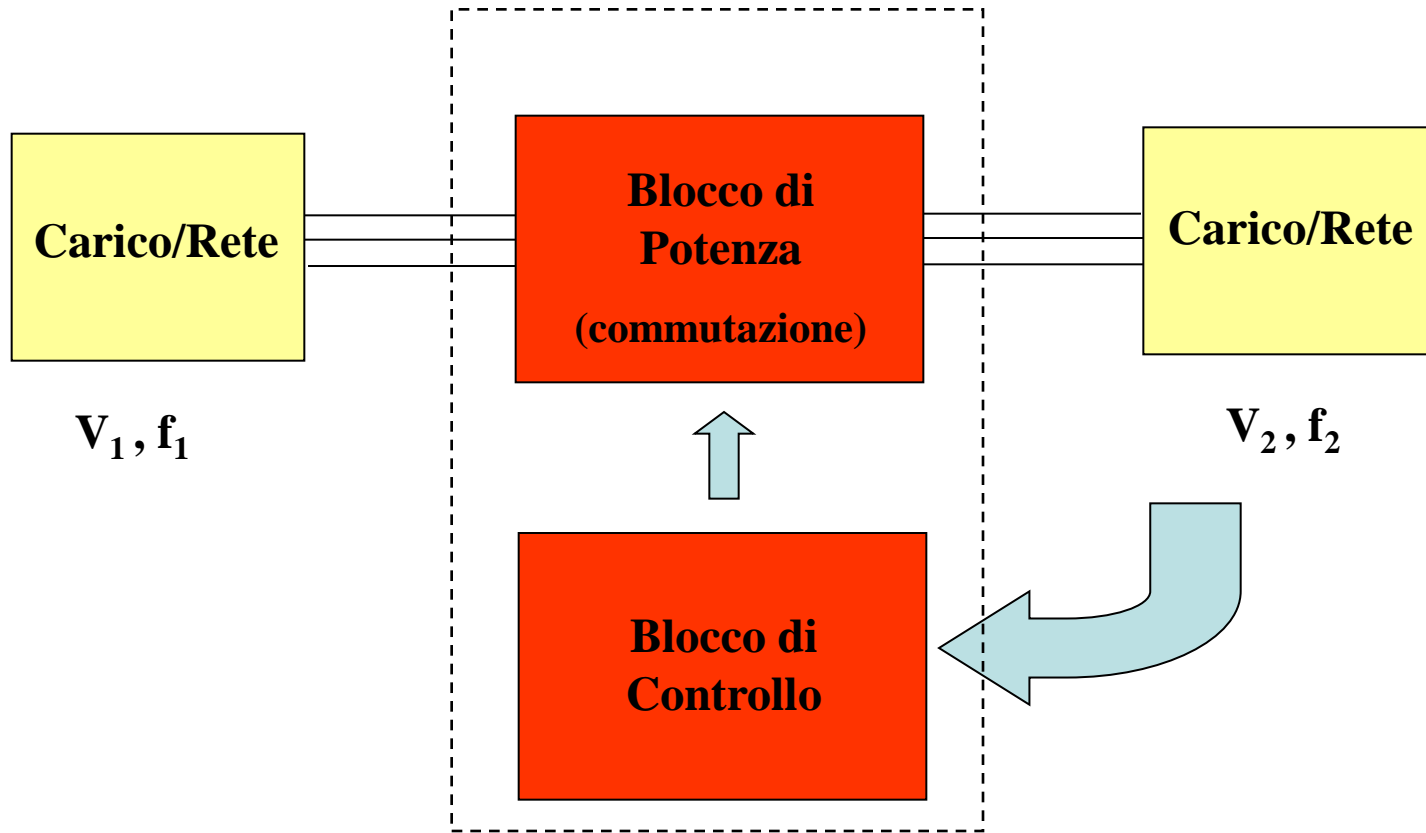


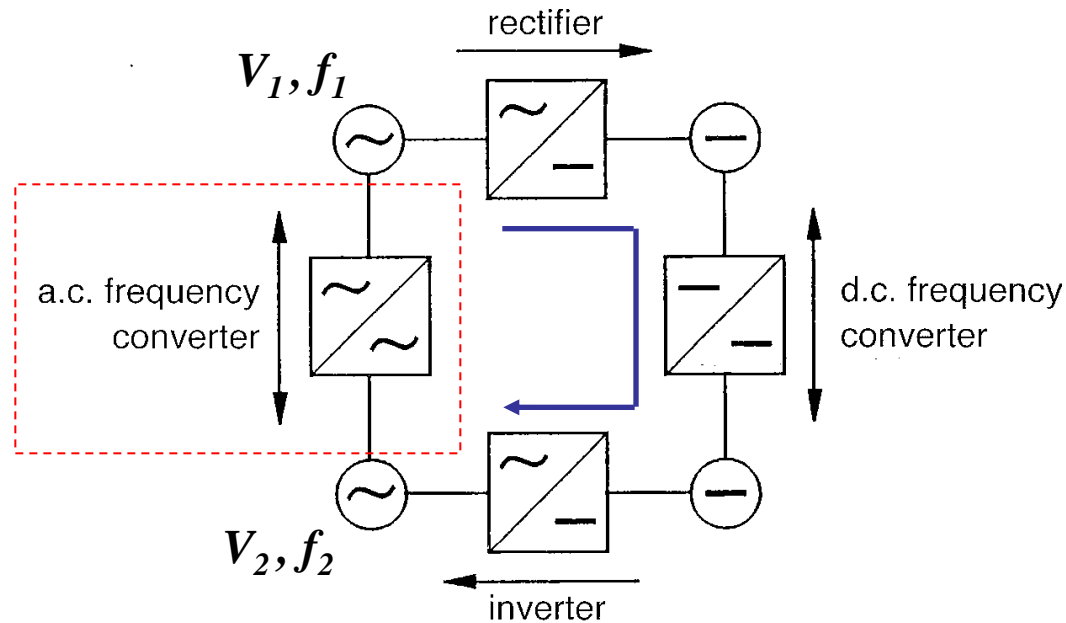
Convertitori Elettronici di Potenza



Schema di principio di un convertitore di potenza

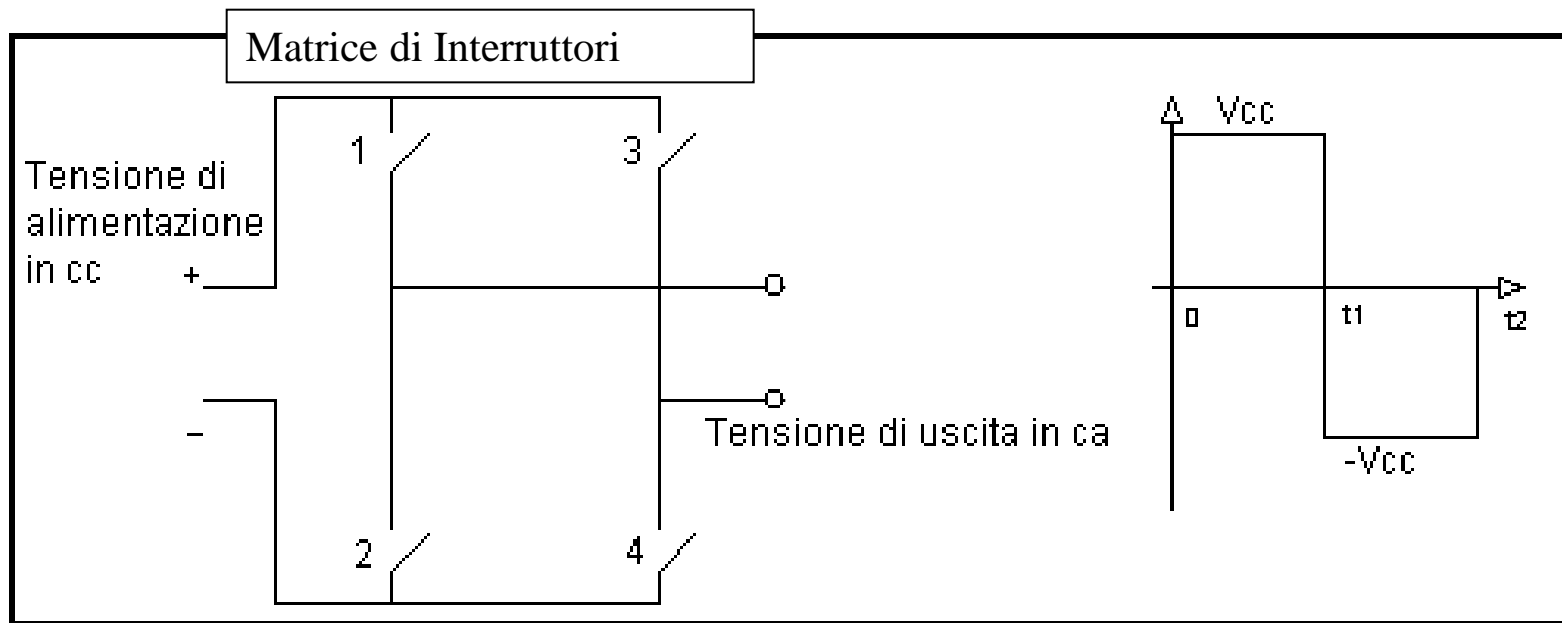
Classificazione dei Convertitori Elettronici di Potenza

Sigfried Heier , "Grid integration of Wind Energy Conversion Systems" , John Wiley and Sons, 1998



Conversione AC/AC indiretta

Convertitori a Commutazione



Schema di principio di un inverter monofase

Teorema di Fourier

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

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

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

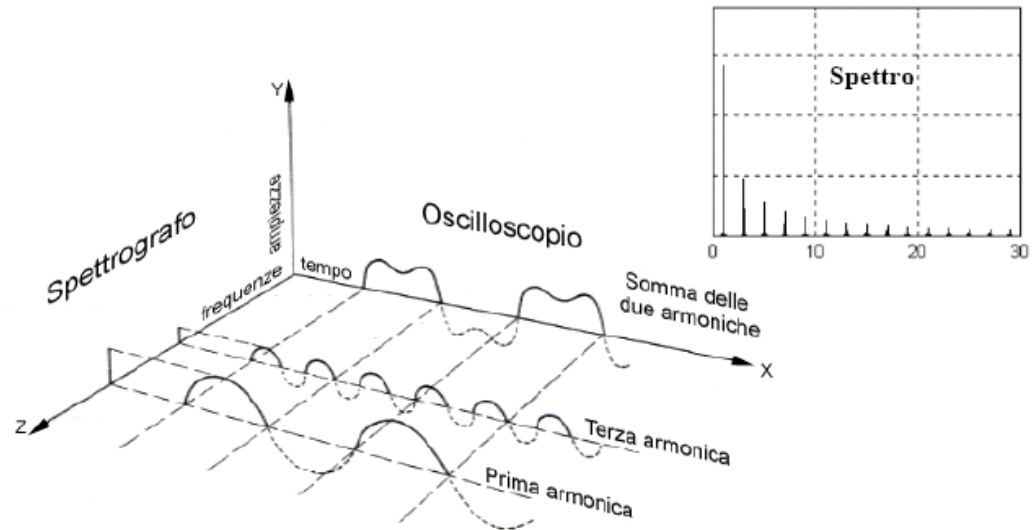
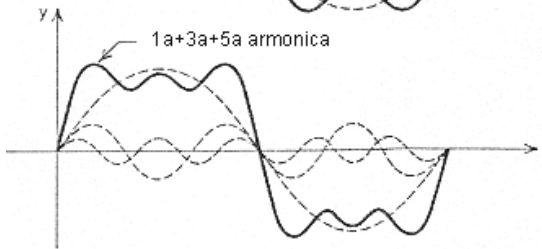
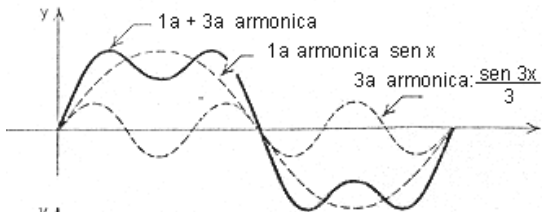
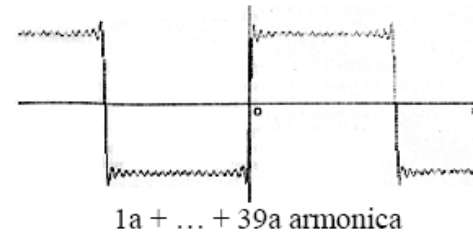
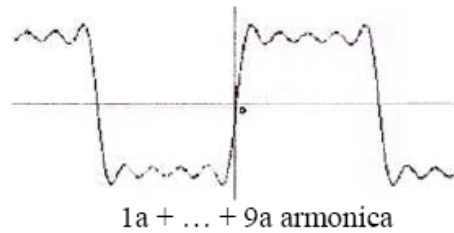
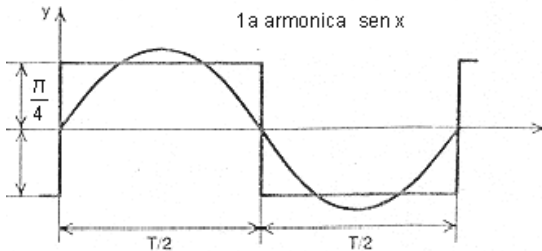
$$a(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega t + \theta_k)$$

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

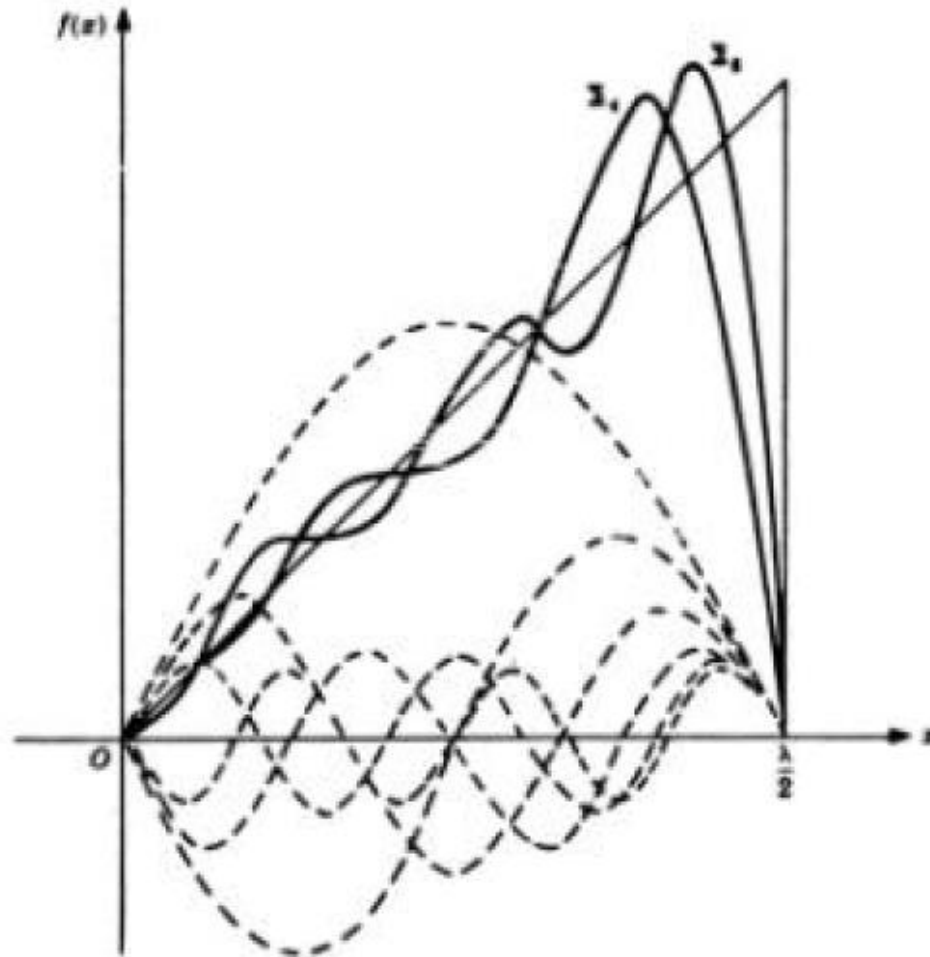
$$a(t) = \frac{\pi}{4} \begin{cases} +1, & \left(0 < t < \frac{T}{2}\right)_{\text{mod } T} \\ -1, & \left(\frac{T}{2} < t < T\right)_{\text{mod } T} \end{cases} \Rightarrow a(t) = \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots$$

Esempio di serie di Fourier
(onda quadra)



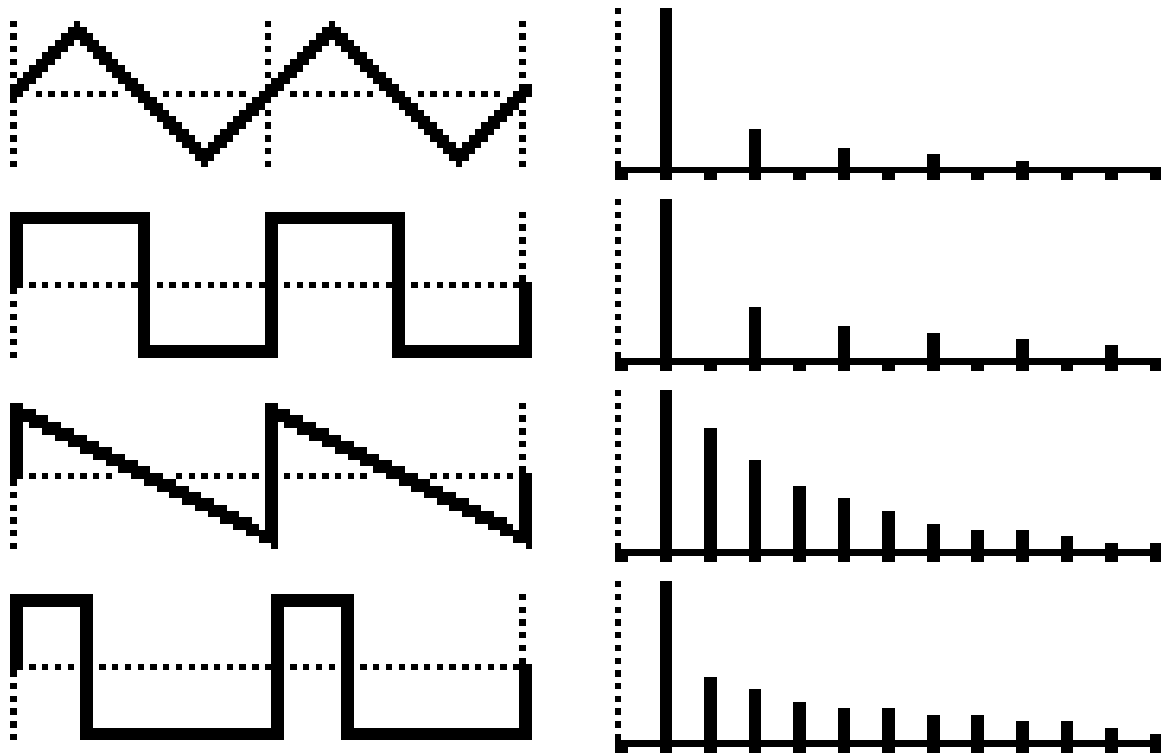
Scomposizione armonica di un onda quadra

Esempio 2

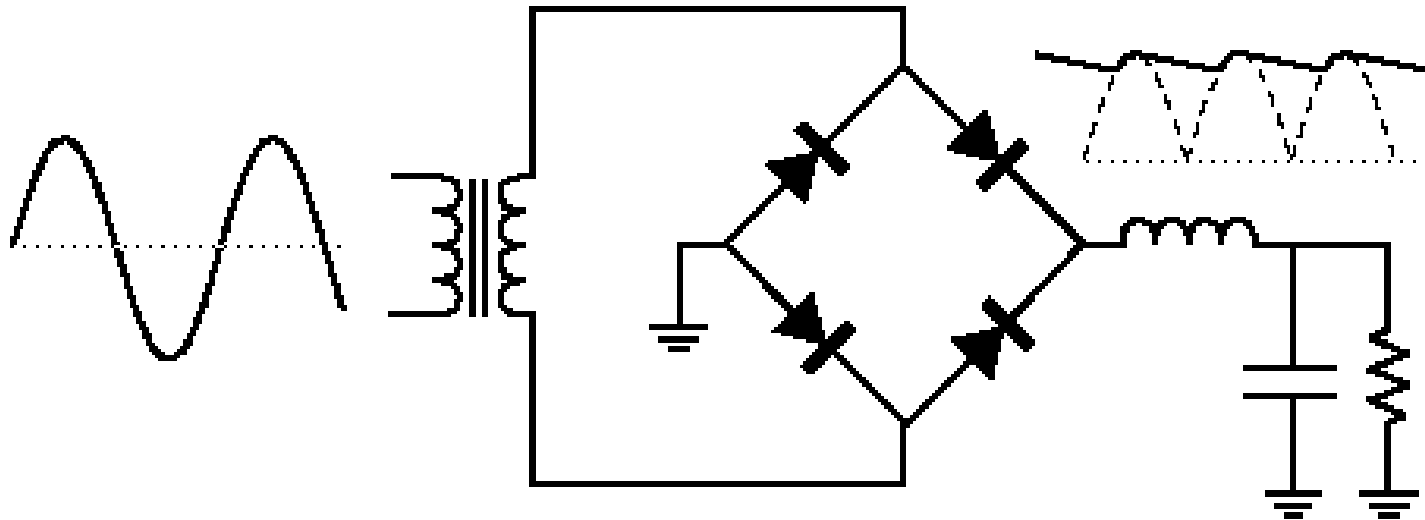


Scomposizione armonica di un onda a dente di sega

Spettro di un segnale periodico



Filtri



Filtro LC passa basso

Interruttori ideali

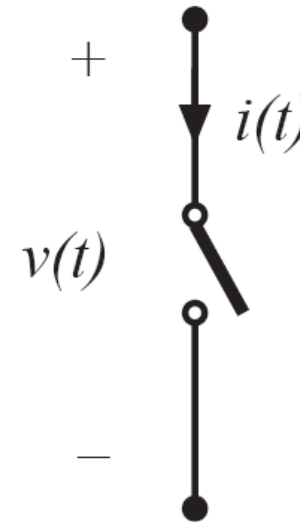
Power loss in an ideal switch

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:

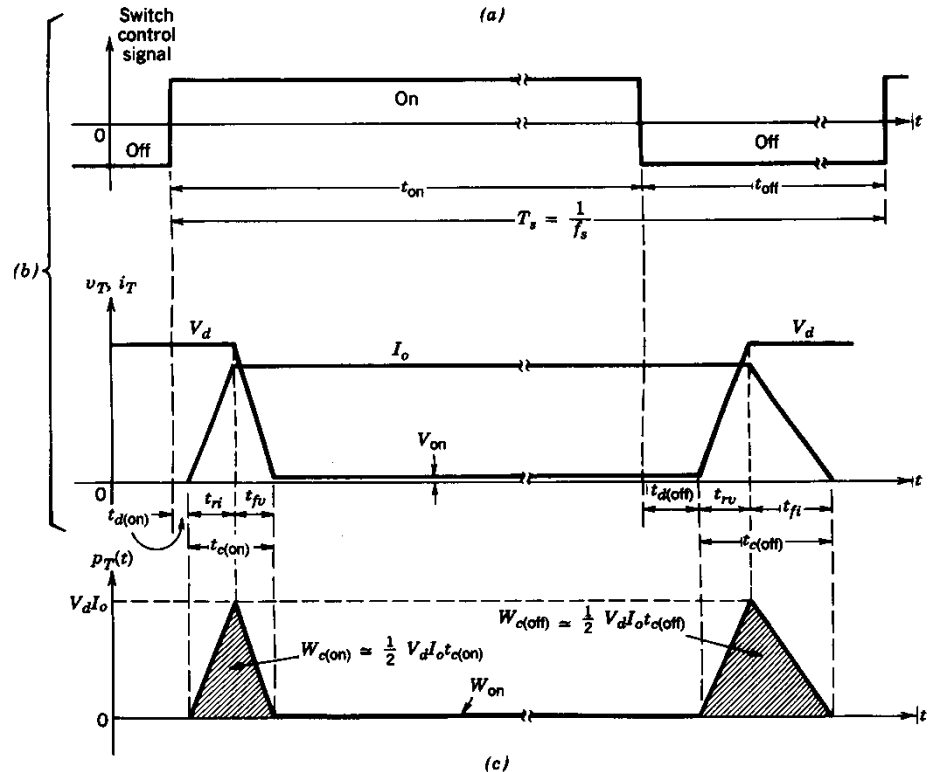
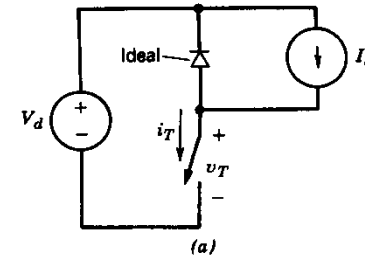
- frequenza di commutazione f_s
- tempi di accensione e spegnimento $t_{c(on)}$ e $t_{c(off)}$

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

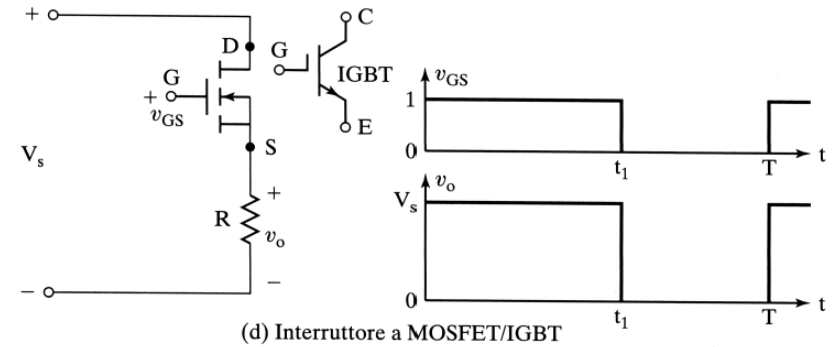
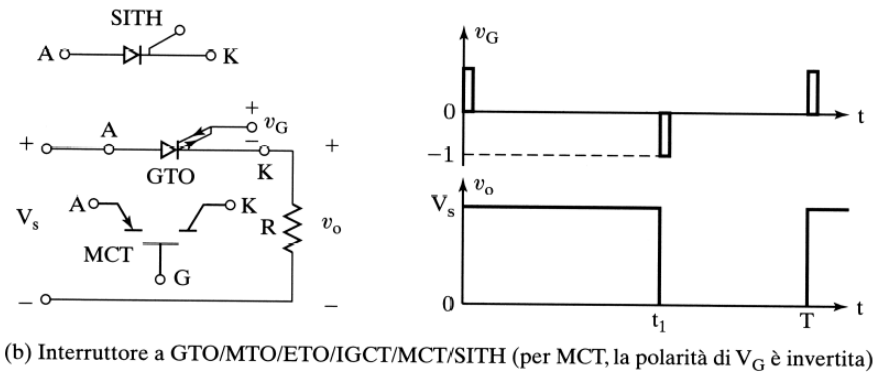
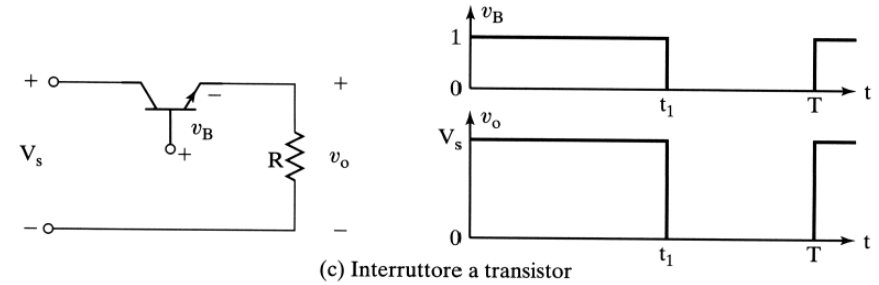
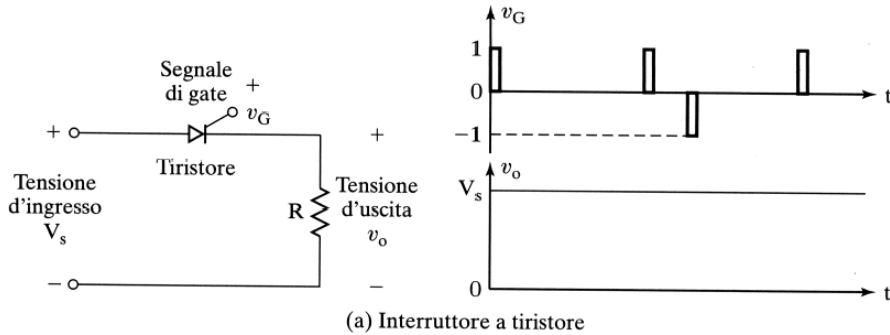
$$P_T = P_{on} + P_s$$



Componenti Elettronici di Potenza -1

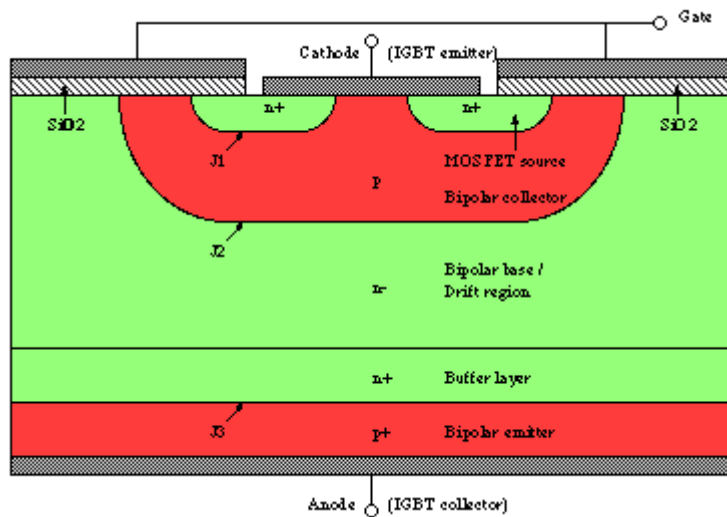
- Diodi
- Tiristori
- Transistori a giunzione bipolari (**BJT**)
- Transistori a effetto di campo a metallo-ossido-semiconduttore (**MOS-FET**)
- Tiristori **GTO** (**G**ate **T**urn-off **T**hyristors: tiristori con spegnimento dal gate)
- Transistori bipolari a gate isolato (**IGBT**: insulated **g**ate **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

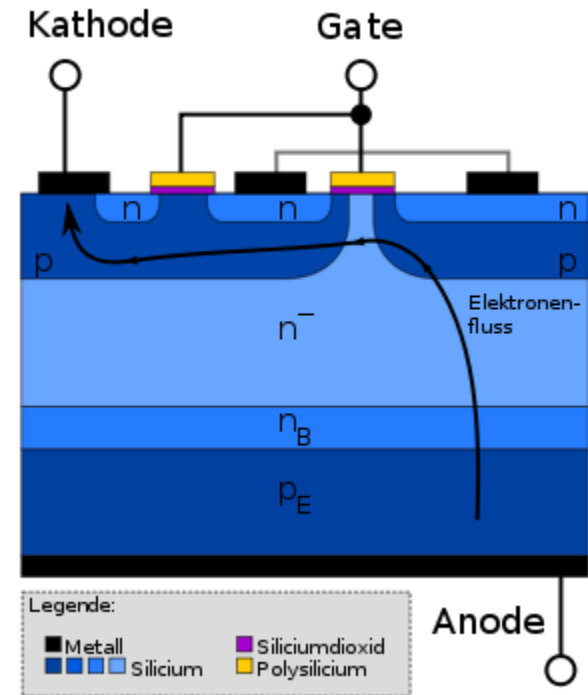


Componenti Elettronici di Potenza - 3

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

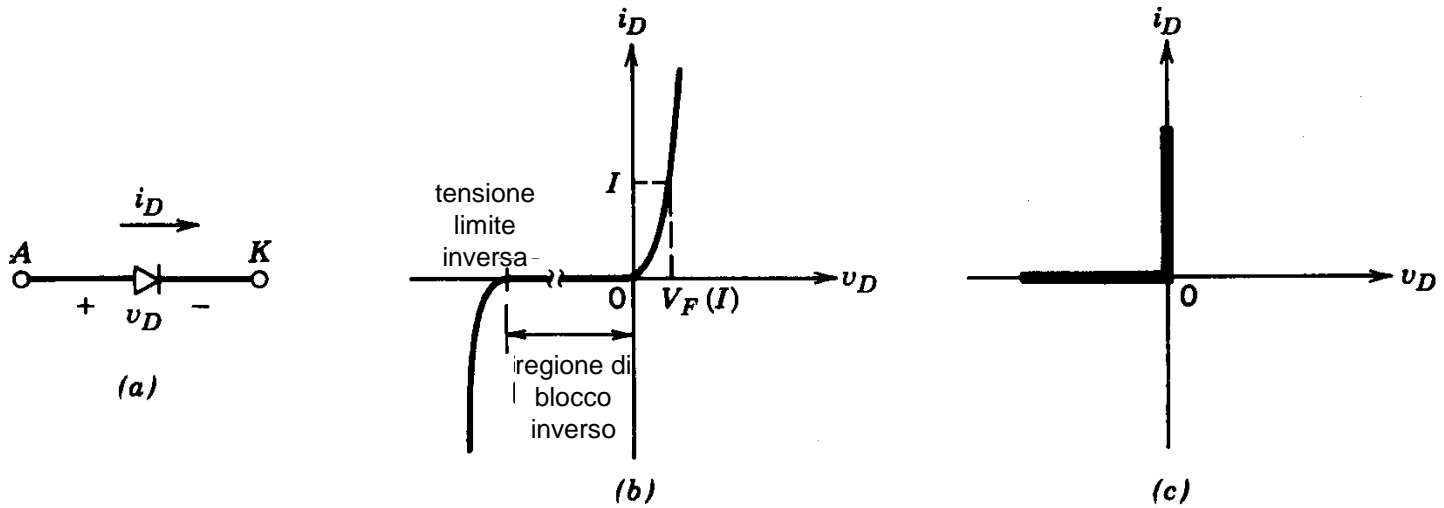


Struttura del IGBT



Struttura del IGCT

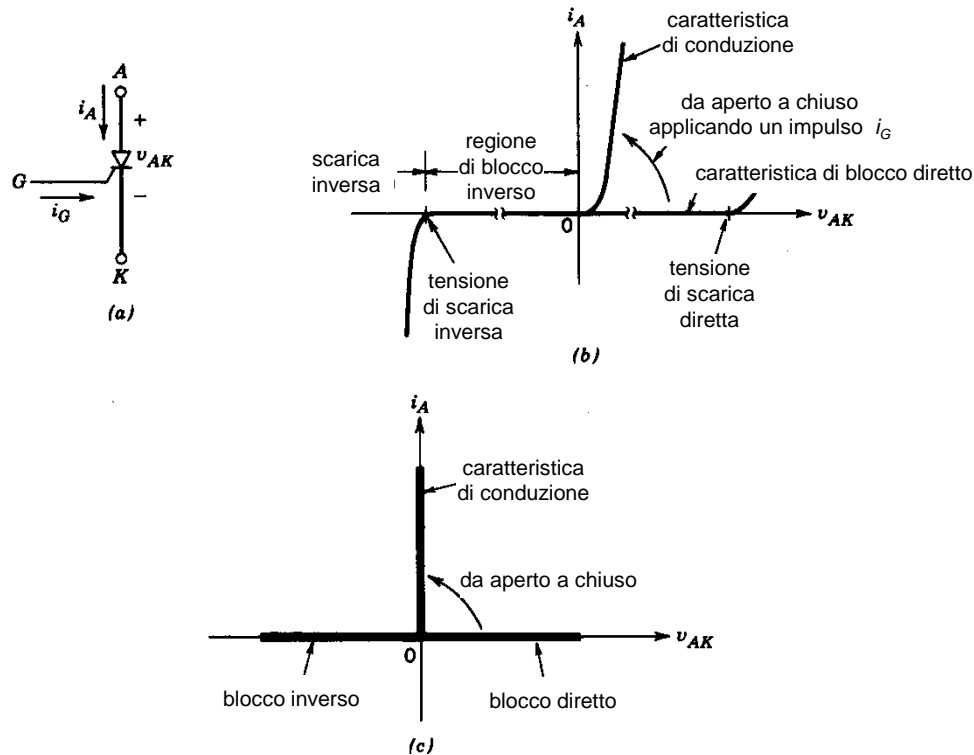
Diodi



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

- Lo stato di on ed off dipende dal circuito esterno

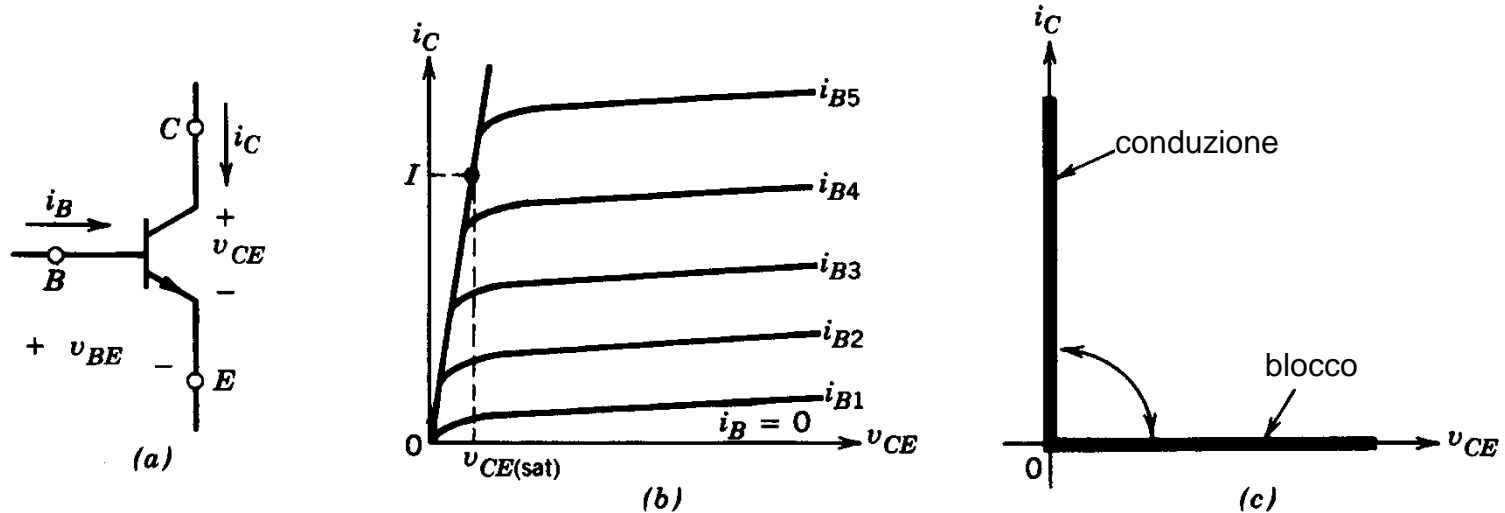
Tiristori



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

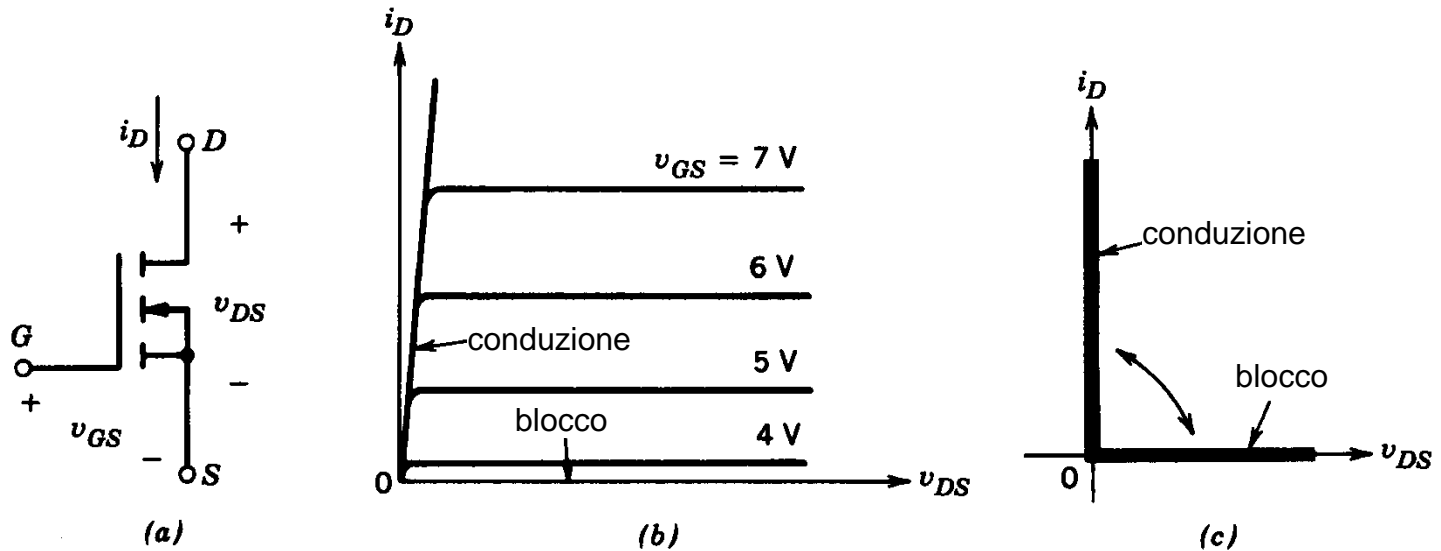
Transistore a giunzione bipolare (BJT)



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 $\approx 0.1 \div 10$ μ s
- usato comunemente in passato ma ora generalmente sostituito con MOSFET e IGBT

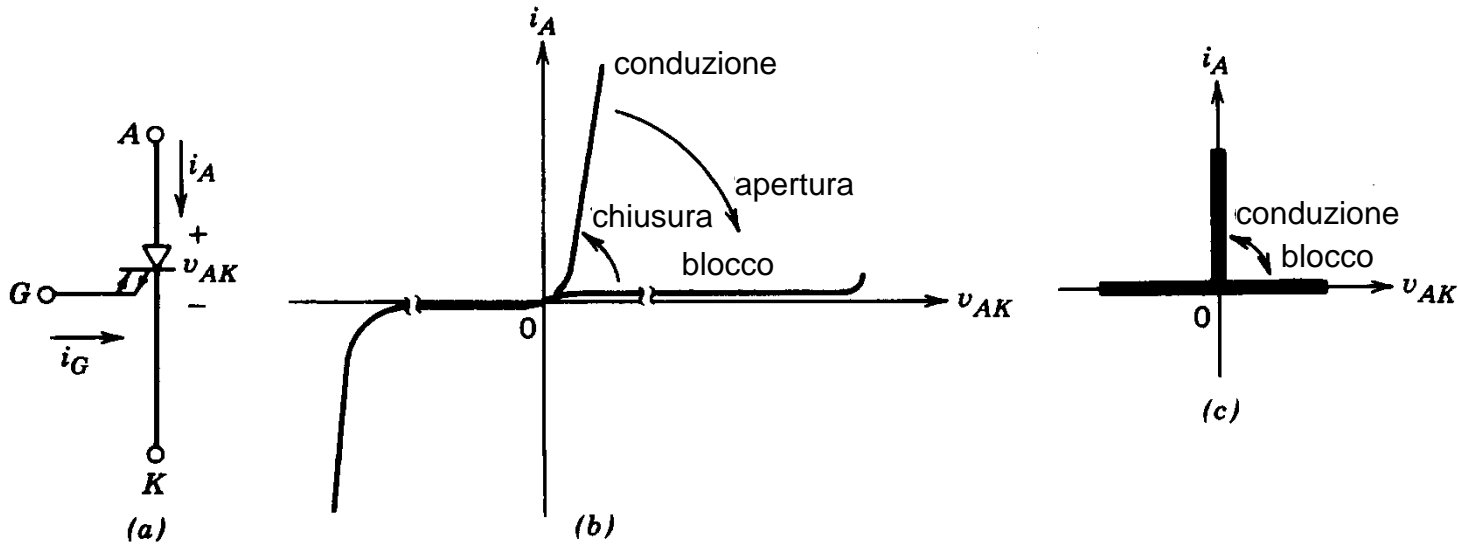
Transistor a effetto di campo a metallo-ossido-semiconduttore (MOSFET)



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)

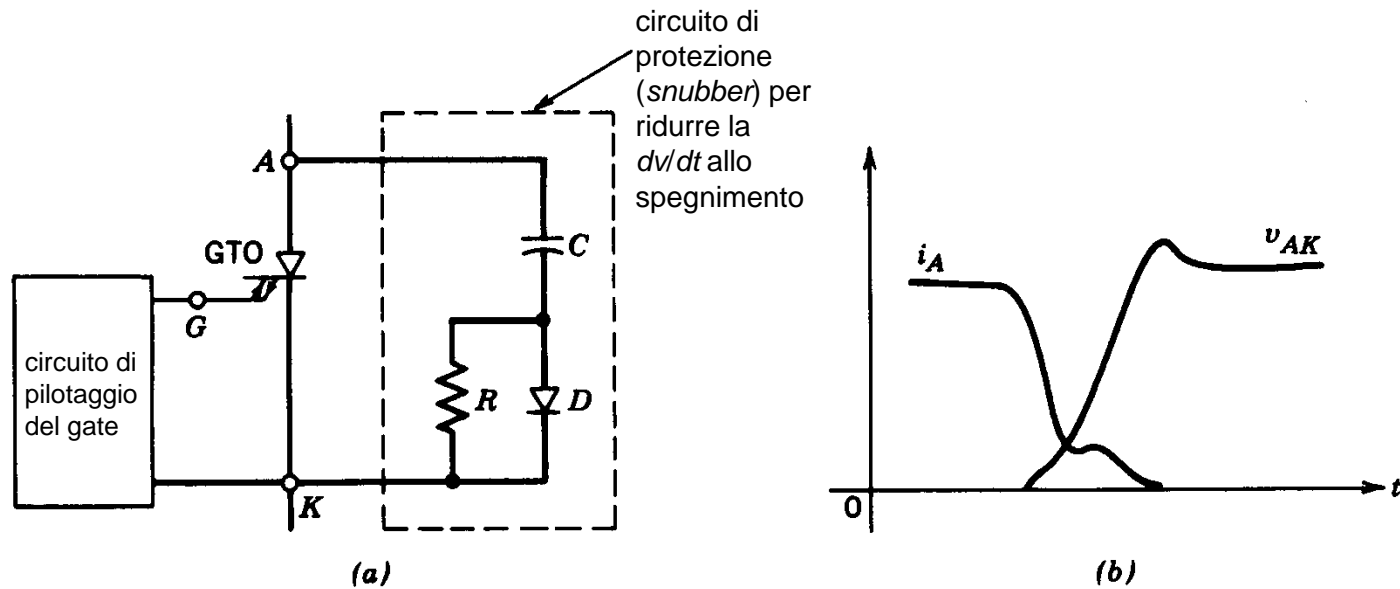
Tiristori a spegnimento dal gate (Gate-Turn-Off Thyristors - GTO)



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 ($\approx 100 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz max}$)

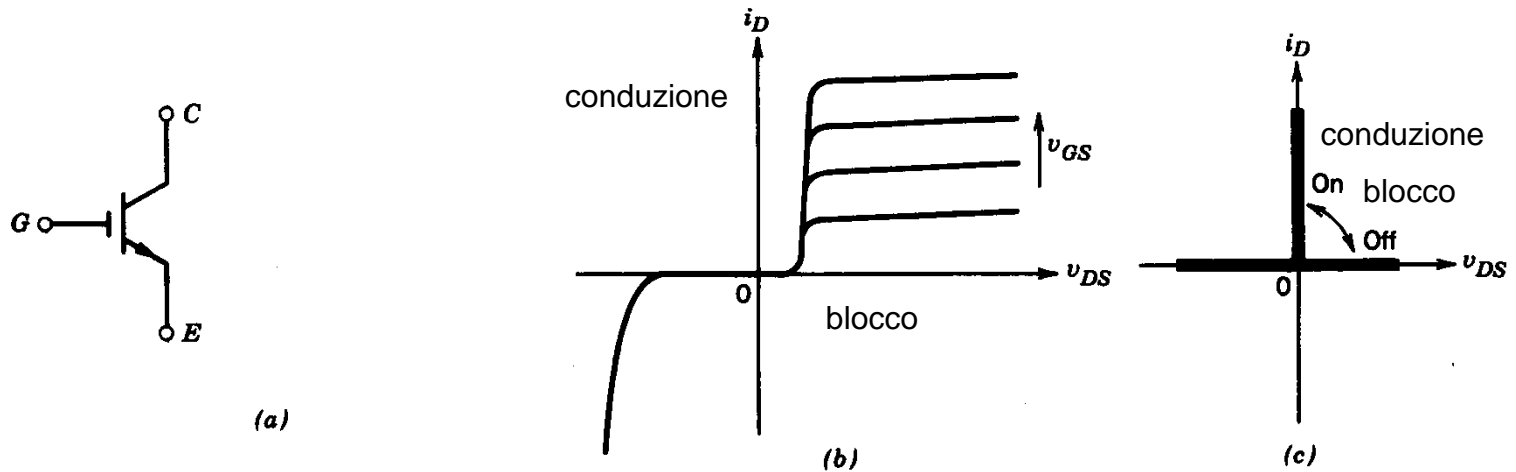
Circuito di protezione GTO



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 ≈ 4.5 kV, correnti massime di qualche kA
- Cadute di tensione $2 \div 3$ V
- Tempi di commutazione $5 \div 25$ μ s

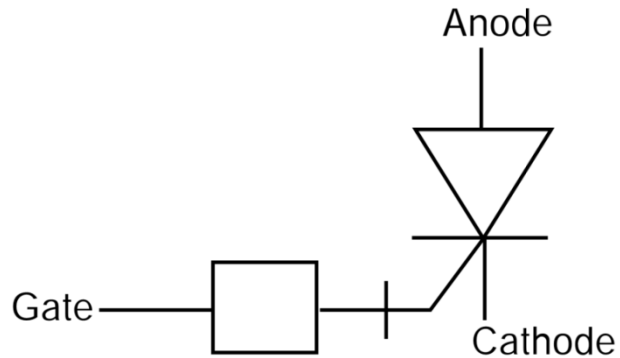
Transistore bipolare a gate isolato IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



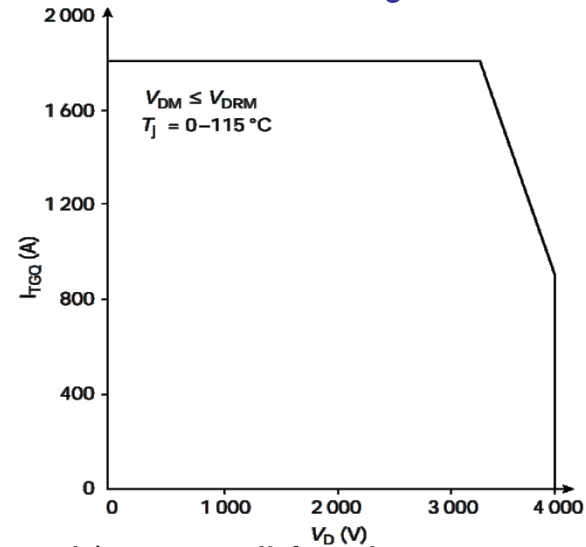
IGBT: a) simbolo; b) caratteristica i - v ; c) caratteristica ideale

- 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)



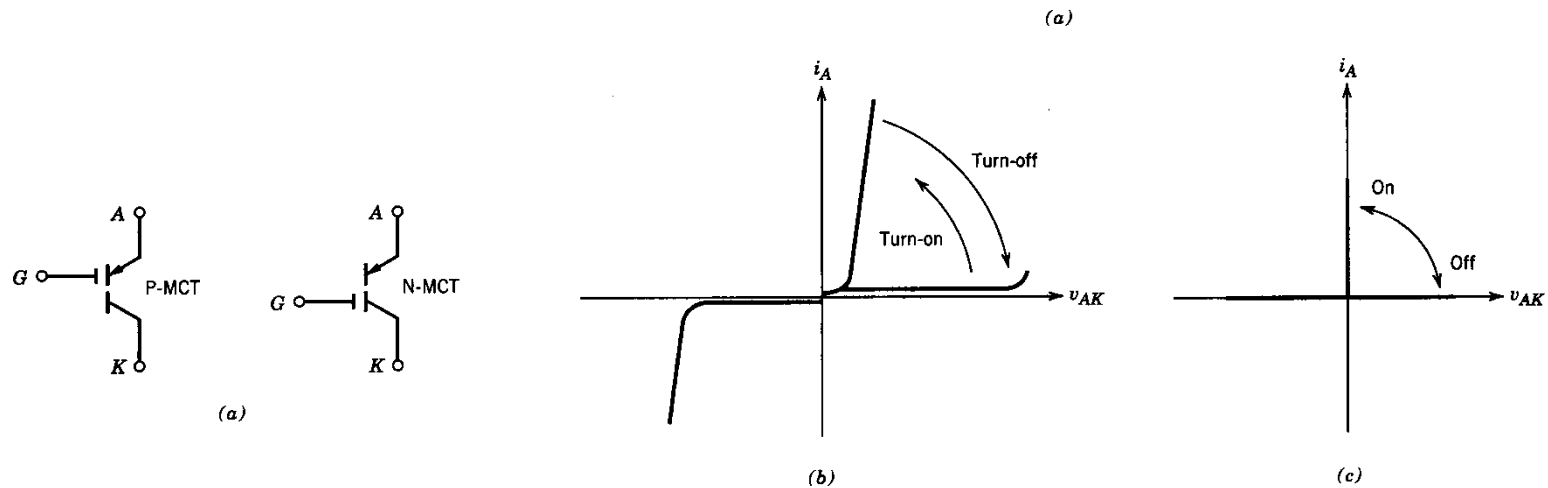
IGCT: a) simbolo;



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 ($\approx 500 \text{ Hz} \div 2 \text{ kHz max}$)
- Tensioni fino a 5500 V, correnti fino a 4000 A

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



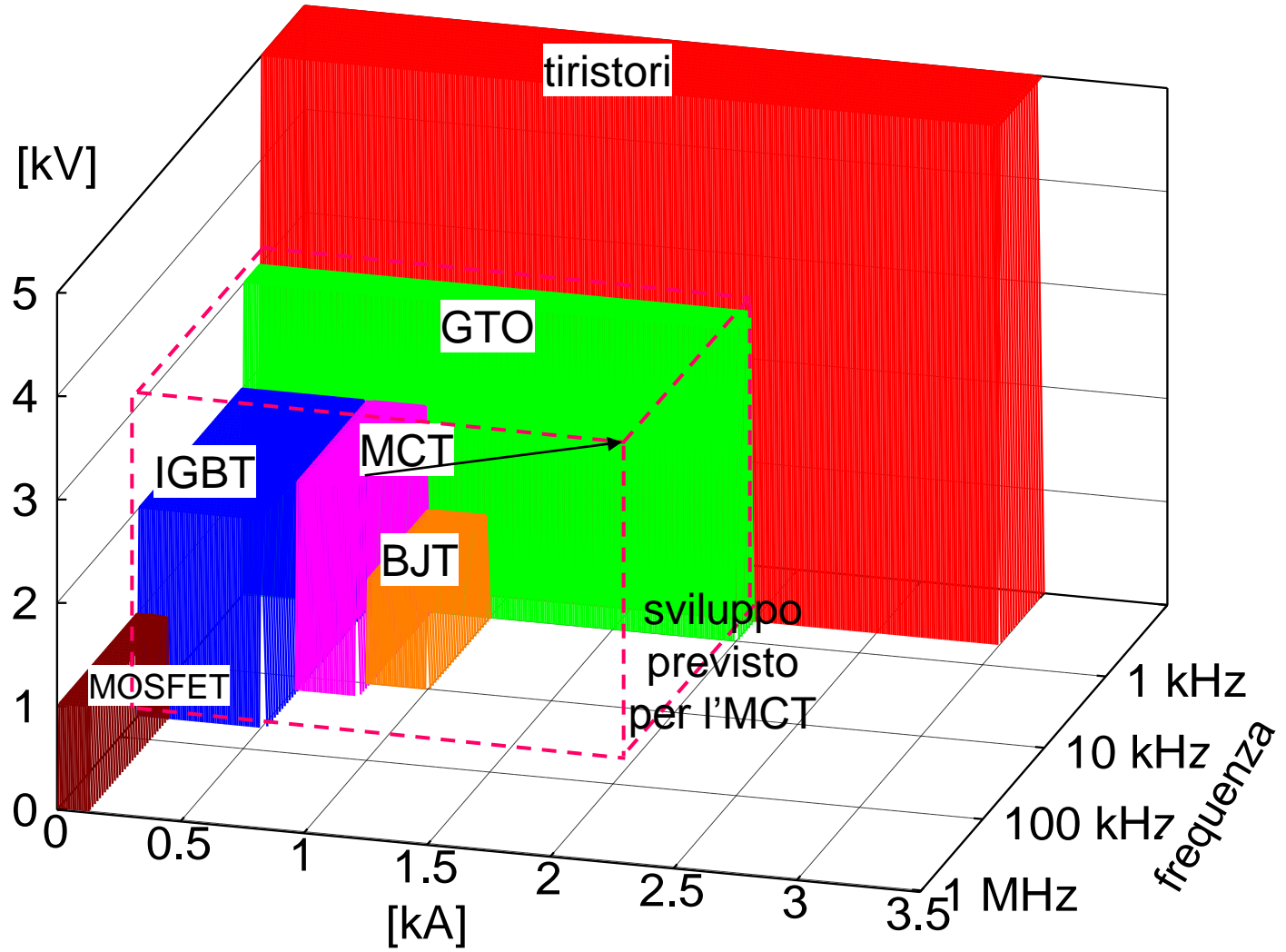
MCT: a) simbolo; b) caratteristica i - v ; c) caratteristica ideale

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

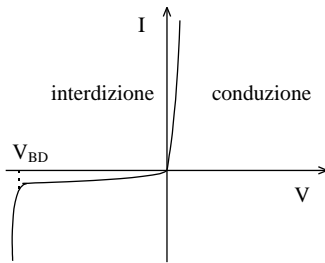
Prestazioni limite dei vari componenti



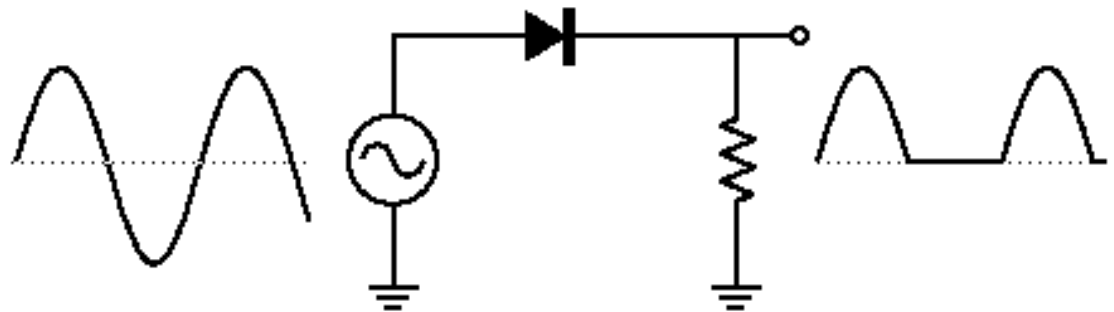
Confronto tra dispositivi controllati

Componente	Accensione	Spegnimento
BJT	Mantenimento di una corrente di base di valore positivo	Corrente di base negativa, rimovibile quando il BJT raggiunge lo stato di off
MOSFET	Mantenimento di una tensione al gate di valore positivo	Assenza di tensione
IGBT	Mantenimento di una tensione al gate di valore positivo	Tensione negativa, rimovibile quando l'IGBT raggiunge lo stato di off
GTO	Impulso di corrente positivo della durata della decina di μs e poi mantenimento di una debole corrente di gate	Impulso di corrente negativo e di valore elevato
IGCT	Impulso di corrente positivo	Impulso di corrente negativo

Raddrizzatore monofase a semionda - 1

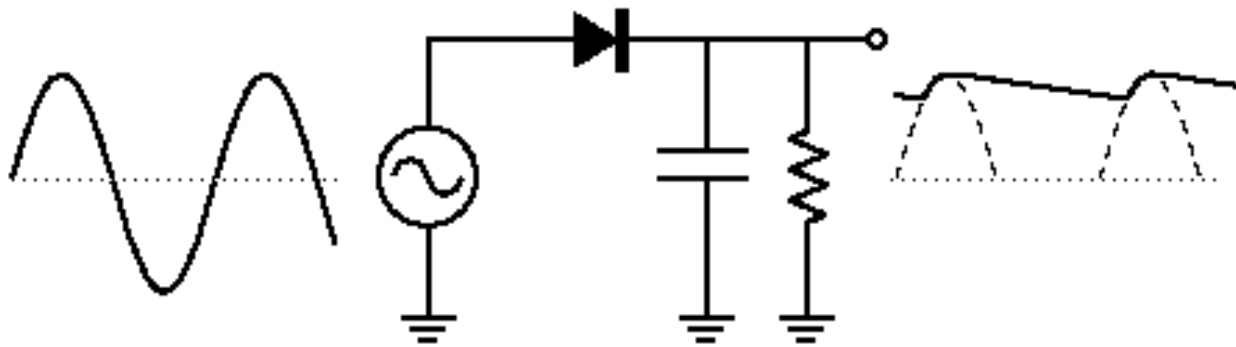


Caratteristica del diodo



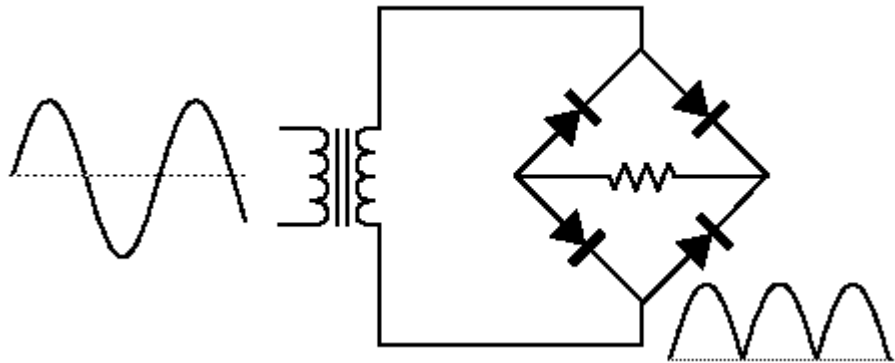
Commutazione Naturale

Raddrizzatore monofase a semionda - 2

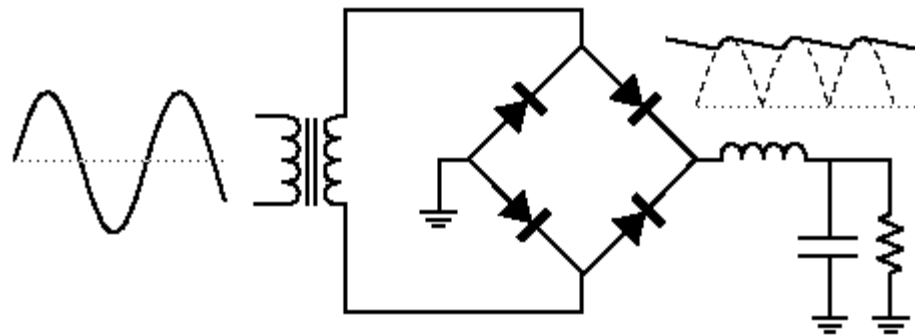


Filtro RC in uscita

Raddrizzatore monofase a onda intera

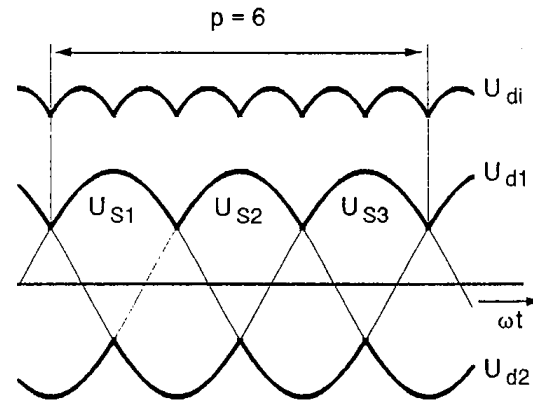
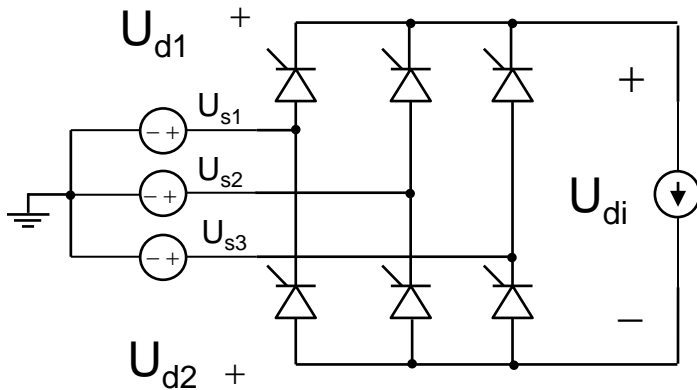
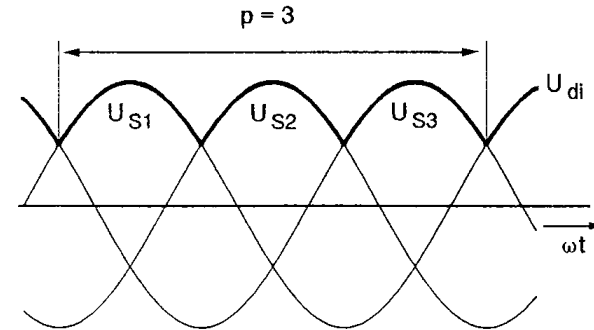
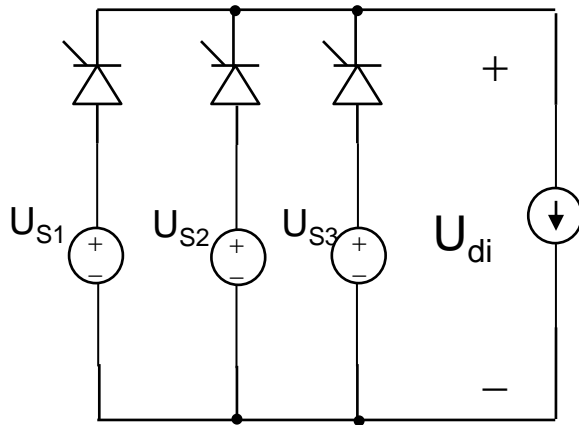


Commutazione Naturale



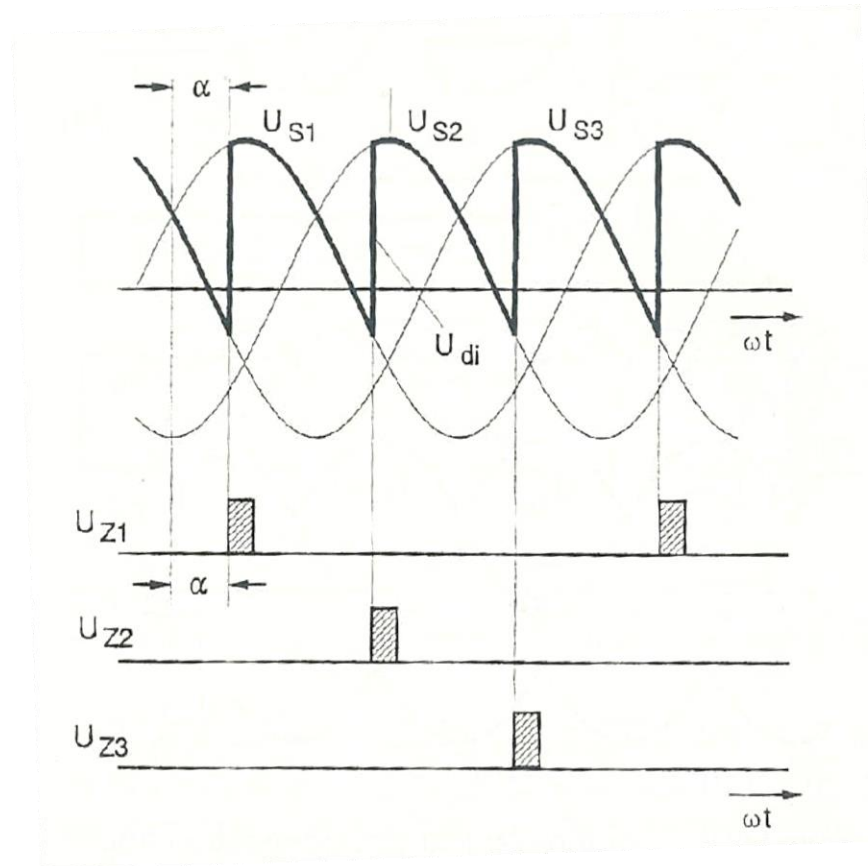
Filtro LC in uscita

Raddrizzatore Trifase



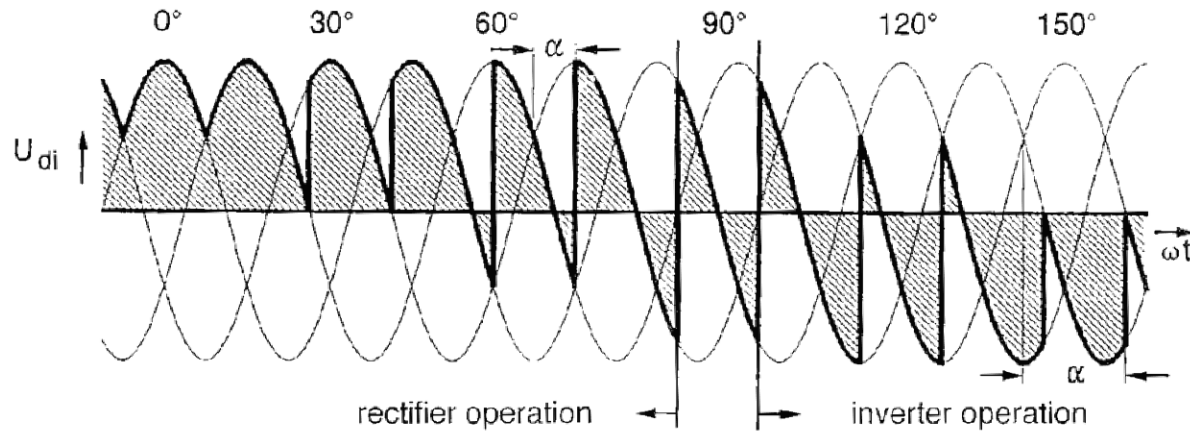
- a) Raddrizzatore trifase a semionda (3 commutazioni in un periodo)
- b) Raddrizzatore trifase ad onda intera (a ponte, 6 commutazioni in un periodo)

Raddrizzatore Trifase Controllato



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

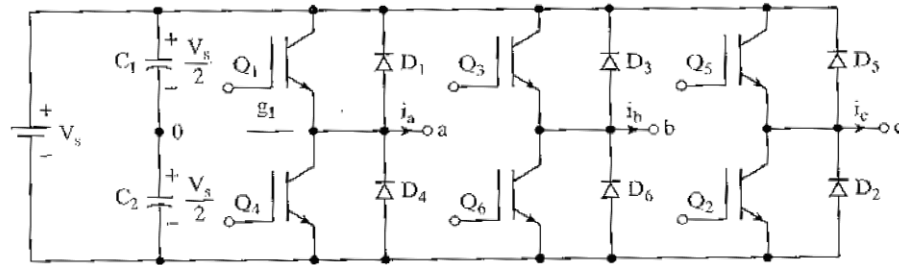
Raddrizzatore Trifase Controllato - funzionamento da inverter -



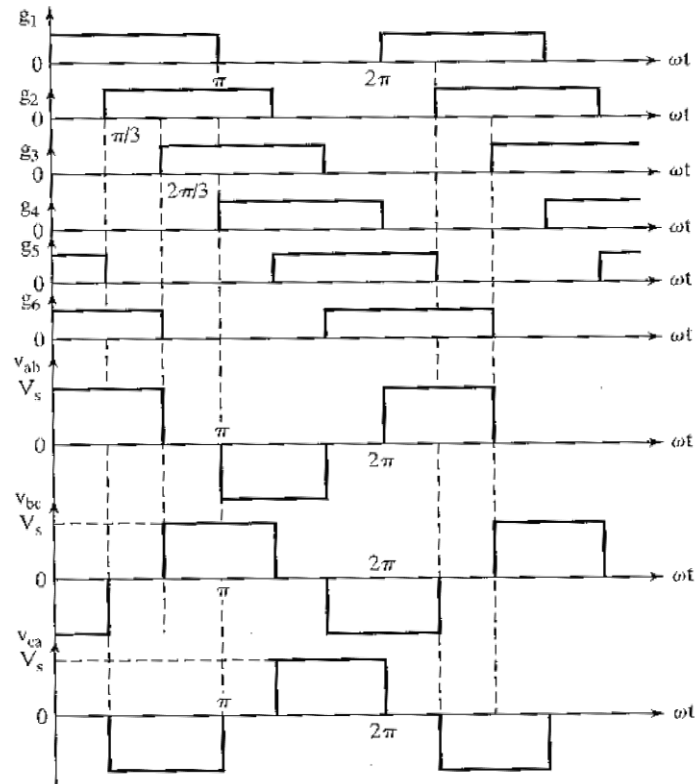
$$V_{out} = 1.35V_{LL} \cos \alpha \quad (L_s = \infty \quad i_{out} = I)$$

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

Voltage source inverter

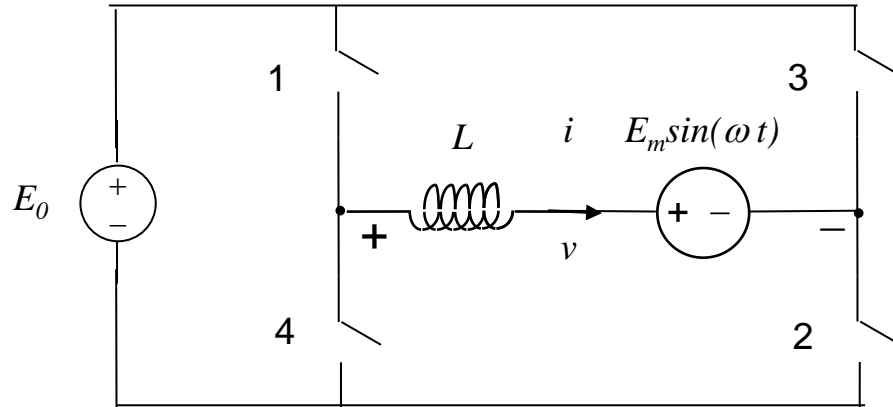


(a) Circuito



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

Inverter PWM (Pulse Width Modulation)

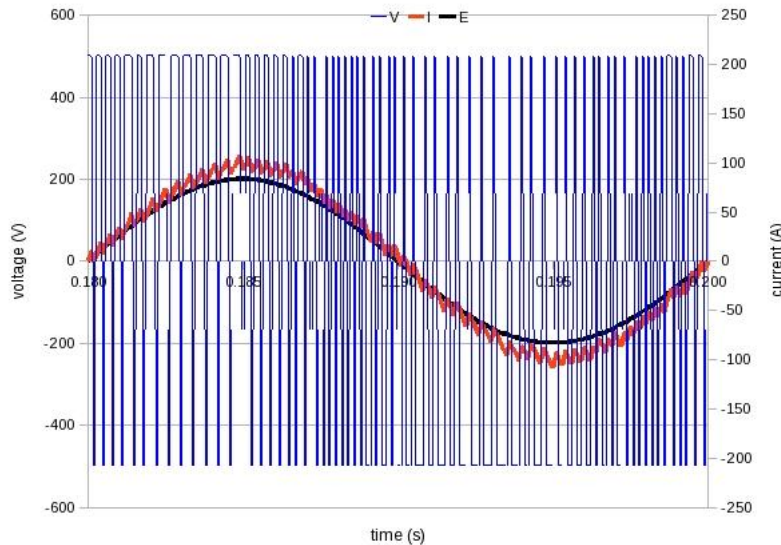


$$\frac{di}{dt} = \frac{v - E_m \sin(\omega t)}{L}$$

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, $v = -E_0$

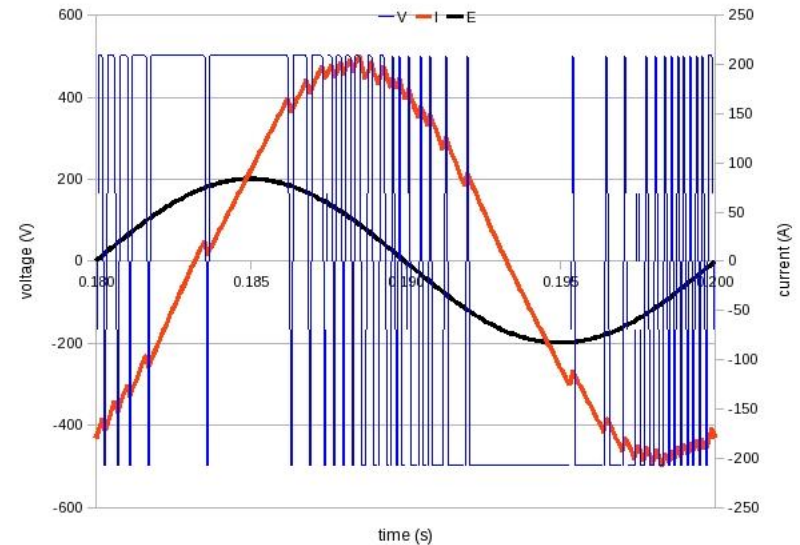
Commutazione con frequenza f_0



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

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

$$Q = 0$$

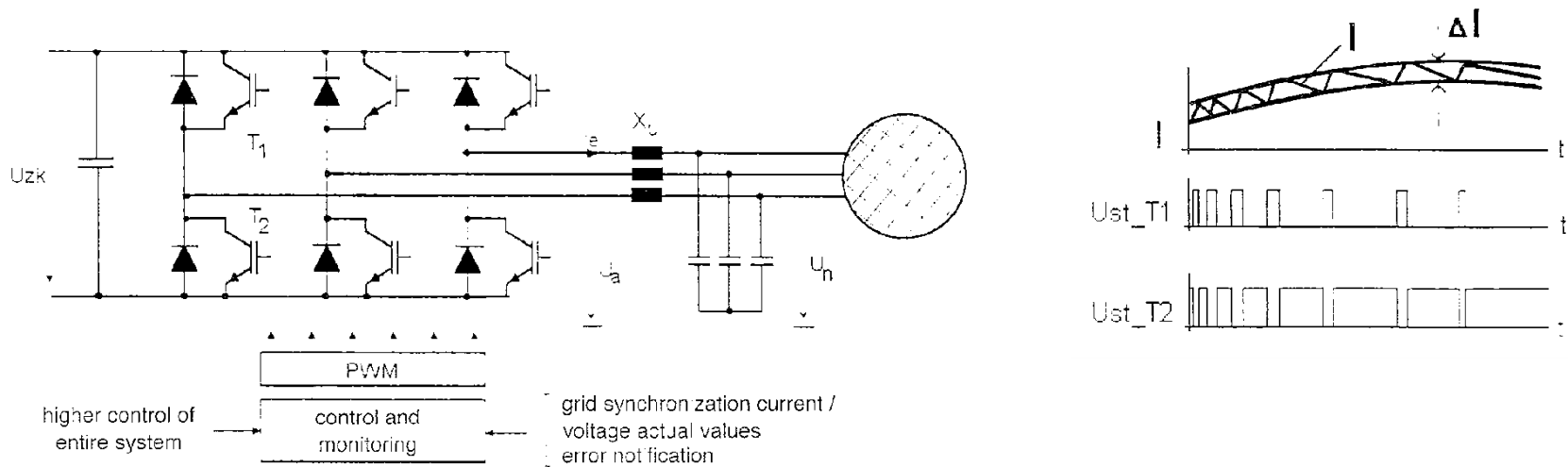


$$I_0(t) = 2I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{3})$$

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

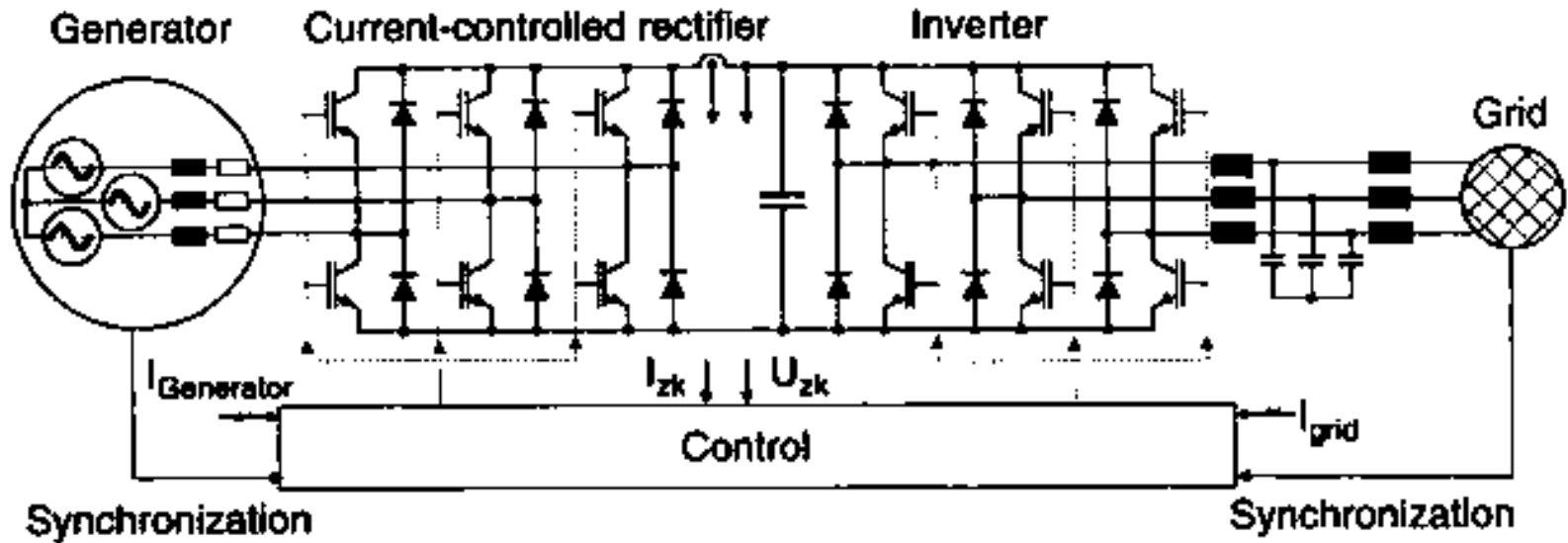
$$Q = \sqrt{3} \frac{E_m I_m}{2}$$

Voltage source inverter trifase ad impulsi



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

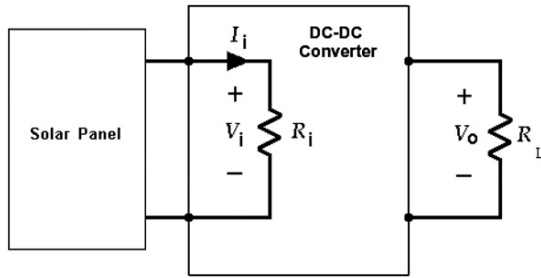
Convertitori per la connessione di generatori eolici alla rete



Convertitori a ponte collegati back to back:

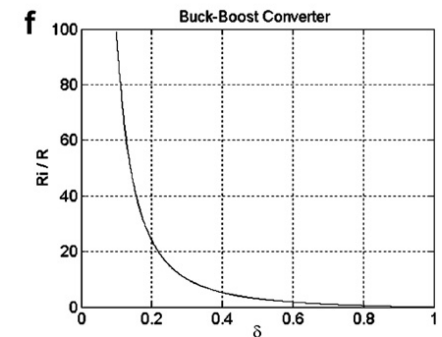
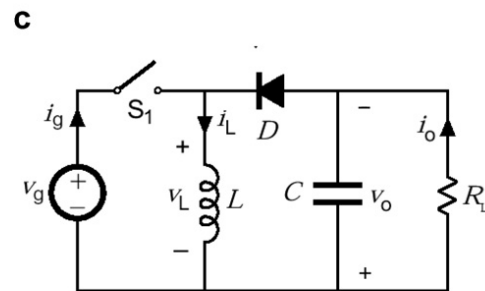
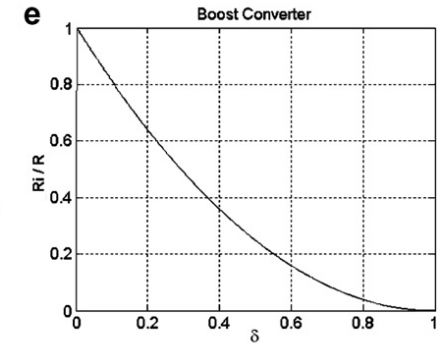
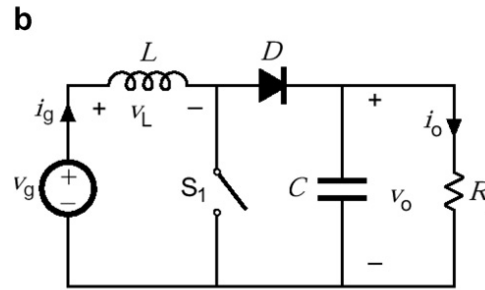
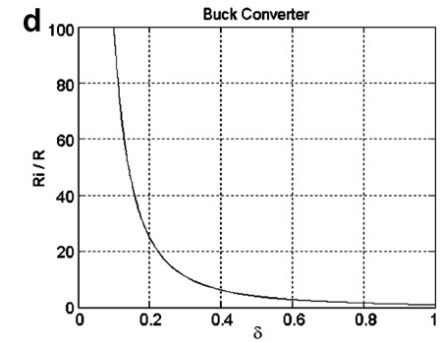
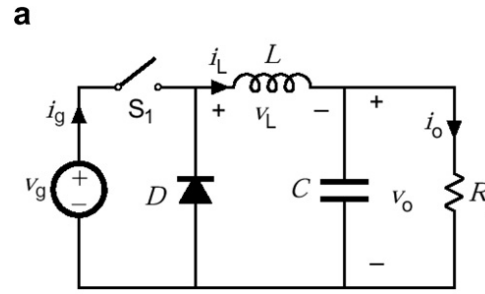
- Il lato rete controlla la carica del condensatore
- Il lato macchina controlla la velocità del rotore

Convertitori DC - DC

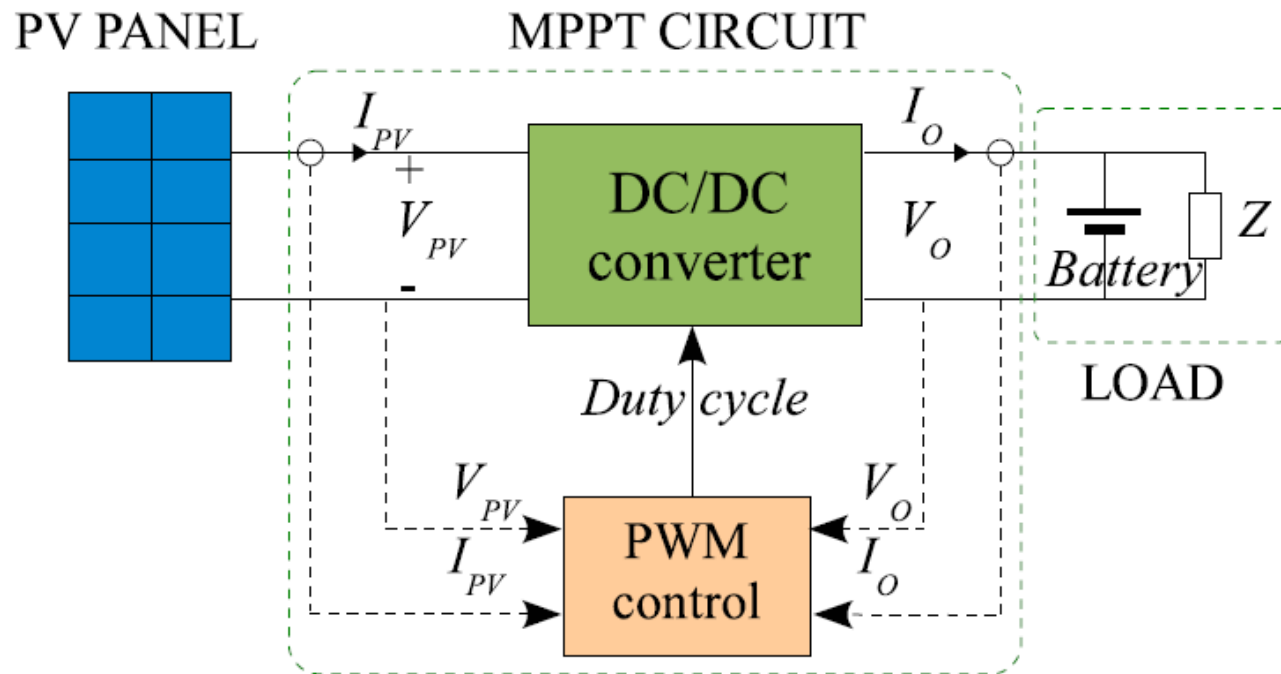


$\delta =$ duty cycle

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



Maximum Power Point Tracking (MPPT)



Maximum Power Point Tracking (MPPT)

