

# Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

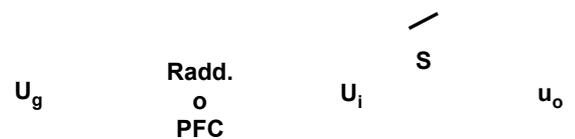
*“Introduzione ai convertitori a commutazione”*

## Argomenti trattati

- Struttura di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck o Step-Down)
- Principio della regolazione di tensione a controllo di tempo (Pulse Width Modulation - PWM)
- Filtraggio della tensione di uscita

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)

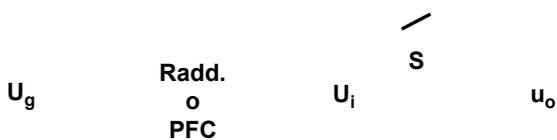
Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)



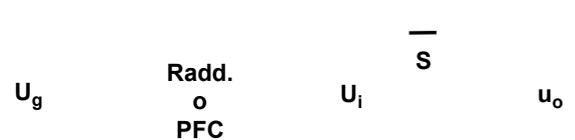
Modi di funzionamento:

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)



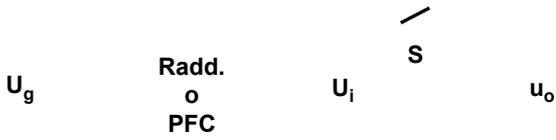
Modi di funzionamento:



Modi di funzionamento:

S on  $\Rightarrow$   $u_o = U_i$

**Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)**

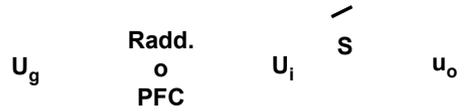


**Modi di funzionamento:**

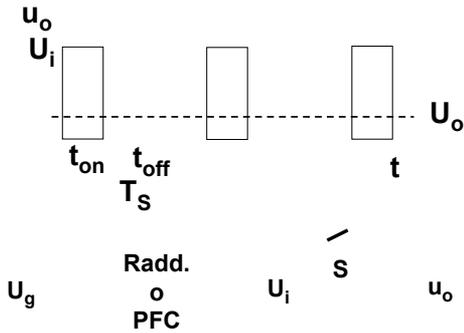
**S on**  $\Rightarrow u_o = U_i$

**S off**  $\Rightarrow u_o = 0$

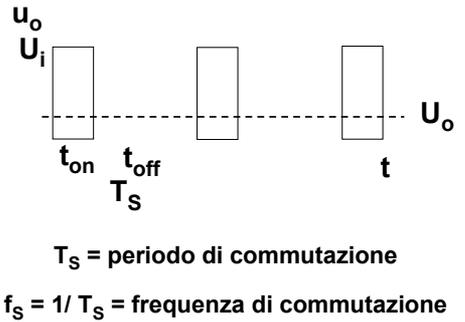
**Regolazione di tensione a controllo di tempo**



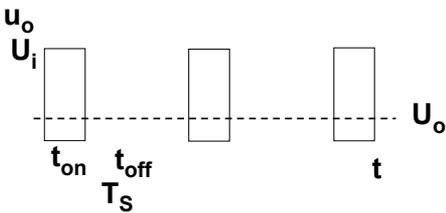
**Regolazione di tensione a controllo di tempo**



**Regolazione di tensione a controllo di tempo**

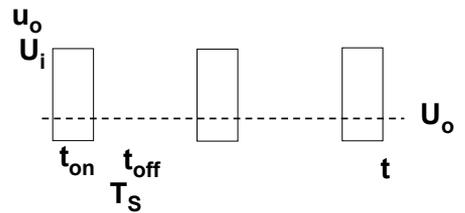


**Regolazione di tensione a controllo di tempo**



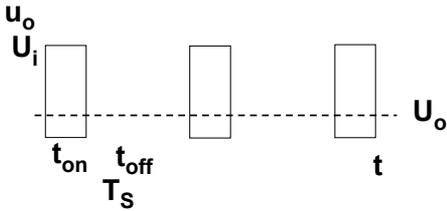
$$U_o = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u_o(t) dt$$

**Regolazione di tensione a controllo di tempo**

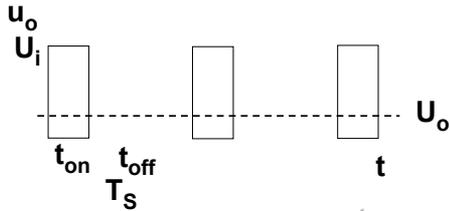
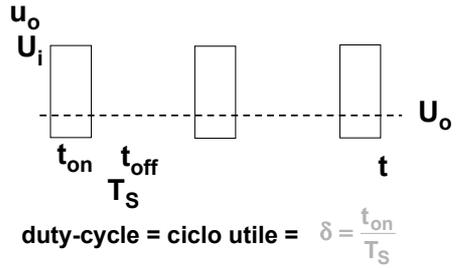


$$U_o = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u_o(t) dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{t_{on}} U_i dt$$

**Regolazione di tensione a controllo di tempo**

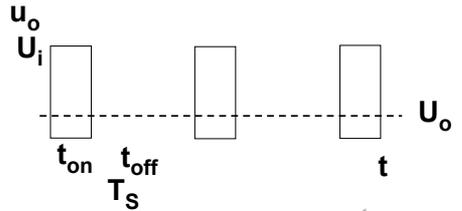


$$U_o = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u_o(t) dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{t_{on}} U_i dt = U_i \frac{t_{on}}{T_S}$$



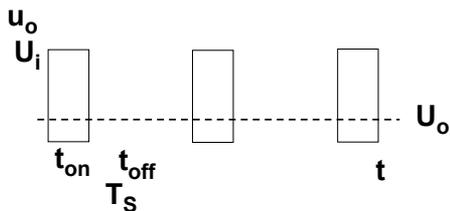
duty-cycle = ciclo utile =  $\delta = \frac{t_{on}}{T_S}$

$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_S} = \delta U_i$$



duty-cycle = ciclo utile =  $\delta = \frac{t_{on}}{T_S}$

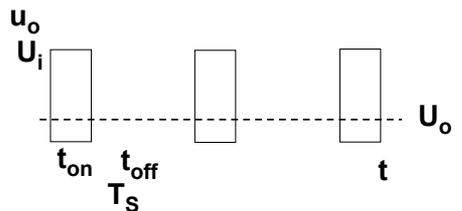
$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_S} = \delta U_i \quad 0 \leq U_o \leq U_i$$



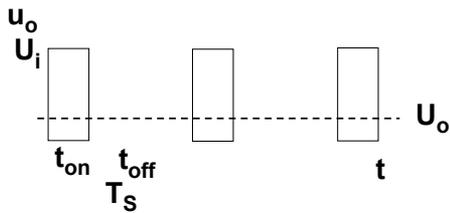
duty-cycle = ciclo utile =  $\delta = \frac{t_{on}}{T_S}$

$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_S} = \delta U_i \quad 0 \leq U_o \leq U_i$$

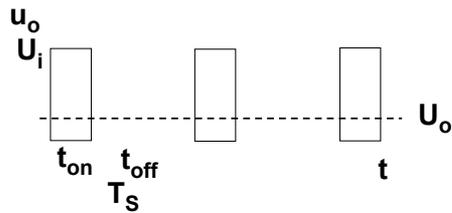
**Convertitore abbassatore di tensione  
(Buck o step-down)**



**PROBLEMA:** La forma d'onda di  $u_o$  è distorta

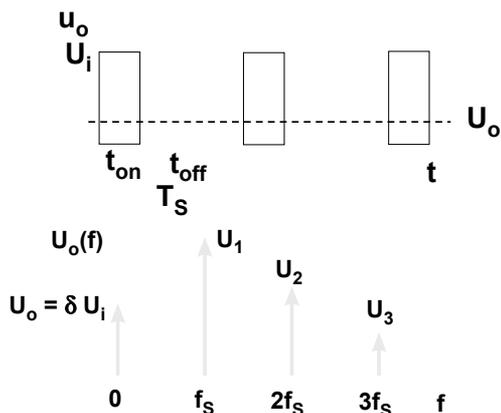


**PROBLEMA:** La forma d'onda di  $u_o$  è distorta  
Le armoniche sono a frequenza multipla di  $f_s$



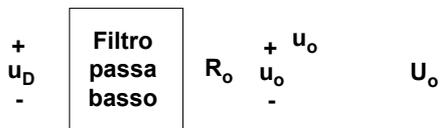
**PROBLEMA:** La forma d'onda di  $u_o$  è distorta  
Le armoniche sono a frequenza multipla di  $f_s$   
Ampiezza dell'armonica a frequenza  $n \cdot f_s$ :

$$U_n = \frac{2U_i}{n\pi} \cdot \sin(n\pi\delta)$$

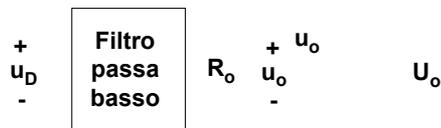


**Filtraggio della tensione di uscita**

**Filtraggio della tensione di uscita**



**Filtraggio della tensione di uscita**



**Obiettivi:**

- riduzione dell'ondulazione di  $u_o$
- rendimento elevato

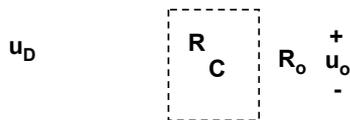
### Filtro passa basso del 1° ordine

### Filtro passa basso del 1° ordine

(Non usato in pratica)

### Filtro passa basso del 1° ordine

(Non usato in pratica)



### Filtro passa basso del 1° ordine

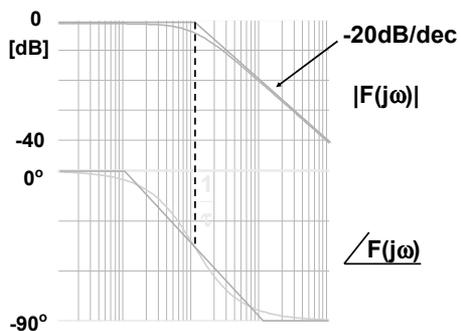
(Non usato in pratica)



Funzione di trasferimento

$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_D(s)} = \frac{R_o}{R + R_o} \cdot \frac{1}{1 + sC \frac{RR_o}{R + R_o}} = \frac{k}{1 + s\tau}$$

### Filtro passa basso del 1° ordine



### Filtro passa basso del 1° ordine

Caratteristiche:

- il filtro è dissipativo e attenua
- per avere una buona attenuazione delle armoniche occorre che il polo del filtro  $1/\tau \ll 2\pi f_s$
- il polo a bassa frequenza limita la velocità di risposta del convertitore

## Filtro passa basso del 1° ordine

### Caratteristiche:

- il filtro è dissipativo e attenua
- per avere una buona attenuazione delle armoniche occorre che il polo del filtro  $1/\tau \ll 2\pi f_s$
- il polo a bassa frequenza limita la velocità di risposta del convertitore

Queste condizioni rendono generalmente inapplicabile il filtro del 1° ordine

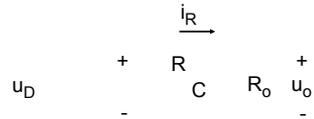
Filtro passa basso del 1° ordine

Filtro passa basso del 1° ordine

Calcolo del rendimento teorico

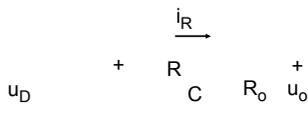
Filtro passa basso del 1° ordine

Calcolo del rendimento teorico



Filtro passa basso del 1° ordine

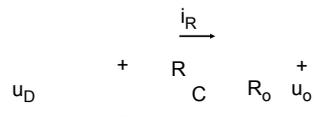
Calcolo del rendimento teorico



$$U_o = U_D \frac{R_o}{R + R_o} = U_i \delta k$$

Filtro passa basso del 1° ordine

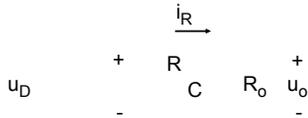
Calcolo del rendimento teorico



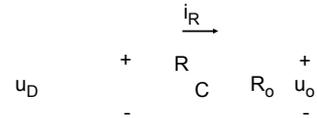
$$U_o = U_D \frac{R_o}{R + R_o} = U_i \delta k$$

$$k = \frac{R_o}{R + R_o} = \text{fattore di attenuazione}$$

Filtro passa basso del 1° ordine



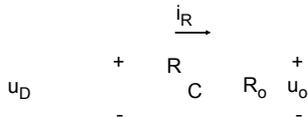
Filtro passa basso del 1° ordine



Fattore di conversione:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \delta k = \text{costante}$$

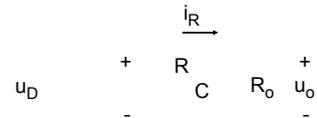
Filtro passa basso del 1° ordine



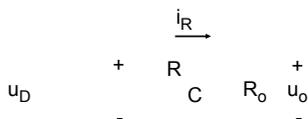
Fattore di conversione:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \delta k = \text{costante} \Rightarrow \delta = \frac{M}{k}$$

Filtro passa basso del 1° ordine

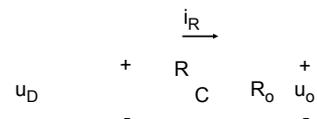


Filtro passa basso del 1° ordine



$$I_{R_{\max}} = \frac{U_i - U_o}{R} = \frac{U_i(1-M)}{R}$$

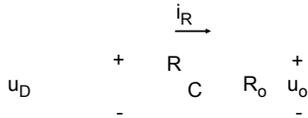
Filtro passa basso del 1° ordine



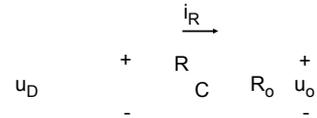
$$I_{R_{\max}} = \frac{U_i - U_o}{R} = \frac{U_i(1-M)}{R}$$

$$\frac{I_{R_{\max}}}{I_o} = \frac{U_i(1-M)R_o}{R_s U_o} = \frac{(1-M)}{M} \frac{k}{(1-k)}$$

Filtro passa basso del 1° ordine

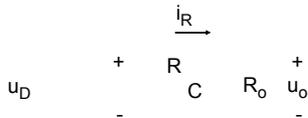


Filtro passa basso del 1° ordine



$$P_i = U_i I_S = U_i I_{R_{\max}} \delta$$

Filtro passa basso del 1° ordine



$$P_i = U_i I_S = U_i I_{R_{\max}} \delta$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_{R_{\max}} \delta} = \frac{(1-k)M}{(1-M)}$$

**Rendimento del filtro del 1° ordine**

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R+R_o}$$

**Rendimento del filtro del 1° ordine**

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R+R_o}$$

**Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.**

**Rendimento del filtro del 1° ordine**

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R+R_o}$$

**Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.**

$$M = \delta k \quad \Rightarrow \quad k_{\min} = M$$

### Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R+R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

Assegnato  $M = U_o/U_i$ , il valore minimo di k si ha per  $\delta = 1$  ( $k = M$ ).

### Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R+R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

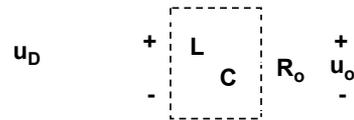
Assegnato  $M = U_o/U_i$ , il valore minimo di k si ha per  $\delta = 1$  ( $k = M$ ).

$$\eta = M$$

é il massimo valore possibile del rendimento

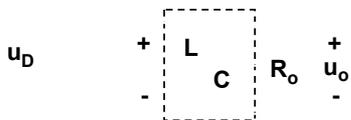
### Filtro passa basso del 2° ordine

### Filtro passa basso del 2° ordine

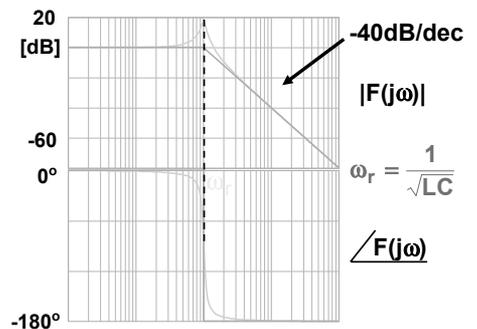


### Filtro passa basso del 2° ordine

### Filtro passa basso del 2° ordine



$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_D(s)} = \frac{1}{1 + s \frac{L}{R_o} + s^2 LC}$$



## Filtro passa basso del 2° ordine

### Caratteristiche del filtro:

- non attenua in c.c.
- non è dissipativo
- presenta una risonanza (poli complessi coniugati)
- ha una efficacia di filtraggio superiore a quella del filtro del 1° ordine

## Filtro del 2° ordine - Esempio:

### Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V}$$

$$U_o = 12 \text{ V}$$

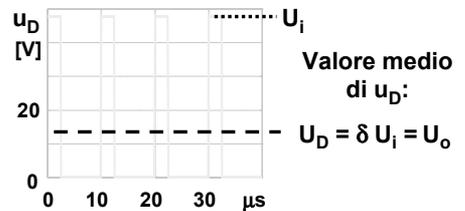
$$I_o = 1 \text{ A}$$

### Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V}$$

$$U_o = 12 \text{ V}$$

$$I_o = 1 \text{ A}$$

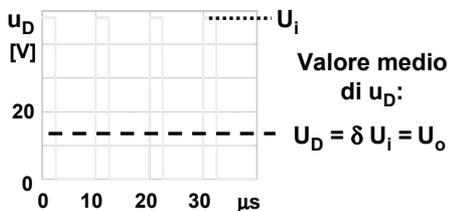


### Filtro del 2° ordine - Esempio:

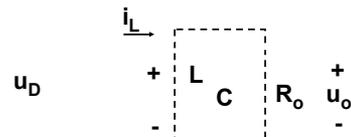
$$U_i = 48 \text{ V}$$

$$U_o = 12 \text{ V} \Rightarrow \delta = \frac{U_o}{U_i} = 0.25$$

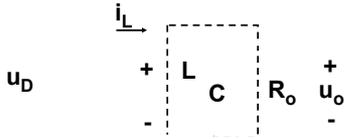
$$I_o = 1 \text{ A} \quad R_o = 12 \Omega$$



## Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

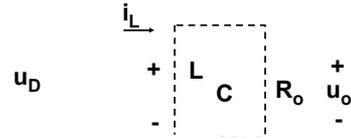


### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Pulsazione di risonanza:  $\omega_r = \frac{2\pi f_S}{10}$

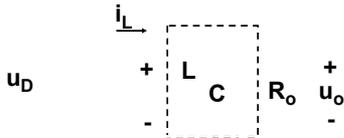
### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Pulsazione di risonanza:  $\omega_r = \frac{2\pi f_S}{10}$

In questo modo si ottiene un'attenuazione di 40 dB dell'armonica fondamentale a frequenza  $f_S$ .

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

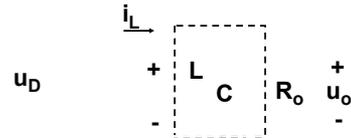


Pulsazione di risonanza:  $\omega_r = \frac{2\pi f_S}{10}$

$f_S = 1/T_S = 100 \text{ kHz}$

$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

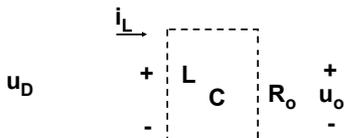
### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_S \cdot L} \delta$$

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

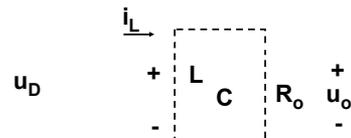


Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_S \cdot L} \delta$$

Fissati  $U_o$  e  $\Delta I_L$  risulta assegnato il prodotto  $f_S \cdot L$ .

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

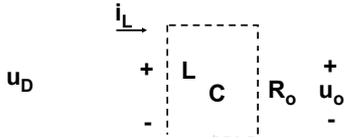


Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_S \cdot L} \delta$$

Fissati  $U_o$  e  $\Delta I_L$  risulta assegnato il prodotto  $f_S \cdot L$ .  
L è dunque tanto minore quanto maggiore è  $f_S$ .

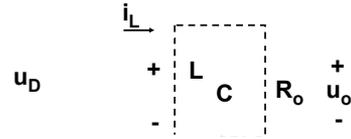
### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Limitazione dell'ondulazione di corrente:

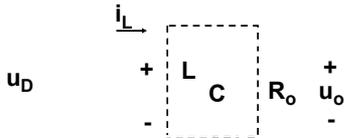
$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_s \cdot L} \delta < 0.2 I_o \Rightarrow L = 450 \mu\text{H}$$

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad L = 450 \mu\text{H}$$

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

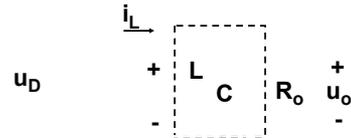


$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad L = 450 \mu\text{H}$$

$$\Downarrow$$

$$C = \frac{1}{\omega_r^2 L} = 0.56 \mu\text{F}$$

### Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



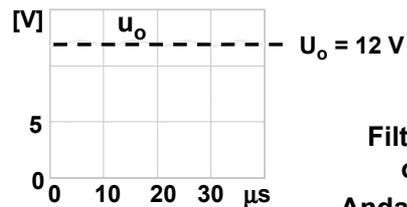
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad L = 450 \mu\text{H}$$

Anche C è tanto più piccola quanto maggiore è  $f_s$ .

$$\Downarrow$$

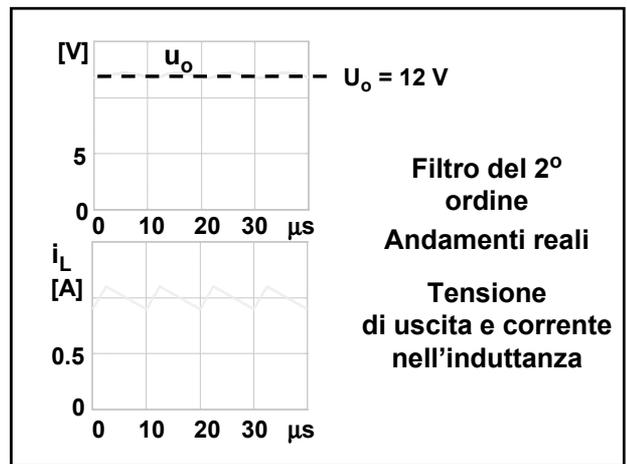
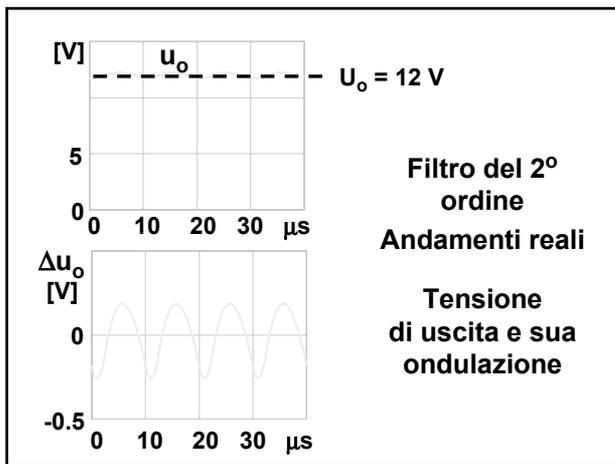
$$C = \frac{1}{\omega_r^2 L} = 0.56 \mu\text{F}$$

Filtro del 2°  
ordine  
Andamenti reali



Filtro del 2°  
ordine  
Andamenti reali

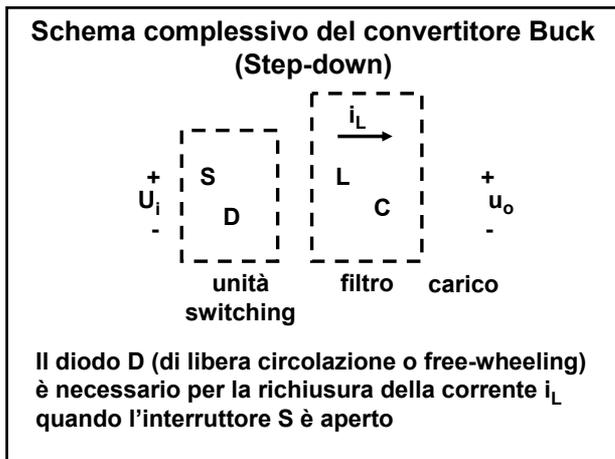
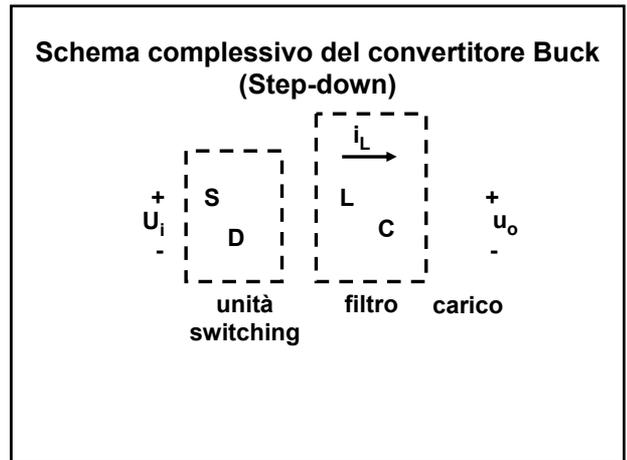
Tensione  
di uscita



**Filtro del 2° ordine**

**Conclusioni**

- il filtro non attenua e non è dissipativo
- per avere bassa ondulazione della tensione di uscita la frequenza di risonanza deve essere significativamente inferiore alla frequenza di commutazione
- a parità di attenuazione il filtro risulta tanto più piccolo quanto più elevata è la frequenza di commutazione



**Conclusioni**

- Il convertitore abbassatore di tensione (Buck o Step-Down) include:
  - una sezione di commutazione (switching), costituita da un interruttore elettronico e da un diodo
  - un filtro del secondo ordine
- Il controllo della tensione d'uscita si effettua regolando il duty-cycle con la tecnica PWM
- Il rendimento del convertitore è teoricamente unitario