

Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

“Regolazione della tensione del convertitore Buck”

Argomenti trattati

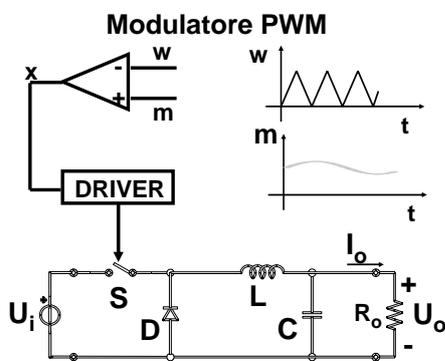
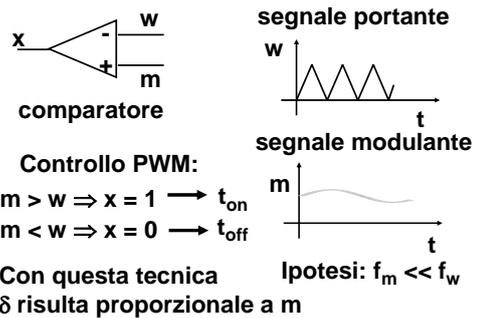
- Modulazione di larghezza degli impulsi (Pulse Width Modulation, PWM)
- Controllo di tensione PWM
- Risposta dinamica del controllo PWM

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

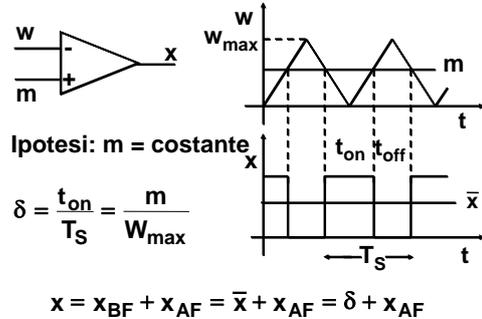
Obiettivo: generare un valore di duty-cycle (parametro di controllo del convertitore) proporzionale ad un segnale di riferimento

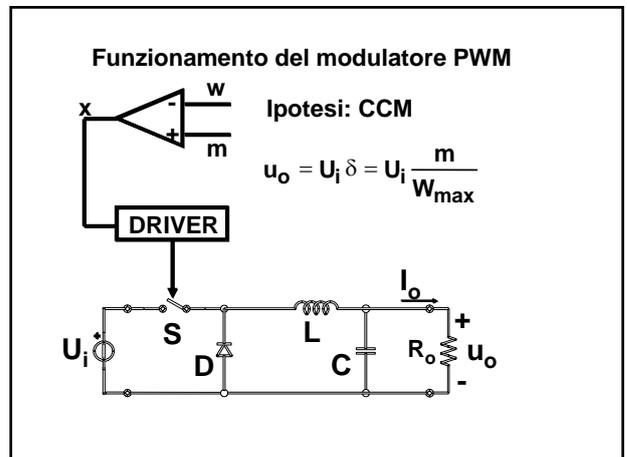
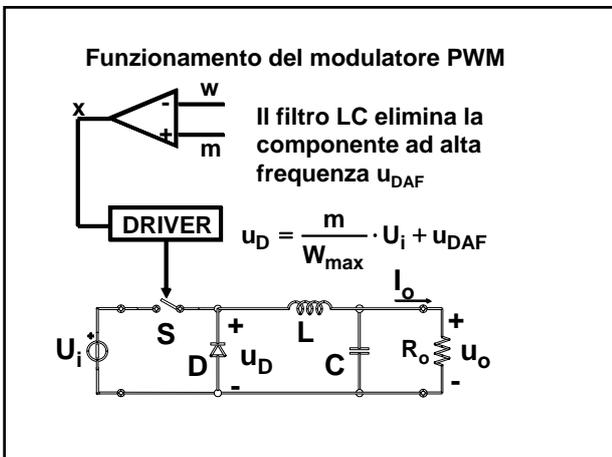
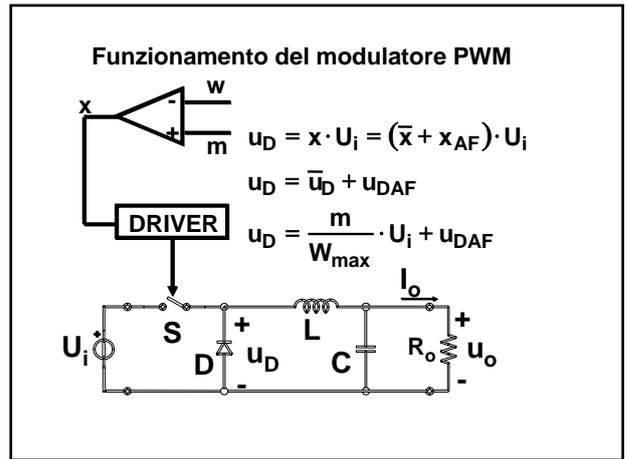
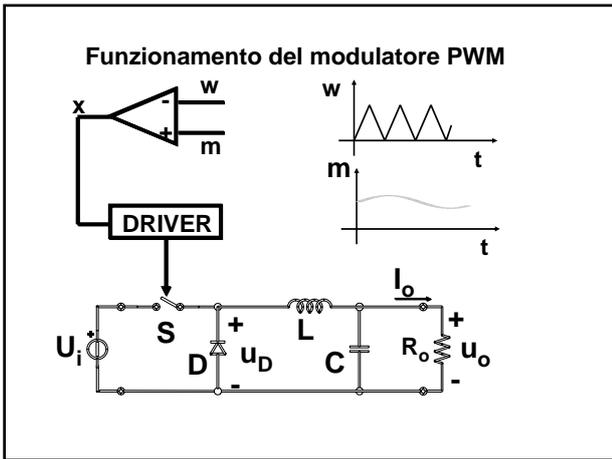
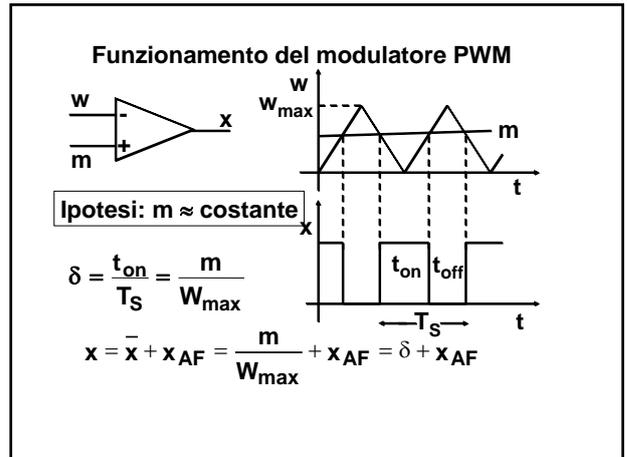
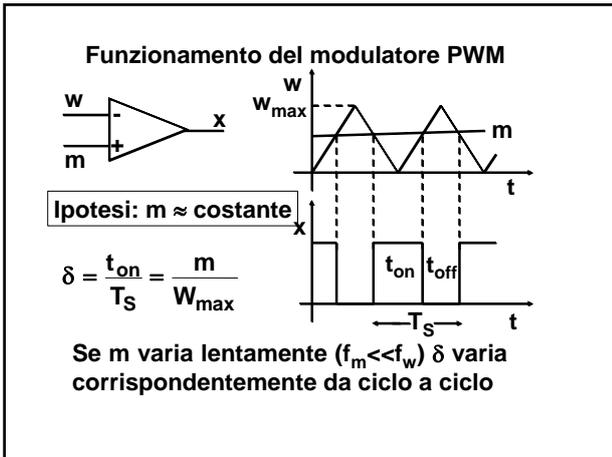
Metodo: modulazione dei tempi t_{on} e t_{off} con tecnica PWM (modulazione di durata degli impulsi)

Modulatore PWM

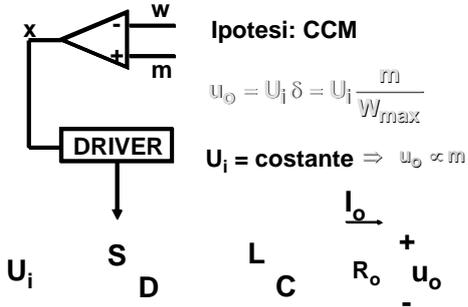


Funzionamento del modulatore PWM





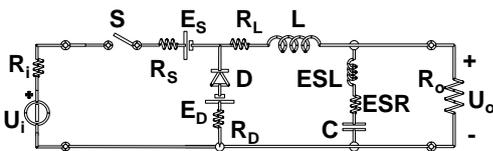
Funzionamento del modulatore PWM



In pratica il modulatore PWM non consente di regolare U_o . Infatti, oltre che da δ , 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)

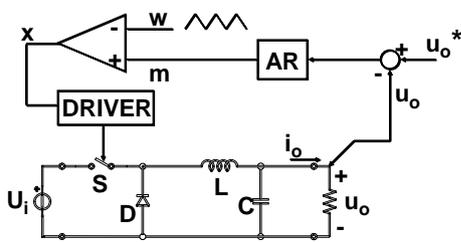
Rappresentazione del circuito con i principali elementi parassiti



In pratica il modulatore PWM non consente di regolare U_o . Infatti, oltre che da δ , 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

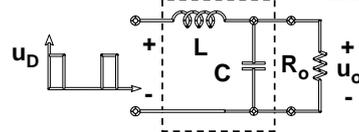


Il regolatore va scelto per garantire: stabilità, precisione, prontezza

Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di u_D in un intervallo di switching

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



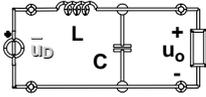
In bassa frequenza ($f \ll f_w$) il circuito si può studiare applicando un generatore di tensione $\bar{u}_D(t)$ all'ingresso del filtro

Modellistica dinamica del convertitore

Valore medio di u_D in un intervallo di switching

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

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

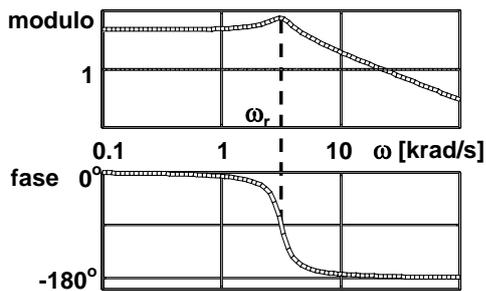


$$\frac{u_o(s)}{m(s)} = \frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} \cdot \frac{\bar{u}_D(s)}{m(s)} = \frac{u_o(s)}{\bar{u}_D(s)} \cdot \frac{U_i}{W_{max}}$$

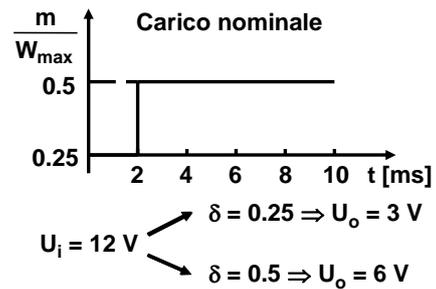
Diagramma di Bode (senza regolatore)

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

Diagramma di Bode (senza regolatore)

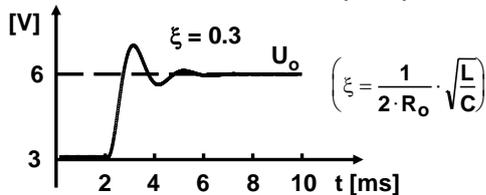


Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m



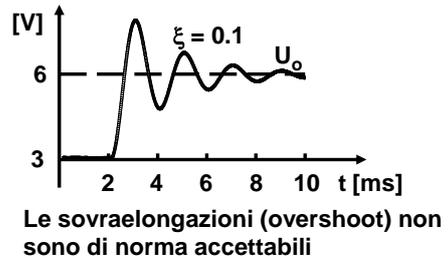
Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m

Carico nominale (CCM)



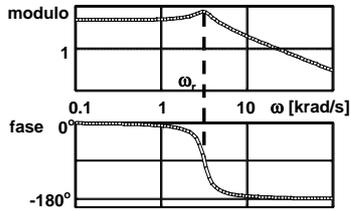
Risposta ad una variazione a gradino del segnale di riferimento m

Carico ridotto al 33%



Scelta dei regolatori

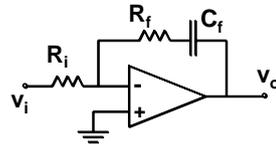
Il regolatore proporzionale non è usabile perchè il doppio polo del filtro rende il sistema instabile



Scelta dei regolatori

Regolatore PI:

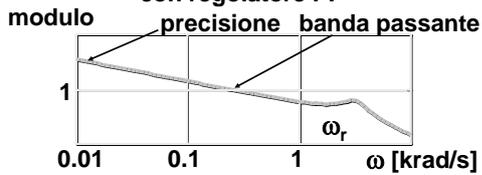
$$PI(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau} \quad \tau \cong \frac{1}{\omega_r}$$



$$k = -R_f/R_i$$

$$\tau = R_f C_f$$

Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI



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

Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI

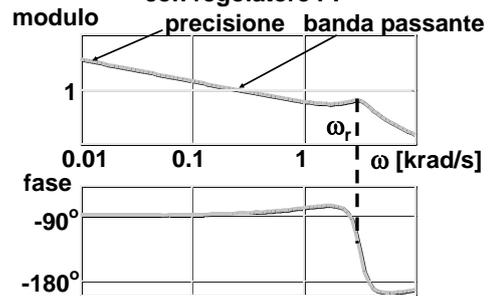
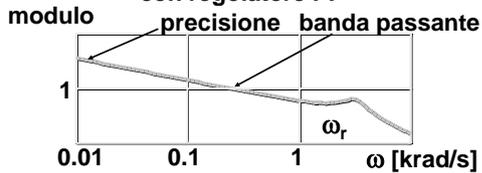
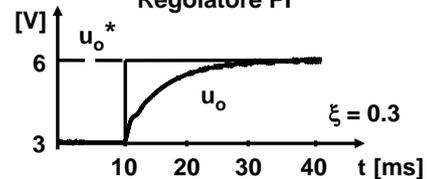


Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PI



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

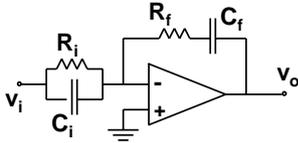


La dinamica risulta lenta, con tempi di risposta molto superiori a quelli rilevabili ad anello aperto

Scelta dei regolatori - Regolatore PID

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

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

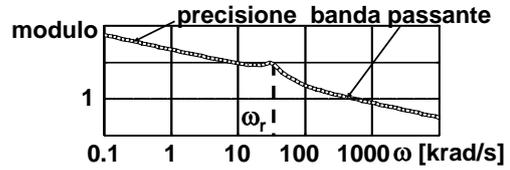


$$k = -R_f/R_i$$

$$\tau_1 = R_f C_f$$

$$\tau_2 = R_i C_i$$

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

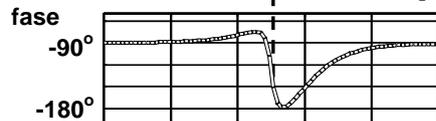
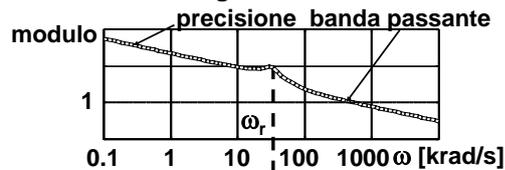
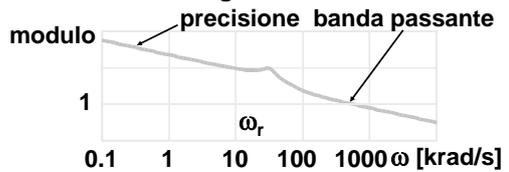
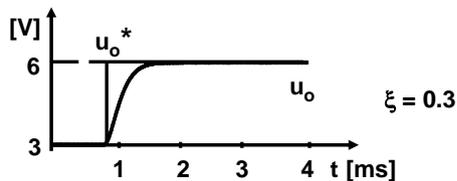


Diagramma di Bode del guadagno d'anello con regolatore PID

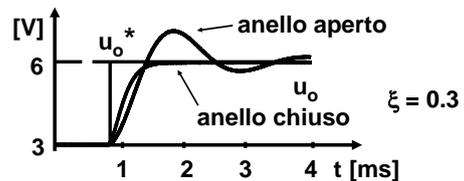


Il regolatore PID consente bande passanti elevate, ma può diventare instabile se non progettato accuratamente

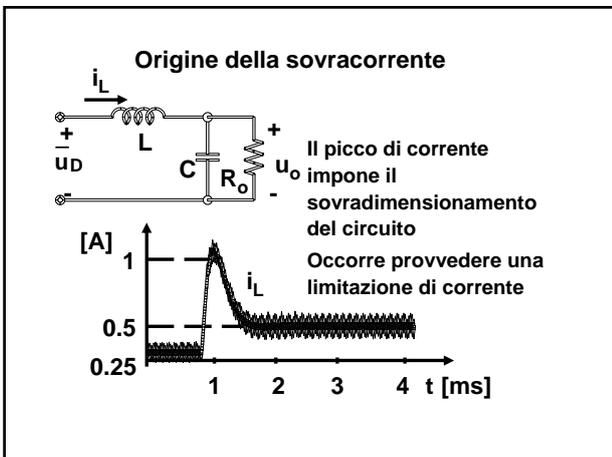
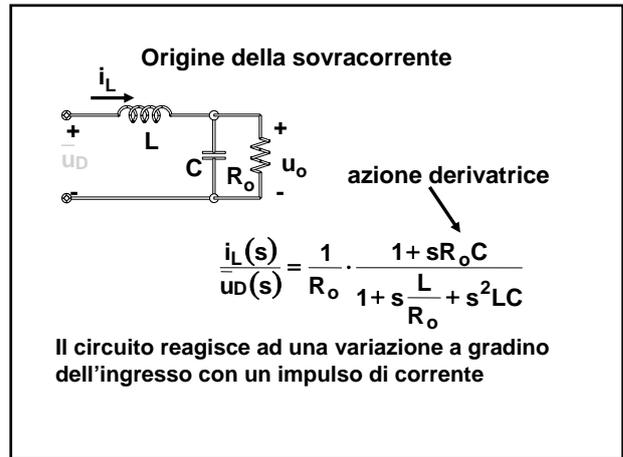
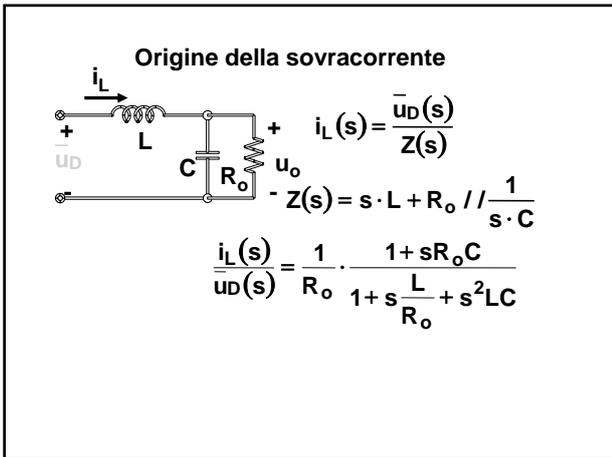
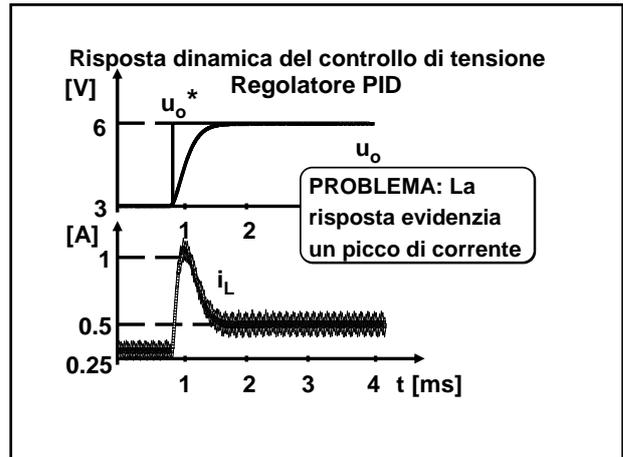
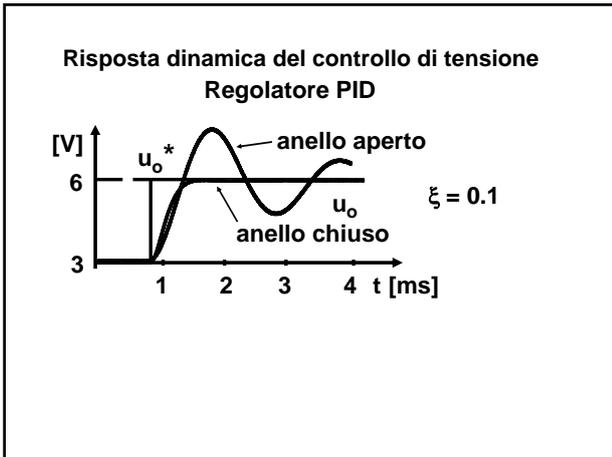
Risposta dinamica del controllo di tensione Regolatore PID



Risposta dinamica del controllo di tensione Regolatore PID



La velocità di risposta è confrontabile con quella ad anello aperto



- ### 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