Roronoa Lillo (lillo)

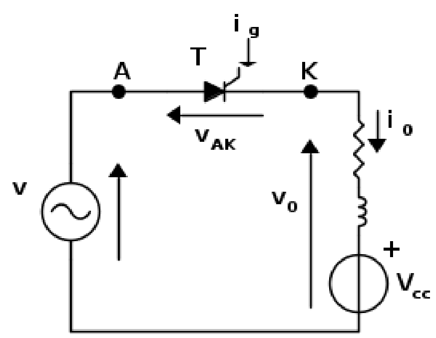
RADDRIZZATORI, ATTO SECONDO

14 October 2011

Ben tornati a tutti. Avevamo lasciato in sospeso il discorso ***qui***, dove avevo introdotto i primi elementari raddrizzatori, su di un carico passivo. Riprendiamo l'argomento considerando un **raddrizzatore elementare con carico attivo**.

Raddrizzatore Elementare con Carico Attivo

Pensiamo ad esempio ad un avvolgimento di **armatura** di una macchina in corrente continua



con tensione di alimentazione ovviamente $v = \sqrt{2}V \sin \omega t$.
La presenza del generatore in continua V_{CC} non cambia l'approccio da utilizzare per l'analisi del circuito. Scriviamo infatti l'equazione alla maglia elementare:

$$v = v_{AK} + v_0$$

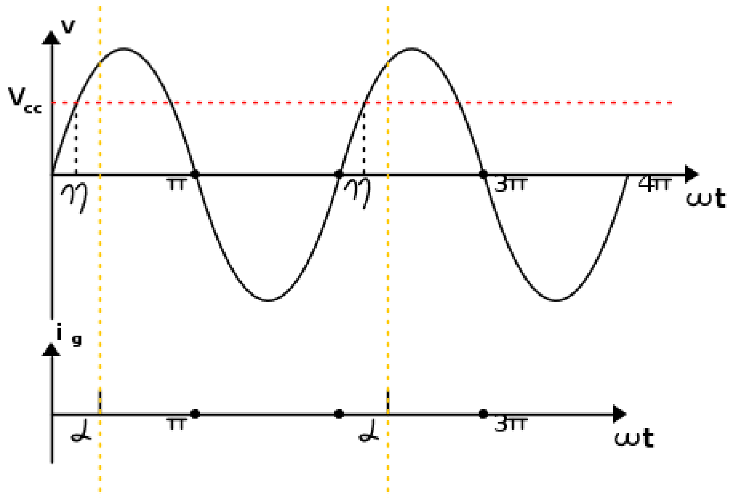
e con v_0 che questa volta ha la seguente espressione:

$$v_0 = Ri_0 + L\frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t} + V_{cc}$$

Il tiristore risulta polarizzato positivamente, e quindi "disponibile" all'impulso di gate, quando ovviamente la tensione ai suoi capi è maggiore di zero:

$$v_{AK} > 0 \rightarrow v - v_0 > 0$$

La presenza del generatore di tensione continua, ci impone un vincolo, infatti il tiristore sarà polarizzato positivamente quando il valore istantaneo di v supererà il valore fisso di v_{CC}, disegniamo un bel grafico che rende l'idea di quanto scritto:



nel grafico si è messa in evidenza la presenza dell'angolo η, ovvero l'angolo in corrispondenza del quale valore istantaneo di v e v_{CC} sono uguali. Prima di tale angolo il tiristore è ovviamente spento e non vi è circolazione di corrente nel circuito. Possiamo individuare l'angolo η, considerando che per la continuità delle variabili la corrente i_0 risulterà nulla nell'istante in cui $\omega t = \eta$. Fatta questa considerazione, e trascurando la caduta sul tiristore la LKT diventa:

$$v = v_0$$

$$\sqrt{2}V \sin \omega t = V_{cc}$$

che in corrispondenza di η diventa:

$$\sqrt{2}V \sin \eta = V_{cc}$$

$$\eta = \arcsin \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V}$$

Ovviamente possiamo innescare con successo il tiristore se:

$$\alpha > \eta \to \alpha > \arcsin \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V}$$

innescato il tiristore, finalmente nel nostro circuito comincia a circolare corrente, e questo mi *costringe* a riscrivere l'equazione alla maglia:

$$\sqrt{2}V\sin\omega t = Ri_0 + L\frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t} + V_{cc}$$

Allora: abbiamo due azioni forzanti(v e V_{CC}), problema risolvibile applicando la sovrapposizione degli effetti. Attenzione però, per poter applicare la sovrapposizione dobbiamo fare un'ipotesi sulla linearità del circuito. Infatti, se come abbiamo detto, stiamo alimentando un avvolgimento di una macchina in continua, l'induttanza di tale avvolgimento non è costante, ma varia in base al punto di lavoro della macchina. Senza dilungarmi troppo sulla questione, aggiungo che solitamente si tende a far lavorare le macchine sul ginocchio della curva di magnetizzazione, e questo in prima approssimazione ci permette di considerare costante il valore dell'induttanza, e quindi di considerare il circuito lineare.
Assodato questo, possiamo affermare che i_0 sarà la somma di due contributi:

$$i_o = i_v + i_{V_{cc}}$$

con ovvio significato dei pedici:

i_v: corrente dovuta al contributo di v;

$i_{V_{cc}}$: corrente dovuta al contributo di V_{CC};

le quali risulteranno:

$$i_v = A_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sqrt{2}V}{Z}\sin(\omega t - \varphi)$$

$$i_{V_{cc}} = A_2 e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{V_{cc}}{R}$$

La corrente sarà la somma dei due contributi:

$$i_o = i_v + i_{V_{cc}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\sqrt{2}V}{Z}\sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_{cc}}{R}$$

Dove abbiamo conglobato in A la somma delle due singole costanti A_1 e A_1. Il calcolo della A avviene sempre considerando le condizioni iniziali: nell'istante dell'innesco ($\omega t = \alpha$), la corrente sarà comunque nulla:

$$0 = Ae^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} + \frac{\sqrt{2}V}{Z}\sin(\alpha - \varphi) - \frac{V_{cc}}{R}$$

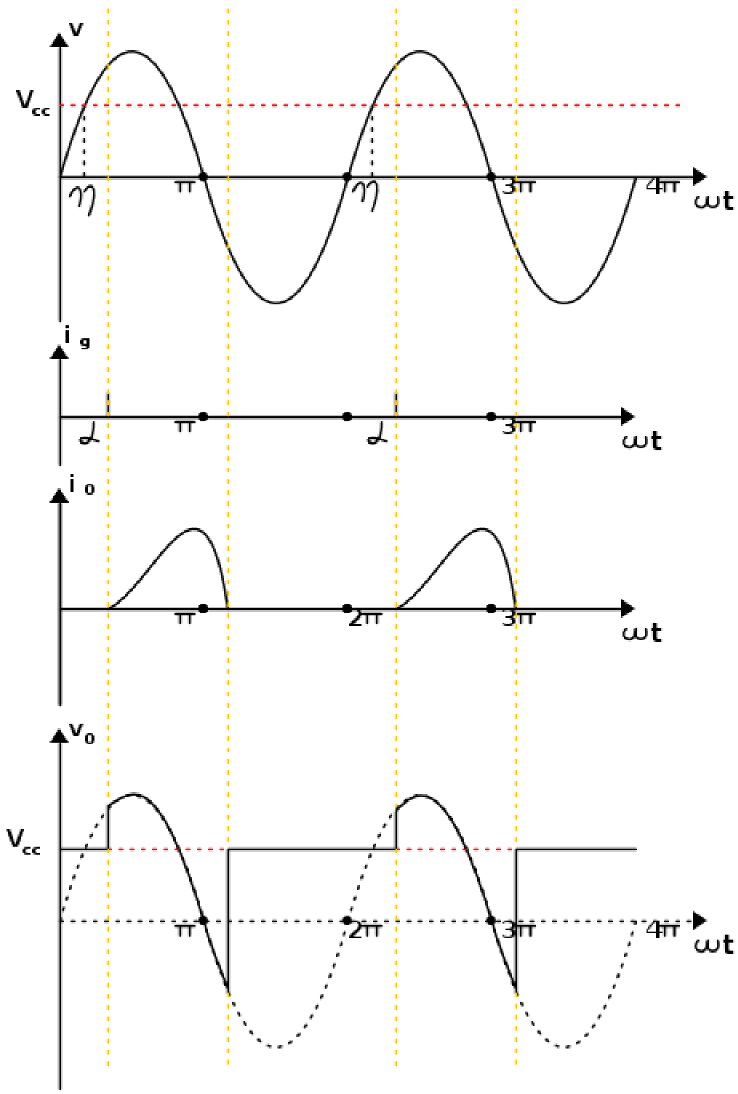
$$A = [-\frac{\sqrt{2}V}{Z}\sin(\alpha - \varphi) + \frac{V_{cc}}{R}]e^{\frac{\alpha}{\omega\tau}}$$

Possiamo ora scrivere l'espressione completa della corrente:

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V}{Z}\left\{[\sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_{cc}}{R}\frac{Z}{\sqrt{2}V}] - [\sin(\alpha - \varphi) - \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V}\frac{Z}{R}]e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\omega \tau}}\right\}$$

La seguente espressione non solo rappresenta il caso di carico attivo, ma già come avevo anticipato nell'articolo precedente, si tratta di un espressione generale; infatti se riconsideriamo il caso di un carico RL, basta imporre nell'equazione appena scritta $V_{CC} = 0$. Lascio al lettore la banale dimostrazione ;)

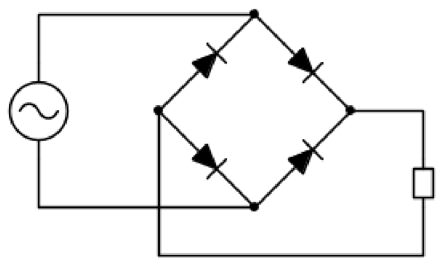
Visualizziamo gli andamenti temporali delle grandezze in gioco:



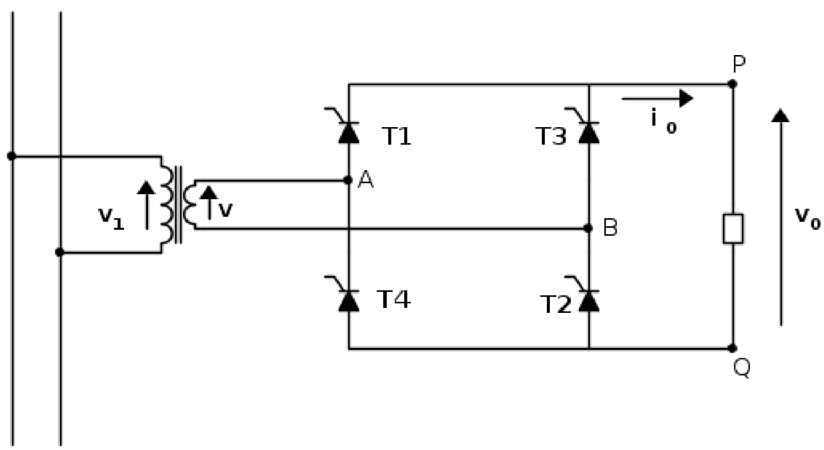
L'andamento della tensione sul carico, è ricavabile come nei casi precedenti, ma notiamo una particolarità: quando la corrente è nulla, la tensione sul carico non va a zero, ma si assesta al valore costante di V_{CC}.

Raddrizzatore Monofase a Ponte Interamente Controllato

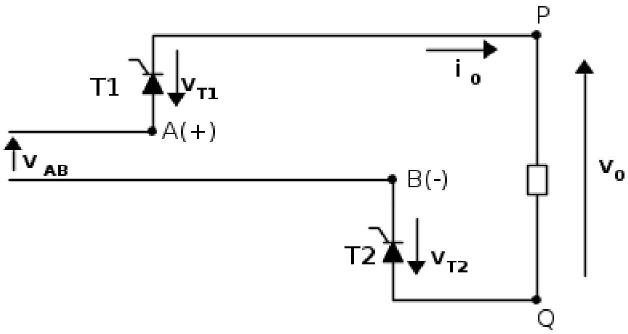
Le forme d'onda della corrente ricavate fin'ora, possono non essere adeguate per l'alimentazione di alcuni carichi. E' vero, abbiamo ottenuto correnti unidirezionali, ma il ripple è ancora molto alto. Qualche amico elettronico potrebbe cominciare a protestare non vedendo almeno un condensatore di livellamento, ma questo non è il nostro caso, in quanto il suo inserimento modificherebbe la costante di tempo del circuito. Vediamo quindi un'altra applicazione, che molti conoscono come il Ponte di Graetz:



Per la nostra analisi, utilizzeremo una rappresentazione diversa, ma niente paura, la sostanza non cambia ;):



Abbiamo introdotto uno schema più completo, nel quale notiamo anche la presenza di un trasformatore, e non è un caso. Il trasformatore è interposto tra linea di alimentazione e raddrizzatore, e il suo compito è, oltre ad adattare la tensione di rete a quella richiesta dal raddrizzatore ove richiesto, quello di isolare galvanicamente il corpo raddrizzatore + carico dalla rete di potenza, quindi può trattarsi anche di un trasformatore d'isolamento. Detto questo, partiremo quindi con l'analisi dal secondario, che risulta collegato ai rami contenenti i tiristori, rami che per l'occasione prendono in nome di *gambe*. L'ordine con cui sono stati numerati i tiristori non è casuale, e capiremo presto il perchè. La tensione al secondario è rappresentata dalla solita solita onda di tipo sinusoidale. Per capire il funzionamento del ponte è bene analizzare le maglie interessate da circolazione di corrente durante la semionda positiva e negativa. Considerando infatti la semionda positiva, la maglia percorsa da la corrente risulta essere quella contenente i tiristori T_1 e T_2, in quanto polarizzati positivamente:



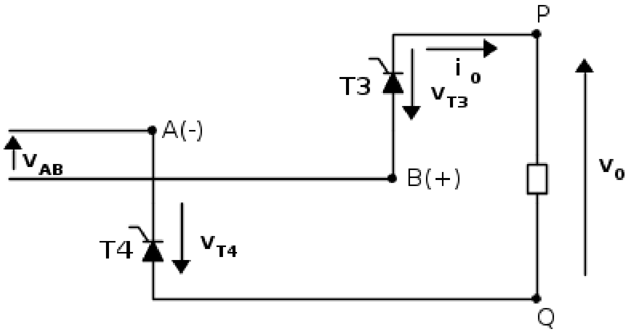
Scriviamo l'equazione di tale maglia:

$$v_{AB} = v_{T1} + v_0 + v_{T2}$$

dove, trascurando come al solito le cadute sui tiristori in quanto piccole, in prima approssimazione rispetto alle grandezze in gioco, ricaviamo:

$$v_0 \cong v_{AB}$$

Durante la semionda negativa, saranno T_3 e T_4 a polarizzarsi positivamente andando in conduzione; la maglia interessata sarà:



La LKT ci da:

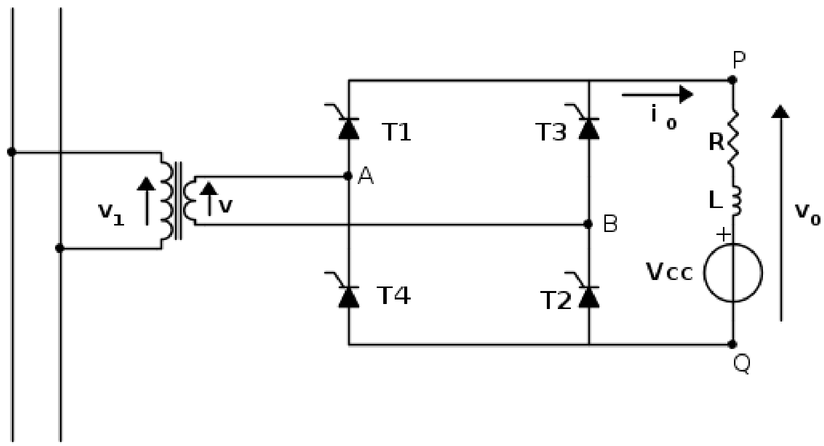
$$v_{AB} + v_{T3} + v_0 + v_{T4} = 0$$

che trascurando le cadute sui tiristori diventa:

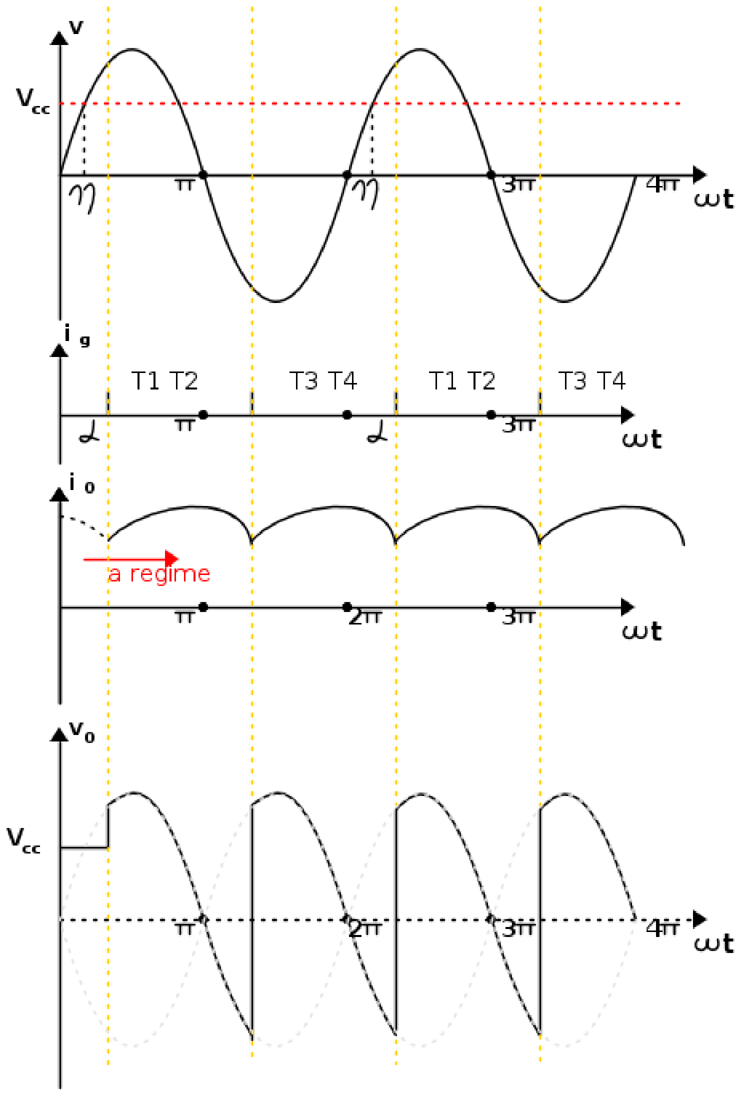
$v_0 \cong -v_{AB}$

E' abbastanza evidente come in entrambi i casi la corrente attraversi il carico nello stesso verso. Comincia adesso ad avere un senso la numerazione data ai tiristori, in quanto T_1 e T_2 verranno innescati contemporaneamente, seguiti da T_3 e T_4, che cominceranno a condurre esattamente 180° dopo. Prima di proseguire con le analisi delle forme d'onda introduciamo l'angolo di conduzione γ, in quanto, il suo valore determina due particolari sottocasi: $\gamma < \pi$: conduzione discontinua $\gamma > \pi$: conduzione continua

Ai fini pratici, una conduzione il più continua possibile, sarebbe l'ideale, ecco perché mi limito ad analizzare il caso di $\gamma > \pi$, e anche per non annoiarvi ulteriormente. Limito ulteriormente lo sproloquio considerando il caso di carico attivo. Il circuito da analizzare quindi risulta il seguente:



Ancora una volta, una carrellata di diagrammi temporali valgono più di mille parole:



Il particolare caso di conduzione continua prevede che vi siano istanti in cui tutti e 4 i tiristori siano in conduzioni. Durante tali istanti avviene il fenomeno della **commutazione**, del quale spero di occuparmi in seguito. Per il momento mi limito a sottolineare che considereremo l'angolo di commutazione pari a 0, si parla in questo caso di commutazione ideale. L'espressione della corrente sarà la stessa, anzi approfitto della questione per approfondire un commento fatto nel precedente articolo: l'equazione differenziale associata al circuito non è cambiata, in ogni semiperiodo sostanzialmente il circuito percorso dalla corrente risulta sempre lo stesso, l'unica differenza sta nel fatto che in questo tipo di raddrizzatori, anche durante la semionda negativa di tensione vi è circolazione. Un'altra differenza consiste nel fatto che adesso abbiamo due tiristori in serie, questo aumenterebbe la c.d.t, ma in prima approssimazione resta comunque trascurabile. L'espressione analitica della corrente, rappresentata da un equazione lineare, è riferita al periodo T_0. Dal grafico è evidente come la forma d'onda della corrente comincia sempre più a livellarsi, mostrando comunque un certo *ripple*. L'ondulazione dipende fortemente dall'induttanza del carico. Avremmo una corrente perfettamente continua nel momento in cui L tendesse ad infinito. Per questioni di versatilità risulterebbe alquanto complicato agire su tale parametro, ma, come vedremo, risulta più conveniente agire su un altro parametro, ovvero sul **numero di impulsi**:

$$n_p = \frac{T}{T_0}$$

dove T è il periodo delle grandezze in ingresso, mentre T_0 quello delle grandezze in uscita. L'induttanza garantisce la continuità della corrente, ma non della tensione in uscita, cosa invece che farebbe un condensatore.

Calcolo della tensione media ai capi del carico

Possiamo calcolare la tensione media ai capi del carico, e per farlo partiremo dall'espressione del valor medio di un segnale durante il suo periodo.

$$V_m = \frac{1}{T_0}\int_{(T_0)} v_0 dt$$

Anche se stiamo analizzando il caso di carico attivo e conduzione continua, l'analisi del valor medio di tensione parte sempre da qui, per ogni caso. Sviluppiamo quindi il nostro integrale:

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

Gli estremi di integrazioni sono angoli espressi in radianti, mentre noi stiamo integrando rispetto al tempo. Ovviamo a questo dividendo per ω e deriviamo rispetto a ωt:

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

e risolvendo quest'ultimo integrale otteniamo:

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

$$= \frac{\sqrt{2}V}{\omega T_0}\left[\cos\alpha + \cos\alpha\right] = \frac{2\sqrt{2}V}{\omega T_0}\cos\alpha$$

ora qualche piccola sostituzione:

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

$$T = 2T_0 \to 2\omega T_0 = 2\pi \to \omega T_0 = \pi$$

sostituendo nell'espressione di V_m abbiamo:

$$V_m = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos\alpha = V_{m0} \cos\alpha$$

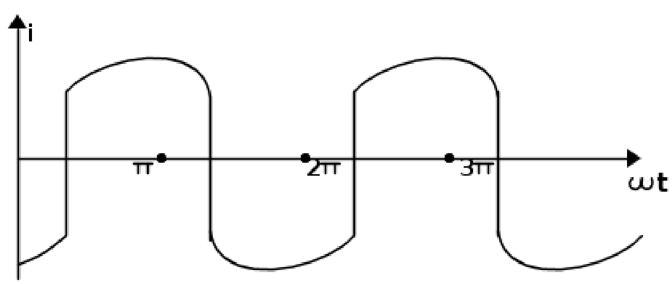
Bene, il valor medio della tensione ai capi del carico dipende esclusivamente dall'angolo d'innesco α Quindi la tensione media sul carico può essere regolata agendo su di esso. L'argomento spero possa essere trattato in seguito analizzando le caratteristiche di controllo del raddrizzatore.

Corrente richiamata al primario

E' molto semplice ricavare tale corrente, in quanto la i, potendo trascurare le c.d.p. sui tiristori, è identica a i_0 in valore assoluto, e il segno dipende dalla coppia di tiristori in conduzione:

$$T_1\ T_2\ \ \text{on} \to i = i_0$$
$$T_3\ T_4\ \ \text{on} \to i = -i_0$$

In realtà questa è la corrente al secondario, ma sappiamo benissimo che quella al primario sarà identica a meno di un fattore di scala, rappresentato dall'inverso del rapporto spire:



E' evidente come tale forma d'onda sia tutt'altro che sinusoidale, ma una buona approssimazione la rende simile a un'**onda quadra**.

Conclusioni

Questa volta penso di aver scritto troppo, e qualcuno si sarà addormentato prima del solito, se così fosse almeno sono stato una buona alternativa a qualche dannoso sonnifero :) Bè, vi lascio, la mia ciurma mi aspetta, ma tornerò.... spero ;)

continua...

Bibliografia

Appunti di elettronica di potenza