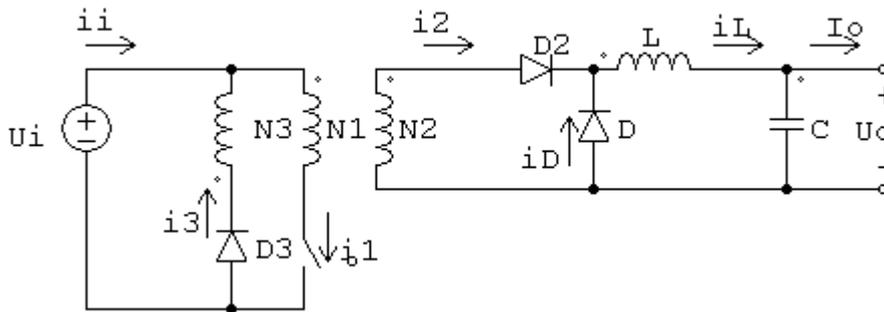


Dato il convertitore forward di figura con le seguenti specifiche:



Specifiche

Tensione d'ingresso: $U_i = 280 \text{ V} \div 340 \text{ V}$

Tensione d'uscita $U_o = 48 \text{ V}$, $\Delta U_o = 2\%$ statico, $\Delta U_o = 5\%$ dinamico

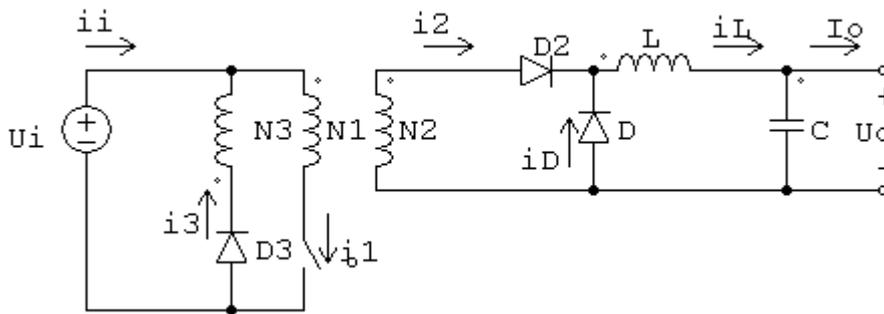
Corrente d'uscita $I_o = 10 \div 50 \text{ A}$

Frequenza di switching: $f_s = 50 \text{ kHz}$

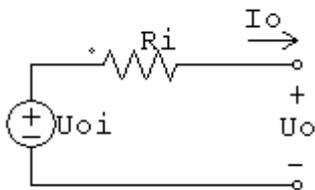
Si chiede:

- 1) Di dimensionare L , C e il rapporto spire $\frac{N1}{N2}$ in modo da garantire funzionamento CCM in ogni condizione operativa assumendo, in prima approssimazione, che il rendimento del circuito sia unitario.
Assunzione facoltativa: Ai fini del calcolo del rapporto spire si assuma che il rendimento del circuito sia $\eta=0.85$.
- 2) Di valutare il valore dell'induttanza magnetizzante (riportata al primario) assumendo che la corrente magnetizzante di picco (lato primario) sia circa pari al 20% della corrente secondaria riportata al primario.
- 3) Di valutare gli stress di tensione e corrente (valore medio e di picco) nello switch e nei diodi.
- 4) Di stimare la banda passante ottenibile nell'ipotesi di utilizzare un controllo diretto di tensione a catena chiusa. **Quesito facoltativo**

Soluzione



1) Calcolo del rapporto spire



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

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{diss}} \quad P_{diss} = P_o \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta} = 50 \cdot 48 \cdot \frac{0.15}{0.85} \approx 425W$$

$$R_i = \frac{P_{diss}}{I_o^2} \approx \frac{425}{2500} \approx 0.17\Omega$$

$$U_{oi} = U_o + R_i \cdot I_o = 48 + 0.17 \cdot 50 = 56.5V$$

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

Considerando che il convertitore forward presenta un limite nel max. valore di duty cycle:

$$\delta \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

e assumendo che il numero di spire dell'avvolgimento terziario sia uguale a quello del primario:

$$\frac{N_1}{N_3} = 1 \quad \text{ne deriva:} \quad \delta_{max} = 0.5.$$

Si ha quindi: $U_{oi} = U_2 \cdot \delta = U_{2min} \cdot \delta_{max} = U_{2max} \cdot \delta_{min}$ da cui si deriva:

$$U_{2min} = \frac{U_{oi}}{\delta_{max}} = \frac{U_{oi}}{0.5} = 113V \quad \text{e considerando che } U_i = 280 \div 340 \text{ si ottiene:}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{2min}}{U_{1min}} = \frac{113}{280} \approx 0.4 \quad \text{inoltre:} \quad \delta_{min} = \frac{U_{oi}}{U_{2max}} = \frac{U_{oi}}{U_{1max} \cdot \frac{N_2}{N_1}} = \frac{56.5}{340 \cdot 0.4} \approx 0.41$$

Calcolo di L

Se il funzionamento deve essere continuo in ogni condizione operativa:

$$\Delta I_{L\max} \leq 2I_{o\min} = 20A$$

$$L \cong \frac{U_o}{f_s \cdot 2I_{o\min}} \cdot (1 - \delta_{\min}) = \frac{48 \cdot (1 - 0.41)}{50 \cdot 10^3 \cdot 20} \approx 28 \mu H$$

Calcolo di C

Statico:

$$\Delta U_o = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot C} \quad C \geq \frac{\Delta I_{L\max}}{8 \cdot f_s \cdot \Delta U_o} = \frac{20}{8 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0.96} \approx 52 \mu F$$

Nel caso limite di distacco di carico, tutta l'energia immagazzinata nell'induttore viene scaricata nel condensatore; mantenere l'errore della tensione d'uscita entro il 5% significa soddisfare la condizione:

$$C \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}_L^2}{U_o \cdot \Delta U_o} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot 28 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{48 \cdot 2.4} \cong 300 \mu F$$

$$\hat{I}_L = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} \cong 50 + \frac{20}{2} = 60A$$

Si deve scegliere quest'ultimo valore per rispettare entrambe le specifiche

2) Calcolo dell'induttanza di magnetizzazione

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

$$\hat{I}_\mu = 0.2 \cdot \hat{I}_2 \frac{N_2}{N_1} = 0.2 \cdot 60 \cdot 0.4 = 4.8A \quad \text{inoltre } \bar{I}_\mu = \frac{\hat{I}_\mu \cdot T_s}{2 \cdot T_s} = 4.8 \cdot 0.5 = 2.4A$$

$$\hat{I}_\mu = \frac{U_i}{L_\mu} \cdot t_{on} \quad L_\mu \geq \frac{U_{i\min}}{\hat{I}_\mu \cdot f_s} \cdot \delta_{\max} = \frac{280 \cdot 0.5}{4.8 \cdot 50 \cdot 10^3} \cong 600 \mu H$$

3) Stress di tensione e corrente su switch e diodi

$$\text{Diodo D: } \hat{U}_D = U_{2\max} = U_{i\max} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 340 \cdot 0.4 = 136V$$

$$\bar{I}_D = I_L (1 - \delta_{\min}) = 50 \cdot (1 - 0.41) \approx 30A$$

$$\hat{I}_D = \hat{I}_L = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 50 + \frac{20}{2} = 60A$$

$$\text{Diodo D2: } \hat{U}_{D2} = 136V \quad \hat{I}_D = 60A \quad \text{come per il diodo D}$$

$$\bar{I}_{D2} = I_L \delta_{\max} = I_o \delta_{\max} = 50 \cdot 0.5 \approx 25A$$

Switch:

$$\hat{U}_s = U_{i_{\max}} + U_{i_{\max}} \cdot \frac{N_1}{N_3} = 2 \cdot U_{i_{\max}} = 680V$$

$$\bar{I}_s = \bar{I}_1 = \bar{I}_1' + \bar{I}_\mu = [I_L \cdot \frac{N_2}{N_1} \delta_{\max} + \bar{I}_\mu] = 50 \cdot 0.4 \cdot 0.5 + 2.4 \approx 12.4A$$

$$\hat{I}_s = (I_o + \frac{\Delta I_L}{2}) \cdot \frac{N_2}{N_1} + \hat{I}_\mu = (50 + 10) \cdot 0.4 + 4.8 \approx 29A$$

Diodo D3: $\hat{U}_s = U_{i_{\max}} + U_{i_{\max}} \cdot \frac{N_3}{N_1} = 2 \cdot U_{i_{\max}} = 680V$ come per lo switch S

$$\bar{I}_{D3} = \frac{\hat{I}_\mu}{2} \cdot \delta_{\max} = [0.2 \cdot I_o \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\delta_{\max}}{2}] = 0.2 \cdot 50 \cdot 0.4 \cdot 0.25 \approx 1A$$

$$\hat{I}_{D3} = \hat{I}_\mu = 4A$$

3) Stima della banda passante

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{28 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^{-6}}} = 10krad / s \quad f_r = 1736Hz$$

Scegliendo un regolatore di tipo PID, la funzione di trasferimento complessiva risulta:

$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{U_i}{W_{\max}} \cdot k \cdot \frac{(1 + s\tau_1) \cdot (1 + s\tau_2)}{s\tau_1} \cdot \frac{1}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC}$$

dove m(s) è il segnale modulante e Wmax il picco della portante triangolare.

Compensando con i due zeri del PID il doppio polo del filtro si potrebbe pensare di ottenere una banda passante anche piuttosto maggiore del valore fr. Bisogna tenere però conto che avvicinandosi alla frequenza di commutazione insorgono fenomeni d'instabilità.

E' quindi prudente scegliere un valore di guadagno tale per cui la banda passante resti inferiore ai 1000 Hz.