

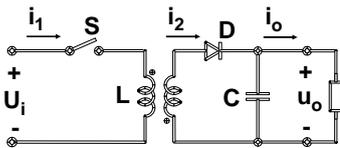
## Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

*“Convertitore Flyback.  
Esempio di progetto”*

### Argomenti trattati

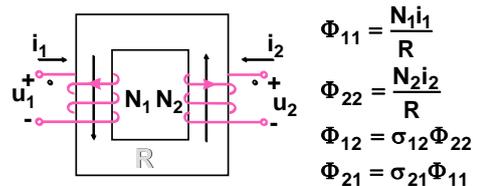
- Struttura e caratteristiche del convertitore Flyback
- Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita

### Convertitore Flyback



- è il più semplice schema a trasformatore
- l'induttanza del convertitore buck-boost viene sostituita da un mutuo induttore
- ha un basso fattore di utilizzo  $P_o/P_s$

### Mutuo Induttore

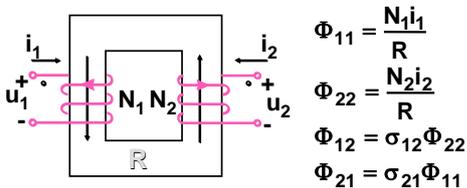


Flussi concatenati con gli avvolgimenti:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = N_1(\Phi_{11} + \Phi_{12})$$

$$= N_1 \left( \frac{N_1 i_1}{R} + \sigma_{12} \frac{N_2 i_2}{R} \right)$$

### Mutuo Induttore

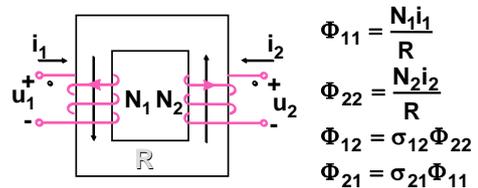


Flussi concatenati con gli avvolgimenti:

$$\lambda_2 = \lambda_{22} + \lambda_{21} = N_2(\Phi_{22} + \Phi_{21})$$

$$= N_2 \left( \frac{N_2 i_2}{R} + \sigma_{21} \frac{N_1 i_1}{R} \right)$$

### Mutuo Induttore



Coefficiente di accoppiamento:

$$\sigma_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}} = \sigma_{21} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} = \sigma$$

**Mutuo Induttore**

$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R}$   
 $\Phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{R}$   
 $\Phi_{12} = \sigma_{12} \Phi_{22}$   
 $\Phi_{21} = \sigma_{21} \Phi_{11}$

Accoppiamento perfetto:  
 $\sigma = 1 \Rightarrow \Phi_{12} = \Phi_{22}, \Phi_{21} = \Phi_{11}$

**Mutuo Induttore**

$L_M = \sigma \sqrt{L_1 L_2}$   
 Accoppiamento perfetto:  
 $L_M = \sqrt{L_1 L_2}$

Coefficienti di autoinduzione:  
 $\lambda_1 = \frac{N_1^2 i_1}{R} + \sigma \frac{N_2 N_1 i_2}{R} = L_1 i_1 + L_M i_2$

**Mutuo Induttore**

$L_M = \sigma \sqrt{L_1 L_2}$   
 Accoppiamento perfetto:  
 $L_M = \sqrt{L_1 L_2}$

Coefficienti di autoinduzione:  
 $\lambda_2 = \frac{N_2^2 i_2}{R} + \sigma \frac{N_1 N_2 i_1}{R} = L_2 i_2 + L_M i_1$

**Mutuo Induttore**

Energia accumulata:  
 $W = \frac{1}{2} \lambda_1 i_1 + \frac{1}{2} \lambda_2 i_2 = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + L_M i_1 i_2$

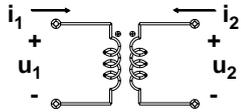
**Mutuo Induttore**

Nota:  
 Contrariamente al trasformatore ( $R = 0$ ), il mutuo induttore ( $R > 0$ ) accumula energia. A tal fine vengono introdotti dei traferri.

**Mutuo Induttore**

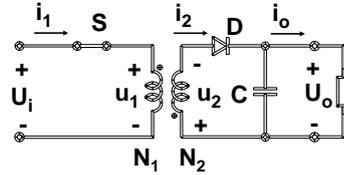
Nota:  
 Contrariamente al trasformatore ( $R = 0$ ), il mutuo induttore ( $R > 0$ ) accumula energia. A tal fine vengono introdotti dei traferri.

**Equazioni del mutuo induttore**



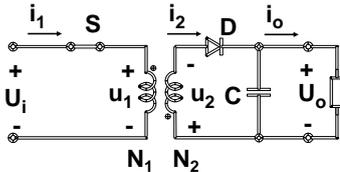
$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_M \cdot \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = L_M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di on (CCM)**



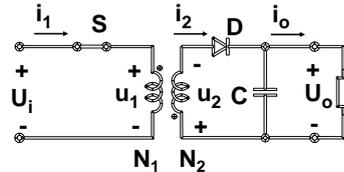
$$S \text{ on} \Rightarrow u_1 = U_i \Rightarrow i_2 = 0 \Rightarrow D \text{ off}$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di on (CCM)**



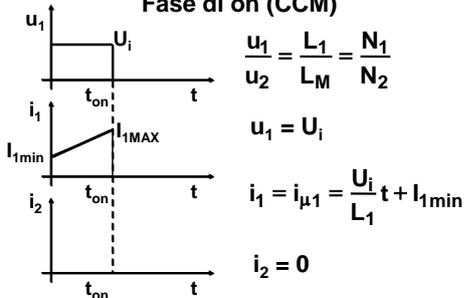
$$\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \\ u_2 = L_M \cdot \frac{di_1}{dt} \end{cases} \Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{L_1}{L_M} = \frac{N_1}{N_2}$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di on (CCM)**



$$i_1 = i_{\mu 1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1\min} \quad I_{1\text{MAX}} = I_{1\min} + \frac{U_i}{L_1} t_{\text{on}}$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di on (CCM)**



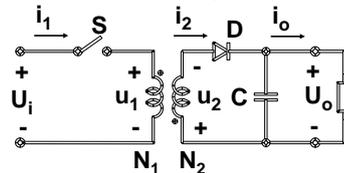
$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{L_1}{L_M} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$u_1 = U_i$$

$$i_1 = i_{\mu 1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1\min}$$

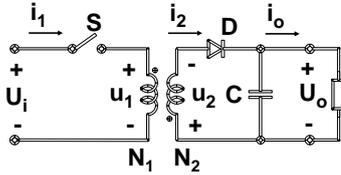
$$i_2 = 0$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di off (CCM)**



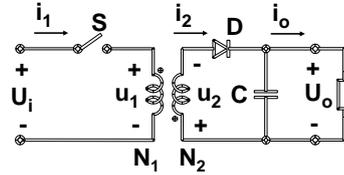
$$S \text{ off} \Rightarrow i_1 = 0 \Rightarrow i_2 > 0 \Rightarrow u_2 = -U_o$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di off (CCM)**



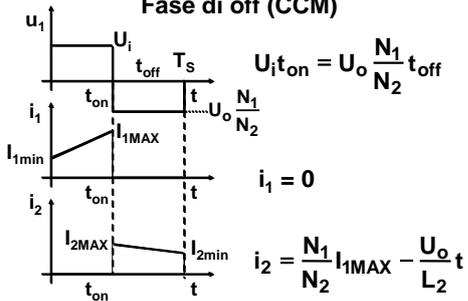
$$\begin{cases} u_1 = L_M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{L_M}{L_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di off (CCM)**

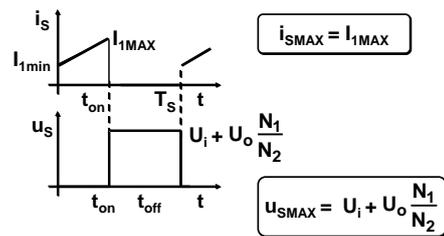


$$i_2 = i_{\mu 2} = I_{2MAX} - \frac{U_o}{L_2} t = \frac{N_1}{N_2} I_{1MAX} - \frac{U_o}{L_2} t$$

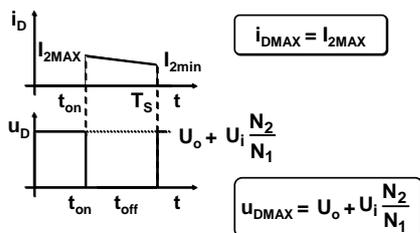
**Funzionamento del convertitore flyback  
Fase di off (CCM)**



**Funzionamento del convertitore flyback  
Sollecitazioni sugli interruttori**



**Funzionamento del convertitore flyback  
Sollecitazioni sugli interruttori**



**Fattore di conversione del  
convertitore Flyback**

**Fattore di conversione del convertitore Flyback**

$$\text{CCM } (I_o > I_{o\text{lim}}) \quad M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{\delta}{1-\delta}$$

$$\text{DCM } (I_o < I_{o\text{lim}}) \quad M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{I_N}{I_o} \delta^2$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_s L_1}$$

$$I_{o\text{lim}} = I_N \frac{N_1}{N_2} \delta(1-\delta)$$

**Caratteristiche con carico resistivo**

$$\text{CCM } (I_o > I_{o\text{lim}}) \quad M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{\delta}{1-\delta}$$

$$\text{DCM } (I_o < I_{o\text{lim}}) \quad M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta}{\sqrt{k}}$$

$$k = \frac{2 f_s L_1}{R_o}$$

$$k_{\text{lim}} = \left[ \frac{N_1}{N_2} (1-\delta) \right]^2$$

**Modo di utilizzo**

Il convertitore flyback si usa normalmente in DCM perchè:

- si sfrutta l'intera escursione del flusso ( $\Delta\Phi = B_{\text{sat}} S$ ) e quindi il nucleo risulta più piccolo
- si ottengono migliori caratteristiche dinamiche

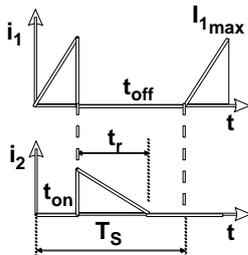
**Tasso di utilizzo di un convertitore Flyback ( $i_L = I_L$ )**

$$\frac{P_o}{P_s} = \delta(1-\delta) \leq \frac{1}{4} \quad (\text{CCM})$$

$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{\delta(1-\delta)}{2} \leq \frac{1}{8} \quad (\text{limite CCM - DCM})$$

Poichè il tasso di utilizzo è basso il convertitore si usa a bassa potenza

**Funzionamento discontinuo (DCM)  
Correnti a primario e a secondario**

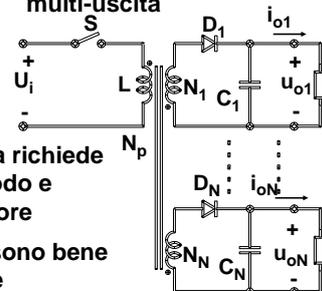


$$I_{1\text{max}} = \frac{U_i}{L_1} t_{\text{on}}$$

$$I_{2\text{max}} = \frac{N_1}{N_2} I_{1\text{max}}$$

$$t_r = \frac{N_2}{N_1} L_1 \frac{I_{1\text{max}}}{U_o}$$

**Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita**



Ogni uscita richiede un solo diodo e condensatore

Le uscite sono bene accoppiate

**Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita**

**Applicazione:**

**Alimentatore per scheda di controllo e driver di un inverter per azionamento**

**Convertitore Flyback multi-uscita**

**Specifiche di progetto**

Potenza di uscita totale .....=18W

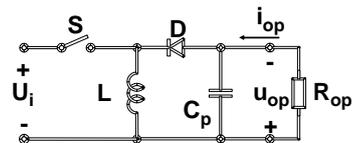
Frequenza di commutazione .....=50kHz

Tensione continua d'ingresso ...=180-710V

**Specifiche per le singole uscite**

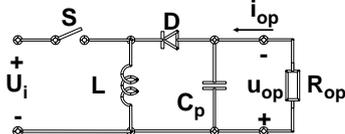
Tensioni di uscita [V]	Assorbimento (min-max) [mA]
$U_{01} - U_{03} = +15 \text{ V}$	13-25
$U_{04} = +15 \text{ V}$	44-83
$U_{05} = +5 \text{ V}$	100-350
$U_{06} = +15 \text{ V}$	150-400
$U_{07} = -15 \text{ V}$	80-280
$U_{08} = +24 \text{ V}$	0-100
$U_{09} = +15 \text{ V}$	50
$U_{10} = +15 \text{ V}$	1.7

**Analisi del convertitore flyback multi-uscita**



Riportando tutti i parametri a primario si possono utilizzare le relazioni del convertitore buck-boost

**Analisi del convertitore multi-uscita**



$$n_j = \frac{N_j}{N_p} \quad u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j} \quad i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj}$$

$$R_{op} = \frac{1}{G_{op}} \quad G_{op} = \sum_{j=1}^N G_{oj} n_j^2 \quad C_p = \sum_{j=1}^N C_j n_j^2$$

**Dimensionamento della parte di potenza**

**1) Calcolo dei rapporti spire**

Ipotesi: funzionamento CCM alla corrente nominale

Motivo: limitare inferiormente  $t_{onmin}$

Rapporti di conversione  $\Rightarrow$

$$M_{min} = \frac{U_{op}}{U_{i_{max}}} = \frac{\delta_{min}}{1 - \delta_{min}}$$

$$M_{max} = \frac{U_{op}}{U_{i_{min}}} = \frac{\delta_{max}}{1 - \delta_{max}}$$

$\delta_{min}$  e  $\delta_{max}$  dipendono dalla scelta di  $U_{op}$

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**1) Calcolo dei rapporti spire**

Il valore della tensione di carico riportata a primario ( $U_{op}$ ) si determina in modo da limitare a valori opportuni:

- la tensione massima dell'interruttore
- il minimo  $t_{on}$  dell'interruttore

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**1) Calcolo dei rapporti spire**

**Tensione massima dell'interruttore**

$$U_{s_{max}} = U_{i_{max}} + U_{op}$$



$$\delta_{min} = 1 - \frac{U_{i_{max}}}{U_{s_{max}}}$$

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**1) Calcolo dei rapporti spire**

**Minimo  $t_{on}$  dell'interruttore**

$$t_{on_{min}} = \delta_{min} T_s \quad T_s = 20 \mu s$$

**NOTA:** Se al diminuire della corrente di carico il convertitore entrasse in funzionamento intermittente si causerebbe una ulteriore diminuzione del duty-cycle. Per evitare ciò si tende ad evitare il DCM.

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**1) Calcolo dei rapporti spire**

Posto:  $\delta_{min} = 0.1 \Rightarrow t_{on_{min}} = 2 \mu s$



$$U_{op} \approx 80 V$$



$$n_j = \frac{U_{op}}{U_{oj}}, j = 1 + N$$

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**2) Calcolo dell'induttanza L (a primario)**

Si assume:  $\alpha = 0.4$

( $\alpha$  = frazione della potenza d'uscita cui corrisponde il funzionamento limite tra CCM e DCM)

Ciò garantisce un funzionamento CCM anche alla minima potenza di uscita, evitando ulteriori riduzioni del duty-cycle.

**Dimensionamento della parte di potenza**  
**2) Calcolo dell'induttanza L (a primario)**

L deve essere dimensionata per garantire CCM in ogni condizione

$$k_{crit} = \frac{1}{(1+M)^2} \quad k_{crit} = \frac{2Lf_s}{R_{op_{max}}}$$

$$R_{op_{max}} = \frac{R_{op_{nom}}}{\alpha}$$

$$L = \frac{R_{op_{nom}}}{2f_s(1+M_{min})^2} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Dimensionamento della parte di potenza  
3) Calcolo degli stress di corrente e tensione dell'interruttore

$$I_{s_{max}} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = I_{op}(1+M) \left( 1 + \frac{1}{k(1+M)^2} \right)$$

$$U_{s_{max}} = U_{i_{max}} + U_{op}$$



$$\begin{aligned} I_{s_{max}} &= 0.59 \text{ A} \\ U_{s_{max}} &= 790 \text{ V} \end{aligned}$$

Dimensionamento della parte di potenza  
4) Dimensionamento del mutuo induttore

Nucleo in ferrite: ETD 34x17x11  
Sezione del nucleo:  $A_e = 92 \text{ mm}^2$

Posto:  $B_{max} = 200 \text{ mT}$



$$N_p = \frac{L I_{s_{max}}}{B_{max} A_e}$$

Dimensionamento della parte di potenza  
4) Dimensionamento del mutuo induttore

Nota: è necessario un traferro (air gap) per evitare la saturazione del nucleo e accumulare energia

$$E_L = \frac{1}{2} L I_{L_{max}}^2$$

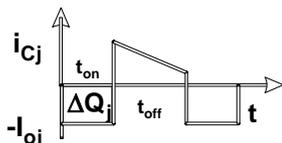
Dimensionamento della parte di potenza  
4) Dimensionamento del mutuo induttore  
Trascurando la riluttanza del nucleo rispetto a quella del traferro si trova:



$$\lambda_t = \frac{\mu_0 A_e N_p^2}{2L}$$

$\lambda_t$  = lunghezza del traferro da realizzare su ciascuna colonna del nucleo

Dimensionamento della parte di potenza  
5) Calcolo delle capacità di uscita  
Ondulazione (ripple statico):



$$C_j = \frac{I_{oj}}{\Delta U_{oj} f_s} \cdot \delta_{max}$$