

Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

*“Controllo di corrente del
convertitore Buck”*

Argomenti trattati

Argomenti trattati

- Controllo di tensione con limitazione di corrente

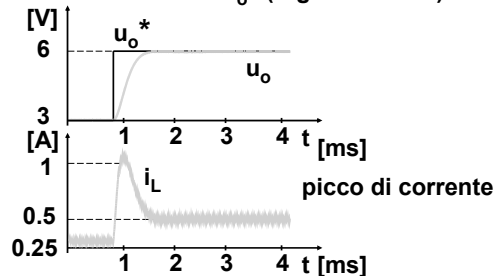
Argomenti trattati

- Controllo di tensione con limitazione di corrente
- Controllo di corrente di picco

Argomenti trattati

- Controllo di tensione con limitazione di corrente
- Controllo di corrente di picco
 - Principio di funzionamento
 - Struttura del controllore
 - Risposta dinamica
 - Instabilità statica
 - Correzione dell'instabilità statica con rampa di compensazione

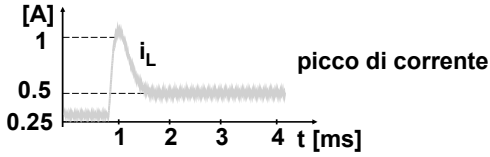
Controllo di tensione Risposta ad una variazione a gradino del riferimento u_o^* (regolatore PID)



Controllo di tensione

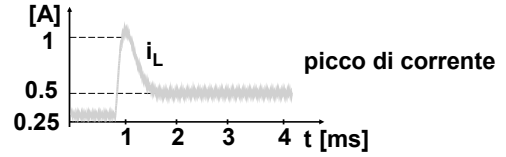
Risposta ad una variazione a gradino del riferimento u_o^* (regolatore PID)

Per limitare il picco di corrente si può modificare lo schema del controllo di tensione

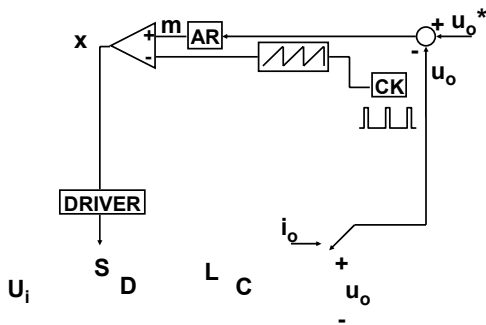


Limitazione della corrente

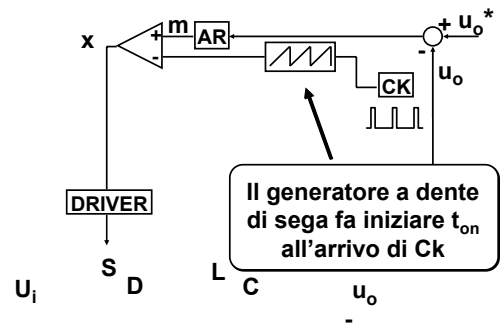
Si può usare un limitatore di corrente, che interrompe t_{on} quando i_L supera la soglia i_L^*



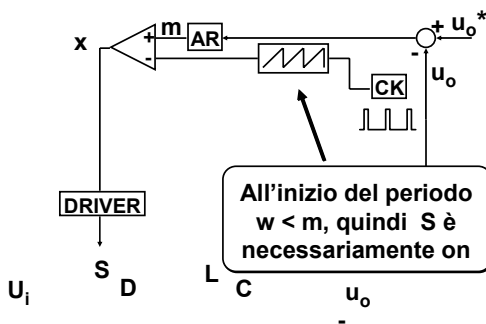
Controllo di tensione



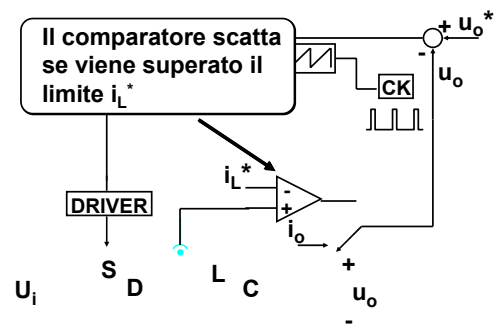
Controllo di tensione



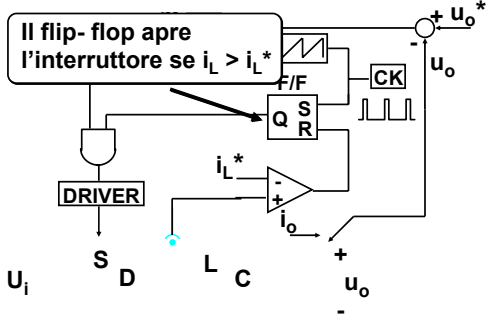
Controllo di tensione



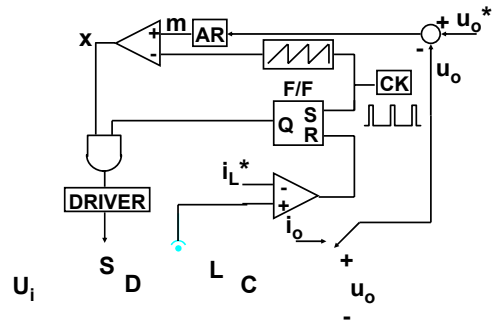
Controllo di tensione + limitazione di corrente



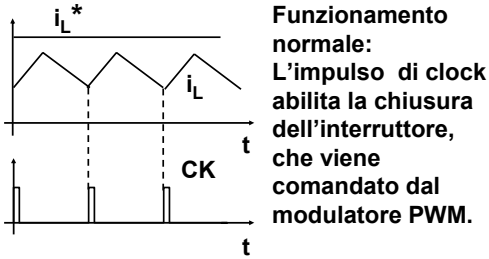
Controllo di tensione + limitazione di corrente



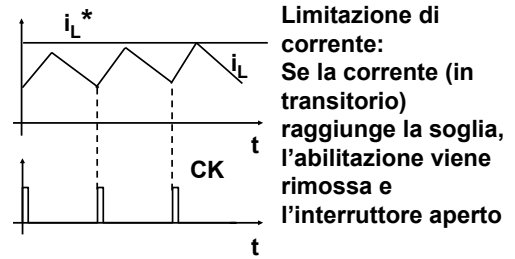
Controllo di tensione + limitazione di corrente



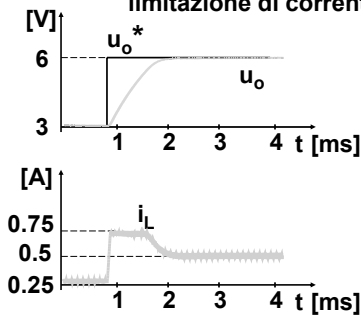
Funzionamento del limitatore di corrente



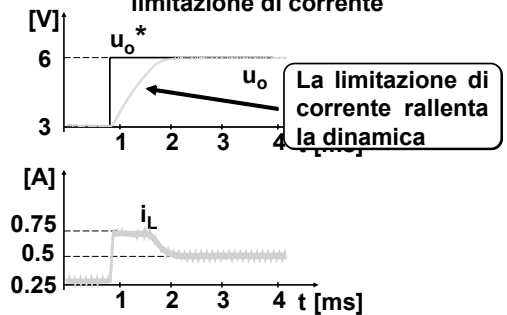
Funzionamento del limitatore di corrente



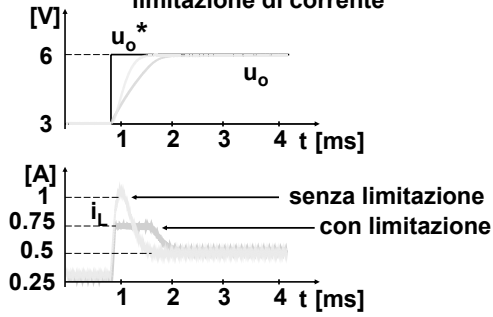
Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente

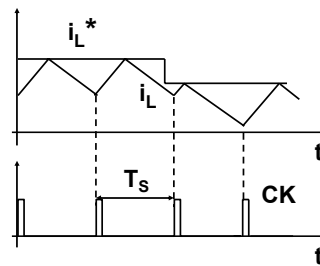


NOTA

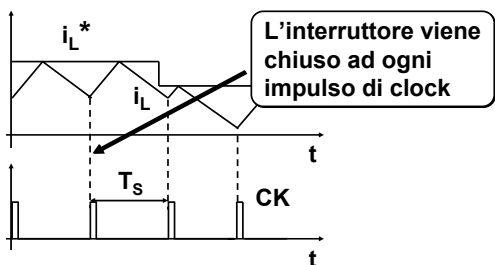
Con gli stessi componenti circuitali richiesti per realizzare una limitazione di corrente si può introdurre una vera e propria retroazione di corrente che, oltre a evitare sovracorrenti, migliora significativamente la risposta dinamica.

Controllo di corrente di picco

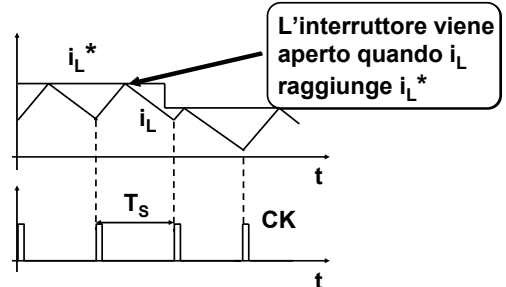
Controllo di corrente di picco Principio di funzionamento



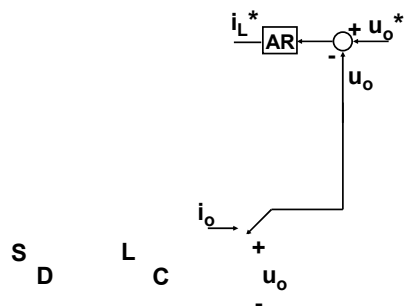
Controllo di corrente di picco Principio di funzionamento



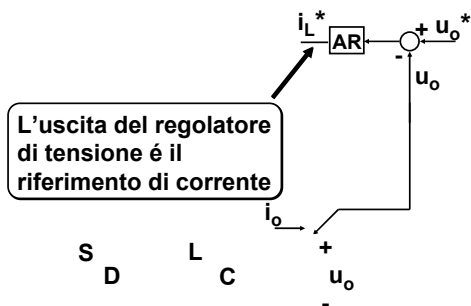
Controllo di corrente di picco Principio di funzionamento



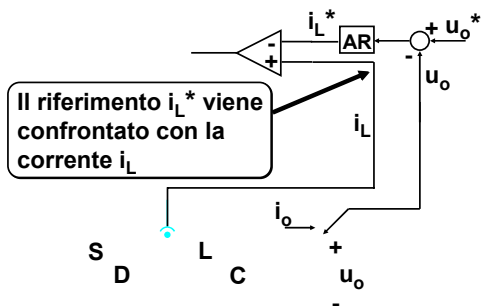
Controllo di corrente di picco (versione base)



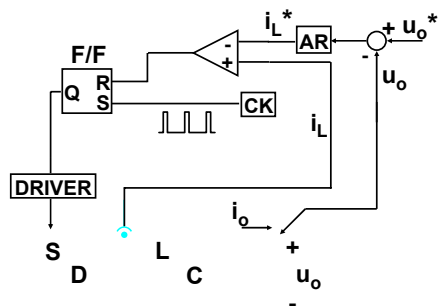
Controllo di corrente di picco (versione base)



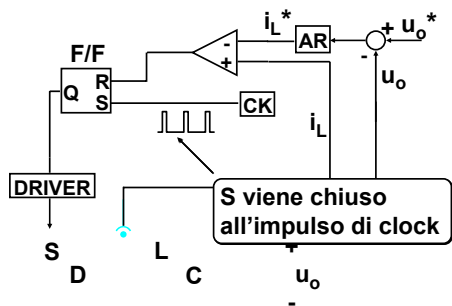
Controllo di corrente di picco (versione base)



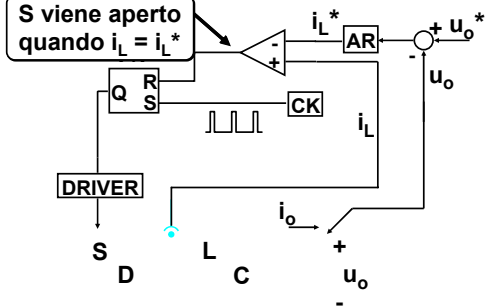
Controllo di corrente di picco (versione base)



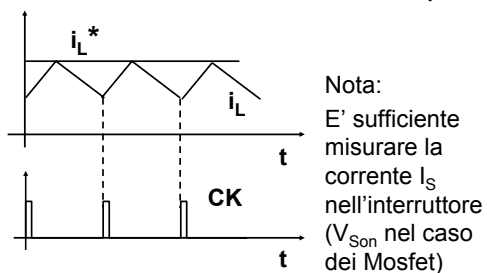
Controllo di corrente di picco (versione base)



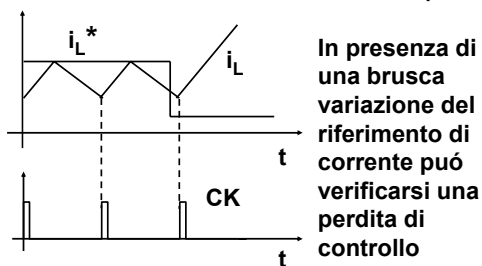
Controllo di corrente di picco (versione base)



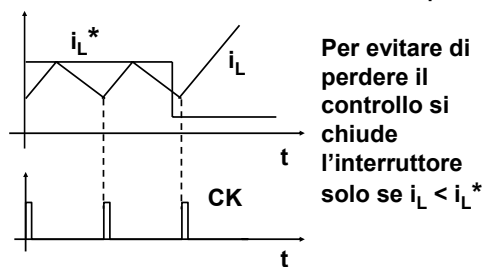
Funzionamento del controllo di corrente di picco



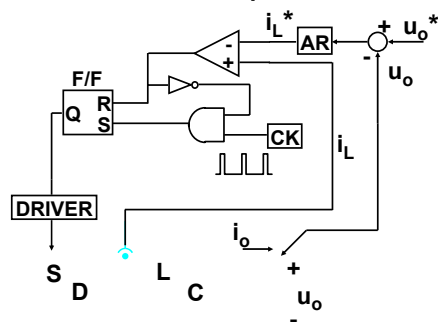
Funzionamento del controllo di corrente di picco



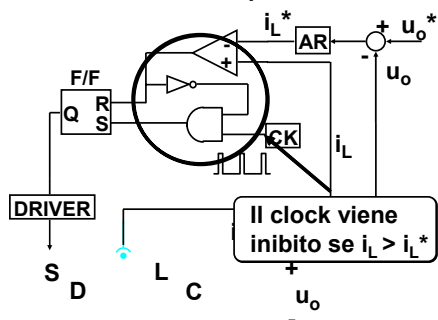
Funzionamento del controllo di corrente di picco



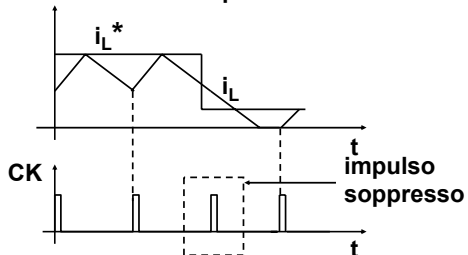
Controllo di corrente di picco modificato



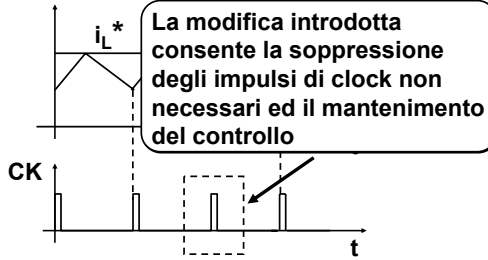
Controllo di corrente di picco modificato



Funzionamento del controllo di corrente di picco modificato



Funzionamento del controllo di corrente di picco modificato



Dinamica del controllo di corrente

Dinamica del controllo di corrente

Il controllo di corrente migliora la risposta dinamica rispetto al controllo di tensione

Dinamica del controllo di corrente

La dimostrazione risulta semplice nel caso di piccola ondulazione di i_L

Dinamica del controllo di corrente

Se Δi_L è trascurabile si ha: $i_L \cong i_L \cong i_{Lmax}$ sicché il controllo di corrente di picco equivale a quello di corrente media

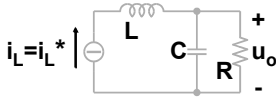
Dinamica del controllo di corrente

Se Δi_L è trascurabile si ha: $i_L \cong i_L \cong i_{Lmax}$ sicché il controllo di corrente di picco equivale a quello di corrente media

Si può allora sostituire il convertitore controllato in corrente con un generatore di corrente impresso ai morsetti del filtro

Dinamica del controllo di corrente

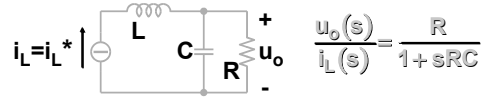
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong i_L \cong i_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



Si può allora sostituire il convertitore
controllato in corrente con un generatore
di corrente impresso ai morsetti del filtro

Dinamica del controllo di corrente

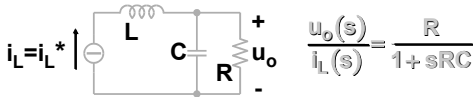
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong i_L \cong i_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



Si può allora sostituire il convertitore
controllato in corrente con un generatore
di corrente impresso ai morsetti del filtro

Dinamica del controllo di corrente

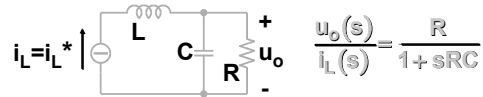
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong i_L \cong i_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



Poiché la dinamica é del primo ordine si
ottengono bande passanti elevate anche
con un semplice regolatore PI. Inoltre la
stabilità é garantita.

Dinamica del controllo di corrente

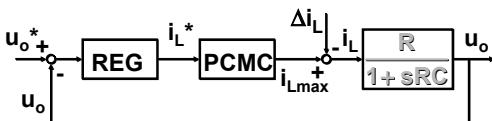
$$\text{PI: } \frac{u_o(s)}{i_L^*(s)} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau} \cdot \frac{R}{1 + sRC}$$



Poiché la dinamica é del primo ordine si
ottengono bande passanti elevate anche
con un semplice regolatore PI. Inoltre la
stabilità é garantita.

Dinamica del controllo di corrente

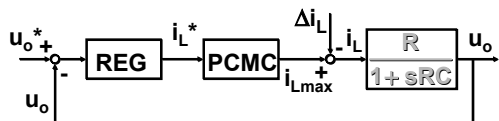
Se Δi_L non é trascurabile il sistema si può
rappresentare come in figura:



PCMC: Peak Current Mode Control

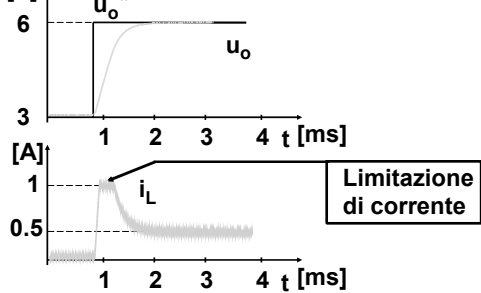
Dinamica del controllo di corrente

Se Δi_L non é trascurabile il sistema si può
rappresentare come in figura:

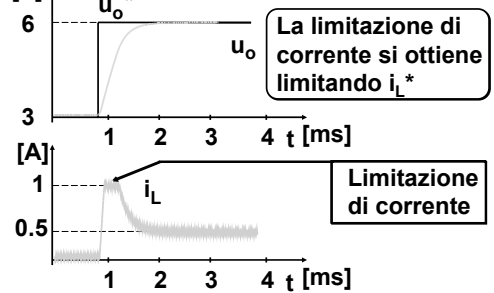


L'ondulazione di corrente Δi_L può
considerarsi come un disturbo. I suoi
effetti vengono cancellati se il regolatore
é opportuno (azione integratrice)

Dinamica del controllo di corrente di picco (Regolatore PI)



Dinamica del controllo di corrente di picco (Regolatore PI)



Instabilità statica

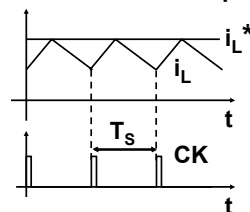
Instabilità statica
Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica.

Instabilità statica

Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica. Esso tuttavia presenta una instabilità "statica" in CCM per valori di $\delta > 0.5$.

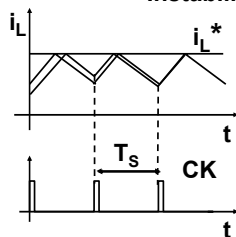
Instabilità statica

Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica. Esso tuttavia presenta una instabilità "statica" in CCM per valori di $\delta > 0.5$.



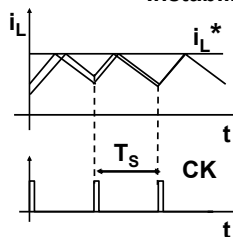
Funzionamento ideale

Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta < 0.5$)

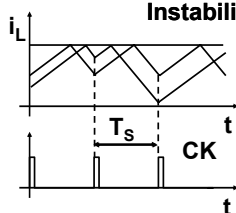
Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta < 0.5$)

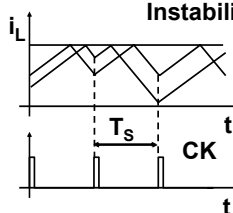
Una perturbazione di i_{Lmin} fa variare temporaneamente t_{on} , e quindi t_{off} , ma viene riassorbita in pochi cicli

Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

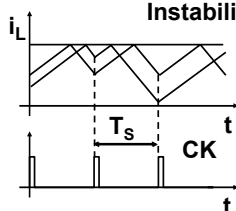
Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

Una perturbazione di i_{Lmin} si propaga da un ciclo all'altro amplificandosi

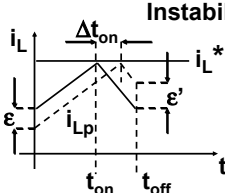
Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

L'origine dell'amplificazione della perturbazione sta nella minore pendenza di i_L nella fase di on rispetto alla fase di off ($U_i - U_o < U_o$). Questa situazione si verifica quando $U_o / U_i > 0.5$.

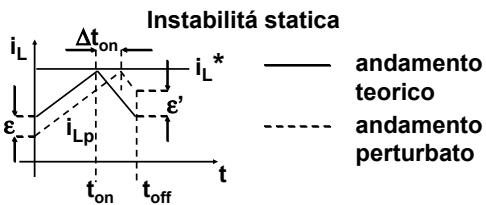
Instabilità statica



—— andamento
teorico
----- andamento
perturbato

ON:

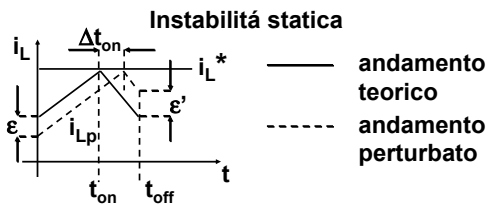
$$\Delta i_L = i_{Lmax} - (i_{Lmin} + \varepsilon) = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot (t_{on} + \Delta t_{on})$$



ON:

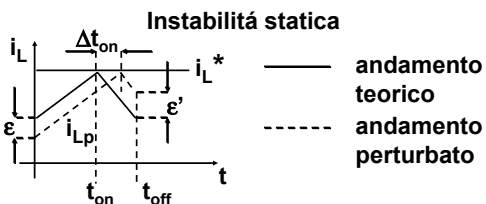
$$\Delta i_L = i_{L,max} - (i_{L,min} + \varepsilon) = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot (t_{on} + \Delta t_{on})$$

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



OFF:

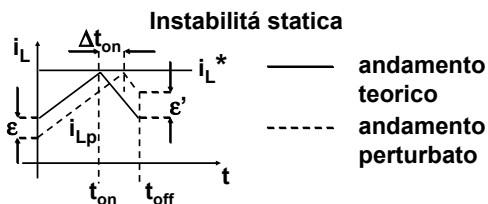
$$i_{L,max} - (i_{L,min} + \varepsilon') = \frac{U_o}{L} \cdot (t_{off} - \Delta t_{on})$$



OFF:

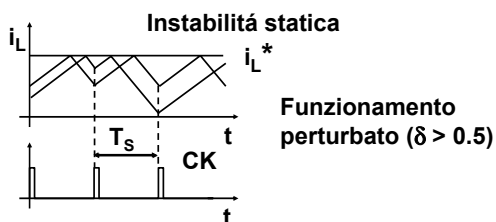
$$i_{L,max} - (i_{L,min} + \varepsilon') = \frac{U_o}{L} \cdot (t_{off} - \Delta t_{on})$$

$$\varepsilon' = \frac{U_o}{L} \cdot \Delta t_{on} = -\varepsilon \cdot \frac{U_o}{U_i - U_o}$$



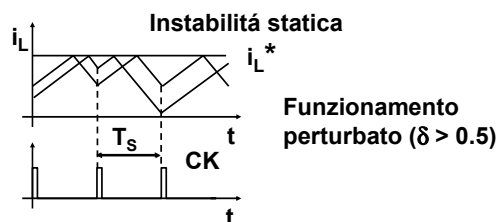
$$\varepsilon' = -\varepsilon \cdot \frac{U_o}{U_i - U_o}$$

$$U_o > 0.5 \cdot U_i \Rightarrow |\varepsilon'| > |\varepsilon|$$



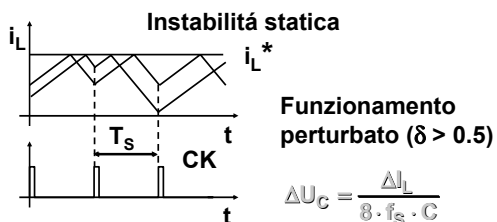
Problemi causati dall'instabilità statica

- Aumento dell'ondulazione di corrente



Problemi causati dall'instabilità statica

- Armoniche di corrente a frequenza $< f_s$



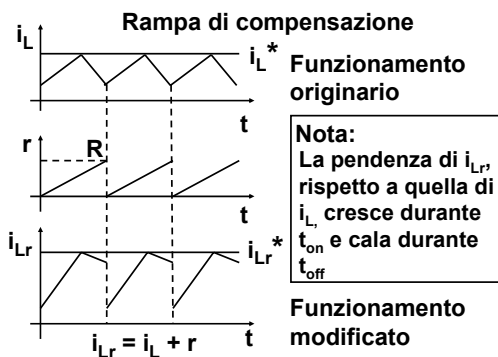
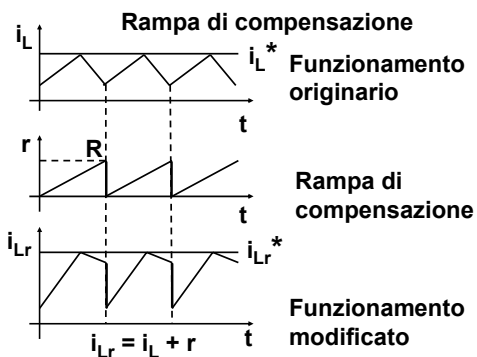
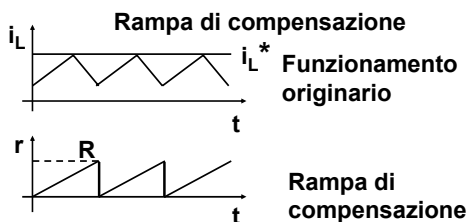
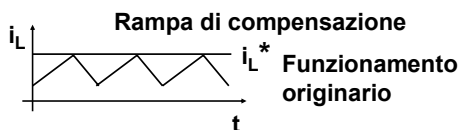
Problemi causati dall'instabilità statica

- Aumento dell'ondulazione della tensione di uscita

Eliminazione dell' instabilità statica

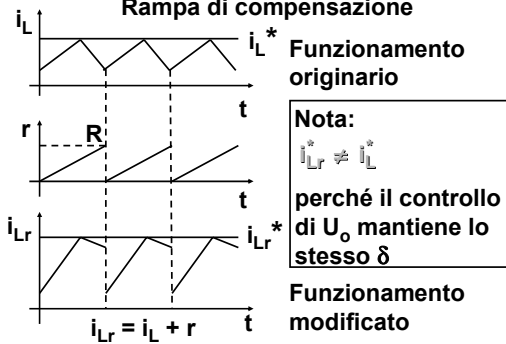
L'instabilità statica è originata dal fatto che la pendenza di i_L durante t_{on} è inferiore a quella durante t_{off}

Soluzione: si aggiunge al segnale di retroazione di corrente (i_L) un segnale a rampa (r) in modo da evitare la condizione di instabilità



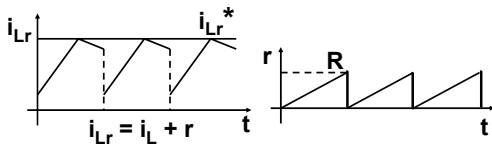
Nota:
La pendenza di i_{Lr} , rispetto a quella di i_L , cresce durante t_{on} e cala durante t_{off}

Rampa di compensazione

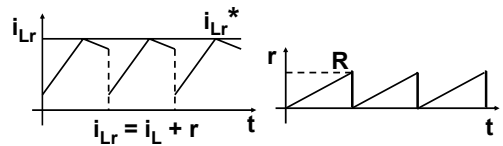


Ampiezza della rampa

Ampiezza della rampa



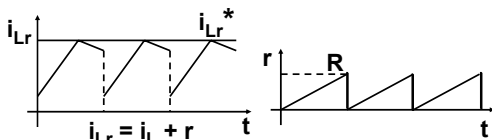
Ampiezza della rampa



Affinché la perturbazione non si propaghi occorre che:

$$\left| \frac{di_{Lr}}{dt} \right|_{t_{on}} > \left| \frac{di_{Lr}}{dt} \right|_{t_{off}} \Leftrightarrow \frac{U_i - U_o}{L} + \frac{R}{T_s} > \frac{U_o}{L} - \frac{R}{T_s}$$

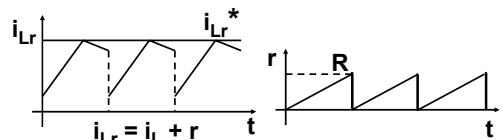
Ampiezza della rampa



$$R > \frac{2 \cdot U_o - U_i}{2 \cdot f_s \cdot L} = \frac{U_i}{f_s \cdot L} \cdot \left(\delta - \frac{1}{2} \right)$$

$$\left| \frac{di_{Lr}}{dt} \right|_{t_{on}} > \left| \frac{di_{Lr}}{dt} \right|_{t_{off}} \Leftrightarrow \frac{U_i - U_o}{L} + \frac{R}{T_s} > \frac{U_o}{L} - \frac{R}{T_s}$$

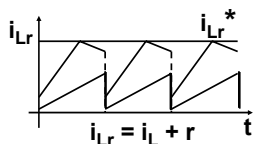
Ampiezza della rampa



Per evitare l'instabilità statica in ogni condizione ($0 \leq \delta \leq 1$) occorre scegliere:

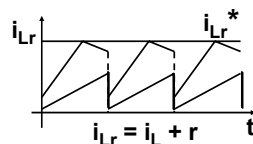
$$R > \frac{U_i}{2 \cdot f_s \cdot L} = 2 \cdot \Delta i_{L \max}$$

Sollecitazioni in corrente



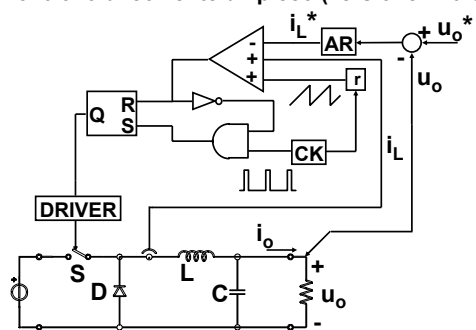
Al riferimento di corrente i_L^* viene dunque aggiunta una rampa di ampiezza $2\Delta i_{Lmax}$

Sollecitazioni in corrente

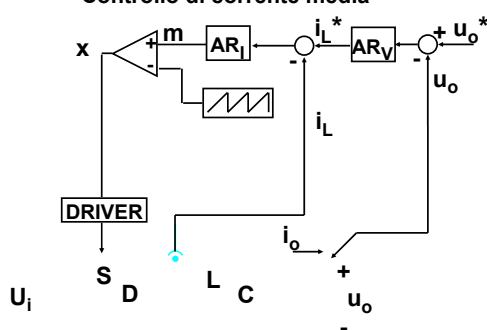


Al riferimento di corrente i_L^* viene dunque aggiunta una rampa di ampiezza $2\Delta i_{Lmax}$
Ciò comporta un sovradimensionamento del circuito, poichè $i_L = i_{Lr}^*$ per $\delta = 0$ ($r = 0$).

Controllo di corrente di picco (versione finale)



Controllo di corrente media



Conclusioni

- Il controllo di corrente consente di migliorare le prestazioni dinamiche del convertitore evitando, nel contempo, sovraelongazioni di corrente
- Per queste proprietà, le tecniche di controllo di corrente sono oggi le più usate