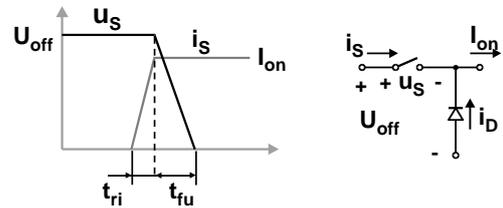


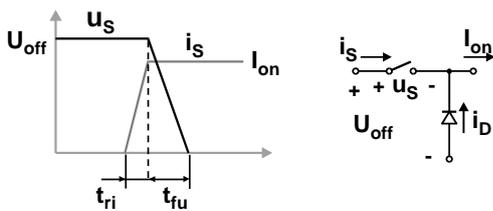
“Snubber”

Accensione: diodo ideale

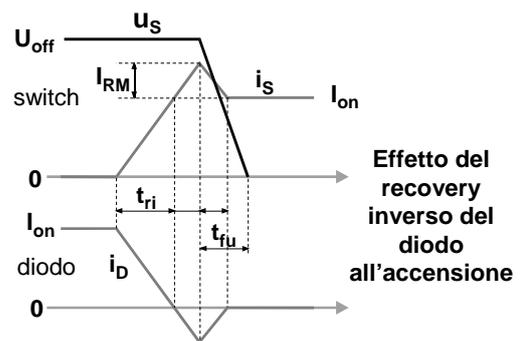


Finchè  $i_s < I_{on}$  il diodo resta in conduzione e la tensione sull'interruttore rimane costante al valore  $U_{off}$

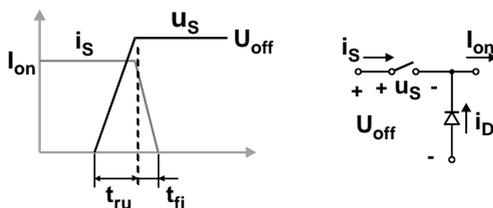
Accensione: potenza dissipata



$$P_{on} = U_{off} I_{on} \frac{(t_{fu} + t_{ri})}{2} f_s$$

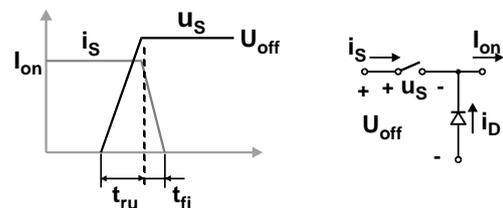


Spegnimento: potenza dissipata



Finchè  $u_s < U_{off}$  il diodo rimane interdetto e la corrente nell'interruttore rimane costante al valore  $I_{on}$

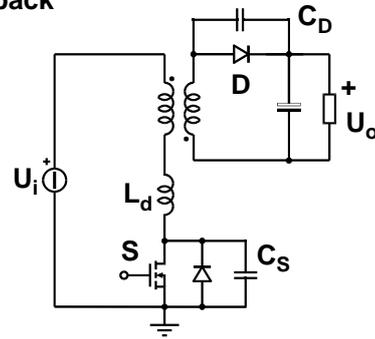
Spegnimento: potenza dissipata



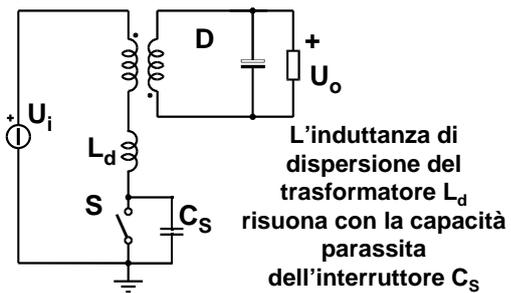
$$P_{off} = U_{off} I_{on} \frac{(t_{ru} + t_{fi})}{2} f_s$$

## Effetto degli elementi parassiti

## Flyback

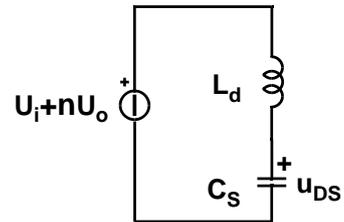


## Intervallo di spegnimento $t_{off}$

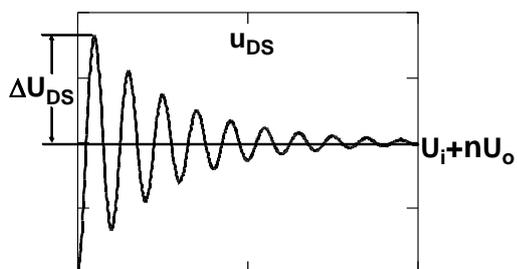


## Circuito equivalente e forme d'onda

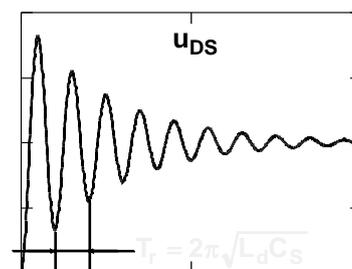
$n =$  rapporto di trasformazione  $N_1/N_2$



## Sovratensione sullo switch allo spegnimento



## Generazione di disturbi a frequenza elevata (EMI)



**Circuiti Snubber:  
Obiettivi (1):**

- ✓ Limitare lo stress di tensione dei dispositivi allo spegnimento
- ✓ Limitare lo stress di corrente nei dispositivi all'accensione
- ✓ Limitare la derivata di corrente ( $di/dt$ ) nei dispositivi all'accensione
- ✓ Limitare la derivata di tensione ( $du/dt$ ) nei dispositivi allo spegnimento

**Circuiti Snubber:  
Obiettivi (2):**

- ✓ Ridurre la corrente di recovery nei diodi
- ✓ Modificare le traiettorie di commutazione dei dispositivi allo scopo di rimanere dentro la SOA
- ✓ Ridurre la potenza dissipata nei dispositivi a semiconduttore
- ✓ Ridurre i disturbi elettromagnetici (EMI)

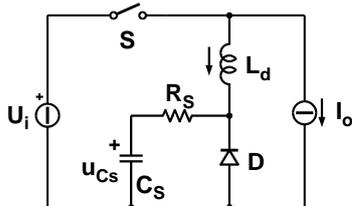
**Tipi di snubber**

- ✓ snubber R-C non polarizzati: usati per limitare la sovratensione e la  $du/dt$  nei diodi e nei tiristori
- ✓ snubber R-C polarizzati: usati per limitare la  $du/dt$  e modificare la traiettoria di commutazione allo spegnimento, e limitare la sovratensione nei dispositivi attivi allo spegnimento
- ✓ snubber L-R polarizzati: usati per limitare la  $di/dt$  e modificare la traiettoria di commutazione all'accensione

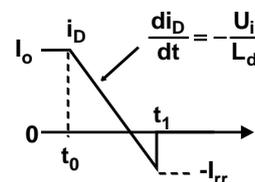
**Snubber R-C non polarizzati**

**Esempio: convertitore Buck**

$L_d$  = induttanza parassita



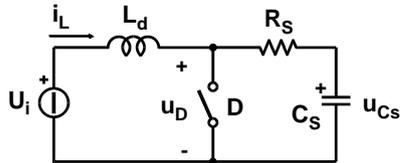
**Corrente nel diodo**



$t_0$  = istante di chiusura dello switch  
Il diodo rimane in conduzione fino all'istante  $t_1$

**Circuito equivalente nell'istante di spegnimento del diodo**

$$i_L(0) = I_{rr}, \quad u_{C_S}(0) = 0$$



**Grandezze di normalizzazione**

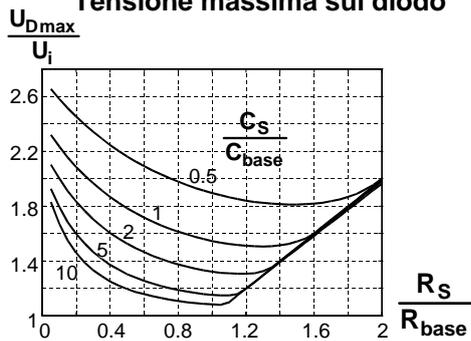
**Capacità di normalizzazione:**

$$C_{base} = L_d \left( \frac{I_{rr}}{U_i} \right)^2$$

**Resistenza di normalizzazione:**

$$R_{base} = \frac{U_i}{I_{rr}}$$

**Tensione massima sul diodo**



**Tensione massima sul diodo**

**Esempio:  $C_S = C_{base}$**

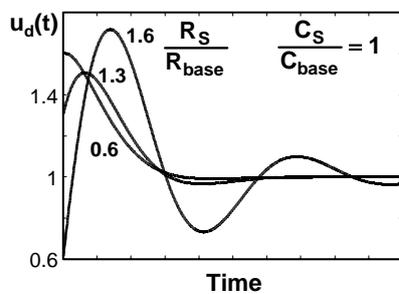
**Valore ottimo di resistenza dello snubber:**

$$R_S = 1.3 R_{base}$$

**Stress di tensione sul diodo:**

$$U_{Dmax} = 1.5 U_i$$

**Tensione normalizzata sul diodo**



**Energia dissipata nella resistenza di snubber**

**Fase "off" del diodo:**

$$W_R = \frac{1}{2} L_d I_{rr}^2 + \frac{1}{2} C_S U_i^2$$

**Fase "on" del diodo:**

$$W_C = \frac{1}{2} C_S U_i^2$$

**Energia dissipata nella resistenza di snubber**

Energia totale dissipata:

$$W_{tot} = W_R + W_C$$

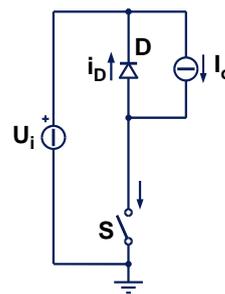
$$= \frac{1}{2} L_d I_{rr}^2 \left( 1 + 2 \frac{C_S}{C_{base}} \right)$$

**Snubber R-C polarizzati (turn off snubber)**

**Snubber R-C polarizzati**

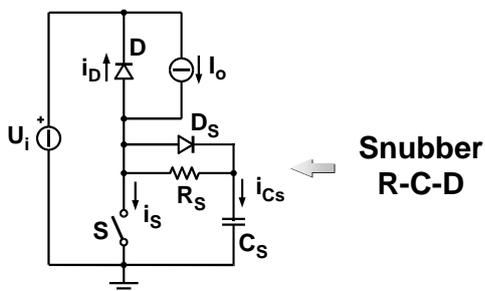
**Obiettivi:**

- ✓ Riduzione delle perdite negli switch allo spegnimento
- ✓ Modifica della traiettoria i-u di commutazione degli switch

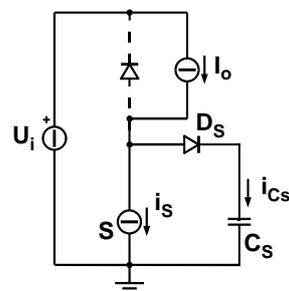


**Caso generale: switch con carico induttivo ( $I_o$ )**

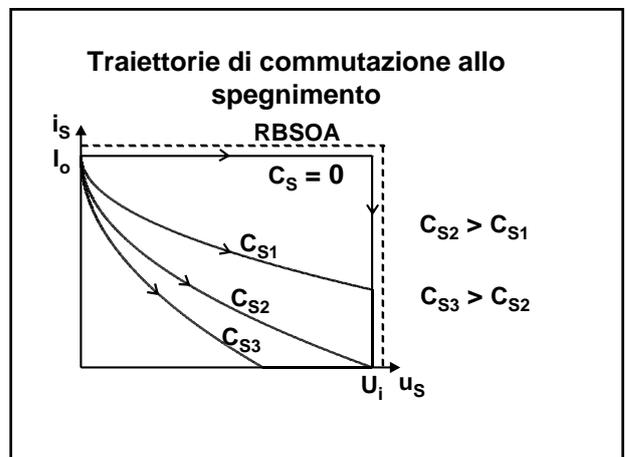
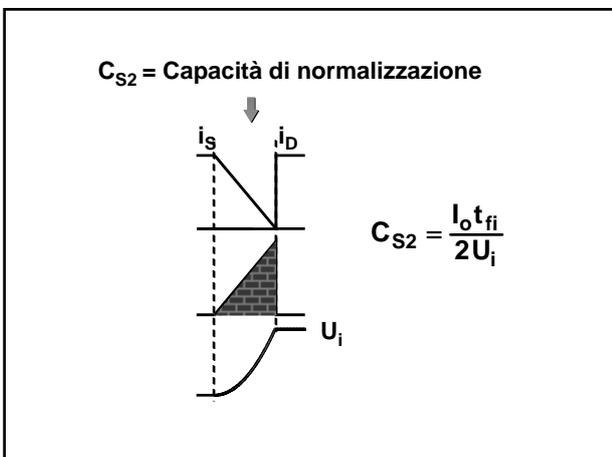
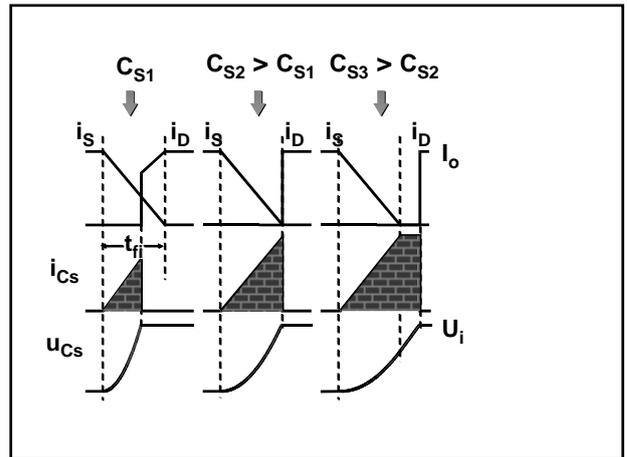
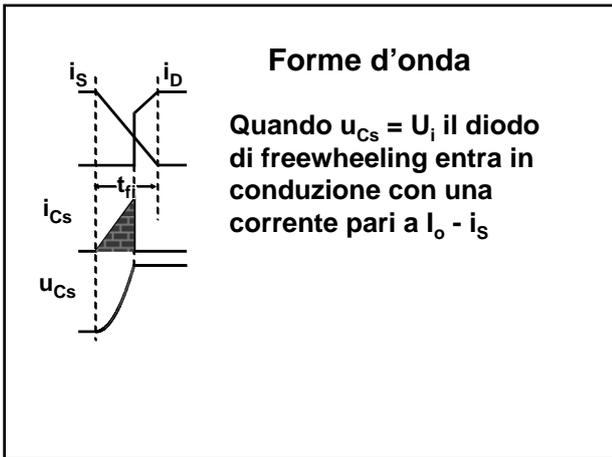
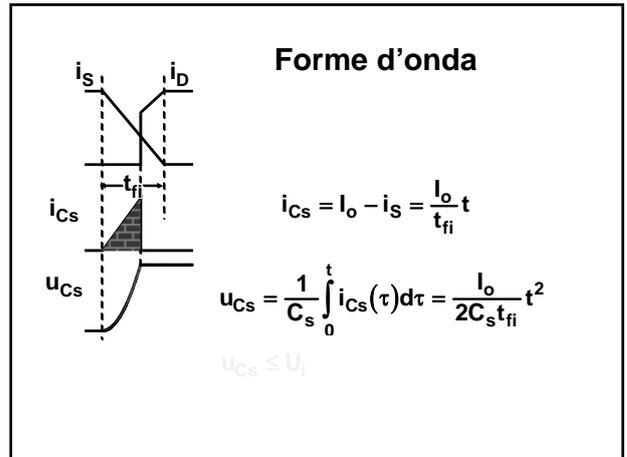
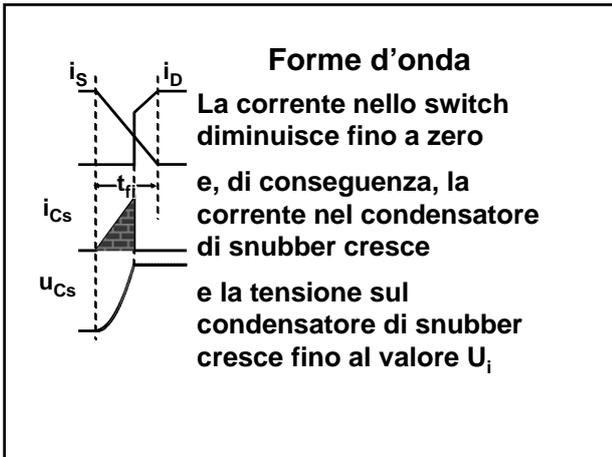
**Turn off Snubber**



**Turn off**



**Circuito equivalente durante la commutazione (Andamento di  $i_s$  imposto dal componente)**



**Effetto dello snubber sull'energia dissipata nello switch allo spegnimento**

Senza snubber:  $W_{T\_SN} = U_i I_o \frac{t_{fi}}{2}$

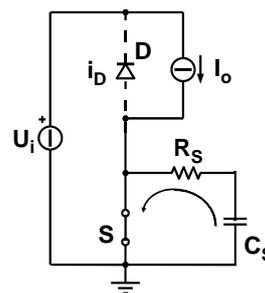
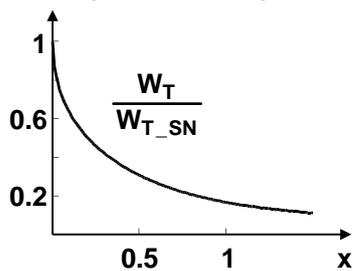
**Nota:** si trascura l'intervallo di crescita della tensione da 0 a  $U_i$  (intervallo  $t_{ru}$ )

**Con snubber:**

$$\frac{W_T}{W_{T\_SN}} = \begin{cases} 1 + \frac{x}{2} - \frac{4}{3}\sqrt{x} & \text{per } x < 1 \\ \frac{1}{6x} & \text{per } x \geq 1 \end{cases}$$

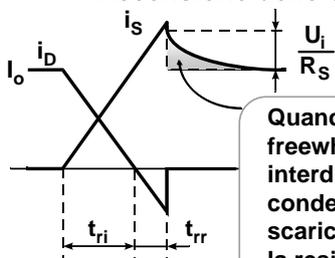
$$x = \frac{C_s}{C_{S2}}$$

**Energia dissipata allo spegnimento (normalizzata)**



**Il condensatore di snubber  $C_s$  si scarica attraverso la resistenza  $R_s$  e lo switch all'accensione**

**Accensione dello switch**



Quando il diodo di freewheeling si interdice il condensatore  $C_s$  si scarica attraverso la resistenza  $R_s$  e lo switch

**Energia dissipata nella resistenza di snubber  $R_s$ :**

$$W_R = \frac{1}{2} C_s U_i^2$$

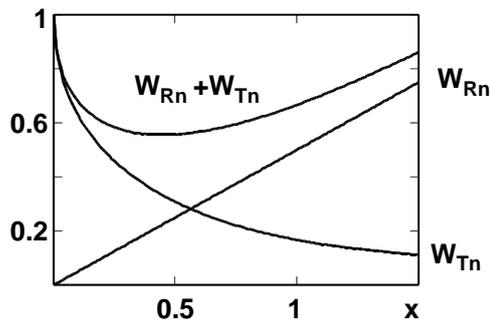
**Corrente di picco nella resistenza di snubber:**

$$\frac{U_i}{R_s} < I_{rr}$$

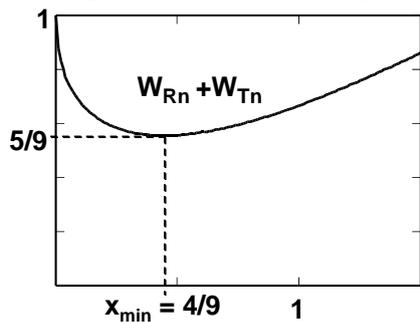
### Commenti

- ✓ L'energia del condensatore di snubber viene dissipata nella resistenza di snubber
- ✓ La corrente di picco nello switch all'accensione non aumenta

### Energie dissipate allo spegnimento



### Energie dissipate allo spegnimento



### Criteri di scelta del condensatore di snubber

- ✓ mantenere la traiettoria di commutazione allo spegnimento all'interno della RBSOA
- ✓ ridurre la potenza dissipata nello switch (considerazioni termiche)
- ✓ mantenere bassa la totale potenza dissipata ( $W_T + W_R$ )

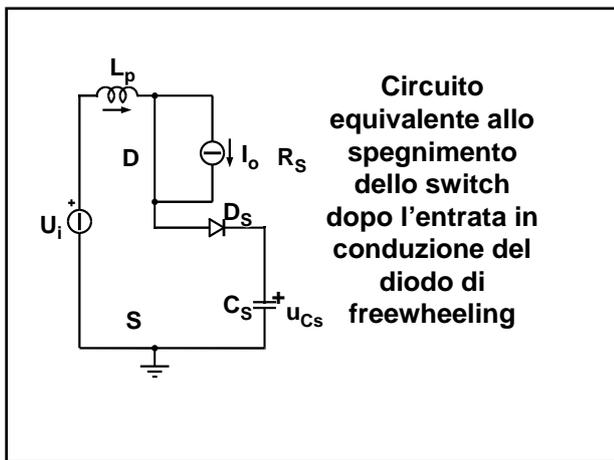
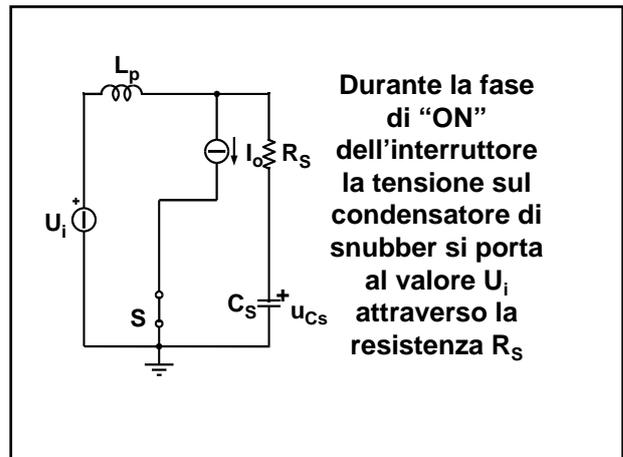
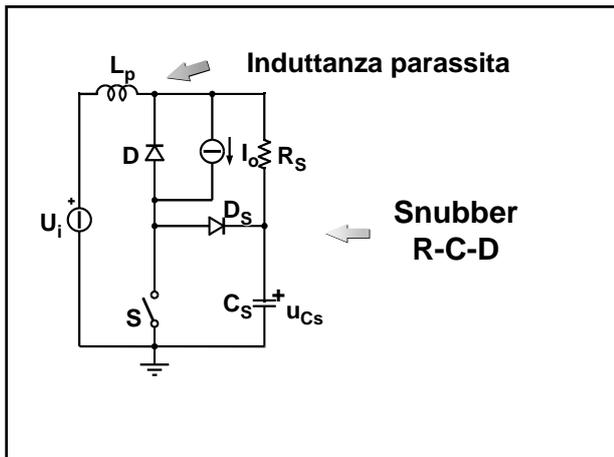
### Vincolo sui valori

Il condensatore di snubber deve scaricarsi completamente durante il minimo intervallo di "ON" dello switch:

$$t_{ONmin} > 2.3R_S C_S$$

per avere  $u_{Cs} = 0.1 U_i$

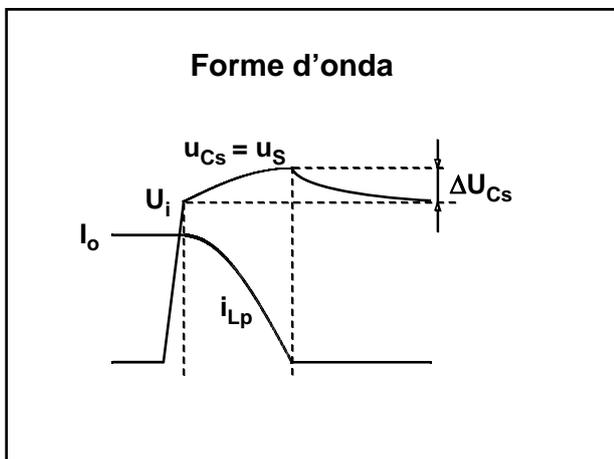
**Snubber R-C polarizzati (overvoltage snubber)**



Essendo  $C_s$  precaricato al valore  $U_i$  la sovratensione  $\Delta U_{C_s}$  si può calcolare dal bilancio energetico:

$$\frac{1}{2} C_s \Delta U_{C_s}^2 = \frac{1}{2} L_p I_o^2$$

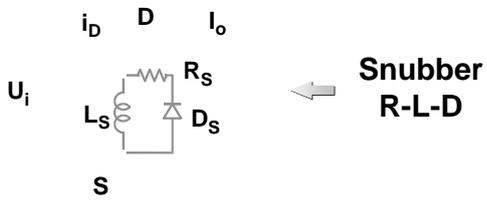
Nota: un valore elevato di  $C_s$  riduce la sovratensione sullo switch



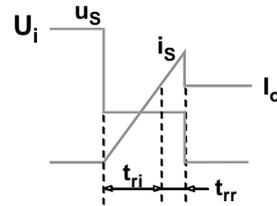
**Snubber L-R polarizzati**

- ✓ ridurre le perdite dello switch all'accensione
- ✓ ridurre la  $di/dt$  all'accensione
- ✓ ridurre il picco della corrente di recovery inverso

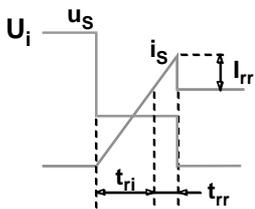
**Schema di principio**



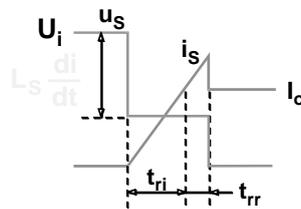
Per valori piccoli di  $L_S$  la derivata di corrente nello switch risulta ancora imposta dal componente



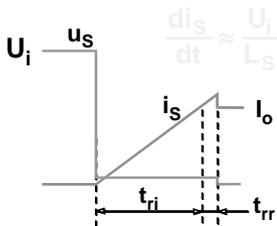
Di conseguenza il picco di corrente di recovery inverso rimane invariato



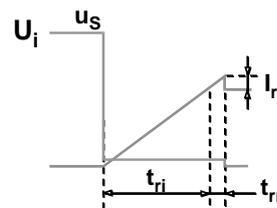
La tensione sullo switch risulta ridotta della caduta su  $L_S$

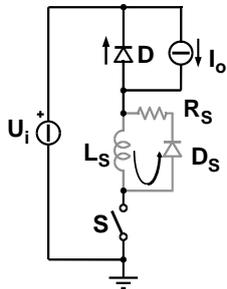


Un valore maggiore di  $L_S$  comporta una derivata di corrente imposta da  $L_S$

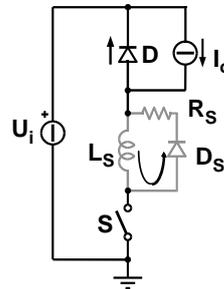


Di conseguenza il picco di corrente di recovery inverso viene ridotto





Allo spegnimento dello switch l'energia immagazzinata in  $L_S$  viene dissipata nella resistenza  $R_S$



Questo causa una sovratensione sullo switch pari a  $R_S \cdot I_o$

#### Vincolo sui valori

L'induttanza di snubber deve scaricarsi completamente durante il minimo intervallo di "OFF" dello switch:

$$t_{OFFmin} > 2.3 \frac{L_S}{R_S}$$

per avere  $i_{L_S} = 0.1 I_o$

#### Conclusioni (1)

- I tempi finiti nei passaggi ON ---> OFF e OFF ---> ON causano perdite di commutazione proporzionali alla frequenza
- Il fenomeno del reverse recovery dei diodi causa un aumento delle perdite di commutazione e un aumento degli stress di corrente

#### Conclusioni (2)

- La presenza di elementi parassiti nei convertitori provoca una maggiore sollecitazione in tensione e corrente dei dispositivi e la generazione di oscillazioni ad alta frequenza (EMI)
- Per ridurre tali problemi si possono utilizzare circuiti snubber