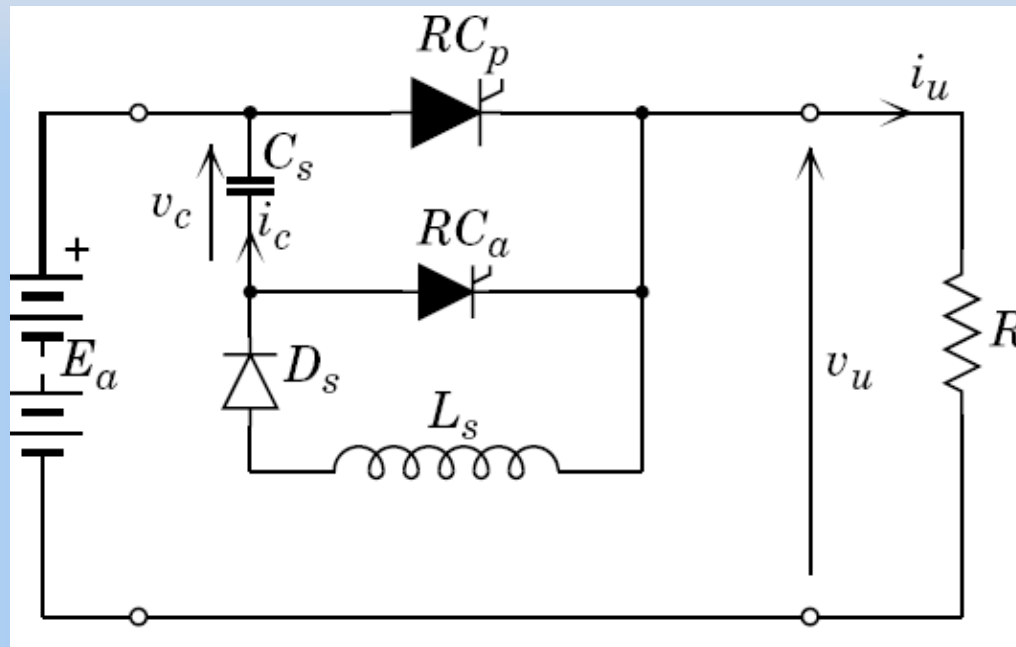


## *Chopper Riduttore - Realizzazione con Tiristori*

Per potenze superiori alle decine di MVA ed a causa dell'elevato costo dei GTO di più elevate prestazioni è spesso economicamente conveniente ricorrere all'impiego di Tiristori.

A differenza dei Transistor e dei GTO, l'apertura dei Tiristori non può essere ottenuta agendo sul pilotaggio; pertanto, per poter impiegare un Tiristore come interruttore statico, è necessario **aggiungere al circuito di potenza un apposito circuito ausiliario di spegnimento** composto da un'induttanza, un diodo, un condensatore e da un altro Tiristore (Tiristore ausiliario,  $RC_a$ ) che serve per lo spegnimento del principale.

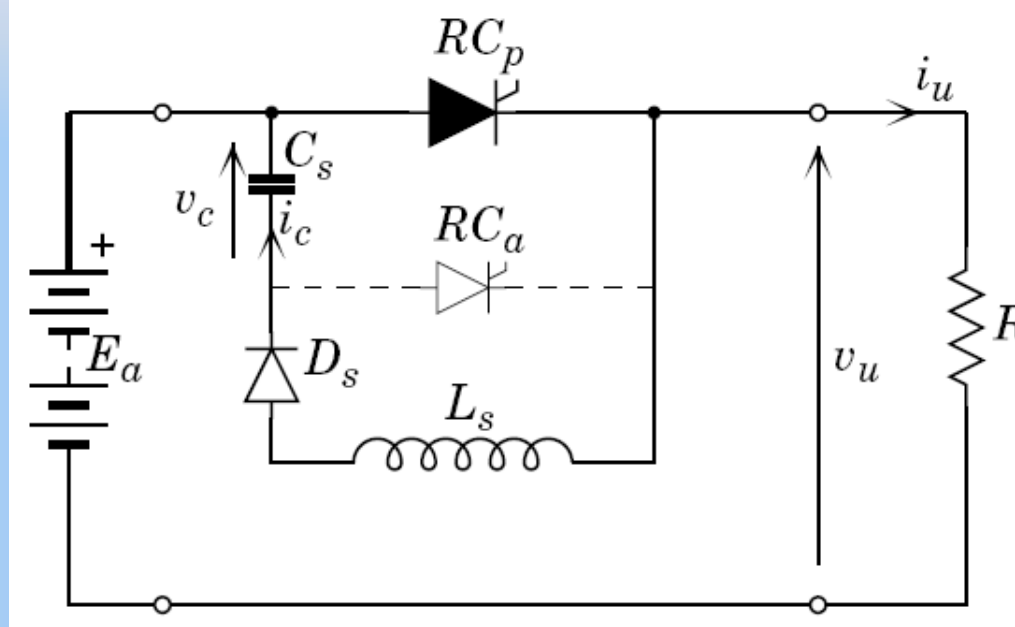
# Chopper Riduttore - Realizzazione con Tiristori



Per ricavare il modello semplificato del convertitore si può procedere suddividendo in sotto-intervalli di tempo il periodo di commutazione degli interruttori e ricavare le relazioni matematiche in ciascun sotto-intervallo.

Si supponga che nell'istante  $t = t_0$   $RC_p$  ed  $RC_a$  siano spenti, l'induttanza  $L_s$  scarica ed il condensatore  $C_s$  carico ad una tensione iniziale  $v_c(t_0) = E_a$ .

# Realizzazione con Tiristori

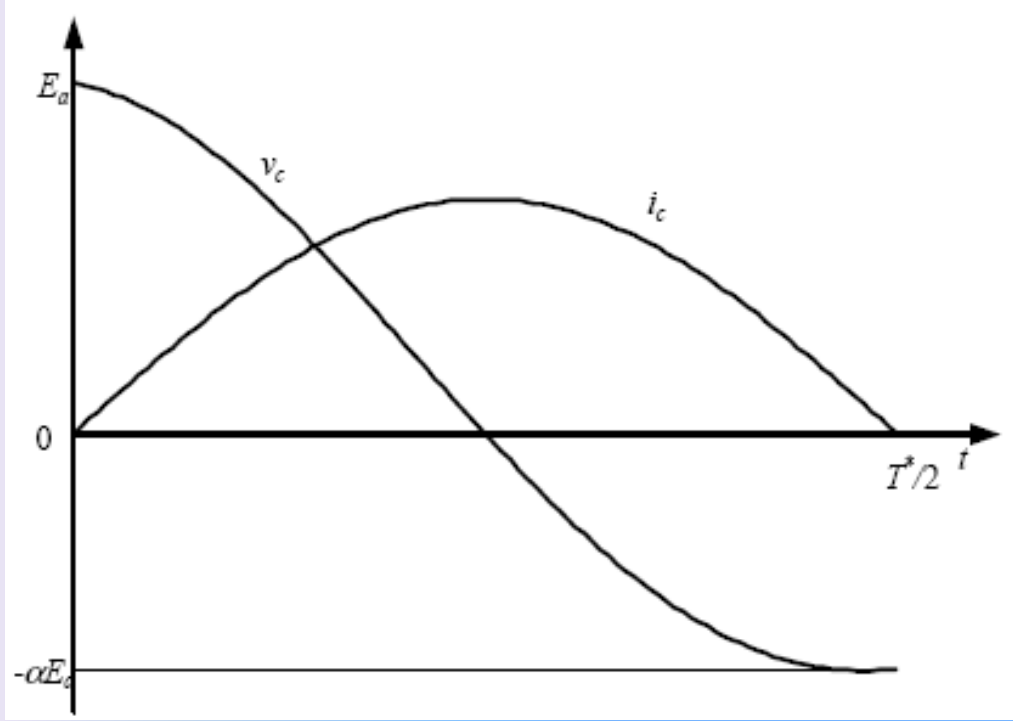


$t = t_0$ ,  $RC_p$  è ON,  $v_u = E_a$

Il circuito oscillante, formato da  $C_s$  e  $L_s$ , inizia ad oscillare con un periodo:

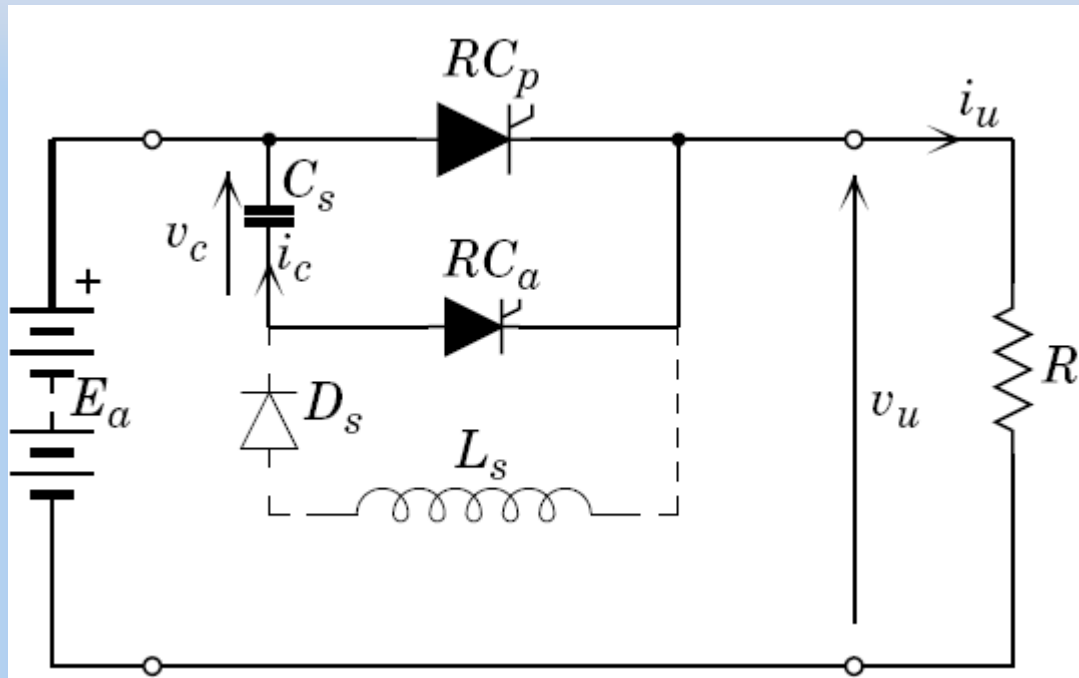
$$T^* = 2\pi\sqrt{L_s C_s}$$

# Realizzazione con Tiristori



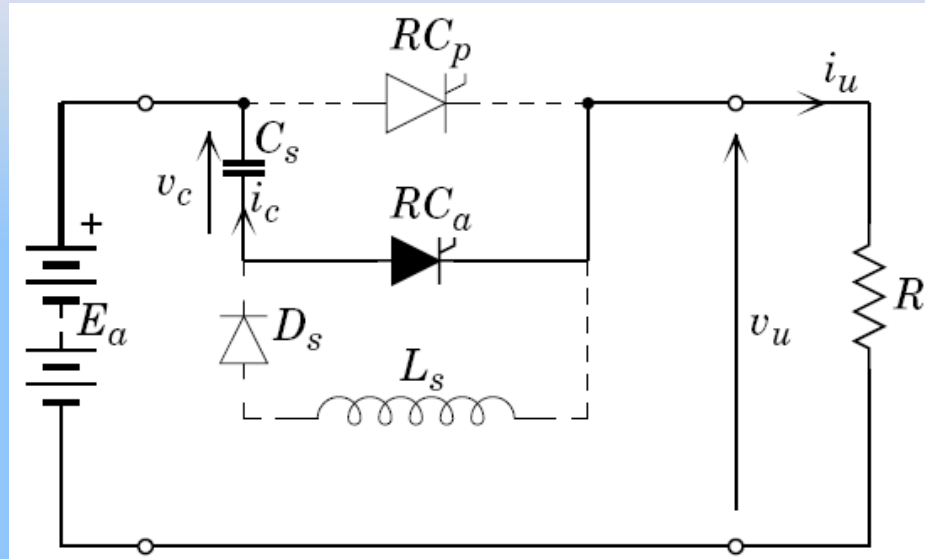
A causa del diodo  $D_s$  l'oscillazione termina dopo la prima semioscillazione ( $t_x = t_0 + T^*/2$ ). In  $t_x$  si ha  $i_c = 0$  il Diodo  $D_s$  smette di condurre e  $v_c = -\alpha E_a$ , in cui il coefficiente  $\alpha$  tiene conto delle perdite insite nel circuito (cadute dirette nel Tiristore principale e in  $D_s$  e perdite nel condensatore, nell'induttanza e nei collegamenti).

# Realizzazione con Tiristori



Per  $t = t_1 > t_x$ , si accende  $RC_a$  il tiristore  $RC_p$  viene sottoposto ad una contotensione pari ad  $\alpha E_a$  che tende a spegnerlo per spegnimento forzato. Quando  $RC_a$  comincia a condurre in  $RC_p$  circolerà una corrente inversa (recovery) terminata la quale il Tiristore  $RC_p$  risulterà aperto.

# Realizzazione con Tiristori

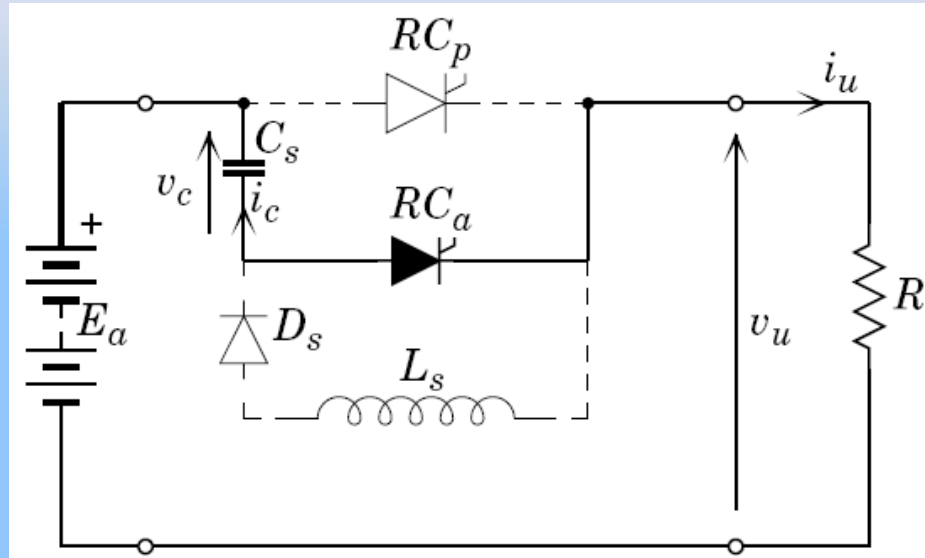


**$RC_p$  OFF,  $RC_a$  ON**

$RC_p$  deve rimanere polarizzato inversamente per un intervallo di tempo  $t_r \geq t_s$  (tempo di spegnimento). A ciò provvede ancora il condensatore  $C_s$  che si scarica con una costante di tempo pari a  $RC_s$ .

Terminata la fase di scarica, il condensatore comincia a ricaricarsi fino a riportarsi nuovamente alla tensione  $E_a$ . Alla fine di questo ciclo di funzionamento, la corrente che attraversa  $RC_a < I_h$  (corrente di tenuta), per cui si spegne con spegnimento statico.

# Realizzazione con Tiristori



Durante l'intervallo di tempo in cui conduce  $RC_a$ , la tensione  $v_c$  assume l'andamento:

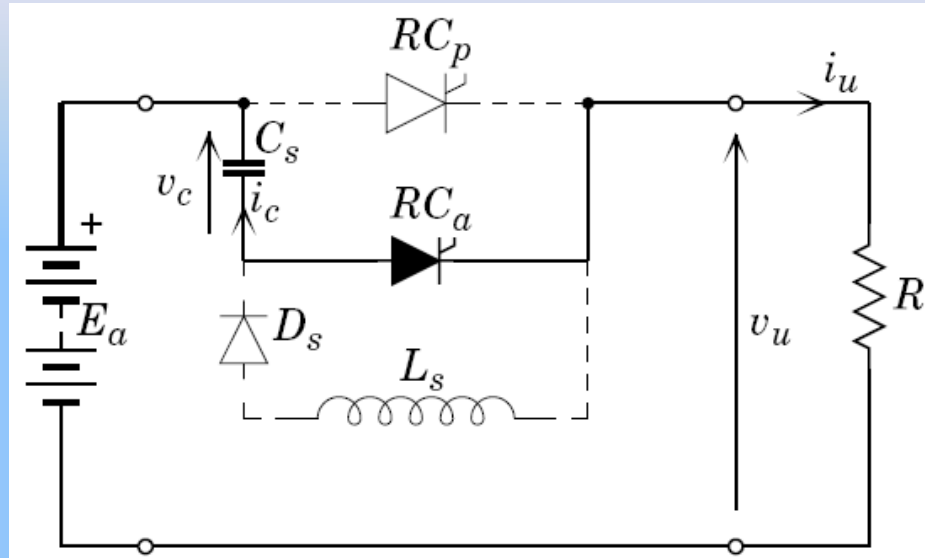
$$v_c(t) = -\alpha E_a + E_a (1 + \alpha) \left(1 - e^{-\frac{t-t_a}{\tau^*}}\right)$$

essendo  $t_a$  l'istante in cui  $RC_p$  si apre.

Eguagliando a zero l'espressione di  $v_c(t)$ , si ricava che la tensione ai capi del condensatore si inverte nell'istante  $t = t_i$ :

$$t_i = t_a + \tau^* \ln(1 + \alpha) \quad \Rightarrow \quad t_r = t_i - t_a = \tau^* \ln(1 + \alpha)$$

# Realizzazione con Tiristori

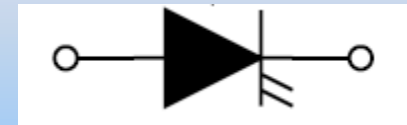
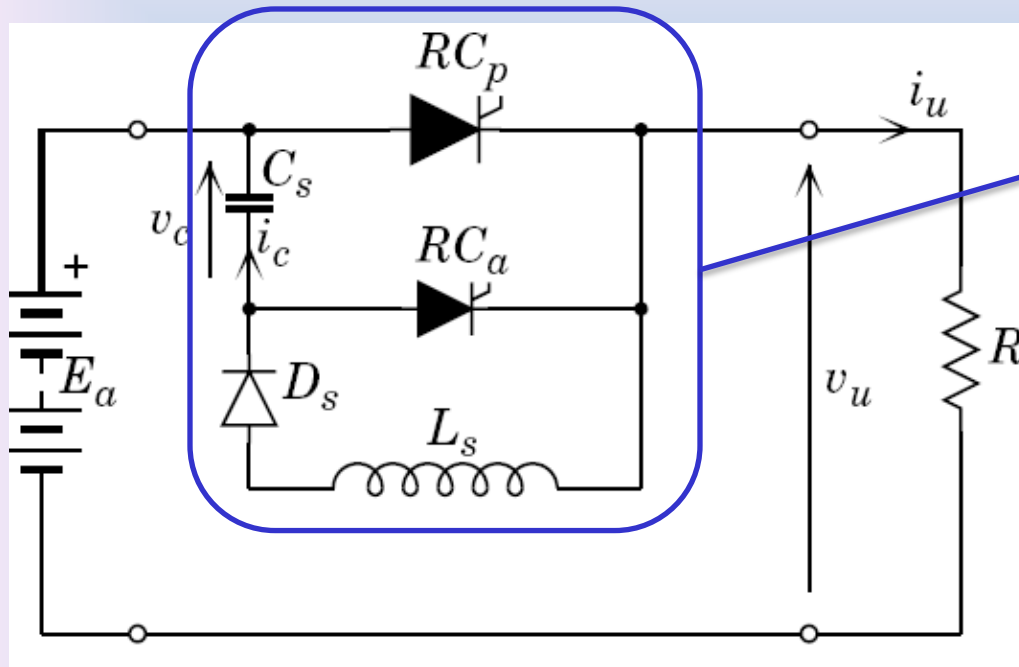


Per assicurare lo spegnimento di  $RC_p$  occorre che  $t_r \geq t_s$  (tempo di spegnimento). Si deve avere :

$$\tau^* > t_s / \ln(1+\alpha) \quad \Rightarrow \quad C_s > t_s / (R \ln(1+\alpha))$$

Se il carico  $R$  è costante si può calcolare facilmente  $C_s$ ; viceversa, occorre trovare un valore di  $C_s$  che garantisca il corretto spegnimento nell'intervallo di  $R$  previsto.

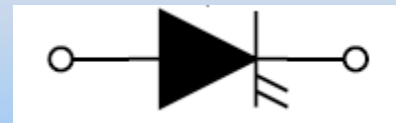
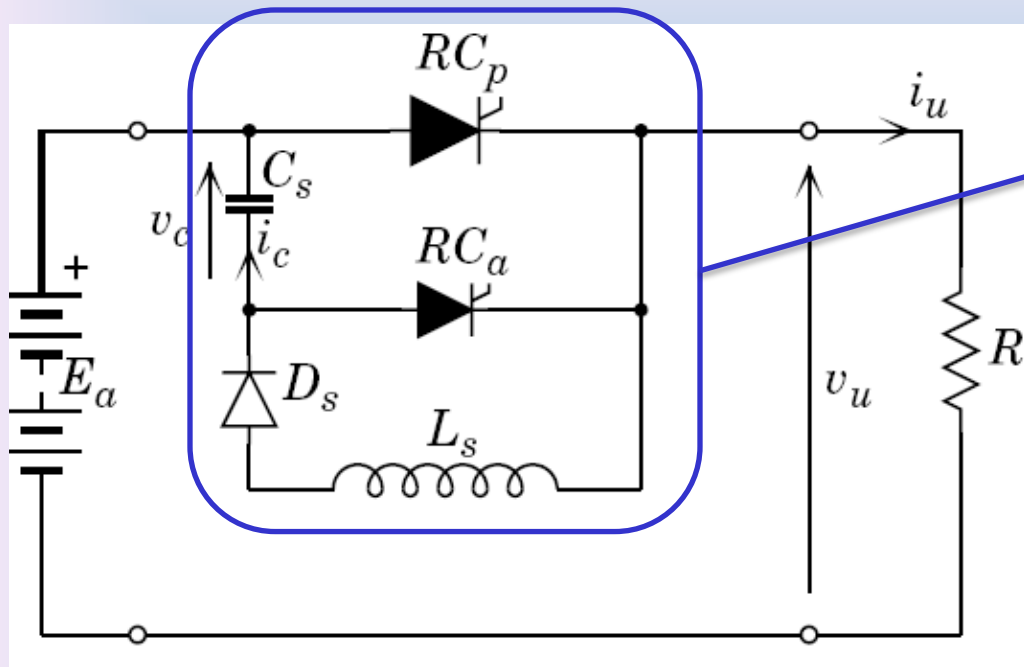
# Realizzazione con Tiristori



*Interruttore Statico*

Il circuito costituito dal Tiristore principale e dal suo circuito di spegnimento (composto dal Tiristore ausiliario  $RC_a$ , dal Diodo  $D_s$ , dal condensatore  $C_s$  e dall'induttanza  $L_s$ ) funziona come un interruttore statico, la cui chiusura e apertura vengono comandate rispettivamente mediante l'impulso di accensione di  $RC_p$  e di  $RC_a$ .

# Realizzazione con Tiristori



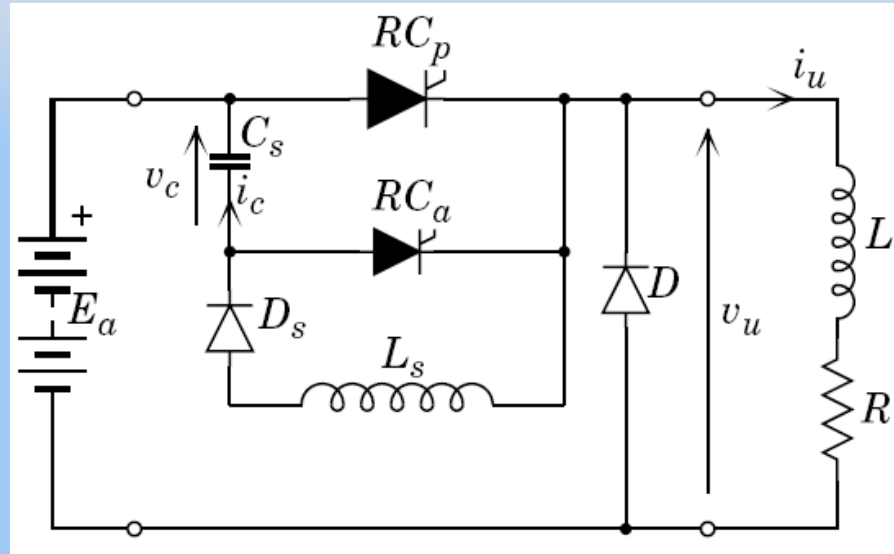
*Interruttore Statico*

Affinché  $RC_p$  possa funzionare correttamente, è necessario che tra la sua accensione e il successivo spegnimento intercorra un tempo maggiore del semiperiodo di oscillazione  $T^*/2$  (affinché  $v_c = -\alpha E_a$ ).

Dualmente, tra lo spegnimento e la successiva accensione deve intercorrere un tempo dell'ordine di 4÷5 volte  $\tau^*$ .

# Realizzazione con Tiristori

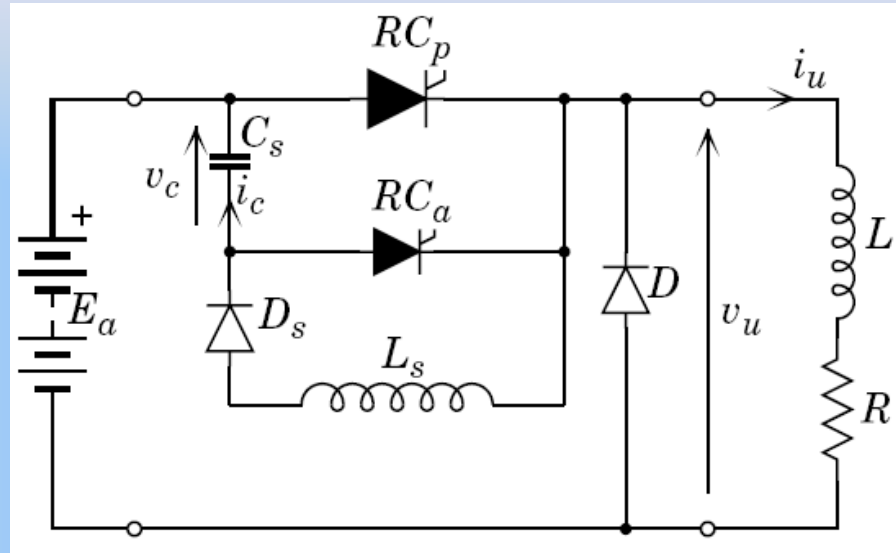
carico induttivo



Occorre aggiungere un diodo di libera circolazione che permetta la circolazione di corrente sul carico quando l'interruttore statico è aperto.

La presenza dell'induttanza non modifica il funzionamento del circuito durante la fase di chiusura.

# Realizzazione con Tiristori - carico induttivo



Per contro, durante la fase di apertura di  $RC_p$ , la corrente che attraversa il condensatore di commutazione risulta praticamente costante e pari al valore  $I_1$  (corrente assorbita dal carico assume nell'istante in cui l'interruttore statico viene aperto). Durante la fase di apertura si avrà:

$$v_c(t) = -\alpha E_a + I_1 (t - t_a)/C_s \quad \rightarrow \quad t_r = \alpha E_a C_s / I_1 \quad \rightarrow \quad C_s > t_s I_1 E_a$$

Quando  $v_c(t) = E_a$  il diodo di libera circolazione  $D$  inizia a condurre.

# Realizzazione con Tiristori

## Scelta di valori di $C_s$ e $L_s$

Il valore della capacità  $C_s$  deve essere scelto in modo da assicurare che la durata  $t_r$  dell'intervallo di tempo durante il quale  $RC_p$  è polarizzato inversamente sia maggiore del suo tempo di spegnimento  $t_s$ .

$$C_s > \frac{t_s I_1}{\alpha E_a}$$

La scelta del valore dell'induttanza  $L_s$ , deve essere fatta attraverso un compromesso tra la durata  $T$  del periodo dell'oscillazione e l'ampiezza  $I_{cp}$  della corrente  $i_c$  si sovrappone alla corrente di carico che interessa anche  $RC_p$ .

All'aumentare di  $L_s$  aumenta il periodo  $T$  mentre diminuisce il valore di  $I_{cp}$ :

$$I_{cp} = E_a \sqrt{\frac{C_s}{L_s}}$$

# Realizzazione con Tiristori

## Effetti delle variazioni del carico

Se la corrente di carico aumenta, la durata dell'intervallo di tempo durante il quale  $RC_p$  si trova polarizzato inversamente non risulta sufficiente per il suo spegnimento e si riaccende.

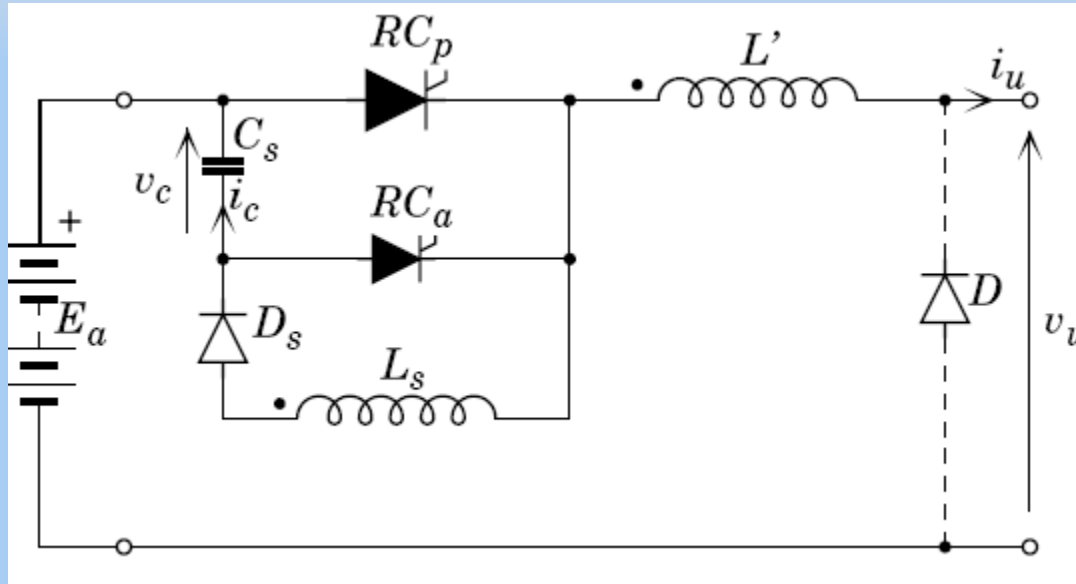
L'interruttore statico non può più venire spento, se non interrompendo il collegamento elettrico con la sorgente di alimentazione.

Per ovviare a tale inconveniente:

- si può scegliere un valore di  $C_s$  più elevato che, però, comporta un maggiore valore di  $I_{cp}$  e un allungamento delle durate minime degli intervalli di conduzione e di interdizione;
- utilizzare il circuito di Jones ottenuto aggiungendo un'induttanza in serie all'interruttore statico e mutuamente accoppiata con  $L_s$ .

# Realizzazione con Tiristori

## Effetti delle variazioni del carico



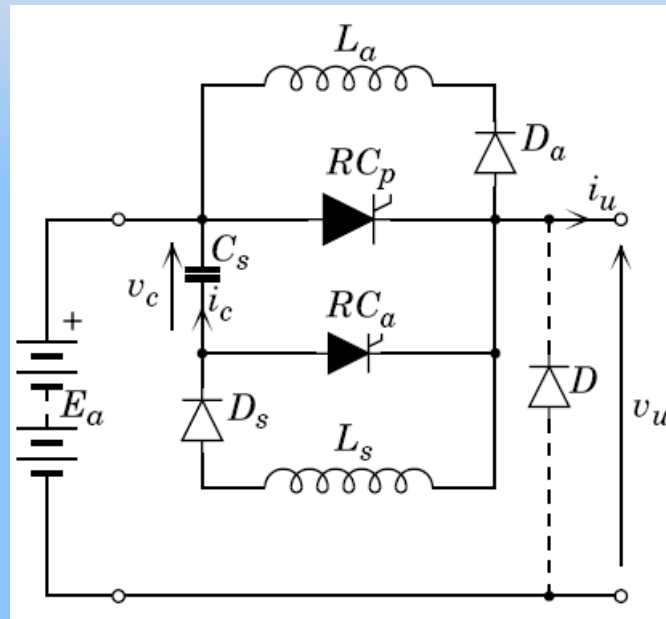
All'aumentare della corrente che circola sul carico, si ha un aumento della tensione ai capi di  $C_s$  e del coefficiente  $\alpha$ .

Tale incremento permette di avere un valore maggiore di  $t_r = \alpha E_a C_s / I_1$ .

Per contro anche le tensioni di picco applicate ai componenti a semiconduttore aumentano.

# Realizzazione con Tiristori

## Effetti delle variazioni del carico



Una riduzione della corrente di carico provoca un aumento della durata minima dell'intervallo di interdizione.

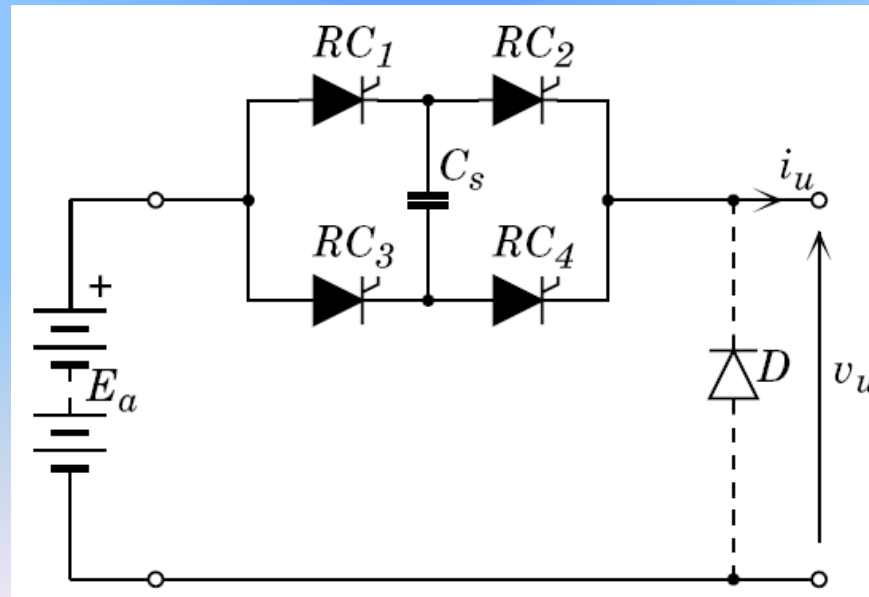
Per ovviare a ciò si inserisce un circuito addizionale costituito da una induttanza  $L_a$  con in serie un Diodo  $D_a$ . L'introduzione di tale circuito crea una ulteriore via lungo la quale può circolare corrente nella capacità e ridurre il tempo di ricarica del condensatore.

# Realizzazione dell'interruttore statico senza induttanza di commutazione

La necessità di invertire la polarità della tensione applicata al condensatore presenta vari inconvenienti:

- una dissipazione di energia durante l'oscillazione;
- una limitazione al tempo minimo di conduzione del Tiristore principale;
- una sovracorrente in  $RC_p$ ;

Per evitare tali inconvenienti, si ricorre a due schemi, basati sull'impiego di una **configurazione a ponte**.

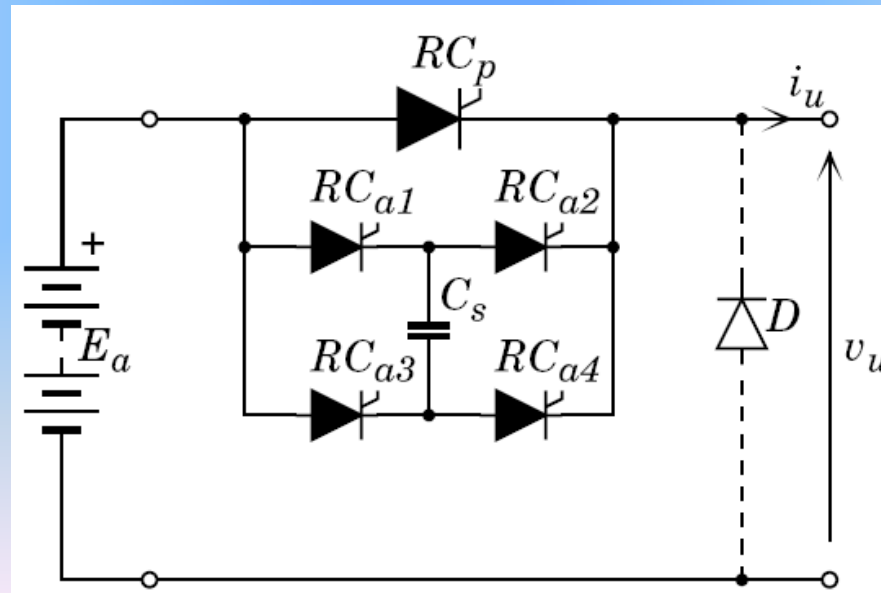


# Realizzazione dell'interruttore statico senza induttanza di commutazione

La necessità di invertire la polarità della tensione applicata al condensatore presenta vari inconvenienti:

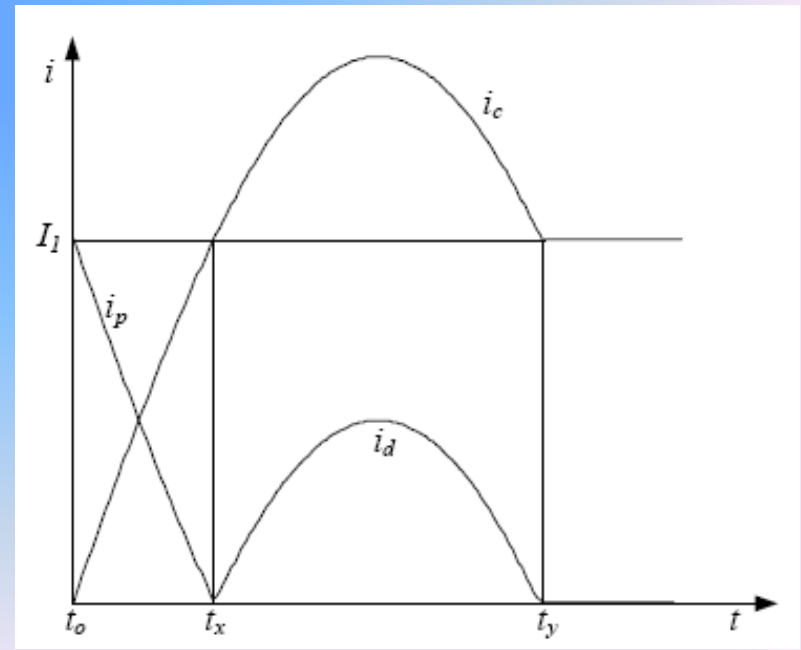
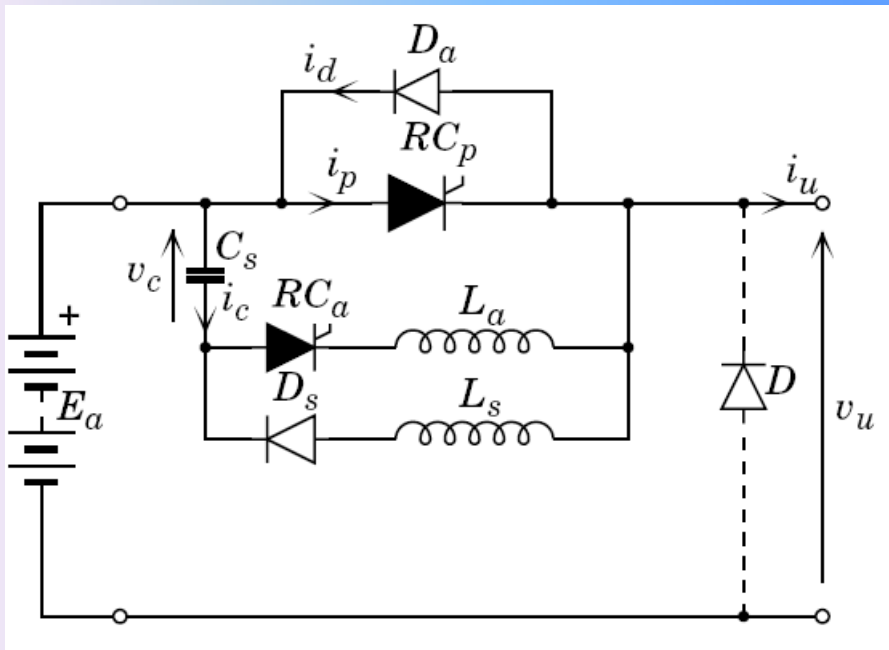
- una dissipazione di energia durante l'oscillazione;
- una limitazione al tempo minimo di conduzione del Tiristore principale;
- una sovracorrente in  $RC_p$ ;

Per evitare tali inconvenienti, si ricorre a due schemi, basati sull'impiego di una **configurazione a ponte**.



# Convertitore con spegnimento quasi statico

Esiste la possibilità di effettuare lo spegnimento in maniera quasi statica. Il circuito base presenta l'aggiunta di un Diodo  $D_a$  in antiparallelo al Tiristore principale e una induttanza  $L_a$  in serie a quello ausiliario utilizzata per ottenere un'oscillazione con  $C_s$  e spegnere quasi staticamente  $RC_p$  quando la corrente che vi scorre si annulla.



# Tiristori

## Circuiti di protezione

Nei convertitori i due Tiristori non necessitano di protezioni contro un eccessivo valore del  $dv/dt$  in quanto tale funzione è assolta dalla capacità  $C_s$ . Qualora però la tensione della sorgente di alimentazione possa presentare delle brusche variazioni è opportuno inserire, in parallelo ad  $RC_p$ , un circuito RC in modo da ridurre il  $dv/dt$ .

Il circuito di protezione contro eccessivi valori del  $di/dt$  su  $RC_p$  e  $Rc_a$  è costituito da una induttanza  $L_2$  con in parallelo la serie di un Diodo e una resistenza, tale da ridurre il valore del  $di/dt$  sul componente ad un valore inferiore a quello accettabile.