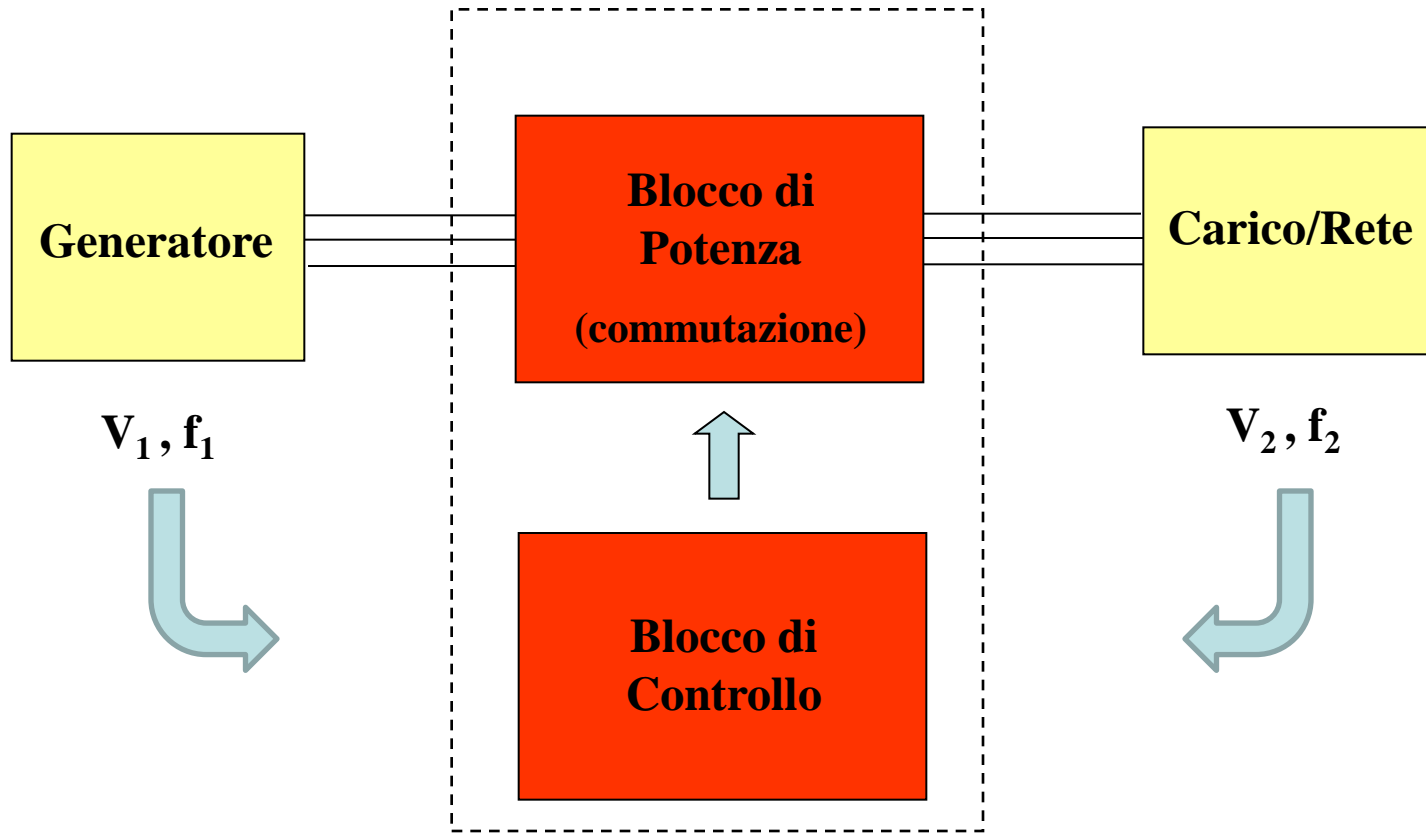
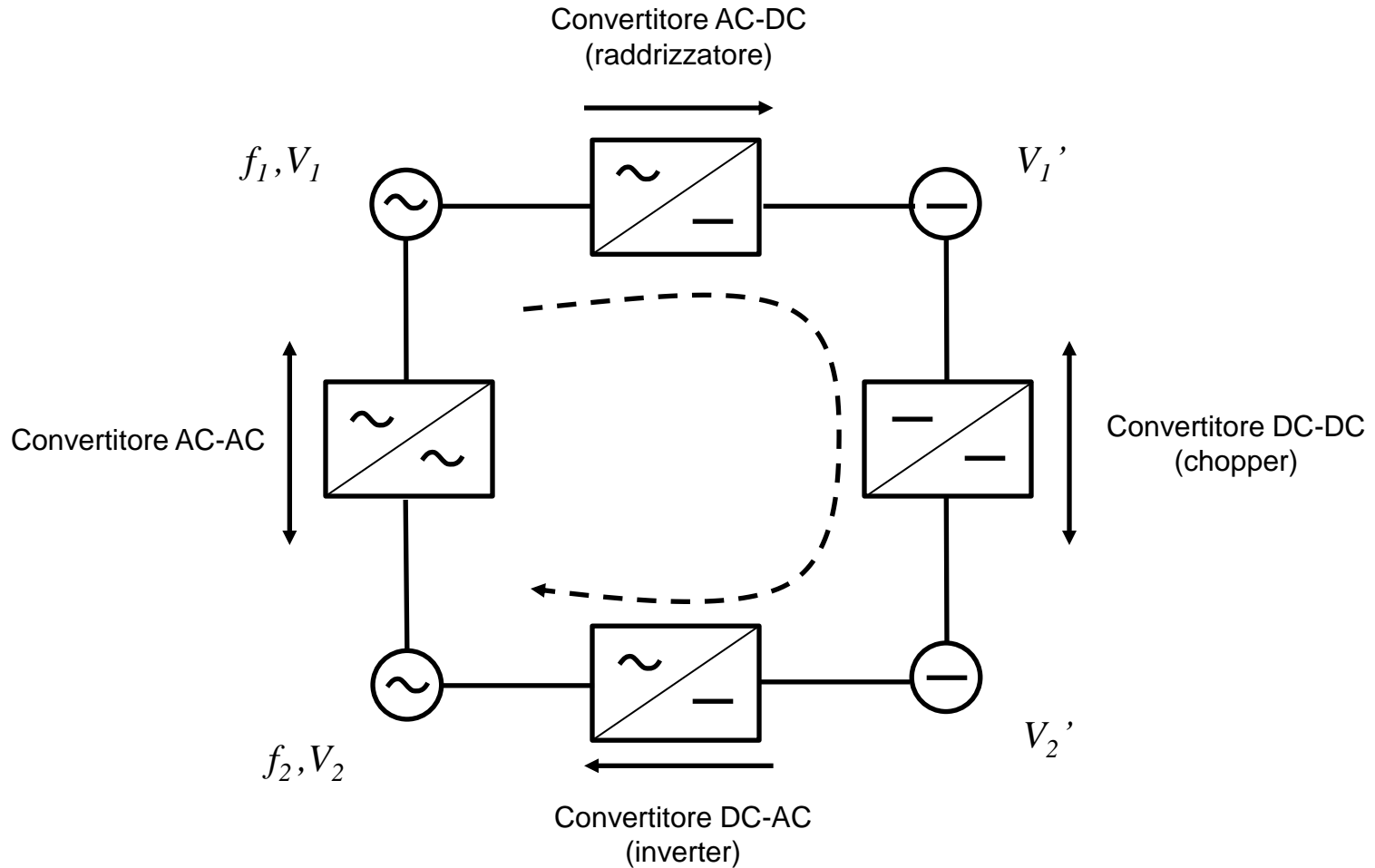


# Convertitori Elettronici di Potenza



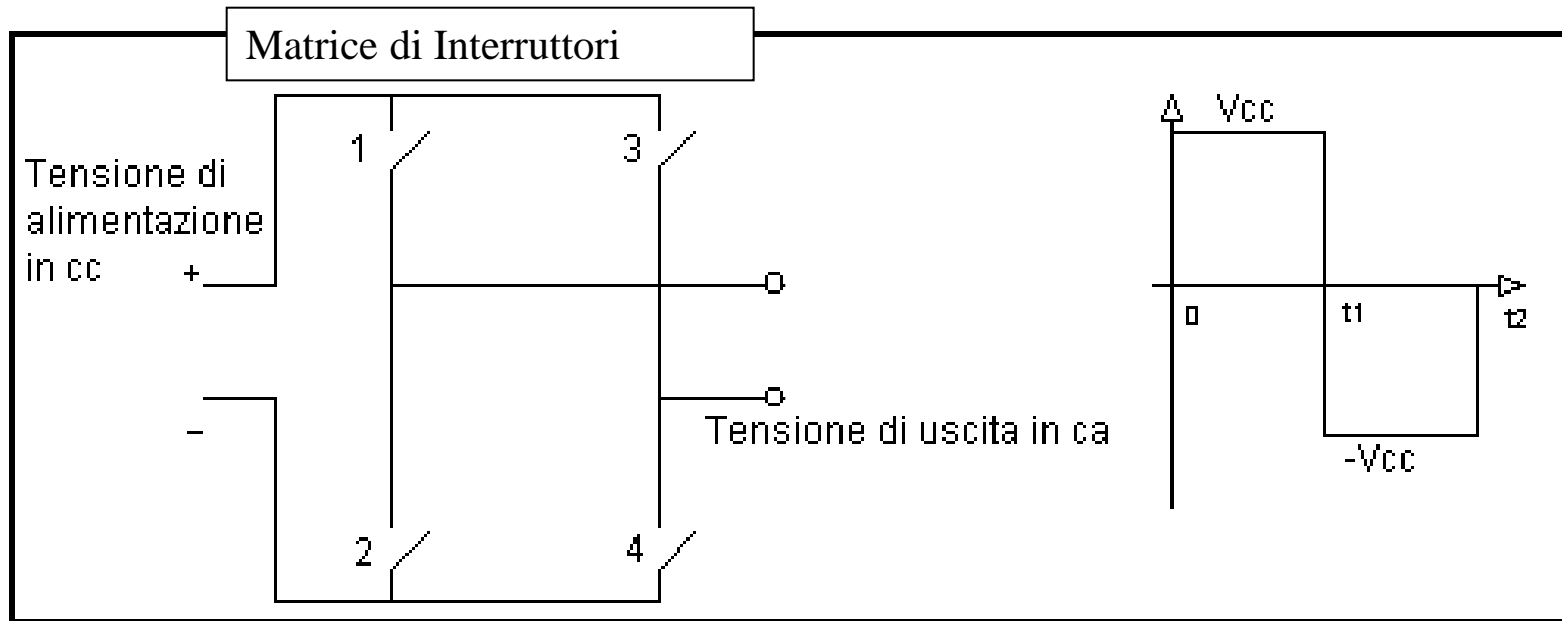
Schema di principio di un convertitore di potenza

# Classificazione dei Convertitori Elettronici di Potenza



Il convertitore AC-AC di solito viene realizzato attraverso tre stadi AC-DC, DC-DC e DC-AC

# Convertitori a Commutazione



**Schema di principio di un inverter monofase**

# Teorema di Fourier

$$a(t) = a(t + nT) \quad \text{Segnale Periodico}$$

$$a(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos(k\omega t) + B_k \sin(k\omega t)]$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(t) dt = \langle a \rangle \quad A_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(t) \cos(k\omega t) dt \quad B_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(t) \sin(k\omega t) dt$$

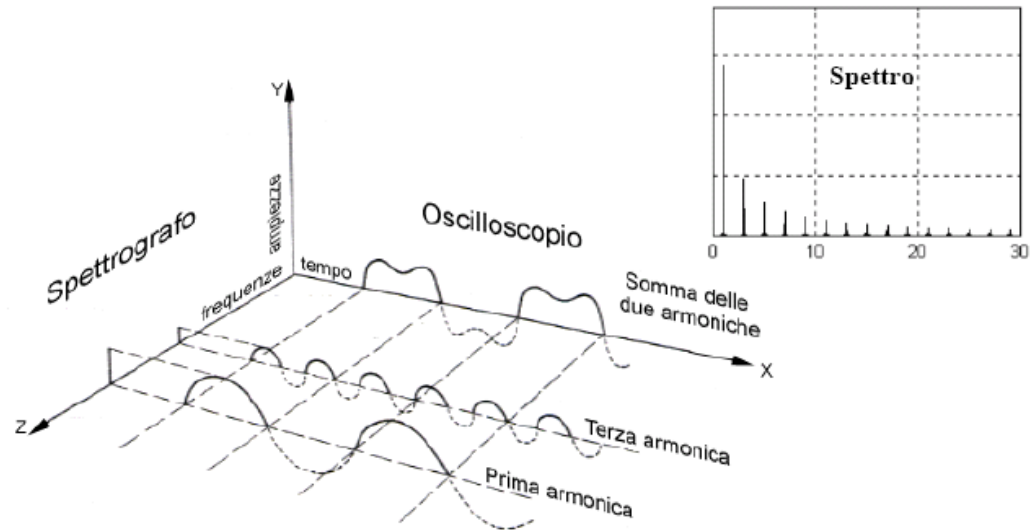
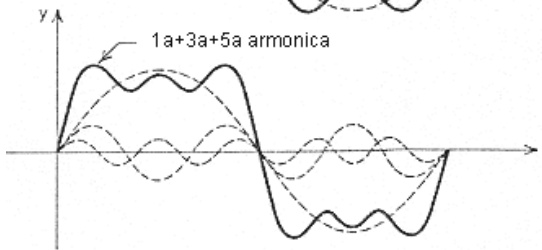
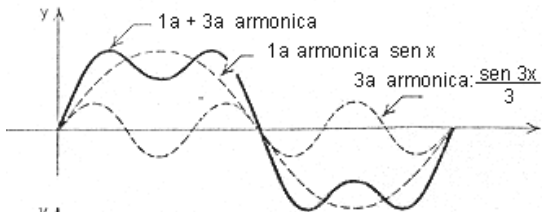
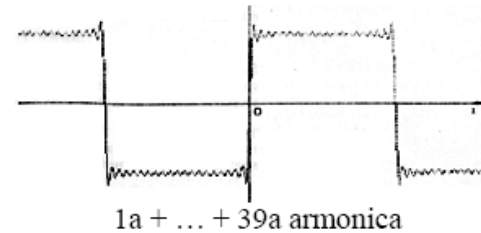
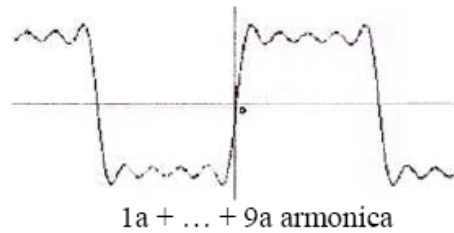
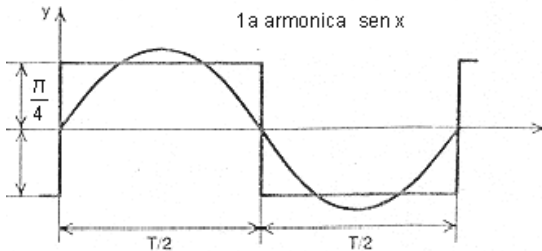
$$a(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega t + \theta_k)$$

**Ogni segnale periodico di data frequenza è scomponibile nella somma del suo valore medio più una serie infinita di componenti armoniche a frequenza multipla**

# Esempio 1

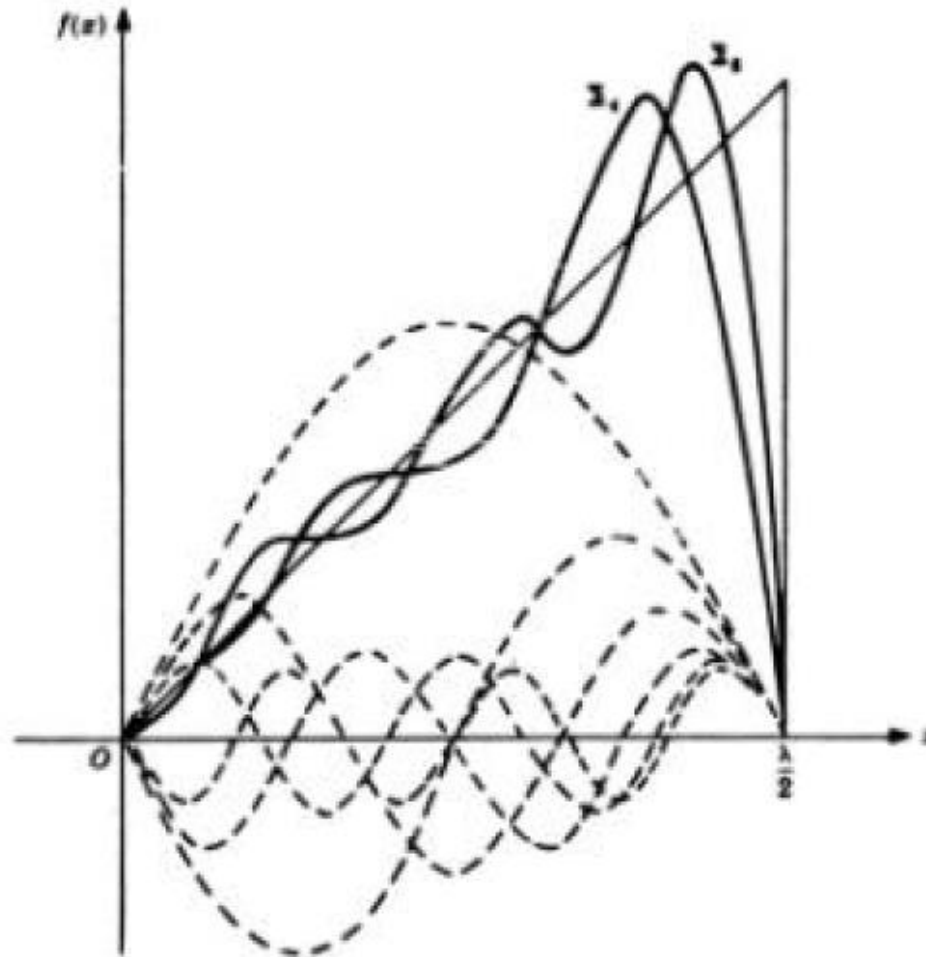
$$a(t) = \frac{\pi}{4} \begin{cases} +1, & \left(0 < t < \frac{T}{2}\right)_{\text{mod } T} \\ -1, & \left(\frac{T}{2} < t < T\right)_{\text{mod } T} \end{cases} \Rightarrow a(t) = \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots$$

**Esempio di serie di Fourier**  
(onda quadra)



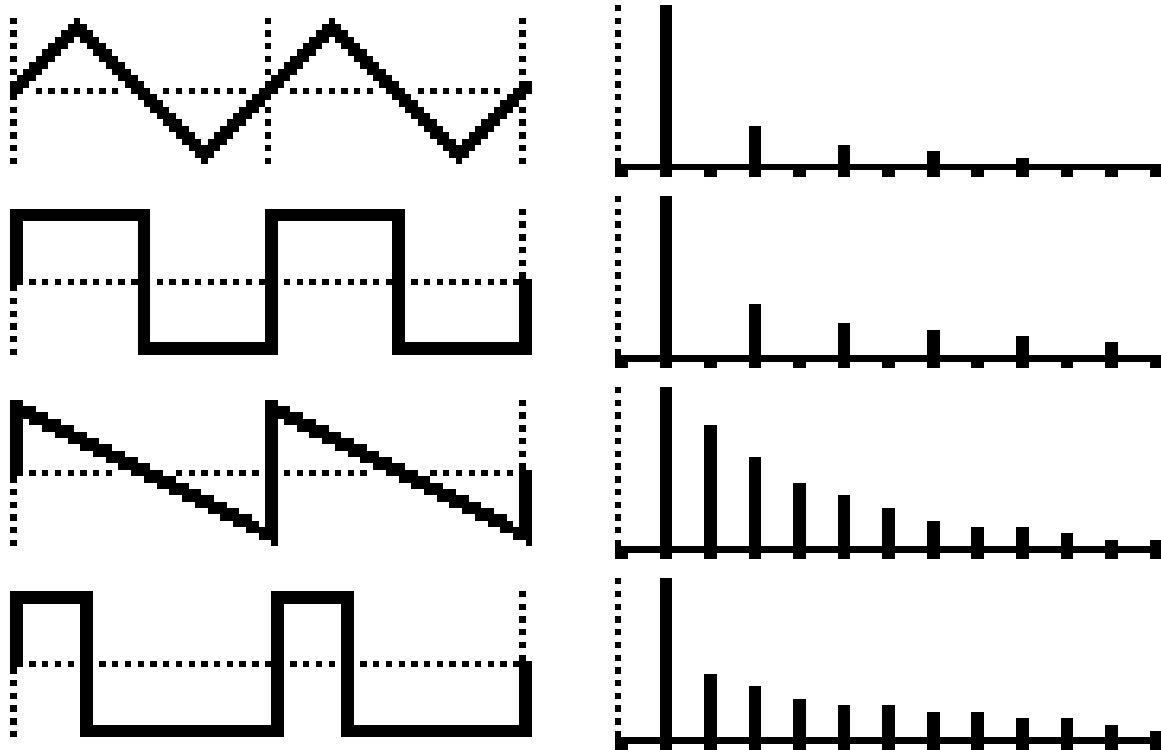
**Scomposizione armonica di un onda quadra**

## Esempio 2

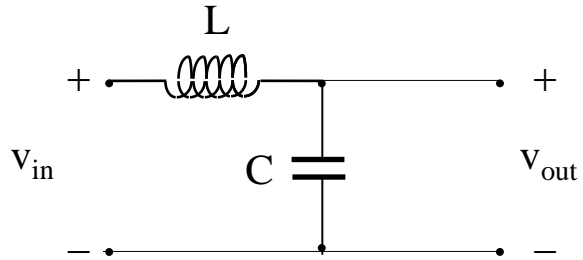


Scomposizione armonica di un onda a dente di sega

# Spettro di un segnale periodico



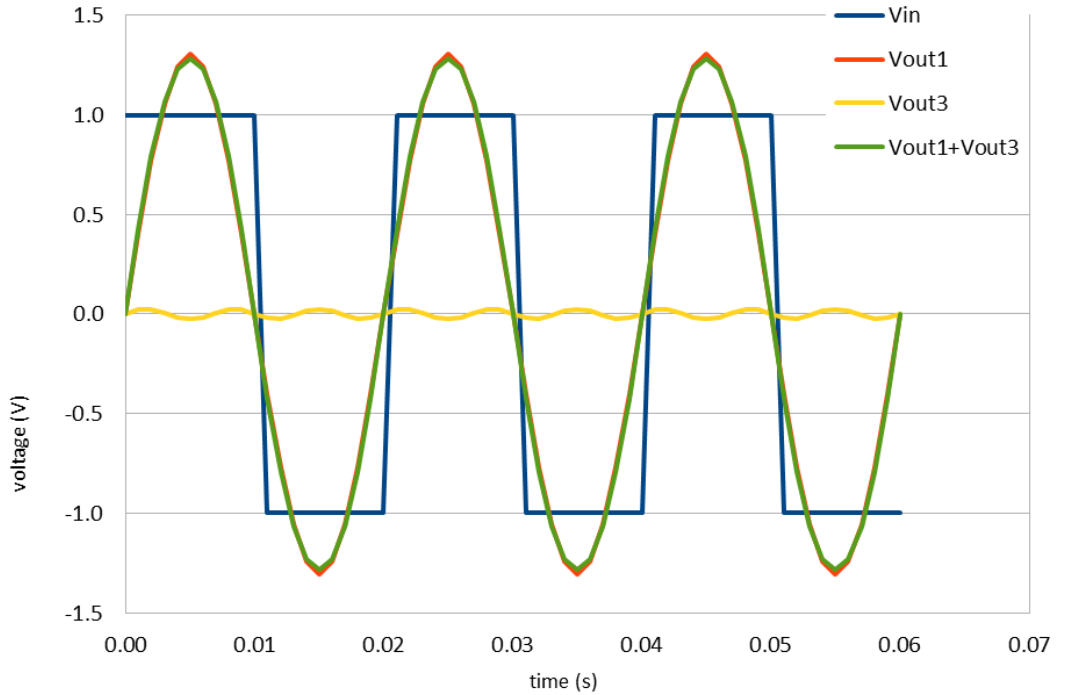
# FILTRO L-C



$$L = 10 \text{ mH}$$

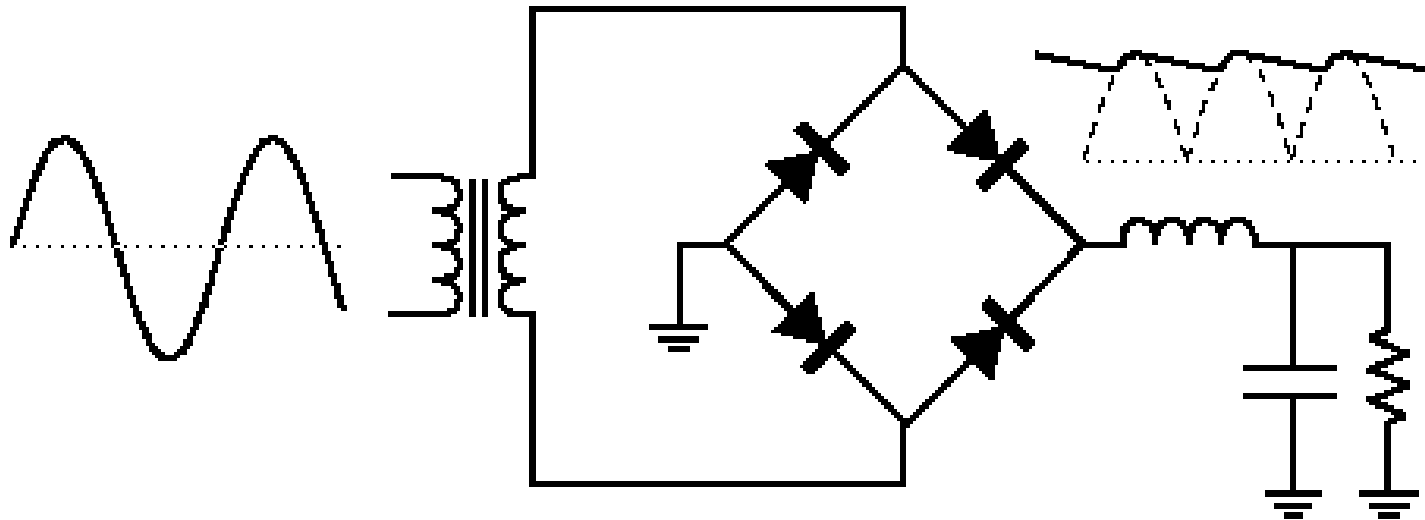
$$C = 2 \text{ mF}$$

$k$	$V_{in,k}$	$V_{out,k}$
1	1.27E+00	1.31E+00
3	4.24E-01	2.53E-02
5	2.55E-01	5.27E-03





# Filtri



Filtro LC passa basso

# Interruttori ideali

## Power loss in an ideal switch

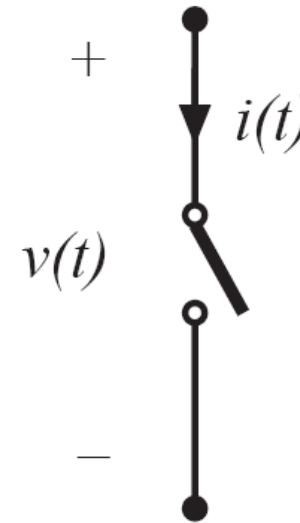
---

Switch closed:  $v(t) = 0$

Switch open:  $i(t) = 0$

In either event:  $p(t) = v(t) i(t) = 0$

Ideal switch consumes zero power



# Commutazione

## PERDITE DI COMMUTAZIONE $P_s$

$$P_s = \frac{W_{c(on)} + W_{c(off)}}{T_s} = \frac{1}{2} V_d I_o f_s (t_{c(on)} + t_{c(off)})$$

$P_s$  è proporzionale a:

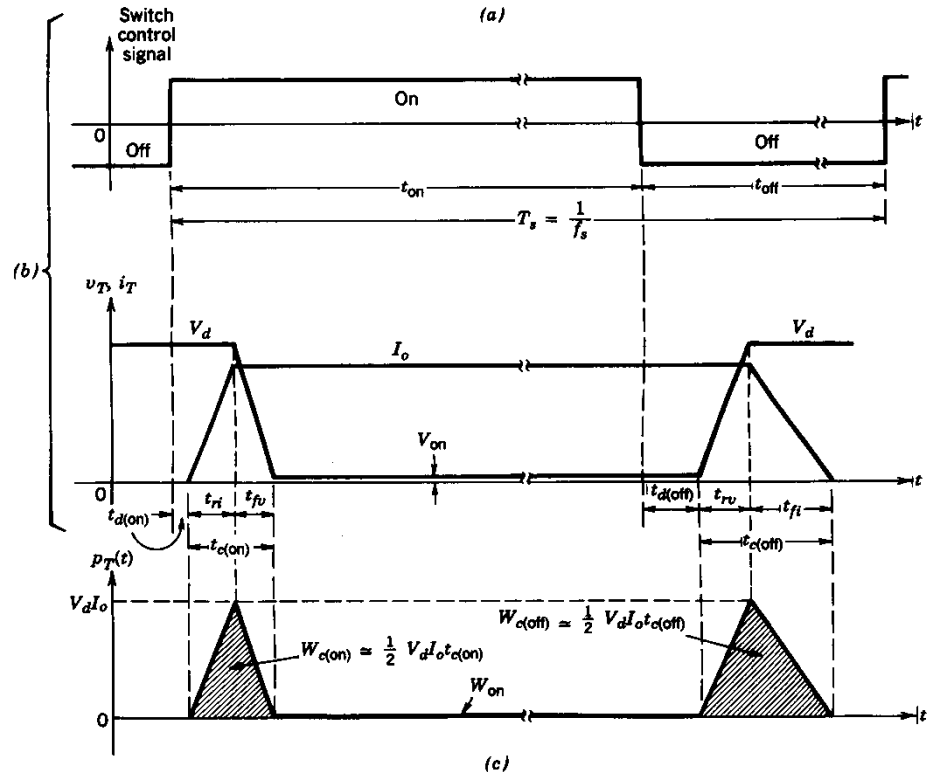
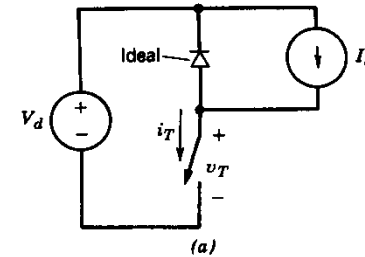
- frequenza di commutazione  $f_s$
- tempi di accensione e spegnimento  $t_{c(on)}$  e  $t_{c(off)}$

## PERDITE DI CONDUZIONE $P_{on}$

$$P_{on} = \frac{W_{on} t_{on}}{T_s} = V_{on} I_o \frac{t_{on}}{T_s}$$

## PERDITE TOTALI $P_T$

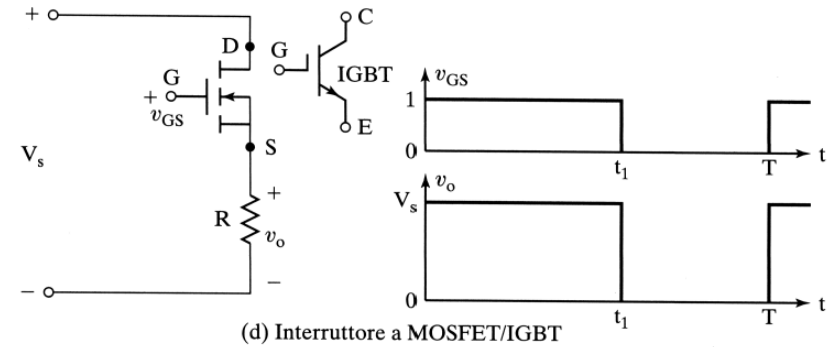
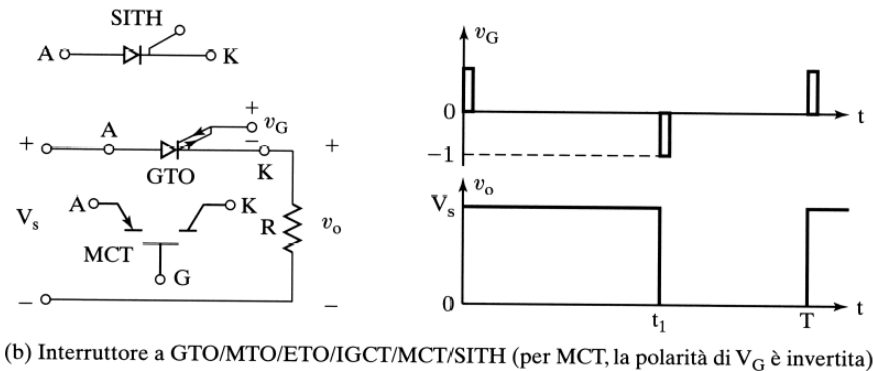
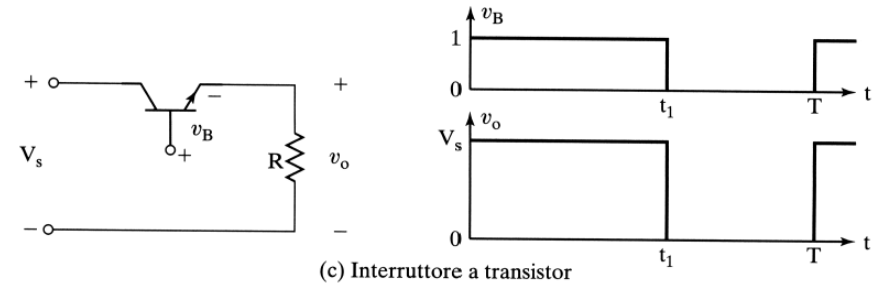
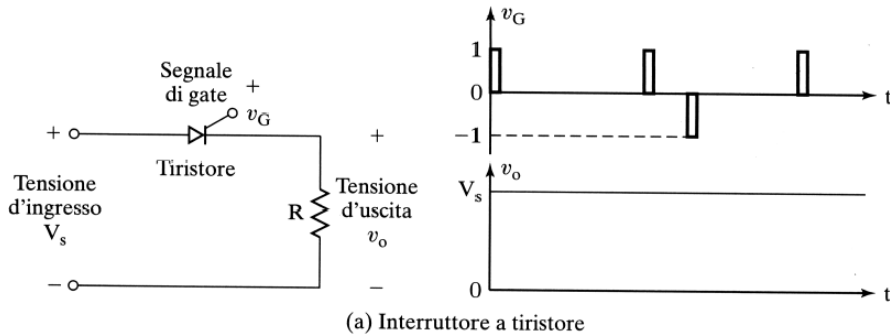
$$P_T = P_{on} + P_s$$



# Componenti Elettronici di Potenza -1

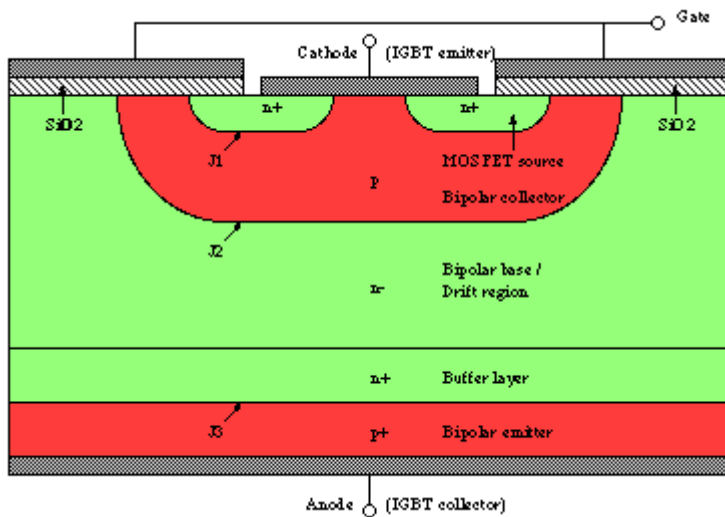
- Diodi
- Tiristori
- Transistori a giunzione bipolari (**BJT**)
- Transistori a effetto di campo a metallo-ossido-semiconduttore (**MOS-FET**)
- Tiristori **GTO** (**G**ate **T**urn-off **T**hyristors: tiristori con spegnimento dal gate)
- Transistori bipolari a gate isolato (**IGBT**: insulated **g**ate **b**ipolar transistor)
- Tiristori commutati a gate integrato (**IGCT**: Integrated **G**ate **C**ommutated **T**hyristor)
- Tiristori controllati a metallo-ossido-semiconduttore **MCT** (**M**OS controlled **t**hyristor)

# Componenti Elettronici di Potenza - 2

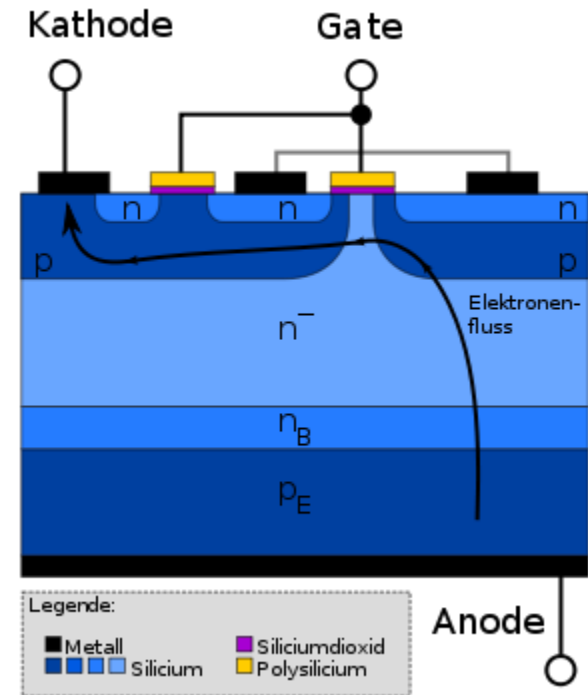


# Componenti Elettronici di Potenza - 3

Realizzati con la tecnologia del silicio, drogando opportunamente regioni diverse del dispositivo

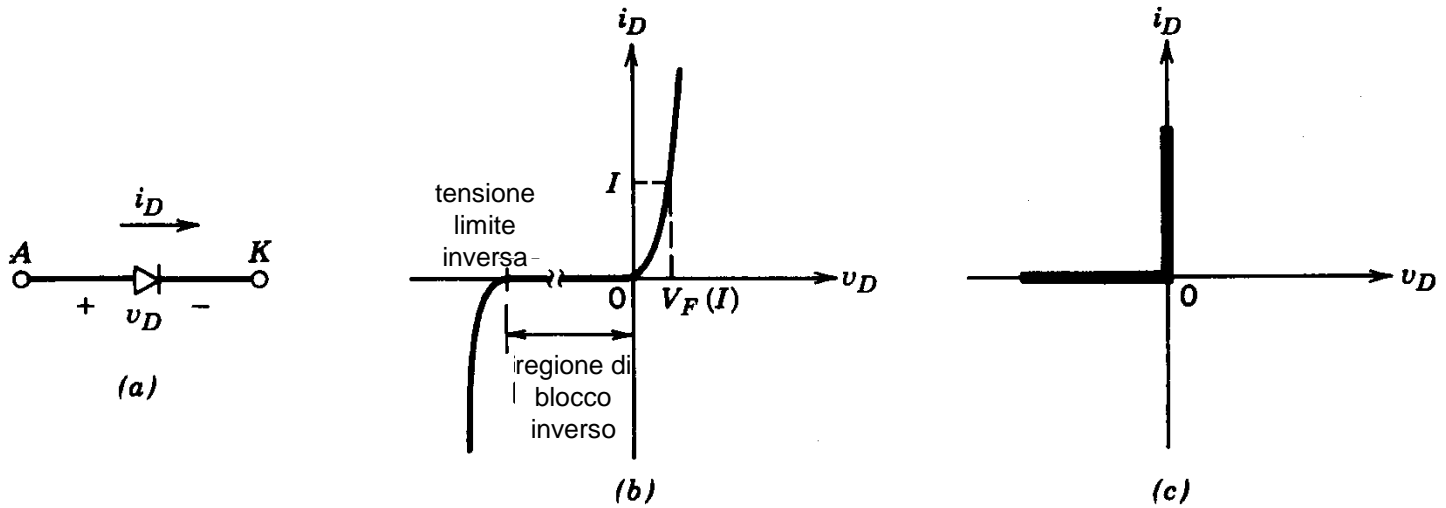


Struttura del IGBT



Struttura del IGCT

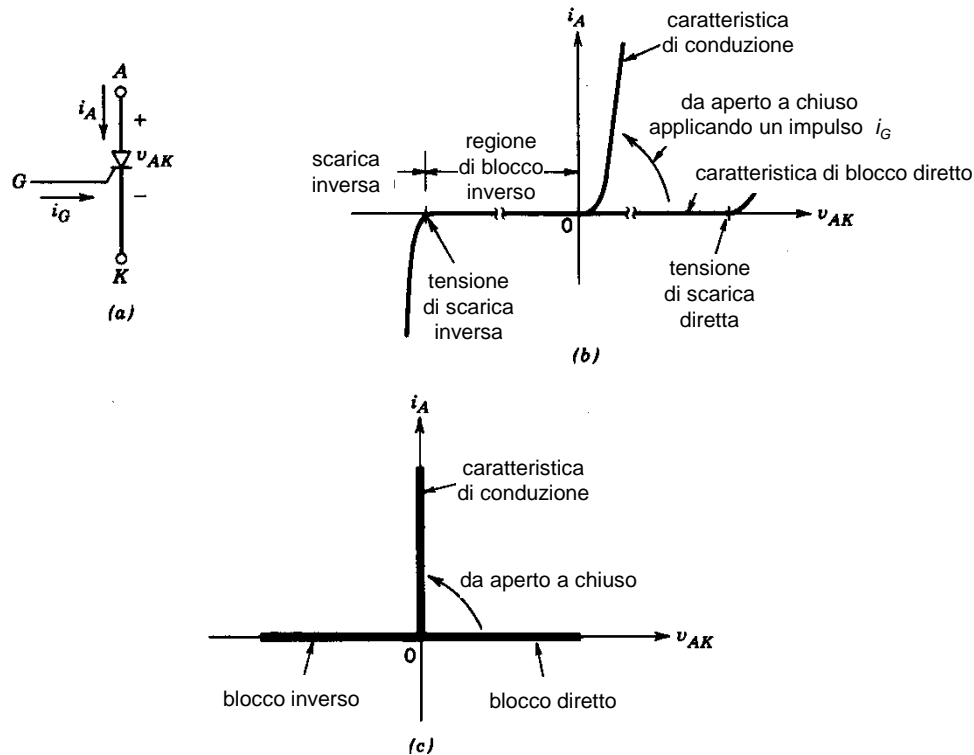
# Diodi



Diodo: a) simbolo; b) caratteristica  $i$ - $v$ ; c) caratteristica ideale

- Lo stato di on ed off dipende dal circuito esterno

# Tiristori

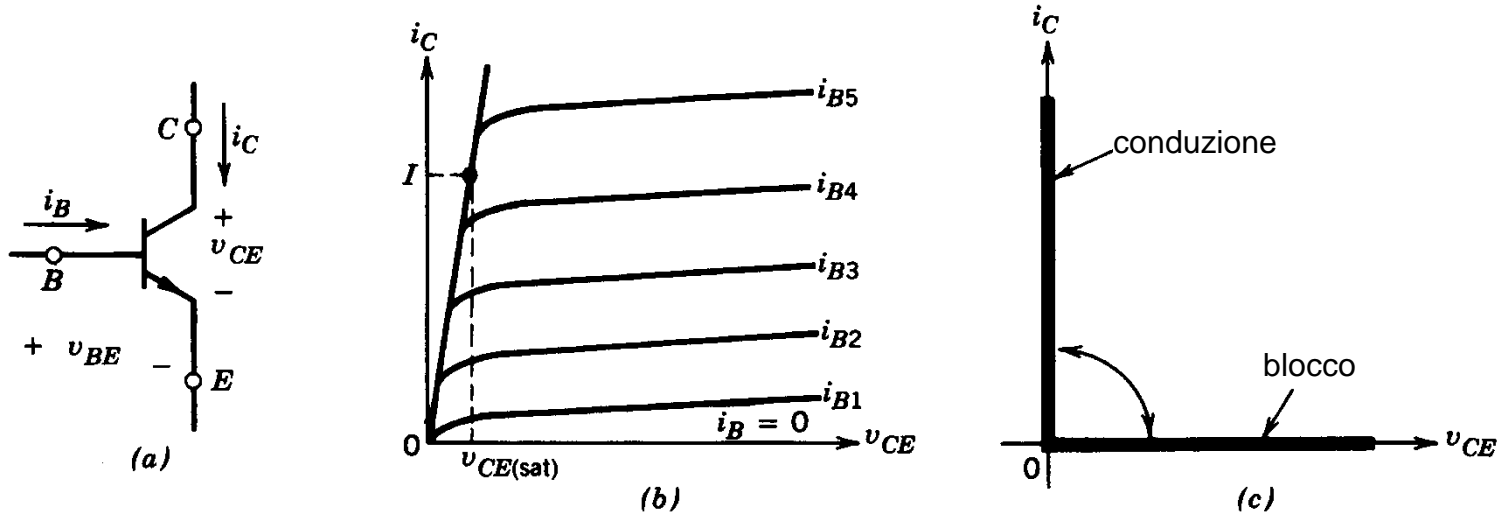


Tiristore: a) simbolo; b) caratteristica  $i$ - $v$ ; c) caratteristica ideale

- Dispositivo semicontrollato
- Si porta in conduzione applicando un impulso positivo di corrente al gate con polarizzazione diretta e vi rimane
- Si spegne all'inversione della corrente



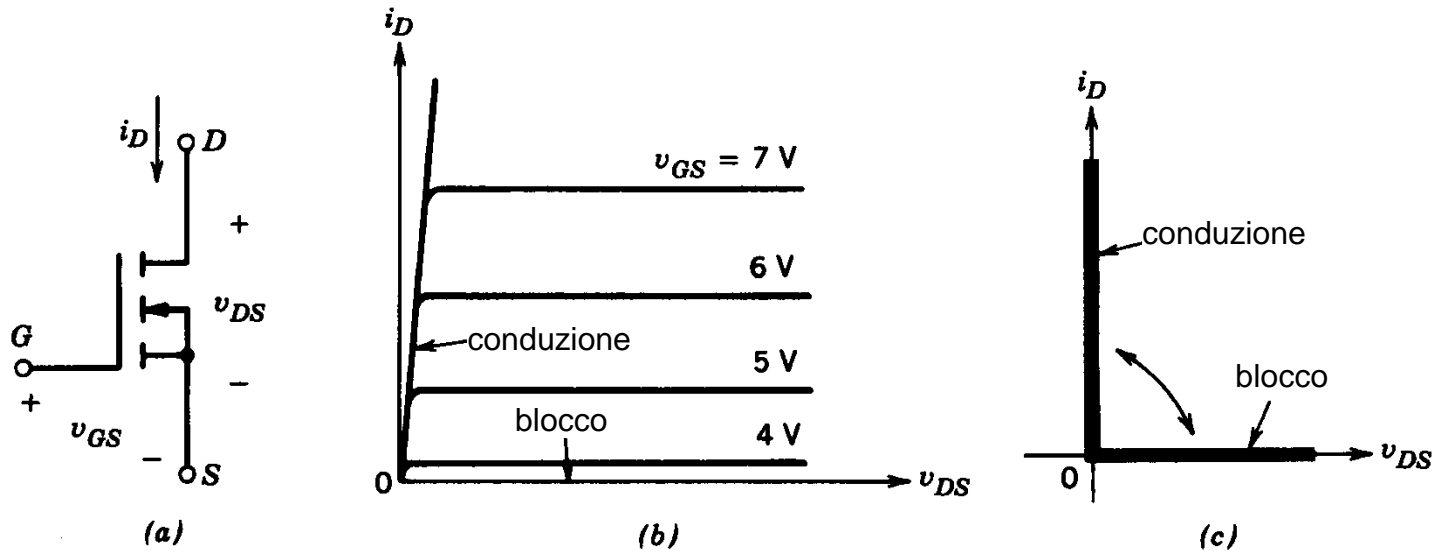
# Transistore a giunzione bipolare (BJT)



Transistore a giunzione bipolare BJT (NPN): a) simbolo; b) caratteristica  $i-v$ ; c) caratteristica ideale

- pilotato in corrente ( $I_B > I_C / h_{FE}$ , con  $h_{FE} = 5 \div 10$  guadagno statico in corrente)
- $V_{CE(sat)} = 1 \div 2$  V; tempi di commutazione  $\approx 0.1 \div 10$   $\mu$ s
- usato comunemente in passato ma ora generalmente sostituito con MOSFET e IGBT

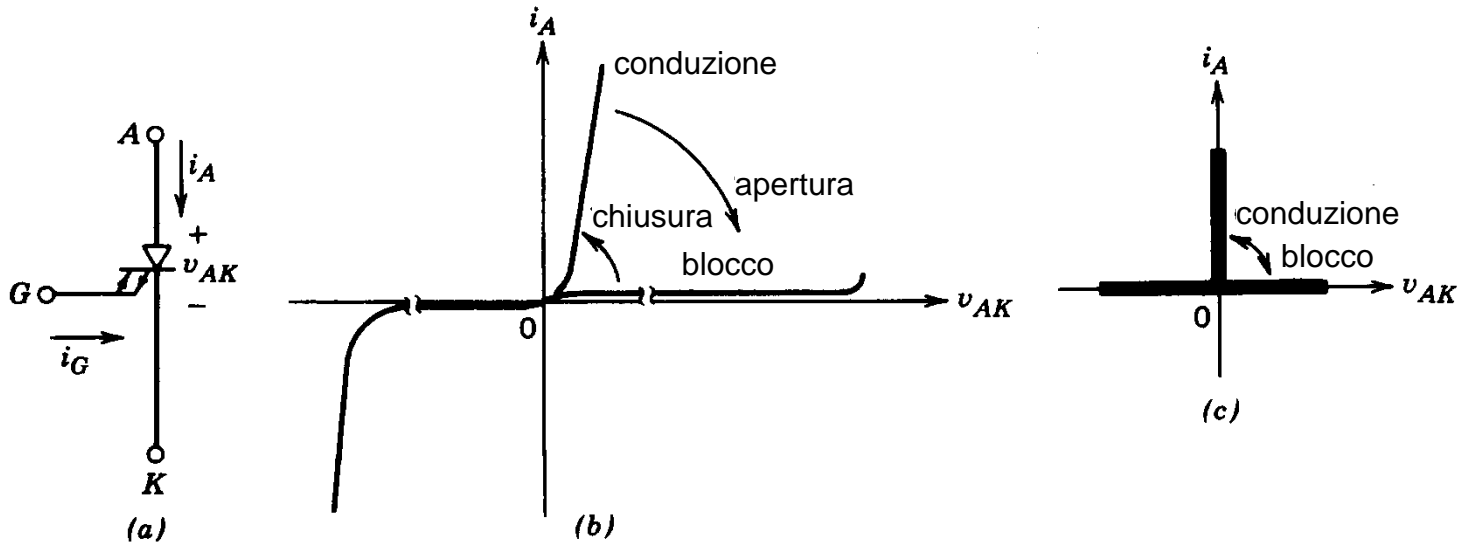
# Transistor a effetto di campo a metallo-ossido-semiconduttore (MOSFET)



MOSFET a canale N: a) simbolo; b) caratteristica  $i$ - $v$ ; c) caratteristica ideale

- Il controllo **attraverso la tensione di gate** è più facile
- Entra in conduzione quando  $V_{GS} > V_{GS(th)}$  (valore di soglia)
- Competitivo con i BJT a basse tensioni, elevate frequenze (<300÷400 V, >30÷100 kHz)

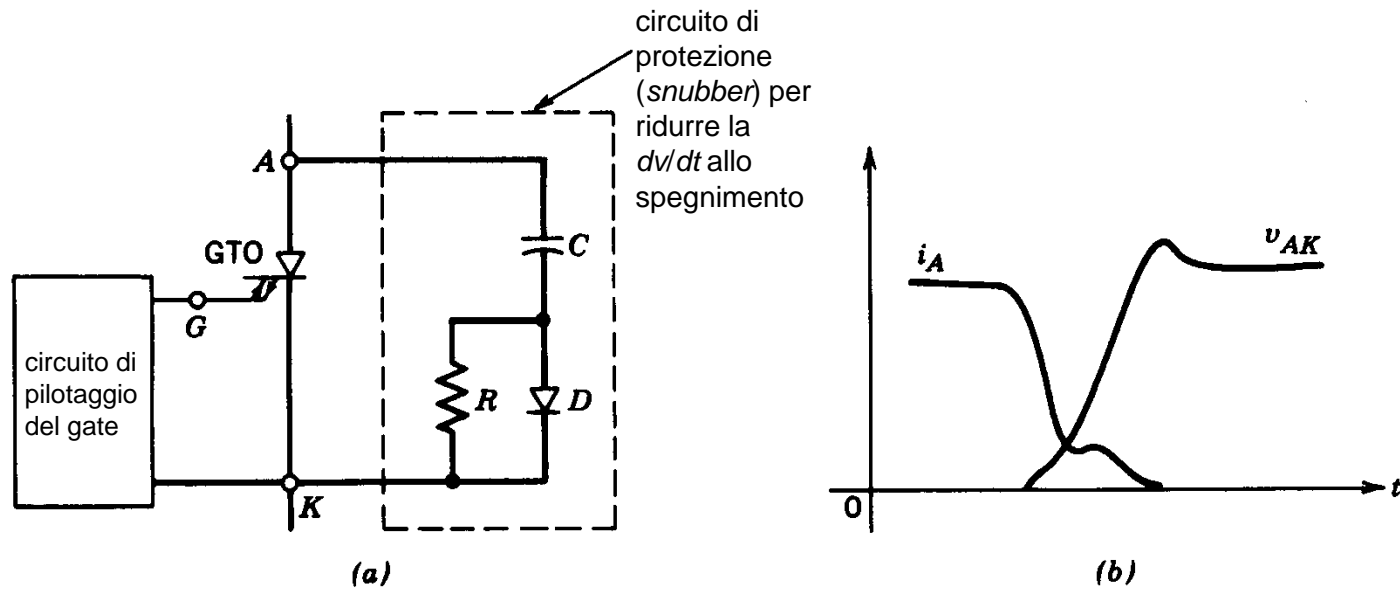
# Tiristori a spegnimento dal gate (Gate-Turn-Off Thyristors - GTO)



GTO: a) simbolo; b) caratteristica  $i$ - $v$ ; c) caratteristica ideale

- Rispetto ai tiristori standard, si spengono con un impulso negativo di corrente di gate abbastanza elevata  $\approx 1/3 i_A$
- Circuito di pilotaggio complesso e oneroso per dimensionamento
- Bassa frequenza di commutazione ( $\approx 100 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz max}$ )

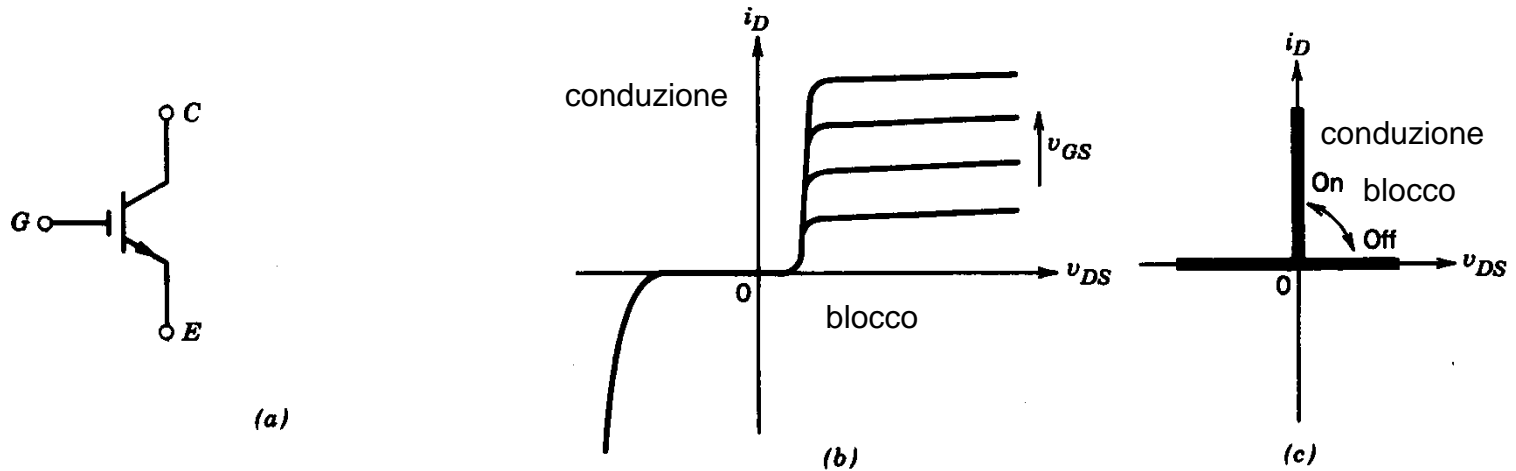
# Circuito di protezione GTO



Caratteristiche transitorie del GTO: a) circuito di protezione (*snubber*); b) spegnimento di un GTO

- Non sopporta  $dv/dt$  elevate per cui richiede un circuito R-C di protezione allo spegnimento (*snubber*)
- Tensioni massime  $\approx 4.5$  kV, correnti massime di qualche kA
- Cadute di tensione  $2 \div 3$  V
- Tempi di commutazione  $5 \div 25$   $\mu$ s

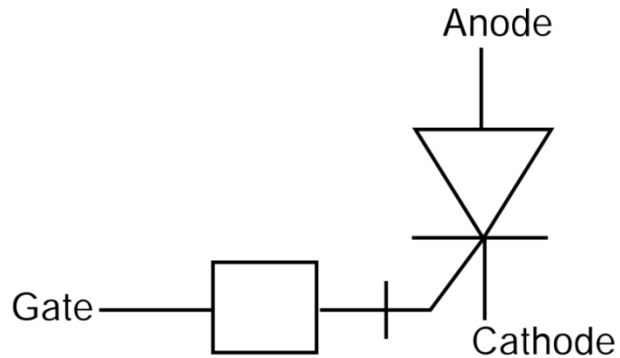
# Transistore bipolare a gate isolato IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



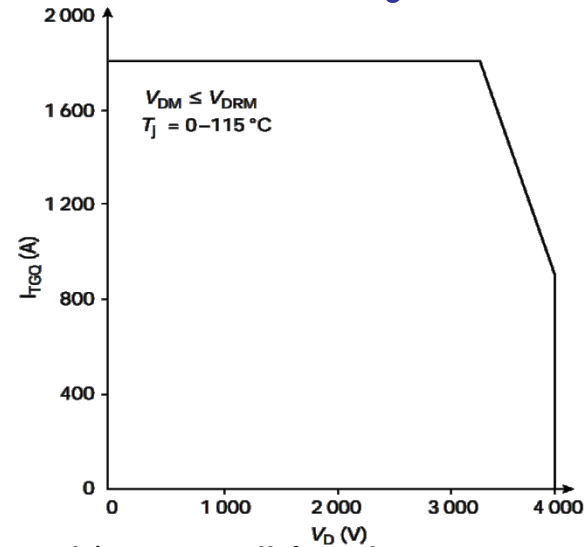
IGBT: a) simbolo; b) caratteristica  $i$ - $v$ ; c) caratteristica ideale

- Pilotato in tensione (circuito di pilotaggio più semplice)
- Tensioni massime 2÷3 kV, correnti massime 1÷2 kA
- Cadute di tensione 2÷3 V con tensioni di blocco di 1000 V
- Tempi di commutazione  $\approx 1 \mu\text{s}$

# Tiristori commutati a gate integrato IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)



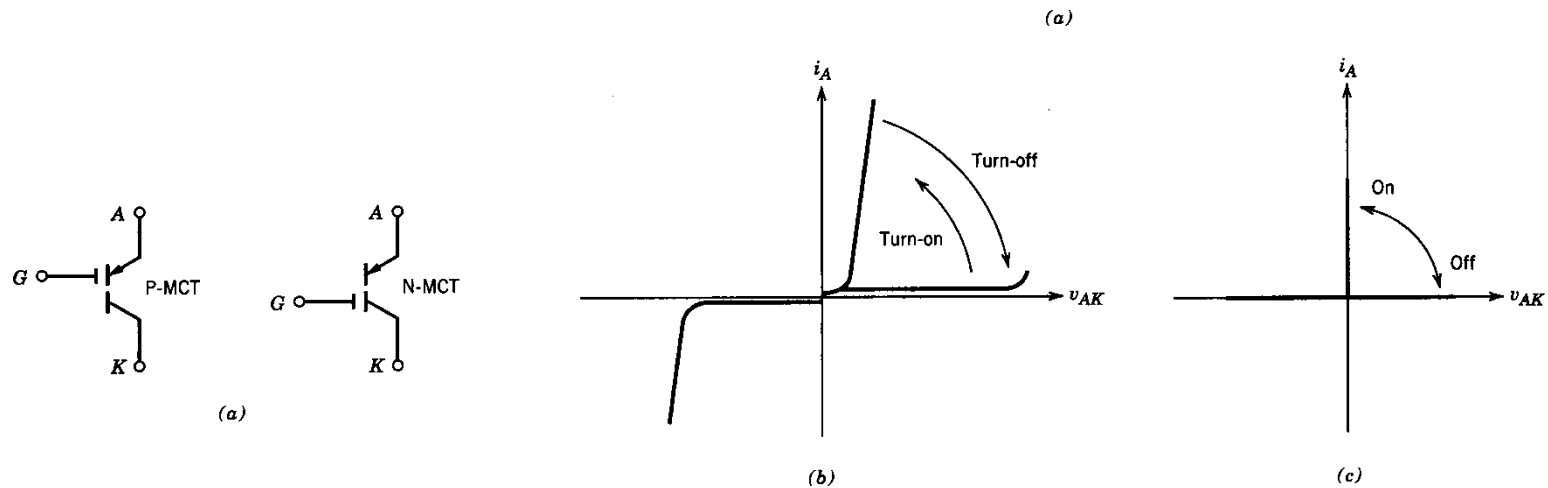
IGCT: a) simbolo;



b) range di funzionamento

- Si possono considerare un'evoluzione dei GTO
- Per lo spegnimento richiedono un impulso negativo di corrente al gate  $\approx i_A$  (drive di pilotaggio complesso)
- Tempi di spegnimento molto ridotti (snubber meno oneroso)
- Caduta di tensione  $\approx 3V$  per componenti di taglia 4500V
- Bassa frequenza di commutazione ( $\approx 500$  Hz  $\div$  2 kHz max)
- Tensioni fino a 5500 V, correnti fino a 4000 A

# Tiristori controllati a metallo-ossido-semiconduttore (MOS Controlled Thyristor – MCT)



MCT: a) simbolo; b) caratteristica  $i-v$ ; c) caratteristica ideale

- Ha caratteristiche analoghe ai GTO ma è pilotato in tensione (circuito di pilotaggio più semplice)
- Tempi di commutazione più brevi dei GTO ( $\approx 1 \mu s$ )
- Cadute di tensione inferiore agli IGBT

# Confronto tra dispositivi controllati

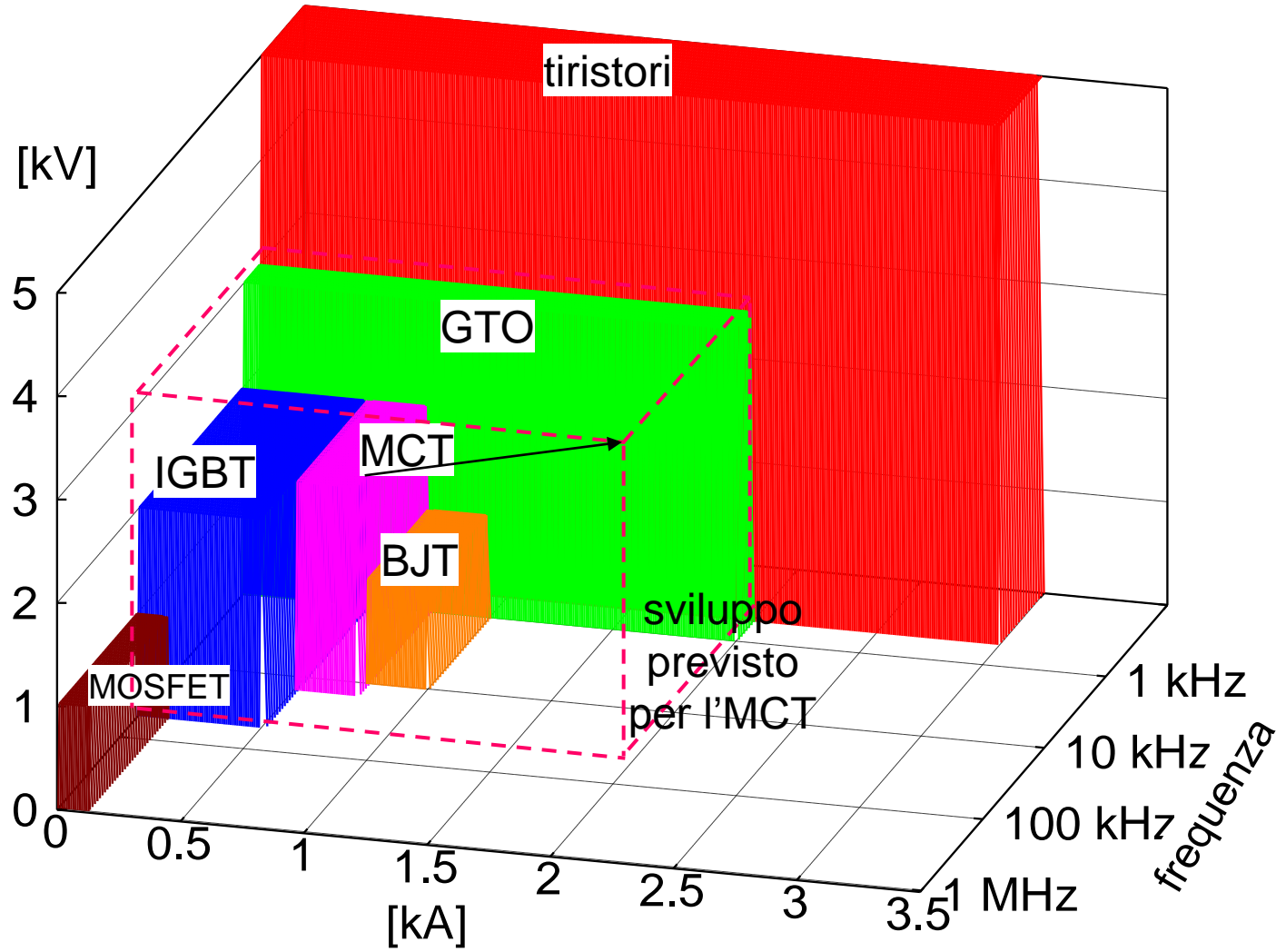
---

dispositivo	potenza pilotabile	frequenza di commutazione
BJT	Media	Media
MOSFET	Bassa	Alta
GTO/IGCT	Alta	Bassa
IGBT	Media	Media
MCT	Media	Media

---



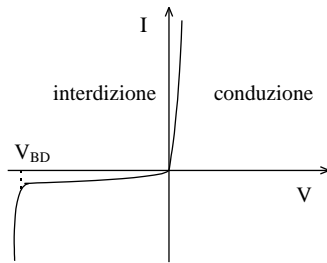
# Prestazioni limite dei vari componenti



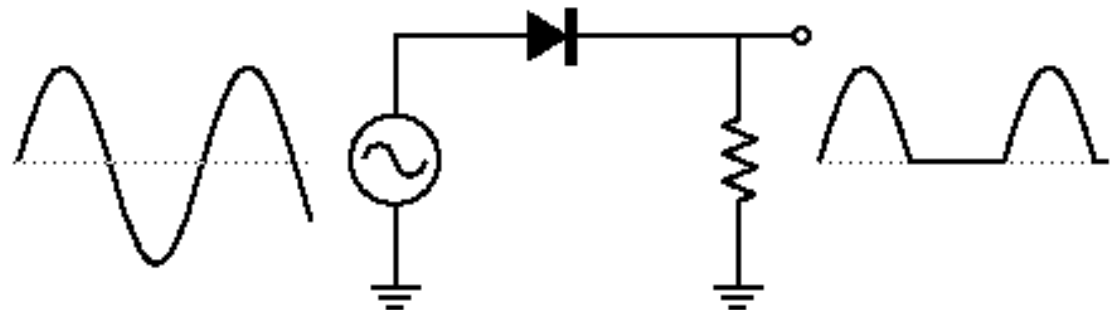
# Confronto tra dispositivi controllati

<b>Componente</b>	<b>Accensione</b>	<b>Spegnimento</b>
<b>BJT</b>	Mantenimento di una corrente di base di valore positivo	Corrente di base negativa, rimovibile quando il BJT raggiunge lo stato di off
<b>MOSFET</b>	Mantenimento di una tensione al gate di valore positivo	Assenza di tensione
<b>IGBT</b>	Mantenimento di una tensione al gate di valore positivo	Tensione negativa, rimovibile quando l'IGBT raggiunge lo stato di off
<b>GTO</b>	Impulso di corrente positivo della durata della decina di $\mu\text{s}$ e poi mantenimento di una debole corrente di gate	Impulso di corrente negativo e di valore elevato
<b>IGCT</b>	Impulso di corrente positivo	Impulso di corrente negativo

# Raddrizzatore monofase a semionda - 1

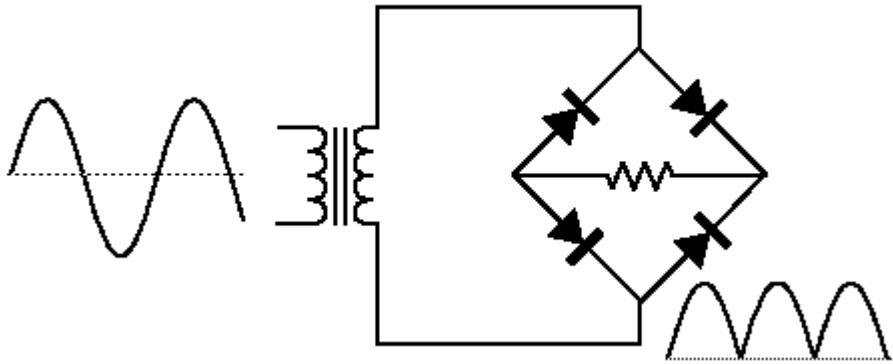


**Caratteristica del diodo**

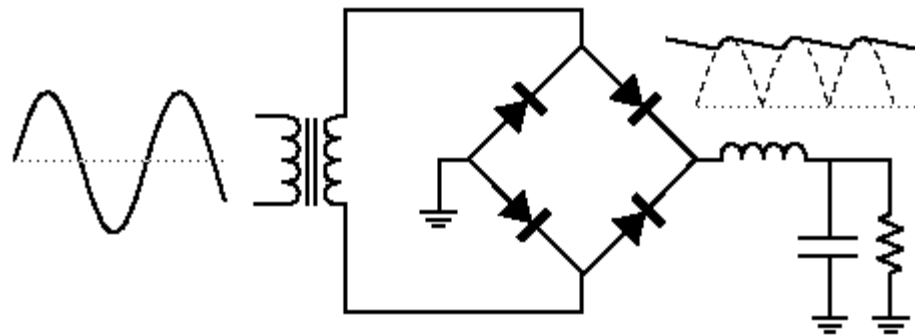


**Commutazione Naturale**

# Raddrizzatore monofase a onda intera

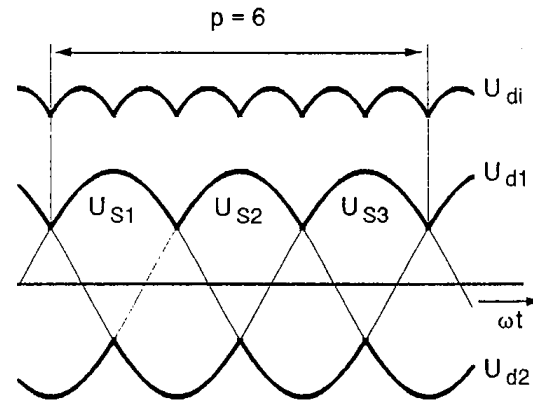
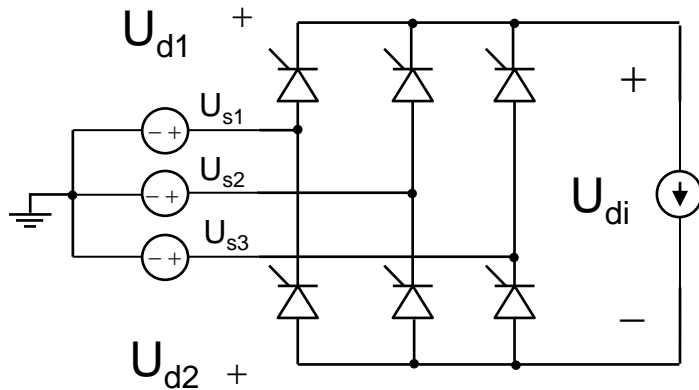
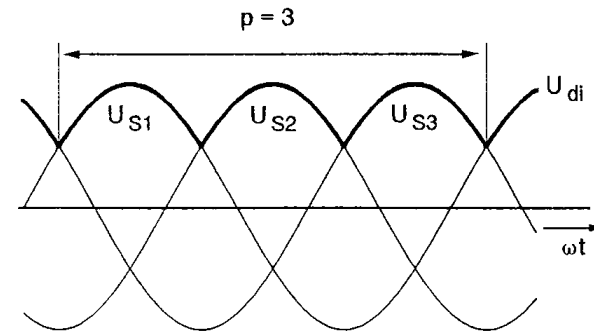
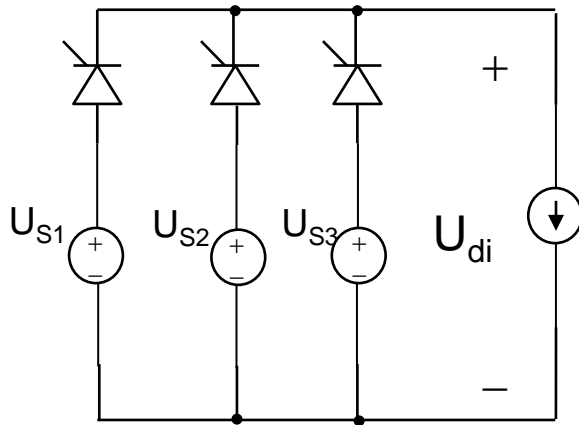


**Commutazione Naturale**



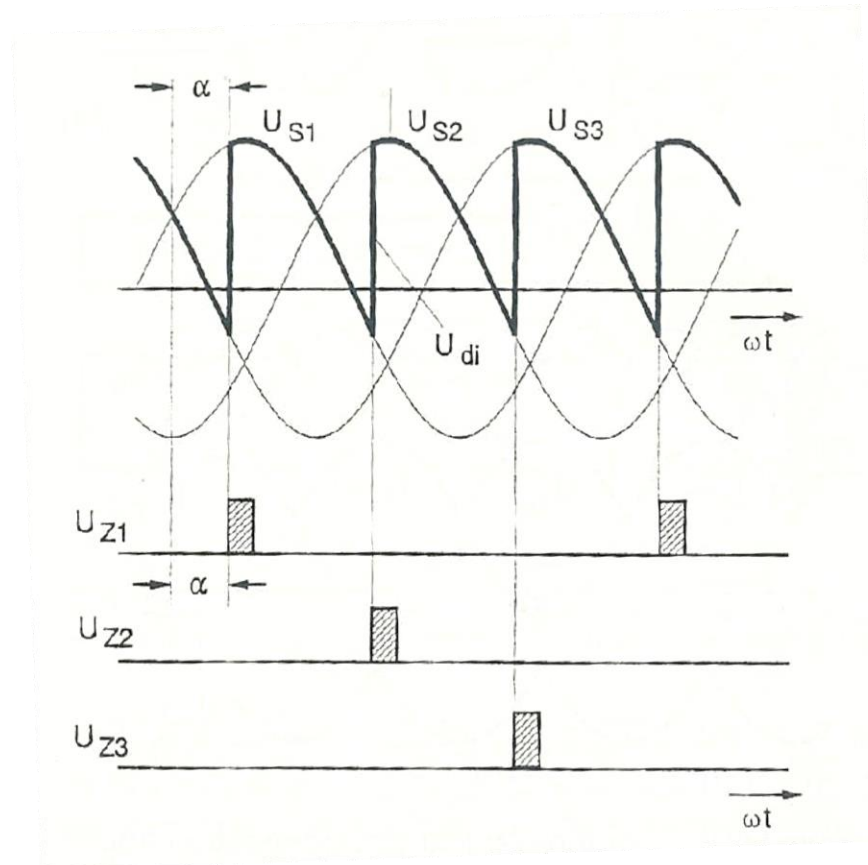
**Filtro LC in uscita**

# Raddrizzatore Trifase



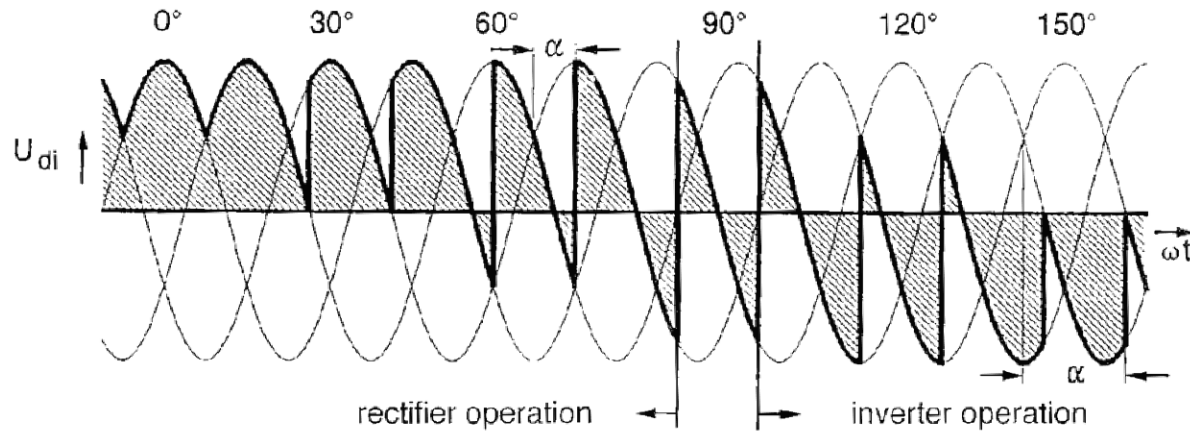
- a) Raddrizzatore trifase a semionda (3 commutazioni in un periodo)
- b) Raddrizzatore trifase ad onda intera (a ponte, 6 commutazioni in un periodo)

# Raddrizzatore Trifase Controllato



- **Accensione ritardata**
- **Spegnimento Naturale**

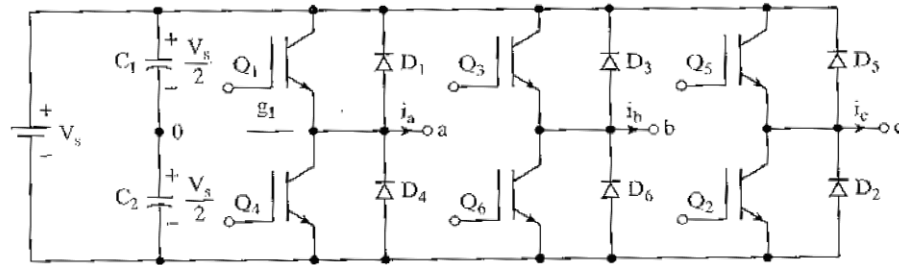
# Raddrizzatore Trifase Controllato - funzionamento da inverter -



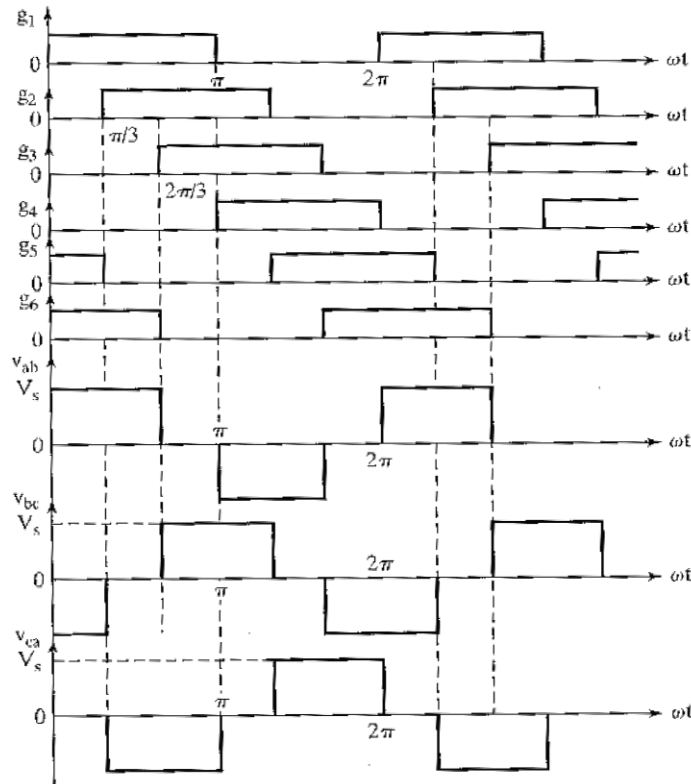
$$V_{out} = 1.35V_{LL} \cos \alpha \quad (L_s = \infty \quad i_{out} = I)$$

$$P_{out} = 1.35V_{LL} I \cos \alpha < 0 \quad \text{per } 90 < \alpha < 180$$

# Voltage source inverter



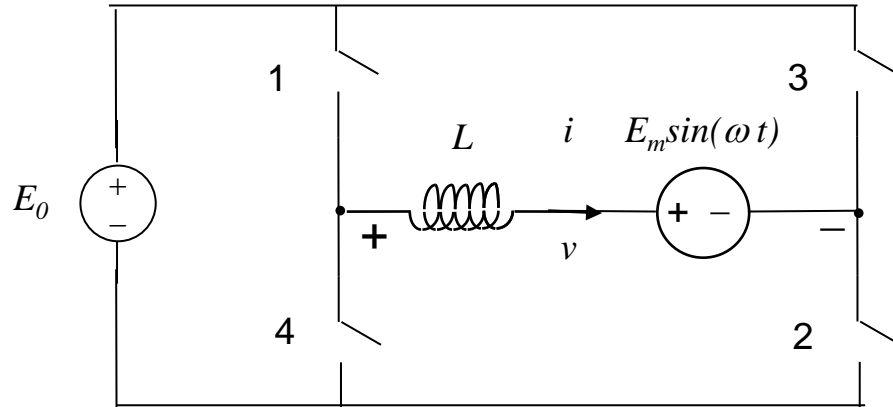
(a) Circuito



(b) Forme d'onda per conduzione a 180°

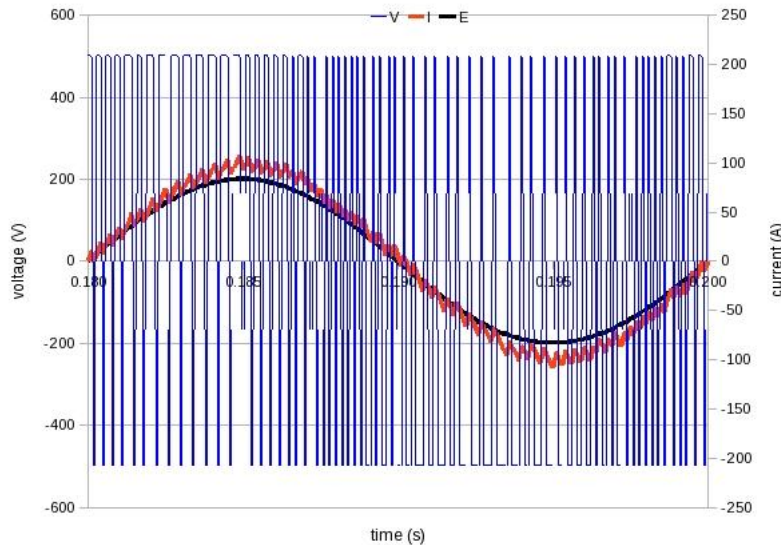


# Inverter PWM (Pulse Width Modulation)



$$\frac{di}{dt} = \frac{v - E_m \sin(\omega t)}{L}$$

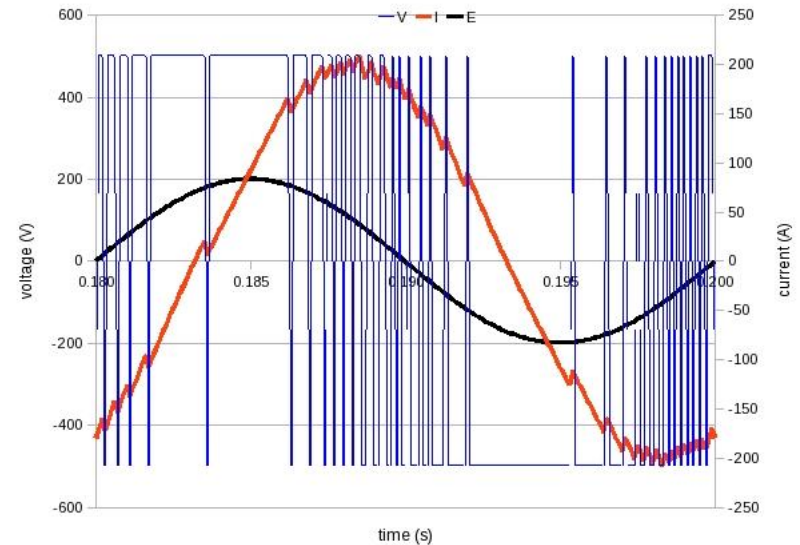
Se  $i(t) < I_0(t)$  1, 2 chiusi, 3, 4 aperti,  $v = E_0$   
 Se  $i(t) > I_0(t)$  1, 2 aperti, 3, 4 chiusi,  $v = -E_0$   
 Commutazione con frequenza  $f_0$



$$I_0(t) = I_m \sin(\omega t)$$

$$P = \frac{E_m I_m}{2}$$

$$Q = 0$$

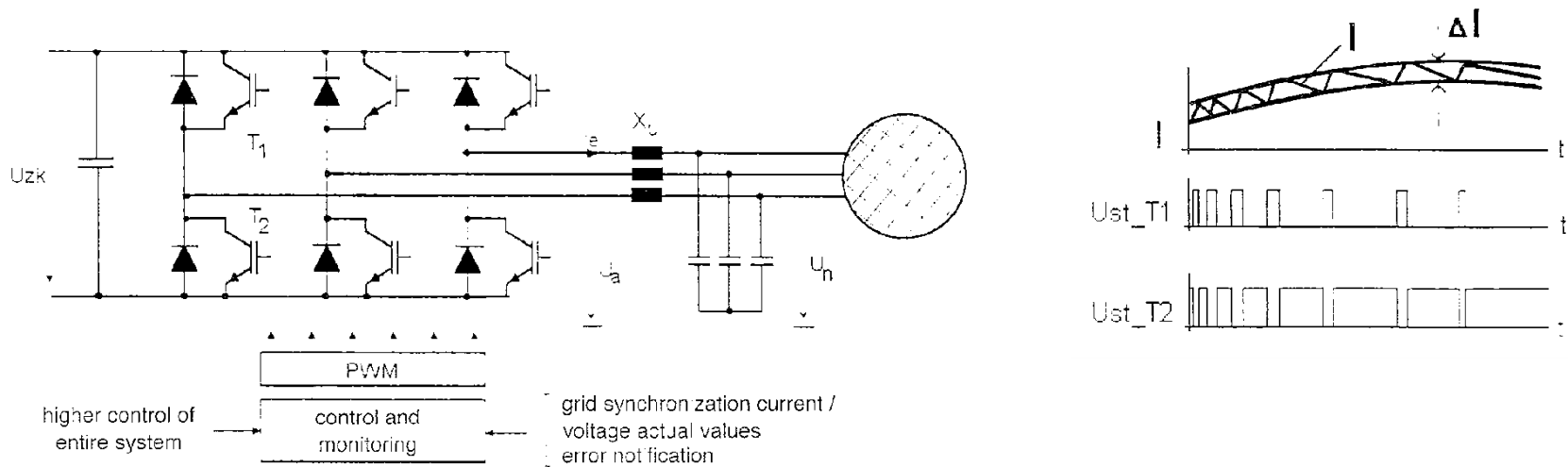


$$I_0(t) = 2I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{3})$$

$$P = \frac{E_m I_m}{2}$$

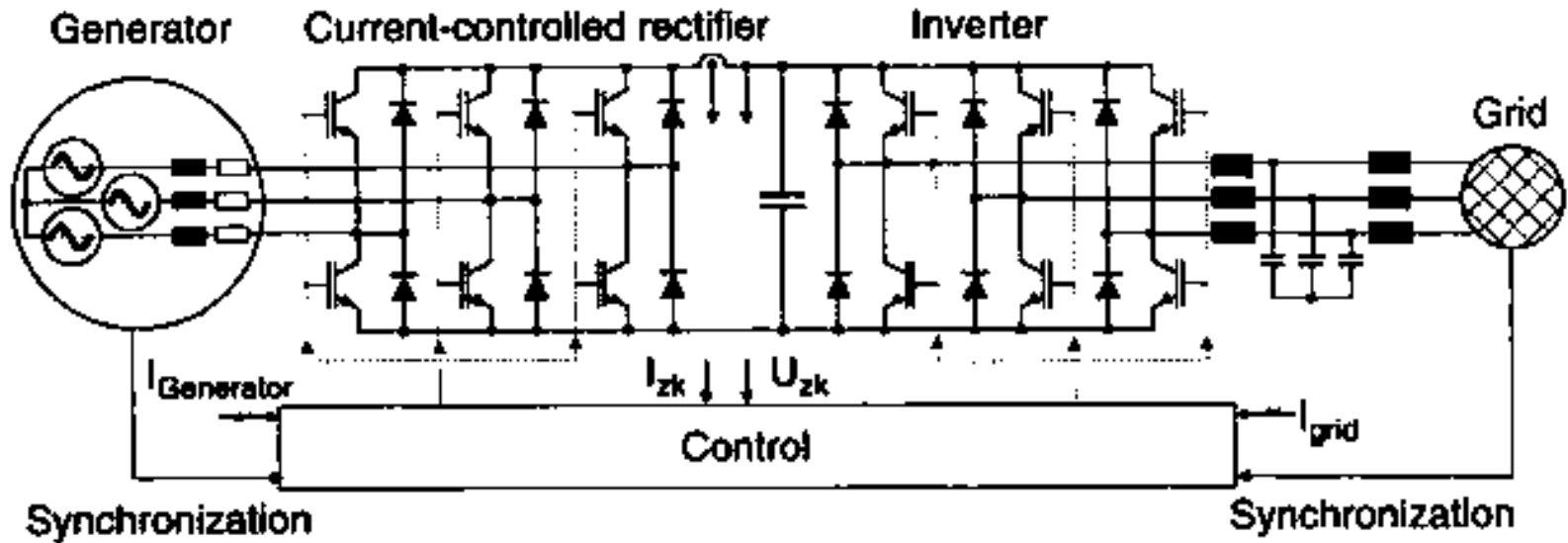
$$Q = \sqrt{3} \frac{E_m I_m}{2}$$

# Voltage source inverter trifase ad impulsi



L'inverter controlla la corrente erogata alla rete e quindi la potenza attiva e reattiva erogata alla rete

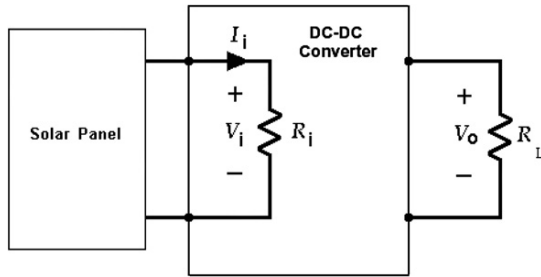
# Convertitori per la connessione di generatori eolici alla rete



**Convertitori a ponte collegati back to back:**

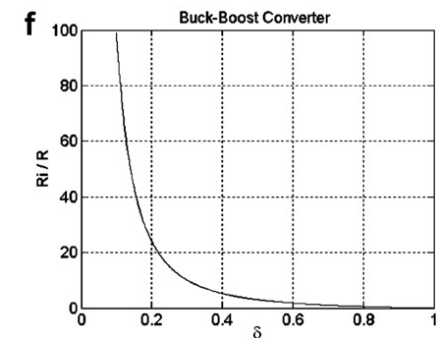
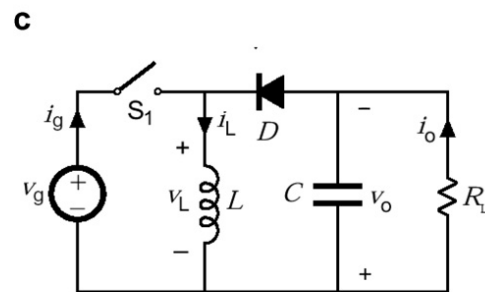
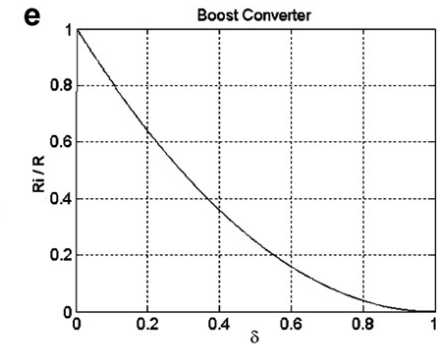
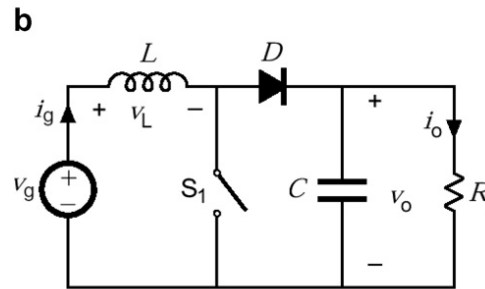
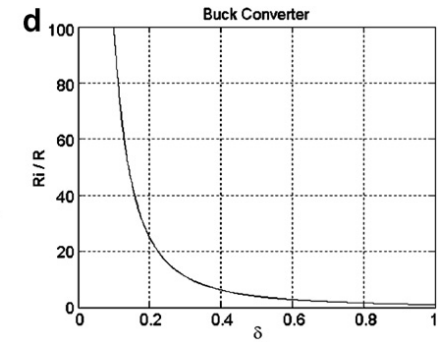
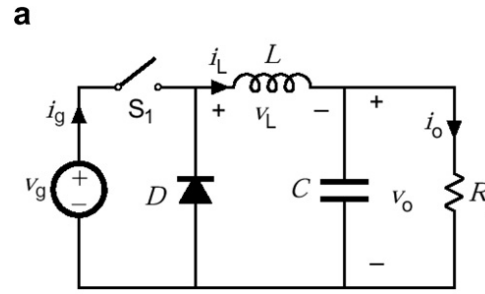
- Il lato rete controlla la carica del condensatore
- Il lato macchina controlla la velocità del rotore

# Convertitori DC - DC

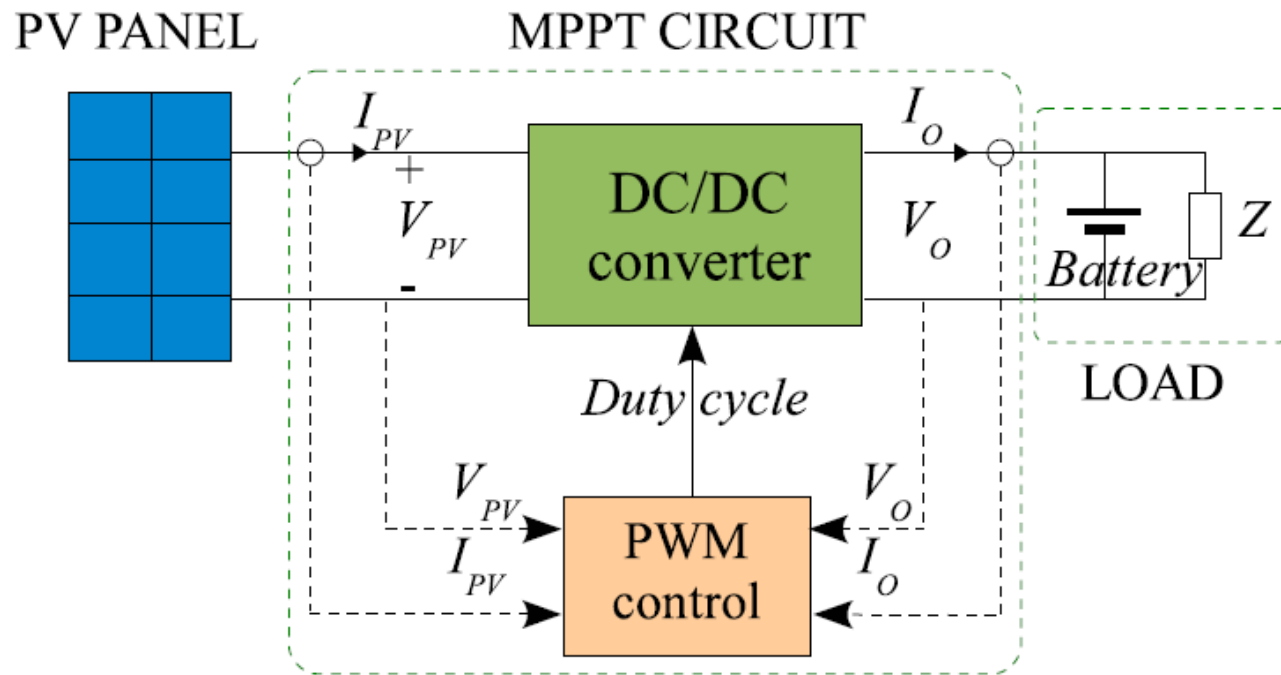


$\delta =$  duty cycle

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$



# Maximum Power Point Tracking (MPPT)



# Maximum Power Point Tracking (MPPT)

