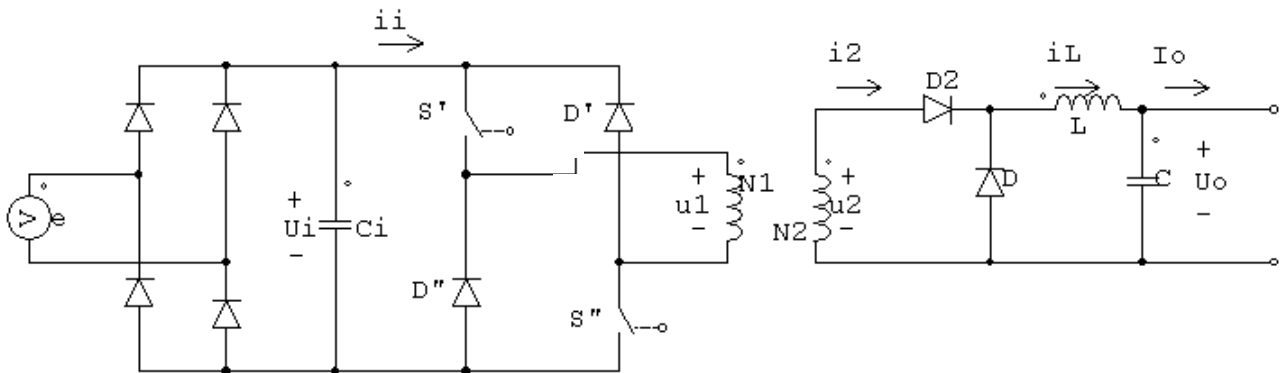


Prova Scritta di ELETTRONICA INDUSTRIALE del 13/02/2009

Tema A

Dato il circuito di figura con le seguenti specifiche:



Tensione d'ingresso:

$$e(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t) \quad E = 230 \text{ V}_{\text{rms}} \pm 10\% \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad f = 50 \text{ Hz}$$

Tensione d'uscita $U_o = 48 \text{ V}$, $\Delta U_o \pm 1\text{V}$

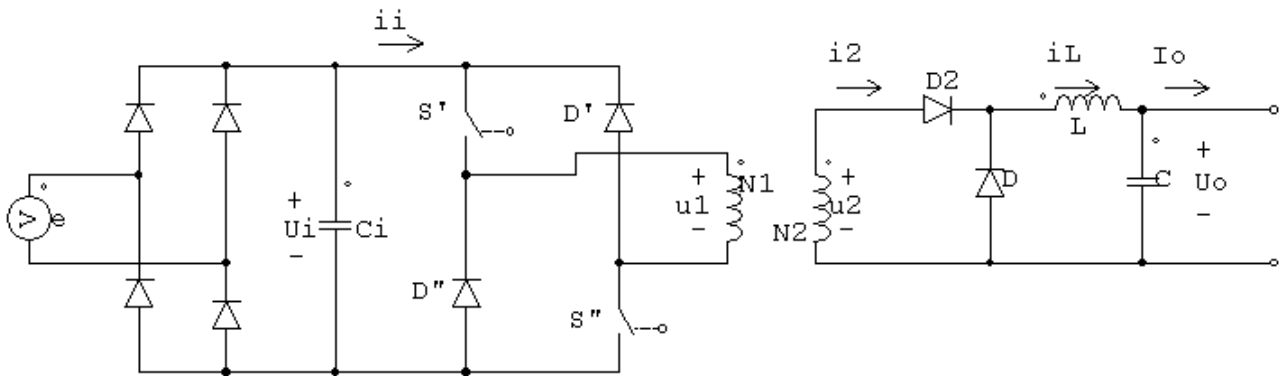
Corrente d'uscita $I_o = 0.5 \div 10 \text{ A}$

Frequenza di commutazione degli switch S' e S'' : $f_s = 200 \text{ kHz}$

Si chiede di calcolare:

- 1) la capacità C_i in modo che l'ondulazione della tensione U_i sia inferiore al 2% (picco-picco) in condizioni nominali ($E=230 \text{ V}$, $I_o=10\text{A}$), assumendo un rendimento del convertitore dual-forward $\eta = 95\%$.
- 2) mantenendo l'assunzione di rendimento pari al 95%, il valore del rapporto spire $n = \frac{N_1}{N_2}$ che consenta di garantire l'erogazione della tensione d'uscita in tutte le condizioni operative.
- 3) il valore dell'induttanza L in modo tale che la situazione limite CCM/DCM si abbia in corrispondenza di $I_o=2\text{A}$ quando la tensione $E=230 \text{ V}$;
- 4) l'intervallo di variazione del duty-cycle
- 5) il valore di C in modo che l'ondulazione ΔU_o rimanga entro il limite specificato in tutte le condizioni operative;
- 6) assumendo che il nucleo magnetico del trasformatore abbia una permeanza $A_L=0.6\mu\text{H}$, i numeri delle spire N_1 ed N_2 degli avvolgimenti primario e secondario del trasformatore, in modo tale che il valore di picco della corrente magnetizzante, riportata al secondario, non ecceda il 30% della corrente nominale d'uscita.

Soluzione



1) Calcolo del valore della capacità d'ingresso

La carica del condensatore C_i avviene attorno al picco di tensione d'ingresso.

$$P_o = U_o \cdot I_o = 48 \cdot 10 = 480W$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{480}{0.95} = 505W$$

Il massimo valore medio di corrente si otterrà per il minimo valore di picco $U_{i\min}$

$$U_{i\min} = \sqrt{2} \cdot E_{\min} = \sqrt{2} \cdot 230 \approx 325V$$

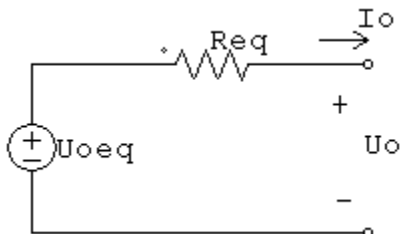
$$\bar{I}_{i\max} = \frac{P_{in}}{U_{i\min}} = \frac{505}{325} = 1.55A$$

Durante la fase in cui i diodi del raddrizzatore non conducono, che in prima approssimazione si assume pari a metà del periodo di rete $T=20ms$, si può considerare che il condensatore C_i si scarichi con corrente costante $\bar{I}_{i\max}$ e quindi che l'ondulazione di tensione valga:

$$\Delta U_i = \frac{\bar{I}_{i\max} \cdot T}{C_i} \quad \text{e quindi} \quad C_i = \frac{1.55}{325 \cdot 0.02} \cdot 0.01 \cong 2.4mF$$

2) Calcolo del rapporto spire

Schema equivalente del circuito all'uscita



Assumendo lo schema equivalente di figura, si ha che:

$$U_{oeq} = U_o + R_{eq} \cdot I_o$$

Nelle condizioni di minima tensione d'uscita U_o e massima corrente I_o , l'ipotesi di caduta da vuoto a carico del 5% implica che: $\Delta U_{oeq} = 0.05 \cdot U_o = 2.4V$

$$\Delta U_{oeq} = R_{eq} \cdot I_o \quad R_{eq} = \frac{\Delta U_{oeq}}{I_o} = \frac{2.4}{10} = 240m\Omega$$

la caratteristica ingresso uscita in CCM vale

$$\frac{U_{oeq}}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \delta = \frac{\delta}{n}$$

Il massimo valore di δ , che è pari a 0.5, si avrà per $U_{imin} = 292 V$

Considerando che:

$$U_{oeqmax} = U_o + R_{eq} \cdot \frac{P_{o,max}}{U_o} = 48 + 0.24 \cdot \frac{480}{48} = 50.4V$$

$$\text{si ottiene: } n = \frac{U_{imin}}{U_{oeqmax}} \delta_{max} = \frac{292}{50.4} * 0.5 \cong 2.9 \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n} = 0.34$$

Il minimo valore di δ in CCM (si assume di trascurare le cadute alla minima corrente) vale

$$\delta_{min_CCM} = \frac{U_o}{U_{imax}} \cdot n = \frac{48}{358} 2.9 \cong 0.39$$

2) Calcolo di L

Si deve garantire funzionamento limite CCM/DCM alla tensione nominale e corrente d'uscita $I_o=2A$. In queste condizioni si può assumere che la caduta di tensione sulla resistenza equivalente sia 1/5 di quella che si avrebbe con $I_o=10A$. Quindi

$$\Delta U_{oeq} = R_{eq} \cdot I_o = 0.24 \cdot 2 = 0.48V \quad U_{oeq} = 48.5V$$

Con questo valore di tensione, il duty cycle vale:

$$\frac{U_{oeq}}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \delta = \frac{\delta}{n} \quad \delta = \frac{U_{oeq}}{U_i} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{2.9 \cdot 48.5}{325} = 0.43$$

In condizioni di funzionamento limite CCM/DCM, si ha:

$$\Delta I_L = 2I_o \quad \Delta I_L = 2I_o = 4A$$

L'ondulazione di corrente si può esprimere come::

$$\Delta I_L = \frac{U_{oeq}}{L} \cdot t_{off} \quad \Leftrightarrow \quad L \geq \frac{U_{oeq}}{\Delta I_L} \cdot t_{off}$$

Si ha quindi:

$$L \cong \frac{U_{oeq} \cdot (1-\delta)}{f_s \cdot 2 \cdot \Delta I_o} = \frac{48.5 \cdot 0.57}{2 \cdot 10^5 \cdot 4} \cong 34\mu H$$

3) Variazione del duty cycle

Il massimo duty cycle si ha in funzionamento CCM, per $U_{i\min}$ e vale 0.5.

Il minimo duty cycle si ha in funzionamento DCM per $U_{i\max}$ e $I_{o\min}$.

In DCM si ha:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{n} \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}} \quad \text{con } I_N = \frac{U_i}{n} \cdot \frac{1}{2 \cdot f_s \cdot L}$$

$$\text{con } U_i = U_{i\max} \quad I_N = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 1.1}{2.9} \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 34 \cdot 10^{-6}} \cong 9A$$

$$\frac{I_o}{I_N} = \frac{0.5}{9} = 0.055 \quad \frac{U_o}{U_{i\max}} \cdot n = \frac{48 \cdot 2.9}{358} = 0.39$$

$$(\delta_{\min}^2 + 0.055) \cdot 0.39 = \delta_{\min}^2 \quad 0.61 \cdot \delta_{\min}^2 = 0.021 \quad \delta_{\min}^2 = \frac{0.021}{0.61} = 0.035$$

$$\delta_{\min} = 0.187$$

4) Calcolo di C

La condizione in cui si manifesta la massima ondulazione della tensione d'uscita è quella di distacco di carico alla massima corrente.

A parità di tensione d'uscita l'ondulazione di corrente è massima quando è massimo t_{off} , dunque:

$$\Delta I_L = \frac{U_{o\text{eq}}}{L} \cdot (1 - \delta_{\min}) \cdot T_s = \frac{54 \cdot 0.82}{2 \cdot 10^5 \cdot 34 \cdot 10^{-6}} \cong 6.5A$$

$$\hat{I}_{L\max} = I_{o\max} + \frac{\Delta I_{L\max}}{2} \cong 13.2A$$

quindi:

$$C \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}_{L\max}^2}{U_o \cdot \Delta U_o} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 34 \cdot 10^{-6} \cdot 13.2^2}{48 \cdot 2} \cong 31\mu F$$

5) Calcolo dell'induttanza di magnetizzazione

Secondo le specifiche, il valore di picco della corrente di magnetizzazione lato secondario è:

$$\hat{I}''_{\mu} = 0.3 \cdot I_{o\max} = 0.3 \cdot 10 = 3A$$

$$\hat{I}''_{\mu} = \frac{U_{2\min}}{L''_{\mu}} \cdot t_{on\max} \quad \text{Poiché però: } (U_2 - U_o) \cdot t_{on} = U_o \cdot t_{off} \Rightarrow U_2 t_{on} = U_o T_s$$

si ha:

$$L''_{\mu} = \frac{U_o}{\hat{I}''_{\mu} \cdot f_s} = \frac{48}{3 \cdot 200 \cdot 10^3} \cong 80\mu H$$

$$L_{\mu} = L_{\mu}'' \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 80 \mu H \cdot 8.4 = 0.67 mH$$

Posto

$$L_{\mu}'' = \frac{N_2^2}{R} = N_2^2 \cdot A_L \quad \text{si ottiene}$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{L_{\mu}''}{A_L}} = \sqrt{\frac{80}{0.6}} \cong 12$$

$$N_1 = n \cdot N_2 = 2.9 \cdot 12 = 34$$