

Prova Scritta di ELETTRONICA INDUSTRIALE del 19/3/2007

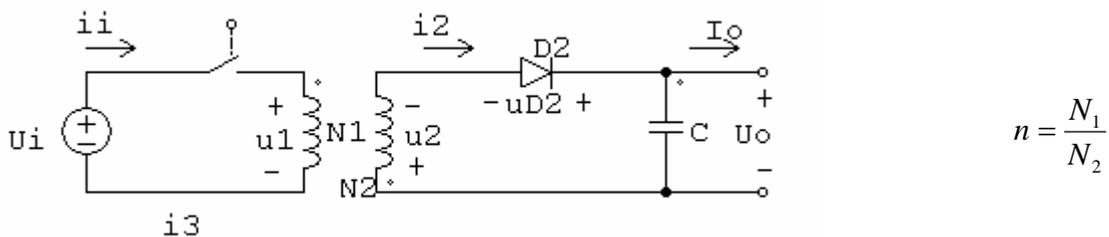
Dato il convertitore flyback di figura, con le seguenti specifiche:

Tensione d'ingresso: $U_i = 12 \text{ V} \pm 20\%$

Tensione d'uscita $U_o = 100\text{V}$, $\Delta U_o = \pm 2\text{V}$

Corrente d'uscita $I_o = 0.1 \div 0.5 \text{ A}$

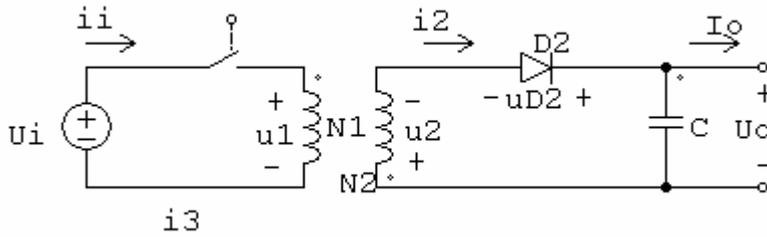
Frequenza di switching: $f_s = 500 \text{ kHz}$



Si chiede di determinare:

- 1) il rapporto spire $n = \frac{N_1}{N_2}$ in modo che la tensione ai capi del Mosfet non superi 35 V;
- 2) l'intervallo di variazione del duty cycle nell'ipotesi di funzionamento CCM in ogni condizione operativa;
- 3) il valore dell'induttanza magnetizzante che garantisca il funzionamento CCM del convertitore in ogni condizione operativa;
- 4) Il valore della capacità C che mantiene l'ondulazione ΔU_o entro i limiti indicati in ogni condizione operativa;
- 5) nell'ipotesi che il tempo di salita (rise) e discesa (fall) della corrente del mosfet sia di 20 ns, stimare le massime perdite di commutazione del mosfet.

Soluzione



$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

1) La tensione che lo switch deve sostenere, durante la fase off, è pari a :

$$U_s = U_i + n \cdot U_o \text{ che è massima per:}$$

$$U_{s\max} = U_{i\max} + n \cdot U_{o\max}$$

$$\text{quindi: } 35 = 14.4 + n \cdot 102 \quad n = \frac{35 - 14.4}{102} \cong 0.2$$

2) Se il funzionamento è sempre continuo, vale la relazione:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{\delta}{1-\delta} = \frac{1}{n} \frac{\delta}{1-\delta} \quad n \cdot \frac{U_o}{U_i} - n \cdot \frac{U_o}{U_i} \delta = \delta \quad n \cdot \frac{U_o}{U_i} = \delta \cdot \left(n \cdot \frac{U_o}{U_i} + 1 \right)$$

$$\delta = \frac{\frac{U_o}{U_i}}{\frac{1}{n} + \frac{U_o}{U_i}} = \frac{1}{1 + \frac{U_i}{n \cdot U_o}} \quad \delta_{\min} = \frac{1}{1 + \frac{U_{i\max}}{n \cdot U_o}} = \frac{1}{1 + \frac{14.4}{0.2 \cdot 100}} = 0.58$$

$$\delta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{U_{i\min}}{n \cdot U_o}} = \frac{1}{1 + \frac{9.6}{0.2 \cdot 100}} = 0.68$$

Quindi:

$$0.58 \leq \delta \leq 0.68$$

$$1.16 \mu s \leq t_{on} \leq 1.36 \mu s$$

$$0.64 \mu s \leq t_{off} \leq 0.84 \mu s$$

3) La condizione limite CCM/DCM si ha quando:

$$I_o = \frac{\hat{I}_2 \cdot t_{off}}{2 \cdot T_s} \quad \hat{I}_2 = \frac{U_o \cdot t_{off}}{L''_{\mu}} \quad I_o = \frac{U_o \cdot t_{off}}{L''_{\mu}} \cdot \frac{t_{off}}{2 \cdot T_s} = \frac{U_o \cdot t_{off}^2}{2 \cdot L''_{\mu} \cdot T_s}$$

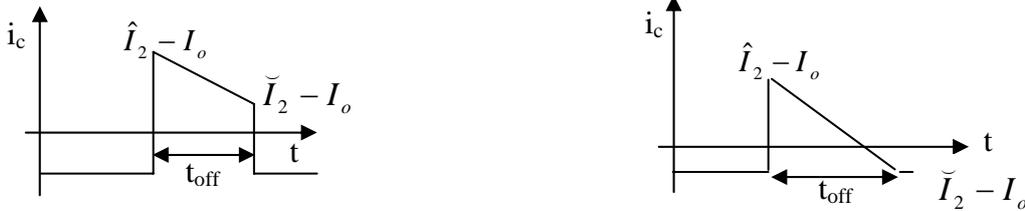
la condizione più onerosa si ha per $I_o = I_{o\min}$ e $t_{off} = t_{off\max}$, e quindi

$$L''_{\mu} = \frac{U_o \cdot t_{off\max}^2}{2 \cdot I_{o\min} \cdot T_s} = \frac{100 \cdot (0.84 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 176 \mu H$$

$$L'_\mu = n^2 \cdot L''_\mu \cong 7.2 \mu H$$

4) Dimensionamento del condensatore C

Nel convertitore flyback, la corrente nel condensatore d'uscita è la componente alternata della corrente nel diodo, il cui andamento è di tipo trapeziodale in funzionamento CCM e triangolare in DCM. Il calcolo dell'ondulazione di tensione sul condensatore cambia a seconda che \tilde{I}_2 sia maggiore o minore di I_o , come illustrato in figura.



Nel nostro caso il funzionamento è sempre CCM, il ripple di corrente è massimo per t_{offmax} e vale:

$$\Delta I_{2max} = \frac{U_o \cdot t_{offmax}}{L''_\mu} = \frac{100 \cdot 0.84 \cdot 10^{-6}}{176 \cdot 10^{-6}} = 0.48 A$$

Per t_{offmax} il δ è minimo, e quindi il valore medio della corrente sul diodo, a parità di corrente d'uscita, è minimo e vale:

$$I_o = \bar{I}_2 \cdot (1 - \delta) \Rightarrow \bar{I}_{2min} = \frac{I_{o,max}}{(1 - \delta_{min})} = 1.19 A$$

Il minimo valore di corrente nel diodo vale pertanto:

$$\tilde{I}_2 = \bar{I}_{2min} - \frac{\Delta I_2}{2} = 1.19 - 0.24 = 0.95 A$$

Se ora si considera il caso di t_{offmin} , il ripple di corrente diventa minimo, ma si ha il massimo valor medio di i_2 , cioè:

$$\Delta I_{2min} = \frac{U_o \cdot t_{offmin}}{L''_\mu} = \frac{100 \cdot 0.64 \cdot 10^{-6}}{176 \cdot 10^{-6}} = 0.36 A, \quad \bar{I}_{2max} = \frac{I_{o,max}}{(1 - \delta_{max})} = 1.56 A$$

$$\text{Quindi: } \tilde{I}_2 = \bar{I}_{2max} - \frac{\Delta I_{2min}}{2} = 1.56 - 0.18 = 1.38 A$$

Si conclude quindi che il minimo valore di corrente sul diodo è comunque maggiore della massima corrente di uscita e la forma d'onda di corrente sul condensatore è pertanto quella di sinistra in figura.

Il valore della capacità C che garantisce un'ondulazione picco-picco inferiore a 4 V si ottiene dai seguenti calcoli (condizioni statiche):

$$\Delta Q_{max} = I_{o,max} \cdot T_{onmax} = 0.5 \cdot 1.36 \cdot 10^{-6} = 0.68 \mu C$$

$$\Delta U_o = \frac{\Delta Q}{C} \Rightarrow C \geq \frac{\Delta Q}{\Delta U_o} = \frac{0.68 \cdot 10^{-6}}{4} = 170 \text{ nF}$$

Per la verifica dell'ondulazione di tensione in condizioni dinamiche si considera il caso limite di distacco di carico. Se si assume che esso avvenga nell'istante in cui vi è la massima energia immagazzinata nell'induttanza (picco di i_2), si osserva che in quell'istante la tensione ai capi del condensatore è minima. Si pone quindi che la massima ondulazione di tensione ammessa non superi i 4 V.

Secondo quanto calcolato in precedenza, il massimo picco di corrente i_2 si ha per il massimo valore medio e minimo ripple e vale:

$$\hat{I}_{2 \max} = \bar{I}_{2 \max} + \frac{\Delta I_{2 \min}}{2} = 1.56 + 0.18 = 1.74 \text{ A}$$

Il condensatore va conseguentemente dimensionato in modo che:

$$C \geq \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \mu \cdot \hat{I}_2^2}{U_o \cdot \Delta U_o} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot 176 \cdot 10^{-6} \cdot 1.74^2}{100 \cdot 4} \cong 0.67 \mu\text{F}$$

Questo risulta pertanto il valore corretto per il dimensionamento.

5) Perdite di commutazione nel mosfet

$$P_{sw} = f_s \cdot \left(\frac{\hat{U}_s \cdot \tilde{I}_1}{2} \cdot t_r + \frac{\hat{U}_s \cdot \hat{I}_1}{2} \cdot t_f \right) = f_s \cdot \hat{U}_s \cdot \frac{\tilde{I}_1 + \hat{I}_1}{2} \cdot t_{sw} = f_s \cdot \hat{U}_s \cdot t_{sw} \cdot \bar{I}_1$$

assumendo rendimento unitario si può scrivere $\bar{I}_1 \cdot U_i \cdot t_{on} = P_o \cdot T_s$

Il valore massimo di \bar{I}_1 si ha per il massimo valore della potenza d'uscita e massimo valore di t_{on} .

$$\bar{I}_1 = \frac{P_o \cdot T_s}{U_i \cdot t_{on}} = \frac{P_o \cdot T_s}{n \cdot U_o \cdot t_{off}} = \frac{100 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{0.2 \cdot 100 \cdot 0.64 \cdot 10^{-6}} = 7.8 \text{ A}$$

Infine, $P_{sw} = 500 \cdot 10^3 \cdot 35 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \cdot 7.8 \cong 2.7 \text{ W}$