

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

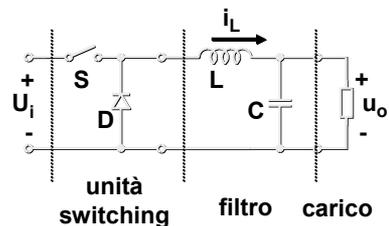
Convertitore Buck con isolamento

Condizioni per l’inserimento di un trasformatore:

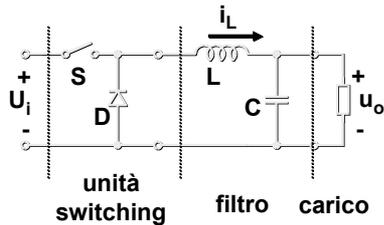
- dev’essere attraversato dall’intera potenza
- dev’essere alimentato da una tensione alternata

NOTA: il convertitore buck non soddisfa queste condizioni

Schema del convertitore Buck (Step-down)



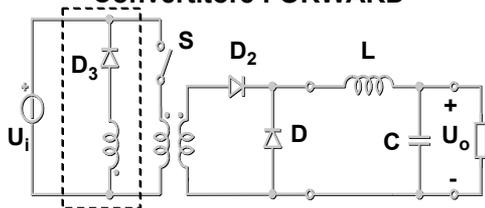
**Schema del convertitore Buck
(Step-down)**



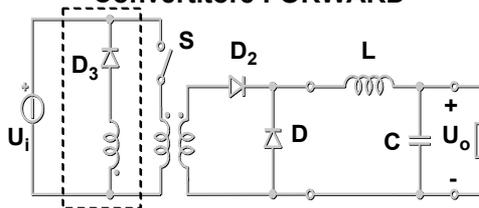
In nessuna sezione la tensione è puramente alternata

**Convertitore buck a trasformatore
Convertitore FORWARD**

**Convertitore buck a trasformatore
Convertitore FORWARD**

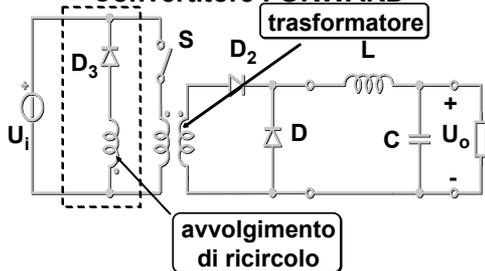


**Convertitore buck a trasformatore
Convertitore FORWARD**

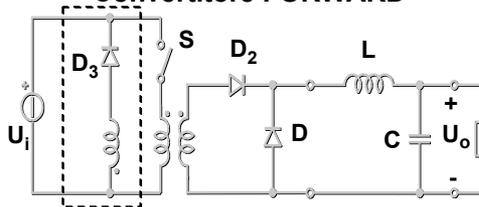


Lo stadio d'uscita è quello di un buck
In ingresso c'è l'interruttore in serie
all'alimentazione

**Convertitore buck a trasformatore
Convertitore FORWARD**



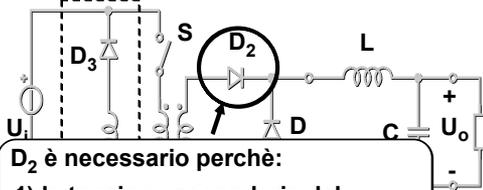
**Convertitore buck a trasformatore
Convertitore FORWARD**



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

Convertitore buck a trasformatore

Convertitore FORWARD

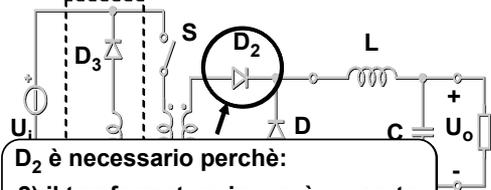


D_2 è necessario perchè:

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

Convertitore buck a trasformatore

Convertitore FORWARD

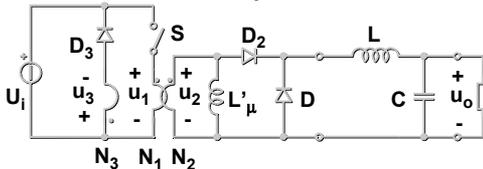


D_2 è necessario perchè:

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

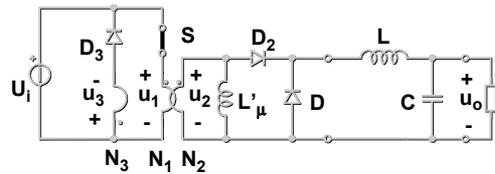
Convertitore FORWARD

Schema equivalente



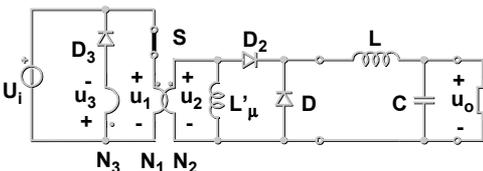
Per semplicità si considerano gli avvolgimenti perfettamente accoppiati ($L_d = 0$). Questa ipotesi assai semplificativa non è verificata in pratica.

Intervallo t_{on} :



$$S \text{ on} \Rightarrow u_1 = U_i$$

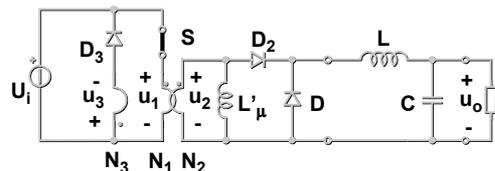
Intervallo t_{on} :



$$S \text{ on} \Rightarrow u_1 = U_i$$

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

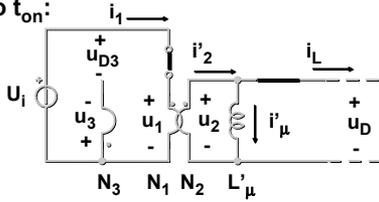
Intervallo t_{on} :



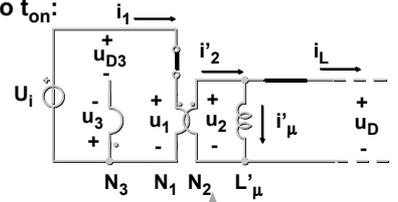
$$S \text{ on} \Rightarrow u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \Rightarrow D_2 \text{ on} - D \text{ off}$$

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

Intervallo t_{on} :

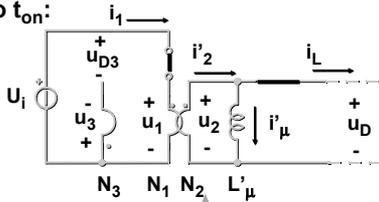


Intervallo t_{on} :



$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \Rightarrow \begin{matrix} u_D \\ t_{on} \end{matrix} \begin{matrix} N_2 U_i \\ N_1 \end{matrix}$$

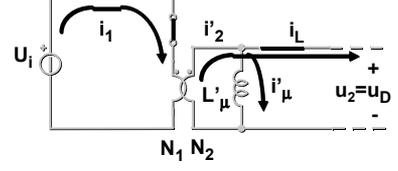
Intervallo t_{on} :



$$u_D = u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i \Rightarrow \begin{matrix} u_D \\ t_{on} \end{matrix} \begin{matrix} N_2 U_i \\ N_1 \end{matrix}$$

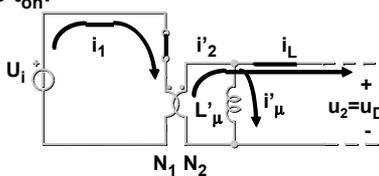
$$u_{D3} = u_1 + u_3 = U_i \left(1 + \frac{N_3}{N_1} \right)$$

Intervallo t_{on} :



$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i'_2, \quad i'_2 = i_L + i'_\mu$$

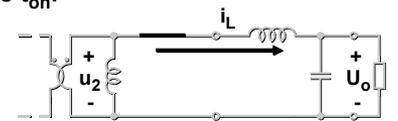
Intervallo t_{on} :



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

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

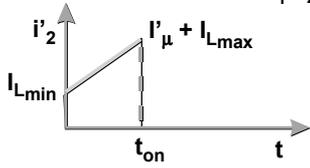
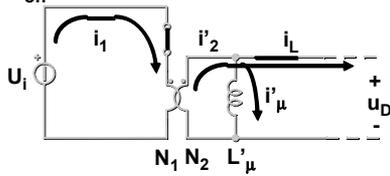
Intervallo t_{on} :



$$i_{Lmax} = \left(\frac{N_2}{N_1} U_i - U_o \right) \frac{t_{on}}{L} + i_{Lmin}$$

$$i_L = \frac{u_2 - U_o}{L} t + i_{Lmin}$$

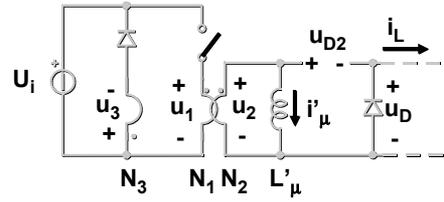
Intervallo t_{on} :



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

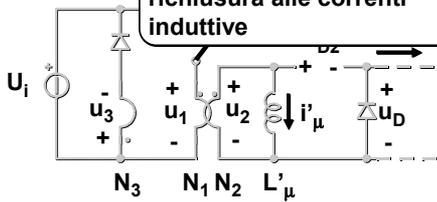
$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i'_2$$

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



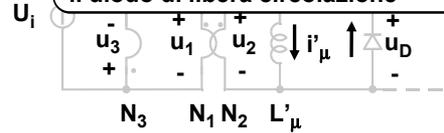
Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off}
(A - reset)

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



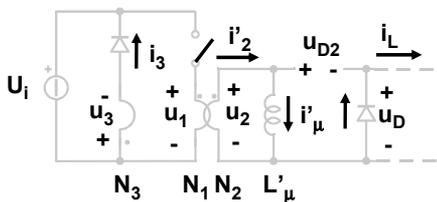
Convertitore FORWARD: Intervallo t_{off}
(A - reset)

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



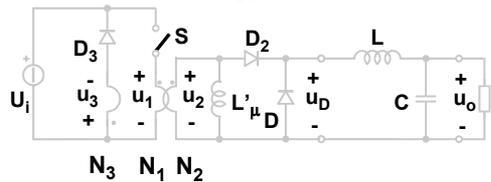
$S = D_2 = \text{"off"}, D = D_3 = \text{"on"}$

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

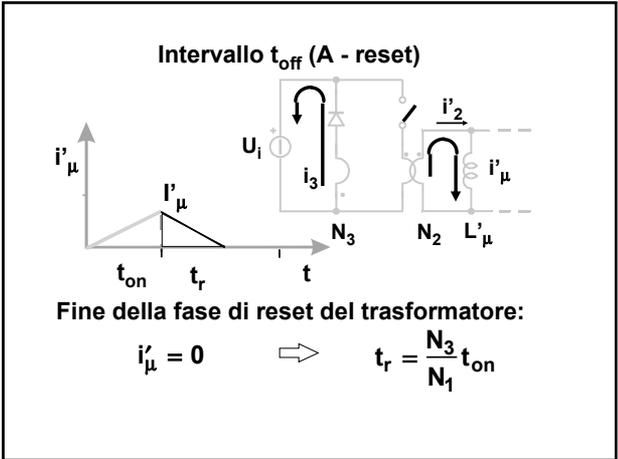
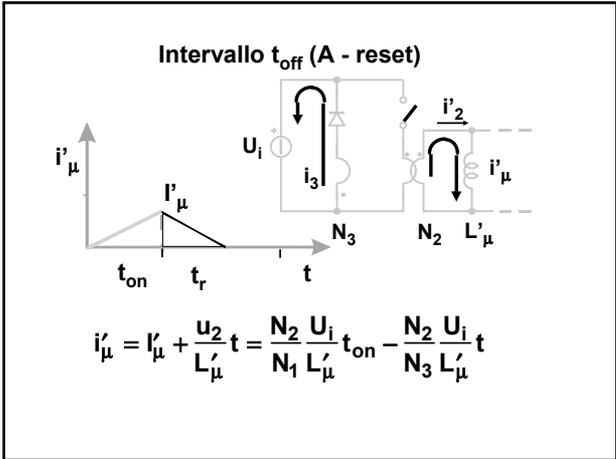
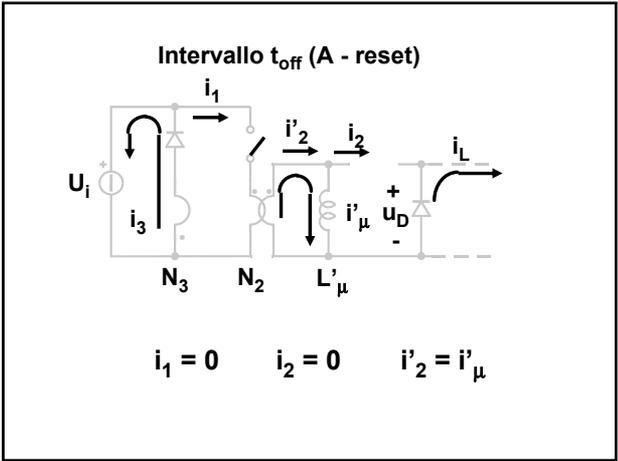
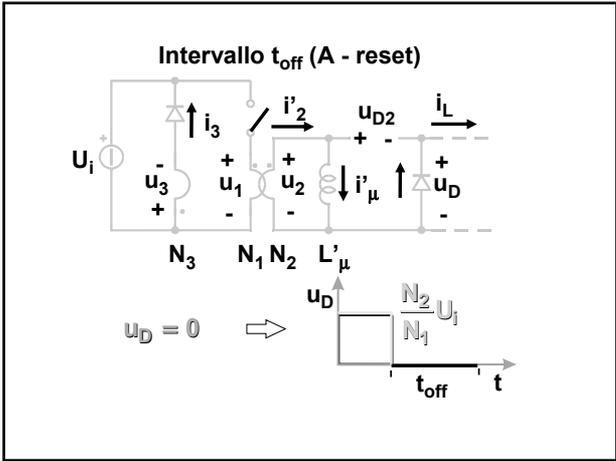
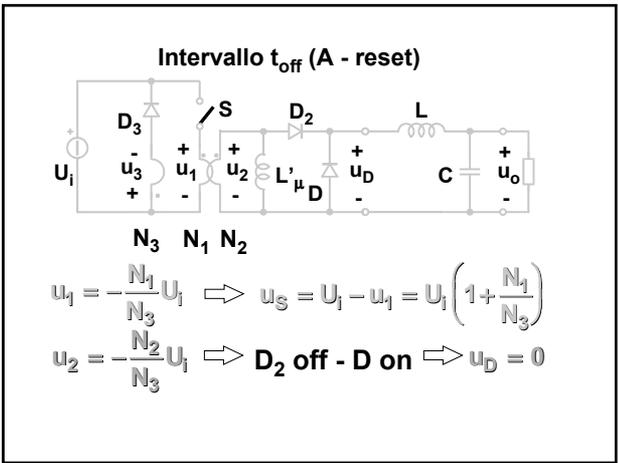
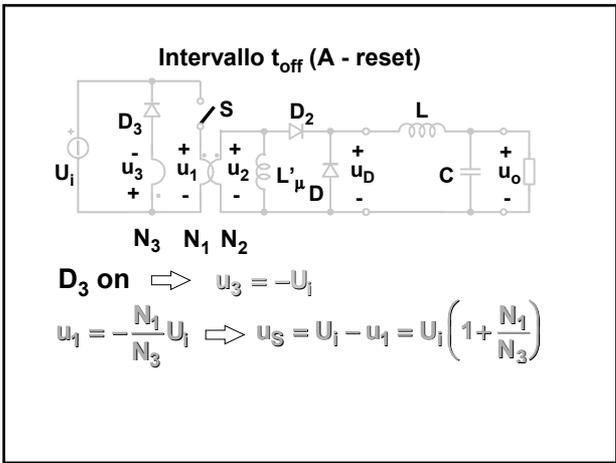


$S = D_2 = \text{"off"}, D = D_3 = \text{"on"}$

Intervallo t_{off} (A - reset)

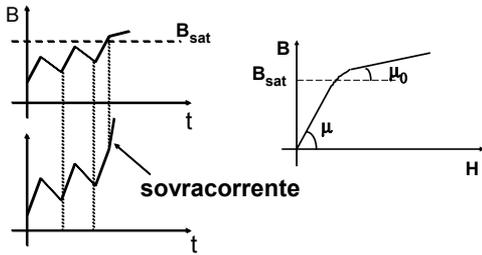


$D_3 \text{ on} \Rightarrow u_3 = -U_i$

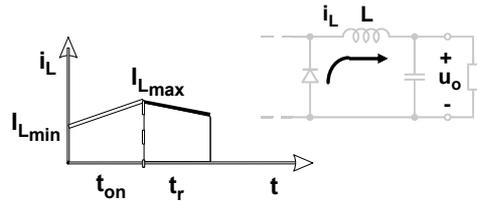


NOTA

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

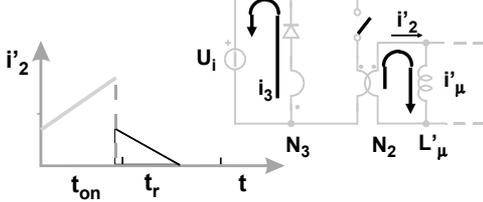


Intervallo t_{off} (A - reset)



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

Intervallo t_{off} (A - reset)



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

NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:

$$t_r \leq t_{off} \Rightarrow \frac{N_3}{N_1} t_{on} \leq T_S - t_{on}$$

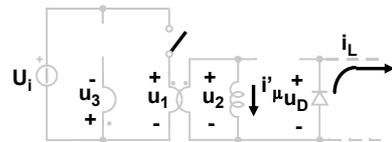
NOTA: Per evitare la saturazione del trasformatore deve essere:

$$t_r \leq t_{off} \Rightarrow \frac{N_3}{N_1} t_{on} \leq T_S - t_{on}$$

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

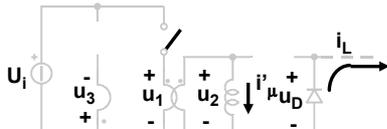
Il valore del duty-cycle è limitato superiormente

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



S, D₂, D₃ OFF

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

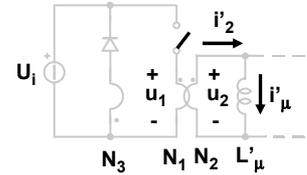


$$i'_{\mu} = 0 \Rightarrow u_1 = u_2 = u_3 = 0$$

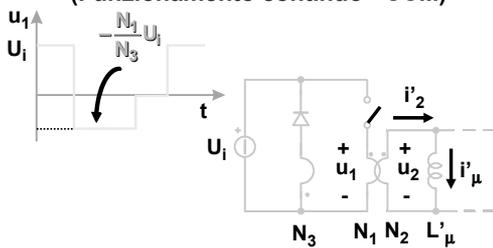
S, D₂, D₃ OFF

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

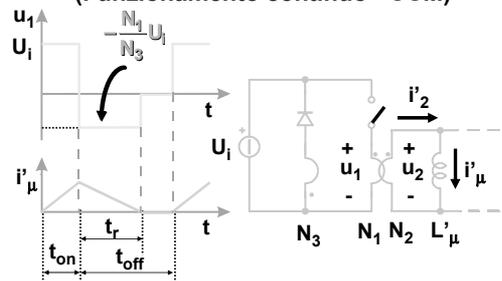
**Forme d'onda complessive del
convertitore FORWARD
(Funzionamento continuo - CCM)**



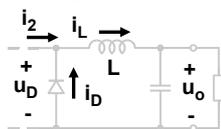
**Forme d'onda complessive del
convertitore FORWARD
(Funzionamento continuo - CCM)**



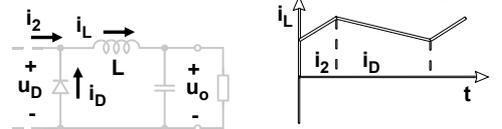
**Forme d'onda complessive del
convertitore FORWARD
(Funzionamento continuo - CCM)**



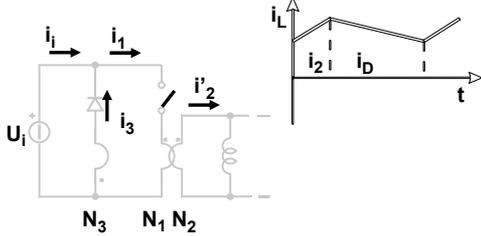
**Forme d'onda complessive del
convertitore FORWARD
(Funzionamento continuo - CCM)**



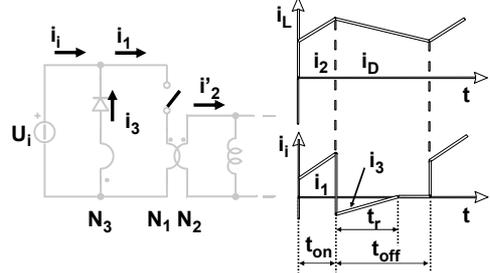
**Forme d'onda complessive del
convertitore FORWARD
(Funzionamento continuo - CCM)**



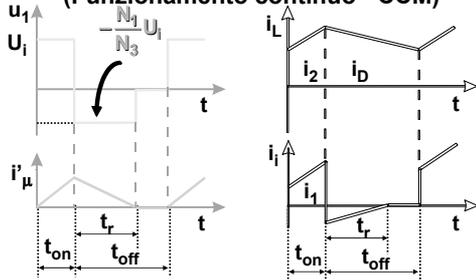
Forme d'onda complessive del convertitore FORWARD (Funzionamento continuo - CCM)



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

$$U_{S,max} = U_i \frac{N_1 + N_3}{N_3}$$

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

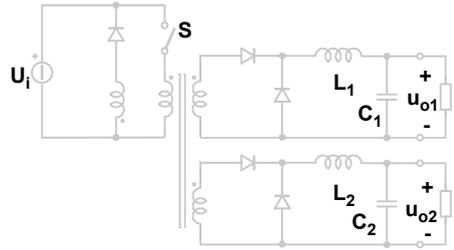
$$P_o = U_{o_{\max}} I_o = \frac{N_2}{N_1} U_i \delta_{\max} I_o$$

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

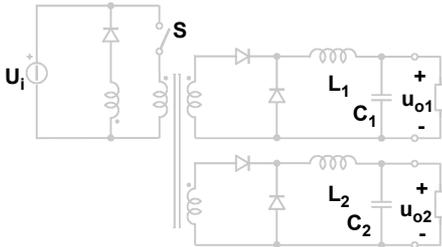


$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{N_1 N_3}{(N_1 + N_3)^2} \leq \frac{1}{4}$$

Convertitore FORWARD multi-uscita

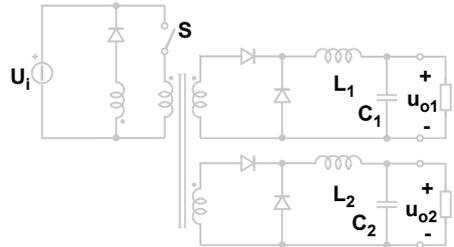


Convertitore FORWARD multi-uscita



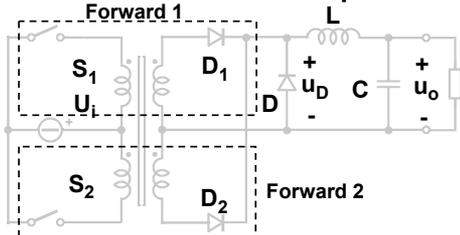
Le tensioni di uscita sono tra loro vincolate dai rapporti spire del trasformatore

Convertitore FORWARD multi-uscita



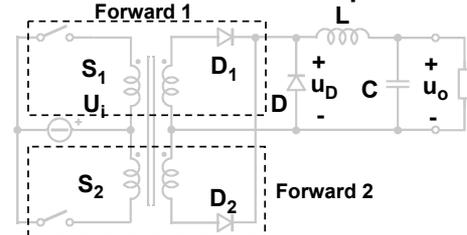
Le induttanze di filtro hanno c.d.t. resistive che dipendono dalle correnti di uscita. Ciò limita la precisione della regolazione.

Convertitore Push-pull Forward



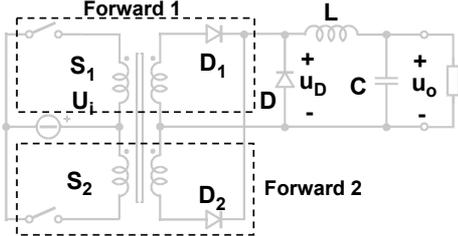
Il convertitore push-pull include due convertitori forward che funzionano a cicli alterni

Convertitore Push-pull Forward



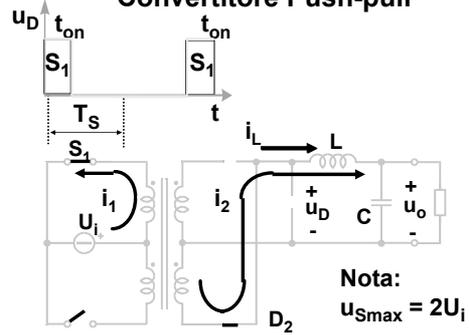
Gli avvolgimenti di ricircolo non sono necessari perchè i due convertitori hanno gli avvolgimenti accoppiati per flussi discordi

Convertitore Push-pull

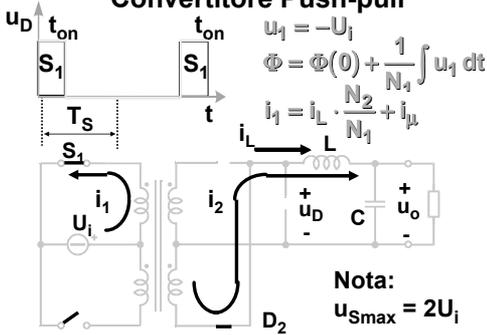


Ciascun avvolgimento primario funziona da circuito di ricircolo per l'altro primario

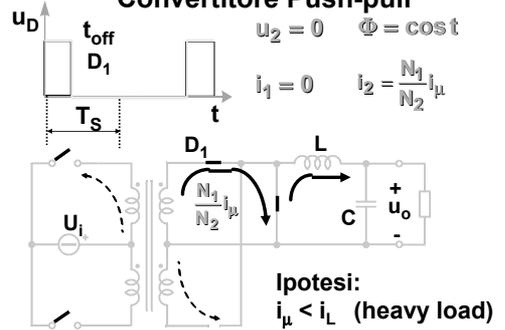
Convertitore Push-pull



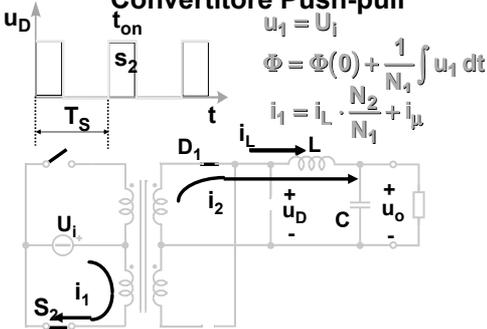
Convertitore Push-pull



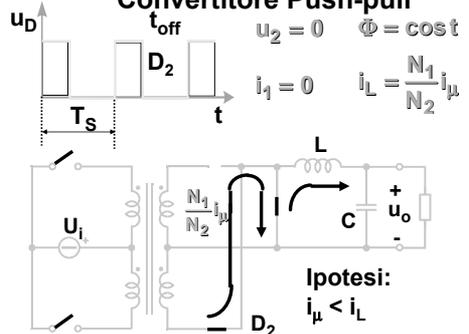
Convertitore Push-pull



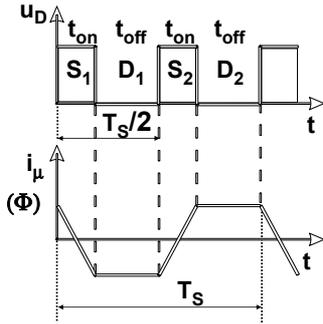
Convertitore Push-pull



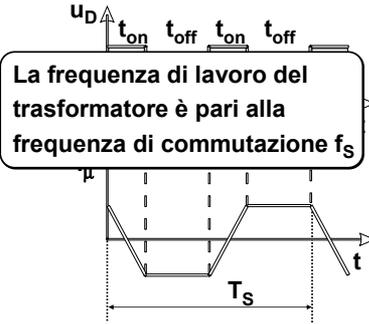
Convertitore Push-pull



Convertitore Push-pull



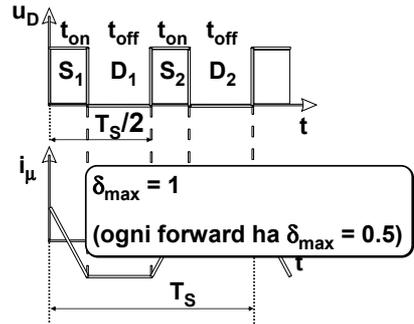
Convertitore Push-pull



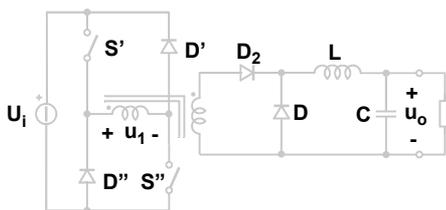
Convertitore Push-pull



Convertitore Push-pull

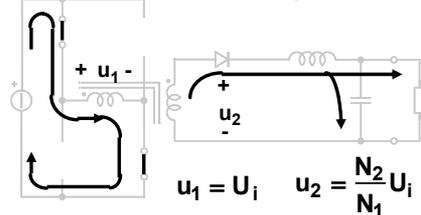


Convertitore Dual Forward



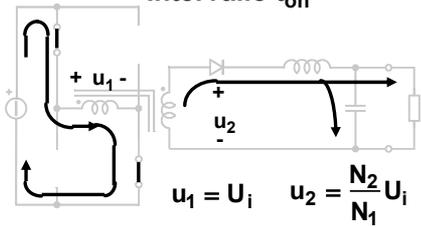
- Dal lato secondario è come un Forward
- La via di ricircolo della corrente magnetizzante è data da D' e D''

Convertitore Dual Forward Intervallo t_on



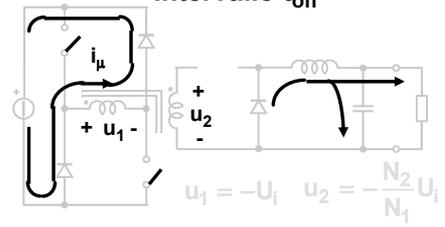
- $u_1 = U_i$ $u_2 = \frac{N_2}{N_1} U_i$
- S' e S'' vengono operati assieme
- $u_{1on} = U_i$

**Convertitore Dual Forward
Intervallo t_{on}**



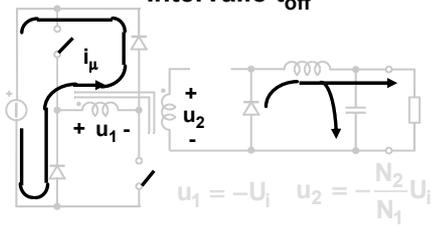
$S' = S'' = D_2 = \text{"on"}, D' = D'' = D = \text{"off"}$

**Convertitore Dual Forward
Intervallo t_{off}**



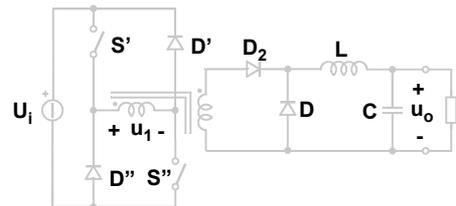
I diodi D' e D'' svolgono la funzione di ricircolo $\Rightarrow u_{1off} = -U_i$

**Convertitore Dual Forward
Intervallo t_{off}**



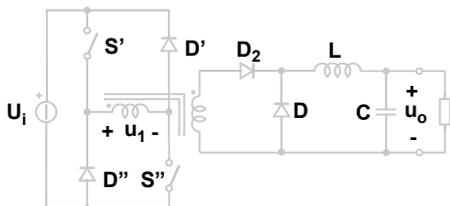
$S' = S'' = D_2 = \text{"off"}, D' = D'' = D = \text{"on"}$

Convertitore Dual Forward



Lato uscita funziona come un convertitore buck

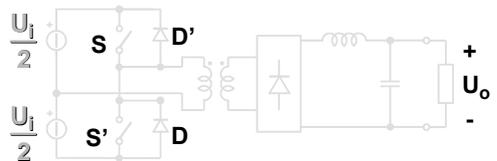
Convertitore Dual Forward



Lato uscita funziona come un convertitore buck

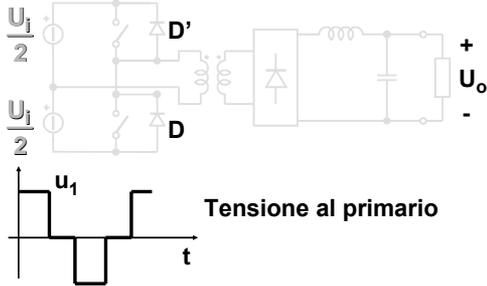
$u_{1on} = U_i, u_{1off} = -U_i \Rightarrow \delta \leq 0.5$

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

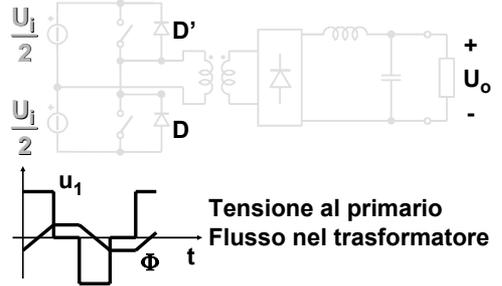


Il funzionamento é lo stesso del convertitore push-pull (S e S' funzionano a cicli alterni)

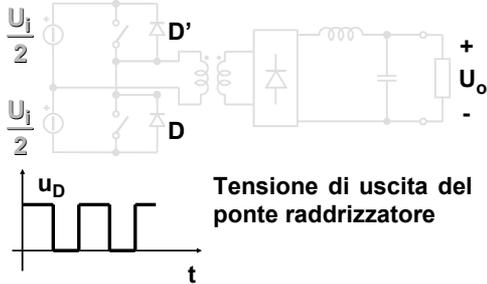
**Convertitore cc/cc con isolamento:
Half - bridge a trasformatore**



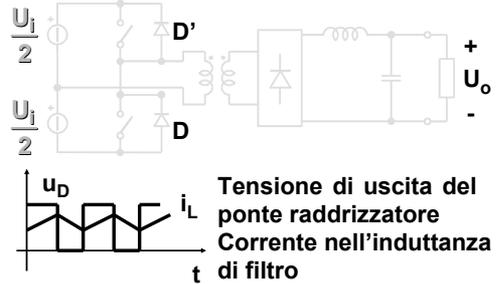
**Convertitore cc/cc con isolamento:
Half - bridge a trasformatore**



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



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



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_o/P_s) cala di almeno 4 volte