

Corso di **ELETRONICA 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

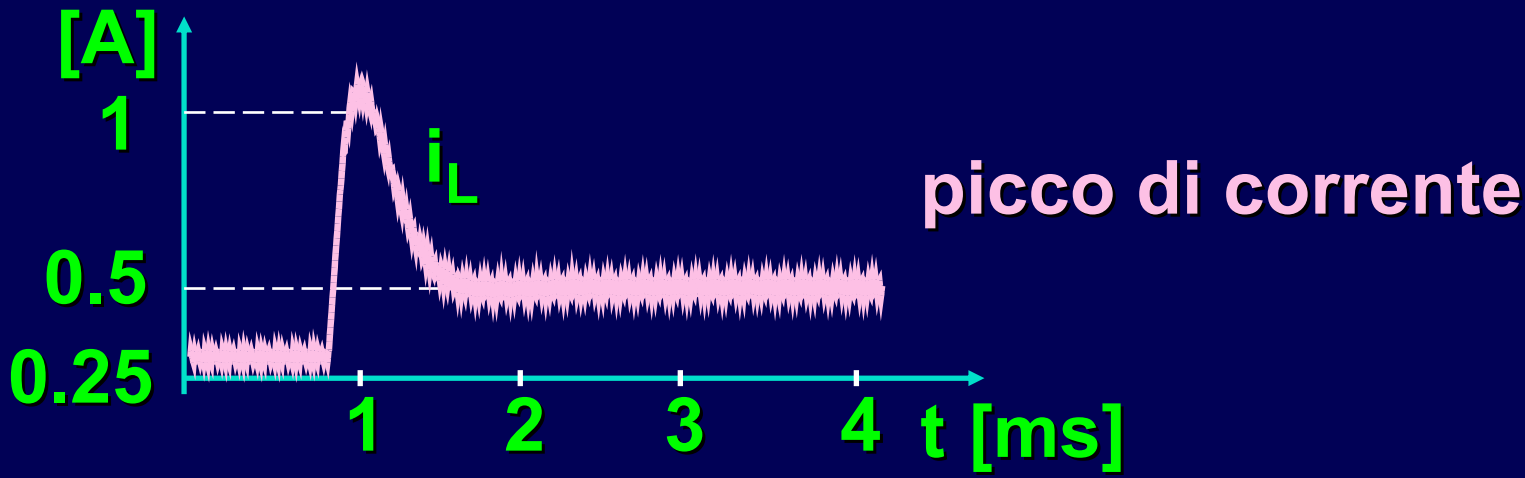
Risposta ad una variazione a gradino del riferimento u_o^* (regolatore PID)



Controllo di tensione

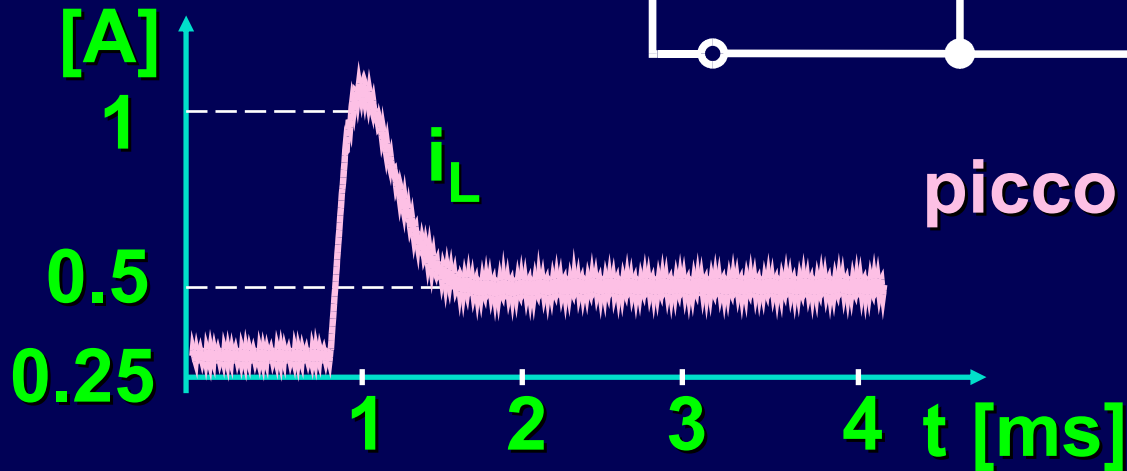
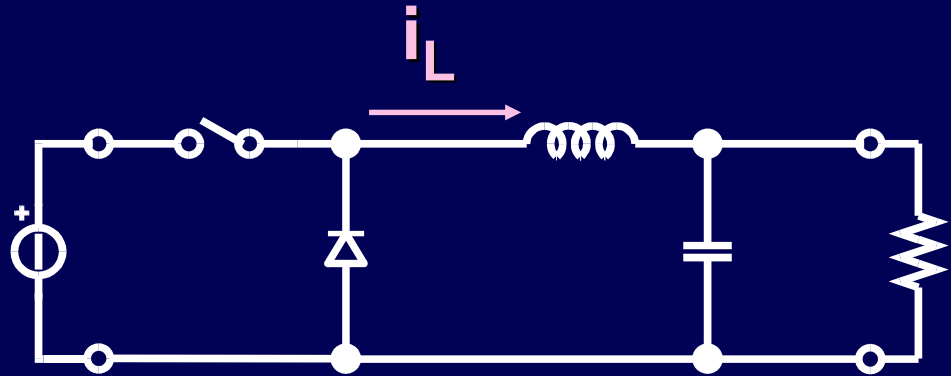
Risposta ad una variazione a gradino del riferimento u_o^* (regolatore PID)

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

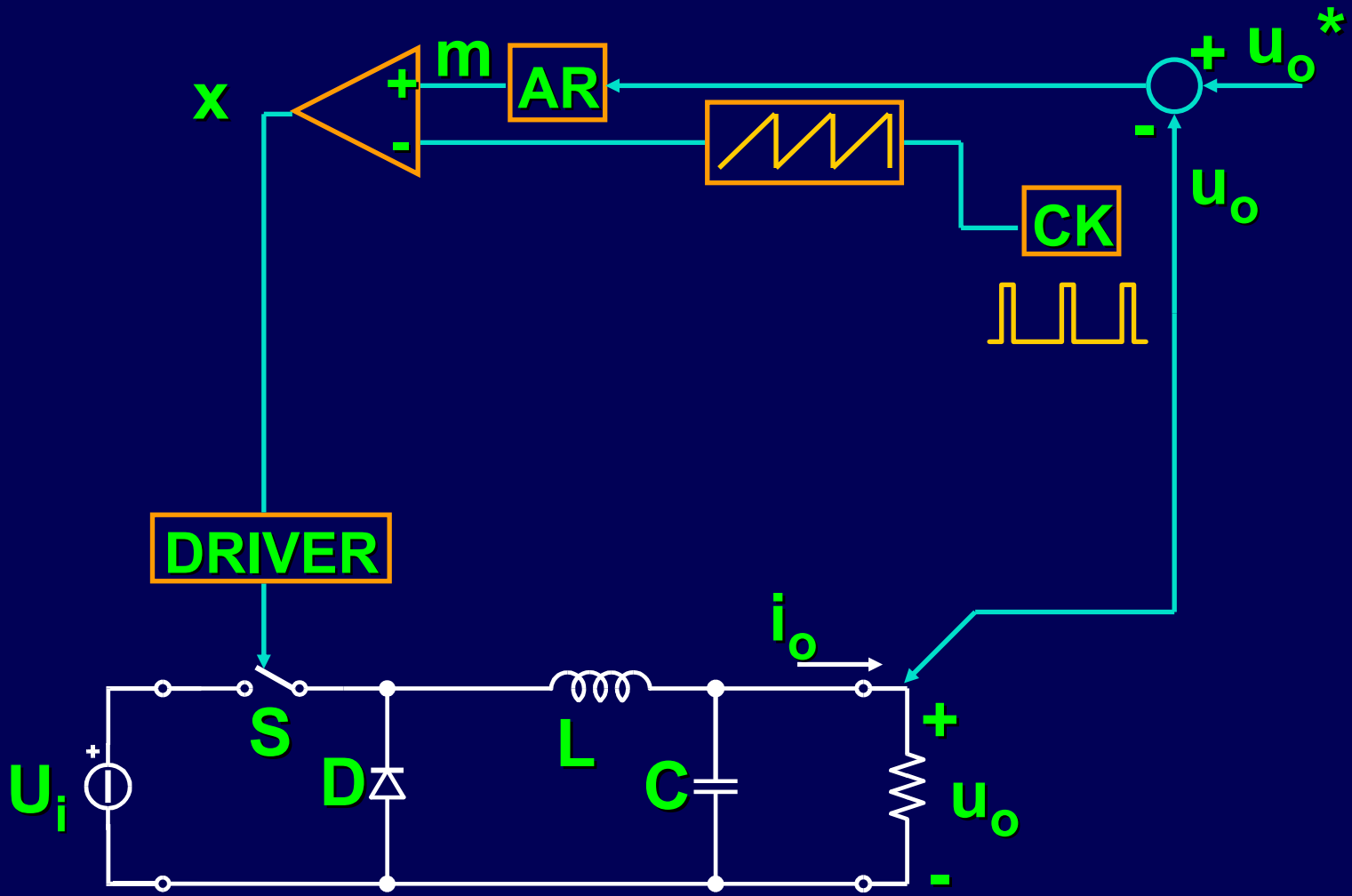


Limitazione della corrente

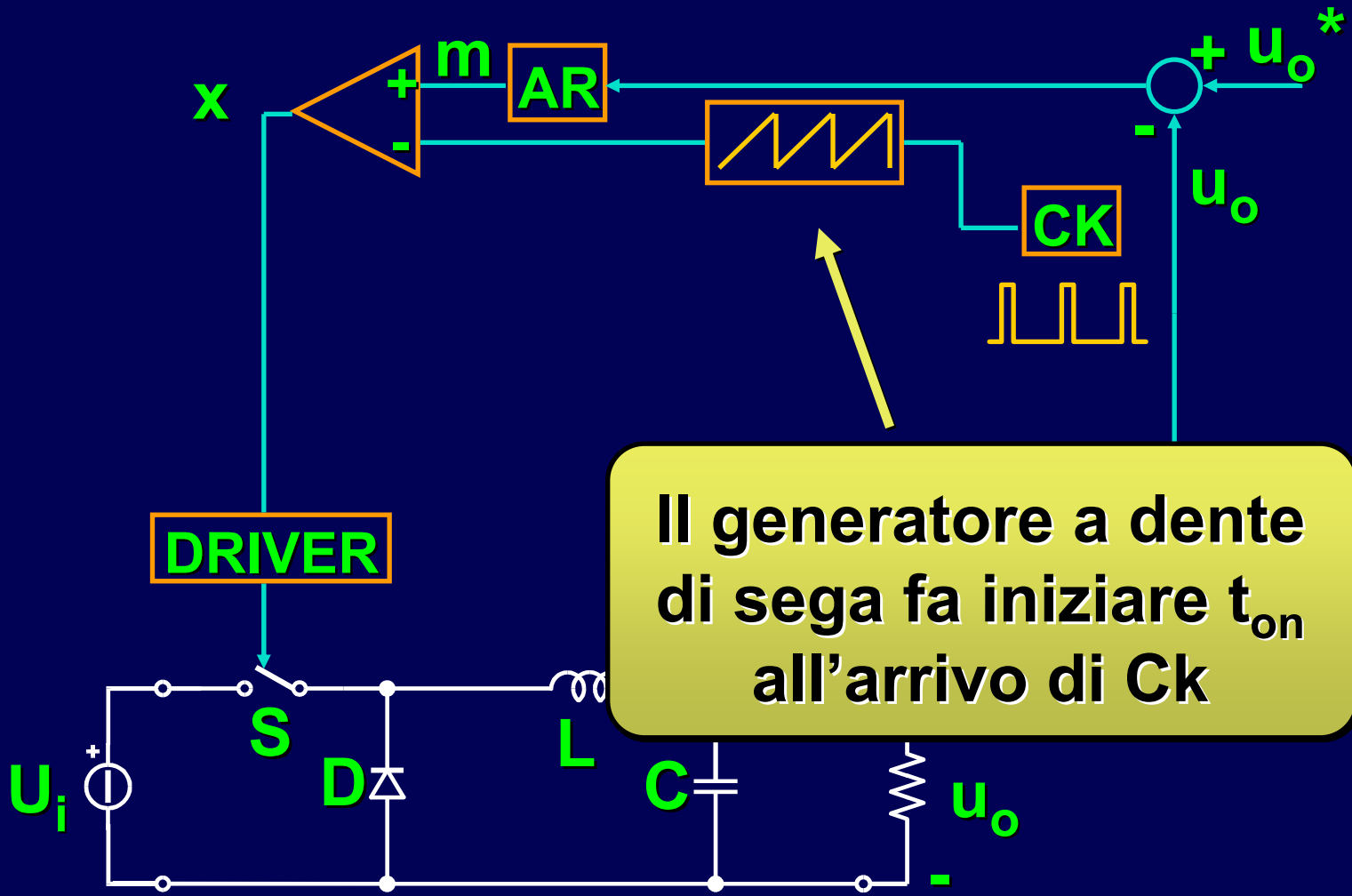
Si puo' usare un limitatore di corrente, che interrompe t_{on} quando i_L supera la soglia i_L^*



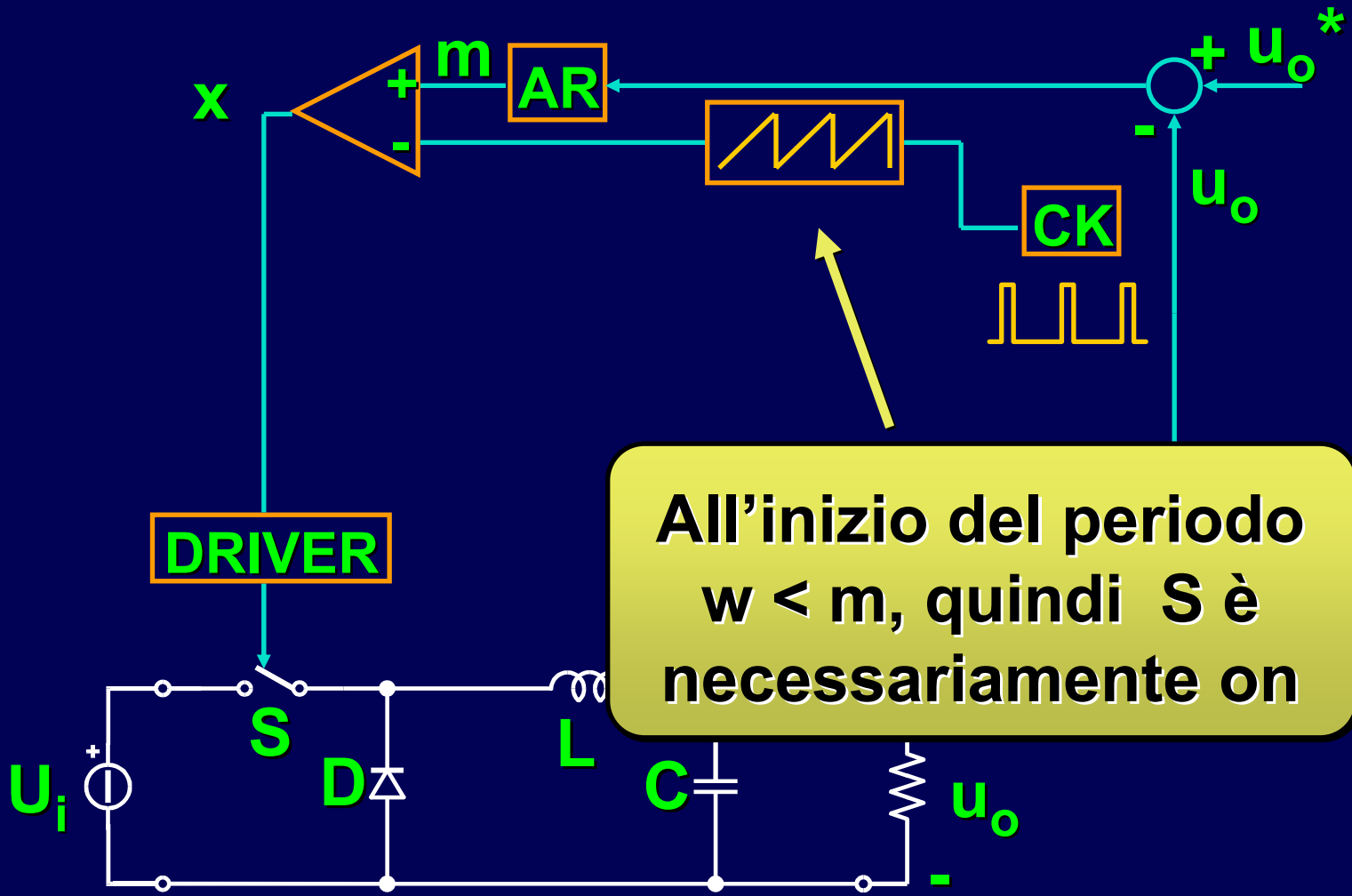
Controllo di tensione



Controllo di tensione

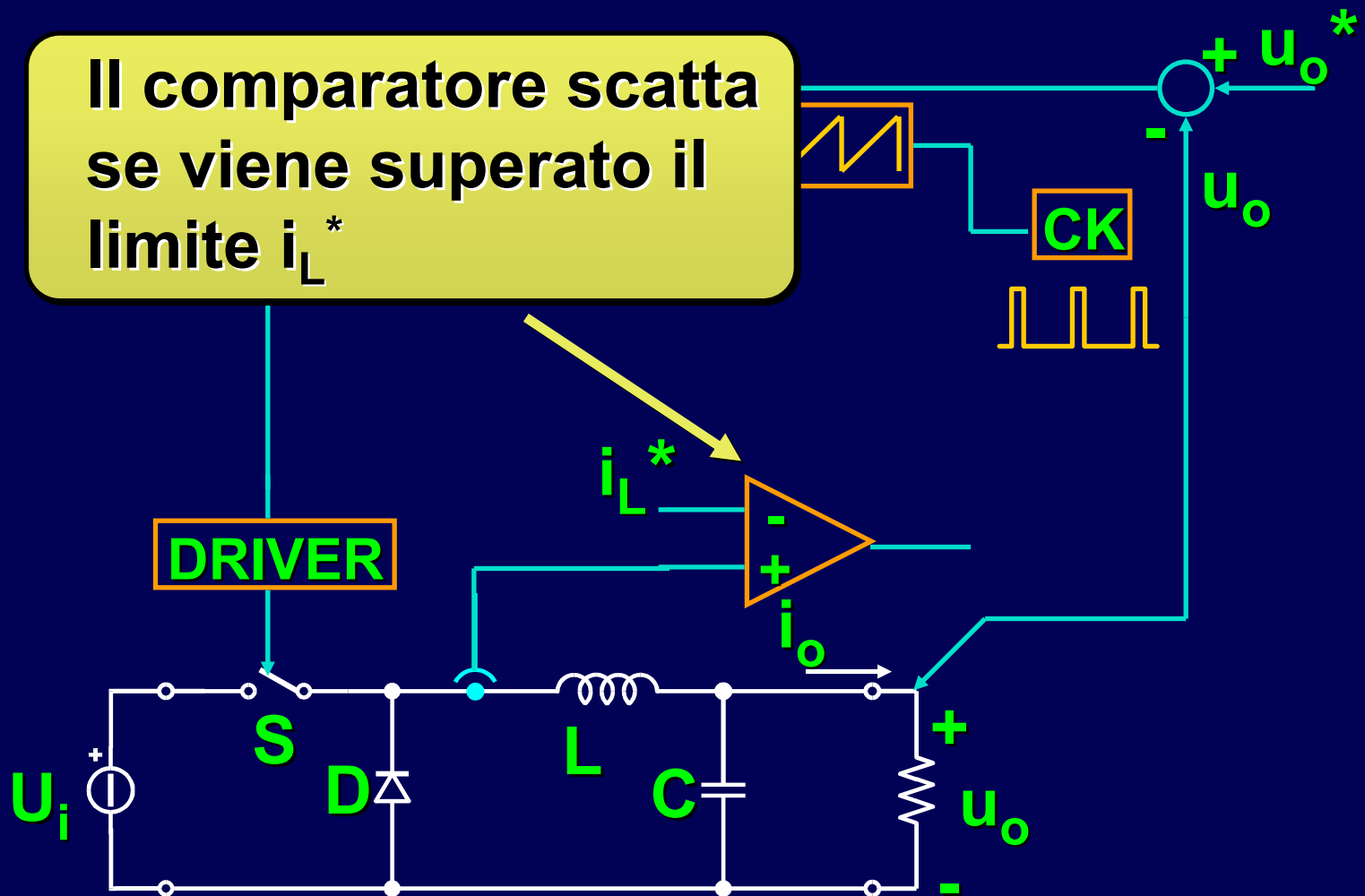


Controllo di tensione

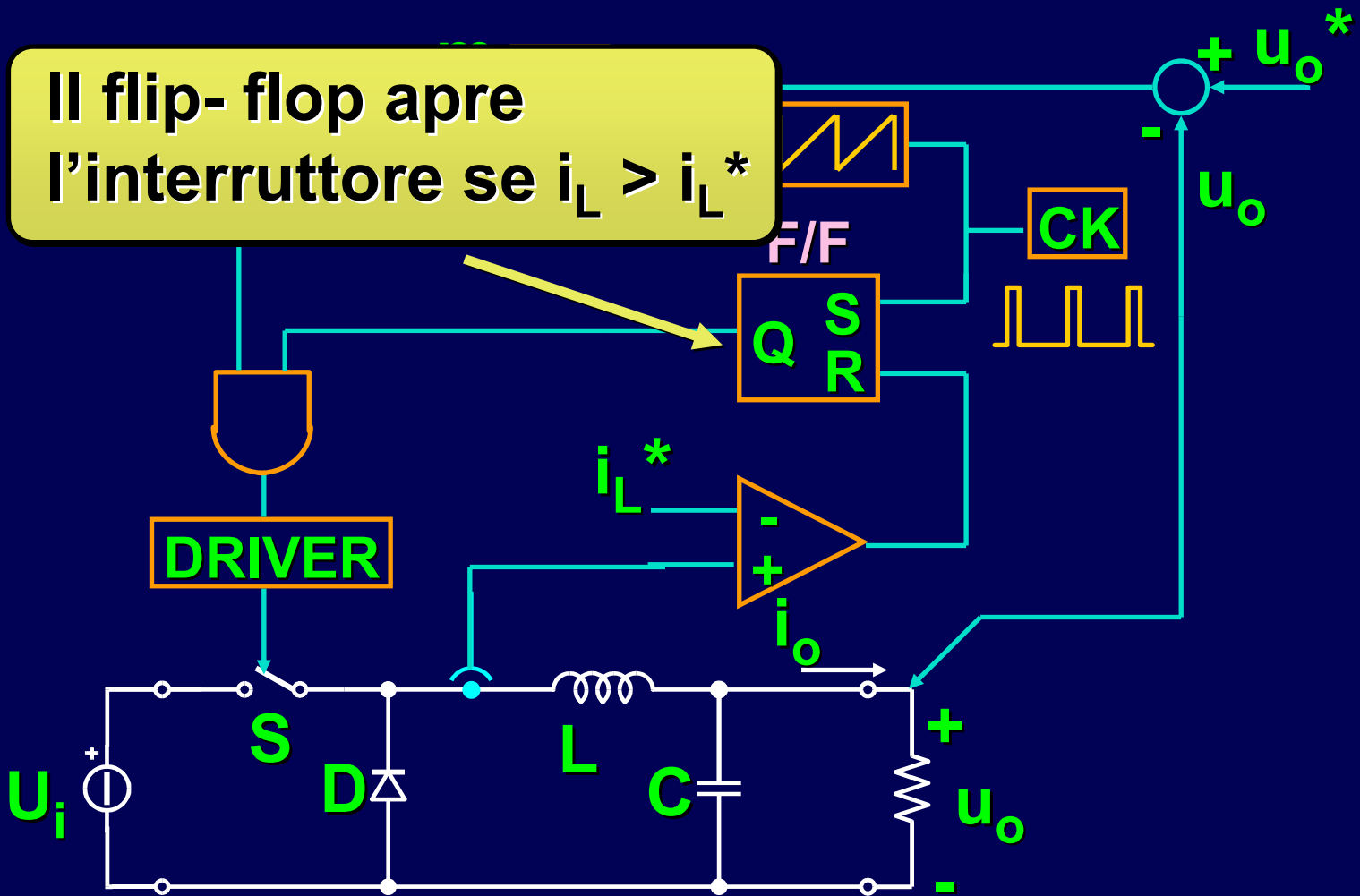


Controllo di tensione + limitazione di corrente

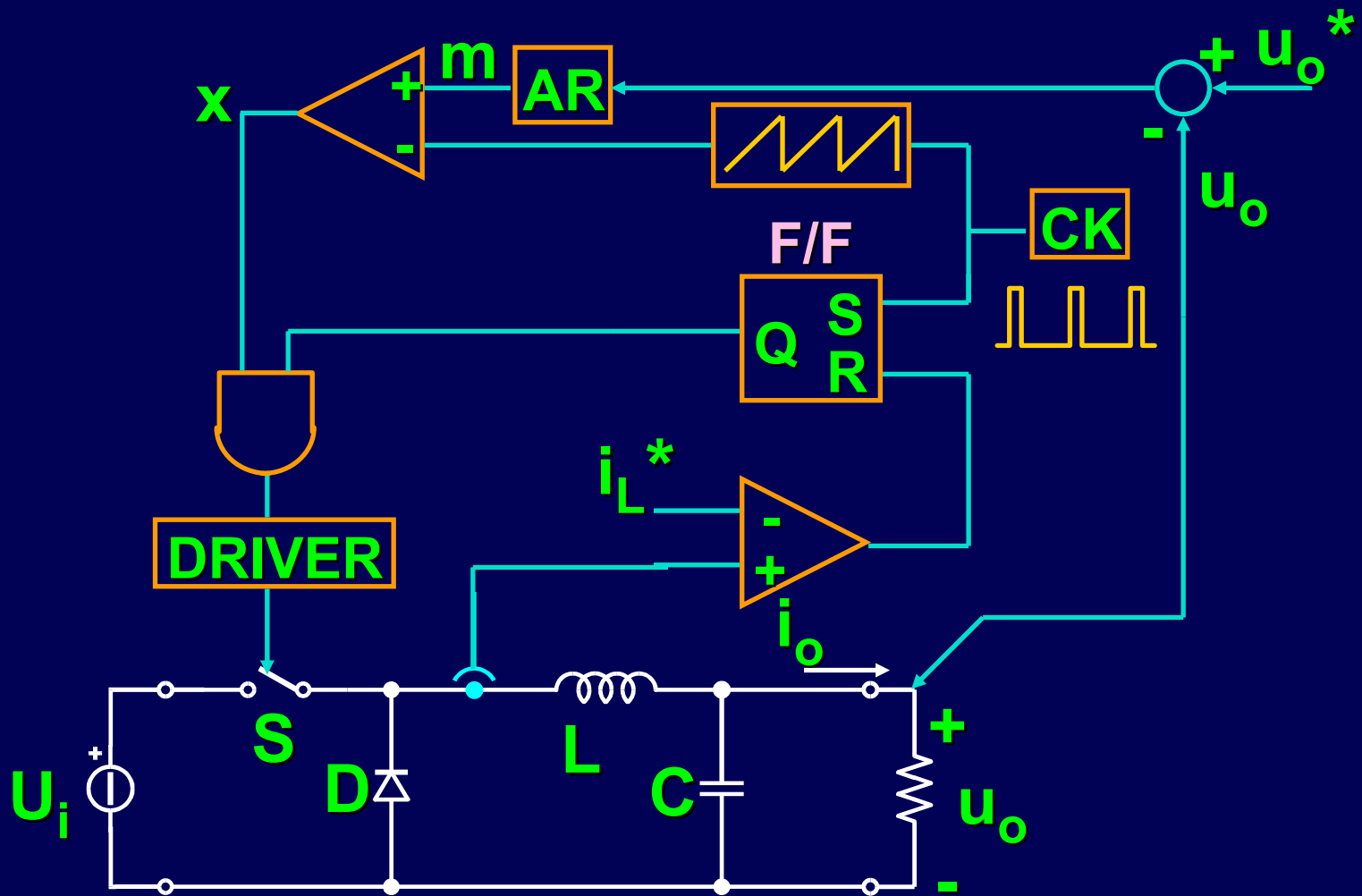
Il comparatore scatta se viene superato il limite i_L^*



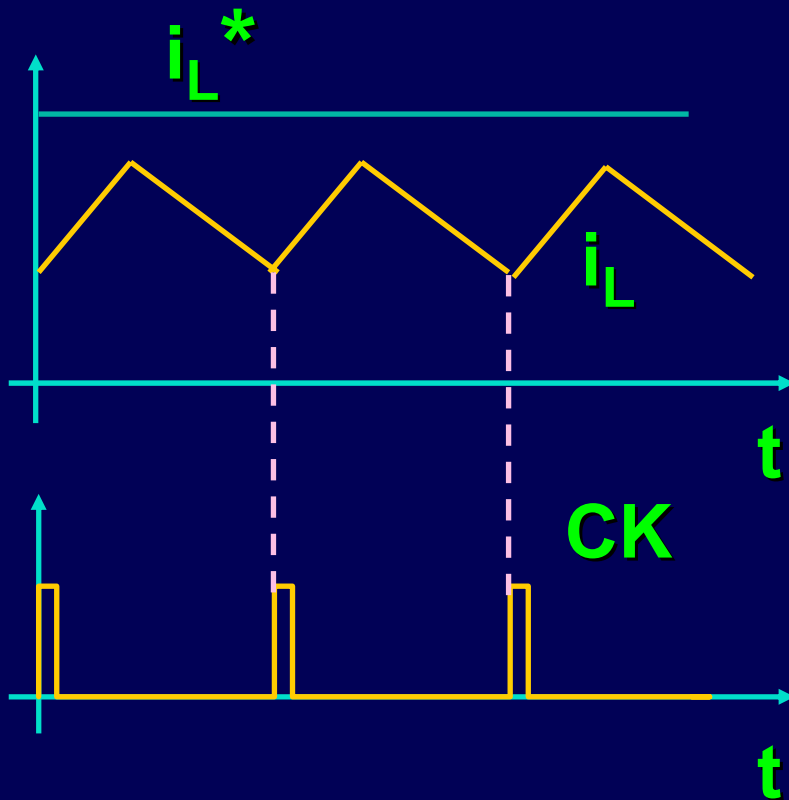
Controllo di tensione + limitazione di corrente



Controllo di tensione + limitazione di corrente



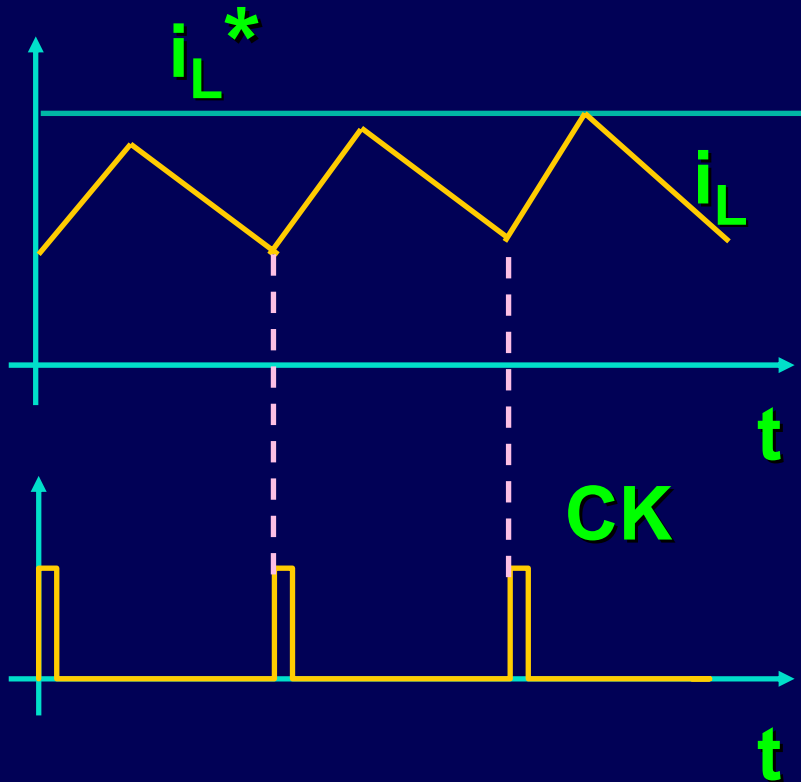
Funzionamento del limitatore di corrente



Funzionamento normale:

L'impulso di clock abilita la chiusura dell'interruttore, che viene comandato dal modulatore PWM.

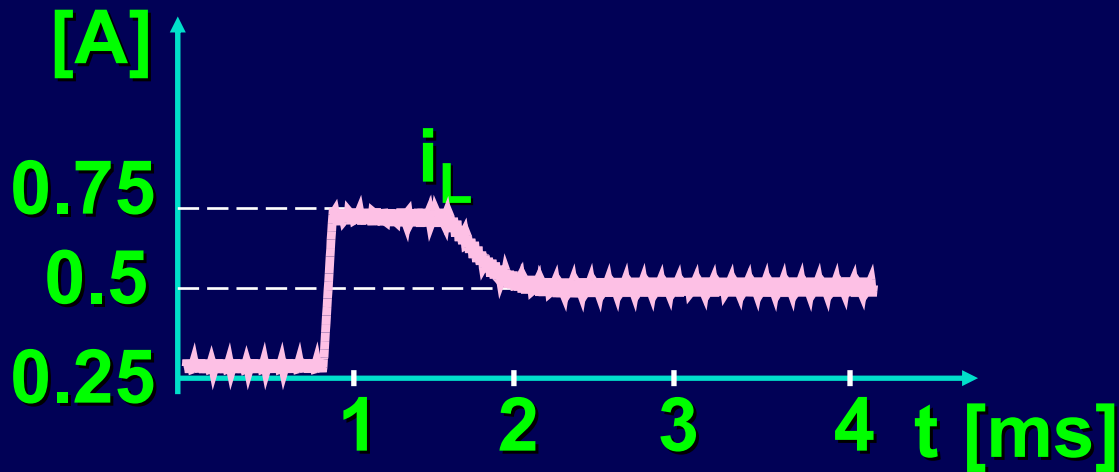
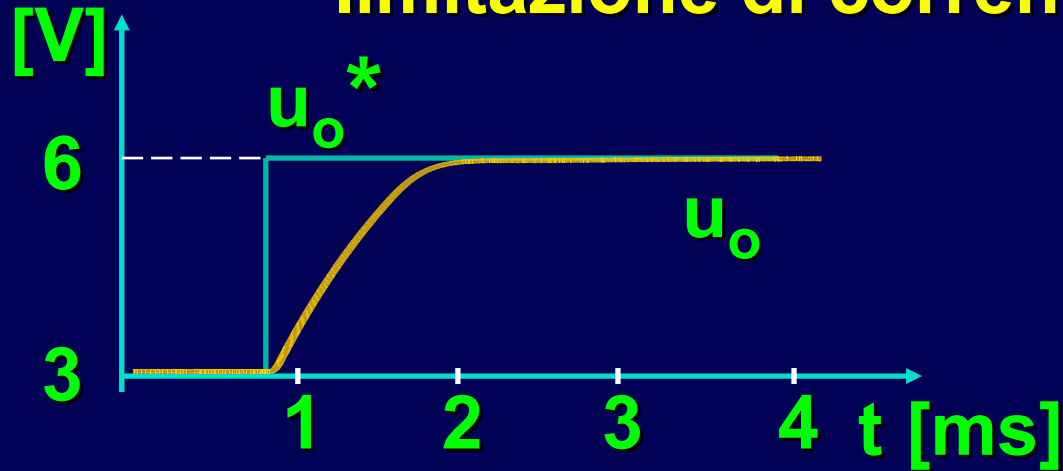
Funzionamento del limitatore di corrente



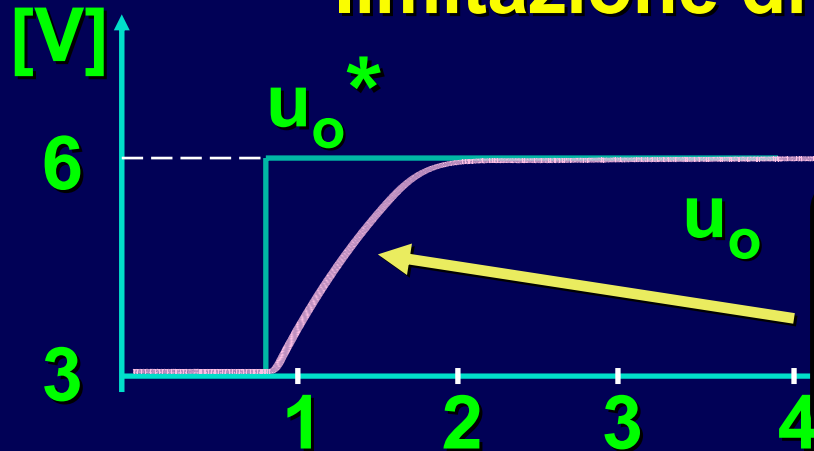
Limitazione di corrente:

Se la corrente (in transitorio) raggiunge la soglia, l'abilitazione viene rimossa e l'interruttore aperto

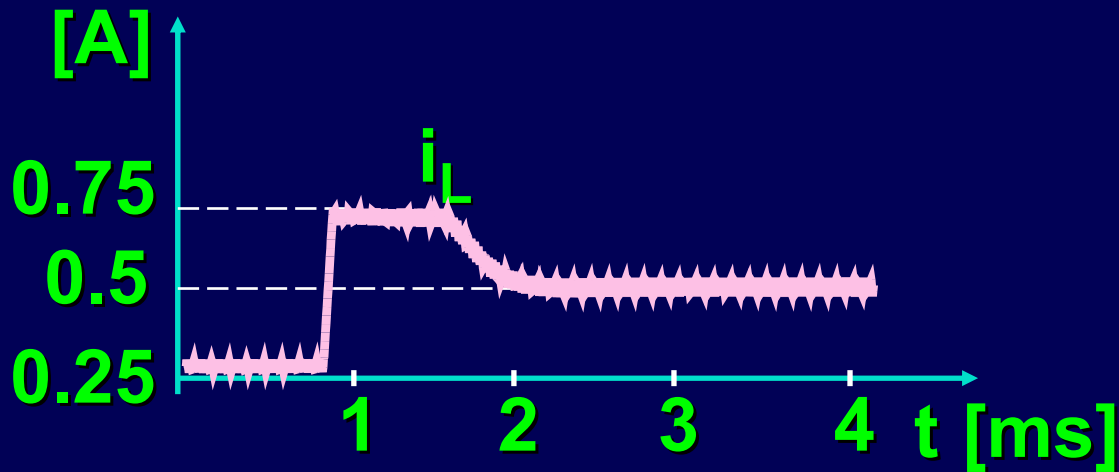
Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



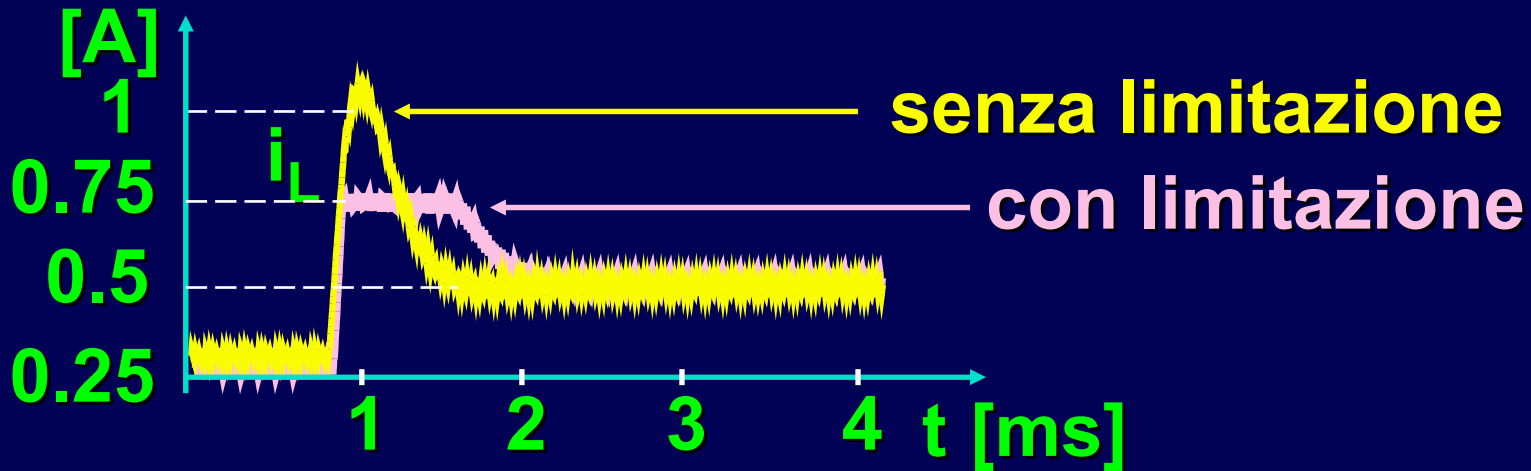
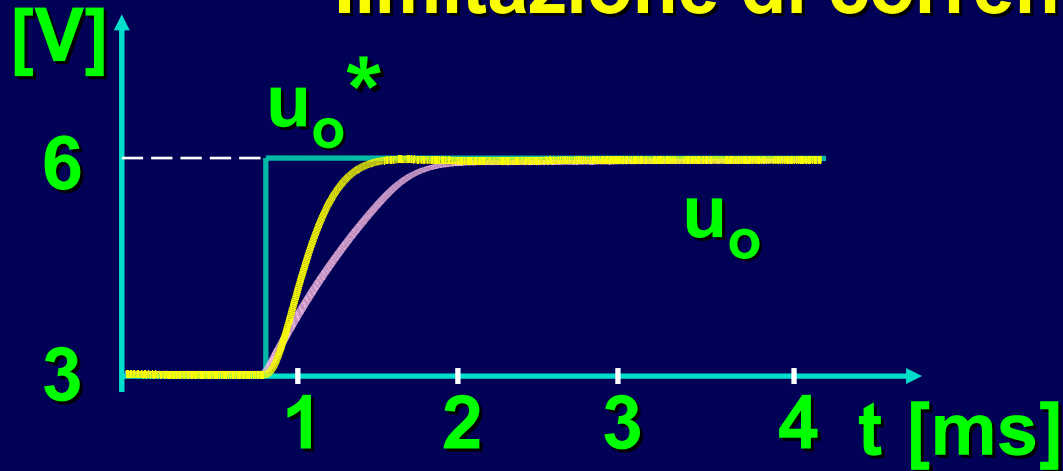
Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



La limitazione di corrente **rallenta** la dinamica



Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



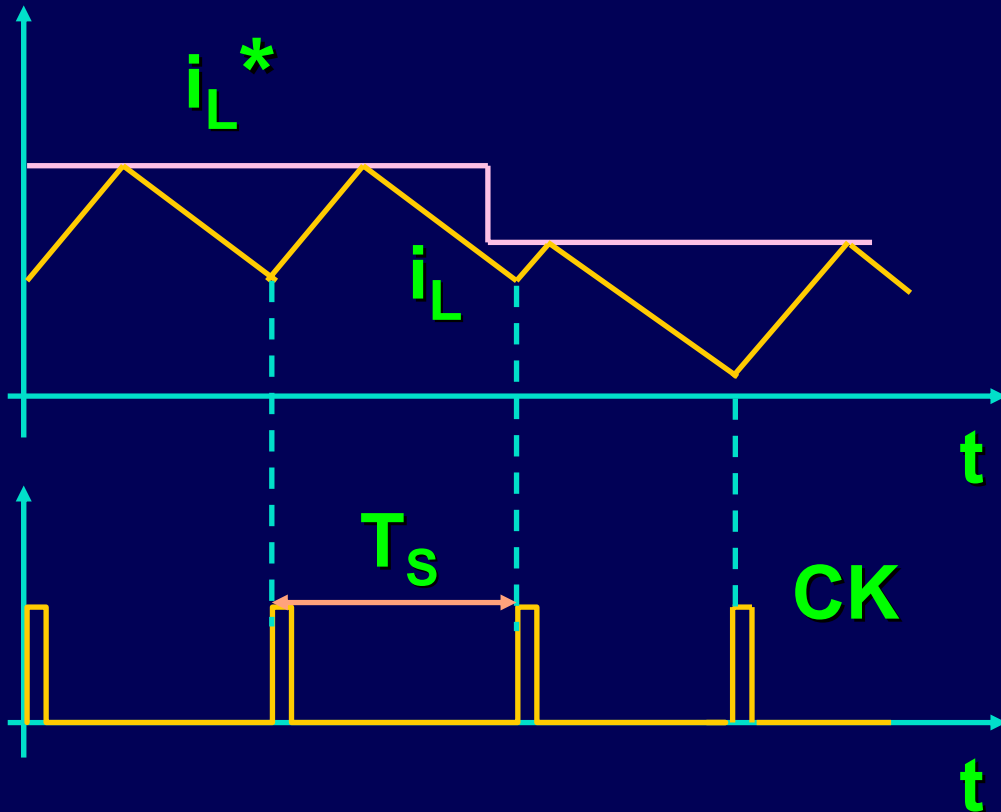
NOTA

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

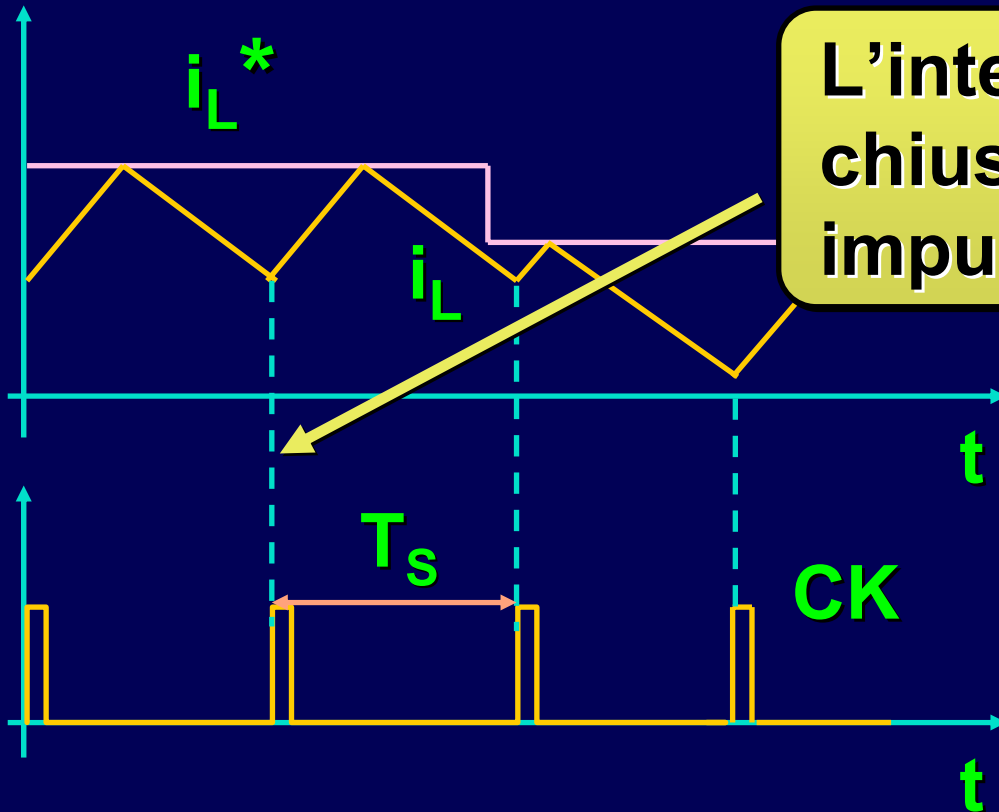
Controllo di corrente di picco

Principio di funzionamento



Controllo di corrente di picco

Principio di funzionamento

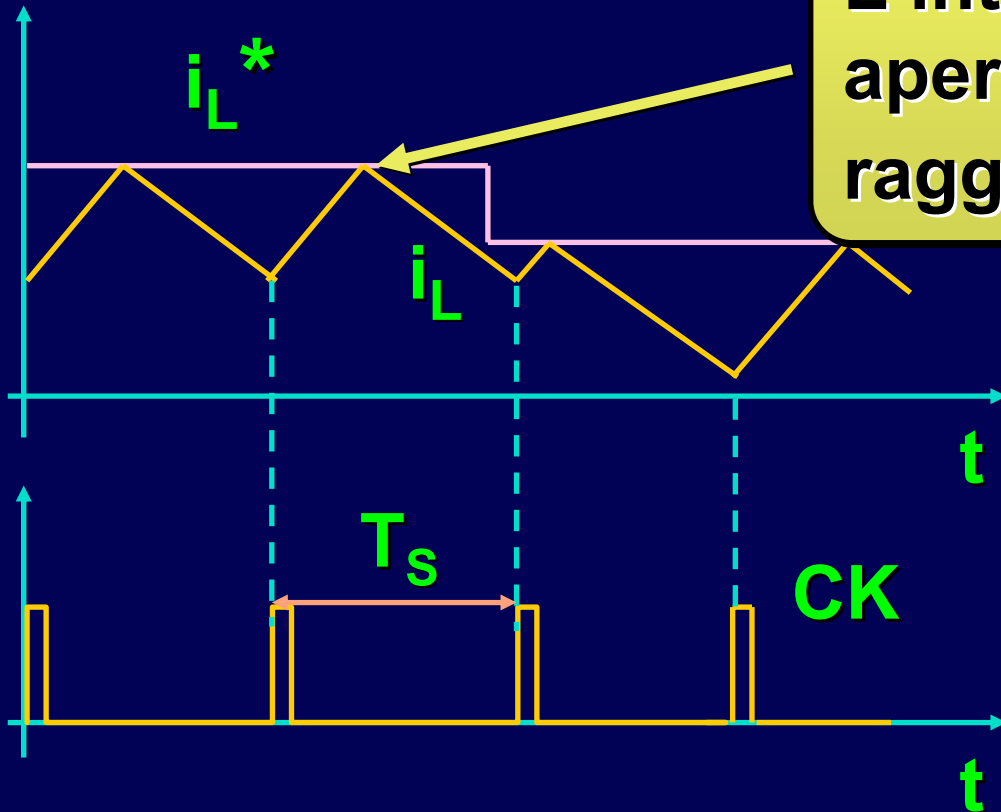


L'interruttore viene chiuso ad ogni impulso di clock

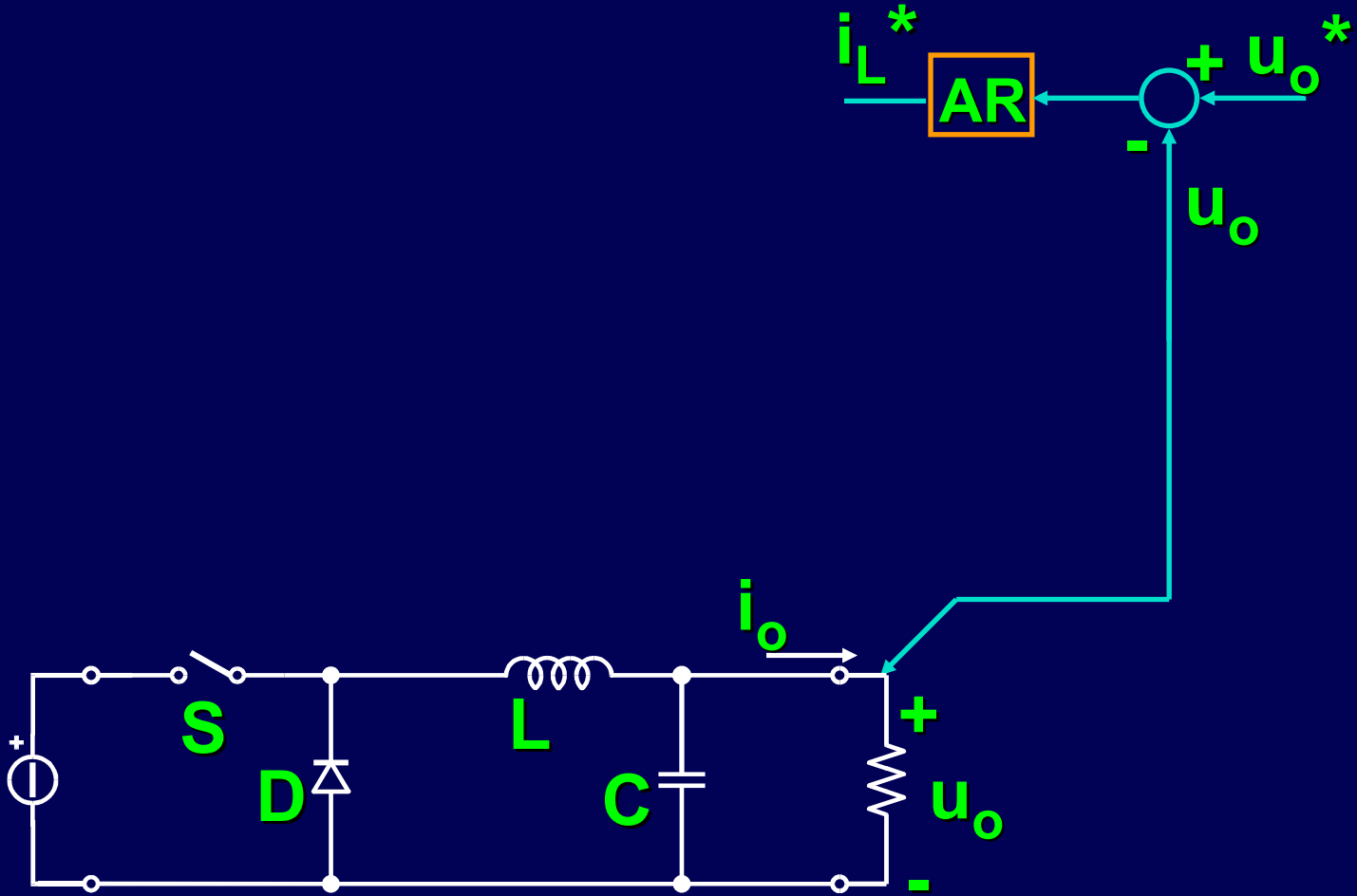
Controllo di corrente di picco

Principio di funzionamento

L'interruttore viene aperto quando i_L raggiunge i_L^*



Controllo di corrente di picco (versione base)

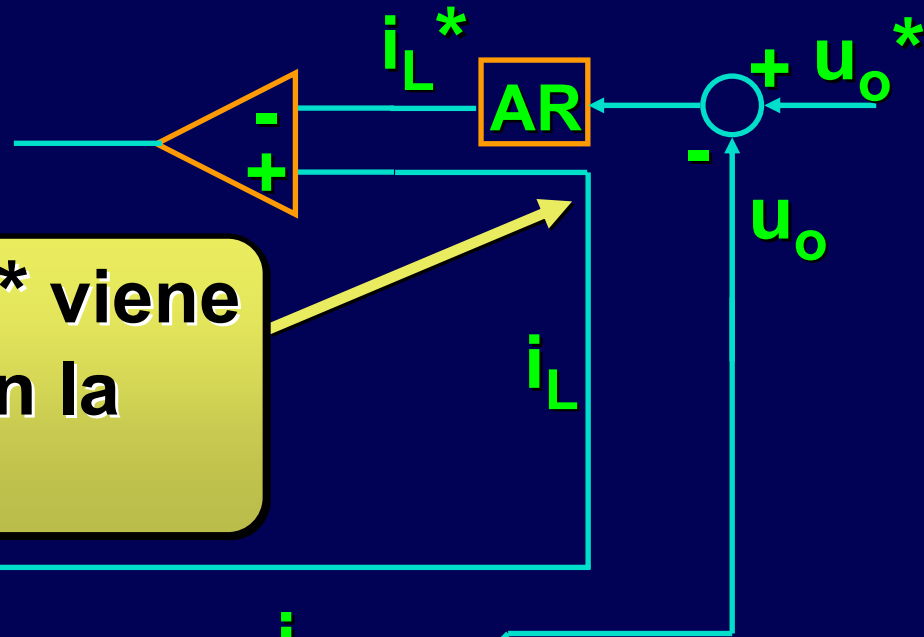


Controllo di corrente di picco (versione base)

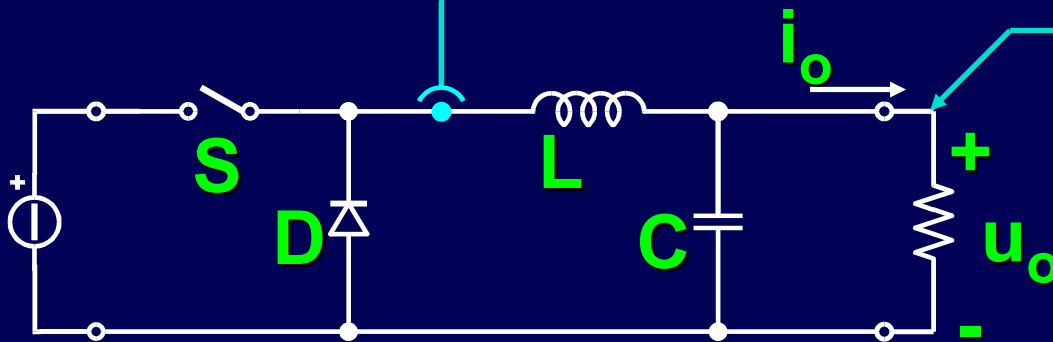
L'uscita del regolatore di tensione é il riferimento di corrente



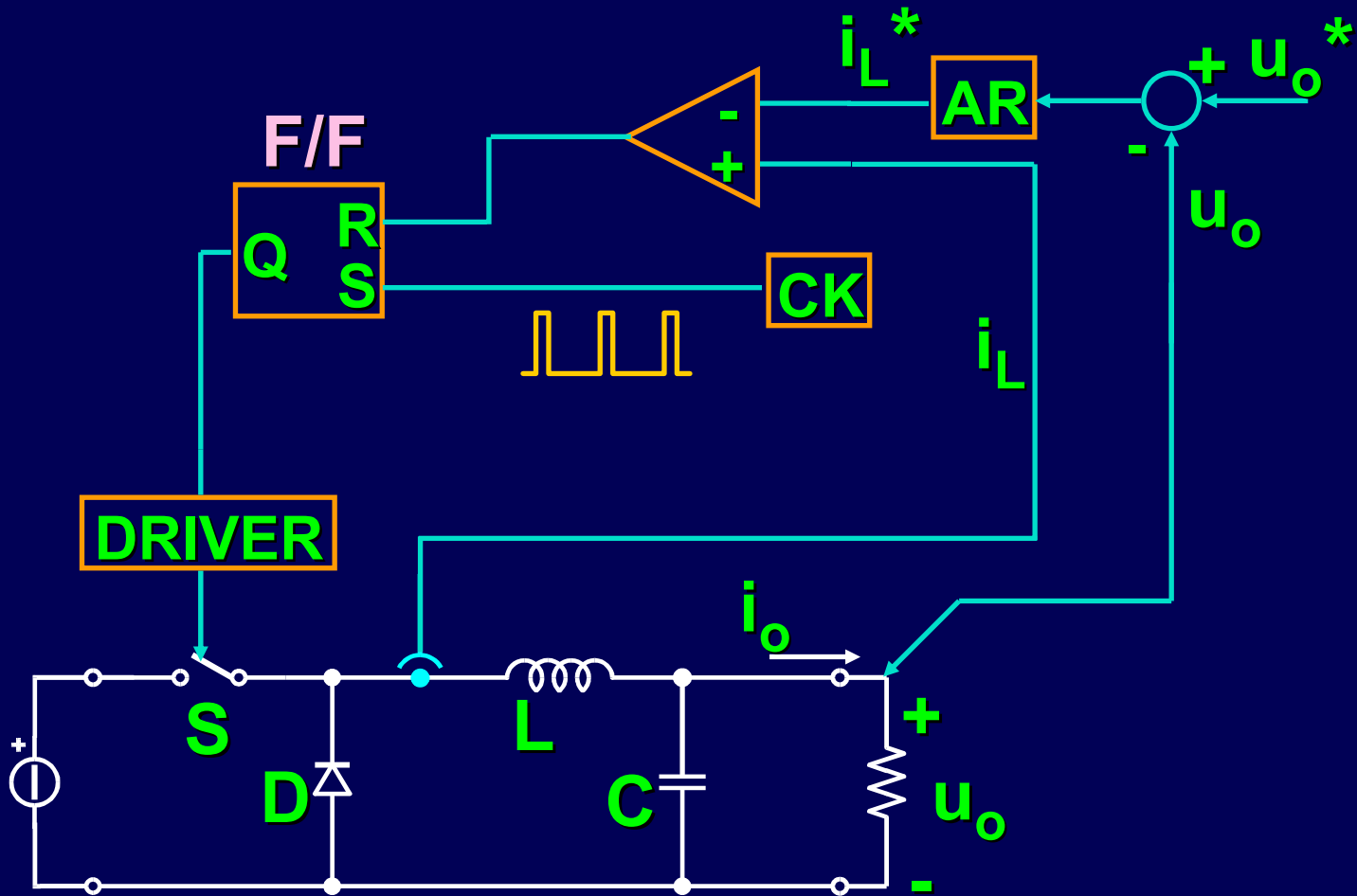
Controllo di corrente di picco (versione base)



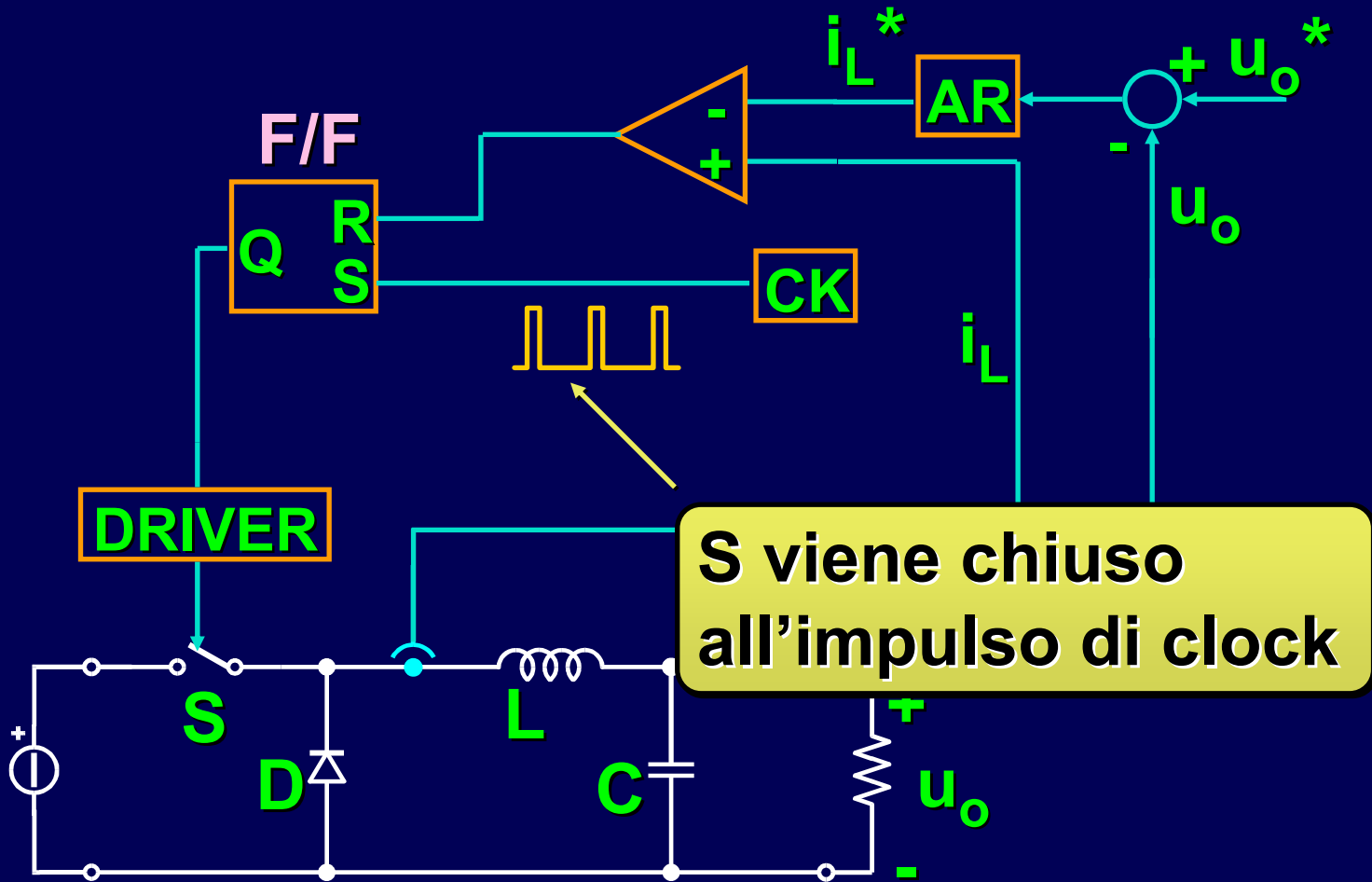
Il riferimento i_L^* viene confrontato con la corrente i_L



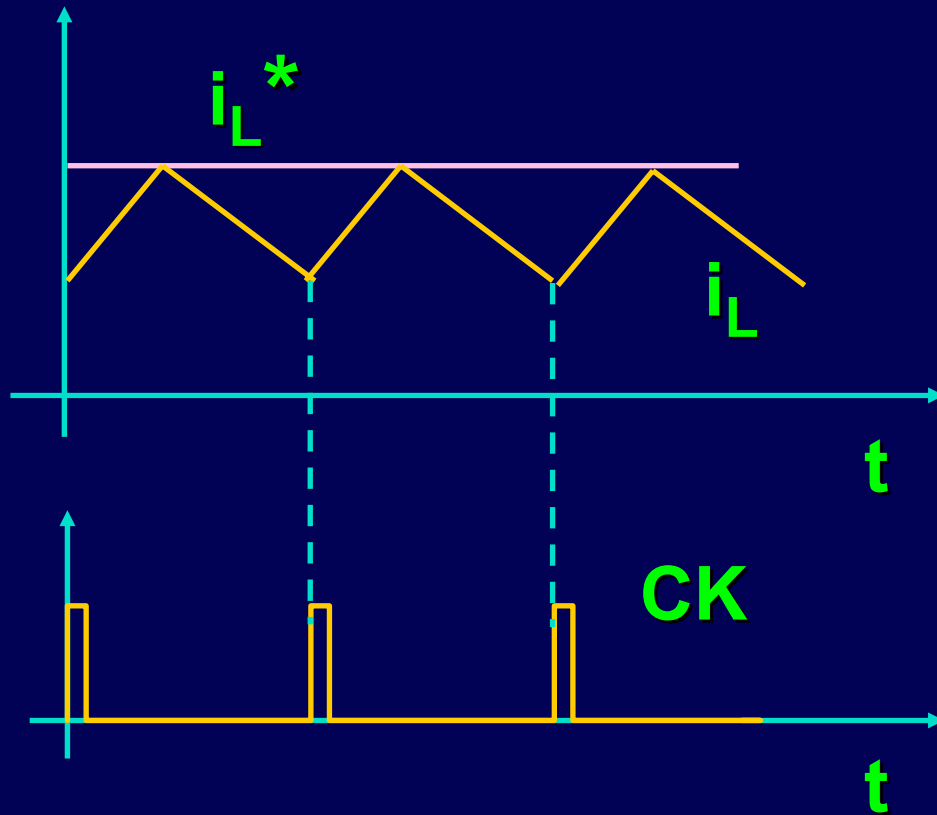
Controllo di corrente di picco (versione base)



Controllo di corrente di picco (versione base)

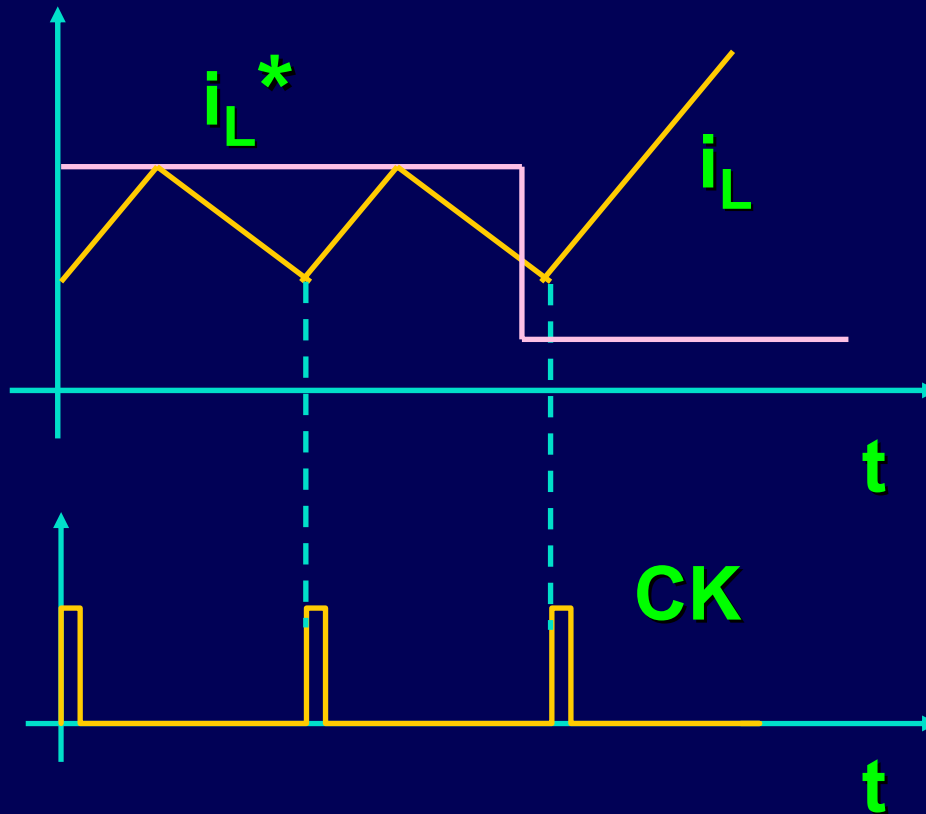


Funzionamento del controllo di corrente di picco



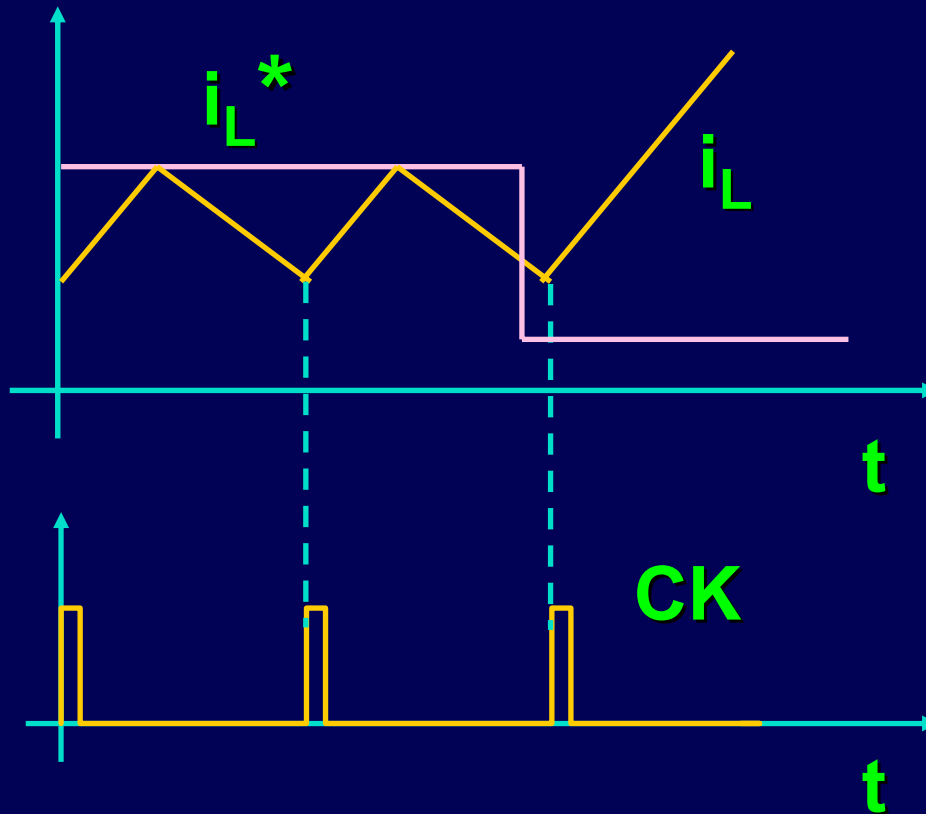
Nota:
E' sufficiente misurare la corrente I_S nell'interruttore (V_{Son} nel caso dei Mosfet)

Funzionamento del controllo di corrente di picco



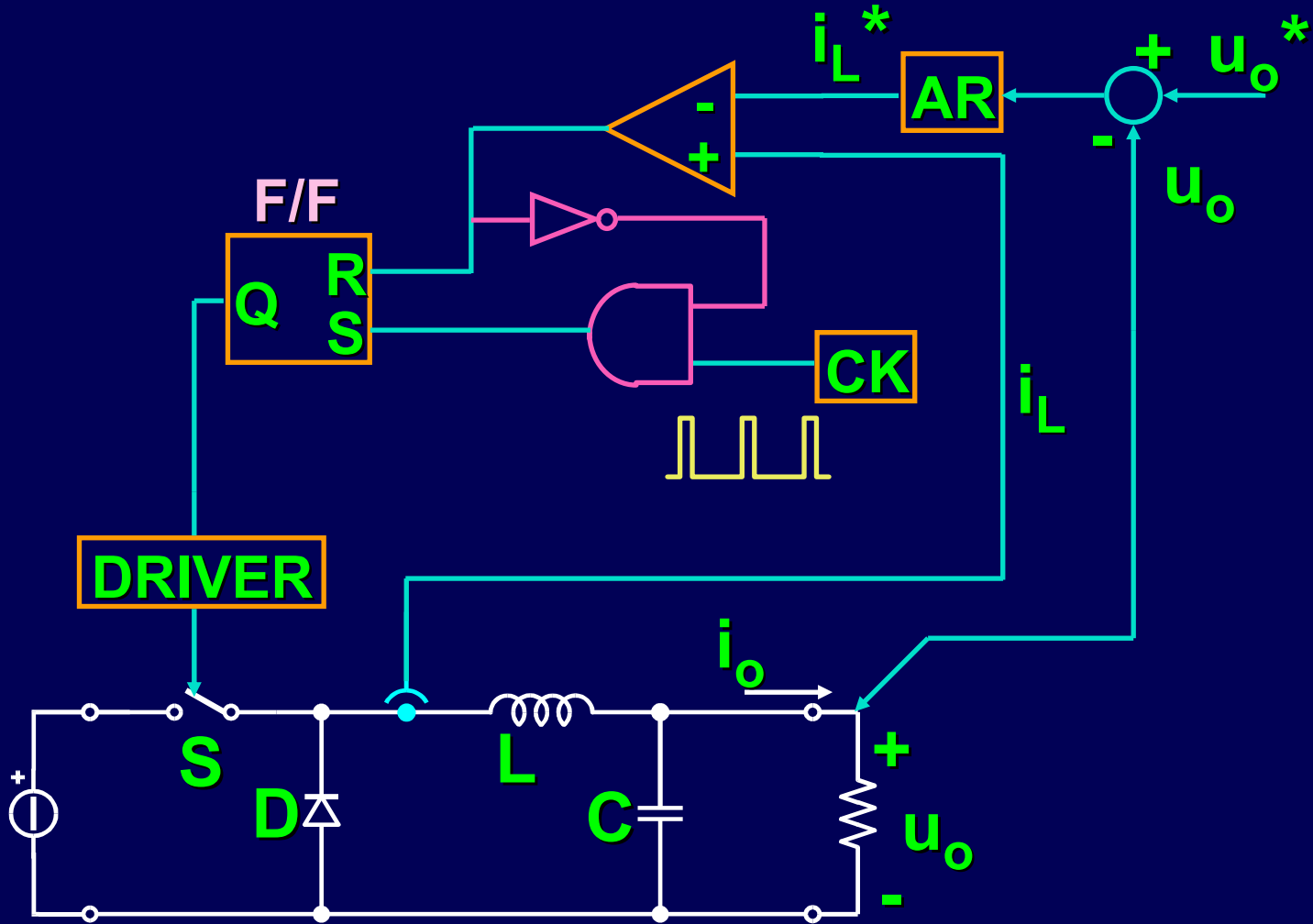
In presenza di una brusca variazione del riferimento di corrente può verificarsi una **perdita di controllo**

Funzionamento del controllo di corrente di picco

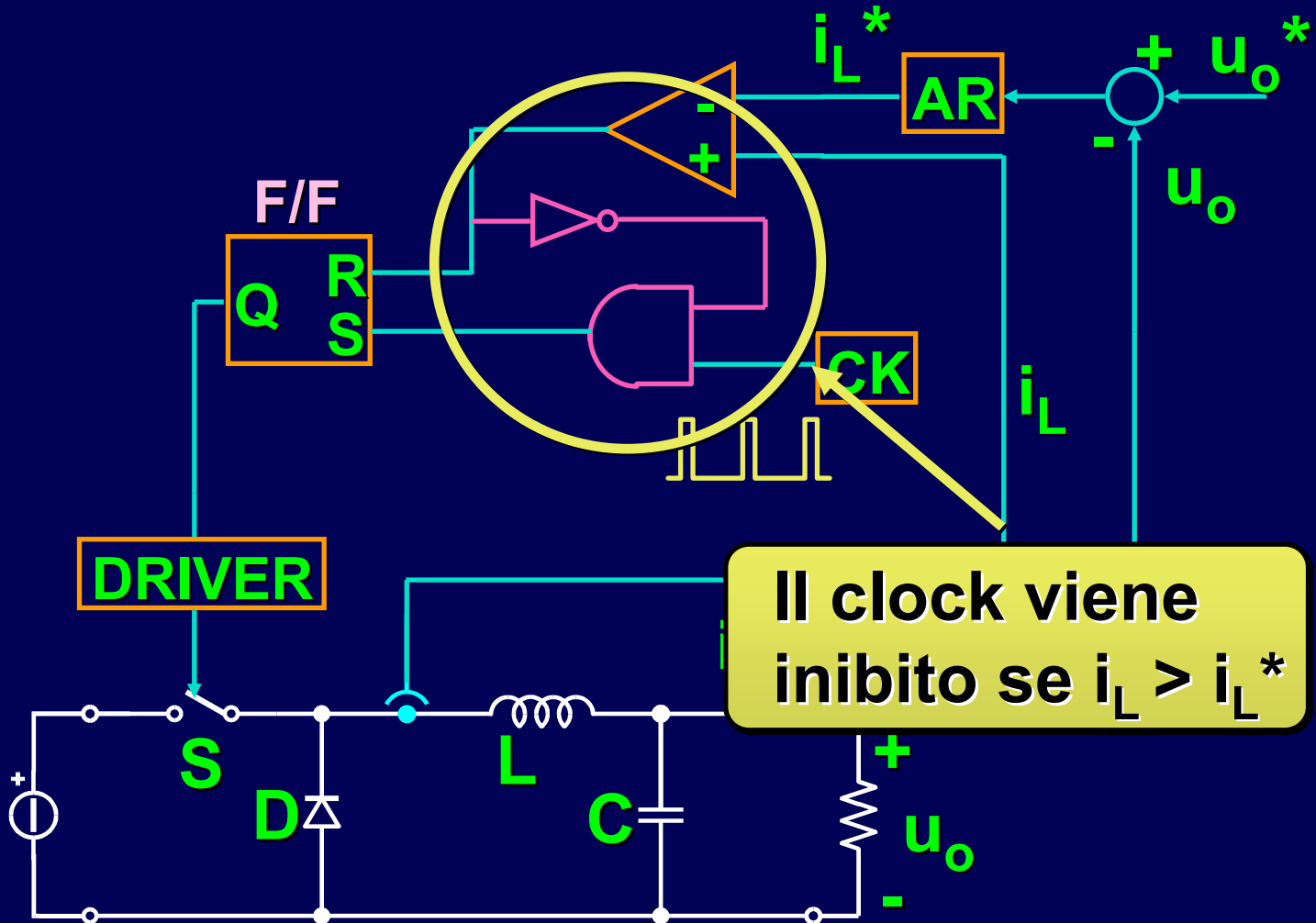


Per evitare di perdere il controllo si chiude l'interruttore solo se $i_L < i_L^*$

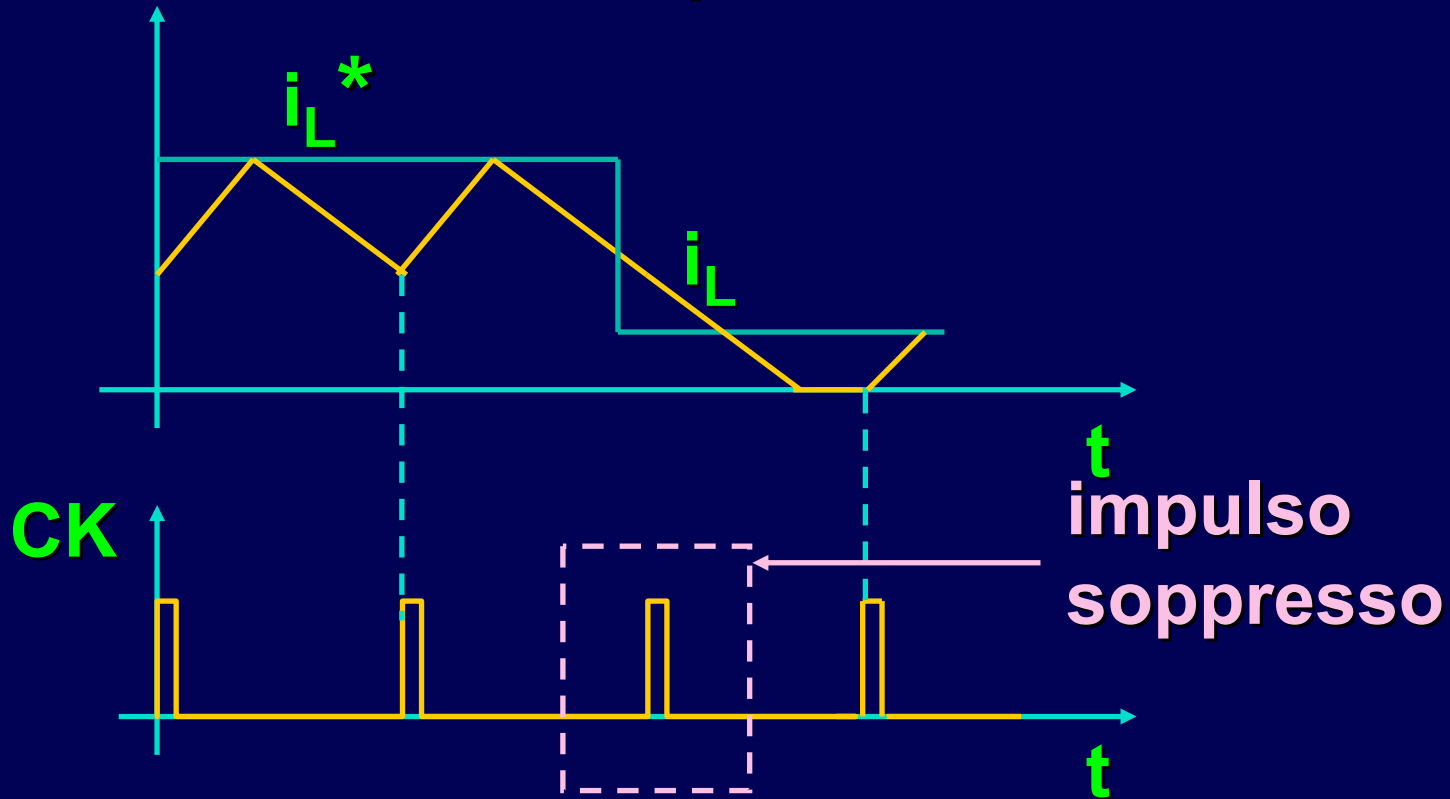
Controllo di corrente di picco modificato



Controllo di corrente di picco modificato

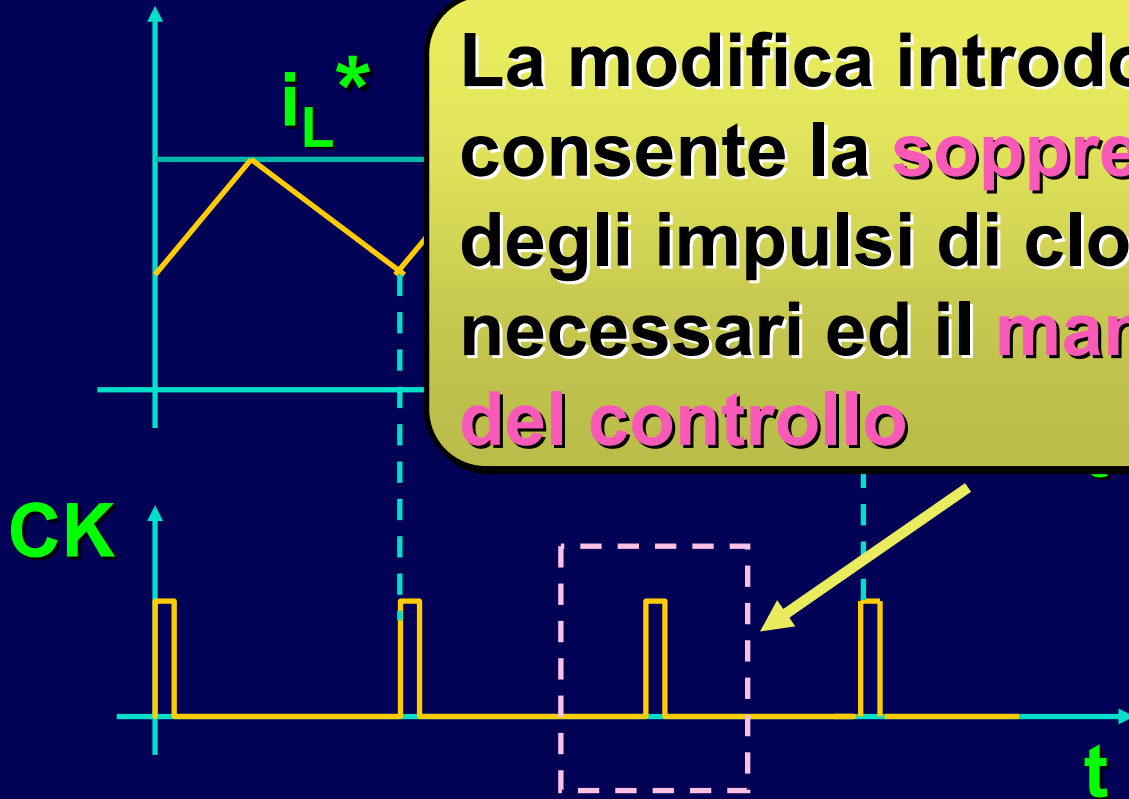


Funzionamento del controllo di corrente di picco modificato



Funzionamento del controllo di corrente di picco modificato

La modifica introdotta consente la **soppressione** degli impulsi di clock non necessari ed il **mantenimento del controllo**



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 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

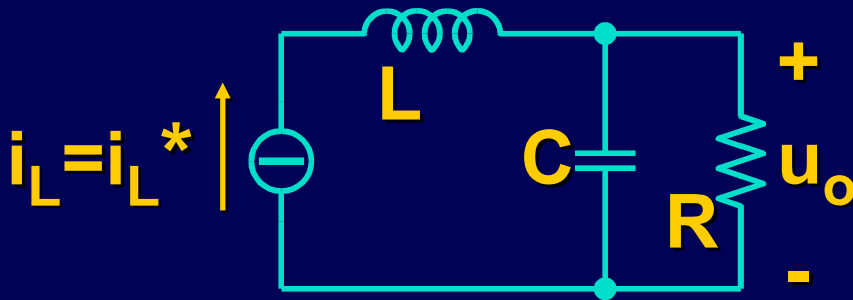
Dinamica del controllo di corrente

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

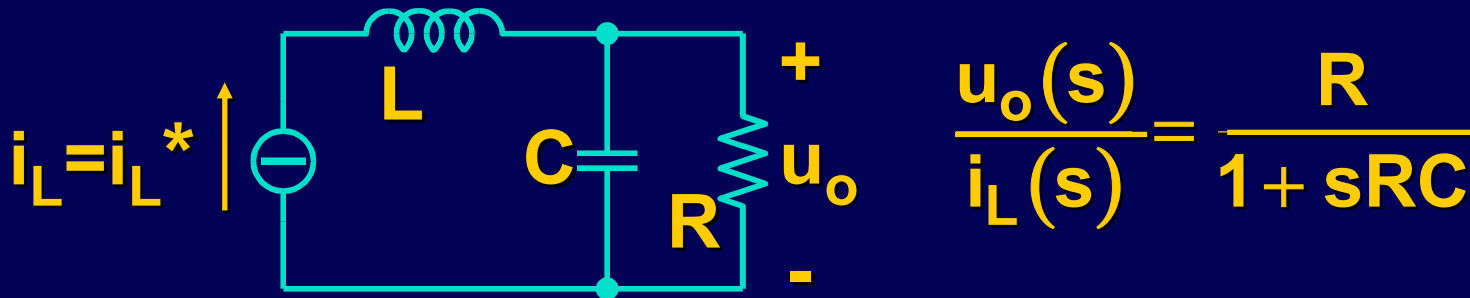
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong I_L \cong I_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



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

Dinamica del controllo di corrente

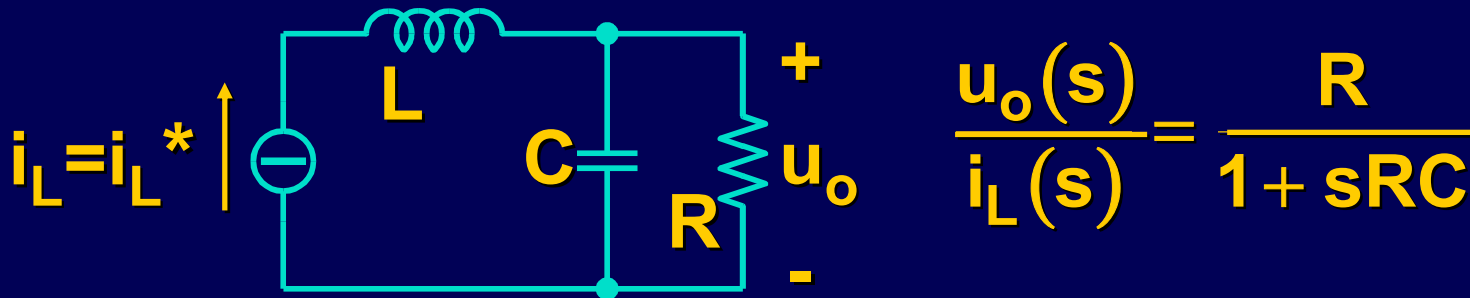
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong I_L \cong I_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



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

Dinamica del controllo di corrente

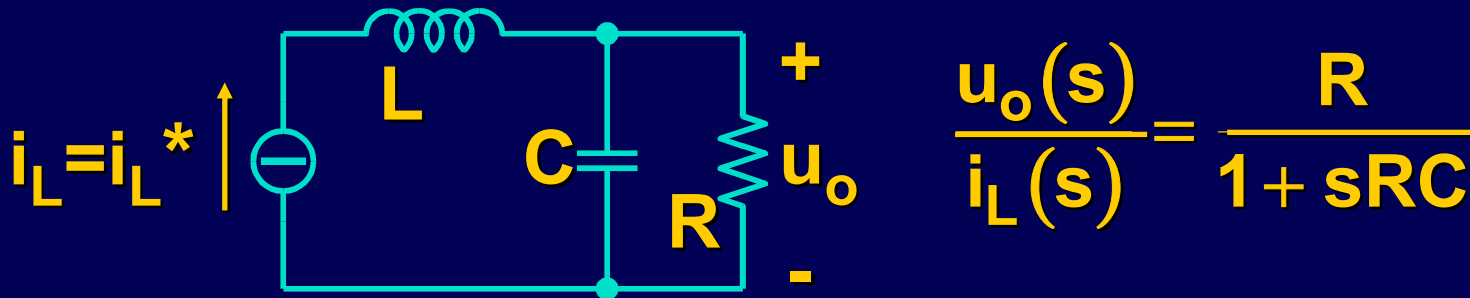
Se Δi_L é trascurabile si ha: $i_L \cong I_L \cong I_{Lmax}$
sicché il controllo di corrente di picco
equivale a quello di corrente media



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

Dinamica del controllo di corrente

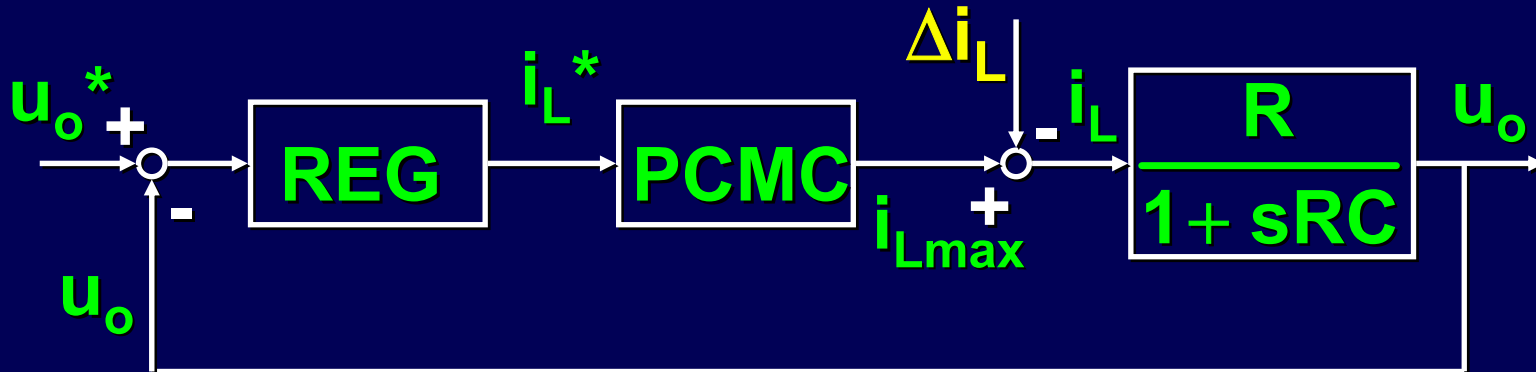
PI:
$$\frac{u_o(s)}{i_L^*(s)} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau} \cdot \frac{R}{1 + sRC}$$



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

Dinamica del controllo di corrente

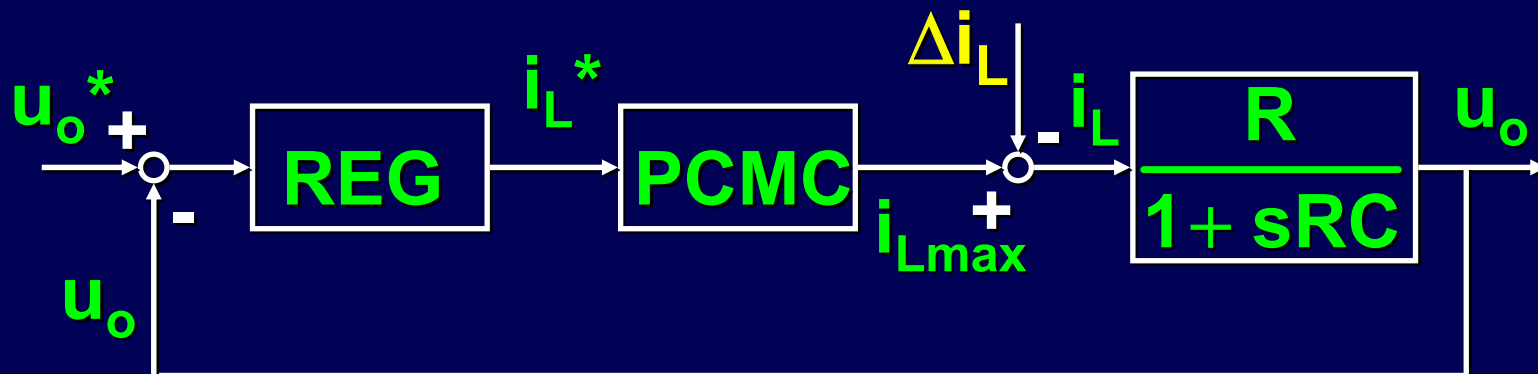
Se Δi_L non é trascurabile il sistema si può rappresentare come in figura:



PCMC: Peak Current Mode Control

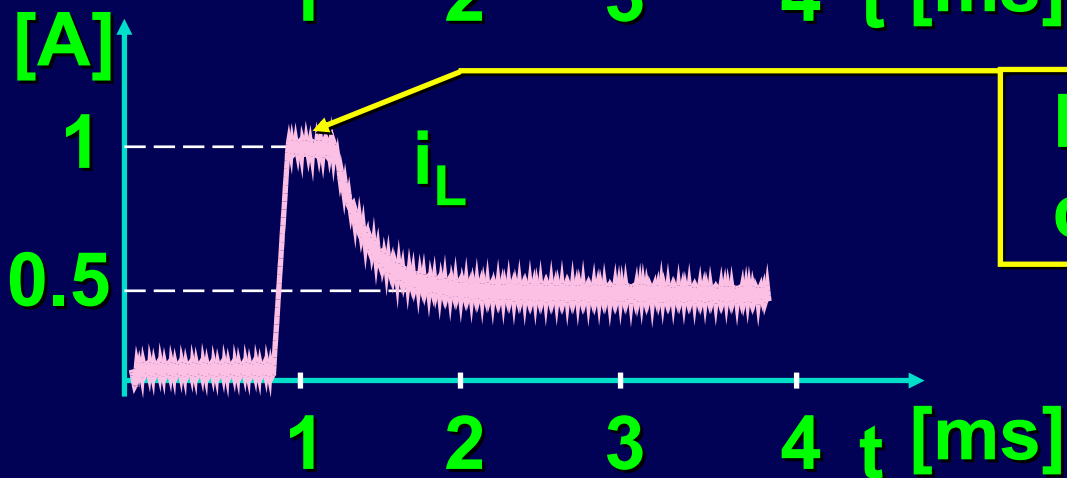
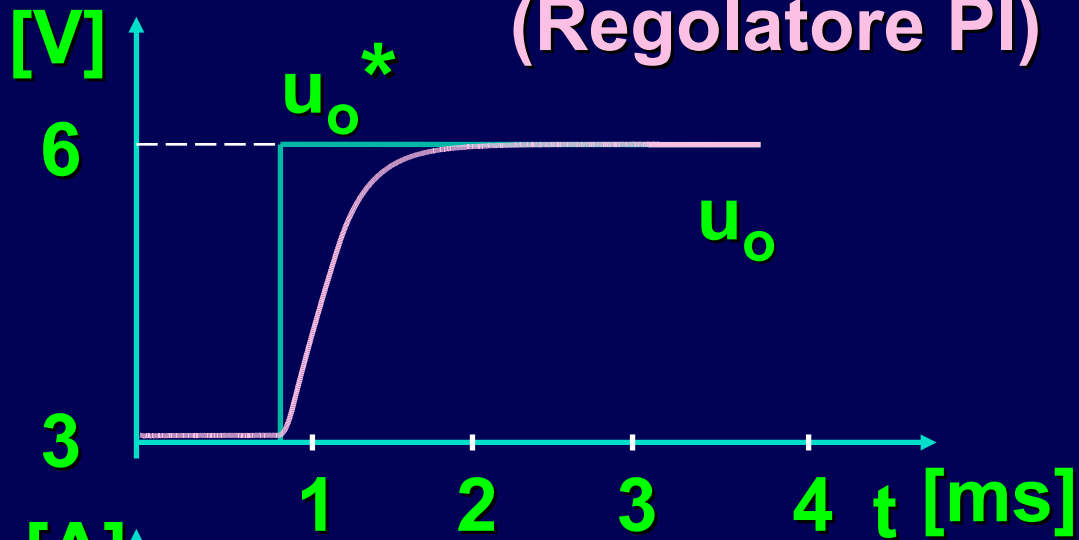
Dinamica del controllo di corrente

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

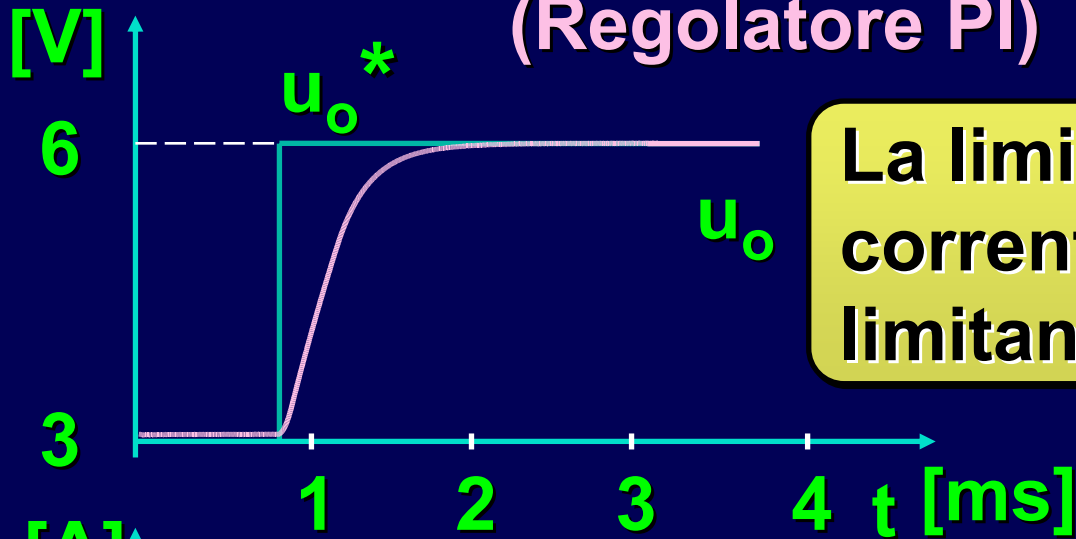


L'ondulazione di corrente Δi_L può considerarsi come un disturbo. I suoi effetti vengono cancellati se il regolatore è opportuno (azione integratrice)

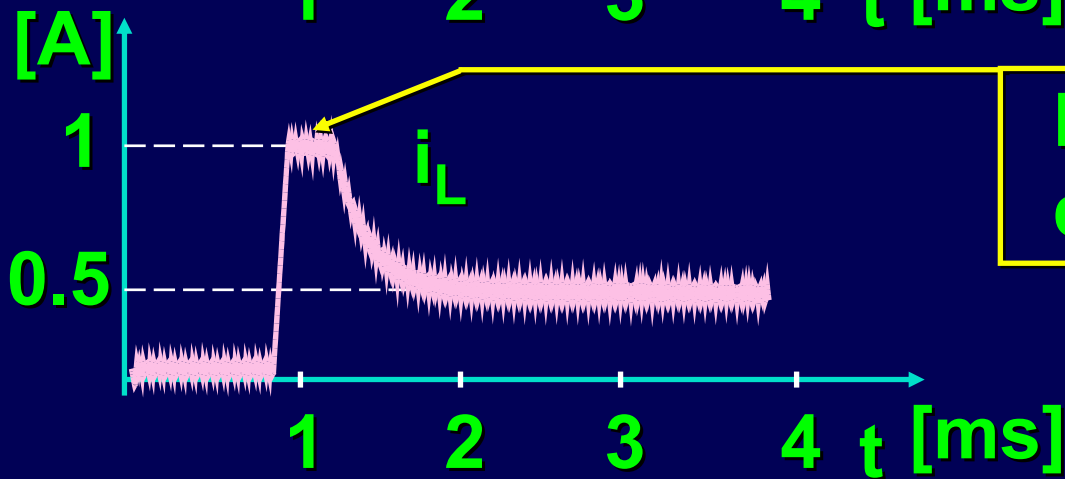
Dinamica del controllo di corrente di picco (Regolatore PI)



Dinamica del controllo di corrente di picco (Regolatore PI)



La limitazione di corrente si ottiene limitando i_L^*



Limitazione di corrente

Instabilitá statica

Instabilità statica

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

Instabilità statica

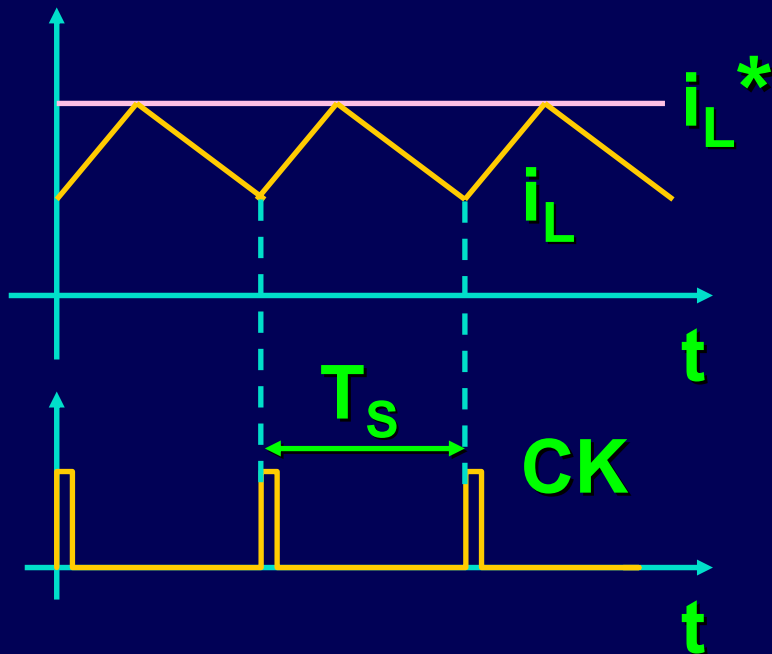
Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica.

Esso tuttavia presenta una instabilità “statica” in CCM per valori di $\delta > 0.5$.

Instabilità statica

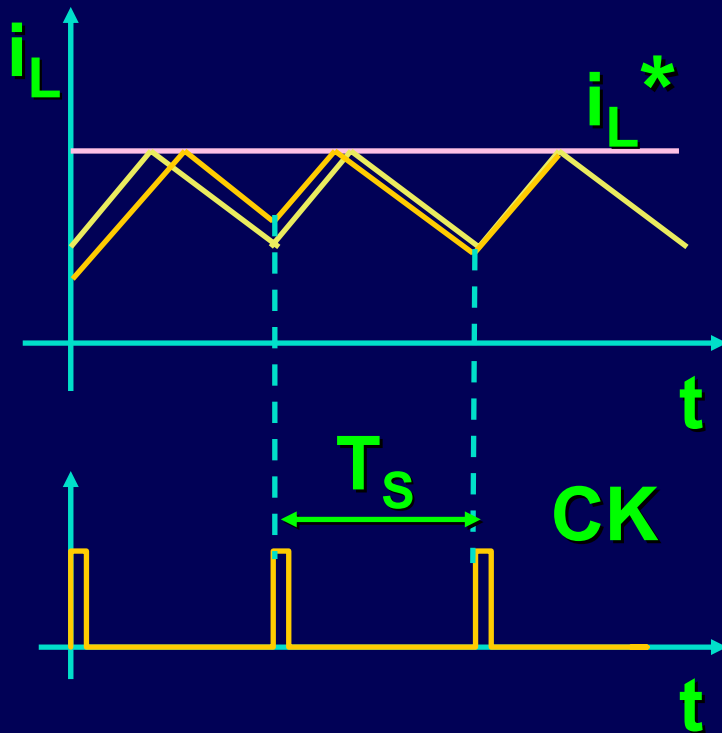
Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica.

Esso tuttavia presenta una **instabilità “statica” in CCM** per valori di $\delta > 0.5$.



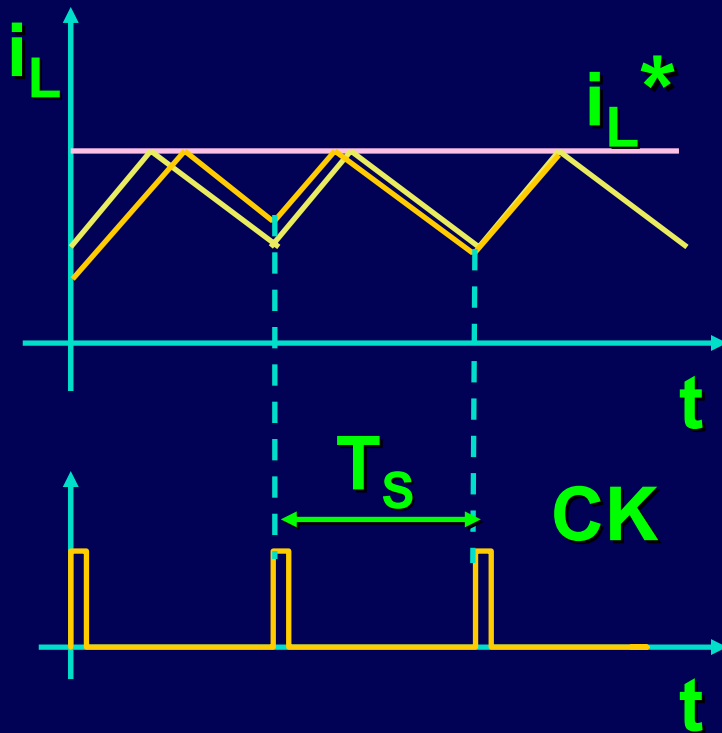
Funzionamento ideale

Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta < 0.5$)

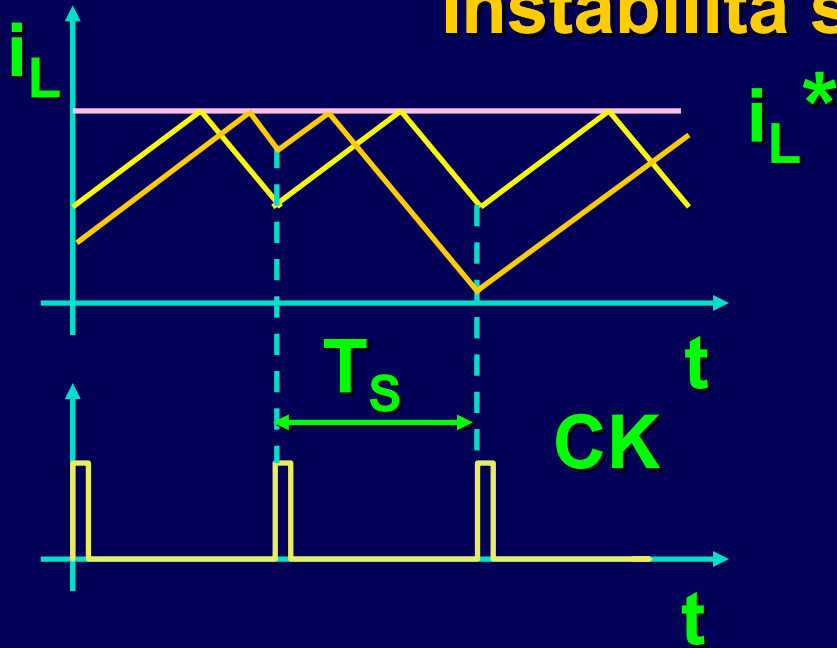
Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta < 0.5$)

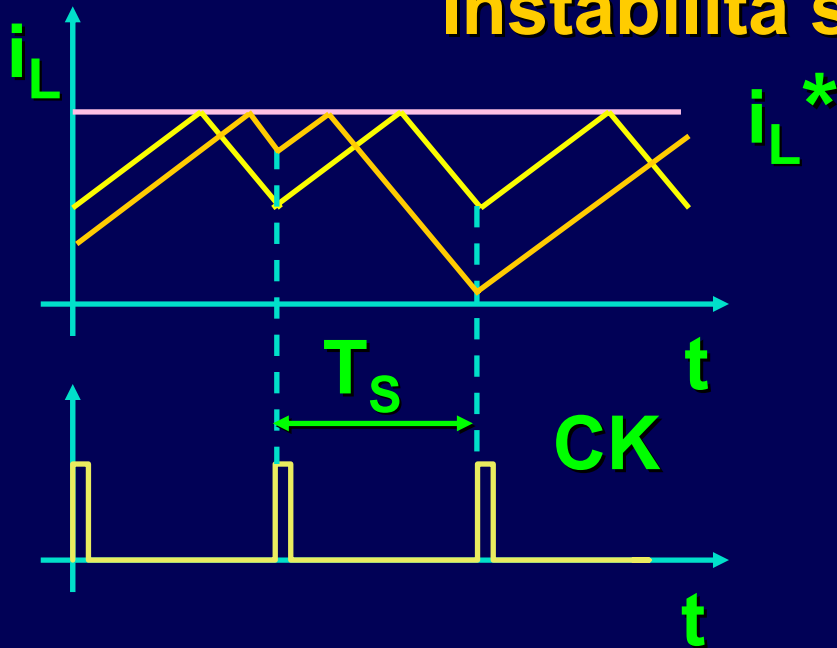
Una perturbazione di I_{Lmin} fa variare temporaneamente t_{on} , e quindi t_{off} , ma viene riassorbita in pochi cicli

Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

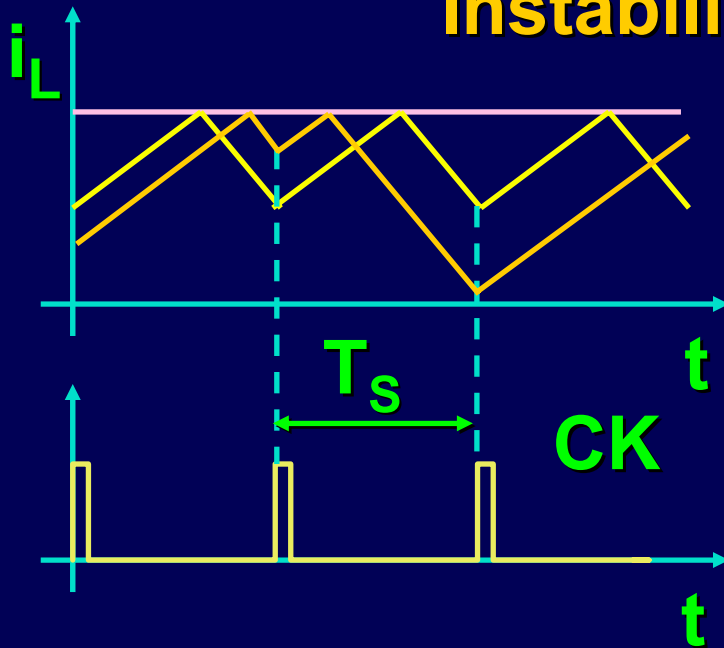
Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

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

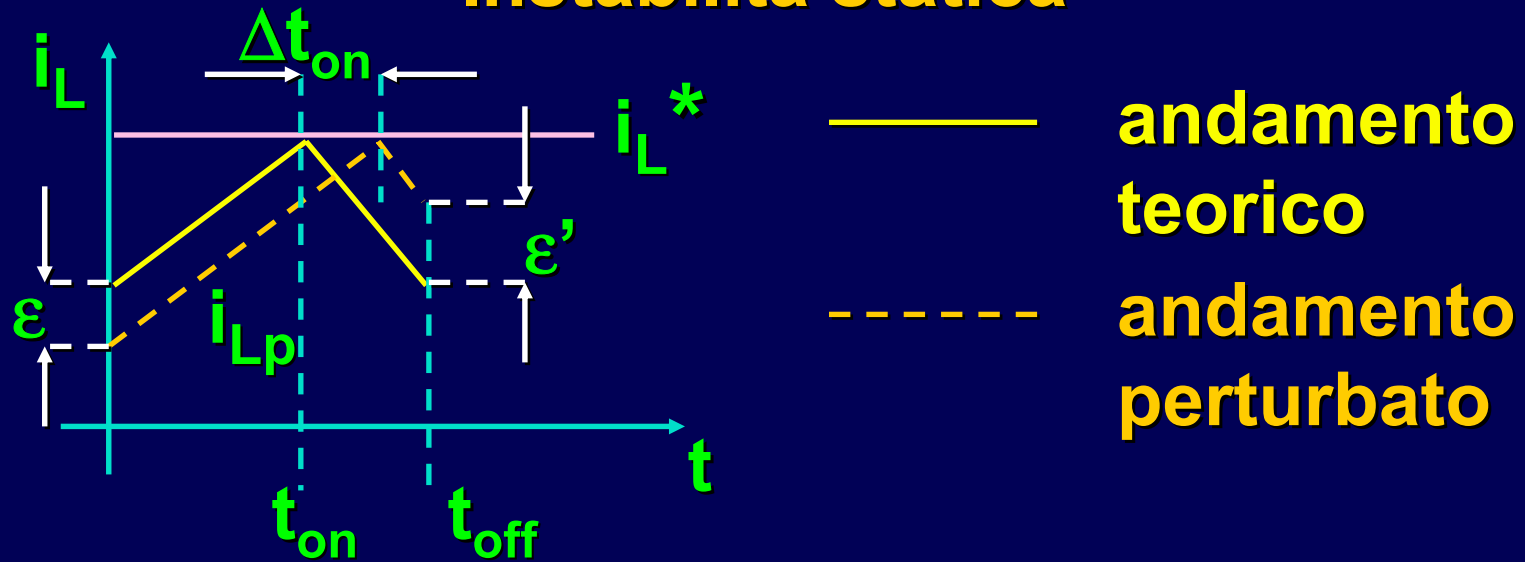
Instabilità statica



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 $U_o / U_i > 0.5$.

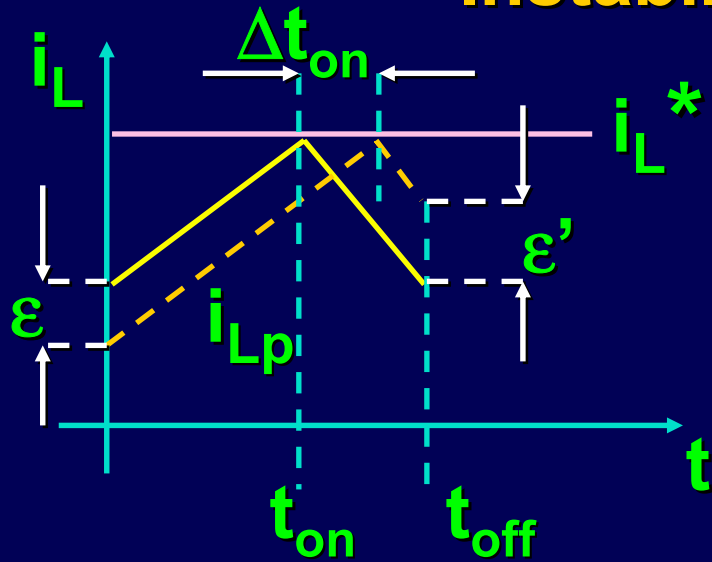
Instabilità statica



ON:

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

Instabilitá statica



———— andamento teorico
 - - - - - andamento perturbato

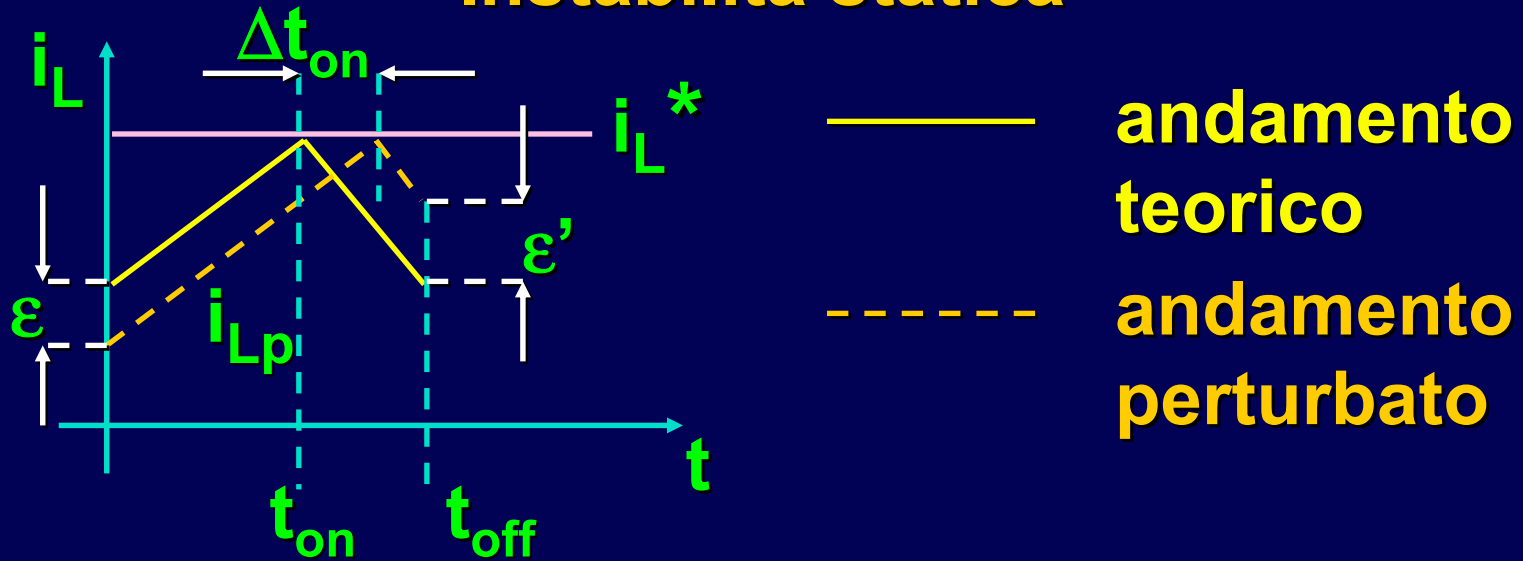
ON:

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - (I_{Lmin} + \epsilon) = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot (t_{on} + \Delta t_{on})$$

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

$$\Delta t_{off} = -\Delta t_{on}$$

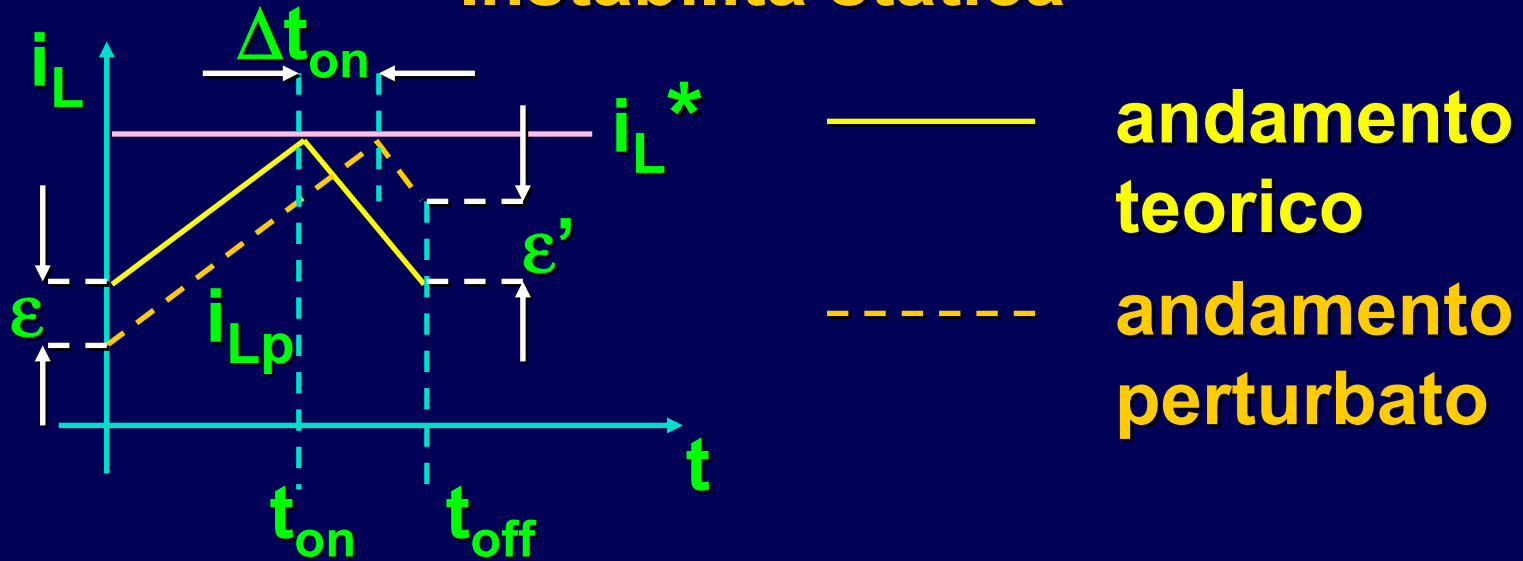
Instabilità statica



OFF:

$$I_{Lmax} - (I_{Lmin} + \epsilon') = \frac{U_o}{L} \cdot (t_{off} - \Delta t_{on})$$

Instabilità statica

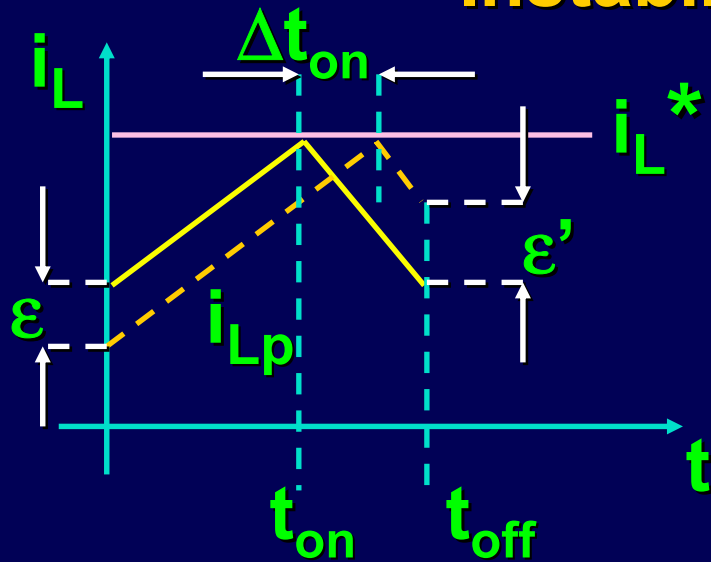


OFF:

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

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

Instabilitá statica



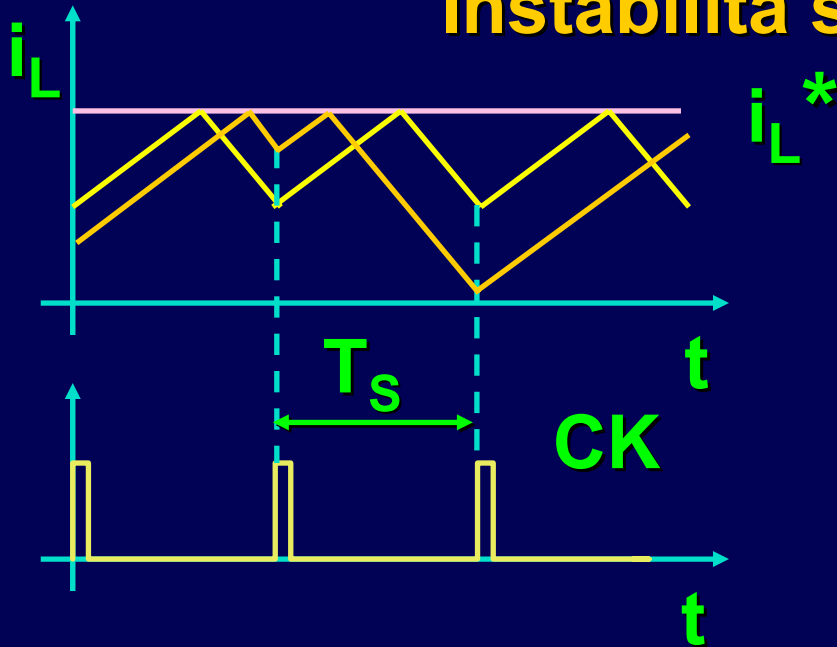
— andamento teorico

- - - - - andamento perturbato

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

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

Instabilità statica

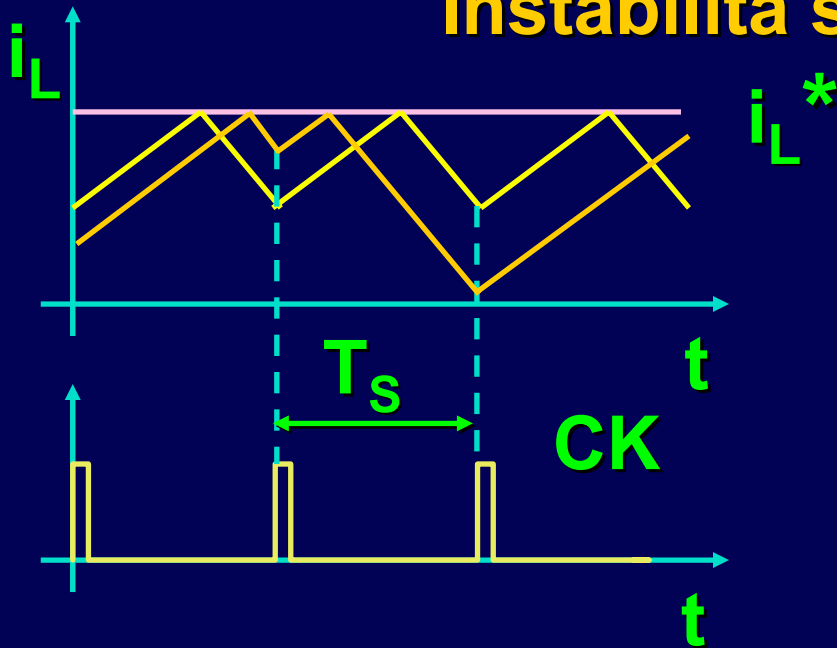


Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

Problemi causati dall'instabilità statica

- Aumento dell'ondulazione di corrente

Instabilità statica

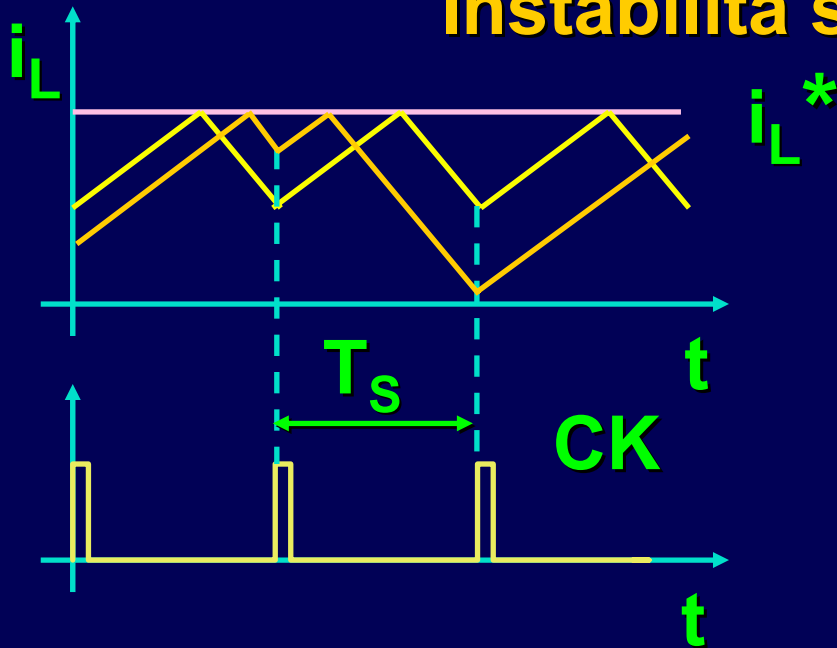


Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

Problemi causati dall'instabilità statica

- Armoniche di corrente a frequenza $< f_s$

Instabilità statica



Funzionamento
perturbato ($\delta > 0.5$)

$$\Delta U_C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot C}$$

Problemi causati dall'instabilità statica

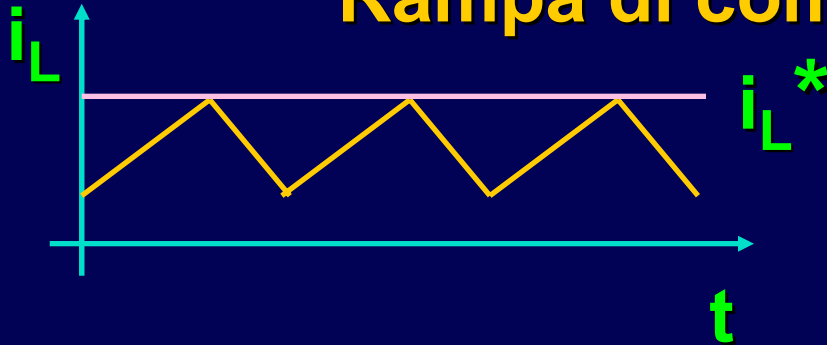
- Aumento dell'ondulazione della tensione di uscita

Eliminazione dell' instabilità statica

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

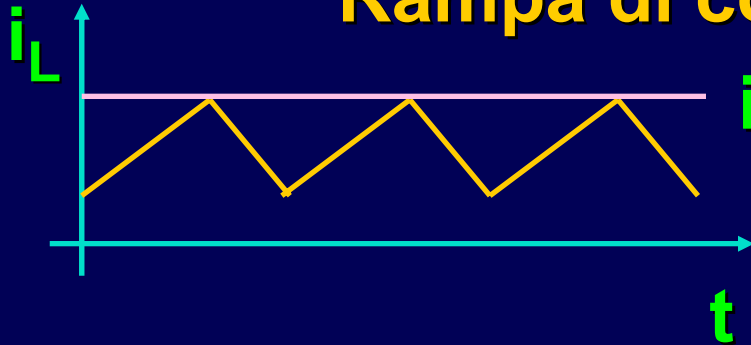
Soluzione: si aggiunge al segnale di retroazione di corrente (i_L) un segnale a rampa (r) in modo da evitare la condizione di instabilità

Rampa di compensazione

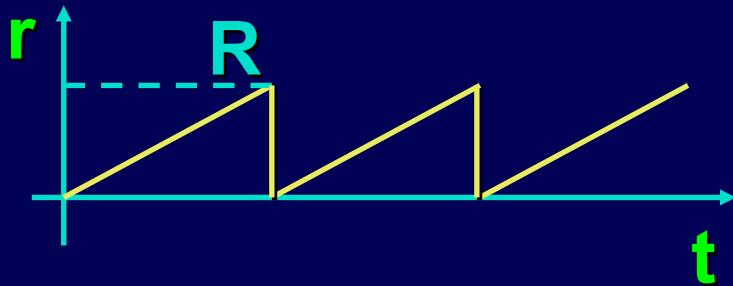


Funzionamento
originario

Rampa di compensazione

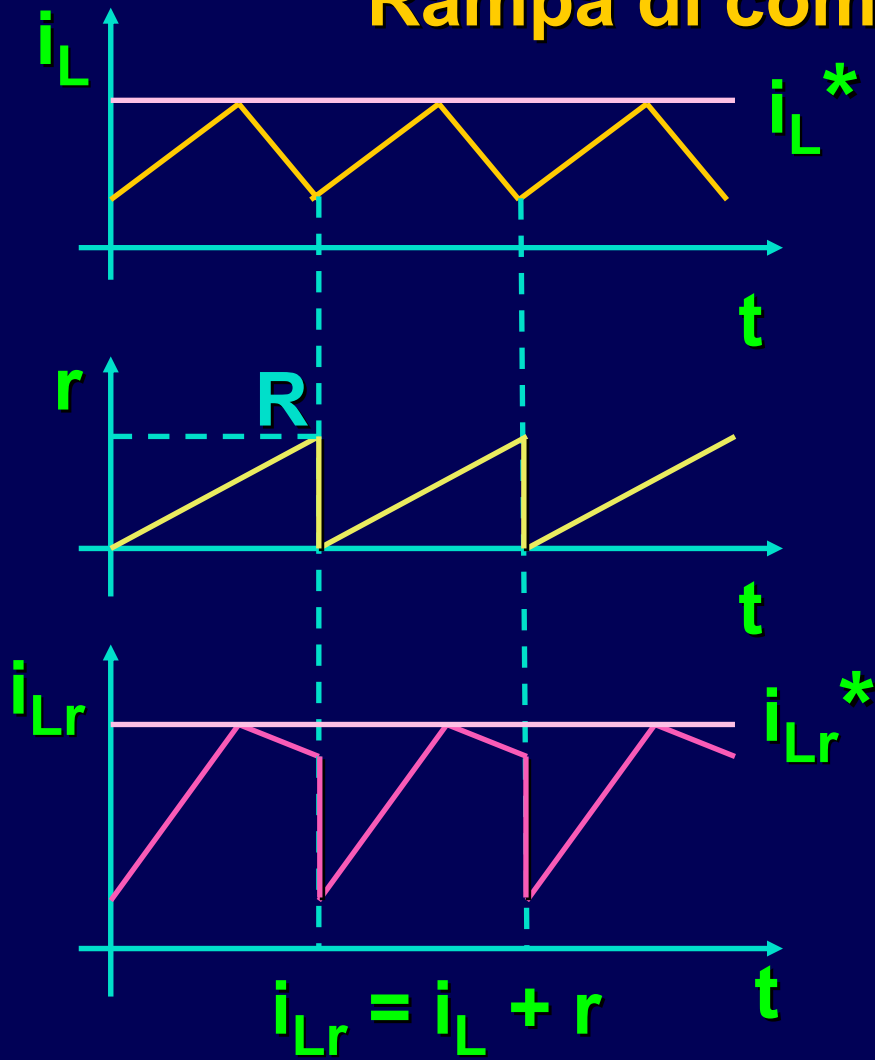


Funzionamento
originario



Rampa di
compensazione

Rampa di compensazione

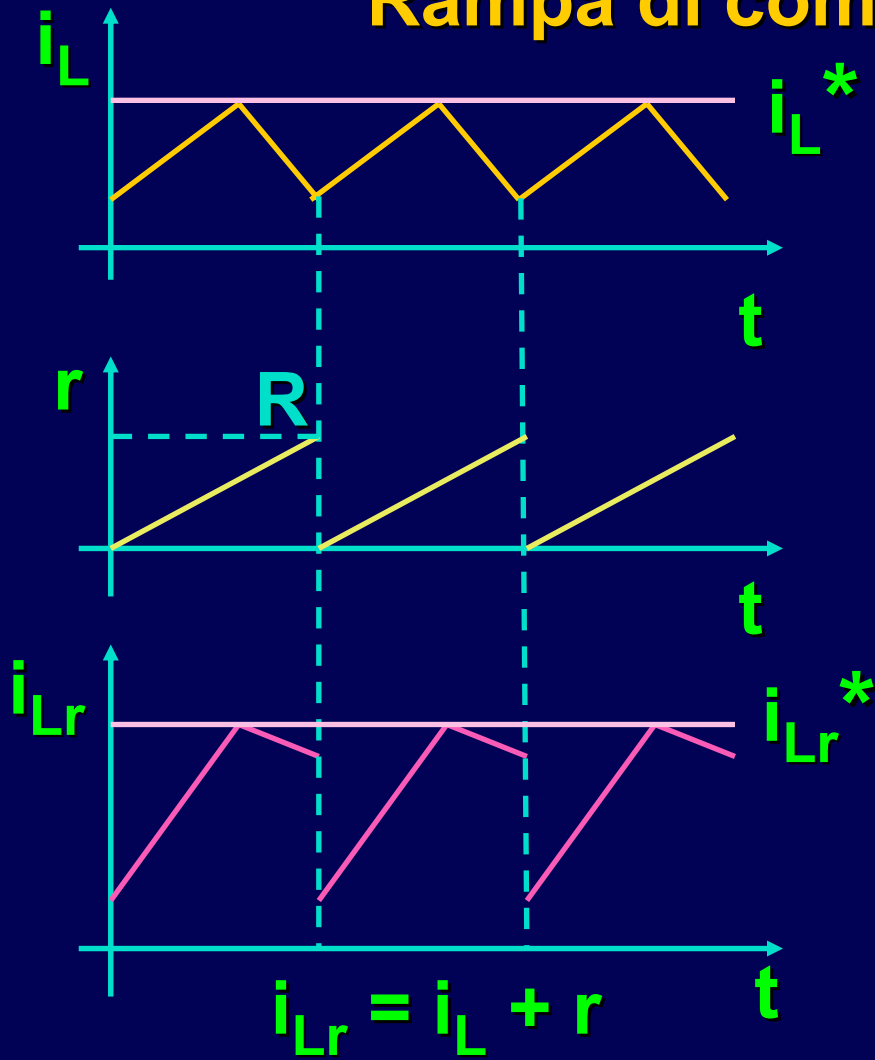


Funzionamento
originario

Rampa di
compensazione

Funzionamento
modificato

Rampa di compensazione



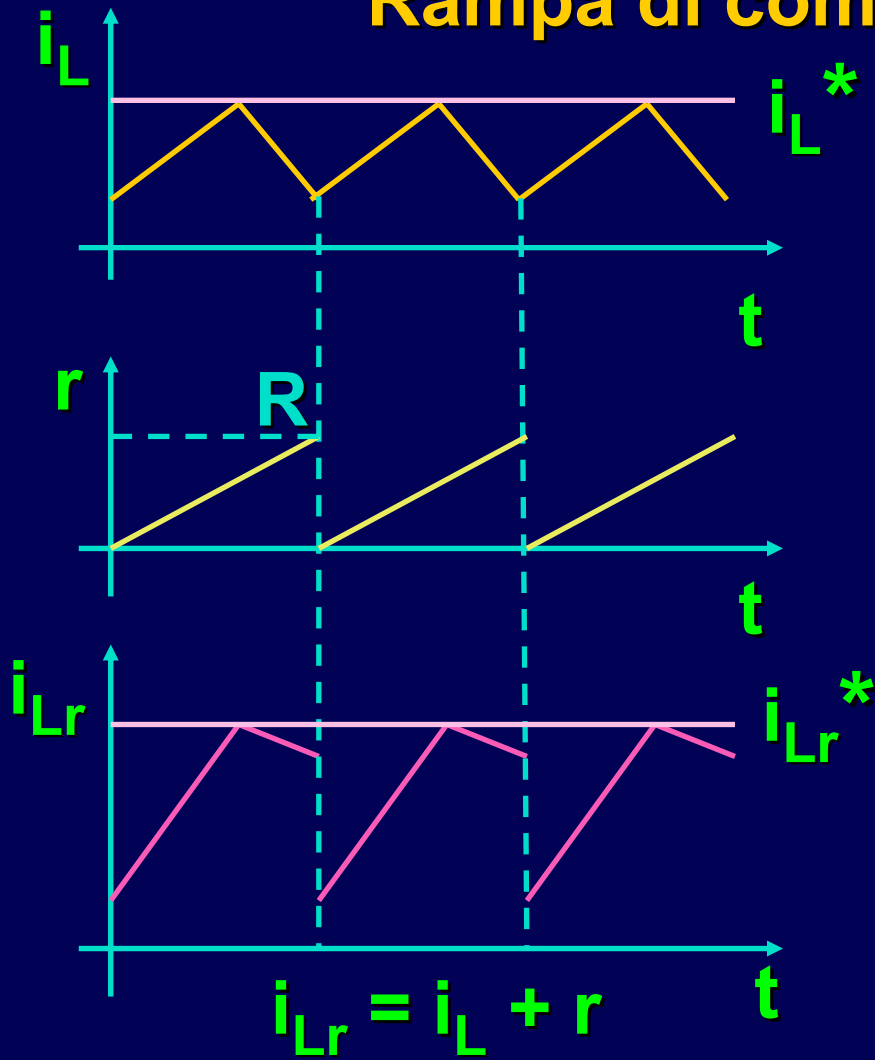
Funzionamento
originario

Nota:

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

Funzionamento
modificato

Rampa di compensazione



Funzionamento
originario

Nota:

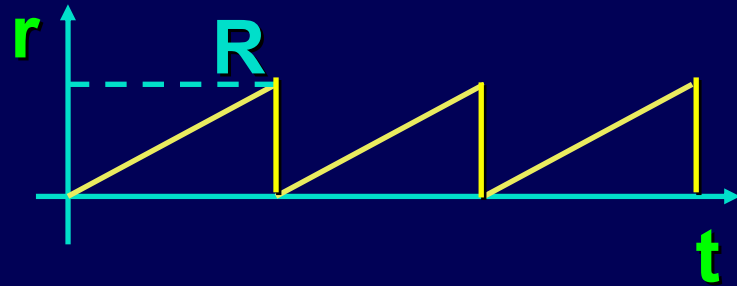
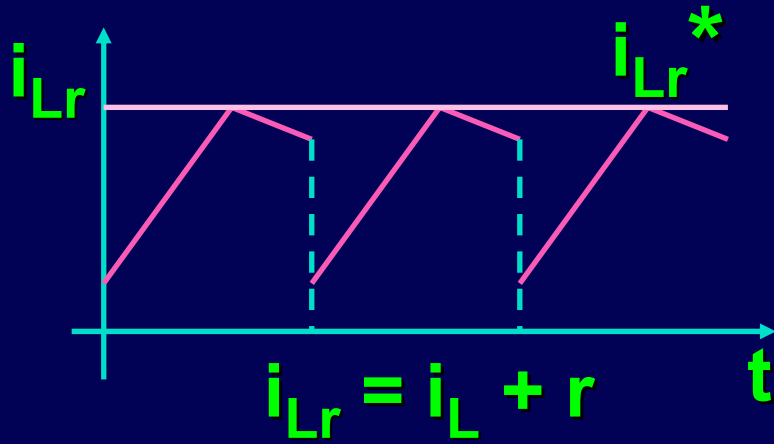
$$i_{Lr}^* \neq i_L^*$$

perché il controllo
di U_o mantiene lo
stesso δ

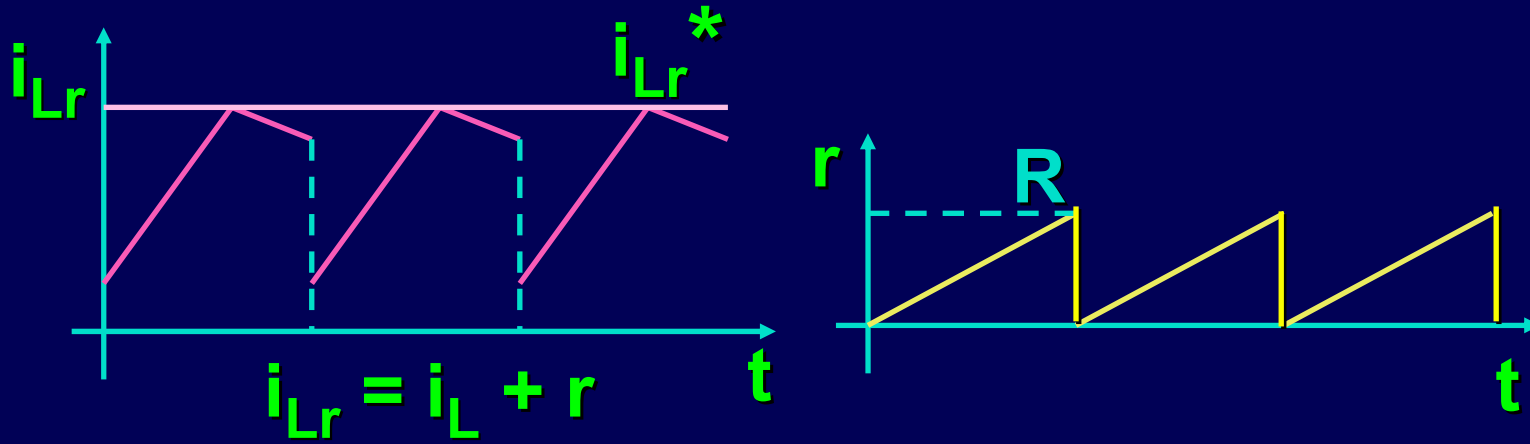
Funzionamento
modificato

Ampiezza della rampa

Ampiezza della rampa



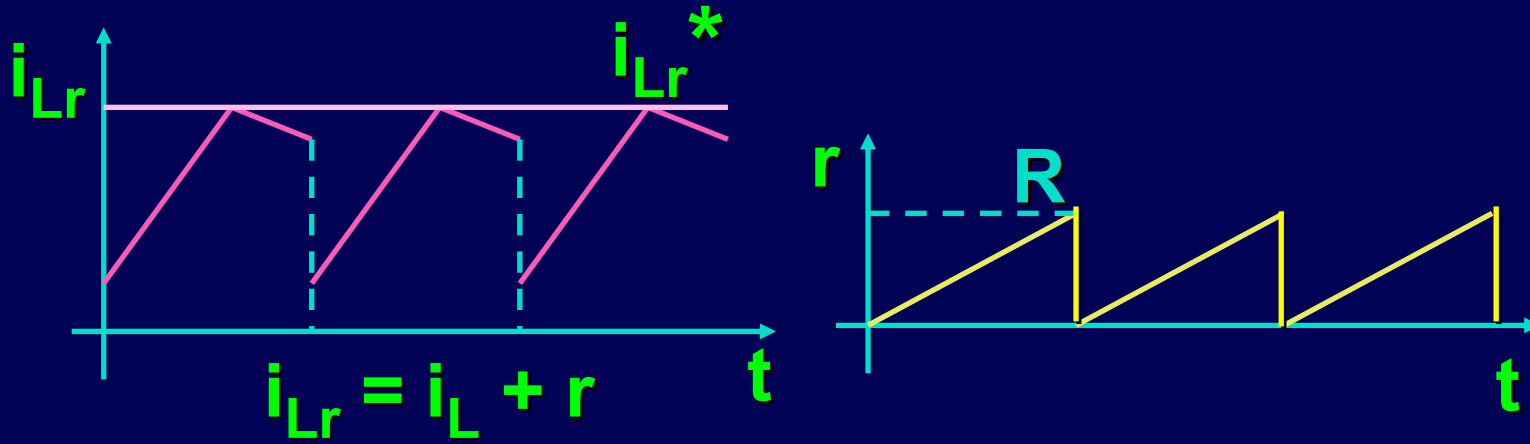
Ampiezza della rampa



Affinché la perturbazione non si propaghi occorre che:

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

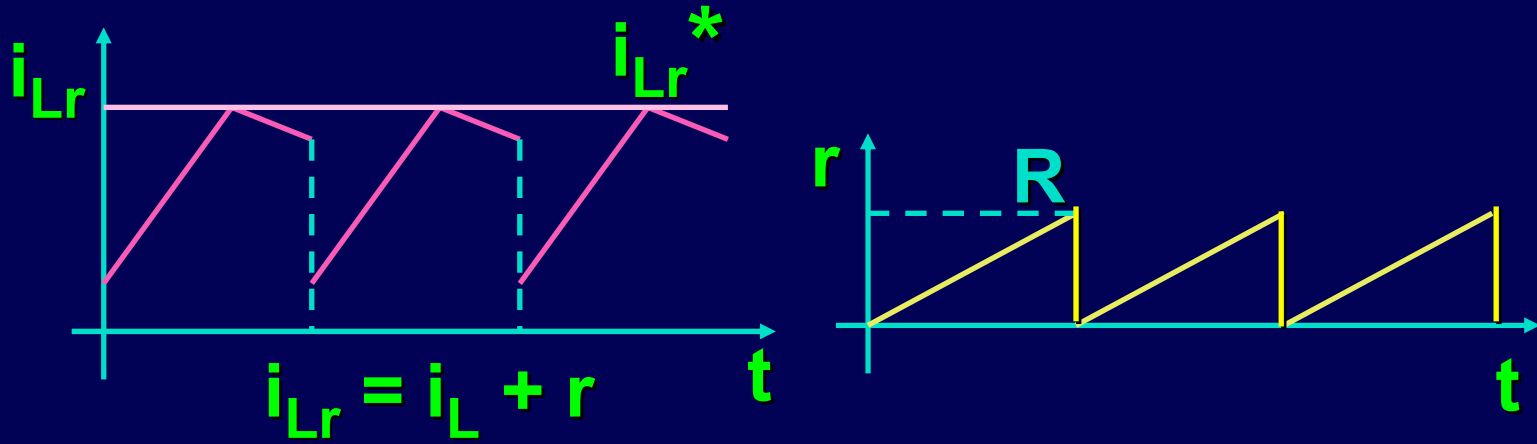
Ampiezza della rampa



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

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

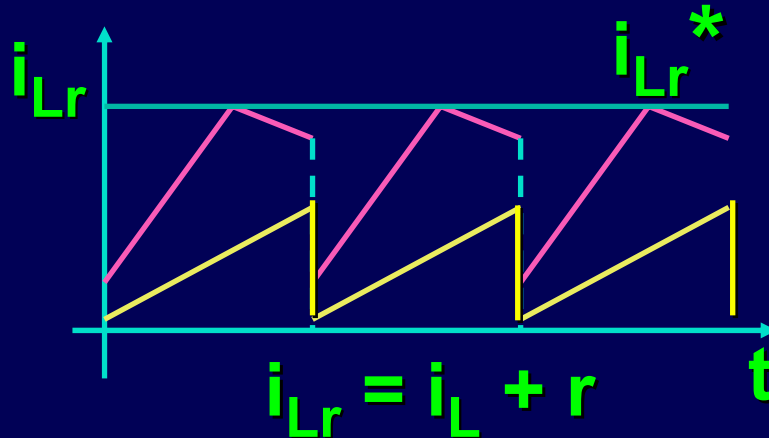
Ampiezza della rampa



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

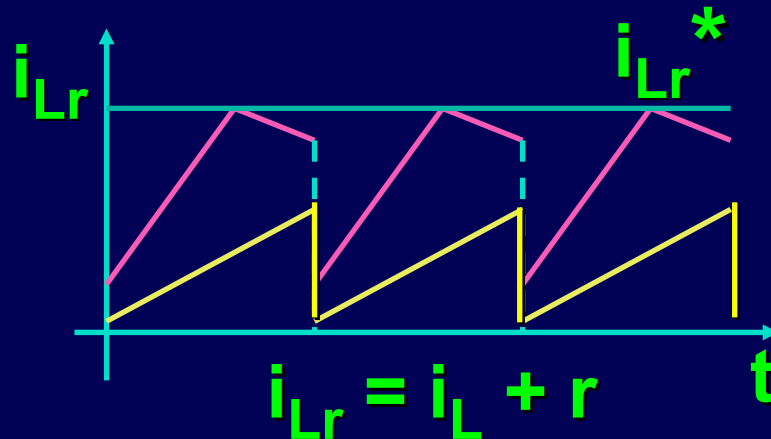
$$R > \frac{U_i}{2 \cdot f_s \cdot L} = 2 \cdot \Delta I_{L \max}$$

Sollecitazioni in corrente



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

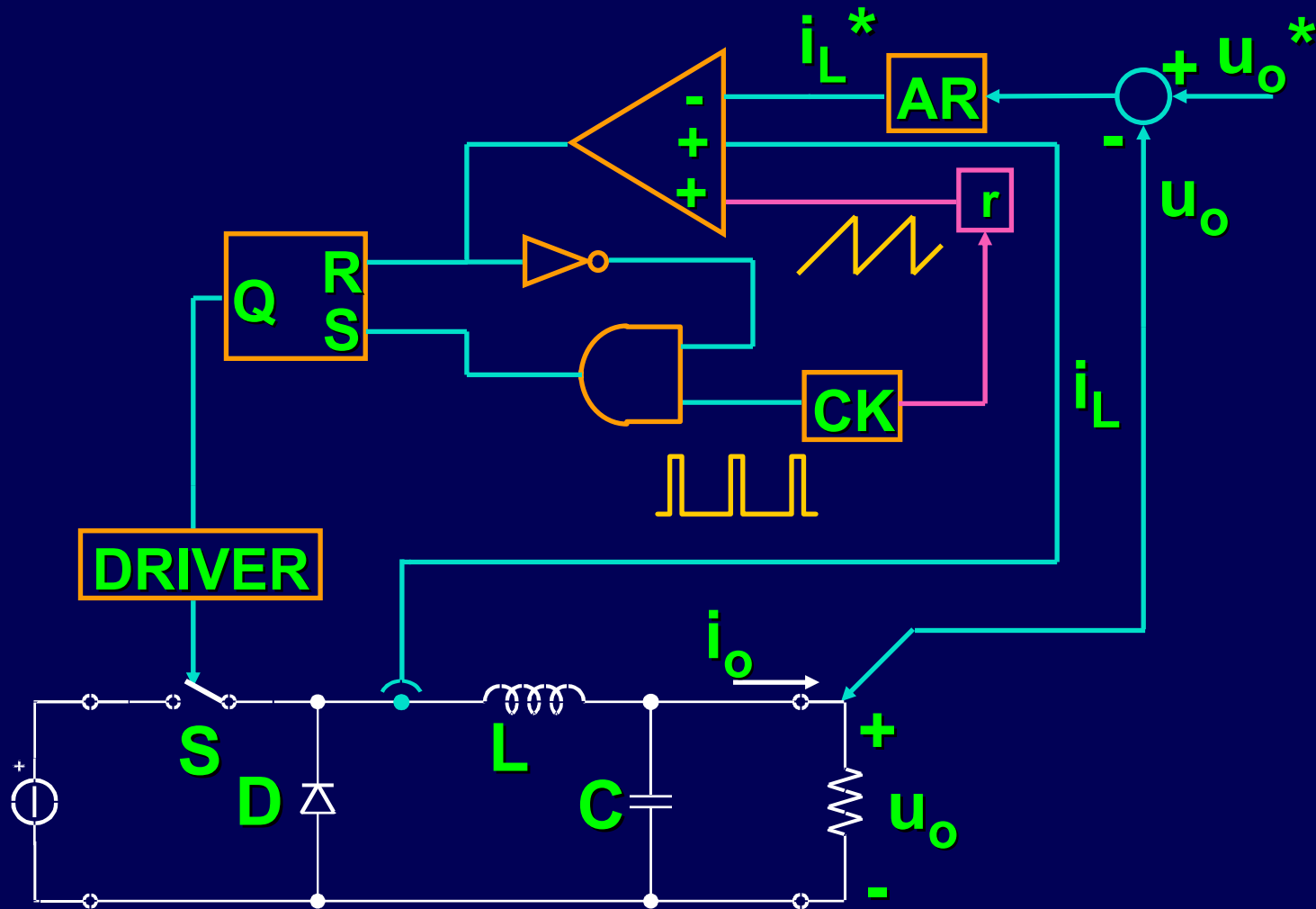
Sollecitazioni in corrente



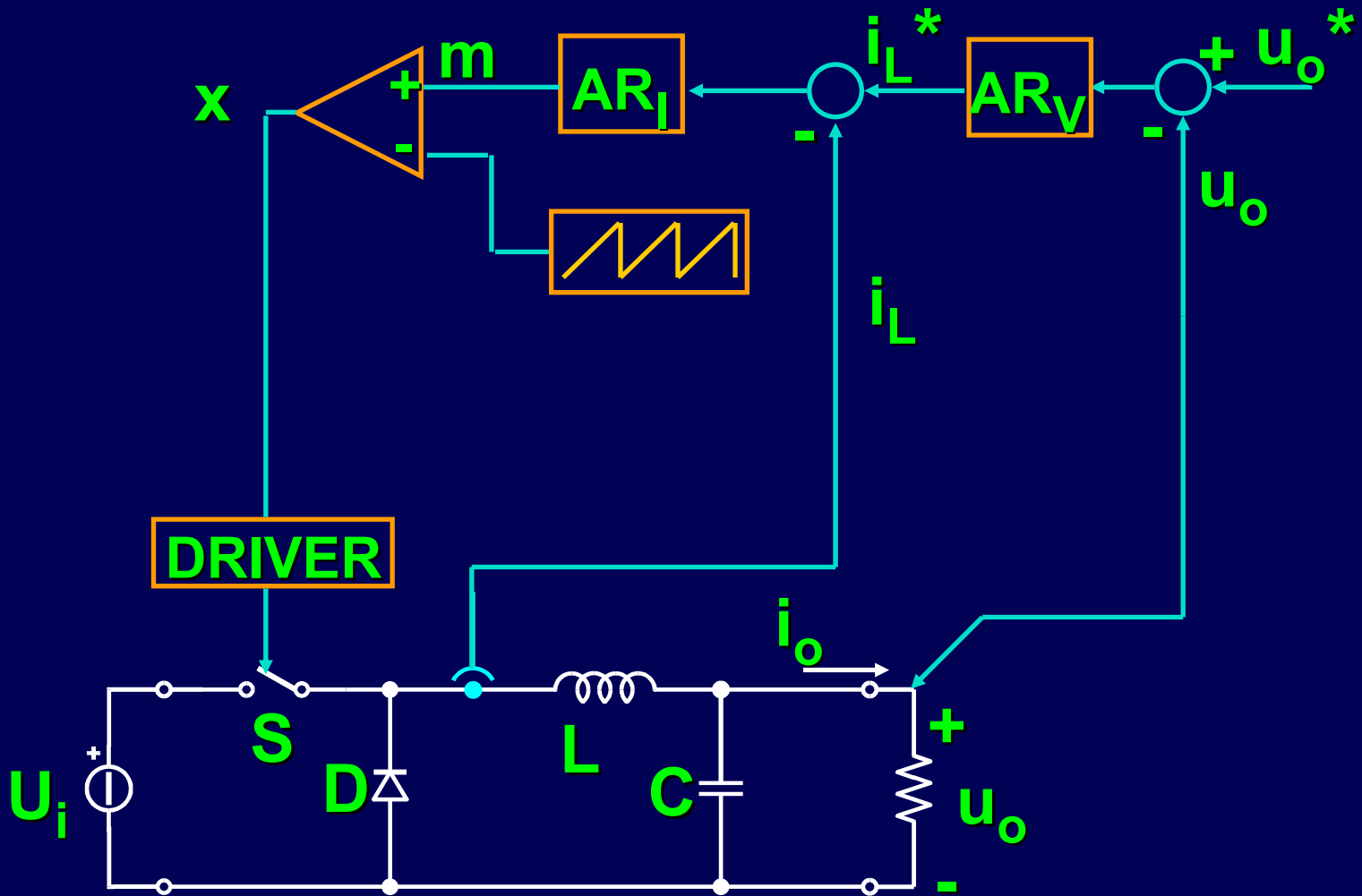
Al riferimento di corrente i_L^* viene dunque aggiunta una rampa di ampiezza $2\Delta i_{Lmax}$

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 piú usate**