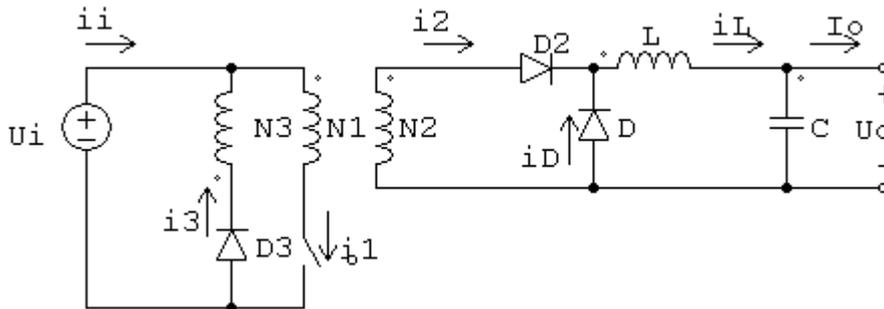


## Prova Scritta di ELETTRONICA INDUSTRIALE del 26/06/2009

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



Tensione d'ingresso:  $U_i = 60 \text{ V} \pm 20\%$

Tensione d'uscita  $U_o = 12 \pm 0.5 \text{ V}$

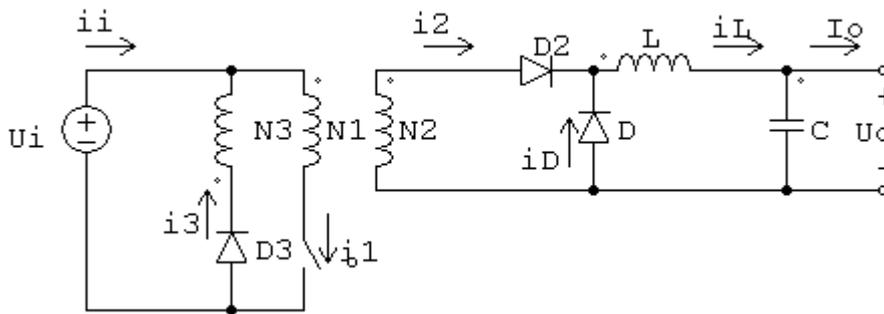
Corrente d'uscita  $I_o = 1 \div 5 \text{ A}$

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

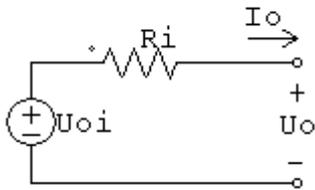
Assumendo  $N_1 = 2 N_3$  e rendimento pari a 0.85 in condizioni nominali ( $U_i = 60 \text{ V}$ ,  $I_o = 5 \text{ A}$ ) si chiede di calcolare:

- 1) il rapporto spire  $\frac{N_1}{N_2}$  del trasformatore che consente il miglior sfruttamento in potenza del convertitore (si raggiunge il massimo duty-cycle);
- 2) il valore dell'induttanza  $L$  che garantisce il funzionamento limite CCM/DCM in corrispondenza a  $U_i = 60 \text{ V}$ ,  $U_o = 12 \text{ V}$ ,  $I_o = 2 \text{ A}$ ;
- 3) l'intervallo di variazione del duty-cycle nelle diverse condizioni operative;
- 4) il valore di  $C$  in modo che l'ondulazione  $\Delta U_o$  ammessa ( $\pm 0.5 \text{ V}$ ) venga rispettata anche al distacco di carico a partire dal valore di  $U_o$  nominale (12V);
- 5) il valore dell'induttanza magnetizzante del trasformatore che, in condizioni nominali, causa un incremento della corrente di picco nell'interruttore pari al 20 %;
- 6) gli stress di tensione e corrente di picco di interruttore e diodi in condizioni nominali.

## Soluzione



### 1) Calcolo del rapporto spire



$R_i$  rappresenta la resistenza equivalente che rende conto delle perdite del sistema ( $P_{diss}$ ).

$$P_o = U_o \cdot I_o = 12 \cdot 5 = 60W$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{diss}} \quad P_{diss} = P_o \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta} = 60 \cdot \frac{0.15}{0.85} \approx 10.6W$$

$$R_i = \frac{P_{diss}}{I_o^2} \approx \frac{10.6}{25} \approx 0.42\Omega$$

$$U_{oi} = U_o + R_i \cdot I_o = 12 + 0.42 \cdot 5 = 14,12V$$

$U_{oi}$  rappresenta il valore di tensione necessario per garantire la tensione d'uscita nominale con il rendimento dell'85%.

Il convertitore forward presenta un limite nel max. valore di duty cycle:

$$\delta_{max} \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3} = \frac{2}{3} = 0.67$$

Il valore massimo di duty cycle si avra' quando si deve fornire la massima tensione in uscita con minima tensione d'ingresso

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{oi}}{U_{imin}} \cdot \frac{1}{\delta_{max}} = \frac{14.2}{60 \cdot 0.8} \cdot \frac{1}{0.67} \approx 0.44 \quad \frac{N_1}{N_2} = 2.27$$

### 2) Calcolo di L

Al limite CCM/DCM:

$$\Delta I_{L\max} = 2 \cdot I_{o\lim} = 2 \cdot 2 = 4A$$

In questa condizione operativa il valore di  $U_{oi}$  e  $\delta$  sono:

$$U_{oi} = U_o + R_i \cdot I_o = 12 + 0.42 \cdot 2 = 12.82V$$

$$\delta_{\lim} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_{oi}}{U_{inon}} = 2.27 \cdot \frac{12.82}{60} \approx 0.48$$

$$L \cong \frac{U_o}{f_s \cdot 2I_{o\lim}} \cdot (1 - \delta_{\lim}) = \frac{12 \cdot (1 - 0.48)}{10^5 \cdot 4} \approx 15.6 \mu H$$

### 3) Calcolo dell'intervallo di variazione del duty-cycle

Per correnti inferiori ai 2 A, il funzionamento è DCM. Si ha pertanto:

$$\frac{U_o}{U'_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}} \quad \text{dove} \quad U'_i = U_i \frac{N_2}{N_1} \quad I_N = \frac{U'_i}{2 \cdot f_s \cdot L}$$

Considerando che la minima corrente d'uscita è  $I_{o\min} = 1A$  e che il minimo valore di duty cycle corrisponde alla massima tensione d'ingresso, si può scrivere:

$$\frac{U_o}{U'_{i\max}} = \frac{\delta_{\min}^2}{\delta_{\min}^2 + \frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot I_{o\min}}{U'_{i\max}}} \quad \frac{U_o}{U'_{i\max}} = \frac{12}{60 \cdot 1.2 \cdot 0.44} = \frac{12}{31.7} = 0.38$$

$$\text{Posto } k = \frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot I_{o\min}}{U'_{i\max}} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 15.6 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{31.7} = 0.098$$

$$\text{si ha:} \quad \frac{U_o}{U'_{i\max}} = \frac{\delta_{\min}^2}{\delta_{\min}^2 + k} \quad \delta_{\min}^2 \cdot \left(1 - \frac{U_o}{U'_{i\max}}\right) = k \cdot \frac{U_o}{U'_{i\max}}$$

$$\delta_{\min}^2 = \frac{k \cdot \frac{U_o}{U'_{i\max}}}{\left(1 - \frac{U_o}{U'_{i\max}}\right)} = \frac{0.098 \cdot 0.38}{1 - 0.38} = \frac{0.037}{0.62} = 0.06 \quad \delta_{\min} = \sqrt{0.06} = 0.24$$

### 4) Calcolo di C

Con tensione e corrente nominale d'uscita, il minimo valore del duty cycle si ha con tensione massima d'ingresso e vale:

$$\delta_{\min CCM} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_{oi}}{U_{i\max}} = 2.27 \cdot \frac{12 + 0.42 \cdot 5}{60 \cdot 1.2} = 2.27 \cdot \frac{14.1}{72} = 0.44$$

pertanto il massimo ripple di corrente in CCM vale

$$\Delta I_L \cong \frac{U_o}{f_s \cdot L} \cdot (1 - \delta_{\min CCM}) = \frac{12 \cdot (1 - 0.44)}{10^5 \cdot 15.6 \cdot 10^{-6}} = 4.48A$$

e quindi il picco di corrente, cui corrisponde la massima energia immagazzinata nell'induttanza vale:

$$\hat{I}_L = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} \cong 5 + \frac{4.48}{2} = 7.24A$$

$$C \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}_L^2}{U_o \cdot \Delta U_o} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot 15.6 \cdot 10^{-6} \cdot 52.4}{12 \cdot 0.5} \cong 68 \mu F$$

### 5) Calcolo dell'induttanza di magnetizzazione

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

$$\hat{I}_\mu = 0.2 \cdot \hat{I}_2 \frac{N_2}{N_1}$$

in condizioni nominali

$$\delta_{nom} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_{oi}}{U_{inom}} = 2.27 \cdot \frac{12 + 0.42 \cdot 5}{60} = 2.27 \cdot \frac{14.1}{60} = 0.53$$

$$\Delta I_L \cong \frac{U_o}{f_s \cdot L} \cdot (1 - \delta_{nom}) = \frac{12 \cdot (1 - 0.53)}{10^5 \cdot 15.6 \cdot 10^{-6}} = 3.58A$$

$$\hat{I}_2 = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 5 + 1.6 = 6.8A$$

$$\hat{I}_\mu = 0.2 \cdot \hat{I}_2 \frac{N_2}{N_1} = 0.2 \cdot 6.8 \cdot 0.44 = 0.6A$$

$$\hat{I}_\mu = \frac{U_i}{L_\mu} \cdot t_{on} \quad L_\mu \geq \frac{U_{inom}}{\hat{I}_\mu \cdot f_s} \cdot \delta_{nom} = \frac{60 \cdot 0.53}{0.6 \cdot 10^5} \cong 530 \mu H$$

### 3) Stress di tensione e corrente su switch e diodi

Diodo D e D2:  $\hat{U}_D = U_{2max} = U_{imax} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 72 \cdot 0.44 = 31.7V$

$$\hat{I}_D = \hat{I}_L = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 5 + \frac{4.48}{2} = 7.24A$$

Switch:  $\hat{U}_s = U_{imax} + U_{imax} \cdot \frac{N_1}{N_3} = 3 \cdot U_{imax} = 216V$

$$\hat{I}_s = (I_o + \frac{\Delta I_L}{2}) \cdot \frac{N_2}{N_1} + \hat{I}_\mu = (5 + 2.24) \cdot 0.44 + 0.6 \cong 3.8A$$

Diodo D3:  $\hat{U}_s = U_{imax} + U_{imax} \cdot \frac{N_3}{N_1} = 1.5 \cdot U_{imax} = 108V$  come per lo switch S

$$\hat{I}_{D3} = \hat{I}_\mu \cdot \frac{N_1}{N_3} = 1.2A$$