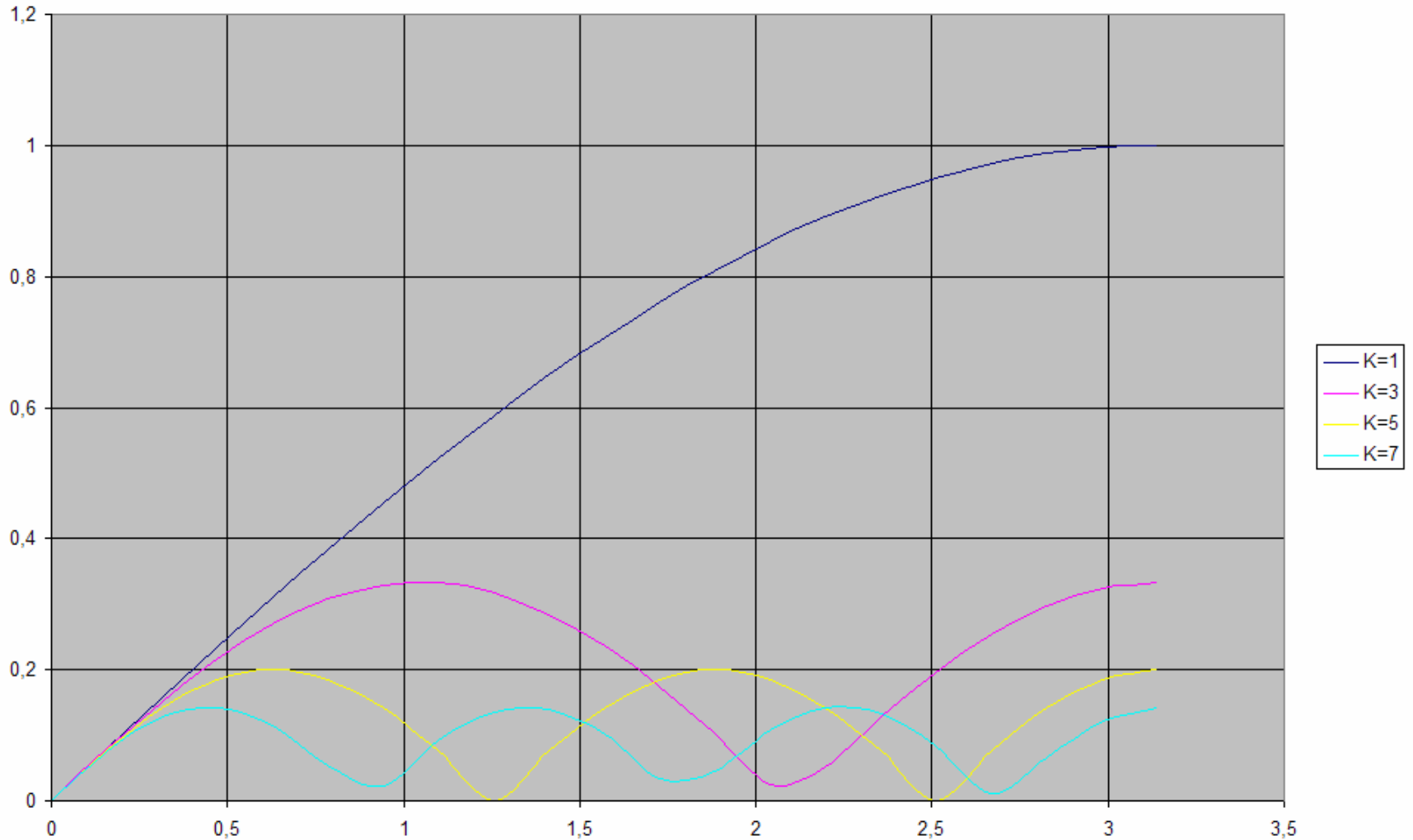
$$V_{0K} = \frac{4V}{k\pi} \left| \cos \left( k \left( \frac{\pi - \delta}{2} \right) \right) \right| \quad \text{con } 0 \leq \delta \leq \pi$$

Pertanto al variare di  $\delta$  è possibile variare l'ampiezza delle armoniche della tensione in uscita in particolare della fondamentale, che poi è quella di interesse in quanto garantisce il trasferimento di potenza al carico:

$$V_{0K} = \frac{4V}{\pi} \cos \left( \frac{\pi - \delta}{2} \right) = \frac{4V}{\pi} \text{sen} \left( \frac{\delta}{2} \right)$$

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*



# Conversione DC/AC

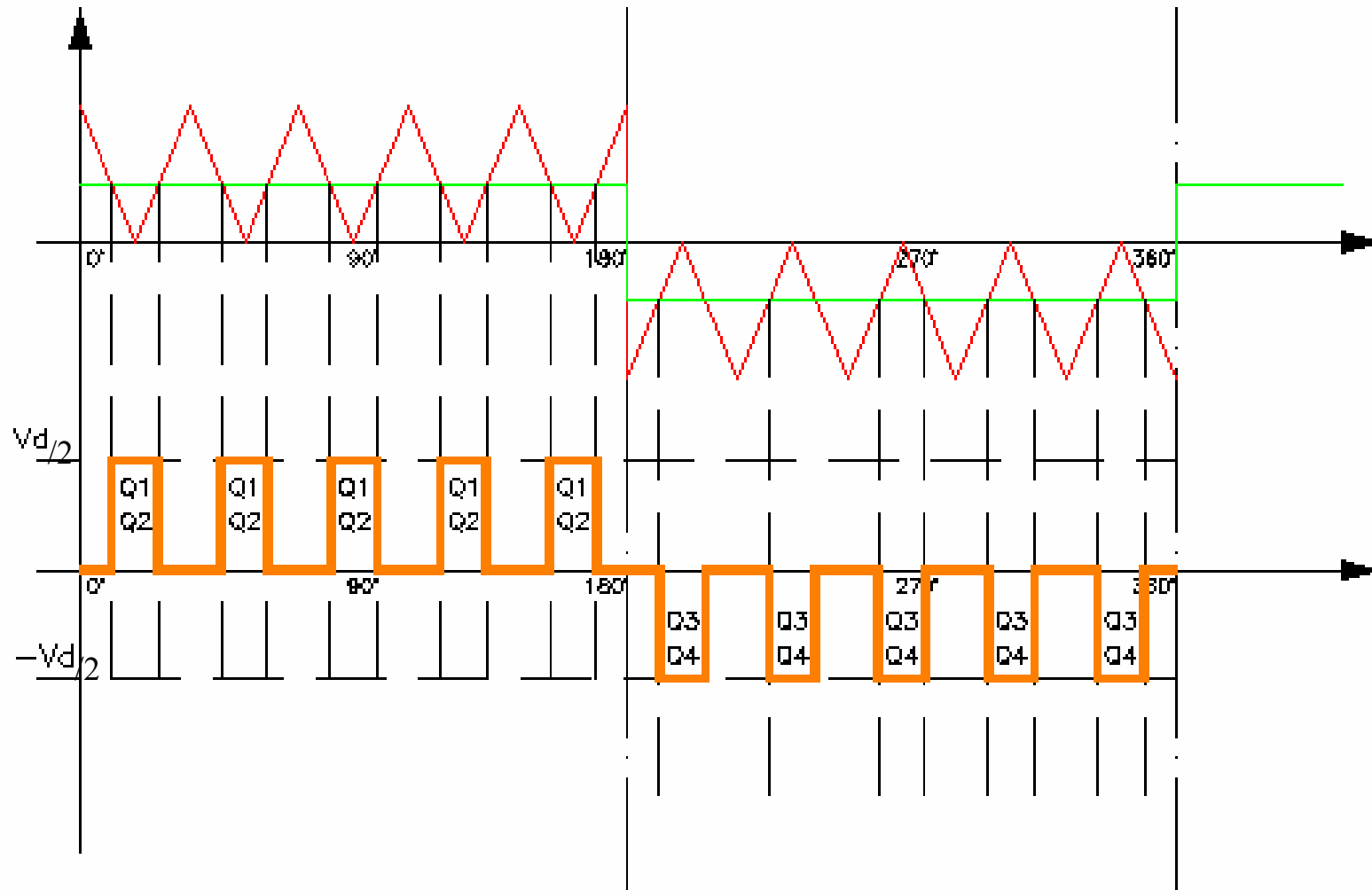
## *Modulazione con portante triangolare*

Dal grafico si può notare un contenuto armonico consistente; questo perché le armoniche di tensione più significative si trovano alle basse frequenze dove le ampiezze sono maggiori, inoltre alle basse frequenze le impedenze non sono elevate per cui le corrispondenti armoniche di corrente hanno ampiezza significativa con ovvie conseguenze a livello di coppia motrice e perdite nel carico, per esempio un motore.

Per ridurre il contenuto armonico si può provare a considerare un segnale portante sempre di tipo triangolare, di ampiezza  $A_c$  e di frequenza dello stesso ordine di grandezza della frequenza massima di commutazione degli interruttori impiegati, riservando un opportuno margine per tenere conto del sistema di raffreddamento.

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*



# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Si procede sempre al confronto dei due segnali e si nota una durata angolare  $\delta$  della conduzione di ciascuna coppia di transistor differente:

$$0 \leq A_r \leq A_c \rightarrow 0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{N_p}$$

Dove  $N_p$  è il numero di impulsi di pilotaggio in un semiperiodo. La tensione di uscita  $v_0$  è costituita da un treno di impulsi alternativamente positivo e negativo e la durata  $\delta$  è modulabile variando l'ampiezza del segnale modulante  $A_r$ . È possibile introdurre due indici che sono *indice di modulazione*  $M$  e *rapporto di frequenza* definiti come:

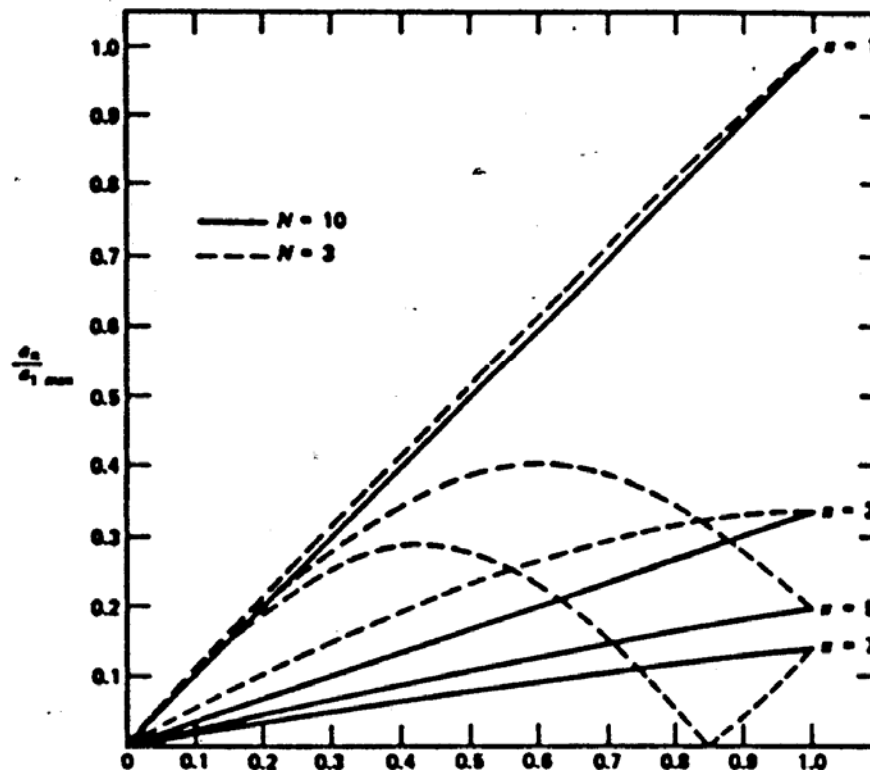
$$M = \frac{A_r}{A_c} \quad R = \frac{f_c}{f}$$

# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

Si parla in questo caso di *modulazione multipla dell'impulso*.

Il vantaggio di questa tecnica risiede nel fatto che è possibile attenuare notevolmente le ampiezze delle armoniche di ordine superiore.

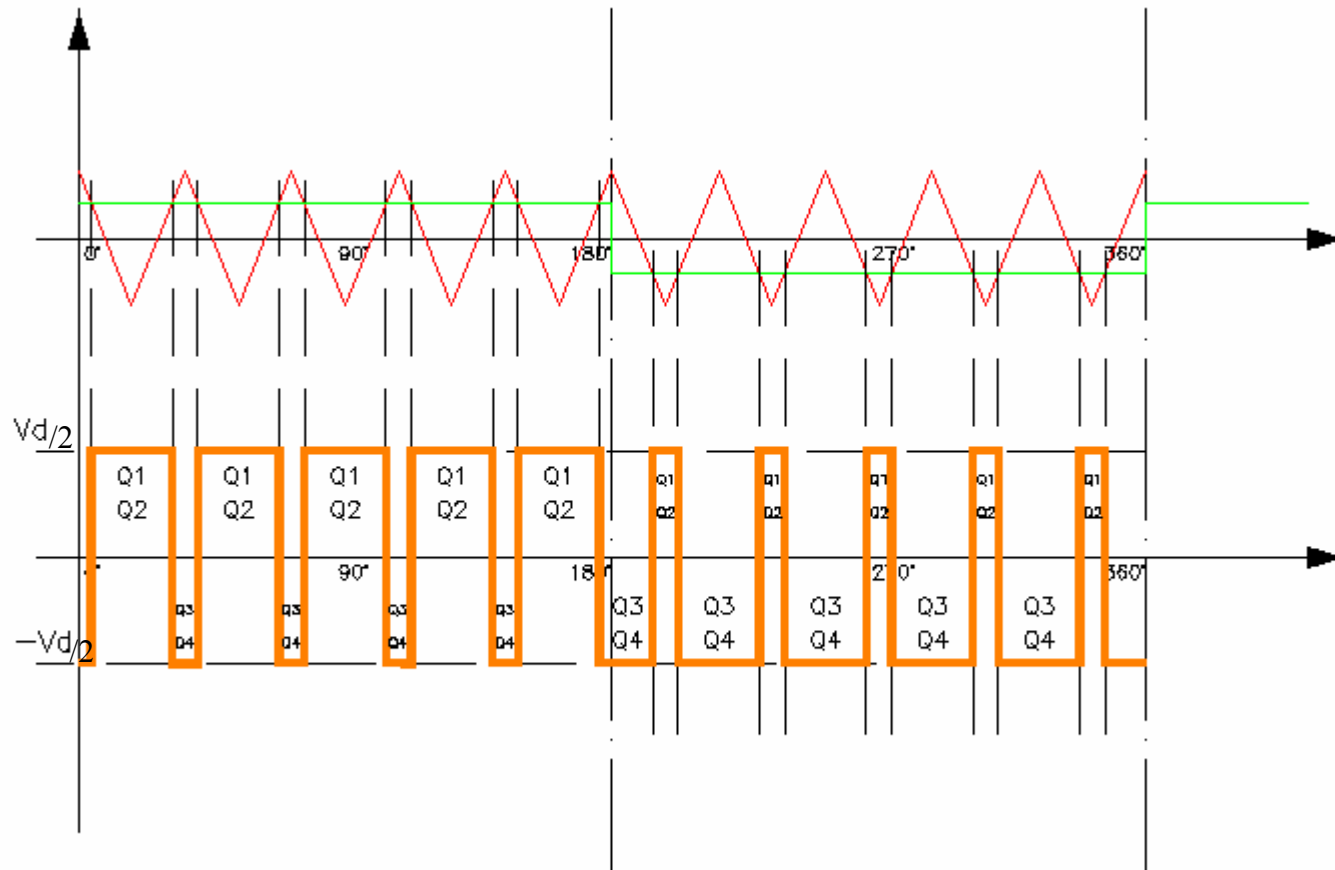




# Conversione DC/AC

## *Modulazione con portante triangolare*

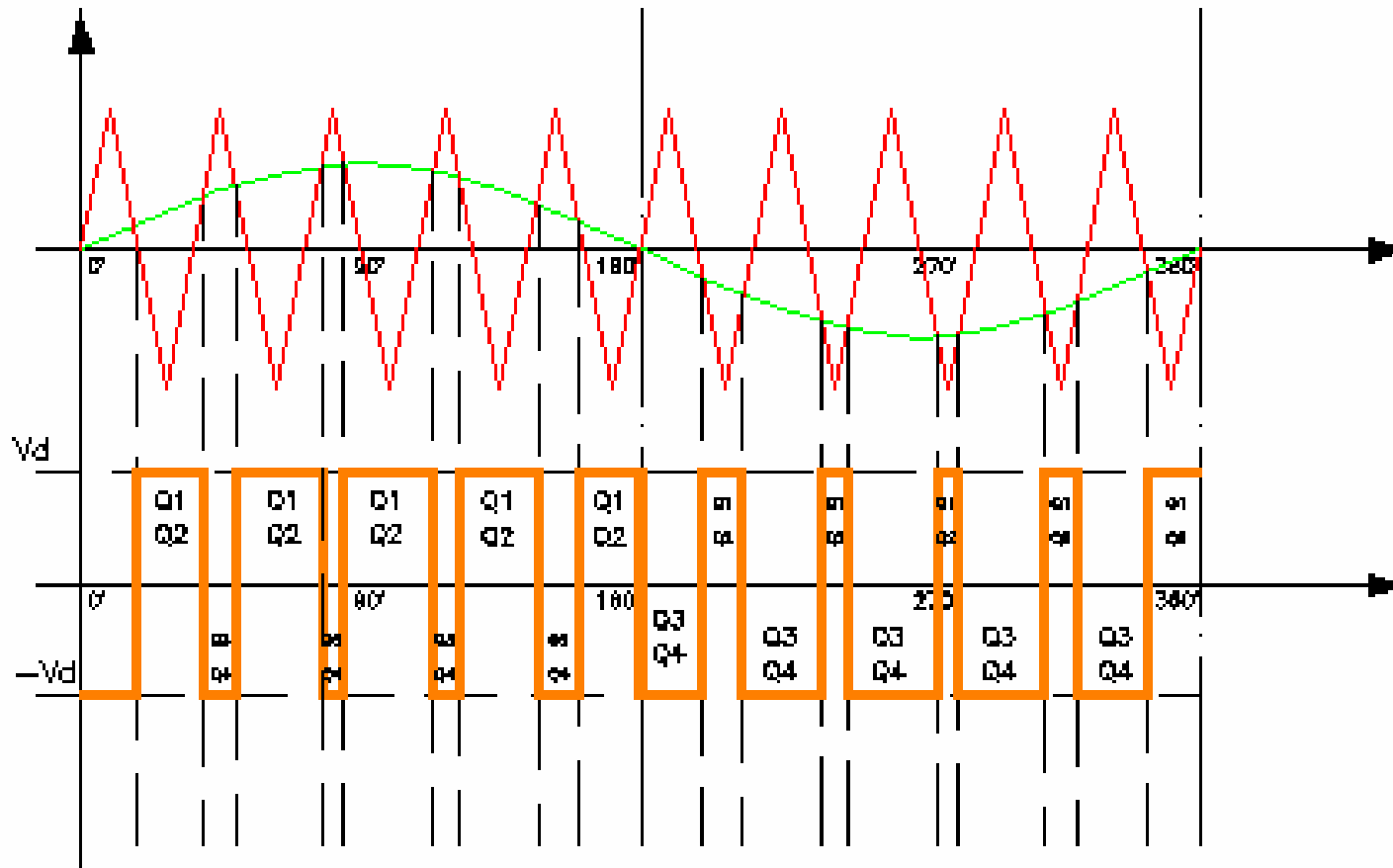
Il segnale di tensione in uscita dall'inverter è detto a *tre livelli* in quanto assume tre valori  $+V$ ,  $0$ ,  $-V$ . È possibile ottenere un segnale a *due livelli* se il segnale portante assume la forma come di seguito riportato:



# Conversione DC/AC

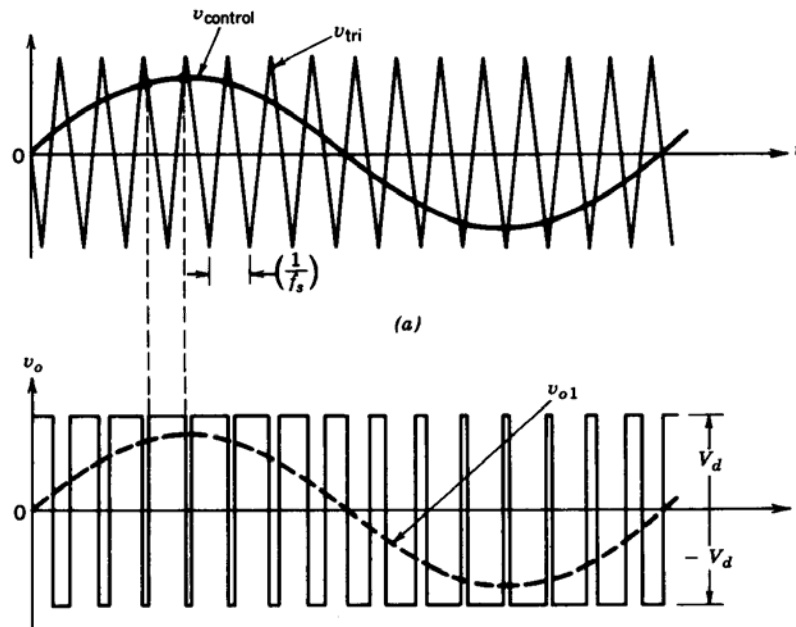
## *Modulante sinusoidale*

Altra tecnica di pilotaggio è basata sul confronto tra un segnale di modulante sinusoidale e una portante triangolare di valore medio nullo:



# Conversione DC/AC

## *Modulante sinusoidale*



L'ampiezza della fondamentale è:

$$\begin{cases} \hat{V}_{o1} = MV_d & M \leq 1 \\ V_d \leq \hat{V}_{o1} \leq \frac{4}{\pi} V_d & M > 1 \end{cases} \quad M = \frac{A_r}{A_c}$$

# Conversione DC/AC

## *Modulante sinusoidale*

Il segnale che si ottiene è sempre a due livelli.

Si parla in questo caso di *modulazione sinusoidale* del segnale di tensione  $v_0$ , differisce da quello ad onda quadra per il fatto che il segnale è costituito da un treno di impulsi di larghezza differente: massima verso la zona centrale della semionda positiva o negativa e minima in corrispondenza dei punti di intersezione con l'asse delle x.

Naturalmente gli impulsi di chiusura degli interruttori devono essere ritardati per evitare il cortocircuito dell'alimentazione. Il tempo di ritardo dell'impulso di chiusura di un interruttore rispetto a quello di apertura dell'altro interruttore della stessa gamba prende il nome di tempo morto.

# Conversione DC/AC

## *Modulante sinusoidale*

Questo tipo di modulazione permette di avere in uscita un segnale con un basso contenuto armonico.

La corrente in uscita, trattandosi di carico ohmico-induttivo a cui vengono applicati dei gradini di tensione, ha andamento esponenziale crescente o decrescente. I diodi svolgono ancora una funzione di ricircolo, cioè conducono in quelli intervalli in cui corrente e tensione hanno segni opposti; questo perché, mentre la tensione può invertirsi istantaneamente, la presenza dell'induttanza non consente l'inversione istantanea della corrente.

Si nota, inoltre, che nel primo semiperiodo ( $0 \leq \omega t \leq \pi$ ) la corrente è prevalentemente positiva così la conduzione avviene per larga parte nei transistor Q1 e Q2 e nei diodi D3 e D4.

Il contrario accade per  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ , dove sono invece i transistor Q3 e Q4 ed i diodi D1 e D2 a presiedere per larga parte alla conduzione, essendo la corrente prevalentemente negativa.

# Conversione DC/AC

## *Effetto del tempo morto*

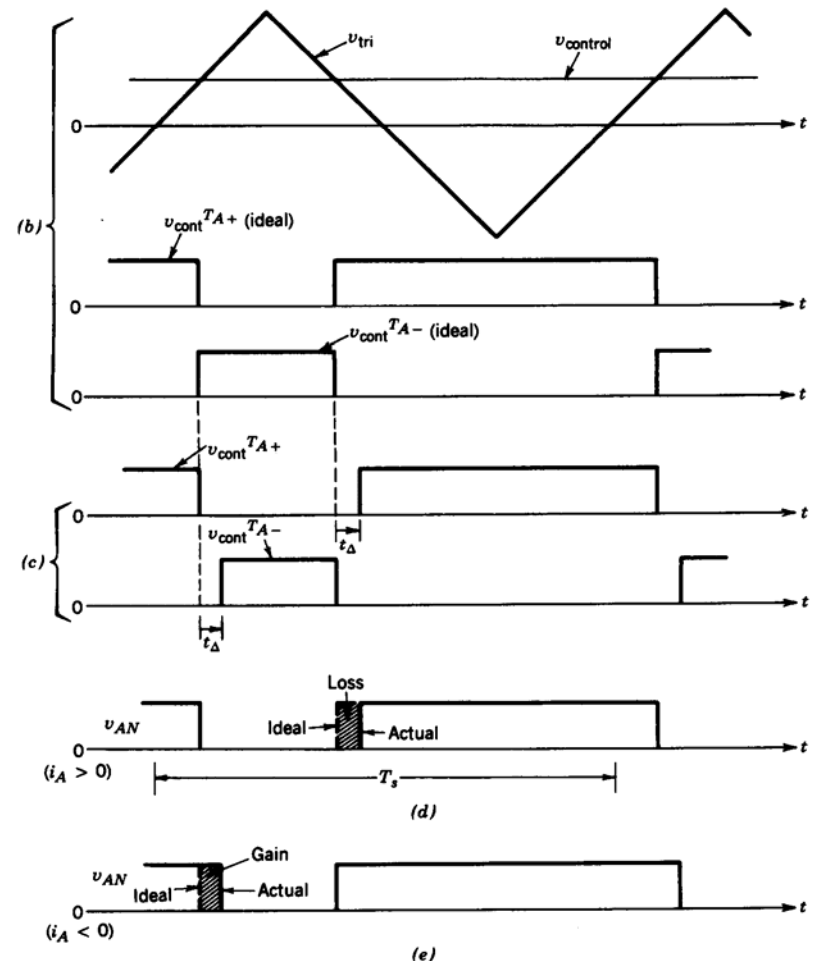
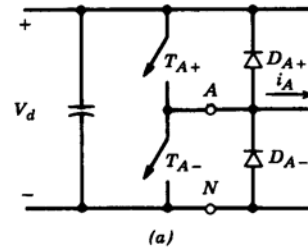
È necessario attendere un tempo  $t_{\Delta}$  prima di accendere un interruttore, questo per garantire lo spegnimento dell'altro ed evitare un cortocircuito dell'alimentazione. Si presentano due situazioni:

$i_A > 0$ : spegnendo  $T_{A+}$  si ha che comunque entra in conduzione  $D_{A-}$  come nel caso ideale; invece, allo spegnimento di  $T_{A-}$ , durante  $t_{\Delta}$  la tensione resta a 0 anziché portarsi a  $V_d$  e quindi si ha una diminuzione del valore medio della tensione di uscita

$$i_A > 0 \quad V_{AN, reale} = \frac{t_{on} - t_{\Delta}}{T_s} V_d \Rightarrow \Delta V_{AN} = \frac{t_{\Delta}}{T_s} V_d$$

$i_A < 0$ : spegnendo  $T_{A+}$  durante  $t_{\Delta}$  continua comunque a condurre  $D_{A+}$  e quindi la tensione rimane a  $V_d$  anziché portarsi a 0 e quindi si ha un aumento del valore medio della tensione di uscita; spegnendo  $T_{A-}$  entra invece in conduzione  $D_{A+}$  e quindi il ritardo  $t_{\Delta}$  di accensione di  $T_{A+}$  non influisce sulla tensione

$$i_A < 0 \quad V_{AN, reale} = \frac{t_{on} + t_{\Delta}}{T_s} V_d \Rightarrow \Delta V_{AN} = -\frac{t_{\Delta}}{T_s} V_d$$



# Conversione DC/AC

## *Conclusioni*

Con la tecnica PWM, a differenza della tecnica a onda quadra, il valore medio della tensione di uscita può essere regolato agendo sul rapporto di modulazione dell'inverter; questa tecnica dato l'elevato numero di confronti tra la portante e la modulante, richiede un numero di commutazioni più elevato e comporta quindi uno stress maggiore per i componenti con conseguente aumento delle perdite di commutazione, da tenere presente nel dimensionamento del dissipatore di calore. La tecnica PWM offre però il vantaggio di un minor valore dell'ondulazione di corrente di uscita dell'inverter, ed inoltre poiché le armoniche di tensione prodotte sono a frequenze più alte, risultano più facilmente filtrabili.

# Conversione DC/AC

## *Analisi armonica*

Si dimostra che la frequenza della k-esima armonica  $f_k$  della tensione  $v_0$  o della  $v_{A0}$  in uscita da un inverter PWM a modulazione sinusoidale è legata alla frequenza  $f_p$  della portante e a quella della modulante  $f$  dalla seguente formula:

$$f_k = m f_p \pm n f$$

dove  $m$  ed  $n$  sono numeri interi tali che la loro somma  $m + n$  sia un numero dispari.

Tenendo conto che  $f_k$  ed  $f_p$  sono legate alla frequenza della modulante dalle relazioni :

$$f_k = k f; \quad f_p = R f$$

si può scrivere:

$$k = m R \pm n$$

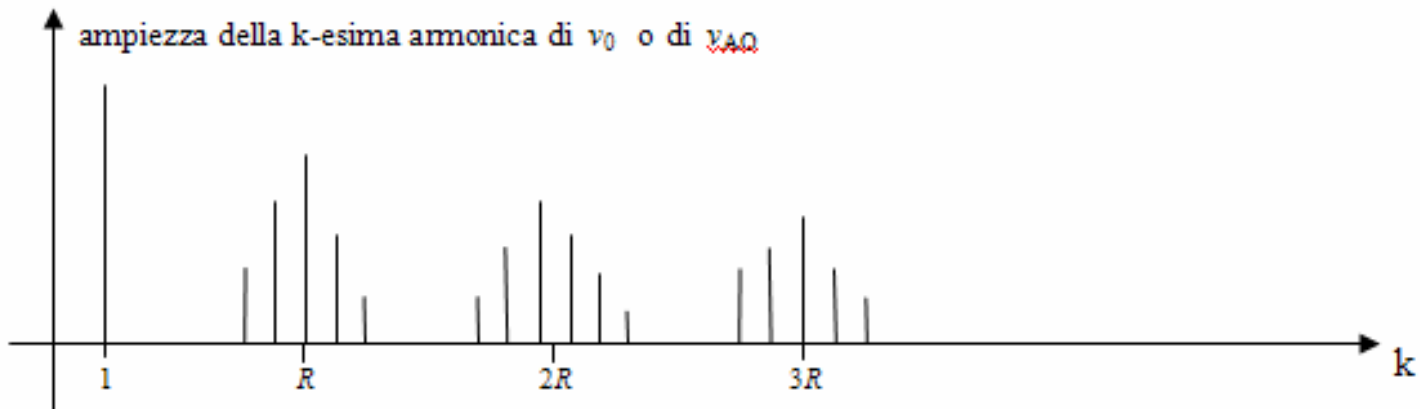


# Conversione DC/AC

## *Analisi armonica*

Per  $m$  pari,  $n$  dovrà essere dispari e viceversa, pertanto lo spettro armonico è del tipo:

$R$	$R \pm 2$	$R \pm 4$	
$2R$	$2R \pm 1$	$2R \pm 3$	$2R \pm 5$
$3R$	$3R \pm 2$	$3R \pm 4$	$3R \pm 6$



# Conversione DC/AC

## *Analisi armonica*

E' importante allora che  $R$  assuma il valore più alto possibile, compatibilmente con le frequenze di commutazione tollerabili dai transistor; aumentare  $R = f_p / f$ , significa infatti aumentare la frequenza  $f_p$  del segnale portante a parità di frequenza  $f$  della fondamentale in uscita, e quindi aumentare la frequenza di commutazione dei transistor.

Oltre a ciò è anche importante che il parametro  $R$  possa essere regolato nelle varie condizioni di funzionamento dell'inverter; se esso fosse costante, per esempio  $R = 12$ , il pacchetto di armoniche più significativo (il primo), che per una frequenza  $f = 50\text{Hz}$  sarebbe concentrato intorno alla frequenza:

$$f_k = k f = R f = 12 \times 50 = 600 \text{ Hz}$$

se riduciamo  $f$  a  $5\text{Hz}$  per rallentare il motore

$$f_k = k f = R f = 12 \times 5 = 60 \text{ Hz}$$