

Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

"Introduzione ai convertitori a commutazione"

Argomenti trattati

- Richiami sulle caratteristiche statiche e dinamiche degli interruttori elettronici
- Definizione dell'interruttore elettronico ideale
- 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

Interruttori elettronici di potenza

Power BJT:

$$U_{S_{\max}} \cong 500V, I_{S_{\max}} \cong 100A, t_{SW} \cong 1\mu s$$



Applicazioni limitate
(si preferiscono interruttori comandati in tensione)

Interruttori elettronici di potenza

Power MOS:

$$U_{S_{\max}} \cong 500V, I_{S_{\max}} \cong 50A, t_{SW} \cong 100ns$$



Applicazioni di potenza medio-piccola
($< 1 kW$)

Interruttori elettronici di potenza

IGBT:

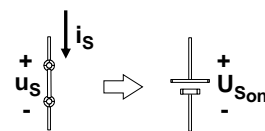
$$U_{S_{\max}} > 1kV, I_{S_{\max}} > 1kA, t_{SW} \cong 1\mu s$$



Usati per applicazioni di potenza media e grande (kW-MW)

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche statiche

Conduzione: S on



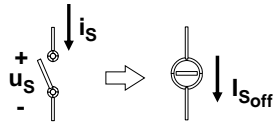
$$U_{S_{on}} \cong 1 + 3 V$$



$$P_{on} > 0$$

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche statiche

Interdizione: S off

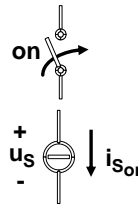


$$I_{Soff} \cong nA \div mA$$

$$P_{off} \cong 0$$

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche dinamiche

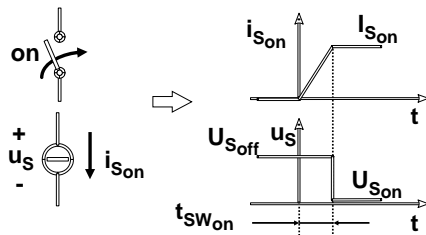
Commutazione in accensione:



Durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa crescente

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche dinamiche

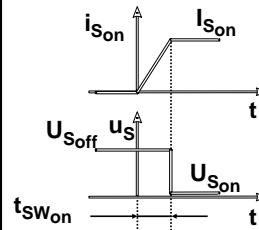
Commutazione in accensione:



U_{Soff} e I_{Son} sono imposti dal circuito esterno

Interruttori elettronici

Commutazione in accensione:
Energia dissipata in ogni commutazione



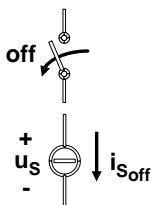
$$W_{SWon} = \int_0^{t_{SWon}} u_S i_S dt$$

$$= \frac{U_{Soff} I_{Son}}{2} t_{SWon}$$

$$P_{SWon} = f_S \cdot W_{SWon}$$

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche dinamiche

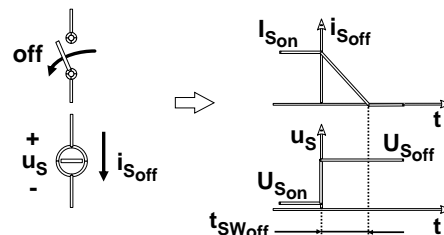
Commutazione in spegnimento:



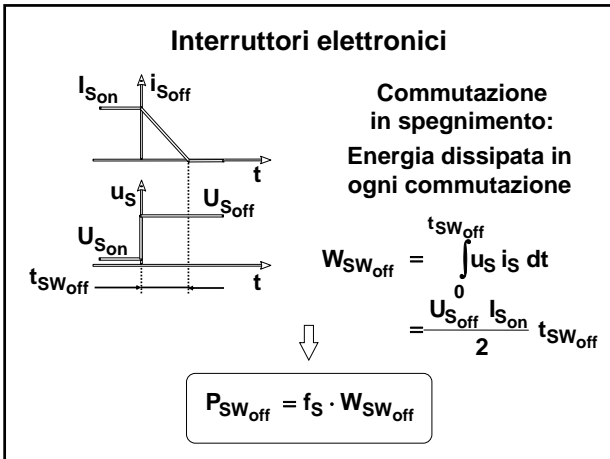
Durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa decrescente

Interruttori elettronici di potenza Caratteristiche dinamiche

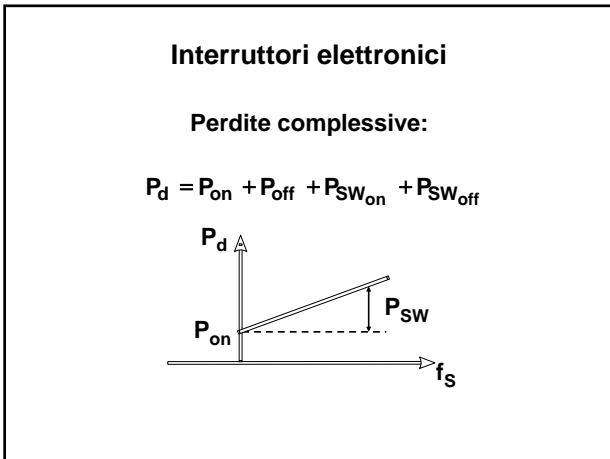
Commutazione in spegnimento:



U_{Soff} e I_{Son} sono imposti dal circuito esterno



- ### Interruttori elettronici
- Le perdite di commutazione sono circa proporzionali ad $I_{S_{on}}$, $U_{S_{off}}$ ed f_S
 - Le perdite di conduzione sono circa proporzionali ad $I_{S_{on}}$ (ed indipendenti da f_S)
 - Le perdite di interdizione sono trascurabili



- ### Interruttore ideale
- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
 - I tempi di commutazione degli interruttori sono infatti molto più piccoli dei tempi con cui evolvono le grandezze del circuito
 - Le cadute di tensione in conduzione sono solitamente trascurabili rispetto alle tensioni in gioco nel circuito

- ### Interruttore ideale
- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
 - I circuiti vengono dunque analizzati, in prima approssimazione, assumendo interruttori ideali
 - Gli effetti delle nonidealità (in particolare le perdite) vengono valutati in seconda approssimazione

Interruttore elettronico ideale Caratteristiche statiche

$\begin{matrix} + \\ u_S \\ - \end{matrix}$
 $\downarrow i_S$

Conduzione:

S on $\Leftrightarrow u_S = 0 \Leftrightarrow P_{on} = u_S i_S = 0$

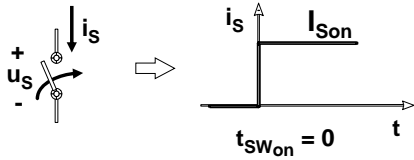
$\begin{matrix} + \\ u_S \\ - \end{matrix}$
 $\downarrow i_S$

Interdizione:

S off $\Leftrightarrow i_S = 0 \Leftrightarrow P_{off} = u_S i_S = 0$

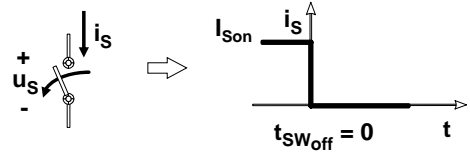
In ambo i modi di funzionamento l'interruttore non dissipa potenza

Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in accensione:



$$W_{SW_{on}} = \int_0^{t_{SW_{on}}} u_S \cdot i_S dt = 0$$

Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:

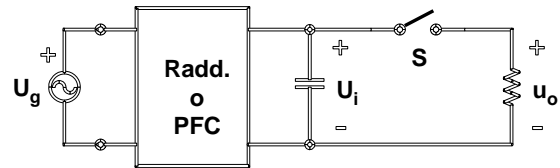


$$W_{SW_{off}} = \int_0^{t_{SW_{off}}} u_S \cdot i_S dt = 0$$

Interruttori elettronici ideali

- Caduta di tensione in conduzione nulla
- Corrente in interdizione nulla
- Tempi di commutazione nulli
- Nessuna potenza dissipata

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

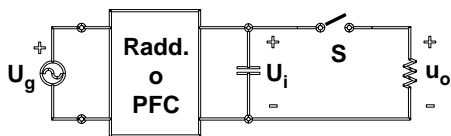
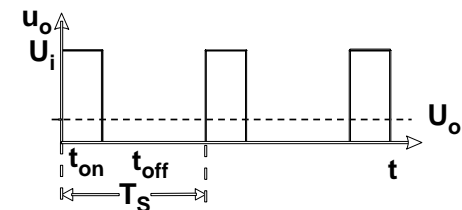


Modi di funzionamento:

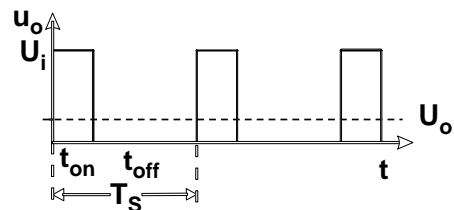
S on \Rightarrow $u_o = U_i$

S off \Rightarrow $u_o = 0$

Regolazione di tensione a controllo di tempo



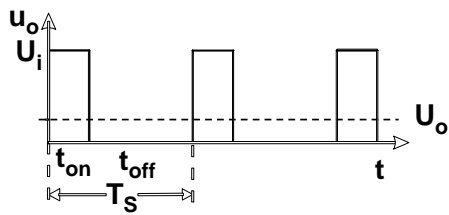
Regolazione di tensione a controllo di tempo



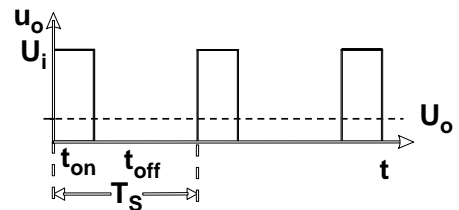
$T_S =$ periodo di commutazione

$f_S = 1/T_S =$ frequenza di commutazione

Regolazione di tensione a controllo di tempo



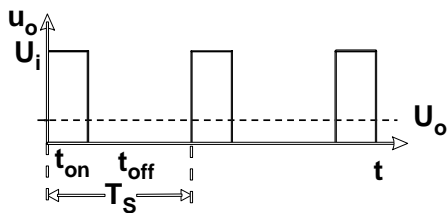
$$U_o = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u_o(t) dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{t_{on}} U_i dt = U_i \frac{t_{on}}{T_S}$$



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

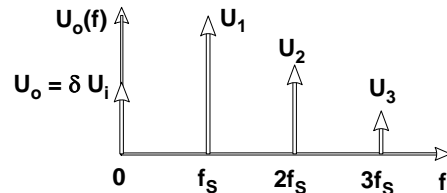
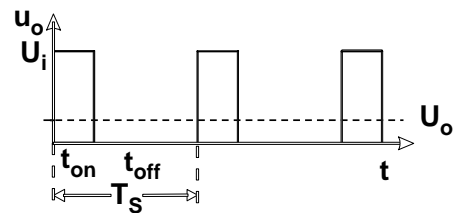
$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_S} = \delta U_i \quad 0 \leq U_o \leq U_i$$

Convertitore abbassatore di tensione
(Buck o step-down)



PROBLEMA: La forma d'onda di u_o è distorta
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

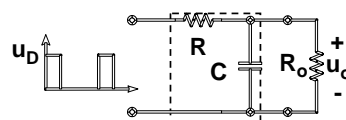


Obiettivi:

- riduzione dell'ondulazione di u_o
- rendimento elevato

Filtro passa basso del 1° ordine

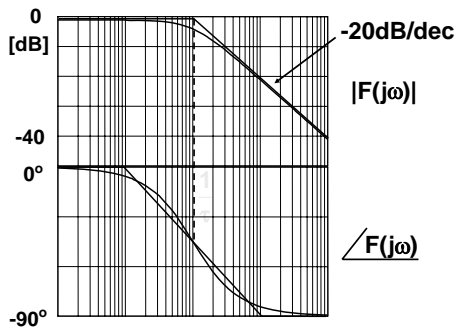
(Non usato in pratica)



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

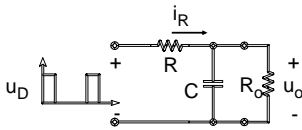
Caratteristiche:

- 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

Queste condizioni rendono generalmente inapplicabile il filtro del 1° ordine

Filtro passa basso del 1° ordine

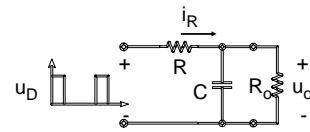
Calcolo del rendimento teorico



$$U_o = U_D \frac{R_0}{R + R_0} = U_i \delta k$$

$$k = \frac{R_0}{R + R_0} = \text{fattore di attenuazione}$$

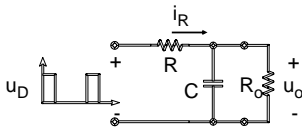
Filtro passa basso del 1° ordine



Fattore di conversione:

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

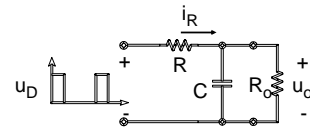
Filtro passa basso del 1° ordine



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

$$\frac{I_{R_{\max}}}{I_b} = \frac{U_i (1 - M) R_0}{R_S U_o} = \frac{(1 - M) k}{M (1 - k)}$$

Filtro passa basso del 1° ordine



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

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

Rendimento del filtro del 1° ordine

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

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

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

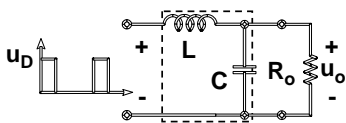
Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

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

$$\eta = M$$

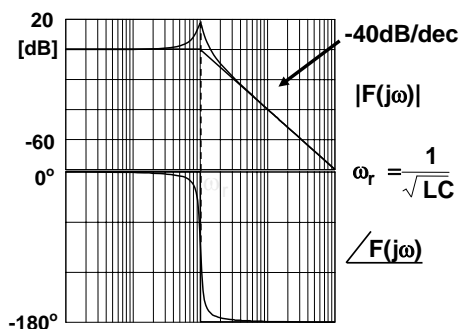
é il massimo valore possibile del rendimento

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



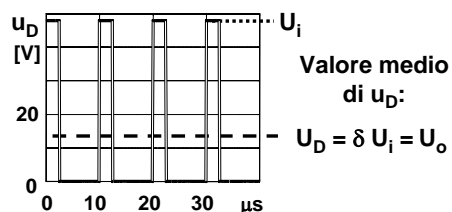
Filtro passa basso del 2° ordine

Caratteristiche del filtro:

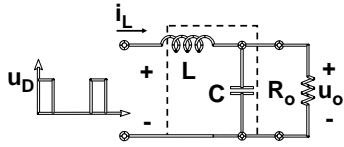
- non attenua in c.c.
- non è dissipativo
- presenta una risonanza (poli complessi coniugati)
- ha una efficacia di filtraggio superiore a quella del filtro del 1° ordine

Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V} \quad U_o = 12 \text{ V} \quad I_o = 1 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{U_o}{U_i} = 0.25 \quad R_o = 12 \Omega$$



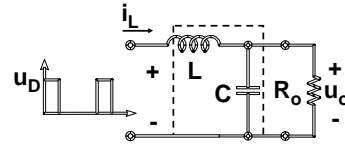
Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



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

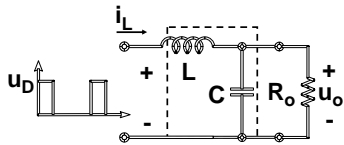


Pulsazione di risonanza: $\omega_r = \frac{2\pi f_s}{10}$

$$f_s = 1/T_s = 100 \text{ kHz}$$

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

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

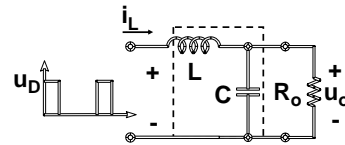


Limitazione dell'ondulazione di corrente:

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

Fissati U_o e ΔI_L risulta assegnato il prodotto $f_s \cdot L$.
L è dunque tanto minore quanto maggiore è f_s .

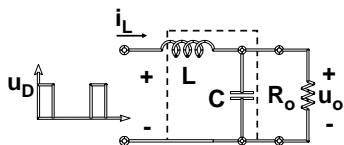
Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Limitazione dell'ondulazione di corrente:

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

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

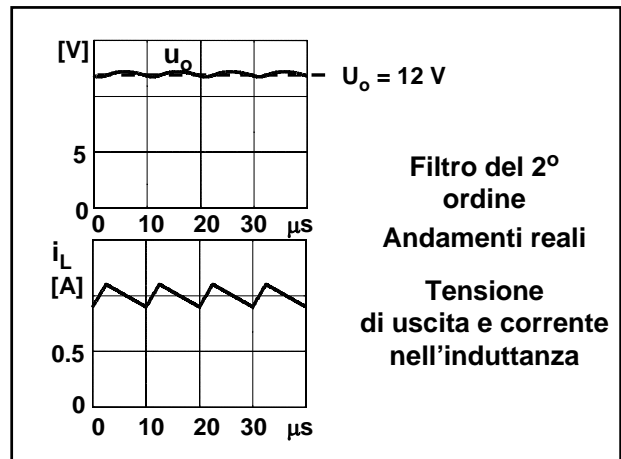
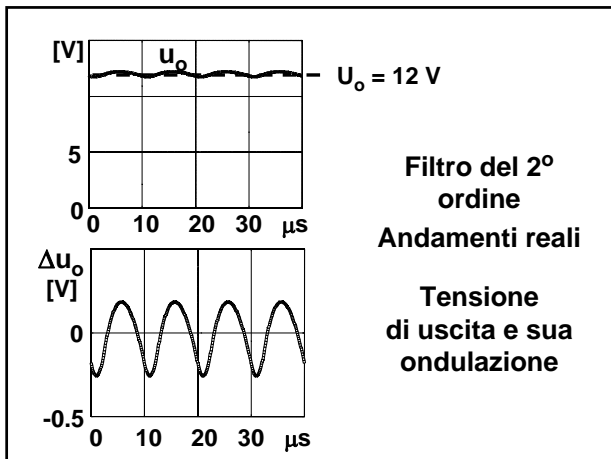


$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad L = 450 \mu\text{H}$$

Anche C è tanto più piccola quanto maggiore è f_s .

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

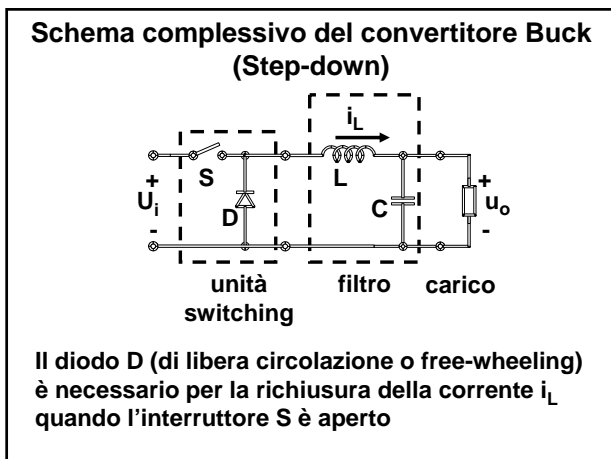
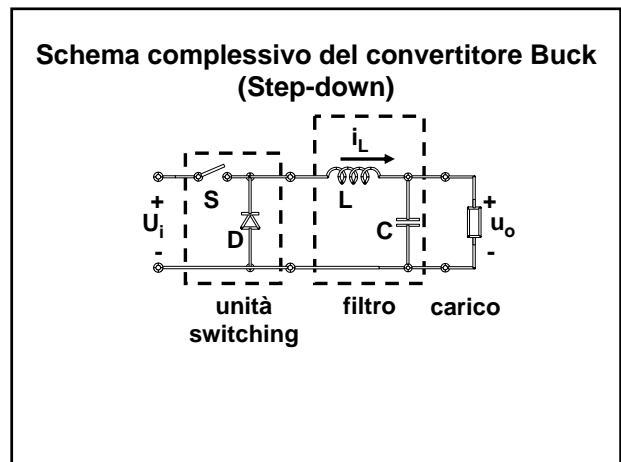
Filtro del 2° ordine
Andamenti reali



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