

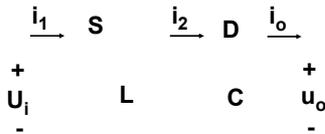
# Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

**“Convertitore Flyback.  
Esempio di progetto”**

## Argomenti trattati

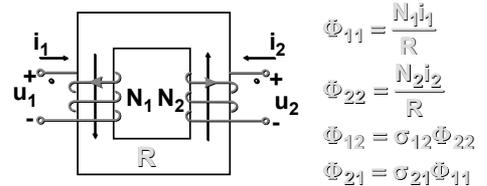
- **Struttura e caratteristiche del convertitore Flyback**
- **Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita**

### 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

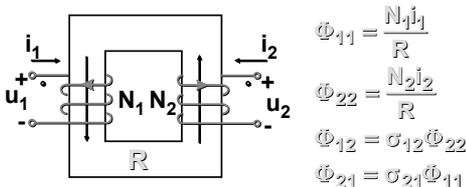


**Flussi concatenati con gli avvolgimenti:**

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

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

### Mutuo Induttore

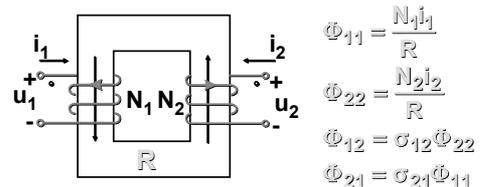


**Flussi concatenati con gli avvolgimenti:**

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

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

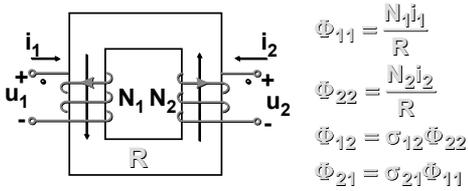
### Mutuo Induttore



**Coefficiente di accoppiamento:**

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

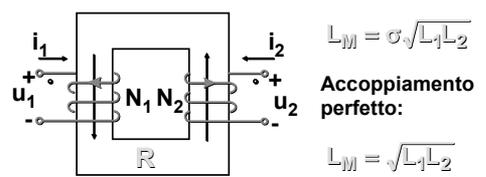
### Mutuo Induttore



Accoppiamento perfetto:

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

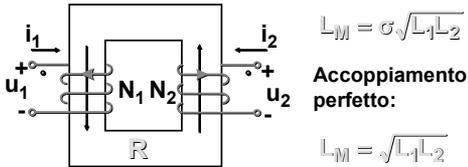
### Mutuo Induttore



Coefficienti di autoinduzione:

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

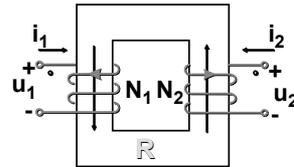
### Mutuo Induttore



Coefficienti di autoinduzione:

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

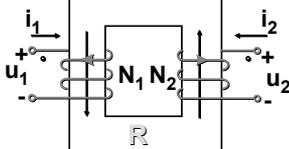
### Mutuo Induttore



Energia accumulata:

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

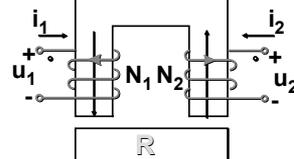
### Mutuo Induttore



Nota:

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

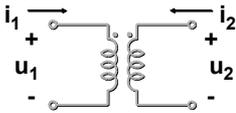
### Mutuo Induttore



Nota:

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

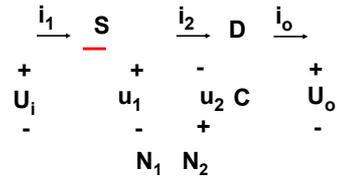
### Equazioni del mutuo induttore



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

### Funzionamento del convertitore flyback

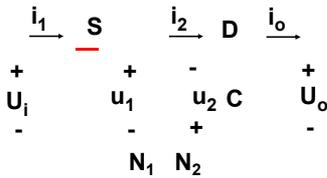
#### Fase di on (CCM)



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

### Funzionamento del convertitore flyback

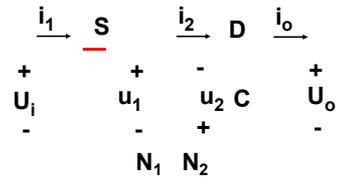
#### Fase di on (CCM)



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

### Funzionamento del convertitore flyback

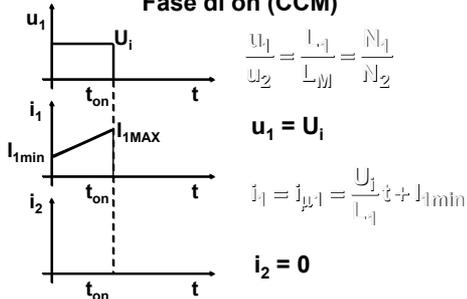
#### Fase di on (CCM)



$$i_1 = i_{p1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1min} \quad I_{1MAX} = I_{1min} + \frac{U_i}{L_1} t_{on}$$

### Funzionamento del convertitore flyback

#### Fase di on (CCM)



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

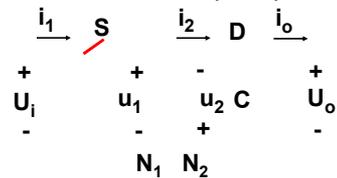
$$u_1 = U_i$$

$$i_1 = i_{p1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1min}$$

$$i_2 = 0$$

### Funzionamento del convertitore flyback

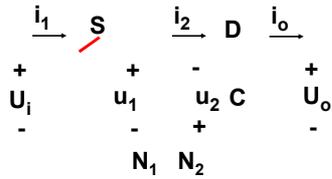
#### Fase di off (CCM)



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

### Funzionamento del convertitore flyback

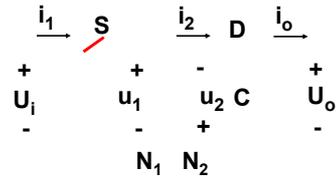
#### Fase di off (CCM)



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

### Funzionamento del convertitore flyback

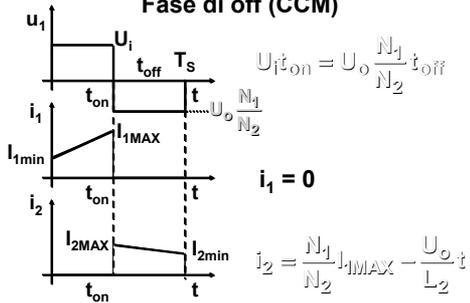
#### Fase di off (CCM)



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

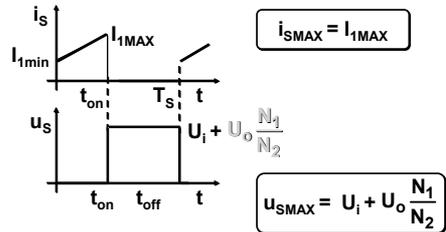
### Funzionamento del convertitore flyback

#### Fase di off (CCM)



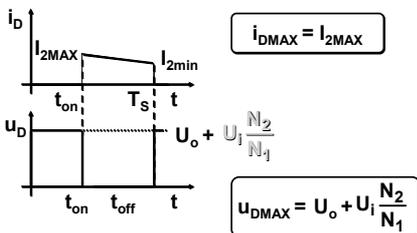
### Funzionamento del convertitore flyback

#### Sollecitazioni sugli interruttori



### Funzionamento del convertitore flyback

#### Sollecitazioni sugli interruttori



### Fattore di conversione del convertitore Flyback

**Fattore di conversione del convertitore Flyback**

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

**Fattore di conversione del convertitore Flyback**

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

$$\text{DCM } (I_o < I_{o\text{lim}}) \quad M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{I_N}{I_o} \delta^2$$
$$I_N = \frac{U_i}{2f_S L_1}$$

**Fattore di conversione del convertitore Flyback**

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

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

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

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

**Caratteristiche con carico resistivo**

**Caratteristiche con carico resistivo**

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

**Caratteristiche con carico resistivo**

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

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

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

### Caratteristiche con carico resistivo

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

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

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

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

### Modo di utilizzo

### 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 ( $i_L = I_L$ )

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

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

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

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

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

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

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

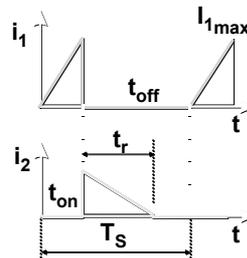
$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{\delta(1-\delta)}{2} \leq \frac{1}{3} \quad (\text{limite CCM - DCM})$$

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

**Funzionamento discontinuo (DCM)**

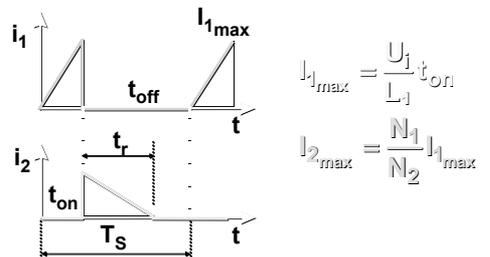
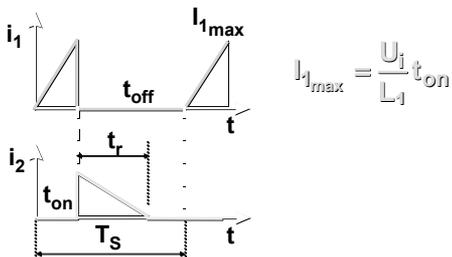
**Funzionamento discontinuo (DCM)  
Correnti a primario e a secondario**

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

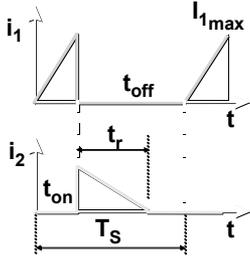


**Funzionamento discontinuo (DCM)  
Correnti a primario e a secondario**

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



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



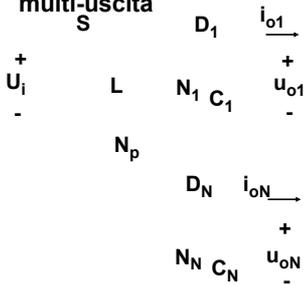
$$I_{1,max} = \frac{U_i}{L_1} t_{on}$$

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

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

## Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita

### Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita

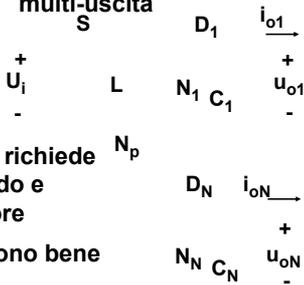


### Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita



Ogni uscita richiede un solo diodo e condensatore

### 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

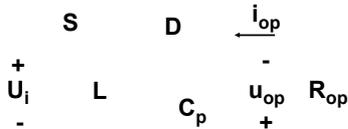
### Specifiche di progetto

Potenza di uscita totale .....=18W  
 Frequenza di commutazione .....=50kHz  
 Tensione continua d'ingresso ...=180-710V

## Specifiche per le singole uscite

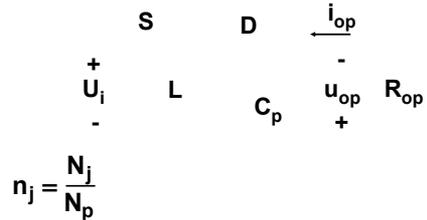
Tensioni di uscita [V]	Assorbimento (min-max) [mA]
$U_{01} - U_{03} = +15 \text{ V}$	13-25
$U_{04} = +15 \text{ V}$	44-83
$U_{05} = +5 \text{ V}$	100-350
$U_{06} = +15 \text{ V}$	150-400
$U_{07} = -15 \text{ V}$	80-280
$U_{08} = +24 \text{ V}$	0-100
$U_{09} = +15 \text{ V}$	50
$U_{10} = +15 \text{ V}$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

## Analisi del convertitore flyback multi-uscita

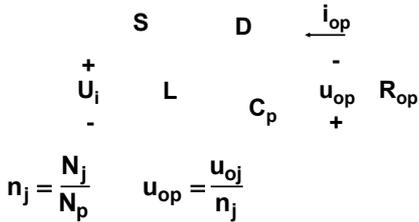


Riportando tutti i parametri a primario si possono utilizzare le relazioni del convertitore buck-boost

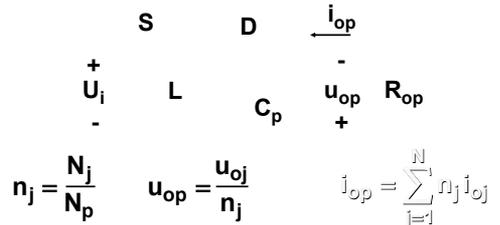
## Analisi del convertitore multi-uscita



## Analisi del convertitore multi-uscita



## Analisi del convertitore multi-uscita



### Analisi del convertitore multi-uscita

$$\begin{array}{c}
 \text{S} \quad \text{D} \quad \overleftarrow{i_{op}} \\
 + \quad \quad \quad - \\
 U_i \quad L \quad C_p \quad u_{op} \quad R_{op} \\
 - \quad \quad \quad + \\
 n_j = \frac{N_j}{N_p} \quad u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j} \quad i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj} \\
 R_{op} = \frac{1}{G_{op}}
 \end{array}$$

### Analisi del convertitore multi-uscita

$$\begin{array}{c}
 \text{S} \quad \text{D} \quad \overleftarrow{i_{op}} \\
 + \quad \quad \quad - \\
 U_i \quad L \quad C_p \quad u_{op} \quad R_{op} \\
 - \quad \quad \quad + \\
 n_j = \frac{N_j}{N_p} \quad u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j} \quad i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj} \\
 R_{op} = \frac{1}{G_{op}} \quad G_{op} = \sum_{j=1}^N G_{oj} n_j^2
 \end{array}$$

### Analisi del convertitore multi-uscita

$$\begin{array}{c}
 \text{S} \quad \text{D} \quad \overleftarrow{i_{op}} \\
 + \quad \quad \quad - \\
 U_i \quad L \quad C_p \quad u_{op} \quad R_{op} \\
 - \quad \quad \quad + \\
 n_j = \frac{N_j}{N_p} \quad u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j} \quad i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj} \\
 R_{op} = \frac{1}{G_{op}} \quad G_{op} = \sum_{j=1}^N G_{oj} n_j^2 \quad C_p = \sum_{j=1}^N C_j n_j^2
 \end{array}$$

### Dimensionamento della parte di potenza

#### 1) Calcolo dei rapporti spire

### Dimensionamento della parte di potenza

#### 1) Calcolo dei rapporti spire

Ipotesi: funzionamento CCM alla corrente nominale ( $I_{oim} = 40\% I_{onom}$ )

### Dimensionamento della parte di potenza

#### 1) Calcolo dei rapporti spire

Ipotesi: funzionamento CCM alla corrente nominale ( $I_{oim} = 40\% I_{onom}$ )

Motivo: limitare inferiormente  $t_{onmin}$  (2  $\mu s$ )

## Dimensionamento della parte di potenza

### 1) Calcolo dei rapporti spire

Ipotesi: funzionamento CCM alla corrente nominale

Motivo: limitare inferiormente  $t_{onmin}$

Rapporti di conversione  $\Rightarrow$

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

## 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

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

## 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

$$t_{onmin} = \delta_{min} T_S \quad T_S = 20 \mu s$$

**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:**  $\delta_{min} = 0.1$

**Dimensionamento della parte di potenza**

**1) Calcolo dei rapporti spire**

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

**Dimensionamento della parte di potenza**

**1) Calcolo dei rapporti spire**

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

↓

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

**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)**

**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)

**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

$$k_{crit} = \frac{1}{(1+M)^2}$$

**Dimensionamento della parte di potenza**

**2) Calcolo dell'induttanza L (a primario)**

L deve essere dimensionata per garantire CCM in ogni condizione

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

**Dimensionamento della parte di potenza**

**2) Calcolo dell'induttanza L (a primario)**

L deve essere dimensionata per garantire CCM in ogni condizione

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

**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**

**Dimensionamento della parte di potenza**

**3) Calcolo degli stress di corrente e tensione dell'interruttore**

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

**Dimensionamento della parte di potenza**

**3) Calcolo degli stress di corrente e tensione dell'interruttore**

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

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

**Dimensionamento della parte di potenza**

**3) Calcolo degli stress di corrente e tensione dell'interruttore**

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

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



$$I_{s_{max}} = 0.59 \text{ A}$$

$$U_{s_{max}} = 790 \text{ V}$$

**Dimensionamento della parte di potenza**

**4) Dimensionamento del mutuo induttore**

**Dimensionamento della parte di potenza**

**4) Dimensionamento del mutuo induttore**

**Nucleo in ferrite: ETD 34x17x11**

**Sezione del nucleo:  $A_e = 92 \text{ mm}^2$**

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

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

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:

Dimensionamento della parte di potenza

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

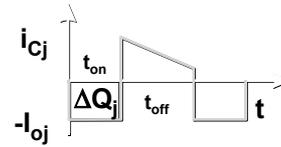


$$\lambda_t = \frac{\mu_0 A_e N_p^2}{2L}$$

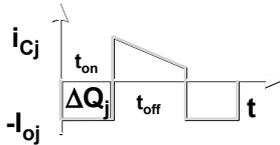
$\lambda_t$  = lunghezza del traferro da realizzare  
su ciascuna colonna del nucleo

Dimensionamento della parte di potenza  
5) Calcolo delle capacità di uscita

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



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



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