

## Progetto di convertitore push-pull

Specifiche:  $U_i = 36-72 \text{ V}$  (applic. Telecom)

$U_o = 12 \text{ V}$ ,  $I_o = 20 \text{ A}$  (uscita isolata)

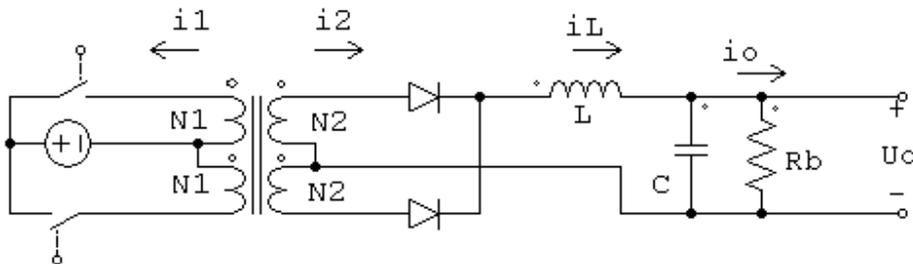
Precisione: statica 1%, dinamica 5%

Si richiede di garantire il funzionamento continuo

Scelte progettuali: frequenza di commutazione  $f_s = 50 \text{ kHz}$

Switch: Mosfet

Frequenza d'uscita  $f_o = 2 f_s = 100 \text{ kHz}$



a) Resistenza bleeder  $R_b$  (per garantire il funzionamento continuo)

Si pone  $P_B \sim 5\% P_o = 12 \text{ W}$  quindi  $R_B = \frac{U_o^2}{P_B} = 12 \Omega$

b) Induttanza di filtro  $L$

Le caratteristiche ingresso uscita nel caso CCM e DCM sono:

$$\text{CCM: } \frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \delta \quad \text{DCM: } \frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{2 \cdot f_o \cdot L \cdot I_o}{\frac{N_2}{N_1} \cdot U_i}}$$

Nel caso di carico resistivo, ponendo  $k = \frac{2 \cdot f_o \cdot L}{R_B}$ , si può scrivere la relazione in DCM

$$\text{come: } \frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k}{\delta^2}}}$$

Uguagliando le caratteristiche nella condizione limite CCM/DCM si ottiene

$$k_{\text{lim}} = 1 - \delta \quad \text{quindi} \quad \frac{2 \cdot f_o \cdot L}{R_B} = 1 - \delta$$

per assicurare il funzionamento continuo per tutti i valori di  $\delta$ , si sceglie un valore di L

$$L \geq \frac{R_B}{2 \cdot f_o} = \frac{12}{2 \cdot 100 \cdot 10^3} = 60 \mu H$$

c) Tensione secondaria

Posti: C.d.t. sui diodi di raddrizzamento circa 1 V

C.d.t. sul trasformatore, su L, ecc circa 1.5 V (10%  $U_o$ )

Max duty cycle  $\delta_{\text{max}} = 0.95$  (0.5  $\mu s$  dead-time)

Si ottiene:  $U_{2\text{min}} = (\text{per } U_i=36 \text{ V}) = (U_o + \text{c.d.t.}) / \delta_{\text{max}} \sim 15 \text{ V}$

$U_{2\text{max}} = (\text{per } U_i=72 \text{ V}) \sim 30 \text{ V}$  cui corrisponde un  $\delta \sim 0.5$

d) Condensatore d'uscita

Statico:

Il massimo valore del ripple di corrente si ha per  $\delta = 0.5$ , cioè per  $U_i = U_{i\text{max}}$  e vale

$$\Delta I_{\text{max}} = \frac{U_{2\text{max}}}{4 \cdot f_o \cdot L} = \frac{30}{4 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 1.25 \text{ A}$$

La carica scambiata con il condensatore è:

$$\Delta Q = \frac{\Delta i_{\text{max}} \cdot T_o}{8} = \frac{1.25 \cdot 10^{-5}}{8} \approx 1.6 \mu C$$

ed la conseguente ondulazione di tensione è:

$$\Delta U = 0.01 \cdot U_o = 0.12 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1.6 \cdot 10^{-6}}{C} \quad \text{quindi } C \sim 13 \mu F$$

Dinamico:

La situazione peggiore si ha al distacco di carico, quando tutta l'energia immagazzinata nell'induttore si scarica nel condensatore:

$$\hat{I}_L = I_o + \frac{\Delta I_{L\max}}{2} = 20 + \frac{1.25}{2} = 20.62A \quad W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}_L^2 \cong 1.3 \cdot 10^{-2} J$$

$$C = \frac{W_L}{U_o \cdot \Delta U_o} = \frac{1.3 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 0.6} \cong 1.7mF$$

e) Progetto dell'induttanza di filtro

Scelta del nucleo magnetico

$$L \cdot I_L = N \cdot \Phi = N \cdot B_{\max} \cdot A_e$$

Assunta come corrente nominale  $I_L$  dell'induttanza, la corrente d'uscita  $I_o$  (si trascura il ripple) e scelto un materiale magnetico con  $B_{\max} = 200$  mT (a 100 kHz), si ha:

$$N \cdot A_e = \frac{L \cdot I_o}{B_{\max}} = \frac{60 \cdot 10^{-6} \cdot 20}{0.2} = 6^{-3} m^2 = 6000 mm^2$$

Assunto un valore di densità di corrente  $\delta_I = 4A/mm^2$ , la sezione utile del filo di rame diventa:

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{20}{4} = 5 mm^2 \quad \text{quindi il diametro del filo di rame è } d_{int} = 2.5 mm$$

Usando del filo smaltato con uno spessore di isolamento di 0.2 mm, si ha  $d_{ext} \sim 3$  mm e quindi  $S_{filo} \sim 7$  mm<sup>2</sup>. Assunto un coefficiente di riempimento pari a 0.5, si ha:

$$S_{avv} = \frac{N \cdot S_{filo}}{K_r} = \frac{N \cdot 7}{0.5} = N \cdot 14 mm^2$$

Si sceglie un nucleo tipo EC70, con:

sezione magnetica utile  $A_e = 279$  mm<sup>2</sup> ( $A_{min} = 211$  mm<sup>2</sup>)

sezione utile per l'avvolgimento  $A_N = 470$  mm<sup>2</sup>

permeanza  $A_L = 3900$  nH (senza traferro)

Si ottiene:

$$N = \frac{6000}{279} \approx 22 \text{ spire} \quad S_{avv} = 14 \cdot 22 \sim 310 \text{ mm}^2$$

Calcolo del traferro t

Indicata la riluttanza magnetica con  $R_m$ , si può scrivere:  $R_m = \frac{t}{\mu_o \cdot A_{\min}} = \frac{N \cdot I_o}{\Phi}$

e quindi 
$$t = \frac{\mu_o \cdot N \cdot I_o \cdot A_{\min}}{B_{\max} \cdot A_e} = \frac{1.25 \cdot 10^{-6} \cdot 22 \cdot 20 \cdot 211}{0.2 \cdot 279} = 2mm$$

Calcolo della resistenza dell'avvolgimento:

$$R_L = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d_m \cdot N}{S_{CU}} = \frac{0.02 \cdot 3.1416 \cdot 0.03 \cdot 22}{5} \approx 9m\Omega$$

dove  $\rho = 0.02$  ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ) e  $\rho \cdot d_m$  è la lunghezza media delle spire (nei data sheet viene indicato il diametro interno ed esterno della sezione utile dell'avvolgimento, rispettivamente 17 e 42.5 mm)

Perdite nell'avvolgimento:

$$P_L = R \cdot I_o^2 \sim 4 \text{ W}$$

f) Progetto del trasformatore

Assunta la minima tensione di alimentazione  $U_{\min} = 36 \text{ V}$

e stimata la c.d.t. dovuta ai mosfet e avvolgimenti  $\sim 3 \text{ V}$

si ha che la tensione utile al primario è  $U_i = 33 \text{ V}$

$U_{2\min} = 15 \text{ V}$  (per assicurare  $U_o = 12 \text{ V}$  con  $U_{\min} = 36 \text{ V}$ , tenendo conto delle c.d.t. sul secondario e di un limite nel  $\delta_{\max} = 0.95$ )

Si può ricavare quindi 
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{33}{15} = 2.2$$

Scelta del nucleo magnetico:

la massima escursione del flusso si avrà quando gli switch operano con il massimo duty-cycle a cui corrisponde la minima tensione d'ingresso (con la tensione max ed il  $\delta_{\min} = 0.5$  si ottiene comunque lo stesso valore), si può scrivere quindi:

$$T_s \cdot U_{i\min} = N_1 \cdot \Phi_{\max} = N_1 \cdot B_{\max} \cdot A_e$$

Alla frequenza di 50 kHz,  $B_{\max} = 300 \text{ mT}$ , si ha:

$$N \cdot A_e = \frac{T_s \cdot U_{i\min}}{B_{\max}} = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 36}{0.3} = 2400mm^2$$

Si assume ancora un nucleo tipo EC70, con:

$A_e = 279 \text{ mm}^2$ ,  $A_N = 470 \text{ mm}^2$ ,  $A_L = 3900 \text{ nH}$  (senza traferro)

e si ottiene:

$$N_1 = \frac{2400}{279} = 8.6 \approx 9 \text{ spire} \quad N_2 = \frac{N_1}{2.2} \approx 4 \text{ spire}$$

Avvolgimento secondario

$$I_{2rms} \approx \frac{20}{\sqrt{2}} = 14 \text{ A}$$

Assunto  $\delta_I = 4 \text{ A/mm}^2$

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{14}{4} = 3.5 \approx 4 \text{ mm}^2 \quad d_{int} = 2.3 \text{ mm} \quad d_{ext} \sim 2.7 \text{ mm} \quad S_{filo} \sim 6 \text{ mm}^2$$

$$S_{avv} = \frac{N_2 \cdot S_{filo}}{K_r} = \frac{4 \cdot 6}{0.5} = 48 \text{ mm}^2$$

La sezione totale degli avvolgimenti secondari è quindi di circa  $100 \text{ mm}^2$

Avvolgimento primario

Indicato con  $I'_1 = I_1 - I_\mu$ , si può scrivere

$$I'_1 = \frac{N_2 \cdot I_2}{N_1} = \frac{4 \cdot 20}{9} = 8.9 \text{ A}$$

$$L_\mu = N_1^2 \cdot A_L \approx 81 \cdot 3900 \cdot 10^{-9} = 323 \mu\text{H}$$

$$\hat{I}_\mu = \frac{U_{i\min} \cdot T_S}{L_\mu} \approx 2.2 \text{ A}$$

$$\hat{I}_1 \approx 11 \text{ A} \quad I_{1rms} \approx 8 \text{ A}$$

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{8}{4} = 2 \text{ mm}^2 \quad d_{int} = 1.6 \text{ mm} \quad d_{ext} \sim 2 \text{ mm} \quad S_{filo} \sim 3.2 \text{ mm}^2$$

$$S_{avv} = \frac{N_1 \cdot S_{filo}}{K_r} = \frac{9 \cdot 3.2}{0.5} = 58 \text{ mm}^2$$

quindi la sezione totale degli avvolgimenti primari è di circa  $120 \text{ mm}^2$  e la sezione complessiva per tutti gli avvolgimenti è di circa  $220 \text{ mm}^2$ .

Il nucleo è quindi largamente sufficiente.

