

E

I

Interruttori elettronici di potenza

1

1

Interruttori elettronici di potenza

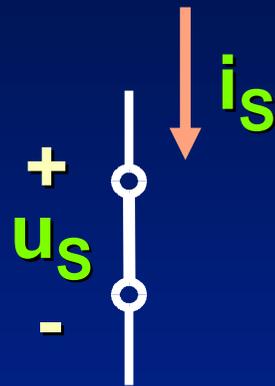
Caratteristiche statiche

Conduzione: S on

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

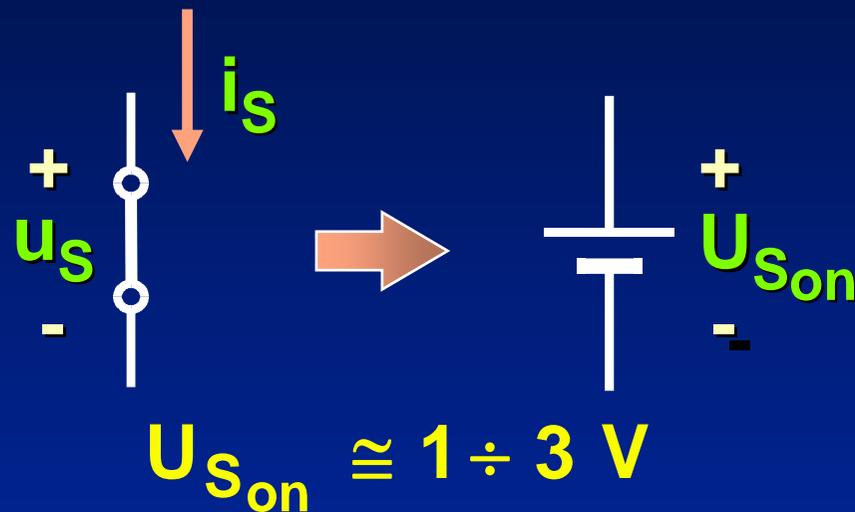
Conduzione: S on



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

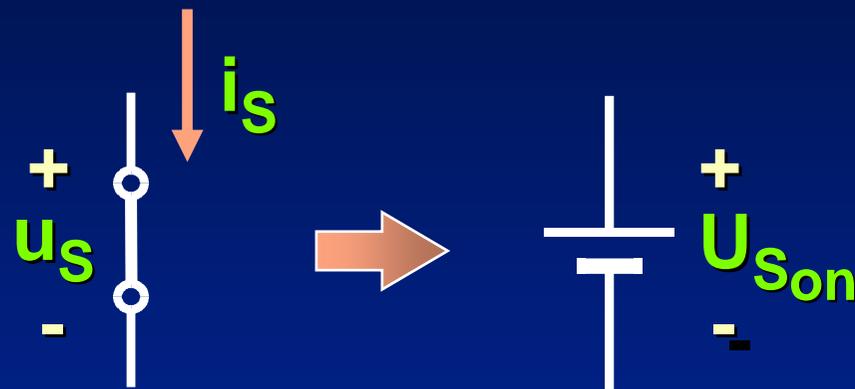
Conduzione: S on



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

Conduzione: S on



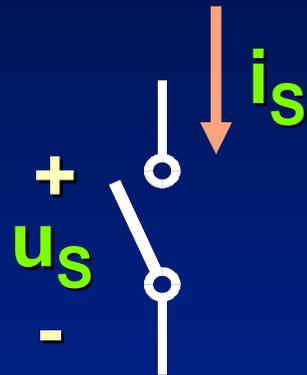
$$U_{S_{on}} \cong 1 \div 3 \text{ V}$$

$$P_{on} > 0$$

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

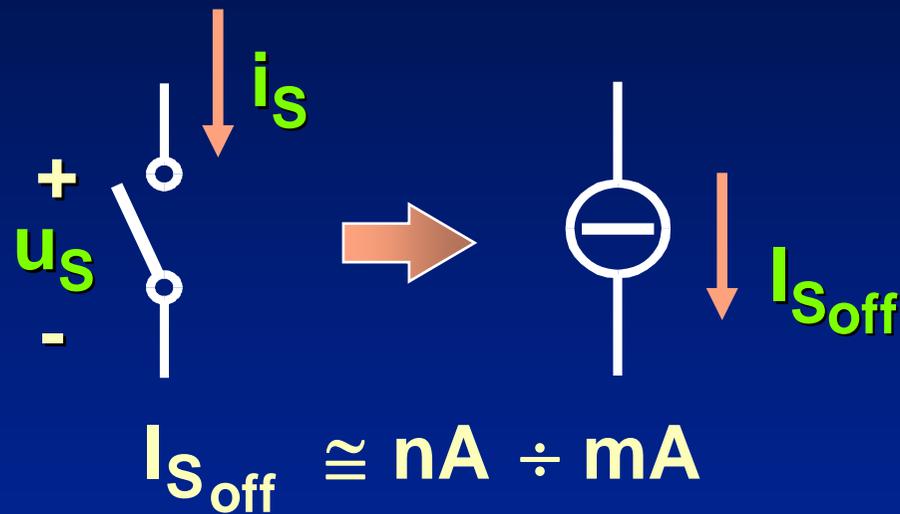
Interdizione: S off



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

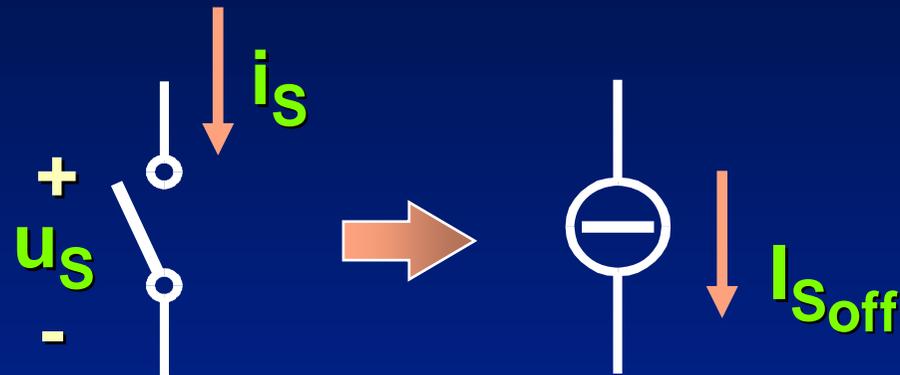
Interdizione: S off



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

Interdizione: S off



$$I_{Soff} \cong \text{nA} \div \text{mA}$$

$$P_{off} \cong 0$$

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

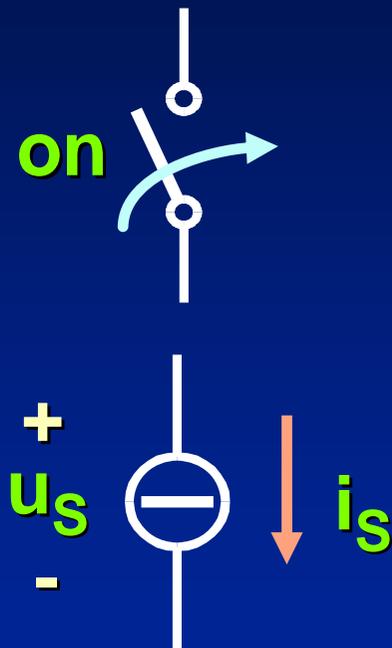
Commutazione in accensione:



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

Commutazione in accensione:

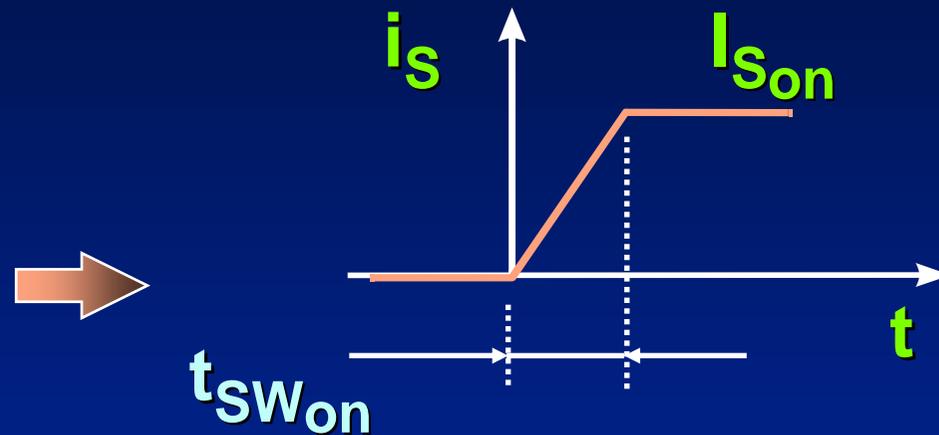
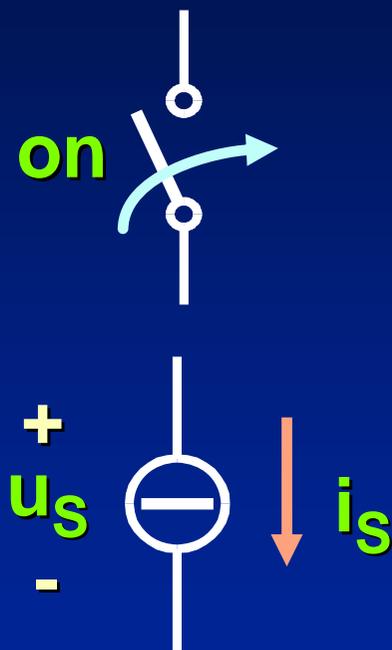


Durante la commutazione,
l'interruttore elettronico è un
generatore di corrente a
rampa crescente

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

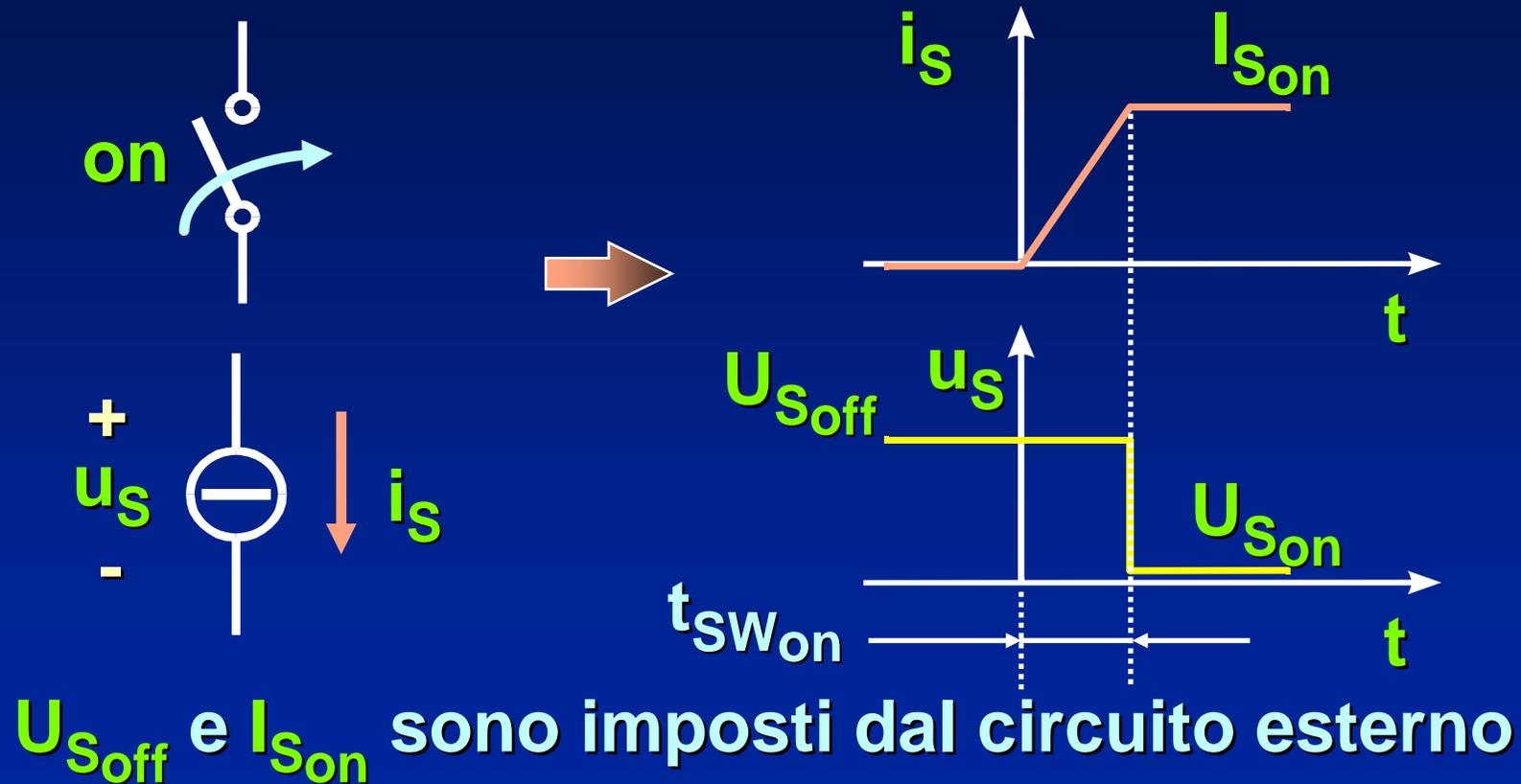
Commutazione in accensione:



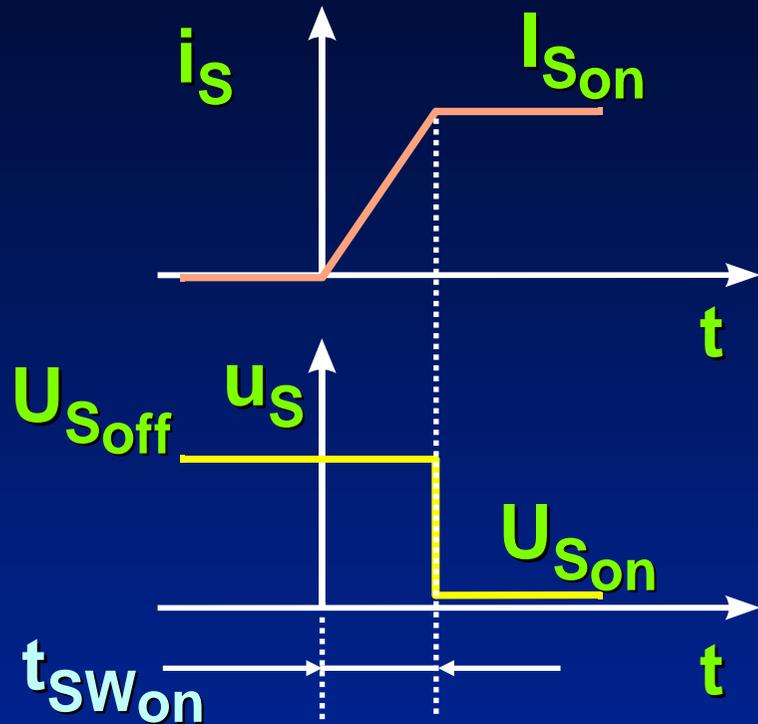
Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

Commutazione in accensione:



Interruttori elettronici



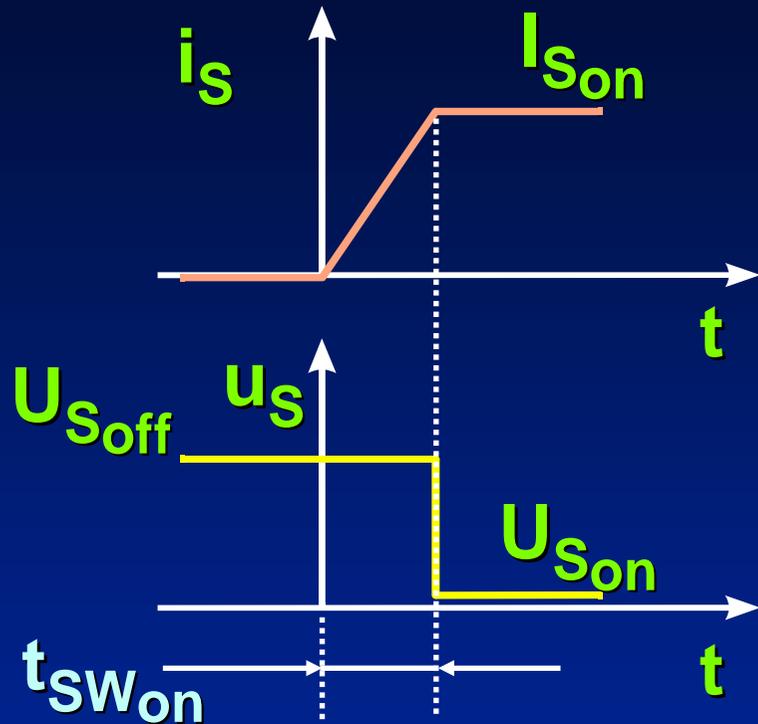
Commutazione
in accensione:

Energia dissipata in
ogni commutazione

$$W_{sw_{on}} = \int_0^{t_{sw_{on}}} u_s i_s dt$$

$$= \frac{U_{s_{off}} I_{s_{on}}}{2} t_{sw_{on}}$$

Interruttori elettronici



Commutazione
in accensione:

Potenza dissipata in
commutazione

$$P_{SW_{on}} = f_s \cdot W_{SW_{on}}$$

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

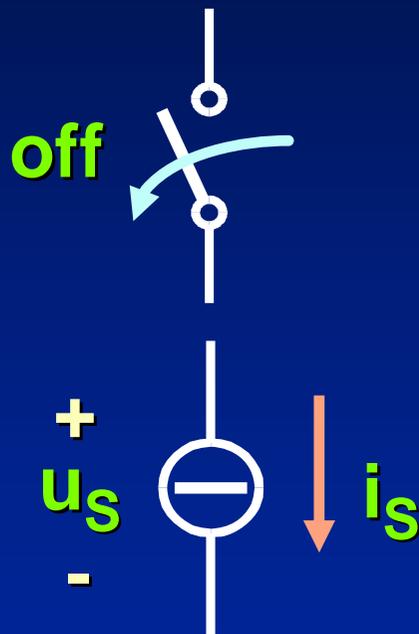
Commutazione in spegnimento:



Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

Commutazione in spegnimento:

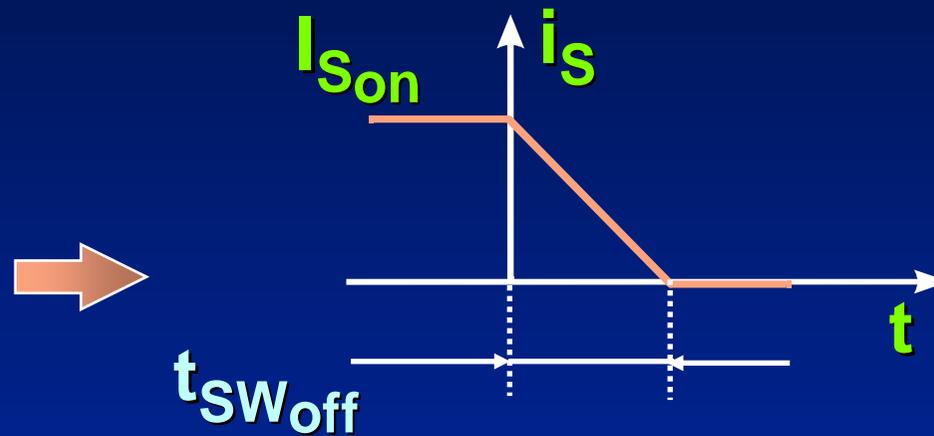
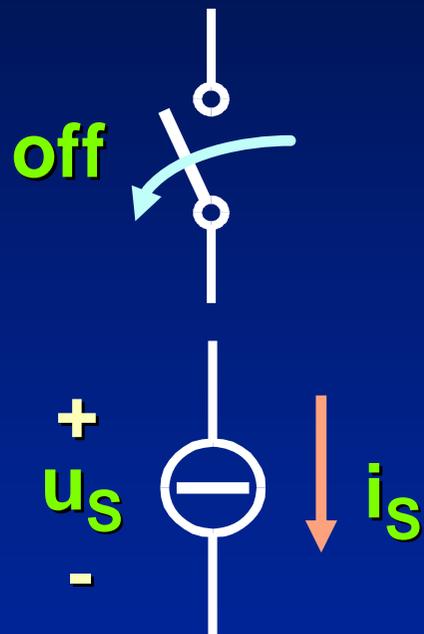


Durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa decrescente

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche dinamiche

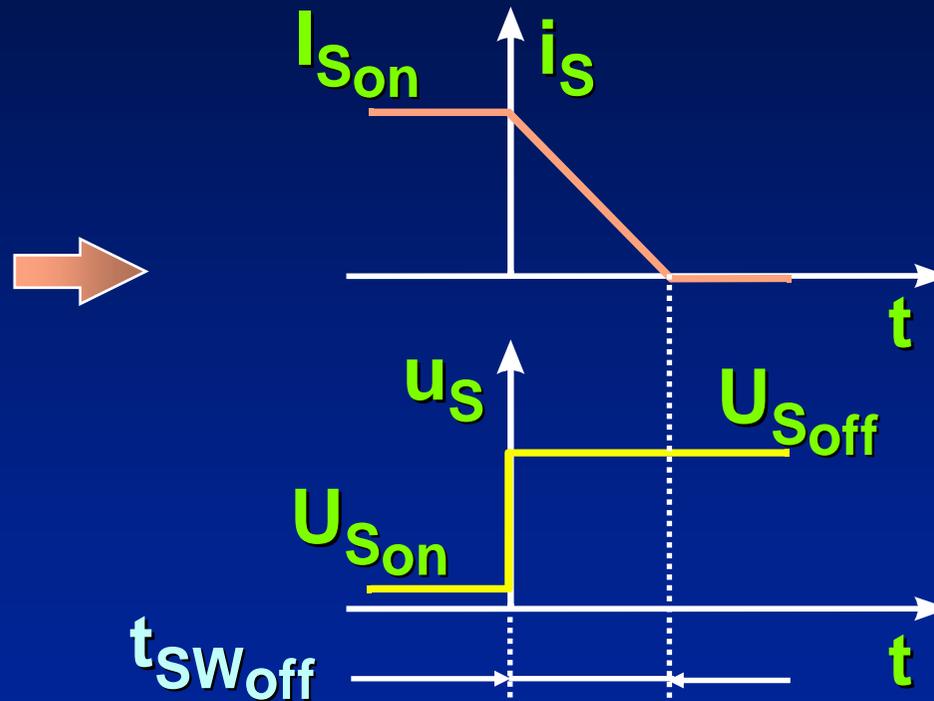
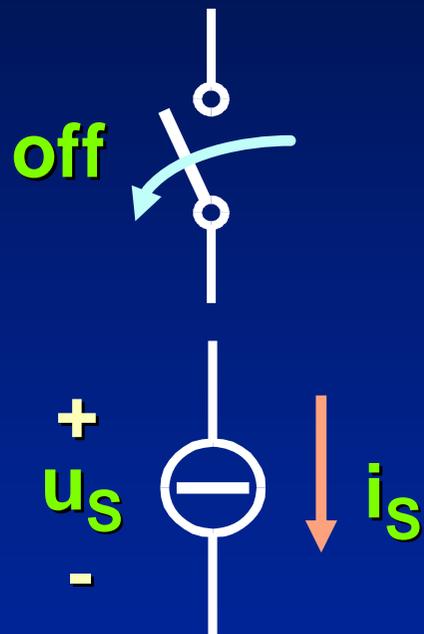
Commutazione in spegnimento:



Interruttori elettronici di potenza

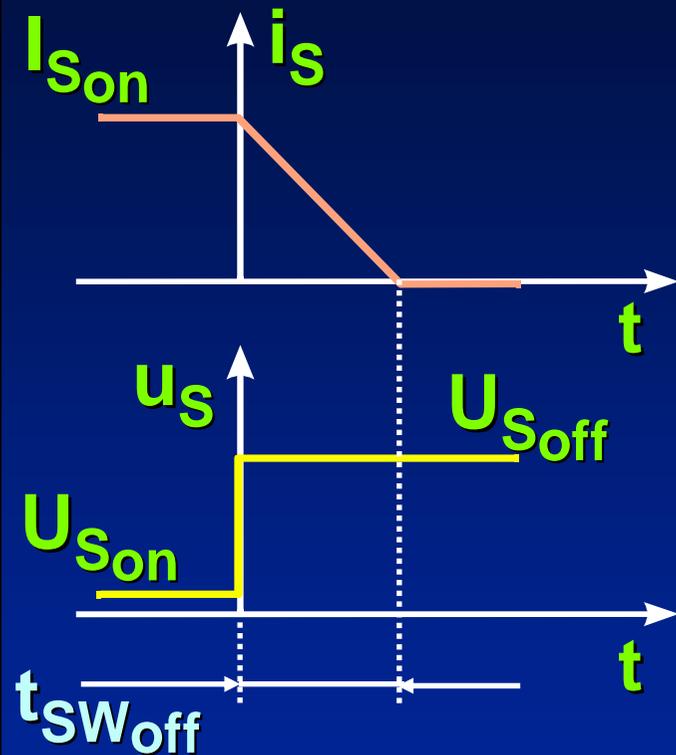
Caratteristiche dinamiche

Commutazione in spegnimento:



U_{Soff} e I_{Son} sono imposti dal circuito esterno

Interruttori elettronici



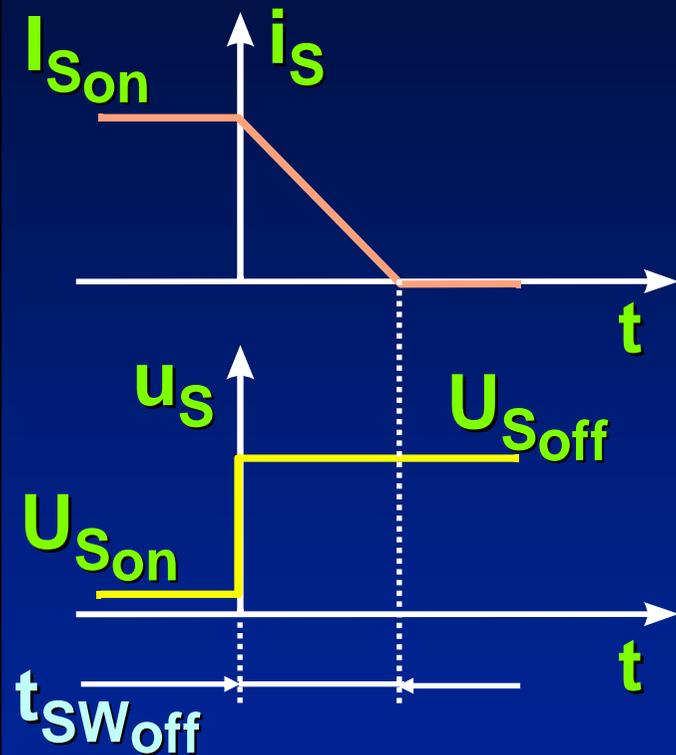
Commutazione
in spegnimento:

Energia dissipata in
ogni commutazione

$$W_{SW_{off}} = \int_0^{t_{SW_{off}}} u_s i_s dt$$

$$= \frac{U_{S_{off}} I_{S_{on}}}{2} t_{SW_{off}}$$

Interruttori elettronici



Commutazione
in spegnimento:

Potenza dissipata in
commutazione

$$P_{SW_{off}} = f_s \cdot W_{SW_{off}}$$

Interruttori elettronici

- Le perdite di commutazione sono circa proporzionali ad $I_{S_{on}}$, $U_{S_{off}}$ ed f_S
- Le perdite di conduzione sono circa proporzionali ad $I_{S_{on}}$ (ed indipendenti da f_S)
- Le perdite di interdizione sono trascurabili

Interruttori elettronici

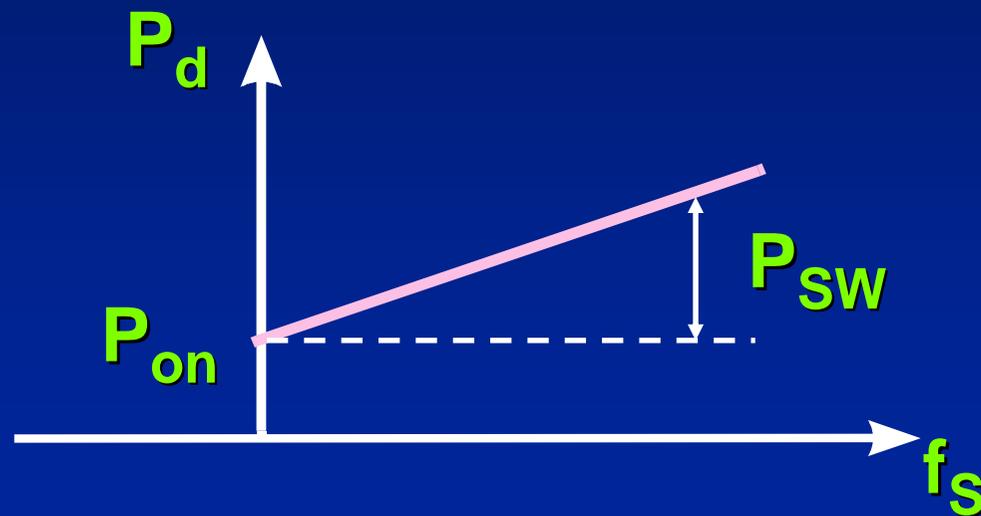
Perdite complessive:

$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{SW_{on}} + P_{SW_{off}}$$

Interruttori elettronici

Perdite complessive:

$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{SW_{on}} + P_{SW_{off}}$$



Interruttore ideale

Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti

Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
 - I tempi di commutazione degli interruttori sono infatti molto più piccoli dei tempi con cui evolvono le grandezze del circuito

Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
 - I tempi di commutazione degli interruttori sono infatti molto più piccoli dei tempi con cui evolvono le grandezze del circuito
 - Le cadute di tensione in conduzione sono solitamente trascurabili rispetto alle tensioni in gioco nel circuito

Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
- I circuiti vengono dunque analizzati, in prima approssimazione, assumendo interruttori ideali

Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
- I circuiti vengono dunque analizzati, in prima approssimazione, assumendo interruttori ideali
- **Gli effetti delle nonidealità (in particolare le perdite) vengono valutati in seconda approssimazione**

Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche statiche

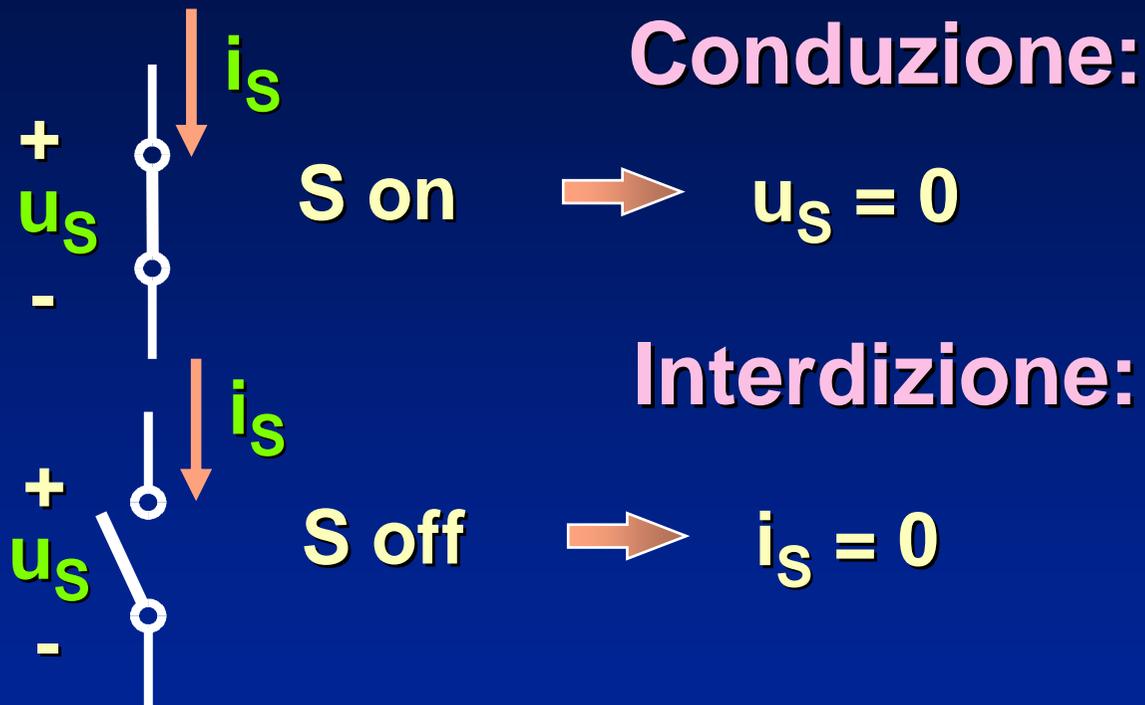
Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche statiche



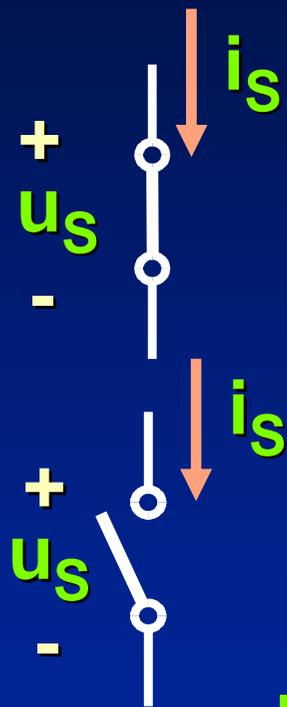
Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche statiche



Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche statiche



Conduzione:

$$S \text{ on} \rightarrow u_s = 0 \rightarrow P_{\text{on}} = u_s i_s = 0$$

Interdizione:

$$S \text{ off} \rightarrow i_s = 0 \rightarrow P_{\text{off}} = u_s i_s = 0$$

In ambo i modi di funzionamento
l'interruttore non dissipa potenza

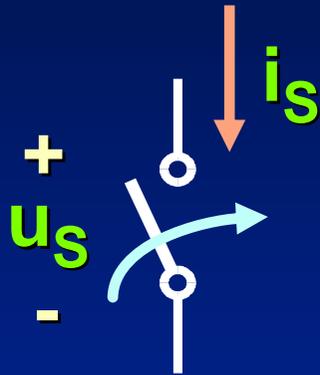
Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

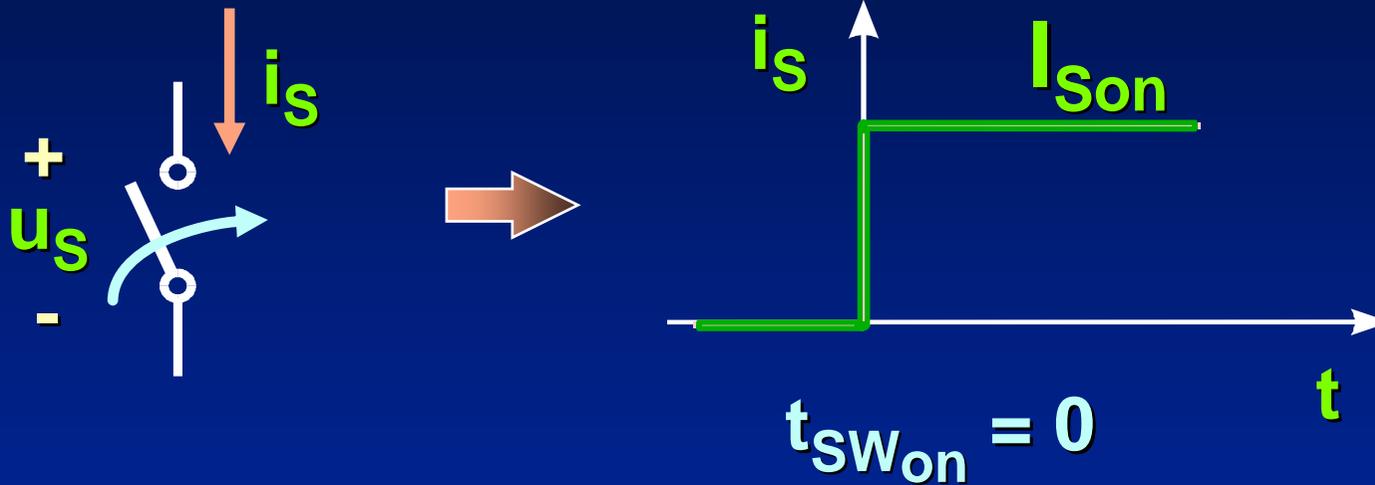
Commutazione in accensione:



Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

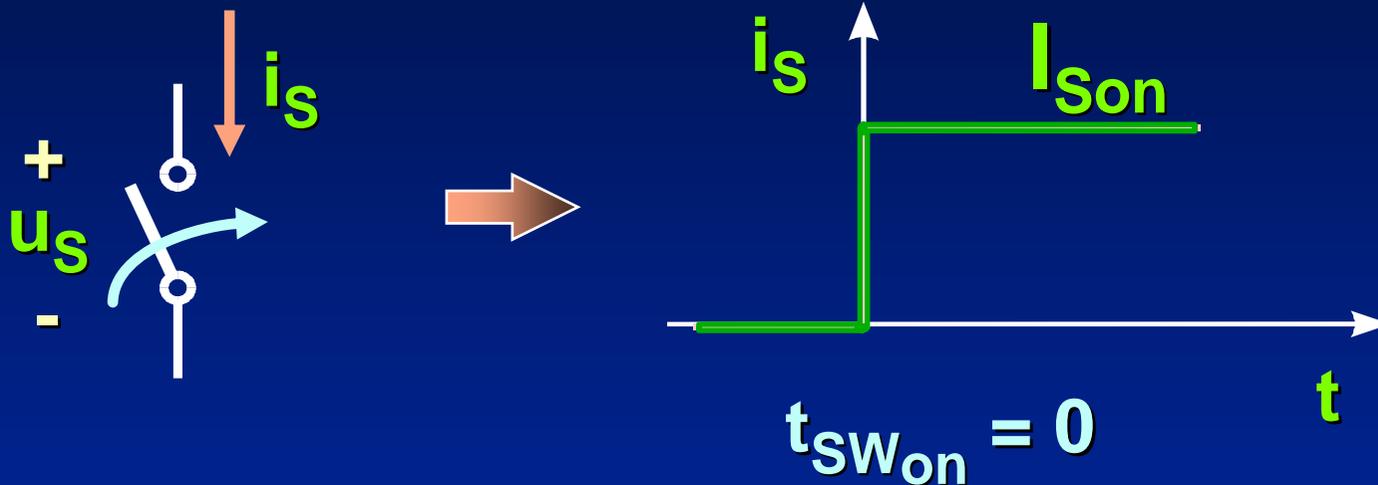
Commutazione in accensione:



Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

Commutazione in accensione:

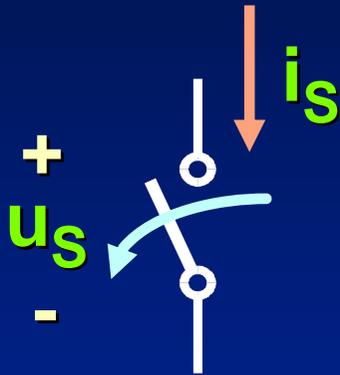


$$W_{SW_{on}} = \int_0^{t_{SW_{on}}} u_s \cdot i_s dt = 0$$

Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

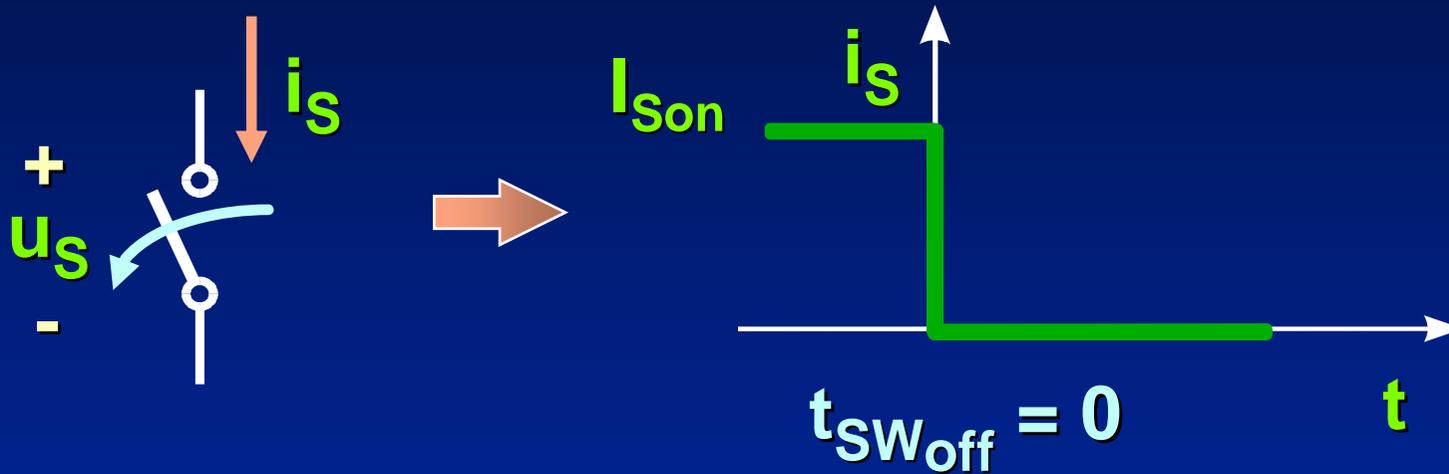
Commutazione in spegnimento:



Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

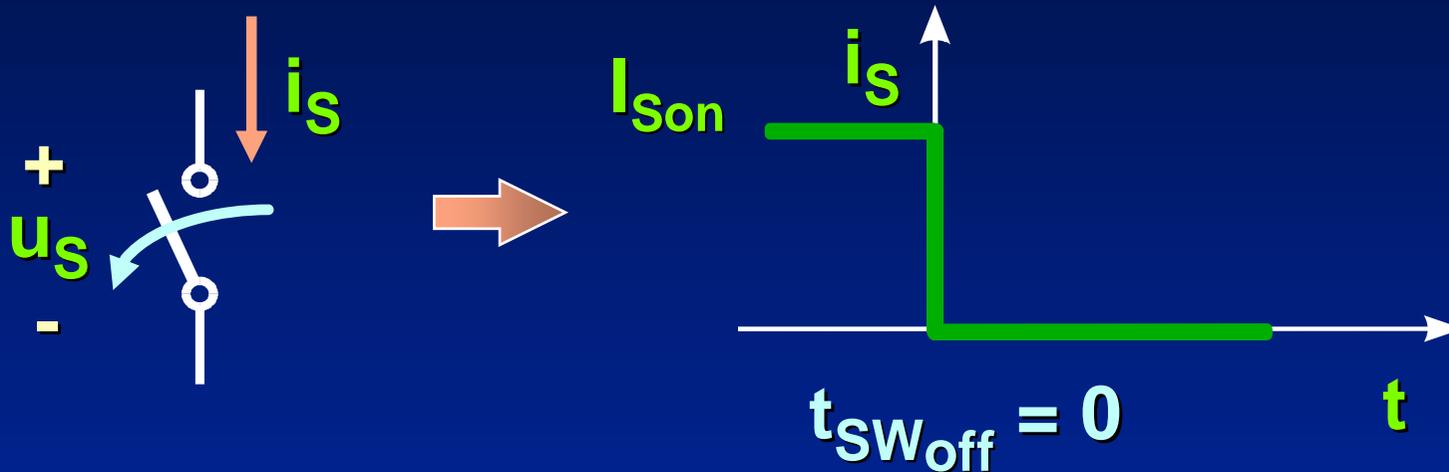
Commutazione in spegnimento:



Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

Commutazione in spegnimento:



$$W_{SW_{off}} = \int_0^{t_{SW_{off}}} u_s \cdot i_s dt = 0$$

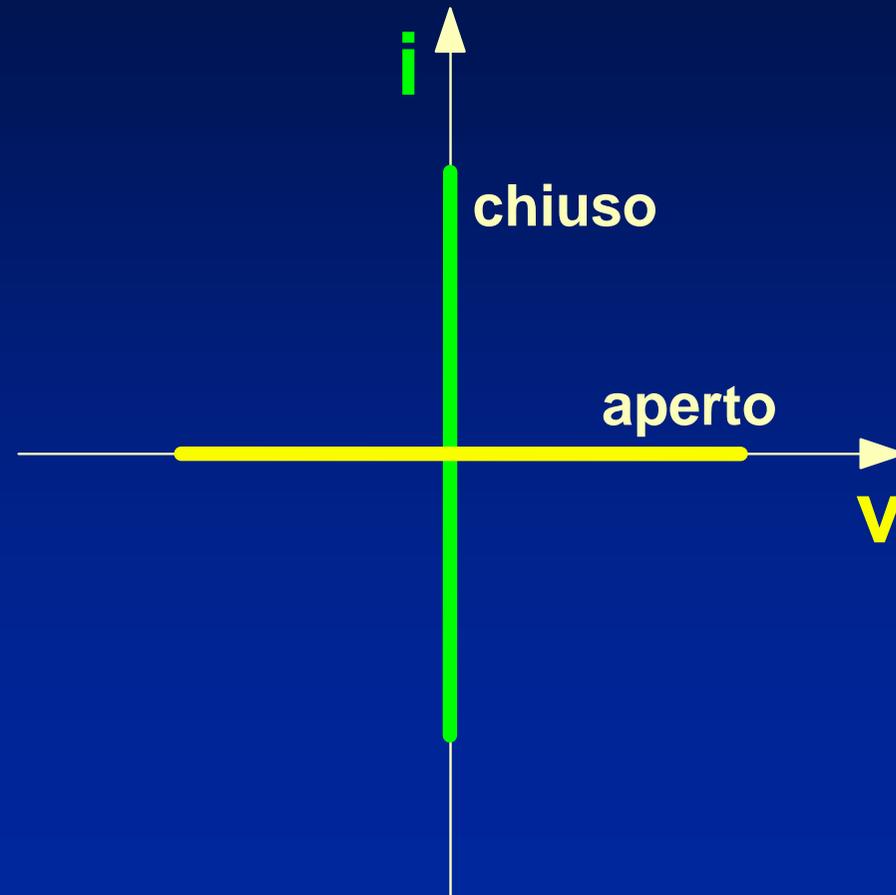
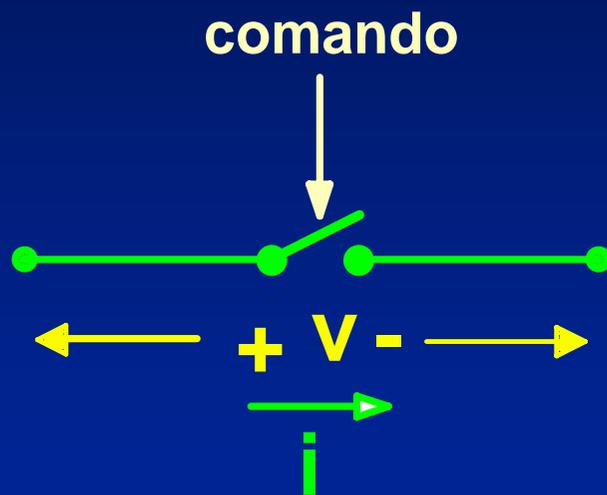
Interruttori elettronici ideali

- **Caduta di tensione in conduzione nulla**
- **Corrente in interdizione nulla**
- **Tempi di commutazione nulli**
- **Nessuna potenza dissipata**

1.2 – Famiglie di interruttori

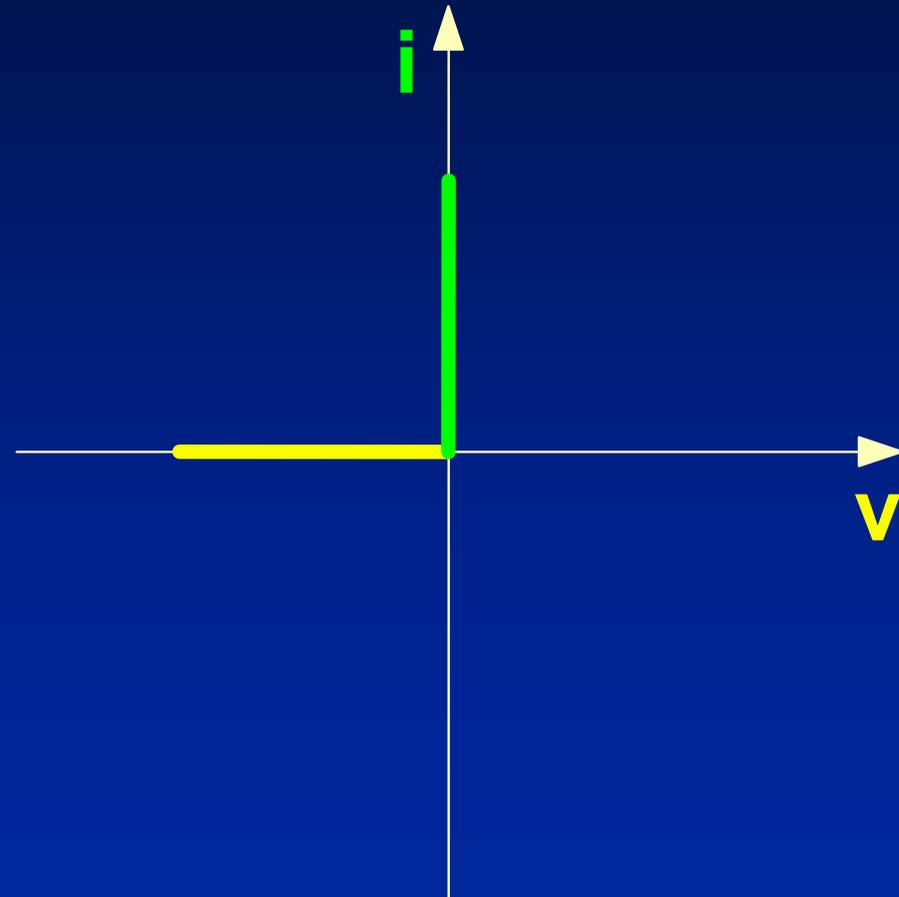
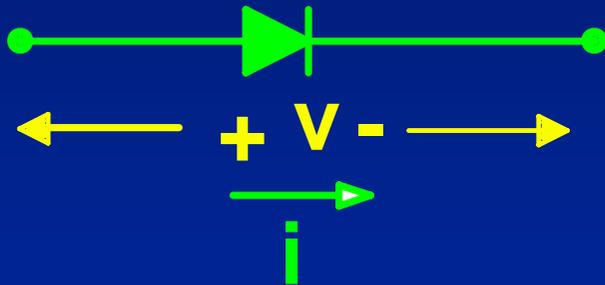
Interruttore ideale

Simbolo e caratteristica statica



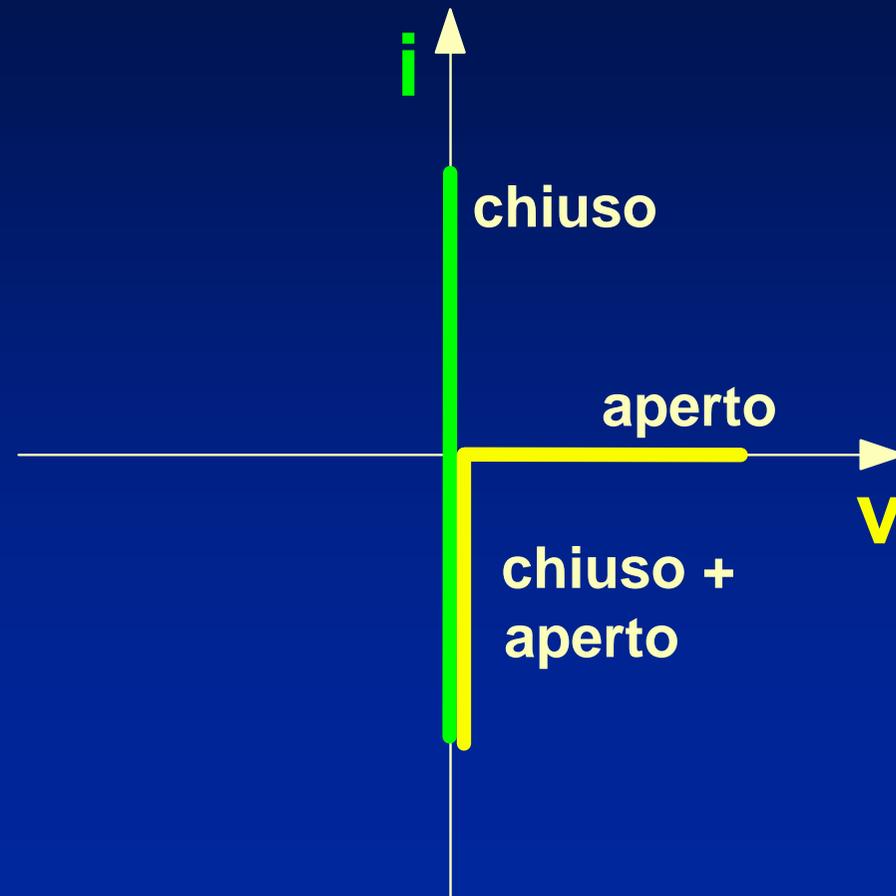
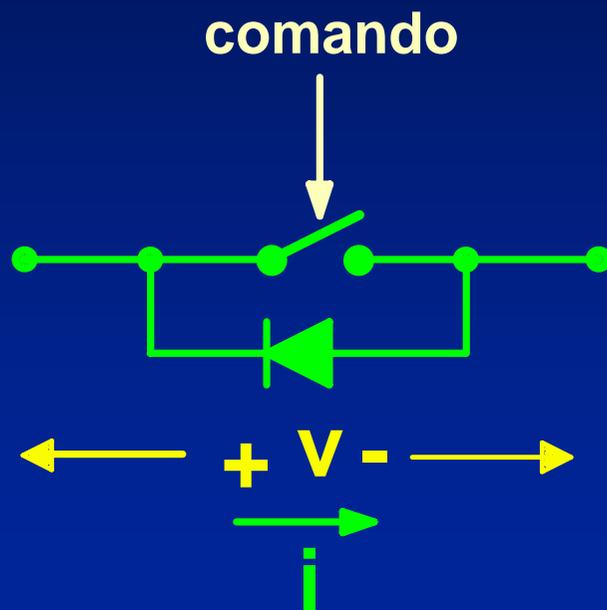
Diodo ideale

Simbolo e caratteristica statica



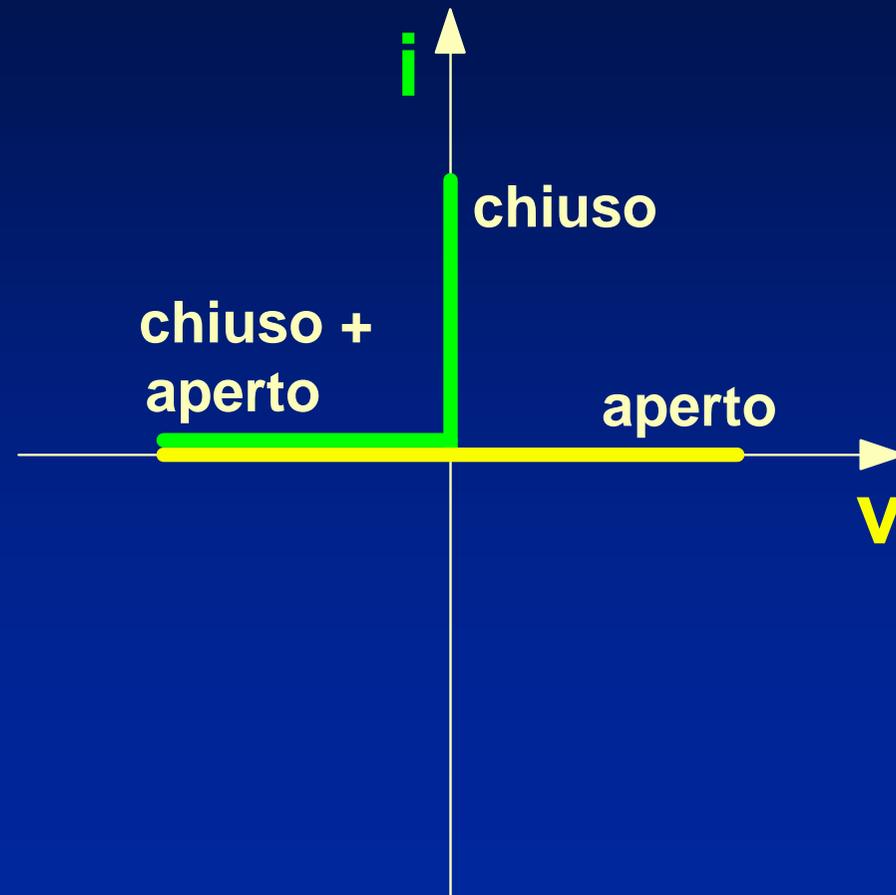
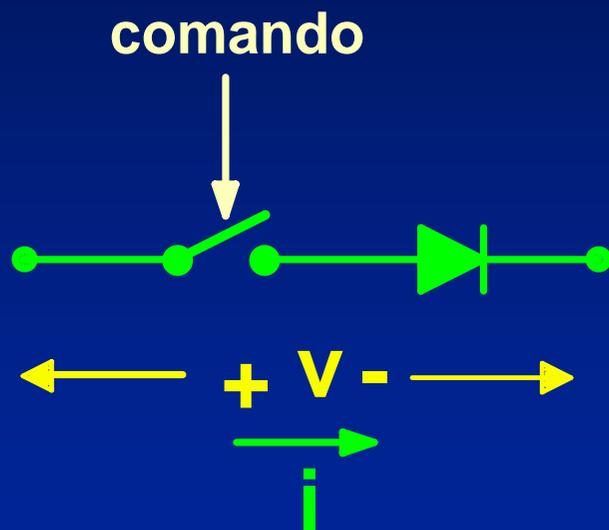
Interruttore ideale a conduzione inversa

Simbolo e caratteristica statica



Interruttore ideale a blocco inverso

Simbolo e caratteristica statica



1.3 - Interruttori reali a semiconduttore

Interruttori reali a semiconduttore

I **dispositivi attivi di commutazione a semiconduttore**, usati come **interruttori**, si discostano dal comportamento dell'interruttore ideale per molti aspetti diversi.

Perdite di conduzione

Perdite di dispersione

Perdite di commutazione

Interruttori reali a semiconduttore

In commutazione:

tensione e la **corrente non** passano **istantaneamente** da zero al massimo o viceversa, ma impiegano **tempi finiti** (“**tempi di commutazione**”).

La potenza media dissipata nelle commutazioni **non è** di solito trascurabile.

Essa costituisce il **principale** fattore che **limita** la **frequenza di operazione** degli interruttori reali

Interruttori reali a semiconduttore

I dispositivi a semiconduttore più usati in Elettronica di potenza **Diodi di potenza e Diodi Schottky**, **MOSFET** di potenza, (**Transistori Bipolari** soprattutto Darlington), **IGBT**, **SCR** e **TRIAC**, **GTO**, **IGCT**. **Differenza principali:**
velocità di commutazione
Massime tensioni, correnti e potenze dissipabili

MOSFET **piccole potenze** ed **elevate frequenze**

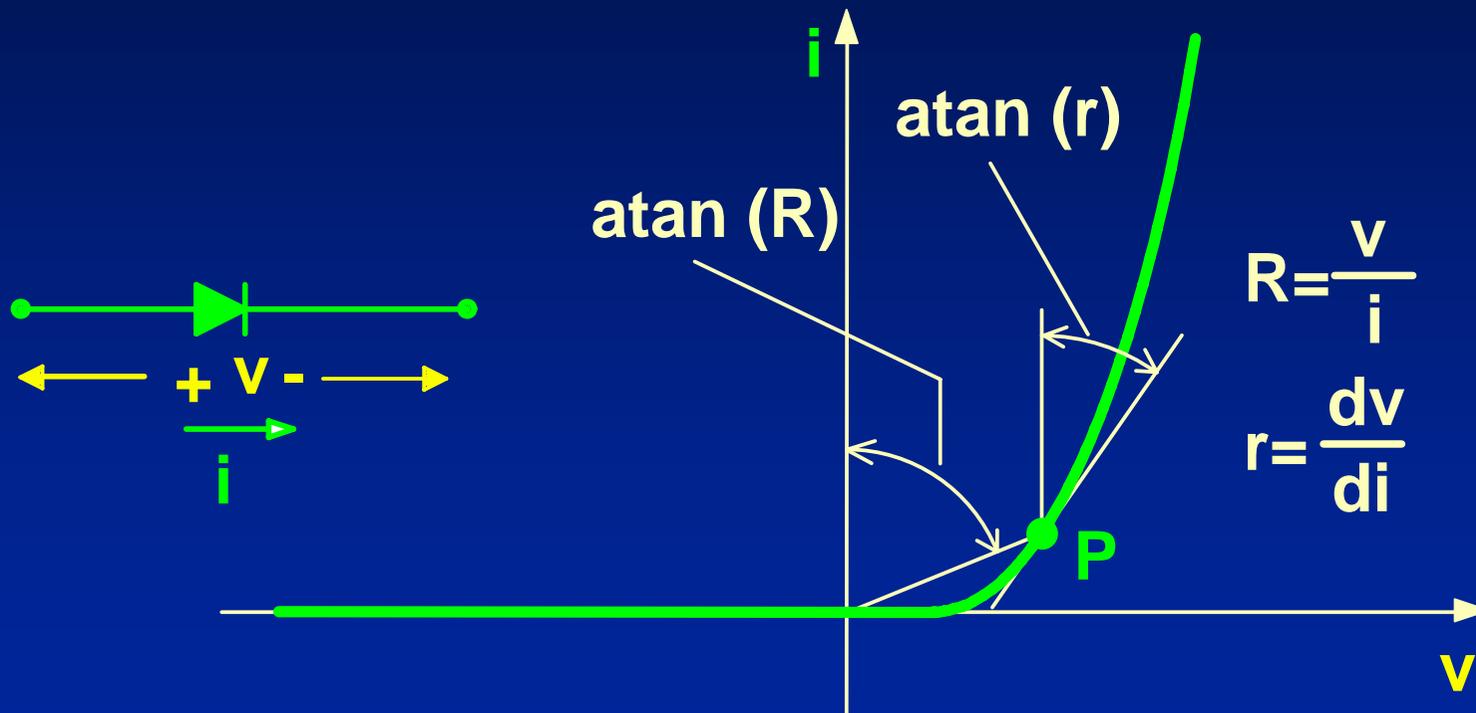
IGBT **ampia zona intermedia di potenze e frequenze**

SCR, GTO **alte potenze e basse frequenze**

1.4 - Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

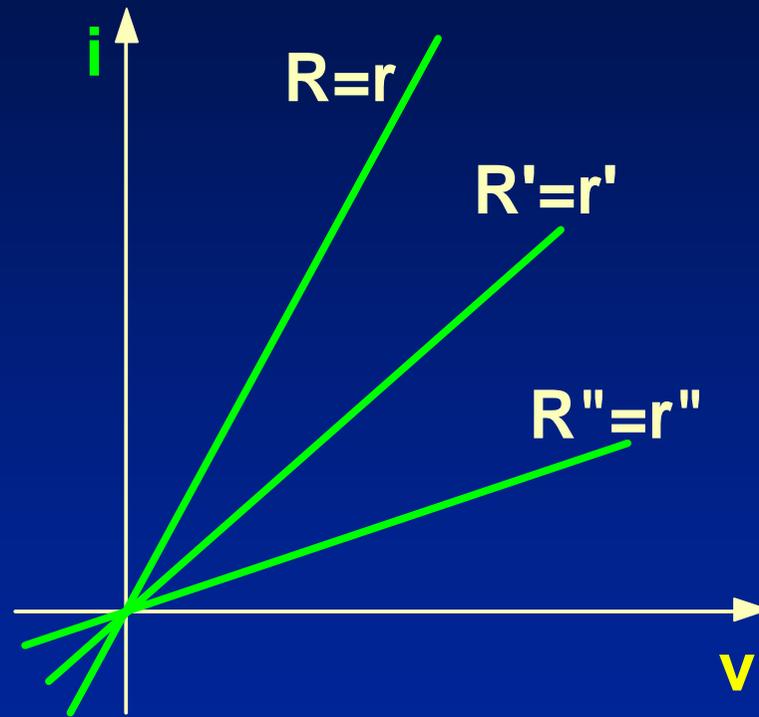
Resistenza e resistenza differenziale

Resistenza e
resistenza differenziale di un diodo



Resistenza e resistenza differenziale

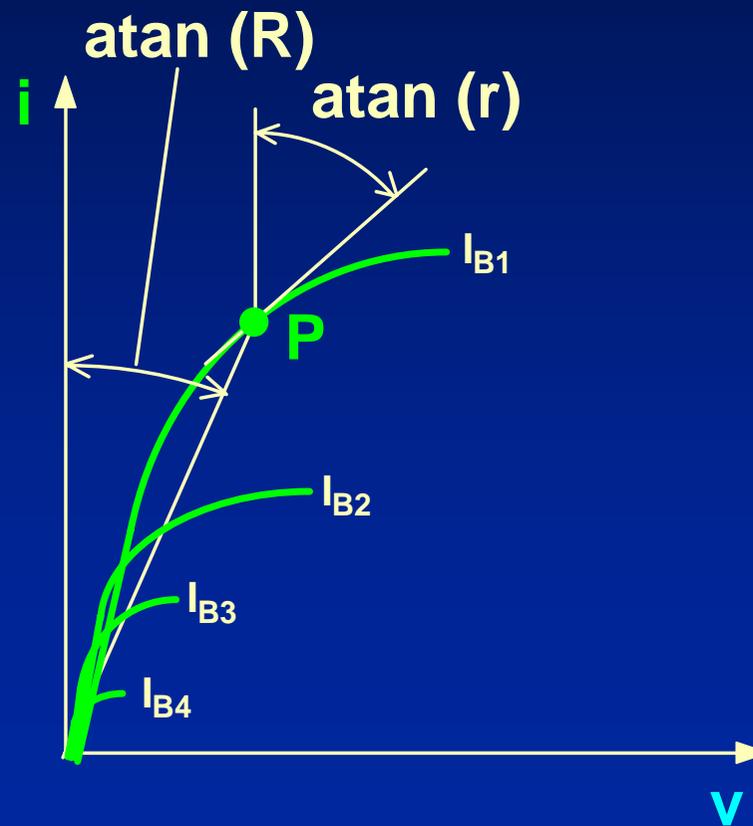
Caratteristiche lineari di resistenze ohmiche



$$R = \frac{v}{i} = r = \frac{dv}{di} = \text{costante}$$

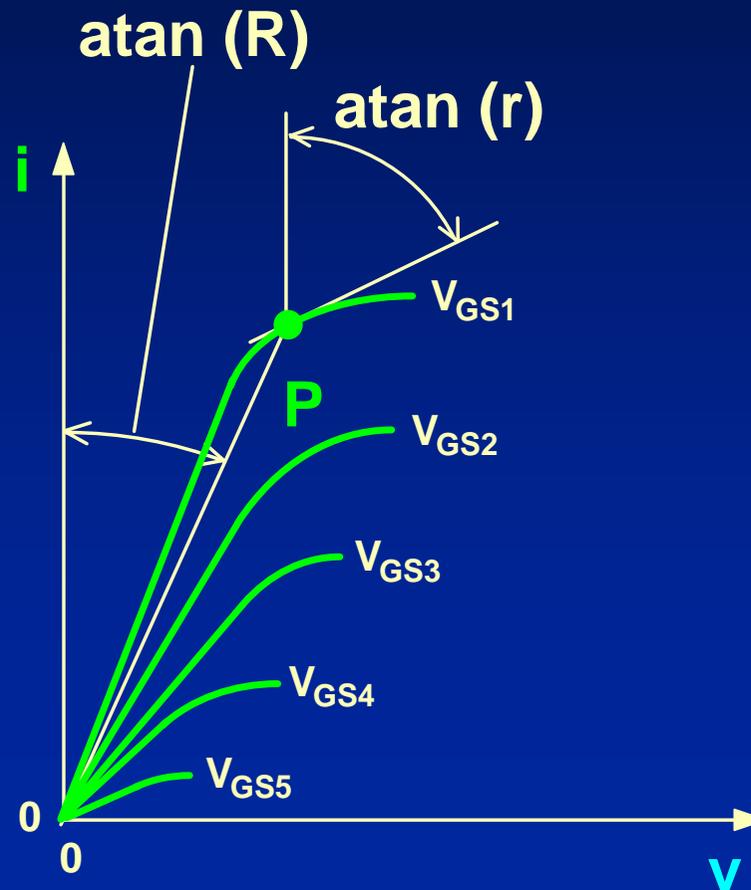
Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

Caratteristiche di BJT per diversi valori della corrente di base I_B



Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

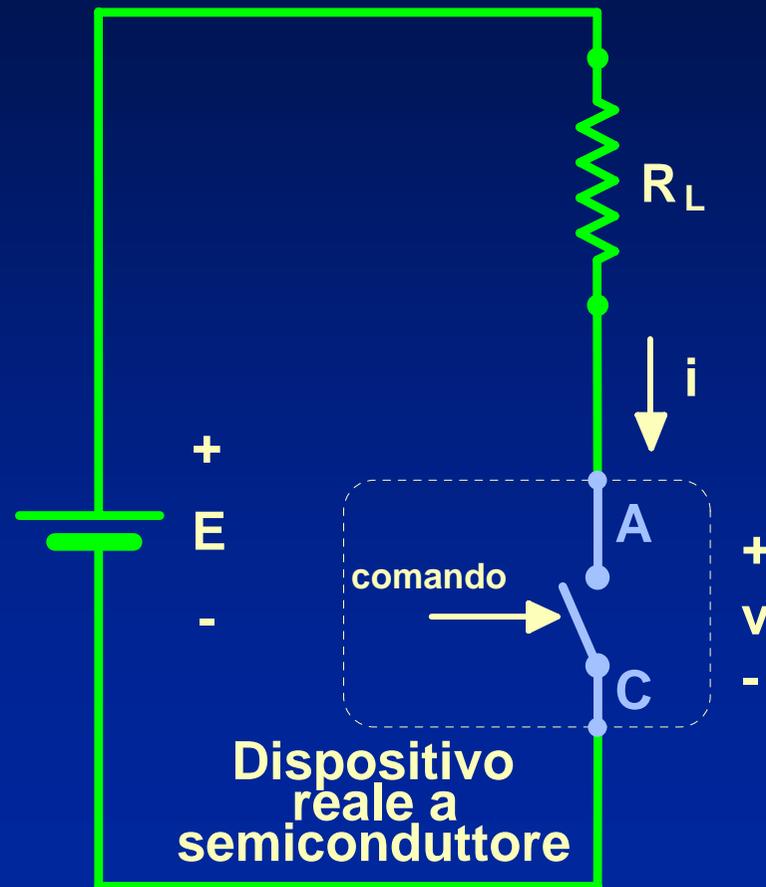
Caratteristiche di MOSFET per diversi valori della tensione Gate/Source V_{GS}



1.5 - Commutazioni dei dispositivi reali

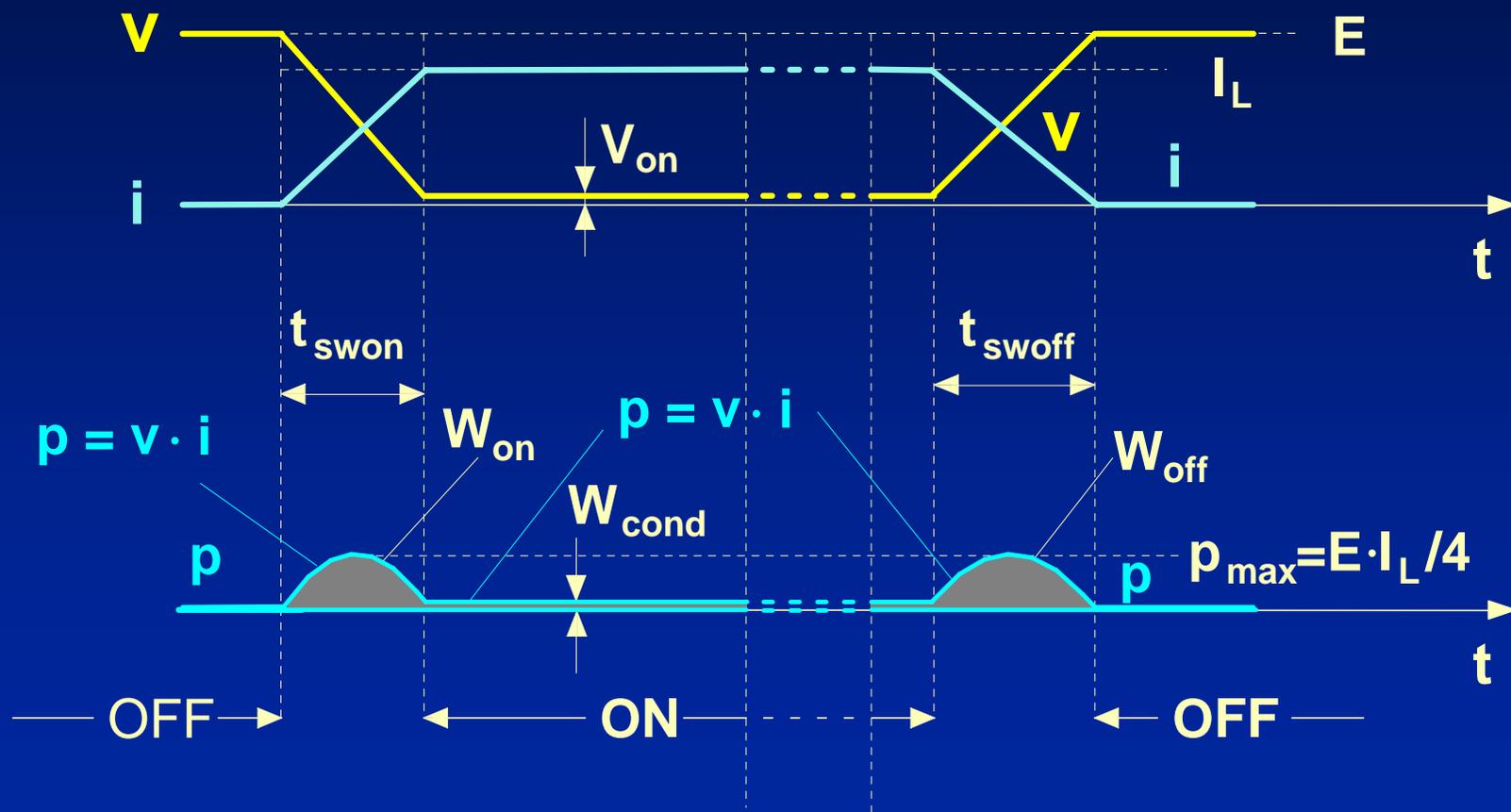
Commutazioni dei dispositivi reali

Circuito di prova con carico resistivo



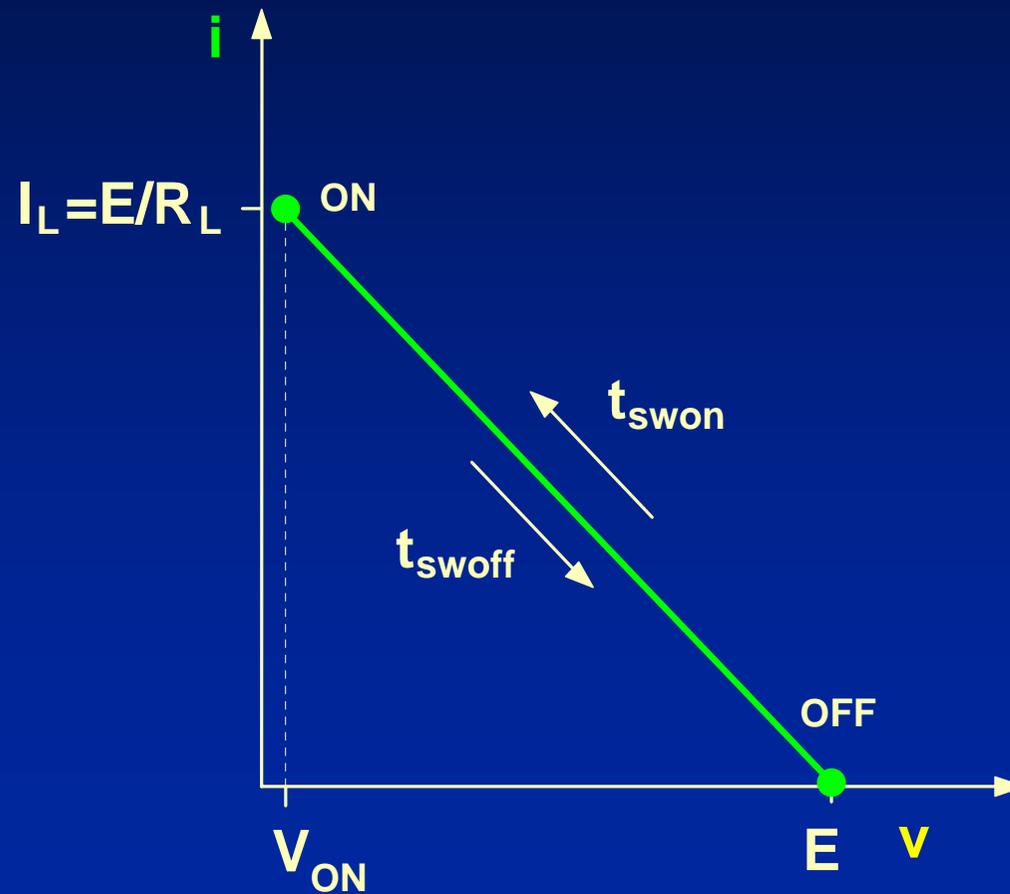
Commutazioni dei dispositivi reali

Commutazioni con carico resistivo



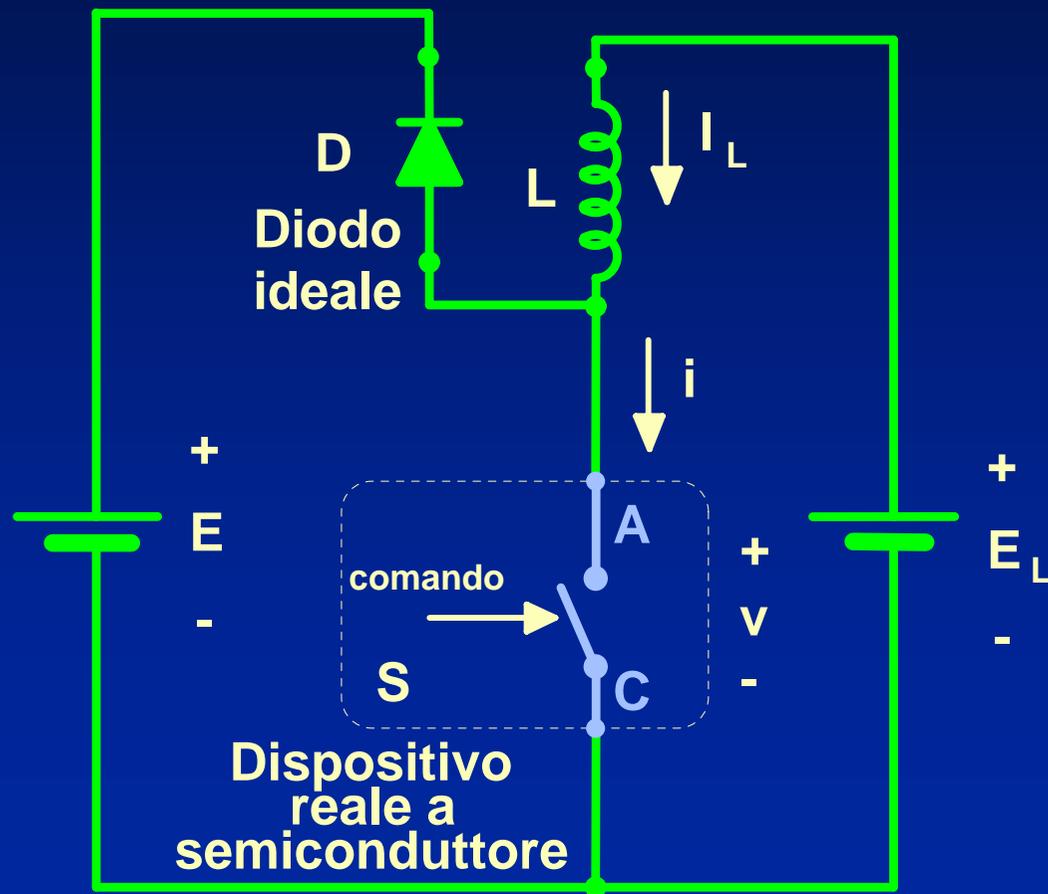
Commutazioni dei dispositivi reali

Stati e percorsi di commutazione
con carico resistivo



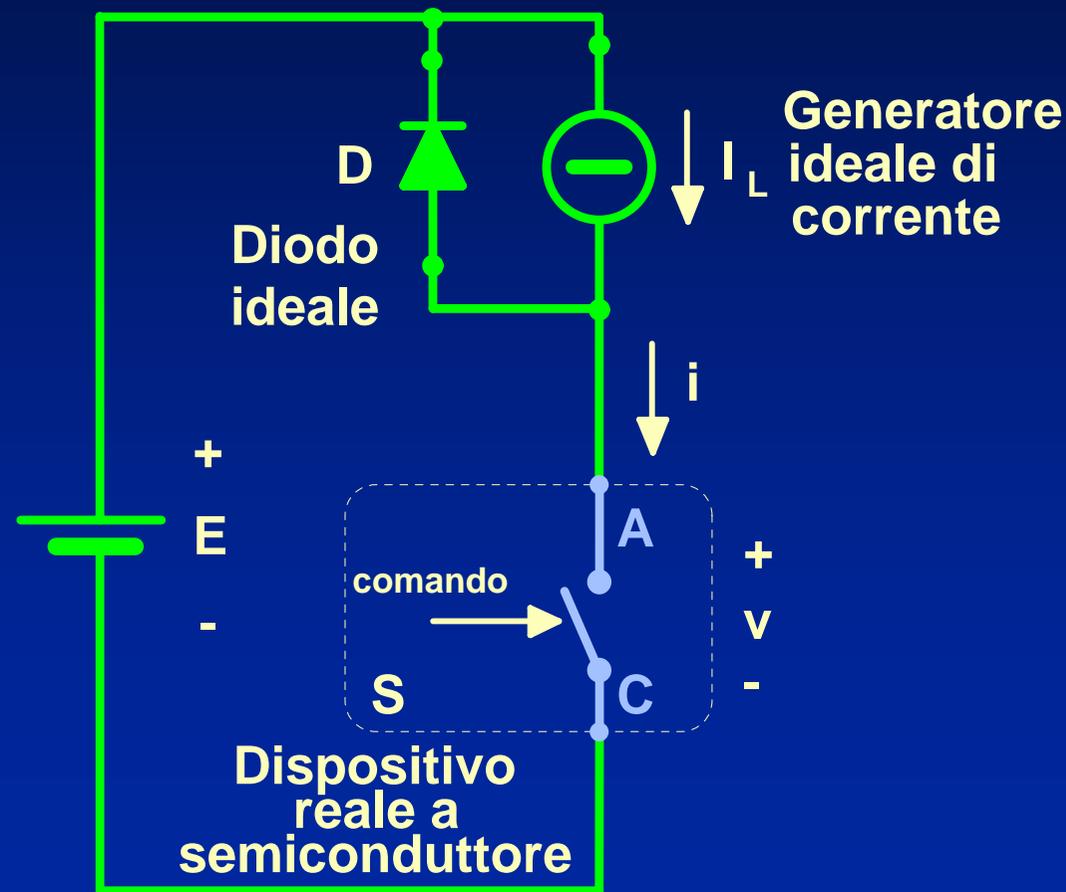
Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

Circuito di prova con carico induttivo



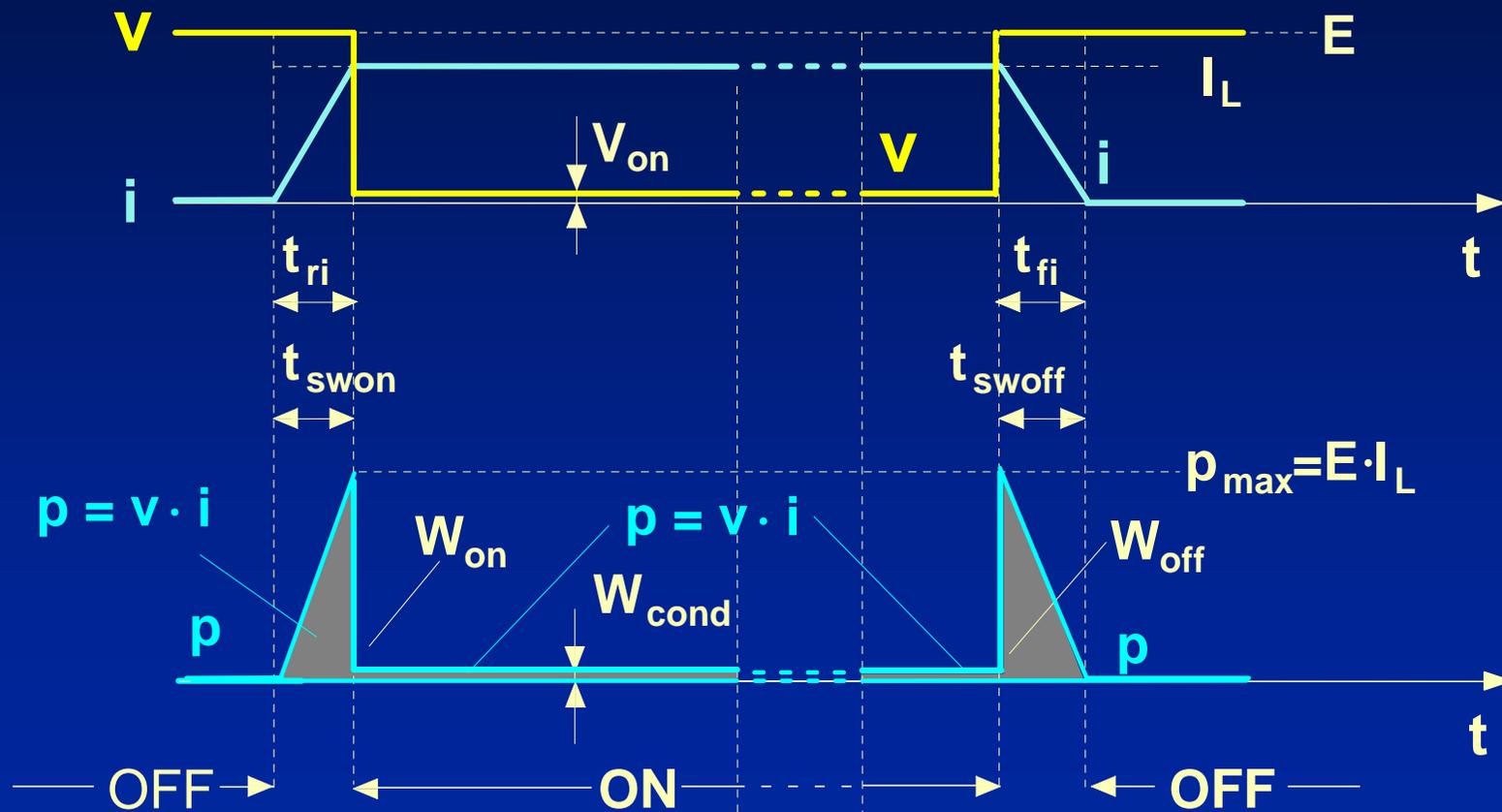
Commutazioni dei dispositivi reali

Circuito di prova con carico di tipo induttivo
con generatore ideale di corrente



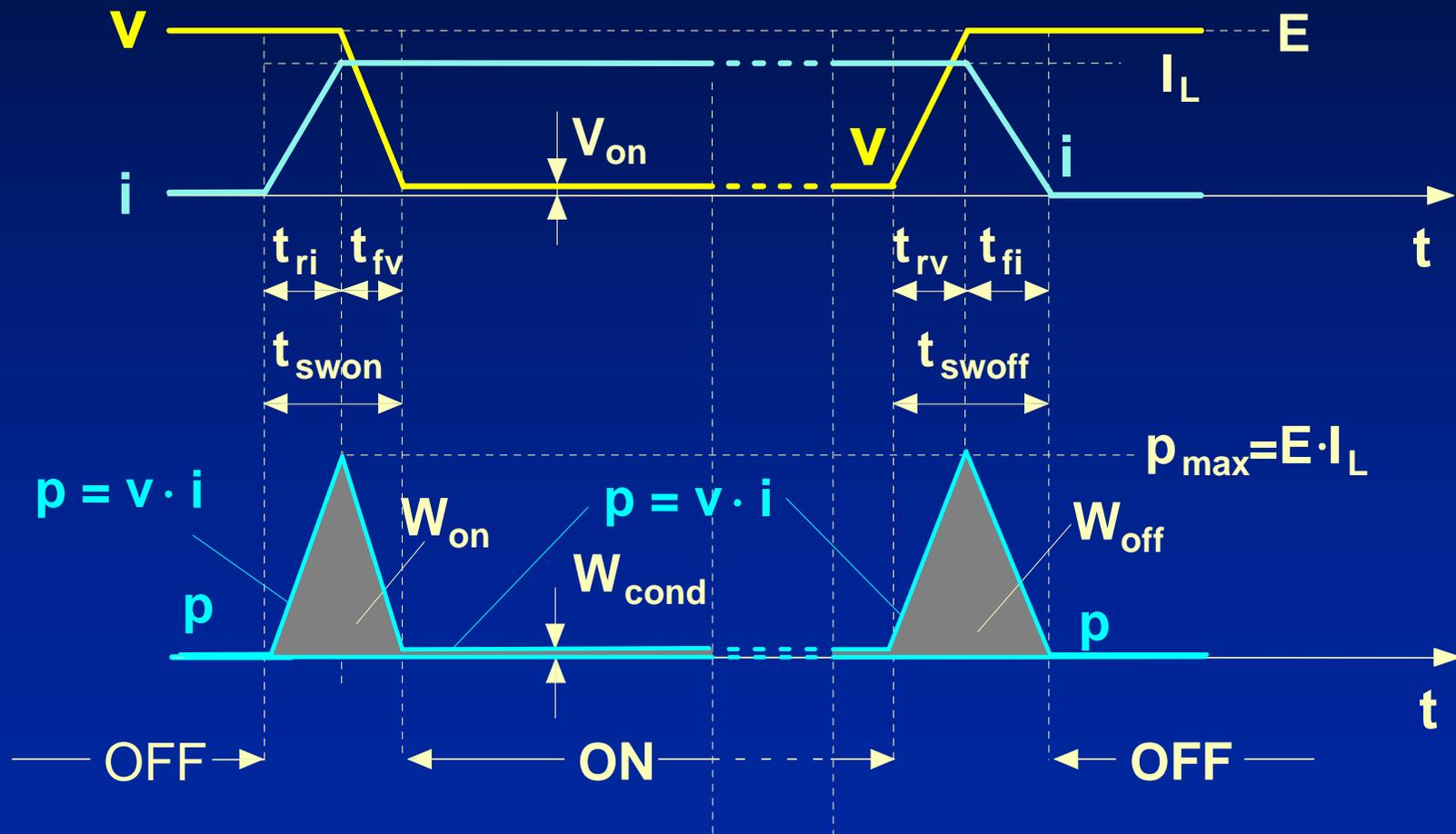
Commutazioni dei dispositivi reali

Commutazioni con carico di tipo induttivo
(senza effetti delle capacità parassite)



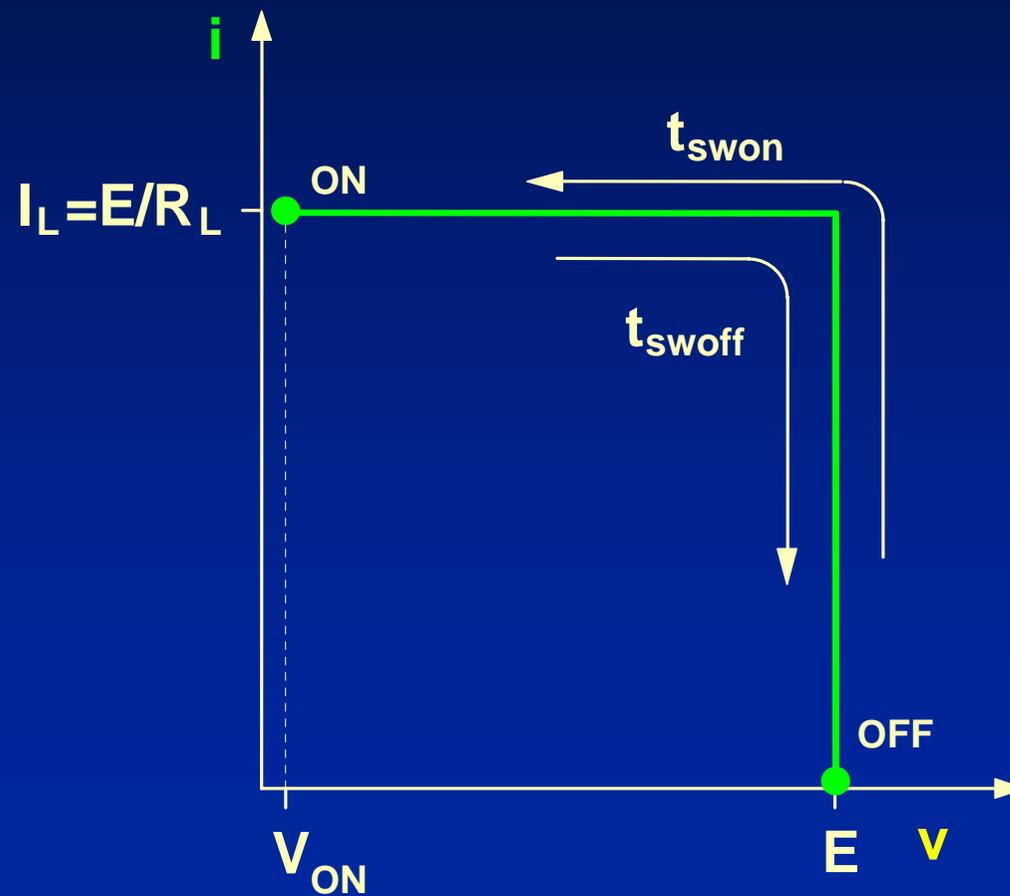
Commutazioni dei dispositivi reali

Commutazioni con carico di tipo induttivo (con effetti delle capacità parassite)



Commutazioni dei dispositivi reali

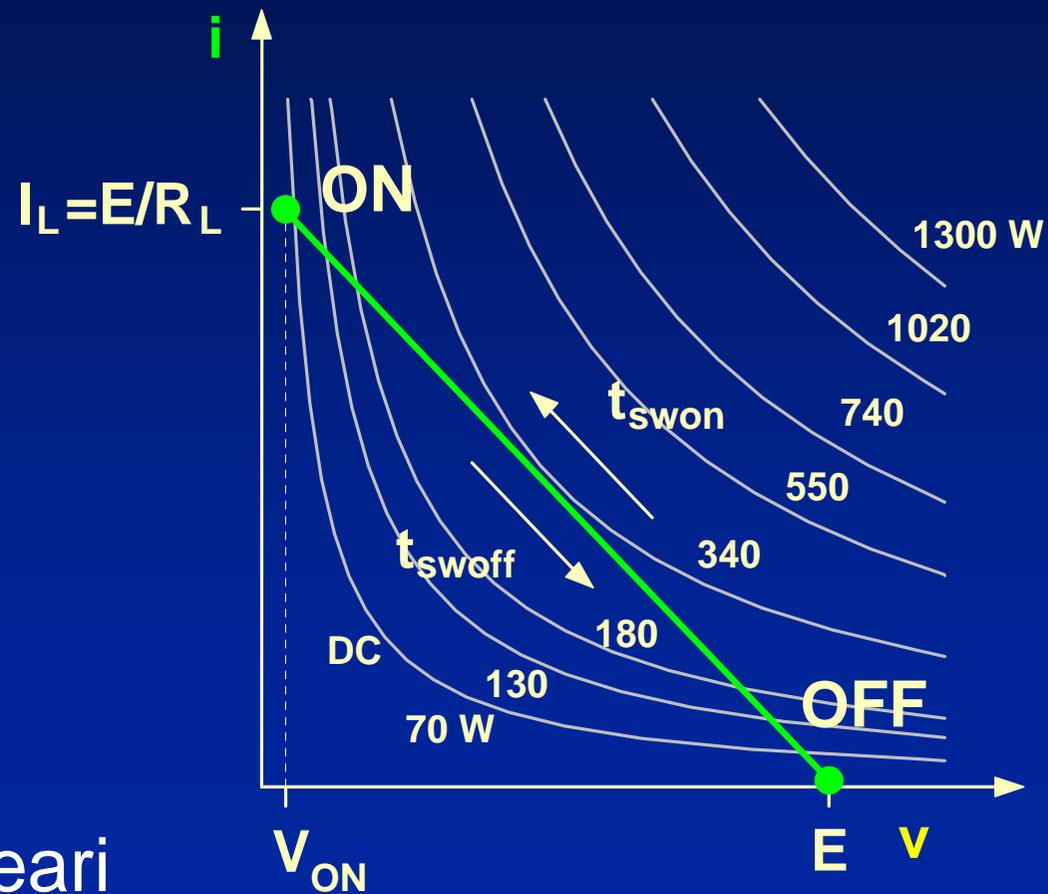
Stati e percorsi di commutazione
con carico di tipo induttivo



1.6 - SOA

Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

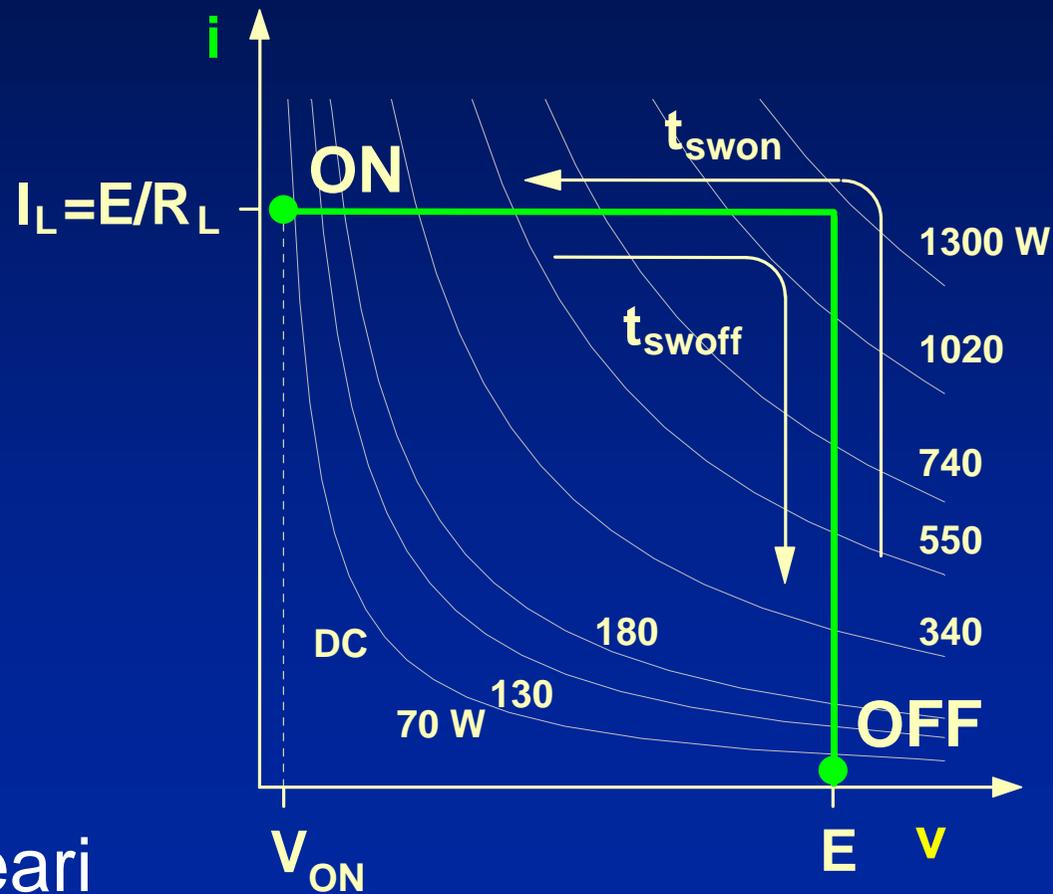
Stati e percorsi di commutazione
con carico resistivo con curve a potenza costante



Coordinate lineari

Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

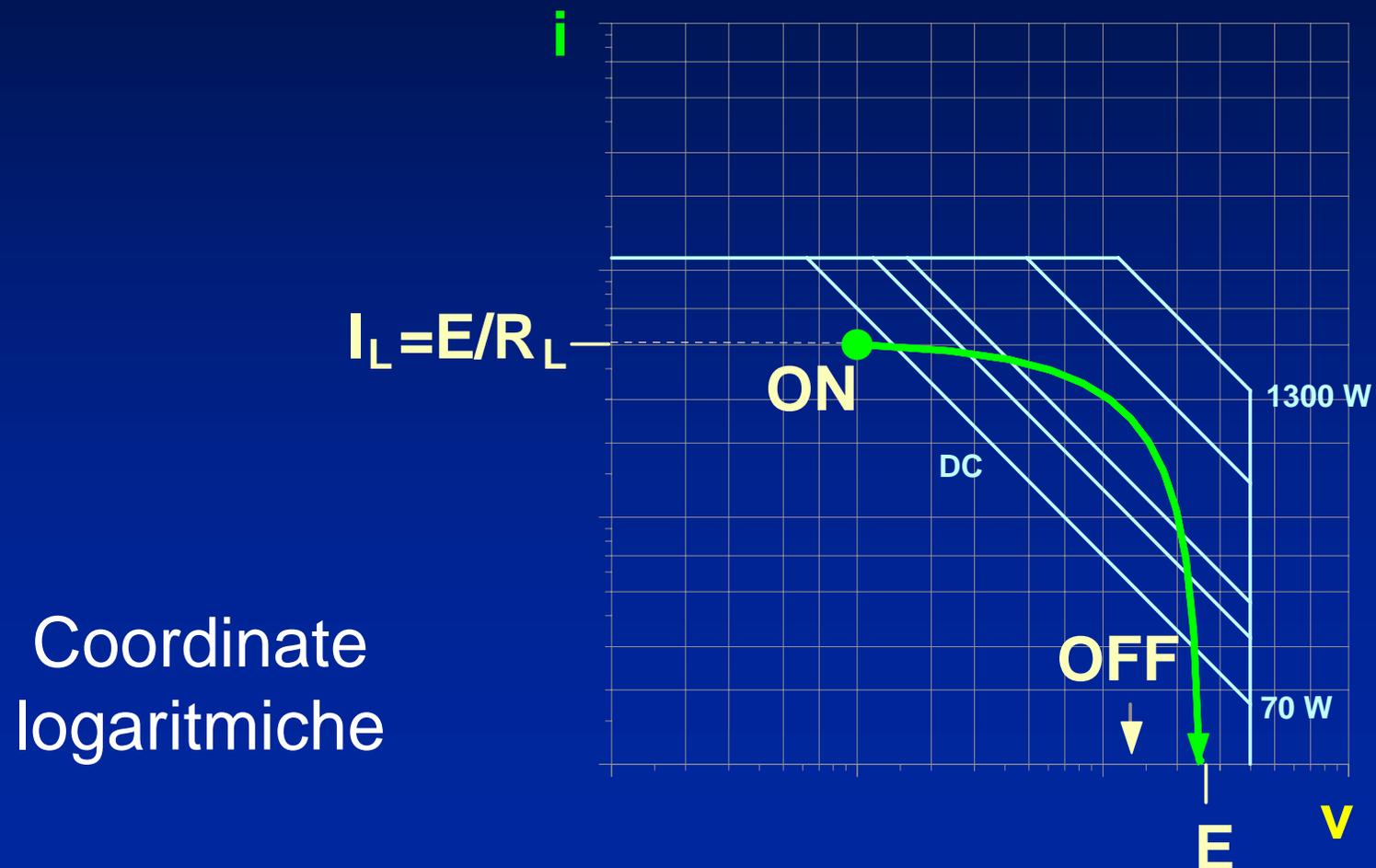
Stati e percorsi di commutazione
con carico di tipo induttivo e curve a potenza costante



Coordinate lineari

SOA

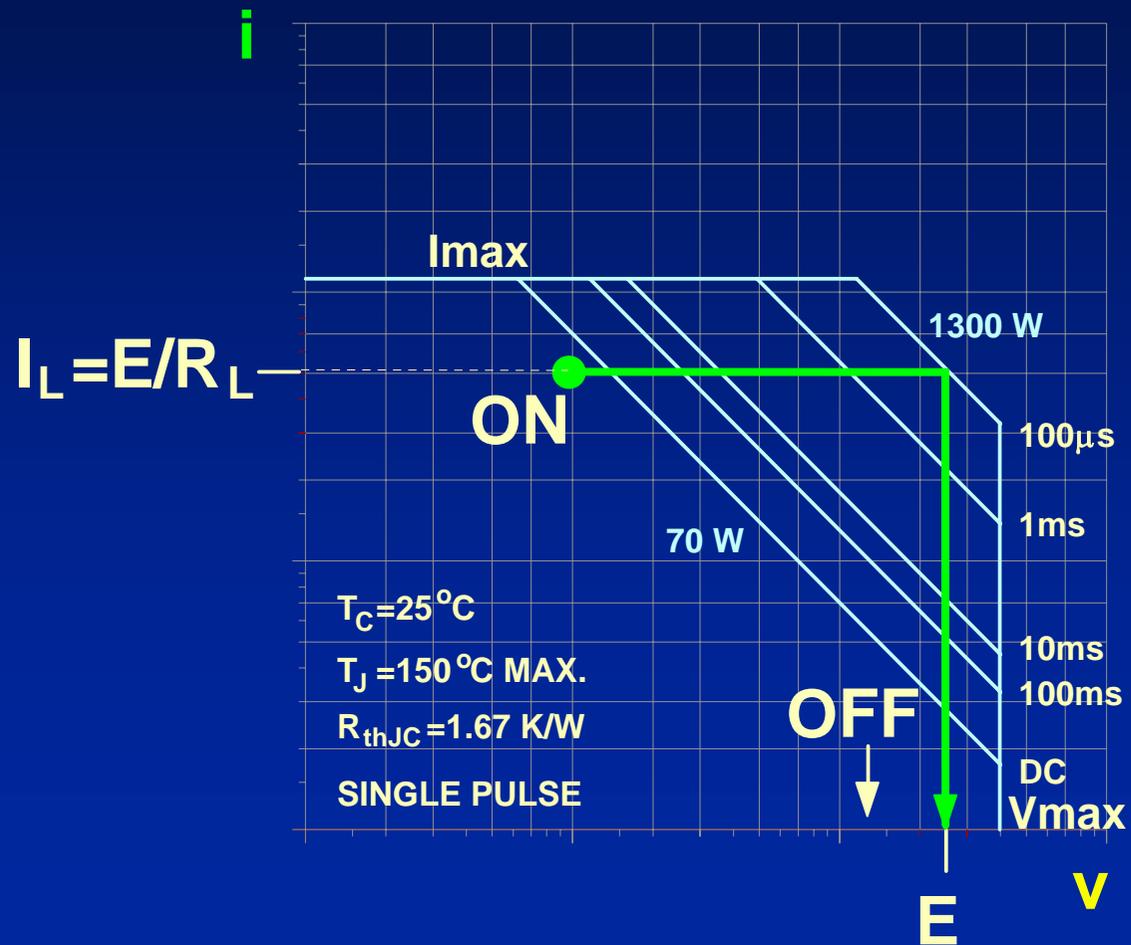
Stati e percorsi di commutazione
con carico resistivo e curve a potenza costante



Coordinate
logaritmiche

SOA

Stati e percorsi di commutazione
con carico di tipo induttivo e curve a potenza costante



Coordinate
logaritmiche

SOA

Limiti dei dispositivi a semiconduttore:

potenza dissipata

tensioni e correnti istantanee massime

“Breakdown secondario”

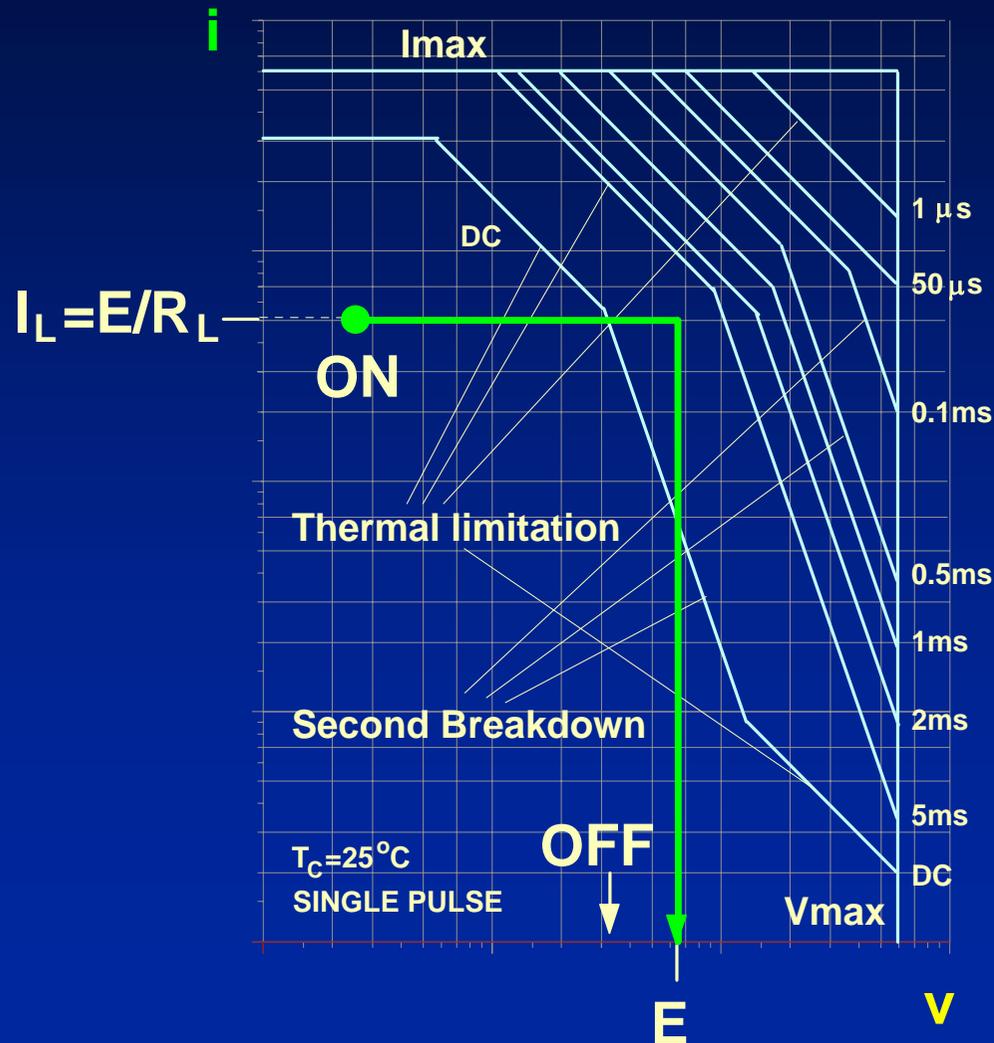
Rappresentazione sul piano **v-i** dei limiti:

“Area di Operazione Sicura”

indicata in inglese con **SOA**, Safe Operating Area

SOA

Fig.1.6.5. Stati e percorsi di commutazione carico induttivo - SOA con Breakdown Secondario

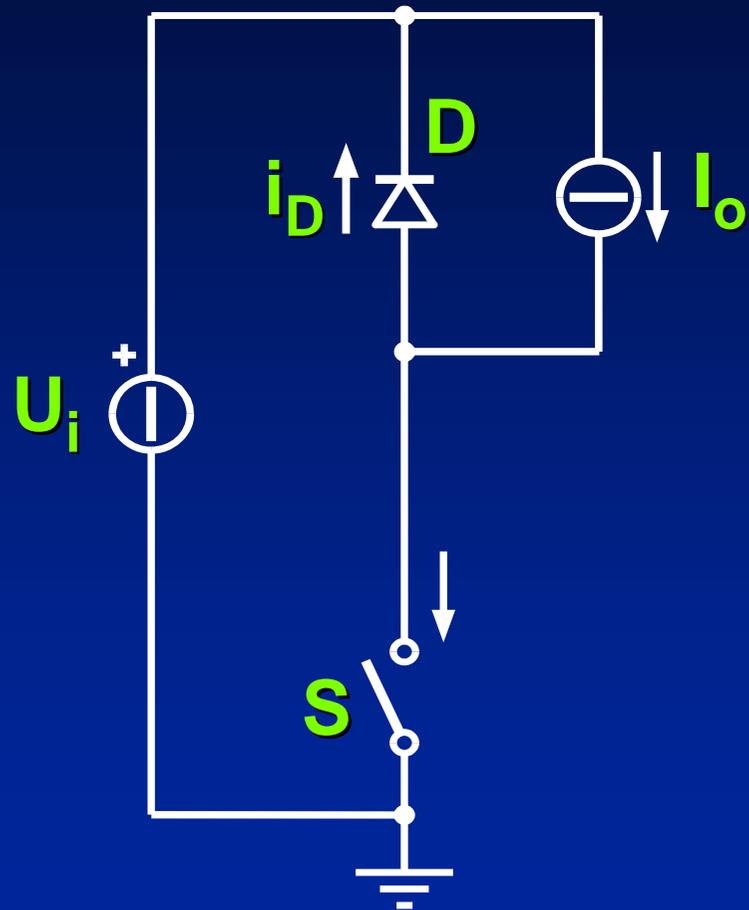


1.7 - SNUBBER

- Scopi:
- ridurre le **perdite** nel dispositivo
 - limitare le **velocità di variazione** delle tensioni e/o correnti

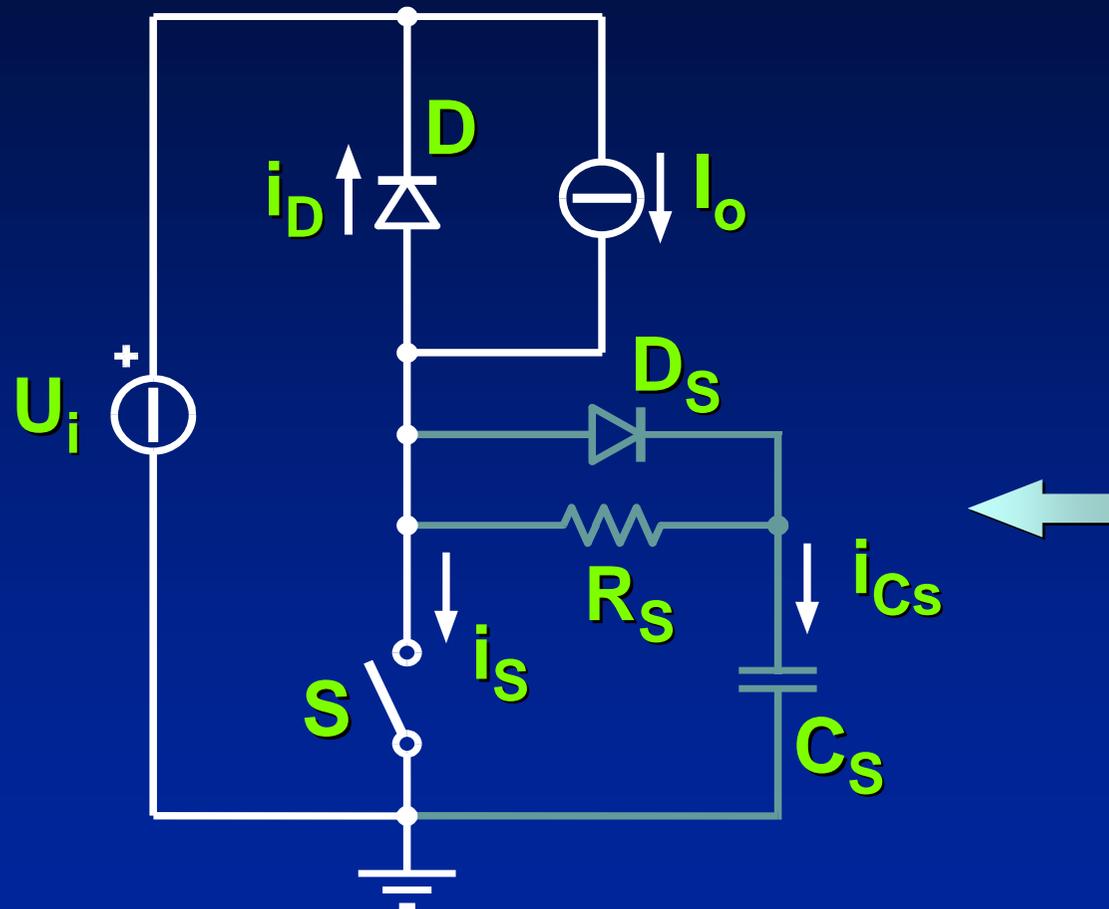
Tipi di snubber

- ✓ **snubber RCD (turn-off):** usati per limitare la du/dt e modificare la traiettoria di commutazione allo spegnimento, e limitare la sovratensione nei dispositivi attivi allo spegnimento
- ✓ **snubber LRD (turn-on):** usati per limitare la di/dt e modificare la traiettoria di commutazione all'accensione



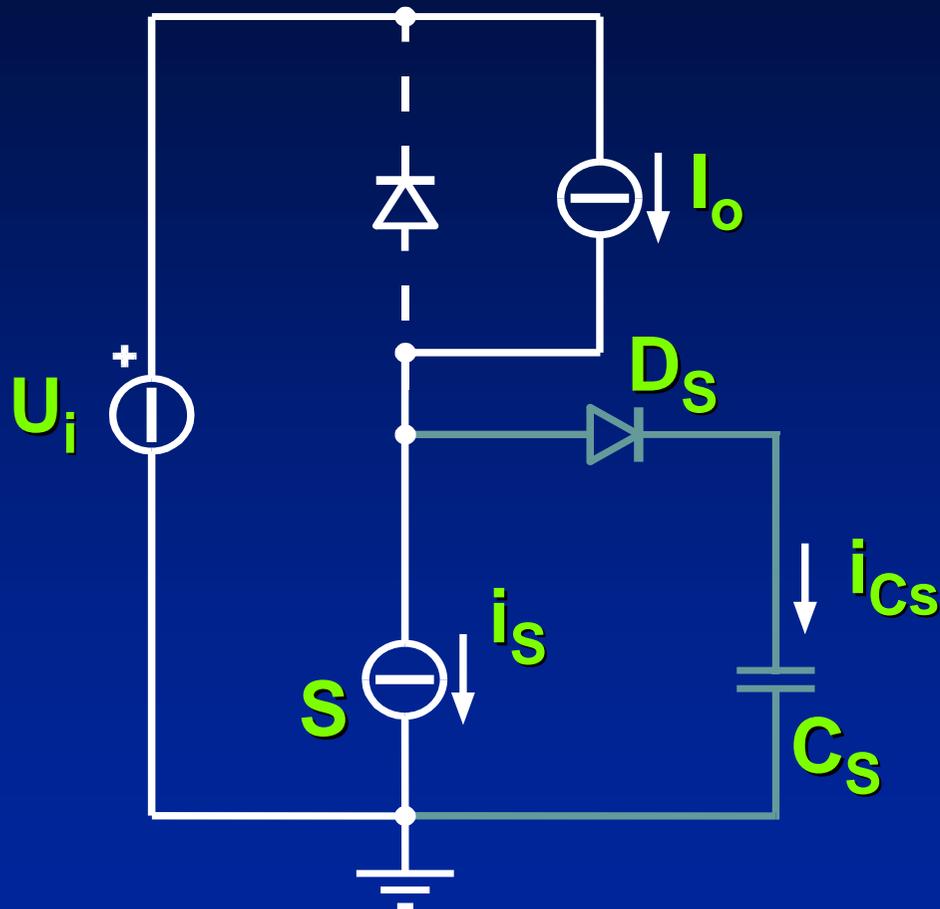
**Caso
generale:
switch con
carico
induttivo (I_o)**

Turn off Snubber



Snubber
R-C-D

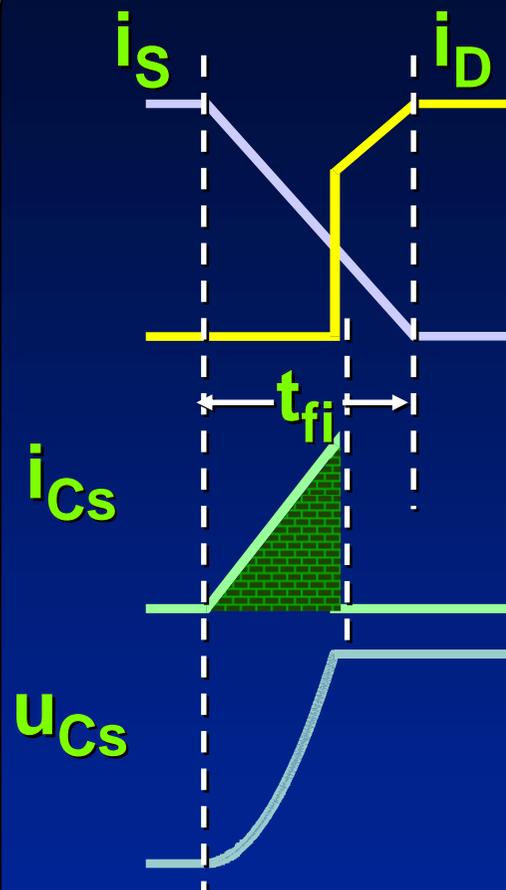
Turn off



Circuito
equivalente
durante la
commutazione

(Andamento
di i_s
imposto dal
componente)

Forme d'onda

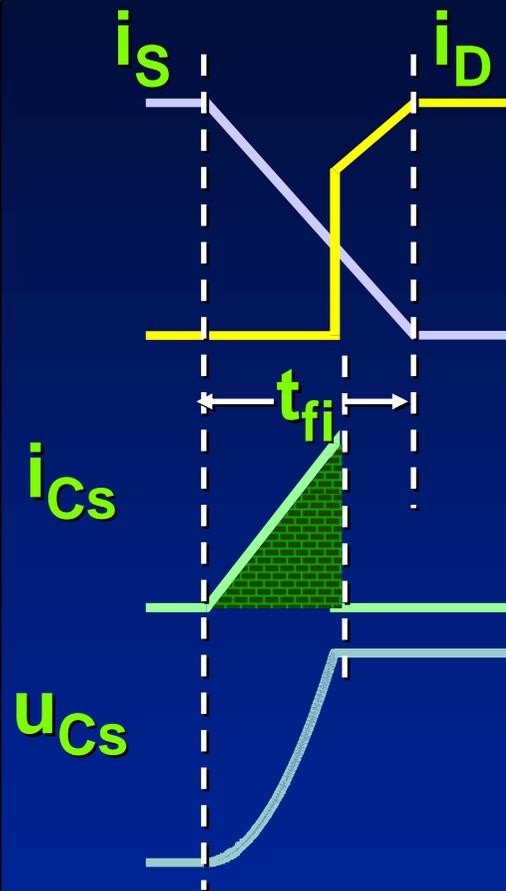


La corrente nello switch
diminuisce fino a zero

e, di conseguenza, la
corrente nel condensatore di
snubber cresce

e la tensione sul
condensatore di snubber
cresce fino al valore U_i

Forme d'onda

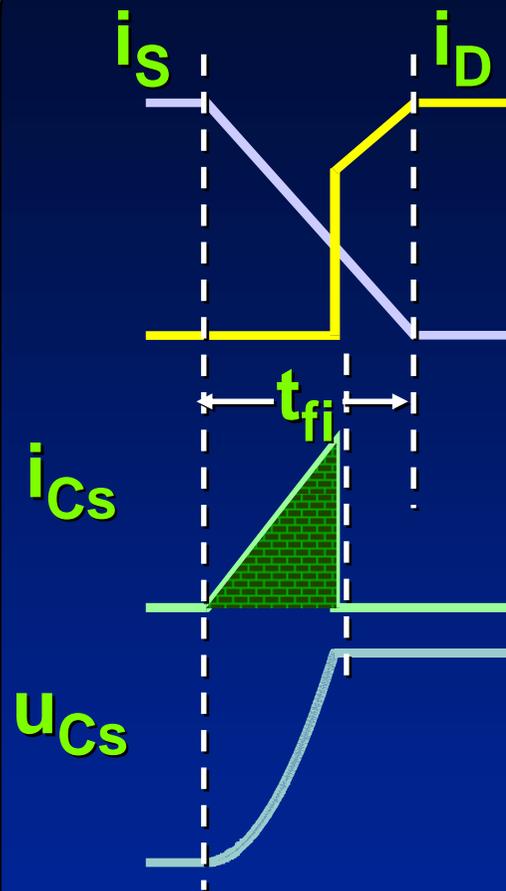


$$i_{Cs} = I_o - i_s = \frac{I_o}{t_{fi}} t$$

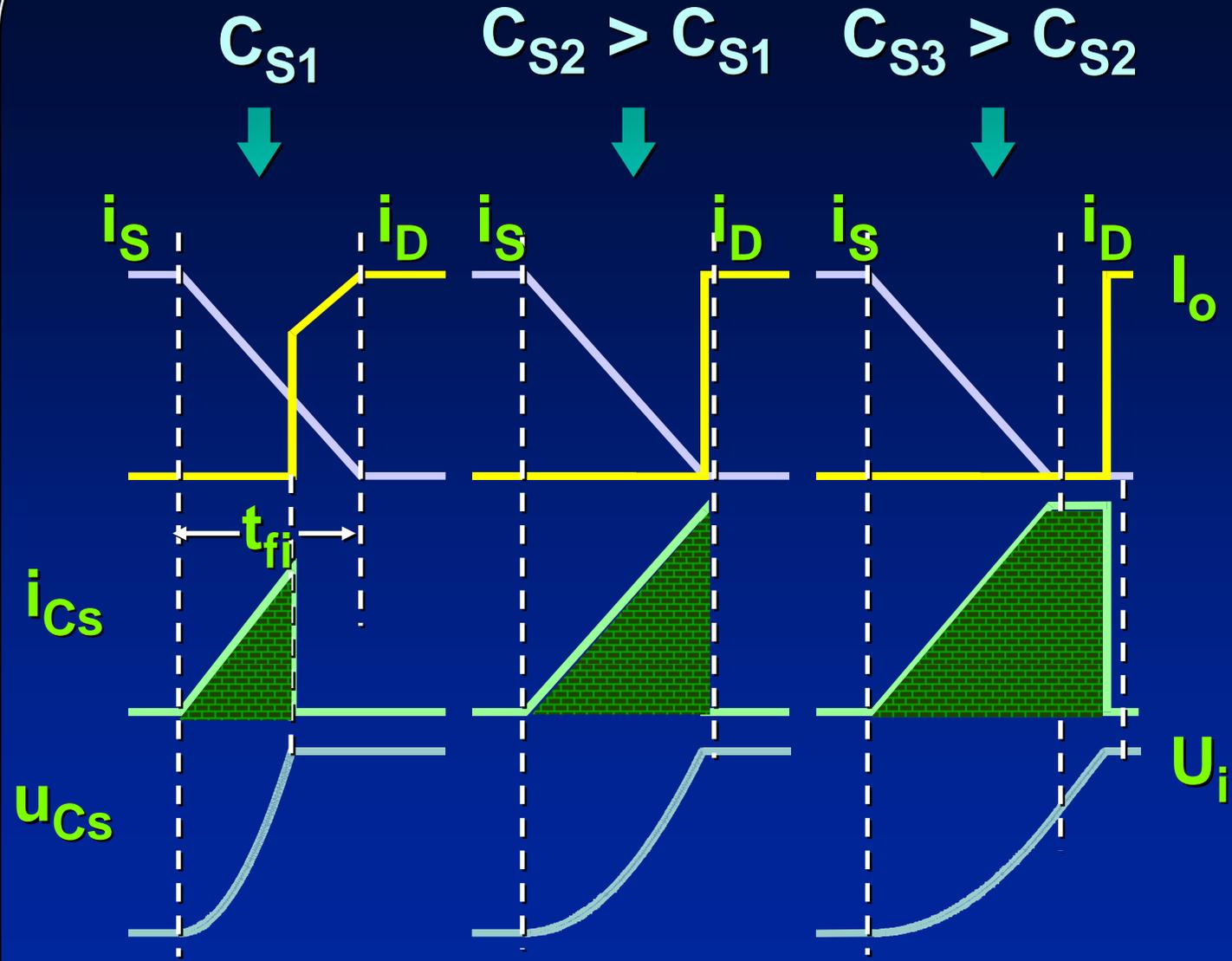
$$u_{Cs} = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_{Cs}(\tau) d\tau = \frac{I_o}{2C_s t_{fi}} t^2$$

$$u_{Cs} \leq U_i$$

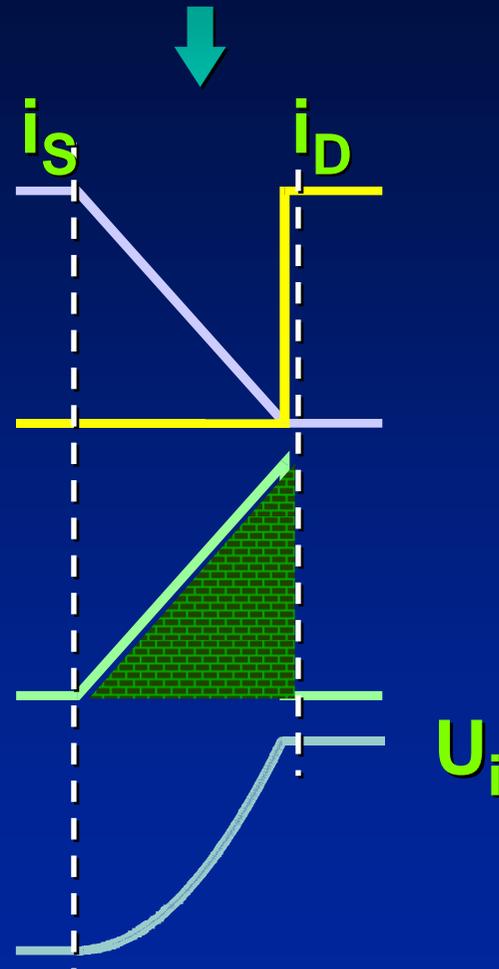
Forme d'onda



Quando $u_{Cs} = U_i$ il diodo di freewheeling entra in conduzione con una corrente pari a $I_o - i_s$

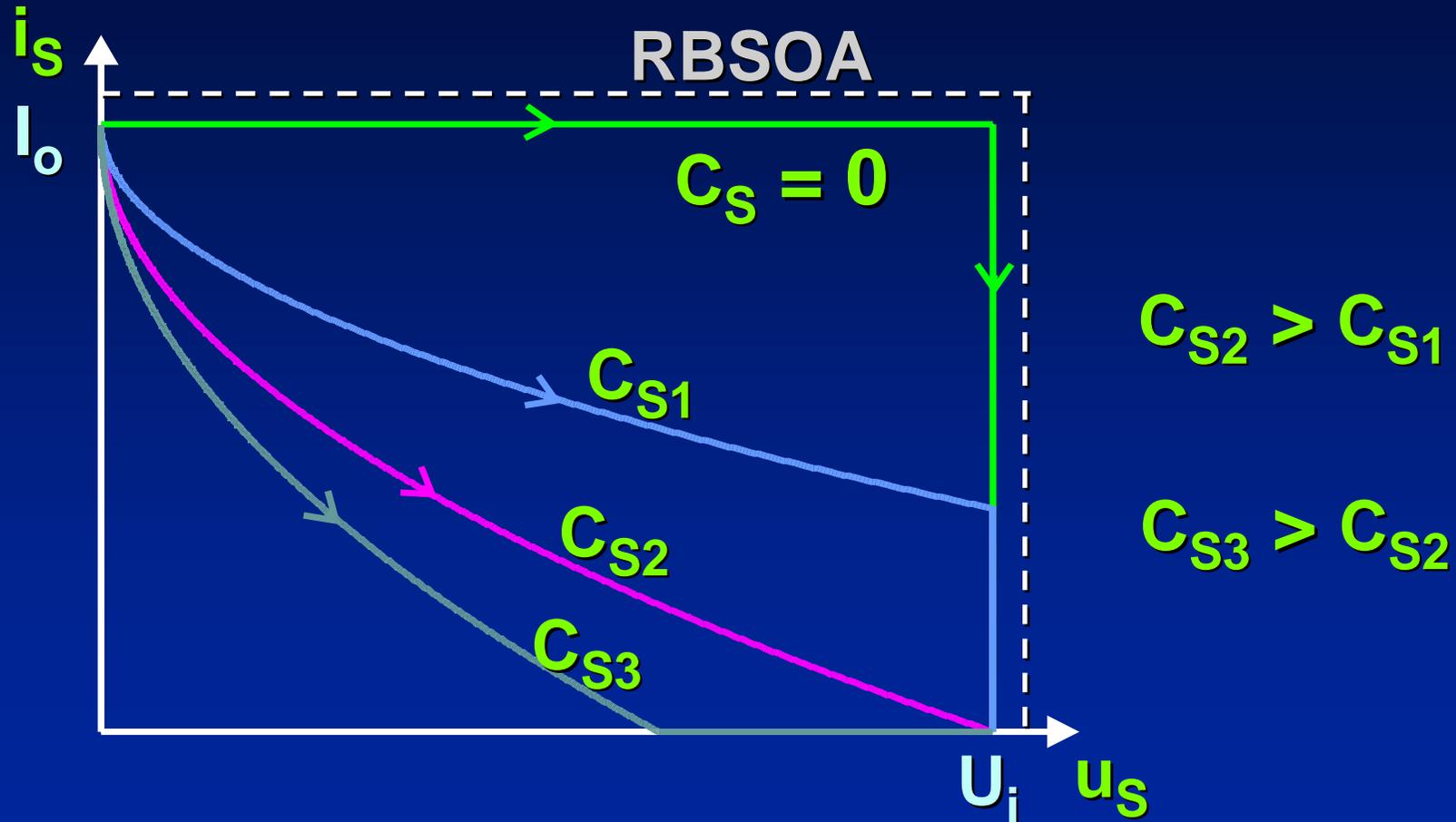


C_{S2} = Capacità di normalizzazione



$$C_{S2} = \frac{I_o t_{fi}}{2U_i}$$

Traiettorie di commutazione allo spegnimento



Effetto dello snubber sull'energia dissipata nello switch allo spegnimento

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

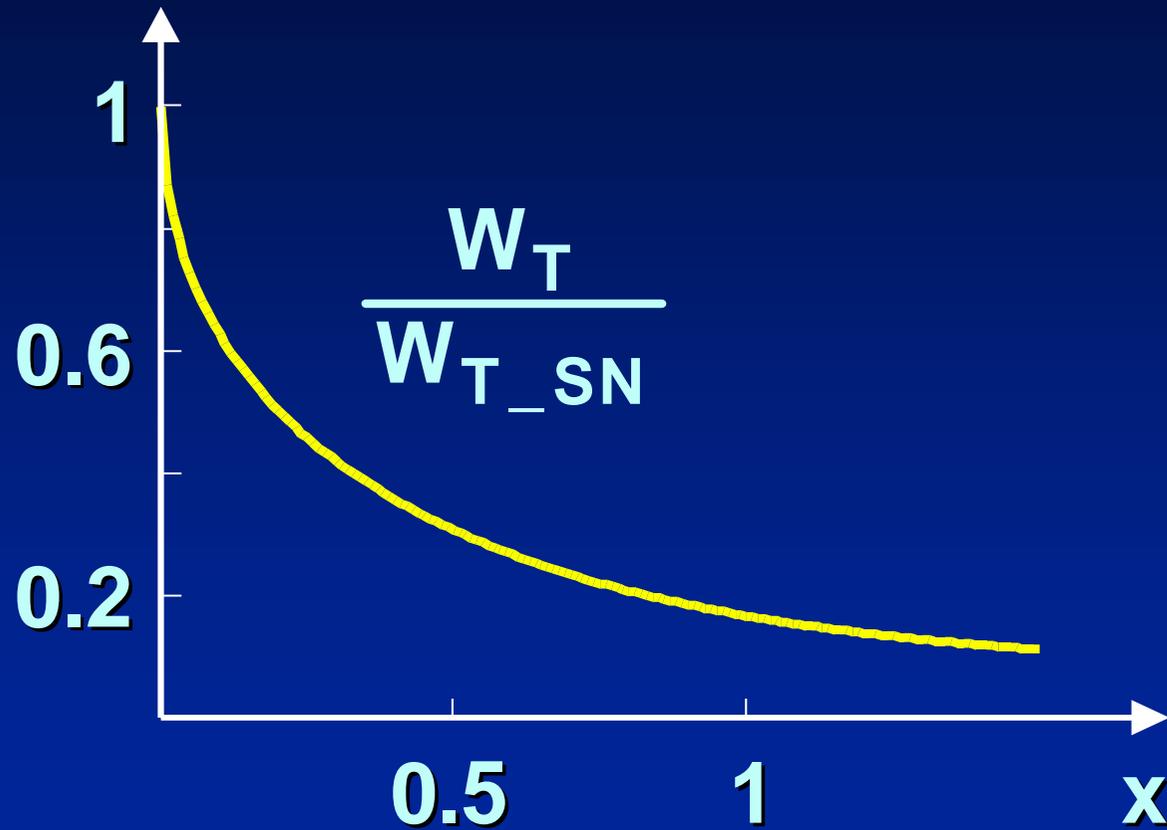
Nota: si trascura l'intervallo di crescita della tensione da 0 a U_i (intervallo t_{ru})

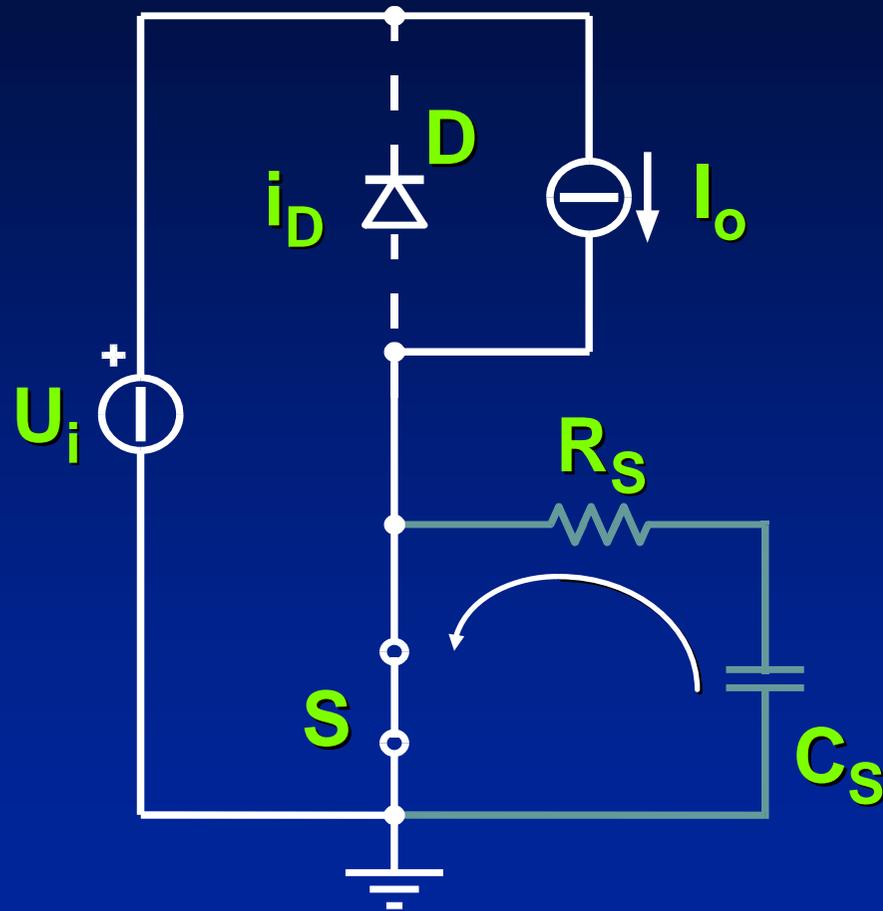
Con snubber:

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

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

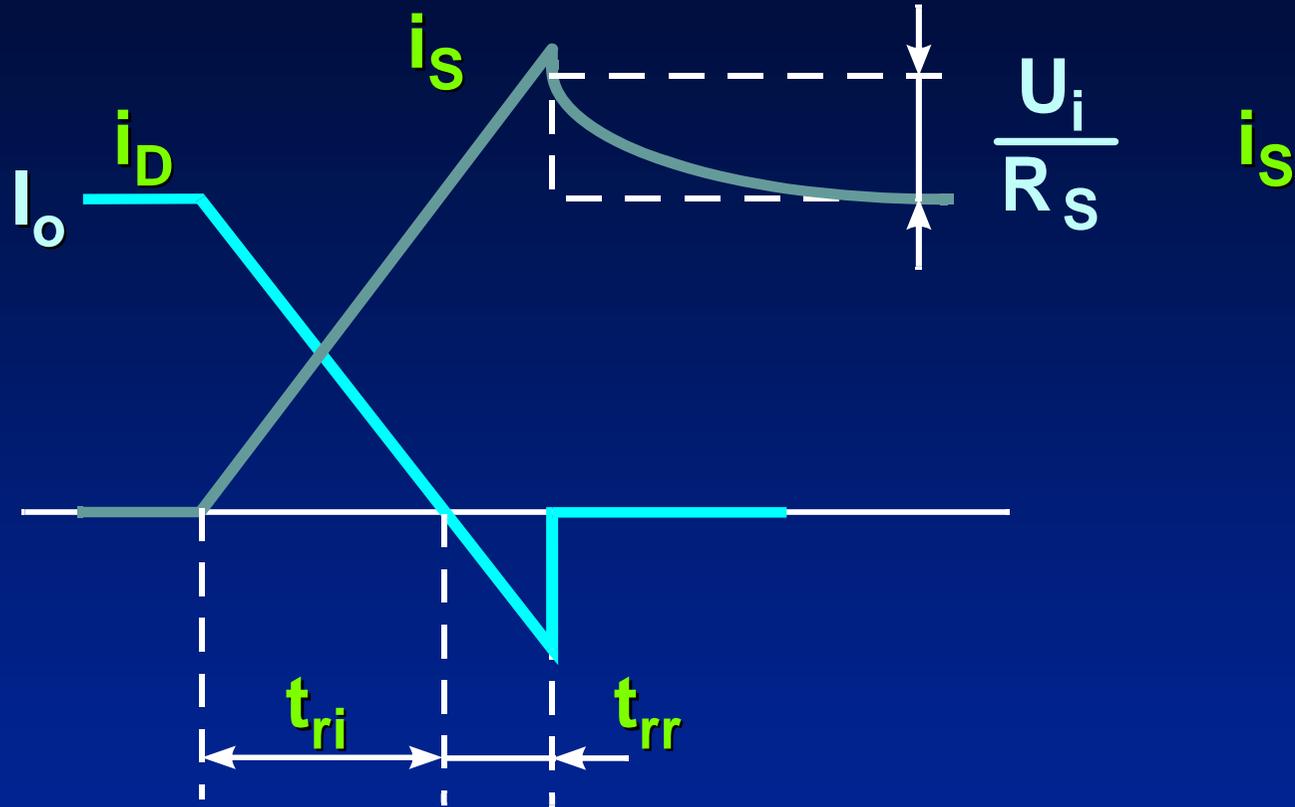
Energia dissipata allo spegnimento (normalizzata)



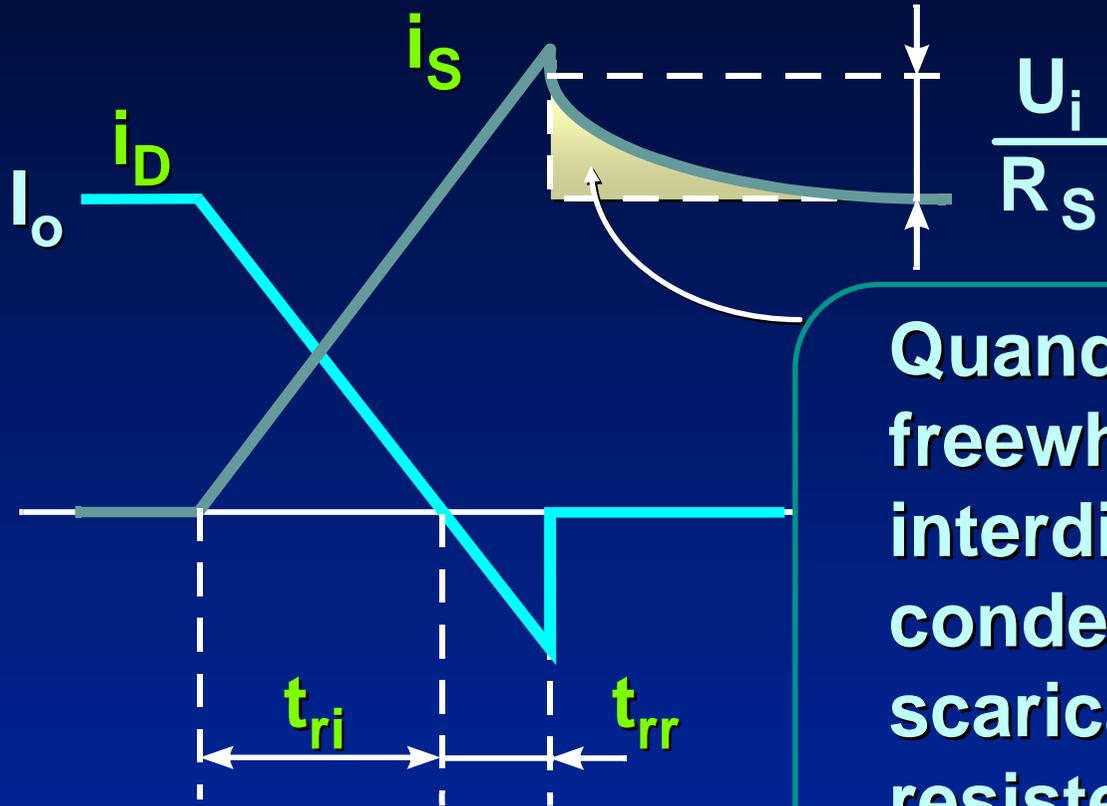


Il condensatore di snubber C_s si scarica attraverso la resistenza R_s e lo switch all'accensione

Accensione dello switch



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 :

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

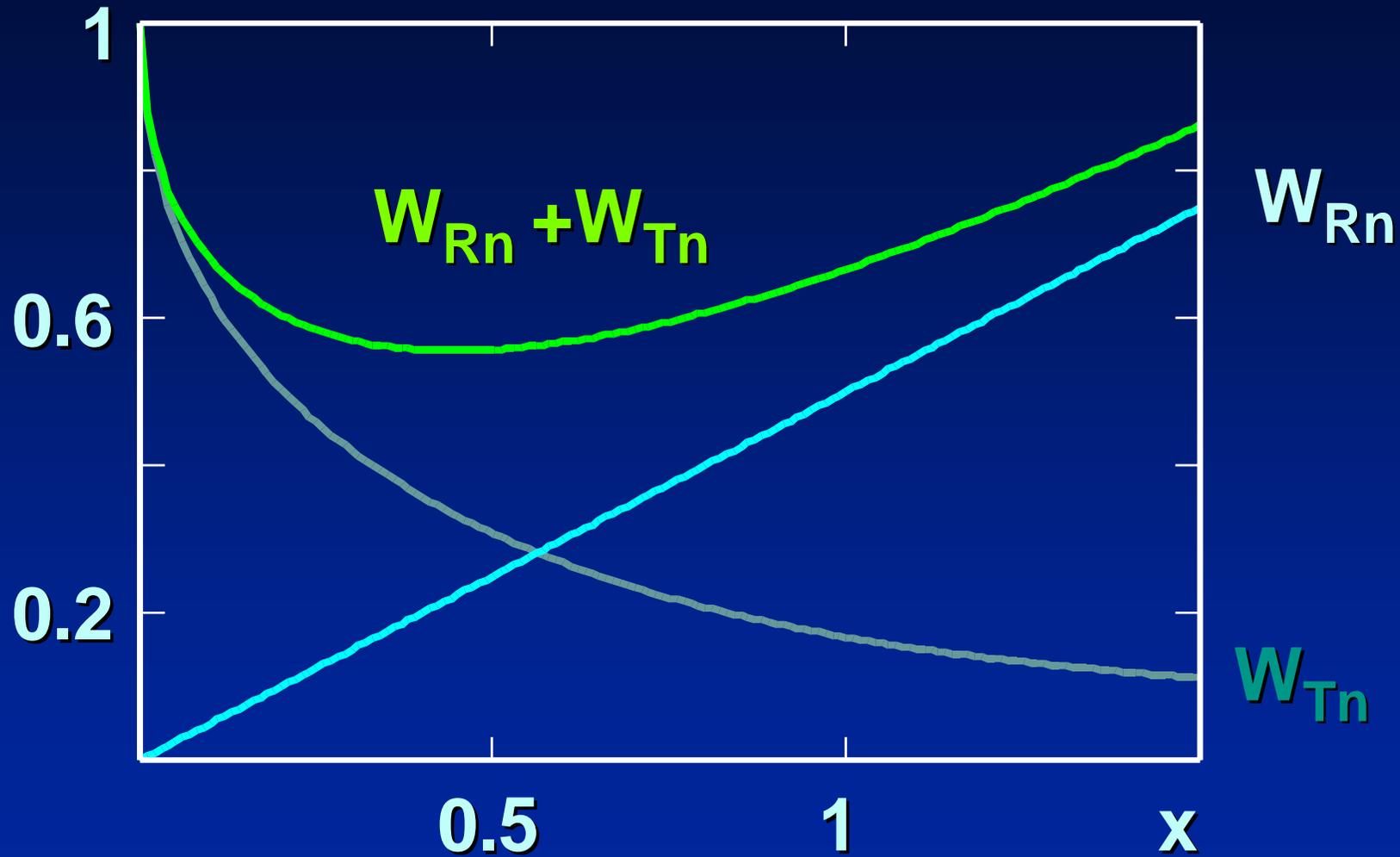
Corrente di picco nella resistenza di snubber:

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

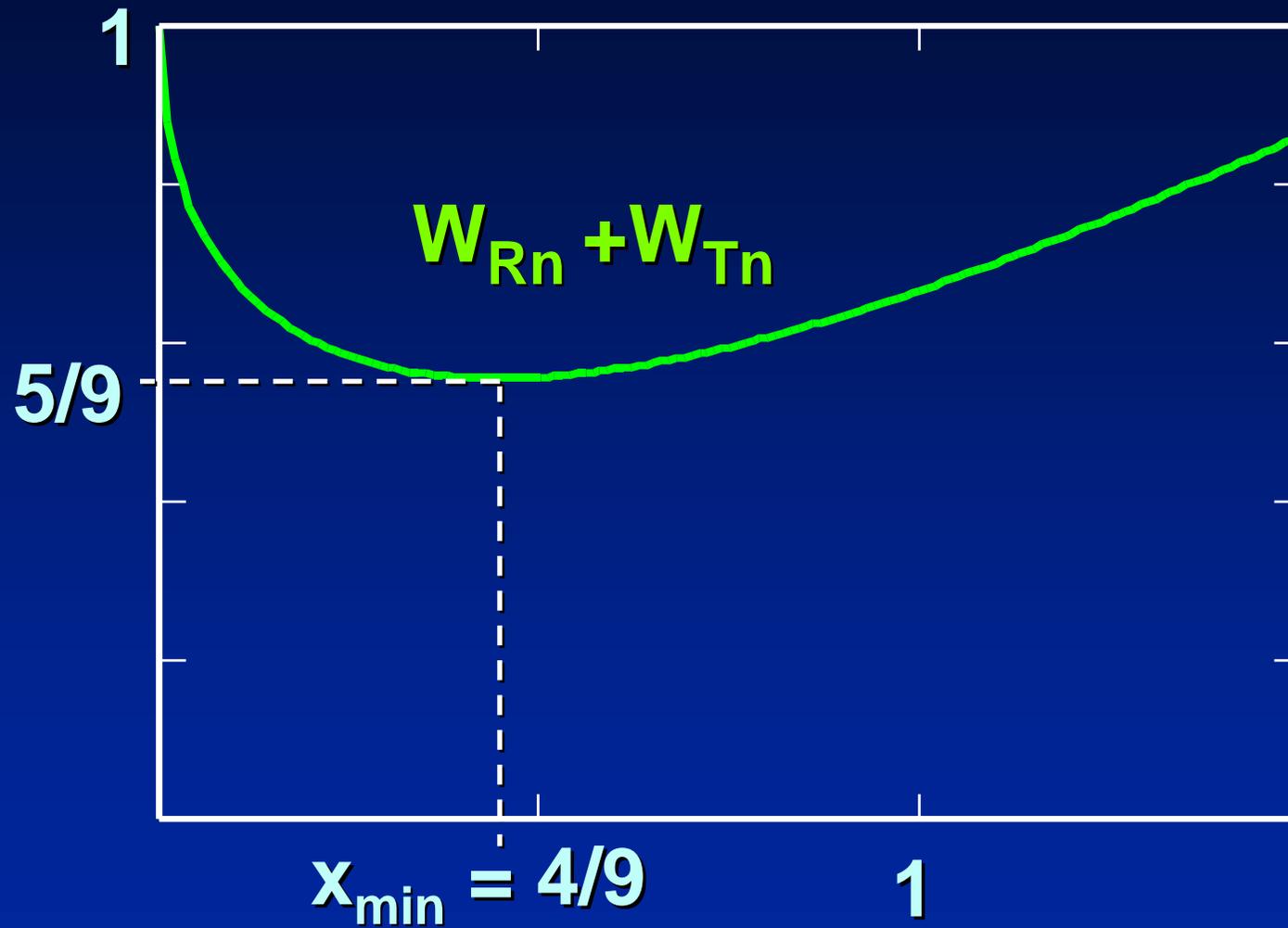
Commenti

- ✓ **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

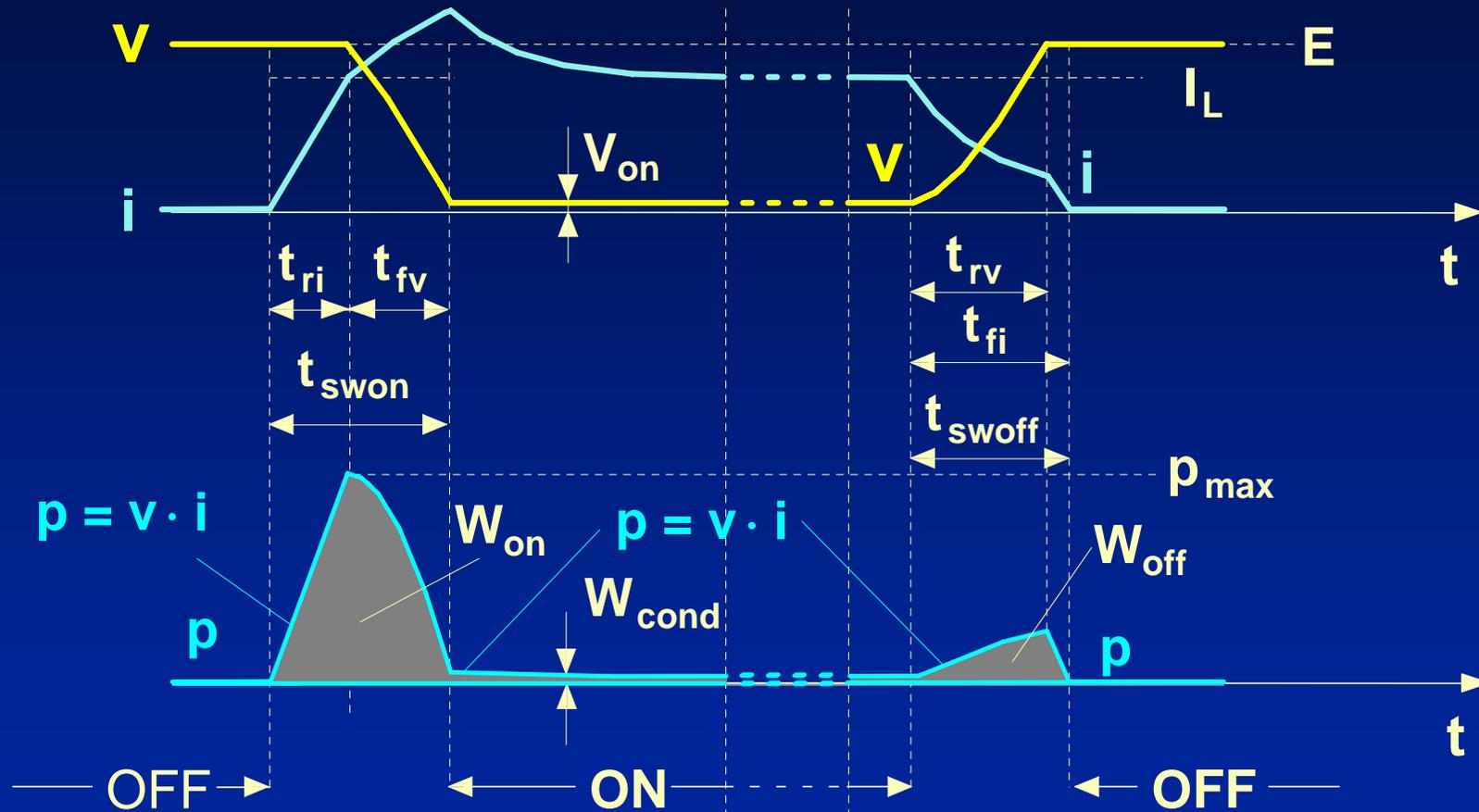
Il condensatore di snubber deve scaricarsi completamente durante il minimo intervallo di “ON” dello switch:

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

per avere $u_{C_S} = 0.1 U_i$

Snubber RC-Diodo

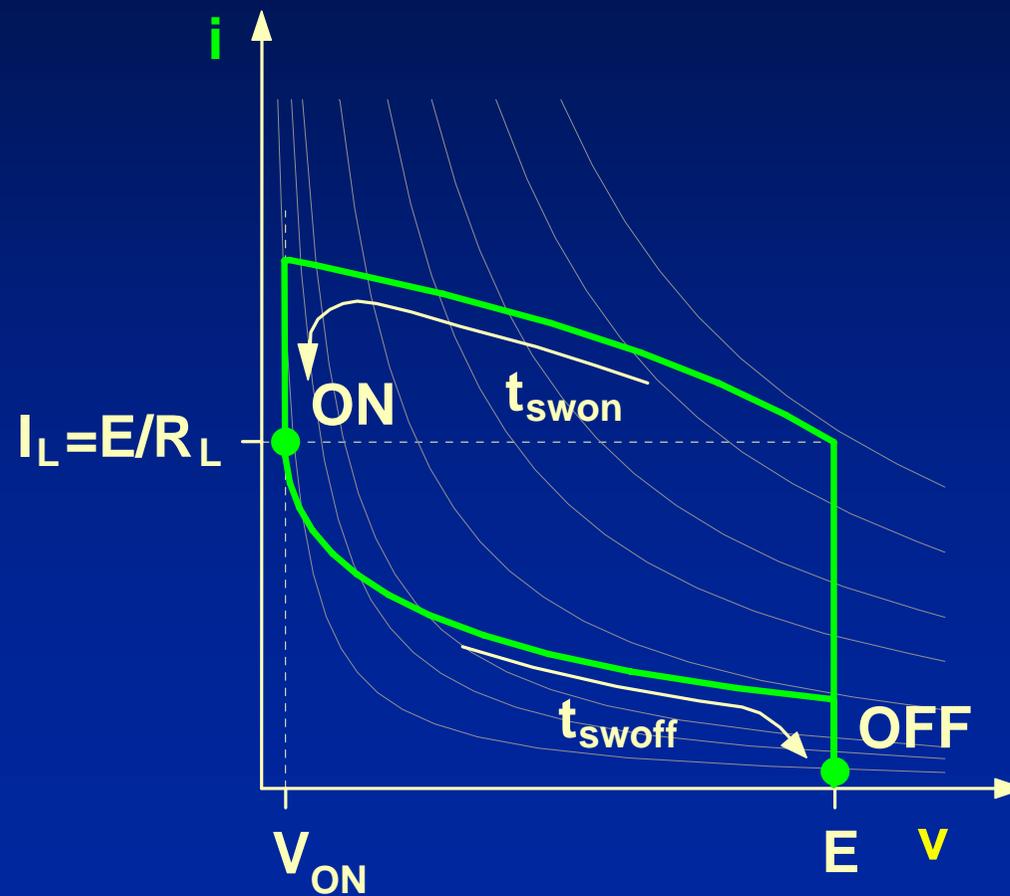
Commutazioni con carico di tipo induttivo
con snubber di spegnimento RC-Diodo



potenza dissipata e dv/dt allo spegnimento ridotte
ma aumento della corrente all'accensione

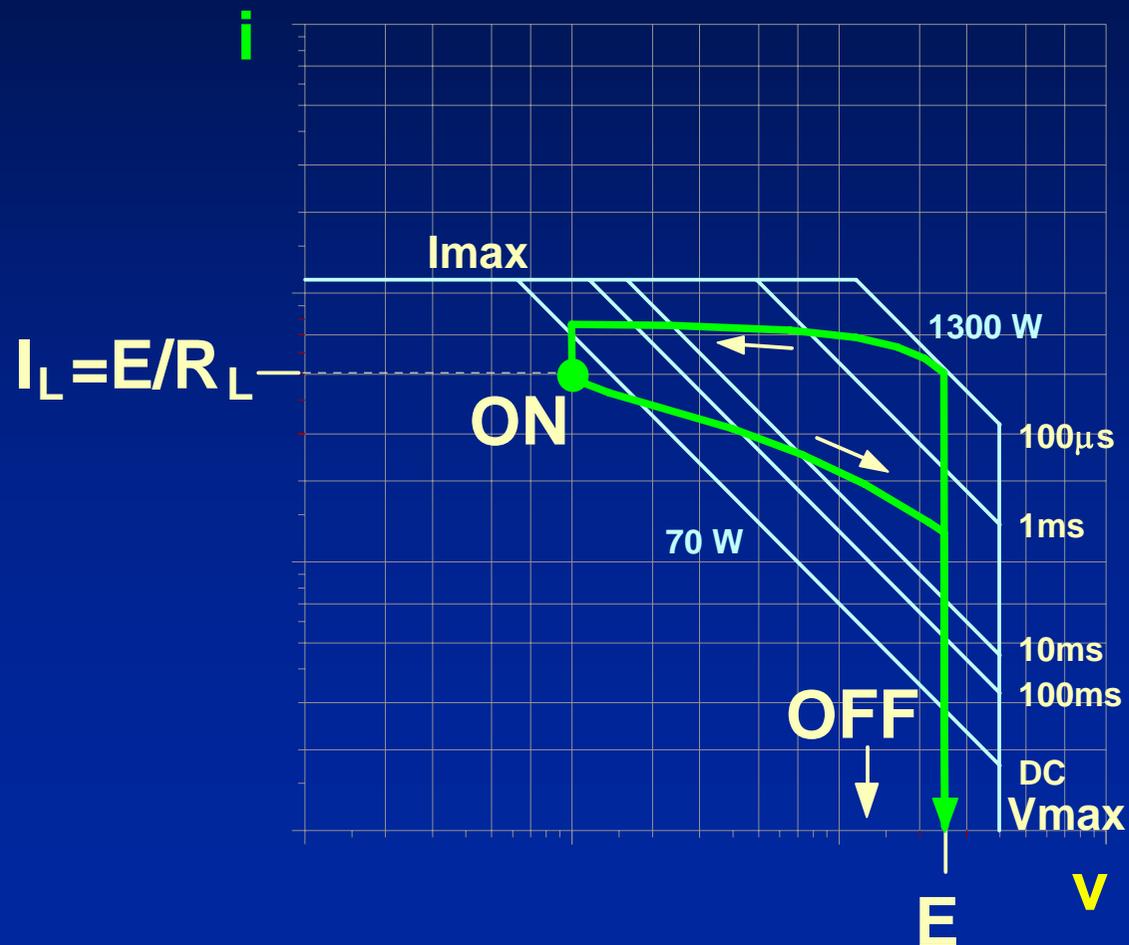
Snubber RC-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo
con snubber di spegnimento RC-Diodo

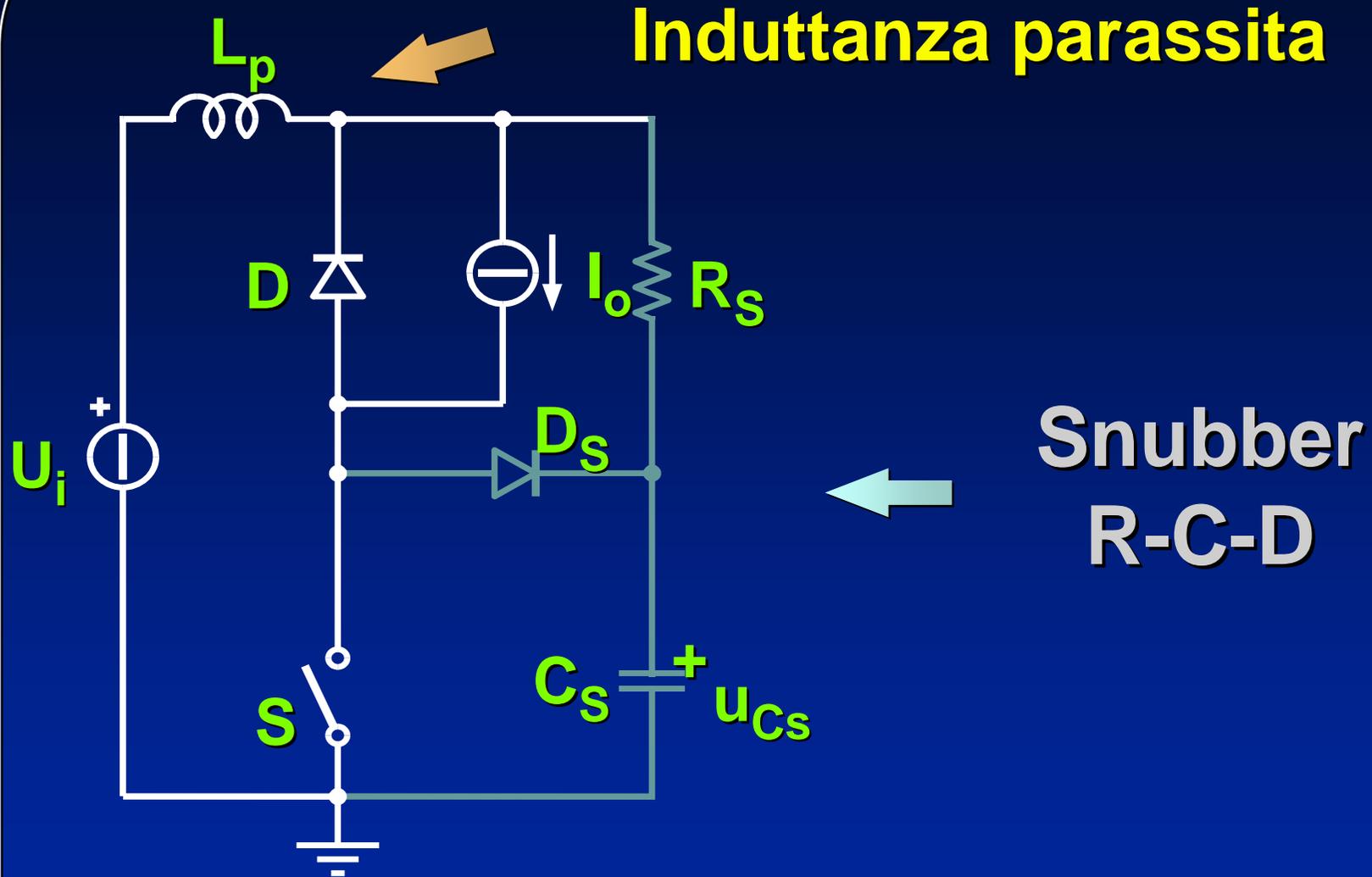


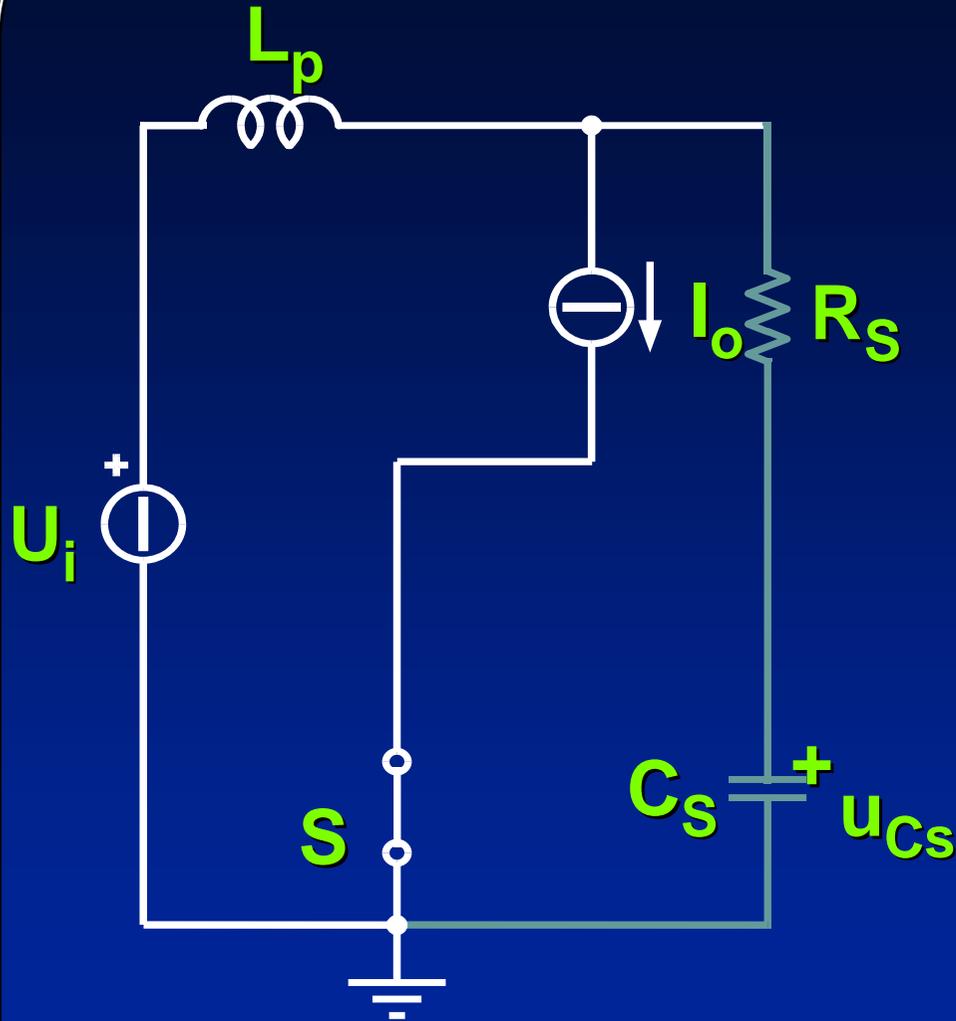
Snubber RC-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo
con snubber di spegnimento RC-Diodo



Snubber R-C polarizzati (overvoltage snubber)

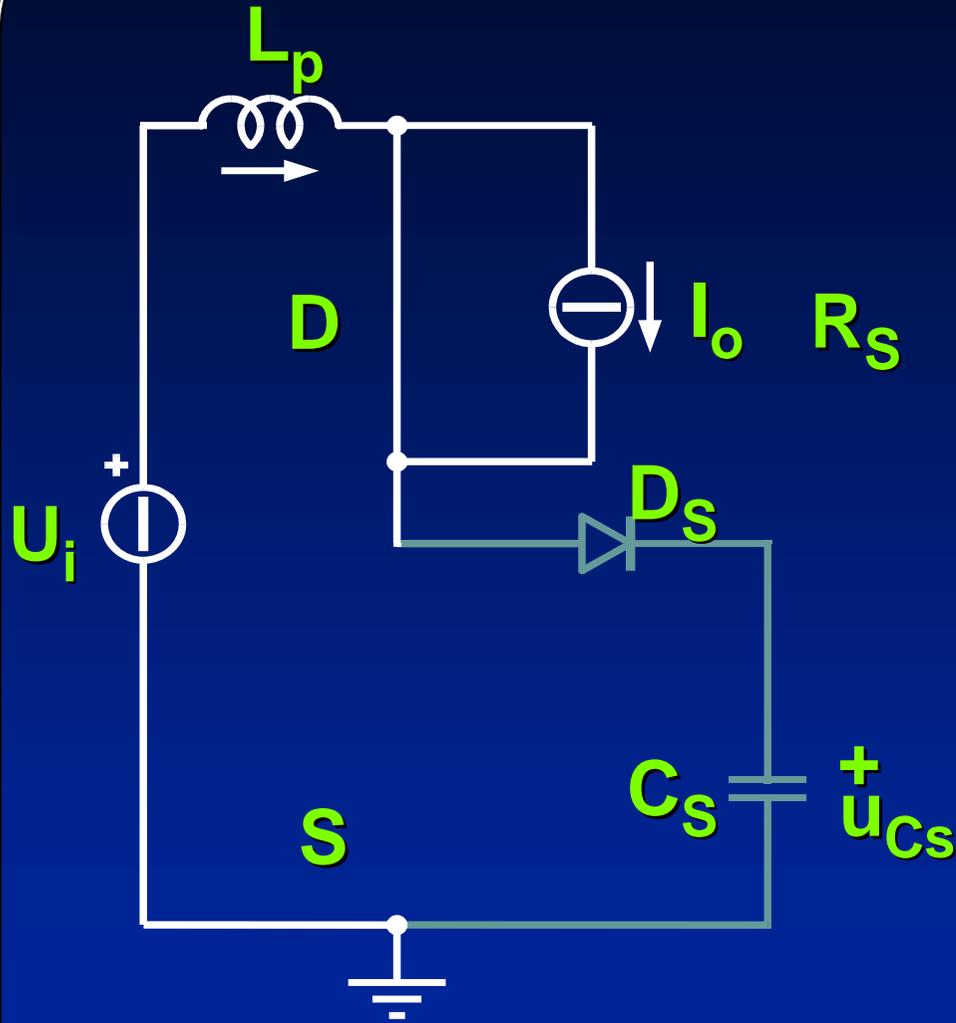




Durante la fase di
“ON”
dell'interruttore la
tensione sul
condensatore di
snubber si porta
al valore U_i
attraverso la
resistenza R_s

E

I



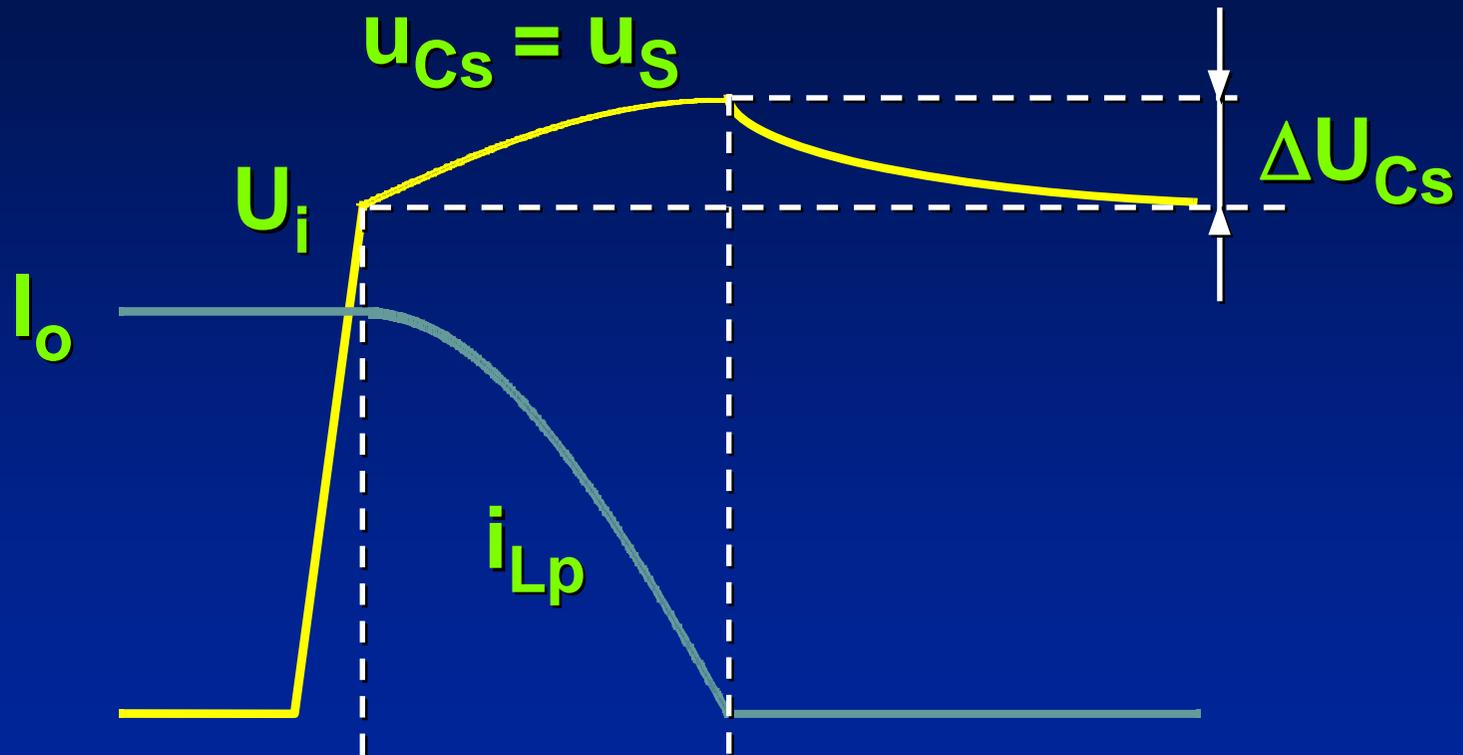
**Circuito
equivalente allo
spegnimento
dello switch dopo
l'entrata in
conduzione del
diodo di
freewheeling**

Essendo C_s precaricato al valore U_i la sovratensione ΔU_{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

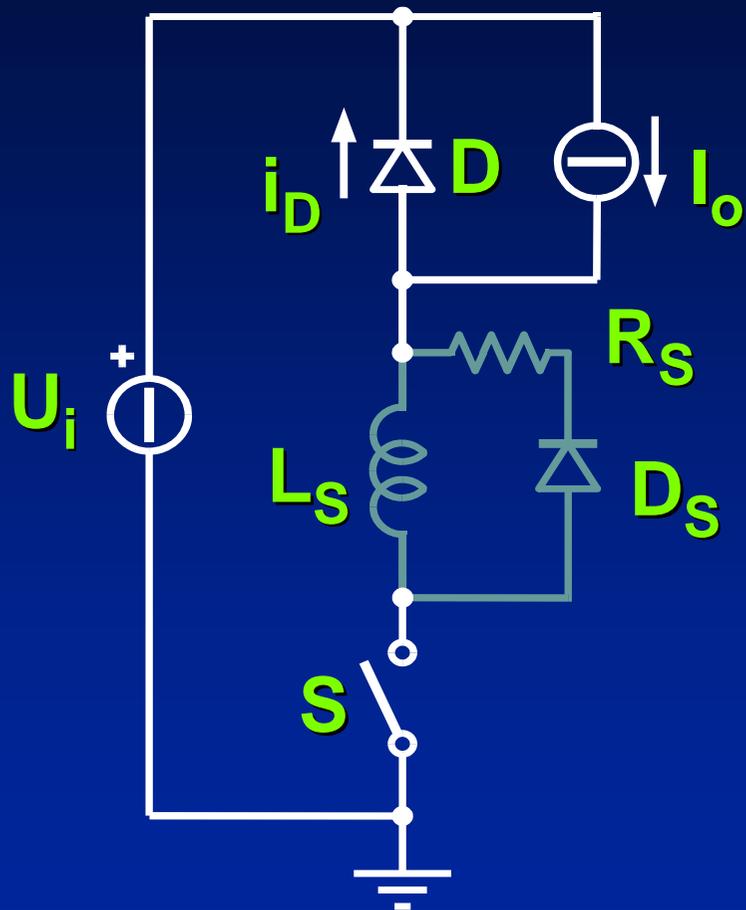
Forme d'onda



Snubber L-R (turn-on snubber)

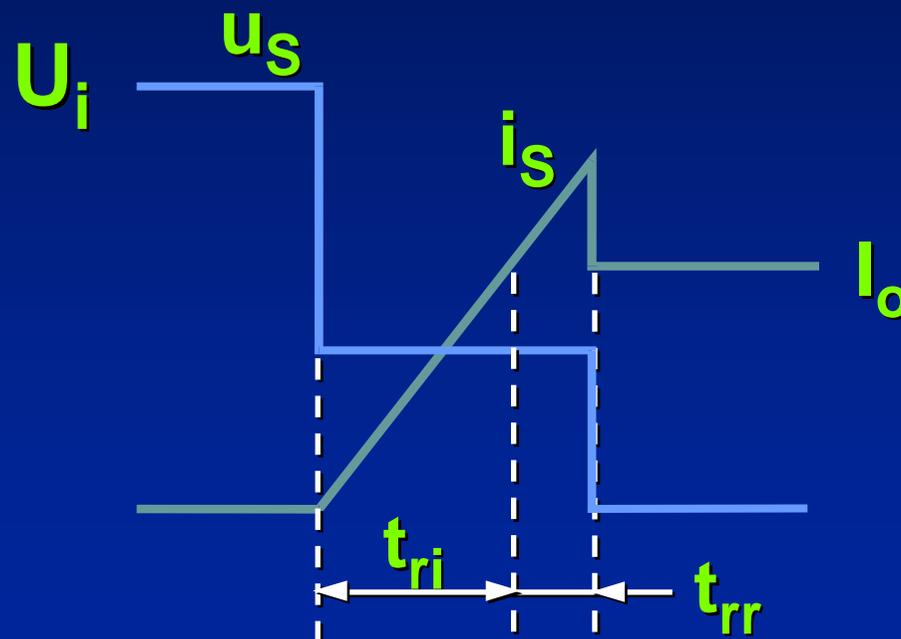
- ✓ ridurre le perdite dello switch all'accensione
- ✓ ridurre la di/dt all'accensione
- ✓ ridurre il picco della corrente di recovery inverso

Schema di principio

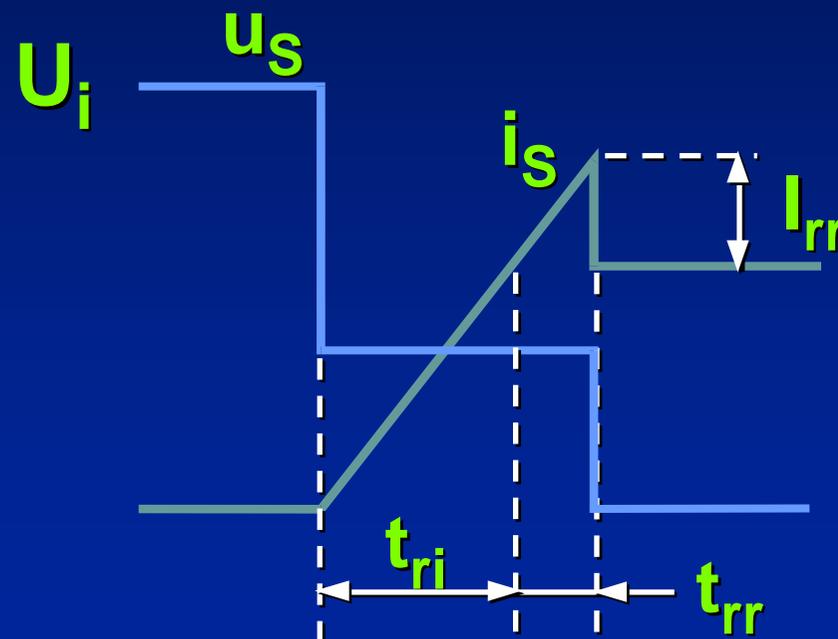


← Snubber
R-L-D

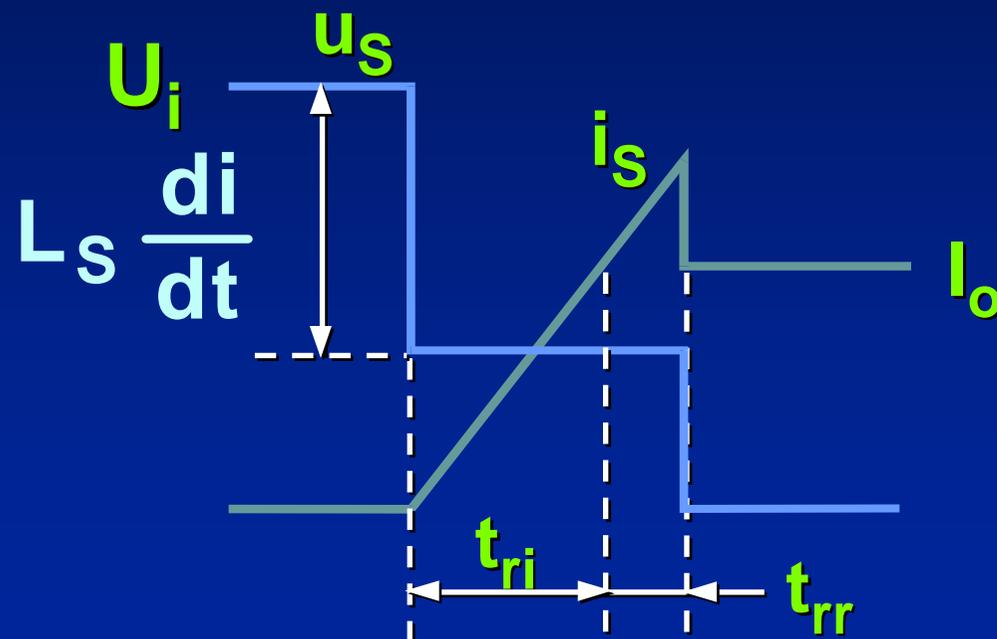
Per valori piccoli di L_s la derivata di corrente nello switch risulta ancora imposta dal componente



Di conseguenza il picco di corrente di recovery inverso rimane invariato

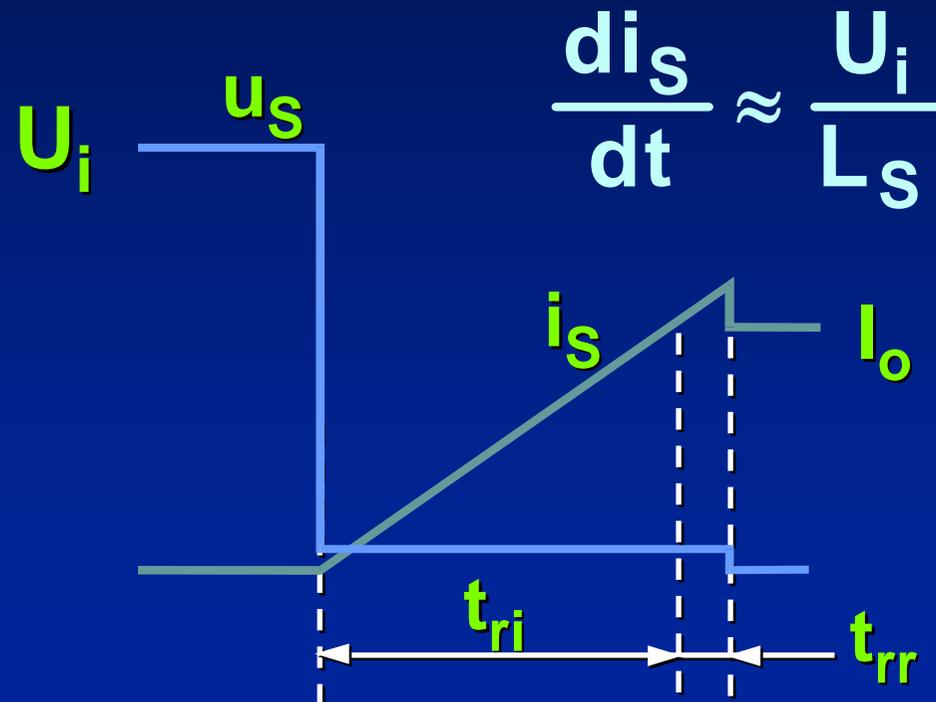


La tensione sullo switch risulta ridotta della caduta su L_s

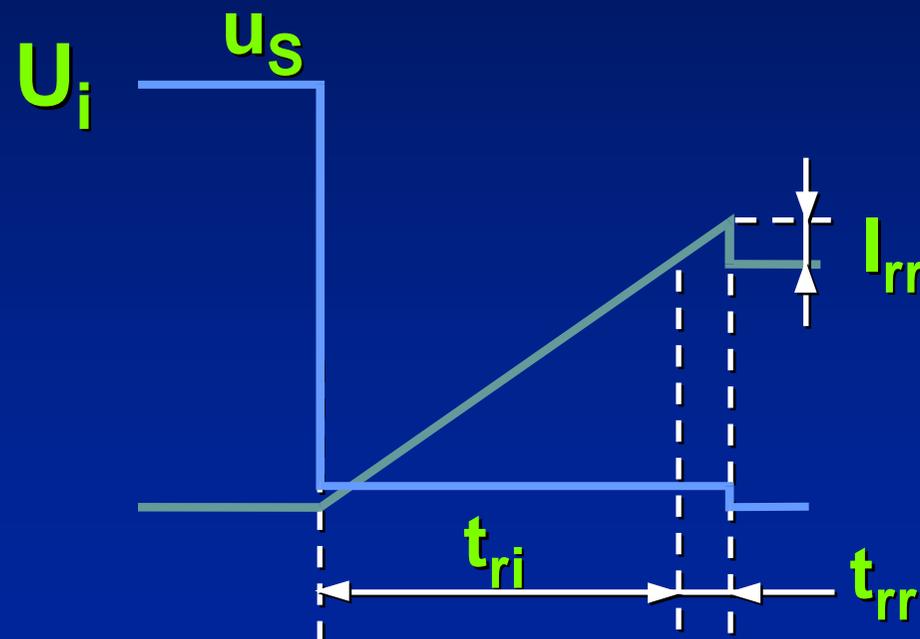


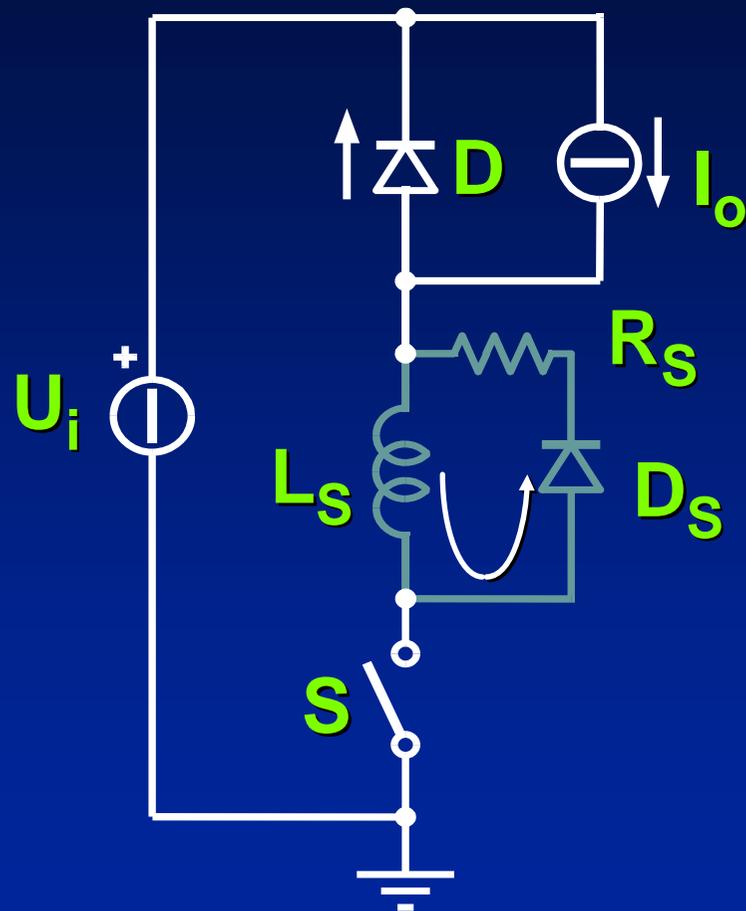
Un valore maggiore di L_s comporta una derivata di corrente imposta da

$$L_s$$

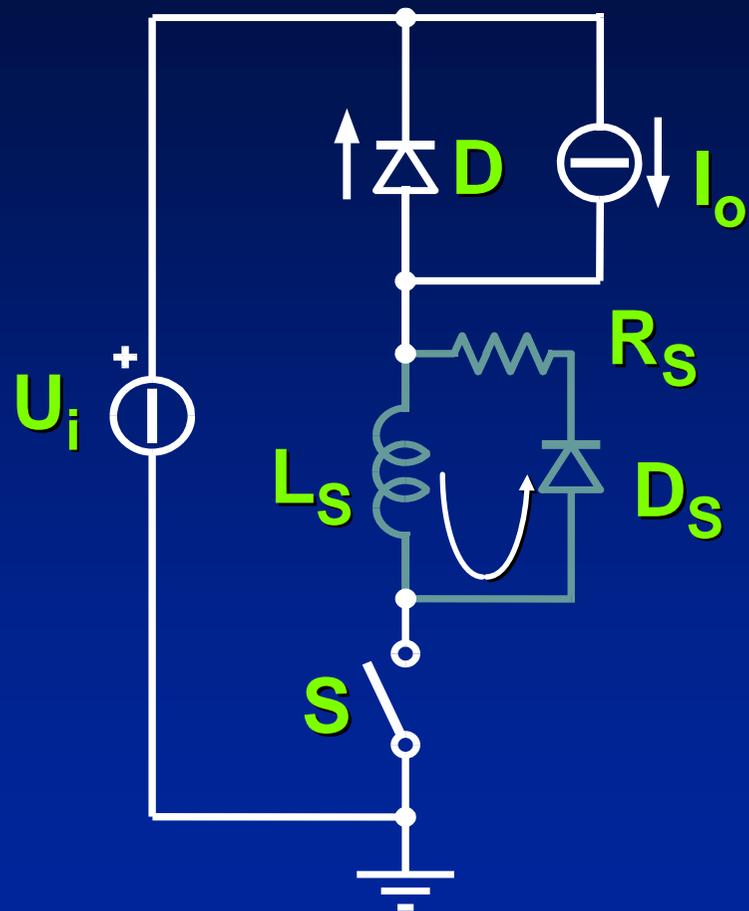


Di conseguenza il picco di corrente di recovery inverso viene ridotto





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

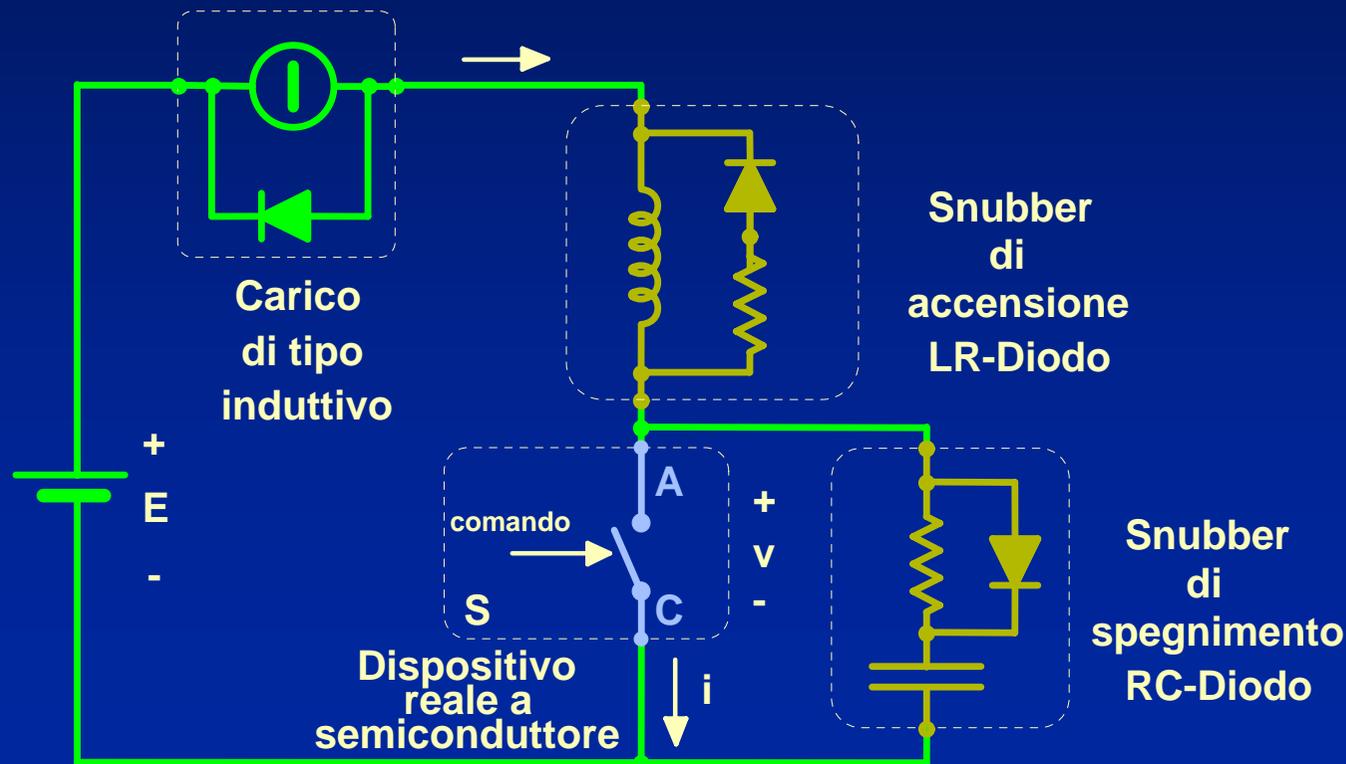
L'induttanza di snubber deve scaricarsi completamente durante il minimo intervallo di "OFF" dello switch:

$$t_{\text{OFF min}} > 2.3 \frac{L_s}{R_s}$$

per avere $i_{L_s} = 0.1 I_o$

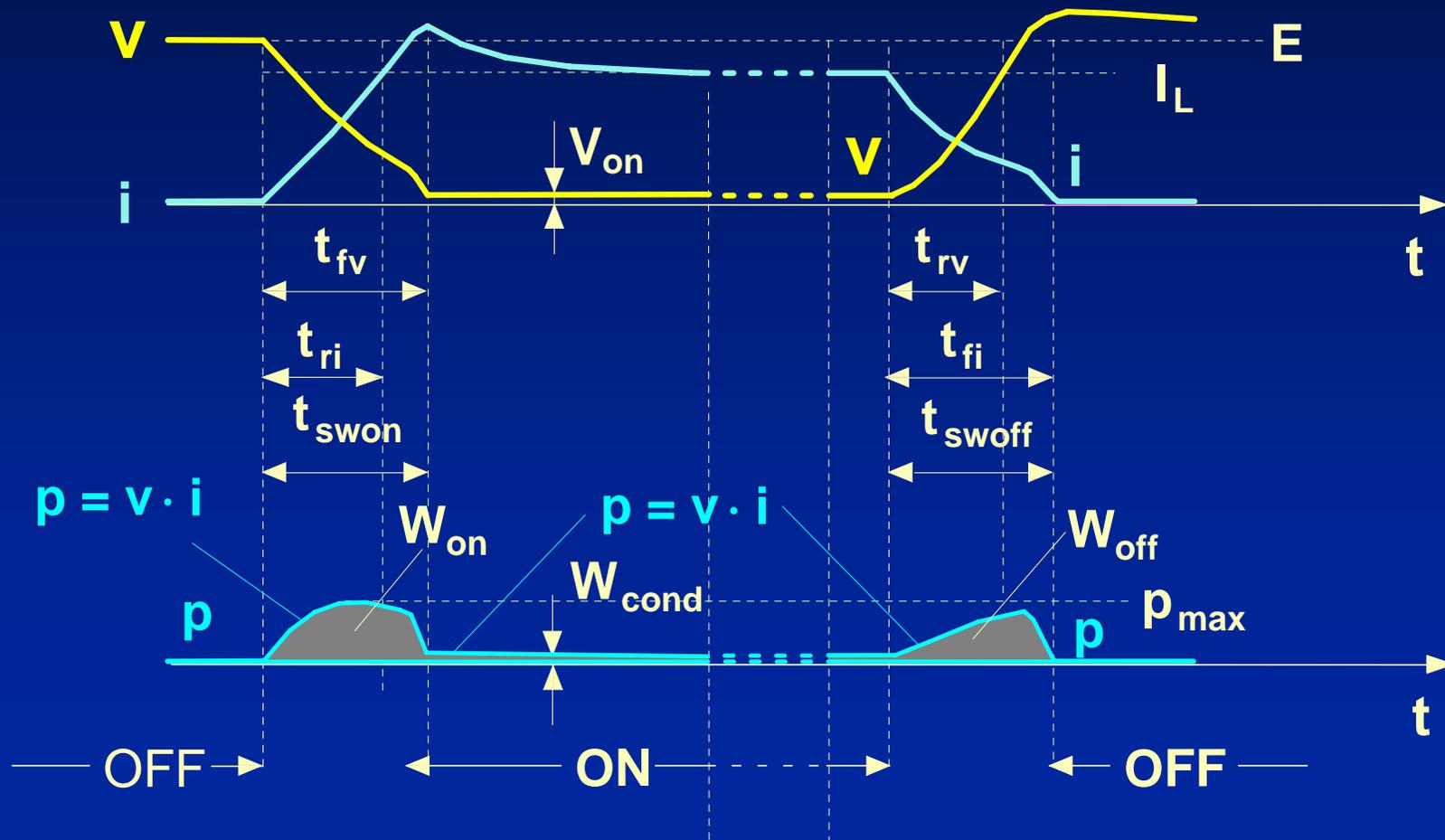
Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento RC-Diodo e di accensione RL- Diodo che limita la velocità di crescita della corrente del dispositivo all'accensione.



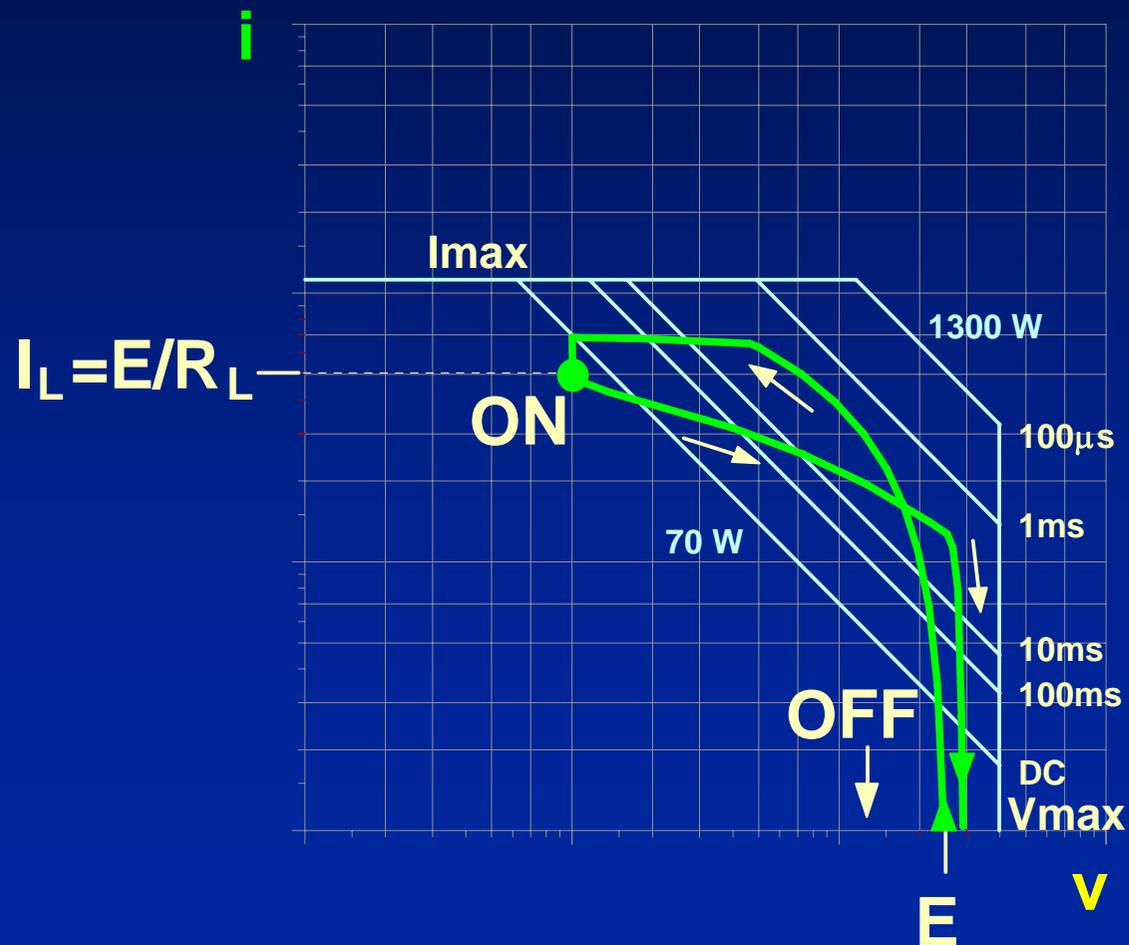
Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento RC-Diodo e di accensione RL-Diodo



Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento RC-Diodo e di accensione RL-Diodo



Snubber

Vantaggi:

riduzione delle dissipazioni
per evitare stati pericolosi durante le commutazioni.

Svantaggi:

richiedono notevoli complicazioni circuitali che
comportano aggravii di costi e, in molti casi,
riduzioni di affidabilità.

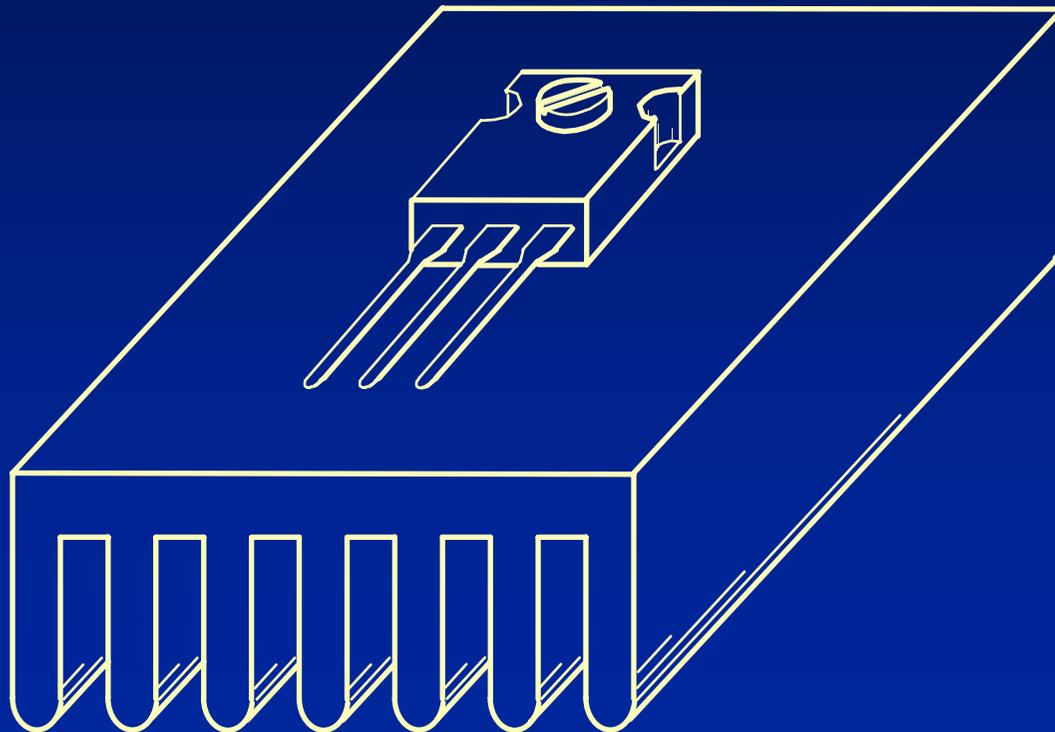
Tendenza attuale:

evitarne l'impiego, anche perchè si sono avuti notevoli
miglioramenti nelle prestazioni (soprattutto la
velocità) dei dispositivi.

1.8 - Smaltimento del calore, Resistenze ed Impedenze termiche

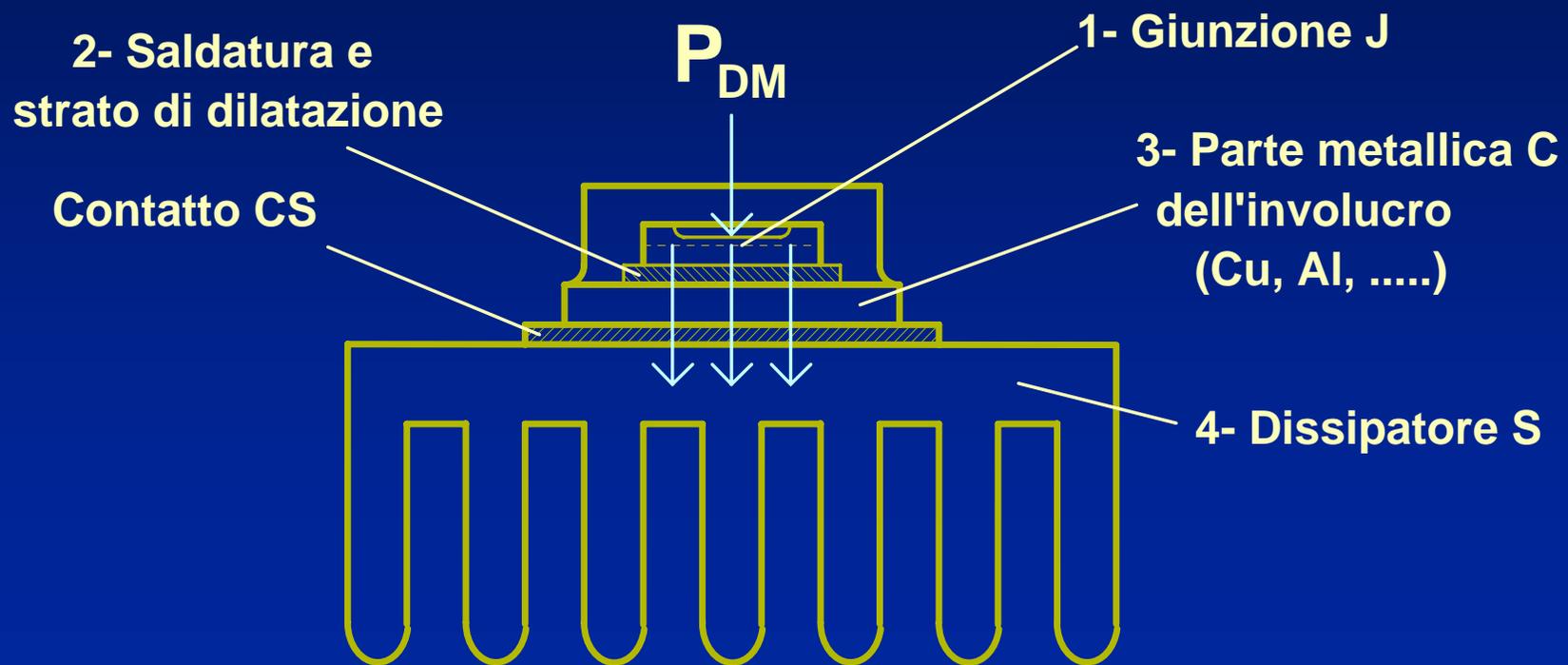
Smaltimento del calore

Dispositivo di potenza
montato su dissipatore



Smaltimento del calore

Trasmissione del calore
nei dispositivi di potenza



Smaltimento del calore

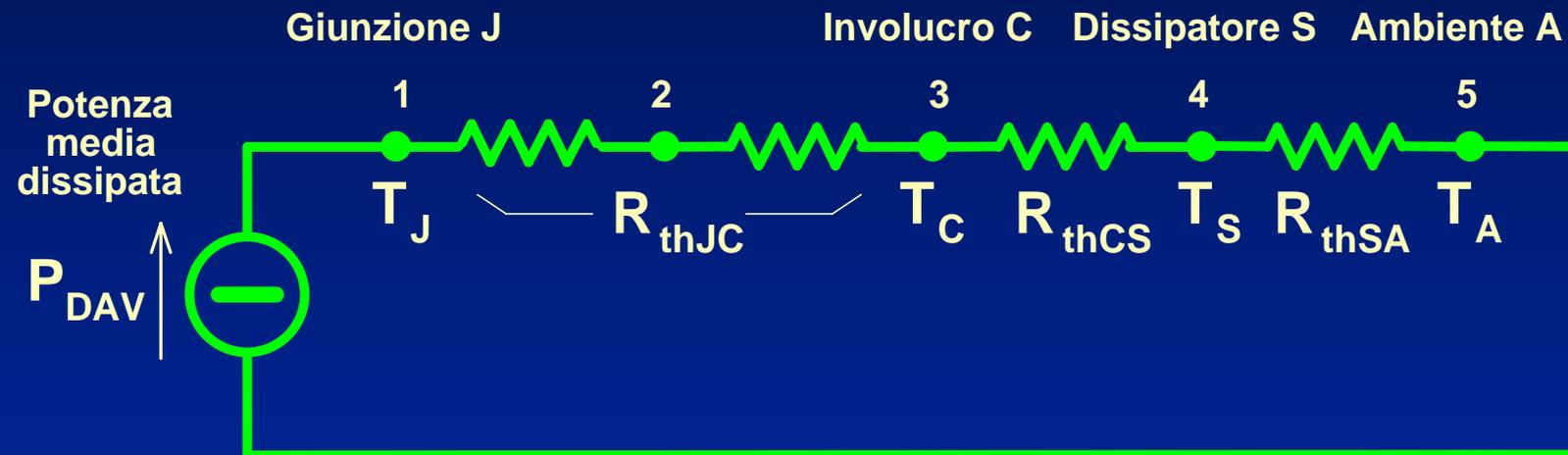
Per ogni passaggio si ha un salto di temperatura che, in prima approssimazione, si può considerare proporzionale al flusso di calore trasmesso.

Il fattore di proporzionalità salto di temperatura/flusso di calore è detto **resistenza termica**.

La quantità di calore è misurata in **calorie** o anche, essendo una energia, in **Joule** ($1\text{Cal}=4185\text{J}$). Il flusso di calore è misurato in **Cal/s** oppure in Joule/secondo, cioè in **Watt**. La resistenza termica si misura quindi in **°C·s/Cal** oppure in **°C/W**.

Smaltimento del calore

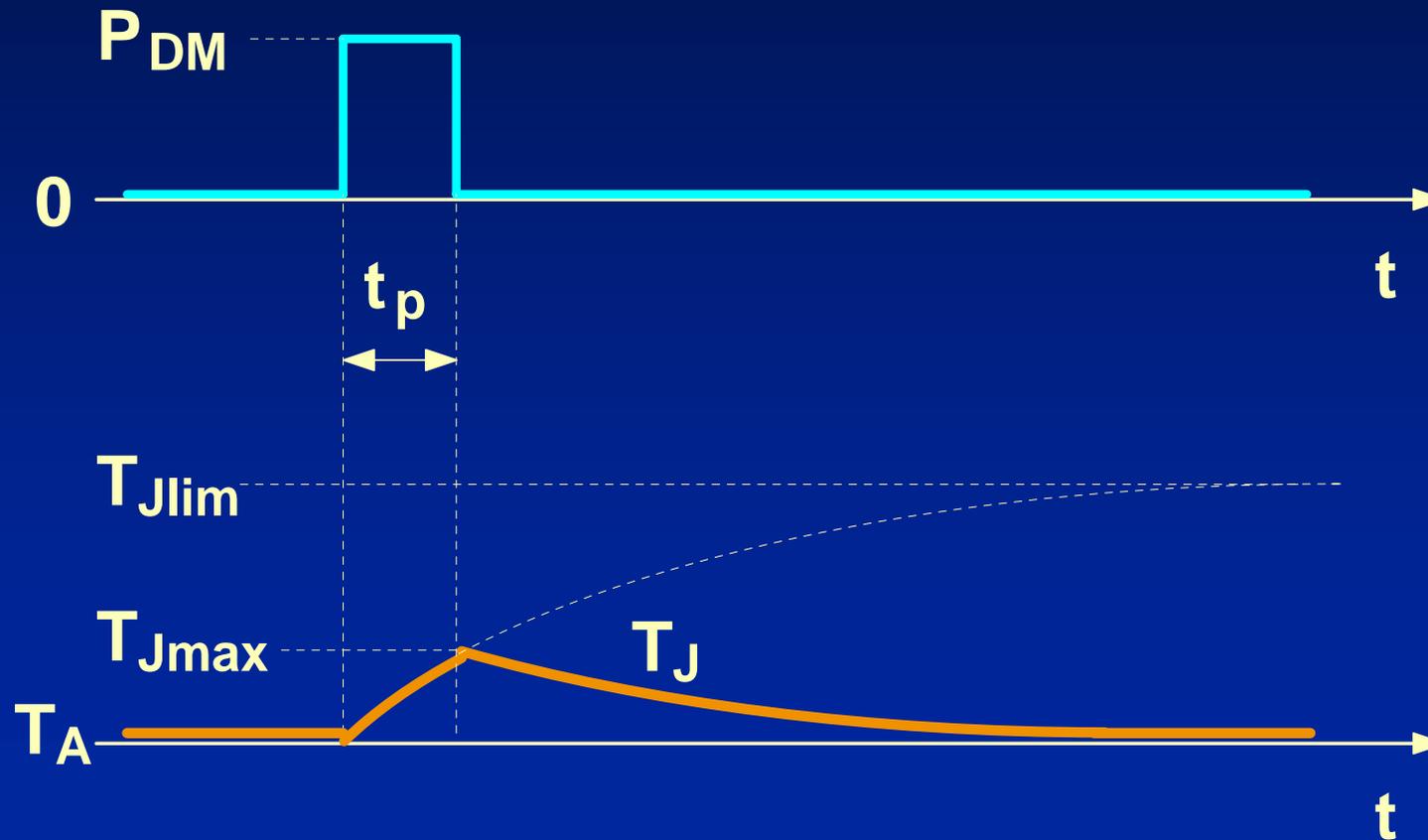
Rete elettrica equivalente
della trasmissione del calore - valori medi



$$T_J = T_A + P \cdot (R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA})$$

Smaltimento del calore

Risposta termica transitoria
ad un gradino di potenza dissipata



Capacità termiche

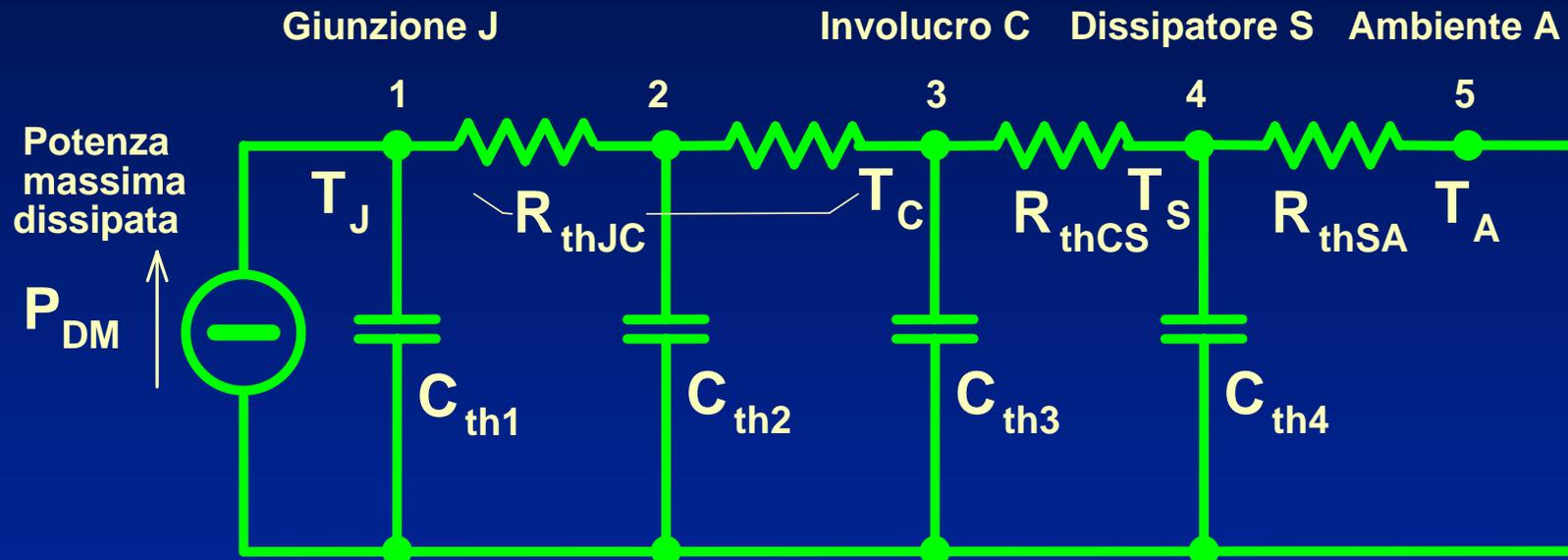
La variazione di temperatura del materiale assorbe una certa quantità di calore.

Si ha cioè una certa “**Capacità termica**” del materiale, la cui azione può essere rappresentata aggiungendo al circuito equivalente elettrico di delle capacità equivalenti **C_{th}** ,

In ogni nodo, i valori di tali capacità dipendono dal volume di materiale, e quindi dalla sua massa, a cui il nodo corrisponde, e dal valore del **calore specifico** del materiale stesso.

Capacità termiche

Rete elettrica equivalente transitoria
della trasmissione del calore - valori massimi

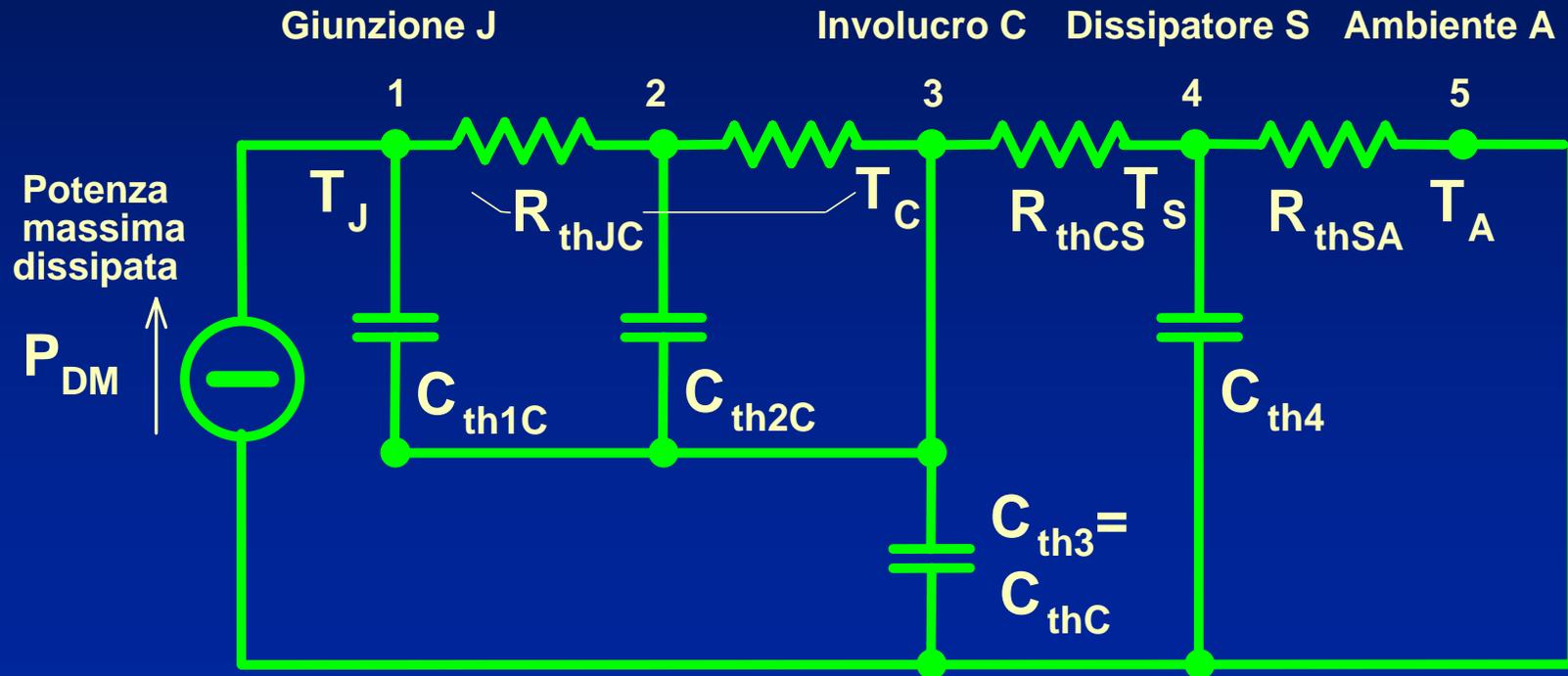


$$T_{Jmax} = T_A + P_{DM} \cdot Z_{th}(t_p)$$

Z_{th} → “impedenza termica transitoria”

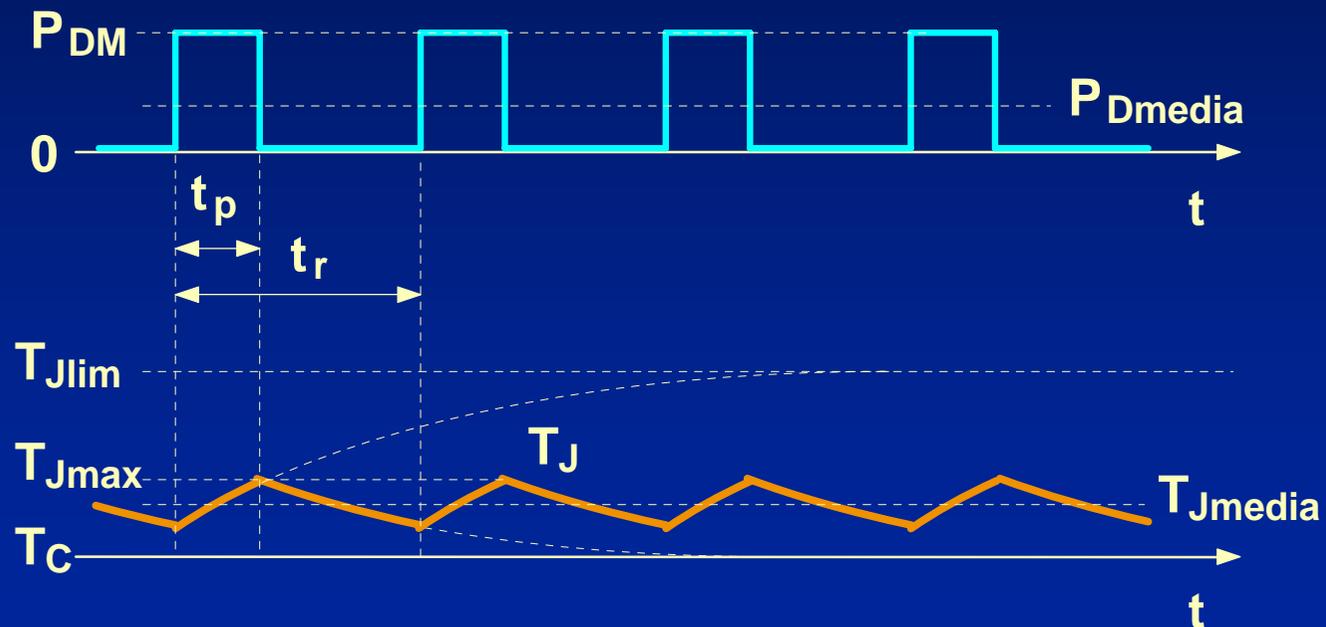
Capacità termiche

Rete elettrica equivalente transitoria
riferita all'involucro - valori massimi



Smaltimento del calore

Risposta termica ad una serie periodica di impulsi di potenza dissipata



Smaltimento del calore

Andamento tipico di impedenze termiche Z_{thJC}
per diversi valori del duty-cycle d

Valori normalizzati alla resistenza termica R_{thJC}

