

# Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

*“Regolazione della tensione del  
convertitore Buck”*

## Argomenti trattati

- Modulazione di larghezza degli impulsi (Pulse Width Modulation, PWM)
- Controllo di tensione PWM
- Risposta dinamica del controllo PWM

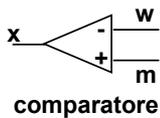
Regolazione della tensione di uscita con  
tecnica PWM (Pulse Width Modulation)

**Obiettivo:** generare un valore di duty-cycle (parametro di controllo del convertitore) proporzionale ad un segnale di riferimento

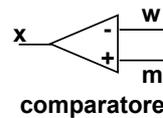
**Metodo:** modulazione dei tempi  $t_{on}$  e  $t_{off}$  con tecnica PWM (modulazione di durata degli impulsi)

## Modulatore PWM

### Modulatore PWM

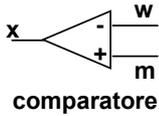


### Modulatore PWM



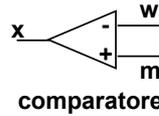
$$m > w \Rightarrow x = 1$$

### Modulatore PWM



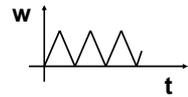
$$m > w \Rightarrow x = 1$$
$$m < w \Rightarrow x = 0$$

### Modulatore PWM

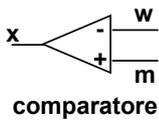


$$m > w \Rightarrow x = 1$$
$$m < w \Rightarrow x = 0$$

segnale portante

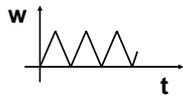


### Modulatore PWM



$$m > w \Rightarrow x = 1$$
$$m < w \Rightarrow x = 0$$

segnale portante

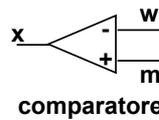


segnale modulante



Ipotesi:  $f_m \ll f_w$

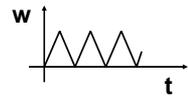
### Modulatore PWM



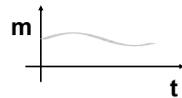
Controllo PWM:

$$m > w \Rightarrow x = 1$$
$$m < w \Rightarrow x = 0$$

segnale portante

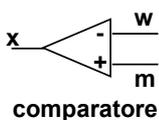


segnale modulante



Ipotesi:  $f_m \ll f_w$

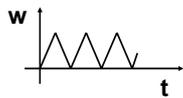
### Modulatore PWM



Controllo PWM:

$$m > w \Rightarrow x = 1 \rightarrow t_{on}$$
$$m < w \Rightarrow x = 0$$

segnale portante

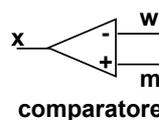


segnale modulante



Ipotesi:  $f_m \ll f_w$

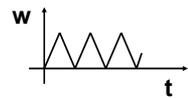
### Modulatore PWM



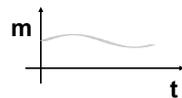
Controllo PWM:

$$m > w \Rightarrow x = 1 \rightarrow t_{on}$$
$$m < w \Rightarrow x = 0 \rightarrow t_{off}$$

segnale portante

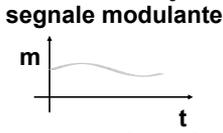
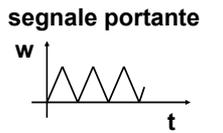
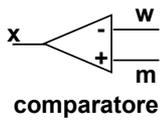


segnale modulante



Ipotesi:  $f_m \ll f_w$

### Modulatore PWM

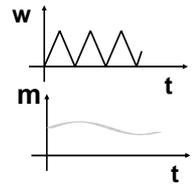
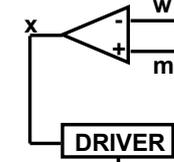


Controllo PWM:  
 $m > w \Rightarrow x = 1 \rightarrow t_{on}$   
 $m < w \Rightarrow x = 0 \rightarrow t_{off}$

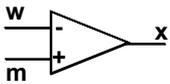
Con questa tecnica  
 $\delta$  risulta proporzionale a  $m$

Ipotesi:  $f_m \ll f_w$

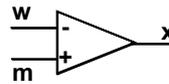
### Modulatore PWM



### Funzionamento del modulatore PWM

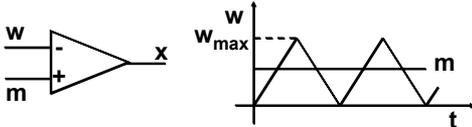


### Funzionamento del modulatore PWM



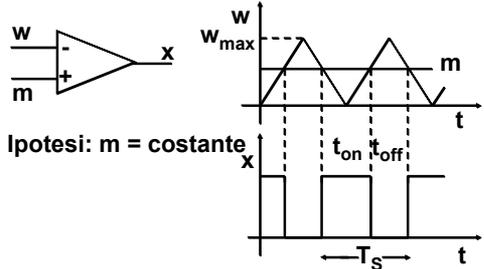
Ipotesi:  $m = \text{costante}$

### Funzionamento del modulatore PWM



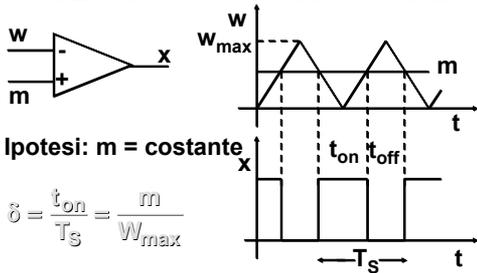
Ipotesi:  $m = \text{costante}$

### Funzionamento del modulatore PWM



Ipotesi:  $m = \text{costante}$

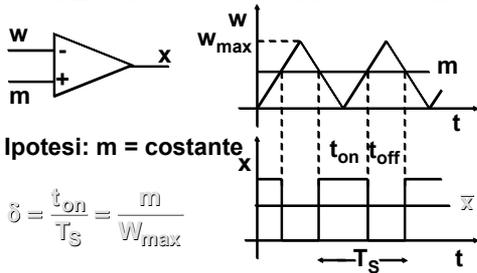
### Funzionamento del modulatore PWM



Ipotesi:  $m = \text{costante}$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{m}{W_{max}}$$

### Funzionamento del modulatore PWM

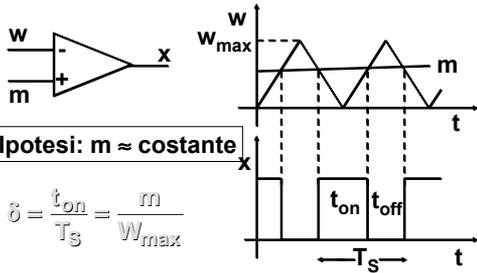


Ipotesi:  $m = \text{costante}$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{m}{W_{max}}$$

$$x = x_{BF} + x_{AF} = \bar{x} + x_{AF} = \delta + x_{AF}$$

### Funzionamento del modulatore PWM

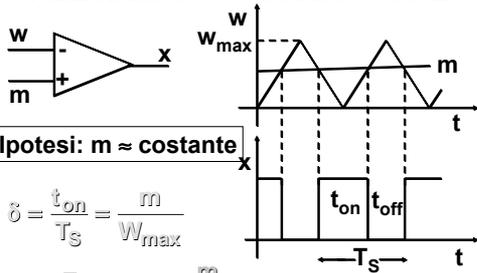


Ipotesi:  $m \approx \text{costante}$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{m}{W_{max}}$$

Se  $m$  varia lentamente ( $f_m \ll f_w$ )  $\delta$  varia corrispondentemente da ciclo a ciclo

### Funzionamento del modulatore PWM

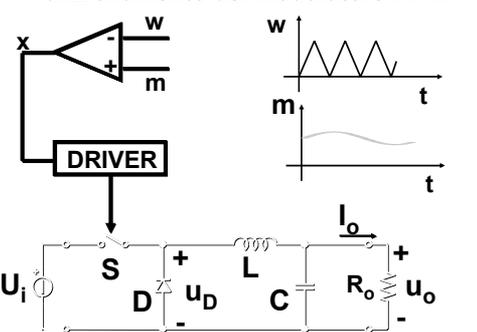


Ipotesi:  $m \approx \text{costante}$

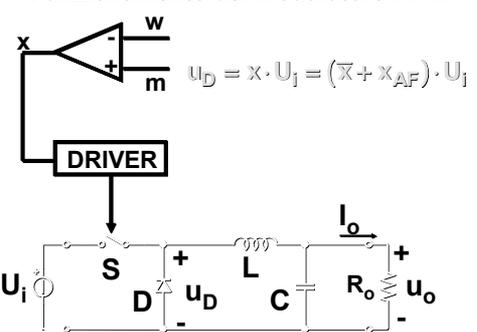
$$\delta = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{m}{W_{max}}$$

$$x = \bar{x} + x_{AF} = \frac{m}{W_{max}} + x_{AF} = \delta + x_{AF}$$

### Funzionamento del modulatore PWM

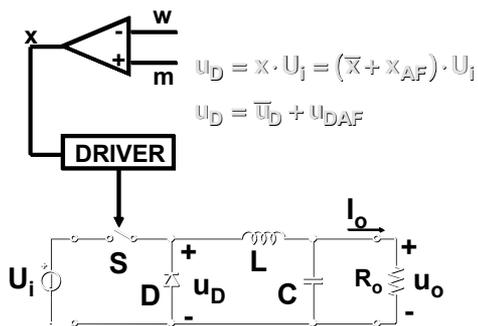


### Funzionamento del modulatore PWM

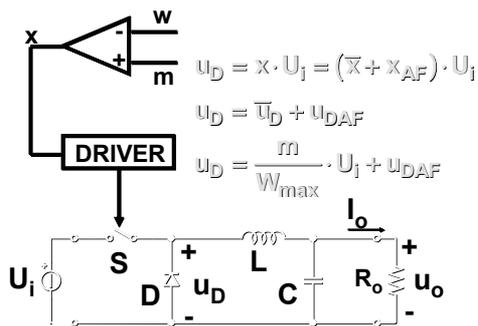


$$u_D = x \cdot U_i = (\bar{x} + x_{AF}) \cdot U_i$$

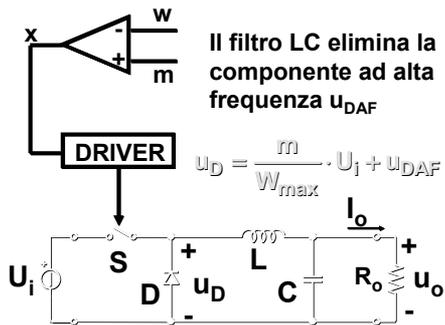
**Funzionamento del modulatore PWM**



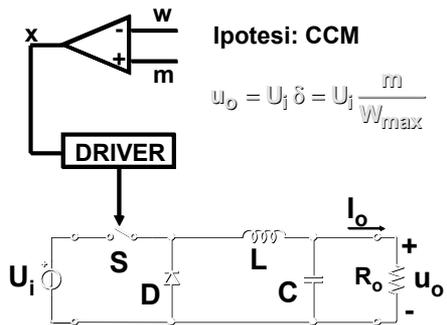
**Funzionamento del modulatore PWM**



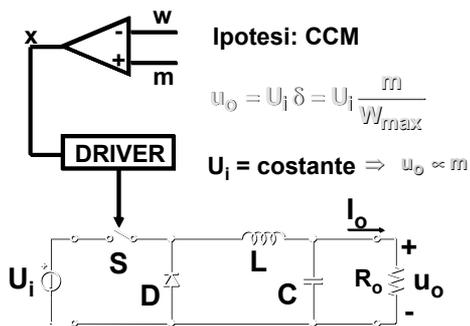
**Funzionamento del modulatore PWM**



**Funzionamento del modulatore PWM**



**Funzionamento del modulatore PWM**

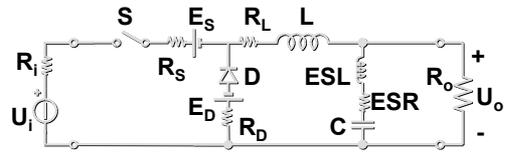


In pratica il modulatore PWM non consente di regolare  $U_o$ .

In pratica il modulatore PWM non consente di regolare  $U_o$ . Infatti, oltre che da  $\delta$ ,  $U_o$  dipende da:

- $U_i$
- Modo di funzionamento (CCM o DCM)
- $I_o$ 
  - in DCM perché  $M = f(\delta, I_o)$
  - in CCM a causa delle cadute di tensione sui componenti (S,D) e sull'induttanza L (resistenza parassita  $R_L$ )
- Altri fattori secondari (ESL, ESR di C)

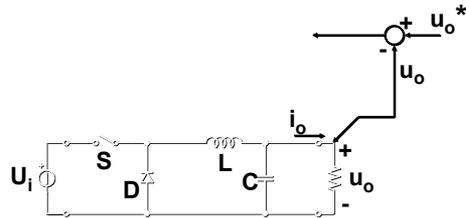
### Rappresentazione del circuito con i principali elementi parassiti



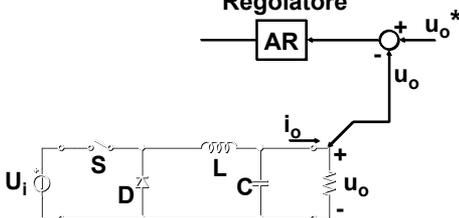
In pratica il modulatore PWM non consente di regolare  $U_o$ . Infatti, oltre che da  $\delta$ ,  $U_o$  dipende da:

- $U_i$
  - Modo di funzionamento (CCM o DCM)
  - $I_o$ 
    - in DCM perché  $M = f(\delta, I_o)$
    - in CCM a causa delle cadute di tensione sui componenti (S,D) e sull'induttanza L (resistenza parassita  $R_L$ )
  - Altri fattori secondari (ESL, ESR di C)
- Occorre quindi introdurre un controllo a retroazione di  $U_o$

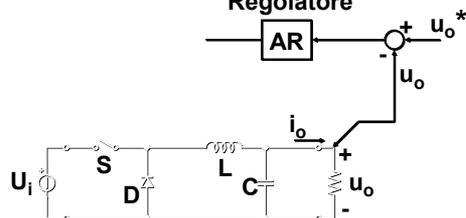
### Struttura del controllo di tensione



### Struttura del controllo di tensione Amplificatore Regolatore

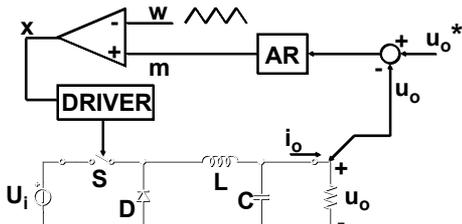


### Struttura del controllo di tensione Amplificatore Regolatore



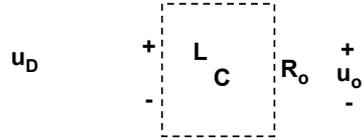
Il regolatore va scelto per garantire: stabilità, precisione, prontezza

### Struttura del controllo di tensione



Il regolatore va scelto per garantire: stabilità, precisione, prontezza

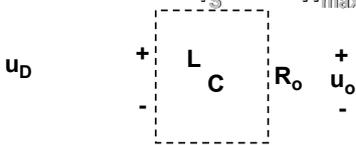
### Modellistica dinamica del convertitore



### Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di  $u_D$  in un intervallo di switching

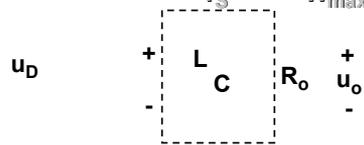
$$\bar{u}_D = U_i \cdot \delta = U_i \cdot \frac{t_{on}}{T_S} = U_i \cdot \frac{m}{W_{max}}$$



### Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di  $u_D$  in un intervallo di switching

$$\bar{u}_D = U_i \cdot \delta = U_i \cdot \frac{t_{on}}{T_S} = U_i \cdot \frac{m}{W_{max}}$$



In bassa frequenza ( $f \ll f_w$ ) il circuito si può studiare applicando un generatore di tensione  $\bar{u}_D(t)$  all'ingresso del filtro

### Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di  $u_D$  in un intervallo di switching

$$\bar{u}_D = U_i \cdot \delta = U_i \cdot \frac{t_{on}}{T_S} = U_i \cdot \frac{m}{W_{max}}$$

$$\frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} = \frac{1}{1 + s \frac{L}{R_o} + s^2 LC}$$

### Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di  $u_D$  in un intervallo di switching

$$\bar{u}_D = U_i \cdot \delta = U_i \cdot \frac{t_{on}}{T_S} = U_i \cdot \frac{m}{W_{max}}$$

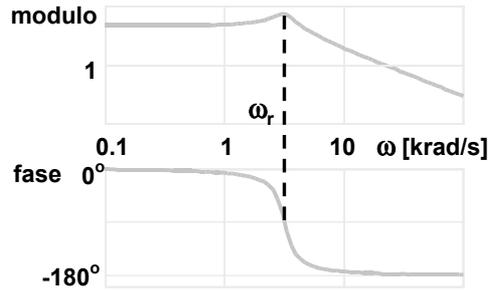
$$\frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} = \frac{1}{1 + s \frac{L}{R_o} + s^2 LC}$$

$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} \cdot \frac{\bar{u}_D(s)}{m(s)} = \frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} \cdot \frac{U_i}{W_{max}}$$

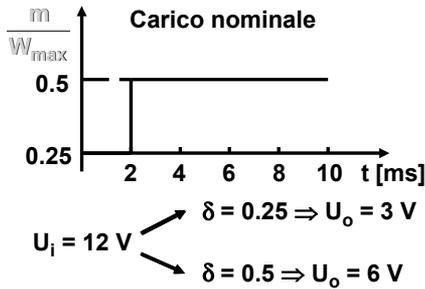
### Diagramma di Bode (senza regolatore)

$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{U_i}{W_{max}} \cdot \frac{1}{1 + s \frac{L}{R_o} + s^2 LC}$$

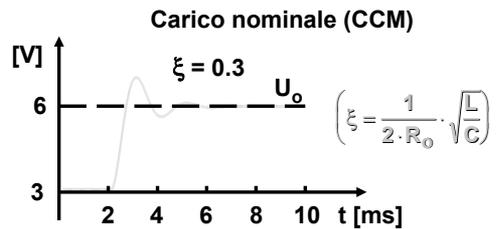
### Diagramma di Bode (senza regolatore)



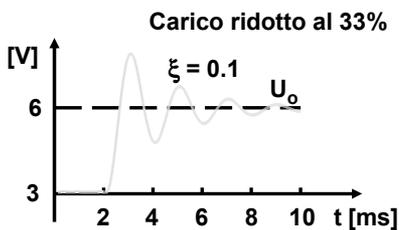
### Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m



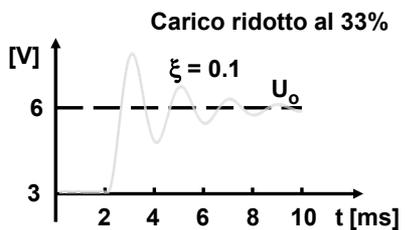
### Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m



### Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m



### Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m



Le sovraelongazioni (overshoot) non sono di norma accettabili

### Scelta dei regolatori

### Scelta dei regolatori

Il regolatore proporzionale non è usabile perchè il doppio polo del filtro rende il sistema instabile

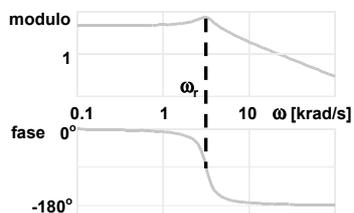
### Scelta dei regolatori

### Scelta dei regolatori

Il regolatore proporzionale non è usabile perchè il doppio polo del filtro rende il sistema instabile

Regolatore PI:

$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau}$$



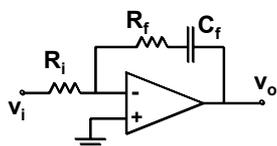
### Scelta dei regolatori

Regolatore PI:

$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau}$$

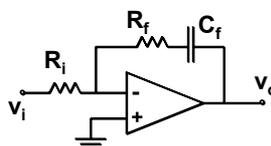
Regolatore PI:

$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau} \quad \tau \cong \frac{1}{\omega_r}$$



$$k = -R_f/R_i$$

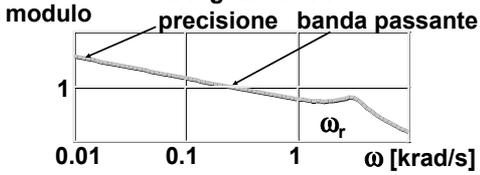
$$\tau = R_f C_f$$



$$k = -R_f/R_i$$

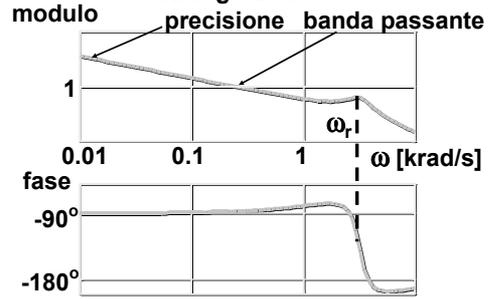
$$\tau = R_f C_f$$

**Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI**

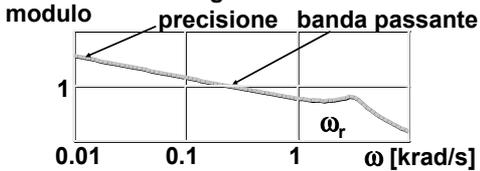


$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{U_i}{W_{max}} \cdot k \cdot \frac{1+s\tau}{s\tau} \cdot \frac{1}{1+s\frac{L}{R}+s^2LC}$$

**Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI**

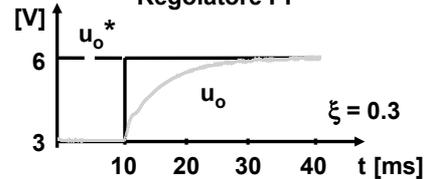


**Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI**

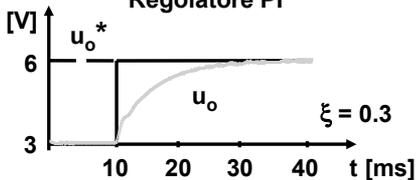


Il regolatore PI garantisce buona precisione (sistema di Tipo 1) e stabilità. La banda passante però è limitata.

**Risposta dinamica del controllo di tensione Regolatore PI**



**Risposta dinamica del controllo di tensione Regolatore PI**



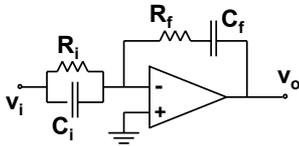
La dinamica risulta lenta, con tempi di risposta molto superiori a quelli rilevabili ad anello aperto

**Sceita dei regolatori - Regolatore PID**

$$PID(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot s = k \cdot \frac{(1+s\tau_1) \cdot (1+s\tau_2)}{s\tau_1}$$

### Sceita dei regolatori - Regolatore PID

$$PID(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot s = k \cdot \frac{(1 + s\tau_1) \cdot (1 + s\tau_2)}{s\tau_1}$$



$$k = -R_f/R_i$$

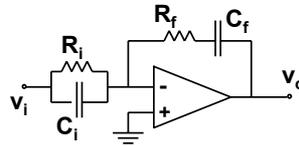
$$\tau_1 = R_f C_f$$

$$\tau_2 = R_i C_i$$

### Sceita dei regolatori - Regolatore PID

$$PID(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot s = k \cdot \frac{(1 + s\tau_1) \cdot (1 + s\tau_2)}{s\tau_1}$$

$$\tau_1 \cong \tau_2 \cong \frac{1}{\omega_r}$$

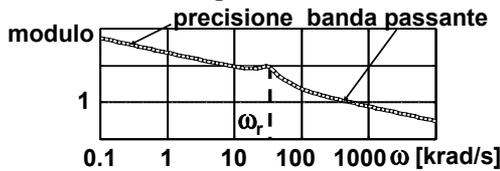


$$k = -R_f/R_i$$

$$\tau_1 = R_f C_f$$

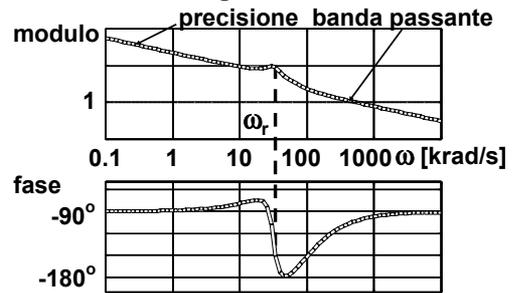
$$\tau_2 = R_i C_i$$

### Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PID

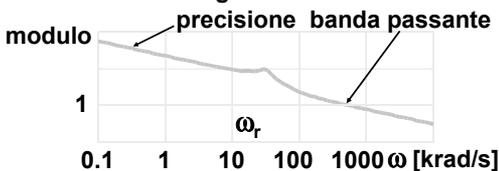


$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{U_i}{W_{max}} \cdot k \cdot \frac{(1 + s\tau_1) \cdot (1 + s\tau_2)}{s\tau_1} \cdot \frac{1}{1 + s\frac{L}{R} + s^2 LC}$$

### Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PID

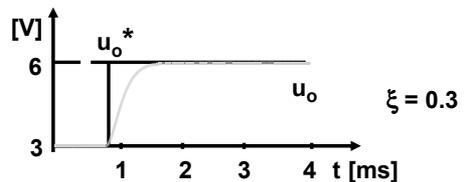


### Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PID

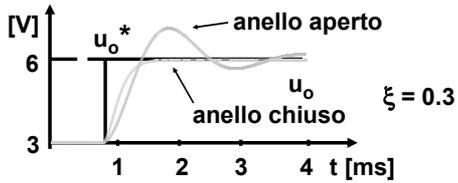


Il regolatore PID consente bande passanti elevate, ma può diventare instabile se non progettato accuratamente

### Risposta dinamica del controllo di tensione Regolatore PID

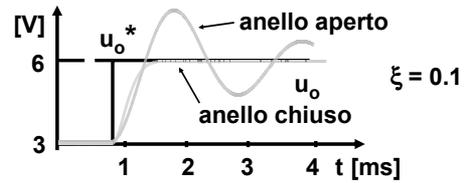


Risposta dinamica del controllo di tensione  
Regolatore PID

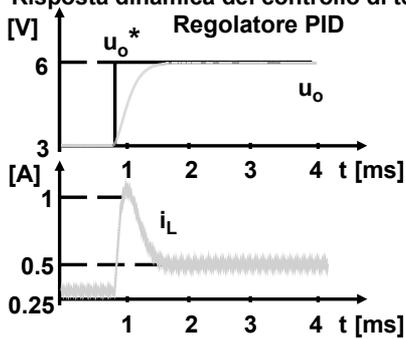


La velocità di risposta è confrontabile con quella ad anello aperto

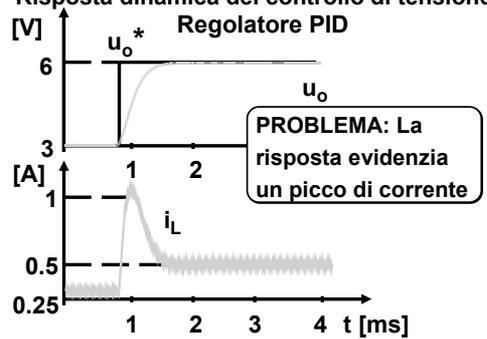
Risposta dinamica del controllo di tensione  
Regolatore PID



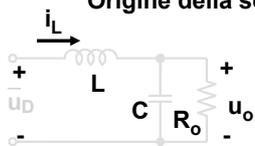
Risposta dinamica del controllo di tensione  
Regolatore PID



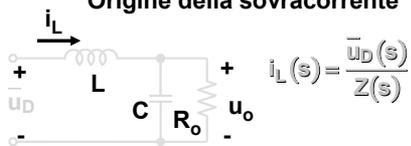
Risposta dinamica del controllo di tensione  
Regolatore PID



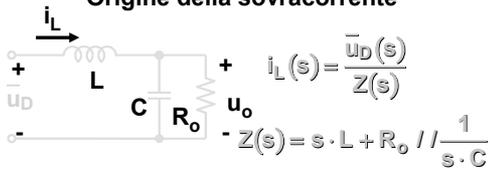
Origine della sovracorrente



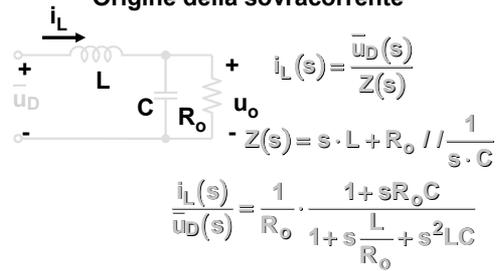
Origine della sovracorrente



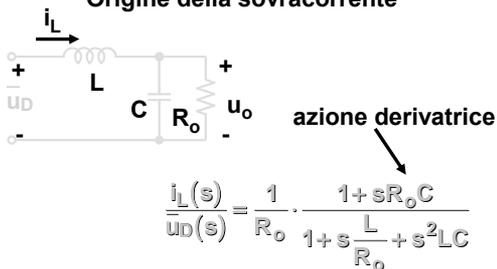
### Origine della sovracorrente



### Origine della sovracorrente

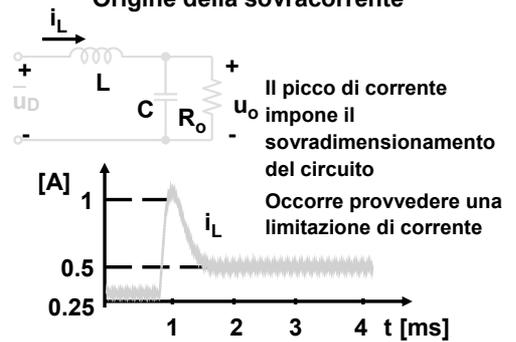


### Origine della sovracorrente



Il circuito reagisce ad una variazione a gradino dell'ingresso con un impulso di corrente

### Origine della sovracorrente



## Conclusioni

- La modulazione di larghezza degli impulsi (PWM) consente un semplice controllo del duty-cycle
- Per un'efficace regolazione della tensione d'uscita occorre introdurre un anello di controllo a retroazione
- Per ottenere buone prestazioni dinamiche dall'anello di controllo di tensione serve un regolatore PID, che provoca sovracorrenti transitorie
- Occorre una limitazione di corrente