

Argomenti trattati

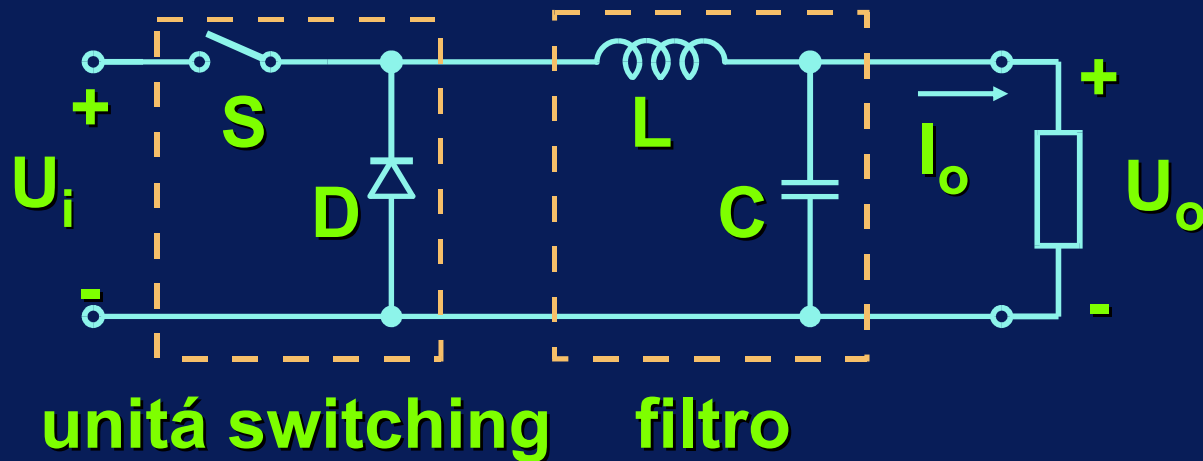
- **Analisi dei circuiti non lineari con interruttori e diodi**
- **Convertitore abbassatore di tensione (Buck):
Analisi del funzionamento continuo
(Continuous Conduction Mode, CCM)**
 - **Fase di on (interruttore chiuso)**
 - **Fase di off (interruttore aperto)**
 - **Forme d'onda complessive**
 - **Caratteristica di controllo**
 - **Ondulazione di corrente e di tensione**

Analisi dei circuiti con interruttori

Approccio lineare a tratti

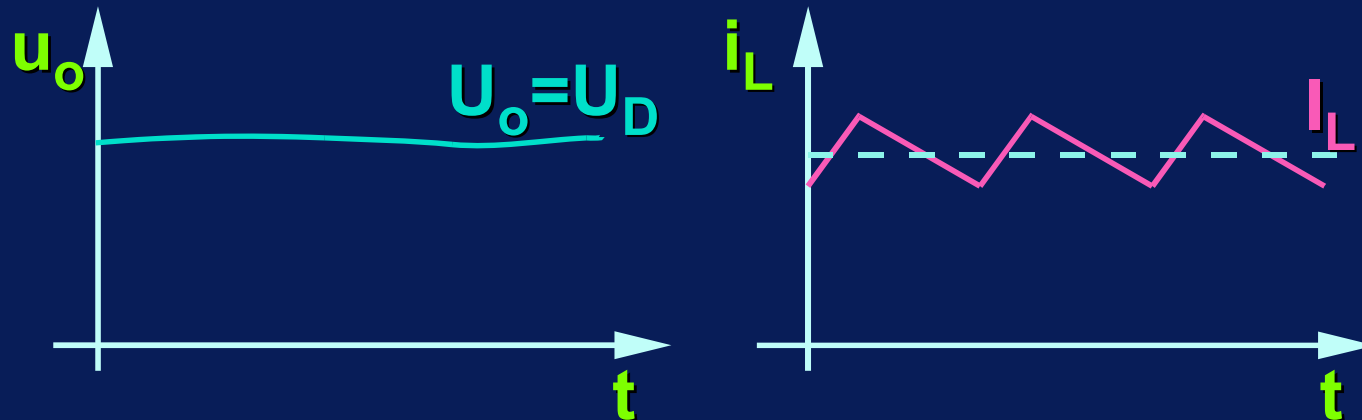
- **Si studia separatamente ogni modo di funzionamento (corrispondente ad uno stato di diodi ed interruttori), in cui il circuito é lineare.**
- **Si compongono le sequenze di modi:**
 - **identificando le condizioni di inizio e di fine di ciascun modo**
 - **determinando la successione dei modi**
 - **trasferendo le condizioni finali di un modo come condizioni iniziali del modo seguente**

Schema del convertitore Buck



- interruttore ideale ($u_{Son}=0$, $i_{Soff}=0$, $t_{swon}=t_{swoff}=0$)
- diodo ideale ($u_{Don}=0$, $i_{Doff}=0$, $t_{swon}=t_{swoff}=0$)
- L, C ideali ($R_L=0$, $ESR=0$, $ESL=0$)
- $u_i = U_i = \text{costante}$
- $u_o = U_o = \text{costante}$ ($\omega_r \ll 2\pi f_s$)
- $i_o = I_o = \text{costante}$

Forme d'onda tipiche del convertitore

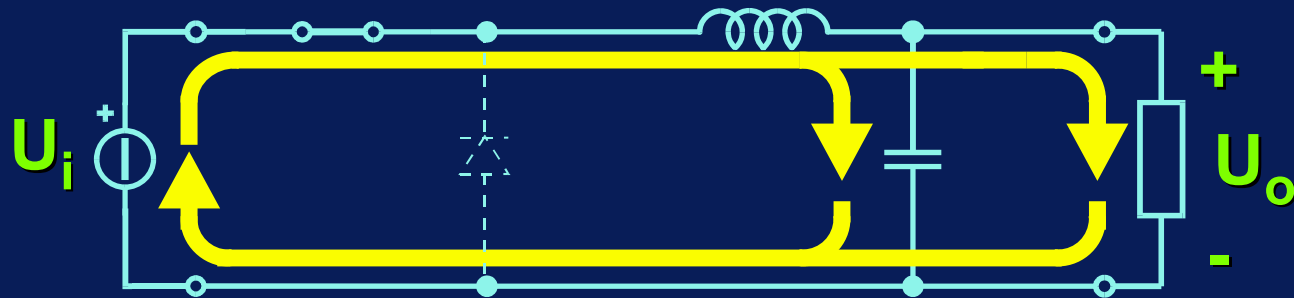


- u_o é effettivamente ben livellata ($u_o = U_o$)
- i_L ha ondulazione (ripple), ma é sempre > 0

**Questo modo di funzionamento ($i_L > 0$)
si chiama modo continuo (CCM =
Continuous Conduction Mode)**

Analisi del funzionamento continuo

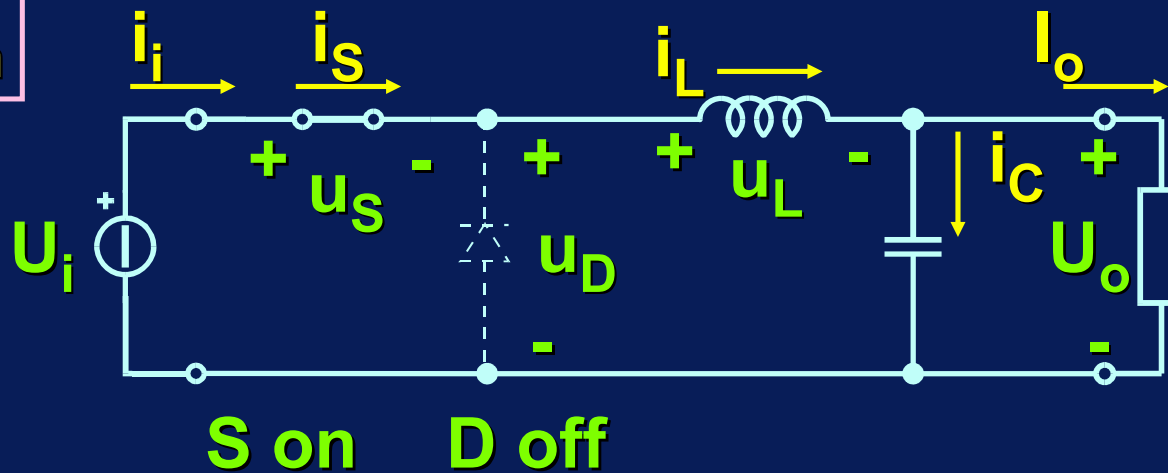
Tempo di chiusura di S (t_{on})



S on D off

- Il diodo é interdetto.
- Il generatore fornisce energia al filtro e al carico.

t_{on}



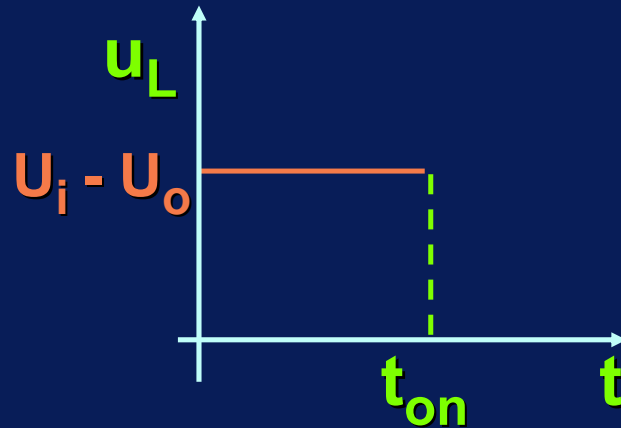
$$i_i = i_S = i_L = I_o + i_c$$

$$u_D = U_i \quad (\text{diodo contropolarizzato})$$

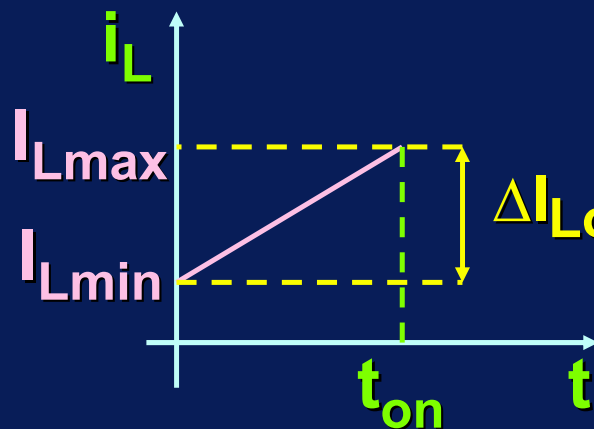
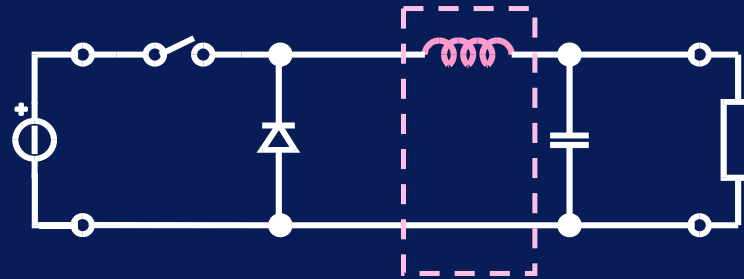
$$u_L = U_i - U_o$$

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u_L(\tau) d\tau = i_{L\min} + \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t$$

Tensioni e correnti durante t_{on}

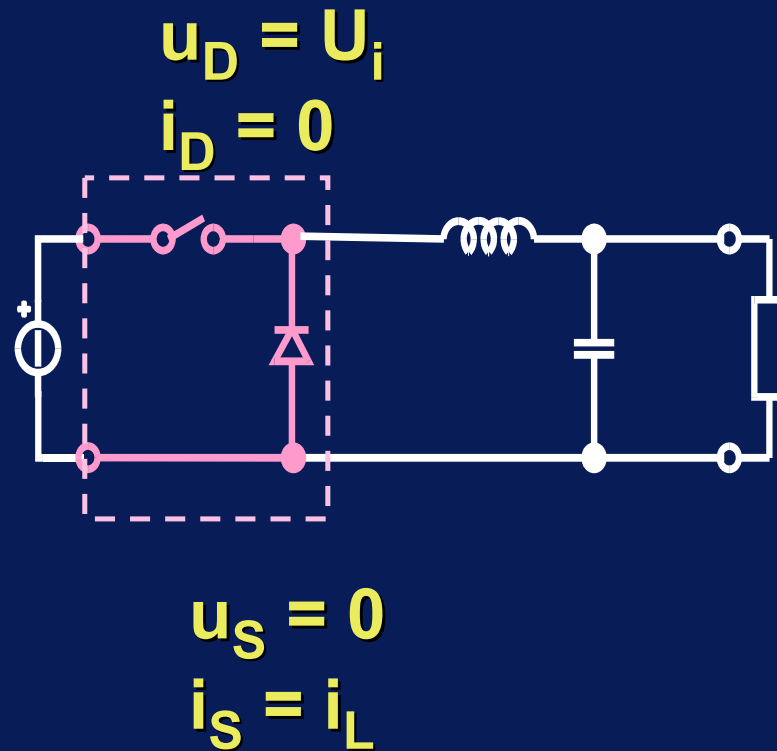
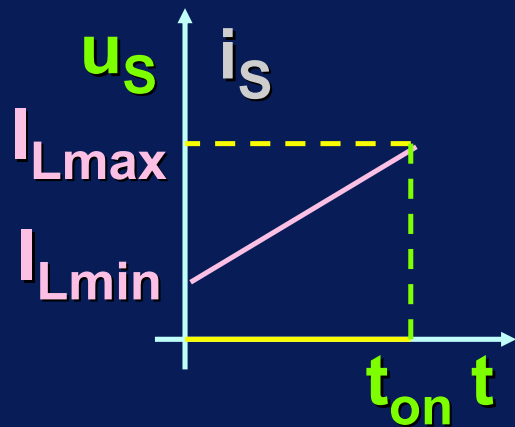
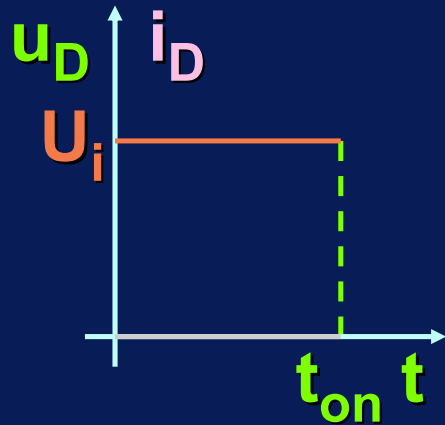


$$u_L = U_i - U_o$$

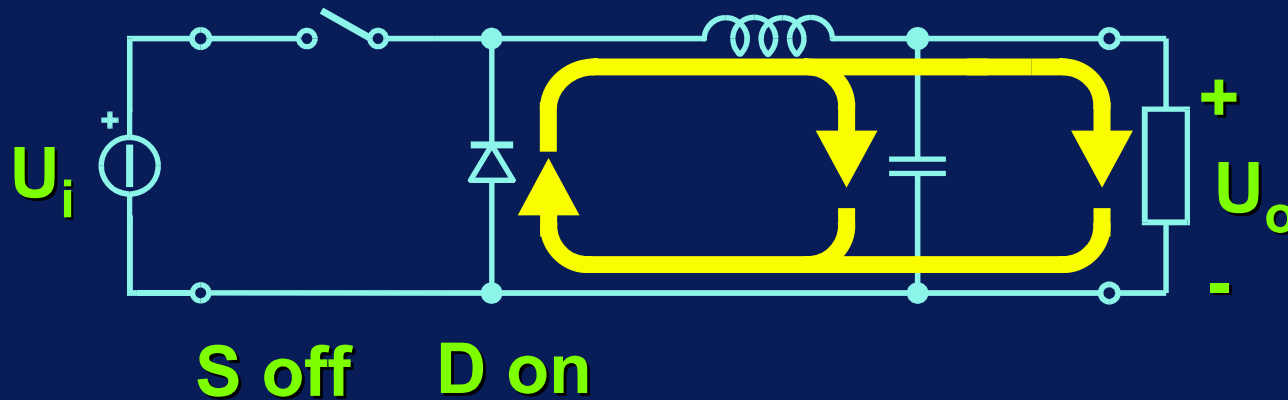


$$\Delta I_{Lon} = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_i - U_o}{f_s \cdot L} \cdot \delta$$

Tensioni e correnti durante t_{on}

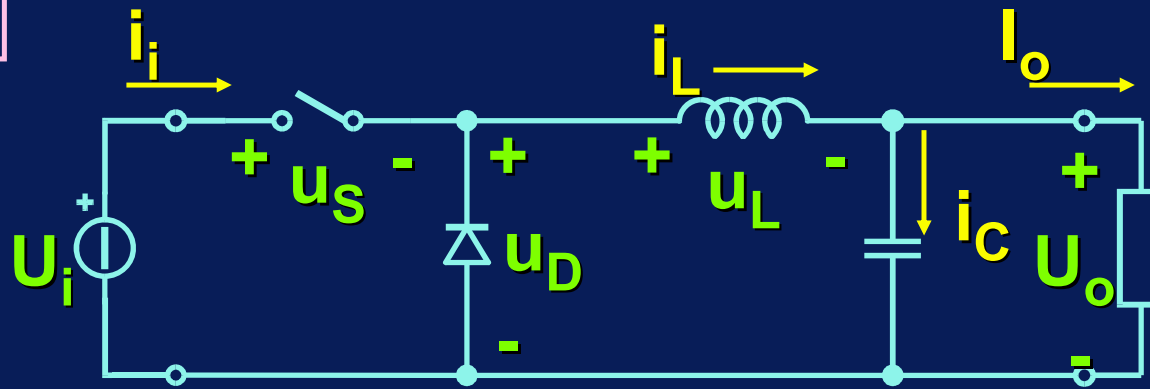


Tempo di apertura di S (t_{off})



- Il diodo conduce
- L'alimentazione non fornisce energia
- L'energia del carico viene fornita dal filtro

t_{off}



S off D on

$$i_i = 0$$

$$i_L = I_o + i_c$$

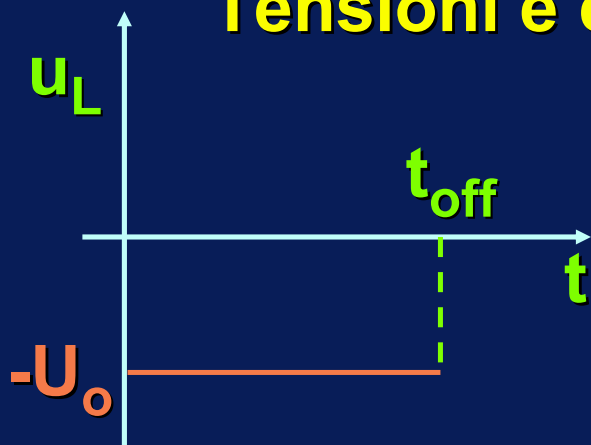
$$u_D = 0$$

$$u_S = U_i$$

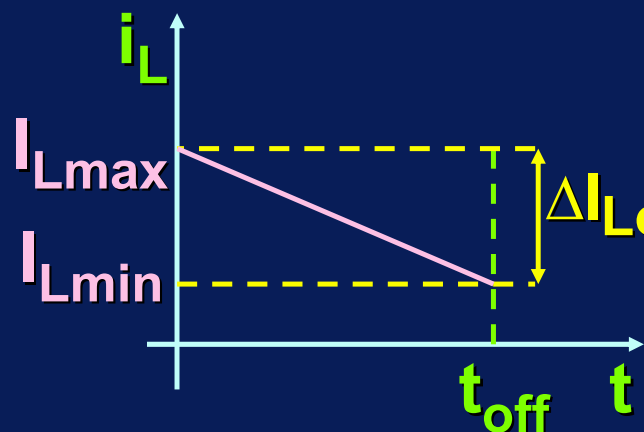
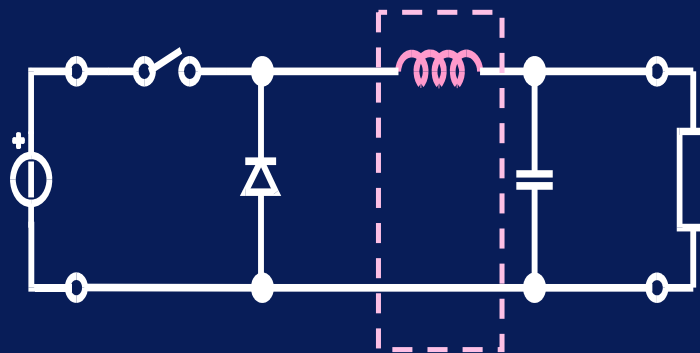
$$u_L = -U_o$$

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u_L(\tau) d\tau = i_{L\text{max}} - \frac{U_o}{L} \cdot t$$

Tensioni e correnti durante t_{off}

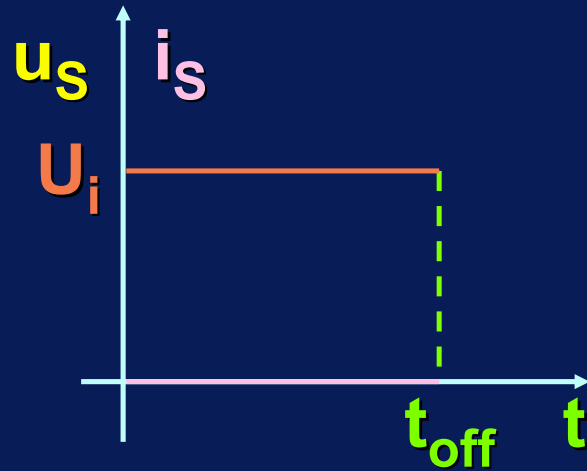


$$u_L = -U_o$$

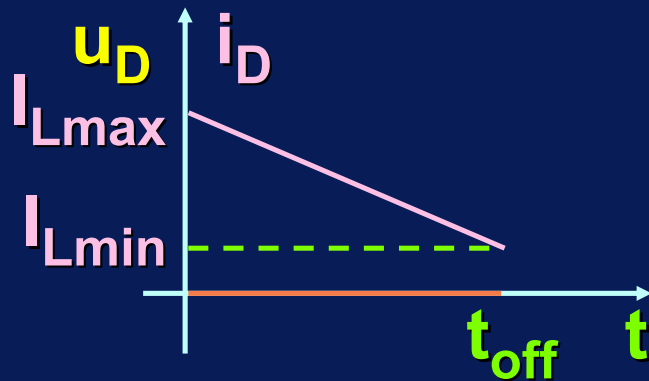
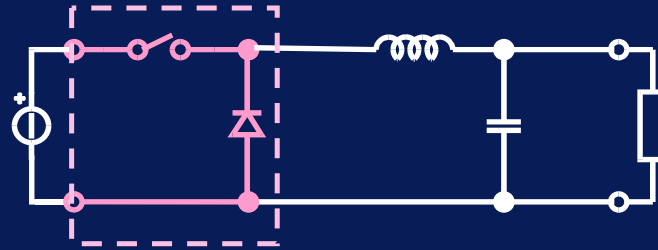


$$\Delta I_{L\text{off}} = \frac{U_o}{L} \cdot t_{\text{off}} = \frac{U_o}{f_s \cdot L} \cdot (1 - \delta)$$

Tensioni e correnti durante t_{off}

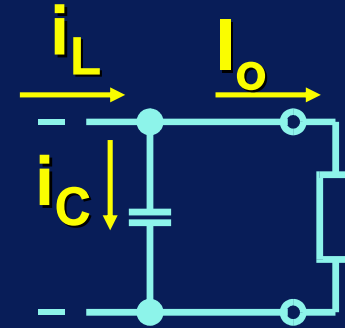
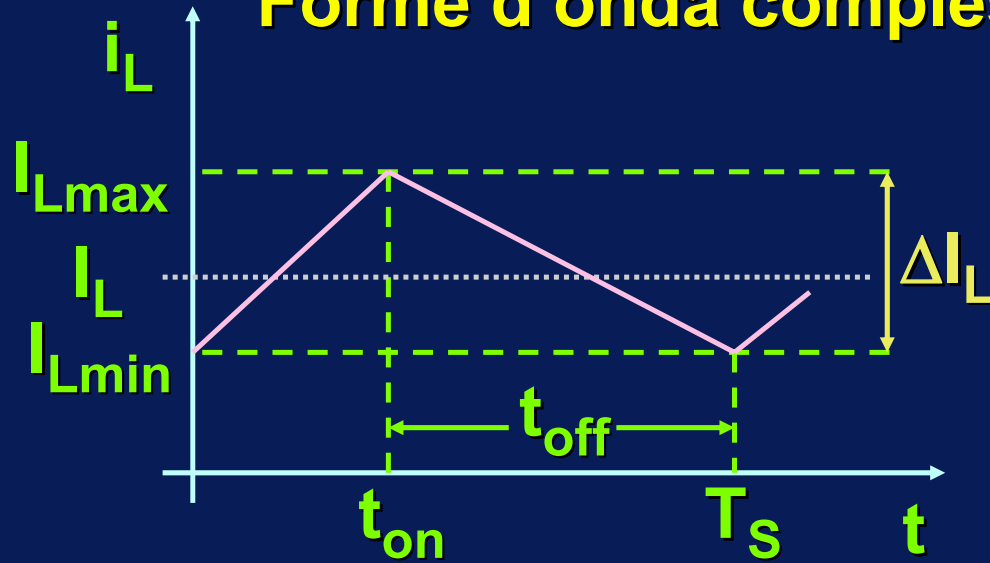


$$u_S = U_i$$
$$i_S = 0$$



$$u_D = 0$$
$$i_D = i_L$$

Forme d'onda compressive: i_L

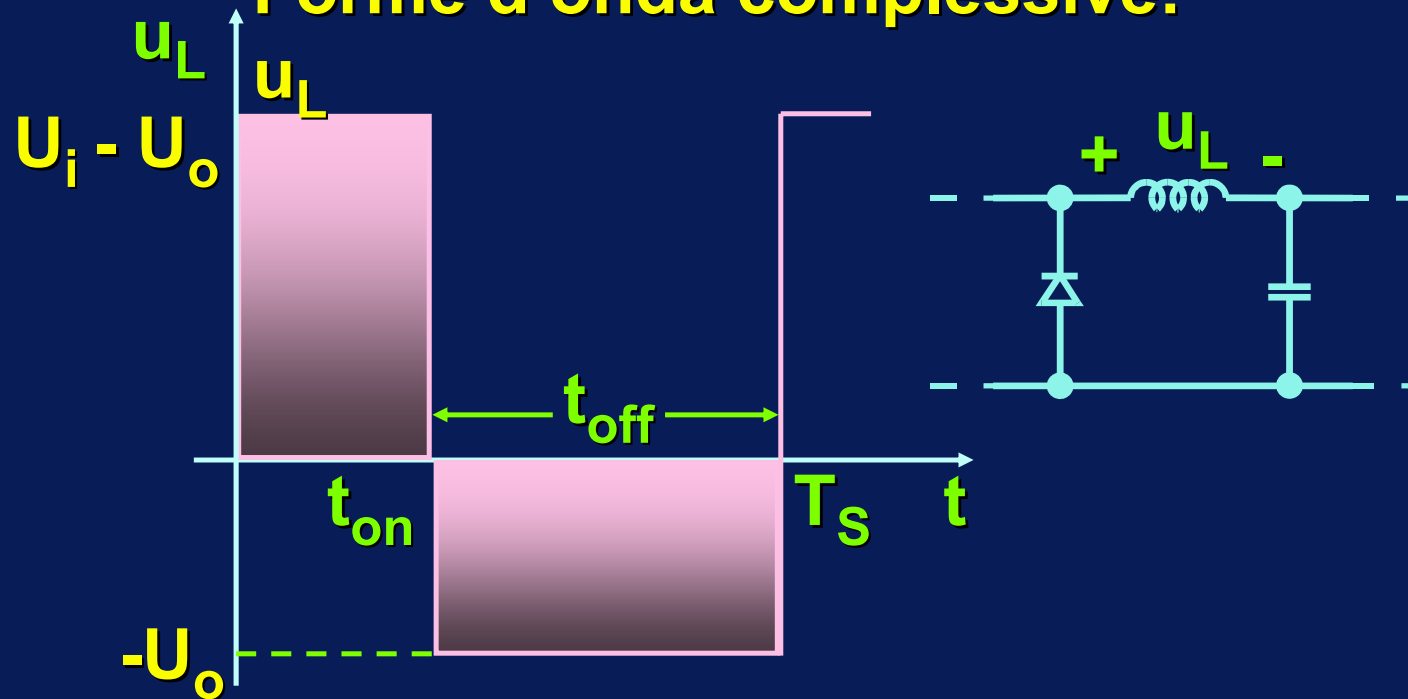


A regime: $I_C = 0 \Rightarrow I_L = I_o$

Ondulazione (ripple) di corrente:

$$\Delta I_{Lon} = \Delta I_{Loff} = \Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_o}{L} \cdot t_{off}$$

Forme d'onda compressive:

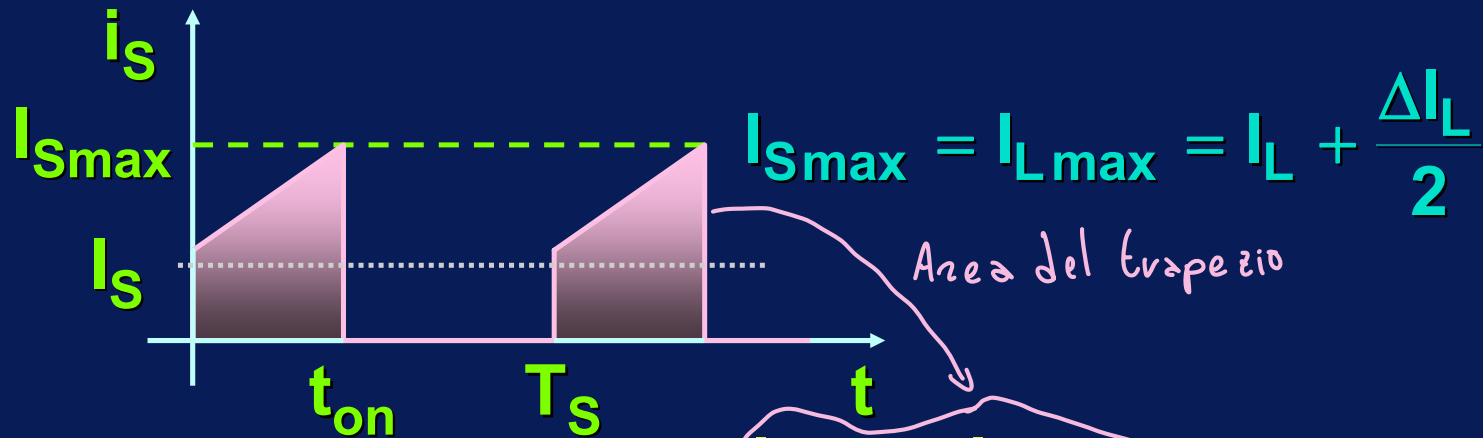


A regime: $(U_i - U_o) \cdot t_{on} = U_o \cdot t_{off}$

$$U_i \cdot t_{on} = U_o \cdot (t_{on} + t_{off}) \Rightarrow U_o = \frac{t_{on}}{T_s} \cdot U_i = \delta \cdot U_i$$

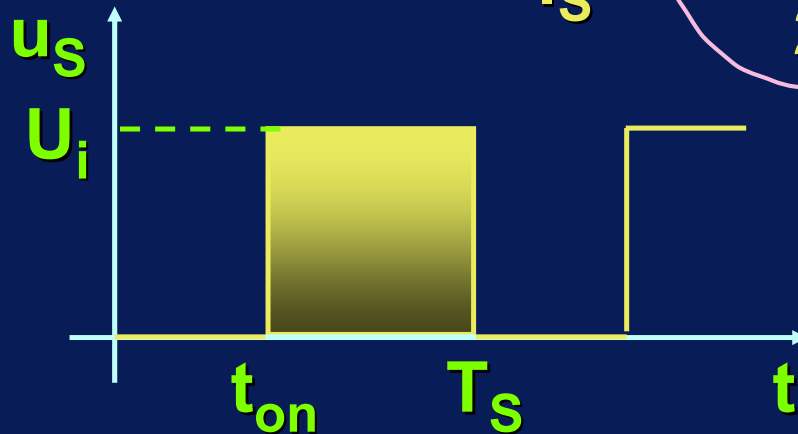
Interruttore

Forme d'onda compressive: u_s , i_s

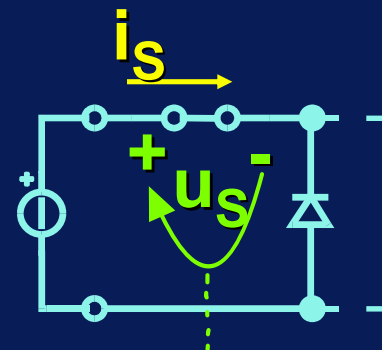


$$I_S = \frac{I_{Lmin} + I_{Lmax}}{2} \cdot t_{on} = I_L \cdot \delta$$

" in questo caso



$$U_{Smax} = U_i$$

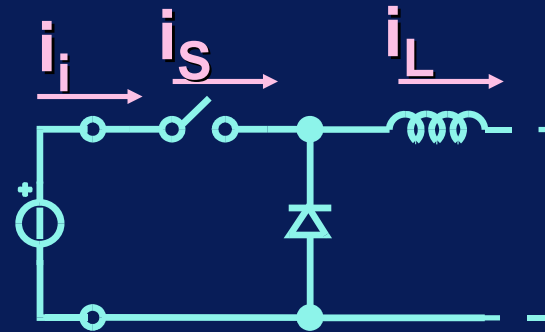


Se chiuso il $\Delta V = 0$

Nota:

$$I_i = I_s = I_L \cdot \delta = I_o \cdot \delta$$

$$P_i = U_i \cdot I_i = U_i \cdot I_o \cdot \delta$$



Ciò è coerente con la conservazione della potenza:

$$P_i = P_o \quad \Rightarrow \quad U_i \cdot I_i = U_o \cdot I_o$$

da cui:

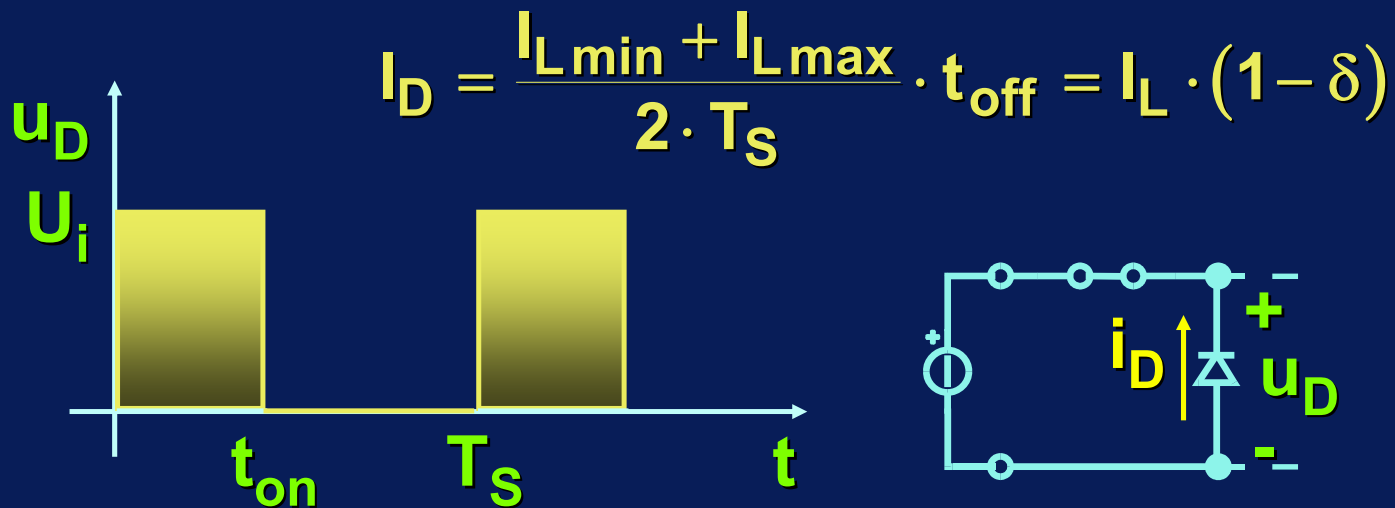
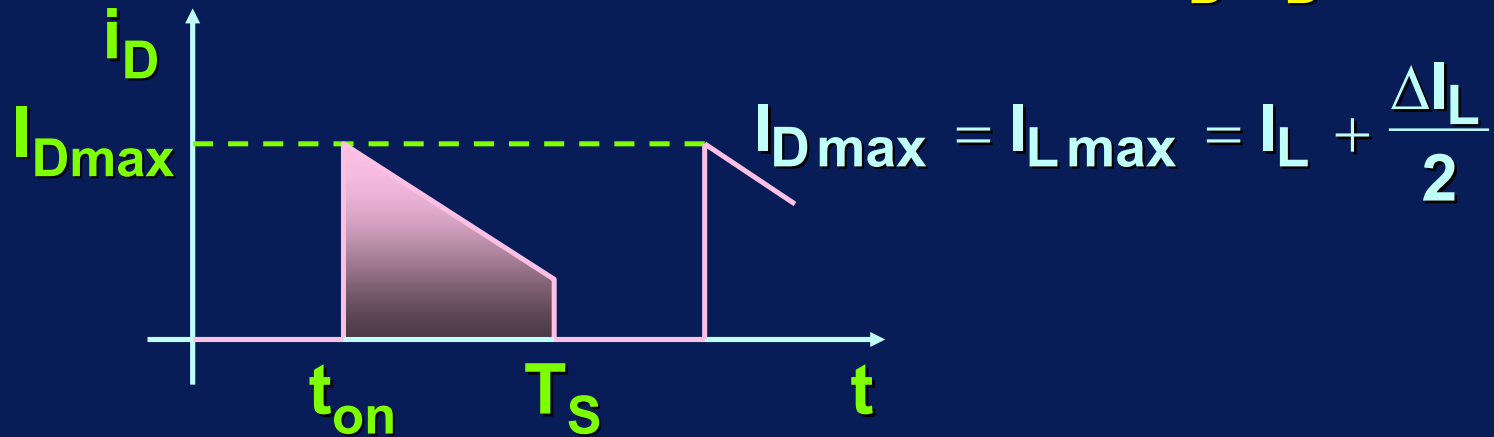
$$\boxed{\frac{I_i}{I_o} = \frac{U_o}{U_i} = \delta}$$

!!! il circuito è ideale occhio
che nella realtà la $U_o = \delta U_i$!!!

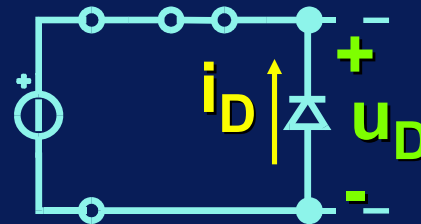
↓
è nocivo il fatto di avere un
piccolo carico x via dal "CCM"

Diode

Forme d'onda compressive: u_D , i_D

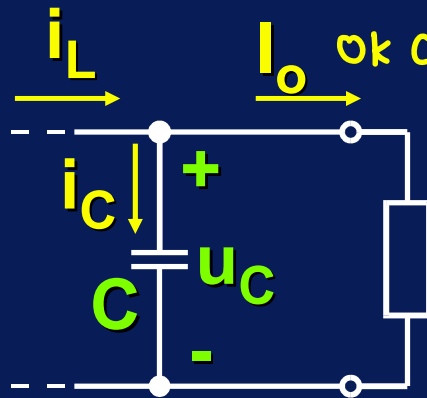


$$U_{Dmax} = U_i$$

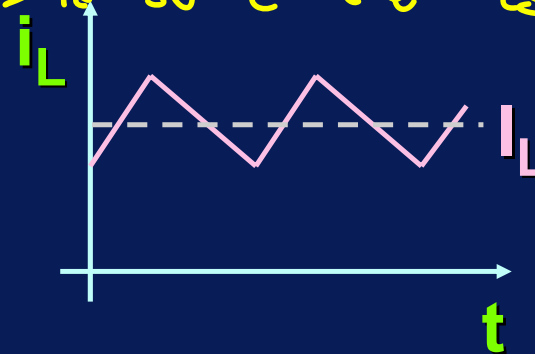


Condensatore

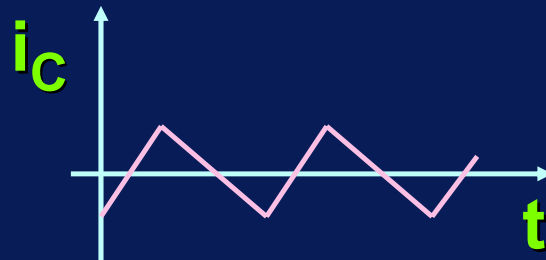
Forme d'onda complessive: i_C



ok che è costante ma in realtà ho un ripple \rightarrow la su c c'è essendo di



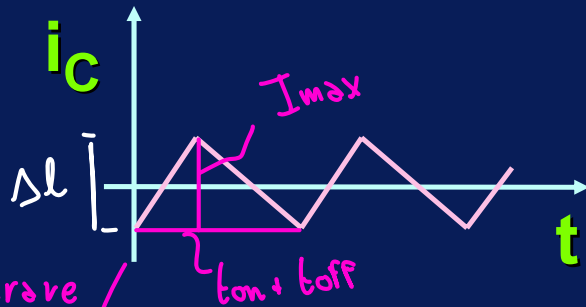
A regime: $I_L = I_o \Rightarrow i_C = i_L - I_o$



x il fatto di avere un piccolo ripple

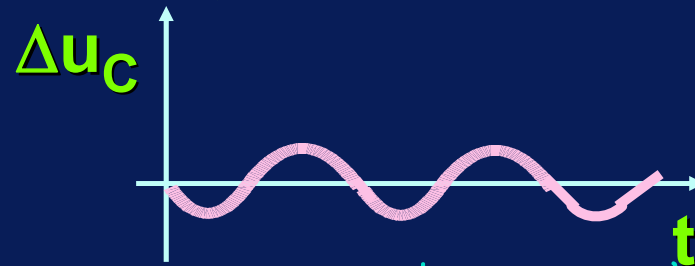
$$\Delta u_C = u_C - U_o = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt$$

Forme d'onda complessive: u_C



x integrare
calcolo area
del triangolo

ripple tensione su C



da linea → archi di parabola

$$\Delta u_C = u_C - U_o = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt$$

$$\Delta u_C = \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \left(I_{Cmax} \cdot \frac{t_{on} + t_{off}}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_s}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot C}$$

il ripple lo posso variare con ΔI_L → di solito f elevate
 C → C grandi

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 24V \pm 20\%$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 1\% U_o$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\delta = \frac{U_o}{U_i} = \frac{12}{U_{i\max}} \div \frac{12}{U_{i\min}} = 0.416 \div 0.625$$

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_o}{L} \cdot t_{off} = \frac{U_o}{f_s L} \cdot (1 - \delta)$$

Esempio di dimensionamento

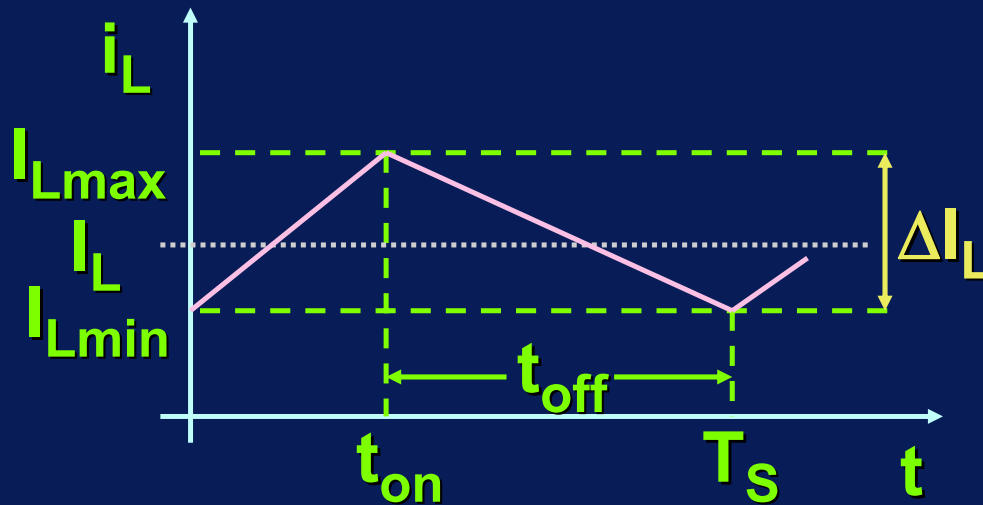
$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\delta = \frac{U_o}{U_i} = \frac{12}{U_{i\max}} \div \frac{12}{U_{i\min}} = 0.416 \div 0.625$$



Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

ΔI_L è massimo quando δ è minimo (se U_o è costante)

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\Delta I_L = \frac{U_o}{f_s L} \cdot \left(1 - \frac{U_o}{U_{imax}} \right)$$

Posto: $\Delta I_{Lmax} = 0.2 I_{On}$ (CCM per $I_o > 0.1 I_{On}$)

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\Delta I_L = \frac{U_o}{f_s L} \cdot \left(1 - \frac{U_o}{U_{imax}} \right)$$

Posto: $\Delta I_{Lmax} = 0.2 I_o$ e $f_s = 100kHz$

$$L = \frac{U_o}{f_s \Delta I_{Lmax}} \cdot \left(1 - \frac{U_o}{U_{imax}} \right) = 175\mu H$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\Delta U_{Cmax} = \frac{\Delta I_{Lmax}}{8f_s C} \Rightarrow C = \frac{\Delta I_{Lmax}}{8f_s \Delta U_{Cmax}}$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$C = 4.16 \mu F \quad \Rightarrow \quad C = 4.7 \mu F$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V \div 28.8V$$

$$I_o = 0 \div 2A$$

$$U_o = 12V$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$C = 4.16 \mu F \quad \Rightarrow \quad C = 4.7 \mu F$$

Pulsazione di risonanza:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cong 35 \text{krad / s}$$

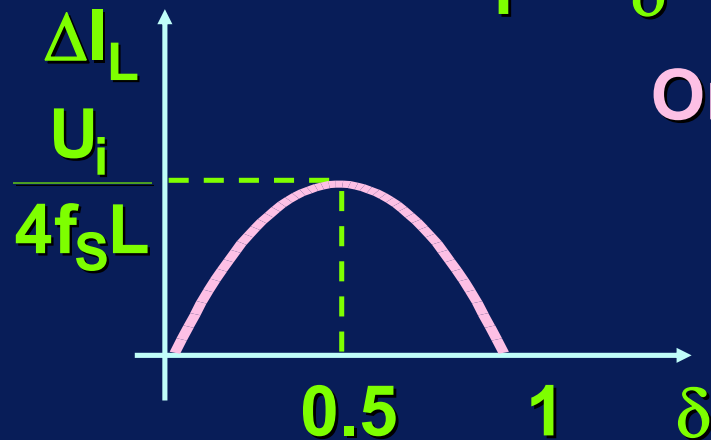
Caratteristiche statiche del convertitore Buck in CCM



Caratteristica di controllo

$$U_o = \delta U_i$$

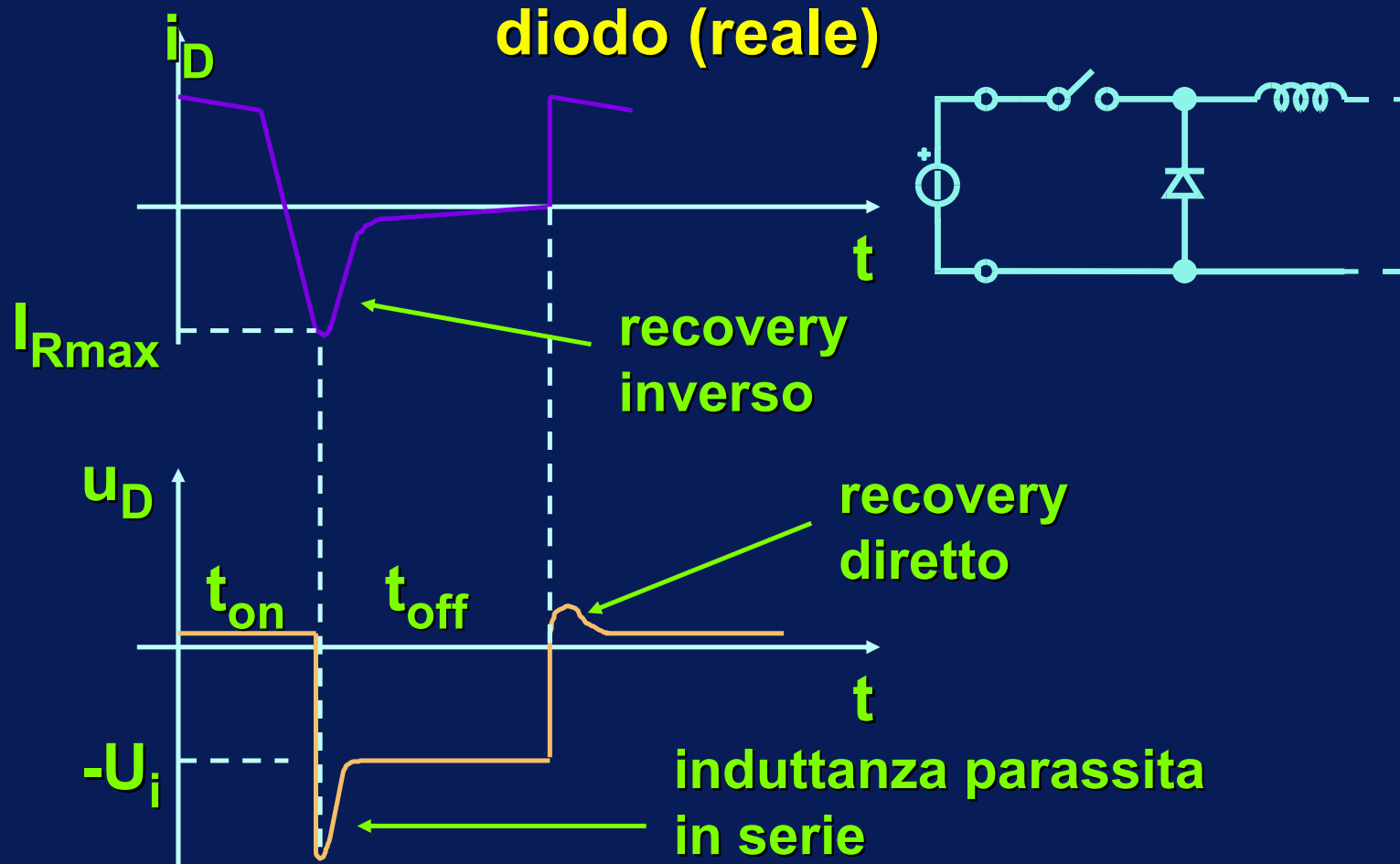
Controllo lineare



Ondulazione di corrente

$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{f_s \cdot L}$$

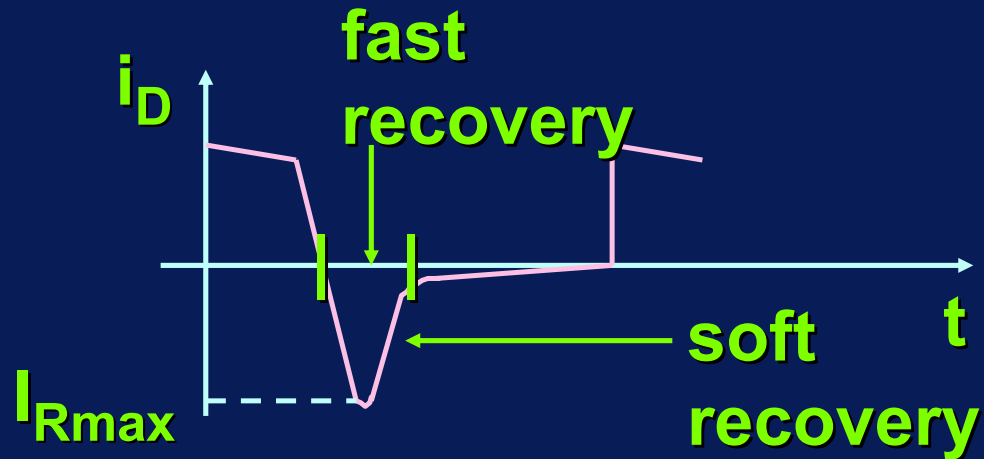
Andamenti di corrente e tensione del diodo (reale)



Osservazioni

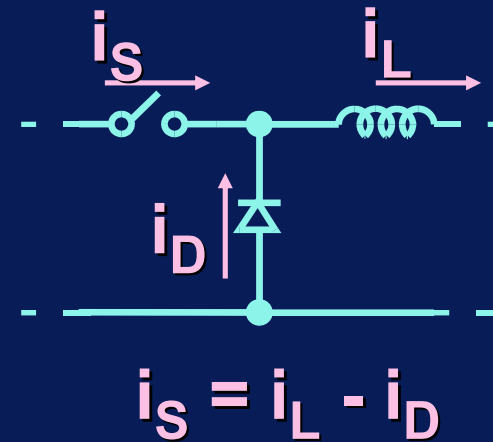
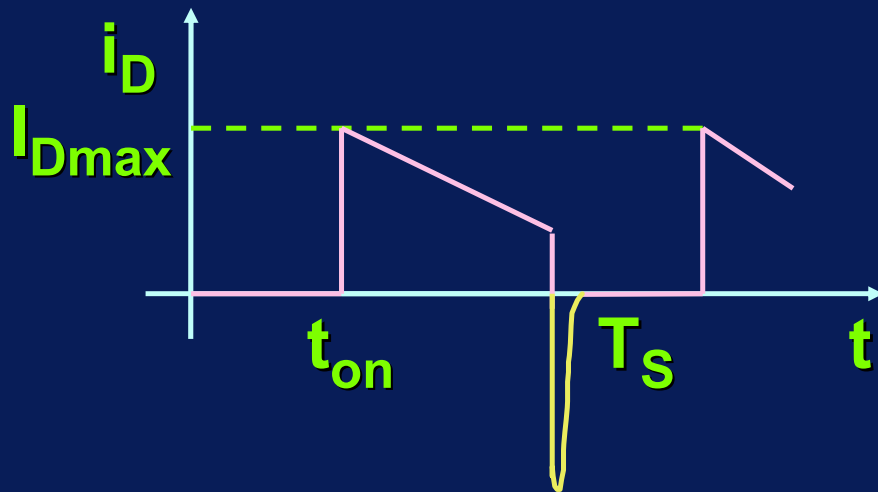
- La corrente di recovery inverso può avere lo stesso ordine di grandezza della corrente diretta
- Al recovery inverso sono associate perdite
- Il recovery diretto é normalmente influente
- I diodi vanno scelti soft-recovery (per ridurre la sovratensione) e fast-recovery (per ridurre I_{Rmax} e le perdite)

Osservazioni



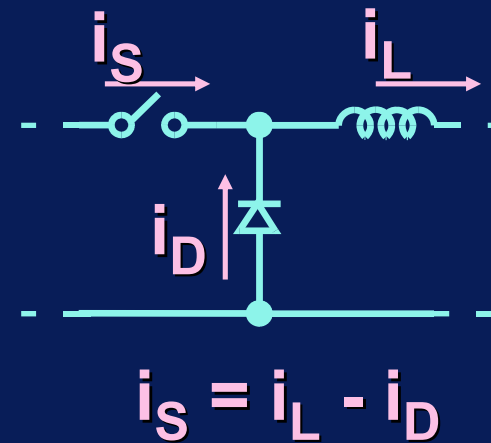
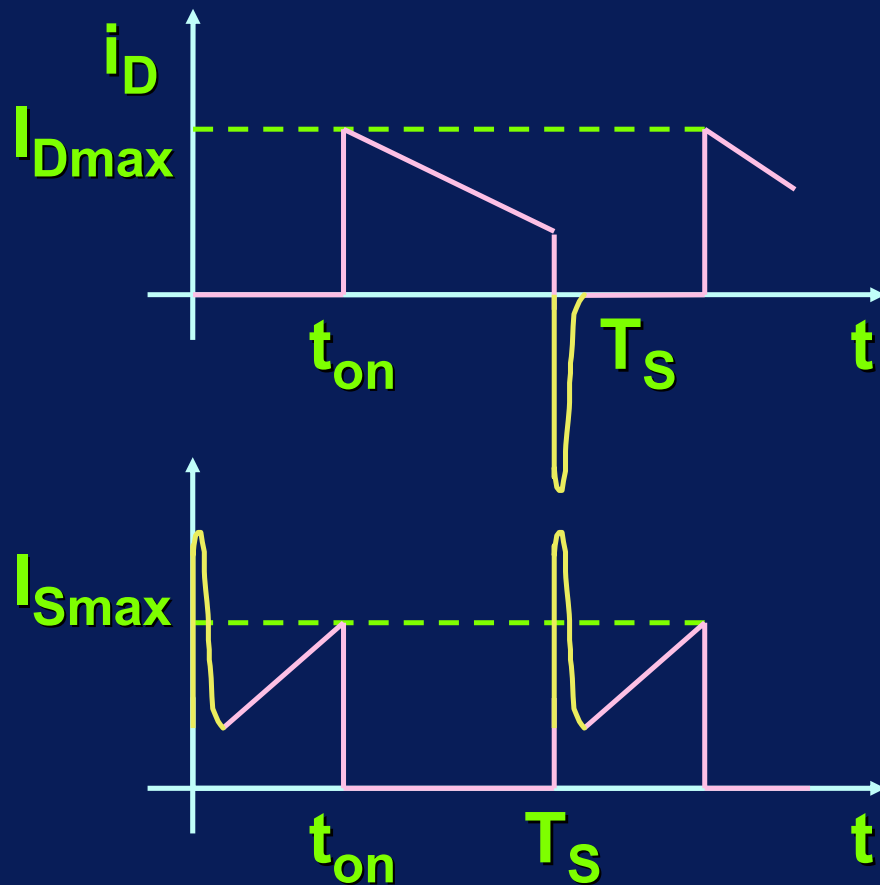
- I diodi vanno scelti soft-recovery (per ridurre la sovratensione) e fast-recovery (per ridurre I_{Rmax} e le perdite)

Andamenti reali della corrente in S e D



Il recovery inverso del diodo causa sovracorrenti nell'interruttore

Andamenti reali della corrente in S e D



Conclusioni

- Si è analizzato il funzionamento continuo (CCM) del convertitore abbassatore di tensione (buck)
- Il convertitore ha una caratteristica di controllo lineare
- I parametri del filtro vengono scelti per limitare l'ondulazione della tensione d'uscita e della corrente nell'induttanza
- Il filtro risulta tanto più piccolo quanto più elevata è la frequenza di commutazione
- Le sollecitazioni in tensione e corrente sono influenzate dal recovery inverso del diodo