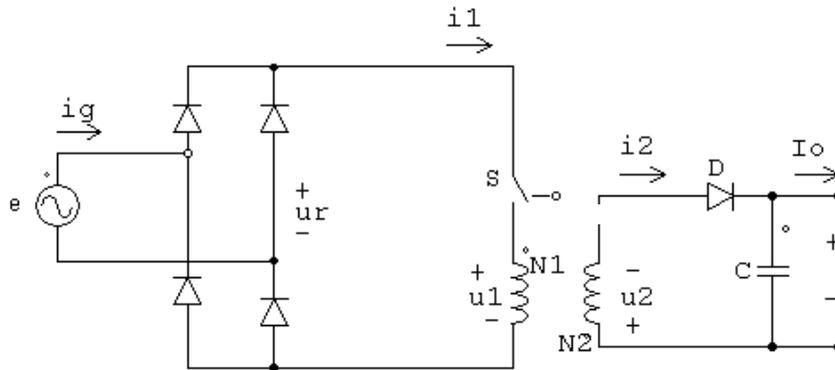


Prova Scritta di ELETTRONICA INDUSTRIALE del 13/02/2009

Dato il PFC flyback di figura, operante in DCM e con le seguenti specifiche:



Tensione d'ingresso: $e(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t)$

$E = 230 \text{ V}_{\text{rms}} \pm 10\%$, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $f = 50 \text{ Hz}$

Tensione d'uscita $U_o = 24 \text{ V}$, $\Delta U_o = \pm 1 \text{ V}$

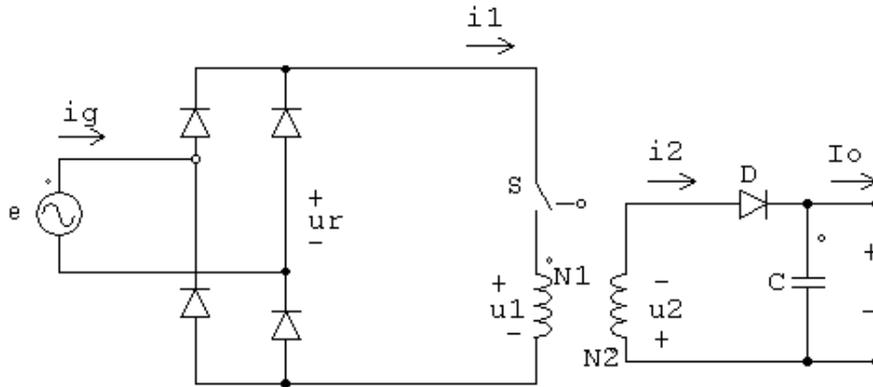
Corrente d'uscita $I_o = 0.1 \div 0.5 \text{ A}$

Frequenza di commutazione dello switch S: $f_s = 200 \text{ kHz}$

Si chiede di:

- 1) Calcolare il valore dell'induttanza di magnetizzazione L_1 (al primario) del mutuo induttore in modo che il convertitore funzioni con $\delta = 0.5$ nelle condizioni nominali ($E = 230 \text{ V}$, $I_o = 0.5 \text{ A}$). Si assuma funzionamento DCM e rendimento $\eta = 0.95$.
- 2) Valutare l'escursione del duty cycle al variare della tensione d'ingresso e della corrente d'uscita, sempre assumendo funzionamento DCM;
- 3) Calcolare il rapporto spire del mutuo induttore in modo che il funzionamento limite CCM/DCM si abbia, in condizioni nominali, in corrispondenza del valore di picco della tensione e ;
- 4) Calcolare il valore del condensatore C in modo tale l'ondulazione della tensione U_o rimanga entro i limiti specificati
- 5) Calcolare gli stress di tensione e corrente (valore di picco e medio) sull'interruttore S.
- 6) Dimensionare il mutuo induttore (numero di spire, traferro) in modo tale che l'induzione magnetica non superi 50 mT nelle condizioni di funzionamento nominali, assumendo di usare un nucleo magnetico con una sezione utile S_u di 1 cm^2 . Ai fini del calcolo si trascuri la riluttanza del materiale ferromagnetico.

Soluzione



1) Calcolo dell'induttanza magnetizzante L_1

Se il convertitore flyback lavora sempre in DCM, con duty cycle costante, esso mantiene il fattore di potenza $PF=1$; esso appare perciò alla sorgente di alimentazione come una resistenza equivalente. Ad ogni intervallo di commutazione T_s , assumendo quindi funzionamento DCM e che la tensione di alimentazione $e(t)$ sia costante in T_s , si può scrivere:

$$\hat{i}_1 = \frac{|e(t)|}{L_1} \cdot t_{on} = \frac{|e(t)|}{L_1 \cdot f_s} \cdot \delta \qquad \bar{i}_1(t) = \frac{\hat{i}_1 \cdot t_{on}}{2 \cdot T_s} = \frac{|e(t)|}{L_1 \cdot f_s} \cdot \delta \cdot \frac{t_{on}}{2 \cdot T_s} = \frac{|e(t)|}{2 \cdot L_1 \cdot f_s} \cdot \delta^2$$

Considerando che $\bar{i}_1(t) = |\bar{i}_s(t)| = \frac{|e(t)|}{R_{eq}} = \frac{|e(t)|}{2 \cdot f_s \cdot L_1} \cdot \delta^2$ si ha: $R_{eq} = \frac{2 \cdot f_s \cdot L_1}{\delta^2}$

Il valore della resistenza equivalente si può ricavare dal bilancio di potenze:

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{E^2}{R_{eq}}$$

$$P_o = U_o \cdot I_o = 24 \cdot 0.5 = 12 \text{ W} \quad \text{quindi} \quad P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{12}{0.95} = 12.63 \text{ W}$$

$$\text{da cui: } R_{eq} = \frac{E^2}{P_{in}} = \frac{230^2}{12.63} \cong 4.2 \text{ k}\Omega$$

Posto $\delta=0.5$, si può ricavare L_1 come:

$$L_1 = \frac{R_{eq}}{2 \cdot f_s} \cdot \delta^2 = \frac{4200}{2 \cdot 200 \cdot 10^3} \cdot 0.25 = 2.6 \text{ mH}$$

2) Campo di variazione del duty cycle

Una volta trovato il valore dell'induttanza di magnetizzazione al primario, si può esprimere il duty cycle come:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L_1}{R_{eq}}}$$

Al variare della corrente d'uscita, varierà anche il valore di R_{eq}

$$R_{eq \min} = \frac{\eta_{\min} \cdot E_{\min}^2}{P_{o \max}} = \frac{0.95 \cdot (230 \cdot 0.9)^2}{24 \cdot 0.5} = \frac{40706}{12} \cong 3.4 k\Omega$$

$$R_{eq \max} = \frac{\eta_{\max} \cdot E_{\max}^2}{P_{o \min}} = \frac{1 \cdot (230 \cdot 1.1)^2}{24 \cdot 0.1} = \frac{64009}{2.4} = 26.7 k\Omega$$

Pertanto:

$$\delta_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L_1}{R_{eq \max}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2.6 \cdot 10^{-3}}{26700}} \cong 0.2$$

$$\delta_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L_1}{R_{eq \min}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2.6 \cdot 10^{-3}}{3400}} = 0.55$$

3) Calcolo del rapporto spire

La specifica impone che il funzionamento limite CCM/DCM si abbia, in condizioni nominali, in corrispondenza del valore di picco della tensione e . In quel periodo di commutazione T_s , considerando le grandezze costanti, si può scrivere

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} \cdot \hat{E} \cdot \frac{\delta}{1 - \delta}$$

Per il valore nominale di $e(t)$ e corrente $I_o = 0.5A$, il duty cycle vale 0.5; si ottiene quindi:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\hat{E}}{U_o} \cdot \frac{\delta}{1 - \delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{24} = 13.55$$

Ne consegue che

$$L_2 = \frac{L_1}{n^2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-3}}{13.55^2} \cong 15 \mu H$$

4) Dimensionamento del condensatore C

L'energia scambiata tra rete e condensatore C si può esprimere come:

$$W = \frac{P_o}{2 \cdot \pi \cdot f_g} = \frac{12}{314} \cong 38 mJ$$

si può quindi trovare il valore del condensatore d'uscita come:

$$C = \frac{W}{U_o \cdot \Delta U_o} = \frac{38 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 2} \cong 0.8 mF$$

5) Dimensionamento in tensione e corrente dello switch S

$$\hat{U}_s = \hat{E}_{\max} + \frac{N_1}{N_2} \cdot U_o = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.1 + 13.55 \cdot 24 \cong 683V$$

Il valore di picco della corrente nell'interruttore vale (utilizzando i precedenti calcoli per valutare l'escursione del duty cycle, si vede che con $I_o=0.5$, se $E=230$ si ha $\delta=0.5$, se $E=230 \cdot 1.1$, si ha $\delta=0.44$; il prodotto e' quindi maggiore per il valore di tensione nominale):

$$\hat{I}_s = \frac{\hat{E}_{nom} \cdot \delta}{f_s \cdot L_1} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.5}{2 \cdot 10^5 \cdot 2.6 \cdot 10^{-3}} \cong 0.3A$$

La corrente media nell'interruttore, nel periodo di commutazione corrispondente al valore di picco della tensione nominale $e(t)$, vale

$$\bar{i}_s = \frac{\hat{I}_s \cdot t_{on}}{2 \cdot T_s} = \frac{\hat{E} \cdot t_{on}}{L_1} \cdot \frac{t_{on}}{2 \cdot T_s} = \frac{\hat{E} \cdot \delta^2}{2 \cdot f_s \cdot L_1}$$

Il valore medio nel periodo di rete e' pari a:

$$\bar{I}_s = \frac{2}{\pi} \cdot \bar{i}_s = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\hat{E} \cdot \delta^2}{2 \cdot f_s \cdot L_1} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 \cdot 0.5^2}{3.14 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2.6 \cdot 10^{-3}} = 49mA$$

4) Calcolo del numero di spire e traferro dell'induttore L

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot S = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} Wb$$

Il massimo valore del flusso si ha in corrispondenza della massima corrente, dunque:

$$L_1 \cdot \hat{I}_1 = N_1 \cdot \Phi_{\max} \quad N_1 = \frac{L_1 \cdot \hat{I}_{L\max}}{\Phi_{\max}} = \frac{2.6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.3}{5 \cdot 10^{-6}} \cong 156 \text{spire}$$

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = \frac{156}{13.55} = 11.5 \quad \text{si assume } N_2=11$$

La riluttanza vale:

$$R = \frac{N_1 \cdot \hat{I}_1}{\Phi_{\max}} = \frac{156 \cdot 0.3}{5 \cdot 10^{-6}} = 9.4 \cdot 10^6 A/Wb$$

trascurando la riluttanza del materiale ferromagnetico, il valore trovato corrisponde alla riluttanza del traferro e si puo' esprimere come:

$$R = \frac{t}{\mu_o \cdot S} \text{ e quindi lo spessore del traferro e': } t = \mu_o \cdot S \cdot R = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 9.4 \cdot 10^6 \cong 1.2mm$$