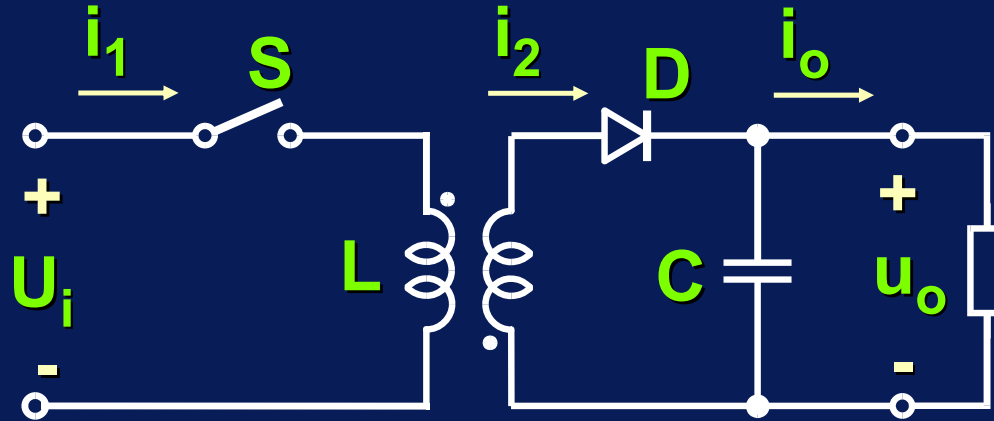


## **Argomenti trattati**

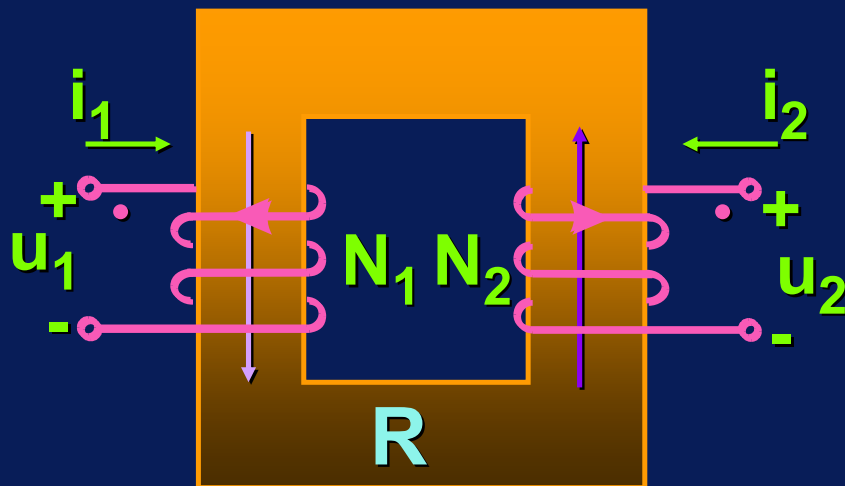
- **Struttura e caratteristiche del convertitore Flyback**
- **Progetto di un convertitore Flyback multi-uscita**

## 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



$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R}$$

$$\Phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{R}$$

$$\Phi_{12} = \sigma_{12} \Phi_{22}$$

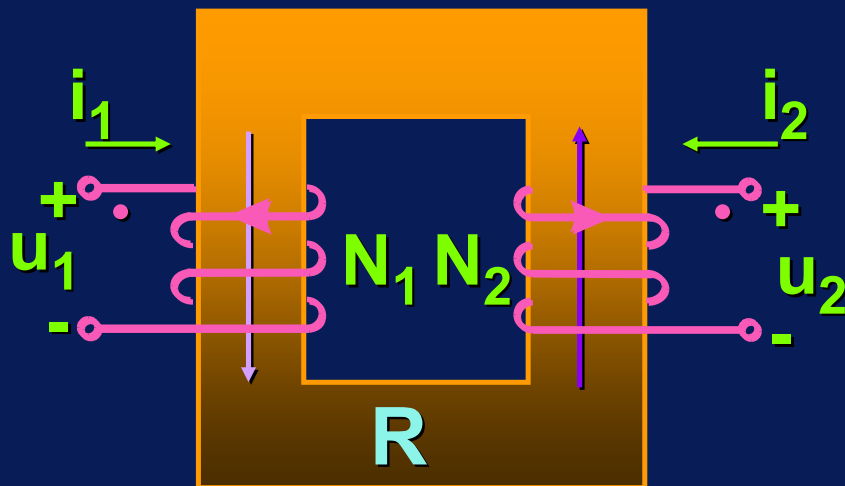
$$\Phi_{21} = \sigma_{21} \Phi_{11}$$

**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



$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R}$$

$$\Phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{R}$$

$$\Phi_{12} = \sigma_{12} \Phi_{22}$$

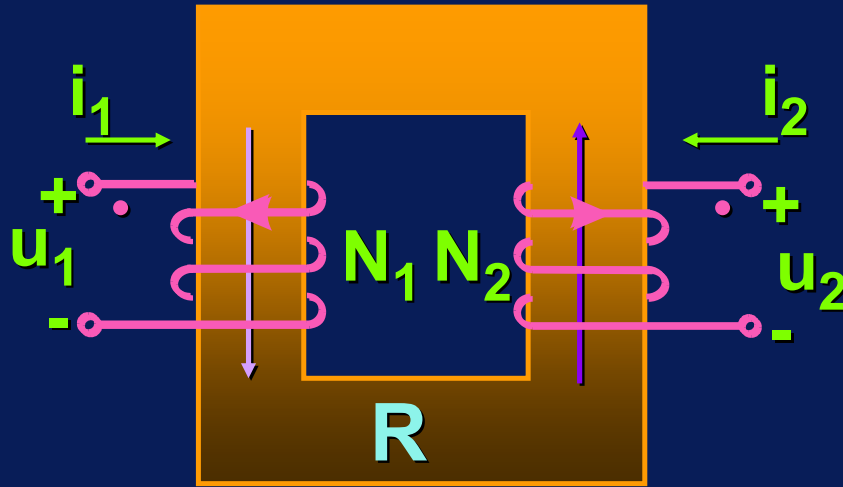
$$\Phi_{21} = \sigma_{21} \Phi_{11}$$

**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



$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R}$$

$$\Phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{R}$$

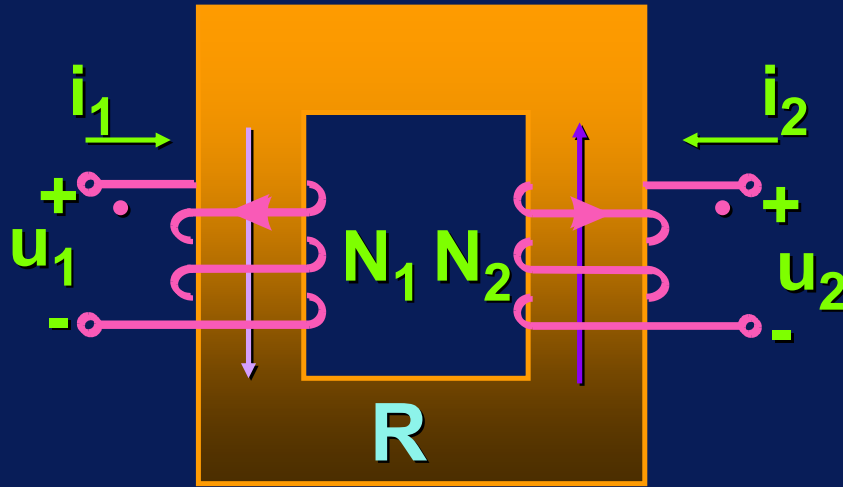
$$\Phi_{12} = \sigma_{12} \Phi_{22}$$

$$\Phi_{21} = \sigma_{21} \Phi_{11}$$

**Coefficiente di accoppiamento:**

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

# Mutuo Induttore



$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R}$$

$$\Phi_{22} = \frac{N_2 i_2}{R}$$

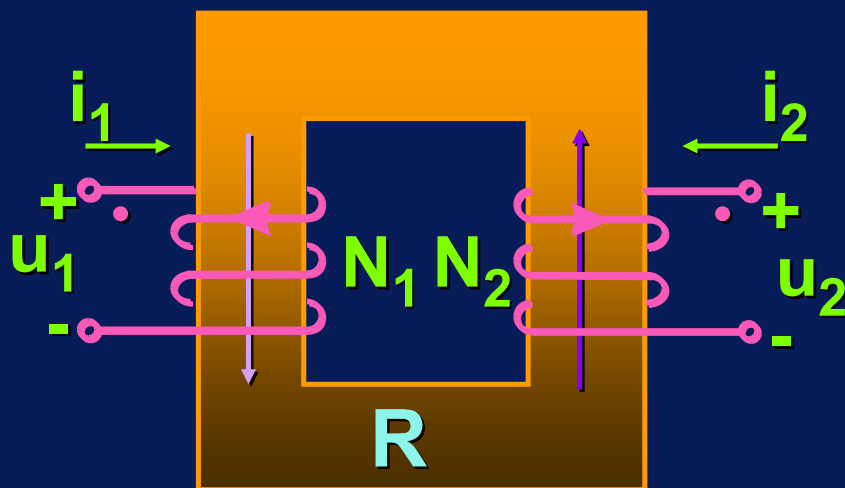
$$\Phi_{12} = \sigma_{12} \Phi_{22}$$

$$\Phi_{21} = \sigma_{21} \Phi_{11}$$

**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:

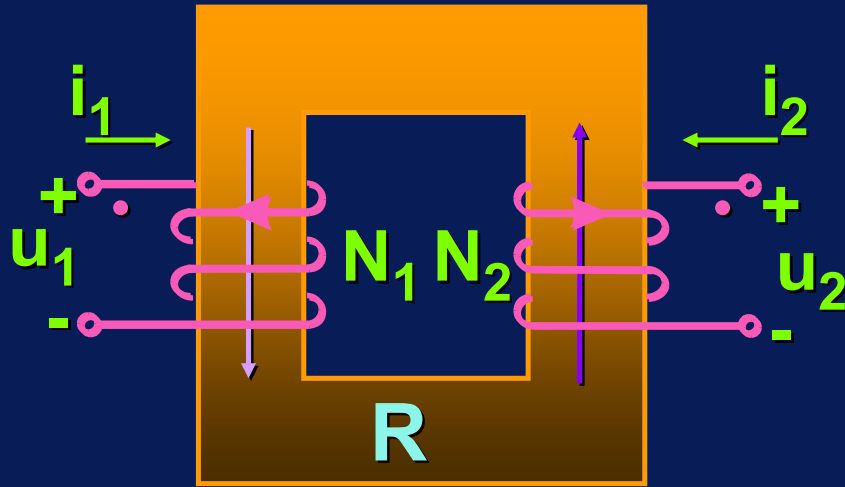
$$L_M = \sqrt{L_1 L_2}$$

Coefficienti di auto- e mutua induzione:

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

↓  
flusso magnetico concatenato

# Mutuo Induttore



$$L_M = \sigma \sqrt{L_1 L_2}$$

Accoppiamento perfetto:

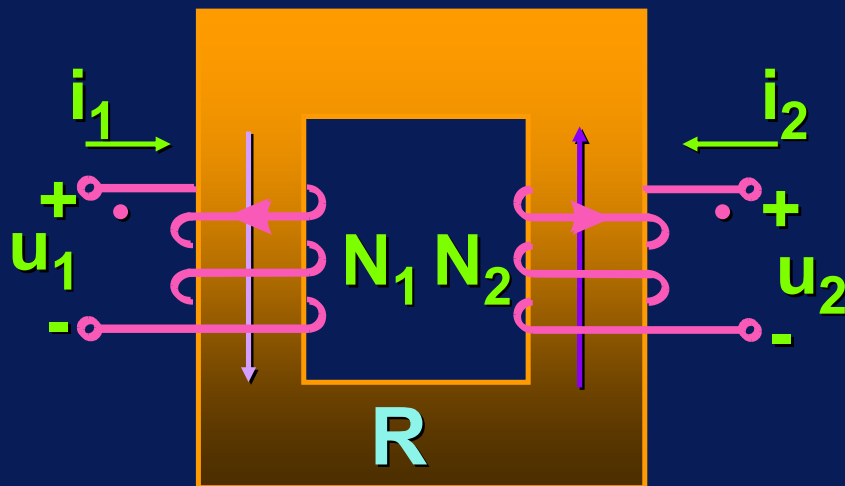
$$L_M = \sqrt{L_1 L_2}$$

Coefficienti di auto- e mutua induzione:

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



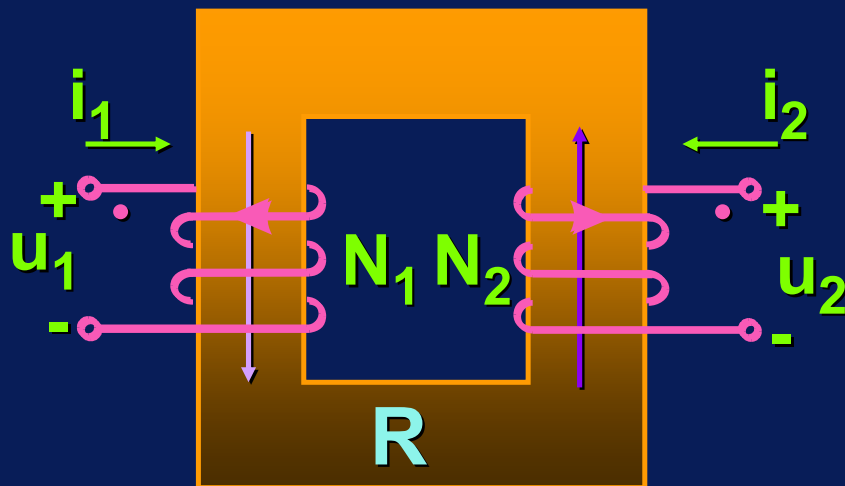
## Mutuo Induttore



Energia accumulata:

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

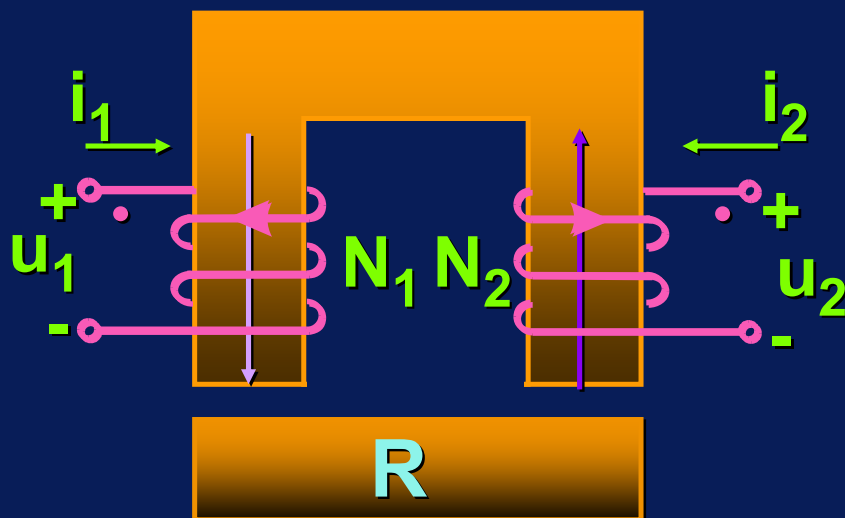
# Mutuo Induttore



**Nota:**

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

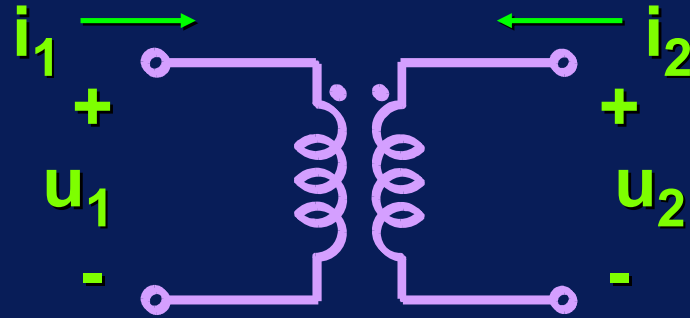
# Mutuo Induttore



**Nota:**

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

## Equazioni del mutuo induttore

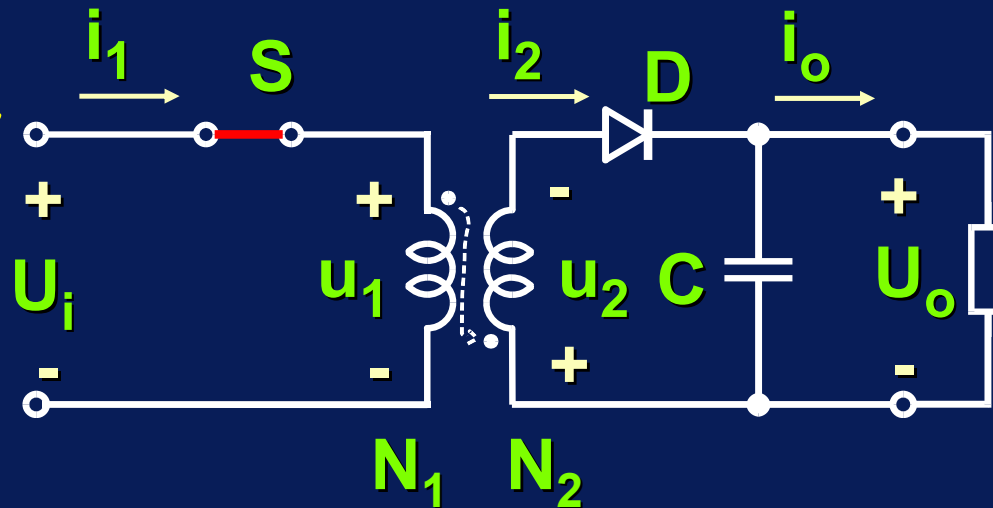


$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_M \cdot \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = L_M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di on (CCM)

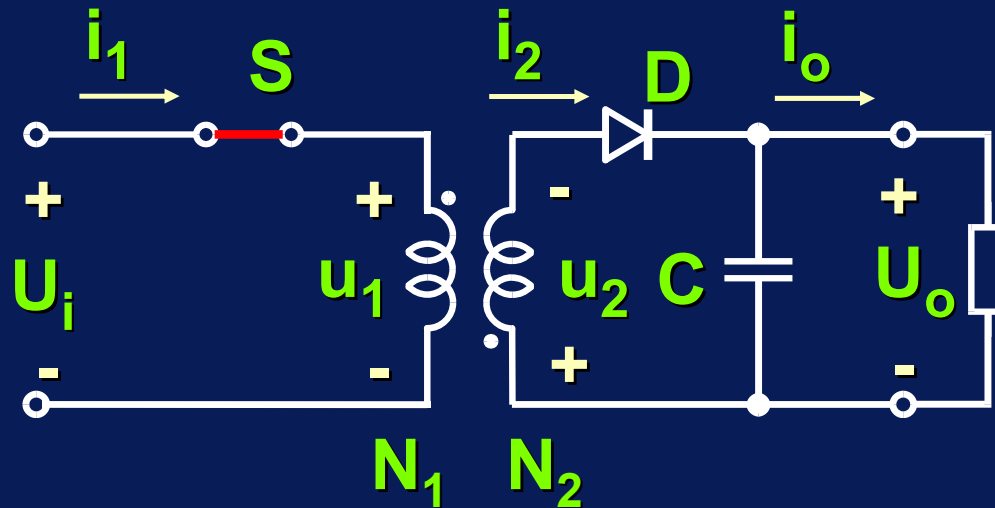
se metto  $L$   
al posto di  $ML$   
è un buck boost



**S on**  $\Rightarrow u_1 = U_i \Rightarrow i_2 = 0 \Rightarrow$  **D off** x tensione  
al contrario

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di on (CCM)

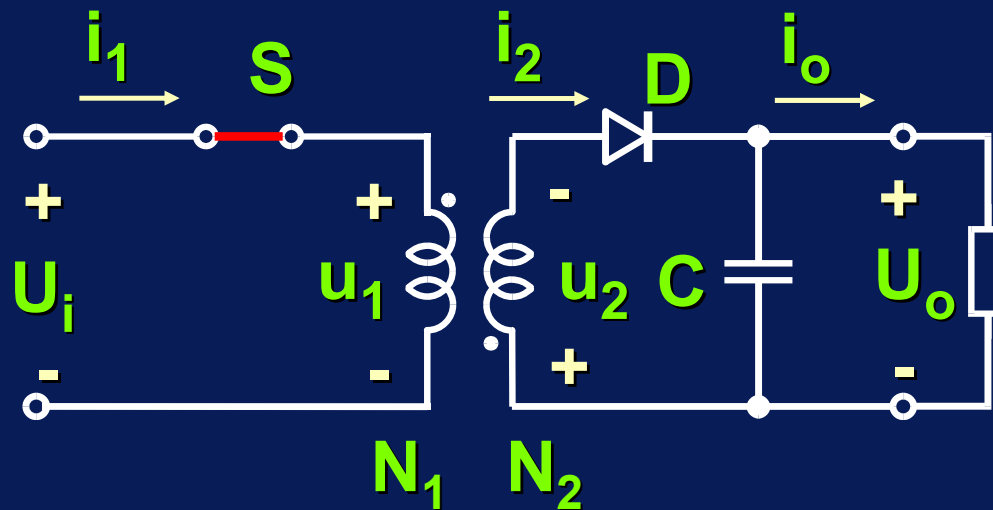


eq. mutuo  
induttore  
con  $i_2 = 0$   
 $\downarrow$   
 $\frac{di_2}{dt} = 0$

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

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di on (CCM)

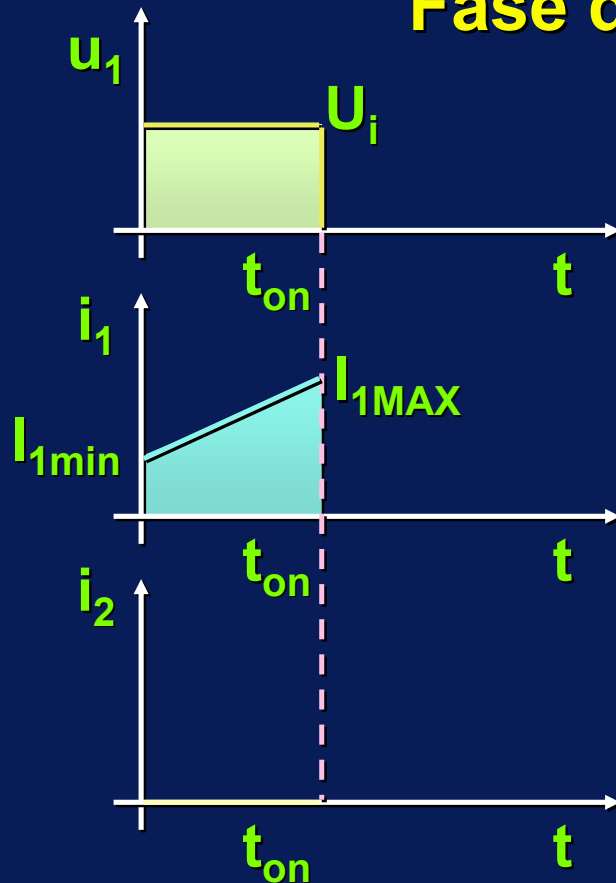


$$i_1 = i_{\mu 1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1\min} \quad I_{1\max} = I_{1\min} + \frac{U_i}{L_1} t_{\text{on}}$$

Carico l'induttore  
partendo dal valore  
minimo del ciclo  
precedente

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di on (CCM)



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

$$u_1 = U_i$$

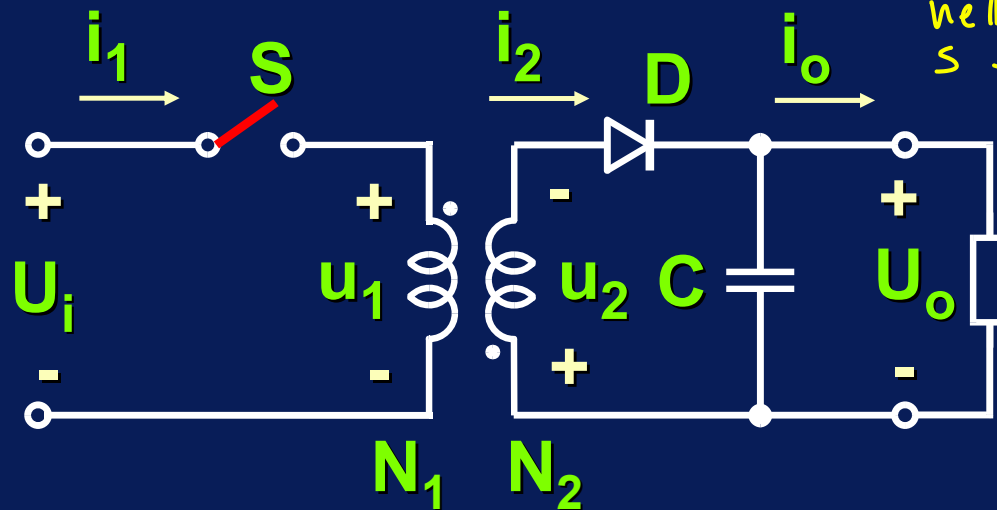
$$i_1 = i_{\mu 1} = \frac{U_i}{L_1} t + I_{1min}$$

$$i_2 = 0$$



# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di off (CCM)



↓  
x' la  $i_1$  è in out.  
nella fase in cui  
S è aperto

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

ho derivata neg su  $u_1 \rightarrow - \dots = +$

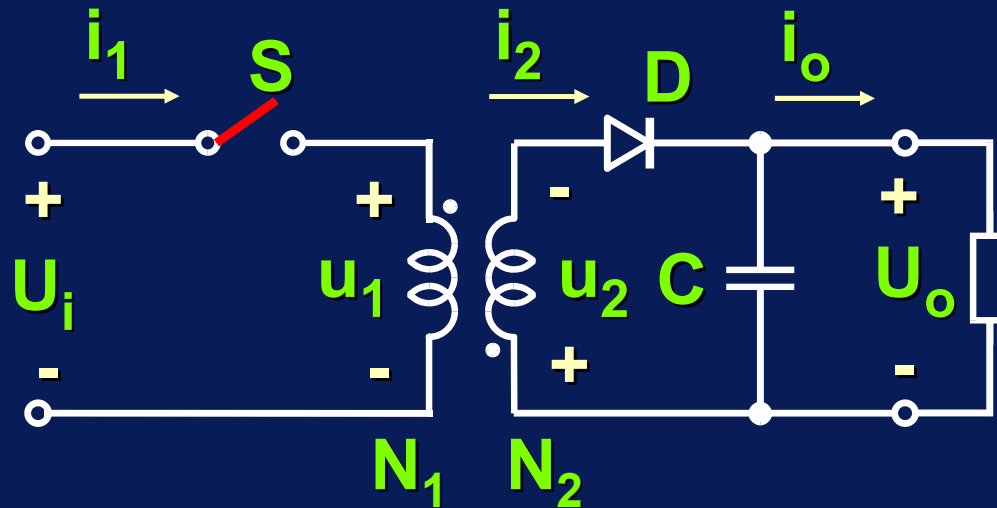
x il fatto di  
mutua induzione  
se faccio maglia

$\mu_2 = \mu_0 \mu_r \mu_2$  è al contrario



# Funzionamento del convertitore flyback

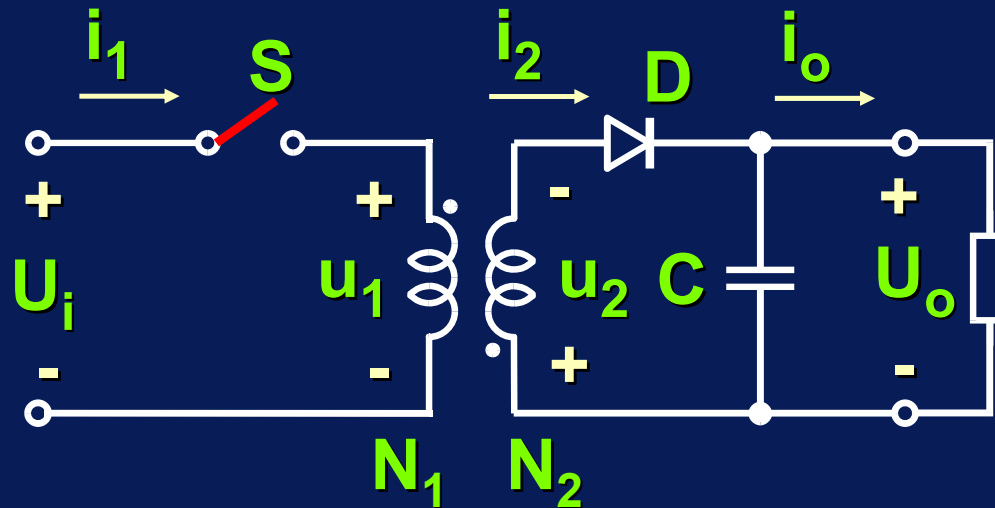
## Fase di off (CCM)



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

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di off (CCM)

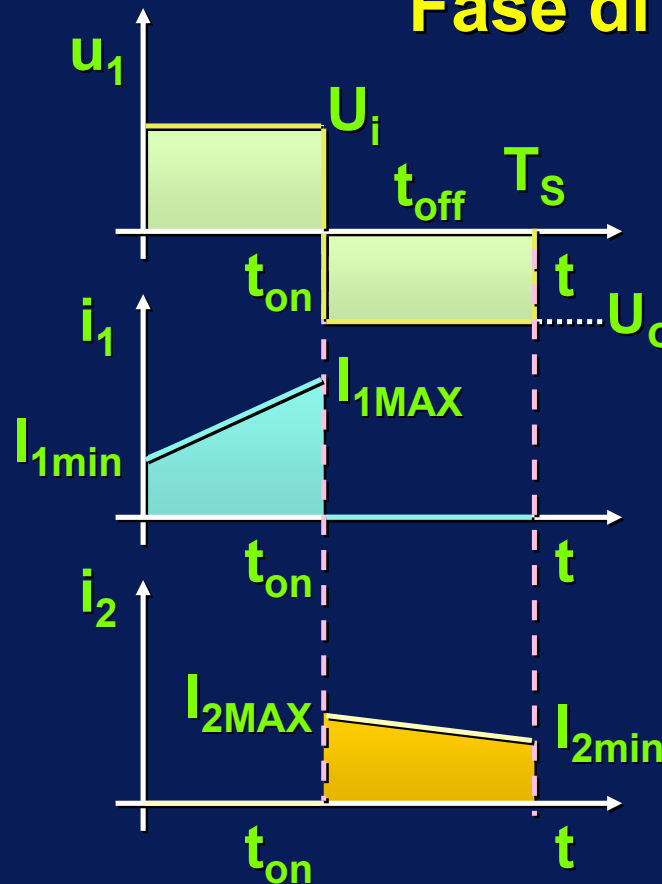


$$i_2 = i_{\mu 2} = I_{2MAX} - \frac{U_o}{L_2} t = \frac{N_1}{N_2} I_{1MAX} - \frac{U_o}{L_2} t$$

io conosco  $I_{1max}$  quindi  $I_{2max} = \frac{N_1}{N_2} I_{1max}$

# Funzionamento del convertitore flyback

## Fase di off (CCM)



$$U_i t_{on} = U_o \frac{N_1}{N_2} t_{off}$$

$$U_i \cdot \cancel{T_s} \cdot D = U_o \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot (1-D) \cdot \cancel{T_s}$$

$$i_1 = 0$$

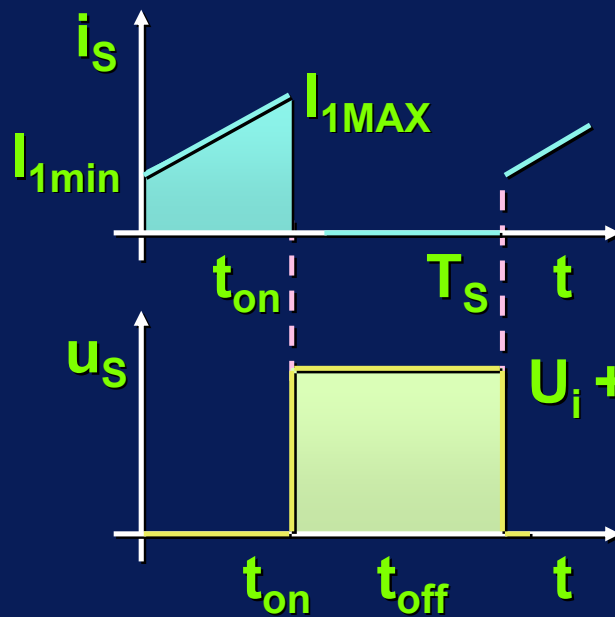
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1-D}$$

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

- no  $V_{out}$  positiva
- no un isolamento galvanico
- posso variare  $N_1/N_2 \rightarrow$  X avere la  $V_{out}$  che voglio e se load cambia vario duty cycle

# Funzionamento del convertitore flyback

## Sollecitazioni sugli interruttori



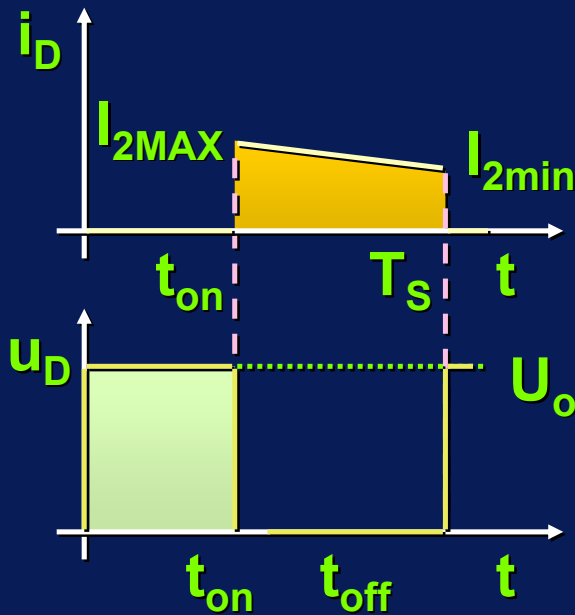
$$i_{sMAX} = I_{1MAX}$$

l'interruttore può  
essere molto stressato  
se  $N_1/N_2 > 1$  !!!  $\frac{100}{10} = 10$

$$u_{sMAX} = U_i + U_o \frac{N_1}{N_2}$$

# Funzionamento del convertitore flyback

## Sollecitazioni sugli interruttori



$$i_{DMAX} = I_{2MAX}$$

$$u_{DMAX} = U_o + U_i \frac{N_2}{N_1}$$



$$t_{on} \Rightarrow V_{Lm} = V_i$$

$$t_{off} \Rightarrow V_{Lm} = -U_o \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

## 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

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

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

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

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



## Modo di utilizzo

**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

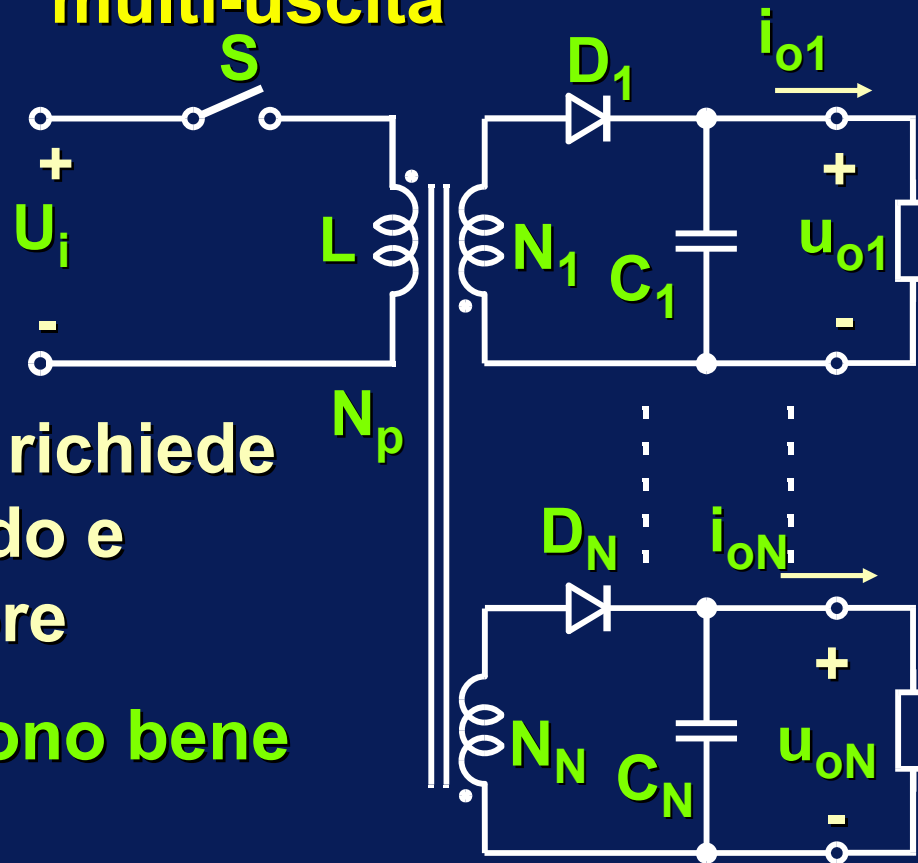
## Tasso di utilizzo di un convertitore Flyback ( $i_L = I_L$ )

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

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

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

## 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**

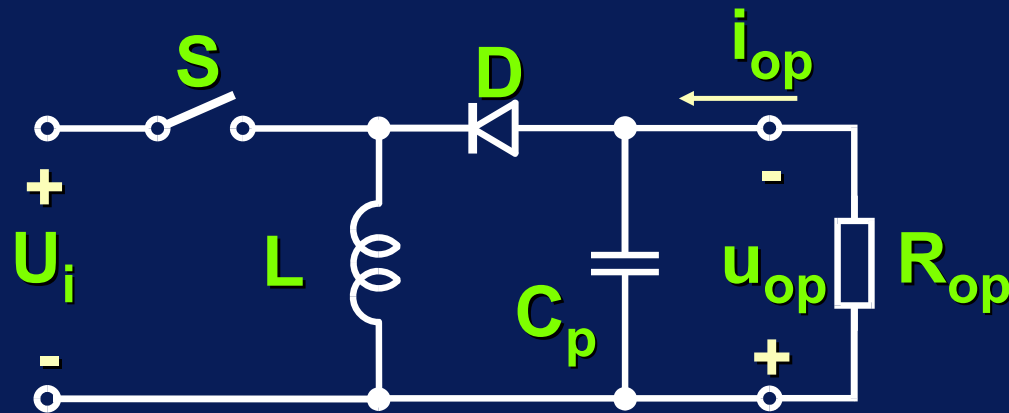
**Frequenza di commutazione .....=50kHz**

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

## Specifiche per le singole uscite

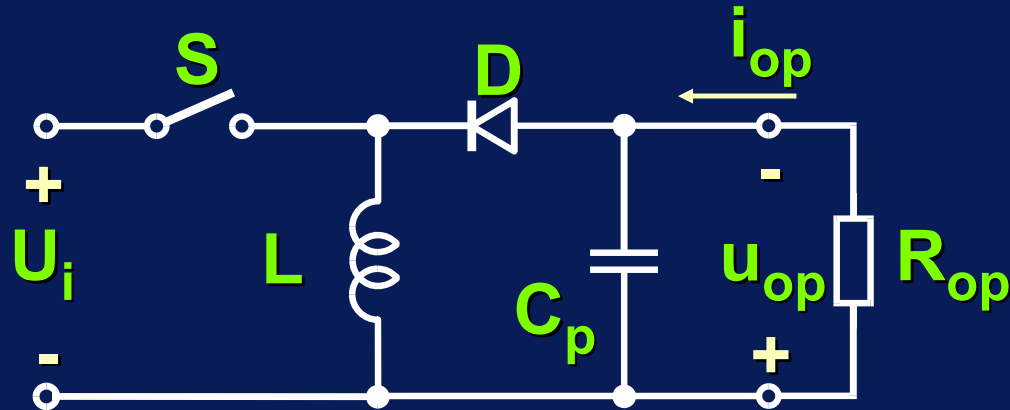
| Tensioni<br>di uscita [V]         | Assorbimento<br>(min-max) [mA] |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| $U_{01} - U_{03} = +15 \text{ V}$ | 13-25                          |
| $U_{04} = +15 \text{ V}$          | 44-83                          |
| $U_{05} = +5 \text{ V}$           | 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



$$n_j = \frac{N_j}{N_p}$$

$$u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j}$$

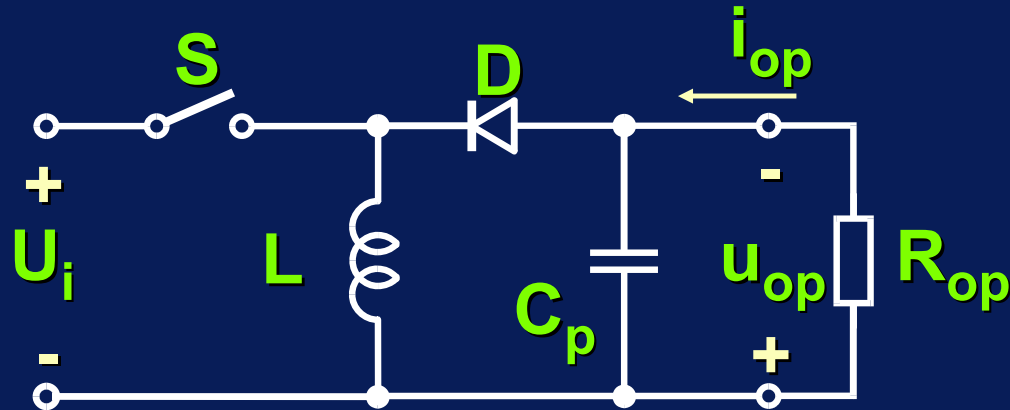
$$i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj}$$

$$R_{op} = \frac{1}{G_{op}}$$

$$G_{op} = \sum_{j=1}^N G_{jp} = \sum_{j=1}^N n_j^2 G_j$$



# Analisi del convertitore multi-uscita



$$n_j = \frac{N_j}{N_p}$$

$$u_{op} = \frac{u_{oj}}{n_j}$$

$$i_{op} = \sum_{j=1}^N n_j i_{oj}$$

$$R_{op} = \frac{1}{G_{op}}$$

$$G_{op} = \sum_{j=1}^N n_j^2 G_j$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N C_j n_j^2$$

# Dimensionamento della parte di potenza

## 1) Calcolo dei rapporti spire

Ipotesi: **funzionamento CCM fino alla corrente minima** ( $I_{o\lim} = 40\% I_{o\text{nom}}$ )

Motivo: **limitare inferiormente  $t_{on\min}$**

Rapporti di  
conversione



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

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

$\delta_{\min}$  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:  $\delta_{\min} = 0.1 \rightarrow t_{\text{onmin}} = 2\mu\text{s}$

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

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

## 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

$$k_{\text{crit}} = \frac{1}{(1+M)^2} \quad k_{\text{crit}} = \frac{2Lf_s}{R_{\text{op}_{\text{max}}}}$$
$$R_{\text{op}_{\text{max}}} = \frac{R_{\text{op}_{\text{nom}}}}{\alpha}$$

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



## Dimensionamento della parte di potenza

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

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

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



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

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

## 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:



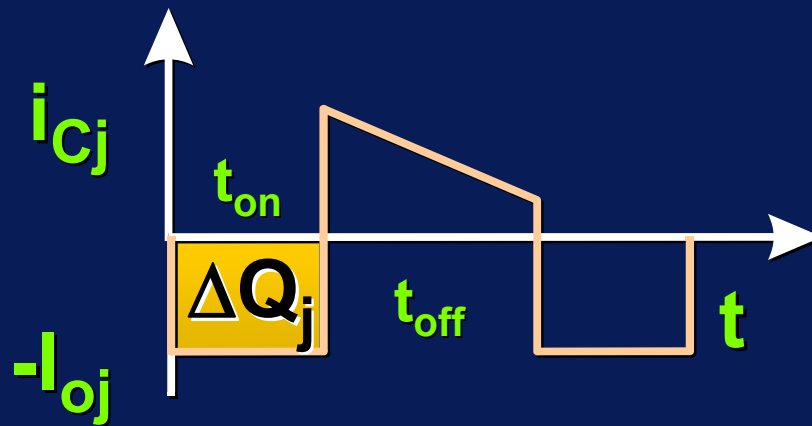
$$\lambda_t = \frac{\mu_0 A_e N_p^2}{2L}$$

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

## Dimensionamento della parte di potenza

### 5) Calcolo delle capacità di uscita

Ondulazione (ripple statico):



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