

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
• **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Macchine e impianti elettrici 2019/2020

Prof. Vito Calderaro

RELAZIONE 15:

FLAVIO DELLA CALCE 0612401796

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
• **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



• **Specifiche di progetto**

La seguente relazione descrive il funzionamento, la progettazione e un prototipo reale di convertitore AC/DC monofase ad onda intera controllato.

Il convertitore è alimentato da un generatore sinusoidale con valore efficace $V_{eff} = 230V$ e frequenza $f = 50\text{ Hz}$. Il carico che il convertitore alimenterà è costituito da un carico ohmico-induttivo in serie ad una $V_{dc} = 100V$, il carico ohmico induttivo è costituito da un resistore R con resistenza pari a 5Ω in serie ad un Induttore L con induttanza $L \gg R$ (Da scegliere).

Si richiede in particolare, di considerare i vincoli legati al funzionamento delle valvole e sul carico:

- Si descriva il funzionamento del convertitore al variare di f ;
- Si valuti il valore della potenza assorbita dal resistore R e dal generatore di tensione V_{dc} ;
- Si determini il valore dell'angolo α , a partire dal quale i tiristori iniziano a condurre, tale la potenza assorbita dal generatore V_{dc} sia pari a 1000 W ;
- Si proponga un valore di L_{min} tale che la variazione di picco-picco della corrente di carico sia pari a 2 A .

• **Indice**

1. Che cos'è e come funziona un convertitore AC/DC
 - 1.1. Percorso della corrente I_D
 - 1.2. Modalità discontinua
 - 1.3. Modalità continua
2. Trattazione dei quesiti proposti e simulazioni
 - 2.1. Si descriva il funzionamento del convertitore al variare di f ;
 - 2.2. si valuti il valore della potenza assorbita dal resistore R e dal generatore di tensione V_{dc} .
 - 2.3. Si determini il valore dell'angolo α , a partire dal quale i tiristori iniziano a condurre, tale la potenza assorbita dal generatore V_{dc} sia pari a $1000W$.
 - 2.4. si proponga un valore di L_{min} tale che la variazione picco picco della corrente di carico sia pari a 2 A .
3. Bill of Materials e prototipo di convertitore reale.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.

Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.

- **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**

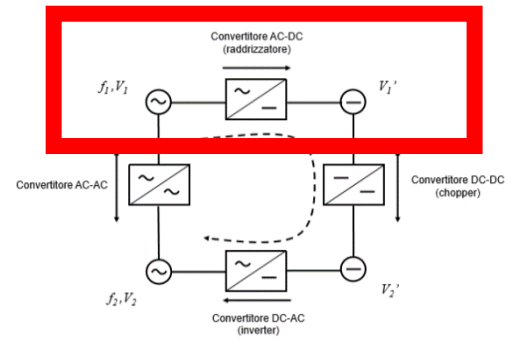


1. Che cos'è e come funziona un convertitore AC/DC

La conversione da corrente alternata in corrente continua è realizzata mediante convertitori AC/DC. Esistono convertitori AC/DC controllati e non controllati, a semionda o a onda intera, in questa trattazione si parlerà del convertitore AC/DC monofase controllato ad onda intera.

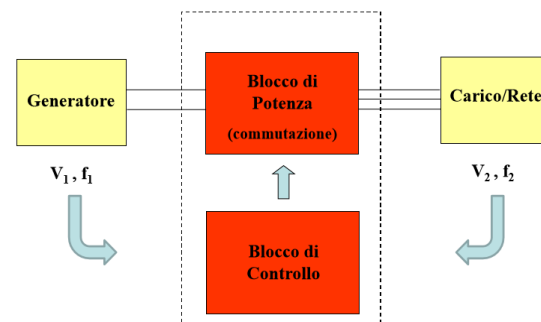
Gli elementi più importanti di un convertitore AC/DC controllato che è anche la differenza principale che li distingue da un convertitore non controllato (detto anche a diodi) sono i tiristori. I tiristori sono dei particolari interruttori di potenza simile ai diodi che possono essere controllati mediante un segnale di controllo che li abilita alla conduzione se polarizzati in diretta, comandando l'accensione del tiristore con un certo ritardo (α) si può variare la tensione in uscita.

Per questo convertitore AC/DC ho scelto come tiristori gli SCR che sono controllati mediante un segnale di corrente impulsiva sul terminale di gate, generato da un circuito esterno.



Un convertitore in generale è formato da tre parti: L'alimentazione che generalmente è costituita da una o più fasi, un blocco di potenza con il suo blocco di controllo (se è controllato) che dipendono dalle fasi dell'alimentazione e dal carico/rete che deve alimentare. In questo caso ho utilizzato come alimentazione un generatore sinusoidale con $V_{eff} = 230V$ a frequenza $f = 50$ Hz. Come Blocco di Potenza ho usato un ponte di Graetz formato da 4 SCR capaci di sopportare tensioni e correnti elevate date dalle specifiche del progetto, mentre come blocco di controllo ho definito due segnali di controllo generati da due generatori impulsivi per controllare l'accensione degli SCR.

Come carico ho utilizzato come da specifiche una $R=5\Omega$, $L \gg R$ e una $V_{dc}=100V$.



Schema di principio di un convertitore di potenza

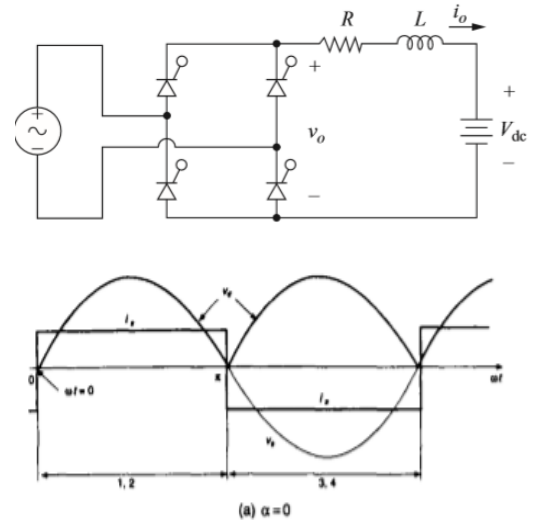
I programmi utilizzati per la simulazione del circuito e per graficare le grandezze di interesse del circuito (V_o e I_o) sono LTSpice e Multisim. LTSpice è stato utilizzato principalmente per graficare le grandezze di interesse poiché utilizza modelli di componenti elettrici ideali. Mentre Multisim è stato utilizzato per la verifica dei risultati algebrici e nel progettare un convertitore molto simile ad un convertitore reale poiché al suo interno ha un catalogo di componenti elettrici e di potenza molto vasto per ogni famiglia di componente.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
 • **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



1.1 Percorso della corrente I_D

Essendo l'alimentazione una sinusoide periodica nel tempo con una determinata ampiezza e periodo, possiamo dire che nelle semionde positive la coppia di tiristori T_1 e T_2 ha una tensione anodica positiva rispetto l'altra coppia, cioè sono polarizzati in diretta e quindi pronti per condurre, ciò che li vincola dalla conduzione è il segnale di controllo, appena ricevono il segnale di controllo essi conducono fino a quando non si avrà che la tensione catodica è maggiore di quella anodica in quel caso non conducono più, cioè quando l'alimentazione è negativa in questo intervallo possono condurre solo i tiristori T_3 e T_4 poiché ora sono loro che hanno una tensione anodica positiva, ma non condurranno fino a quando non riceveranno un impulso sul terminale di gate. Il ponte di Graetz fa in modo da rendere tutte le semionde della sinusoide in entrata semionde positive (Rettificare) così da poter stimare un valore medio di tensione positivo che dipende anche da α .

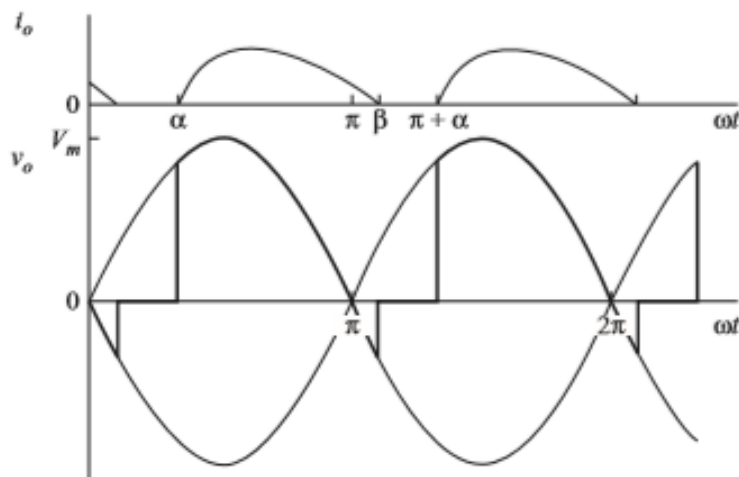


Più precisamente V_o è dato dalla seguente relazione: $V_o = \frac{2V_m}{\pi} \cos(\alpha)$.

Essendo presente nel carico una $V_{dc}=100V$ si impone un vincolo anche sul segnale di controllo α poiché se l'alimentazione è minore di V_{dc} i tiristori anche se ricevono l'impulso di gate non conducono poiché la tensione anodica dei tiristori risulta minore di quella catodica. E quindi per un corretto funzionamento del convertitore si ha che: $\alpha \geq \sin^{-1}\left(\frac{V_{dc}}{V_m}\right)$.

Inoltre essendo il carico ohmico-induttivo con $L \gg R$ questo induce uno sfasamento sulla corrente che è in anticipo rispetto alla tensione, l'induttanza fa sì che la coppia di (T_1, T_2) o (T_3, T_4) sono forzati a condurre a causa dell'energia immagazzinata nell'induttore che deve essere rilasciata. Il valore dell'induttanza decide anche la modalità di funzionamento del convertitore che verranno spiegate nei prossimi paragrafi.

1.2 Modalità discontinua.



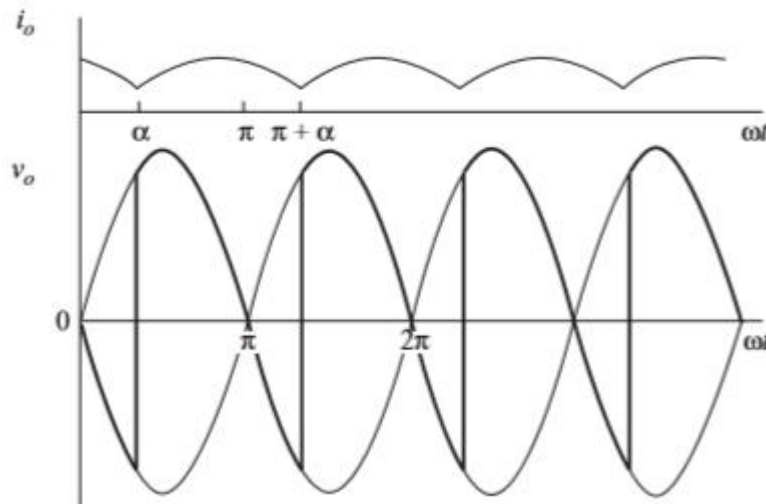
Come già spiegato precedentemente la sinusoide in input al nostro AC/DC è un segnale periodico ciò vuol dire che possiamo studiare il comportamento del circuito in un solo periodo (es. $0 - 2\pi$) e iterarlo per ogni periodo (a regime).

Se il carico presenta un'induttanza si ha che la tensione sul carico dopo π è negativa causata dall'energia immagazzinata dall'induttore questo comporta che la coppia di tiristori T_1, T_2 è forzata a condurre per poter scaricare l'energia immagazzinata dall'induttore, l'induttore avendo immagazzinato energia tra $(\alpha - \pi)$ tende a scaricarsi, se l'induttore ha un'induttanza troppo piccola esso si scaricherà velocemente ad un angolo β dopo π , questo significa che la corrente i_o sul carico sarà nulla nell'intervallo $(\beta - \pi + \alpha)$ e di conseguenza anche la v_o sarà nulla, e quindi si parla di modalità discontinua quando abbiamo dei tratti dove il carico non è alimentato, invece si parla di modalità continua quando la corrente sul carico non si annulla mai.

Si può dire che la modalità discontinua dipende dalla grandezza dell'induttanza, e quindi si può stimare un certo range di induttanza nel quale il convertitore funziona in modalità discontinua. Imponendo la $i_o(\pi + \alpha) = 0$ avendo così un di induttanza al limite tra le due zone di funzionamento che si aggira intorno a $L = 15\text{mH}$, quindi si ha che per $L < 15\text{mH}$ il convertitore funziona in modalità discontinua.

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{dc}}{R} + \left(-\frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) + \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\omega \tau}}$$

1.3 Modalità continua.



Invece con $L > 15\text{mH}$ accade che l'induttore non si scarica del tutto quando arriva a $\pi + \alpha$, angolo in cui si accendono T_3 e T_4 , diremo che il nostro convertitore lavora in modalità continua ossia $\beta > \pi + \alpha$, dove ricordiamo che β è l'angolo introdotto dall'induttanza ed è l'angolo in cui la corrente nell'induttore è zero.

Se la corrente nell'induttore non si è ancora scaricata questo vuol dire che anche la corrente nel carico non è nulla. Quindi basta affermare che l'angolo di accensione dei tiristori sia più piccolo dell'angolo di circuito per garantire la modalità di conduzione continua.

Imponendo che la corrente $i(\omega t) \geq 0$ abbiamo che:

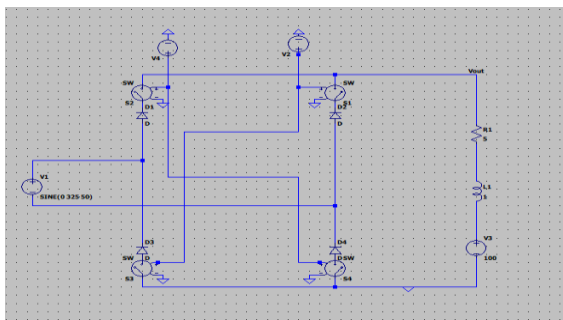
$i(\pi + \alpha) \geq 0$, si ha che per avere $i(\omega t) \geq 0$ si deve avere che: $\alpha \leq \theta$, dove $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$
 quindi:

$$\alpha \leq \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$

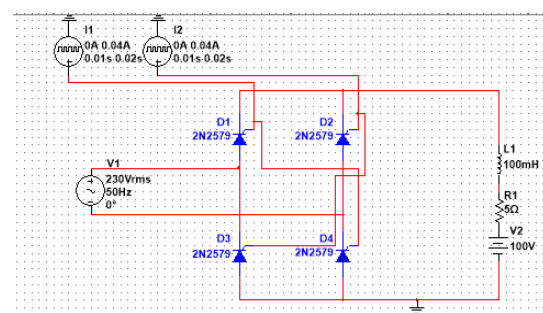
La modalità continua è influenzata dalla grandezza dell'induttanza ma anche dalla frequenza poiché aumentando la frequenza diminuiamo il periodo e quindi anche il tempo in cui l'induttore si carica e scarica così da poter scegliere un'induttanza minore per avere la modalità continua a parità di circuito ma di questo se ne parlerà nel prossimo capitolo.

2. Trattazione dei quesiti proposti e simulazioni

Per rispondere ai vari quesiti proposti e per le varie simulazioni che riportano i vari andamenti delle grandezze elettriche fondamentali sono stati realizzati sui programmi LTSpice per i grafici, mentre Multisim è stato utilizzato per controllare la veridicità dei calcoli svolti, poiché al suo interno è presente molta strumentazione elettronica come per esempio: oscilloscopi elettronici, generatori di funzioni e pinze amperometriche; strumenti di misura “virtuali” che ci sono stati molto utili nel corso della trattazione.



Circuito implementato con LTSpice



Circuito implementato con Multisim

Ho ricreato dei convertitori AC/DC sia su LTSpice che su Multisim, purtroppo su LTSpice non è stato possibile implementare degli SCR poiché non erano inclusi nella libreria standard e quindi ho optato per dei diodi in serie a degli switch controllati in tensione, invece per quanto riguarda Multisim ho utilizzato degli SCR 2N2579 capaci di sostenere una tensione di 500V e una corrente di circa 25A più che sufficienti per il nostro circuito. Per entrambi i simulatori un angolo di innesco $\alpha=43.6^\circ$, così da avere una $V_o \approx 150V$ e una $I_o \approx 10A$.

In LTSpice ho utilizzato due generatori impulsivi di tensione con le seguenti caratteristiche:

Per V4: $V_{iniziale}=0V$, $V_{on}=5V$, $T_{delay}=0.00242s$, $T_{rise}=1ps$, $T_{fall}=1ps$, $T_{on}=0.01$, $T_{period}=0.02$.

Per V2: $V_{iniziale}=0V$, $V_{on}=5V$, $T_{delay}=0.01242s$, $T_{rise}=1ps$, $T_{fall}=1ps$, $T_{on}=0.01$, $T_{period}=0.02$.

Mentre in Multisim ho utilizzato due generatori impulsivi di corrente con le seguenti caratteristiche:

Per I1: $I_{iniziale}=0A$, $I_{on}=0.04A$, $T_{delay}=0.00242s$, $T_{rise}=1ps$, $T_{fall}=1ps$, $T_{on}=0.01$, $T_{period}=0.02$.

Per I2: $I_{iniziale}=0A$, $I_{on}=0.04A$, $T_{delay}=0.01242s$, $T_{rise}=1ps$, $T_{fall}=1ps$, $T_{on}=0.01$, $T_{period}=0.02$.

Invece per quanto riguarda il carico ho scelto una resistenza da 5Ω capace di dissipare una potenza di $500W+20\%$ da un induttore con induttanza $L=100mH$ e da una batteria da $100V$.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
• **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



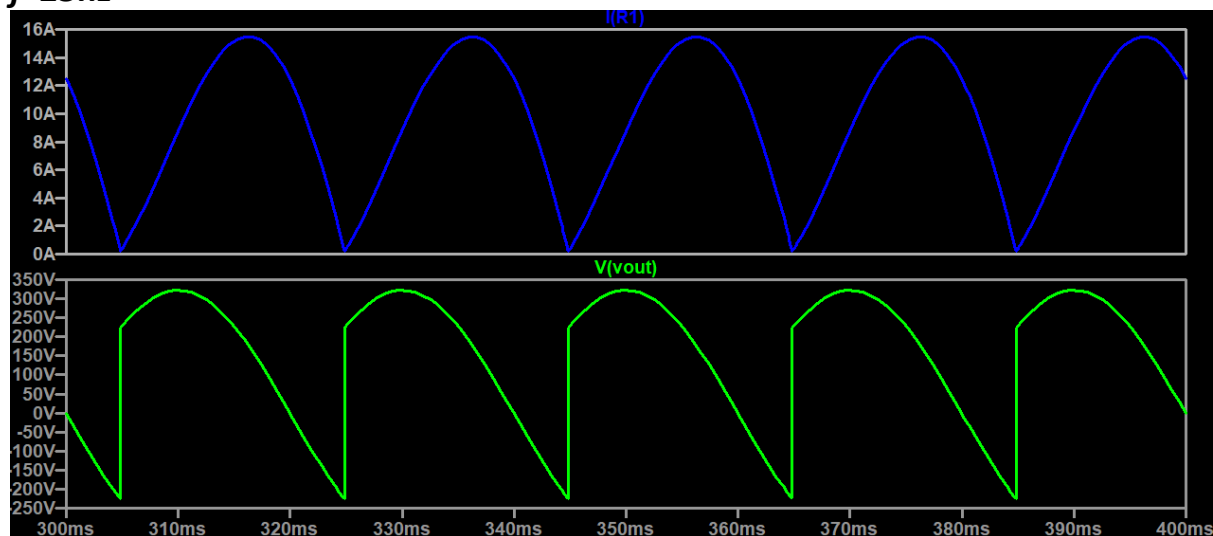
2.1 Si descriva il funzionamento del convertitore al variare di f ;

Ho testato il convertitore con un generatore di tensione sinusoidale con frequenza variabile con stesso valore efficace ma con frequenza diversa. Si sono scelte le seguenti frequenze: $f=25\text{hz}$, $f=50\text{hz}$ e $f=100\text{hz}$ per studiare il funzionamento del convertitore al variare di f .

Al variare di f si possono notare molti cambiamenti e anche delle simmetrie. Se f aumenta, aumenta anche ω poiché $\omega=2\pi f$, cioè diminuiscono i tempi di risposta del circuito e quindi anche i semiperiodi in cui conducono i tiristori sono più brevi e essendo più brevi avremo una corrente $i_o(\omega t)$ con una variazione picco-picco minore a parità di circuito e di angolo di innesco, si ha questo perché all'aumentare della frequenza l'induttore si carica di meno e si scarica di meno, cioè a regime avremo un valore massimo di corrente sempre più piccolo all'aumentare della frequenza mentre si ha che il valore minimo aumenta all'aumentare della corrente (il ripple di corrente diminuisce).

I seguenti grafici dimostrano ciò che è stato detto in precedenza facendo un'analisi di corrente e tensione di uscita a $f=25\text{hz}$, $f=50\text{hz}$ e a $f=100\text{hz}$ fatti con il programma LTSpice.

$f=25\text{hz}$



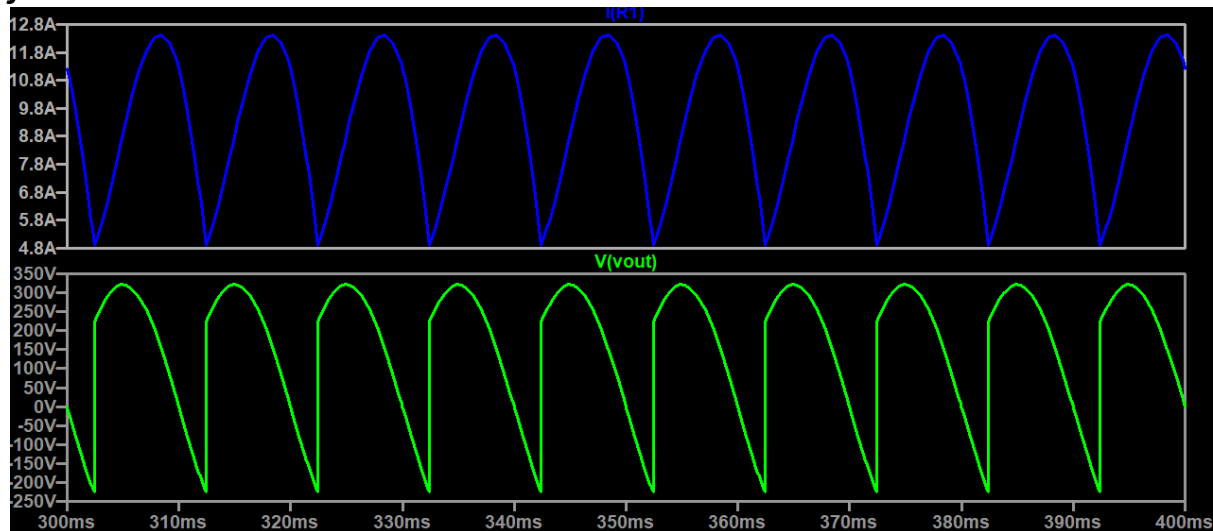
Variazione di picco-picco sulla corrente I_o con $f=25\text{hz}$ $I_{p-p} \approx 15.3\text{A}$.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.

- Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.

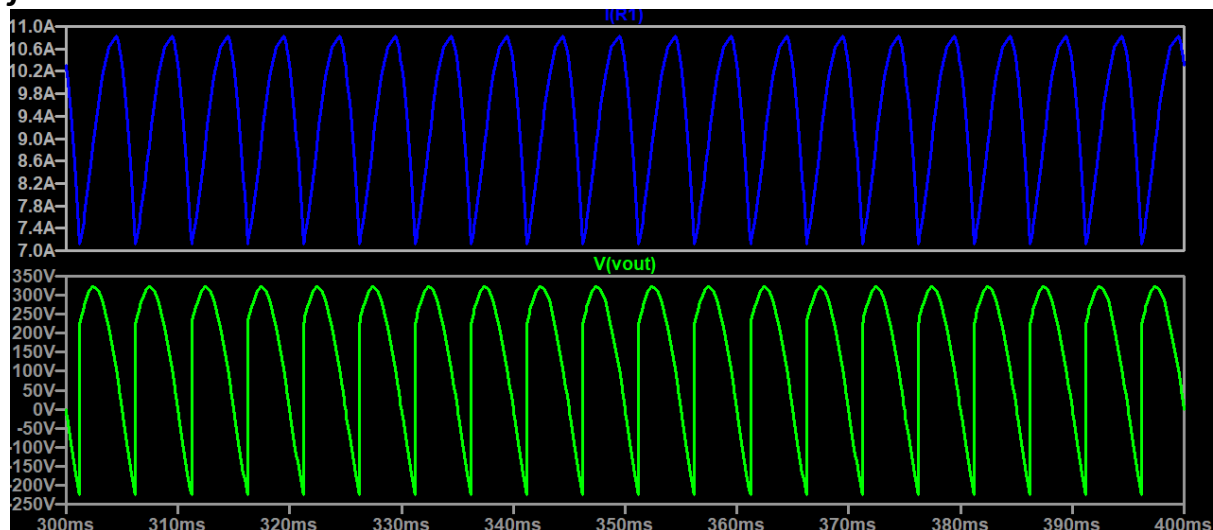


$f=50\text{hz}$



Variazione di picco-picco sulla corrente I_o con $f=50\text{hz}$ $I_{p-p} \approx 7.6\text{A}$

$f=100\text{hz}$



Variazione di picco-picco sulla corrente I_o con $f=100\text{hz}$ $I_{p-p} \approx 3.8\text{A}$

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
 • **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



2.2 Si valuti il valore della potenza assorbita dal resistore R e dal generatore di tensione V_{dc}

Per calcolare la potenza assorbita dal resistore e dal generatore ho utilizzato un $\alpha=43.6^\circ$. Con un $\alpha=43.6^\circ$ abbiamo una corrente $I_O = 18.9A$. Qui sotto viene riportato un estratto delle equazioni usate per calcolare la potenza assorbita e anche un estratto di una simulazione fatta con Multisim con un $\alpha=18^\circ$ che riporta i risultati attesi dalla trattazione analitica:

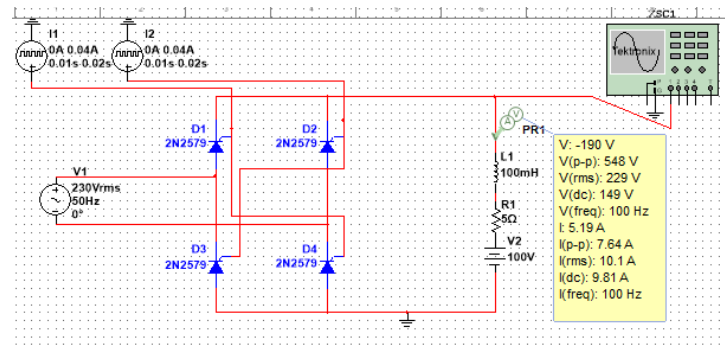
$$\alpha = 43.6^\circ \quad V_m = 325.27V$$

$$V_O = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad V_O = 150V$$

$$I_O = \frac{V_O - V_{dc}}{R} \quad I_O = 10A$$

$$P_R = I_O^2 R \quad P_R = 500W$$

$$P_{V_{dc}} = I_O V_{dc} \quad P_{V_{dc}} = 1000W$$



In Multisim non si ha una $I_{dc}=10A$ poiché nei calcoli ho considerato dei tiristori ideali mentre nella realtà gli SCR come quelli simulati da Multisim hanno una caduta di tensione ai loro capi di $\approx 0.7-1.1V$. Quindi considerando questi voltaggi si ha che:

$$I_O = \frac{V_O - 2V_{SCR} - V_{dc}}{R} = \frac{150 - 2(0.7) - 100}{5} = 9.72A. \text{ molto vicino al risultato del simulatore.}$$

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
 • **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



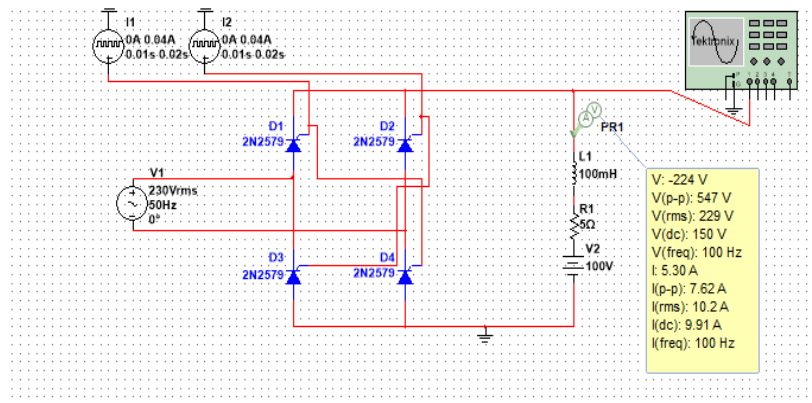
2.3 Si determini il valore dell'angolo α , a partire dal quale i tiristori iniziano a condurre, tale la potenza assorbita dal generatore V_{dc} sia pari a 1000 W;

Il valore dell'angolo α tale per cui si ha una potenza assorbita dal generatore V_{dc} sia pari a 1000W è stato calcolato ricavando il valore di I_o con cui si ha una potenza assorbita di 1000W, una volta calcolata I_o mediante la formula inversa per il calcolo di V_o si ricava il valore di α .

$$I_o = \frac{V_o - V_{dc}}{R} \quad I_o = 10A ;$$

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad V_o = 150V ;$$

$$\cos \alpha = \frac{150\pi}{2V_m} \quad \alpha = 43.6^\circ ;$$



Ovviamente la trattazione analitica è fatta con valori ideali e non reali, quindi con lo stesso angolo $\alpha = 43.6^\circ$ abbiamo un risultato diverso con la simulazione in Multisim (Che utilizza modelli reali di dispositivi elettronici) ma siamo quasi vicino al risultato ideale infatti se scegliamo un $\alpha = 43^\circ$ in Multisim abbiamo una corrente $I_{dc} \approx 10A$.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.
Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.
• Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.



2.4 Si proponga un valore di L_{min} tale che la variazione picco-picco della corrente di carico sia pari a 2 A.

Per calcolare un valore di induttanza, L_{min} , tale che la variazione picco-picco della corrente di carico sia pari a 2A dobbiamo fare uno studio sulle armoniche riguardante la corrente di carico.

Secondo il teorema di Fourier, tutti i segnali periodici, di qualunque forma d'onda, possono essere considerati come il risultato della sovrapposizione di più segnali sinusoidali di opportune ampiezze e frequenze, opportunamente sfasati tra loro. Una funzione $f(t)$ di periodo T e frequenza $f=1/T$ può essere espressa da una serie del tipo:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots$$

Per calcolare una variazione di picco-picco sulla corrente di carico ho utilizzato la seguente formula:

$$I_{rms} = \sqrt{I_o^2 + \sum_{n=2,4,6 \dots}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega_0 L|}$$

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$a_n = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$b_n = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$n = 2, 4, 6, \dots$$

$$I_o = 10$$

$$a_2 = -195.06; \quad b_2 = -90.55; \quad V_2 = 215.05V$$

$$a_4 = 12.47; \quad b_4 = -77.75; \quad V_4 = 78.74V$$

$$a_6 = 49.68; \quad b_6 = 1.325; \quad V_6 = 49.70V$$

$$I_{rms} = \sqrt{10^2 + \left(\frac{215.05}{\sqrt{2} \cdot |5 + j \cdot 2 \cdot 314.16 \cdot L_{min}|} \right)^2 + \left(\frac{78.74}{\sqrt{2} \cdot |5 + j \cdot 4 \cdot 314.16 \cdot L_{min}|} \right)^2 + \left(\frac{49.70}{\sqrt{2} \cdot |5 + j \cdot 6 \cdot 314.16 \cdot L_{min}|} \right)^2}$$

Per $L_{min} \approx 370mH$ abbiamo che $\Delta i_o = 2A$.

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica.

Corso di Macchine e Impianti Elettrici 2019/2020.

- **Relazione di progetto: Convertitore AC/DC.**



3. Bill of Materials e prototipo di convertitore.

In quest'ultimo capitolo vedremo un prototipo reale e una lista di componenti per replicare il convertitore studiato in precedenza.

Come alimentazione si può benissimo utilizzare o un generatore di funzioni o direttamente la corrente di linea dato che è un segnale alternata con $V_{eff}=230V$, $f=50Hz$. Come tiristori SCR ho optato per 4x Littlefuse SCR S6020LTP, TO-220AB. Invece per simulare il carico ohmico-induttivo in serie con una V_{dc} si può benissimo sostituire con un motore dc che rispetta quelle specifiche oppure si possono sostituire con componenti come resistore di potenza capace di dissipare 500W, un induttore da 100mH e come V_{dc} una batteria da 100V o si può simulare con un generatore di tensione.

Purtroppo, in commercio non si trovano induttori da 100mH con $I_{c.c.}\approx 10A$ quindi dobbiamo autocostruirlo, le altre parti invece si possono trovare in commercio o possono essere trovate in laboratorio.

Per autocostruire il nostro induttore da 100mh dobbiamo scegliere un cavo in rame smaltato che costituirà l'avvolgimento su un nucleo di ferrite (toroide), In accordo con l'AWG (American Wire Gauge) ho scelto un cavo unipolare con AWG 14 capace di sostenere tensioni di circa 600V e correnti fino ad un massimo di 20-25A.

Filo di rame RS PRO Unipolare 15AWG: RS 357-930
Anello di ferrite EPCOS 50x30x20mm: RS 212-0881

30m 22€
 x1 8.55€

Per calcolare quanti numeri di avvolgimenti fare sul toroide ho utilizzato la seguente formula:

$$L = \mu_i * \frac{N^2 * Area}{l} * 1.26 * 10^{-6}$$



$\mu_i = 4300$ (permeabilità del materiale del toroide ricavato dal datasheet);

Area = 20x20mm = 40mm² (essendo il toroide schiacciato possiamo semplificare la sezione con la sezione di un quadrato);

$l = 2 * \pi * R = 251.2mm$ (dove R è: la metà della somma dei due diametri);

N=108 (Numero di spire);

Invece per quanto riguarda il resistore di potenza ho scelto una resistenza capace di dissipare 2kW invece di 500kW poiché era più economica.

OSCILLOSCOPIO DIGITALE TEKTRONIC DPO 4054

GENERATORE DI SEGNALI AGILENT 33120°

ALIMENTATORE DA LABORATORIO\ALIMENTAZIONE DI RETE

SCR S6020LTP RS 171-9507

x4 4.28€

Resistenza fissa con montaggio a pannello RS PRO 5Ω 2kW ±10%

x1 186€

INDUTTORE AUTOCOSTRUITO

x1 30.55€