

# Corso di **ELETTRONICA INDUSTRIALE**

*“Convertitori abbassatori con  
isolamento ad alta frequenza”*

# Argomenti trattati

# Argomenti trattati

## Schemi di convertitori cc/cc abbassatori di tensione con isolamento ad alta frequenza

- Convertitore Forward
- Convertitore Forward multi-uscita
- Convertitore Push-pull
- Convertitore Dual Forward

# Convertitore Buck con isolamento

## Condizioni per l'inserimento di un trasformatore:

- dev'essere attraversato dall'intera potenza
- dev'essere alimentato da una tensione alternata

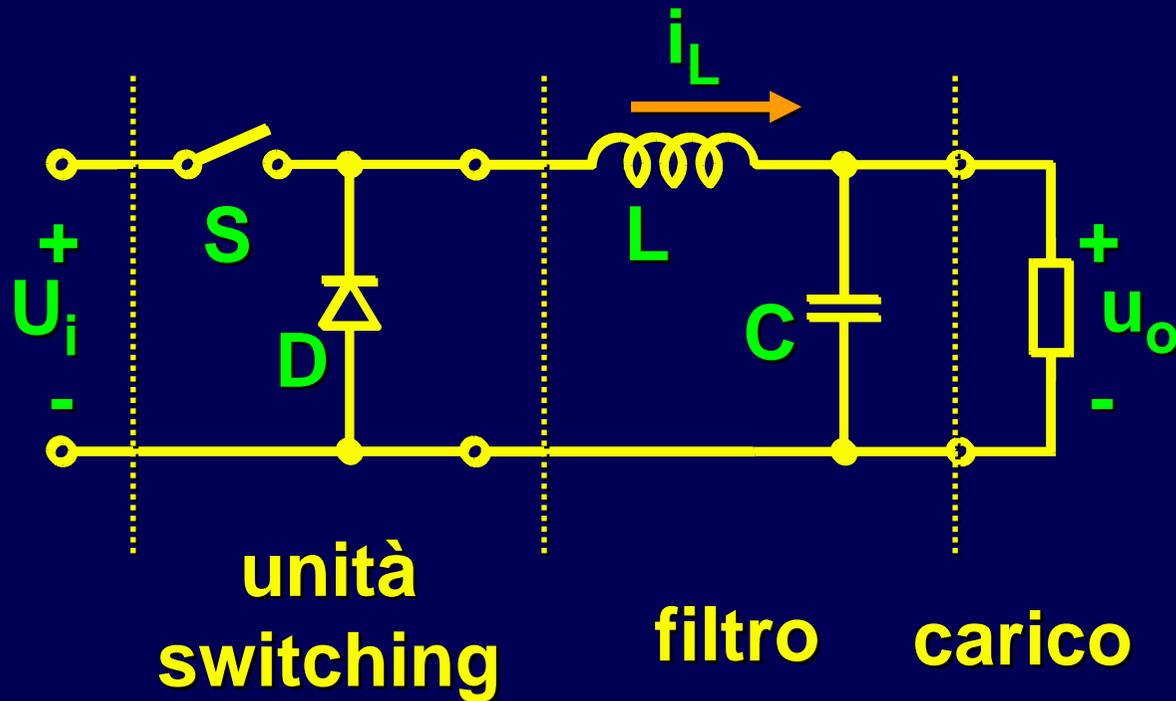
# Convertitore Buck con isolamento

## Condizioni per l'inserimento di un trasformatore:

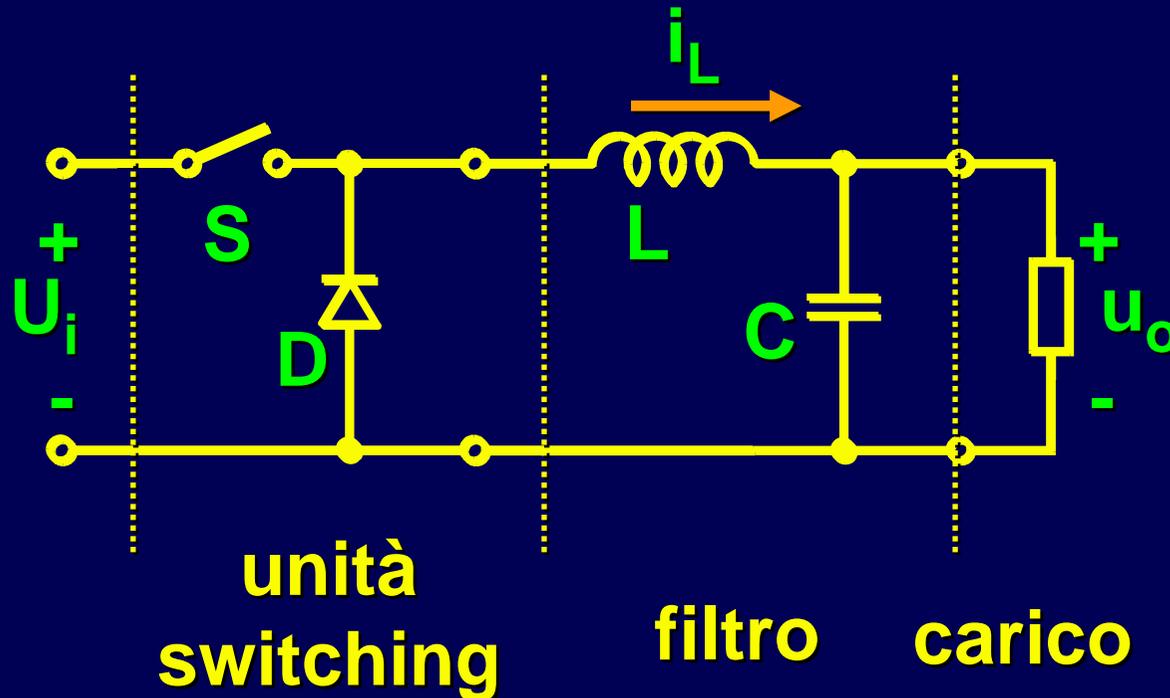
- dev'essere attraversato dall'intera potenza
- dev'essere alimentato da una tensione alternata

**NOTA:** il convertitore buck non soddisfa queste condizioni

# Schema del convertitore Buck (Step-down)



# Schema del convertitore Buck (Step-down)



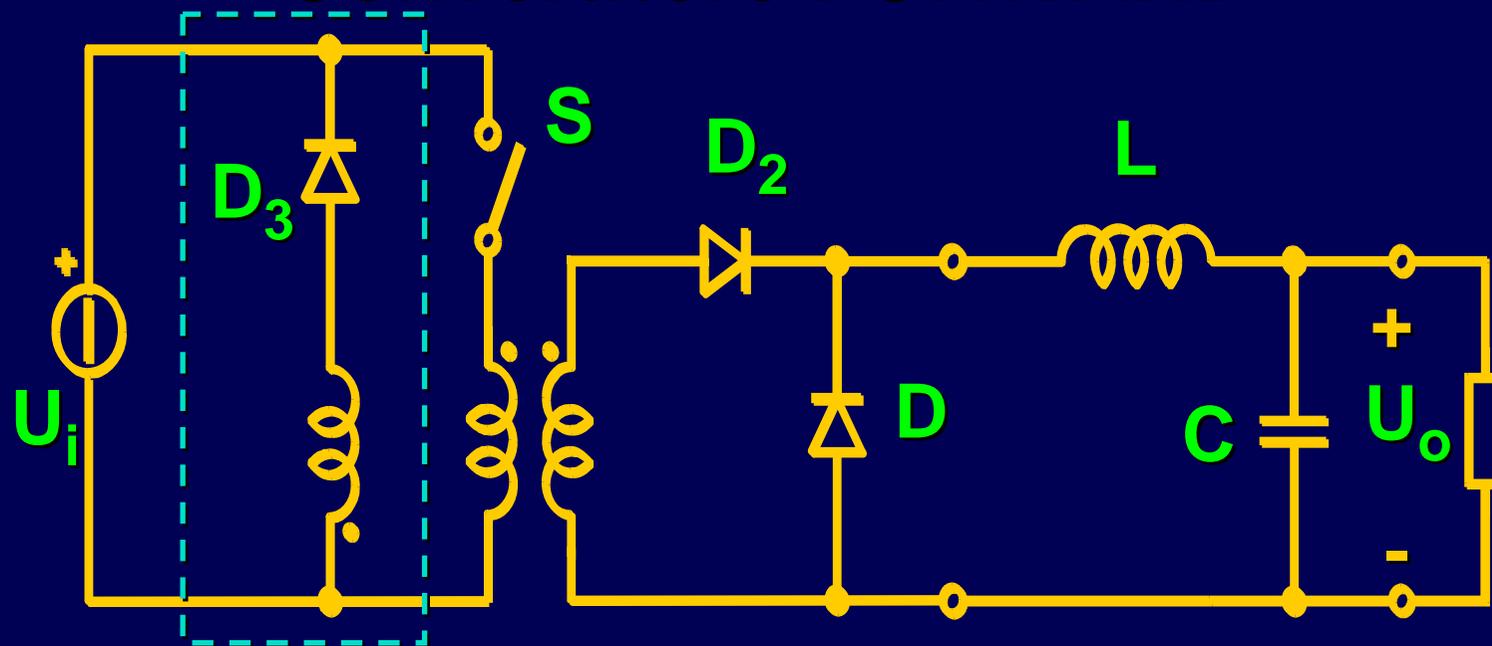
In nessuna sezione la tensione è puramente alternata

**Convertitore buck a trasformatore**

**Convertitore FORWARD**

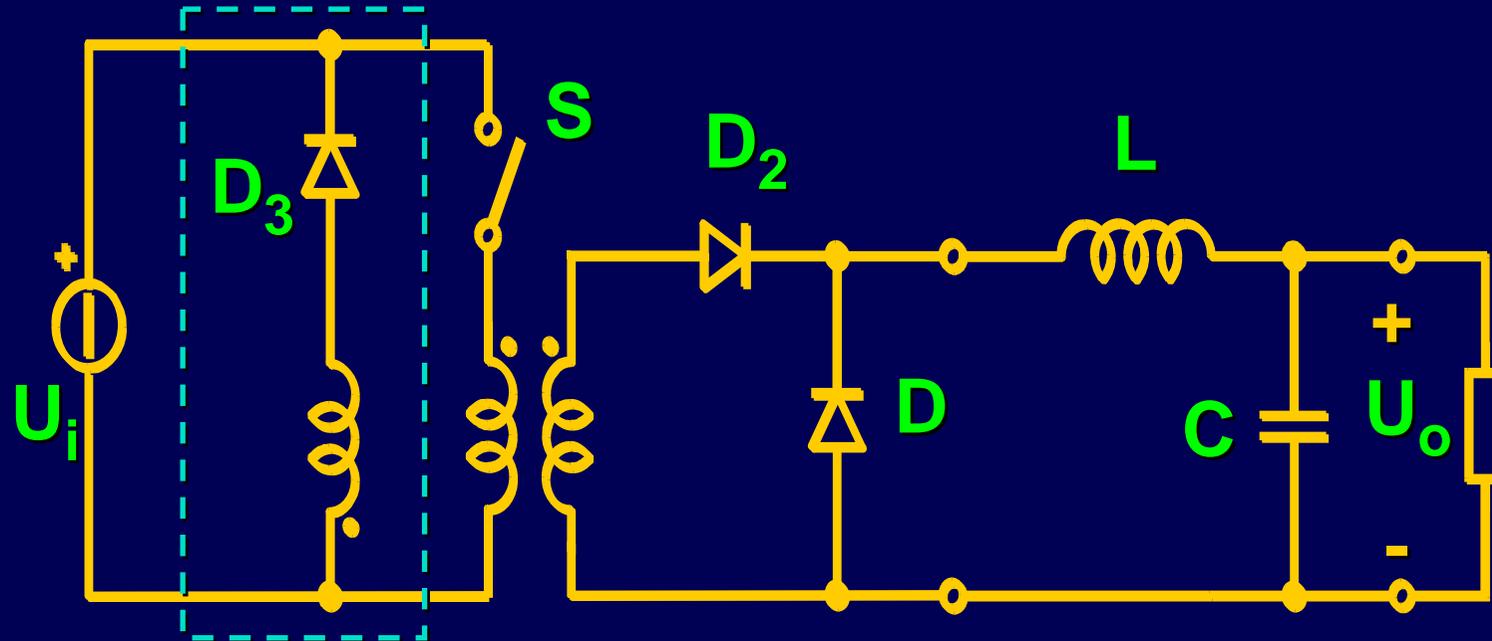
# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD



# Convertitore buck a trasformatore

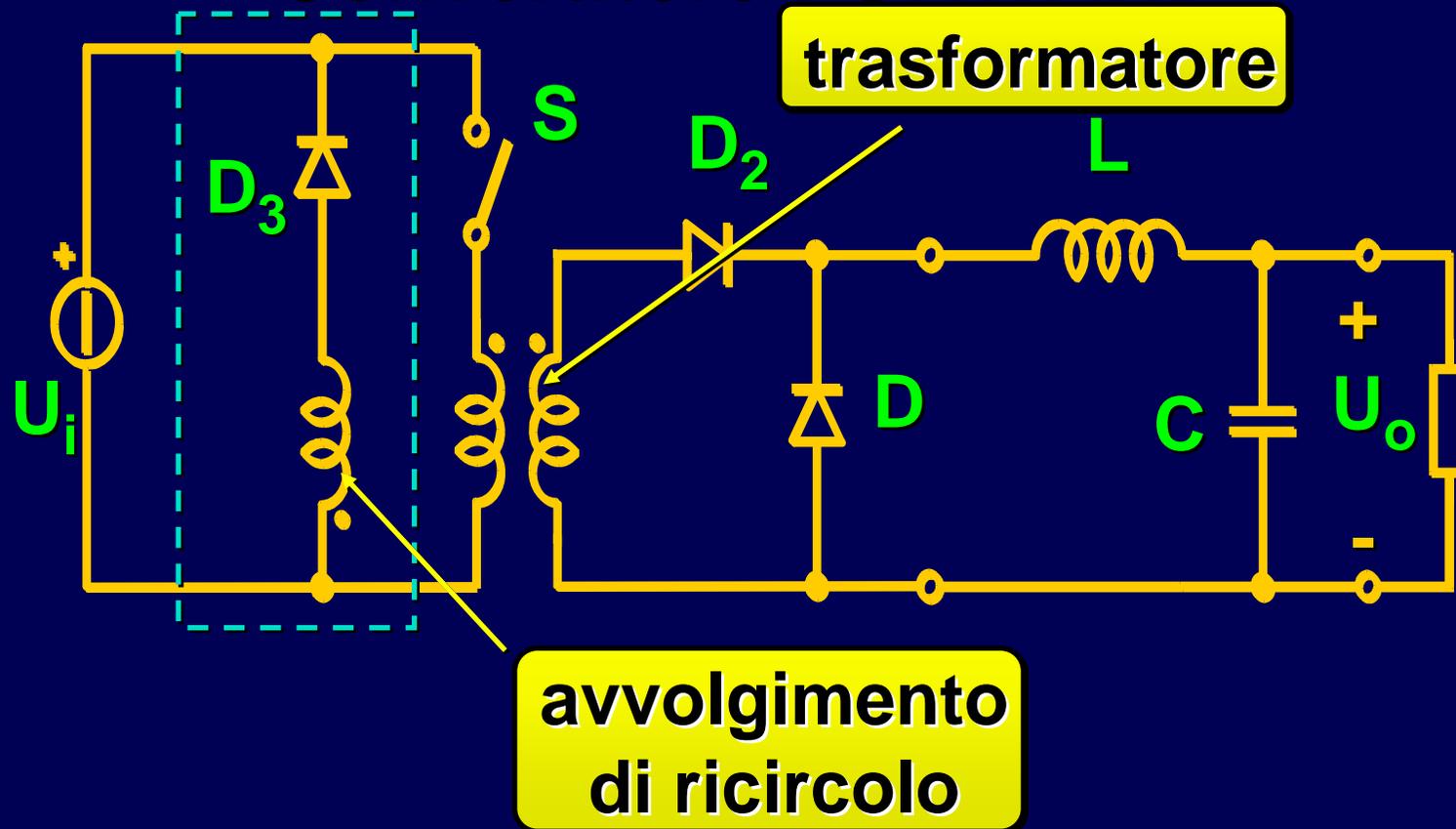
## Convertitore FORWARD



Lo stadio d'uscita è quello di un buck  
In ingresso c'è l'interruttore in serie  
all'alimentazione

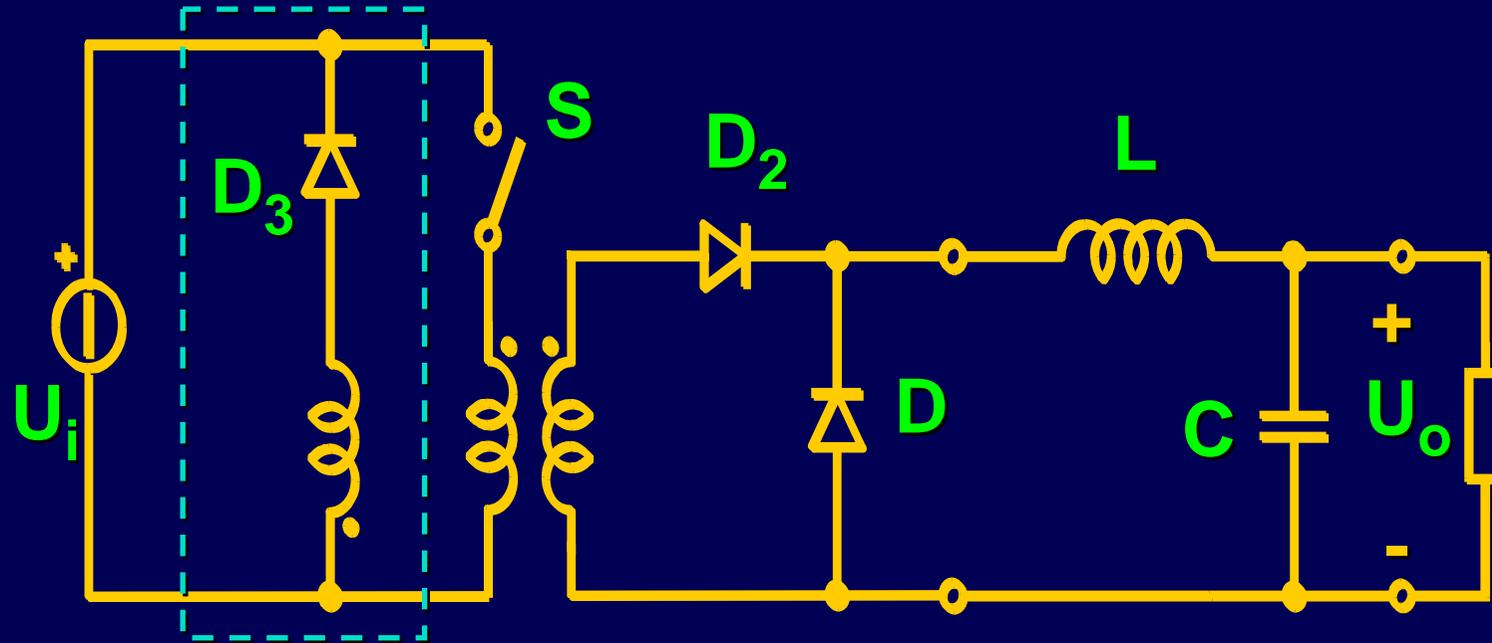
# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD



# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD



L'avvolgimento di ricircolo serve ad evitare la saturazione del trasformatore

# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD



**$D_2$  è necessario perchè:**

- 1) la tensione secondaria del trasformatore è alternata e bisogna raddrizzarla (c.a.  $\rightarrow$  c.c.)

# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD

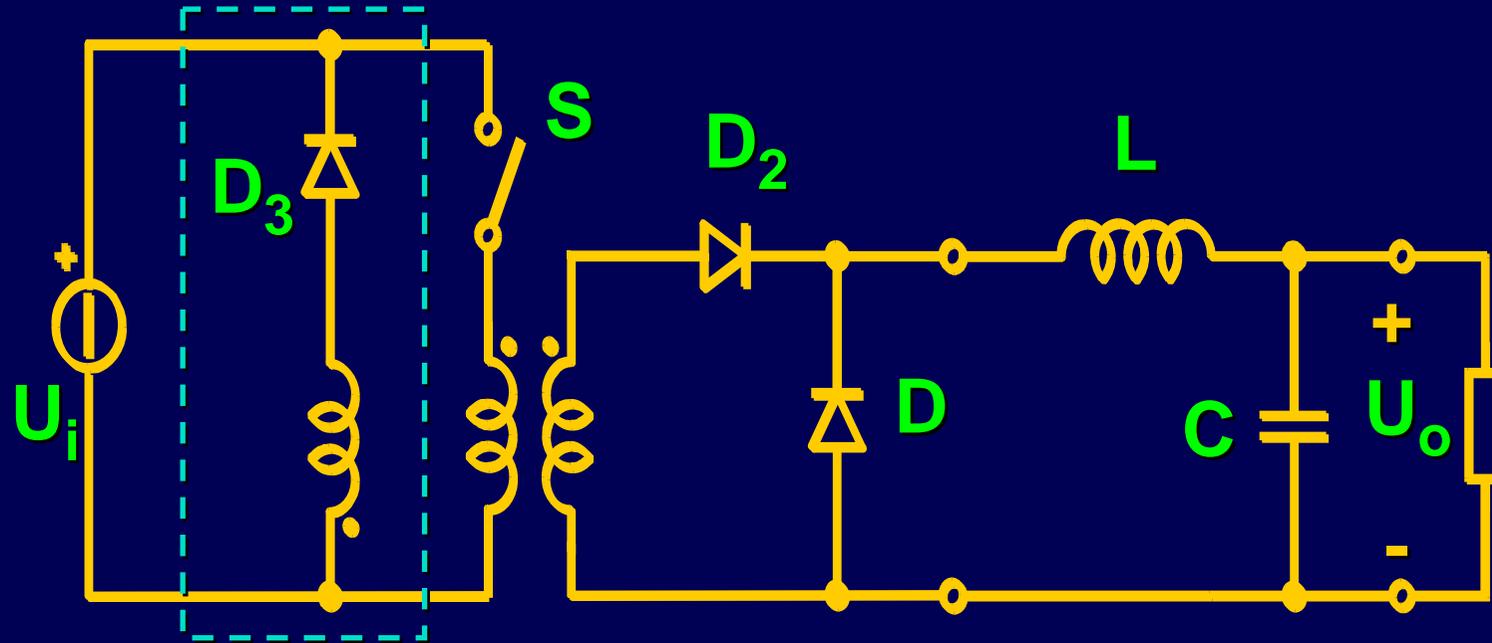


**$D_2$  è necessario perchè:**

- 2) il trasformatore in c.c. è un corto circuito e ciò non è compatibile con la presenza di  $U_o$

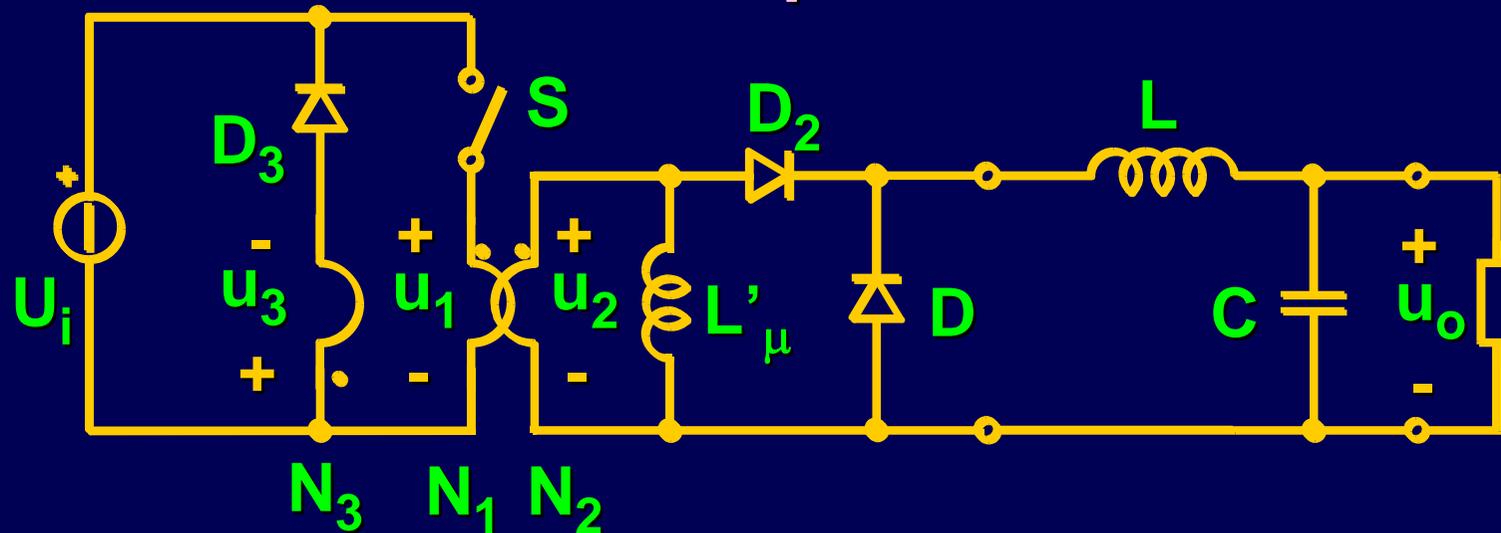
# Convertitore buck a trasformatore

## Convertitore FORWARD



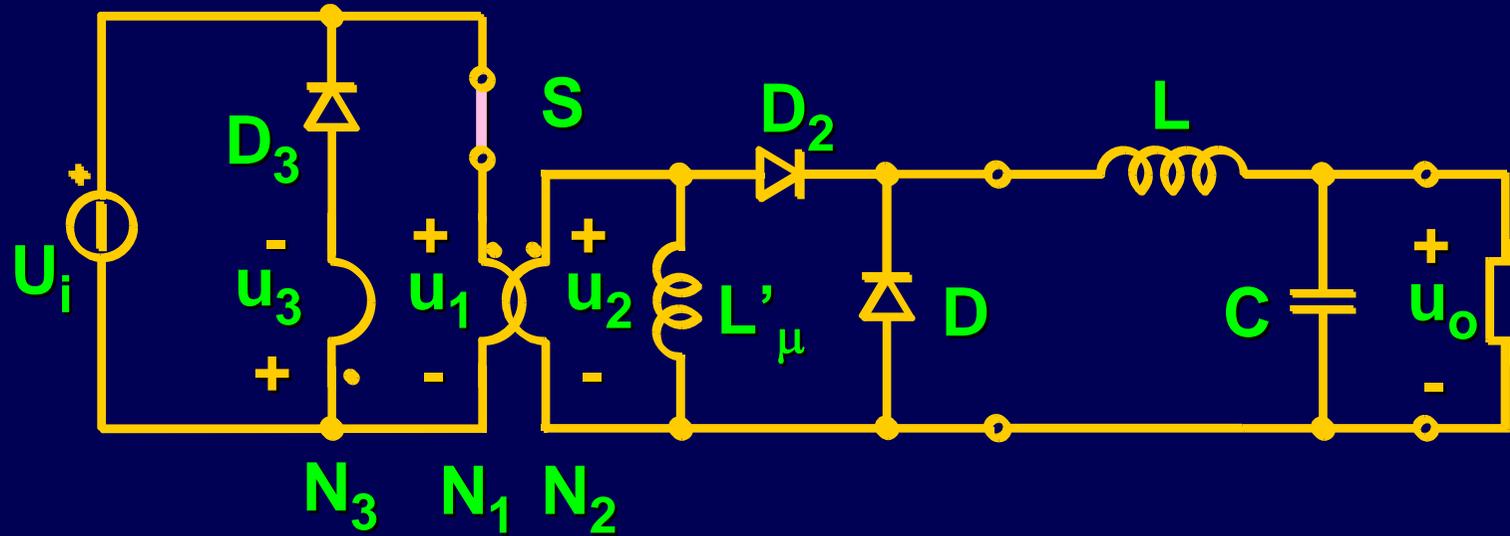
# Convertitore FORWARD

## Schema equivalente



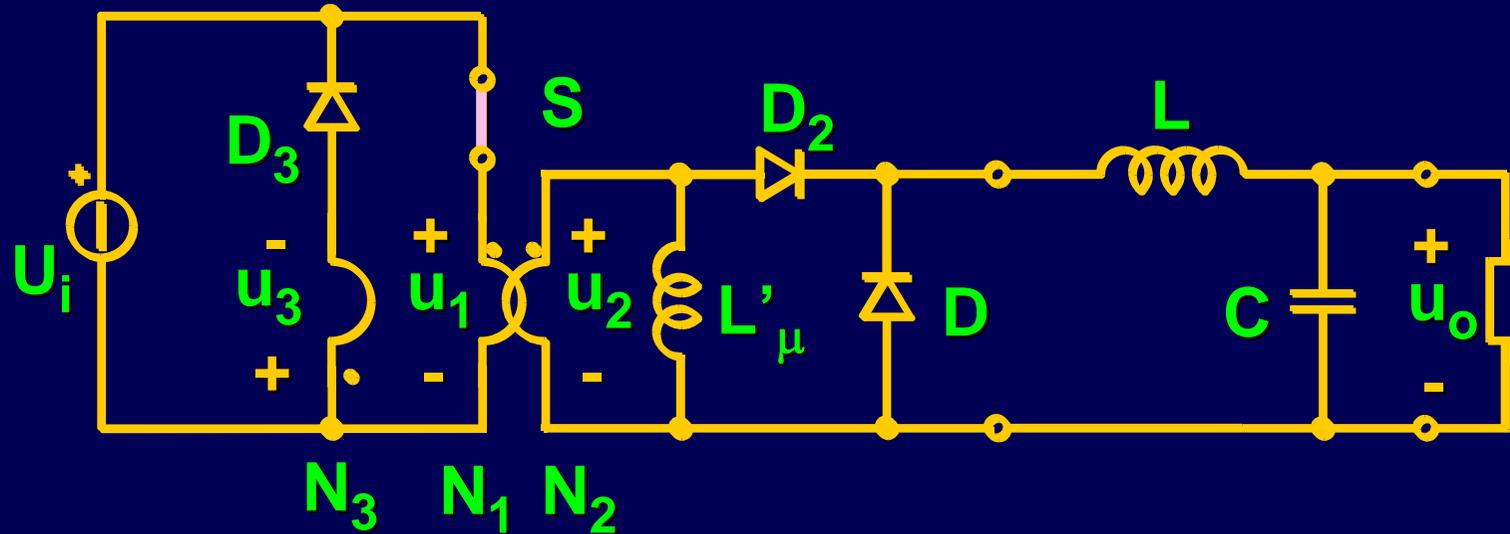
Per semplicità si considerano gli avvolgimenti perfettamente accoppiati ( $L_d = 0$ ). Questa ipotesi assai semplificativa non è verificata in pratica.

Intervallo  $t_{on}$ :



**S on**  $\rightarrow$   $u_1 = U_i$

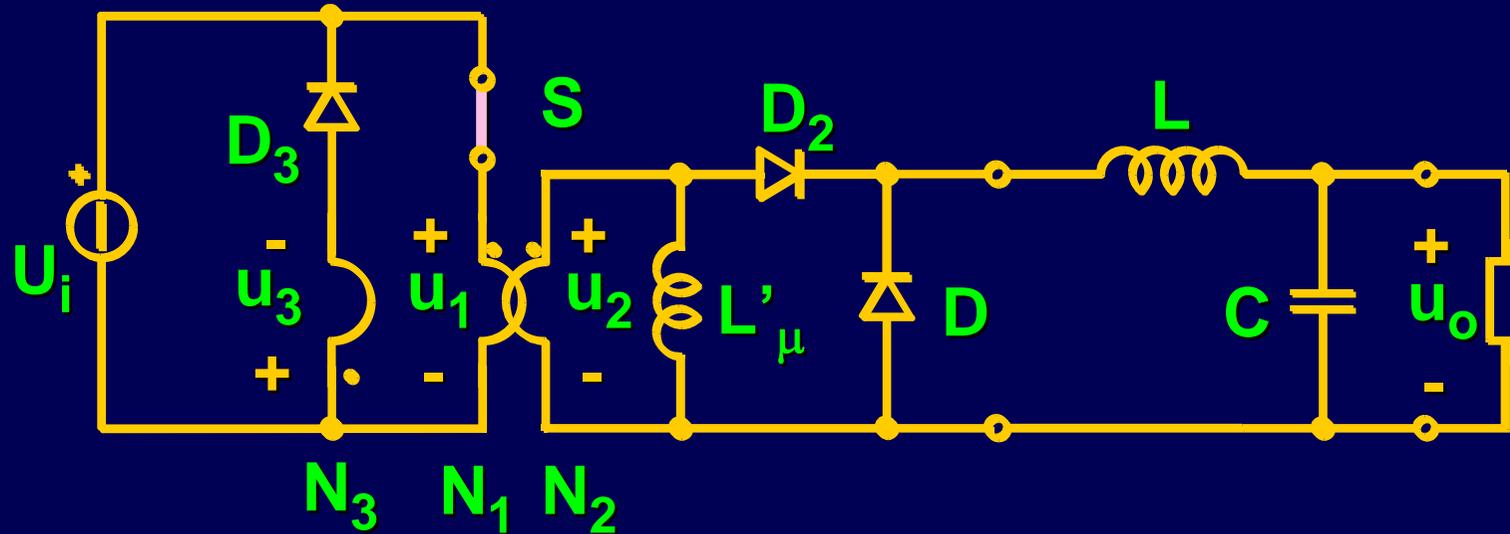
Intervallo  $t_{on}$ :



**S on**  $\rightarrow$   $u_1 = U_i$

$u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \rightarrow$   **$D_2$  on - D off**

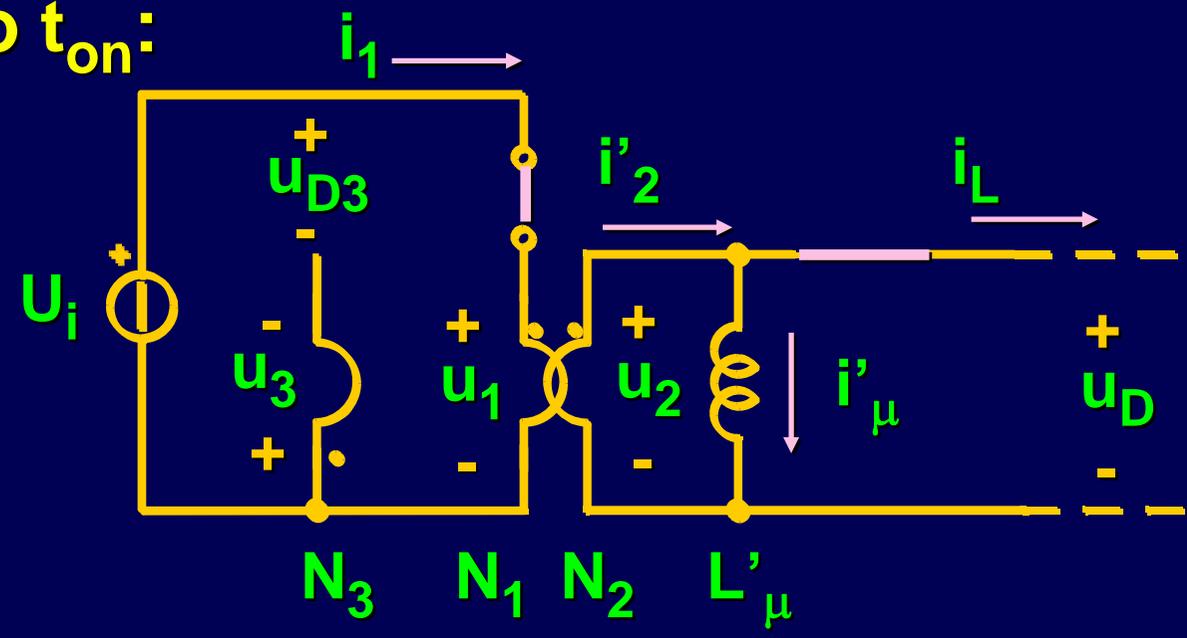
Intervallo  $t_{on}$ :



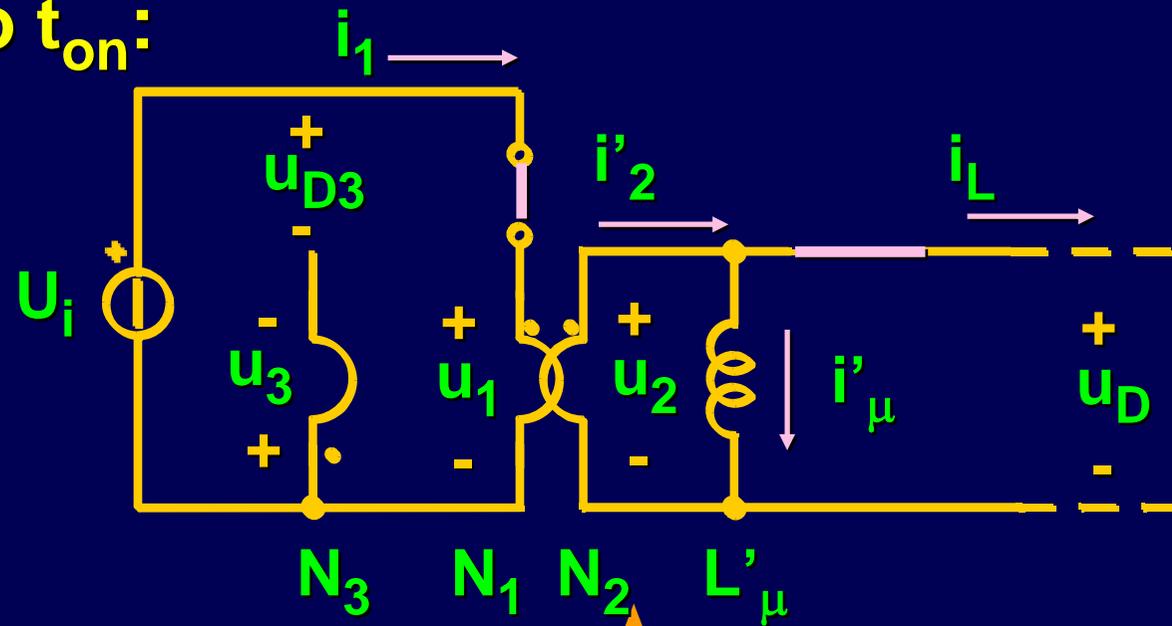
$$S \text{ on} \rightarrow u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \rightarrow D_2 \text{ on} - D \text{ off}$$

$$u_3 = \frac{N_3}{N_1} U_i \rightarrow D_3 \text{ off}$$

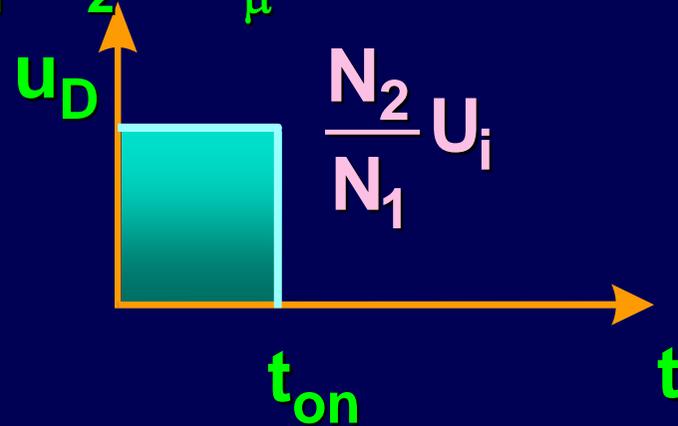
Intervallo  $t_{on}$ :



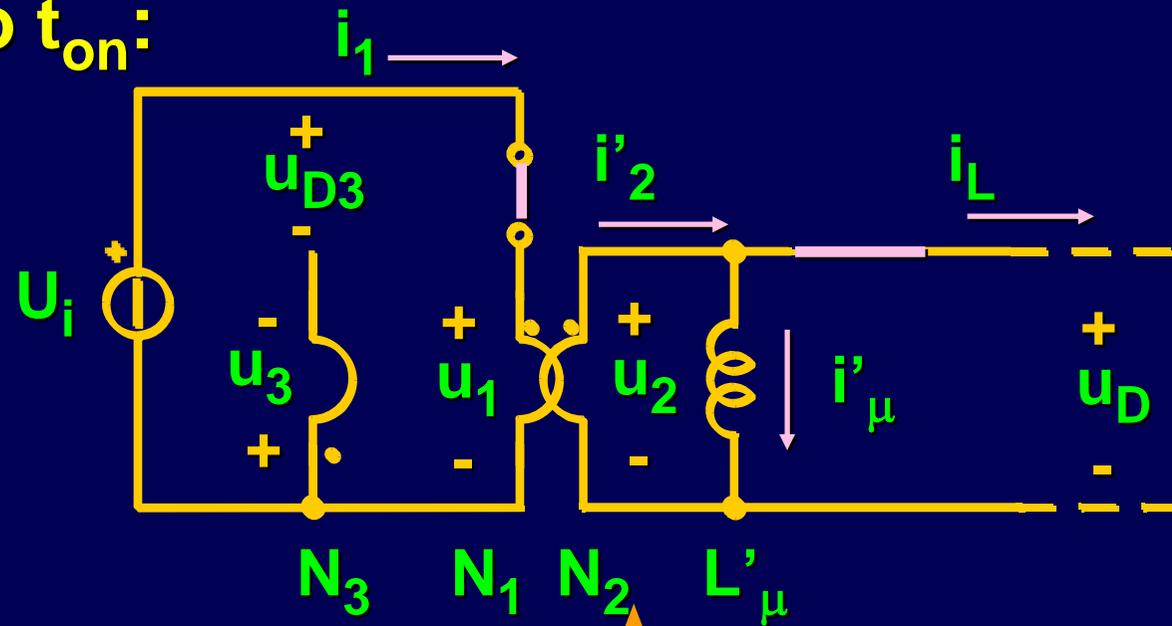
Intervallo  $t_{on}$ :



$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i$$



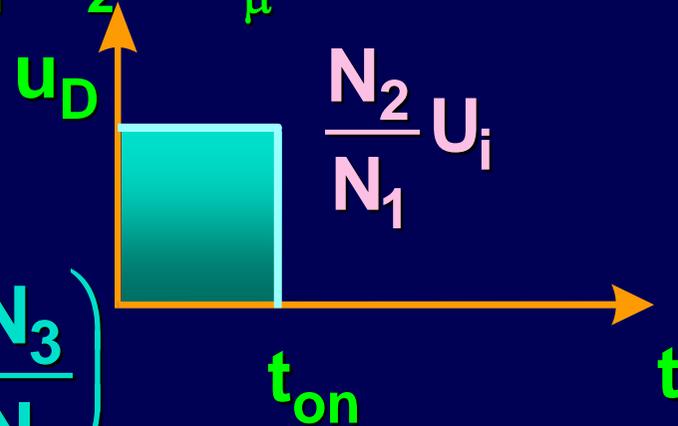
Intervallo  $t_{on}$ :



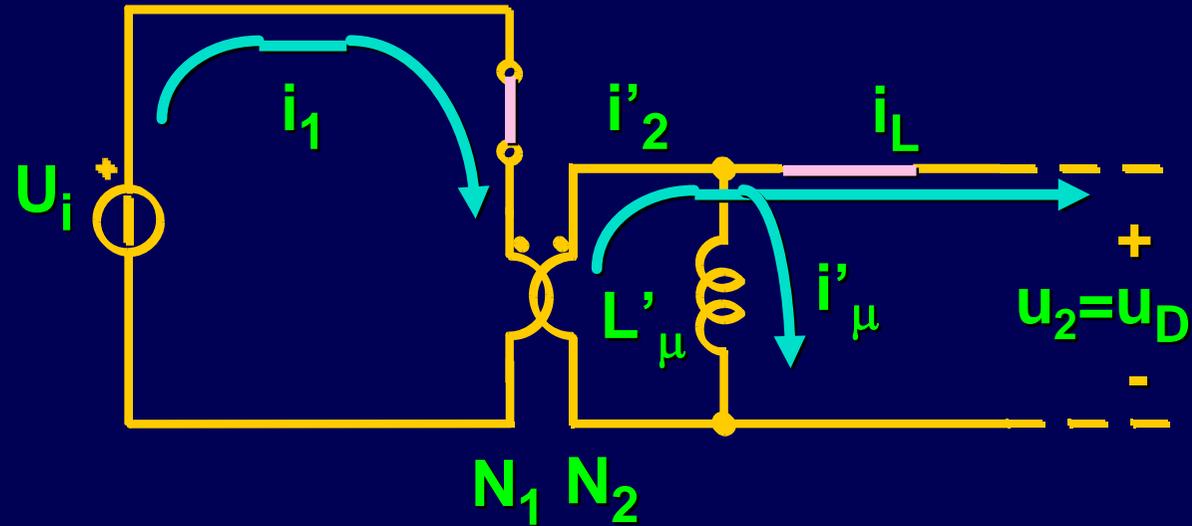
$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i$$



$$u_{D3} = u_1 + u_3 = U_i \left( 1 + \frac{N_3}{N_1} \right)$$



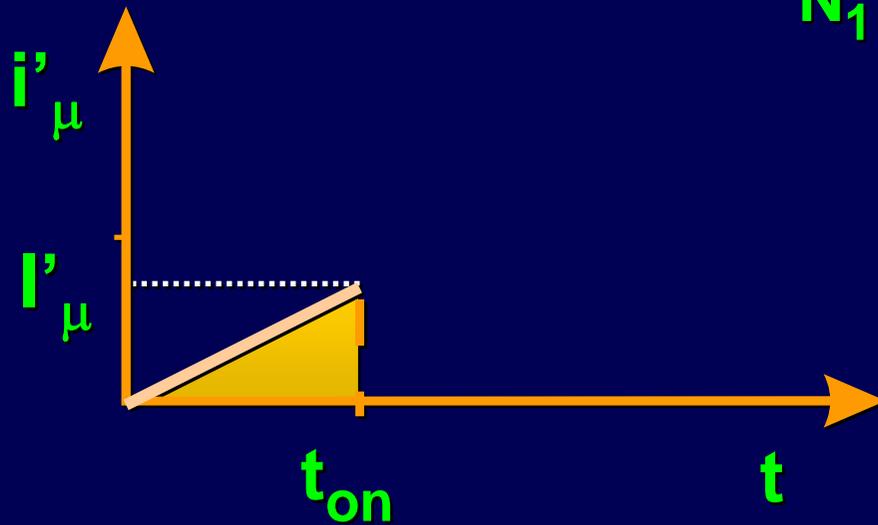
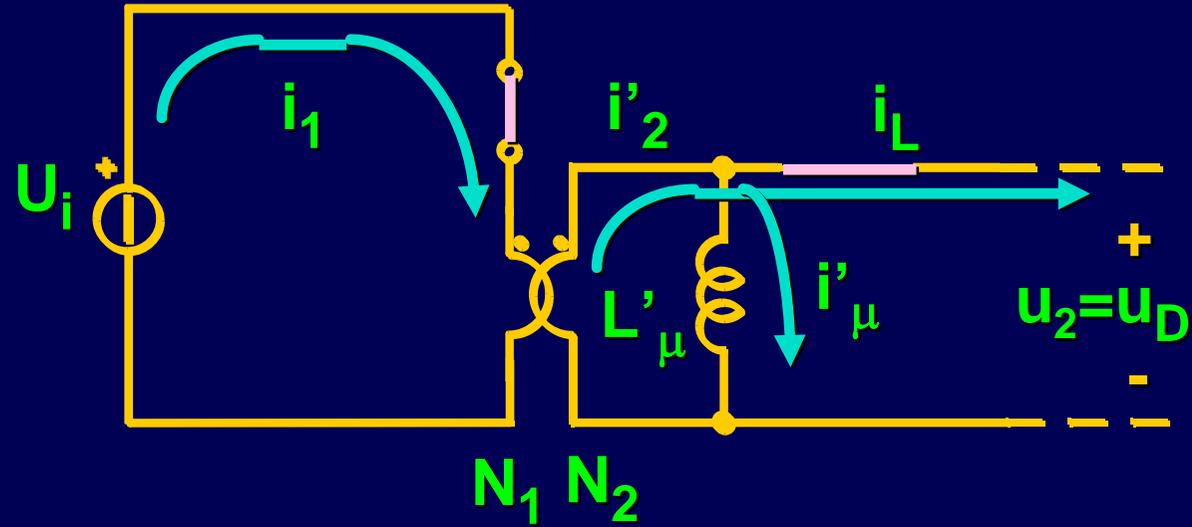
Intervallo  $t_{on}$ :



$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i'_2,$$

$$i'_2 = i_L + i'_\mu$$

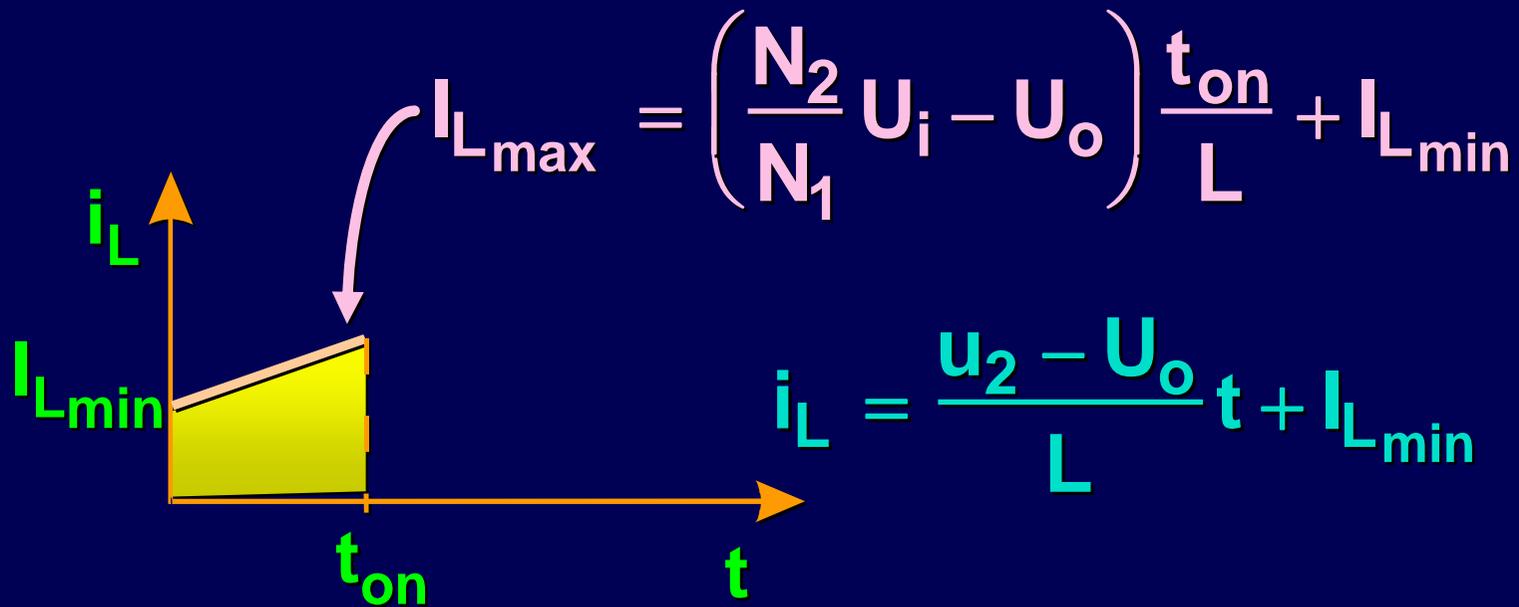
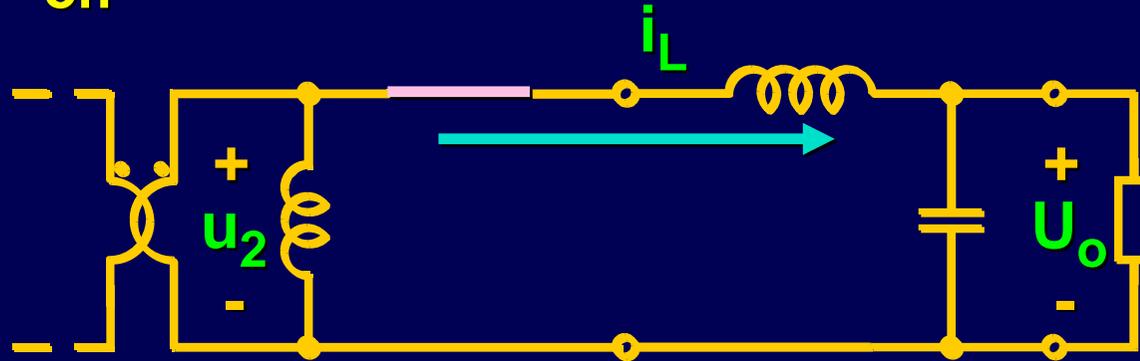
Intervallo  $t_{on}$ :



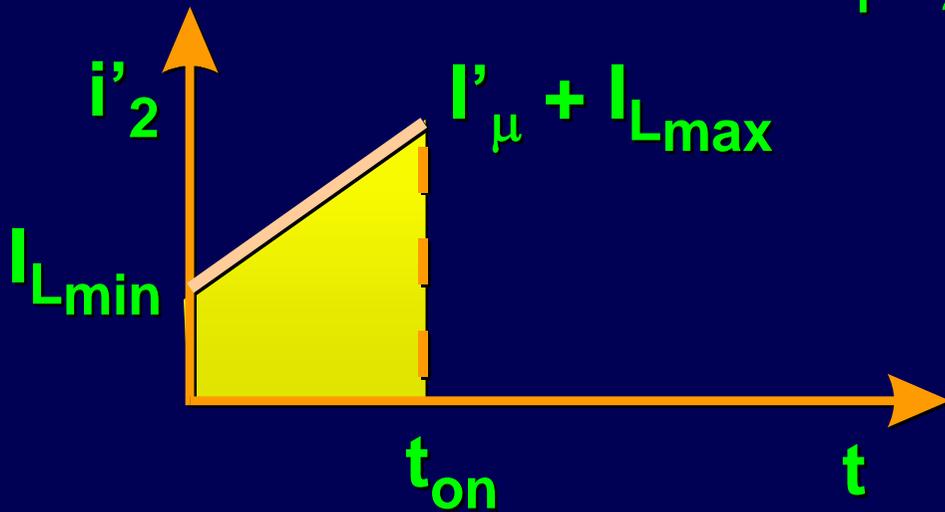
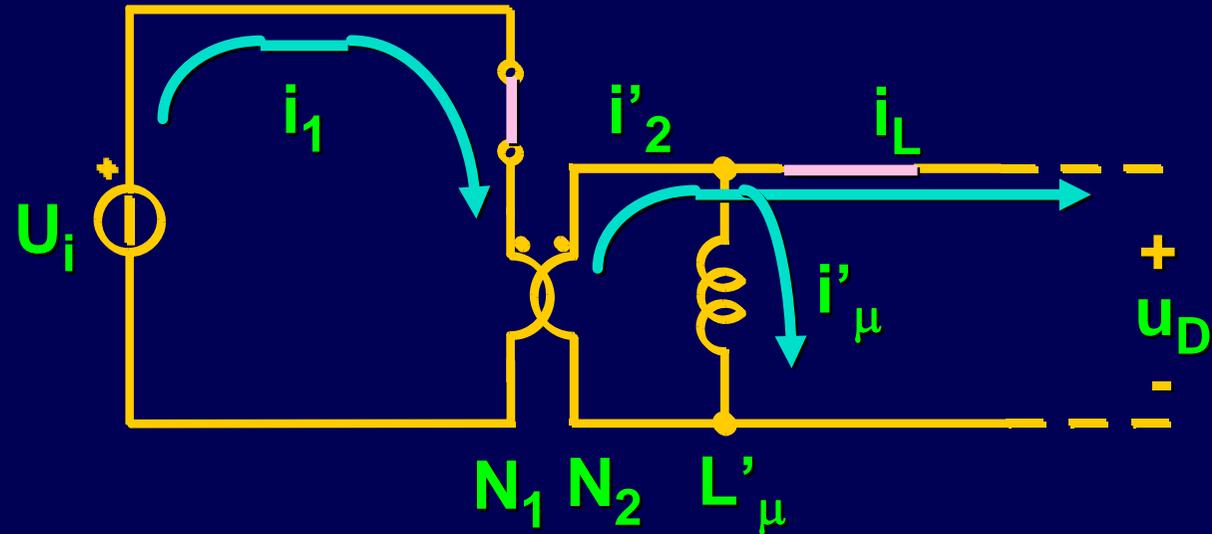
$$i'_\mu = \frac{u_2}{L'_\mu} t$$

$$I'_\mu = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_i}{L'_\mu} t_{on}$$

Intervallo  $t_{on}$ :



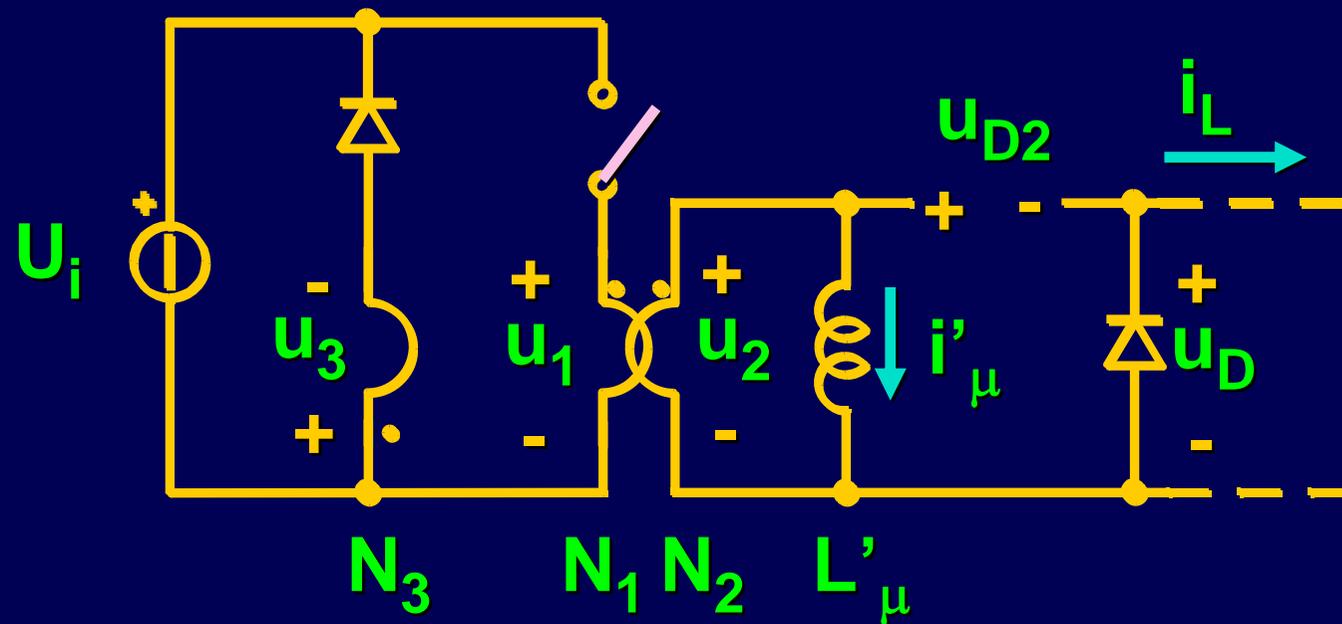
Intervallo  $t_{on}$ :



$$i'_2 = i'_\mu + i_L$$

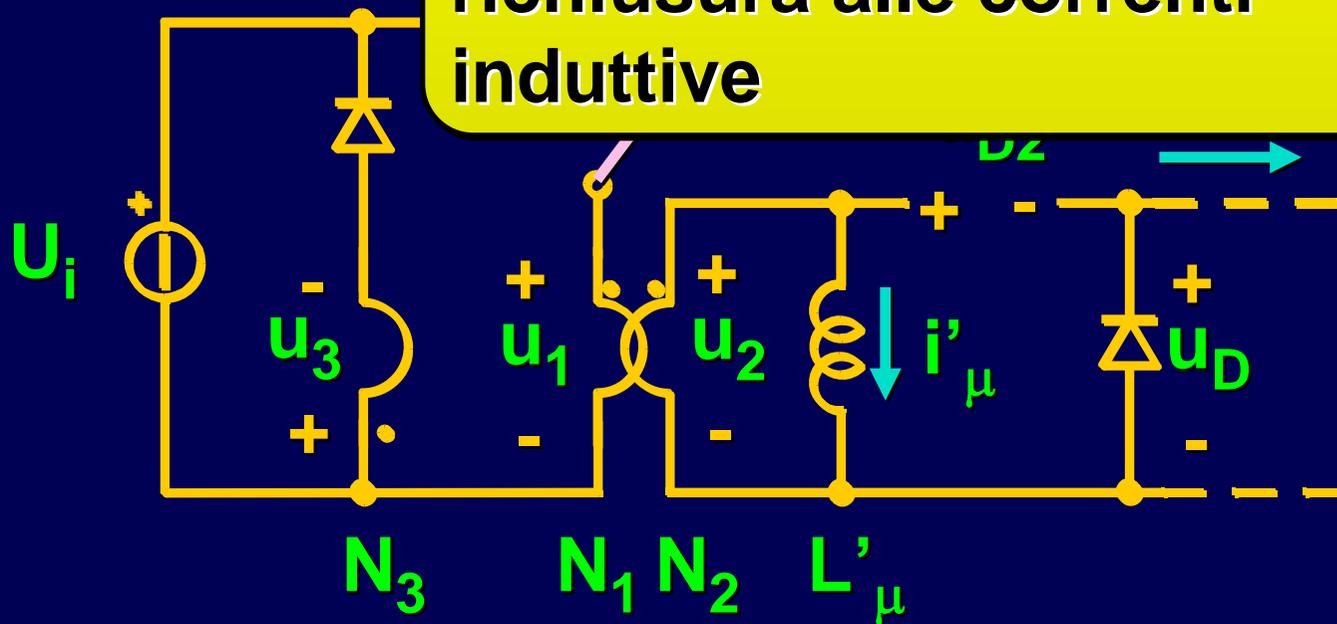
$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i'_2$$

# Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



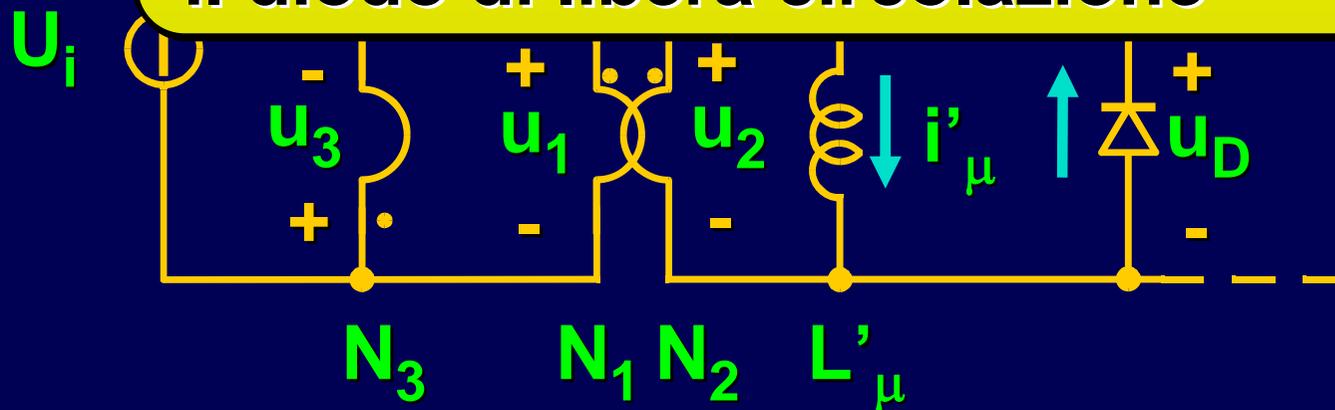
# Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{off}$ (A - reset)

All'apertura dell'interruttore occorre garantire una via di richiusura alle correnti induttive



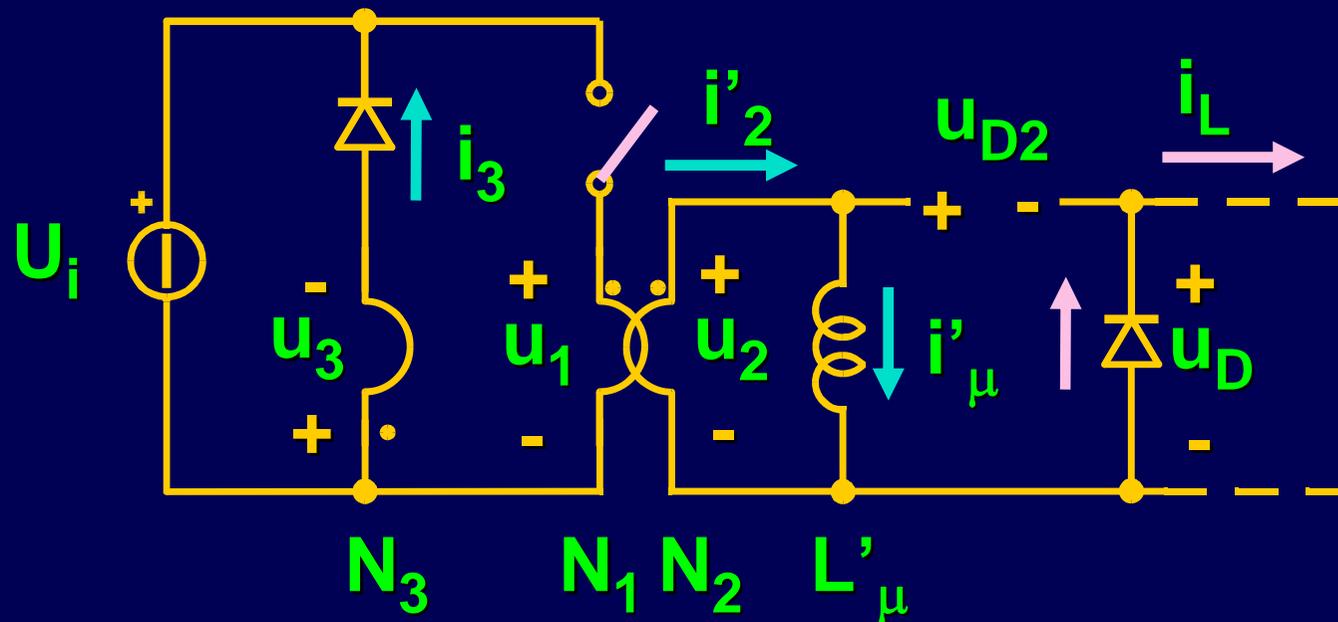
## Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)

La corrente magnetizzante si richiude attraverso l'avvolgimento terziario, quella del filtro attraverso il diodo di libera circolazione



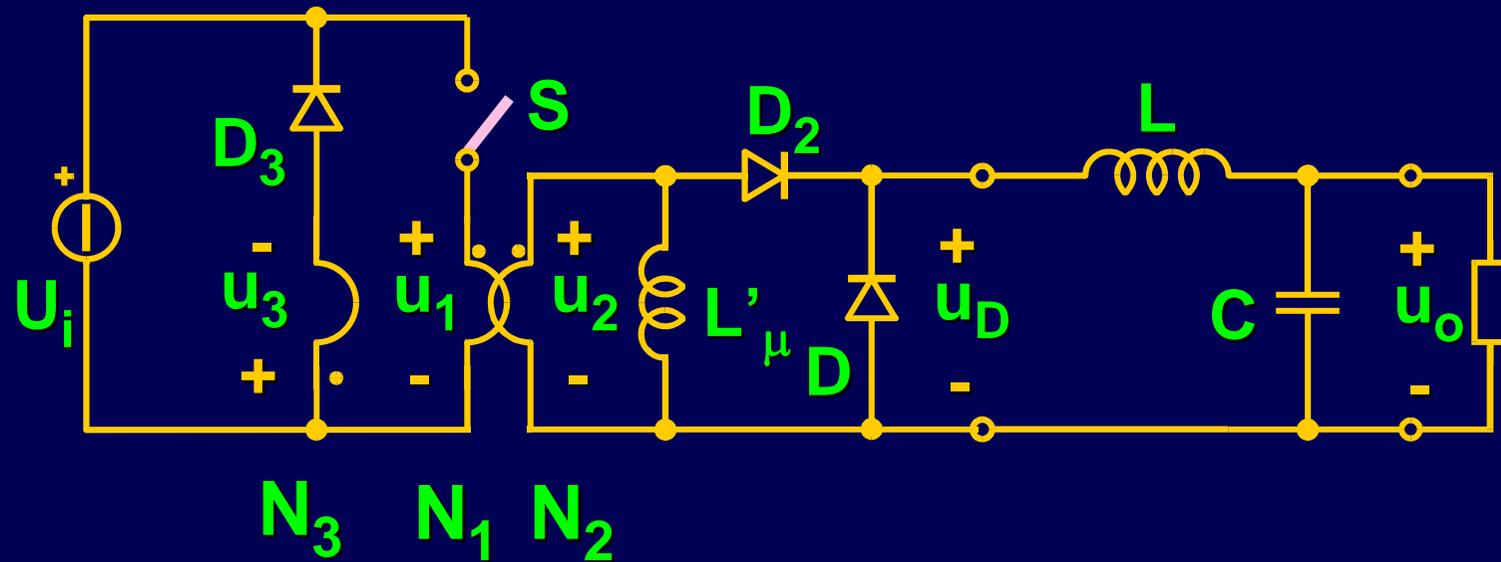
$S = D_2 = \text{“ off ”}$ ,  $D = D_3 = \text{“ on ”}$

# Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



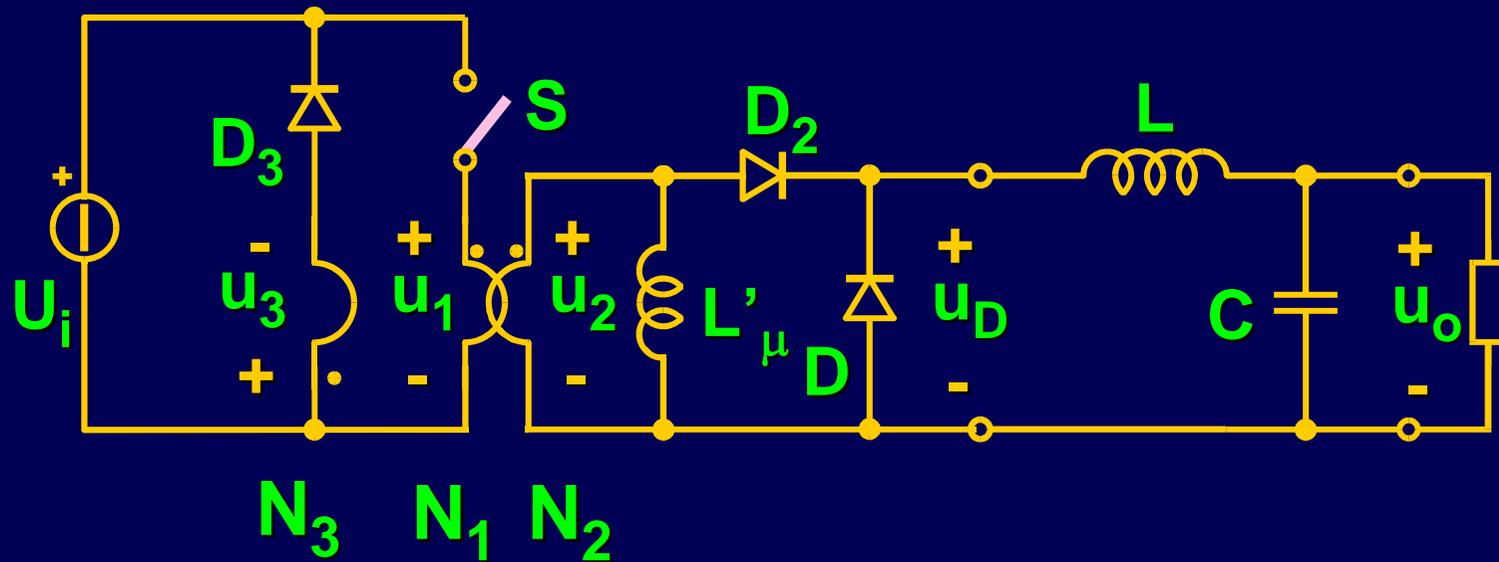
$S = D_2 = \text{"off"}, D = D_3 = \text{"on"}$

## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



$D_3$  on  $\rightarrow u_3 = -U_i$

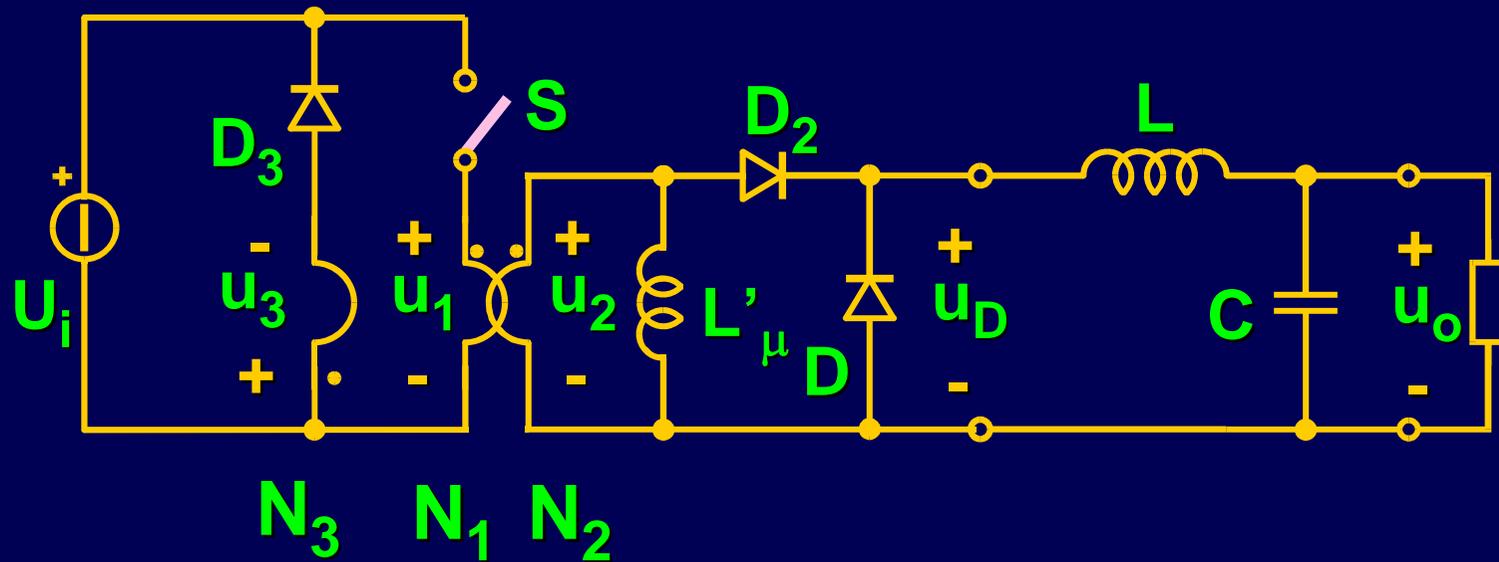
## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



$D_3$  on  $\rightarrow u_3 = -U_i$

$$u_1 = -\frac{N_1}{N_3} U_i \rightarrow u_S = U_i - u_1 = U_i \left( 1 + \frac{N_1}{N_3} \right)$$

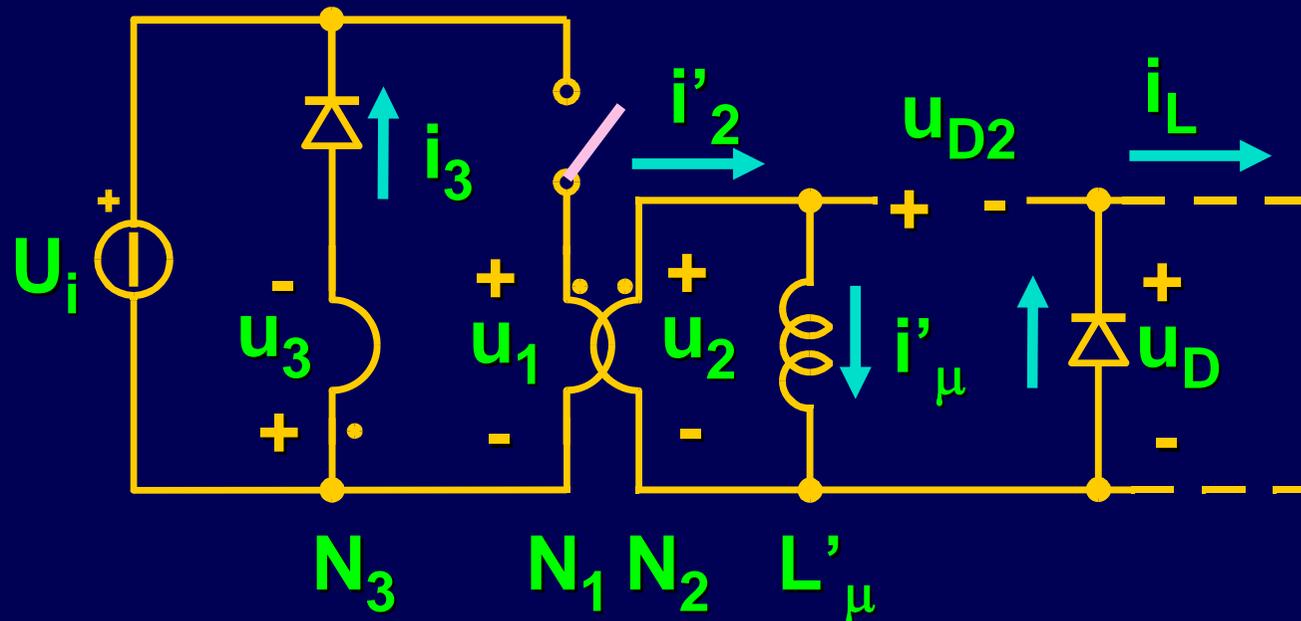
## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



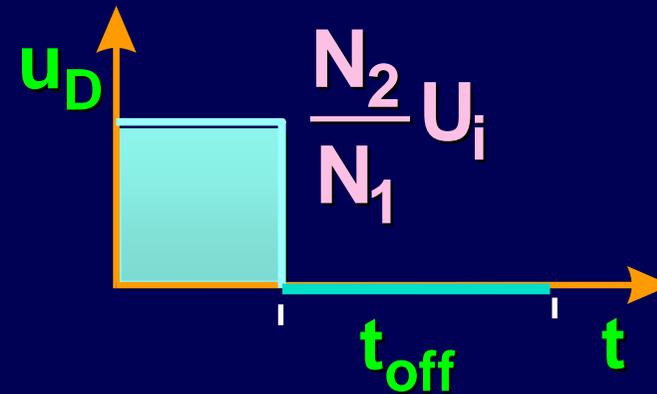
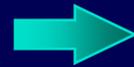
$$u_1 = -\frac{N_1}{N_3} U_i \quad \rightarrow \quad u_S = U_i - u_1 = U_i \left( 1 + \frac{N_1}{N_3} \right)$$

$$u_2 = -\frac{N_2}{N_3} U_i \quad \rightarrow \quad D_2 \text{ off} - D \text{ on} \quad \rightarrow \quad u_D = 0$$

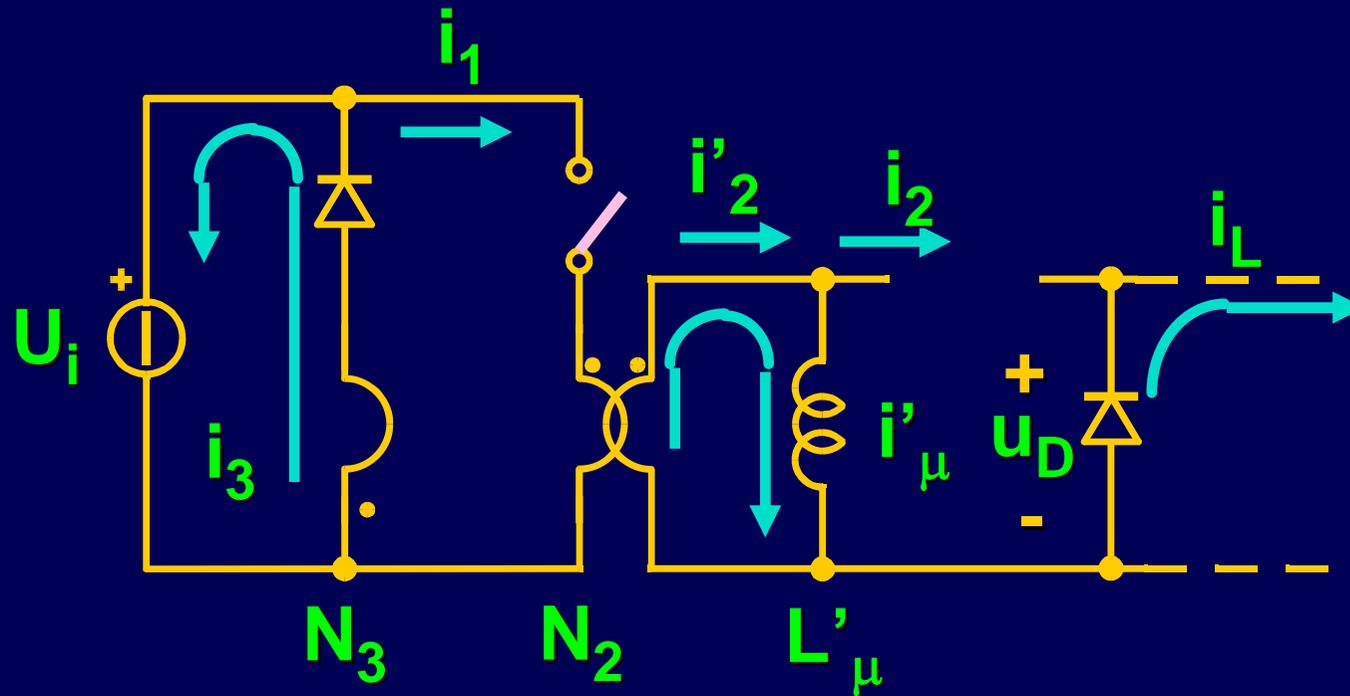
## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



$$u_D = 0$$



## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)

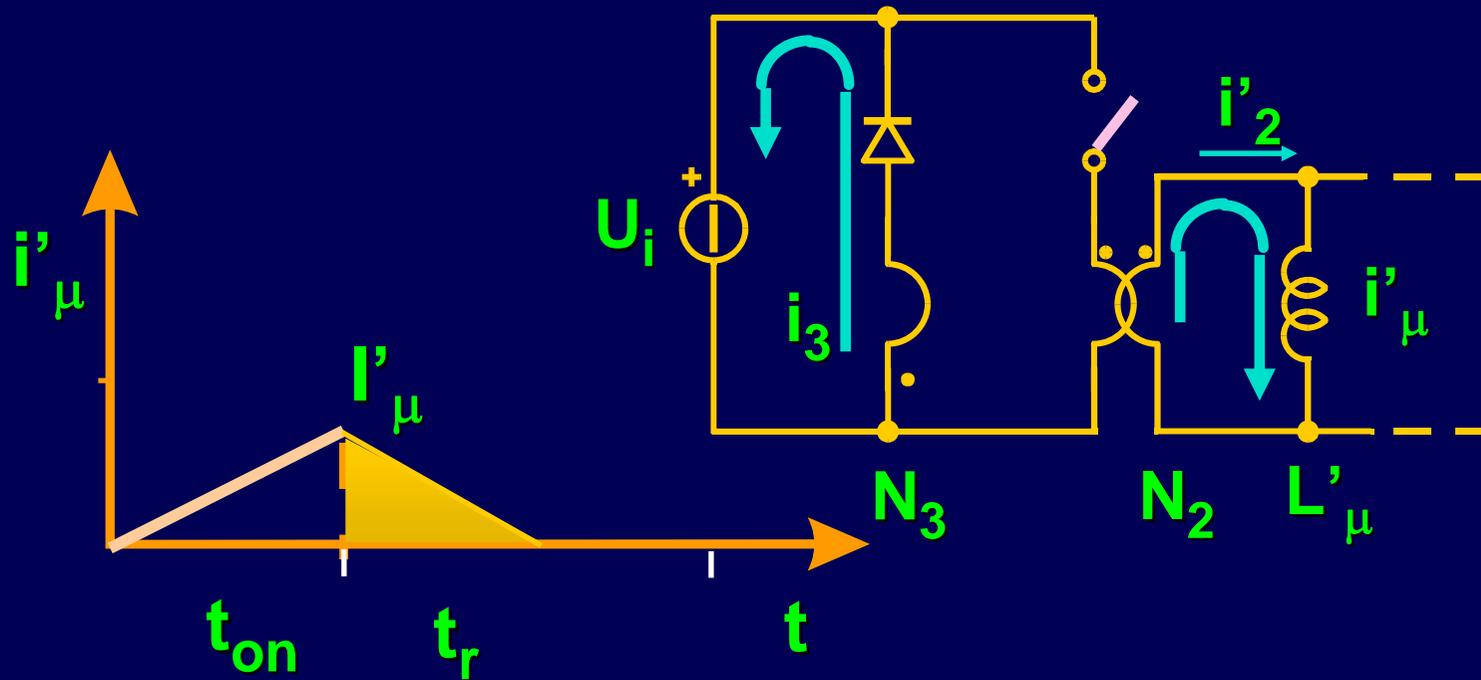


$$i_1 = 0$$

$$i_2 = 0$$

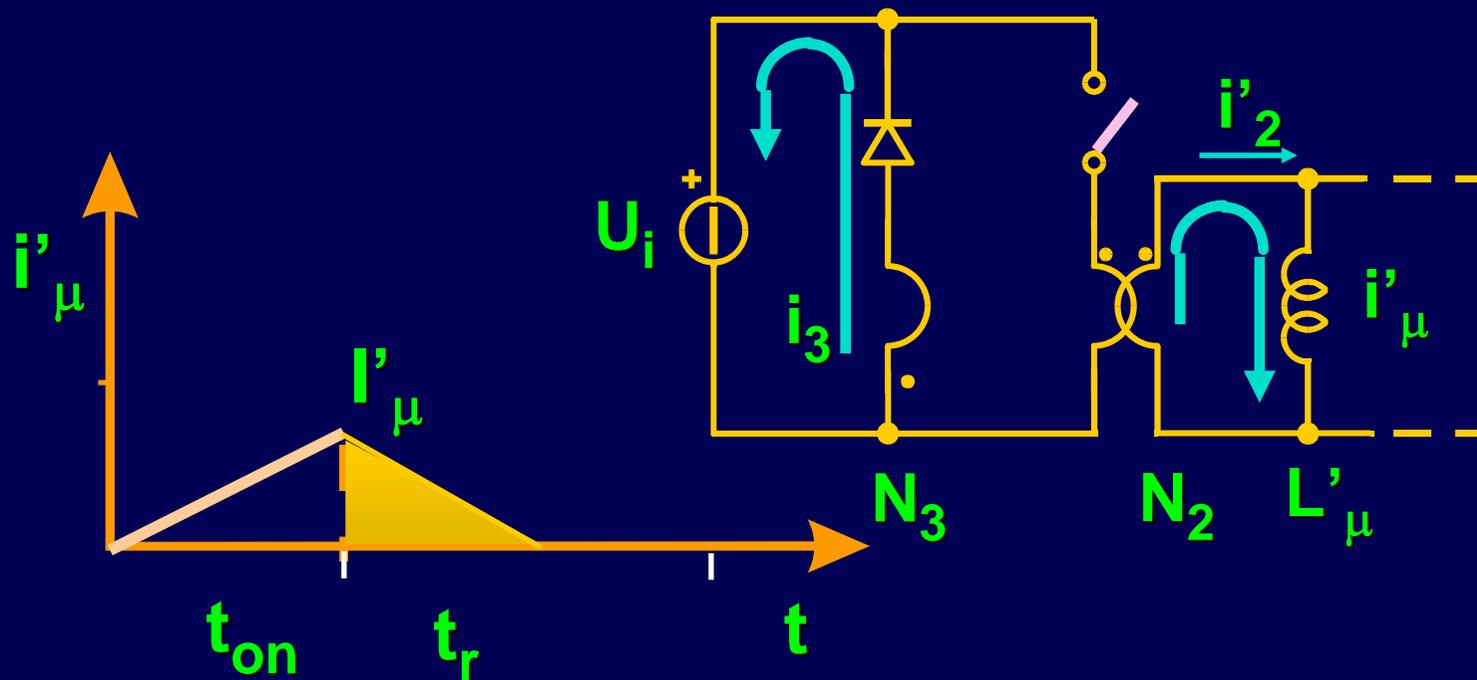
$$i'_2 = i'_\mu$$

## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



$$i'_\mu = I'_\mu + \frac{u_2}{L'_\mu} t = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_i}{L'_\mu} t_{\text{on}} - \frac{N_2}{N_3} \frac{U_i}{L'_\mu} t$$

## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



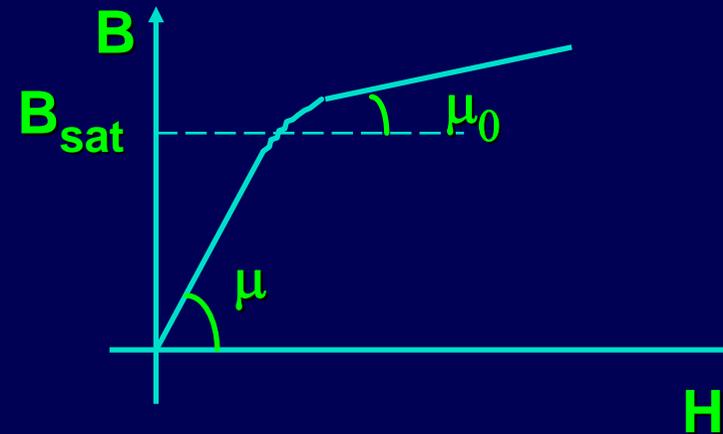
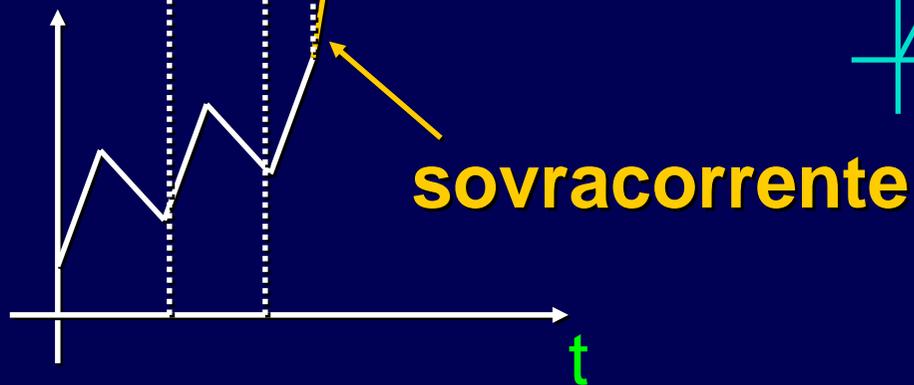
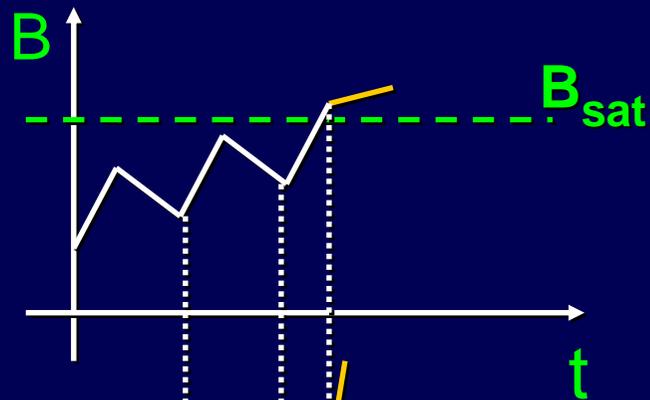
Fine della fase di reset del trasformatore:

$$i'_{\mu} = I'_{\mu} + \frac{u_2}{L'_{\mu}} t = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_i}{L'_{\mu}} t_{\text{on}} - \frac{N_2}{N_3} \frac{U_i}{L'_{\mu}} t$$

$$i'_{\mu} = 0 \quad \rightarrow \quad t_r = \frac{N_3}{N_1} t_{\text{on}}$$

# NOTA

$t_{\text{off}} < t_{\text{reset}} \Rightarrow$  saturazione del nucleo



**NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:**

$$t_r \leq t_{\text{off}} \quad \rightarrow \quad \frac{N_3}{N_1} t_{\text{on}} \leq T_s - t_{\text{on}}$$

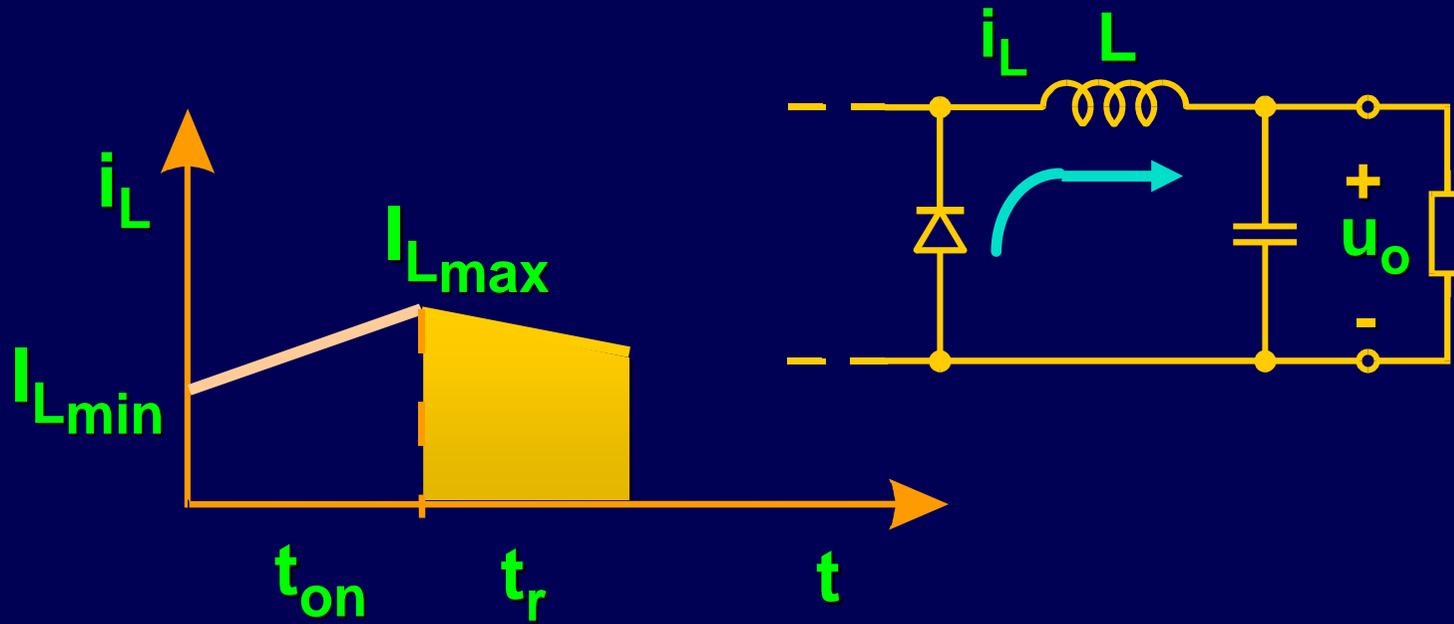
**NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:**

$$t_r \leq t_{\text{off}} \quad \rightarrow \quad \frac{N_3}{N_1} t_{\text{on}} \leq T_s - t_{\text{on}}$$

$$\delta = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

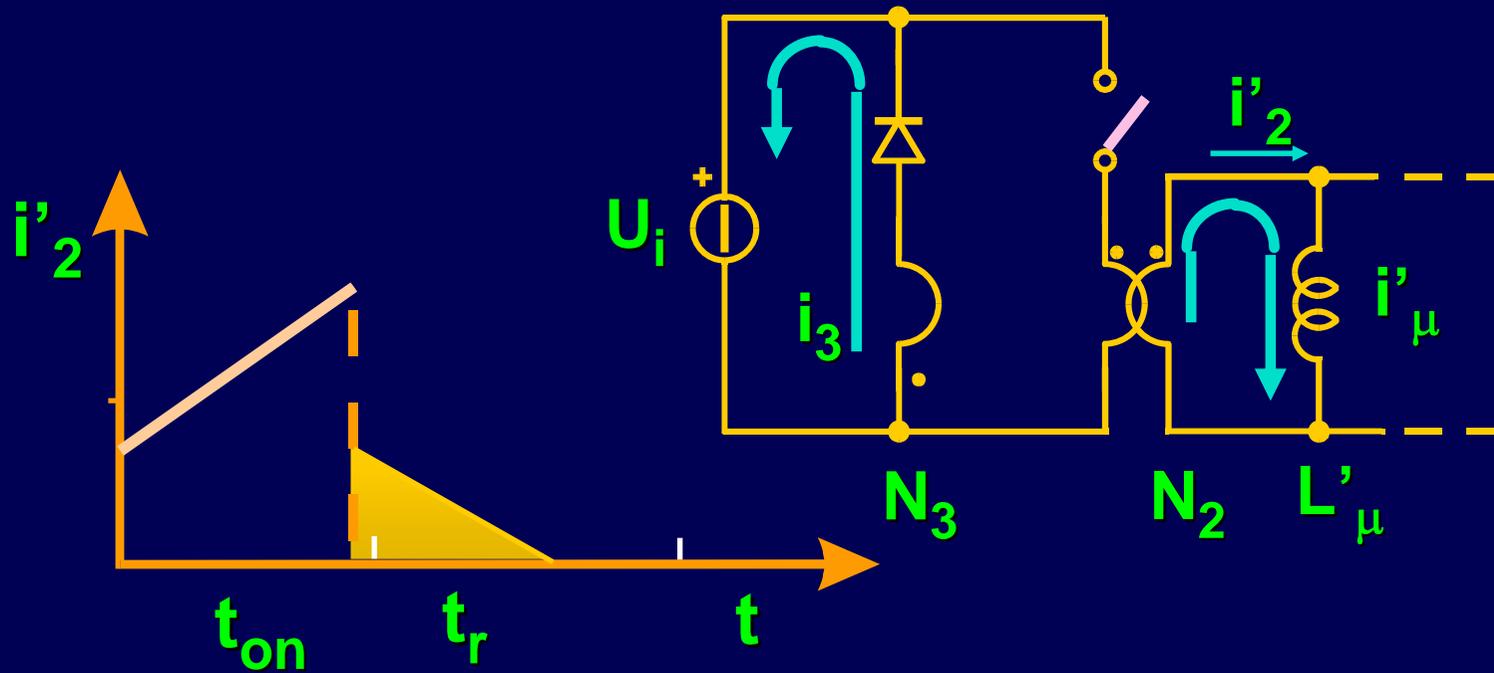
**Il valore del duty-cycle è limitato superiormente**

## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



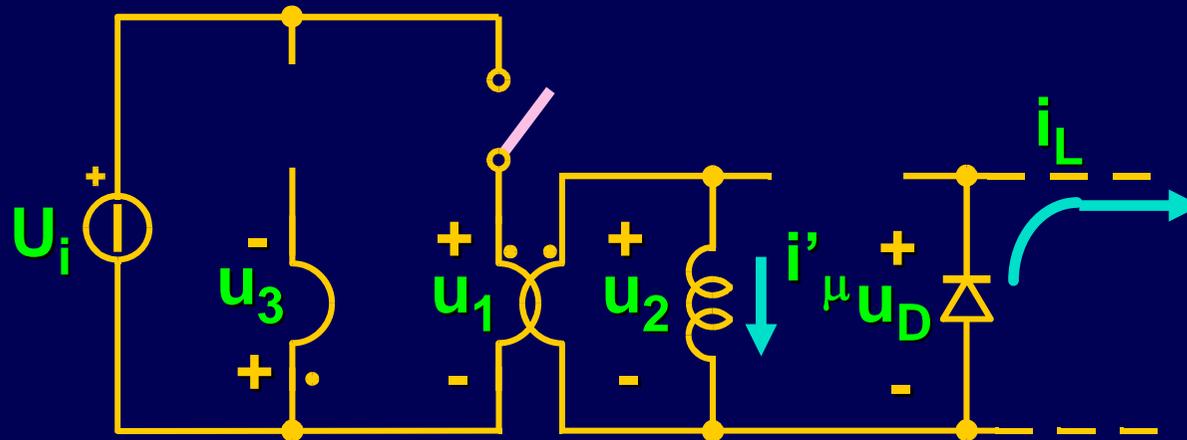
$$i_L = I_{L\text{max}} - \frac{U_o}{L} t$$

## Intervallo $t_{\text{off}}$ (A - reset)



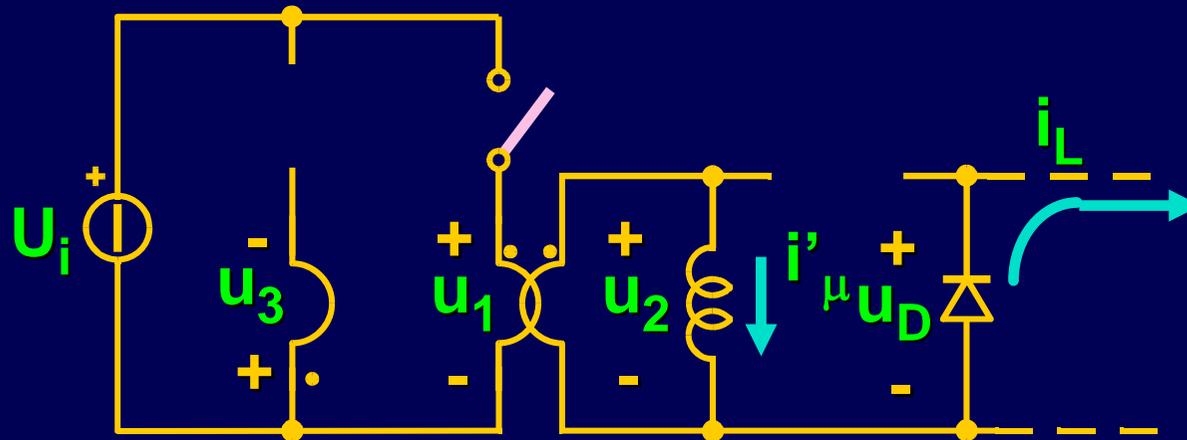
$$i'_2 = i'_\mu \quad i_3 = \frac{N_2}{N_3} i'_2 = \frac{N_2}{N_3} i'_\mu$$

# Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{\text{off}}$ (B - idle)



**S , D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> OFF**

## Convertitore FORWARD: Intervallo $t_{\text{off}}$ (B - idle)

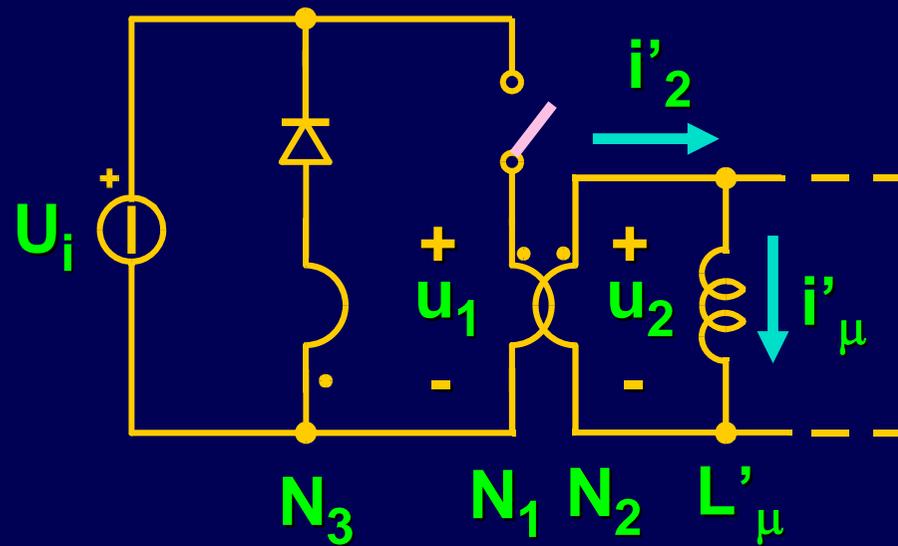


$$i'_\mu = 0 \quad \rightarrow \quad u_1 = u_2 = u_3 = 0$$

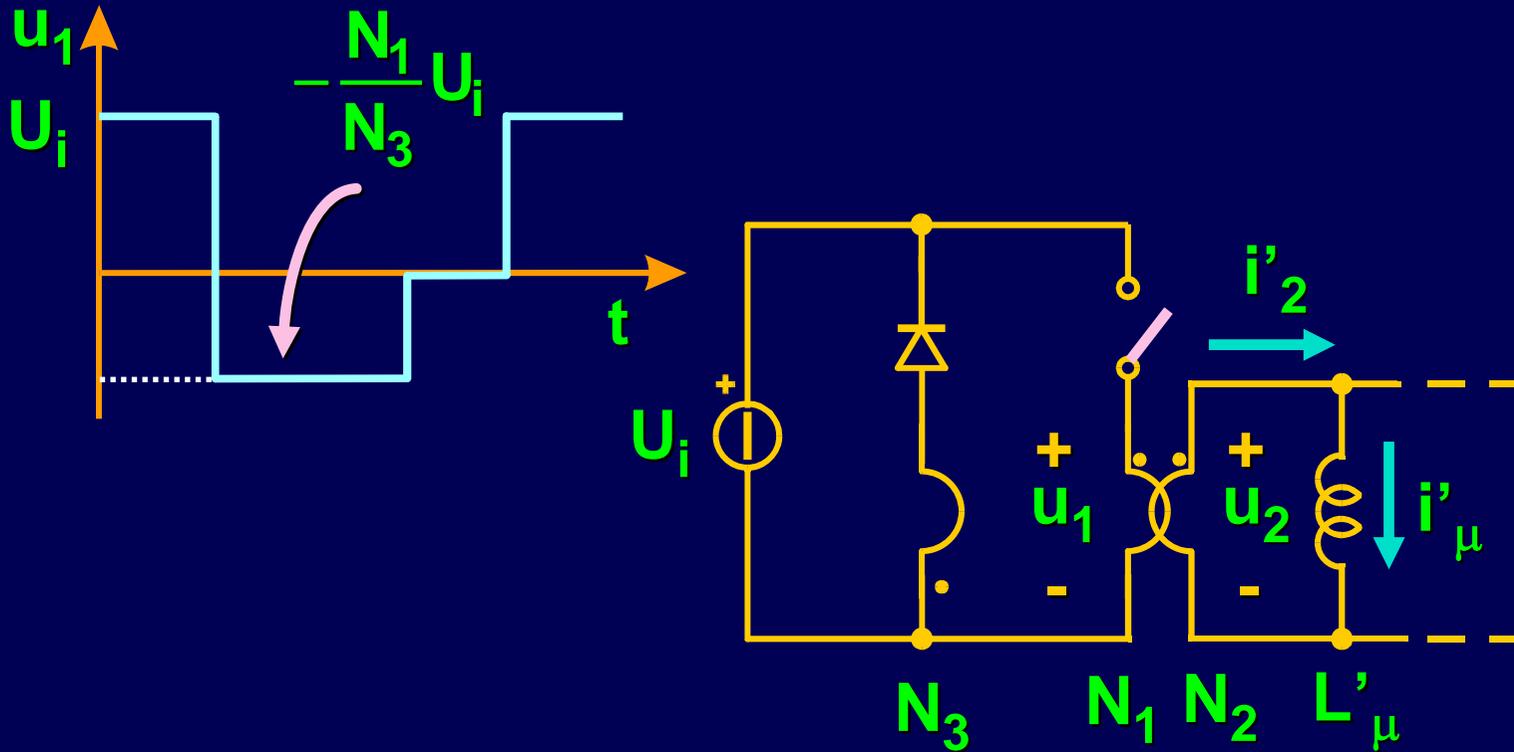
$S, D_2, D_3$  OFF

$$u_D = 0 \quad \rightarrow \quad u_L = -U_o$$

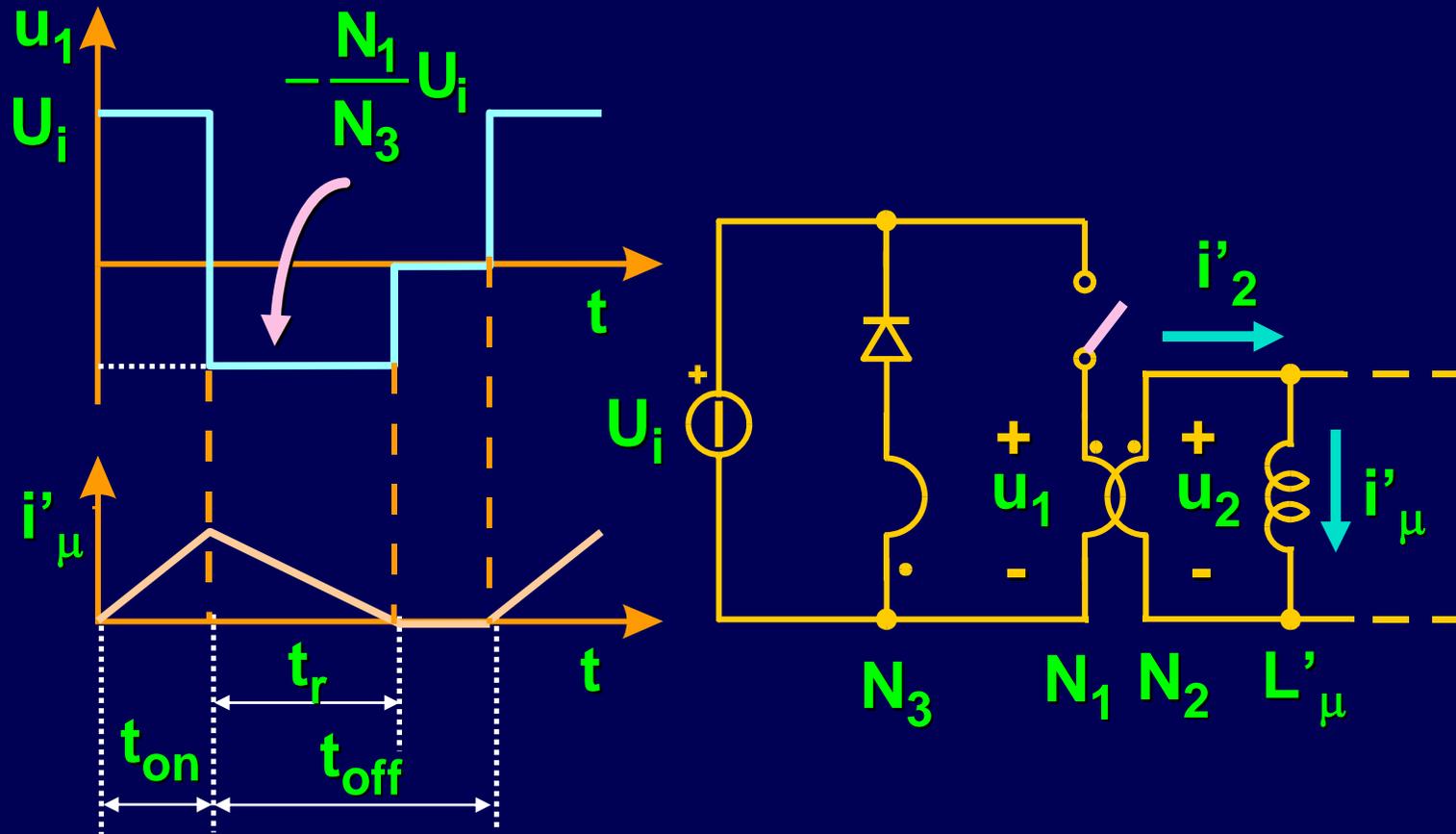
# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



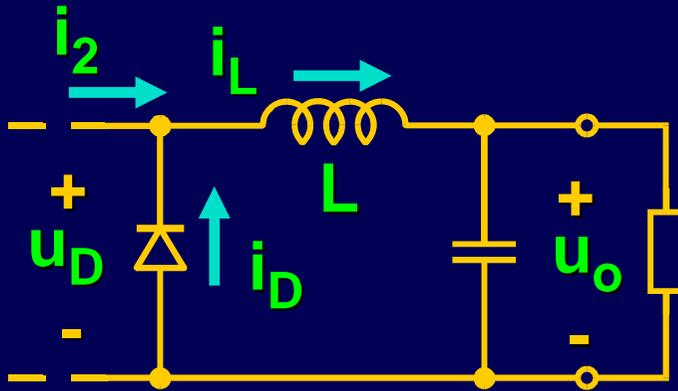
# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



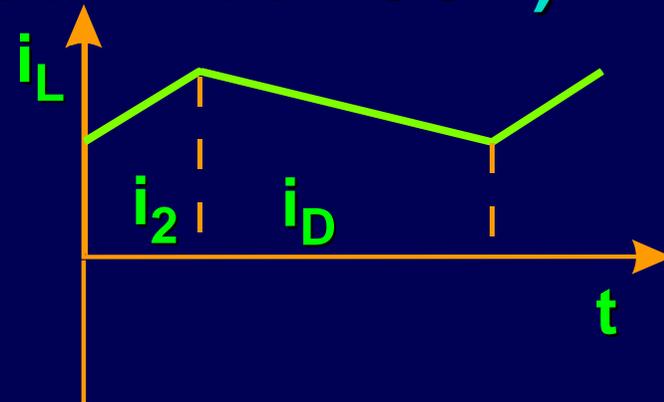
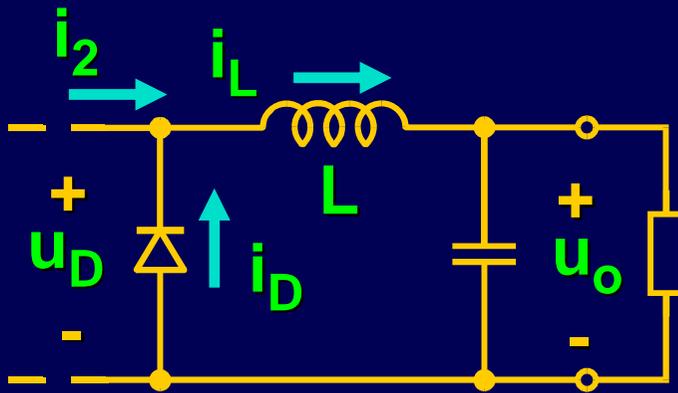
# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



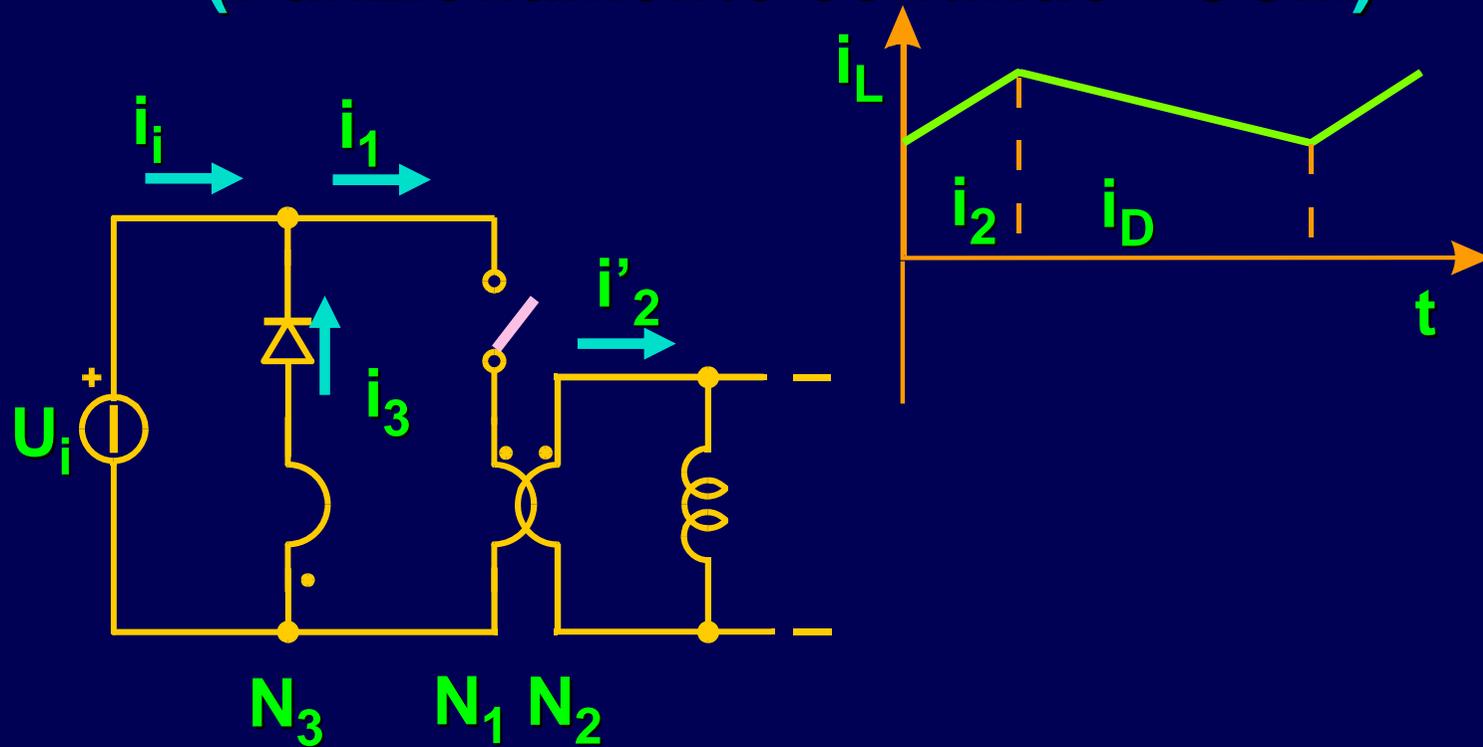
# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



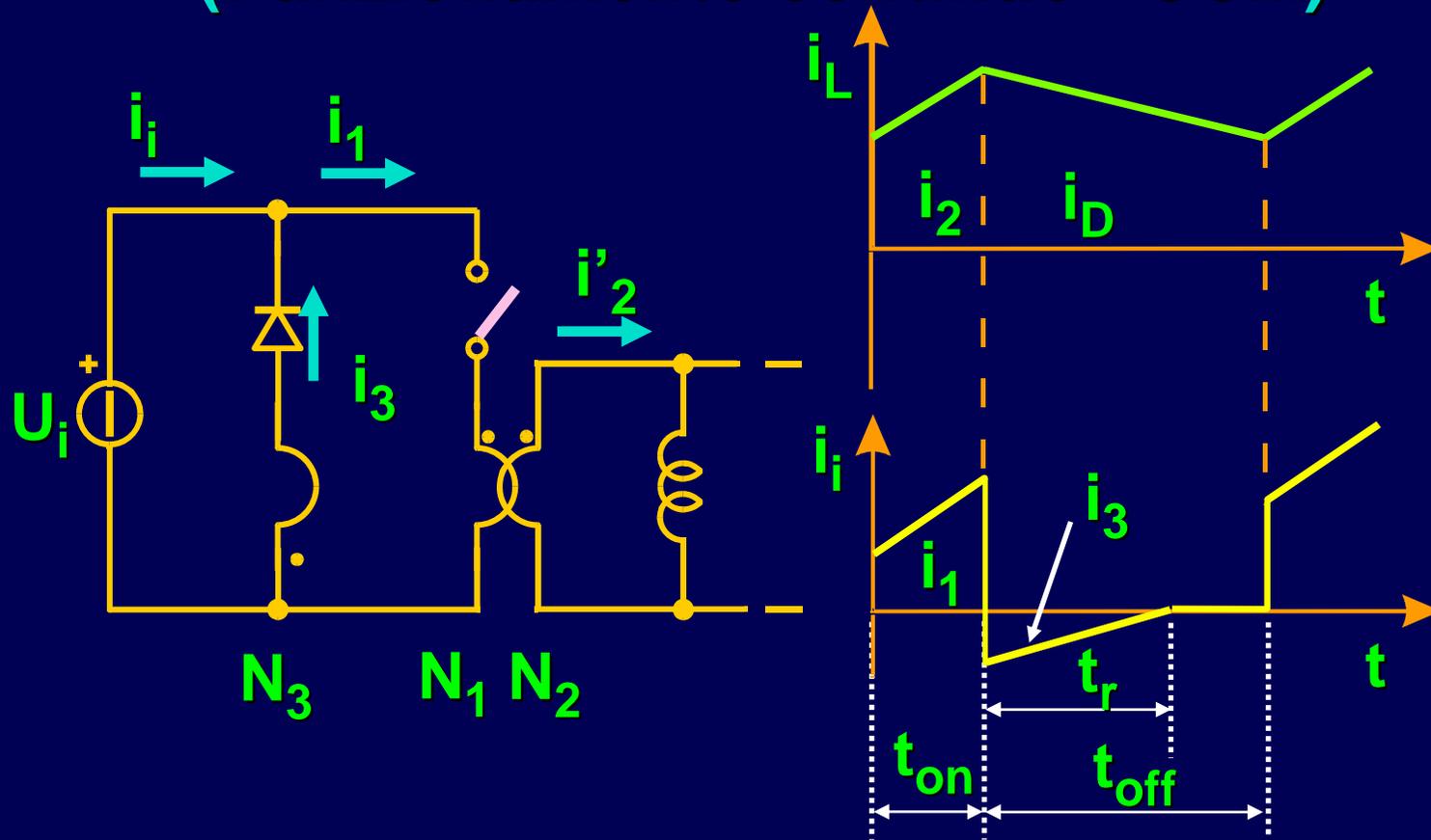
# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)

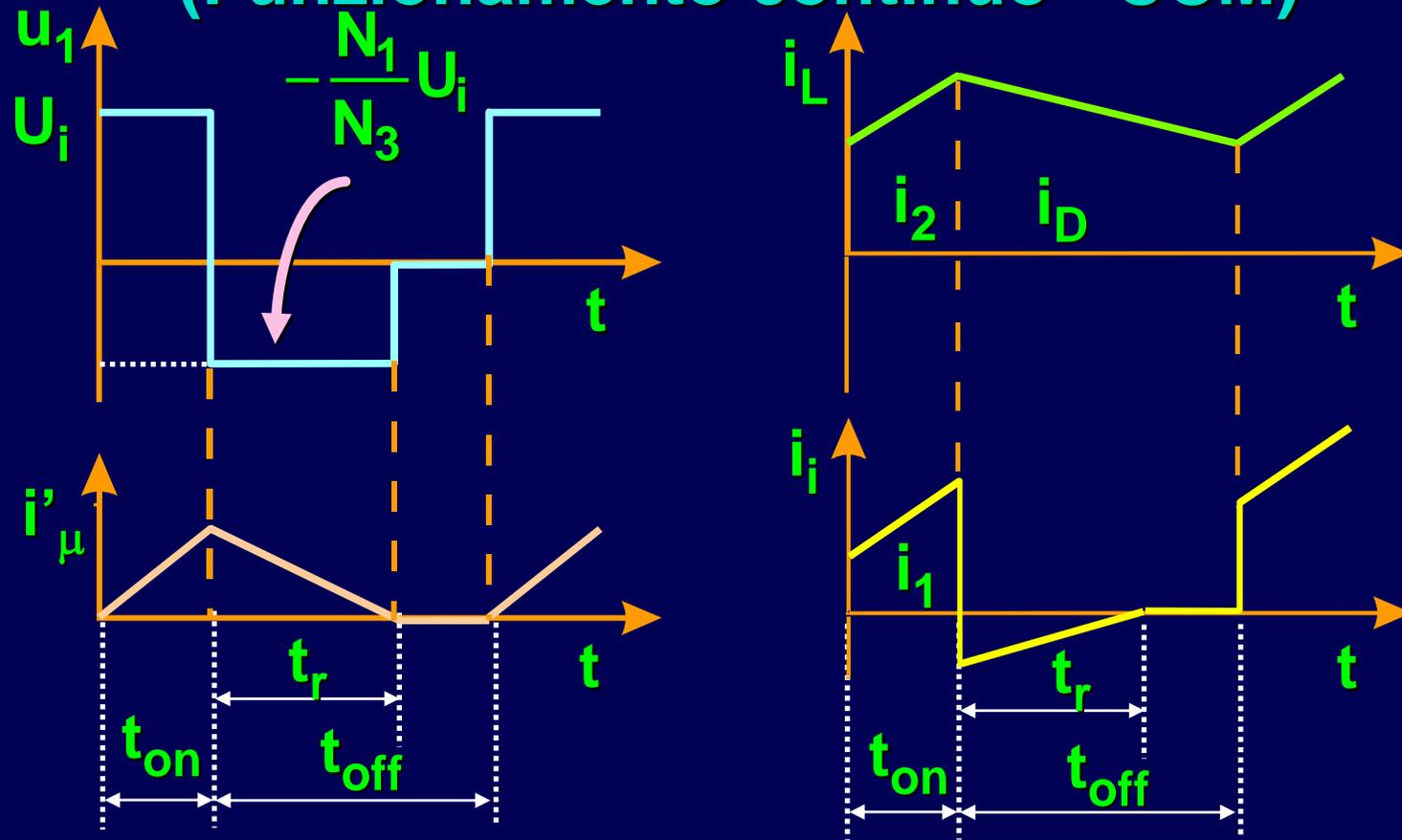


# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



# Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD

(Funzionamento continuo - CCM)



## **Convertitore FORWARD**

### **Conclusioni**

- **dal punto di vista dell'uscita non cambia nulla rispetto al convertitore Buck**

# Convertitore FORWARD

## Conclusioni

- dal punto di vista dell'uscita non cambia nulla rispetto al convertitore Buck
- c'è però un limite di duty-cycle

$$\delta \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

## Convertitore FORWARD

### Conclusioni

- dal punto di vista dell'uscita non cambia nulla rispetto al convertitore Buck

- c'è però un limite di duty-cycle  $\delta \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3}$

- ... ed una maggiore sollecitazione di tensione dell'interruttore

$$U_{S_{\max}} = U_i \cdot \frac{N_1 + N_3}{N_3}$$

## NOTE

1) Spesso si realizza  $N_1 = N_3$  (avvolgimento bifilare), quindi:

$$\delta_{\max} = 0.5 \text{ e } U_{S_{\max}} = 2U_i$$

## NOTE

- 1) Spesso si realizza  $N_1 = N_3$  (avvolgimento bifilare), quindi:

$$\delta_{\max} = 0.5 \text{ e } U_{S_{\max}} = 2U_i$$

- 2) In generale l'introduzione di un trasformatore riduce il “tasso di utilizzo” del convertitore, cioè il rapporto  $P_o/P_s$

## NOTE

- 1) Spesso si realizza  $N_1 = N_3$  (avvolgimento bifilare), quindi:

$$\delta_{\max} = 0.5 \text{ e } U_{S\max} = 2U_i$$

- 2) In generale l'introduzione di un trasformatore riduce il “tasso di utilizzo” del convertitore, cioè il rapporto  $P_o/P_S$

$P_o$  = potenza di uscita nominale (max)

$P_S$  = potenza di dimensionamento dell'interruttore

# Tasso di utilizzo di un convertitore Buck

**Tasso di utilizzo di un convertitore Buck**  
**(Ipotesi semplificativa:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ )**

**Tasso di utilizzo di un convertitore Buck**  
**(Ipotesi semplificativa:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ )**

$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = U_i I_o$$

## Tasso di utilizzo di un convertitore Buck (Ipotesi semplificativa: $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ )

$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = U_i I_o$$

$$P_s = U_{s_{\max}} I_s = U_i I_o$$

## Tasso di utilizzo di un convertitore Buck (Ipotesi semplificativa: $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ )

$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = U_i I_o$$

$$P_s = U_{s_{\max}} I_s = U_i I_o$$



$$\frac{P_o}{P_s} = 1$$

# Tasso di utilizzo di un convertitore Forward

# Tasso di utilizzo di un convertitore Forward

(Ipotesi semplificative:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L, i_\mu = 0$ )

## Tasso di utilizzo di un convertitore Forward

(Ipotesi semplificative:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L, i_\mu = 0$ )

$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = \frac{N_2}{N_1} U_i \delta_{\max} I_o$$

## Tasso di utilizzo di un convertitore Forward

(Ipotesi semplificative:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ ,  $i_\mu = 0$ )

$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = \frac{N_2}{N_1} U_i \delta_{\max} I_o$$

$$P_s = U_{s_{\max}} I_s = \frac{N_1 + N_3}{N_3} U_i \frac{N_2}{N_1} I_o$$

## Tasso di utilizzo di un convertitore Forward

(Ipotesi semplificative:  $\Delta i_L = 0 \rightarrow i_L = I_L$ ,  $i_\mu = 0$ )

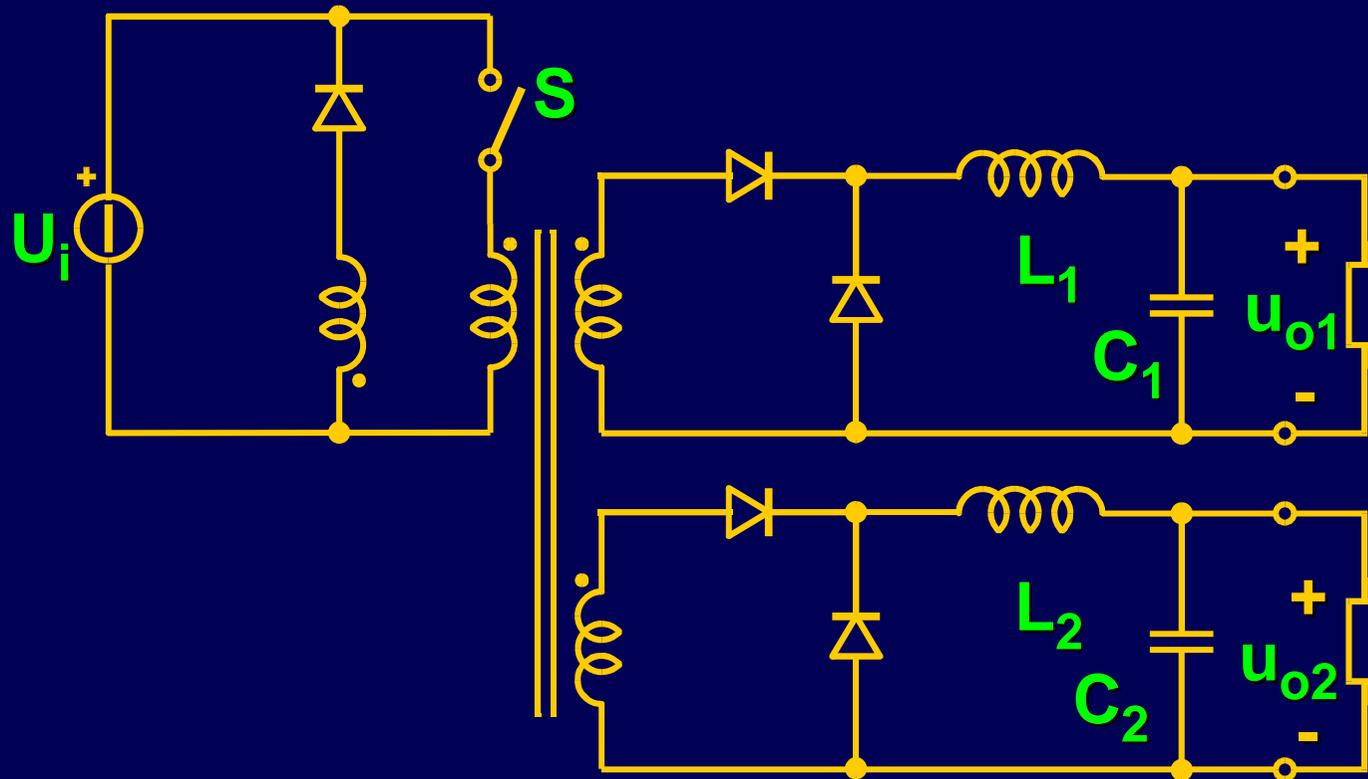
$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = \frac{N_2}{N_1} U_i \delta_{\max} I_o$$

$$P_s = U_{s_{\max}} I_s = \frac{N_1 + N_3}{N_3} U_i \frac{N_2}{N_1} I_o$$

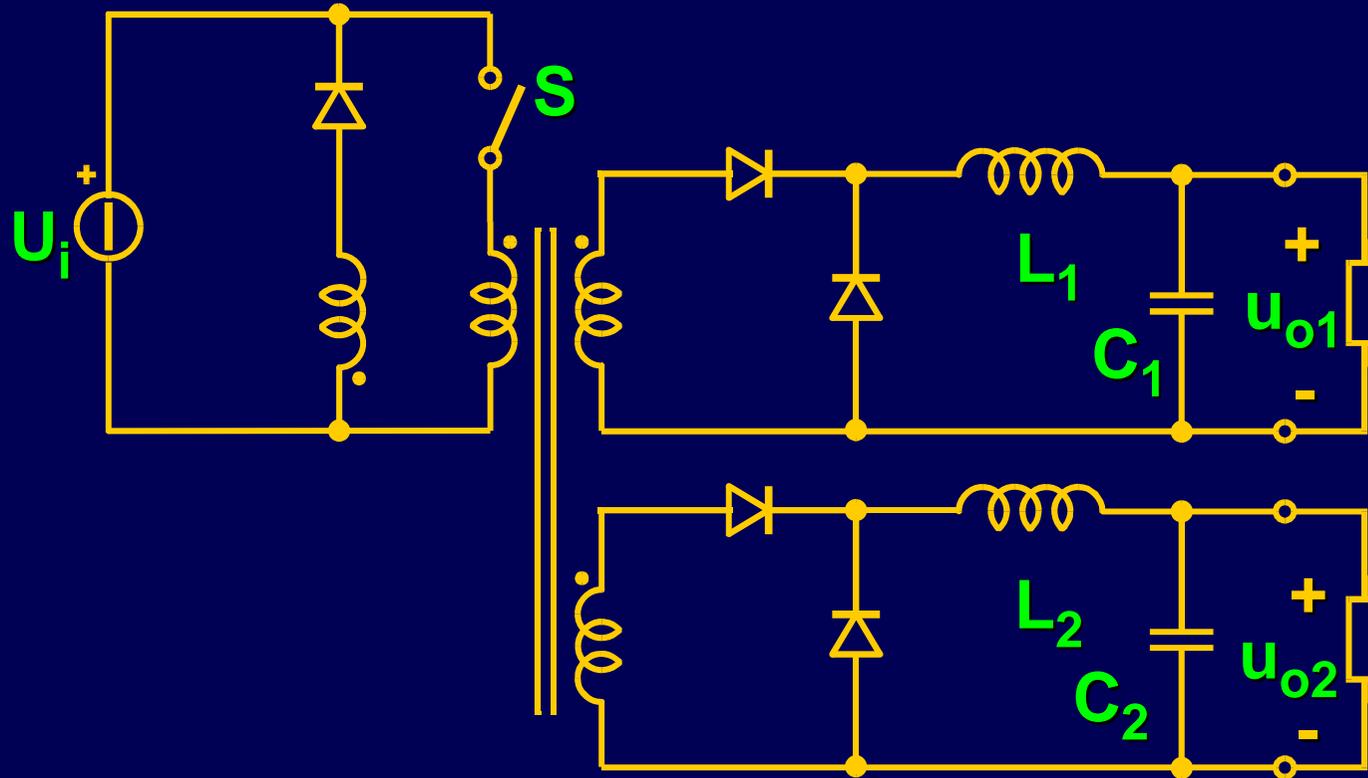


$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{N_1 N_3}{(N_1 + N_3)^2} \leq \frac{1}{4}$$

# Convertitore FORWARD multi-uscita

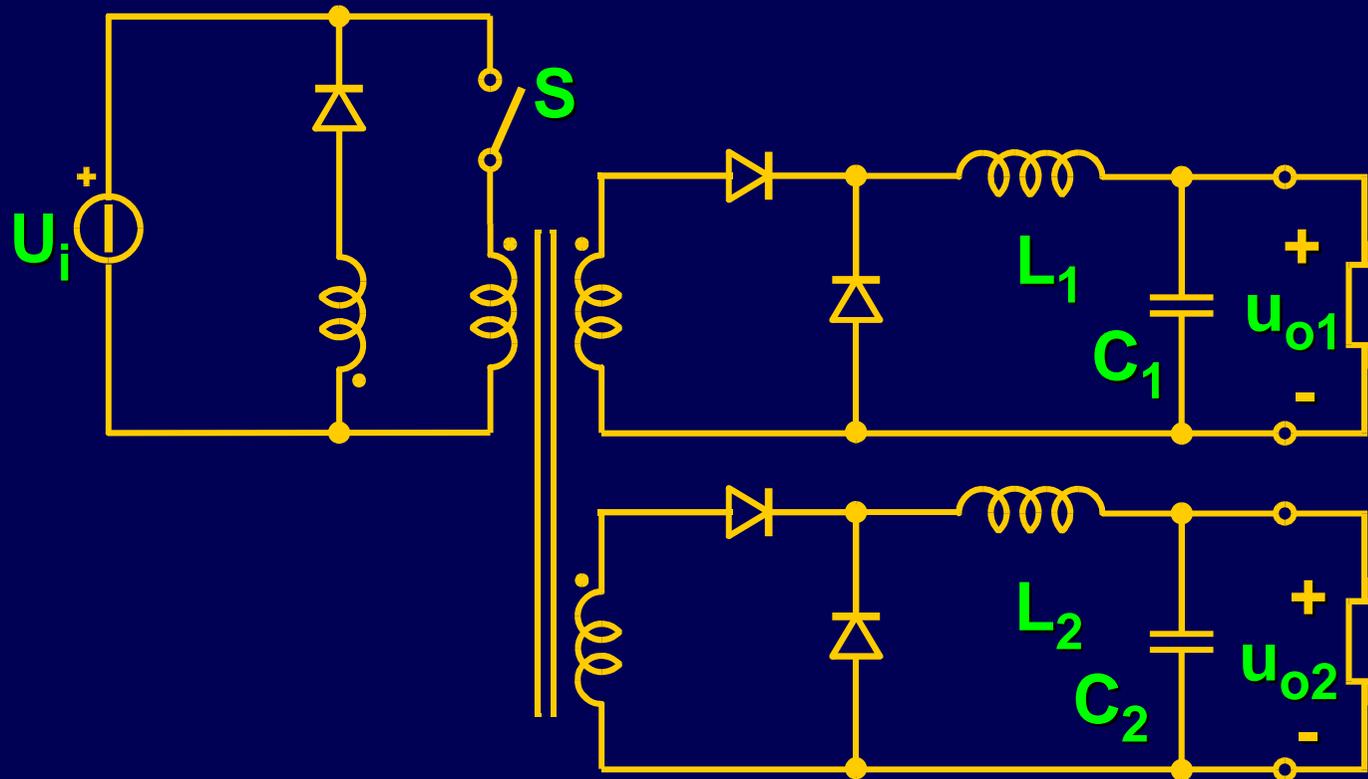


# Convertitore FORWARD multi-uscita



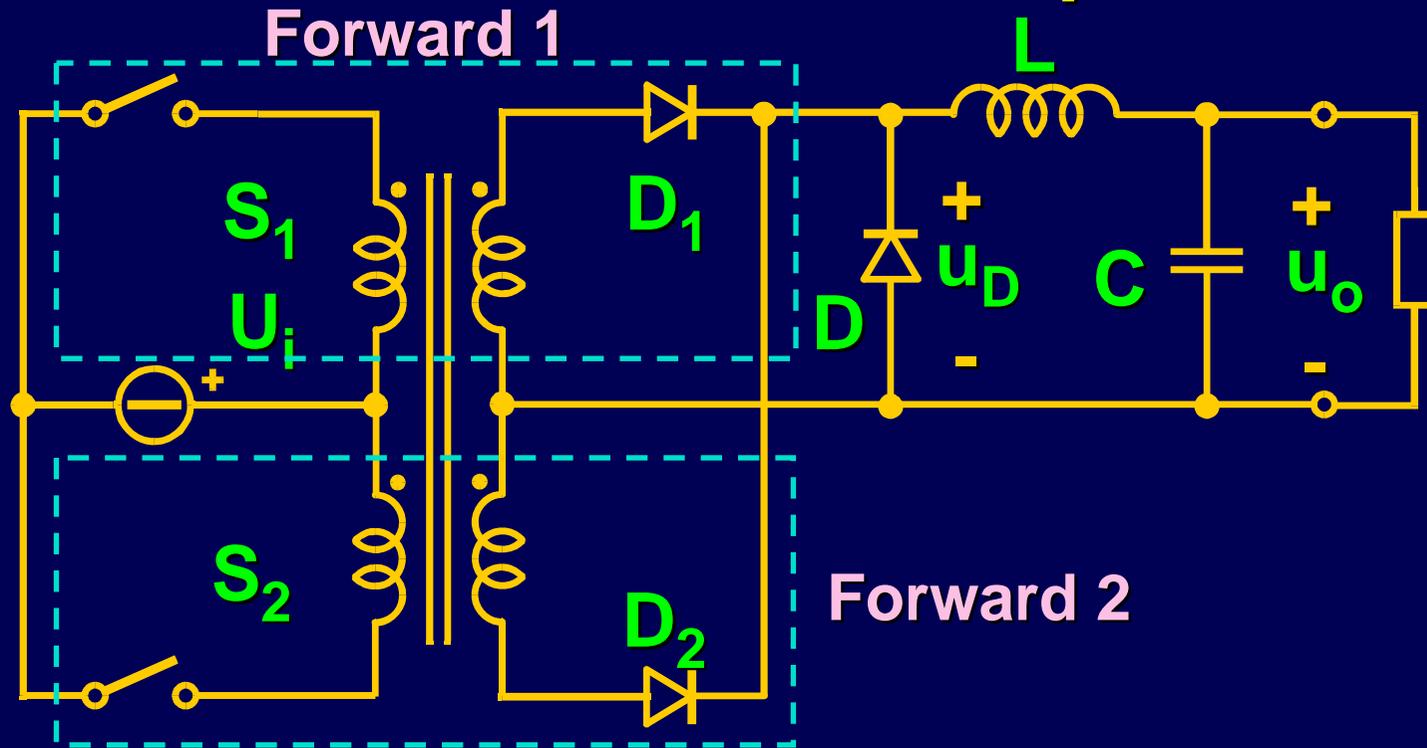
Le tensioni di uscita sono tra loro vincolate dai rapporti spire del trasformatore

# Convertitore FORWARD multi-uscita



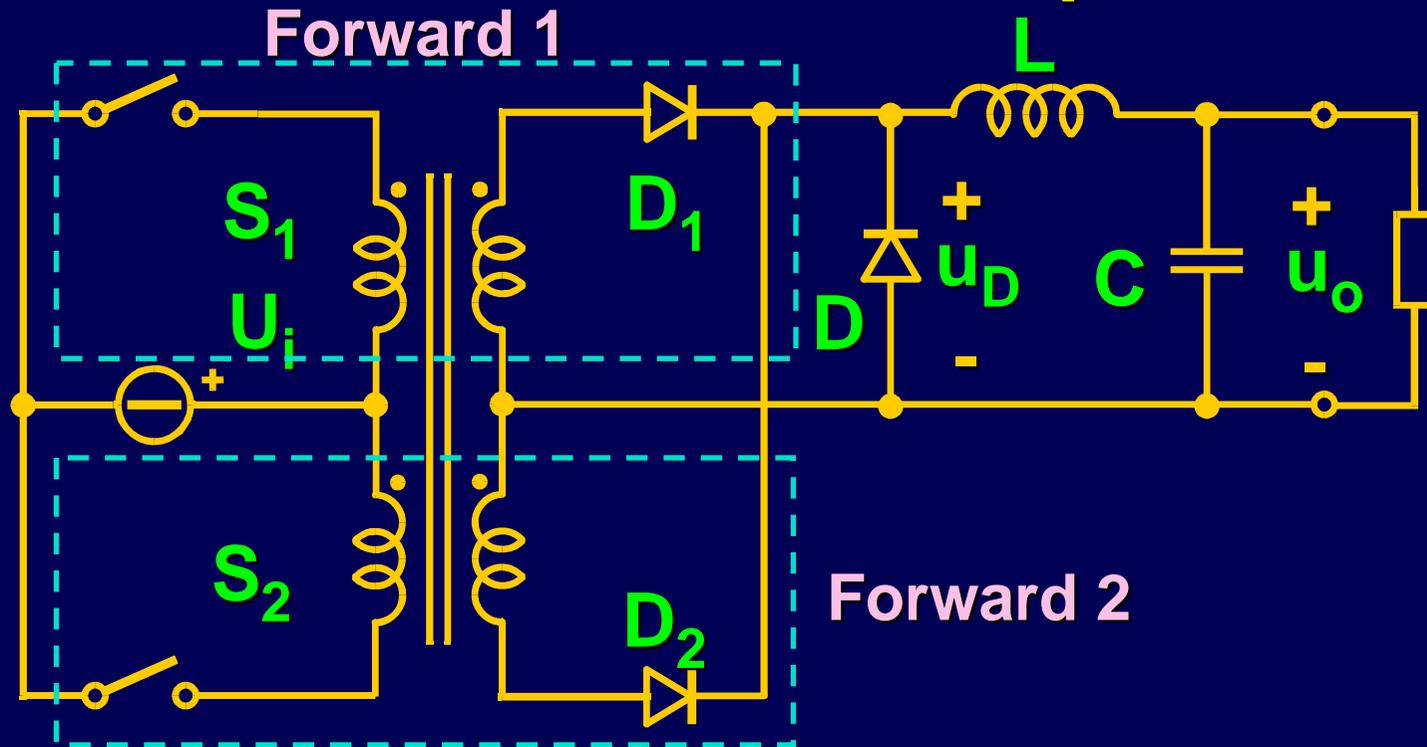
Le induttanze di filtro hanno c.d.t. resistive che dipendono dalle correnti di uscita. Ciò limita la precisione della regolazione.

# Convertitore Push-pull



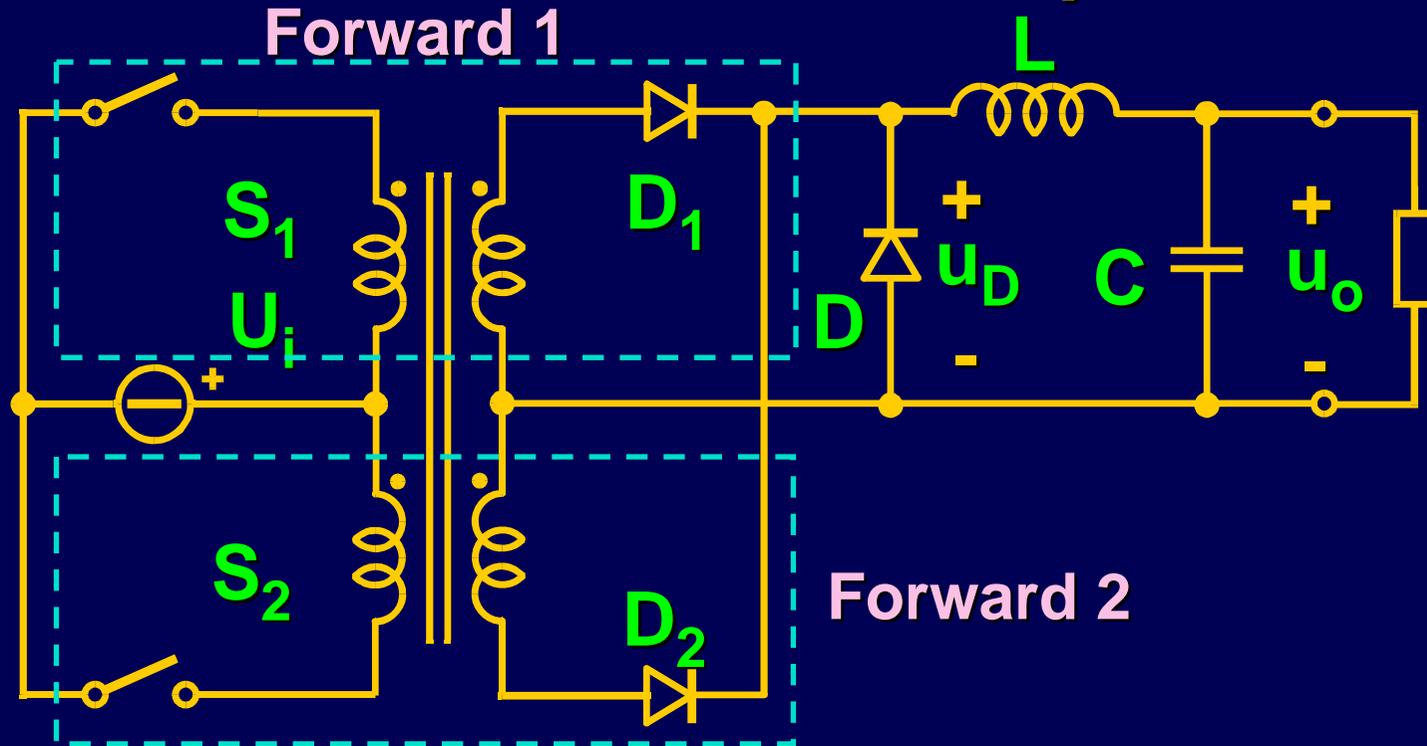
Il convertitore push-pull include due convertitori forward che funzionano a cicli alterni

# Convertitore Push-pull



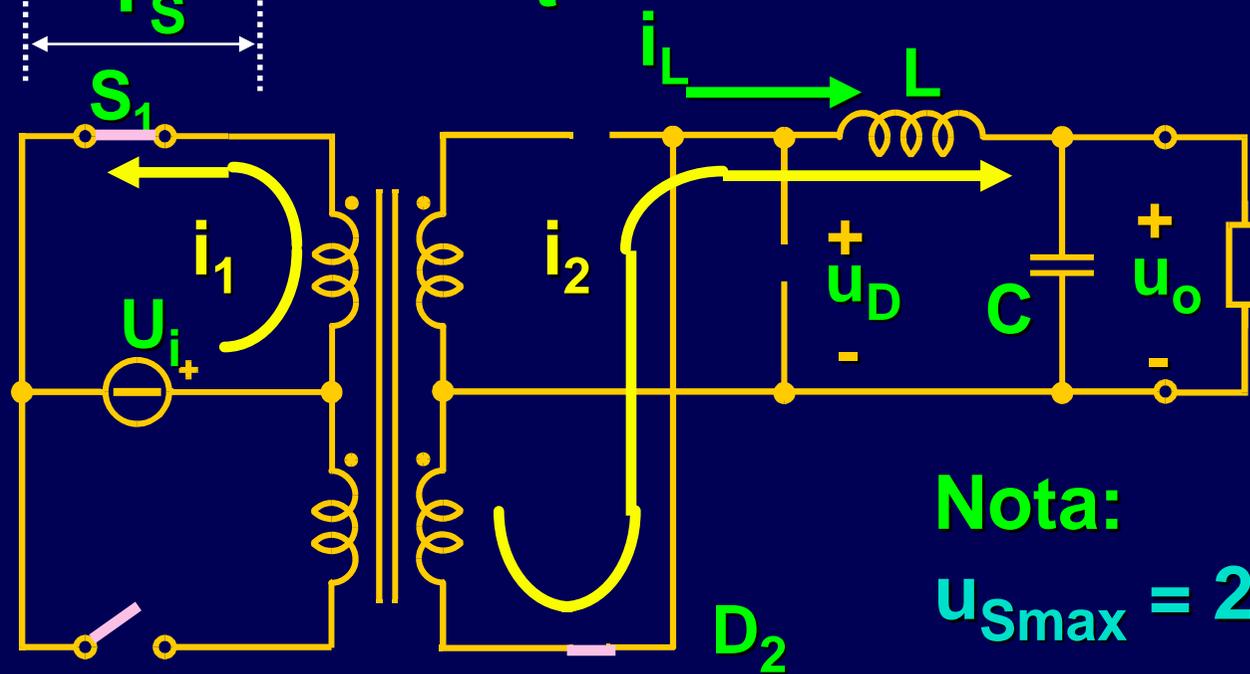
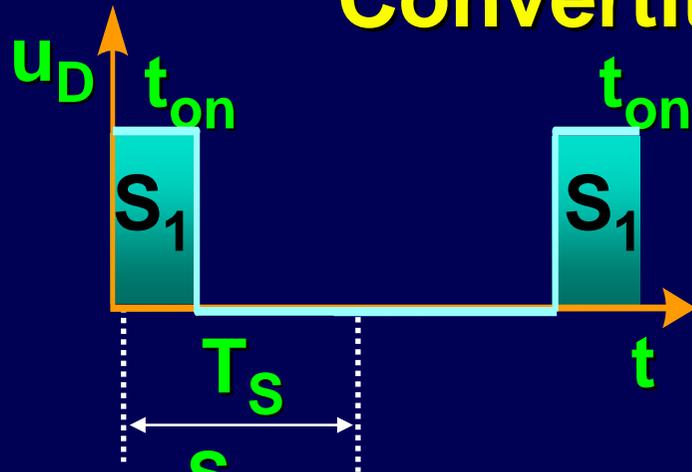
Gli avvolgimenti di ricircolo non sono necessari perchè i due convertitori hanno gli avvolgimenti accoppiati per flussi discordi

# Convertitore Push-pull



Ciascun avvolgimento primario funziona da circuito di ricircolo per l'altro primario

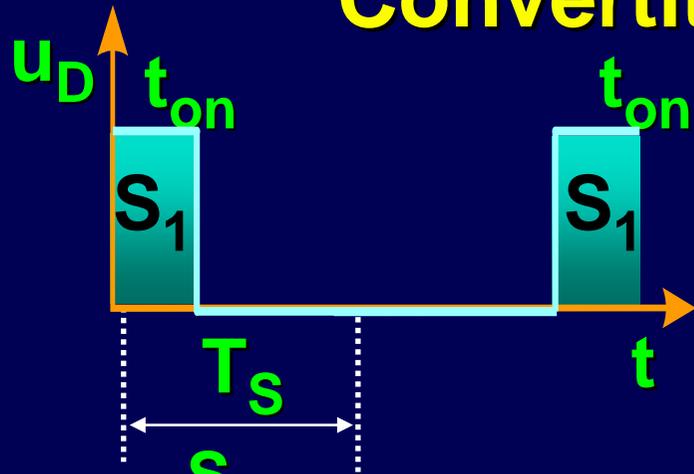
# Convertitore Push-pull



Nota:

$$u_{Smax} = 2U_i$$

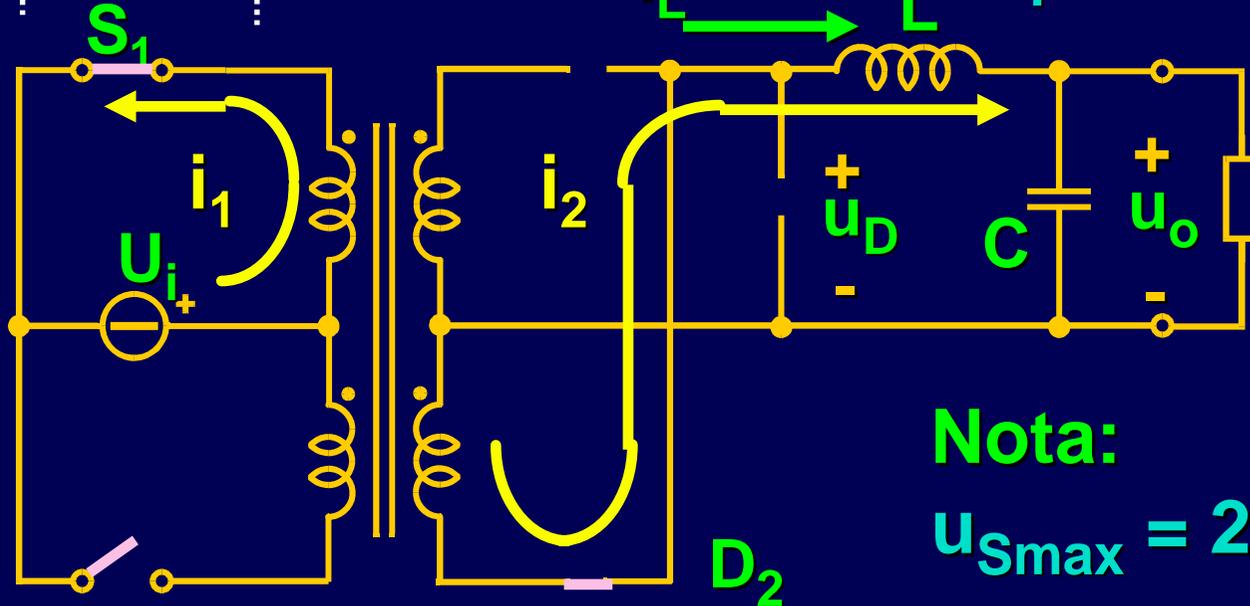
# Convertitore Push-pull



$$u_1 = -U_i$$

$$\Phi = \Phi(0) + \frac{1}{N_1} \int u_1 dt$$

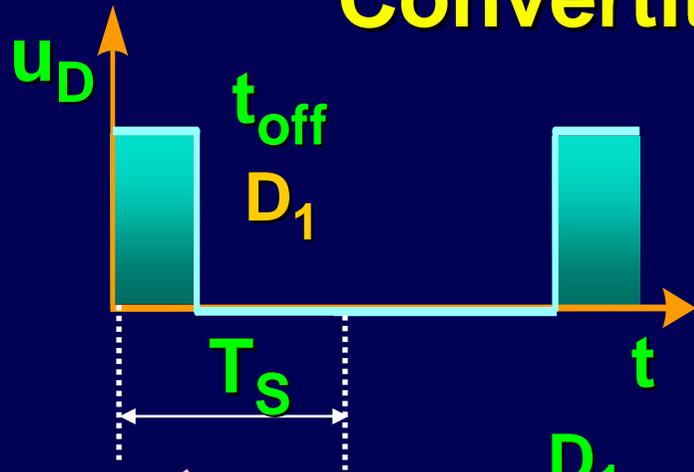
$$i_1 = i_L \cdot \frac{N_2}{N_1} + i_\mu$$



**Nota:**

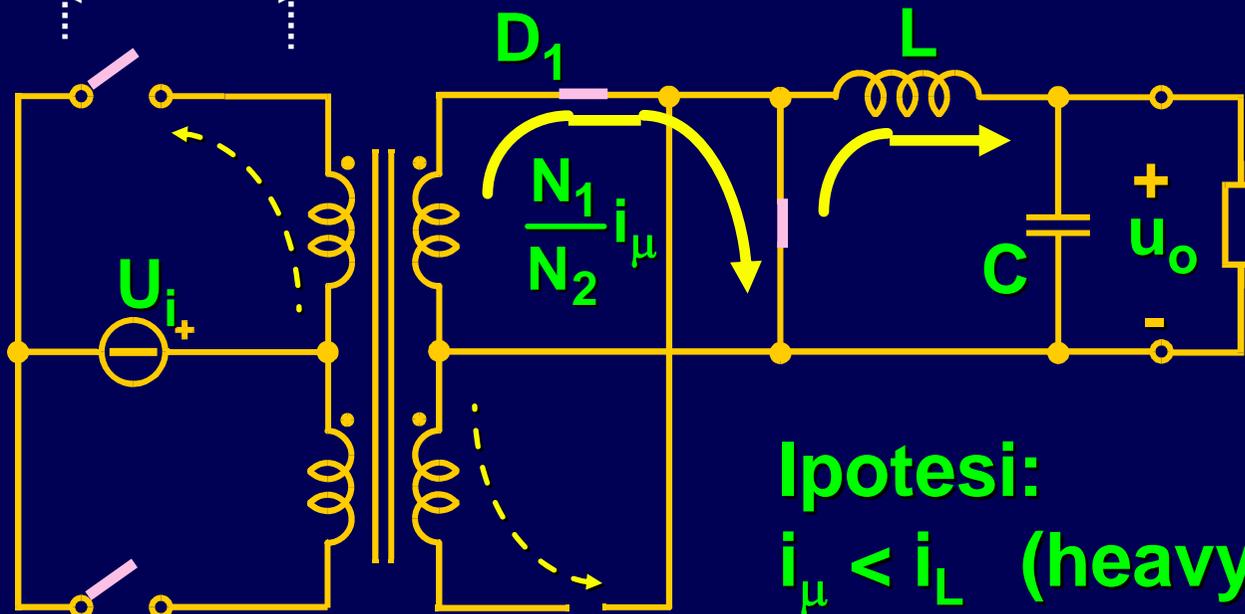
$$u_{Smax} = 2U_i$$

# Convertitore Push-pull



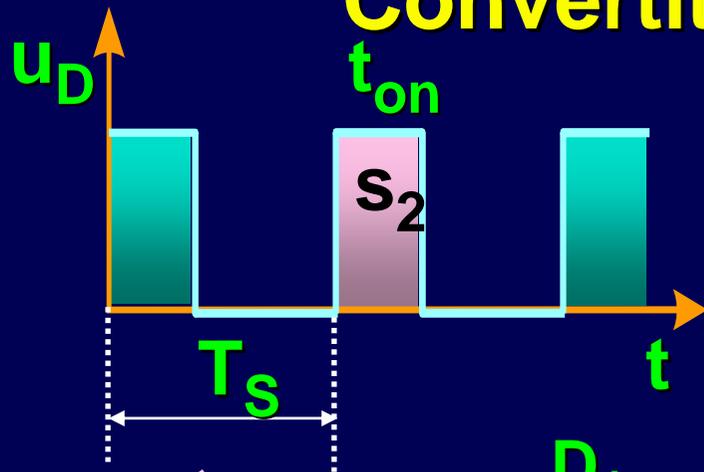
$$u_2 = 0 \quad \Phi = \text{cost}$$

$$i_1 = 0 \quad i_2 = \frac{N_1}{N_2} i_\mu$$



**Ipotesi:**  
 $i_\mu < i_L$  (heavy load)

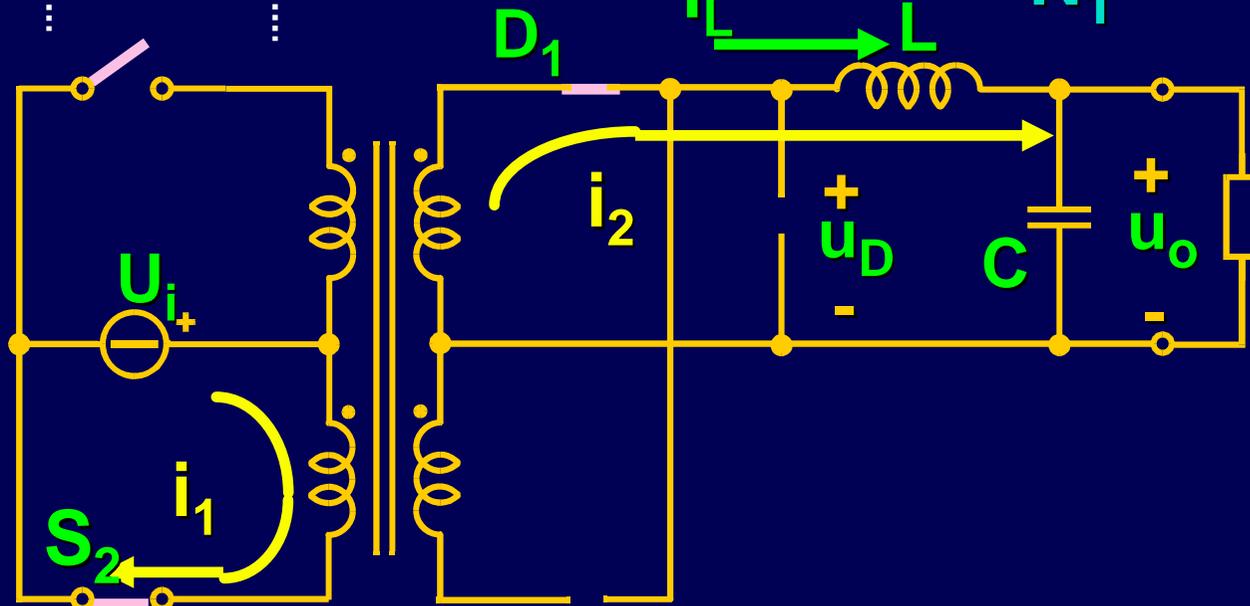
# Convertitore Push-pull



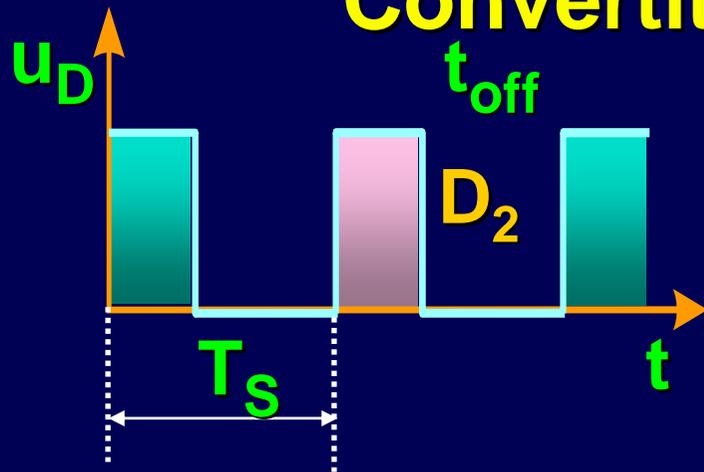
$$u_1 = U_i$$

$$\Phi = \Phi(0) + \frac{1}{N_1} \int u_1 dt$$

$$i_1 = i_L \cdot \frac{N_2}{N_1} + i_\mu$$

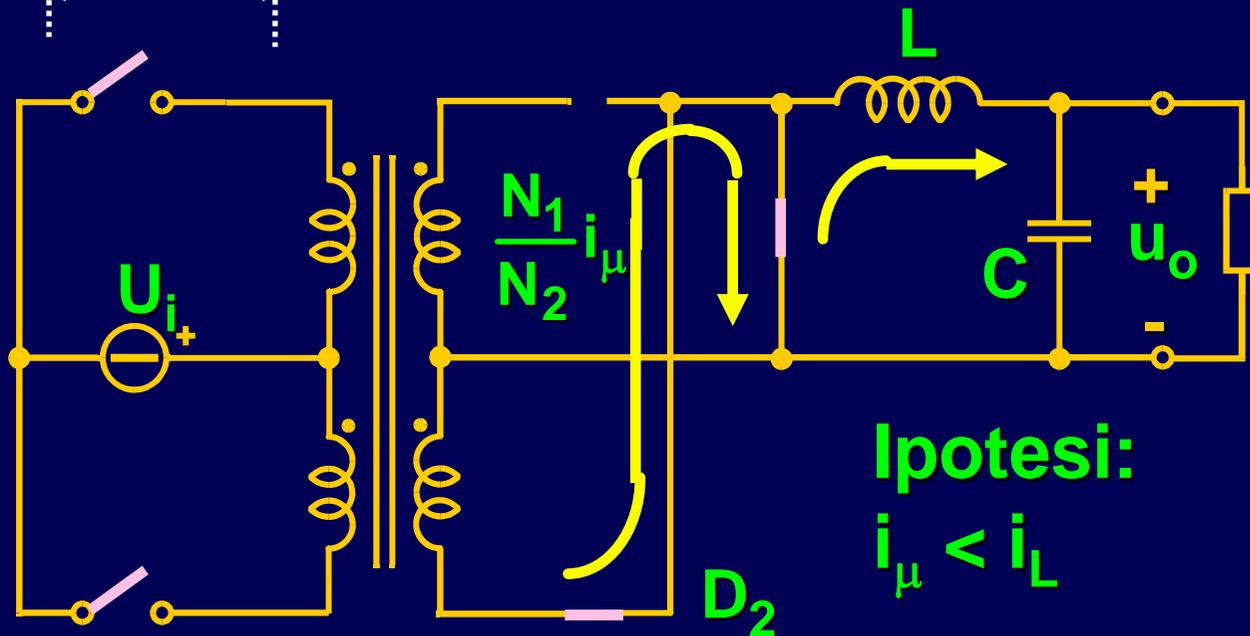


# Convertitore Push-pull



$$u_2 = 0 \quad \Phi = \text{cost}$$

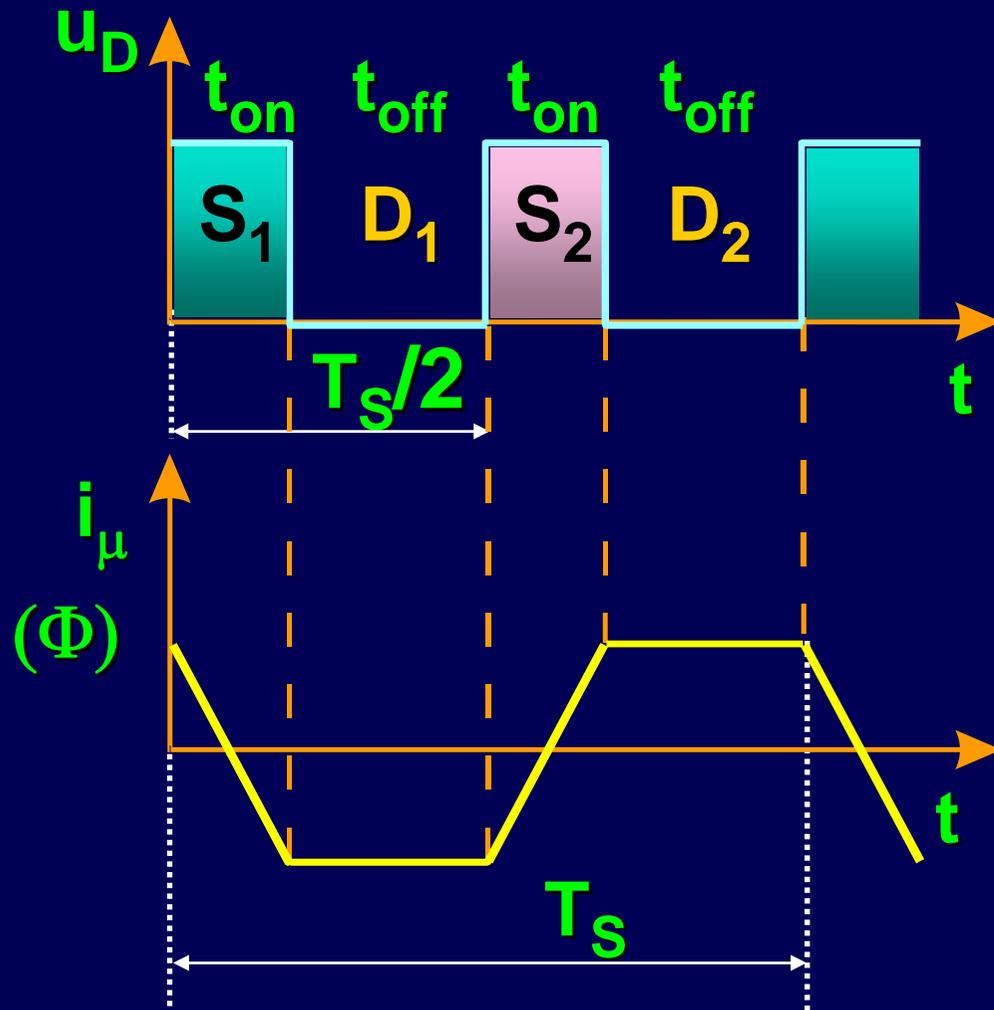
$$i_1 = 0 \quad i_L = \frac{N_1}{N_2} i_\mu$$



Ipotesi:

$$i_\mu < i_L$$

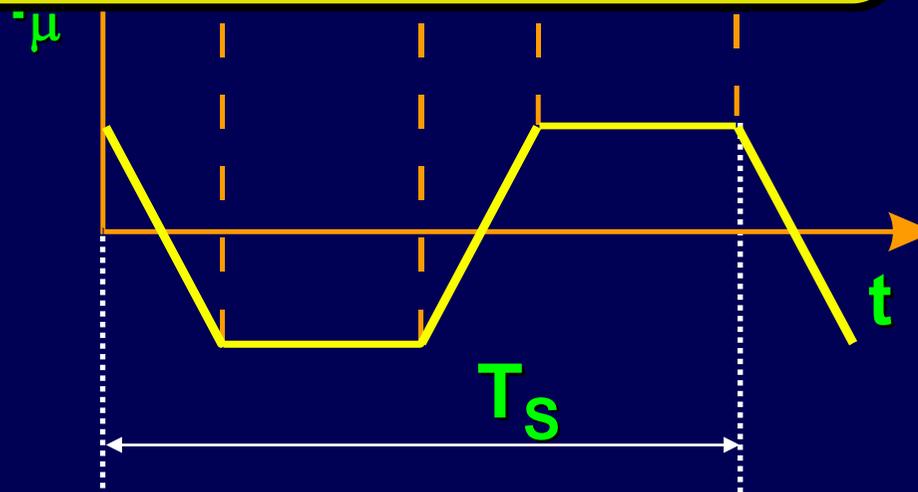
# Convertitore Push-pull



# Convertitore Push-pull



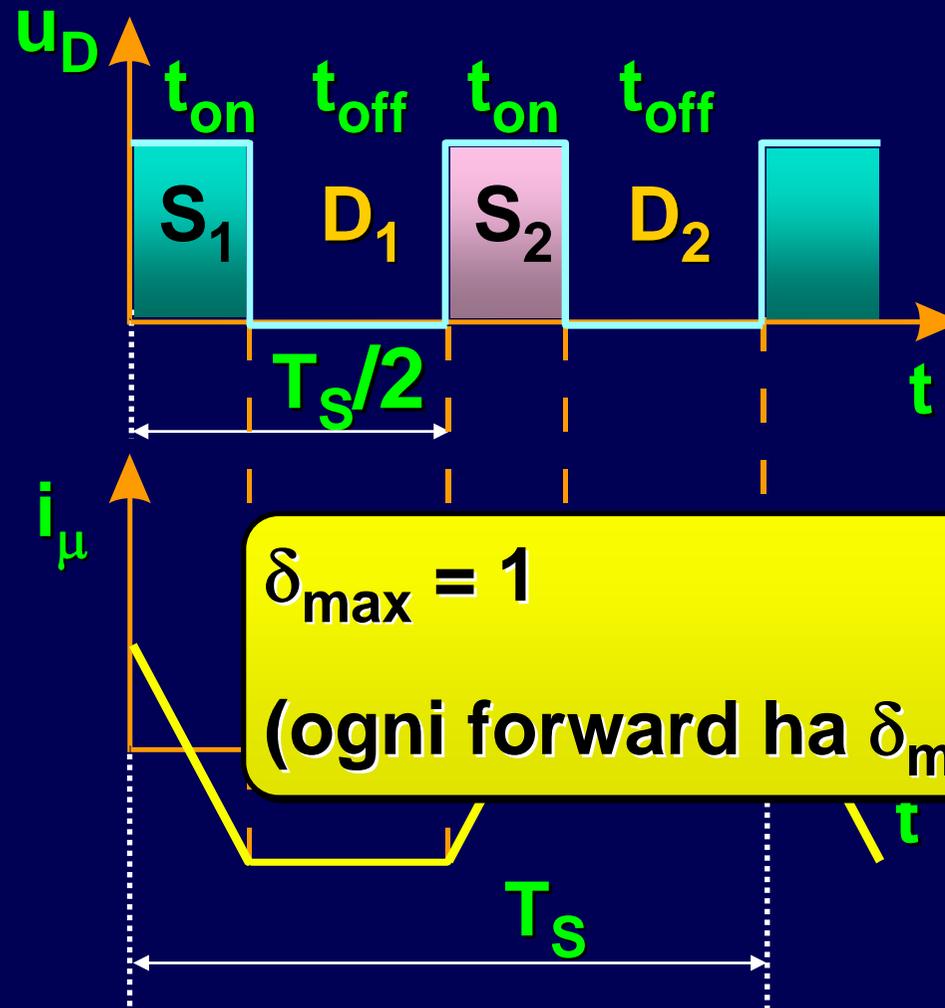
La frequenza di lavoro del trasformatore è pari alla frequenza di commutazione  $f_s$



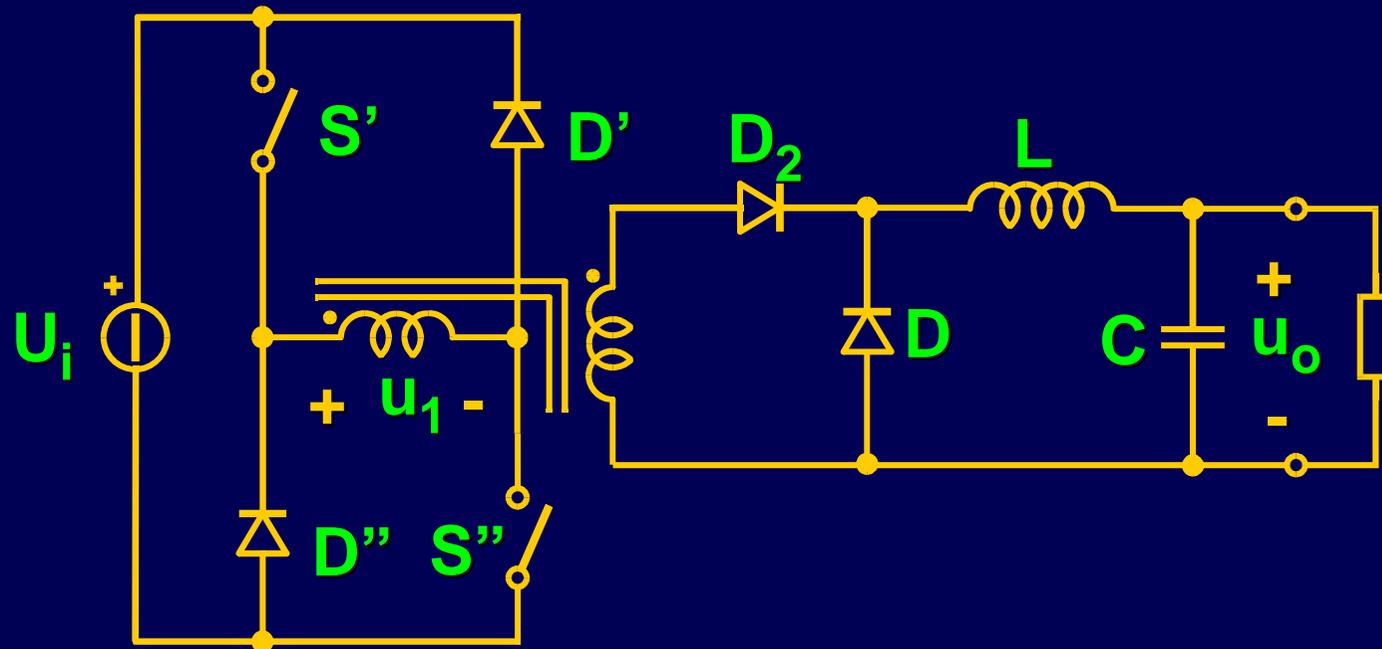
# Convertitore Push-pull



# Convertitore Push-pull



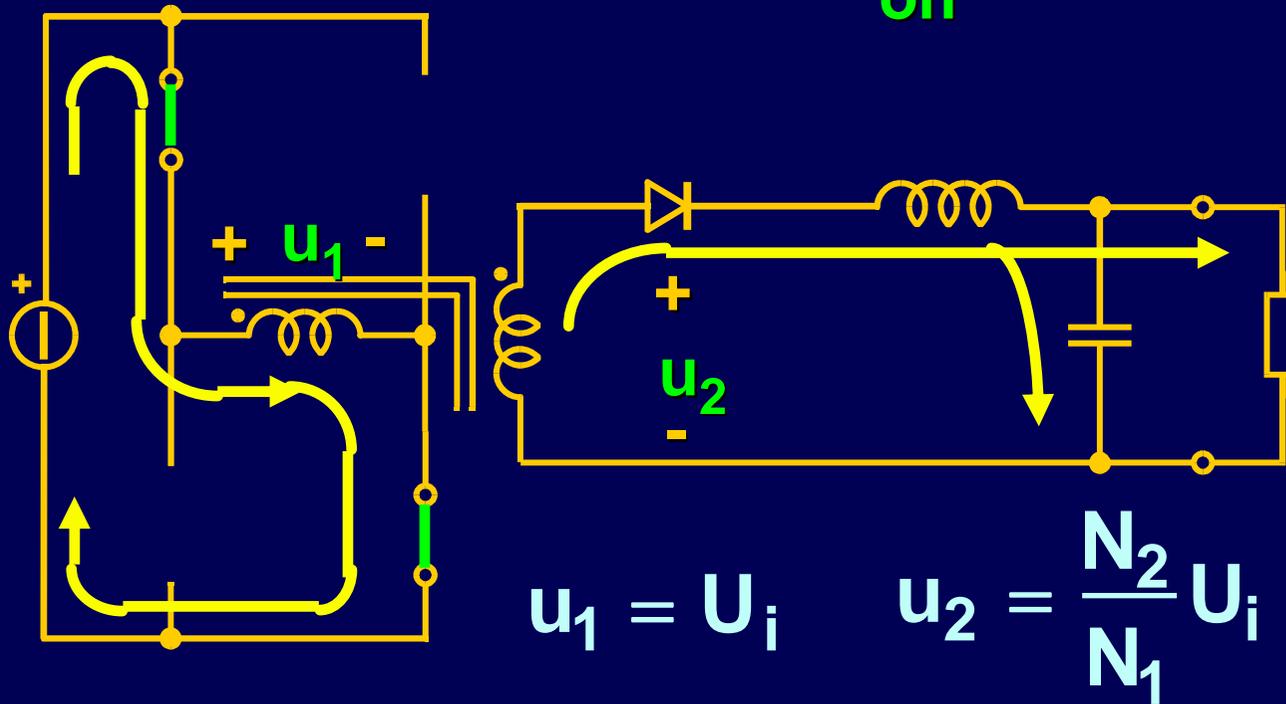
## Convertitore Dual Forward



- Dal lato secondario è come un Forward
- La via di ricircolo della corrente magnetizzante è data da  $D'$  e  $D''$

# Convertitore Dual Forward

Intervallo  $t_{on}$

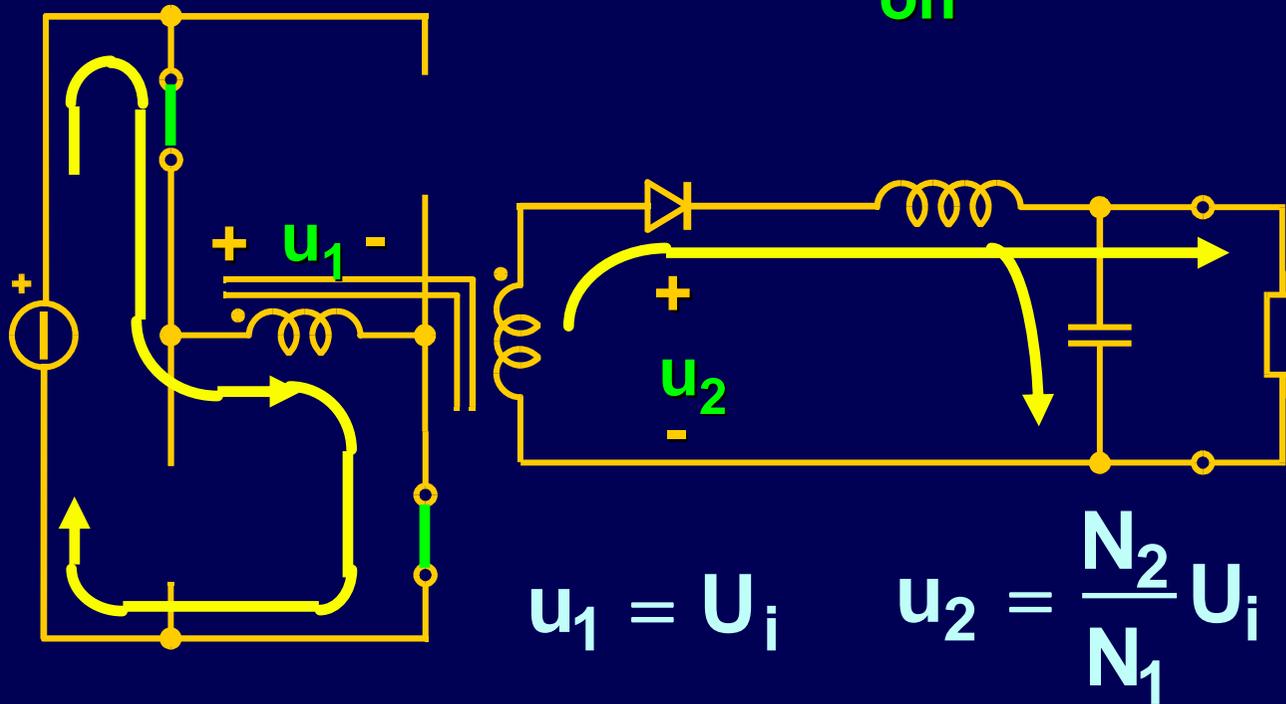


$S'$  e  $S''$  vengono operati assieme

$$u_{1on} = U_i$$

# Convertitore Dual Forward

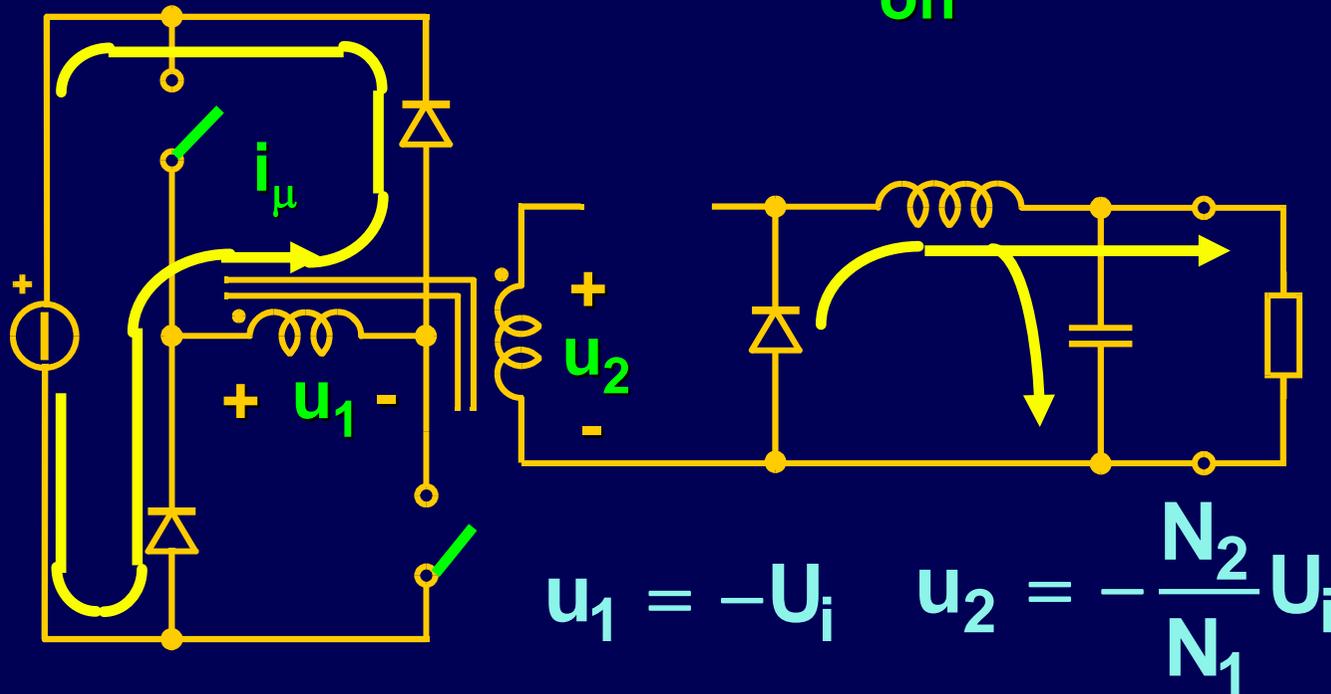
Intervallo  $t_{on}$



$S' = S'' = D_2 = \text{“on”}, D' = D'' = D = \text{“off”}$

# Convertitore Dual Forward

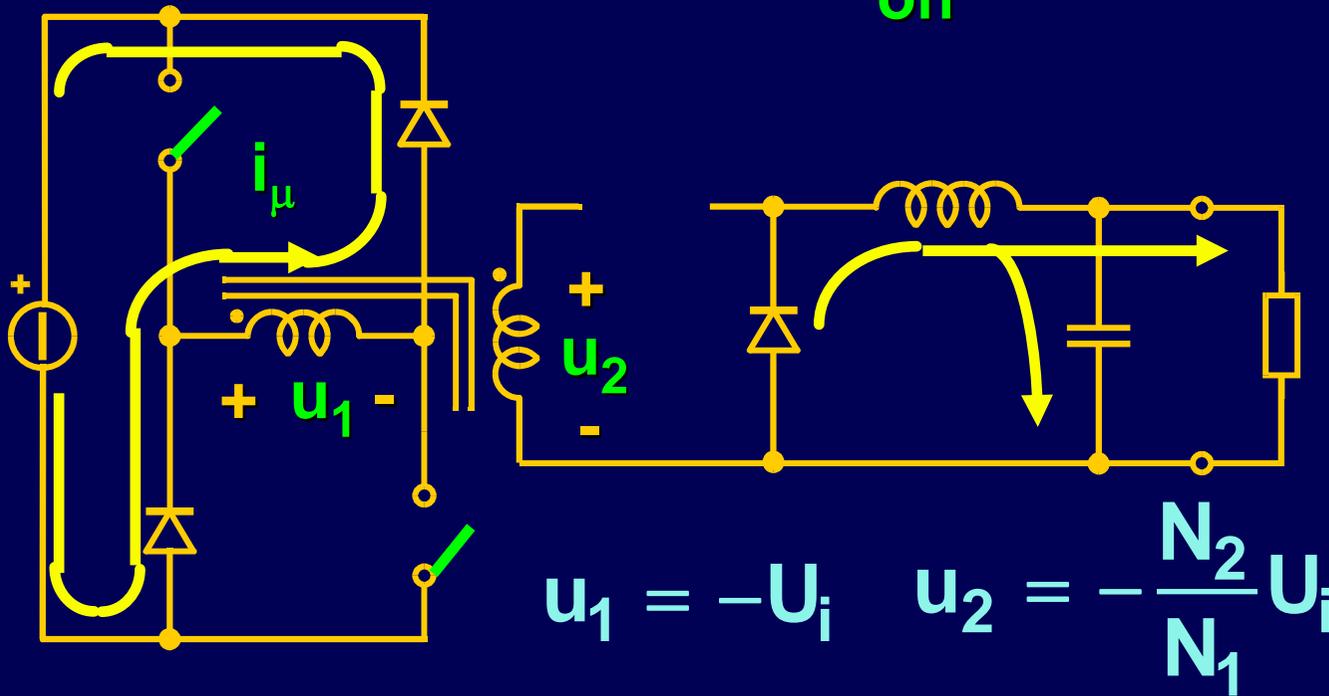
Intervallo  $t_{off}$



I diodi  $D'$  e  $D''$  svolgono la funzione di ricircolo  $\Rightarrow u_{1off} = -U_i$

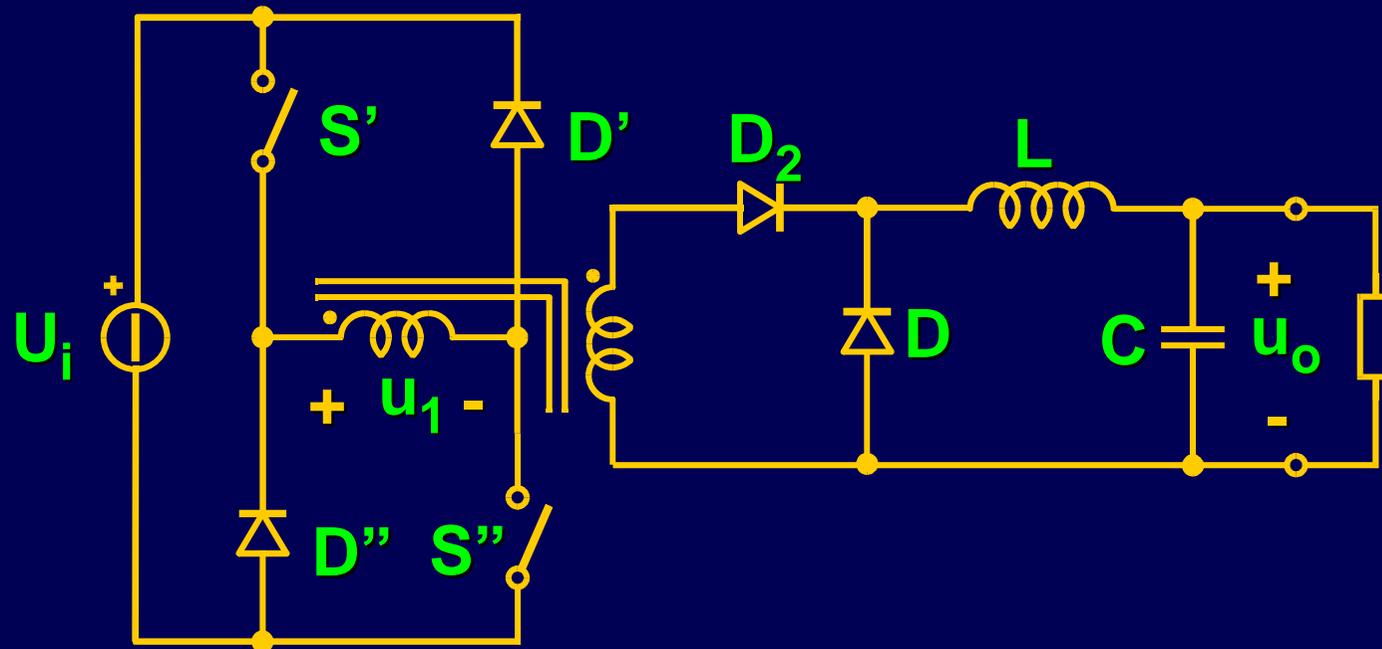
# Convertitore Dual Forward

Intervallo  $t_{off}$



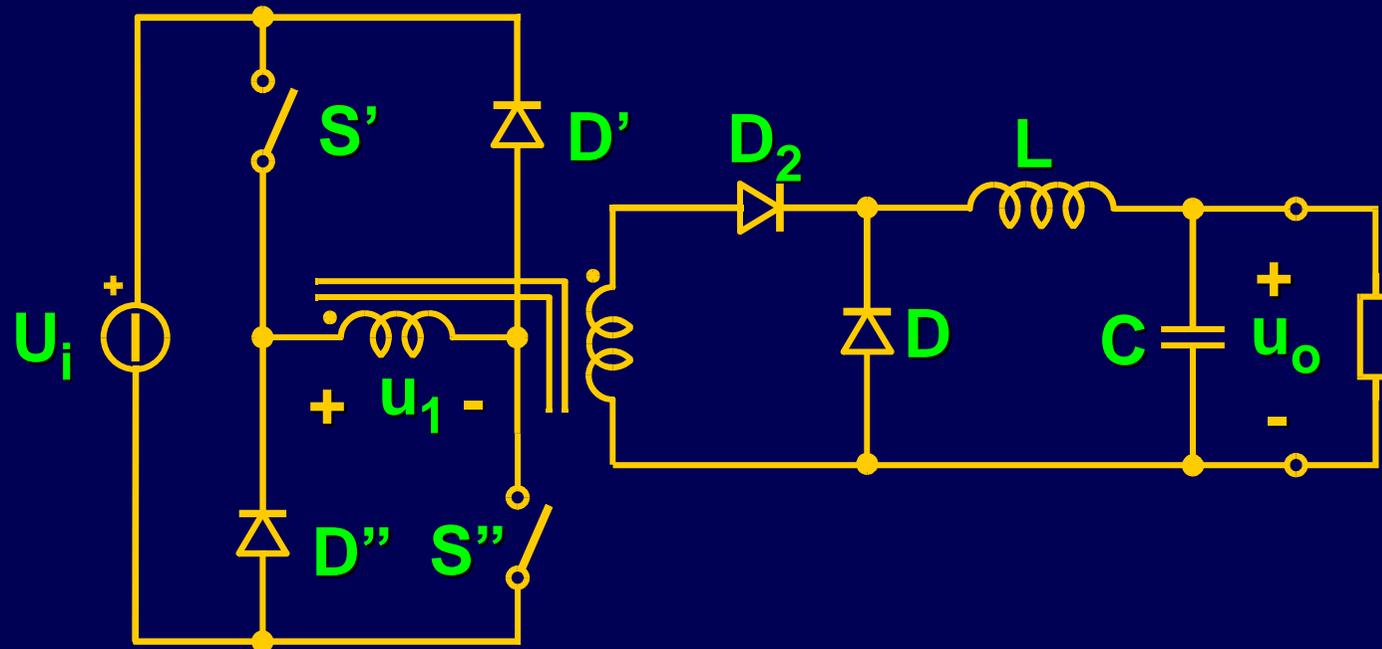
$S' = S'' = D_2 = \text{“off”}$ ,  $D' = D'' = D = \text{“on”}$

# Convertitore Dual Forward



Lato uscita funziona come un convertitore buck

# Convertitore Dual Forward



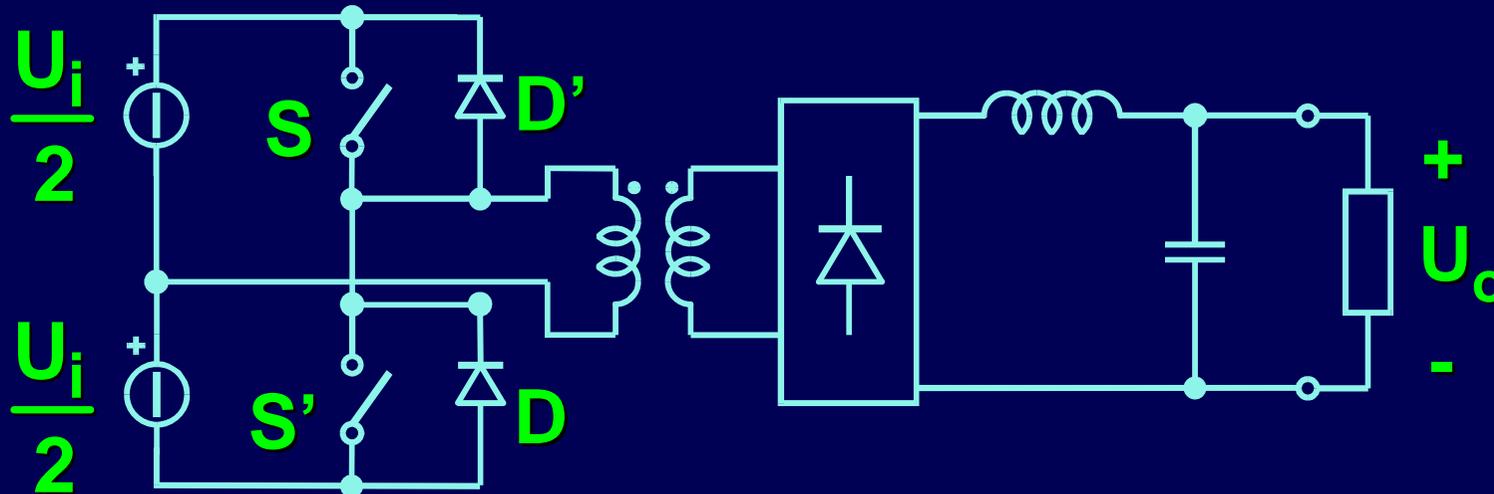
Lato uscita funziona come un convertitore buck

$$u_{1on} = U_i, u_{1off} = -U_i$$



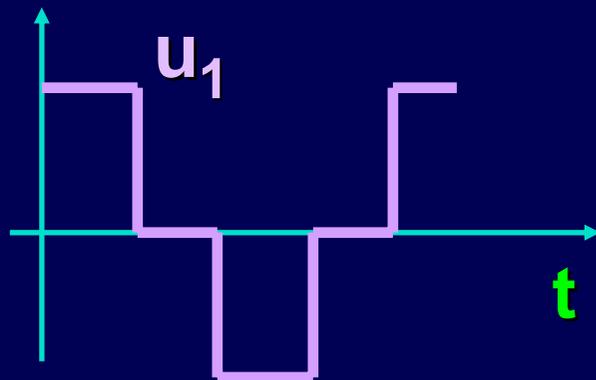
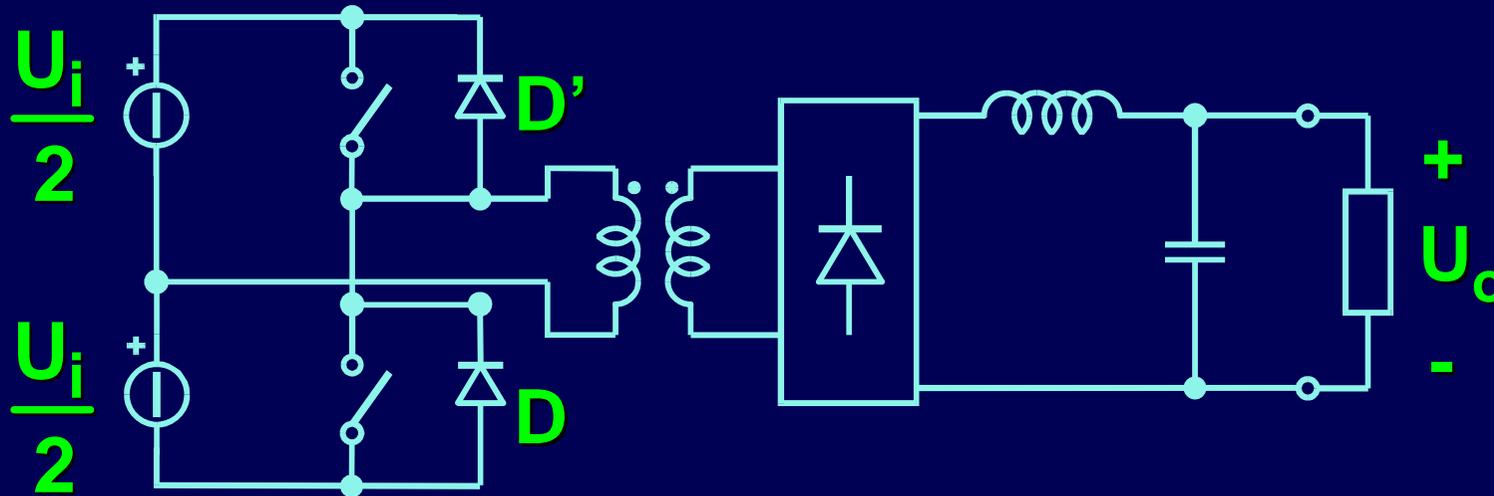
$$\delta \leq 0.5$$

## Convertitore cc/cc con isolamento: Half - bridge a trasformatore



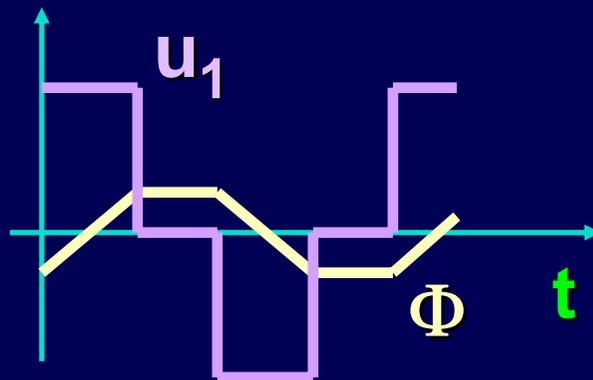
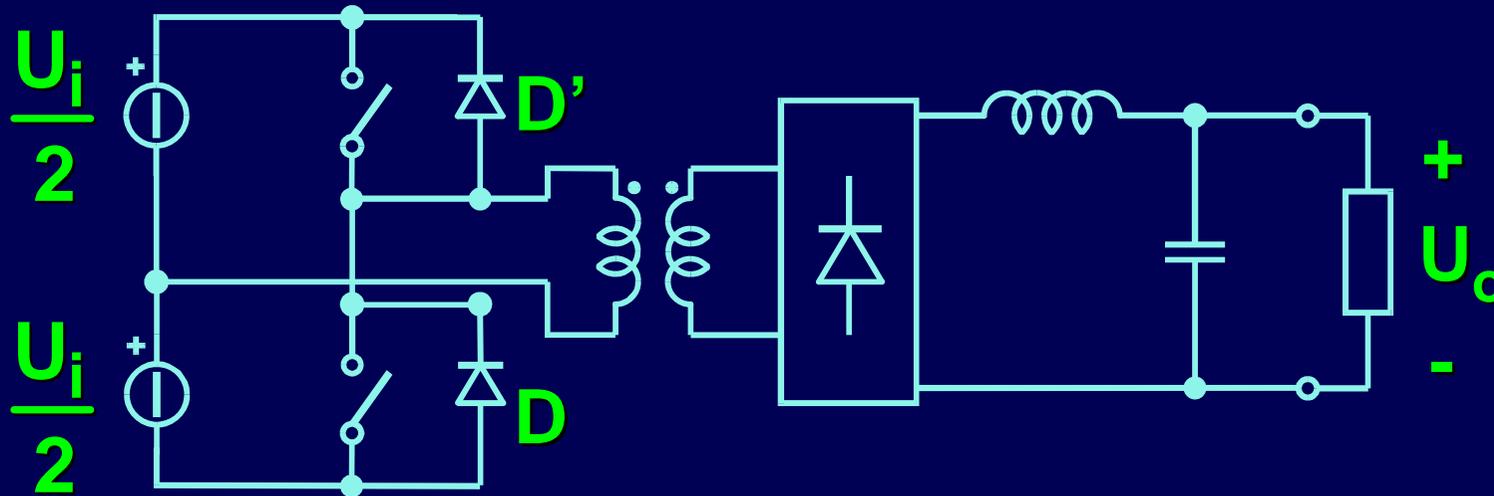
Il funzionamento é lo stesso del convertitore push-pull ( $S$  e  $S'$  funzionano a cicli alterni)

## Convertitore cc/cc con isolamento: Half - bridge a trasformatore



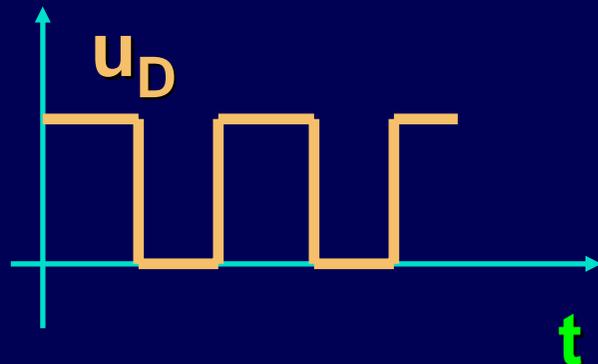
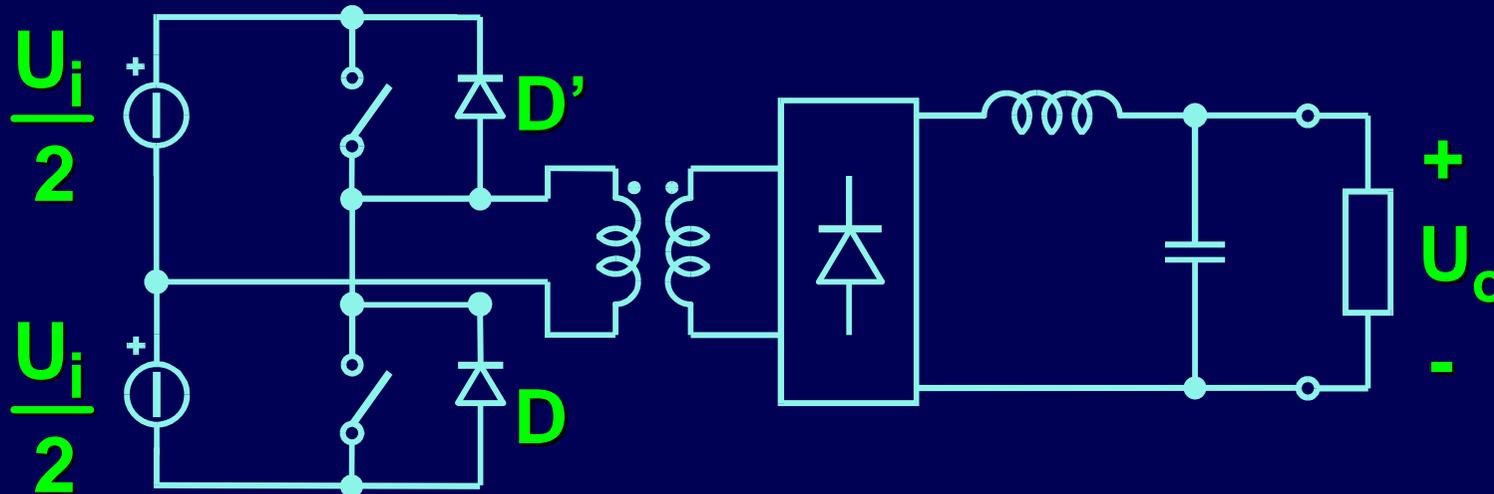
Tensione al primario

## Convertitore cc/cc con isolamento: Half - bridge a trasformatore



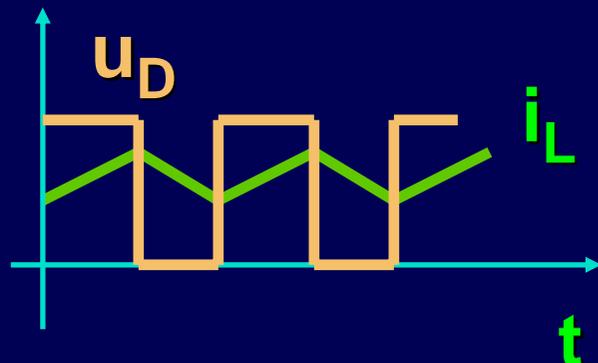
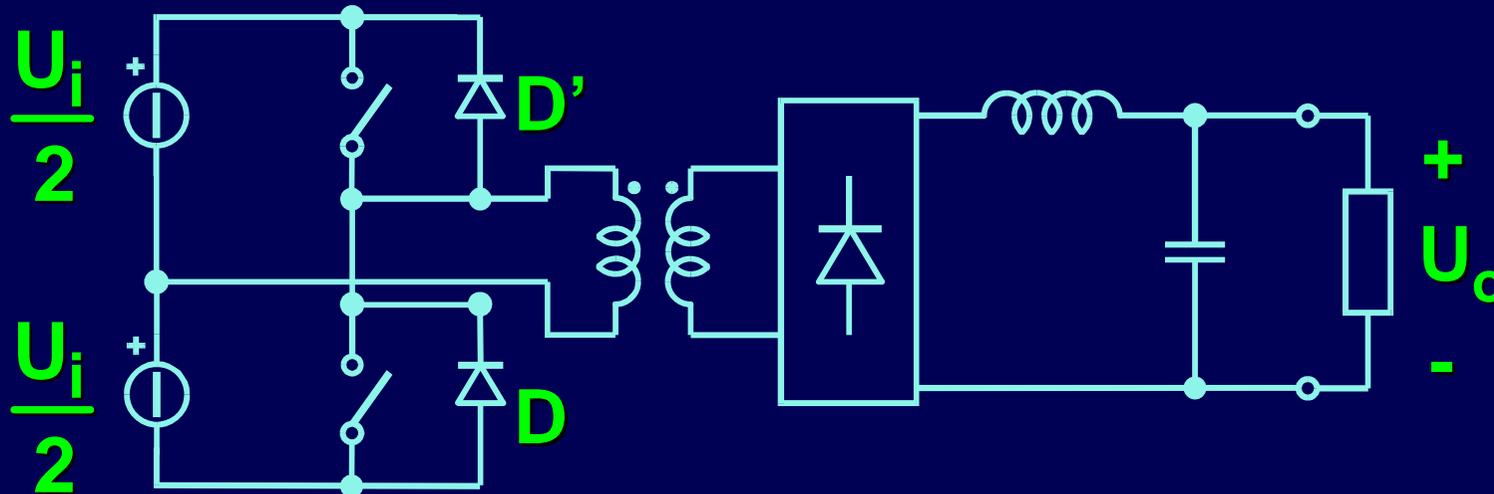
Tensione al primario  
Flusso nel trasformatore

## Convertitore cc/cc con isolamento: Half - bridge a trasformatore



Tensione di uscita del  
ponte raddrizzatore

## Convertitore cc/cc con isolamento: Half - bridge a trasformatore



Tensione di uscita del  
ponte raddrizzatore  
Corrente nell'induttanza  
di filtro

# Conclusioni

- Il funzionamento dei convertitori abbassatori di tensione isolati è fortemente influenzato dai parametri parassiti del trasformatore ( $L_{\mu}$ )
- Per dare vie di richiusura alla corrente magnetizzante occorre complicare il circuito, introducendo rami di ricircolo o interruttori aggiuntivi
- In ogni caso il fattore di utilizzazione del convertitore ( $P_o/P_s$ ) cala di almeno 4 volte