

Convertitore Push-pull

Esempio di dimensionamento

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)

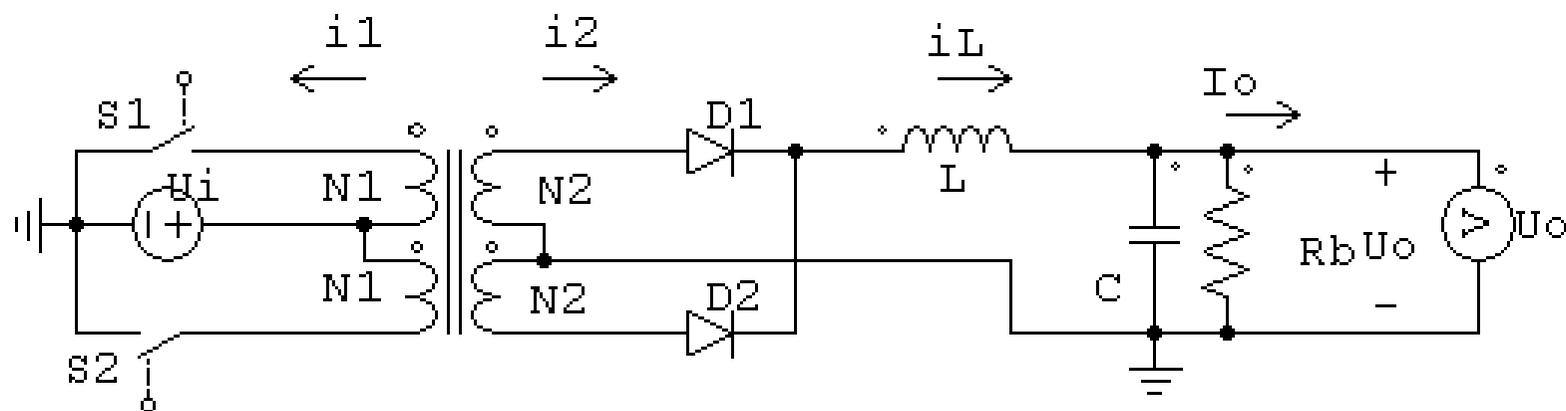
Precisione: statica 1%, dinamica 5%

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:

CCM:
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \delta$$

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

Per assicurare il funzionamento continuo per tutti i valori di δ , si sceglie un valore di L

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

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% Uo)

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

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

$U_{2\max} = (\text{per } U_i=72 \text{ V}) \sim 30 \text{ V}$

cui corrisponde un $\delta \sim 0.5$

d) Condensatore d'uscita - Caso statico (a regime):
Il massimo valore del ripple di corrente si ha per $\delta = 0.5$,
cioè per $U_i = U_{i\max}$ e vale

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

La carica scambiata con il condensatore è:

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

e la conseguente ondulazione di tensione è:

$$\Delta U = 0.01 \cdot U_o = 0.12 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1.6 \cdot 10^{-6}}{C}$$

quindi $C \sim 13 \mu F$

d) Condensatore d'uscita - Caso dinamico (distacco di carico):
La situazione peggiore si ha al distacco di carico, quando tutta l'energia immagazzinata nell'induttore si scarica nel condensatore:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_o^2 = 1.2 \cdot 10^{-2} J$$

$$C = \frac{W_L}{U_o \cdot \Delta U_o} = \frac{1.2 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 0.6} = 1.7 mF$$

e) Progetto dell'induttanza di filtro
Scelta del nucleo magnetico

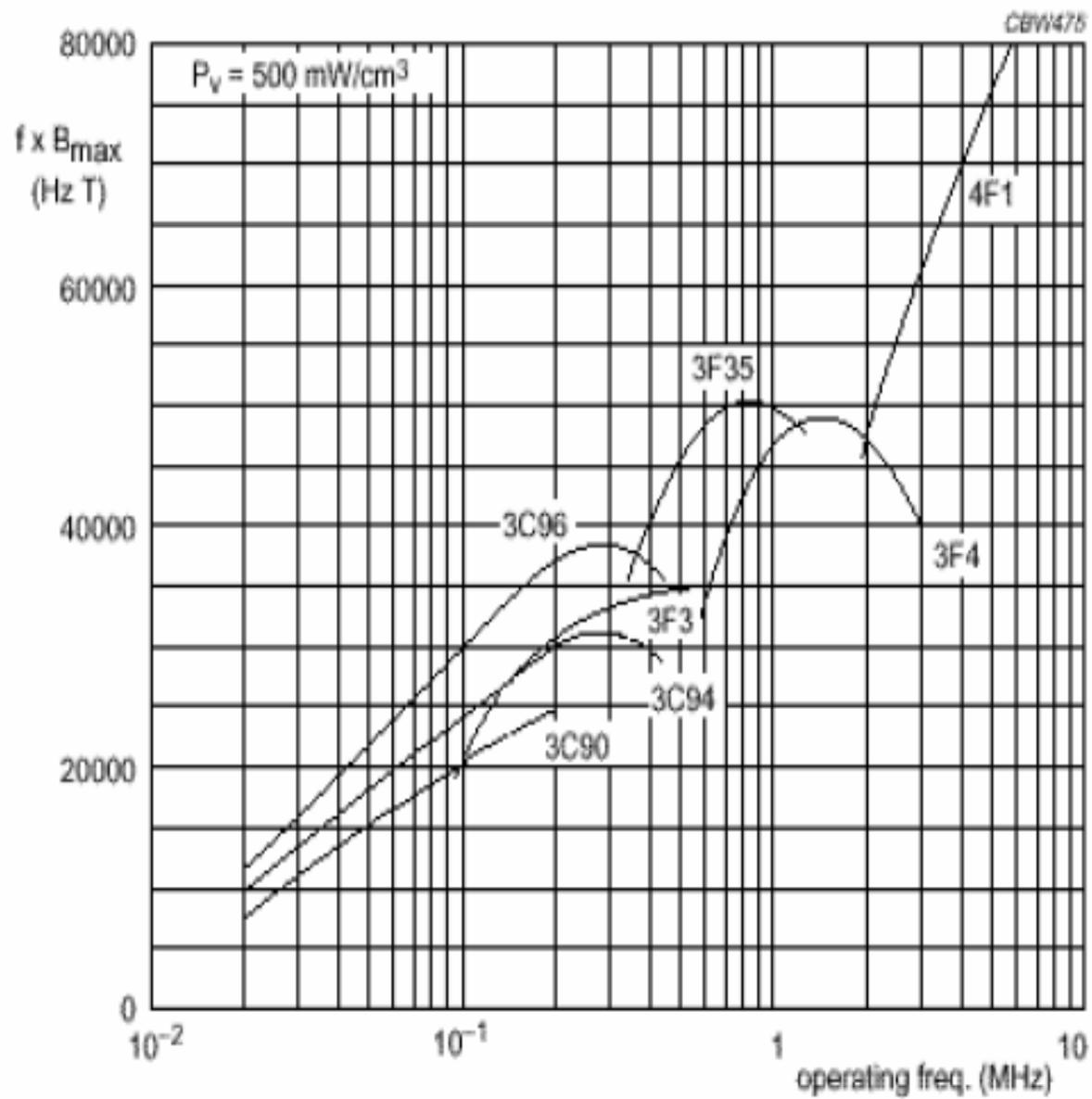
$$L \cdot I_L = N \cdot \Phi = N \cdot B_{\max} \cdot A_e$$

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:

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

Table 3 Power throughput for different core types at 100 kHz switching frequency

POWER RANGE		
	(W)	CORE TYPE
	?5	RM4; P11/7; T14; EF13; U10
5	to10	RM5; P14/8
		RM6; E20; P18/11; T23; U15;
10to 20		
		EFD15
		RM8; P22/13; U20; RM10;
20to 50		
		ETD29; E25; T26/10; EFD20
		ETD29; ETD34; EC35; EC41;
50to100		
		RM12; P30/19; T26/20; EFD25
		ETD34; ETD39; ETD44; EC41;
100to 200		
		EC52; RM14; P36/22; E30; T56;
		U25; U30; E42; EFD30
		ETD44; ETD49; E55; EC52; E42;
200to 500		
		P42/29; U37
?500		E65; EC70; U93; U100



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

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{20}{4} = 5mm^2$$

quindi il diametro del filo di rame è $d_{int}=2.5mm$

Usando del filo smaltato con uno spessore di isolamento di 0.2 mm, si ha $d_{ext} \sim 3 mm$ e quindi $S_{filo} \sim 7 mm^2$.

Assunto un coefficiente di riempimento pari a 0.5, si ha:

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

Si sceglie un nucleo tipo EC70, con:

sezione magnetica utile $A_e = 279 \text{ mm}^2$ ($A_{\min} = 211 \text{ mm}^2$)

sezione utile per l'avvolgimento $A_N = 470 \text{ mm}^2$

permeanza $A_L = 3900 \text{ nH}$ (senza traferro)

Si ottiene:

$$N = \frac{6000}{279} \approx 22 \text{ spire}$$

$$S_{\text{avv}} = 14 \cdot 22 \sim 310 \text{ mm}^2$$

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 $U_{i\min} = 36 \text{ V}$

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 $U_{i\min} = 36 \text{ V}$,

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:

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

Si assume ancora un nucleo tipo EC70, con:

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

e si ottiene:

$$N_1 = \frac{2400}{279} = 8.6 \approx 9 \text{ spire}$$

$$N_2 = \frac{N_1}{2.2} \approx 4 \text{ spire}$$

Avvolgimento secondario

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

Assunto $\delta_1 = 4A/mm^2$

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{14}{4} = 3.5 \approx 4mm^2$$

$$d_{int} = 2.3mm \quad d_{ext} \sim 2.7 \text{ mm} \quad S_{filo} \sim 6 \text{ mm}^2$$

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

La sezione totale degli avvolgimenti secondari è quindi di circa 100 mm^2

Avvolgimento primario

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

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

$$L_\mu = N_1^2 \cdot A_L \approx 81 \cdot 3990 \cdot 10^{-9} = 323 \mu H$$

$$\hat{I}_\mu = \frac{U_{i \min} \cdot T_S}{L_\mu} \approx 2.2A \quad \hat{I}_1 \approx 11A \quad I_{1rms} \approx 8A$$

$$S_{CU} = \frac{I_o}{\delta_I} = \frac{8}{4} = 2mm^2$$

$$d_{\text{int}}=1.6\text{mm} \quad d_{\text{ext}} \sim 2 \text{ mm} \quad S_{\text{filo}} \sim 3.2 \text{ mm}^2$$

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

quindi la sezione totale degli avvolgimenti primari è di circa 120 mm² e la sezione complessiva per tutti gli avvolgimenti è di circa 220 mm².

Il nucleo è quindi largamente sufficiente.

