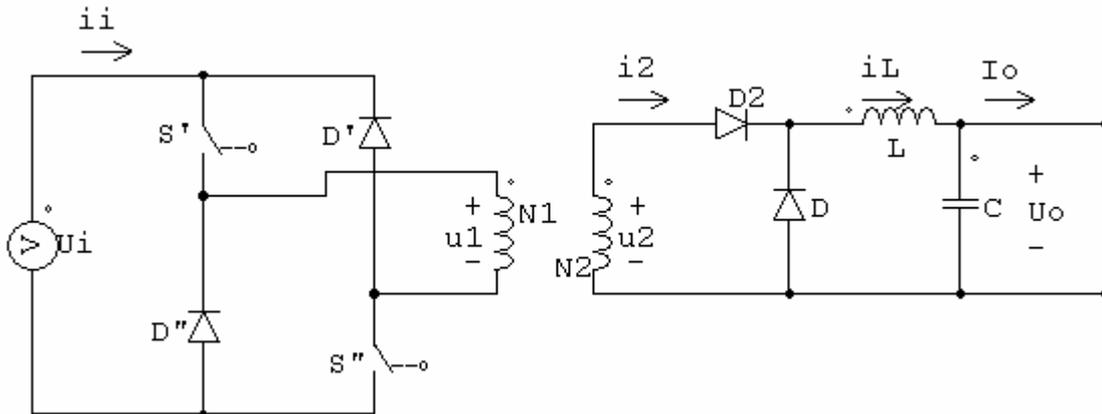


Prova Scritta di ELETTRONICA INDUSTRIALE del 19/09/2007

Dato il convertitore cc/cc dual-forward di figura con le seguenti specifiche:



Tensione d'ingresso: $U_i = 48 \text{ V} \pm 20\%$

Tensione d'uscita $U_o = 12 \text{ V} \pm 2\%$

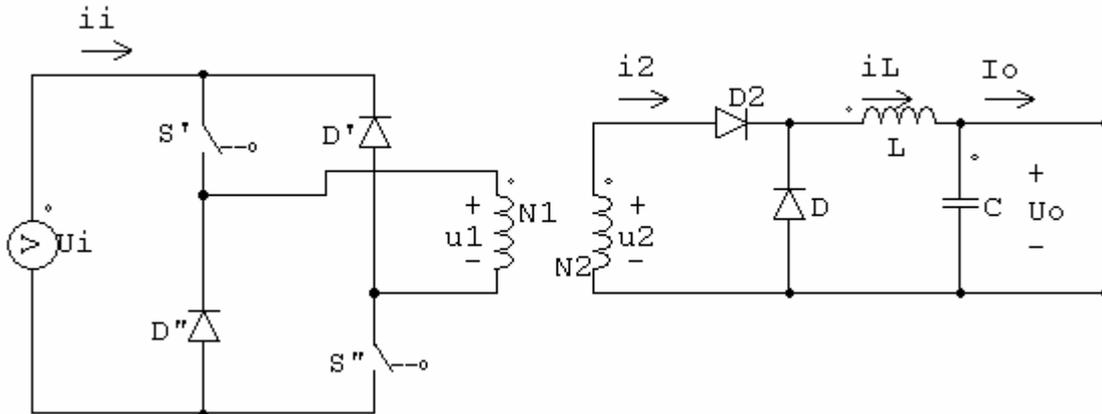
Corrente d'uscita $I_o = 0.5 \div 5 \text{ A}$

Frequenza di switching: $f_s = 100 \text{ kHz}$

Si chiede:

- 1) nell'ipotesi che il convertitore funzioni in CCM, di scegliere il rapporto spire $\frac{N1}{N2}$ del trasformatore che consenta il miglior sfruttamento in potenza del convertitore;
- 2) di scegliere il valore dell'induttanza L che garantisca il funzionamento limite CCM/DCM in corrispondenza a $U_i = 48 \text{ V}$, $U_o = 12 \text{ V}$, $I_o = 1 \text{ A}$;
- 3) di determinare l'intervallo di variazione del duty cycle nelle diverse condizioni operative;
- 4) di scegliere il valore di C in modo che l'ondulazione ΔU_o ammessa ($\pm 2\%$) venga rispettata anche al distacco di carico, nelle condizioni più onerose in termini di corrente d'uscita, a partire dal valore di U_o nominale (12V);
- 5) di determinare il valore dell'induttanza magnetizzante del trasformatore che corrisponda ad un incremento della corrente di picco negli interruttori pari al 20 %;
- 6) di determinare la massima tensione e la massima corrente di picco su switch e diodi.

Soluzione



1) Calcolo del rapporto spire

Il massimo sfruttamento in potenza del convertitore si ha quando è massimo il duty cycle; nel caso del convertitore dual forward, il duty cycle non può superare il valore 0.5. Tale valore massimo si ha in corrispondenza della minima tensione d'ingresso, perciò:

$$u_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot u_1 = \begin{cases} U_i \cdot \frac{N_2}{N_1} & \text{per } t \in t_{on} \\ 0 & \text{per } t \in t_{off} \end{cases} \quad \text{Dunque: } U_o = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_i \cdot \delta \text{ e quindi: } \delta_{max} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_o}{U_{imin}}$$

Si ottiene:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{imin}}{U_o} \cdot \delta_{max} = \frac{48 \cdot 0.8}{12} \cdot 0.5 = 1.6 \quad \frac{N_2}{N_1} = 0.625$$

2) Calcolo di L

In condizioni di funzionamento limite CCM/DCM, con $U_i = 48 \text{ V}$, $U_o = 12 \text{ V}$, $I_o = 1 \text{ A}$ si ha:

$$\delta = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{12 \cdot 1.6}{48} = 0.4 \quad \text{e} \quad \Delta I_L = 2I_o = 2 \text{ A}$$

Peraltro l'ondulazione vale:

$$\Delta I_L = \frac{U_2 - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_o}{L} \cdot t_{off} \quad \Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{U_o}{L} \cdot t_{off} = \frac{U_o}{L} \cdot (1 - \delta) \cdot T_S$$

$$L = \frac{U_o}{f_s \cdot 2I_o} \cdot (1 - \delta) = \frac{12 \cdot (1 - 0.4)}{100 \cdot 10^3 \cdot 2} \approx 36 \mu\text{H}$$

3) Variatione del duty cycle

Il massimo duty cycle si ha in funzionamento CCM, per U_{imin} e vale 0.5. Il minimo duty cycle si ha in funzionamento DCM per U_{imax} e I_{omin} . In DCM si ha:

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

Ponendo: $U_i = U_{imax}$ si ha: $I_N = \frac{48 \cdot 1.2}{2 \cdot 10^5 \cdot 36 \cdot 10^{-6}} = 8A$. Quindi:

$$\delta_{min}^2 \left(\frac{U_o}{U_{imax}} - \frac{1}{n} \right) = - \frac{U_o \cdot I_{omin}}{U_{imax} \cdot I_N}, \quad \text{ovvero:}$$

$$\delta_{min}^2 = \frac{- \frac{U_o \cdot I_{omin}}{U_{imax} \cdot I_N}}{\left(\frac{U_o}{U_{imax}} - \frac{1}{n} \right)} = \frac{\frac{U_o \cdot I_{omin}}{U_{imax} \cdot I_N}}{\left(\frac{1}{n} - \frac{U_o}{U_{imax}} \right)} = \frac{\frac{12 \cdot 0.5}{48 \cdot 1.2 \cdot 8}}{\frac{1}{1.6} - \frac{12}{48 \cdot 1.2}} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{0.625 - 0.208} = 0.03, \quad \delta_{min} \cong 0.18$$

4) Calcolo di C

La massima corrente nell'induttanza L vale: $\hat{I}_{Lmax} = I_{o max} + \frac{\Delta I_{Lmax}}{2}$

La massima ondulazione in CCM, a tensione U_o assegnata, vale: $\Delta I_{Lmax} = \frac{U_o}{L} \cdot (1 - \delta_{min}) \cdot T_S$. Il

valore minimo del duty-cycle si ha quando la tensione d'ingresso è massima e vale:

$$\delta_{min} = \frac{N_1}{N_2} \frac{U_o}{U_{imax}} = 1.6 \frac{12}{48 \cdot 1.2} = 0.33. \text{ Dunque:}$$

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{U_o}{f_S L} \cdot (1 - \delta_{min}) = \frac{12 \cdot 0.67}{10^5 \cdot 36 \cdot 10^{-6}} \cong 2.22 A$$

Quindi: $\hat{I}_{Lmax} = 5 + 1.11 = 6.11 A$

$$\text{Ne consegue: } C \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}_{Lmax}^2}{U_o \cdot \Delta U_o} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 36 \cdot 10^{-6} \cdot 6.11^2}{12 \cdot 0.02 \cdot 12} \cong 233 \mu F$$

5) Calcolo dell'induttanza di magnetizzazione

La corrente \hat{I}_{Lmax} riportata al primario vale: $\frac{\hat{I}_{Lmax}}{n} = \frac{6.11}{1.6} = 3.82 A$

Il 20% di tale valore è circa 0.76 A, che corrisponde al valore di picco della corrente magnetizzante.

$$\hat{I}_\mu = \frac{U_i}{L_\mu} \cdot t_{on} = \frac{U_i \cdot \delta}{L_\mu \cdot f_S} = \frac{U_o \cdot n}{L_\mu \cdot f_S} \quad L_\mu = \frac{U_o \cdot n}{\hat{I}_\mu \cdot f_S} = \frac{12 \cdot 1.6}{0.76 \cdot 10^5} \cong 254 \mu H$$

6) Stress di tensione e corrente su switch e diodi

Tensione massima su D2, D: $U_{2max} = U_{imax} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 48 \cdot 1.2 \cdot 0.625 = 36V$

Corrente di picco D2, D: $I_{Lmax} = 6.11 A$

Tensione massima su D', D'', S', S'': $U_{imax} = 48 \cdot 1.2 = 57.6V$

Corrente di picco S', S'': $I_{Lmax} \cdot \frac{N_2}{N_1} + \hat{I}_\mu = \frac{6.11}{1.6} + 0.76 = 4.58 A$

Corrente di picco D', D'': $\hat{I}_\mu = 0.76 A$