

CONVERTITORI CC/CA (INVERTITORI) I

Prof. Simone CASTELLAN

[1] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, *Power electronics – Converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, 1995.

Versione italiana: *Elettronica di potenza – Convertitori ed applicazioni*, Hoepli, 2005.

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

Versione italiana: *Elettronica di potenza – Dispositivi e circuiti (Volume 1), Elettronica di potenza – Applicazioni (Volume 2)*, Pearson Paravia Bruno Mondadori, 2008.

[3] M.H.Rashid, *Power electronics handbook*, Academic Press, 2001.

INVERTITORE

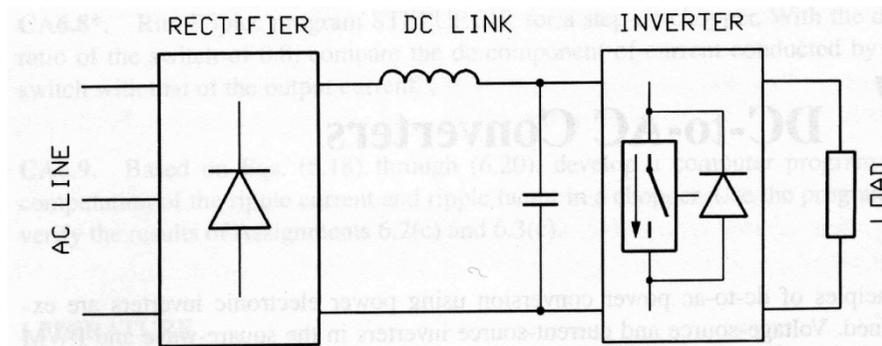
Gli invertitori sono dei convertitori cc/ca. Trasferiscono potenza da una sorgente a cc ad un carico alimentato a ca; la loro caratteristica peculiare è la possibilità di variare l'ampiezza e la frequenza.

Ne esistono due tipologie: invertitori di tensione (IT), o a tensione impressa, e invertitori di corrente (IC), o a corrente impressa, in relazione al tipo di sorgente (rispettivamente di tensione e di corrente).

Dopo i raddrizzatori sono i convertitori statici più diffusi.

Da notare che anche un raddrizzatore funzionante da invertitore trasferisce potenza da un lato a cc verso uno a ca ma con ampiezza e frequenza fissa, quella della rete.

Gli invertitori sono dei convertitori a commutazione forzata: la commutazione deve essere indotta dall'esterno sia in accensione che in spegnimento.



Struttura maggiormente utilizzata dove è inserito un invertitore

La sorgente a cc è ottenuta con un raddrizzatore (di solito non controllato) il quale alimenta l'invertitore attraverso il circuito in cc.

Da notare il diodo in antiparallelo connesso all'interruttore principale, che rende l'interruttore bidirezionale.

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA

Se il condensatore è il componente principale allora esso costituisce la sorgente di tensione (in tal caso l'induttore fa da filtro per le armoniche di alta frequenza della corrente continua).

Viceversa se l'induttore è il componente principale esso costituisce la sorgente di corrente (in tal caso il condensatore non è strettamente necessario, eventualmente fa da filtro per le componenti di alta frequenza della tensione continua).

I primi invertitori furono costruiti con tiristori. Essi avevano bisogno di un circuito per il loro spegnimento forzato costituito praticamente da un altro tiristore di taglia analoga al principale. Successivamente i tiristori sono stati sostituiti da interruttori totalmente controllabili (GTO, BJT, IGBT, MOSFET, ecc.).

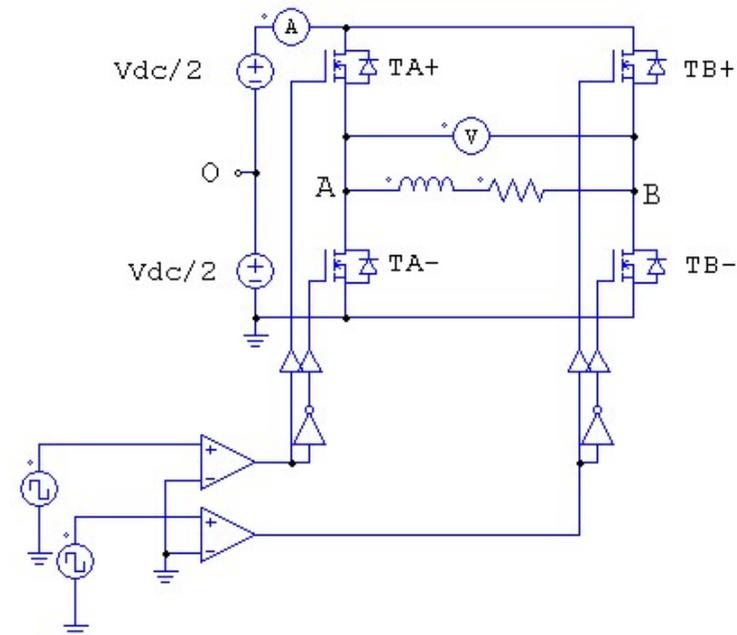
Il numero di fasi di uscita può essere qualsiasi ma in pratica sono usati quasi esclusivamente invertitori monofase e trifase.

Un invertitore monofase è costituito da due rami, ciascuno formato da due interruttori in serie, ai quali è connesso il diodo in antiparallelo (diodo di ricircolo).

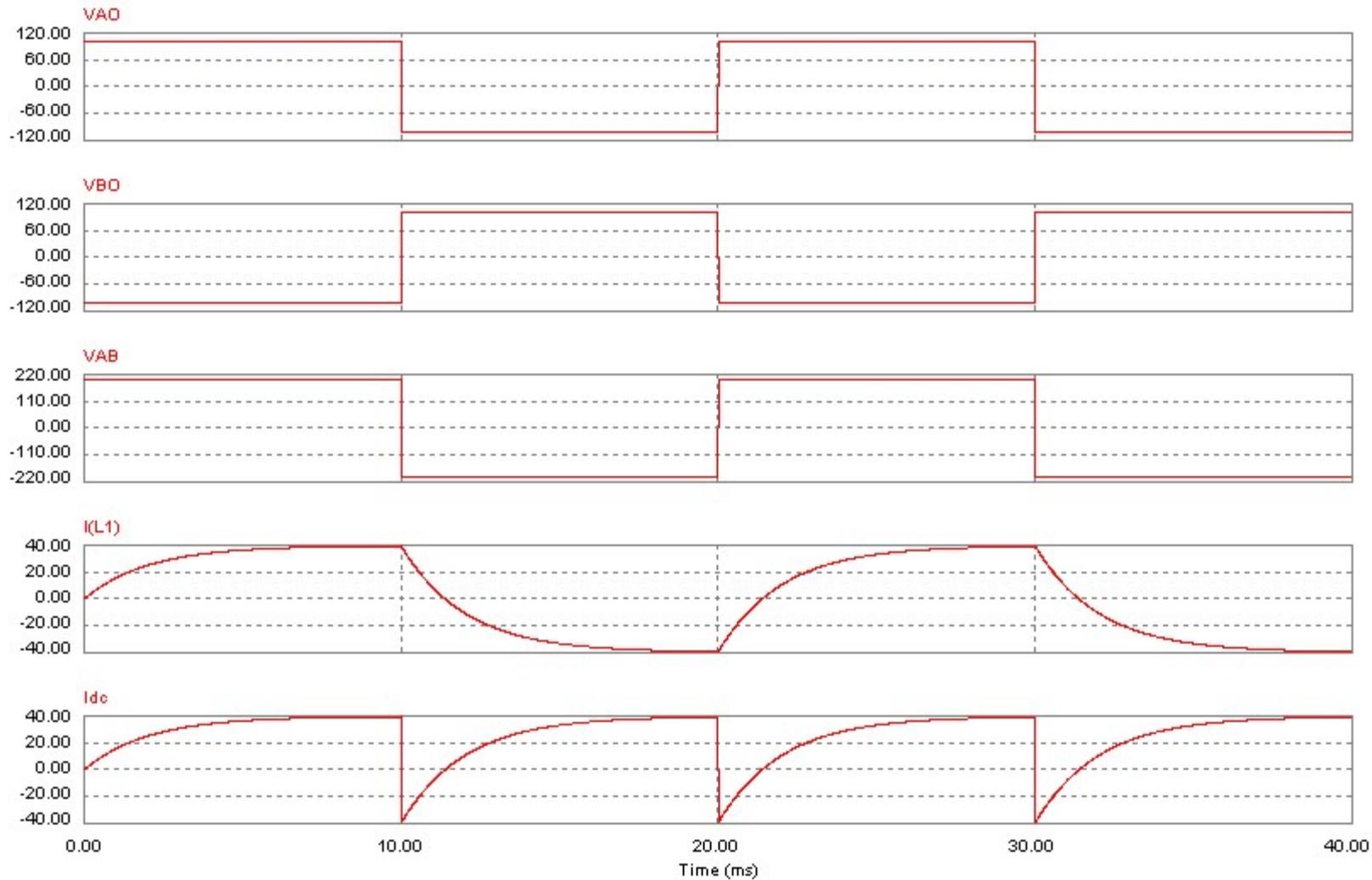
Quando nel ramo A è chiuso TA+, nel ramo B è chiuso TB- e viceversa, la temporizzazione è fatta in modo che il ciclo di lavoro (duty cycle) sia il 50%.

Si noti che non possono essere contemporaneamente chiusi i due interruttori di un ramo, altrimenti si provoca un cortocircuito sulla tensione di ingresso.

Ne risulta che al carico è applicata un'onda quadra di ampiezza pari alla tensione V_{dc} e frequenza dipendente dalla temporizzazione.



INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE



Grandezze di uscita dell'invertitore a tensione impressa monofase comandato in onda quadra.

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

Sia S_A la funzione di commutazione relativa al ramo A definita da

$$S_A = \begin{cases} 1 & \text{se TA + è chiuso (TA - aperto)} \\ 0 & \text{se TA - è chiuso (TA + aperto)} \end{cases}$$

Una relazione analoga vale per il ramo B. Ne viene che si può scrivere:

$$v_{AO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_A - 1)$$

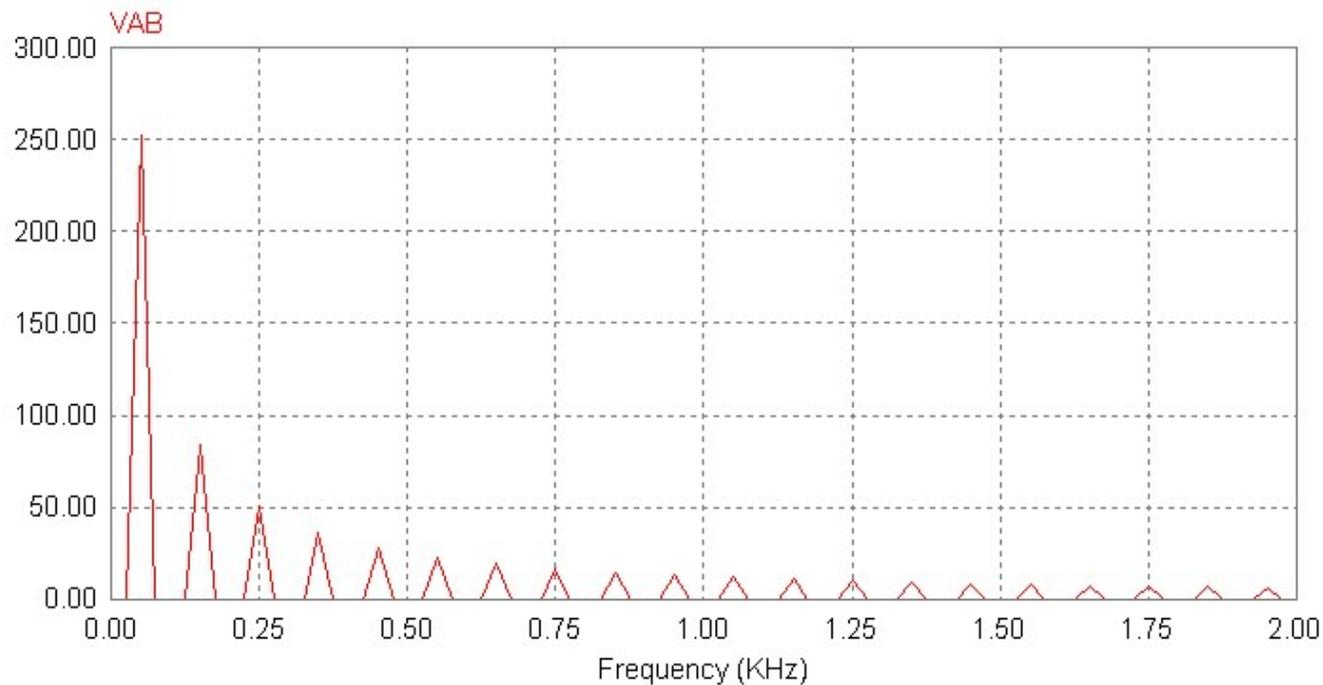
$$v_{BO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_B - 1)$$

$$v_{AB} = v_{AO} - v_{BO} = V_{dc} (S_A - S_B)$$

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

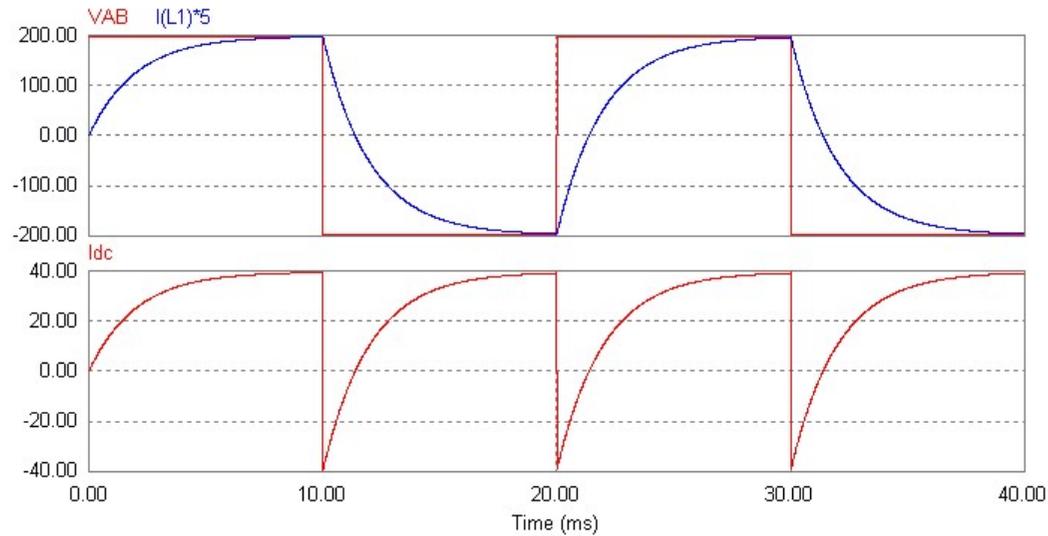
Lo sviluppo in serie della tensione di uscita è (sviluppo di un'onda quadra)

$$v_{AB} = \frac{4}{\pi} V_{dc} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right]$$

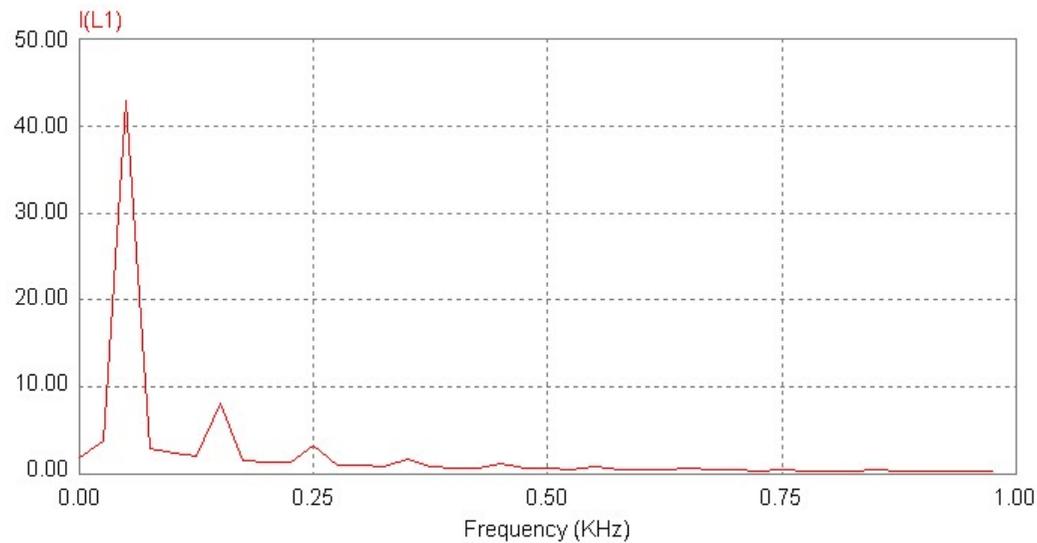


Per $V_{dc} = 198 \text{ V}$ la prima armonica ha ampiezza $V_{AB1M} = 1.27V_{dc} = 252\text{V}$.

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE



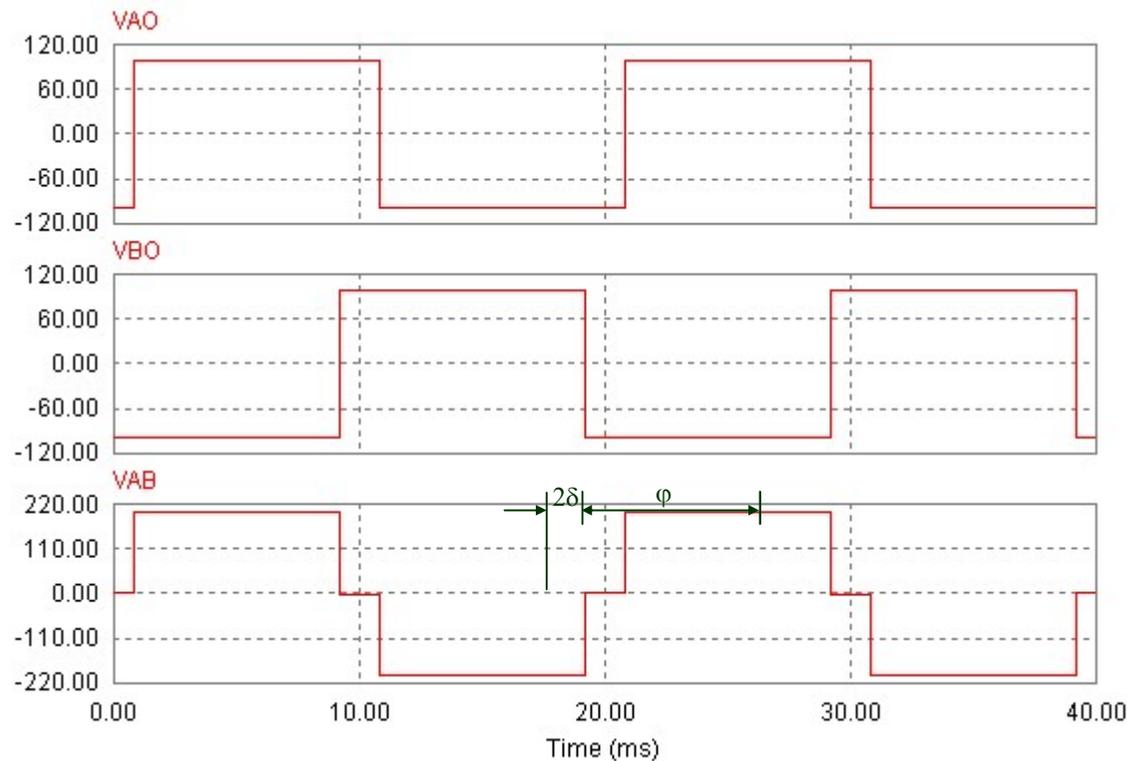
Andamento delle correnti di carico e del circuito in continua



Contenuto armonico della corrente nel carico

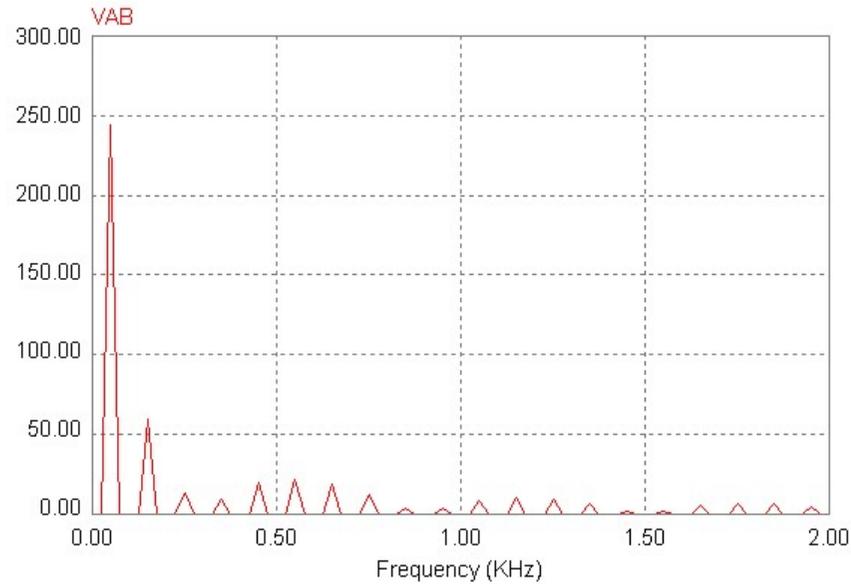
INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

Nell'invertitore monofase comandato in questo modo la variazione di frequenza si può ottenere modificando la temporizzazione, mentre la variazione dell'ampiezza della prima armonica è possibile solo variando V_{dc} , quindi con un raddrizzatore di ingresso a controllo di fase ovvero con un chopper.

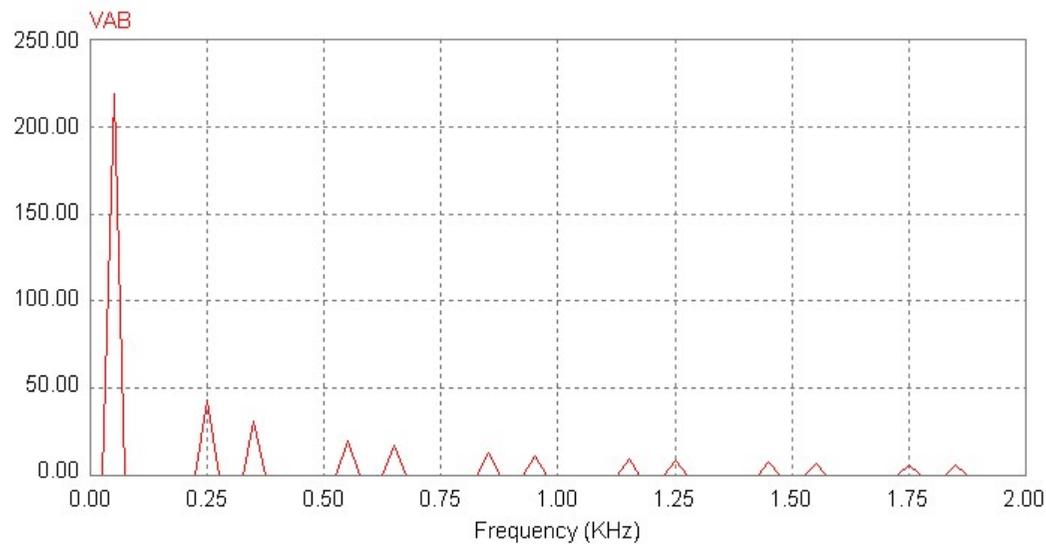


Se invece si introduce, a cavallo del semiperiodo e del periodo, un intervallo in cui la tensione è nulla si può far variare l'ampiezza della prima armonica (ad esempio con un intervallo angolare di $2\delta = 30^\circ$).

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE



Contenuto armonico della tensione sul carico relativo al caso in cui $2\delta = 30^\circ$.

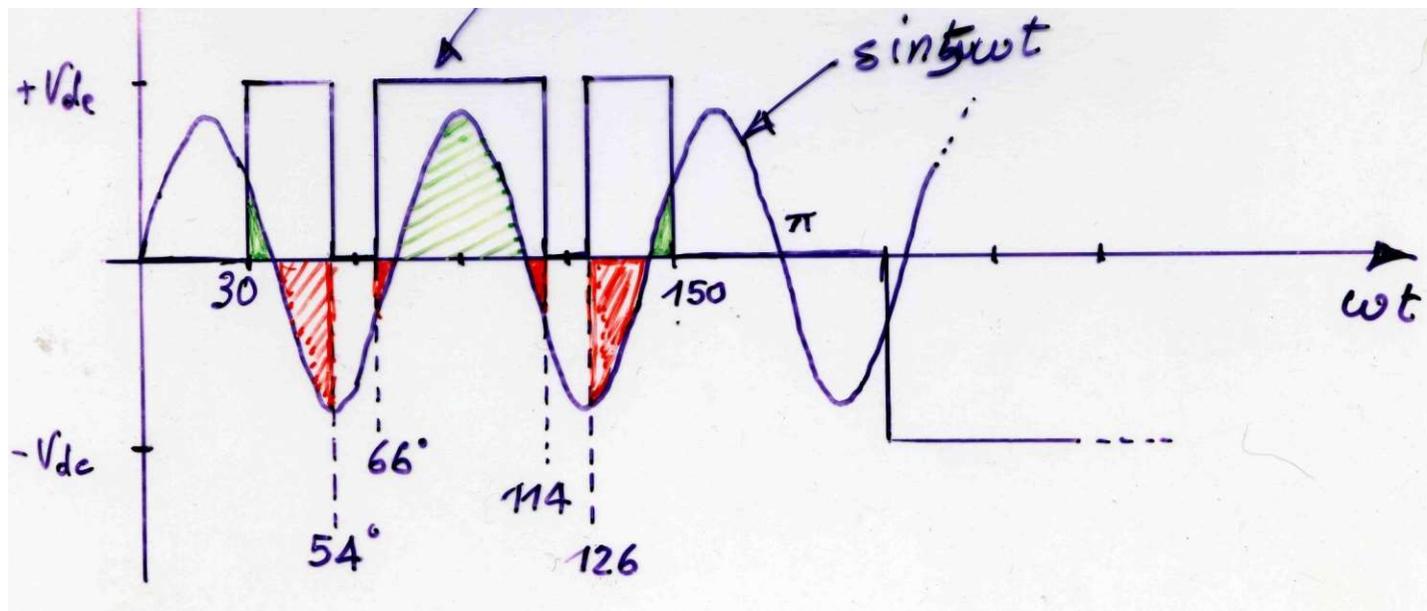


Contenuto armonico della tensione sul carico relativo al caso in cui $2\delta = 60^\circ$.

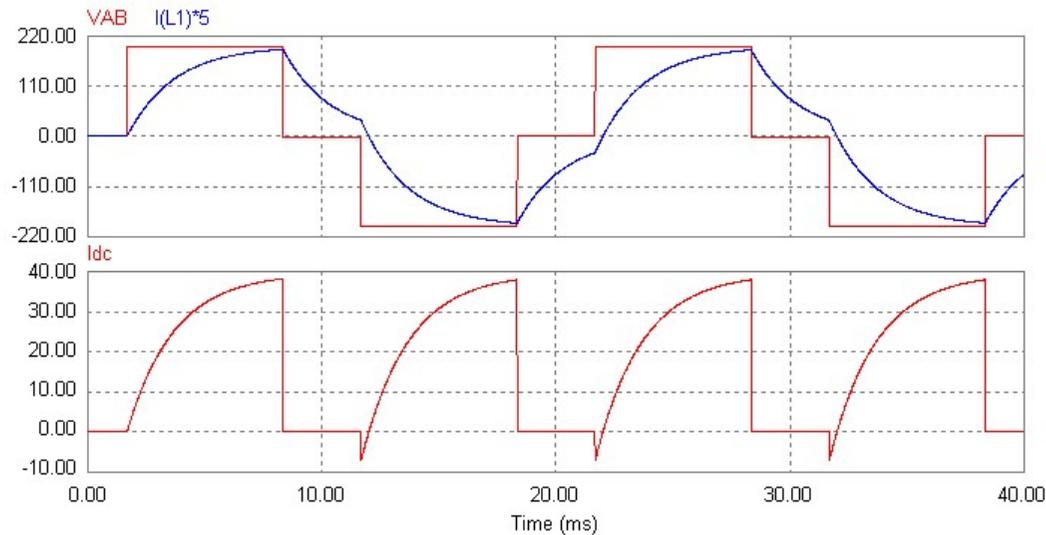
INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

L'introduzione di un opportuno intervallo a tensione nulla permette anche di eliminare la terza armonica. Il metodo può essere generalizzato pensando di introdurre all'interno di ogni semiperiodo degli intervallini a tensione nulla che permettono di eliminare alcune armoniche o ridurre il contenuto armonico della tensione in uscita.

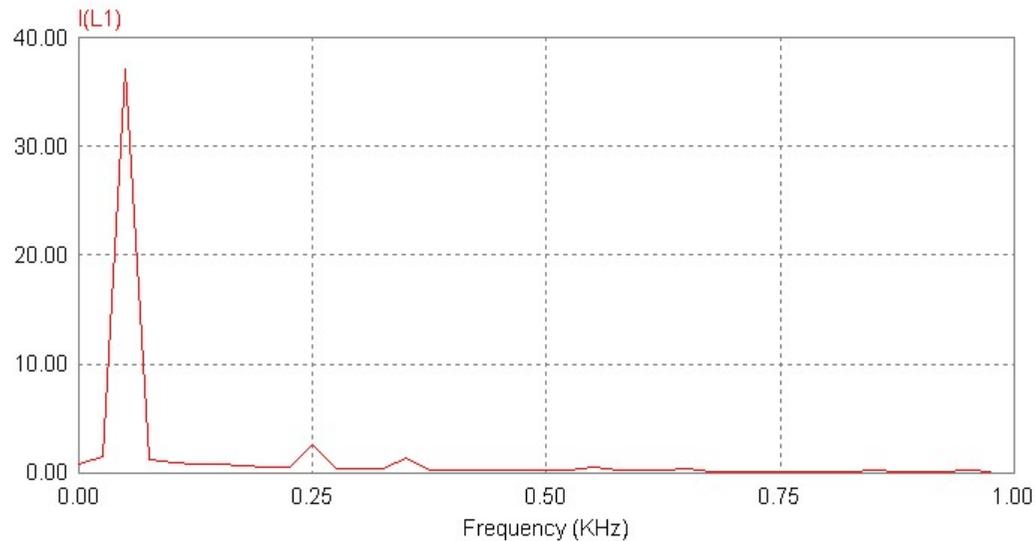
Esempio di eliminazione della terza e quinta armonica:



INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

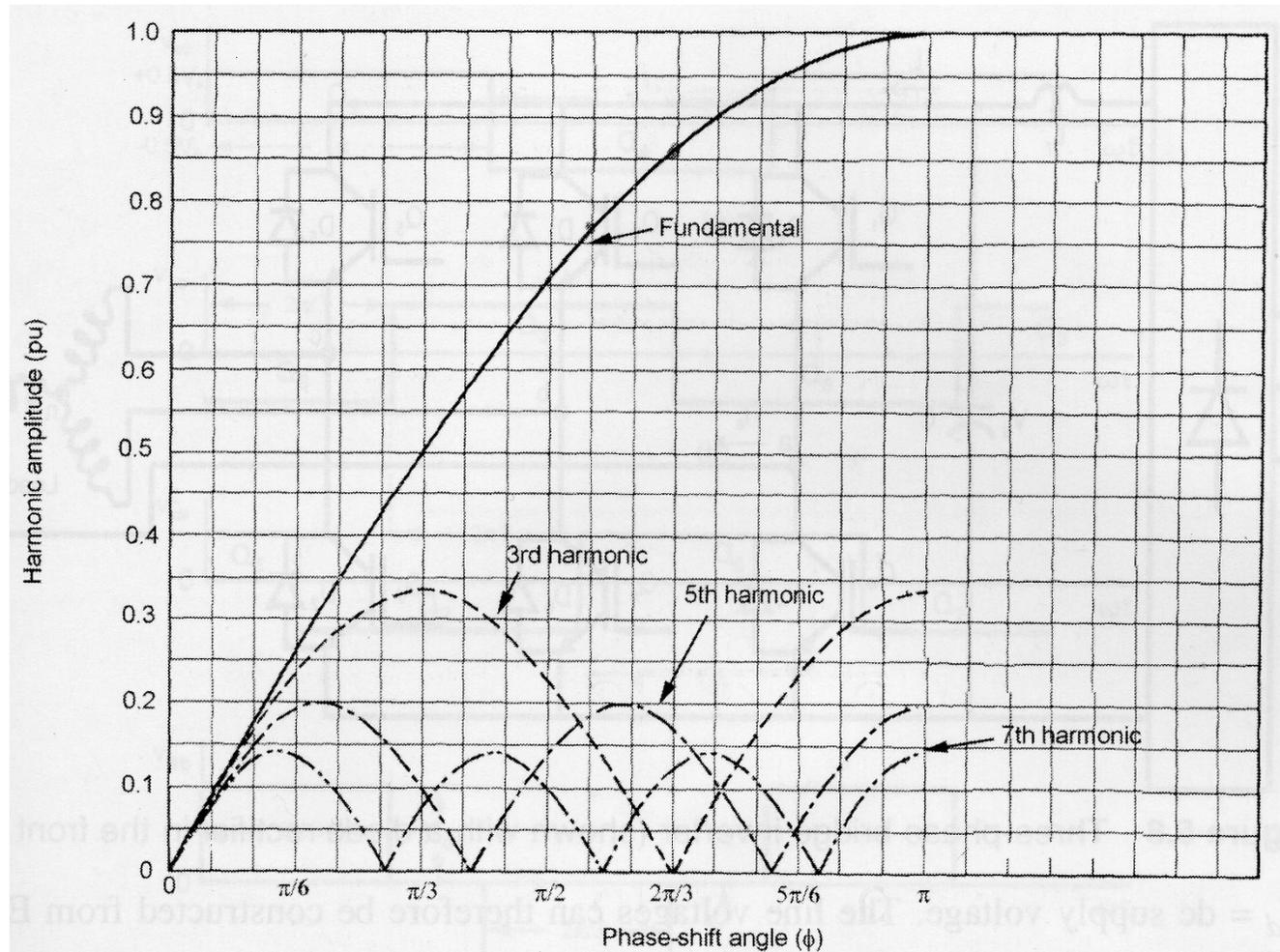


Andamento delle correnti di carico e del circuito in continua relativo al caso in cui $2\delta = 60^\circ$.



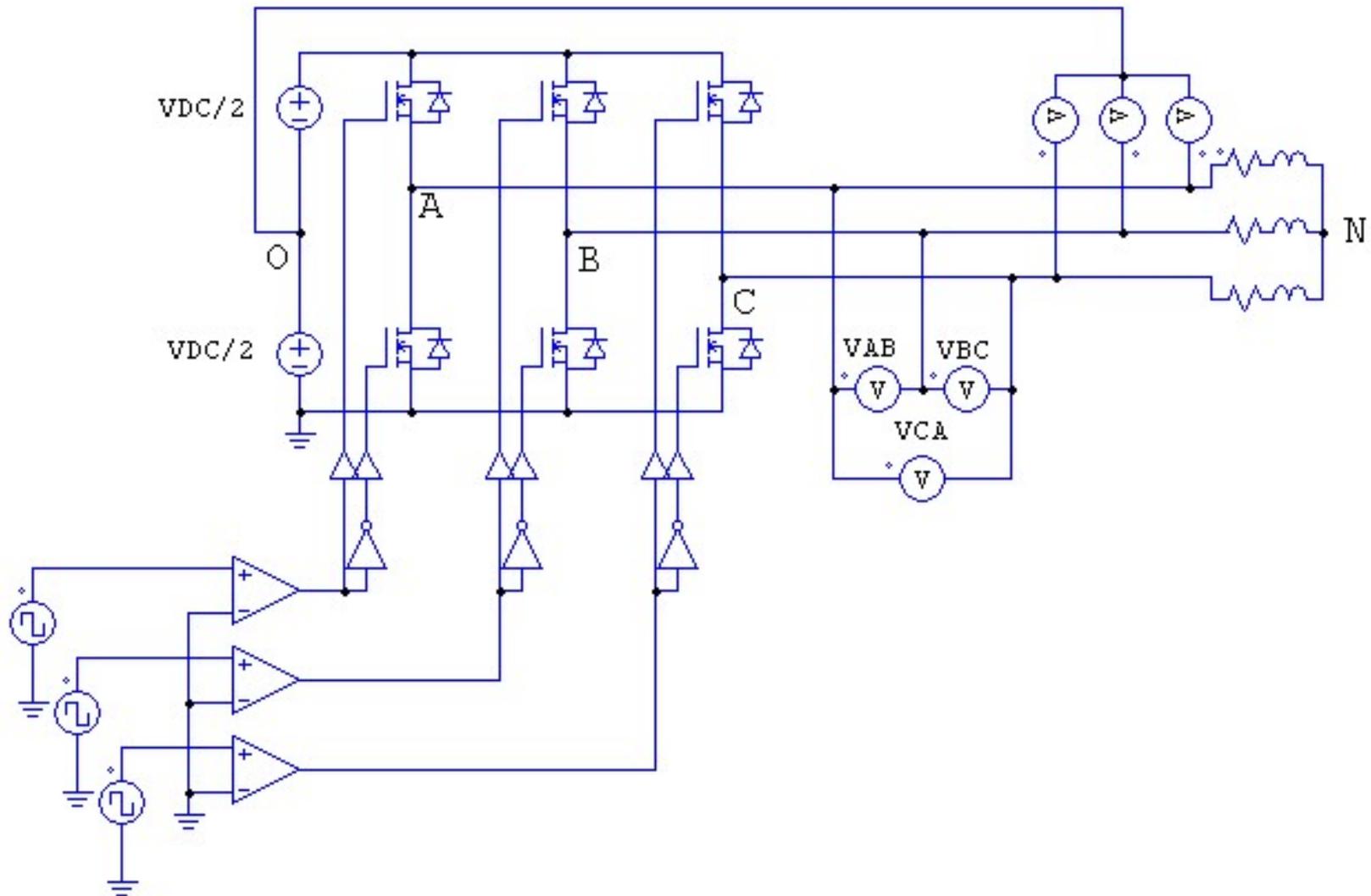
Contenuto armonico della corrente nel carico relativo al caso in cui $2\delta = 60^\circ$.

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA MONOFASE

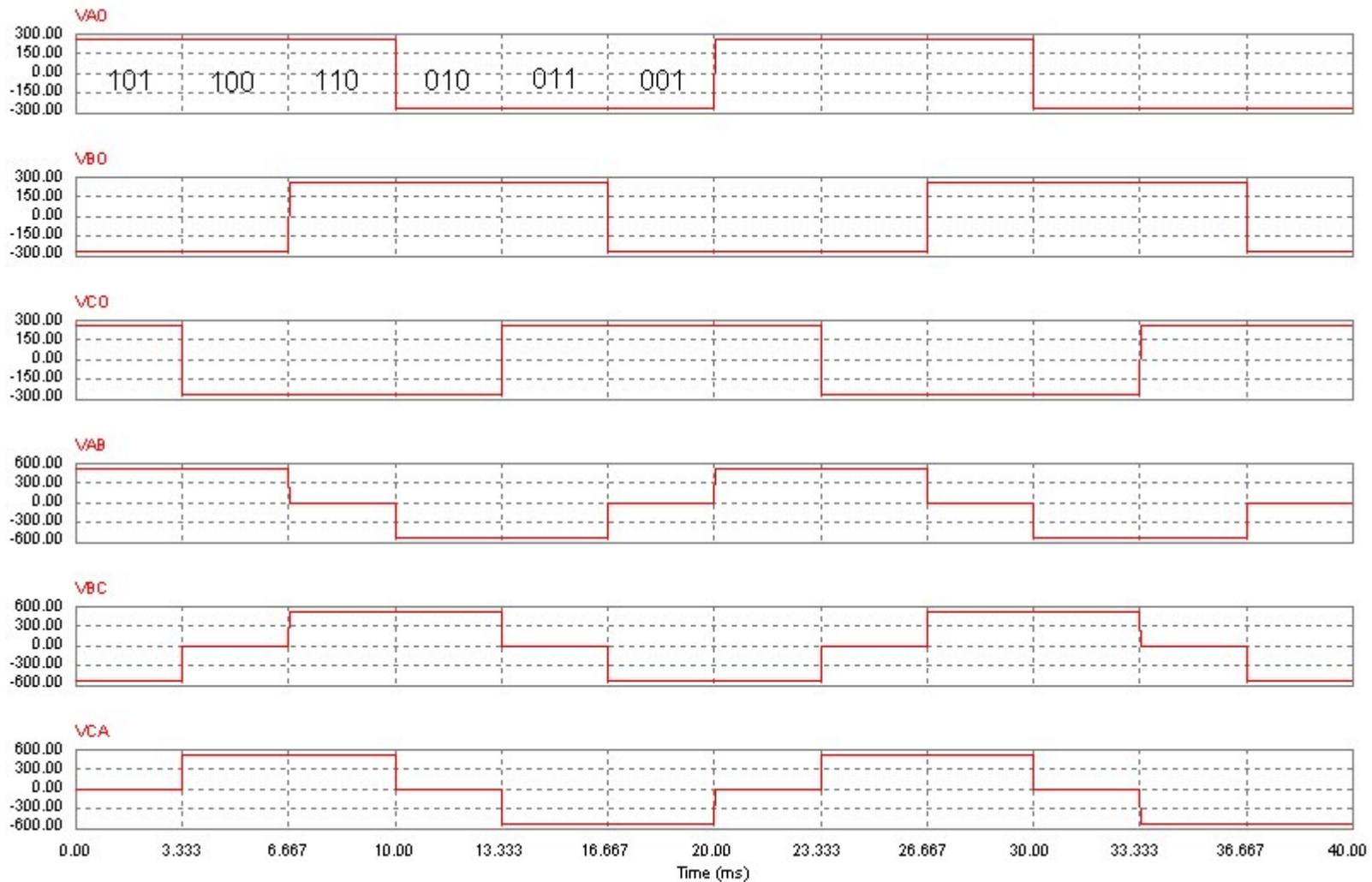


Andamento delle armoniche al variare dell'angolo $\phi = 180 - 2\delta$. In ordinata, l'ampiezza delle armoniche sono riferite al valore della prima armonica in condizioni di $\delta = 0$.

INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA TRIFASE



INVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA TRIFASE



Tensioni di uscita dell'invertitore a tensione impressa trifase comandato in onda quadra.

INVERTITORE TRIFASE: TENSIONI DI FASE

Utilizzando, per la funzione di commutazione, la stessa definizione vista precedentemente si ha:

$$v_{AO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_A - 1) \quad v_{BO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_B - 1) \quad v_{CO} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_C - 1)$$

In corrispondenza le espressioni delle tensioni con lo sviluppo in serie di Fourier sono

$$v_{AO} = \frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \dots \right]$$

$$\begin{aligned} v_{BO} &= \frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{5} \sin 5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right] = \\ &= \frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin\left(5\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \right] \end{aligned}$$

$$v_{CO} = \frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right]$$

INVERTITORE TRIFASE: TENSIONI CONCATENATE

$$v_{AB} = v_{AO} - v_{BO} = V_{dc}(S_A - S_B)$$

$$v_{AB} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{5} \sin 5\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{7} \sin 7\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \dots \right]$$

$$v_{BC} = v_{BO} - v_{CO} = V_{dc}(S_B - S_C)$$

$$v_{BC} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{5} \sin 5\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{7} \sin 7\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \dots \right]$$

$$v_{CA} = v_{CO} - v_{AO} = V_{dc}(S_C - S_A)$$

$$v_{CA} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) + \frac{1}{5} \sin 5\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) + \frac{1}{7} \sin 7\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) + \dots \right]$$

Mancano le armoniche di ordine tre e suoi multipli.

INVERTITORE TRIFASE: TENSIONI STELLATE

Nell'ipotesi di centro stella del carico isolato, le tensioni di fase sul carico a stella, o tensioni stellate, e la tensione del centro stella sono:

$$v_{AN} = v_{AO} + v_{ON}$$

$$v_{BN} = v_{BO} + v_{ON}$$

$$v_{CN} = v_{CO} + v_{ON}$$



$$3v_{ON} = \underbrace{v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}}_{=0} - v_{AO} - v_{BO} - v_{CO}$$



$$v_{ON} = -\frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO})$$

In funzione delle S_i si ottiene:

$$v_{AN} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_A - S_B - S_C)$$

$$v_{BN} = \frac{V_{dc}}{3}(-S_A + 2S_B - S_C)$$

$$v_{CN} = \frac{V_{dc}}{3}(-S_A - S_B + 2S_C)$$

$$v_{ON} = -\frac{V_{dc}}{6}[2(S_A + S_B + S_C) - 3]$$

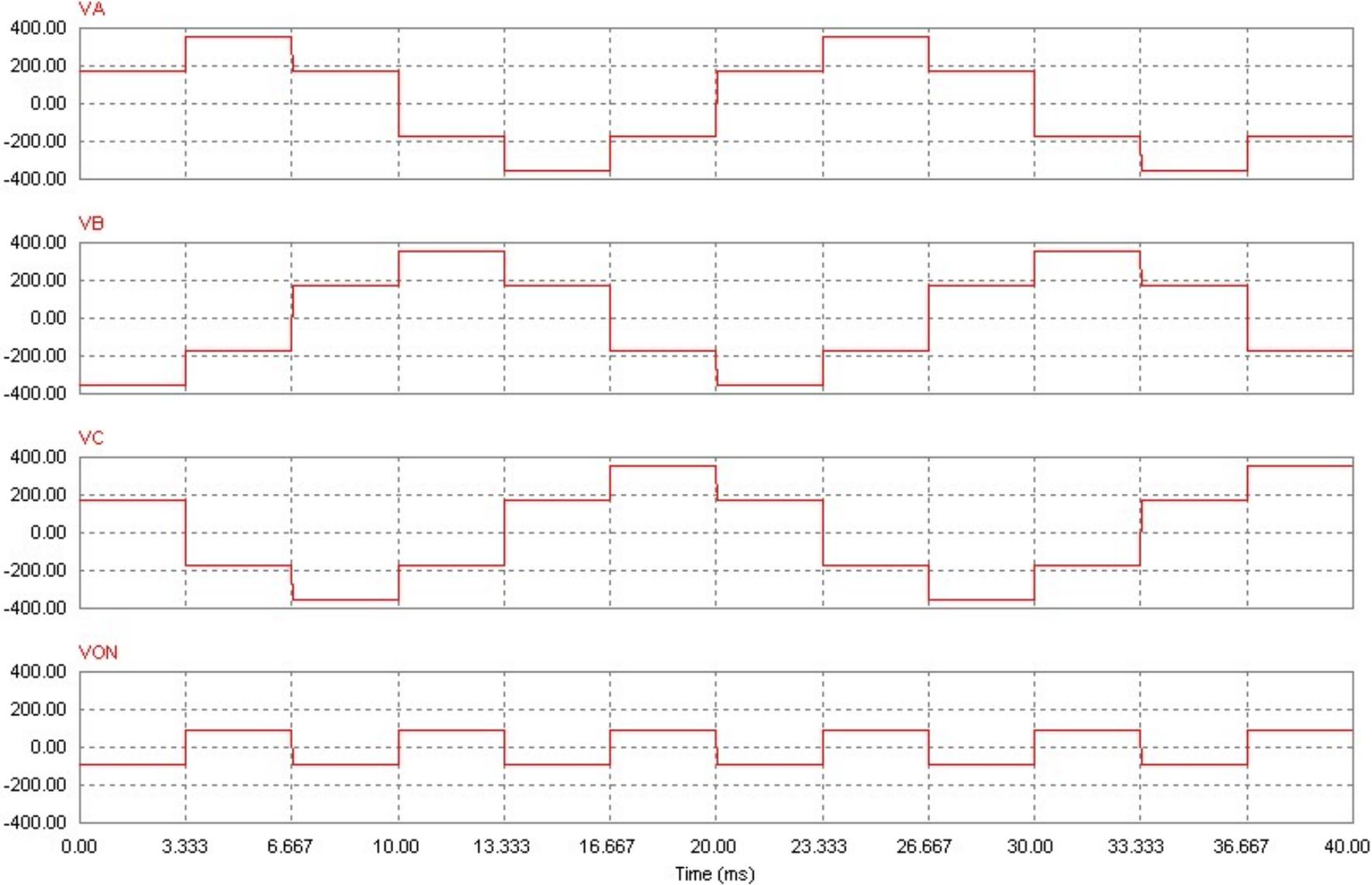
INVERTITORE TRIFASE: TENSIONI STELLATE

Esempi

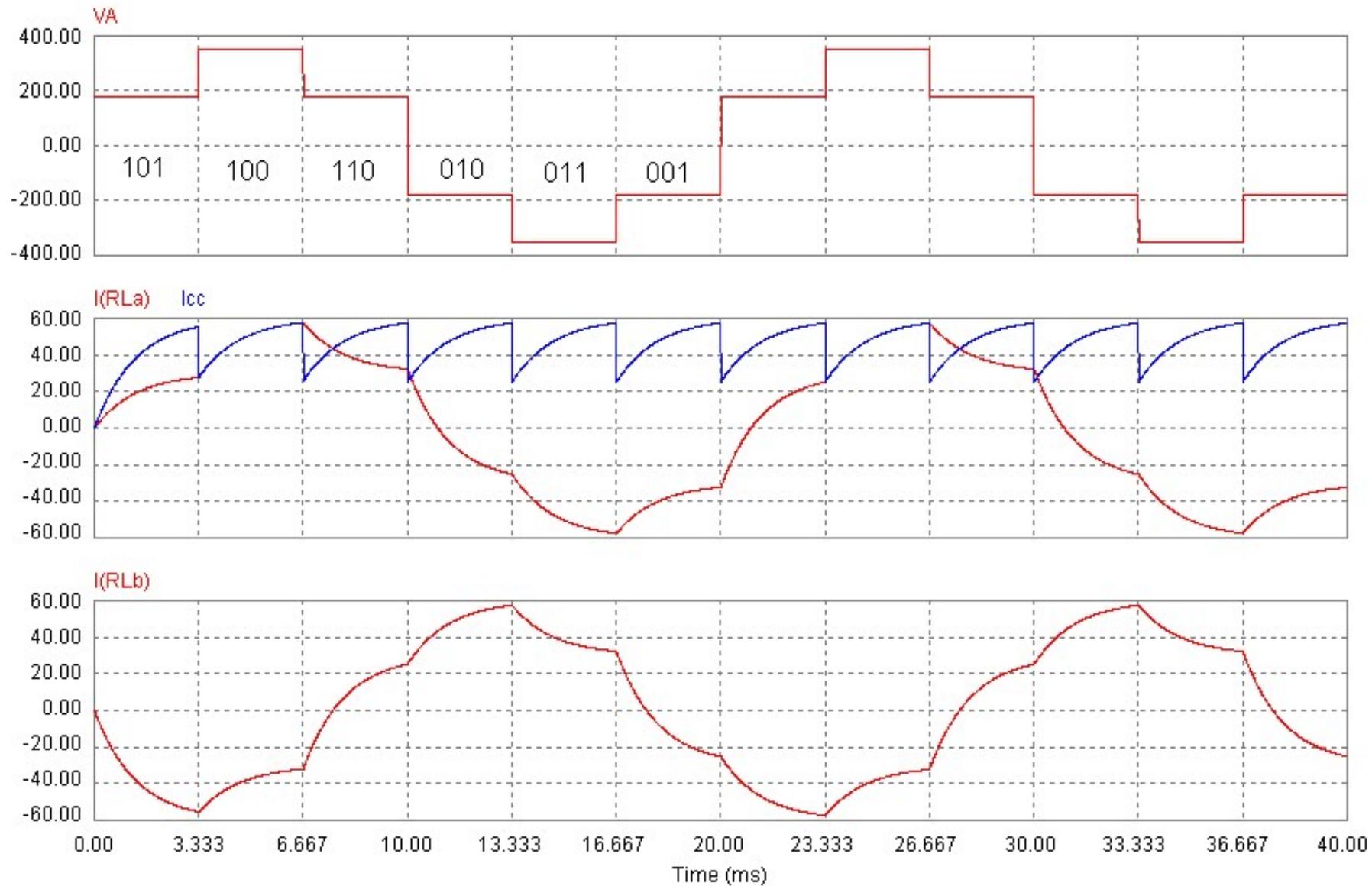
$$\begin{array}{l} S_A = 1 \\ S_B = 0 \\ S_C = 1 \\ (101) \end{array} \quad \begin{array}{l} v_{AN} = \frac{V_{dc}}{3} (2 - 0 - 1) = \frac{V_{dc}}{3} \\ v_{BN} = \frac{V_{dc}}{3} (-1 + 0 - 1) = -\frac{2V_{dc}}{3} \\ v_{CN} = \frac{V_{dc}}{3} (-1 - 0 + 2) = \frac{V_{dc}}{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} v_{ON} = -\frac{V_{dc}}{6} [2(1 + 0 + 1) - 3] = \\ = -\frac{V_{dc}}{6} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} S_A = 1 \\ S_B = 0 \\ S_C = 0 \\ (100) \end{array} \quad \begin{array}{l} v_{AN} = \frac{2V_{dc}}{3} \\ v_{BN} = -\frac{V_{dc}}{3} \\ v_{CN} = -\frac{V_{dc}}{3} \end{array} \quad \begin{array}{l} v_{ON} = \frac{V_{dc}}{6} \end{array}$$

INVERTITORE TRIFASE: TENSIONI STELLATE



INVERTITORE TRIFASE: CORRENTI



INVERTITORE TRIFASE

La tensione di fase ha la forma di una gradinata con sei valori; da qui il nome di invertitore di tensione a sei gradini (six-step). Si dice anche che l'invertitore funziona ad onda quadra a causa del tipo di temporizzazione degli interruttori (che produce l'andamento ad onda quadra delle tensioni tra fase e centro dell'alimentazione).

La tensione tra il centro stella del carico e il punto di mezzo dell'alimentazione è un'onda quadra con frequenza tre volte la fondamentale e ampiezza $V_{dc}/6$.

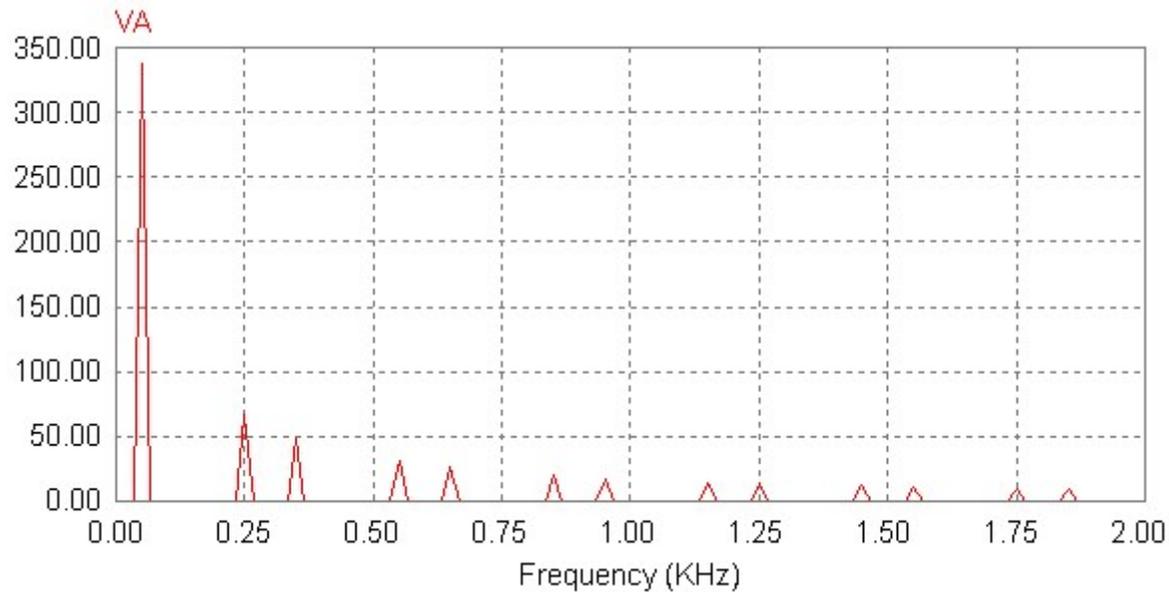
$$v_{AN} = \frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{2} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \dots \right]$$

$$v_{ON} = -\frac{4}{\pi} \frac{V_{dc}}{6} \left[\sin 3\omega t + \frac{1}{3} \sin 9\omega t \dots \right]$$

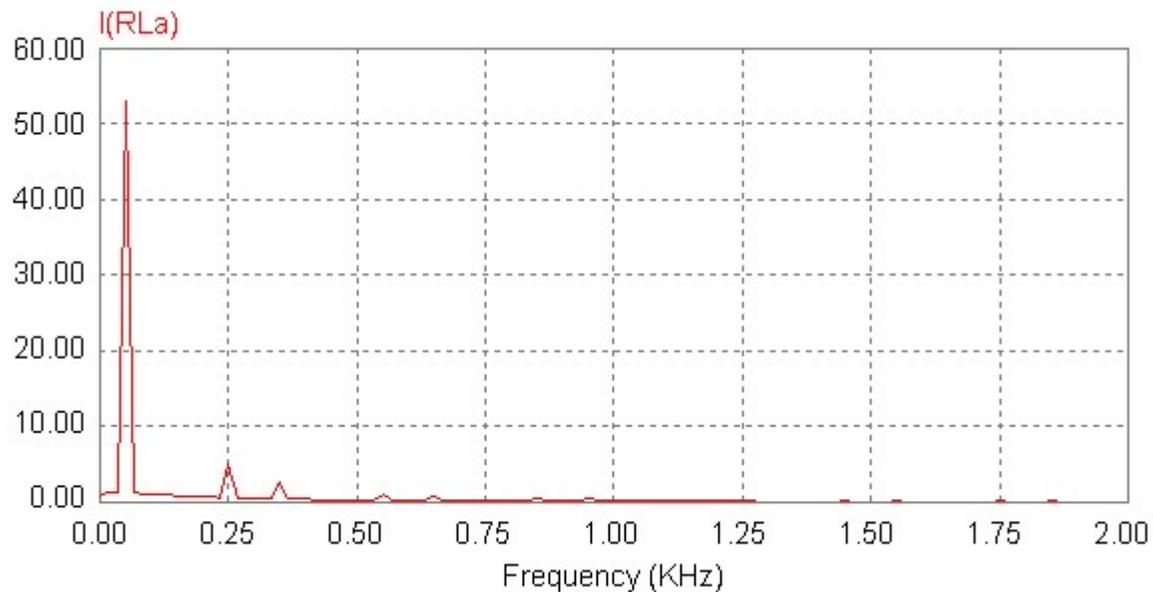
Le correnti di fase hanno un andamento coerente con le corrispondenti tensioni di fase. Per esempio si osserva che la corrente della fase A della figura è costituita da tratti di esponenziali i cui andamenti dipendono (oltre che dal tipo di carico) dal "salto" del valore della tensione di fase in corrispondenza dell'inizio di ogni intervallo di 60° .

L'andamento della corrente del circuito in cc può essere giustificato osservando che, considerato un qualsiasi intervallo di 60° , la configurazione degli interruttori è tale che ad uno dei due poli, positivo o negativo del circuito in cc, è collegata una sola fase, mentre le altre due sono collegate assieme al polo di polarità opposta. Perciò, nell'intervallo di 60° considerato, la corrente del circuito in cc coincide con la corrente di quell'unica fase.

INVERTITORE TRIFASE: ARMONICHE



Contenuto armonico della tensione di fase sul carico a stella



Contenuto armonico della corrente di fase assorbita dal carico a stella