

Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

“Analisi del funzionamento continuo del convertitore Buck”

Argomenti trattati

- Analisi dei circuiti non lineari con interruttori e diodi
- Convertitore abbassatore di tensione (Buck): Analisi del funzionamento continuo (Continuous Conduction Mode, CCM)

Argomenti trattati

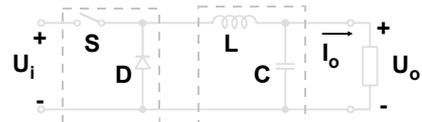
- Analisi dei circuiti non lineari con interruttori e diodi
- Convertitore abbassatore di tensione (Buck): Analisi del funzionamento continuo (Continuous Conduction Mode, CCM)
 - Fase di on (interruttore chiuso)
 - Fase di off (interruttore aperto)
 - Forme d'onda complessive
 - Caratteristica di controllo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

Analisi dei circuiti con interruttori

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

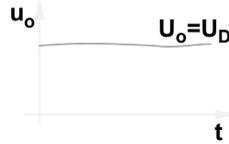
Schema del convertitore Buck



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

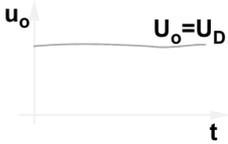
Forme d'onda tipiche del convertitore

Forme d'onda tipiche del convertitore

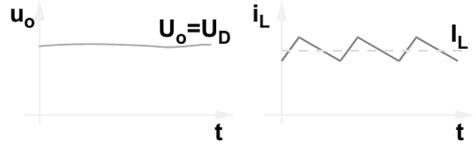


Forme d'onda tipiche del convertitore

Forme d'onda tipiche del convertitore



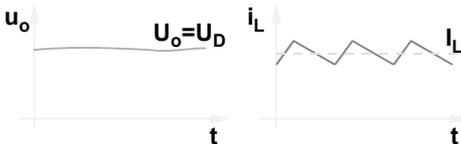
• u_o é effettivamente ben livellata ($u_o = U_o$)



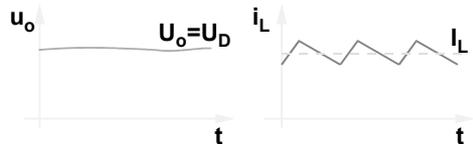
• u_o é effettivamente ben livellata ($u_o = U_o$)

Forme d'onda tipiche del convertitore

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



- 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)

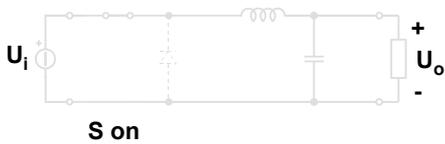
Analisi del funzionamento continuo

Analisi del funzionamento continuo

Tempo di chiusura di S (t_{on})

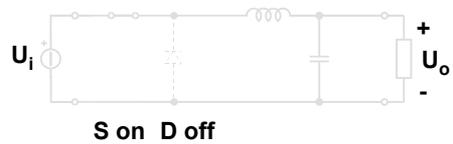
Analisi del funzionamento continuo

Tempo di chiusura di S (t_{on})



Analisi del funzionamento continuo

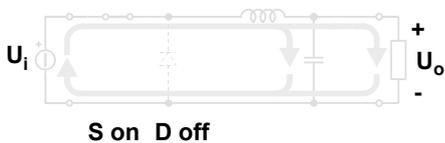
Tempo di chiusura di S (t_{on})



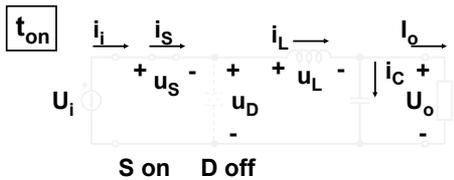
- Il diodo é interdetto.

Analisi del funzionamento continuo

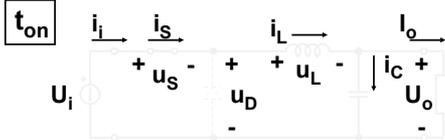
Tempo di chiusura di S (t_{on})



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



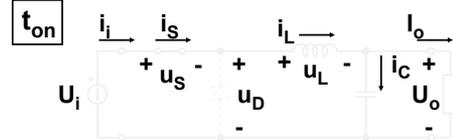
$$i_i = i_S = i_L = i_o + i_c$$



S on D off

$$i_i = i_s = i_L = I_o + i_c$$

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

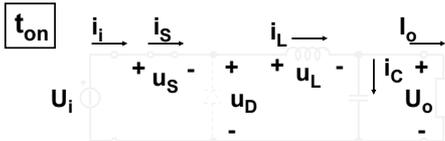


S on D off

$$i_i = i_s = i_L = I_o + i_c$$

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

$$u_L = U_i - U_o$$



S on D off

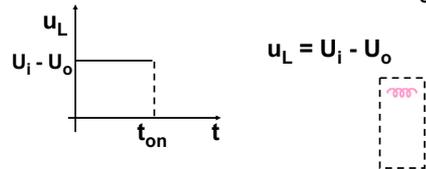
$$i_i = i_s = i_L = I_o + i_c$$

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

$$u_L = U_i - U_o$$

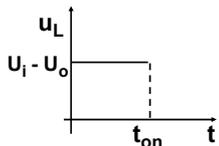
$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u_L(\tau) d\tau = i_{Lmin} + \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t$$

Tensioni e correnti durante t_{on}

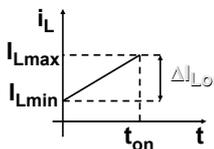


$$u_L = U_i - U_o$$

Tensioni e correnti durante t_{on}

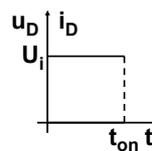


$$u_L = U_i - U_o$$



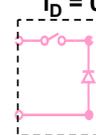
$$\Delta i_{Lon} = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_i - U_o}{i_s \cdot L} \cdot \delta$$

Tensioni e correnti durante t_{on}

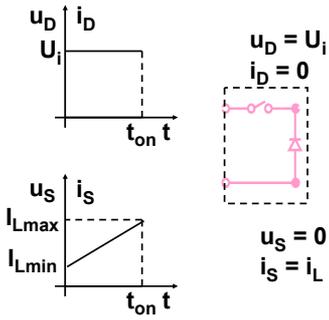


$$u_D = U_i$$

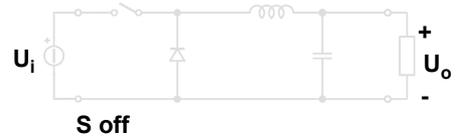
$$i_D = 0$$



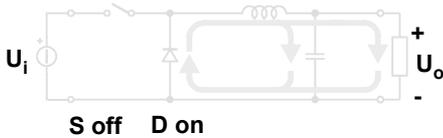
Tensioni e correnti durante t_{on}



Tempo di apertura di S (t_{off})

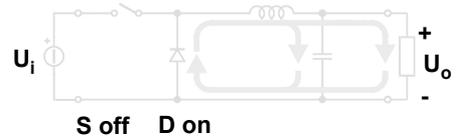


Tempo di apertura di S (t_{off})



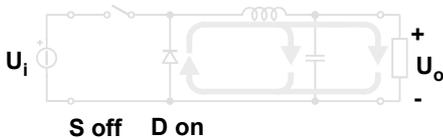
- Il diodo conduce

Tempo di apertura di S (t_{off})



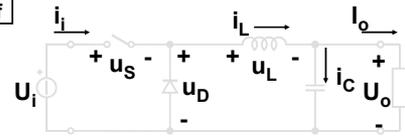
- Il diodo conduce
- L'alimentazione non fornisce energia

Tempo di apertura di S (t_{off})



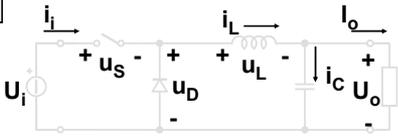
- Il diodo conduce
- L'alimentazione non fornisce energia
- L'energia del carico viene fornita dal filtro

t_{off}



S off D on
 $i_i = 0$ $i_L = i_o + i_c$

t_{off}

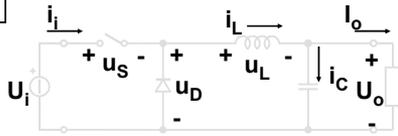


S off D on

$$i_i = 0 \quad i_L = I_o + i_c$$

$$u_D = 0 \quad u_S = U_i$$

t_{off}



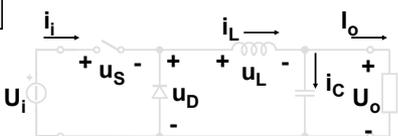
S off D on

$$i_i = 0 \quad i_L = I_o + i_c$$

$$u_D = 0 \quad u_S = U_i$$

$$u_L = -U_o$$

t_{off}



S off D on

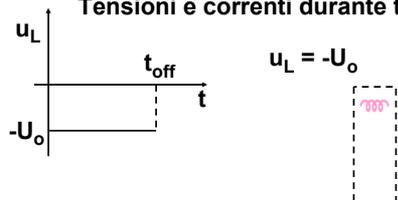
$$i_i = 0 \quad i_L = I_o + i_c$$

$$u_D = 0 \quad u_S = U_i$$

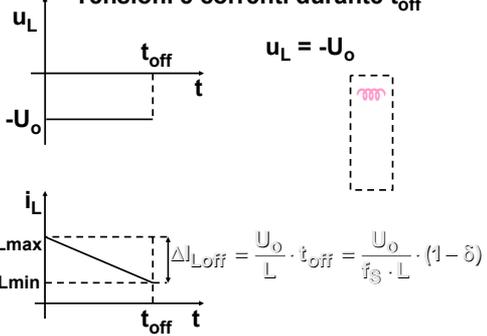
$$u_L = -U_o$$

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

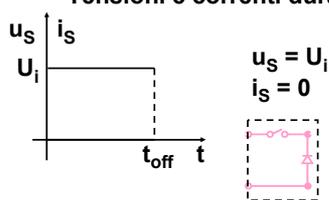
Tensioni e correnti durante t_{off}



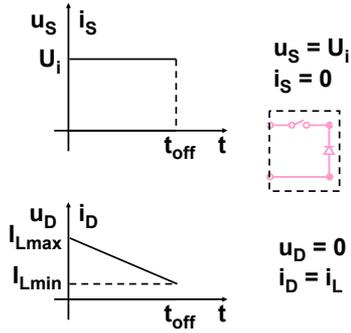
Tensioni e correnti durante t_{off}



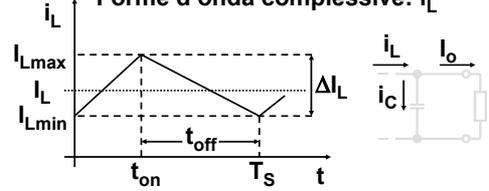
Tensioni e correnti durante t_{off}



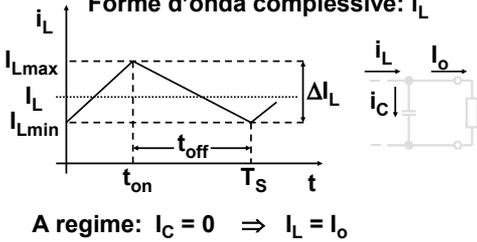
Tensioni e correnti durante t_{off}



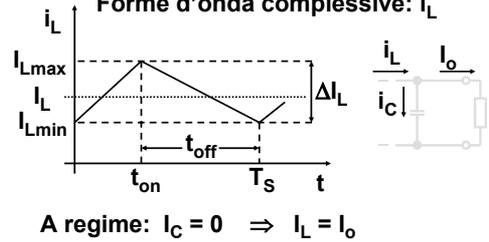
Forme d'onda compressive: i_L



Forme d'onda compressive: i_L



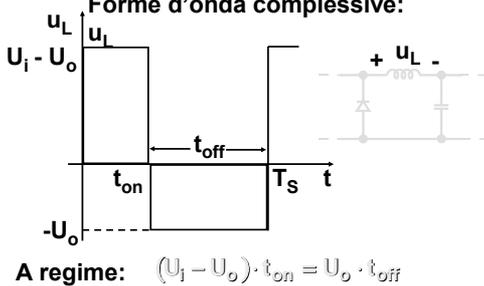
Forme d'onda compressive: i_L



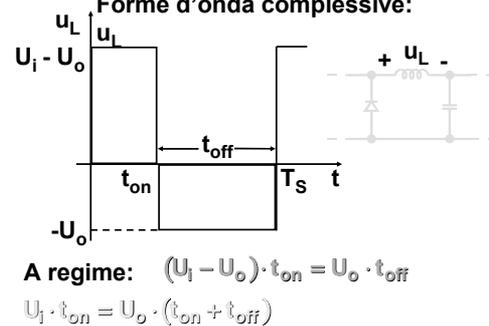
Ondulazione (ripple) di corrente:

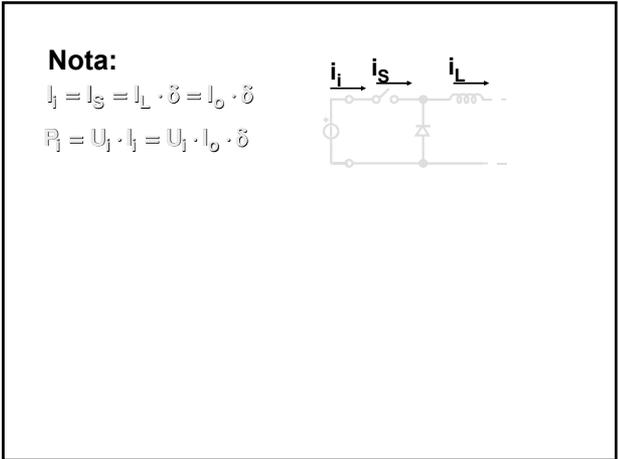
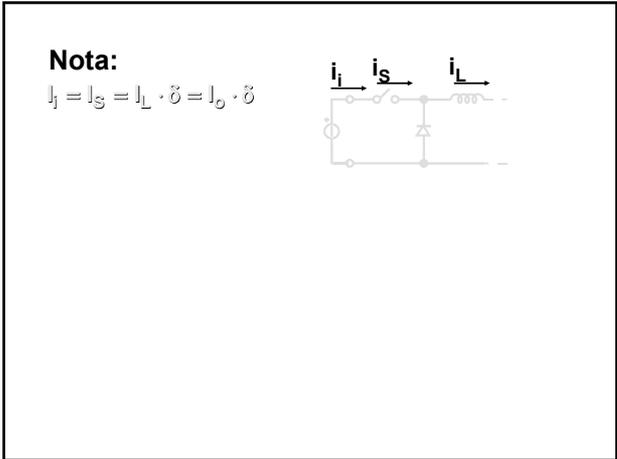
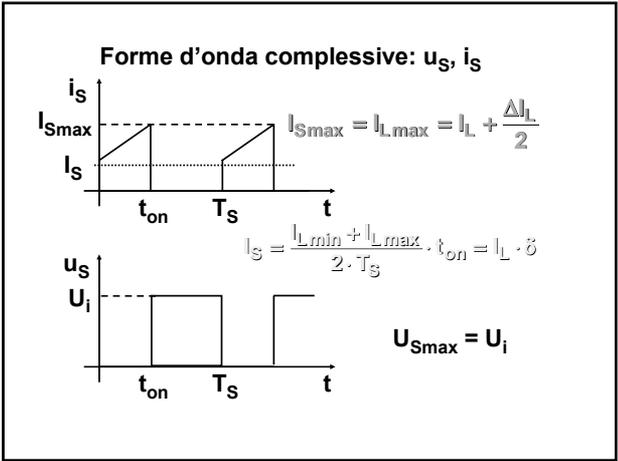
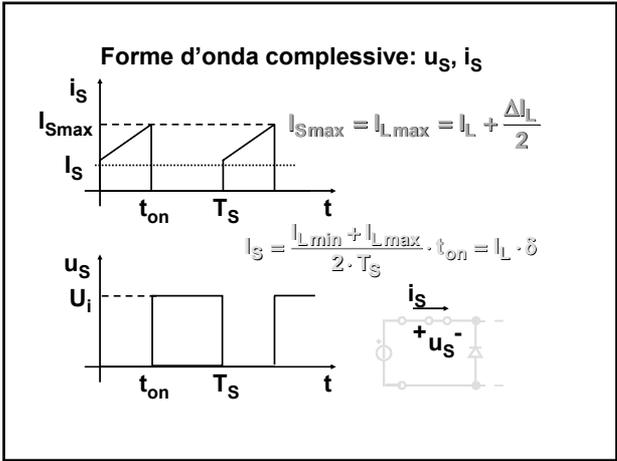
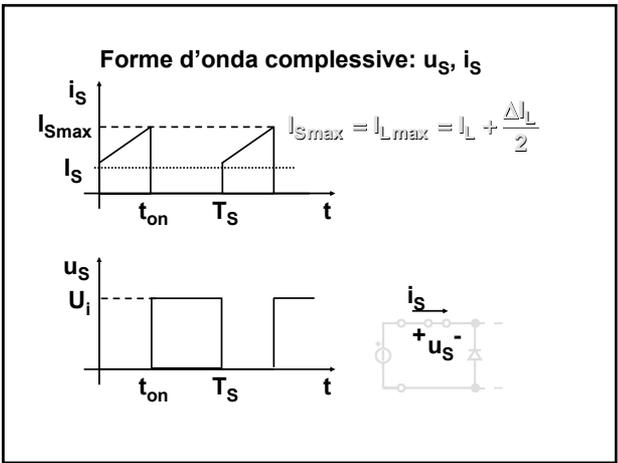
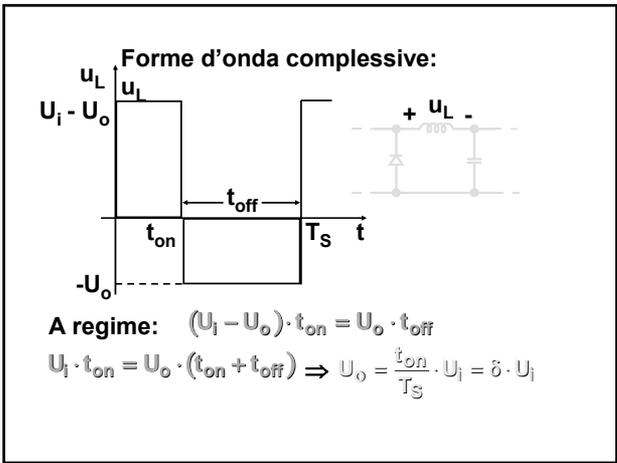
$$\Delta I_{Lon} = \Delta I_{Loff} = \Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_o}{L} \cdot t_{off}$$

Forme d'onda compressive:



Forme d'onda compressive:

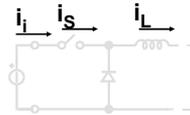




Nota:

$$I_j = I_S = I_L \cdot \delta = I_o \cdot \delta$$

$$P_j = U_j \cdot I_j = U_o \cdot I_o \cdot \delta$$



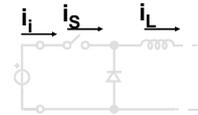
Ciò è coerente con la conservazione della potenza:

$$P_j = P_o \Rightarrow U_j \cdot I_j = U_o \cdot I_o$$

Nota:

$$I_j = I_S = I_L \cdot \delta = I_o \cdot \delta$$

$$P_j = U_j \cdot I_j = U_o \cdot I_o \cdot \delta$$

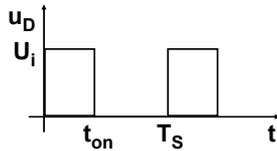
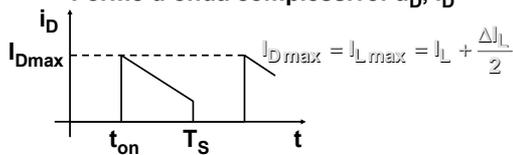


Ciò è coerente con la conservazione della potenza:

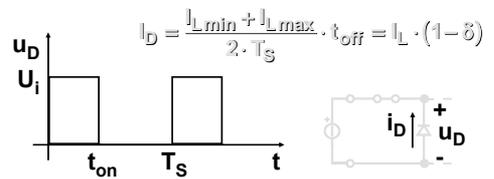
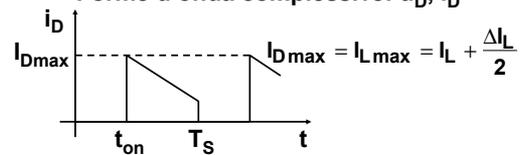
$$P_j = P_o \Rightarrow U_j \cdot I_j = U_o \cdot I_o$$

da cui:
$$\frac{I_j}{I_o} = \frac{U_o}{U_j} = \delta$$

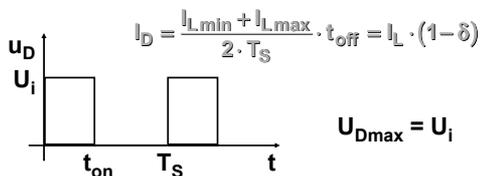
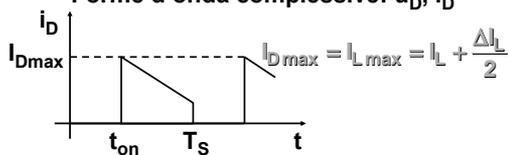
Forme d'onda compressive: u_D, i_D



Forme d'onda compressive: u_D, i_D



Forme d'onda compressive: u_D, i_D

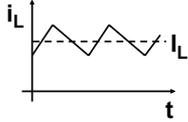


Forme d'onda compressive: i_C

$$\frac{i_L}{i_C} = \frac{I_o}{I_c} = \dots$$

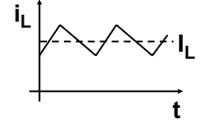
Forme d'onda compressive: i_C

$$\begin{array}{c} \overrightarrow{i_L} \quad \overrightarrow{i_o} \\ i_C \mid + \\ C \quad u_C \\ - \end{array}$$



Forme d'onda compressive: i_C

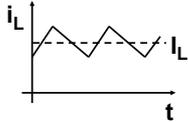
$$\begin{array}{c} \overrightarrow{i_L} \quad \overrightarrow{i_o} \\ i_C \mid + \\ C \quad u_C \\ - \end{array}$$



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

Forme d'onda compressive: i_C

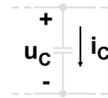
$$\begin{array}{c} \overrightarrow{i_L} \quad \overrightarrow{i_o} \\ i_C \mid + \\ C \quad u_C \\ - \end{array}$$



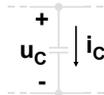
A regime: $I_L = I_o \Rightarrow i_C = I_L - I_o$



Forme d'onda compressive: u_C



Forme d'onda compressive: u_C



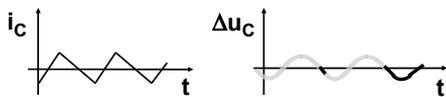
$$\Delta u_C = u_C - U_o = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt$$

Forme d'onda compressive: u_C



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

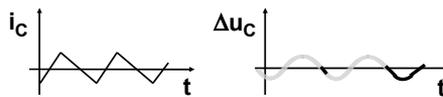
Forme d'onda compressive: u_C



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

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

Forme d'onda compressive: u_C



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

$$\Delta u_C = \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \left(I_{Cmax} \cdot \frac{t_{on} + t_{off}}{2} \right)$$
$$= \frac{1}{2 \cdot C} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_S}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_S \cdot C}$$

Esempio di dimensionamento

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

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\delta = \frac{U_o}{U_i}$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$\delta = \frac{U_o}{U_i} = \frac{12}{U_{i\max}} + \frac{12}{U_{i\min}}$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

Esempio di dimensionamento

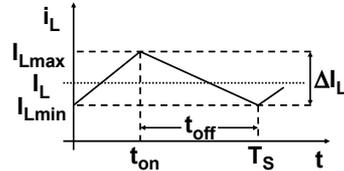
$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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



Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

$$\text{Posto: } \Delta I_{Lmax} = 0.2 I_{On}$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

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

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

$$C = 4.16 \mu F$$

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

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

Pulsazione di risonanza:

Esempio di dimensionamento

$$U_i = 19.6V + 28.8V$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 0 + 2A$$

$$\Delta U_o \leq 120mV$$

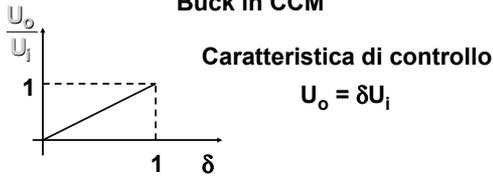
$$C = 4.16 \mu F \Rightarrow C = 4.7 \mu F$$

Pulsazione di risonanza:

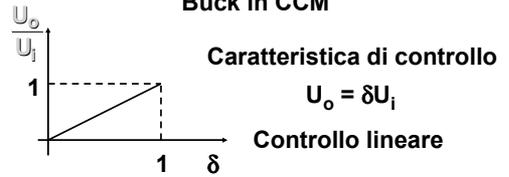
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cong 35 \text{krad/s}$$

Caratteristiche statiche del convertitore Buck in CCM

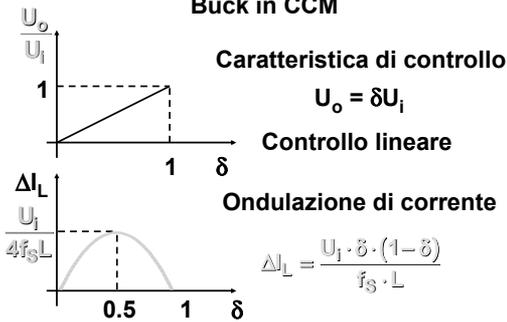
Caratteristiche statiche del convertitore Buck in CCM



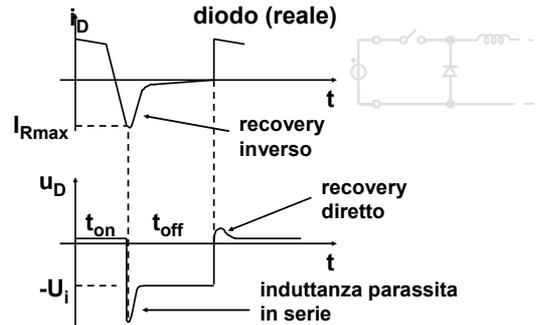
Caratteristiche statiche del convertitore Buck in CCM



Caratteristiche statiche del convertitore Buck in CCM



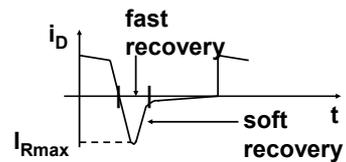
Andamenti di corrente e tensione del diodo (reale)



Osservazioni

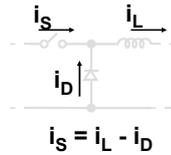
- La corrente di recovery inverso può avere lo stesso ordine di grandezza della corrente diretta
- Al recovery inverso sono associate perdite
- Il recovery diretto è normalmente influente
- I diodi vanno scelti soft-recovery (per ridurre la sovratensione) e fast-recovery (per ridurre I_{Rmax} e le perdite)

Osservazioni

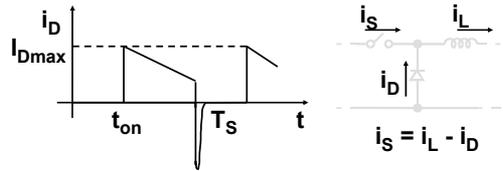


- I diodi vanno scelti soft-recovery (per ridurre la sovratensione) e fast-recovery (per ridurre I_{Rmax} e le perdite)

Andamenti reali della corrente in S e D

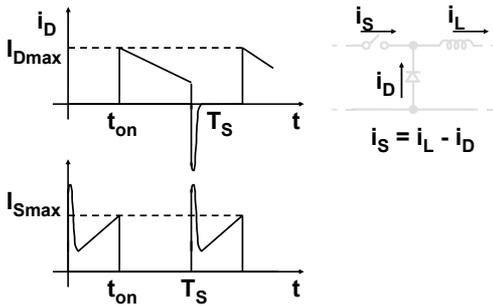


Andamenti reali della corrente in S e D



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