

Roronoa Lillo (lillo)

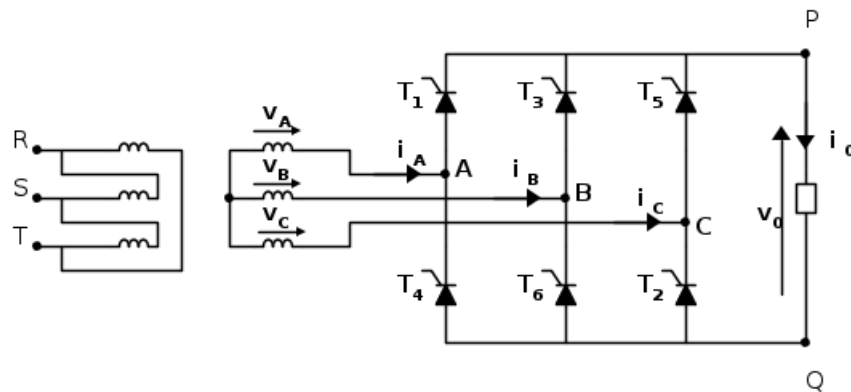
RADDRIZZATORI, ATTO "TRIFASE A PONTE"

18 November 2011

Il raddrizzatore trifase a ponte si presenta come il più aulico delle configurazioni elementari. Parente stretto del [monofase a ponte](#), presenta diversi vantaggi rispetto a quest'ultimo che analizzeremo nel seguito.

Considerazioni generali

Il circuito che lo rappresenta è presto disegnato:



dove i **tiristori** si presentano a coppie, ma questa volta disposti su tre gambe. Richiamando le [nozioni fondamentali](#) delle tensioni al secondario del **trasformatore** cerchiamo di capire come tale strumento riesca nel suo intento. Risulta evidente che il corretto funzionamento è assicurato quando due tiristori sono accesi, ma quali?

Ipotizziamo quindi che T_1 sia acceso e quindi pronto a condurre.

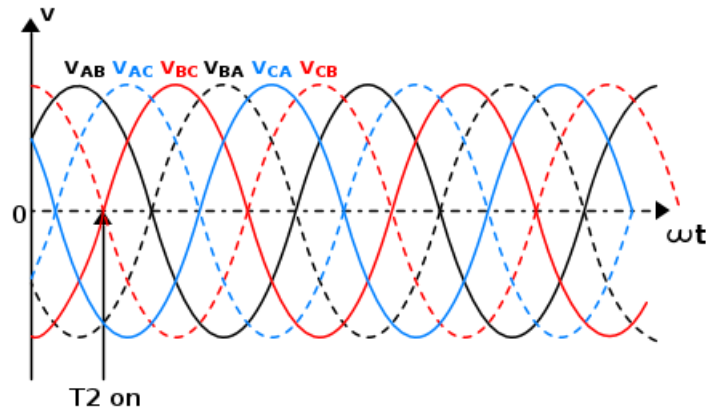
La chiusura della maglia che permetterebbe il passaggio di corrente attraverso il carico può avvenire se uno tra T_6 e T_2 è acceso.

Inutile dire (anche se lo sto dicendo...) che l'accensione contemporanea di due tiristori appartenenti alla stessa gamba chiuderebbe una maglia priva di bipoli attivi (avremo casi particolari in cui questo accade, ma ce ne occuperemo dopo). Dobbiamo quindi stabilire le 6 coppie di tiristori che si troveranno a condurre contemporaneamente, e visto che ci troviamo, cerchiamo di capire quanto vale la

tensione sul carico per ogni coppia in conduzione, e la tensione ai capi dei tiristori rimanenti:

$$\begin{aligned}
 T_1 T_6 \text{ on} \rightarrow \begin{matrix} A \equiv P \\ B \equiv Q \end{matrix} \rightarrow v_0 = v_{AB} \rightarrow \begin{matrix} v_{T_2} = v_{QC} = v_{BC} \\ v_{T_3} = v_{BP} = v_{BA} \\ v_{T_4} = v_{QA} = v_{CA} \\ v_{T_5} = v_{CP} = v_{CA} \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Sulla base di quanto scritto (ricordo che considero il tiristore un cortocircuito durante la conduzione), e risolvendo il buon vecchio andamento temporale delle tensioni concatenate:



NOTA: non sono indicati gli angoli di polarizzazione nell'andamento per chiarezza dello stesso

si intuisce che il tiristore T_2 sia il primo polarizzato positivamente. Tale polarizzazione *spegne* il tiristore precedentemente in conduzione, ovviamente mi riferisco a quello situato nel medesimo semi-ponte di T_2 , ovvero T_6 . Quindi a partire da $\frac{\pi}{2}$ (angolo in cui v_{BC} diviene positiva), la conduzione è affidata alla coppia T_1 e T_2 :

$$\begin{aligned}
 T_1 T_2 \text{ on} \rightarrow \begin{matrix} A \equiv P \\ C \equiv Q \end{matrix} \rightarrow v_0 = v_{AC} \rightarrow \begin{matrix} v_{T_3} = v_{BP} = v_{BA} \\ v_{T_4} = v_{QA} = v_{CA} \\ v_{T_5} = v_{CP} = v_{CA} \\ v_{T_6} = v_{QB} = v_{CB} \end{matrix}
 \end{aligned}$$

La prima tensione che diviene positiva durante la conduzione di questa coppia è v_{BA} , a $\frac{5}{6}\pi$, che innesca T_3 , il quale commuta ovviamente T_1 . Vi risparmio lo schema e andiamo avanti:

$$\begin{array}{l}
 v_{T_1} = v_{AP} = v_{AB} \\
 T_3 T_2 \text{ on} \rightarrow \begin{array}{l} B \equiv P \\ C \equiv Q \end{array} \rightarrow v_0 = v_{BC} \rightarrow \begin{array}{l} v_{T_4} = v_{QA} = v_{CA} \\ v_{T_5} = v_{CP} = v_{CB} \\ v_{T_6} = v_{QB} = v_{CB} \end{array}
 \end{array}$$

Sarà ora T_4 a innescarsi a $\frac{7}{6}\pi$ diventando positiva v_{CA} per prima, commutando T_2 :

$$\begin{array}{l}
 v_{T_1} = v_{AP} = v_{AB} \\
 T_3 T_4 \text{ on} \rightarrow \begin{array}{l} B \equiv P \\ A \equiv Q \end{array} \rightarrow v_0 = v_{BA} \rightarrow \begin{array}{l} v_{T_2} = v_{QC} = v_{AC} \\ v_{T_5} = v_{CP} = v_{CB} \\ v_{T_6} = v_{QB} = v_{AB} \end{array}
 \end{array}$$

Ora T_5 commuterà T_3 a $\frac{3}{2}\pi$:

$$\begin{array}{l}
 v_{T_1} = v_{AP} = v_{AC} \\
 T_5 T_4 \text{ on} \rightarrow \begin{array}{l} C \equiv P \\ A \equiv Q \end{array} \rightarrow v_0 = v_{CA} \rightarrow \begin{array}{l} v_{T_2} = v_{QC} = v_{AC} \\ v_{T_3} = v_{BP} = v_{BC} \\ v_{T_6} = v_{QB} = v_{AB} \end{array}
 \end{array}$$

A $\frac{11}{6}\pi$ si accende T_6 che spegne T_4 :

$$\begin{array}{l}
 v_{T_1} = v_{AP} = v_{AC} \\
 T_5 T_6 \text{ on} \rightarrow \begin{array}{l} C \equiv P \\ B \equiv Q \end{array} \rightarrow v_0 = v_{CB} \rightarrow \begin{array}{l} v_{T_2} = v_{QC} = v_{BC} \\ v_{T_3} = v_{BP} = v_{BC} \\ v_{T_4} = v_{QA} = v_{BA} \end{array}
 \end{array}$$

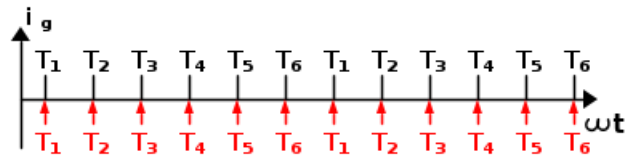
Giunti a $\frac{13}{6}\pi$ è evidente che ritornerà a condurre la coppia T_1 e T_6 . E il giretto ricomincia. Ecco spiegata la strana successione numerica data ai tiristori nel circuito: sono stati numerati in ordine di accensione, ognuna delle quali avviene 60° dopo la precedente.

Se non vi siete persi le puntate precedenti, da qualche parte ho accennato di due tipi di conduzione da parte dei raddrizzatori monofase a ponte: *continua* e *non*. Nel monofase ho analizzato i casi di conduzione continua in quanto maggiormente reali e applicativi all'atto pratico. Stessa considerazione qui. Di seguito analizzeremo 3 casi di maggiore interesse per avere un quadro più chiaro.

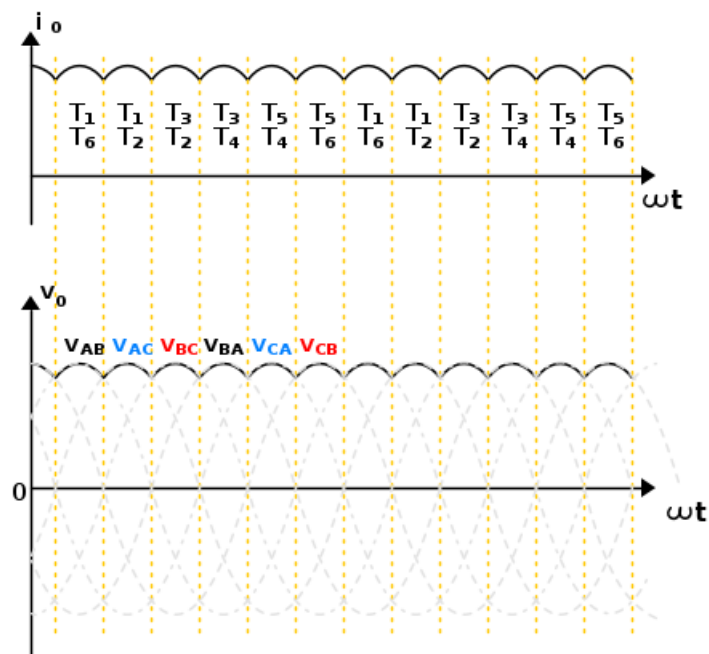
Angoli d'innescio

$\alpha=0^\circ$

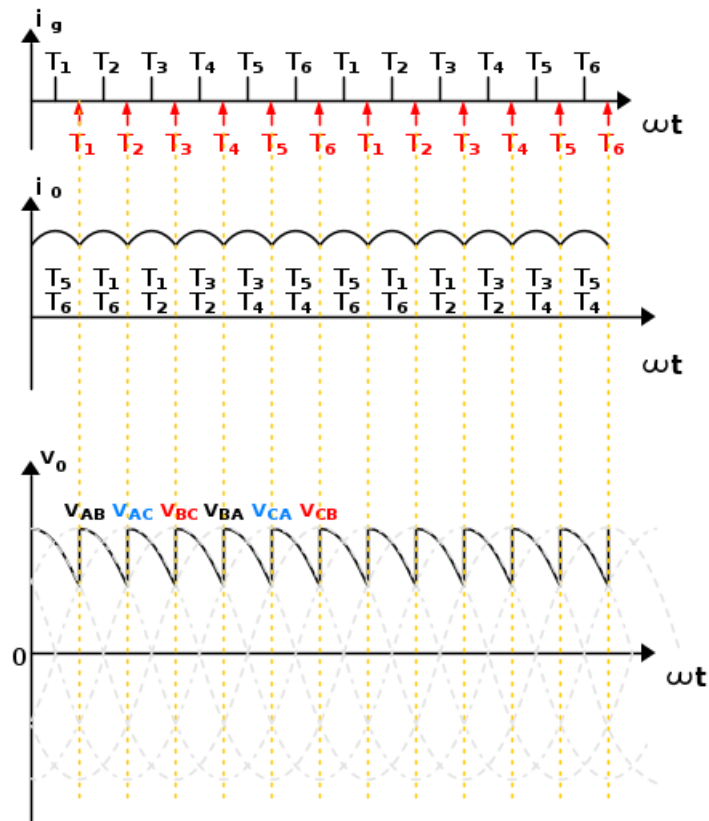
Quanto detto nell'introduzione è sufficiente a capire la sequenza di inneschi qui sotto riportata:

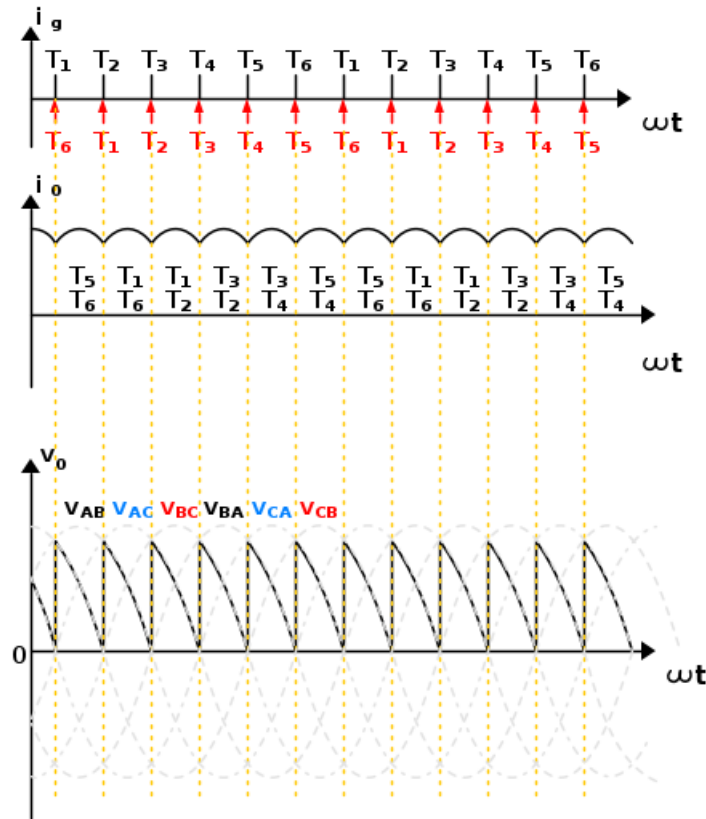


In nero come al solito gli angoli di polarizzazione positiva e in rosso i loro inneschi, che per $\alpha=0^\circ$ ovviamente coincidono. Non sono segnati nello schema per comodità e comprensione dello stesso, ma i loro valori sono stati ampiamente determinati. Senza perderci in chiacchiere, in quanto prevedo già di dilungarmi troppo, corrente e tensione ai capi del carico:



$$\alpha = 30^\circ$$



$\alpha = 60^\circ$ 

Qualitativamente parlando l'angolo α caratterizza la forma d'onda di tensione sul carico. Cosa che abbiamo avuto modo di vedere anche nei raddrizzatori precedenti. Ometto l'andamento della tensione sul generico tiristore in quanto giungeremmo alla solita conclusione di trovare componenti con tensione di break down superiore a $\sqrt{6}V$, onde evitare la rottura dello stesso.

Calcolo del valor medio di tensione per un generico α

Proprio come sospettavate ora ci tocca qualche integrale:

$$V_m = \frac{1}{T_0} \int_{(T_0)} v_0 dt = \frac{1}{T_0} \int_{(T_0)} v_{AB} dt = \frac{1}{\omega T_0} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sqrt{6}V \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d(\omega t)$$

risolviamo l'integrale e giungiamo alla seguente notazione:

$$V_m = \frac{\sqrt{6}V}{\omega T_0} \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} = \frac{\sqrt{6}V}{\omega T_0} \left[-\cos\left(\frac{2}{3}\pi + \alpha\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

ancora solita rispolverata di trigonometria, in particolare formule di addizione e sottrazione, ci permettono di riscrivere l'espressione fra quadre:

$$V_m = \frac{\sqrt{6}V}{\omega T_0} \left(\cos \frac{\pi}{3} \cos \alpha - \sin \frac{\pi}{3} \sin \alpha - \cos \frac{2}{3}\pi \cos \alpha + \sin \frac{2}{3}\pi \sin \alpha \right)$$

$$V_m = \frac{\sqrt{6}V}{\omega T_0} \left(\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha + \frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right) = \frac{\sqrt{6}V}{\omega T_0} \cos \alpha$$

svincoliamoci adesso dalla pulsazione (e quindi dalla frequenza), effettuando le ben note sostituzioni:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow \omega T = 2\pi$$

$$T = 6T_0 \rightarrow 6\omega T_0 = 2\pi \rightarrow \omega T_0 = \frac{\pi}{3}$$

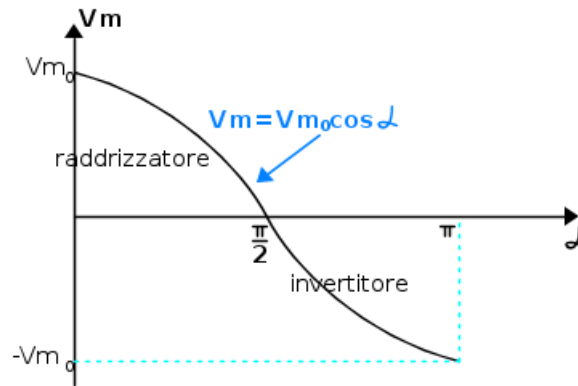
per ottenere:

$$V_m = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos \alpha$$

valore che risulta essere esattamente il doppio di quello trovato per il raddrizzatore trifase a stella.

Caratteristica di controllo

Non mi risulta di aver mai accennato a quest'argomento, aspettate che controllo..... no, non l'ho fatto :) Abbiamo ampiamente messo in evidenza come il valore di α si ripercuota sul valor medio di tensione sul carico, a tal punto da poterla rendere negativa. Il grafico che riporto, dove abbiamo V_m in funzione di α , è detto appunto **caratteristica di controllo** del raddrizzatore:



con:

$$V_{m0} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi}$$

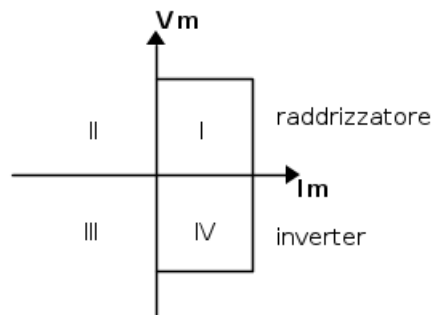
Il grafico mette in evidenza come la tensione ai capi del carico possa diventare negativa, e questo ci permette di individuare due stati di funzionamento:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \rightarrow \begin{matrix} V_M > 0 \\ I_M > 0 \end{matrix} \rightarrow P > 0$$

dove il carico si comporta da utilizzatore.

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \rightarrow \begin{matrix} V_M < 0 \\ I_M > 0 \end{matrix} \rightarrow P < 0$$

mentre adesso da generatore. NB: Il funzionamento da generatore è possibile **solo** se il carico è attivo! Quindi in funzione di α il raddrizzatore si interfaccia diversamente al flusso di potenza. Questa bi-funzionalità può essere messa maggiormente in evidenza adoperando il cosiddetto schema a quadranti:

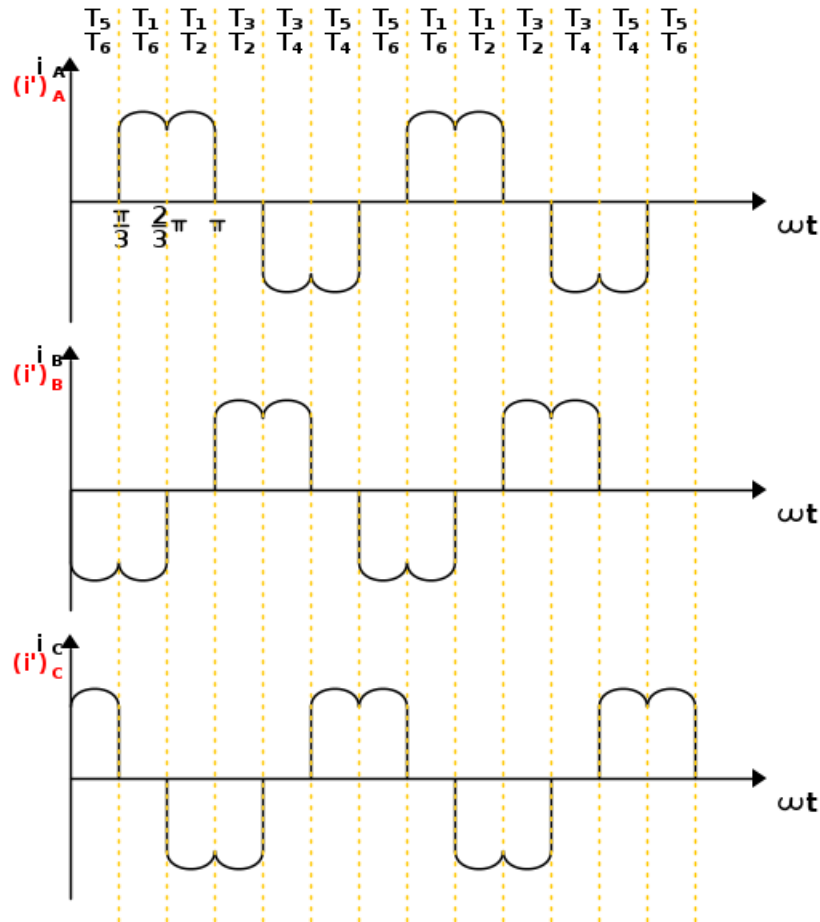


Le correnti richiamate in rete

Facendo riferimento alla figura iniziale, l'analisi delle forme d'onda delle correnti al secondario del trasformatore (e quindi anche a quelle del primario, in quanto proporzionali alle prime a meno di un fattore di scala), può essere studiata osservando in quali rami del raddrizzatore tali correnti confluiscono. Consideriamo ad esempio la corrente i_A : questa *arriva* nel ramo contenente T_1 e T_4 e noi dobbiamo valutare il suo valore quando è acceso T_1 , quando è acceso T_4 , e infine quando entrambi sono spenti. Estendiamo poi lo stesso ragionamento alle due gambe del raddrizzatore rimanenti. Tale analisi ci porta alle seguenti conclusioni:

$$\begin{array}{lll}
 T_1 \text{ on} \rightarrow i_A = i_0 & T_3 \text{ on} \rightarrow i_B = i_0 & T_5 \text{ on} \rightarrow i_C = i_0 \\
 i_A \rightarrow T_4 \text{ on} \rightarrow i_A = -i_0 & i_B \rightarrow T_6 \text{ on} \rightarrow i_B = -i_0 & i_C \rightarrow T_2 \text{ on} \rightarrow i_C = -i_0 \\
 T_1, T_4 \text{ off} \rightarrow i_A = 0 & T_3, T_6 \text{ off} \rightarrow i_B = 0 & T_5, T_2 \text{ off} \rightarrow i_C = 0
 \end{array}$$

In funzione di quanto scritto, possiamo disegnare le forme d'onda di queste correnti:



NB: caso in cui $\alpha=30^\circ$.

i'_A , i'_B e i'_C correnti richiamate al primario

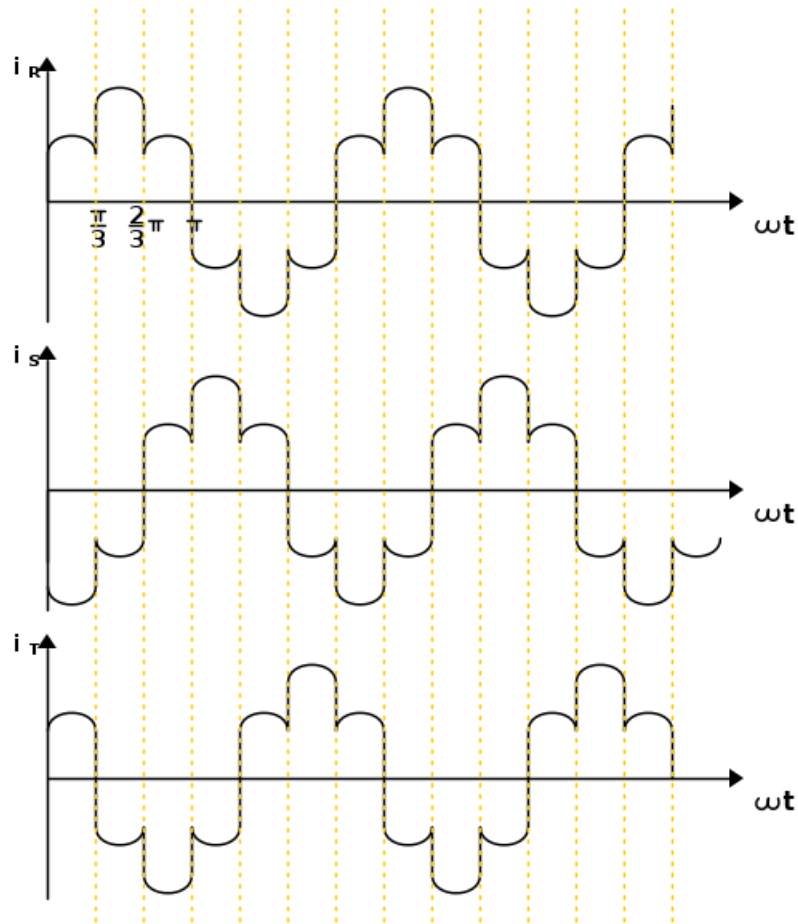
Tali correnti non sono sinusoidali, ma sono periodiche alternate, e isofrequenziali alla tensione di rete. Questo rappresenta il primo vantaggio rispetto al raddrizzatore trifase a stella, dove le correnti richiamate a primario del trasformatore avevano andamenti di [questo](#) tipo. Ma queste correnti circolano nel triangolo del primario, quindi se vogliamo le correnti di linea basta conoscere un po di elettrotecnica:

$$i_R = i'_A - i'_B$$

$$i_S = i'_B - i'_C$$

$$i_T = i'_C - i'_A$$

e subito gli andamenti, ricavati *visivamente*:



Vi è un evidente contenuto armonico in queste correnti richiamate in linea, ma di questo parleremo in un nuovo appuntamento.

Come al solito un particolare ringraziamento a admin per eventuali correzioni e per l'immagine principale. Non è che per caso anche il gran maestro si sta dando ai manga? :)

[continua...](#)

Bibliografia

- Appunti di elettronica di potenza.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Lillo:n-a-3>"