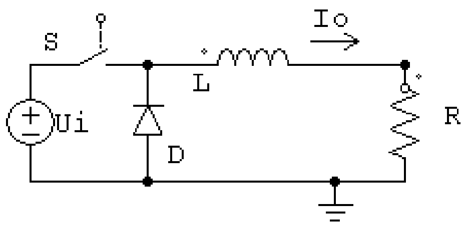
Prova Scritta di
ELETTRONICA INDUSTRIALE del 28/03/2008

TEMA B

Sia dato il convertitore buck di figura, destinato all'alimentazione in corrente di un carico puramente resistivo, con le seguenti specifiche:



Tensione d'ingresso: U_i = 60-72 V

Carico R = 3-5 Ω

Corrente d'uscita I_o = 2 ÷ 10 A

η = 90%

Frequenza di switching: f_s =200 kHz

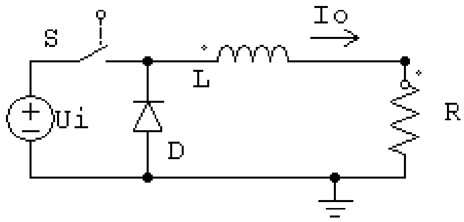
Tempi di accensione e di spegnimento dell'interruttore: tsw_{on} = 10 ns, tsw_{off} = 100 ns

Diodo: Shottky (V_{RRM} = 50 V, V_{on} = 0.2 V, $t_{recovery}$ = trascurabile)

Si chiede di determinare:

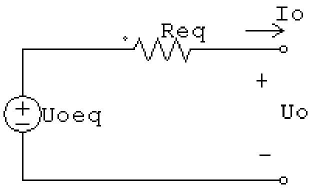
1) l'intervallo di variazione del duty cycle nelle diverse condizioni operative
2) gli stress di tensione e corrente (media e di picco) dell'interruttore S e del diodo D
3) il valore dell'induttanza L che consente di mantenere l'ondulazione di corrente entro il 2% del valore massimo, quando R assume il valore massimo di 5 Ω
4) le massime perdite di commutazione dell'interruttore
5) il valore del condensatore di un circuito di snubber RCD che consenta di ridurre di 6 volte le perdite allo spegnimento calcolate al punto precedente.

Soluzione



1) <u>Intervallo di variazione del duty cycle nelle diverse condizioni operative</u>

Lo schema equivalente del convertitore lato uscita è mostrato in figura. Tenendo conto che il rendimento è pari al 90% alla piena potenza e che la massima potenza viene fornita per $I_o=I_{omax}$ e $R= R_{max}$, si può scrivere:



$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{diss}} = \frac{U_o \cdot I_o}{U_{oeq} \cdot I_o} = \frac{U_o}{U_{oeq}}$$

$$U_{oeq} = \frac{U_o}{\eta} = \frac{R_{\max} \cdot I_{o\max}}{\eta} = \frac{5 \cdot 10}{0.9} = 55.6V$$

la resistenza R_{eq} vale: $R_{eq} = \frac{U_{oeq} - U_o}{I_o} = \frac{55.6 - 50}{10} = 0.56$

La tensione U_{eq} in uscita deve essere garantita anche con il minimo valore della tensione d'ingresso, si ha quindi:

$$\delta_{\max} = \frac{U_{oeq}}{U_{i\min}} = \frac{55.6}{60} = 0.93$$

Il minimo duty cycle si ha per U_{omin} e U_{imax}, cioè:

$$\delta_{\min} = \frac{R_{\min} \cdot I_{\min}}{U_{i\max}} = \frac{3 \cdot 2}{72} = 0.083$$

2) <u>gli stress di tensione e corrente (media e di picco) dell'interruttore S e del diodo D</u>

Tensione: $\hat{U}_s = \hat{U}_D = U_{i\max} = 72V$

Correnti di picco: $\hat{I}_S = \hat{I}_D = I_{o\max} + \frac{\Delta I_L}{2} \cong 10A$

(il ripple si può trascurare perchè secondo specifica è pari al 2% del valore massimo)

Corrente media switch: $\bar{I}_S = I_{o\max} \cdot \delta_{\max} = 10 \cdot 0.93 = 9.3A$

Corrente media diodo: $\bar{I}_D = I_o(1-\delta_{\min})$

Il valore di δ_{min}, a cui corrispondono la minima resistenza di carico e la massima tensione d'ingresso, cambia però al variare della corrente di carico. Al punto precedente si è trovato il più piccolo valore di δ che corrisponde alla minima corrente di carico; questo valore però non è quello per cui è massima l'espressione sopra scritta della corrente media nel diodo. Si deve quindi cercare il massimo di tale espressione in funzione di I_o.

$$\bar{I}_D = I_o(1-\frac{R_{\min}\cdot I_o}{U_{i\max}})$$

Questa è una parabola con il massimo per $I_o = \frac{1}{2}\cdot\frac{U_{i\max}}{R_{\min}} = \frac{72}{6} = 12A$

Questo valore di corrente è maggiore del massimo specificato, quindi la condizione di dimensionamento diventa:

$$\bar{I}_D = I_o\cdot(1-\frac{R_{\min}\cdot I_{o\max}}{U_{i\max}}) = 10\cdot(1-\frac{3\cdot 10}{72}) = 5.8A$$

il valore corrispondente del duty cycle è: $\delta = \frac{R_{\min}\cdot I_{o\max}}{U_{i\max}} = \frac{3\cdot 10}{72} = 0.42$

3) <u>Valore dell'induttanza L</u>

Si deve scegliere il valore di induttanza che consente di mantenere l'ondulazione di corrente entro il 2% del valore massimo quando R=5Ω. Il massimo valore del ripple di corrente si ha per δ=0.5 che è un valore compreso nell'intervallo ammissibile valutato al punto 1 e si può esprimere come:

$$\Delta I_L = \frac{U_i}{4\cdot f_s\cdot L}$$

La massima ampiezza del ripple si avrà per la massima tensione d'ingresso, quindi:

$$L = \frac{U_{i\,max}}{4\cdot f_s\cdot \Delta I_L} = \frac{72}{4\cdot 200\cdot 10^3\cdot 0.2} = 450\mu H$$

Se si vuole effettuare una verifica, si può considerare anche la relazione:

$L \geq \frac{U_o}{f_s\cdot\Delta I_L}\cdot(1-\delta) = \frac{U_i}{f_s\cdot\Delta I_L}\cdot\delta\cdot(1-\delta)$ che ha il suo massimo proprio per δ=0.5 e U_i = U_{imax}. Con R=5Ω e δ=0.5, al variare di U_i, la corrente I_o varia da 6A a 7.2A, ma con U_{imax} la corrente vale I_o=7.2A

$$L \geq \frac{U_o}{f_s\cdot\Delta I_L}\cdot(1-\delta) = \frac{5\cdot 7.2}{2\cdot 10^5\cdot 0.2}\cdot(1-0.5) = 450\mu H$$

Perdite di commutazione nell'interruttore

Perdite in accensione:

$$P_{swon} = \frac{1}{2} U_{i\max} \cdot I_{o\max} \cdot t_{rise} \cdot f_s \le \frac{1}{2} 72 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 = 720mW$$

Perdite in spegnimento:

$$P_{swoff} = \frac{1}{2} U_{i\max} \cdot I_{o\max} \cdot t_{fall} \cdot f_s \le \frac{1}{2} 72 \cdot 10 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 = 7.2W$$

Le perdite complessive in commutazione sono pari a circa 8 W

Snubber

Il valore del condensatore di snubber che consente di ridurre le perdite allo spegnimento di 6 volte è quello per cui la tensione di carica al termine dell'intervallo t_{fall} è proprio pari a U_i (assumiamo il valore massimo).

$$C_s = \frac{I_{o\max} \cdot t_f}{2 \cdot Ui} = \frac{10 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 72} = 7nF$$

Verifica: $P_{SWoff} = \frac{1}{12} \cdot I_{o\max} \cdot V_o \cdot t_{fall} \cdot f_s = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 72 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 \cong 1.2W$ OK

$$v_c = \frac{1}{C} \int_o^t I_o \cdot \frac{t}{t_{off}} \cdot dt = \frac{I_o \cdot t^2}{2 \cdot C \cdot t_{off}} \qquad U_{i\max} = \frac{I_o \cdot t_{off}}{2 \cdot C} \qquad i_S = I_o - I_o \cdot \frac{t}{t_{off}}$$

$$W = \int_0^t \frac{I_o \cdot t^2}{2 \cdot C \cdot t_{off}} \cdot \left(I_o - I_o \cdot \frac{t}{t_{off}} \right) = \int_0^t \frac{I^2{}_o \cdot t^2}{2 \cdot C \cdot t_{off}} - \int_0^t \frac{I^2{}_o \cdot t^3}{2 \cdot C \cdot t^2{}_{off}} = \frac{I^2{}_o \cdot t^3{}_{off}}{2 \cdot 3 \cdot C \cdot t_{off}} - \frac{I^2{}_o \cdot t_{off}{}^4}{2 \cdot 4 \cdot C \cdot t^2{}_{off}}$$

$$W = \frac{I^2{}_o \cdot t^2{}_{off}}{2 \cdot C} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) = \frac{1}{12} \cdot U_{i\max} \cdot I_o \cdot t_{off} \qquad P_{swoff} = \frac{1}{12} \cdot U_{i\max} \cdot I_o \cdot t_{off} \cdot f_s$$