

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**

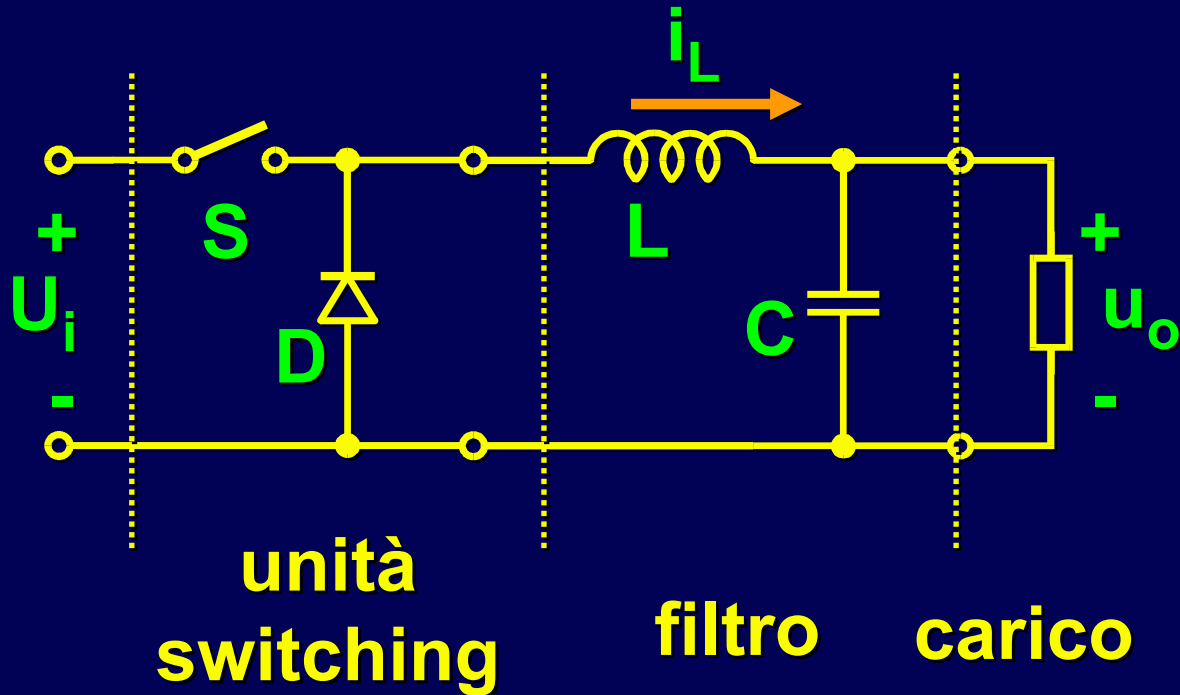
Convertitore Buck con isolamento

Condizioni per l'inserimento di un trasformatore:

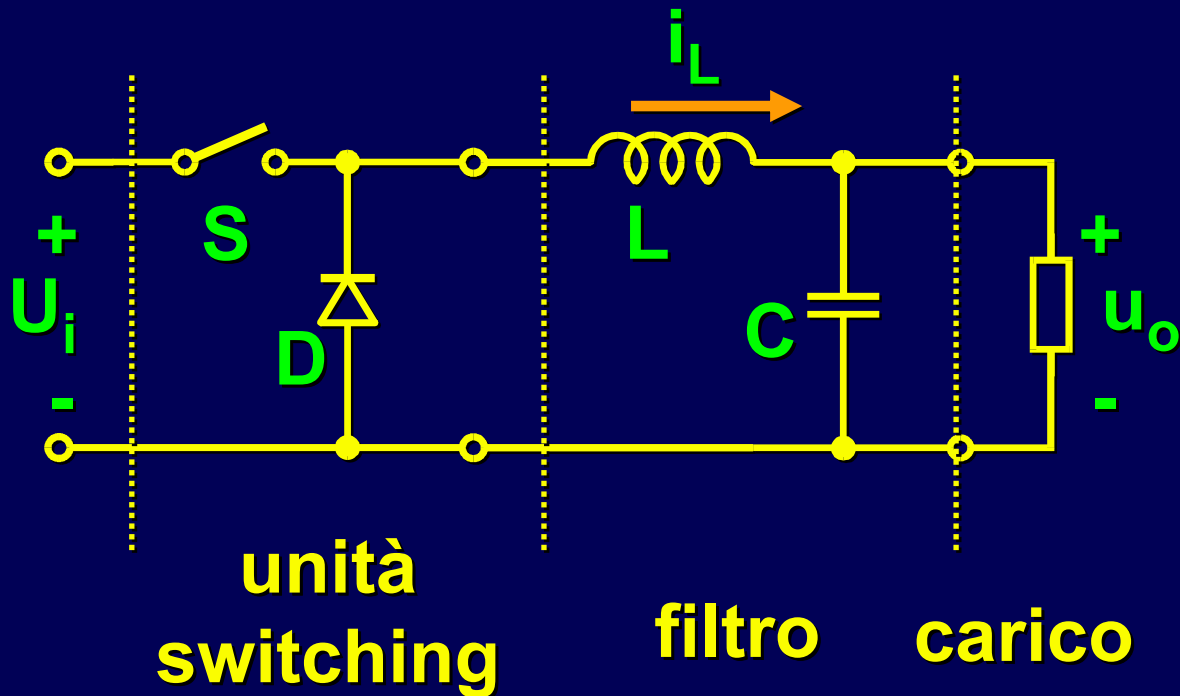
- dev'essere attraversato dall'intera potenza
- dev'essere alimentato da una tensione alternata

NOTA: il convertitore buck non soddisfa queste condizioni

Schema del convertitore Buck (Step-down)



Schema del convertitore Buck (Step-down)



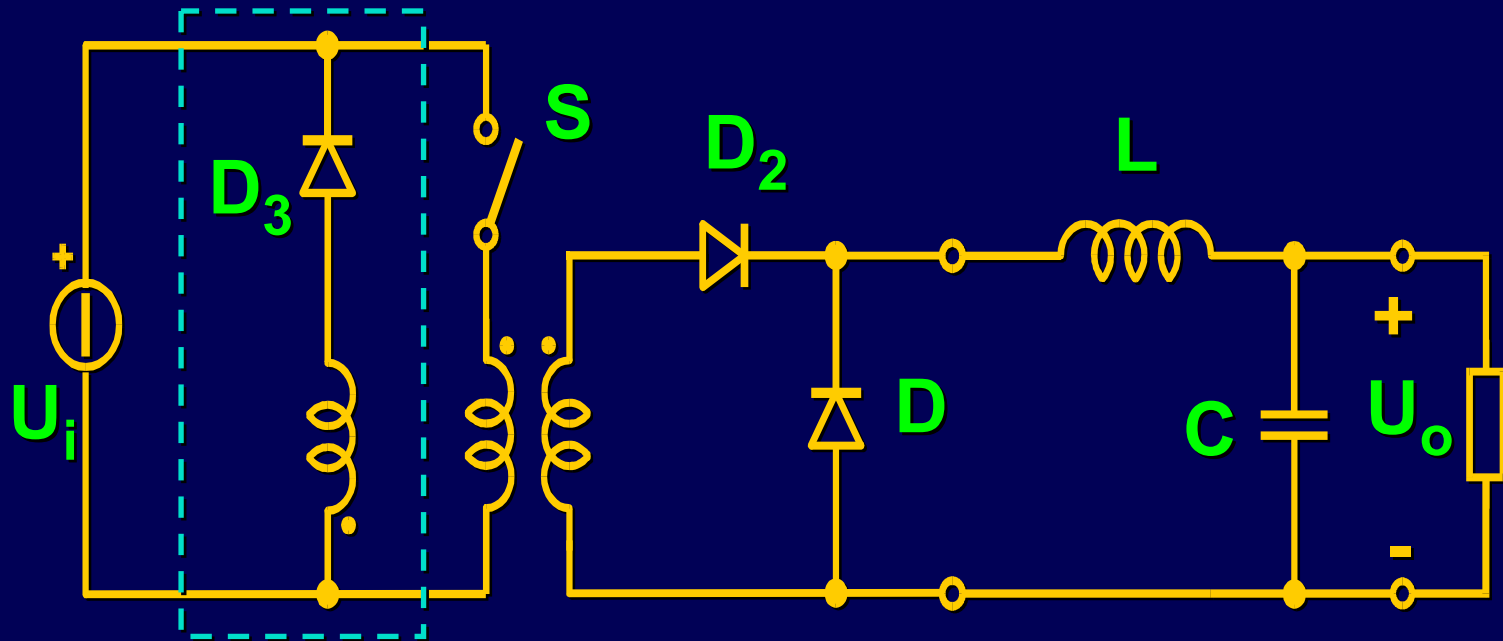
In nessuna sezione la tensione è puramente alternata

Convertitore buck a trasformatore

Convertitore FORWARD

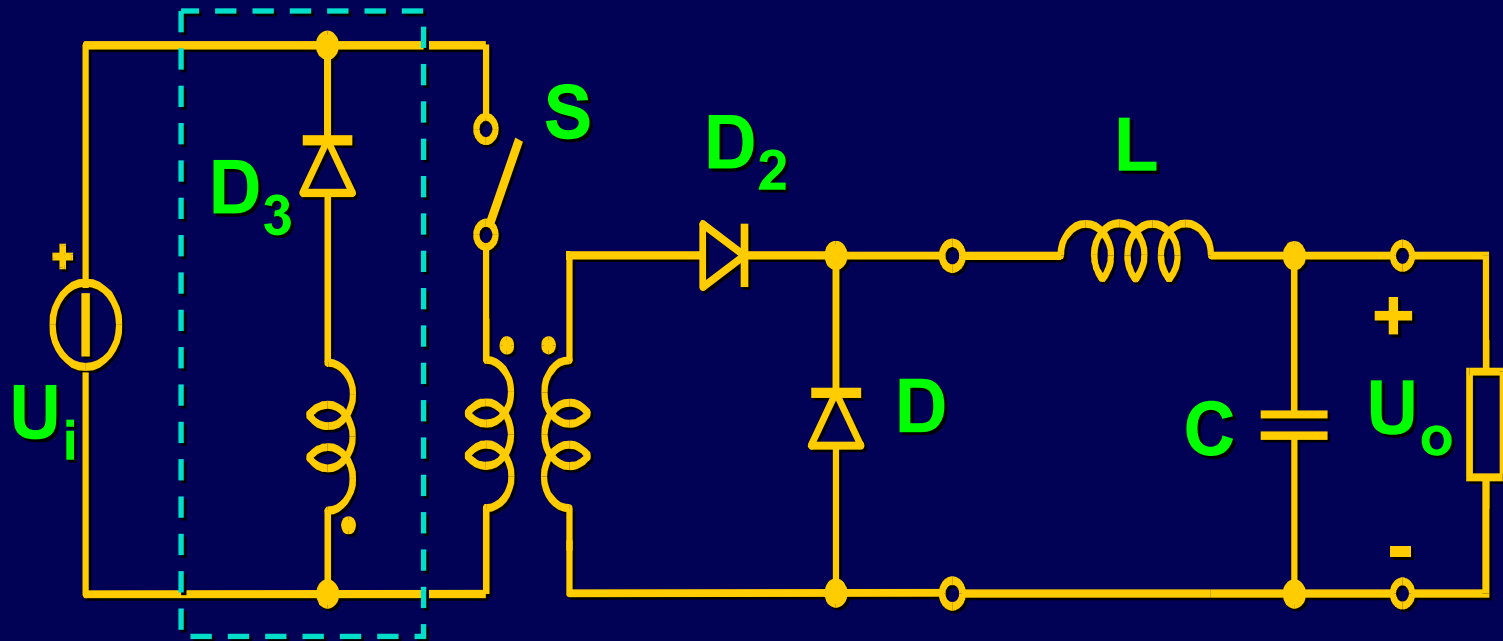
Convertitore buck a trasformatore

Convertitore FORWARD



Convertitore buck a trasformatore

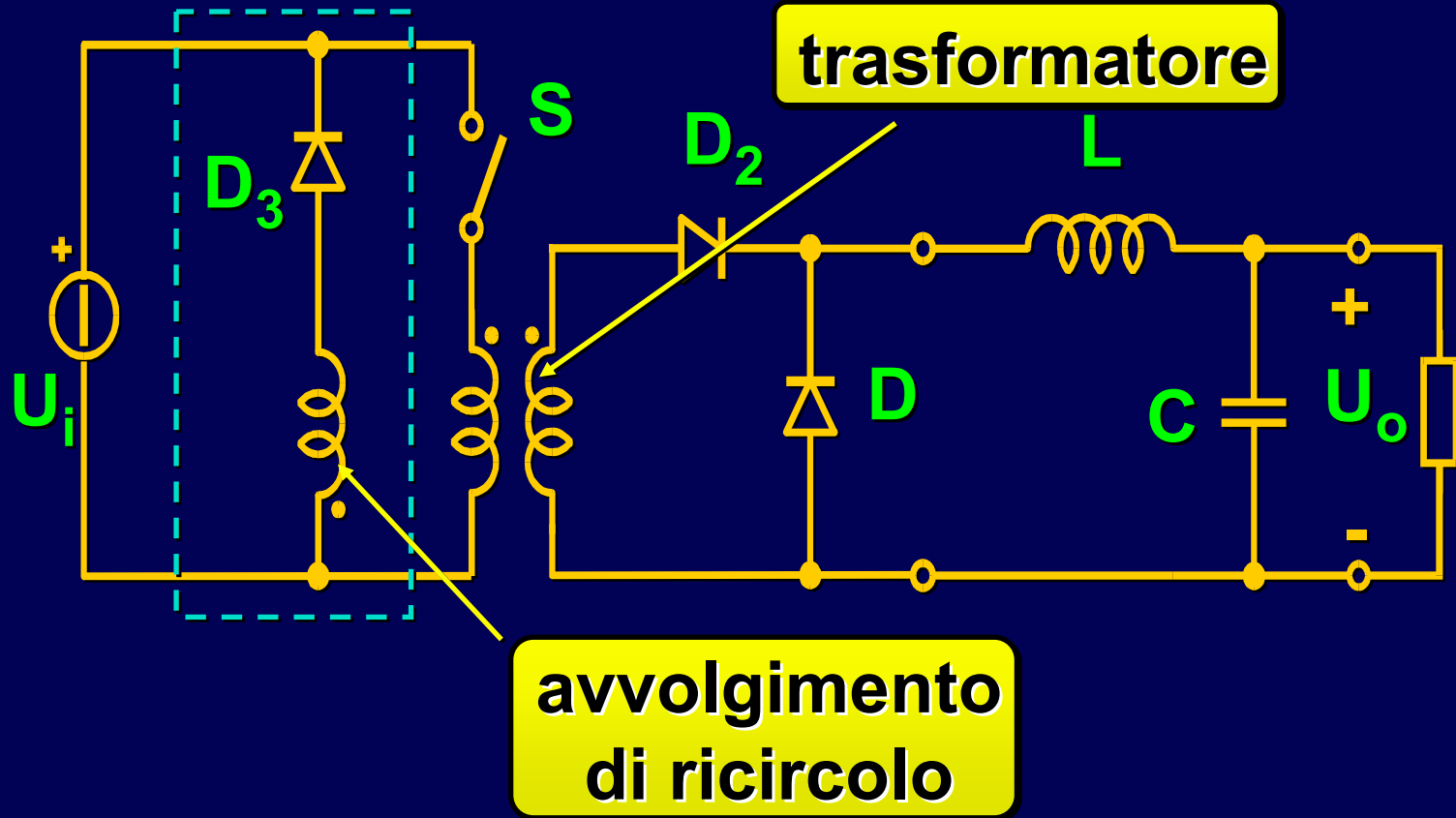
Convertitore FORWARD



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

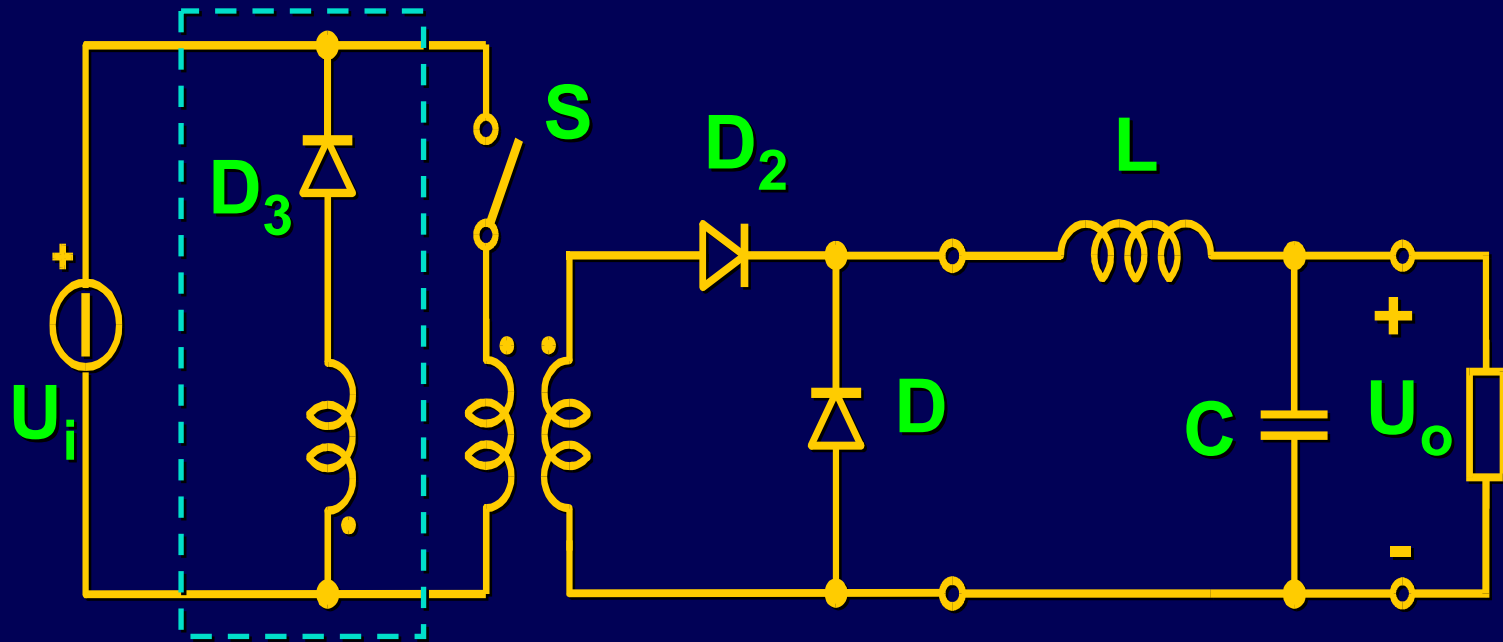
Convertitore buck a trasformatore

Convertitore FORWARD



Convertitore buck a trasformatore

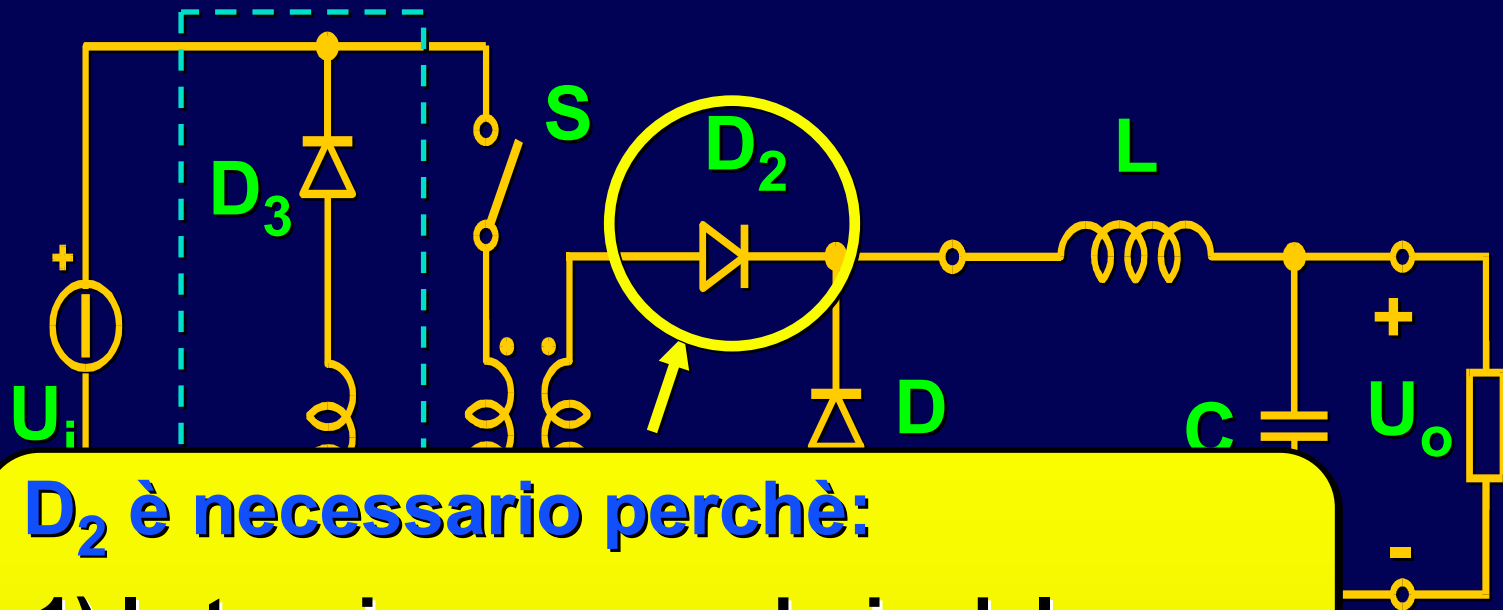
Convertitore FORWARD



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

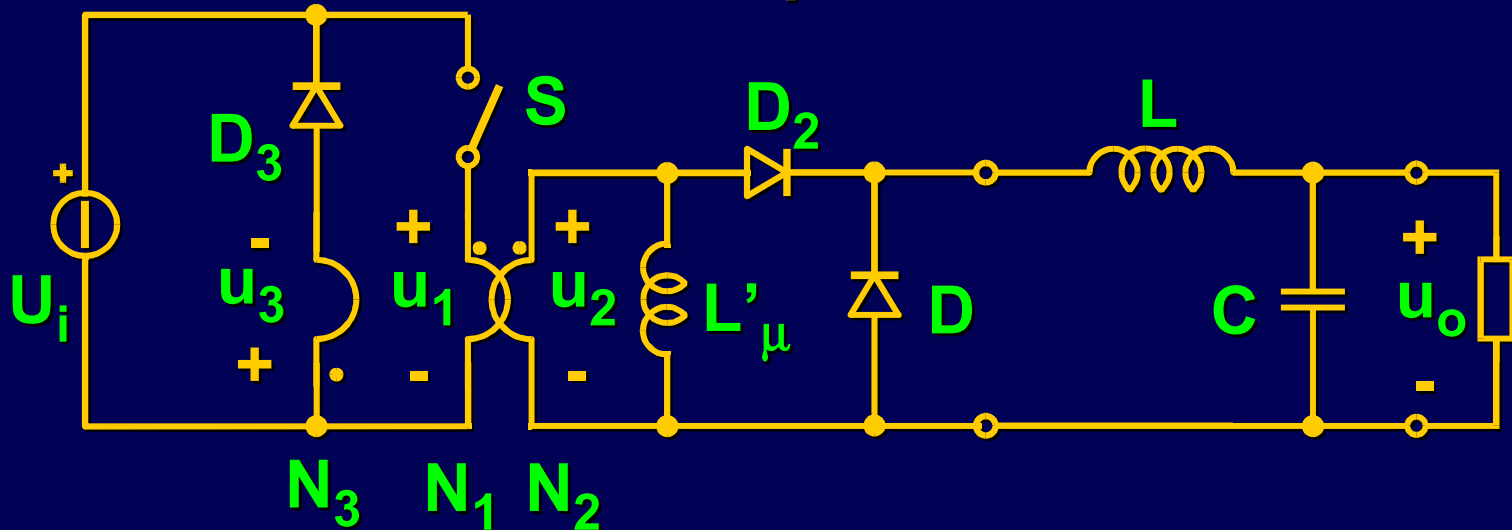


D_2 è necessario perchè:

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

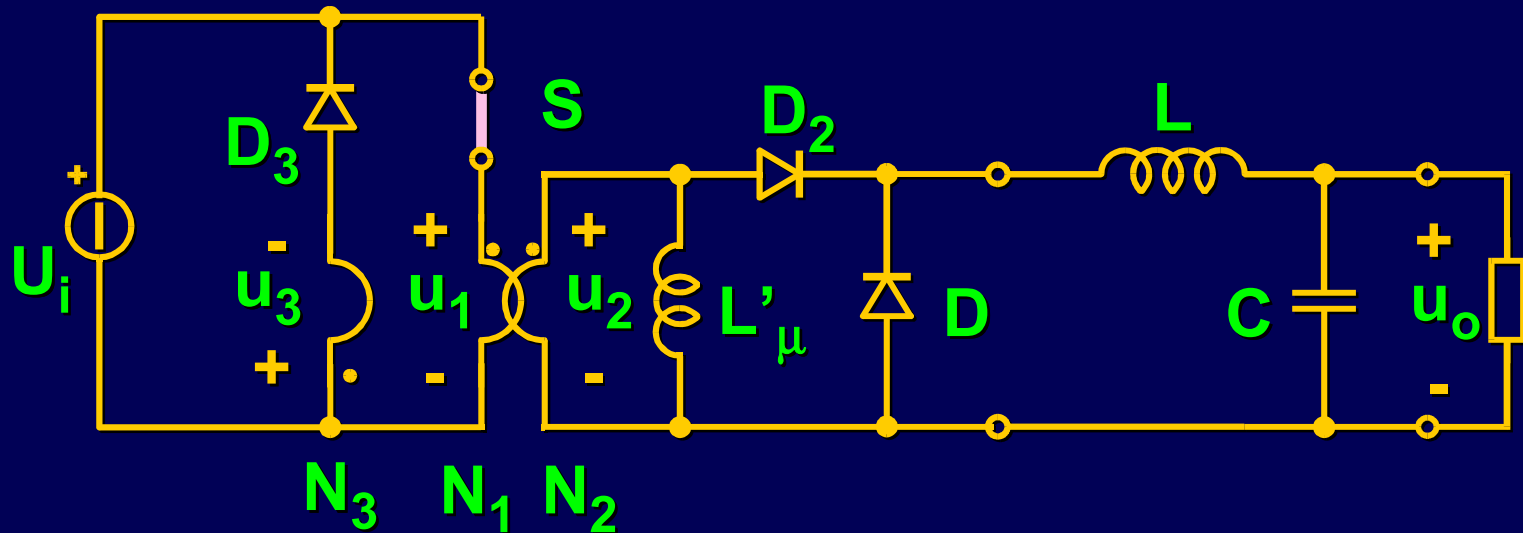
Convertitore FORWARD

Schema equivalente



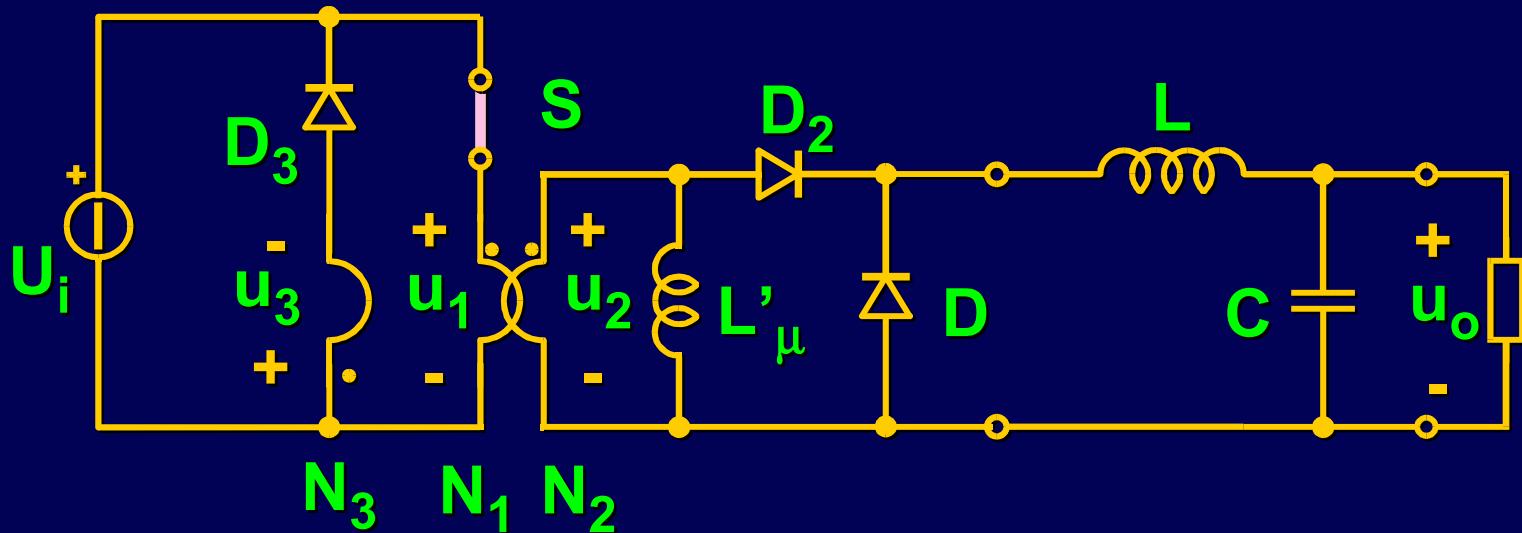
Per semplicità si considerano gli avvolgimenti perfettamente accoppiati ($L_d = 0$). Questa ipotesi assai semplificativa non è verificata in pratica.

Intervallo t_{on} :



S on $\rightarrow u_1 = U_i$

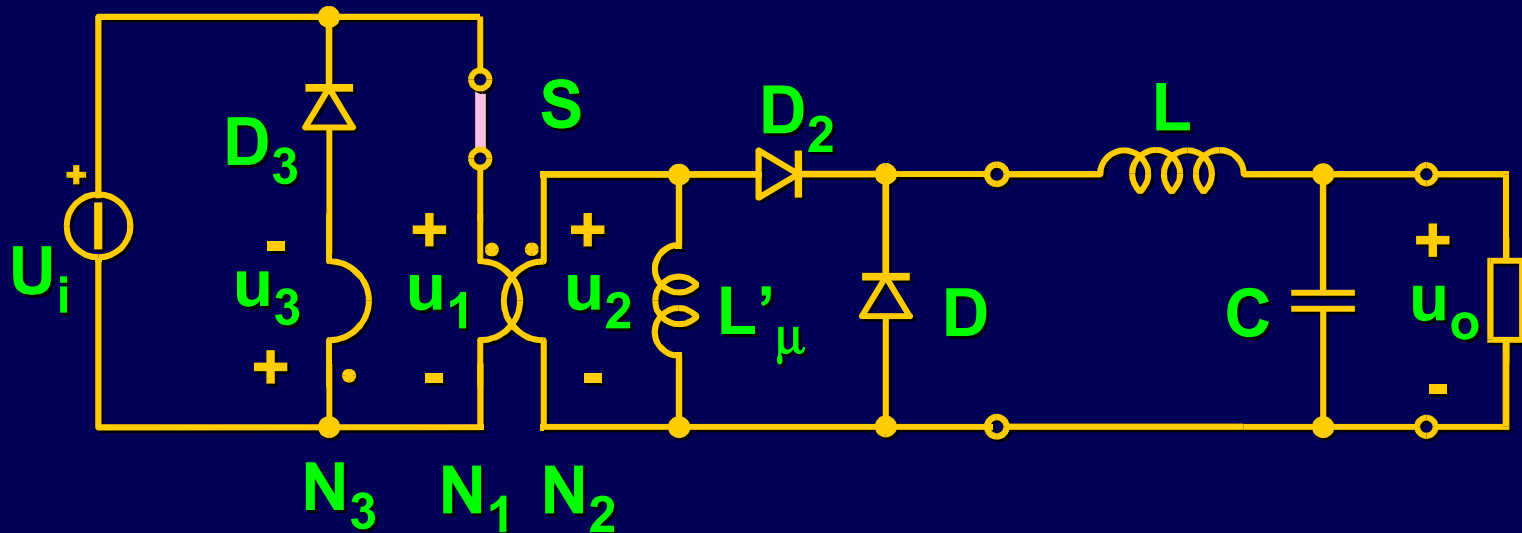
Intervallo t_{on} :



S on $\Rightarrow u_1 = U_i$

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

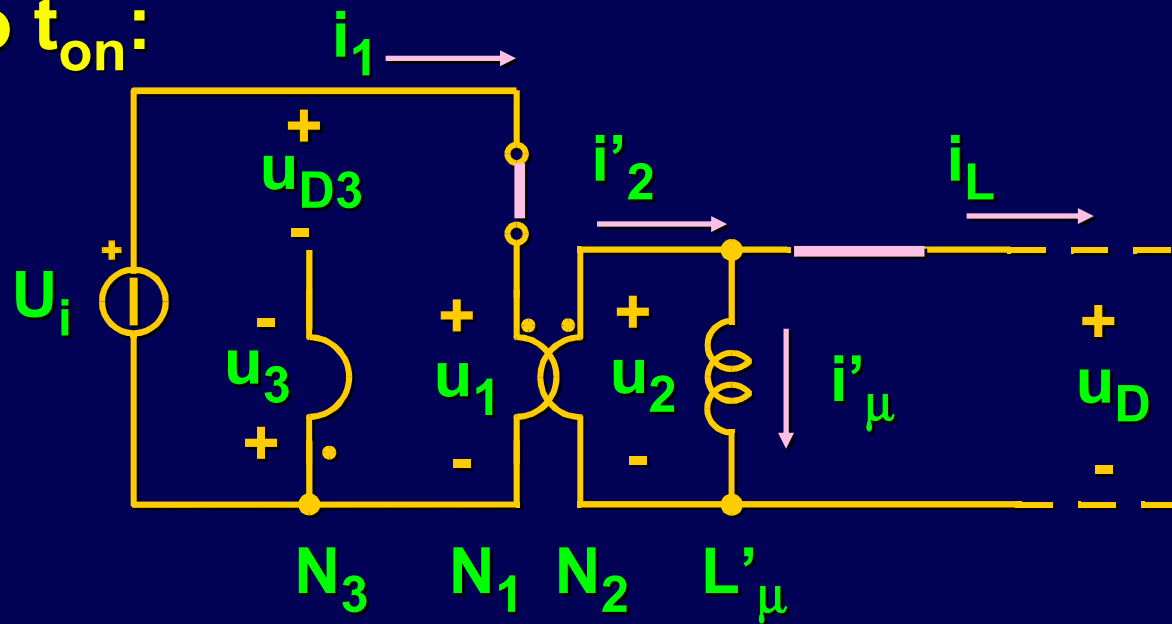
Intervallo t_{on} :



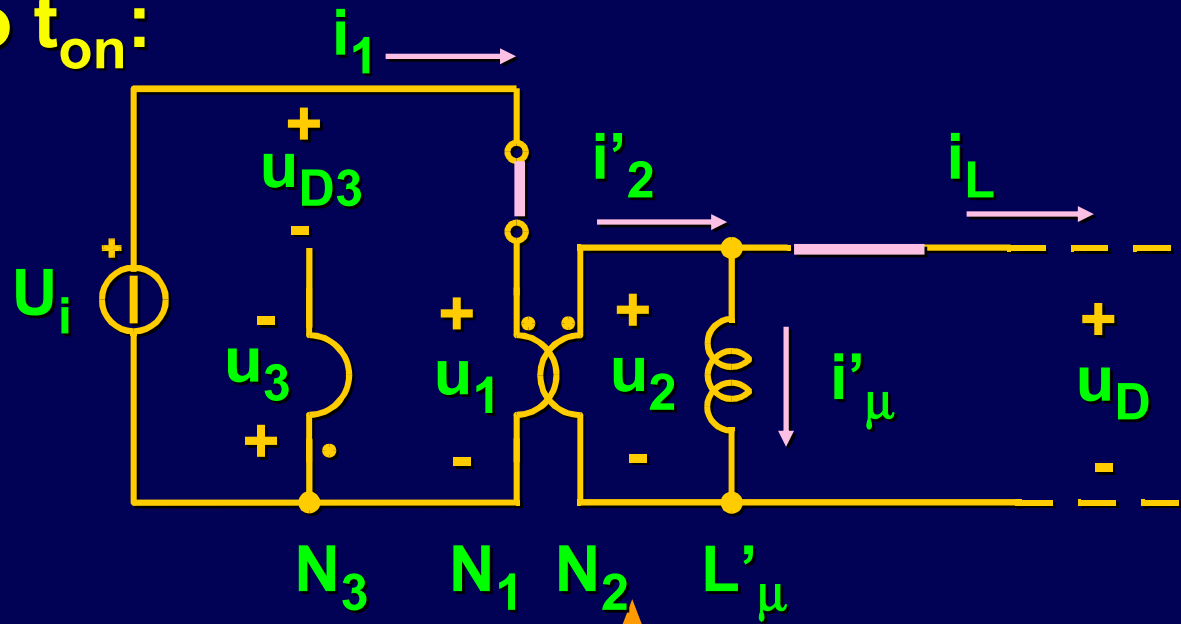
$$S \text{ on} \Rightarrow u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \Rightarrow D_2 \text{ on} - D \text{ off}$$

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

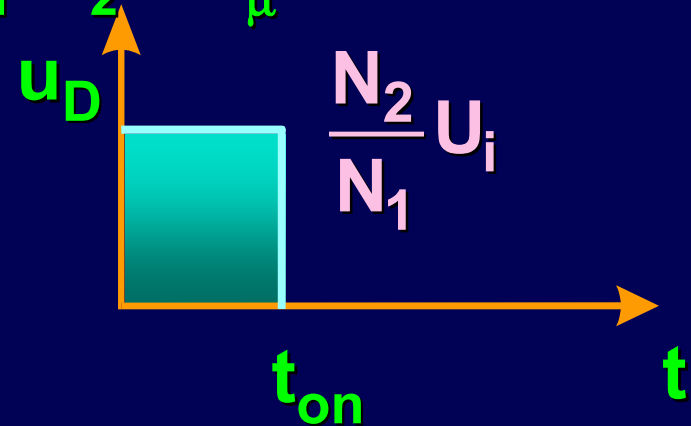
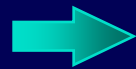
Intervallo t_{on} :



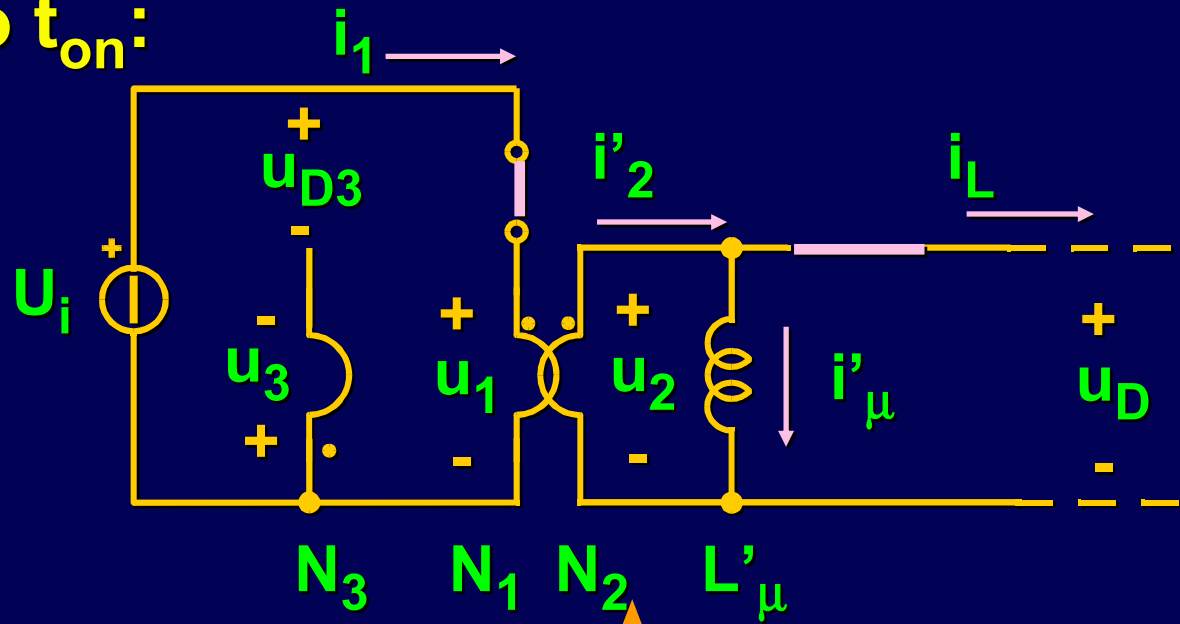
Intervallo t_{on} :



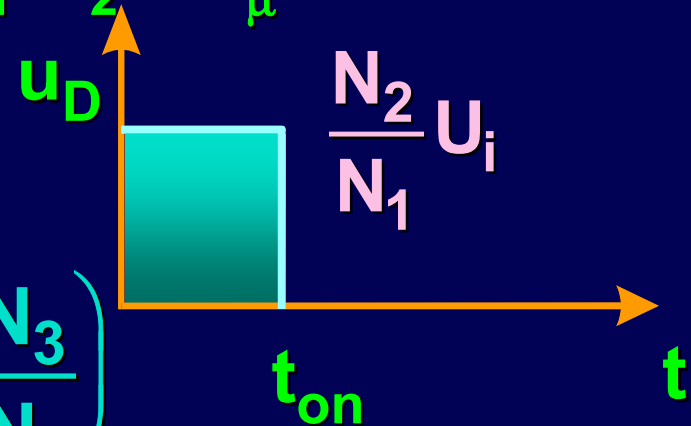
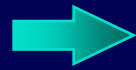
$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i$$



Intervallo t_{on} :

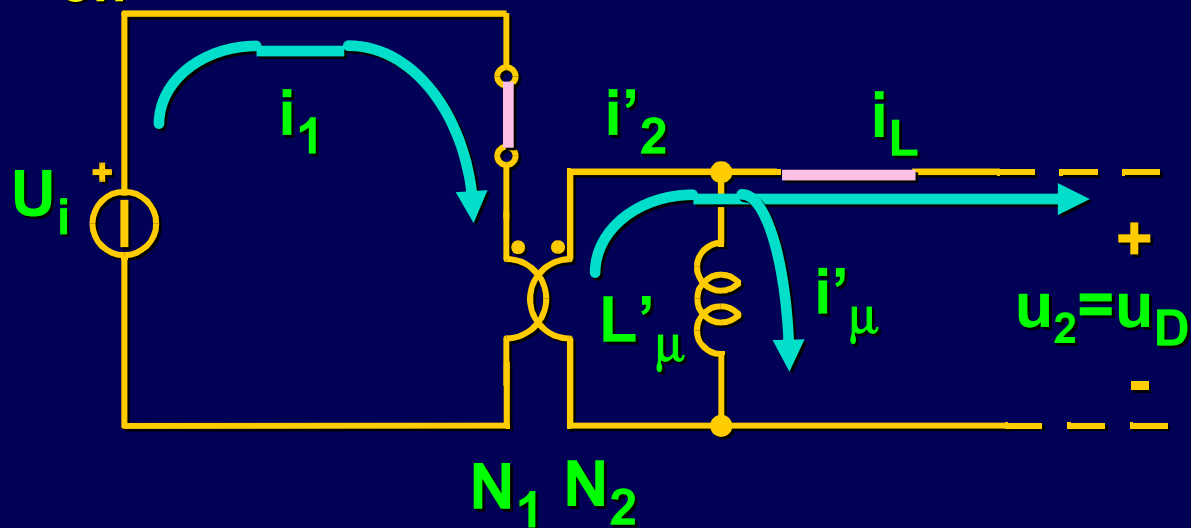


$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i$$



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

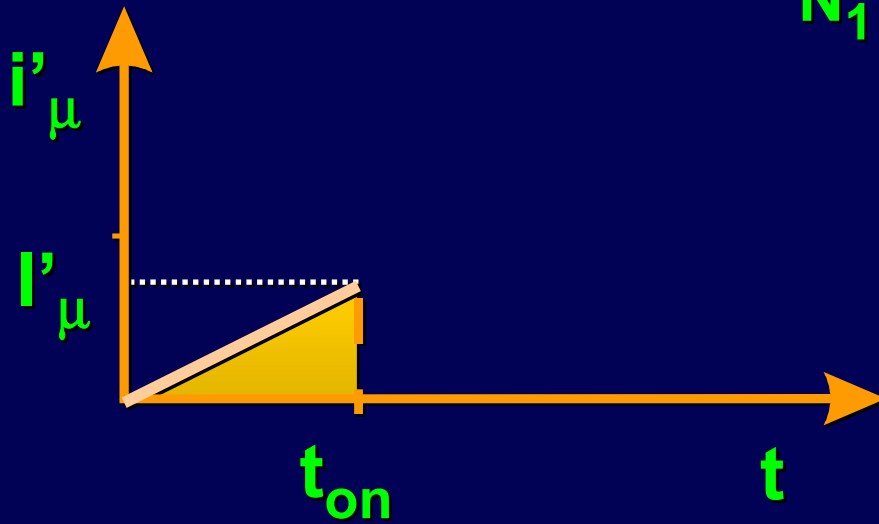
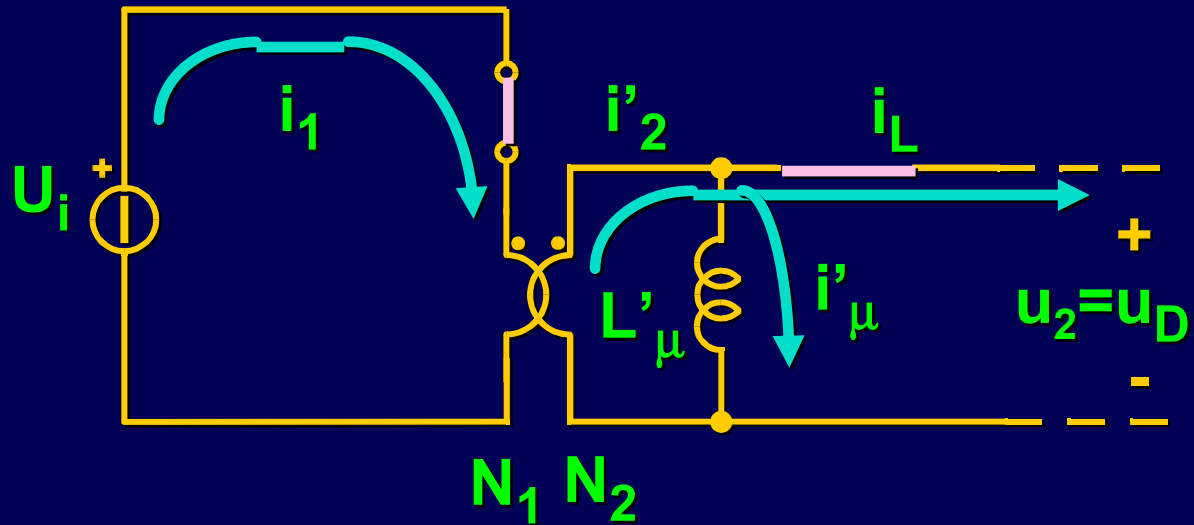
Intervallo t_{on} :



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

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

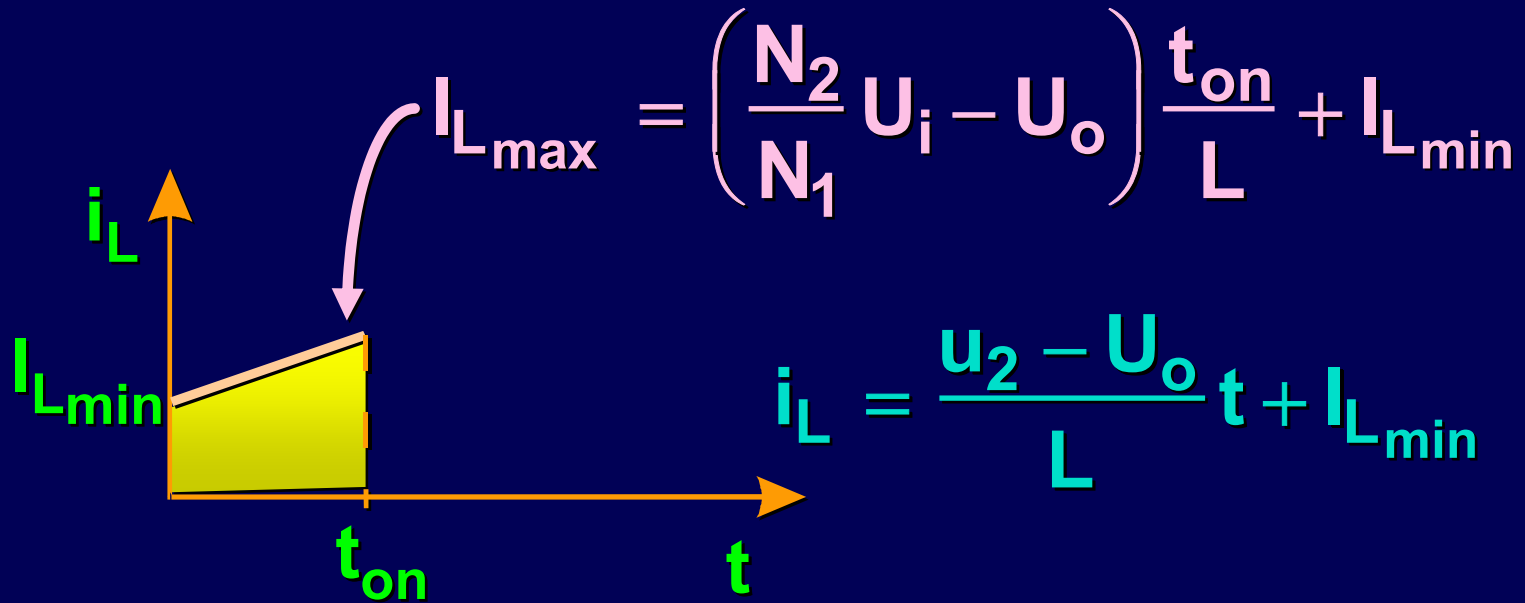
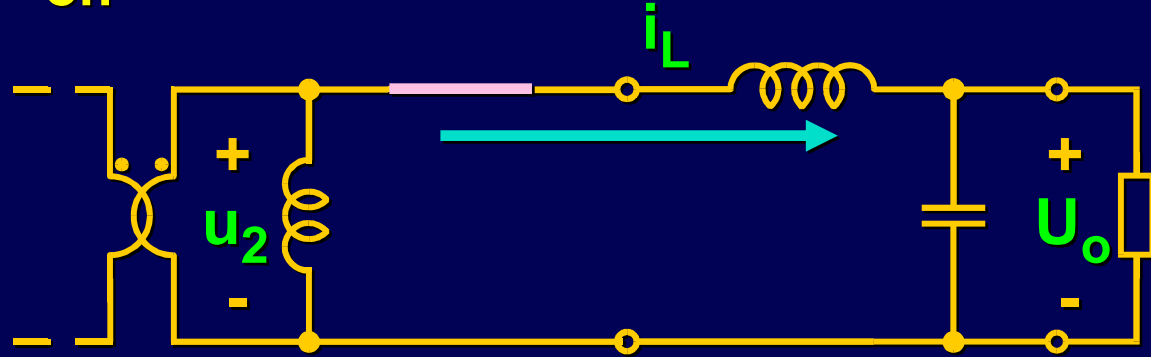
Intervallo t_{on} :



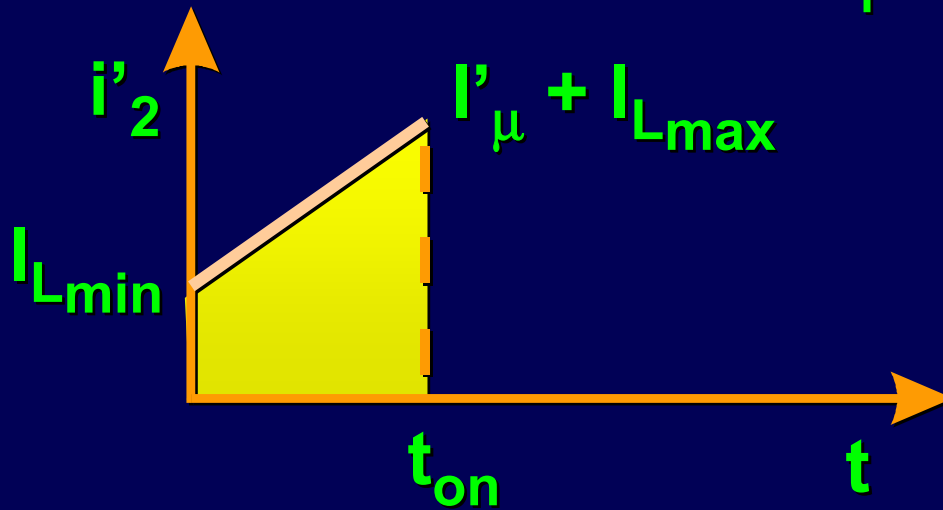
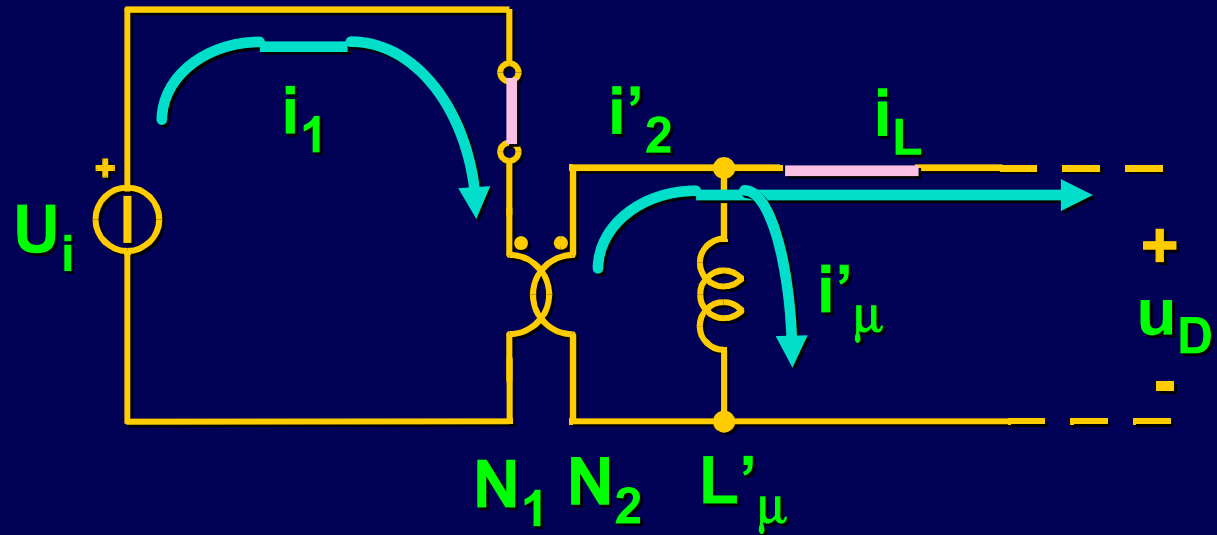
$$i'_\mu = \frac{u_2}{L'_\mu} t$$

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

Intervallo t_{on} :



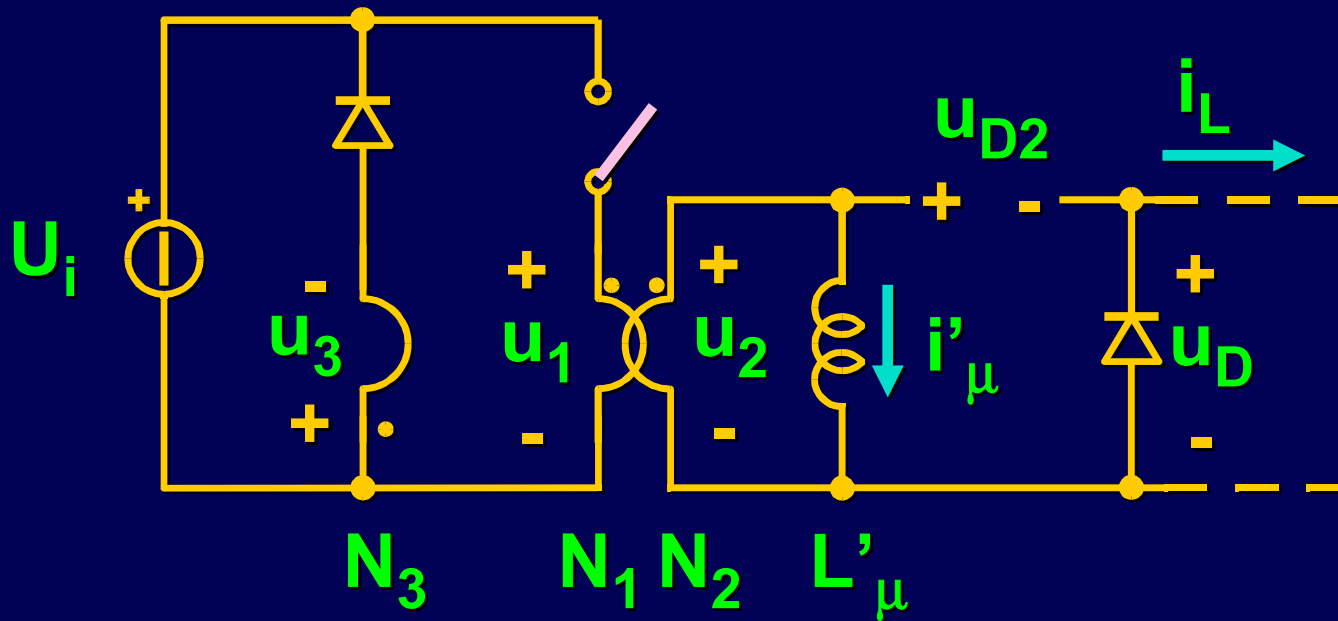
Intervallo t_{on} :



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

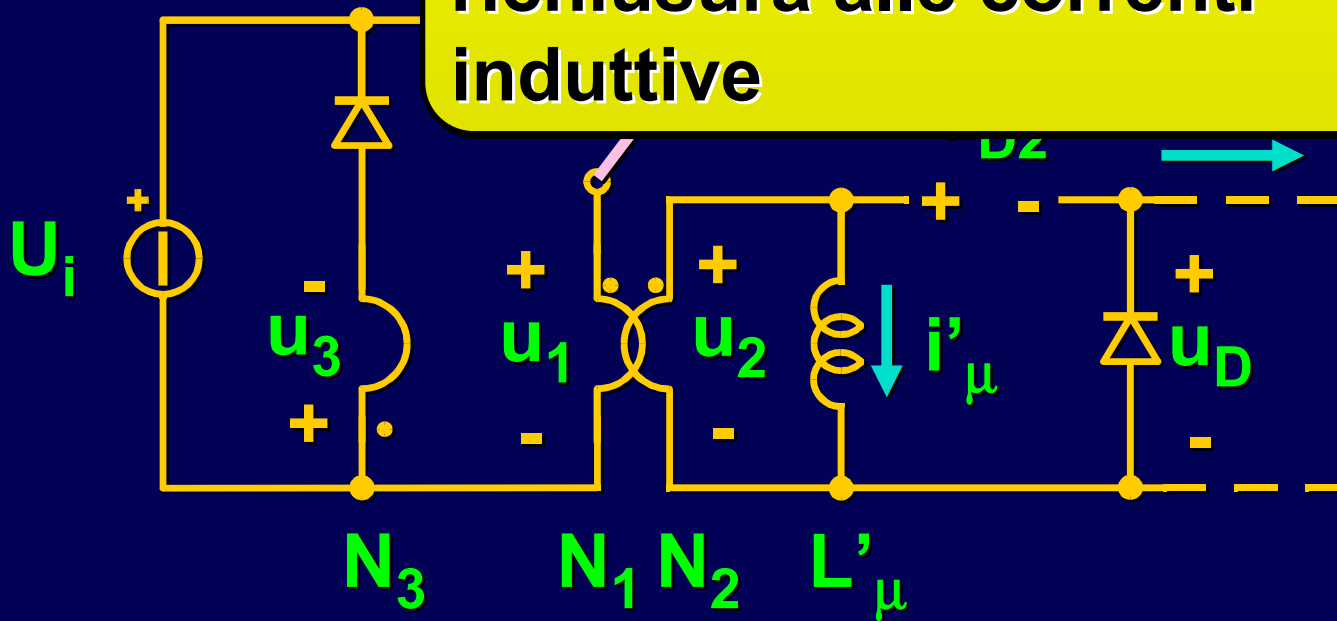
$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i'_2$$

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



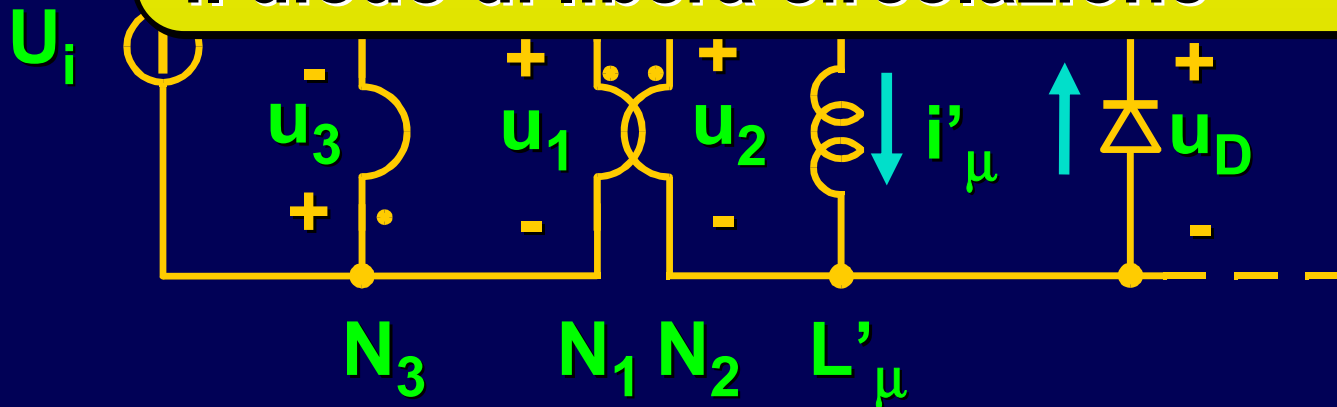
Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off} (A - reset)

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



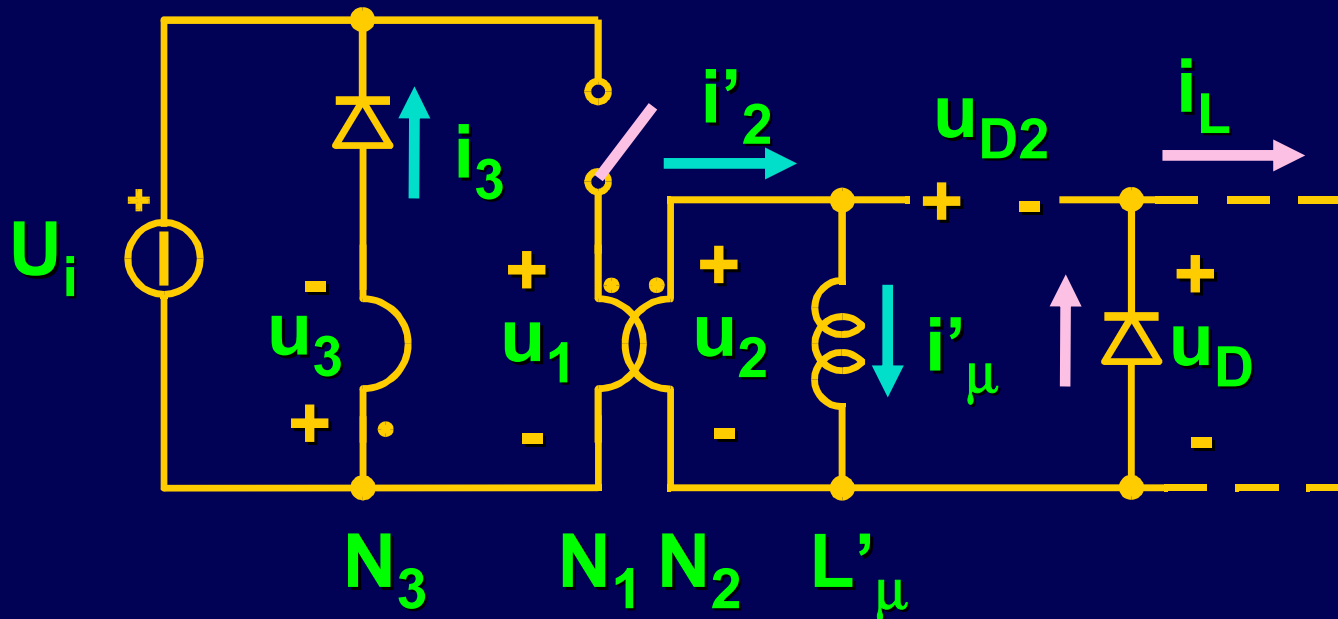
Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off} (A - reset)

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



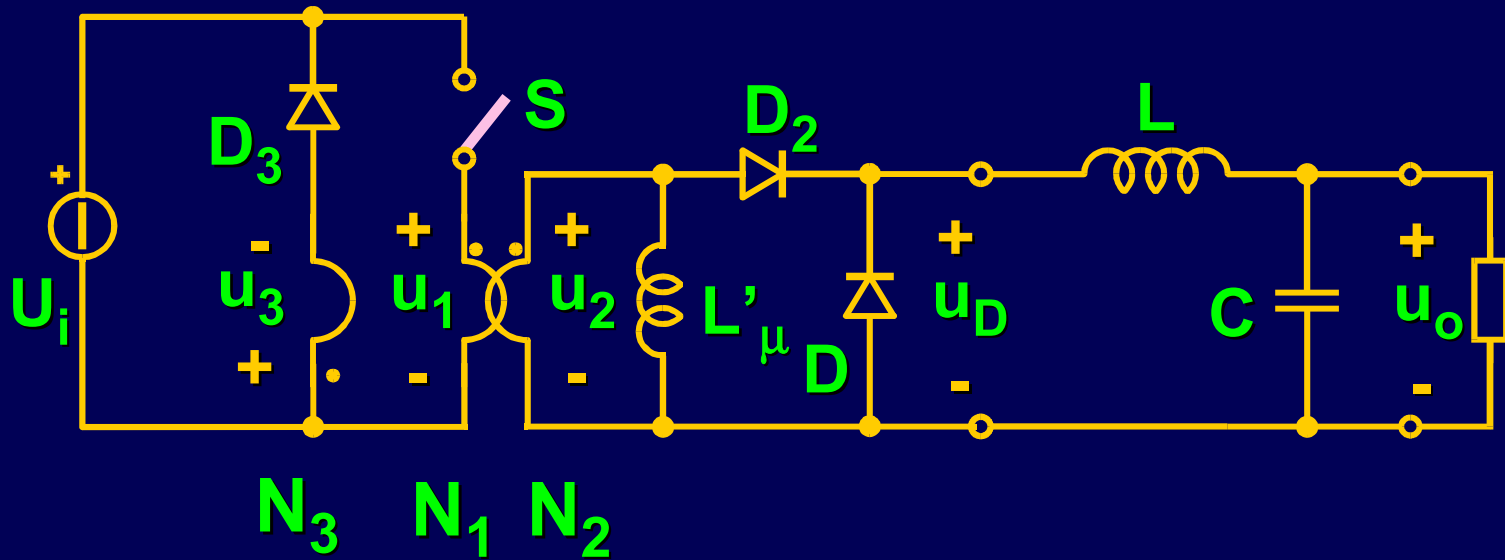
$S = D_2 = \text{"off"} , D = D_3 = \text{"on"}$

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



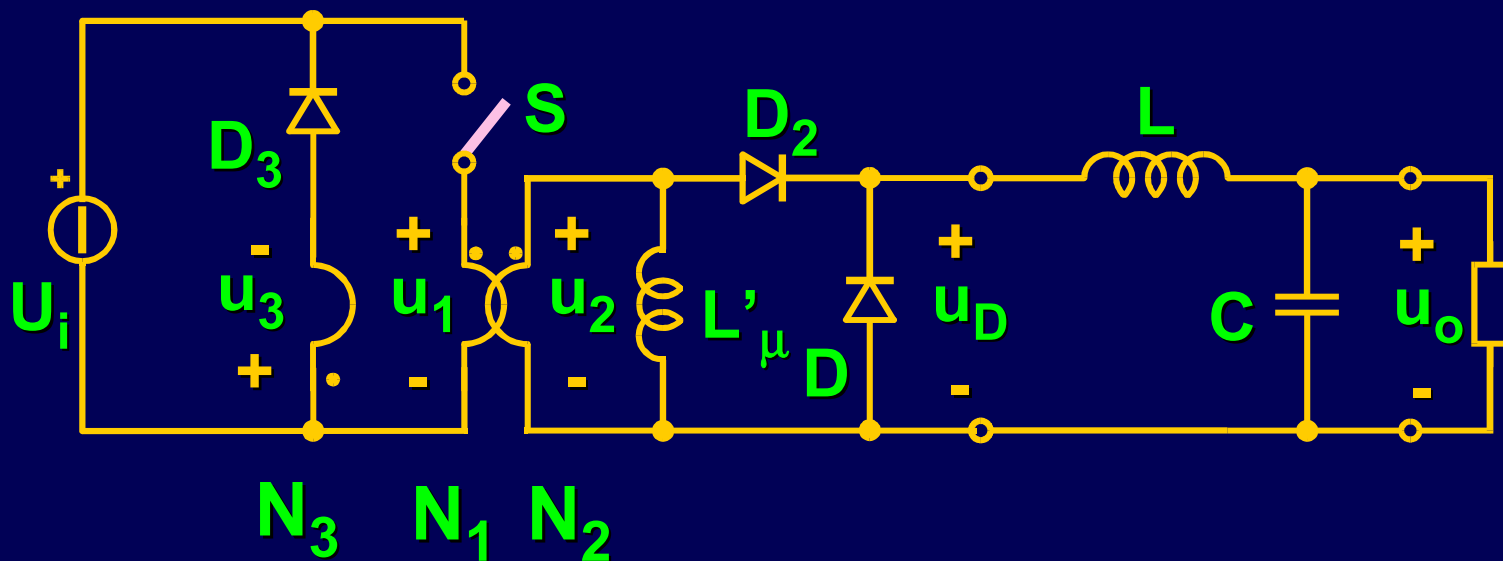
$S = D_2 = \text{"off"}, D = D_3 = \text{"on"}$

Intervallo t_{off} (A - reset)



D_3 on $\Rightarrow u_3 = -U_i$

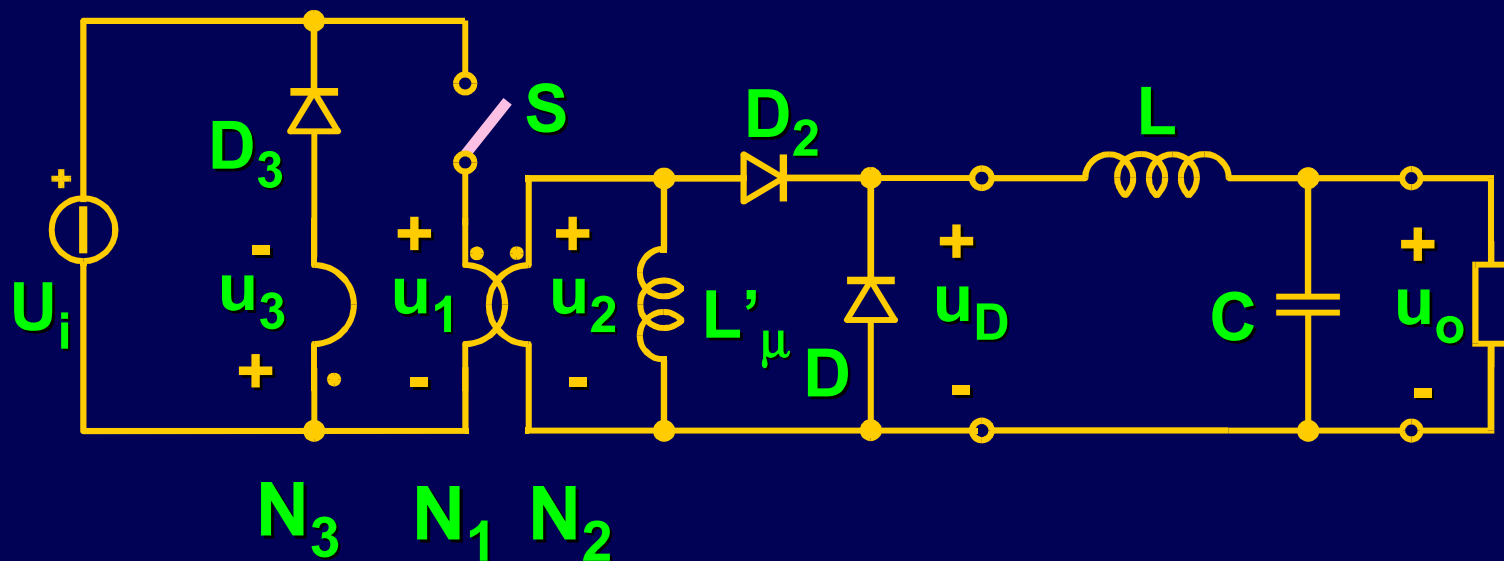
Intervallo t_{off} (A - reset)



D_3 on $\Rightarrow u_3 = -U_i$

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

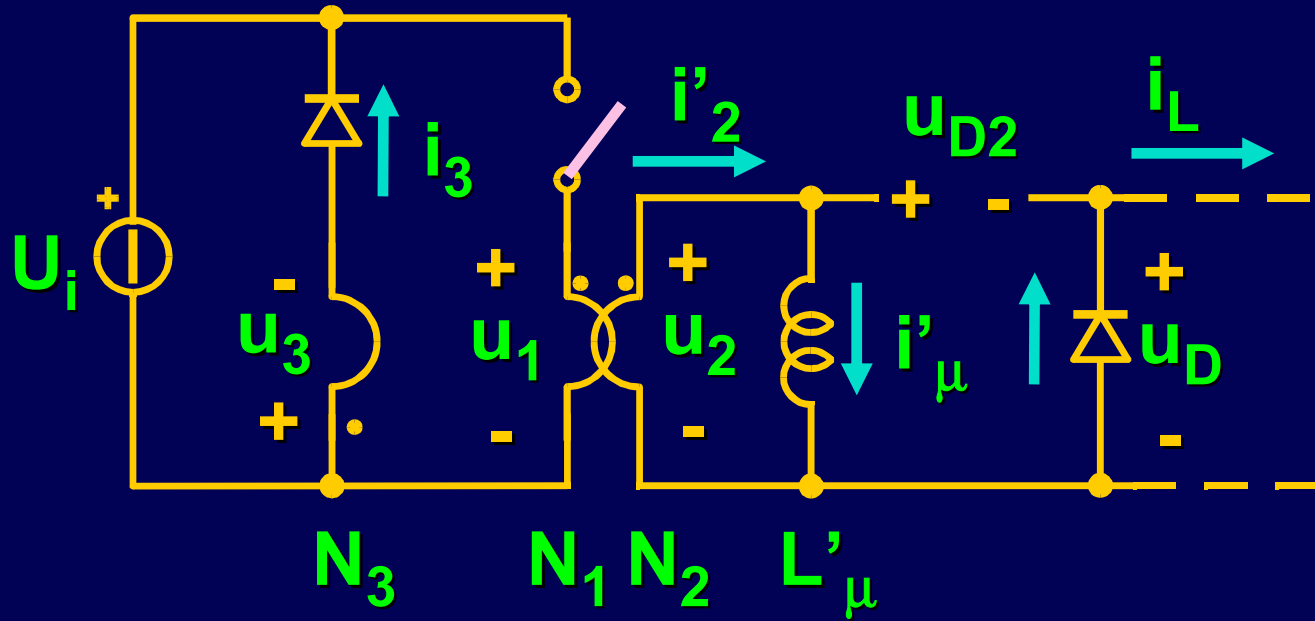
Intervallo t_{off} (A - reset)



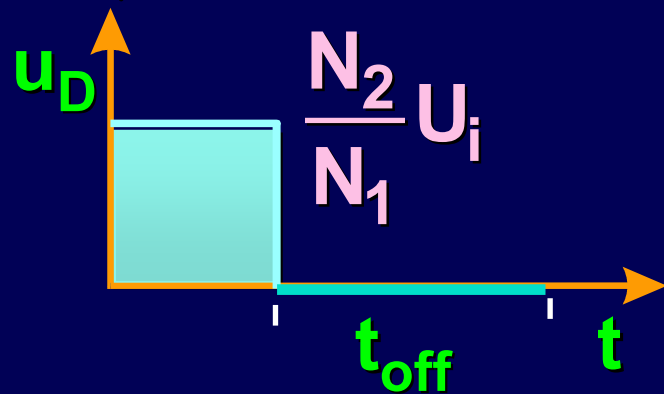
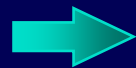
$$u_1 = -\frac{N_1}{N_3} U_i \quad \Rightarrow \quad u_S = U_i - u_1 = U_i \left(1 + \frac{N_1}{N_3} \right)$$

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

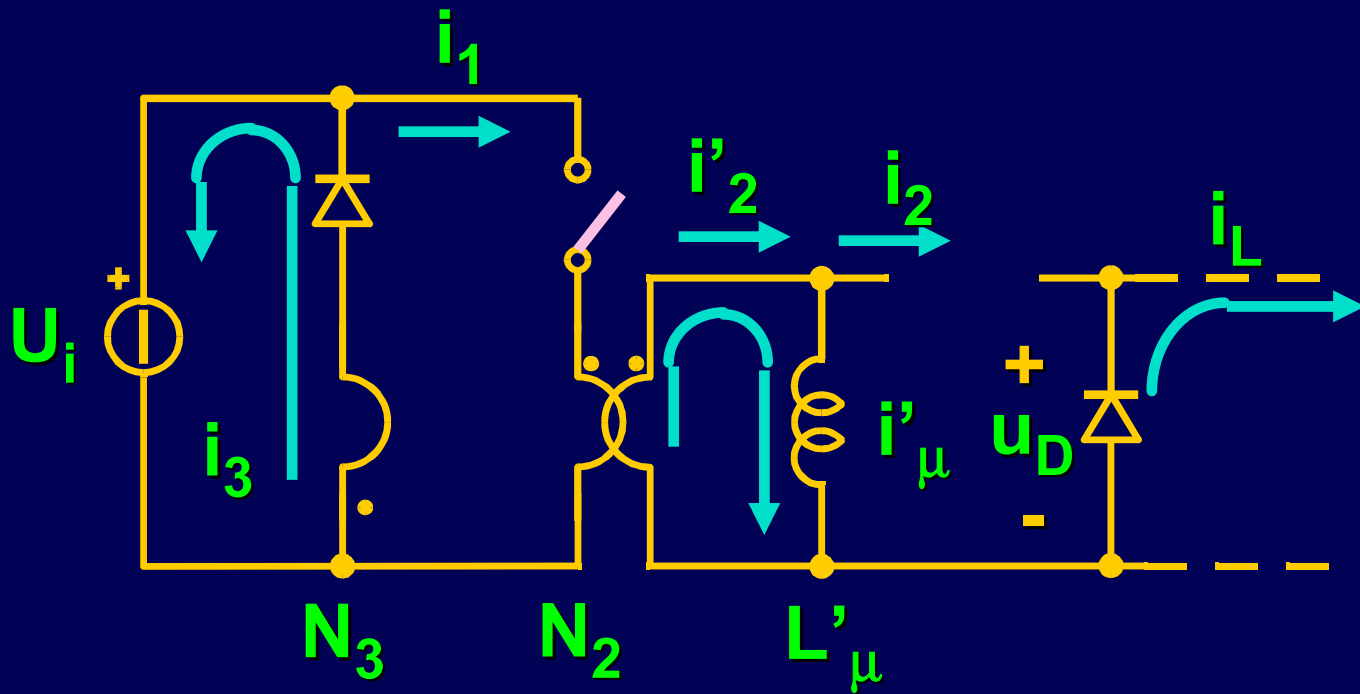
Intervallo t_{off} (A - reset)



$$u_D = 0$$



Intervallo t_{off} (A - reset)

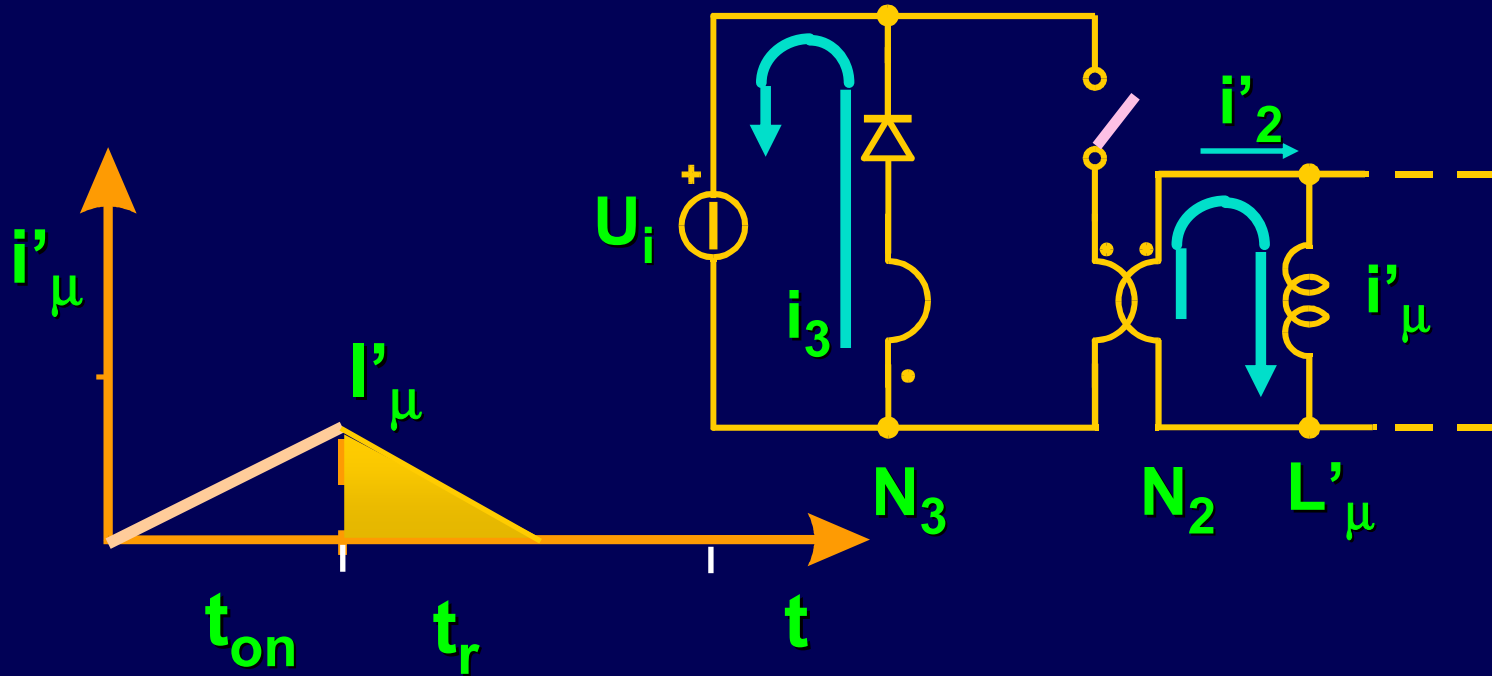


$$i_1 = 0$$

$$i_2 = 0$$

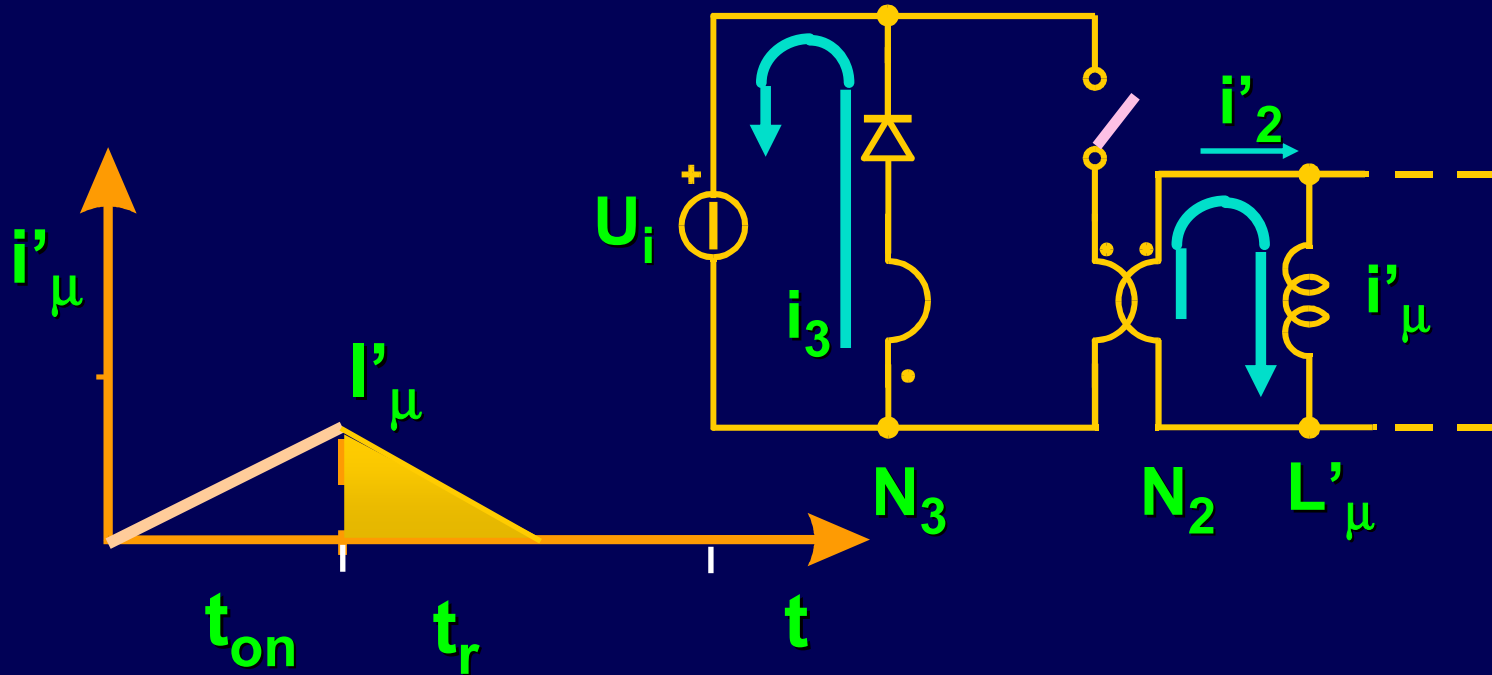
$$i'_2 = i'_\mu$$

Intervallo t_{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_{off} (A - reset)

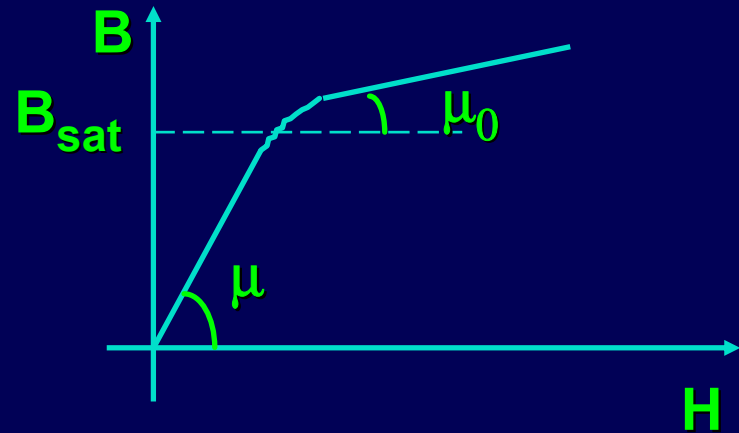
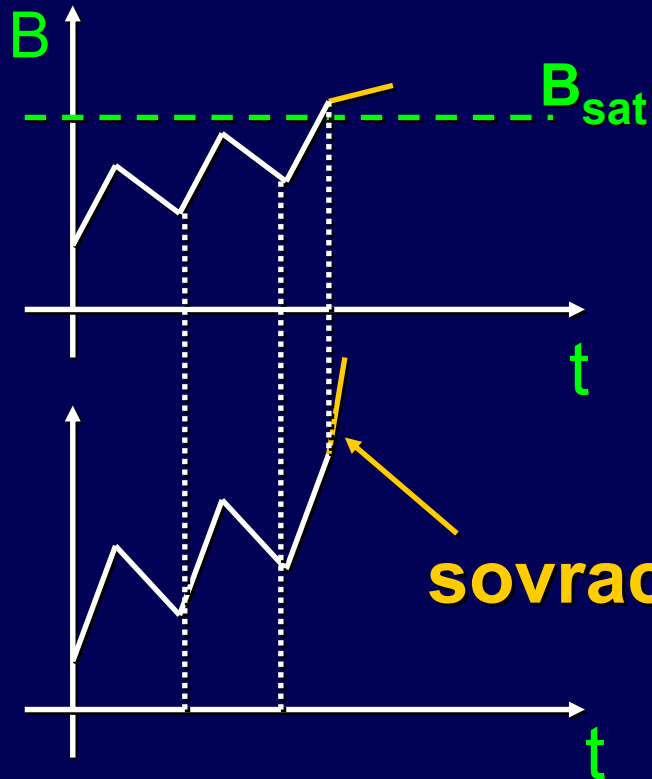


Fine della fase di reset del trasformatore:

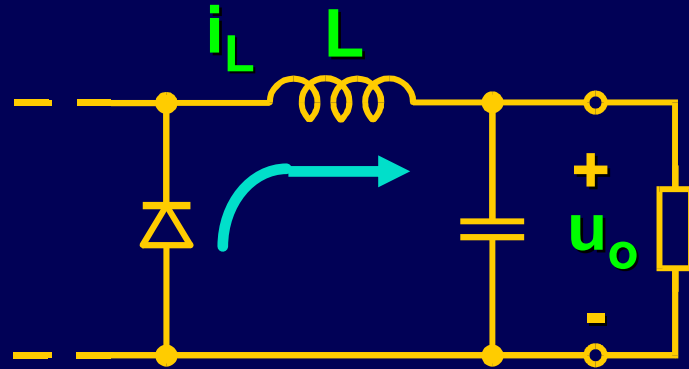
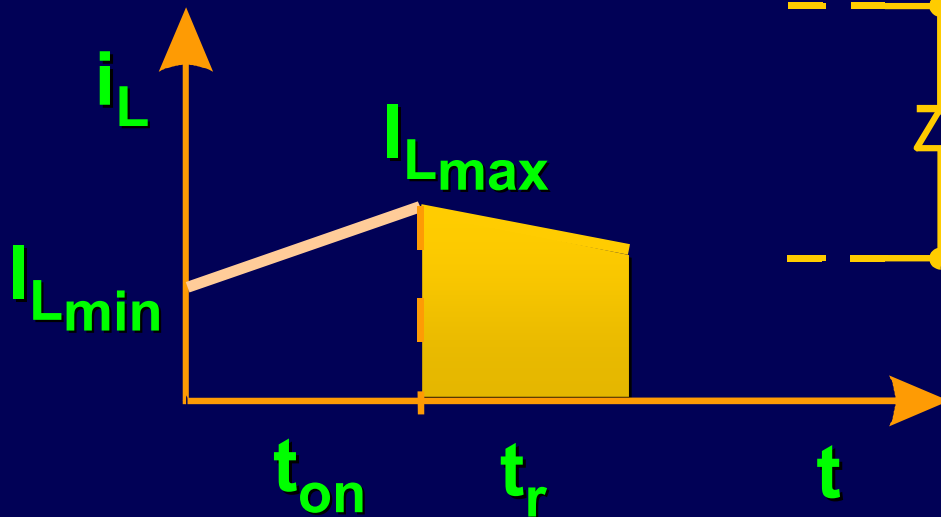
$$i'_\mu = 0 \quad \Rightarrow \quad t_r = \frac{N_3}{N_1} t_{\text{on}}$$

NOTA

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

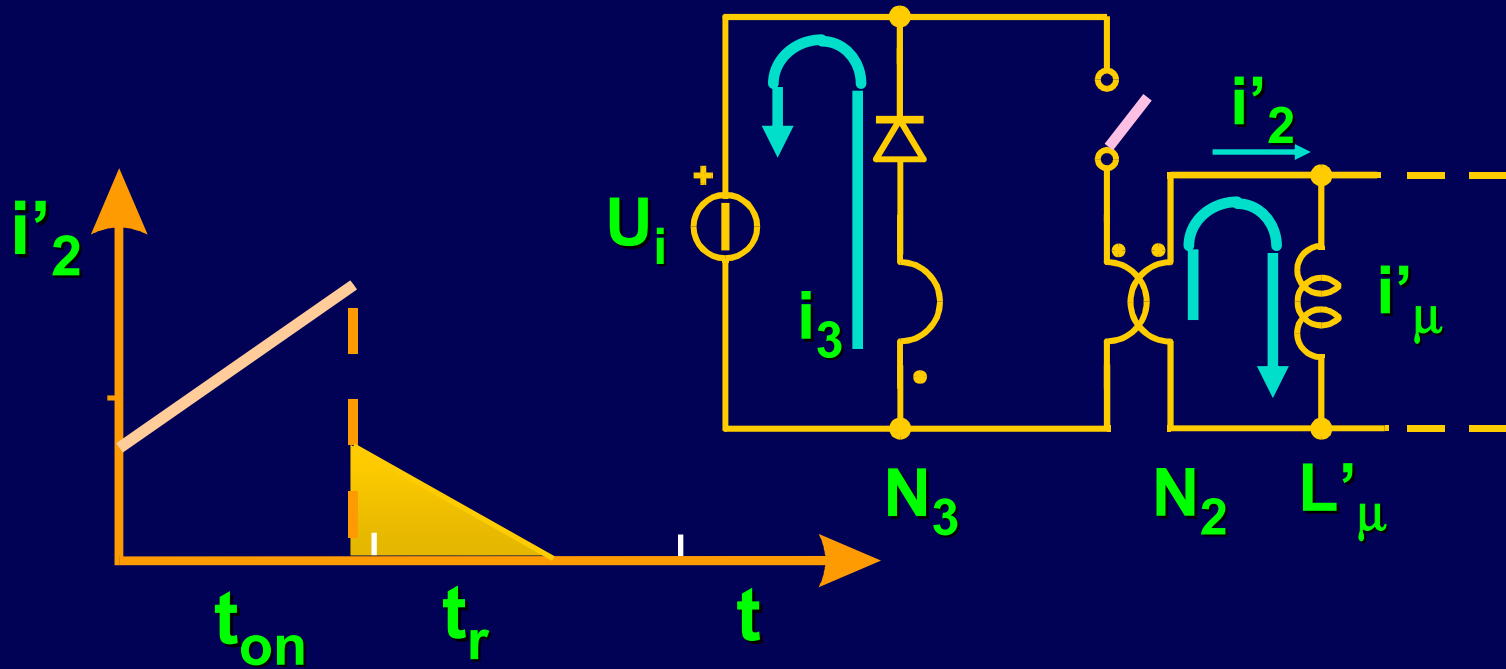


Intervallo t_{off} (A - reset)



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

Intervallo t_{off} (A - reset)



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

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

NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:

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

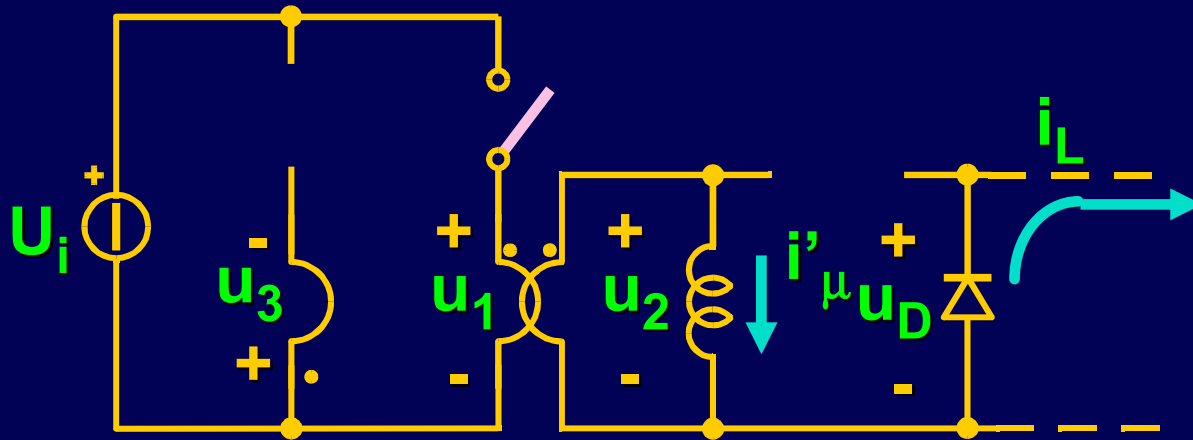
NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:

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


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

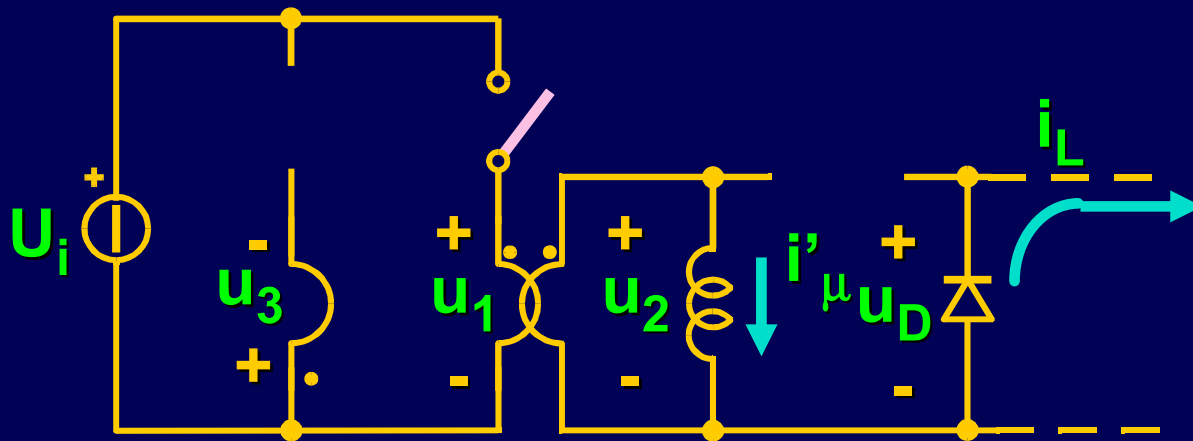
Il valore del duty-cycle è limitato superiormente

Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off} (B - idle)



S , D_2 , D_3 OFF

Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off} (B - idle)

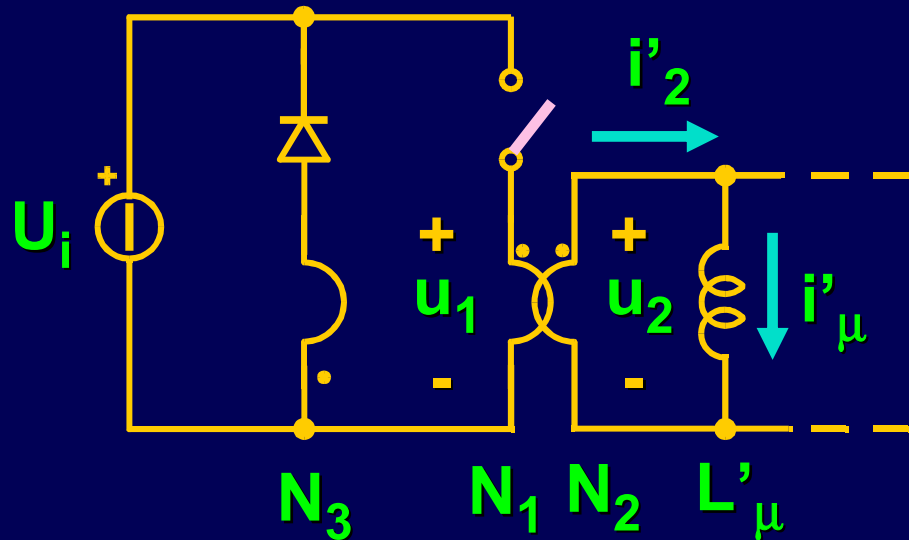


$$i'_\mu = 0 \rightarrow u_1 = u_2 = u_3 = 0$$

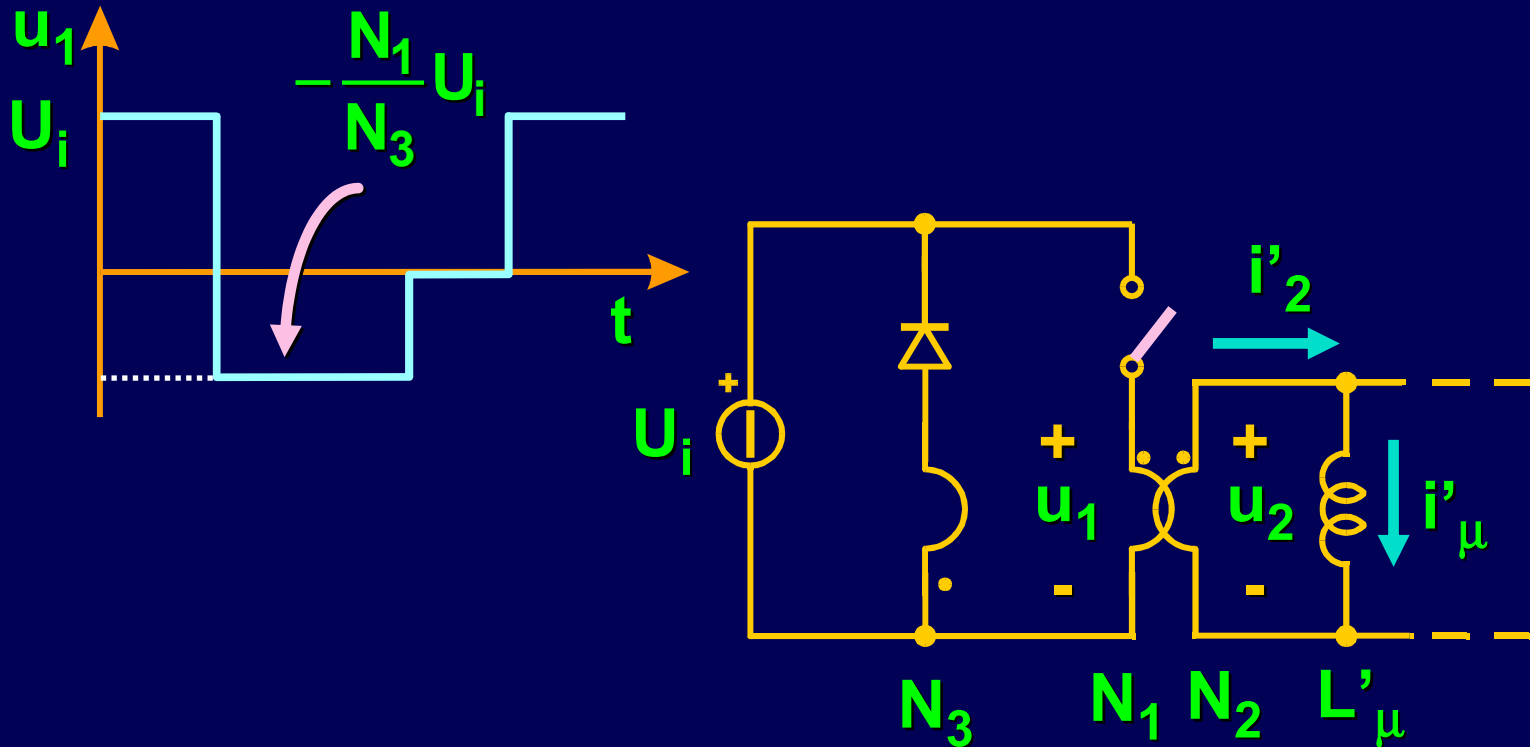
S, D_2, D_3 OFF

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

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

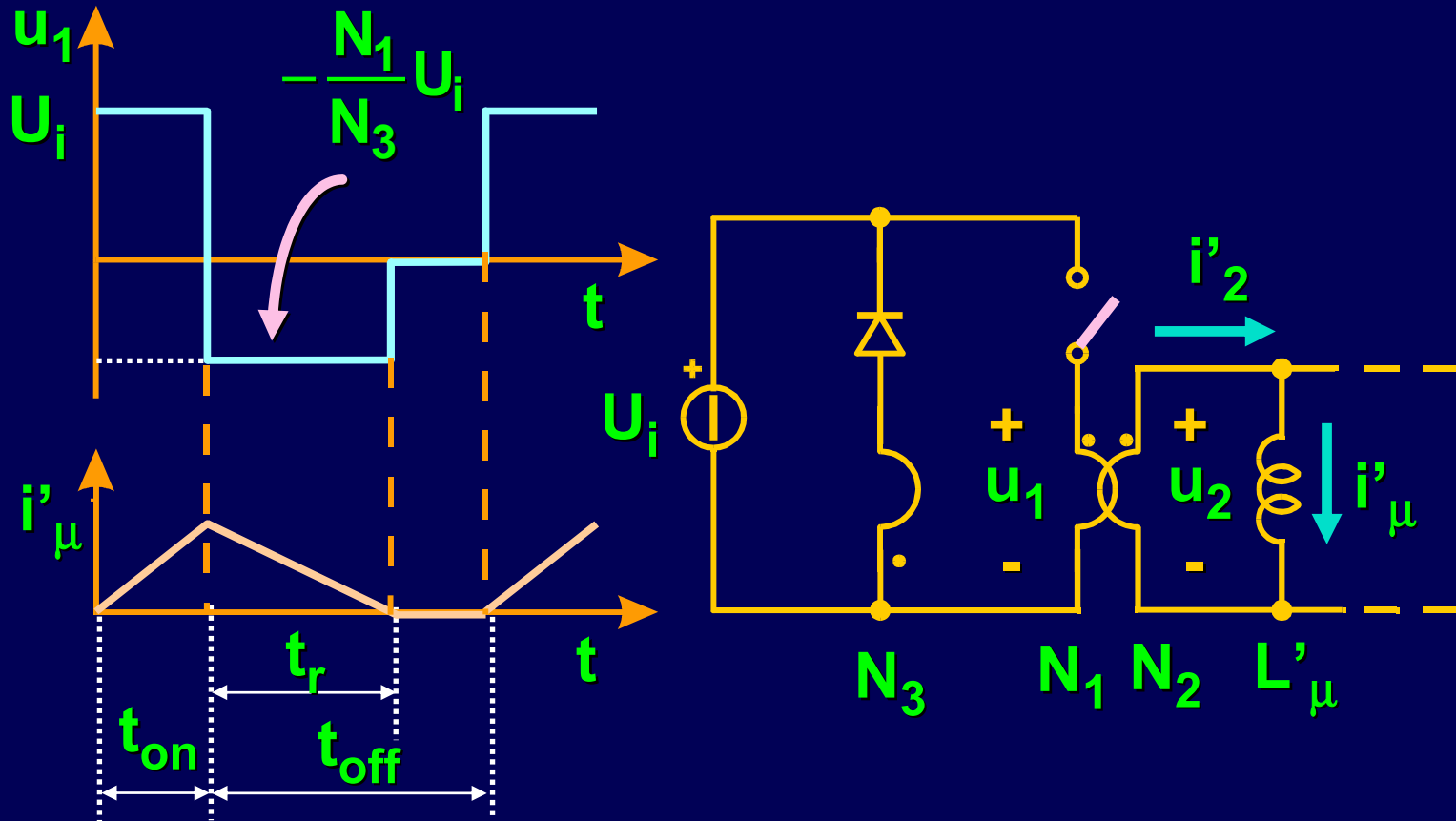


Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)

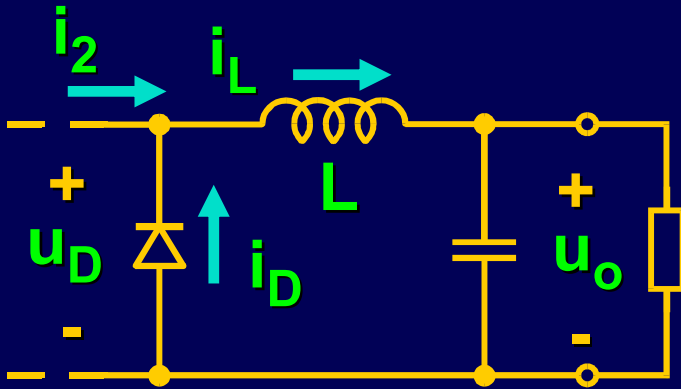


Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD

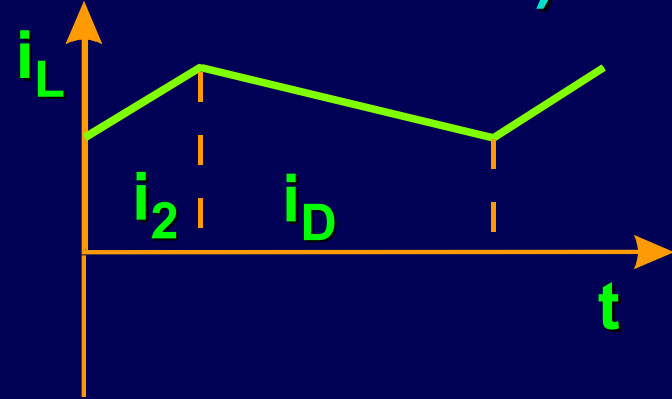
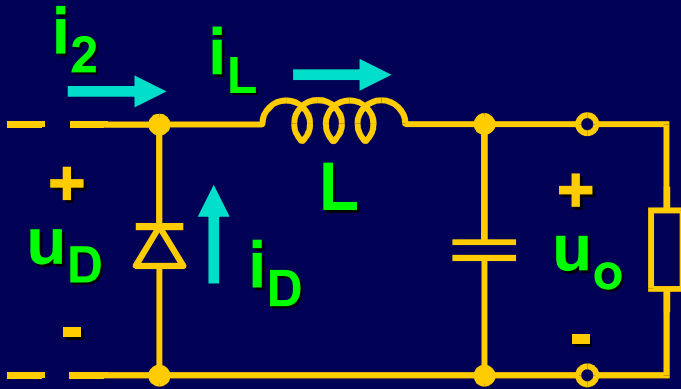
(Funzionamento continuo - CCM)



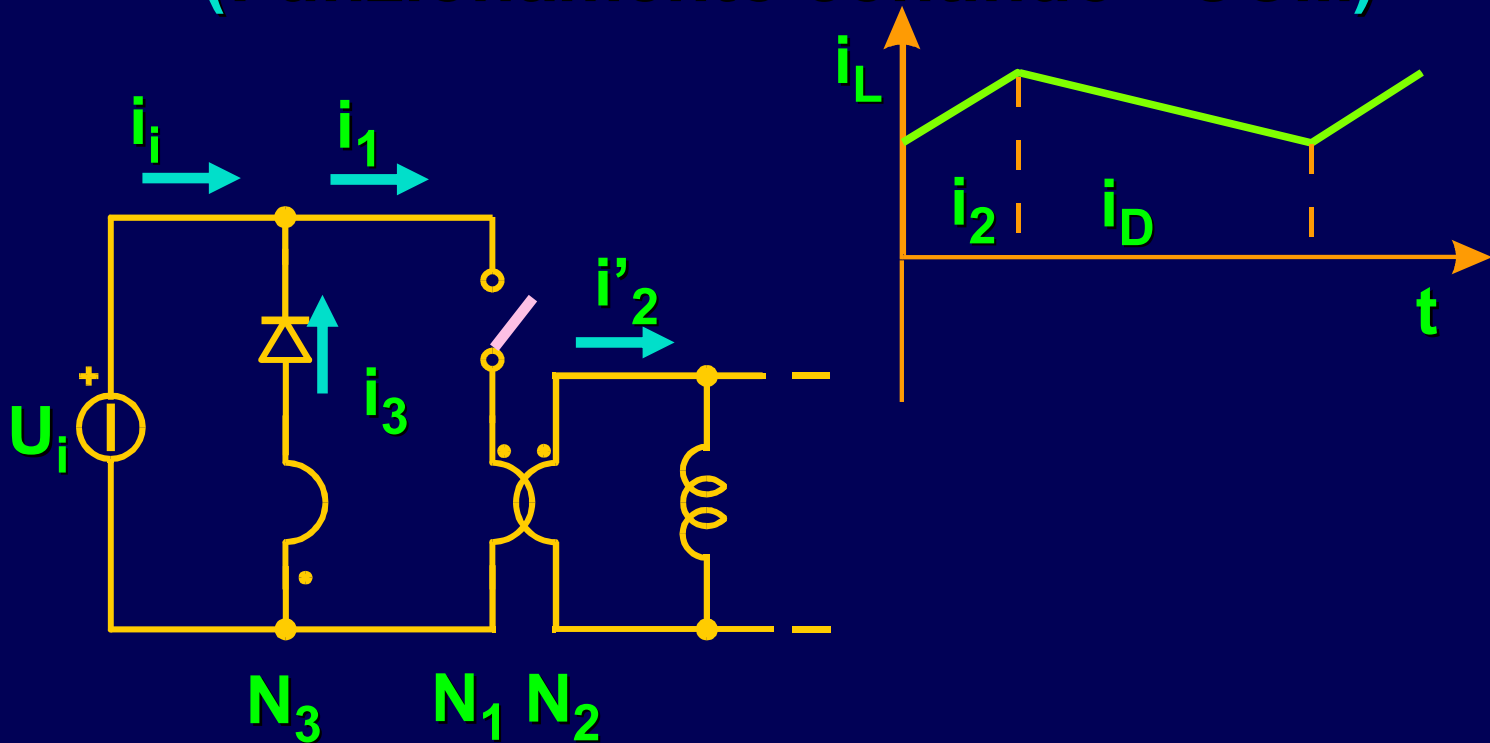
Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



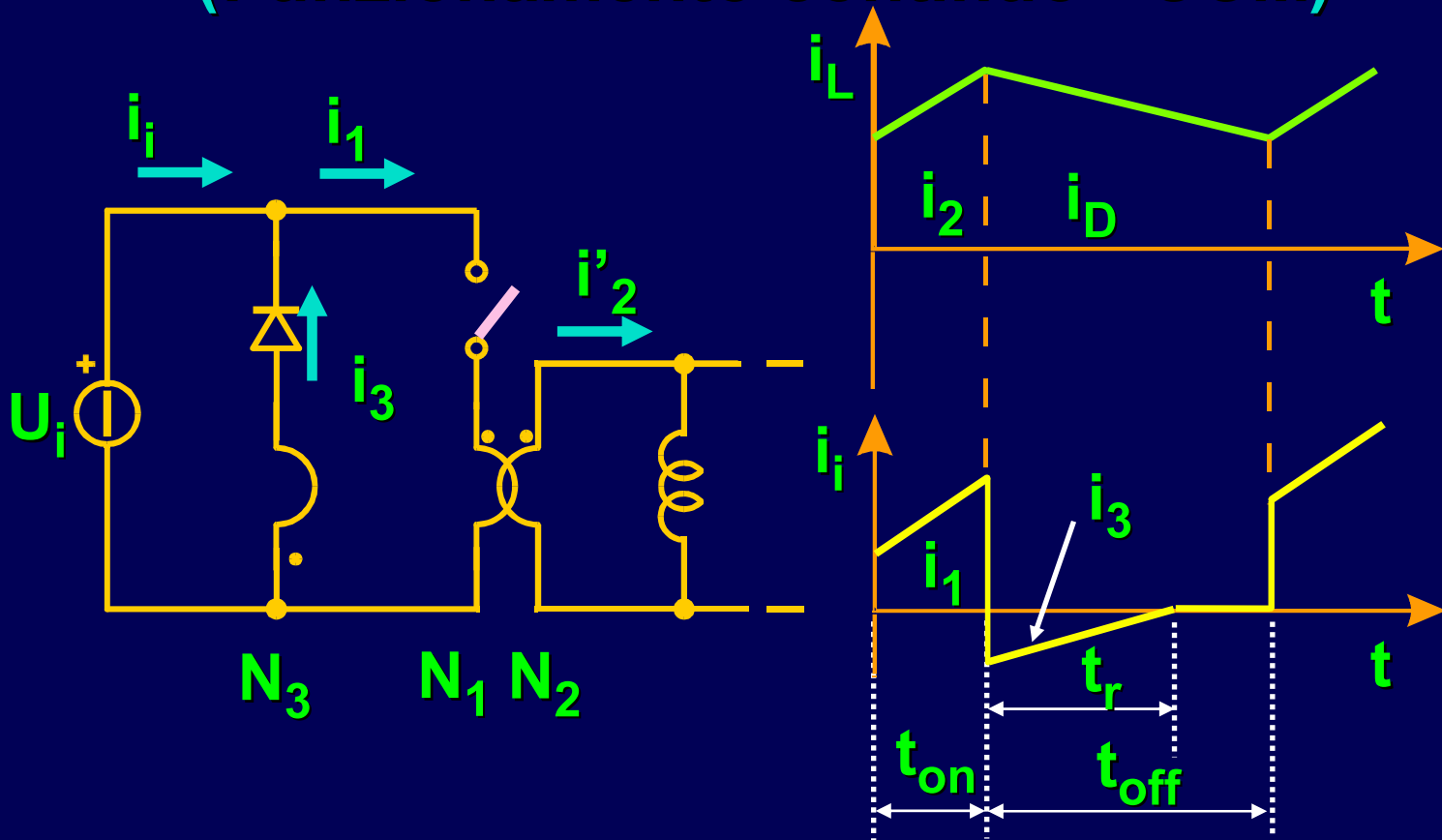
Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



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

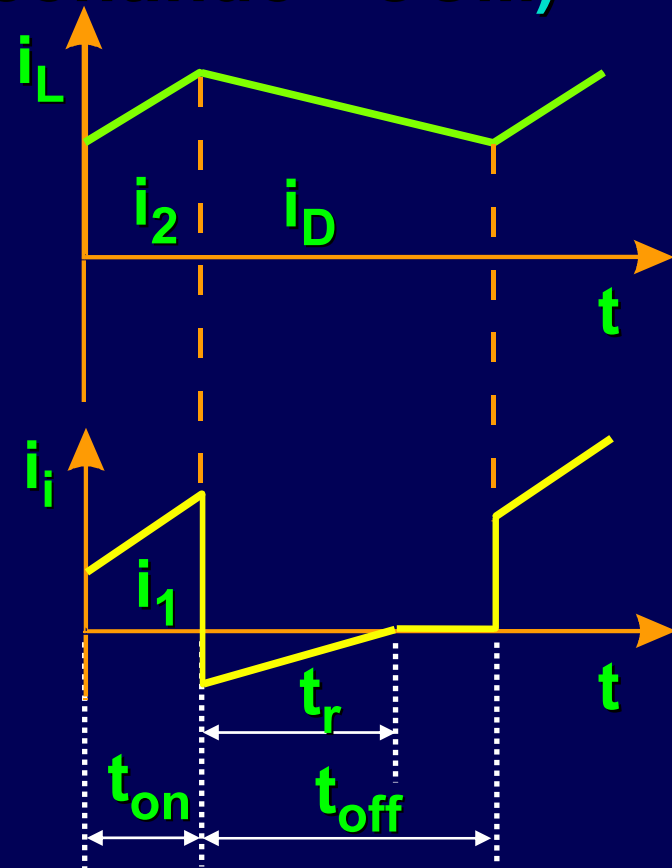
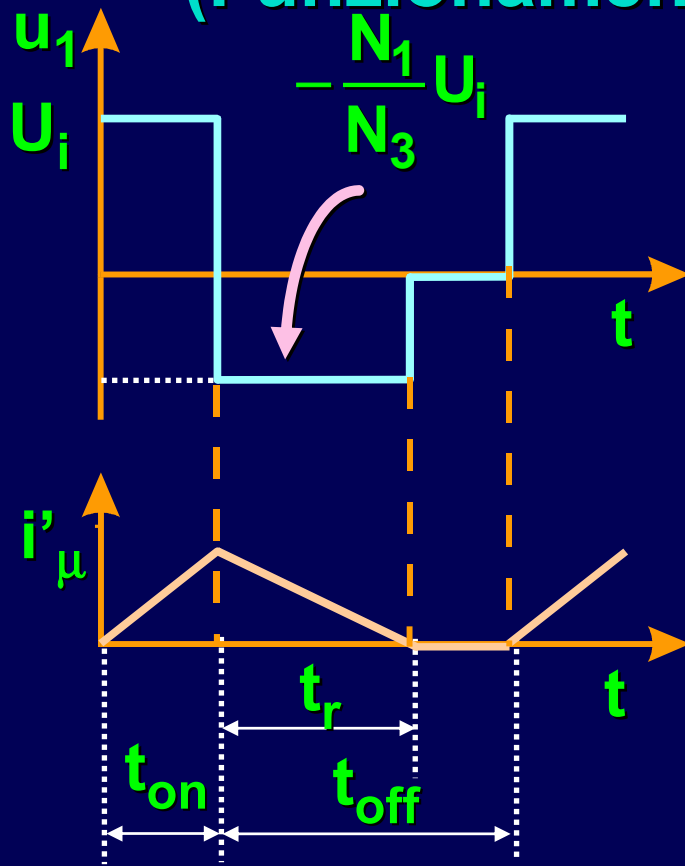


Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



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

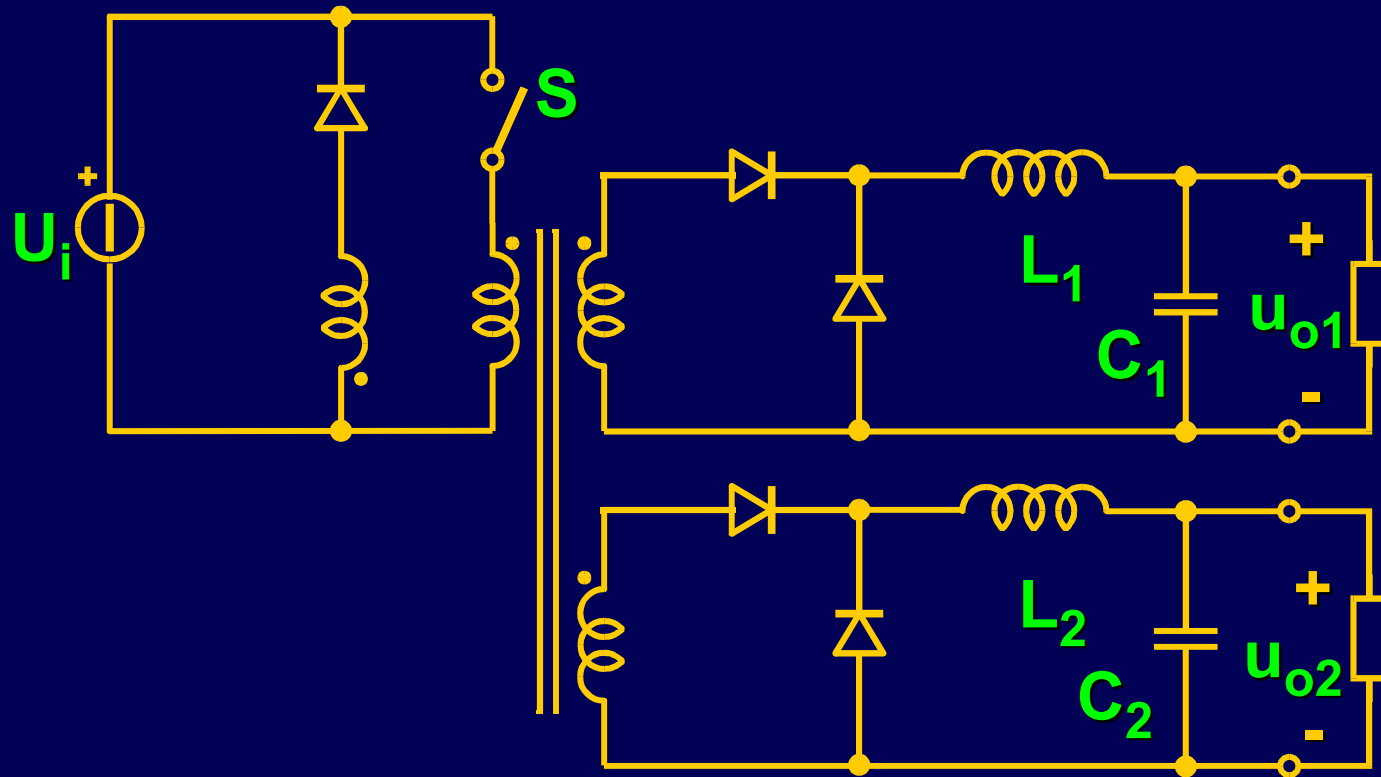
$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = \frac{N_2}{N_1} U_i \delta_{\max} I_o$$

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

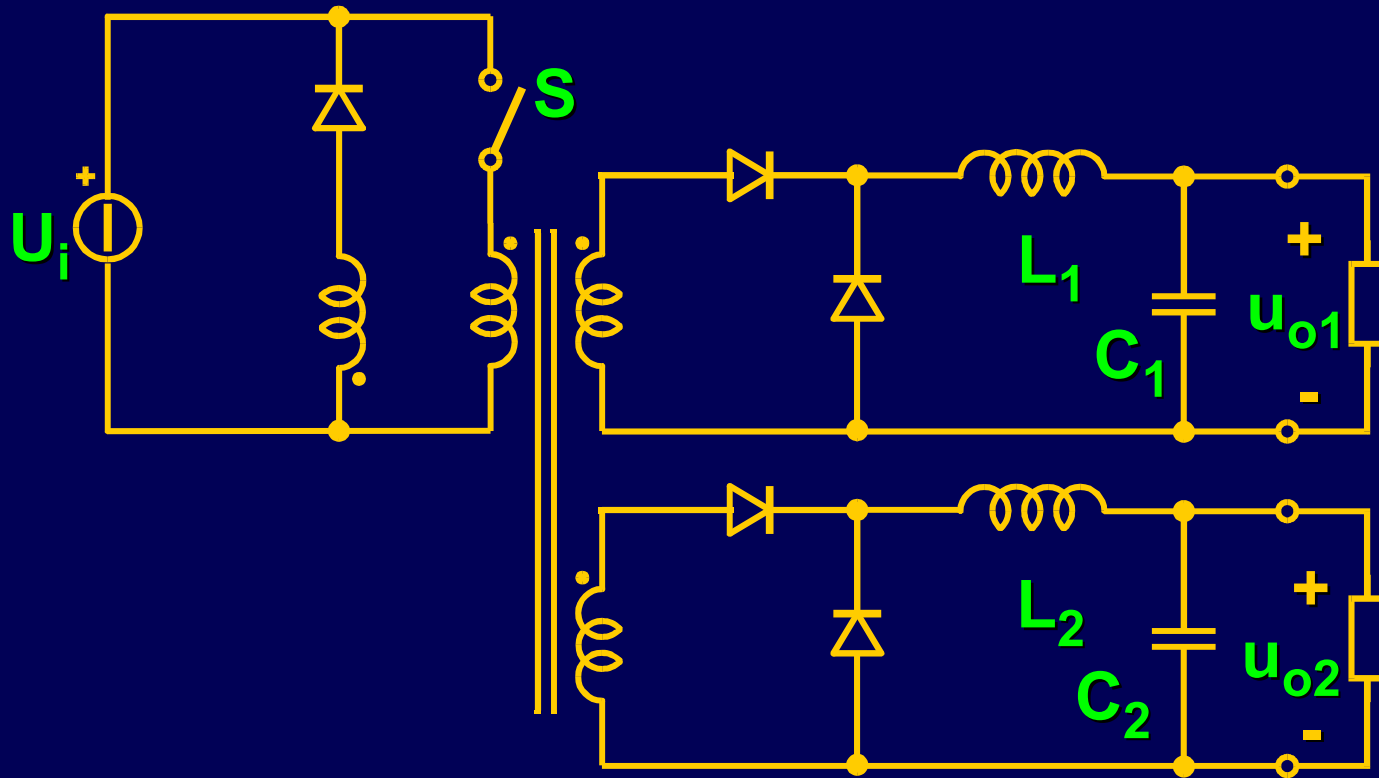


$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{N_1 N_3}{(N_1 + N_3)^2} \leq \frac{1}{4}$$

Convertitore FORWARD multi-uscita

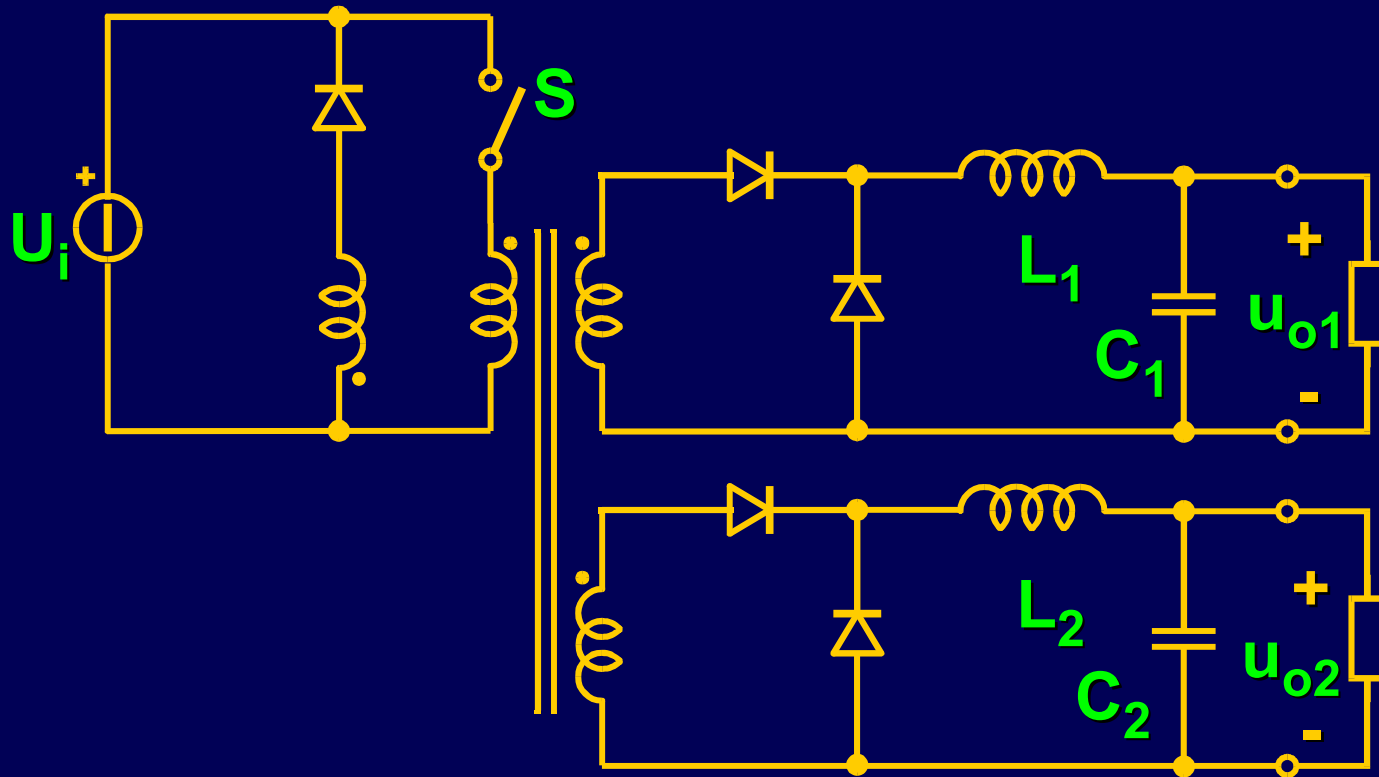


Convertitore FORWARD multi-uscita



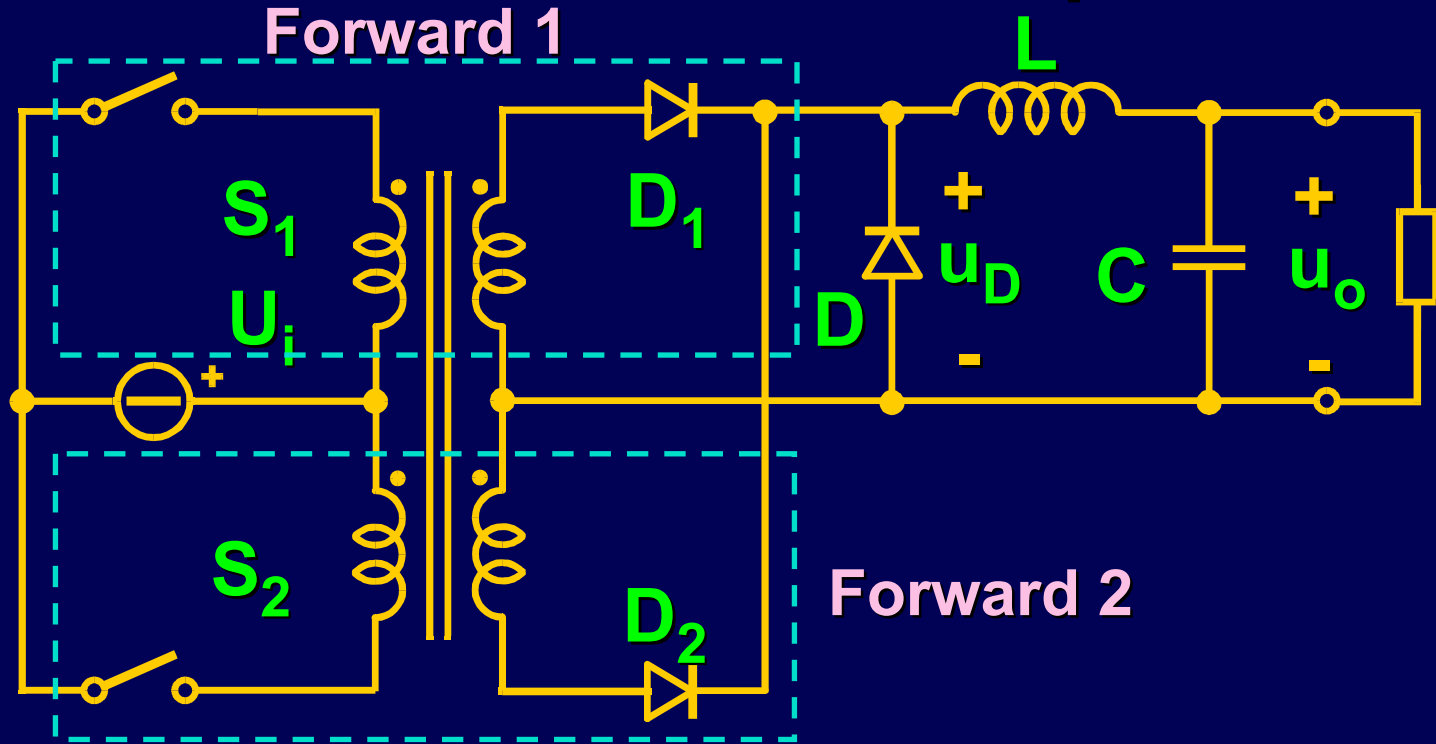
Le tensioni di uscita sono tra loro vincolate dai rapporti spire del trasformatore

Convertitore FORWARD multi-uscita



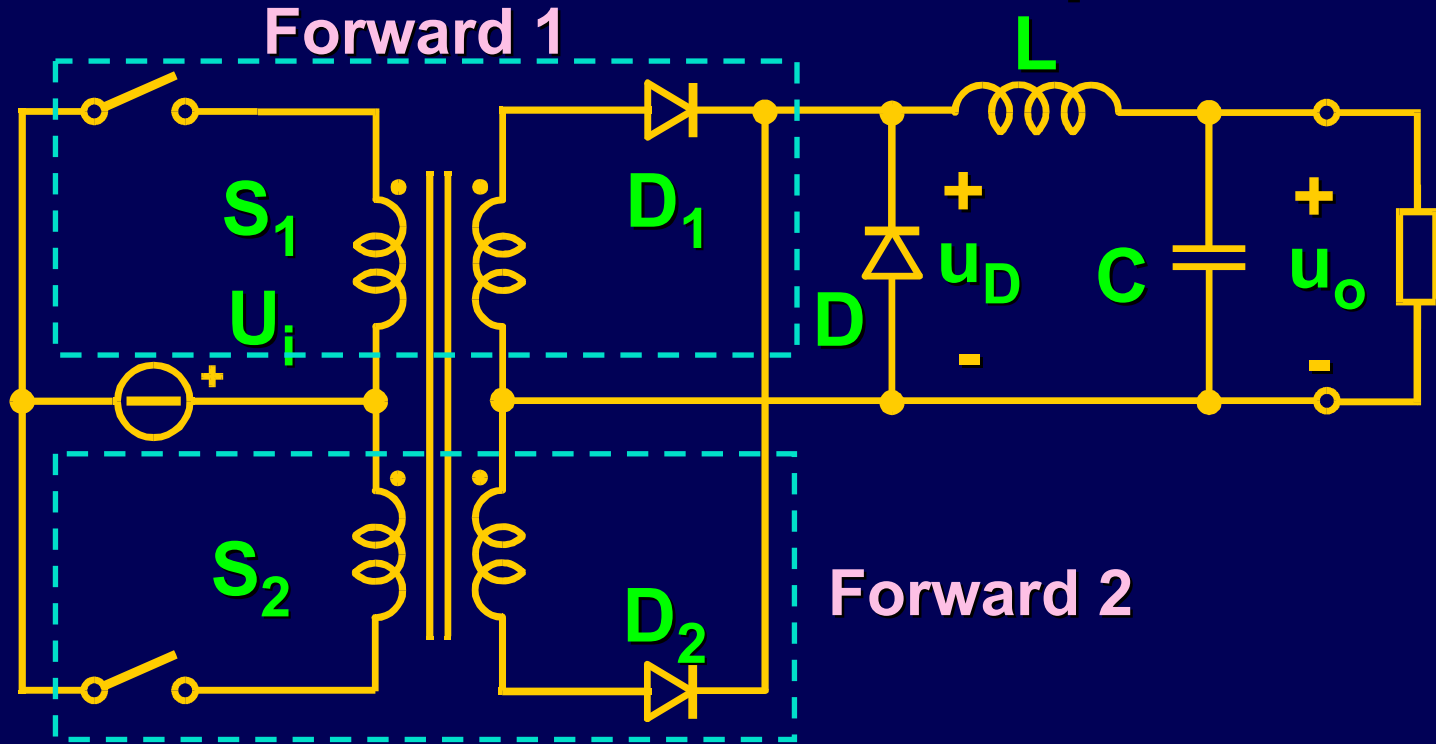
Le induttanze di filtro hanno c.d.t. resistive che dipendono dalle correnti di uscita. Ciò limita la precisione della regolazione.

Convertitore Push-pull



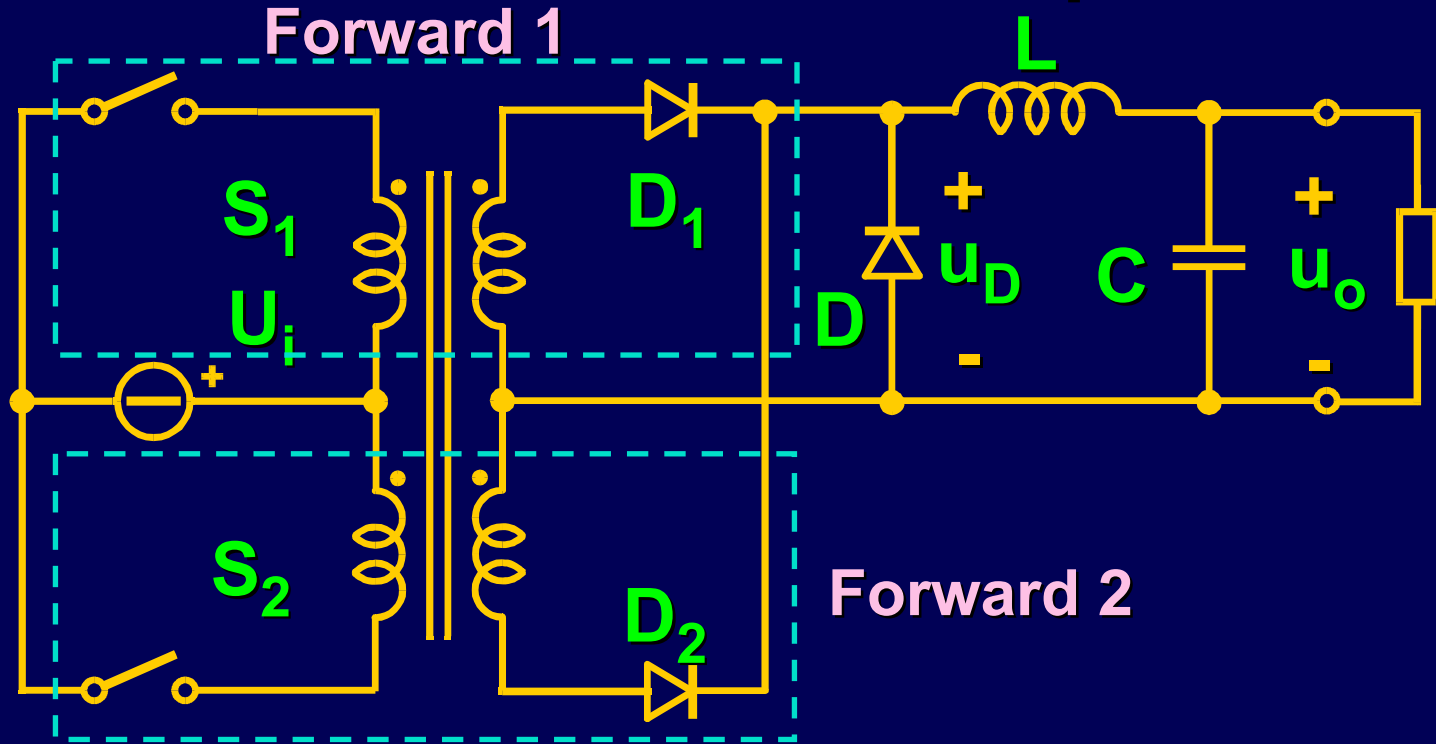
Il convertitore push-pull include due convertitori forward che funzionano a cicli alterni

Convertitore Push-pull



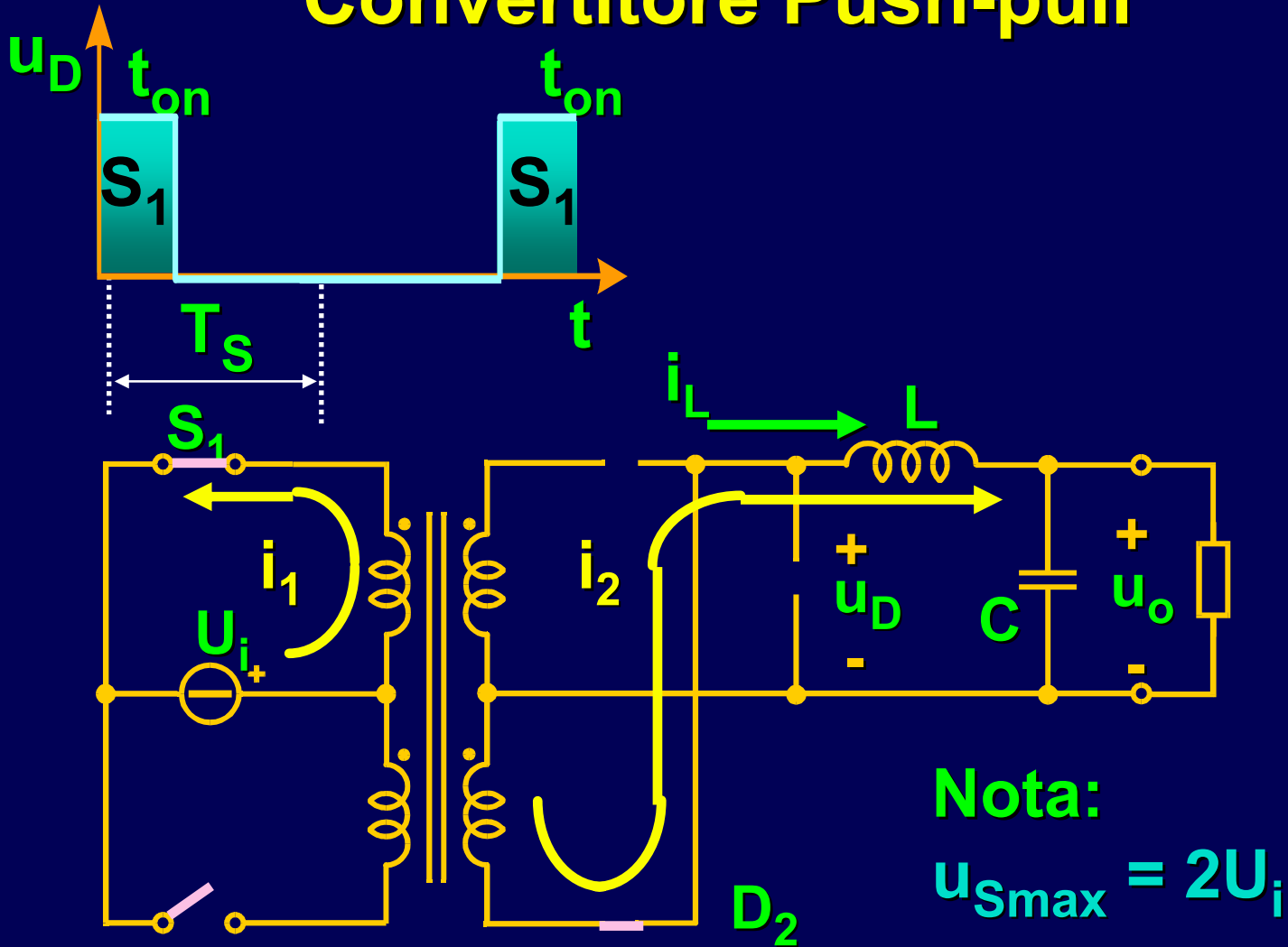
Gli avvolgimenti di ricircolo non sono necessari perchè i due convertitori hanno gli avvolgimenti accoppiati per flussi discordi

Convertitore Push-pull

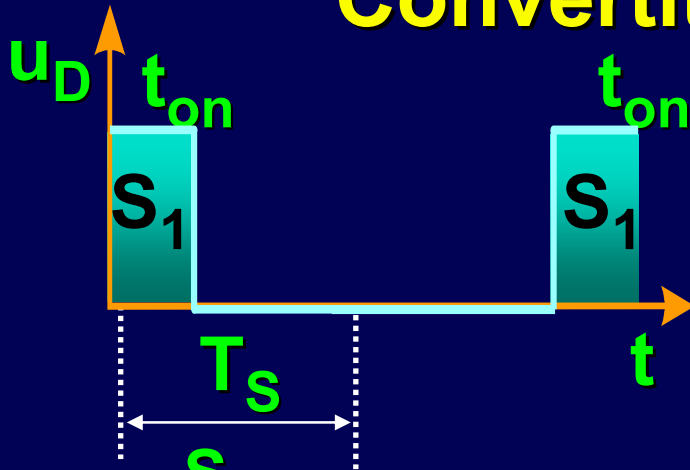


Ciascun avvolgimento primario funziona da circuito di ricircolo per l'altro primario

Convertitore Push-pull



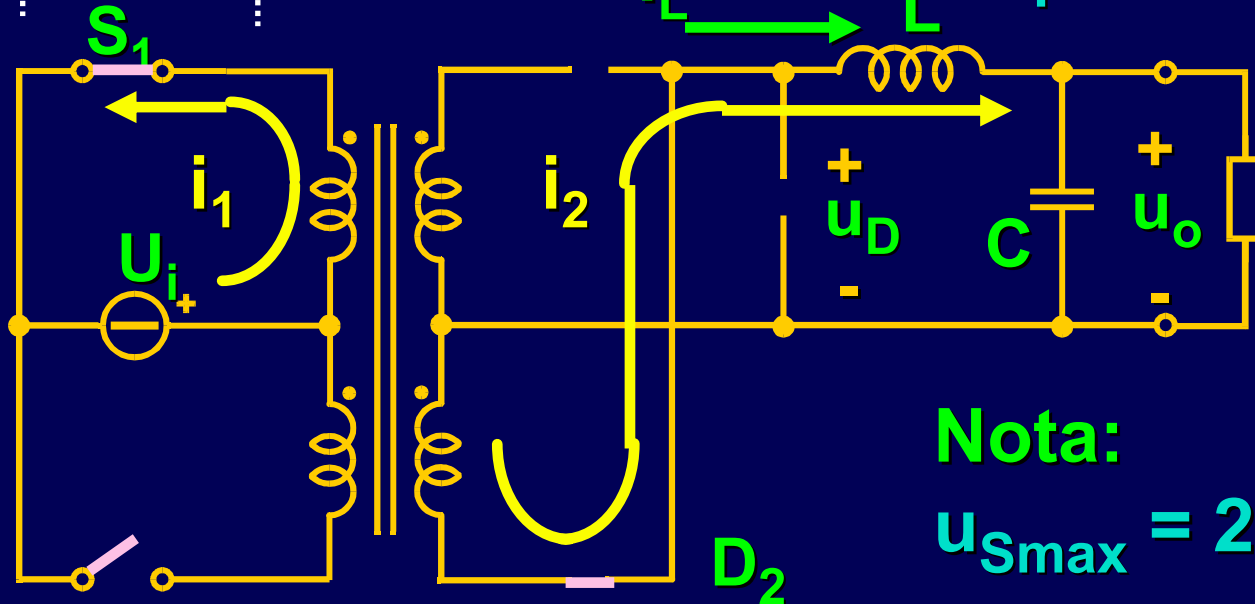
Convertitore Push-pull



$$u_1 = -U_i$$

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

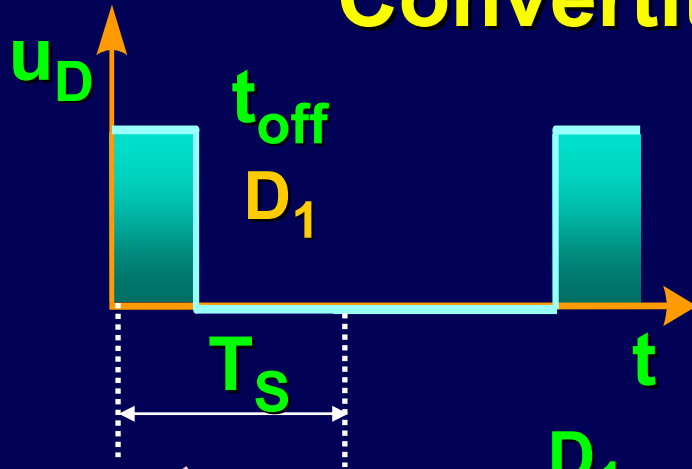
$$i_1 = i_L \cdot \frac{N_2}{N_1} + i_\mu$$



Nota:

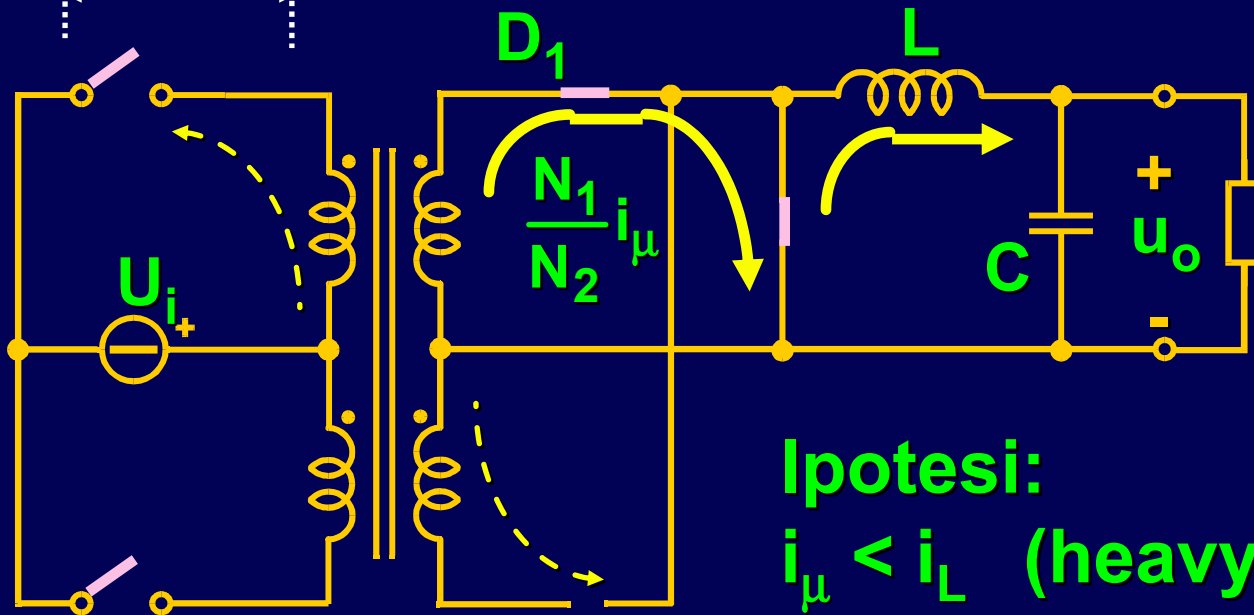
$$u_{Smax} = 2U_i$$

Convertitore Push-pull



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

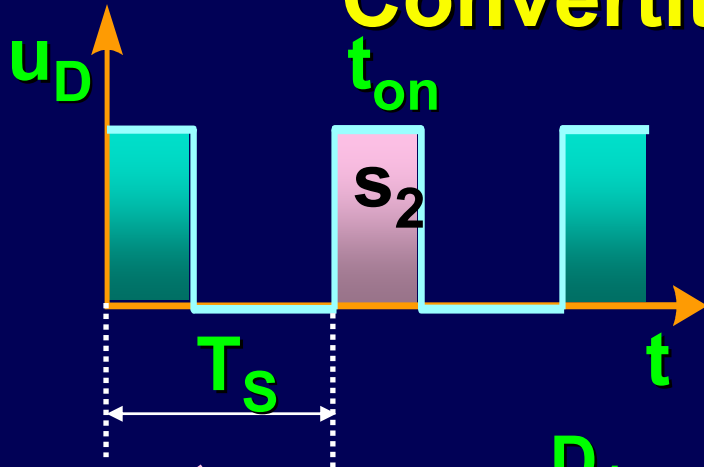
$$i_1 = 0 \quad i_2 = \frac{N_1}{N_2} i_\mu$$



Ipotesi:

$$i_\mu < i_L \quad (\text{heavy load})$$

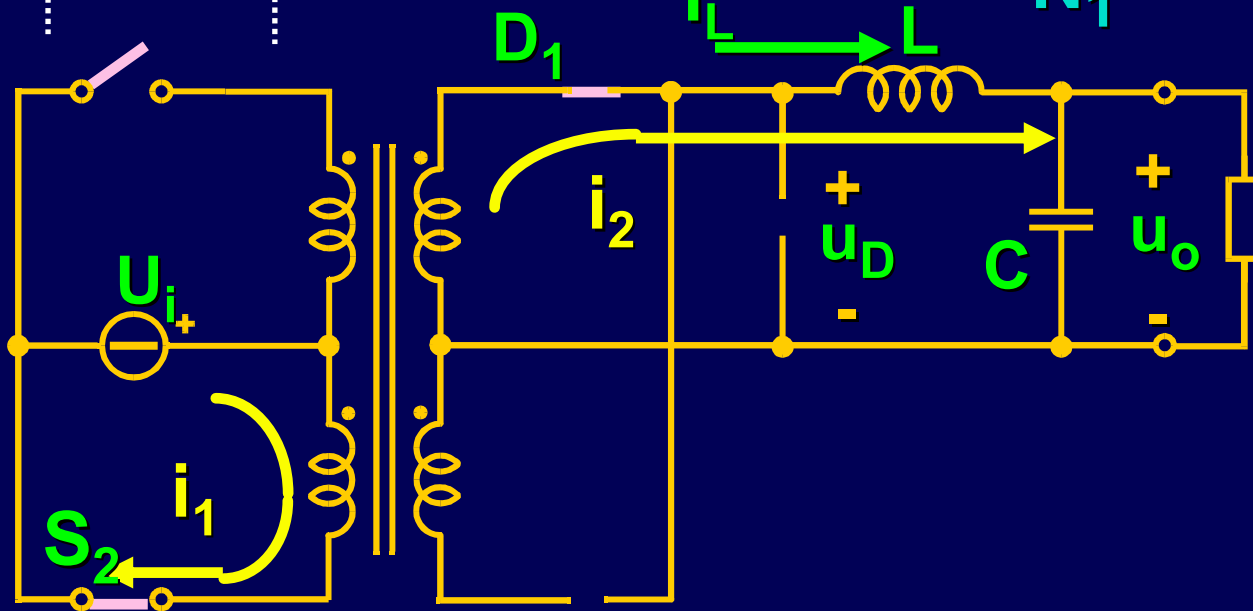
Convertitore Push-pull



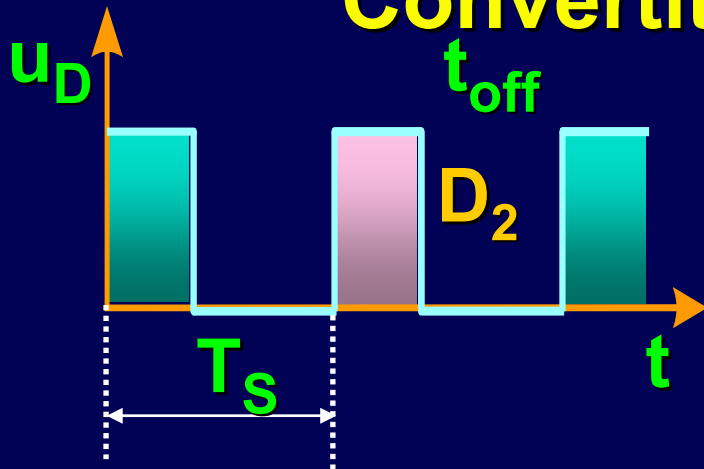
$$u_1 = U_i$$

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

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

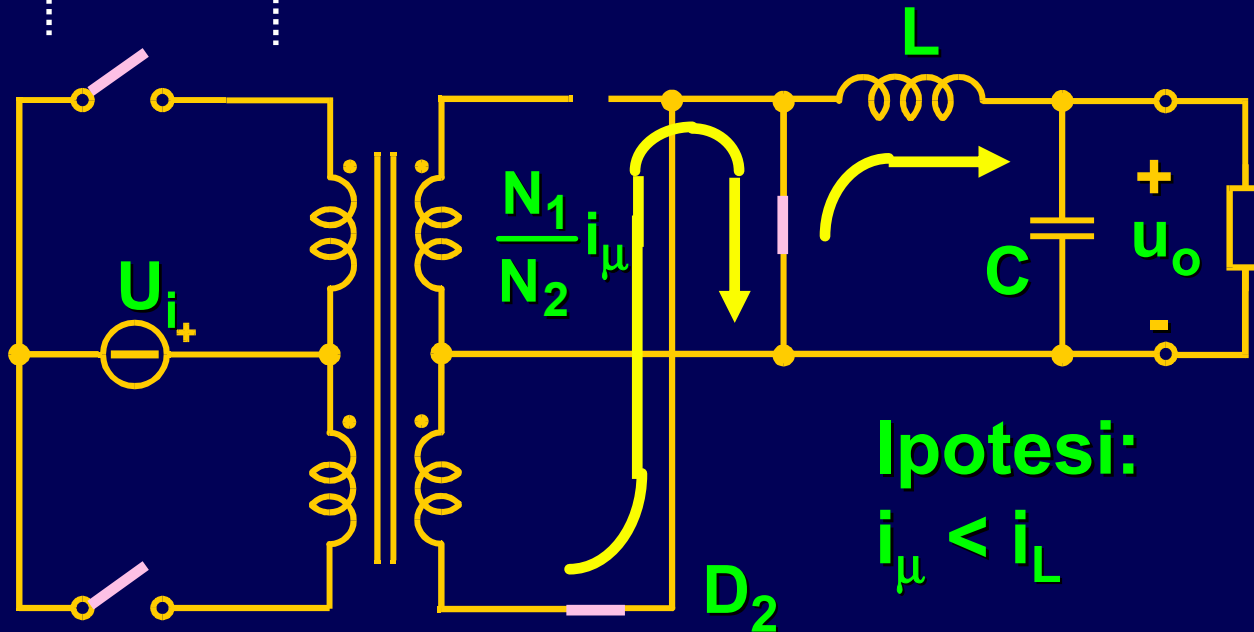


Convertitore Push-pull



$$u_2 = 0 \quad \Phi = \cos t$$

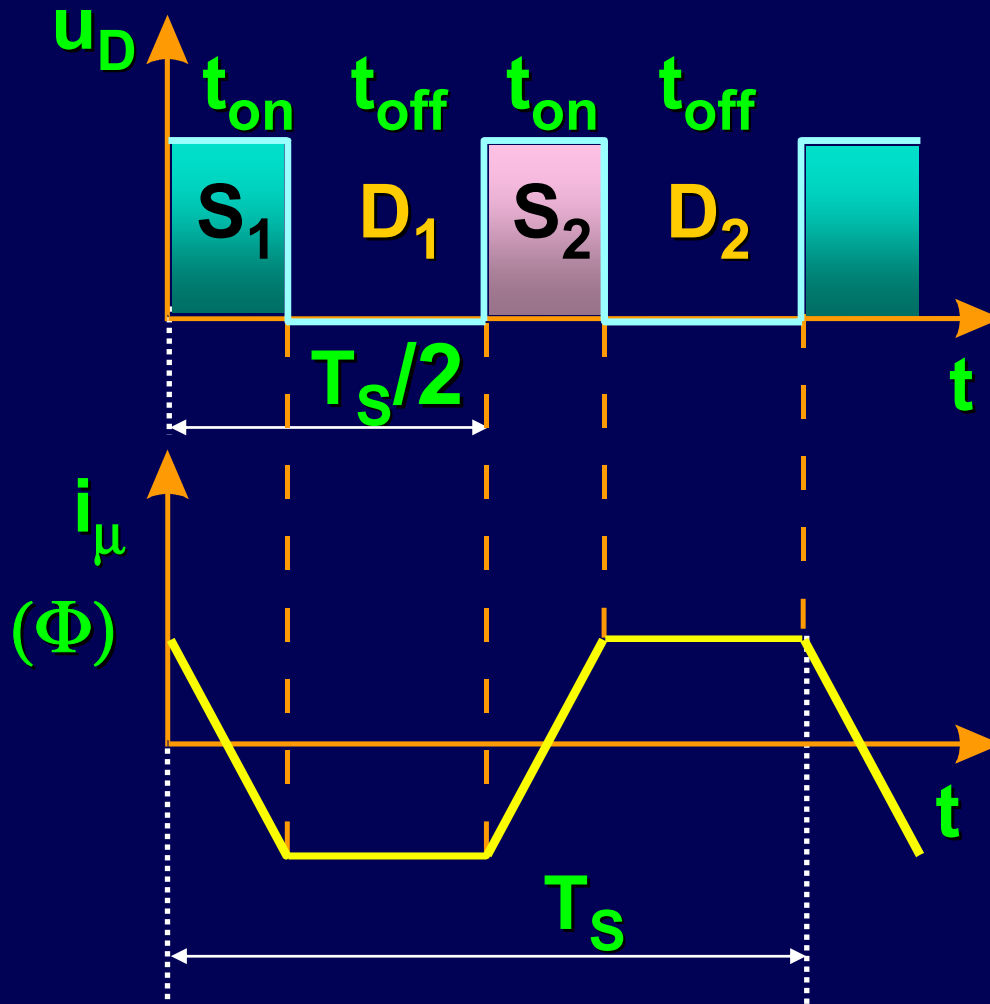
$$i_1 = 0 \quad i_L = \frac{N_1}{N_2} i_\mu$$



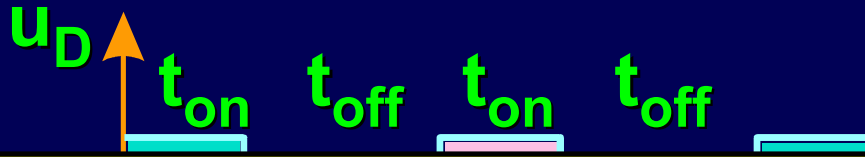
Ipotesi:

$$i_\mu < i_L$$

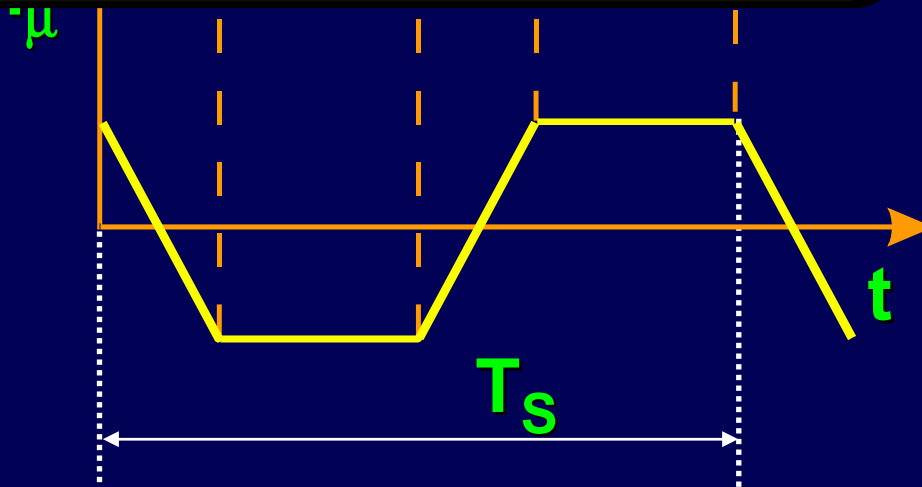
Convertitore Push-pull



Convertitore Push-pull



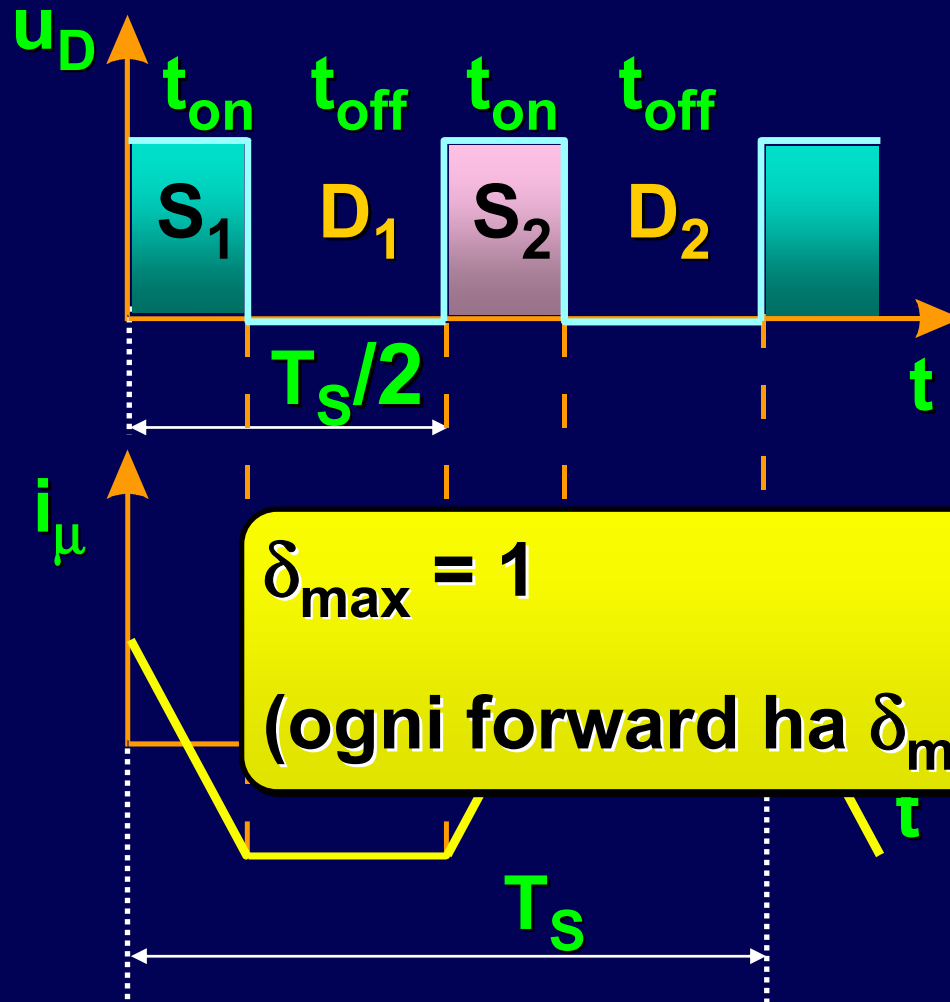
La frequenza di lavoro del trasformatore è pari alla frequenza di commutazione f_s



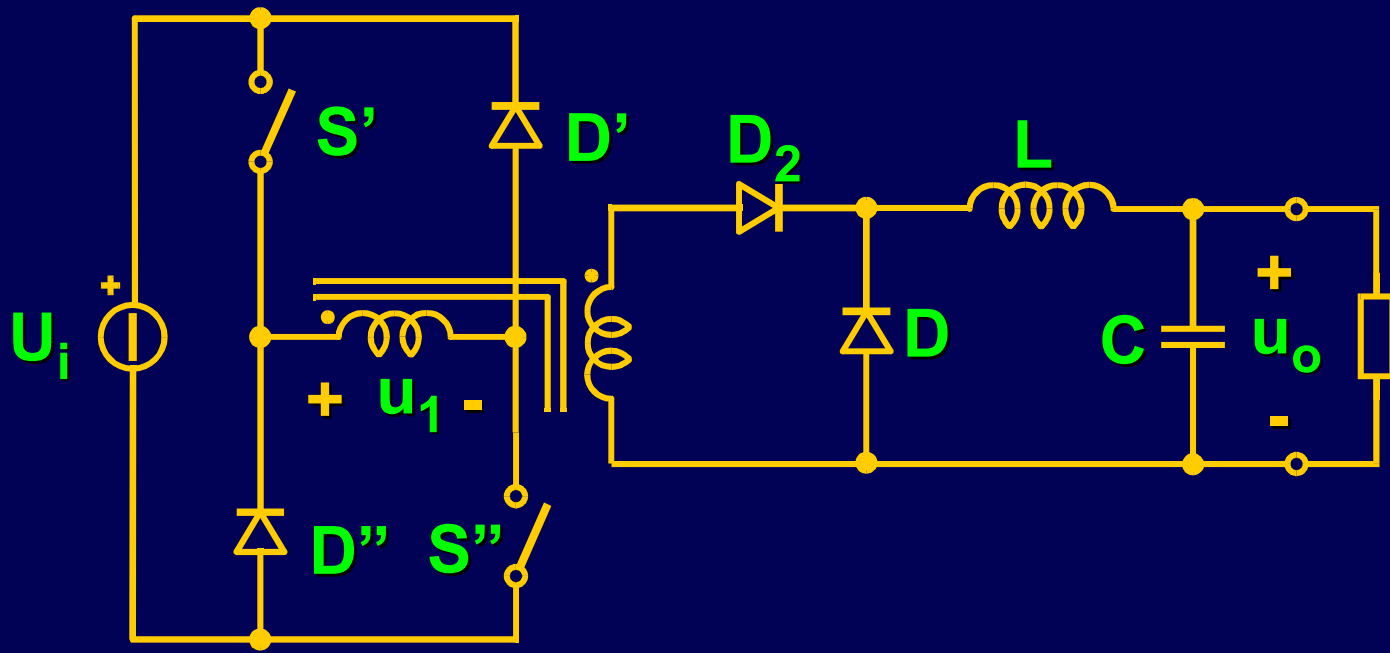
Convertitore Push-pull



Convertitore Push-pull



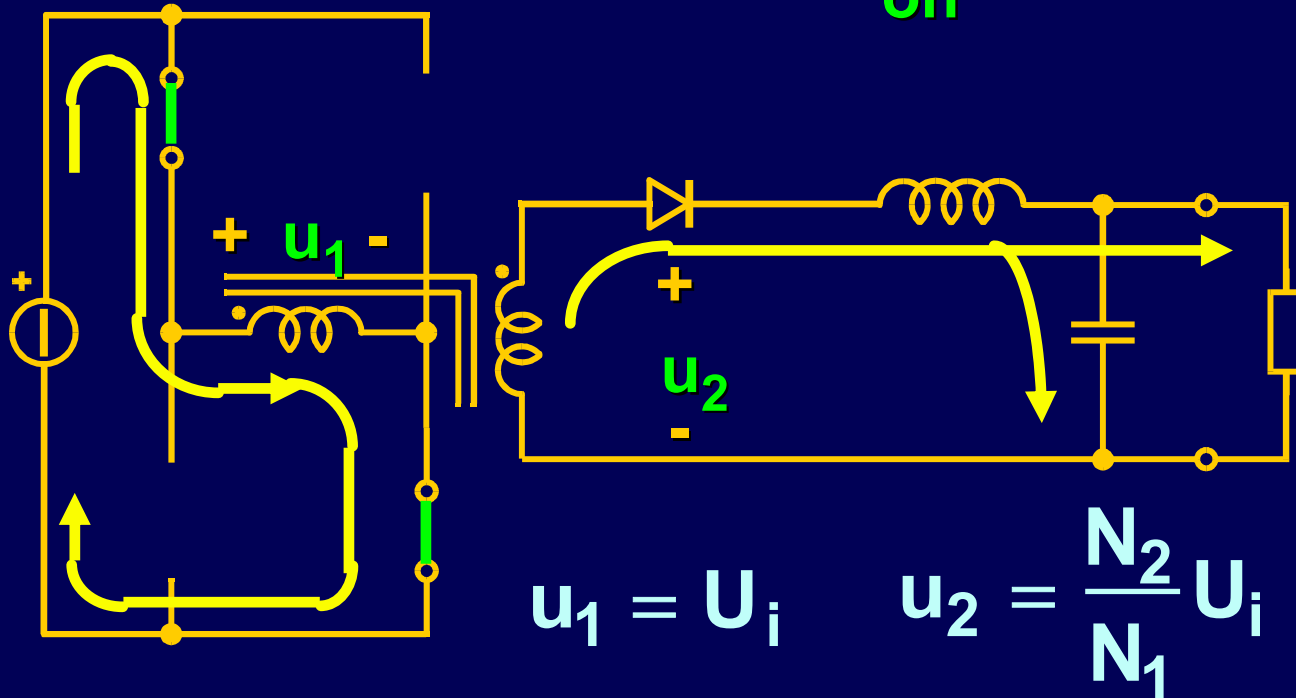
Convertitore Dual Forward



- 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}

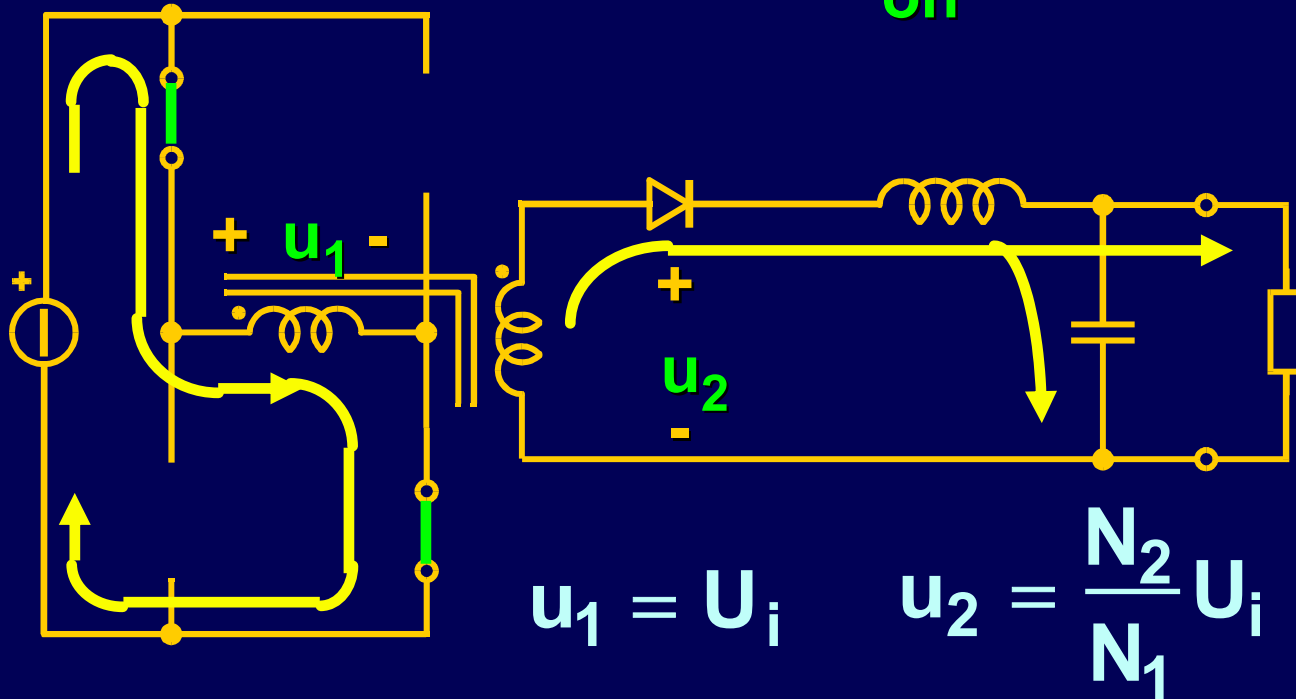


S' e S'' vengono operati assieme

$$u_{1on} = U_i$$

Convertitore Dual Forward

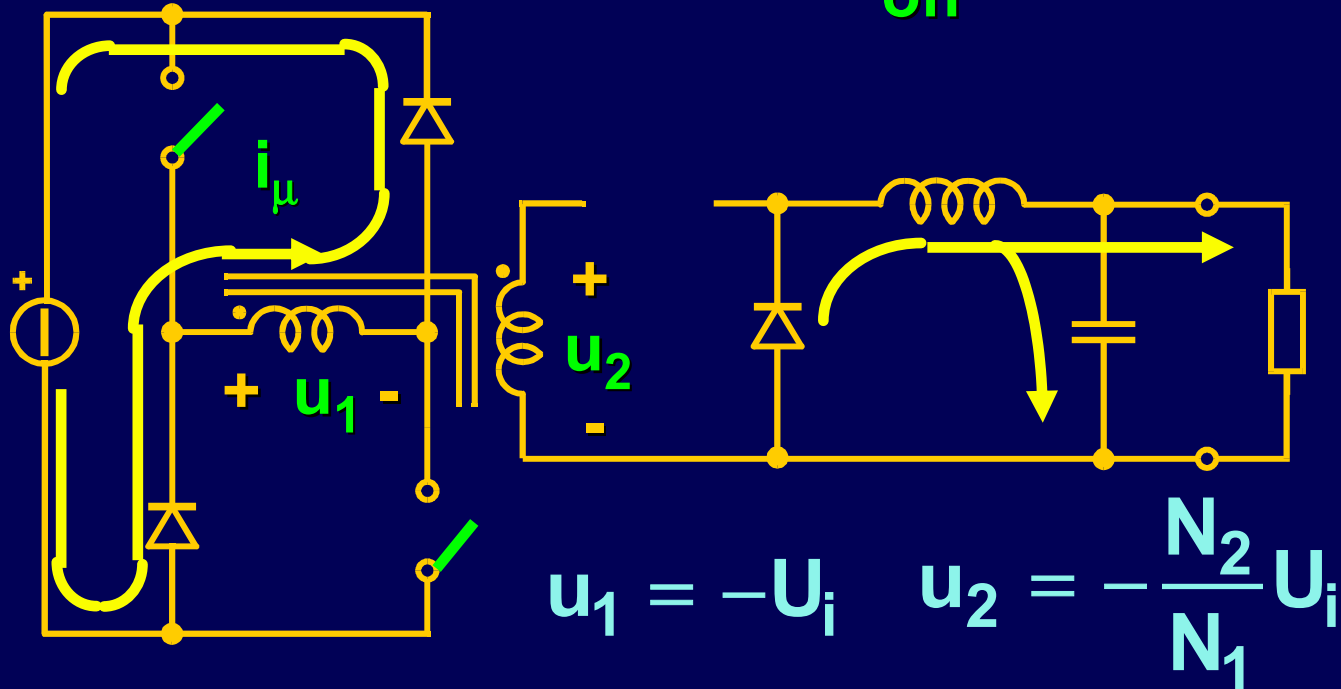
Intervallo t_{on}



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

Convertitore Dual Forward

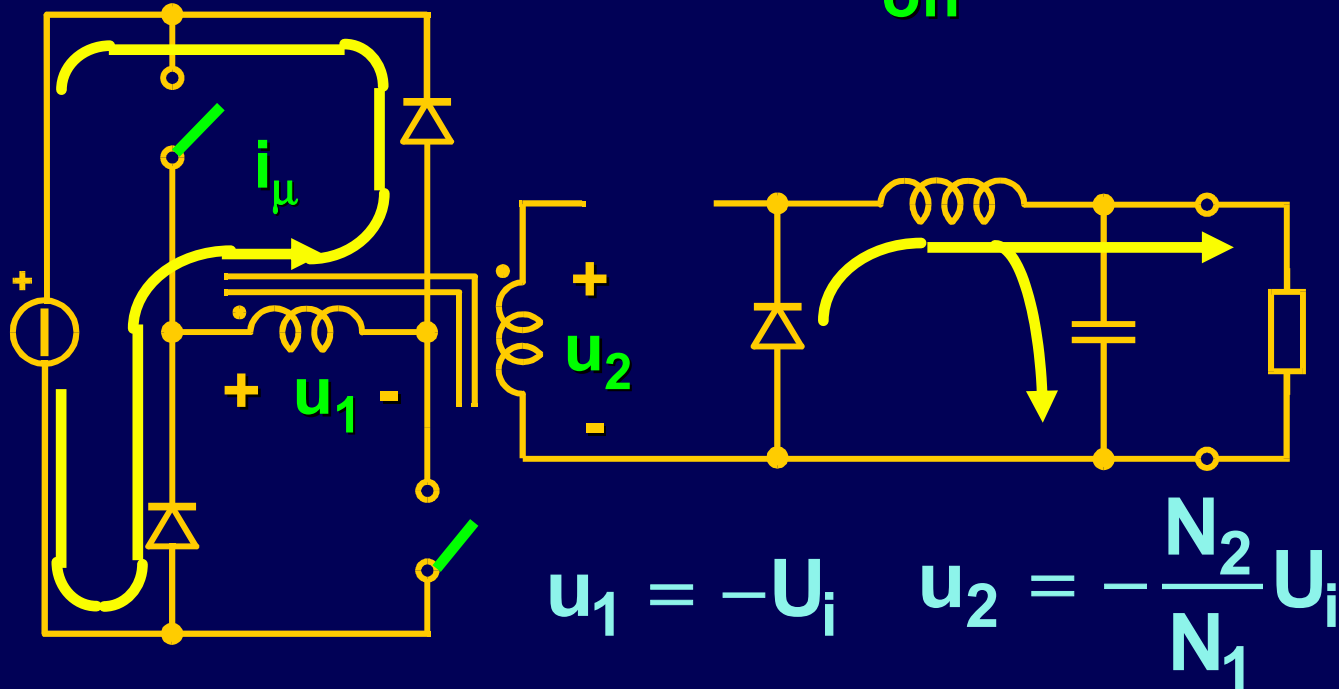
Intervallo t_{off}



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

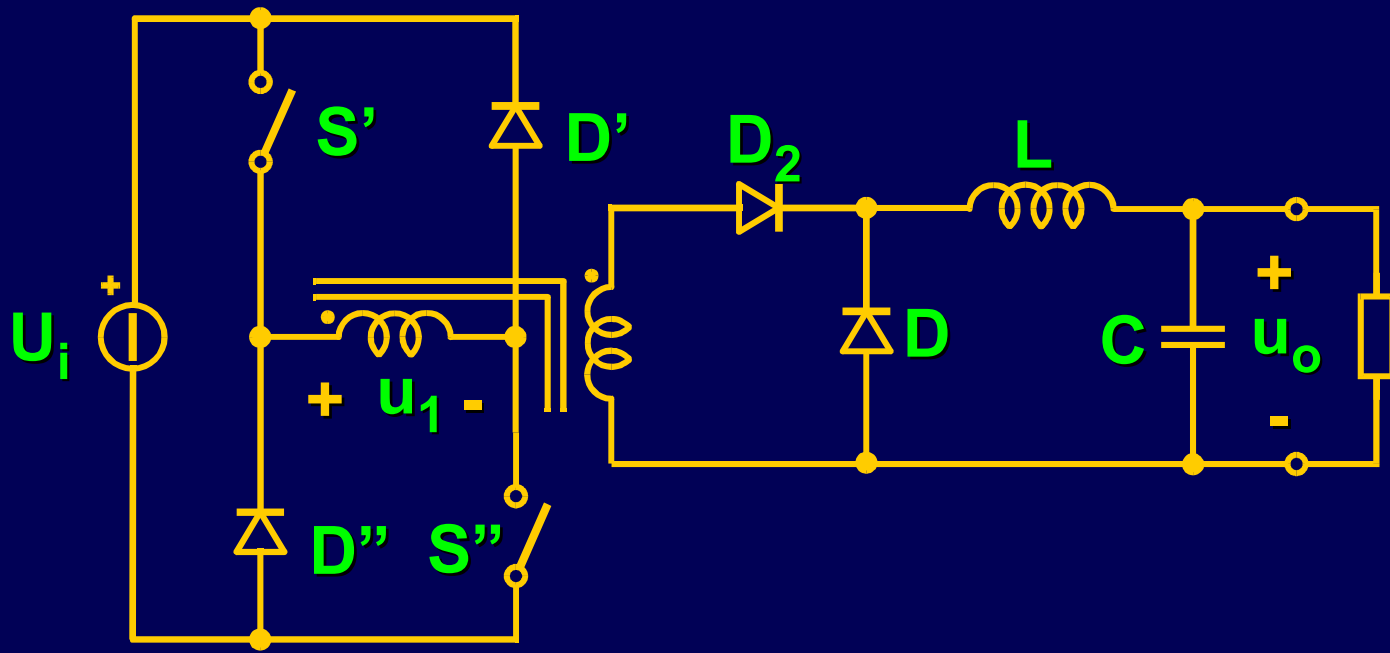
Convertitore Dual Forward

Intervallo t_{off}



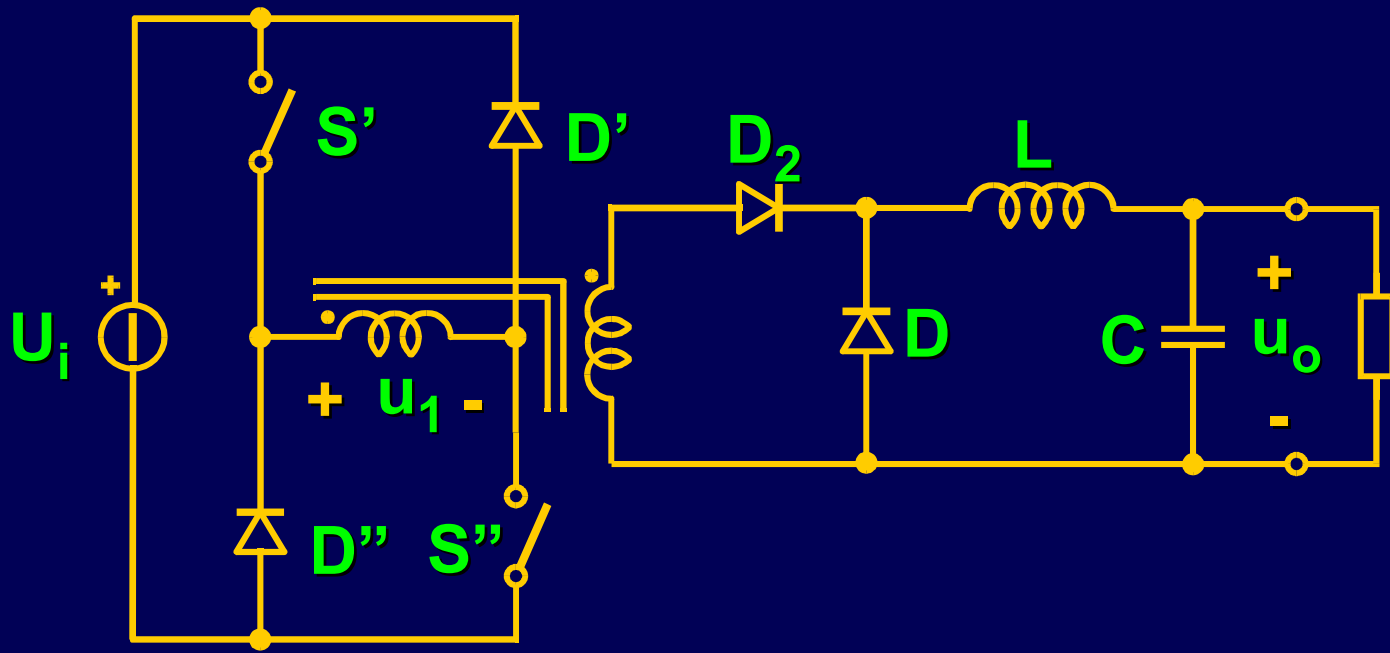
$S' = S'' = D_2 = \text{"off"} , D' = D'' = D = \text{"on"}$

Convertitore Dual Forward



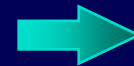
Lato uscita funziona come un convertitore buck

Convertitore Dual Forward



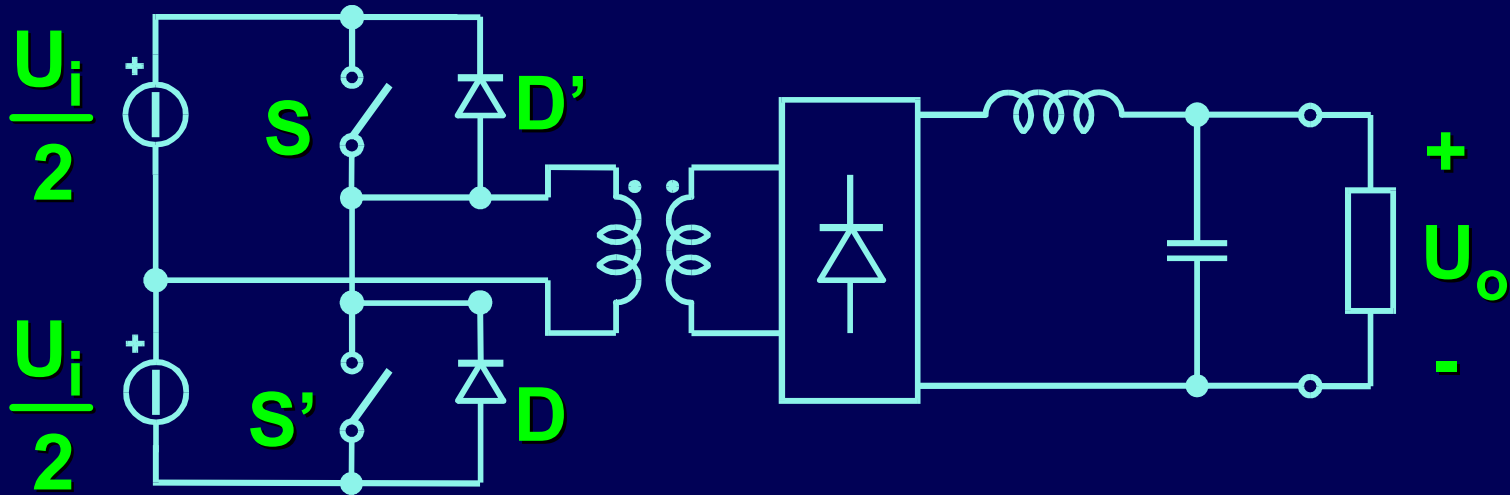
Lato uscita funziona come un convertitore buck

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



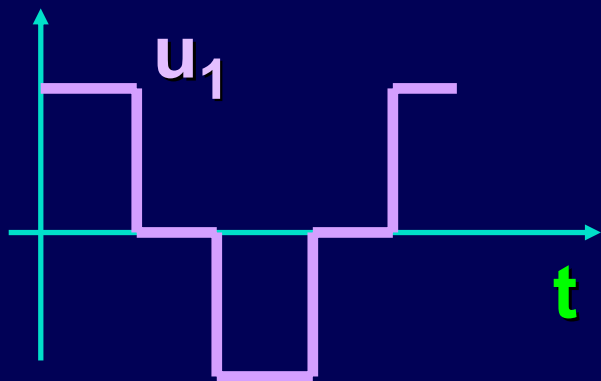
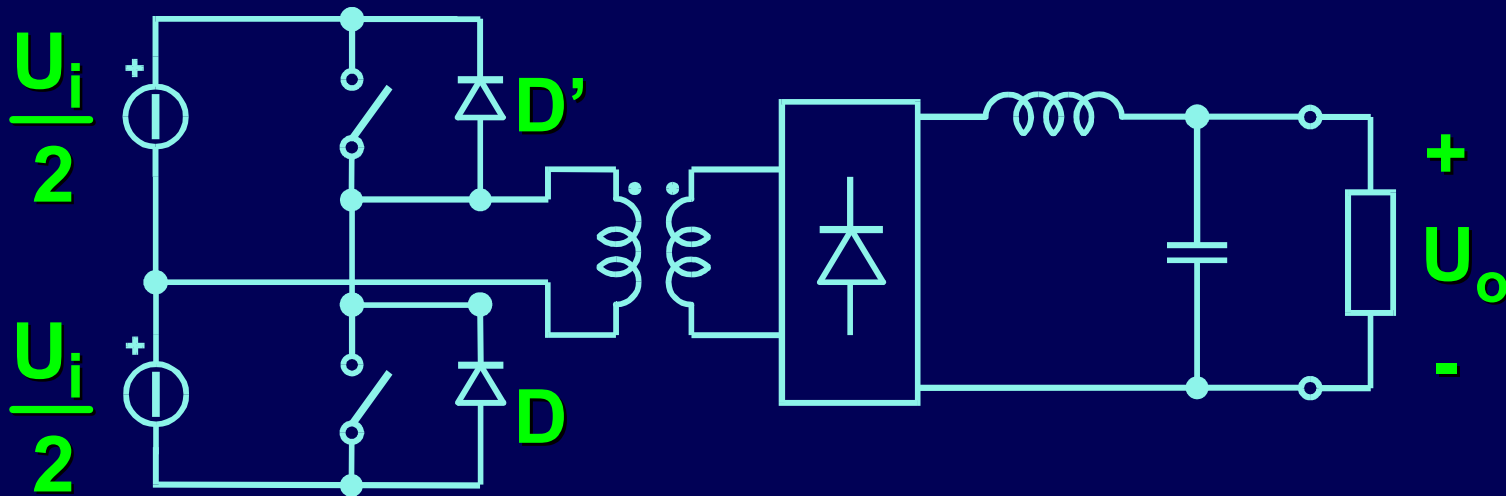
$$\delta \leq 0.5$$

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



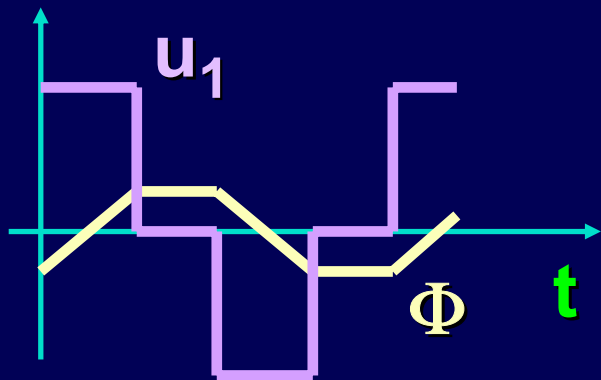
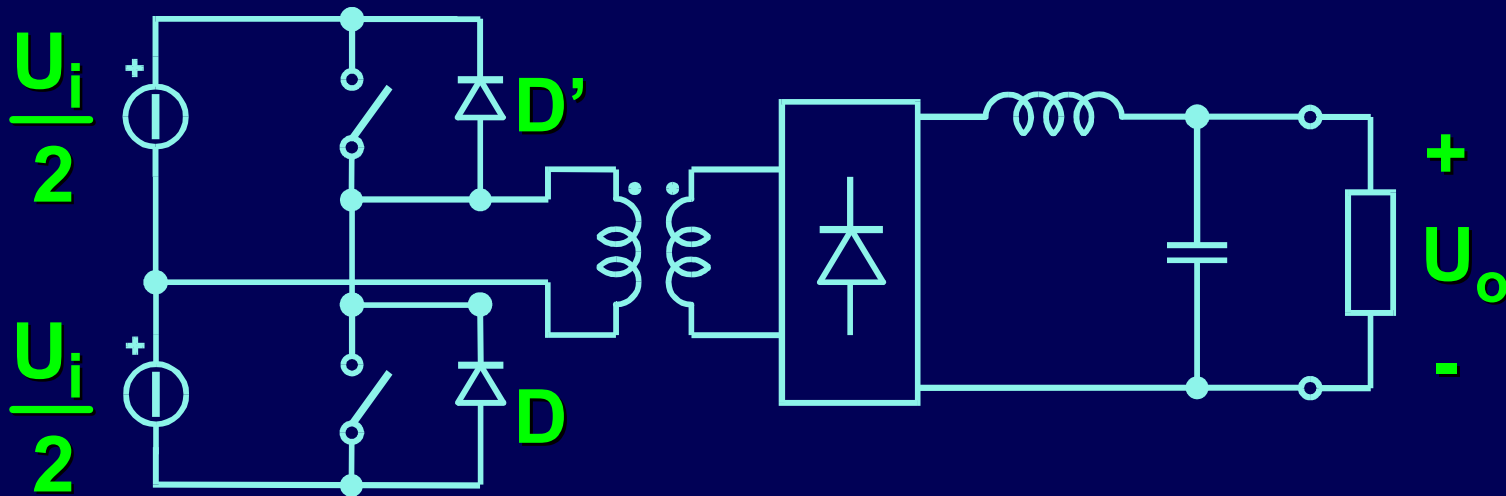
Il funzionamento é lo stesso del convertitore push-pull (S e S' funzionano a cicli alterni)

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



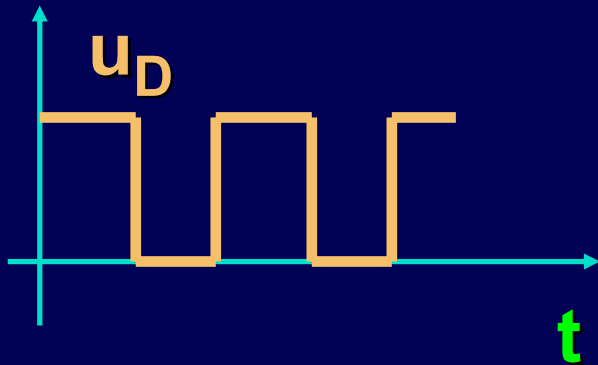
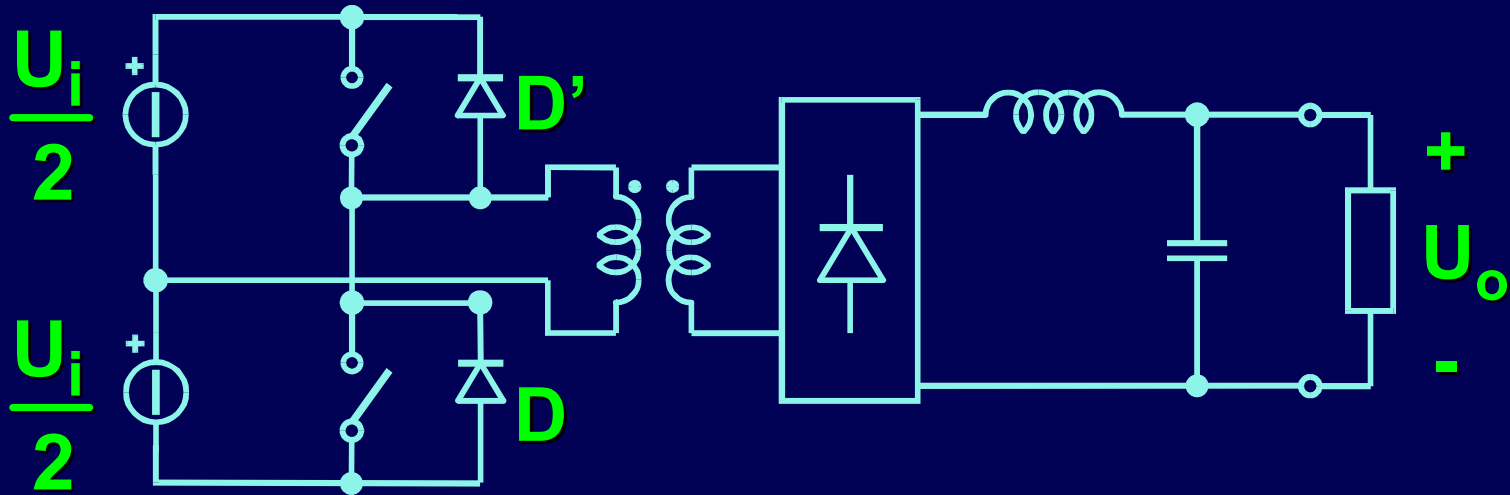
Tensione al primario

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



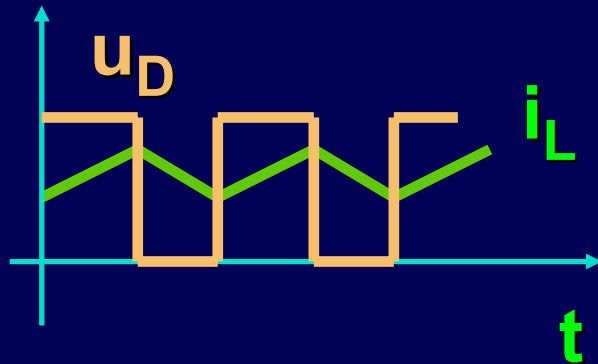
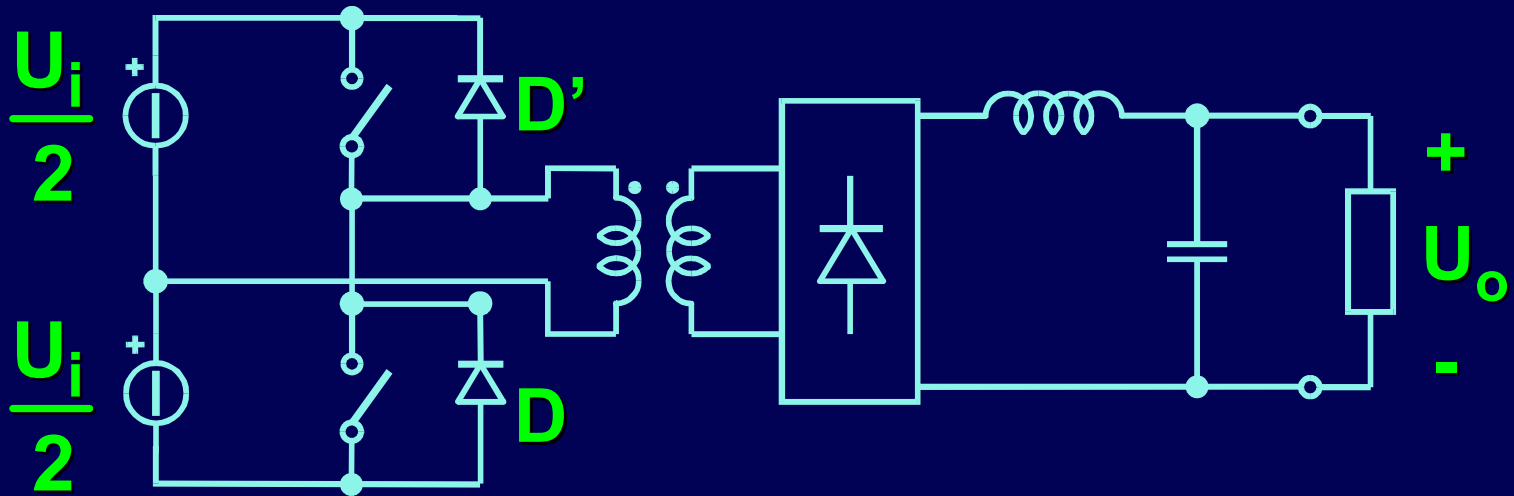
Tensione al primario
Flusso nel trasformatore

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_μ)
- 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_0/P_S) cala di almeno 4 volte