

# 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

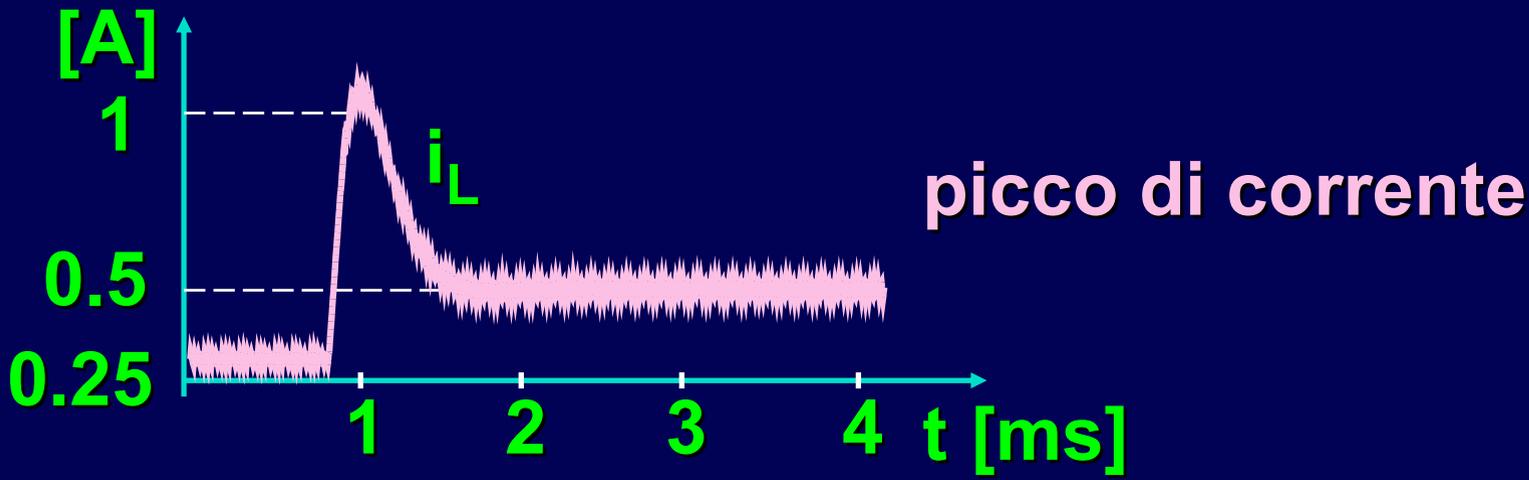
Risposta ad una variazione a gradino del riferimento  $u_o^*$  (regolatore PID)



# Controllo di tensione

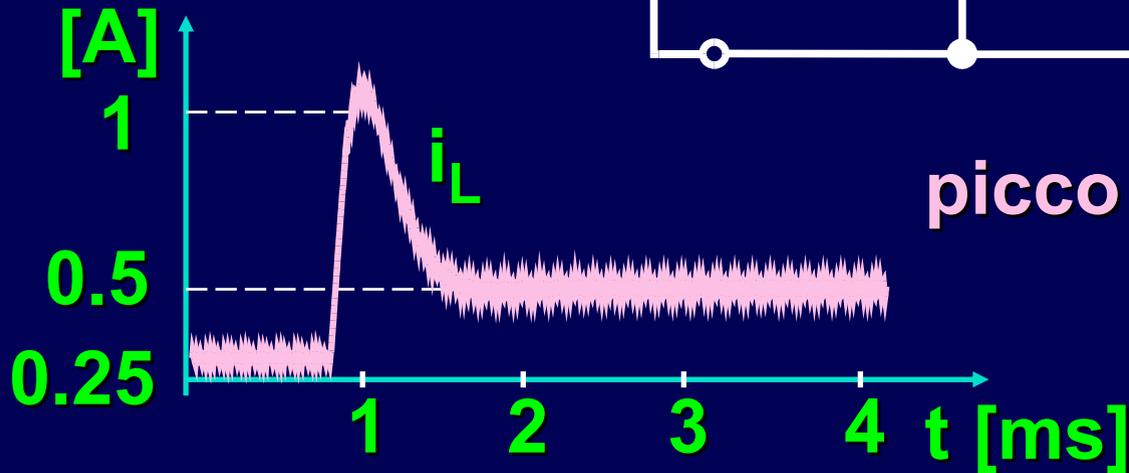
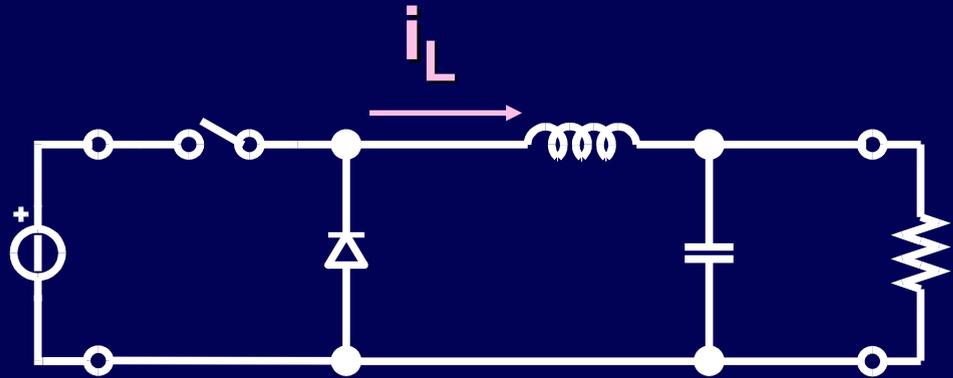
Risposta ad una variazione a gradino del riferimento  $u_o^*$  (regolatore PID)

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

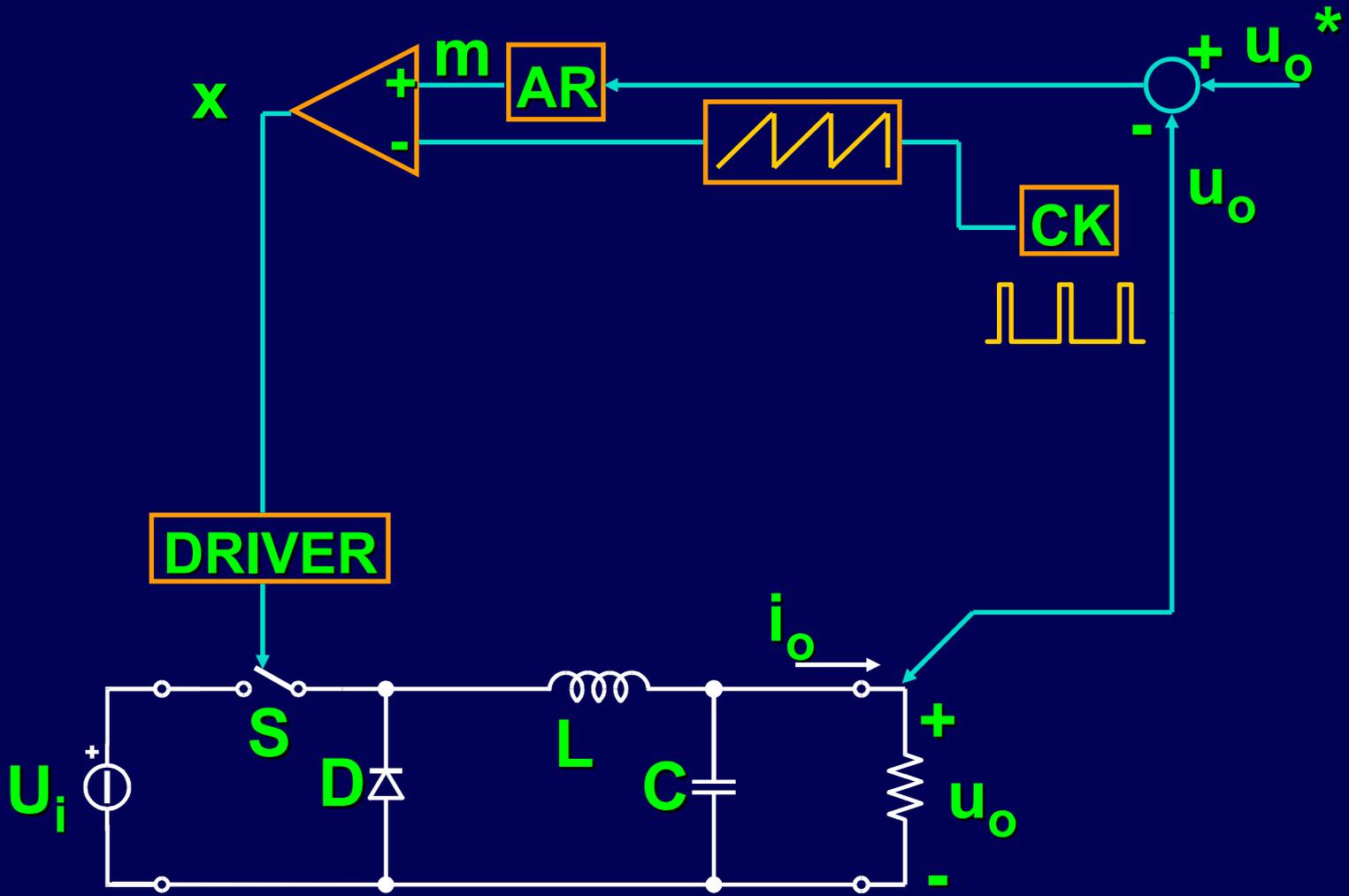


# Limitazione della corrente

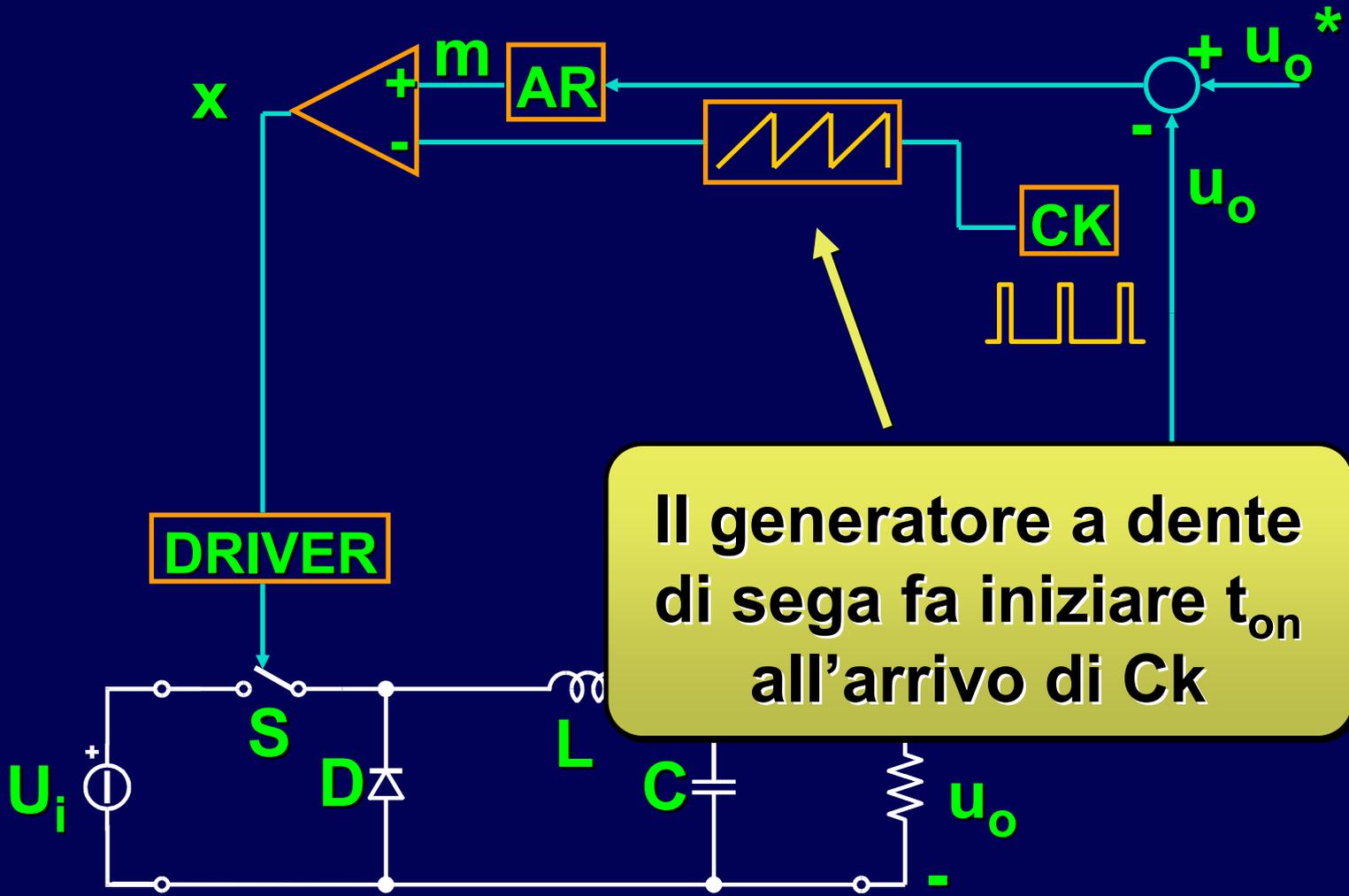
Si puo' usare un limitatore di corrente, che interrompe  $t_{on}$  quando  $i_L$  supera la soglia  $i_L^*$



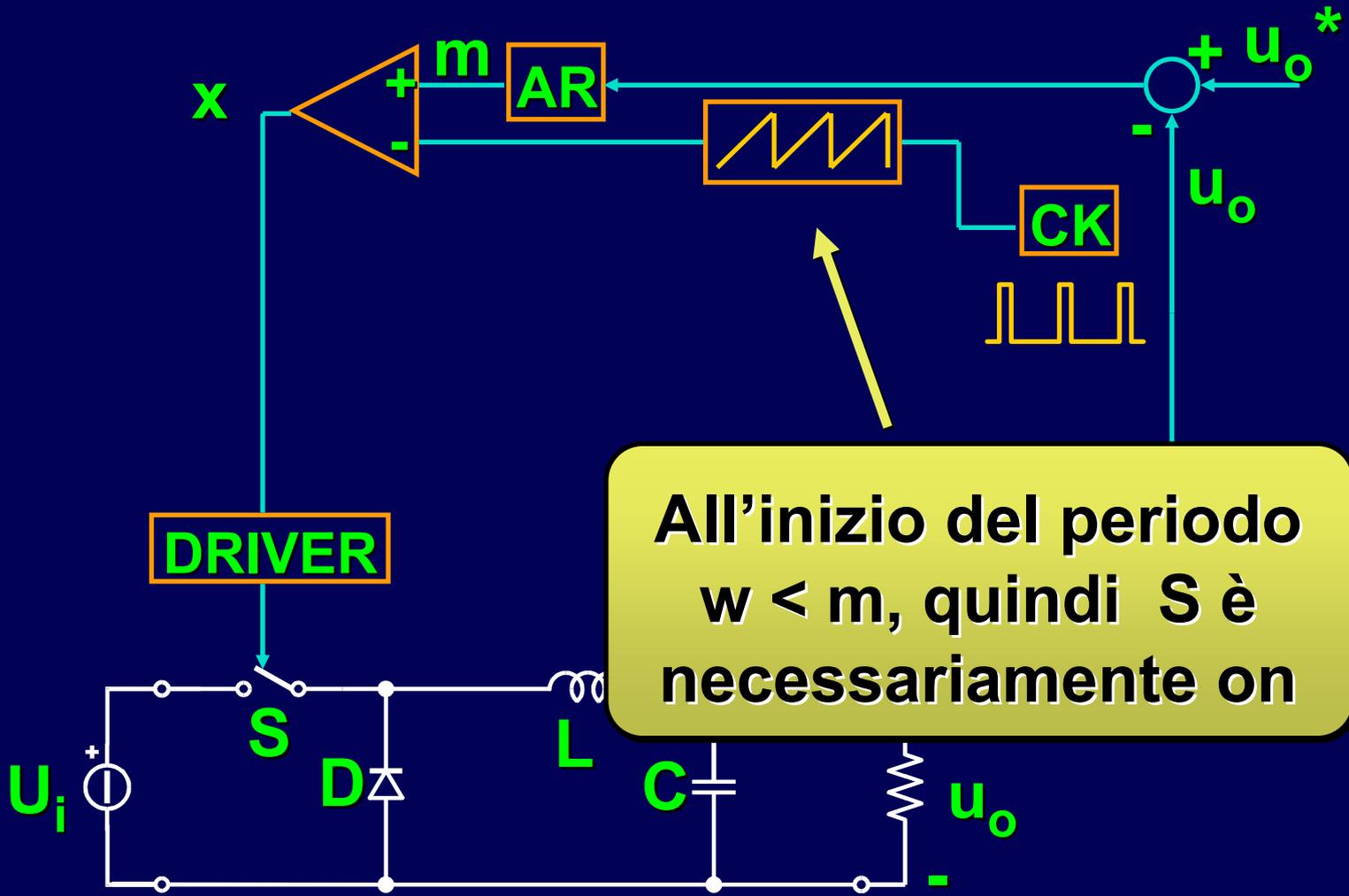
# Controllo di tensione



# Controllo di tensione

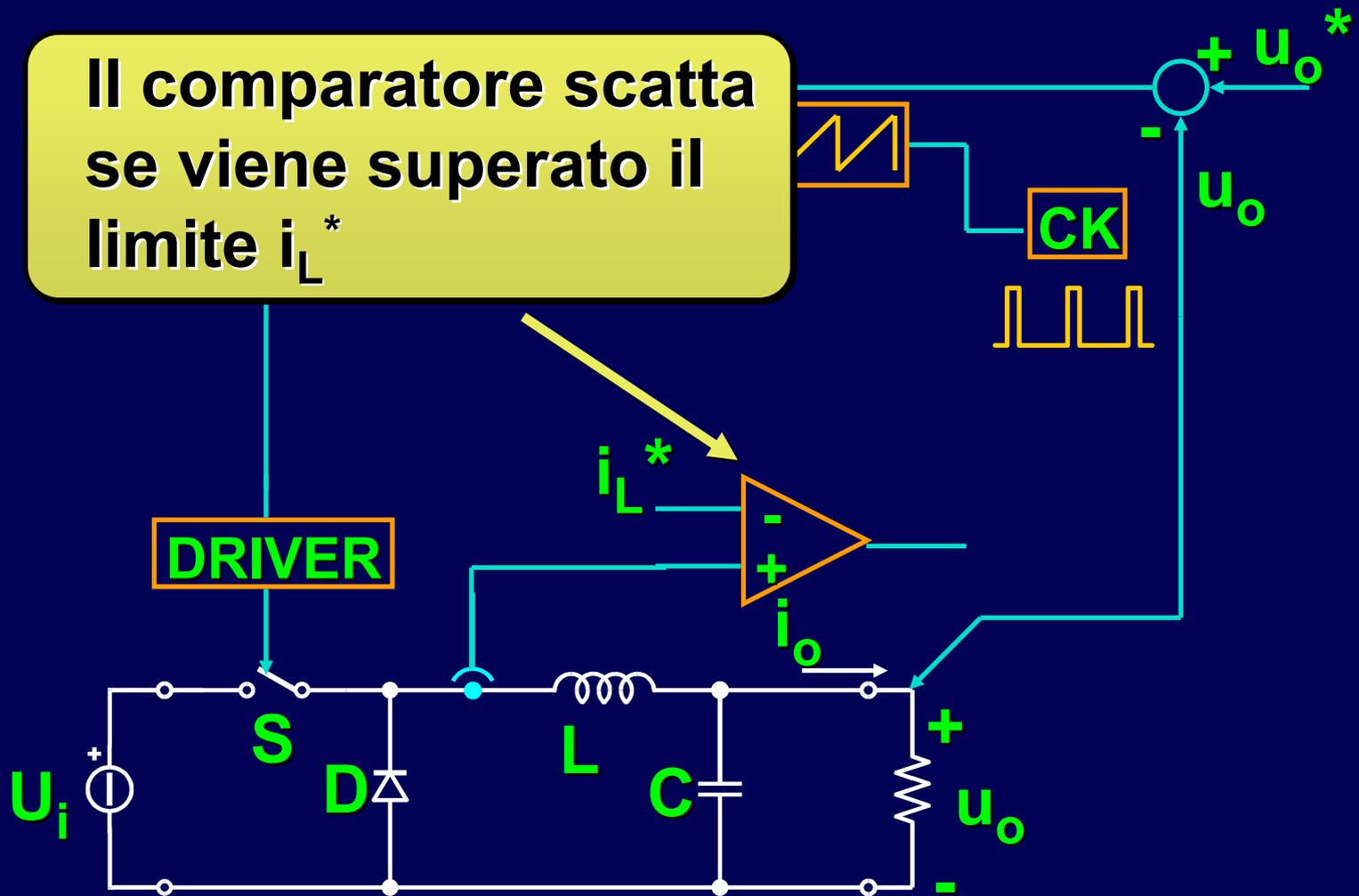


# Controllo di tensione

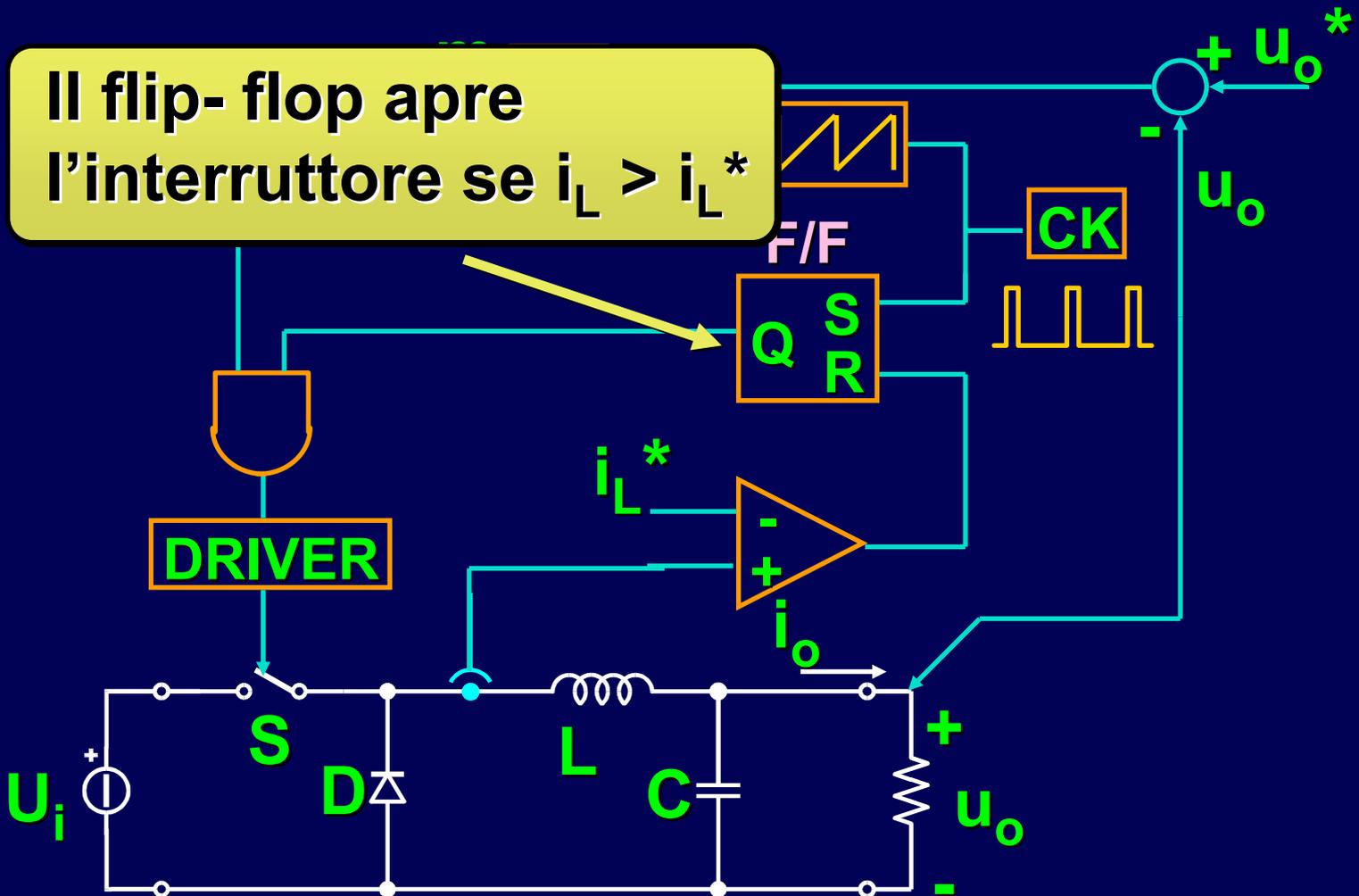


# Controllo di tensione + limitazione di corrente

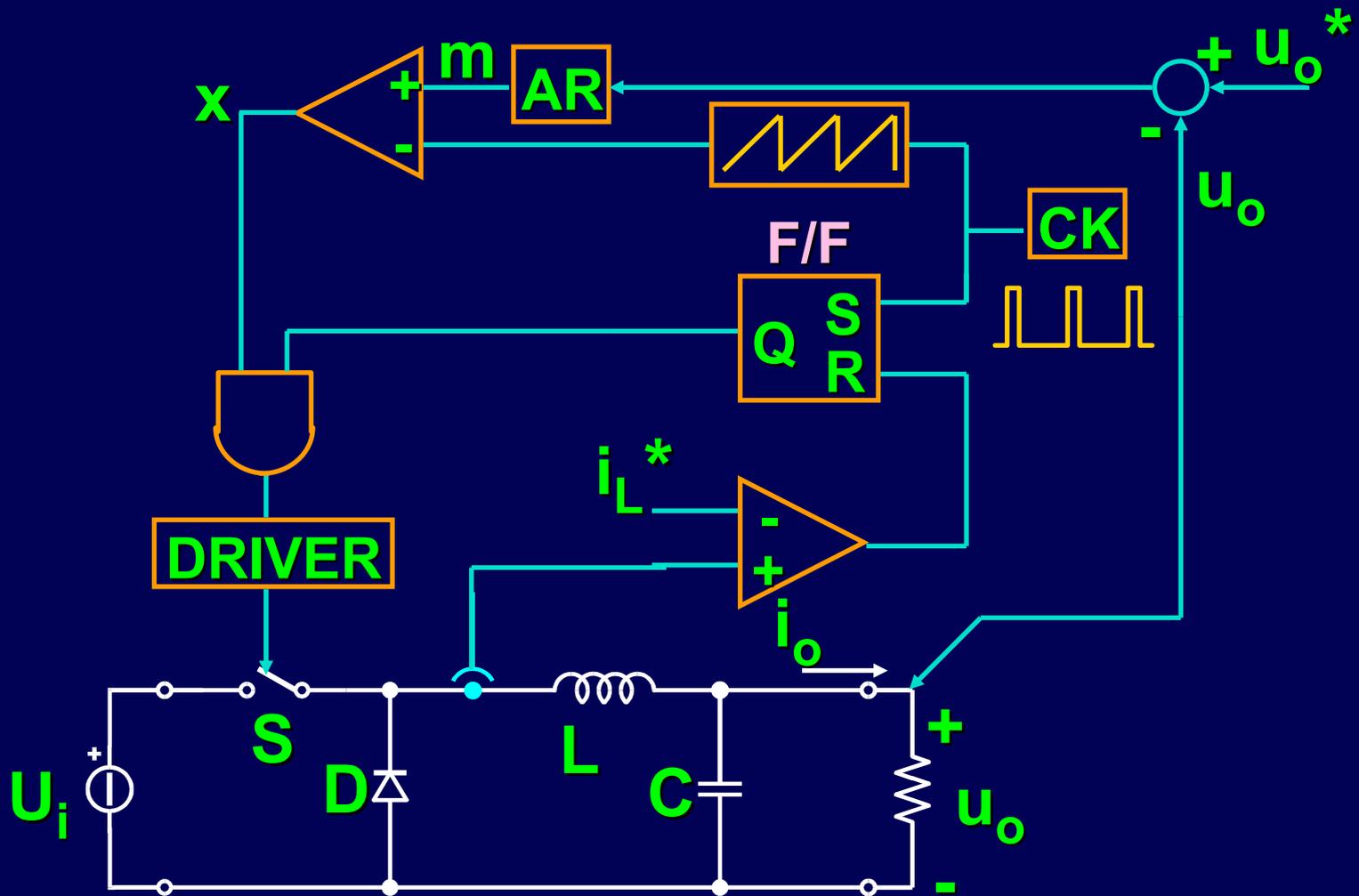
Il comparatore scatta se viene superato il limite  $i_L^*$



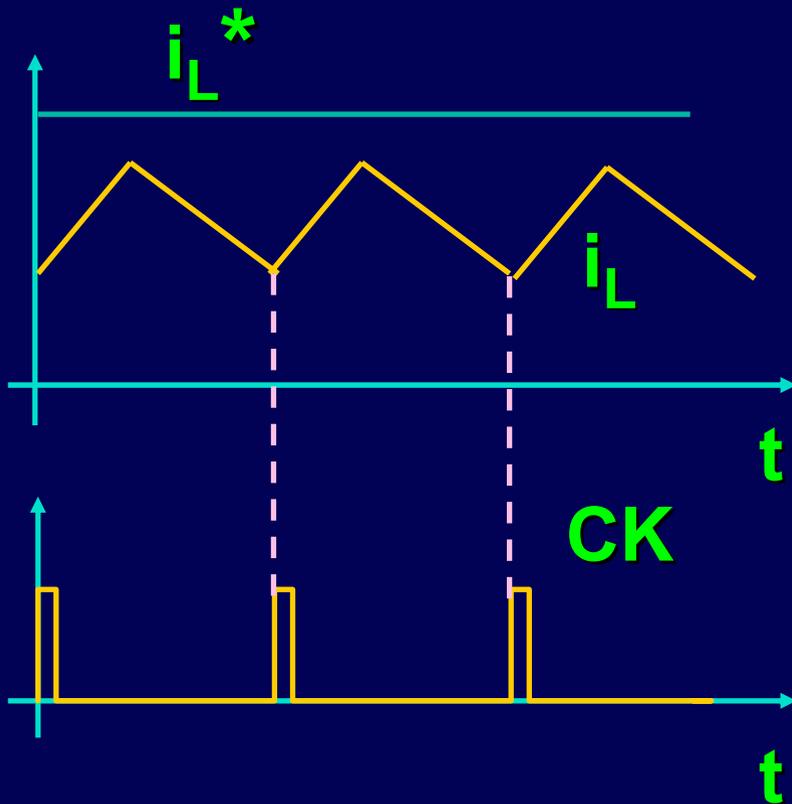
# Controllo di tensione + limitazione di corrente



# Controllo di tensione + limitazione di corrente



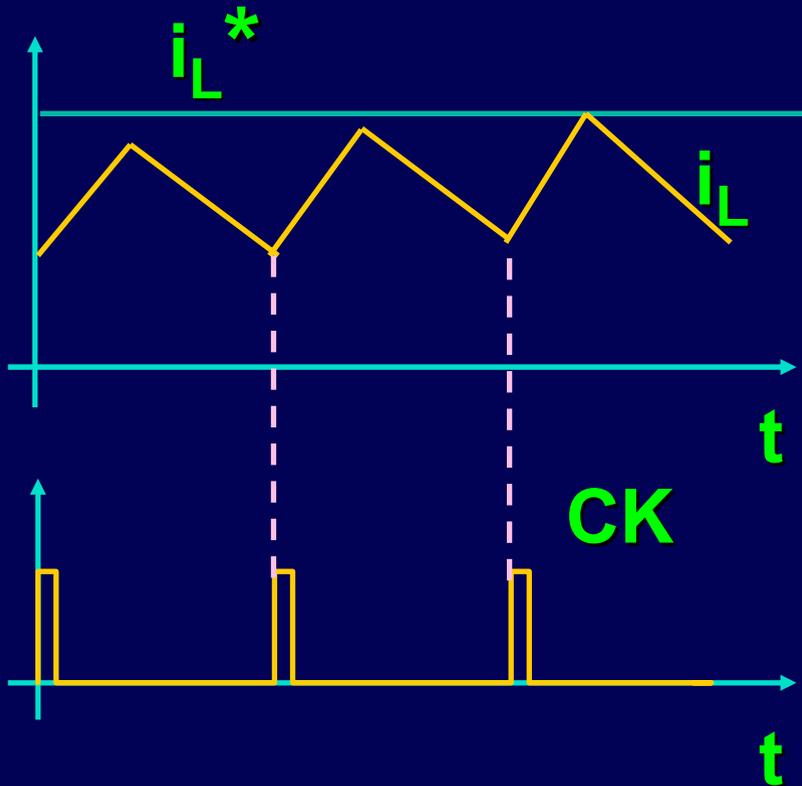
# Funzionamento del limitatore di corrente



**Funzionamento normale:**

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

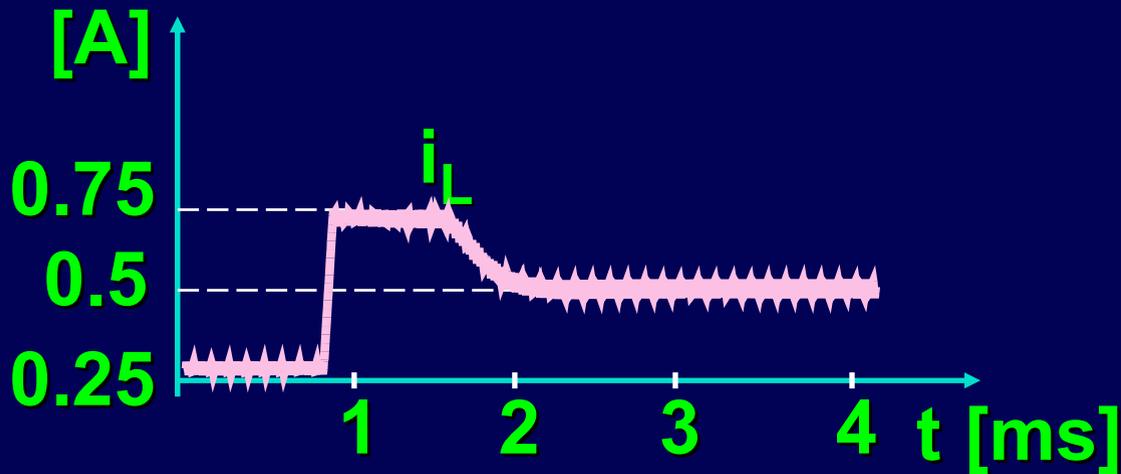
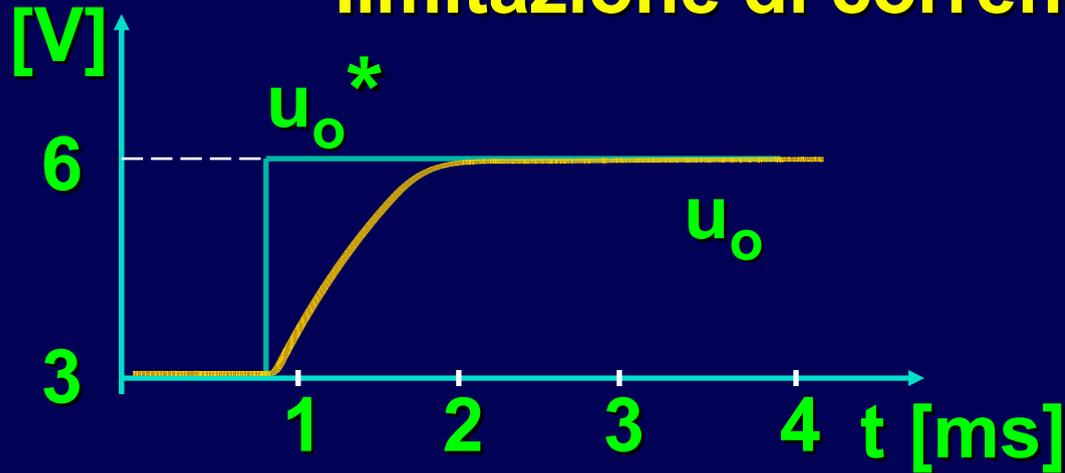
# Funzionamento del limitatore di corrente



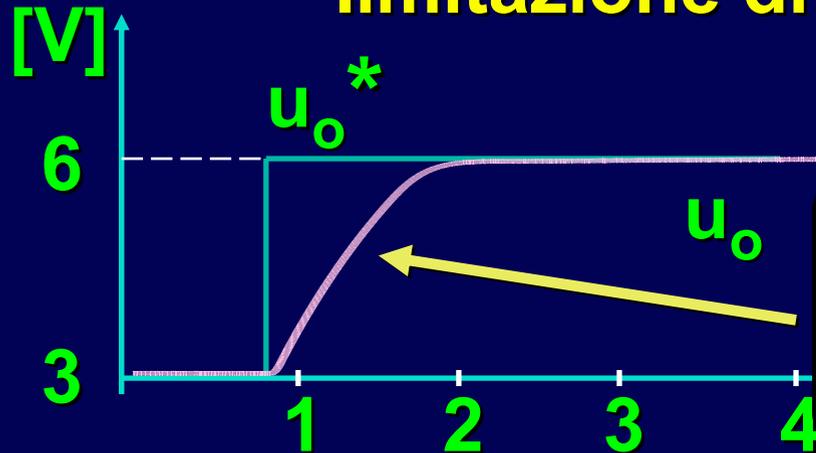
**Limitazione di corrente:**

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

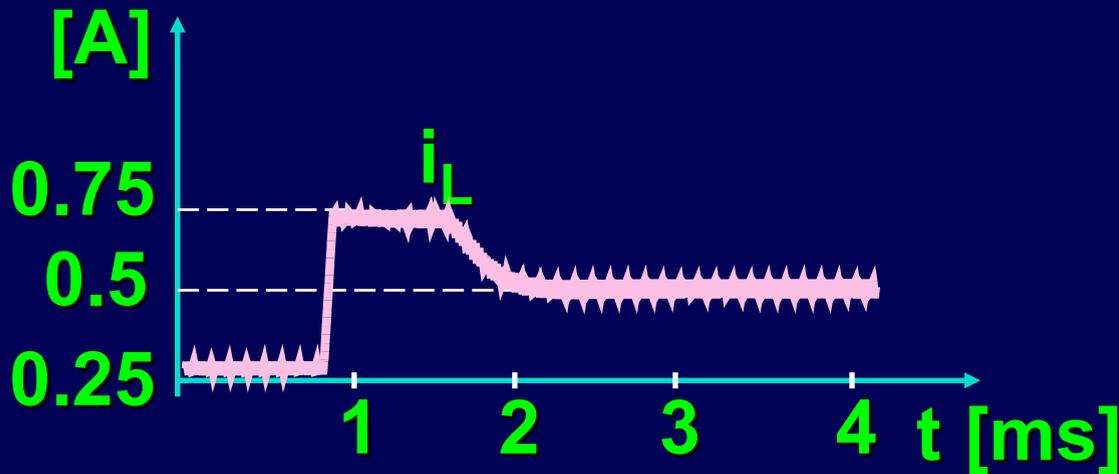
# Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



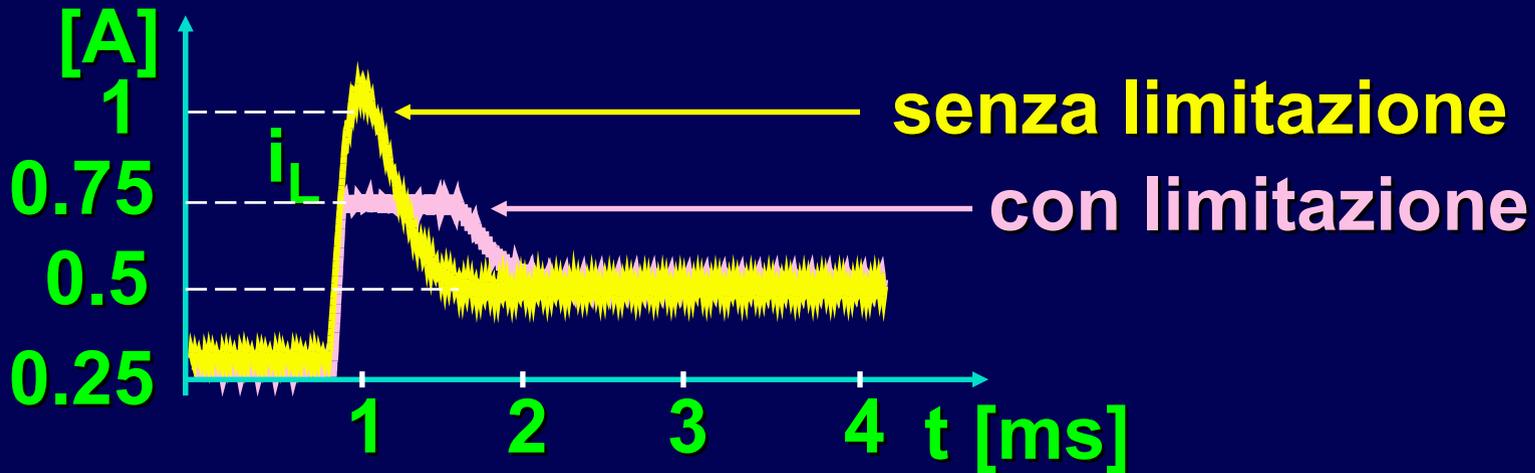
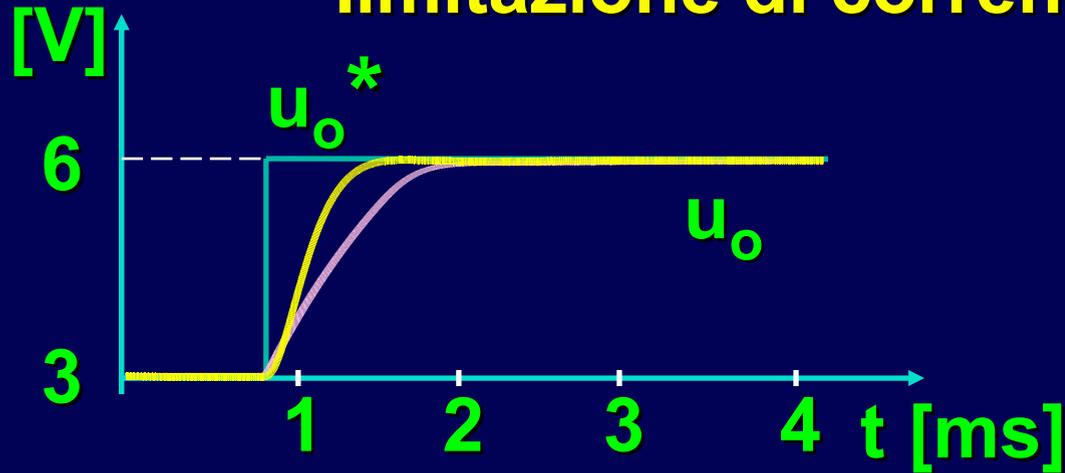
# Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



La limitazione di corrente **rallenta** la dinamica



# Dinamica del controllo di tensione con limitazione di corrente



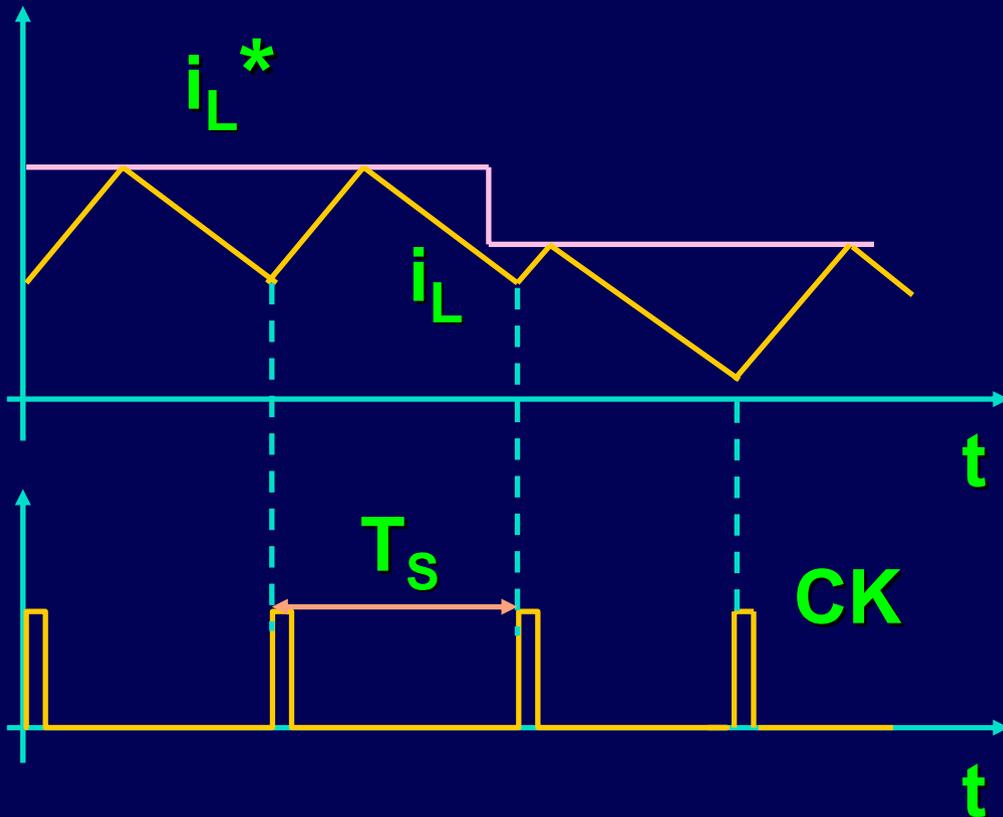
# NOTA

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

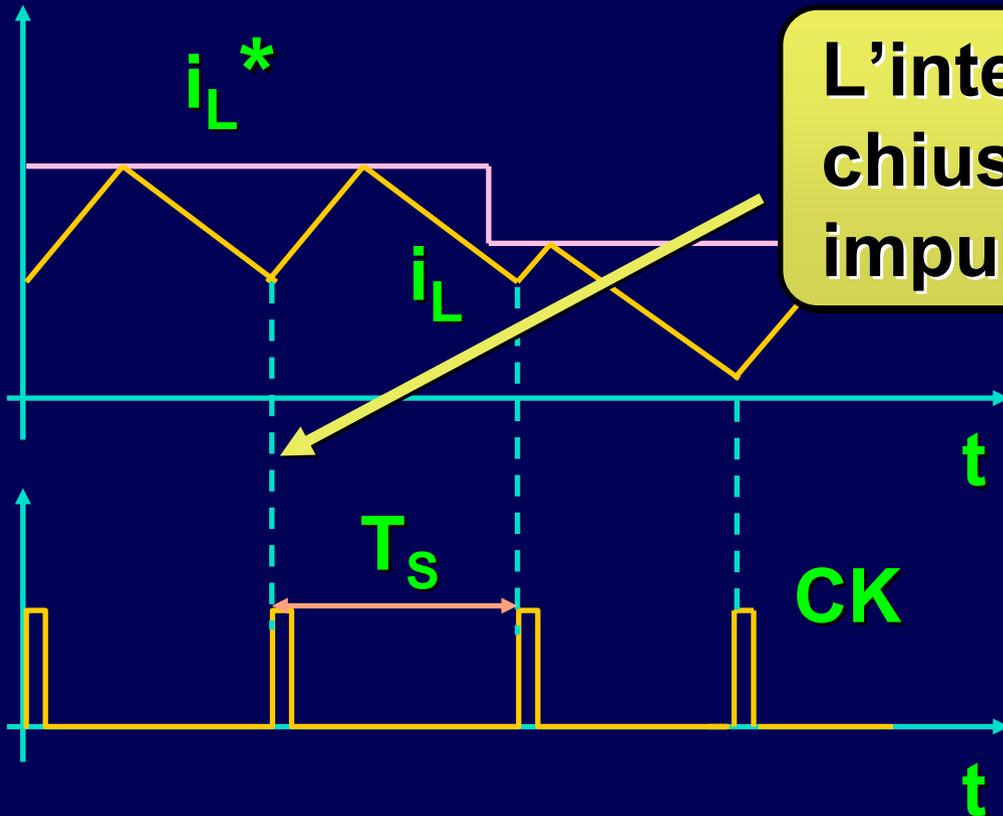
# Controllo di corrente di picco

## Principio di funzionamento



# Controllo di corrente di picco

## Principio di funzionamento

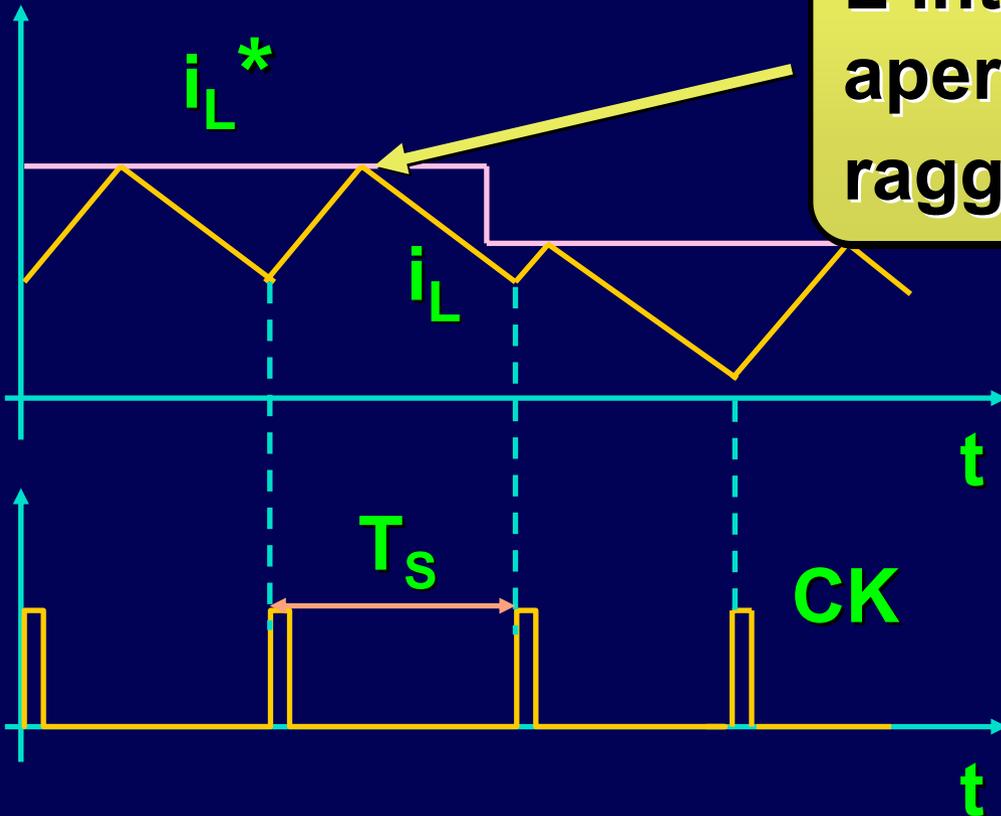


L'interruttore viene chiuso ad ogni impulso di clock

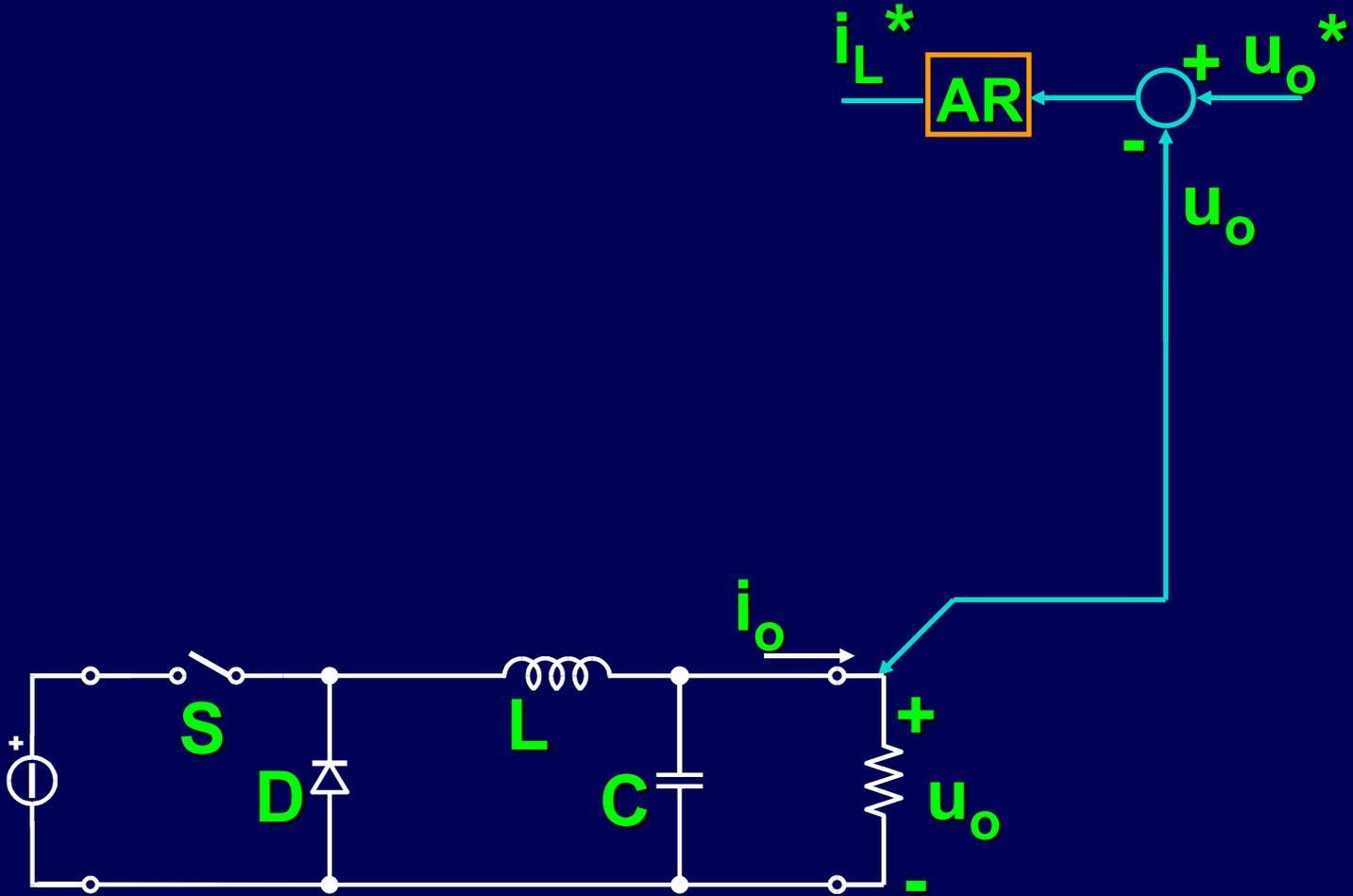
# Controllo di corrente di picco

## Principio di funzionamento

L'interruttore viene aperto quando  $i_L$  raggiunge  $i_L^*$



# Controllo di corrente di picco (versione base)

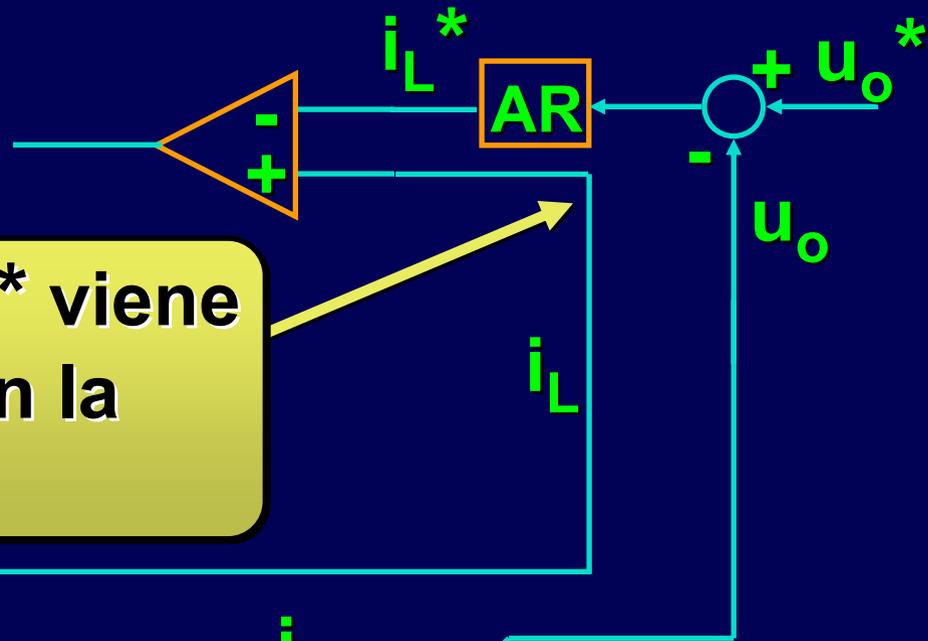


# Controllo di corrente di picco (versione base)

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



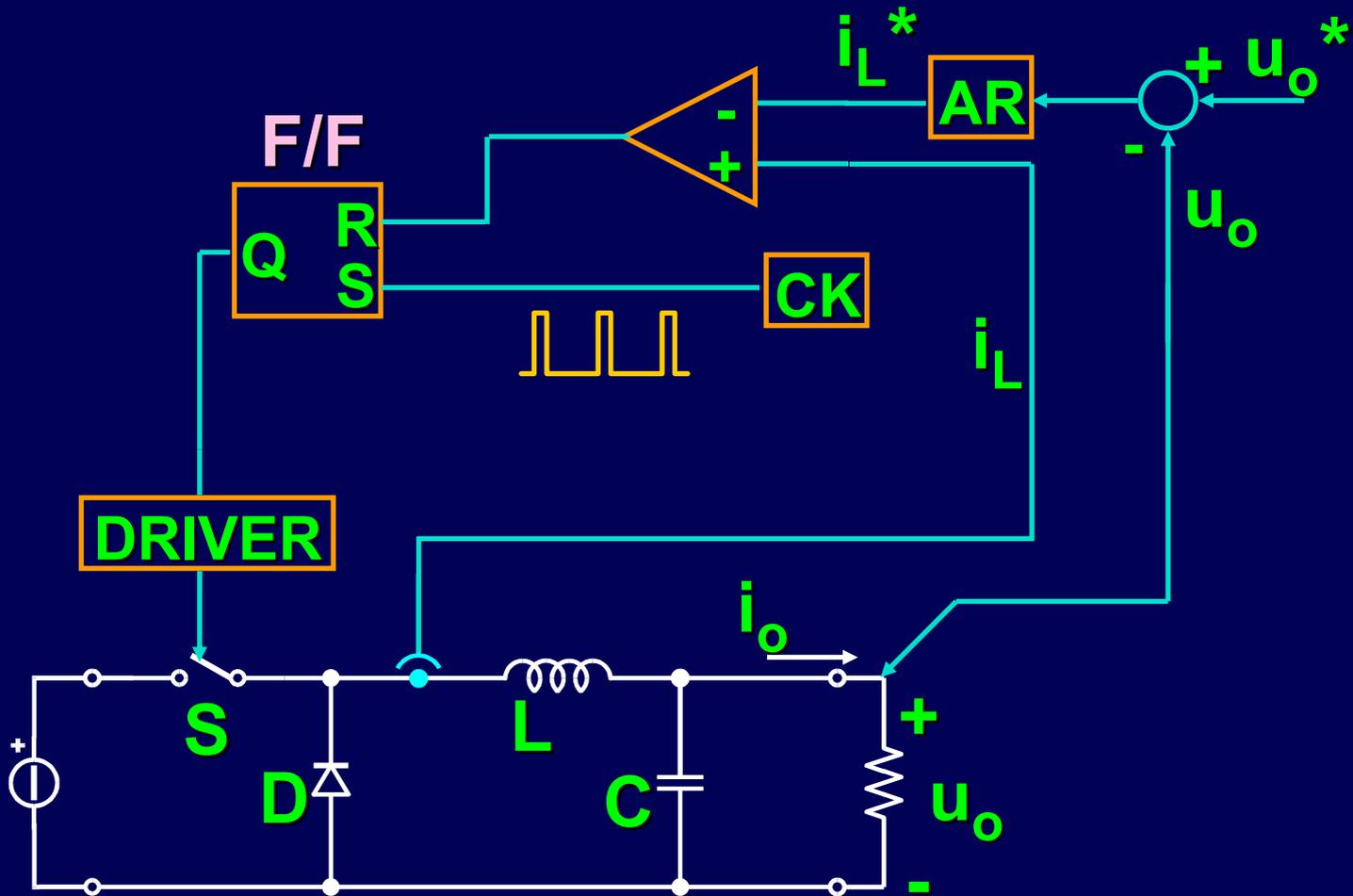
# Controllo di corrente di picco (versione base)



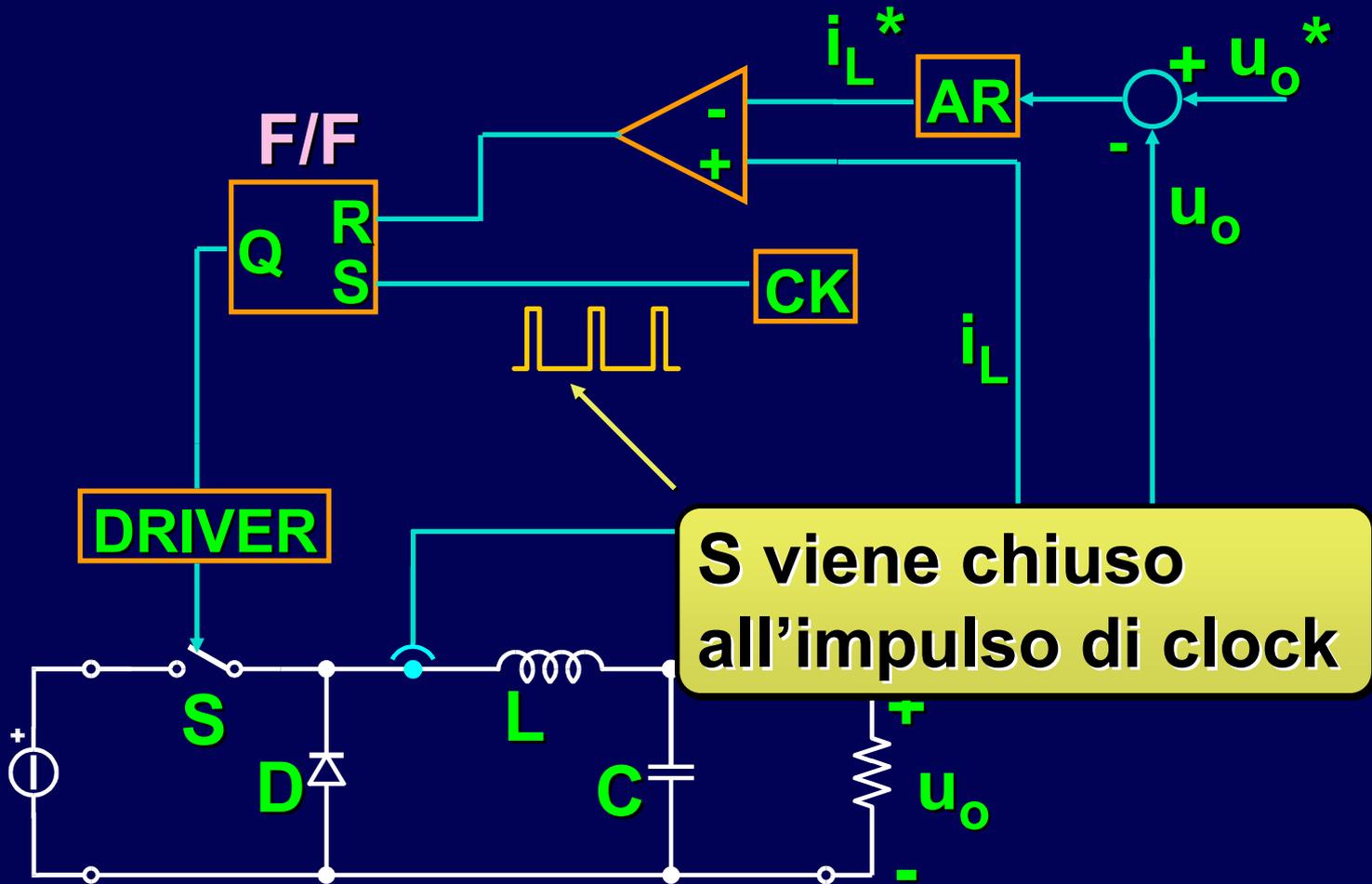
Il riferimento  $i_L^*$  viene confrontato con la corrente  $i_L$



# Controllo di corrente di picco (versione base)

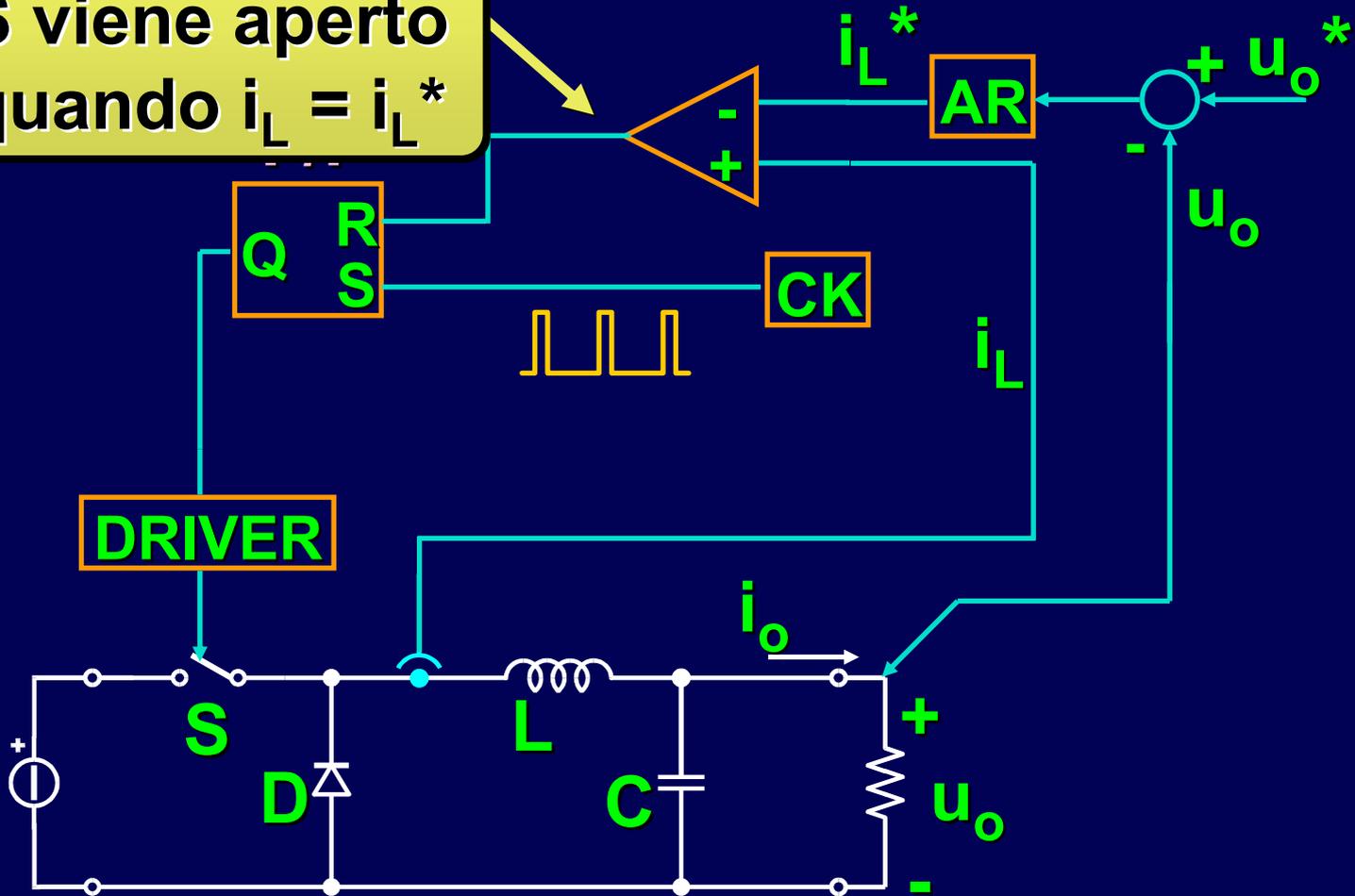


# Controllo di corrente di picco (versione base)

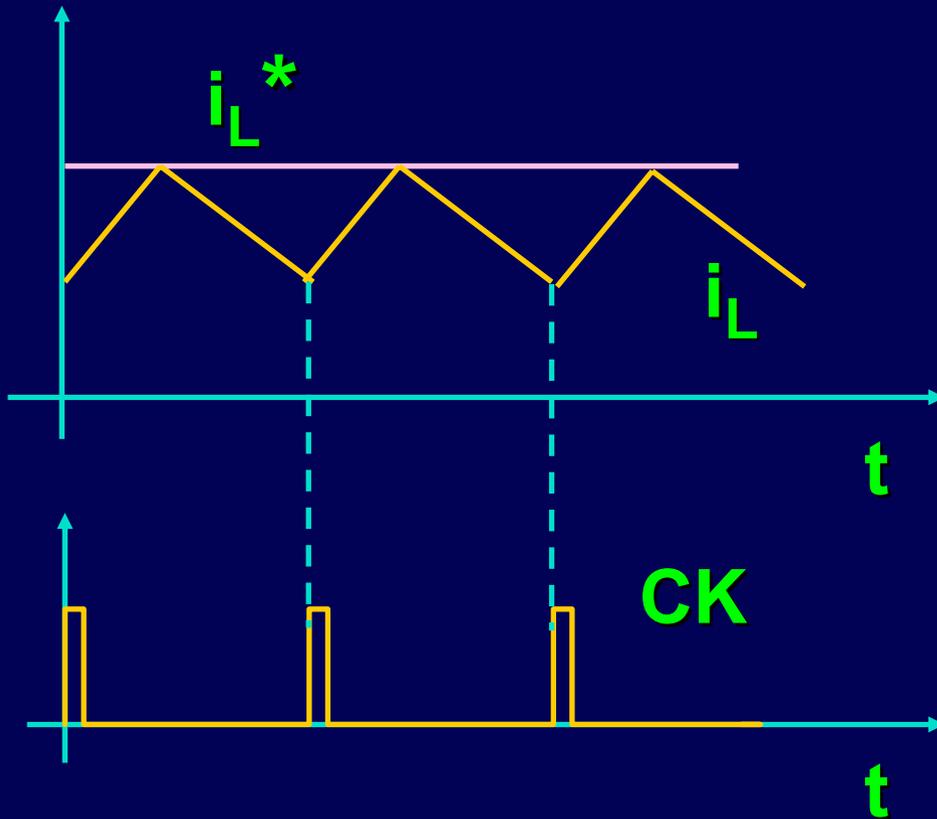


# Controllo di corrente di picco (versione base)

S viene aperto  
quando  $i_L = i_L^*$

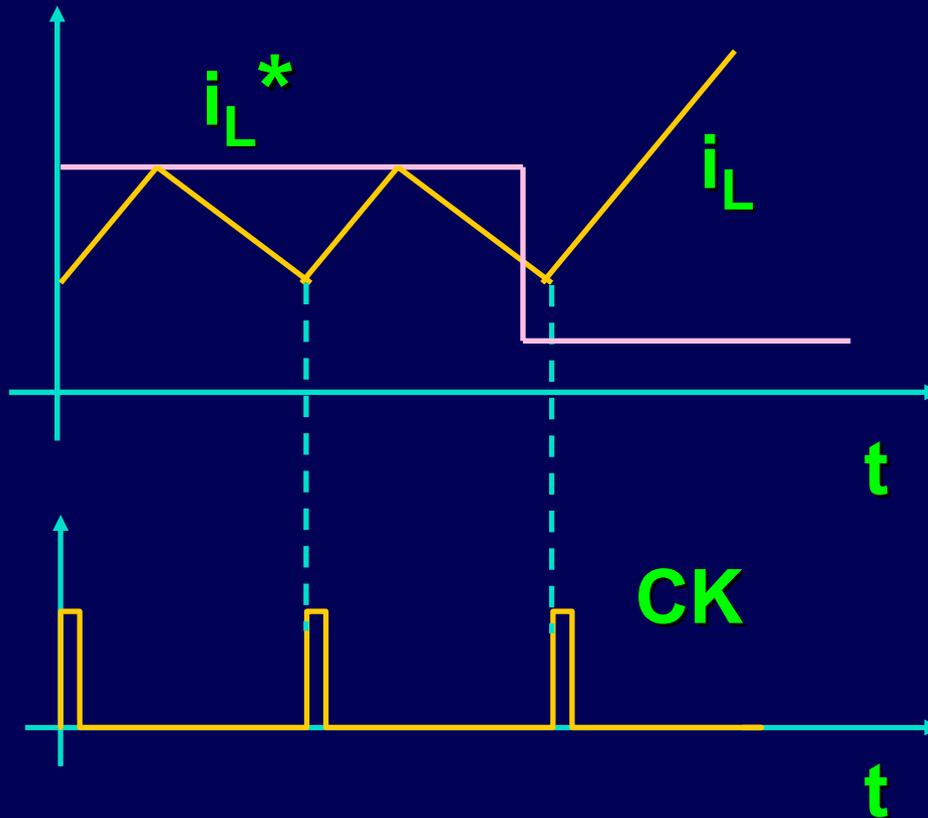


# Funzionamento del controllo di corrente di picco



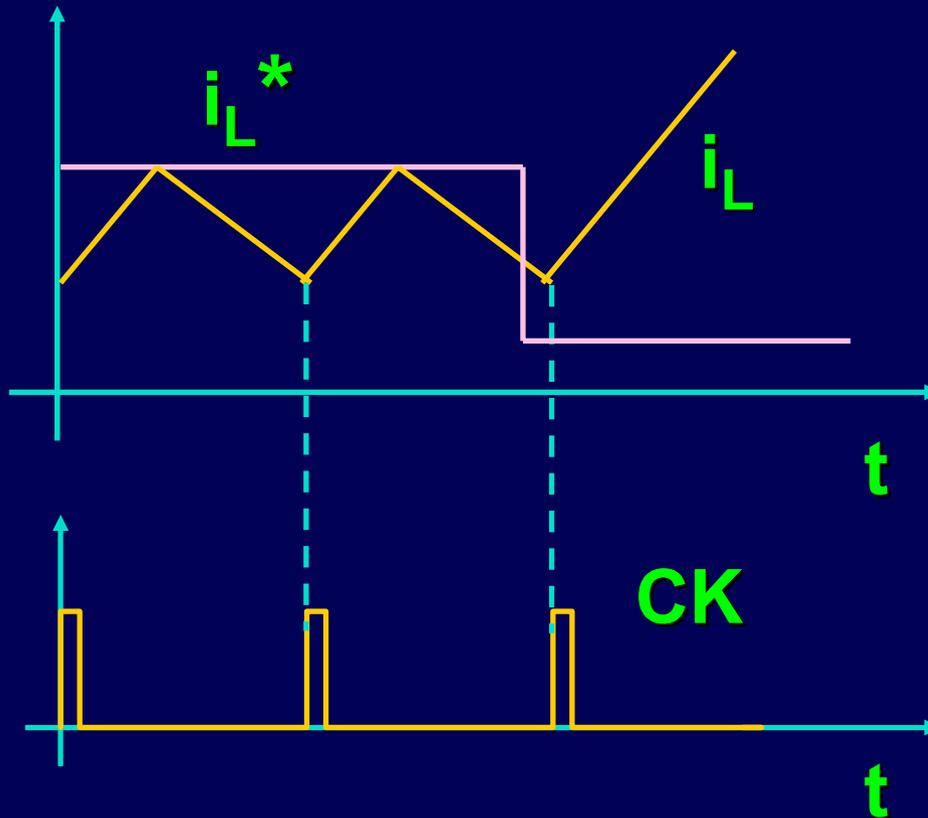
Nota:  
E' sufficiente misurare la corrente  $I_S$  nell'interruttore ( $V_{Son}$  nel caso dei Mosfet)

## Funzionamento del controllo di corrente di picco



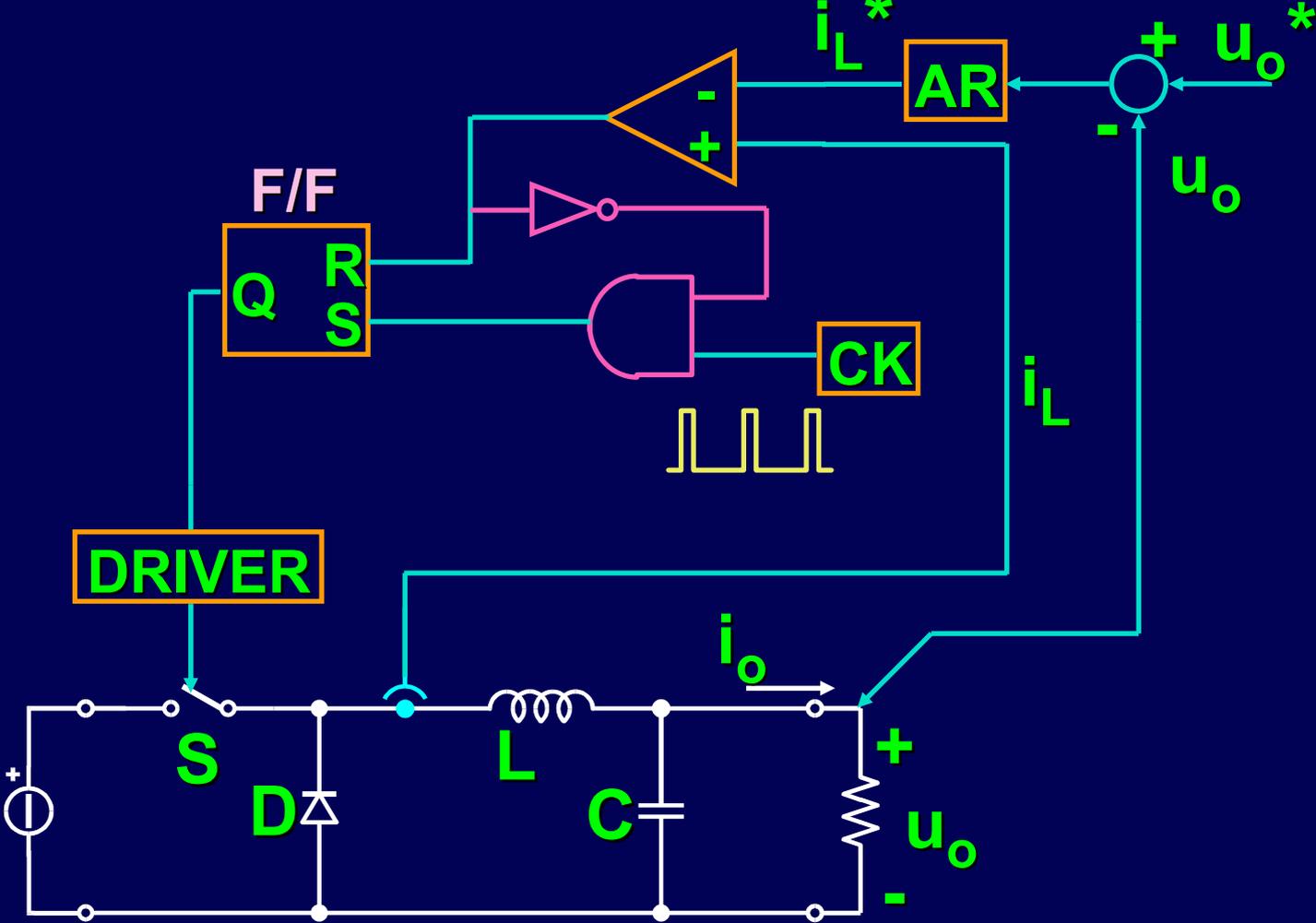
In presenza di una brusca variazione del riferimento di corrente può verificarsi una **perdita di controllo**

## Funzionamento del controllo di corrente di picco

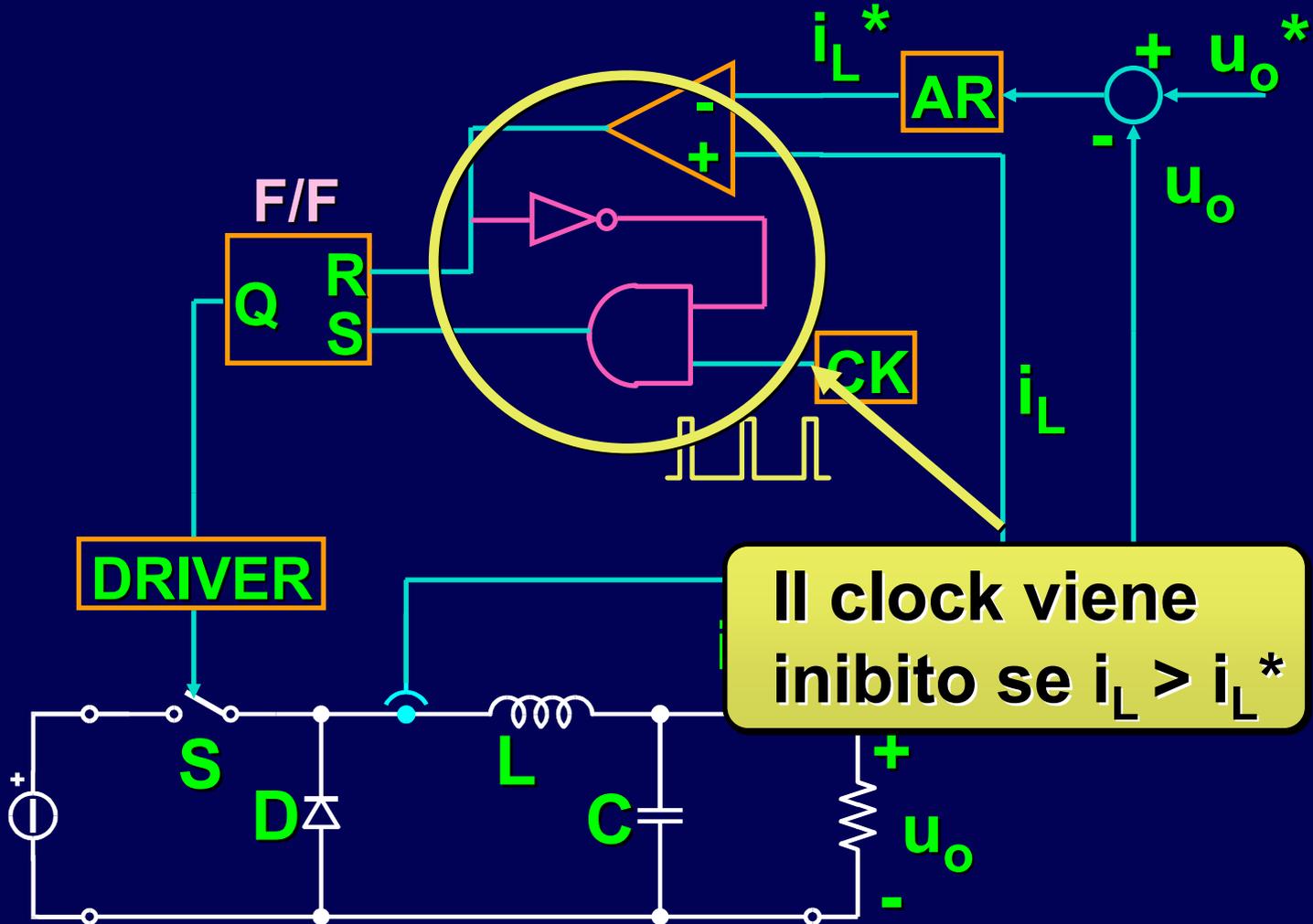


Per evitare di perdere il controllo si chiude l'interruttore solo se  $i_L < i_L^*$

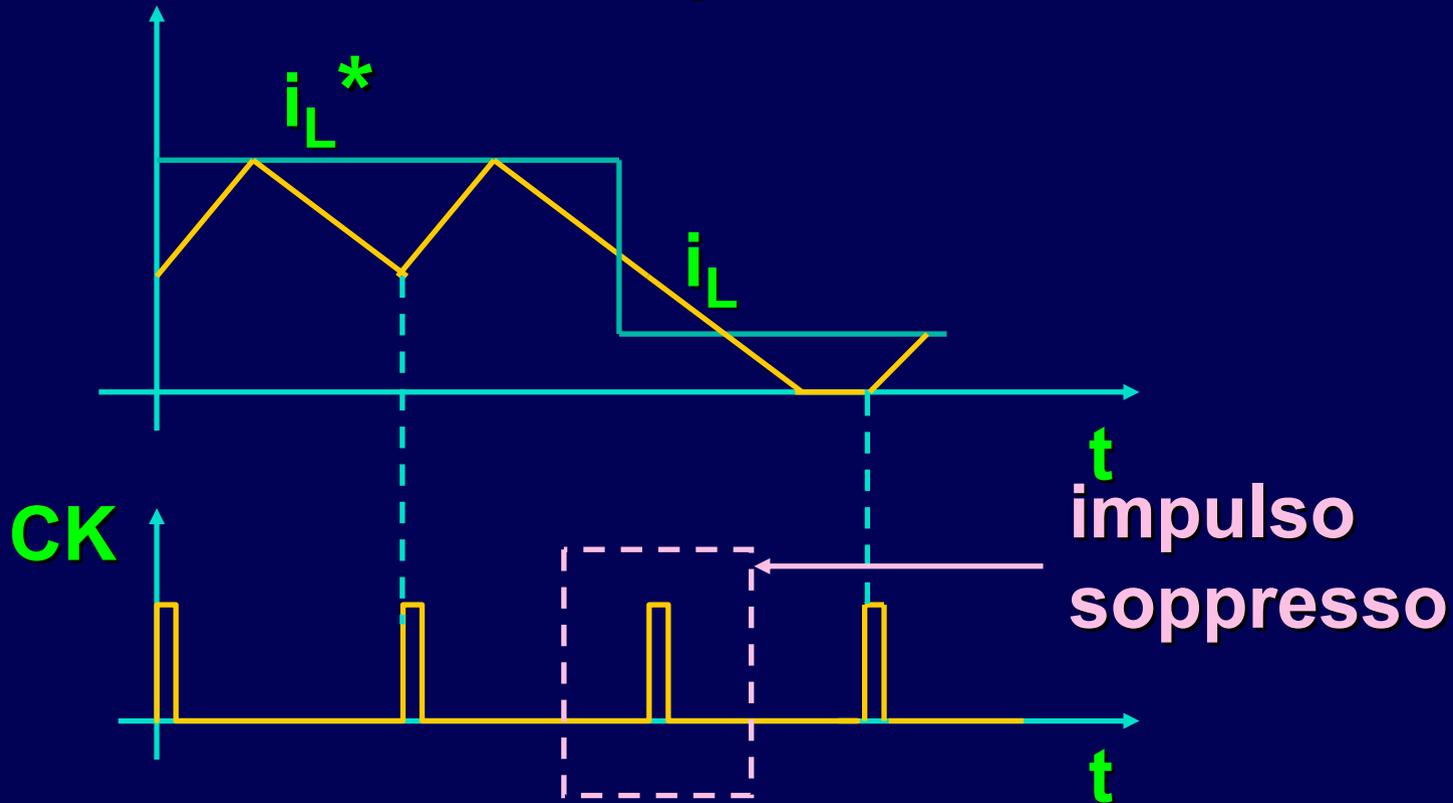
# Controllo di corrente di picco modificato



# Controllo di corrente di picco modificato

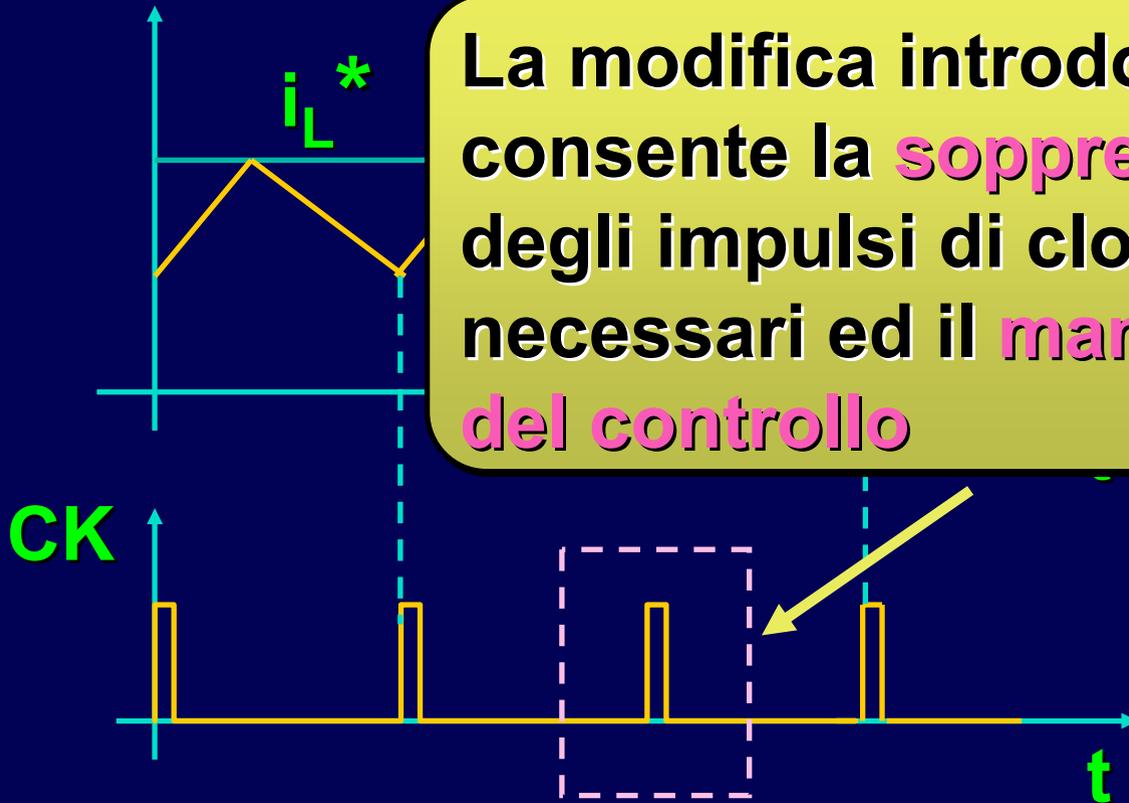


# Funzionamento del controllo di corrente di picco modificato



# 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  $\Delta i_L$  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

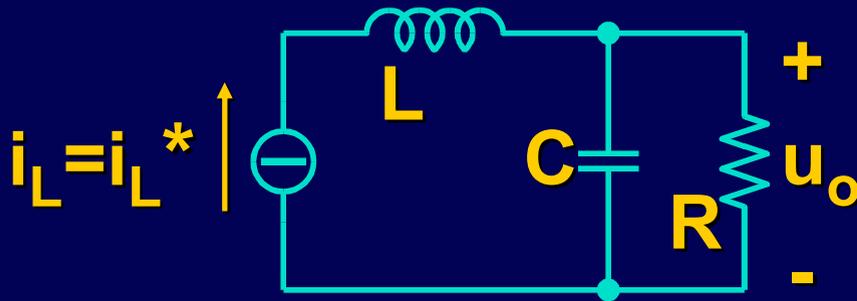
# Dinamica del controllo di corrente

Se  $\Delta i_L$  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  $\Delta i_L$  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  $\Delta i_L$  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

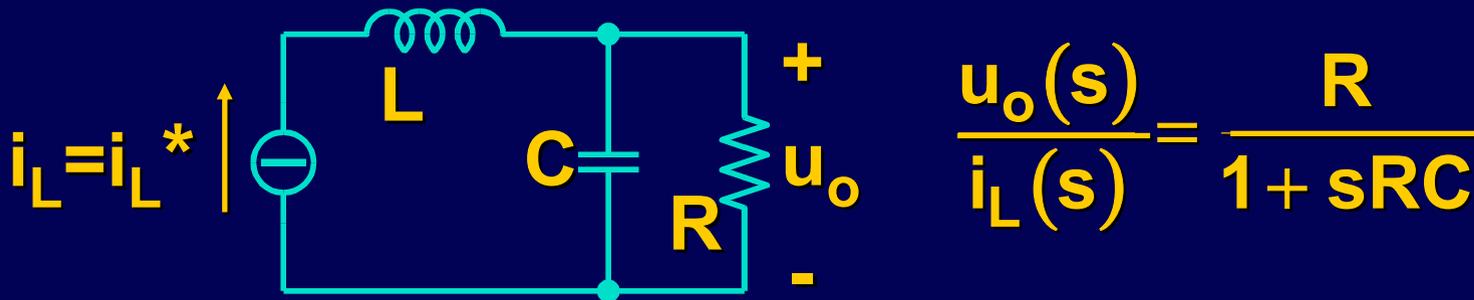
Se  $\Delta i_L$  é trascurabile si ha:  $i_L \cong I_L \cong I_{L\max}$   
sicché il controllo di corrente di picco  
equivale a quello di corrente media



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

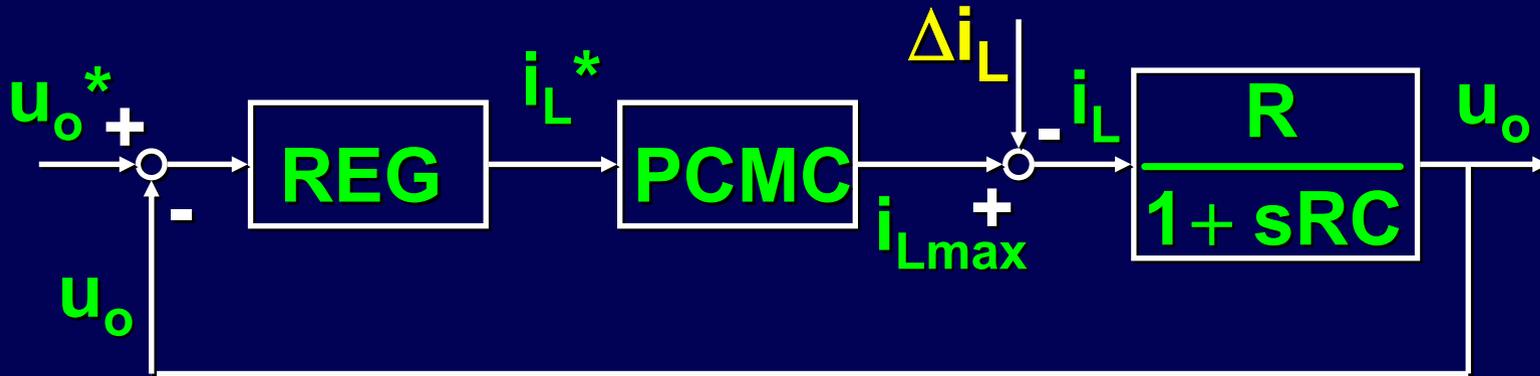
PI: 
$$\frac{u_o(s)}{i_L^*(s)} = k \cdot \frac{1 + s\tau}{s\tau} \cdot \frac{R}{1 + sRC}$$



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

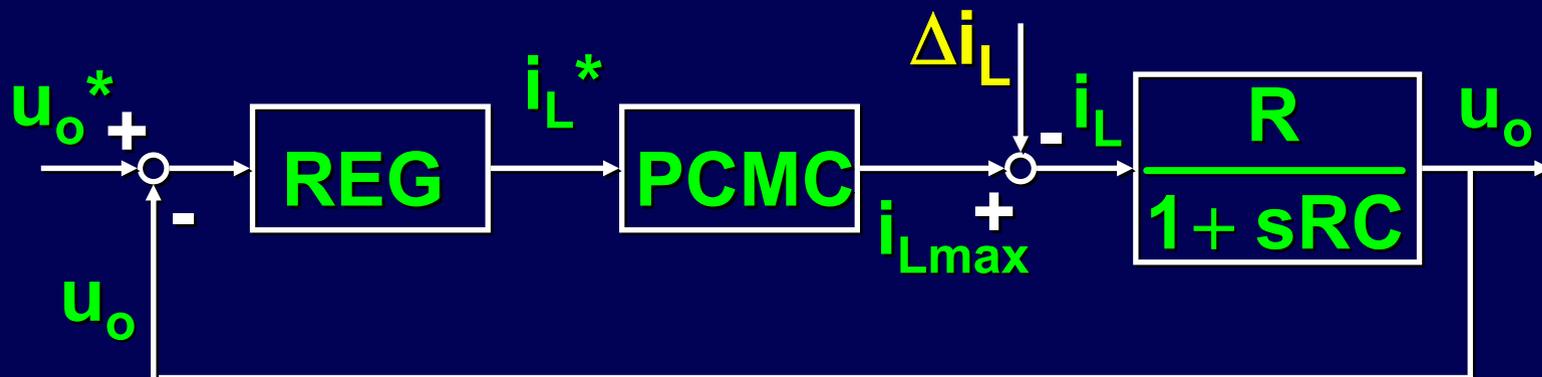
Se  $\Delta i_L$  non è trascurabile il sistema si può rappresentare come in figura:



PCMC: Peak Current Mode Control

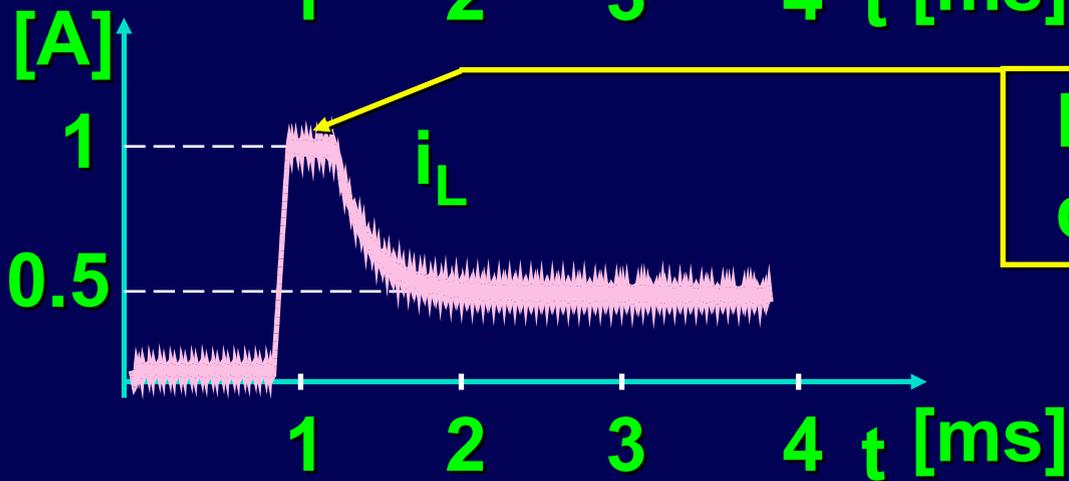
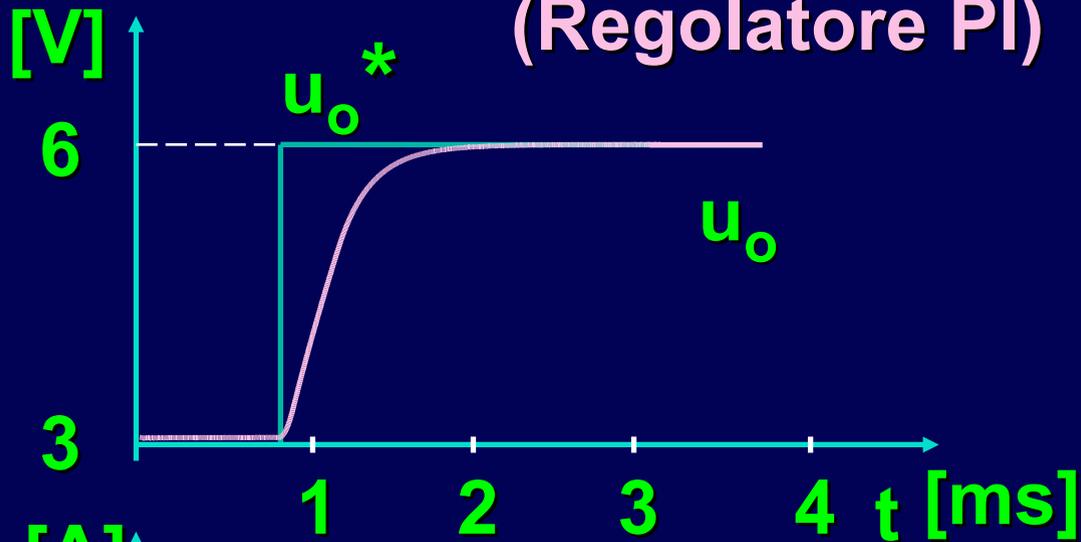
# Dinamica del controllo di corrente

Se  $\Delta i_L$  non è trascurabile il sistema si può rappresentare come in figura:

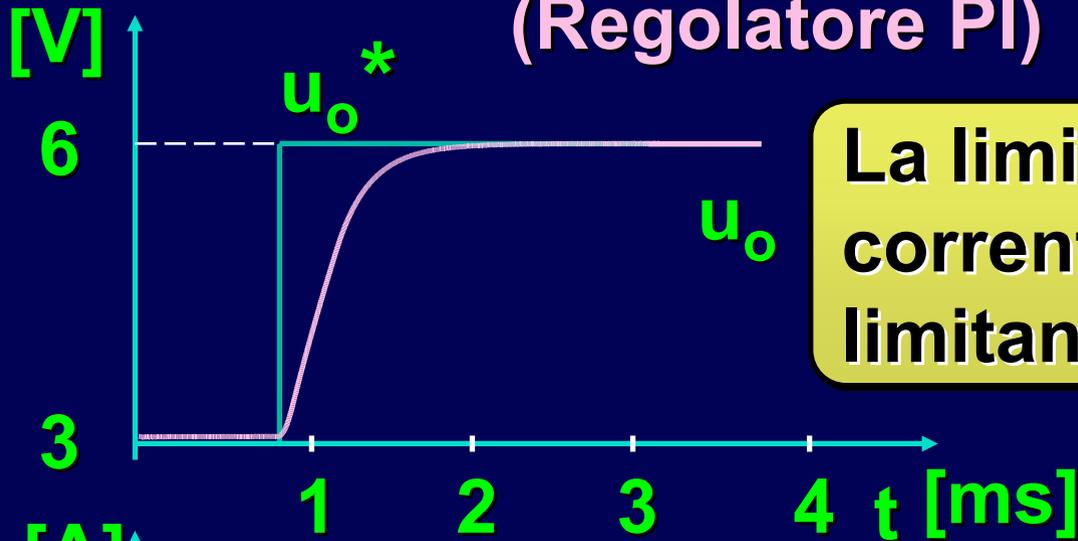


L'ondulazione di corrente  $\Delta i_L$  può considerarsi come un disturbo. I suoi effetti vengono cancellati se il regolatore è opportuno (azione integratrice)

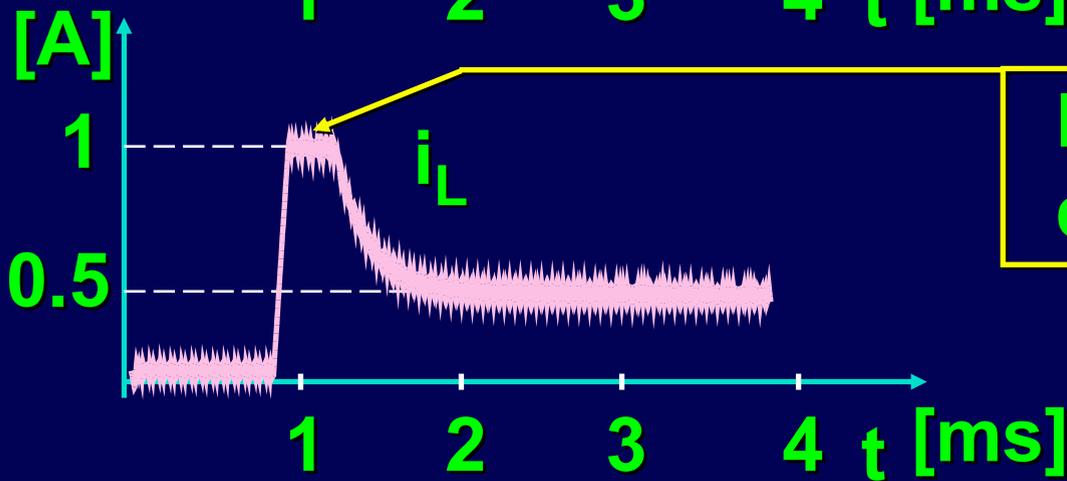
# Dinamica del controllo di corrente di picco (Regolatore PI)



# 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

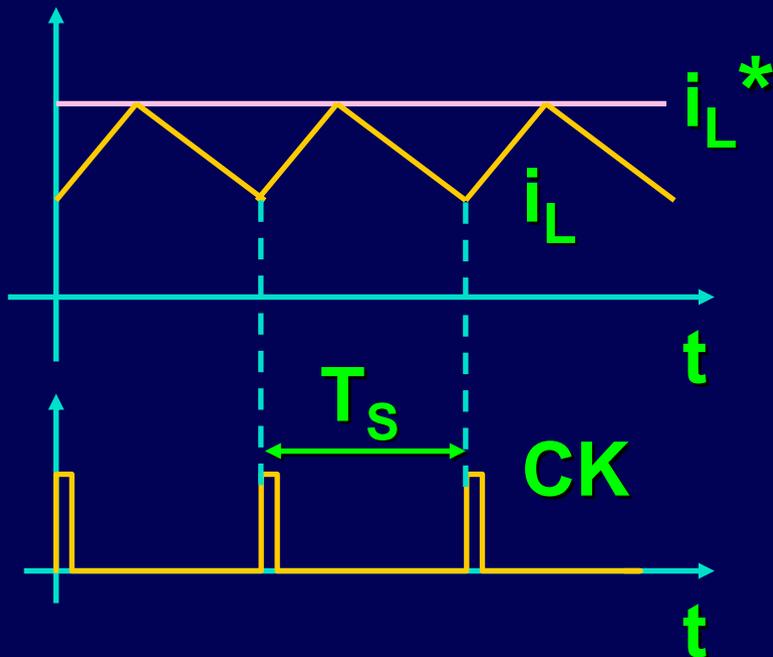
Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica.

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

## Instabilità statica

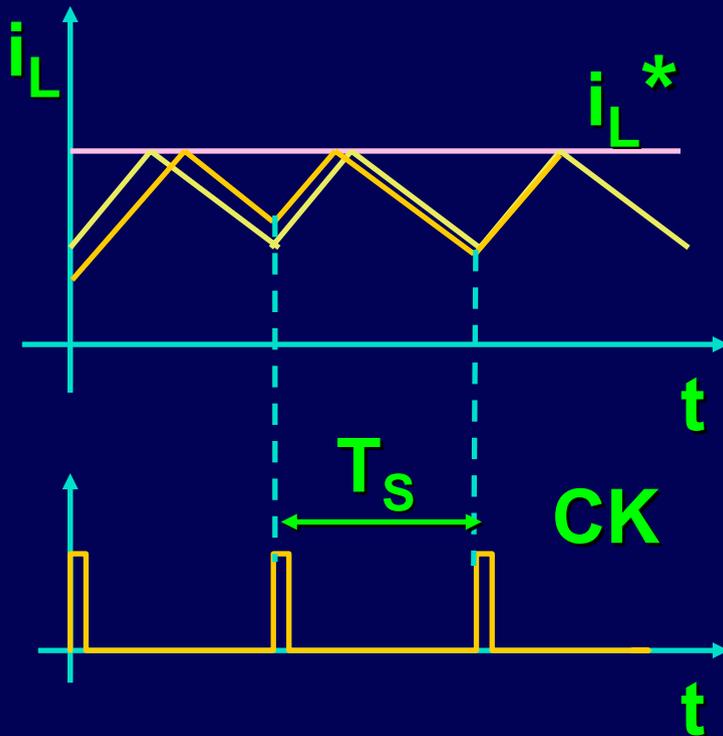
Il controllo di corrente di picco non ha problemi di stabilità dinamica.

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



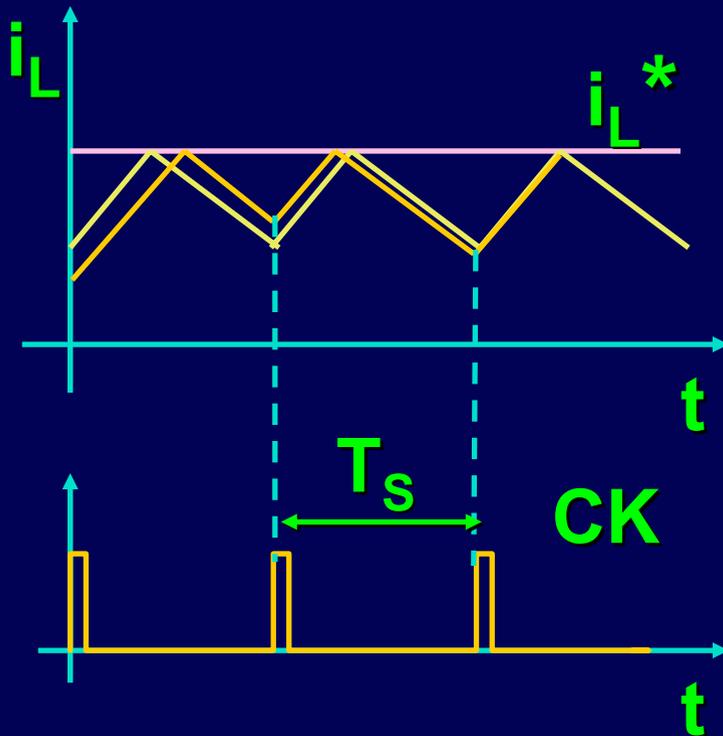
**Funzionamento ideale**

# Instabilità statica



Funzionamento  
perturbato ( $\delta < 0.5$ )

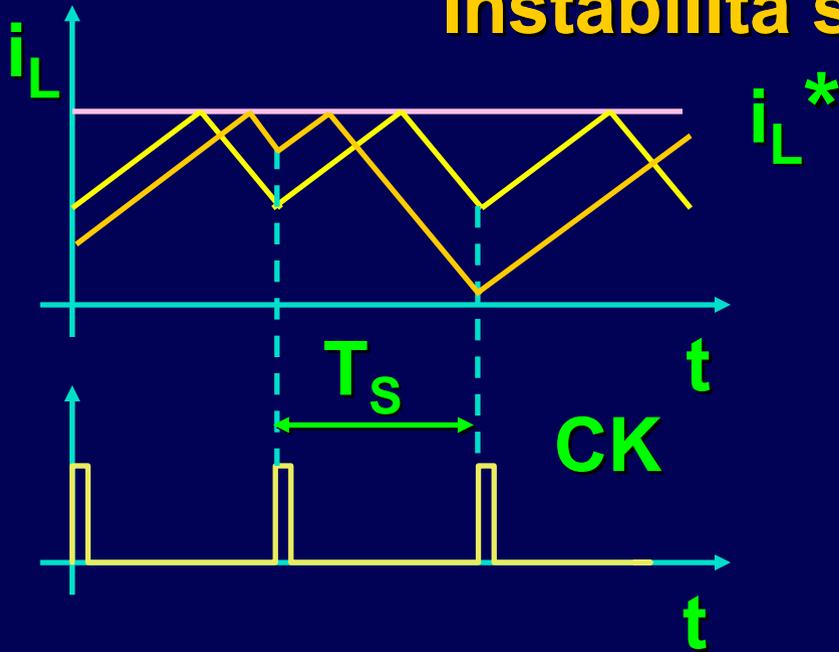
# Instabilità statica



Funzionamento  
perturbato ( $\delta < 0.5$ )

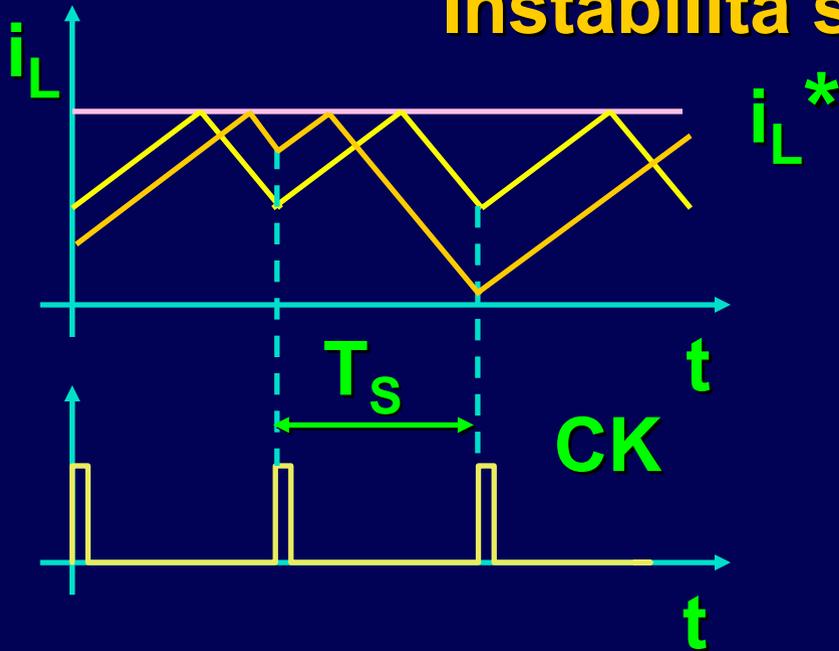
Una perturbazione di  $I_{Lmin}$  fa variare temporaneamente  $t_{on}$ , e quindi  $t_{off}$ , ma viene riassorbita in pochi cicli

# Instabilità statica



Funzionamento  
perturbato ( $\delta > 0.5$ )

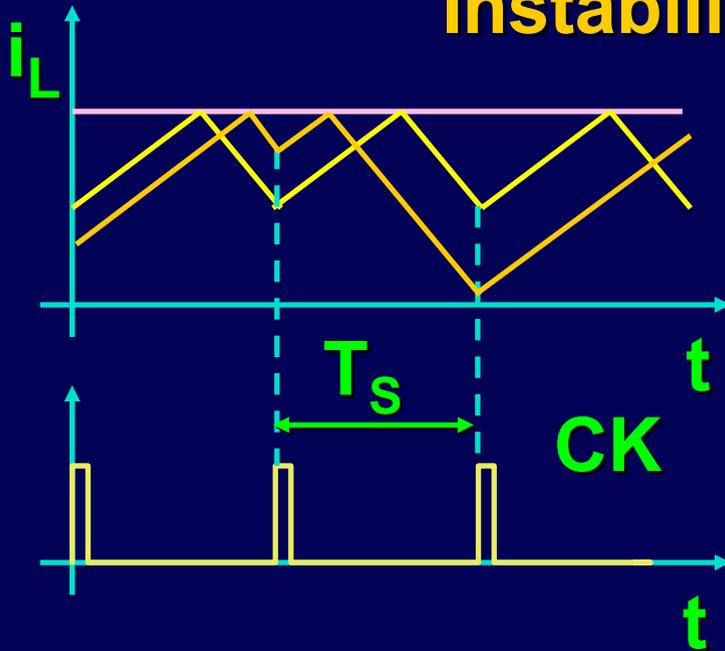
## Instabilità statica



Funzionamento  
perturbato ( $\delta > 0.5$ )

Una perturbazione di  $i_{L\min}$  si propaga  
da un ciclo all'altro amplificandosi

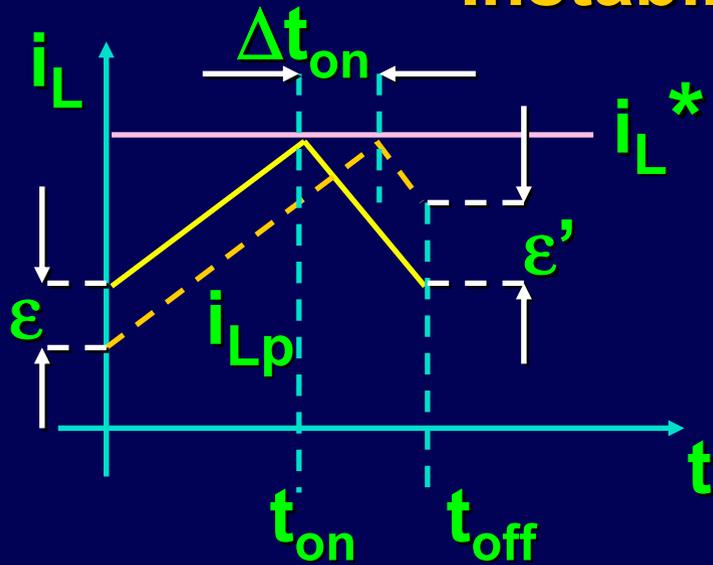
## Instabilità statica



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

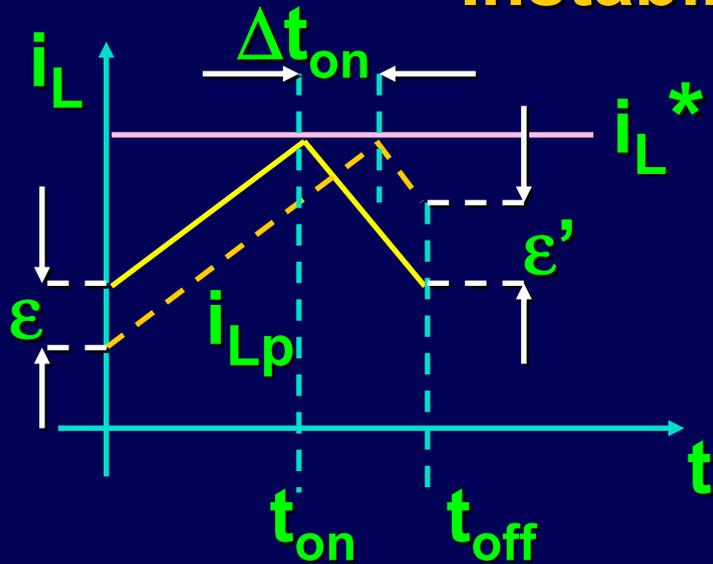


———— andamento teorico  
 - - - - - andamento perturbato

ON:

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

# Instabilitá statica



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

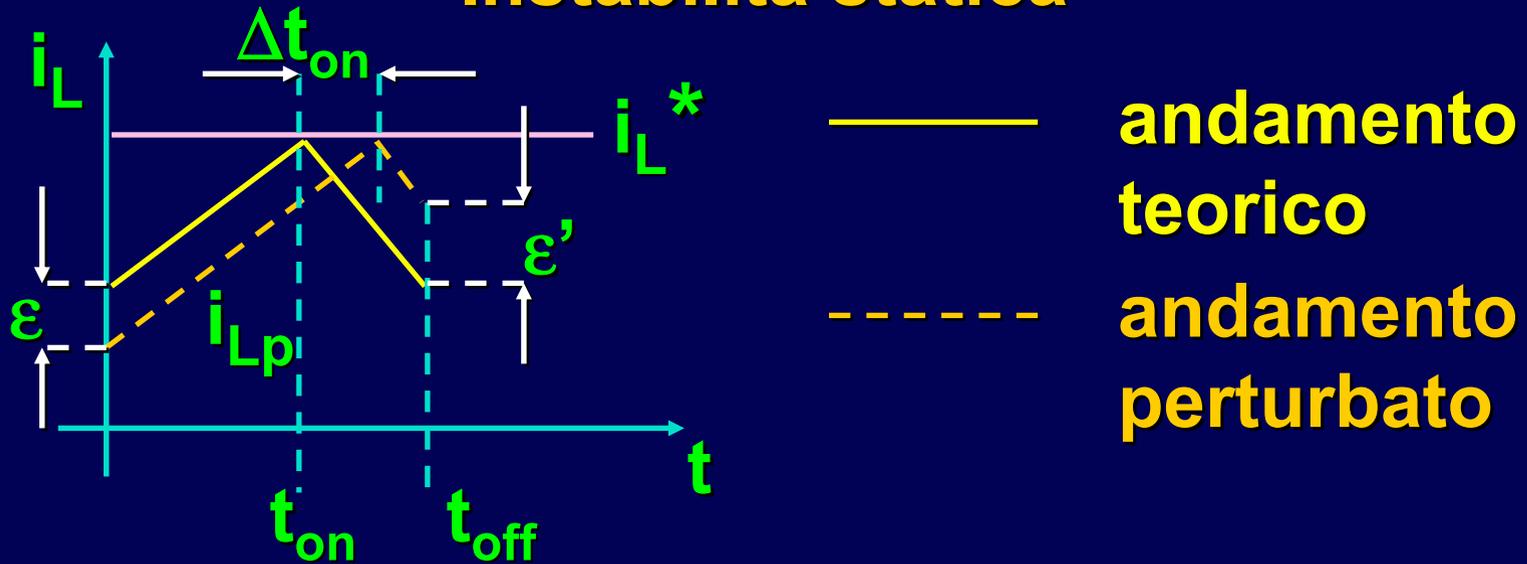
ON:

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

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

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

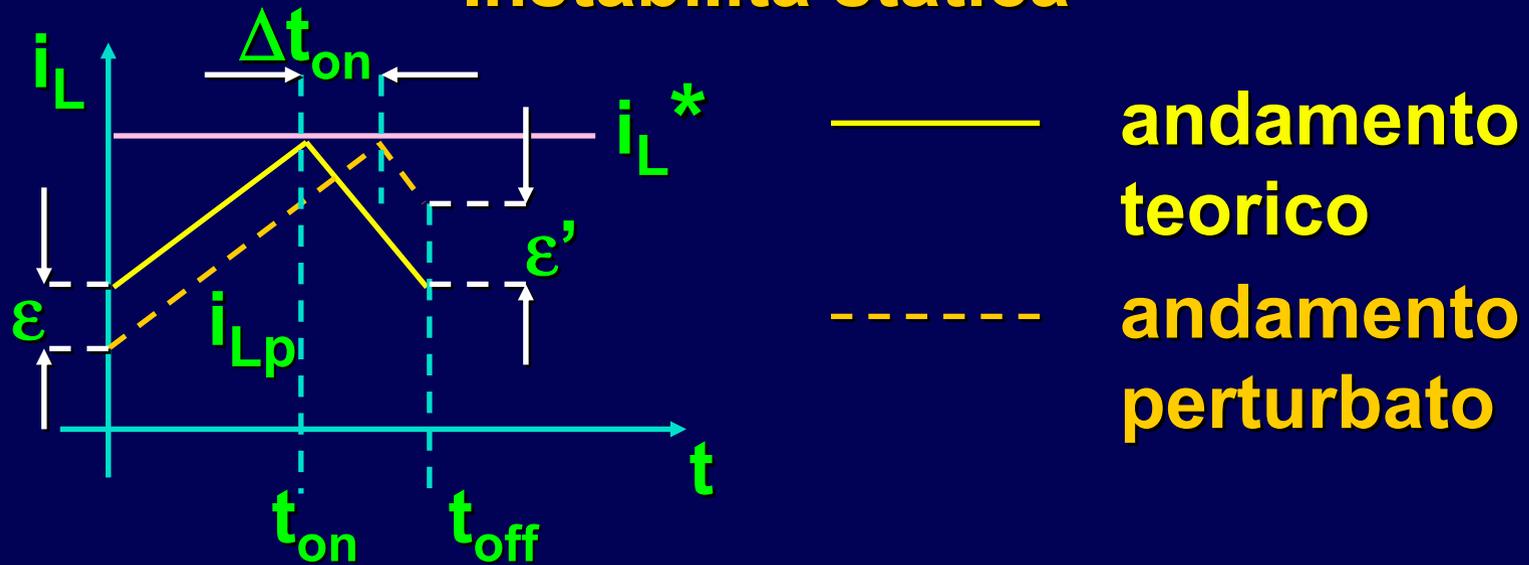
# Instabilità statica



OFF:

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

## Instabilità statica

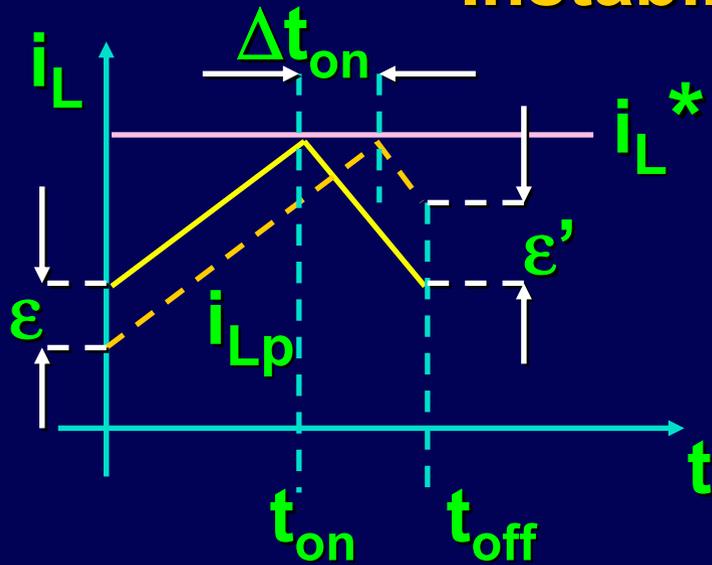


**OFF:**

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

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

# Instabilitá statica



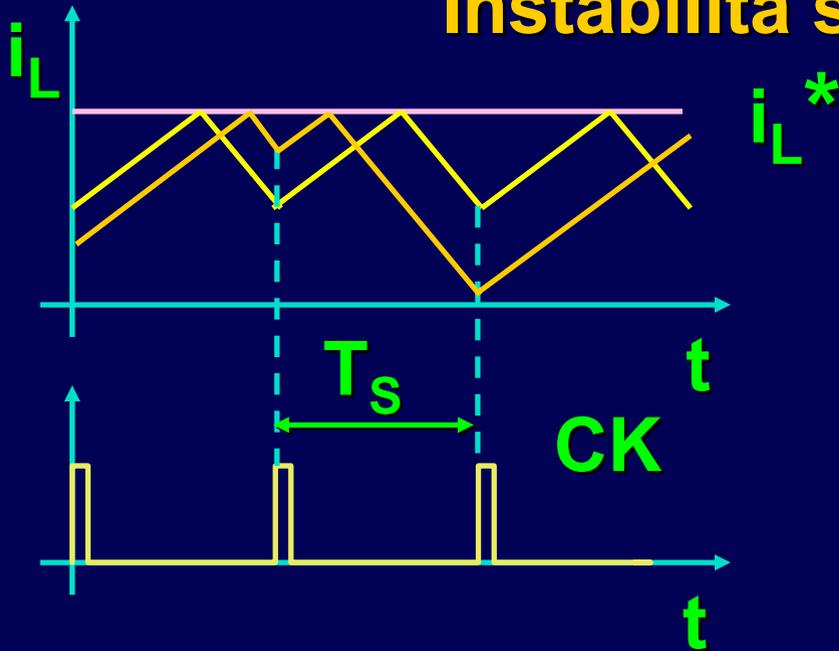
— andamento  
teorico

- - - - - andamento  
perturbato

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

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

## Instabilità statica

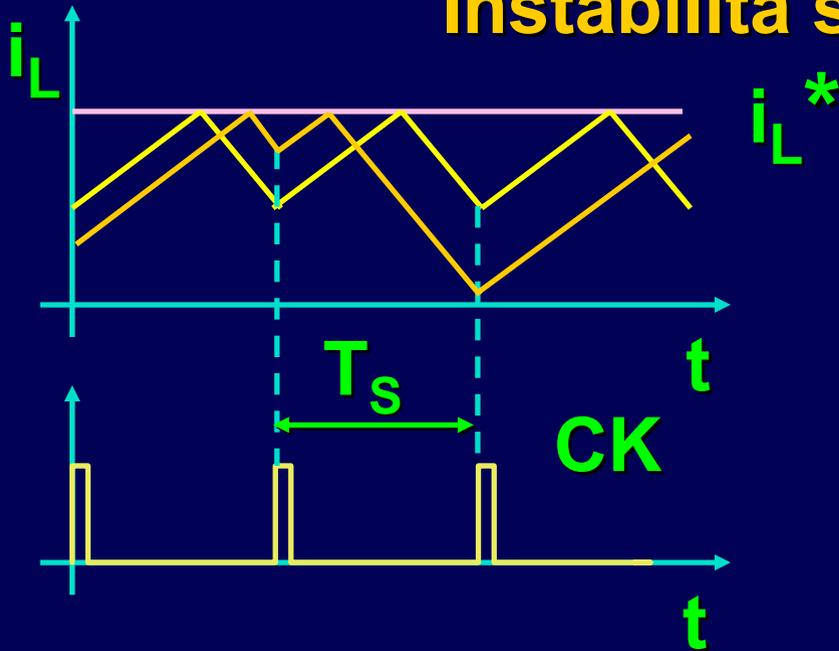


Funzionamento  
perturbato ( $\delta > 0.5$ )

Problemi causati dall'instabilità statica

- Aumento dell'ondulazione di corrente

## Instabilità statica

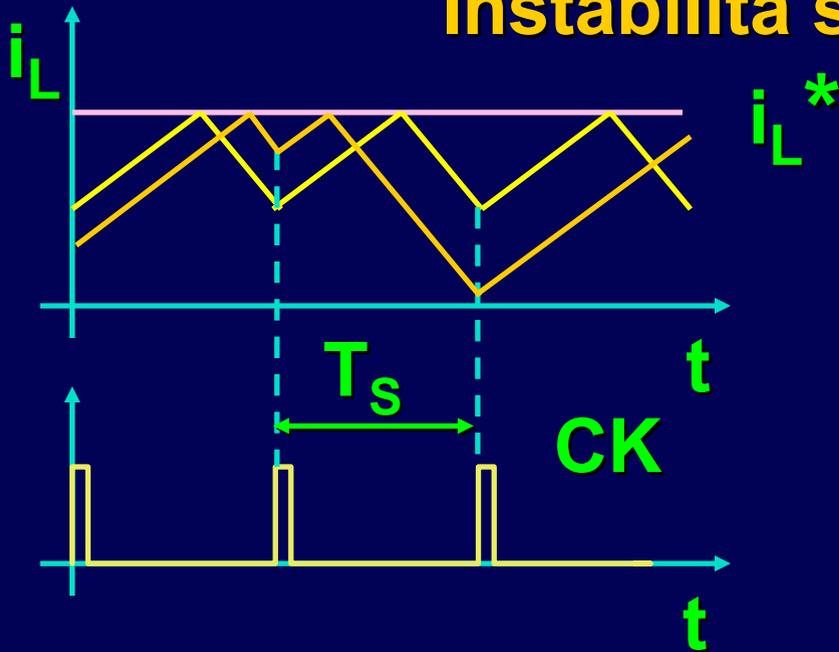


Funzionamento  
perturbato ( $\delta > 0.5$ )

## 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

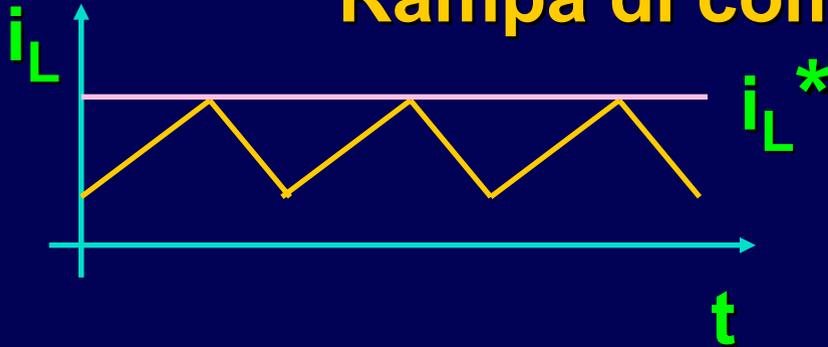
- Aumento dell'ondulazione della tensione di uscita

# 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  $t_{off}$

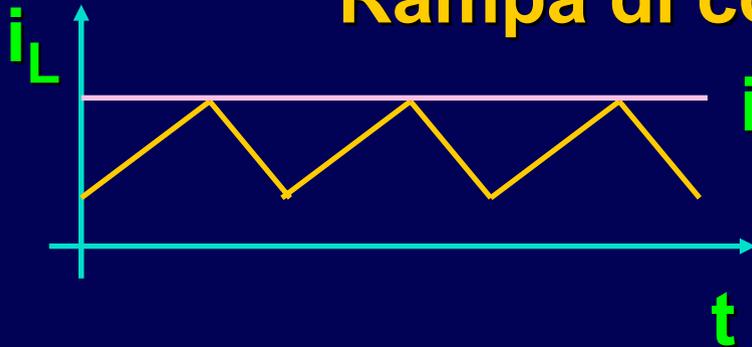
**Soluzione:** si aggiunge al segnale di retroazione di corrente ( $i_L$ ) un segnale a rampa ( $r$ ) in modo da evitare la condizione di instabilità

# Rampa di compensazione

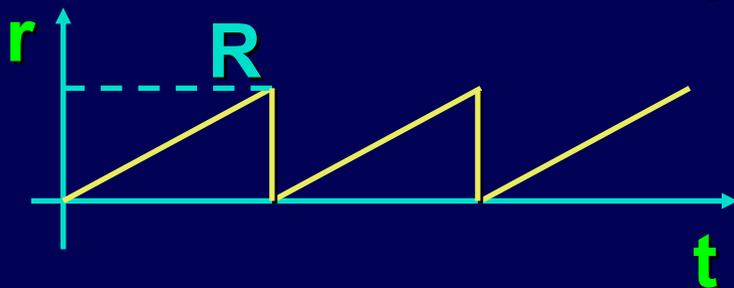


Funzionamento  
originario

# Rampa di compensazione

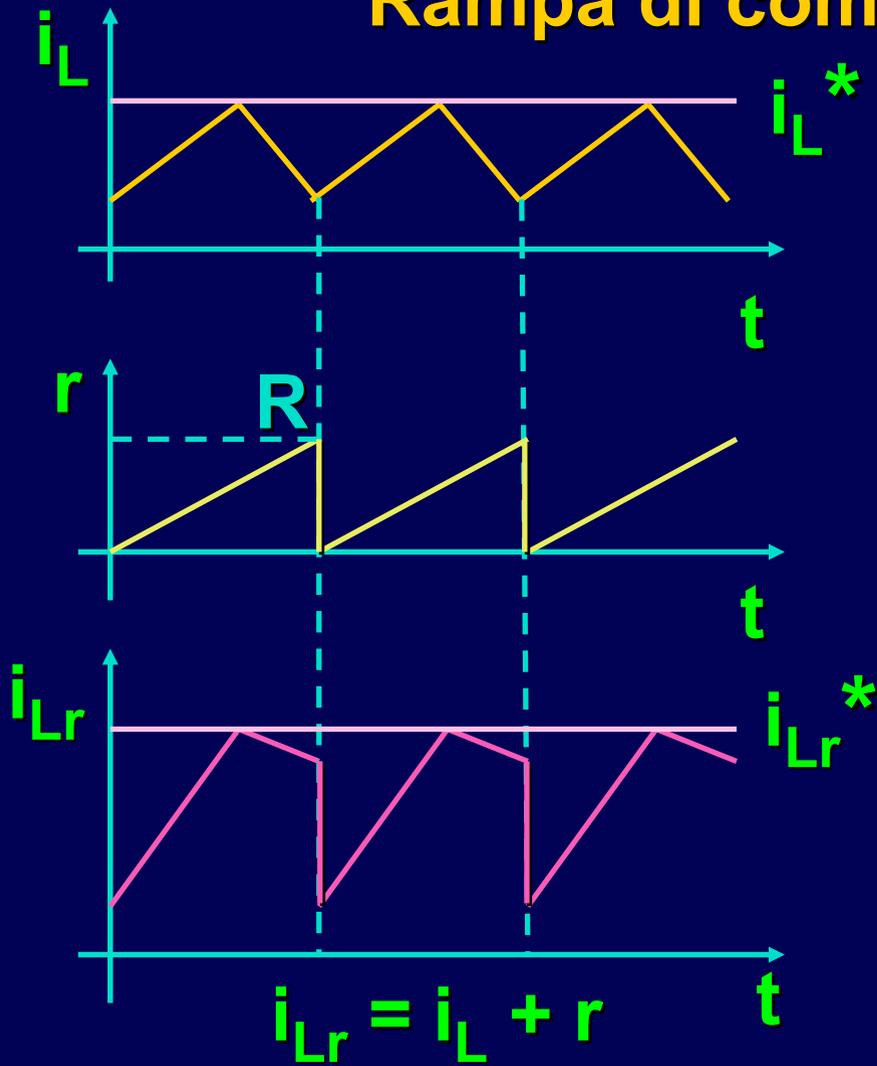


Funzionamento  
originario



Rampa di  
compensazione

# Rampa di compensazione

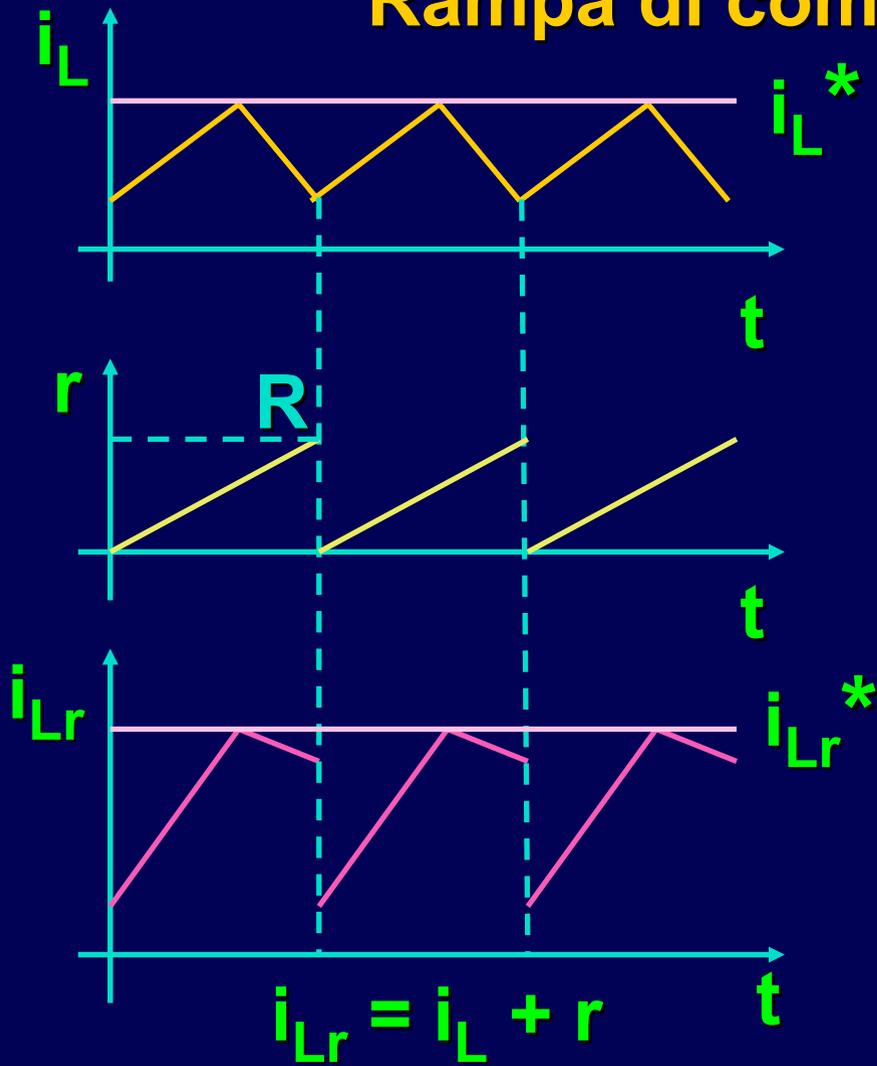


Funzionamento  
originario

Rampa di  
compensazione

Funzionamento  
modificato

# Rampa di compensazione



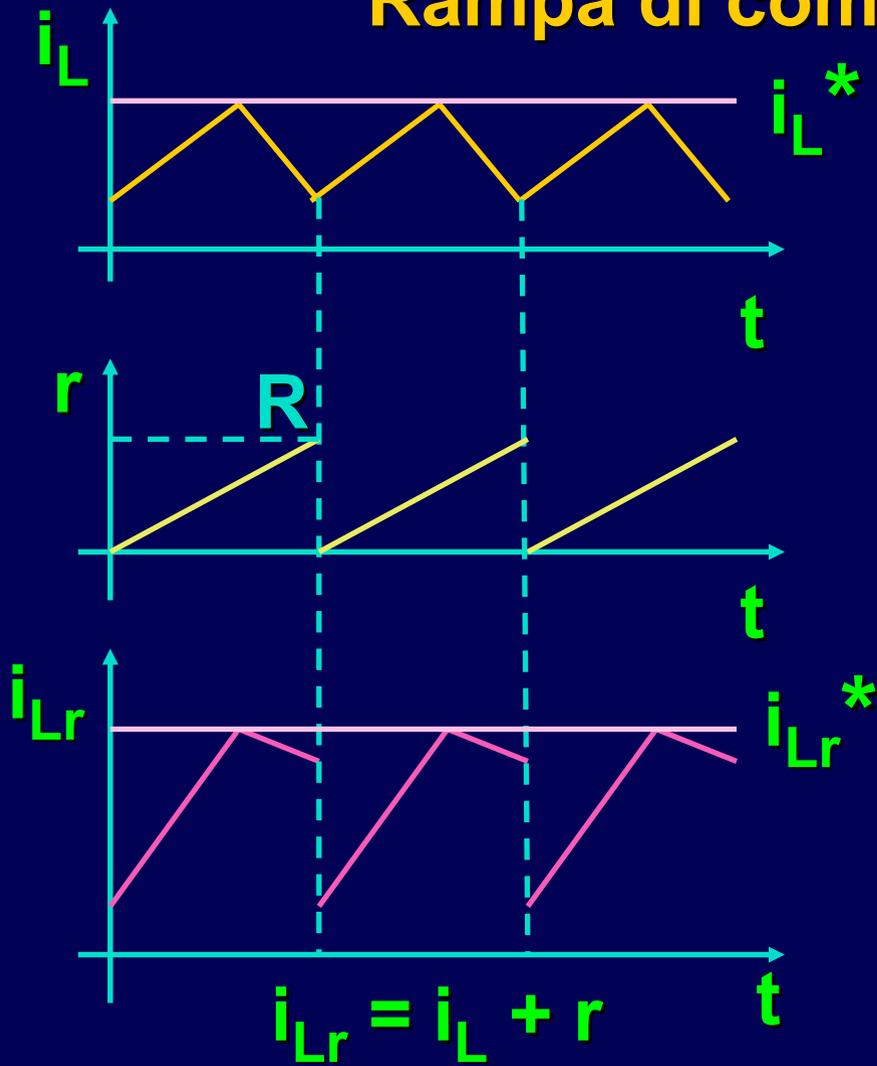
Funzionamento originario

**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:**

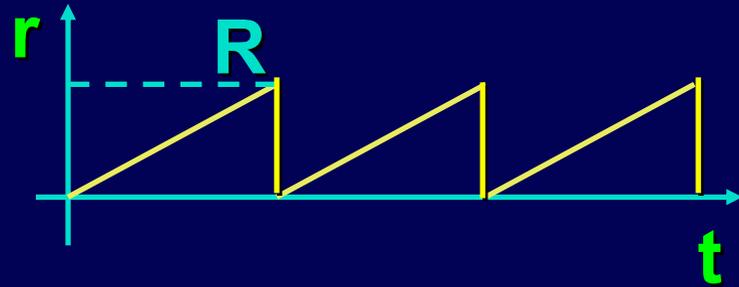
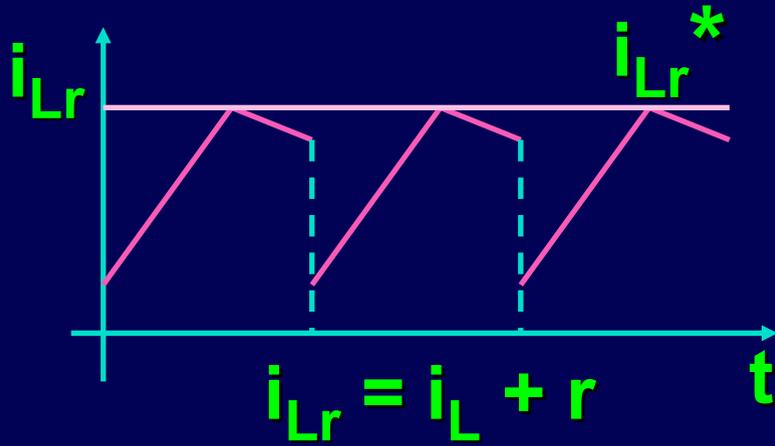
$$i_{Lr}^* \neq i_L^*$$

perché il controllo  
di  $U_o$  mantiene lo  
stesso  $\delta$

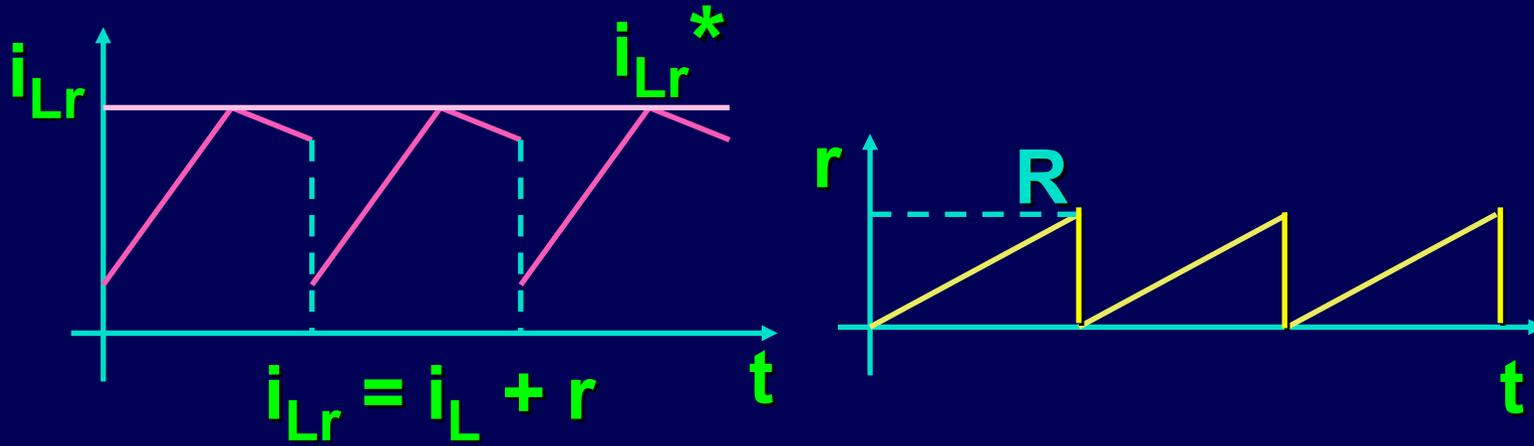
Funzionamento  
modificato

# Ampiezza della rampa

# Ampiezza della rampa



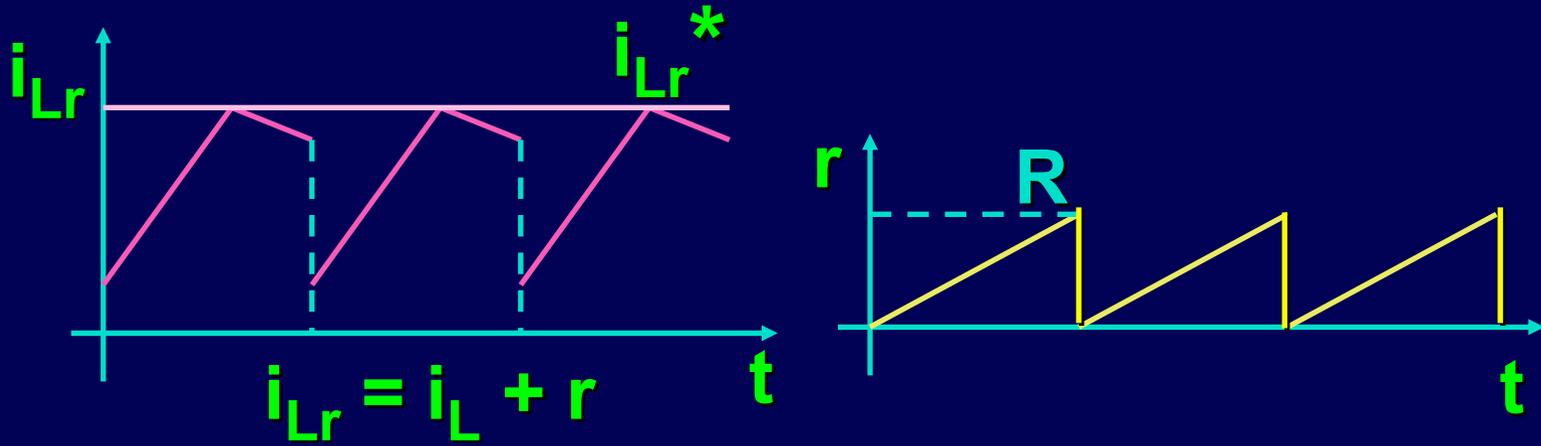
# Ampiezza della rampa



Affinché la perturbazione non si propaghi occorre che:

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

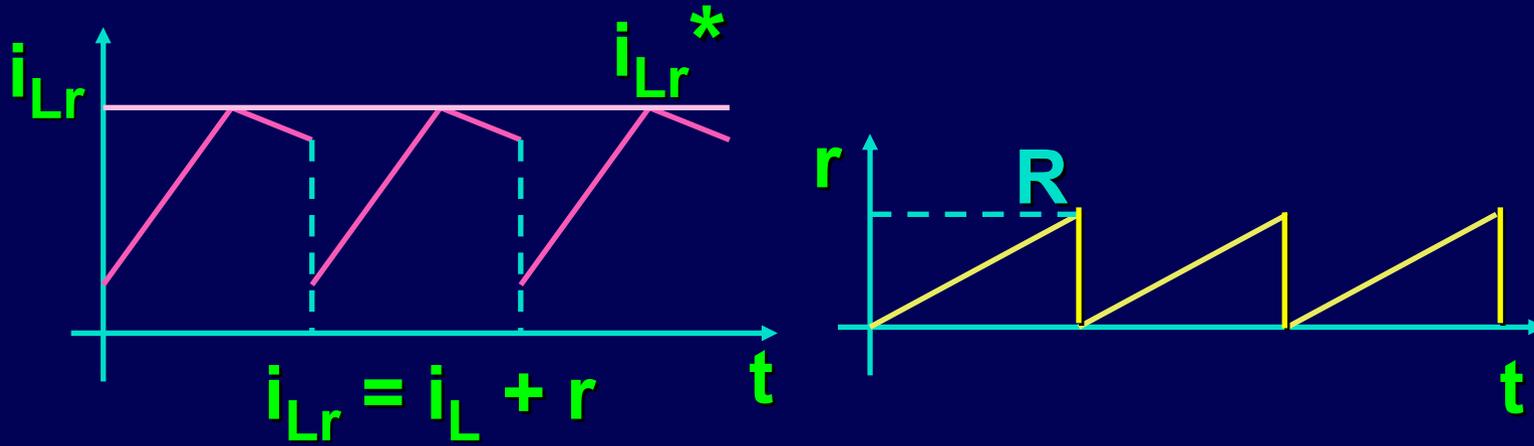
# Ampiezza della rampa



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

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

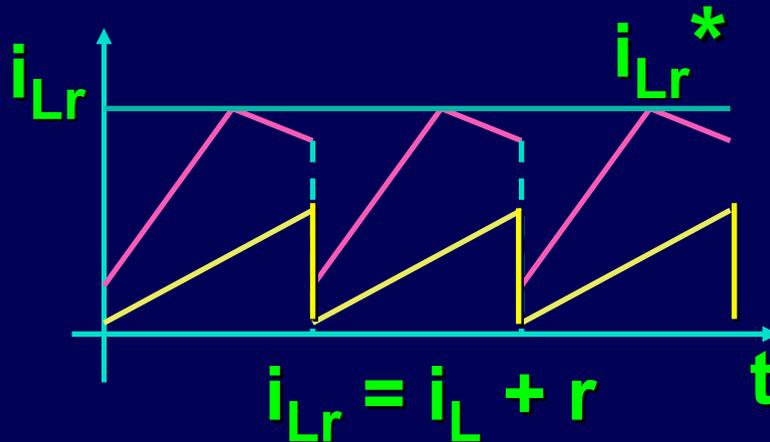
# Ampiezza della rampa



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

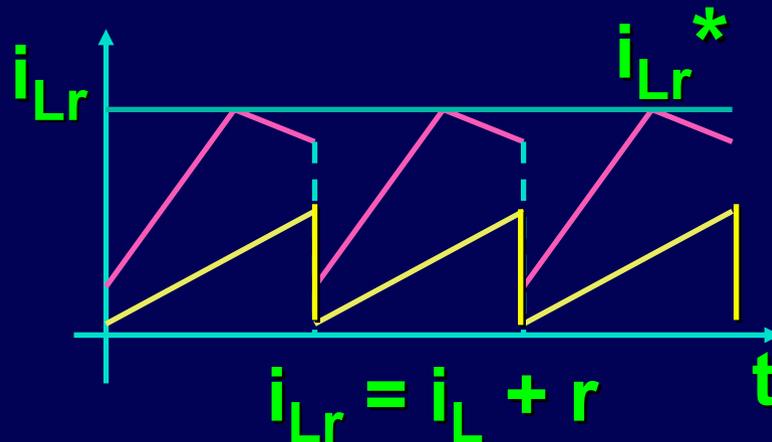
$$R > \frac{U_i}{2 \cdot f_s \cdot L} = 2 \cdot \Delta I_{L \max}$$

# Sollecitazioni in corrente



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

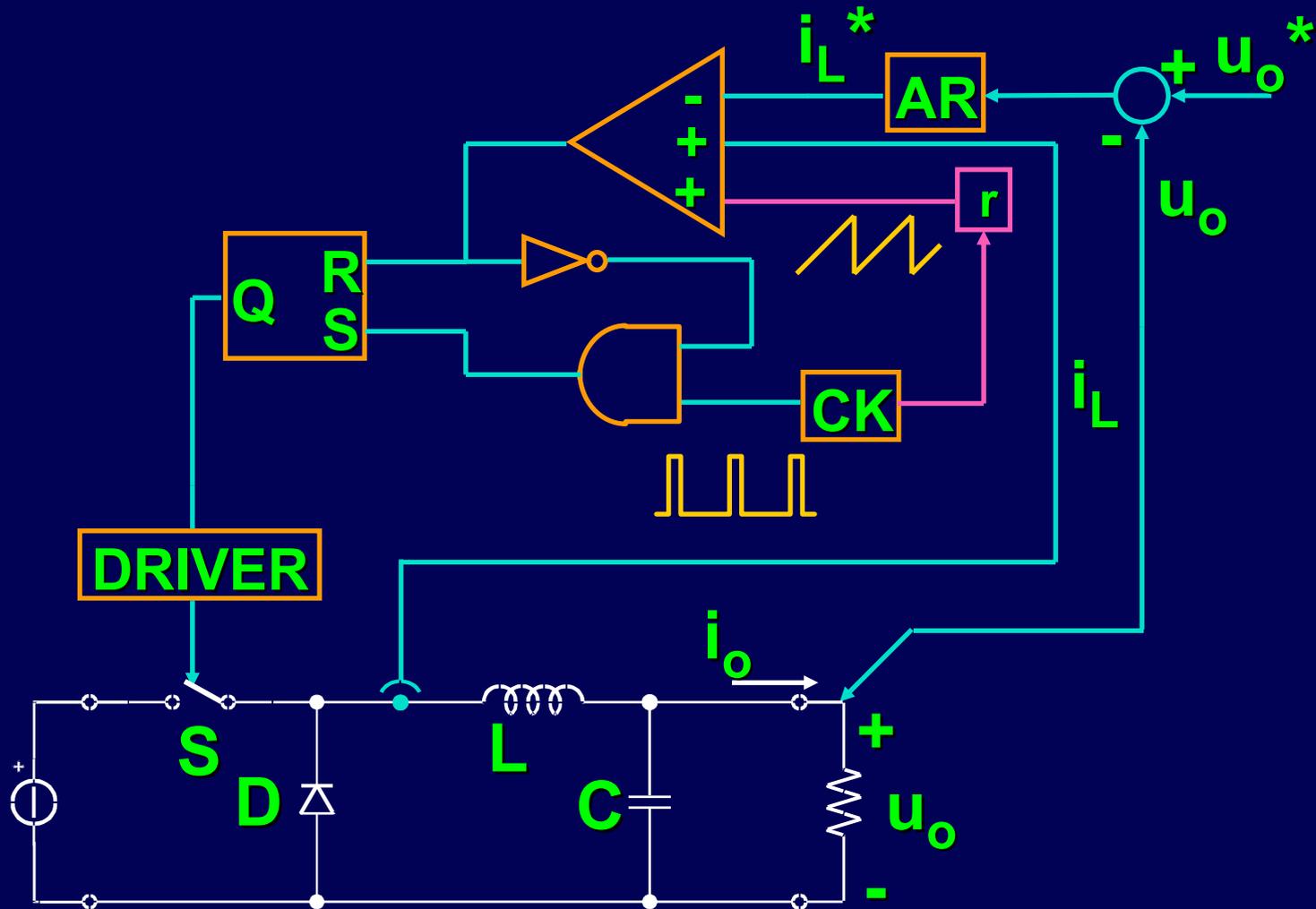
# Sollecitazioni in corrente



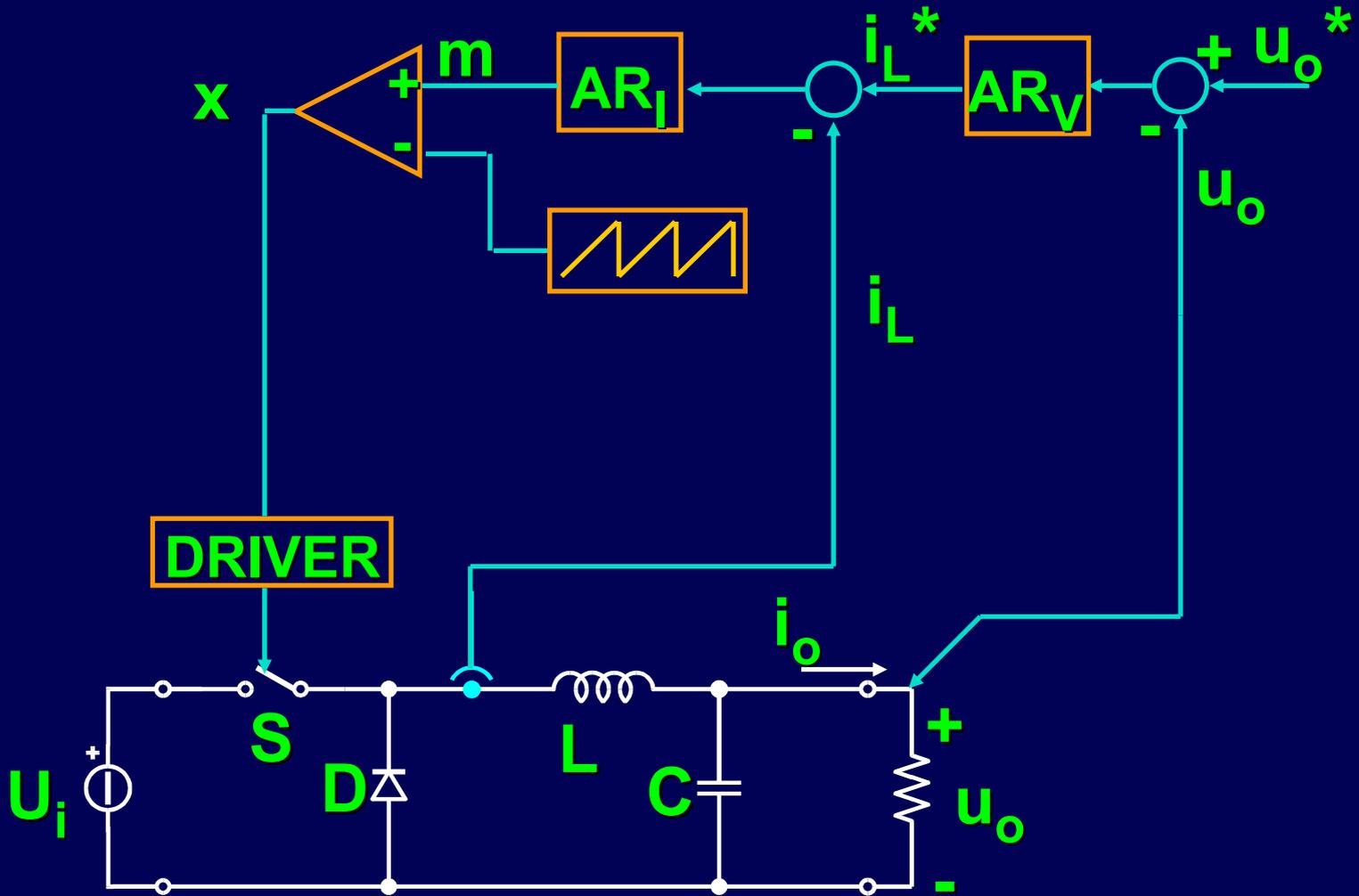
Al riferimento di corrente  $i_L^*$  viene dunque aggiunta una rampa di ampiezza  $2\Delta i_{Lmax}$

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**