

ELETTRONICA DI POTENZA

Finalità

Questa parte del corso intende affrontare i problemi di analisi e progetto dei circuiti elettronici di interesse per le applicazioni industriali, con particolare attenzione per i circuiti di potenza per la conversione statica dell'energia

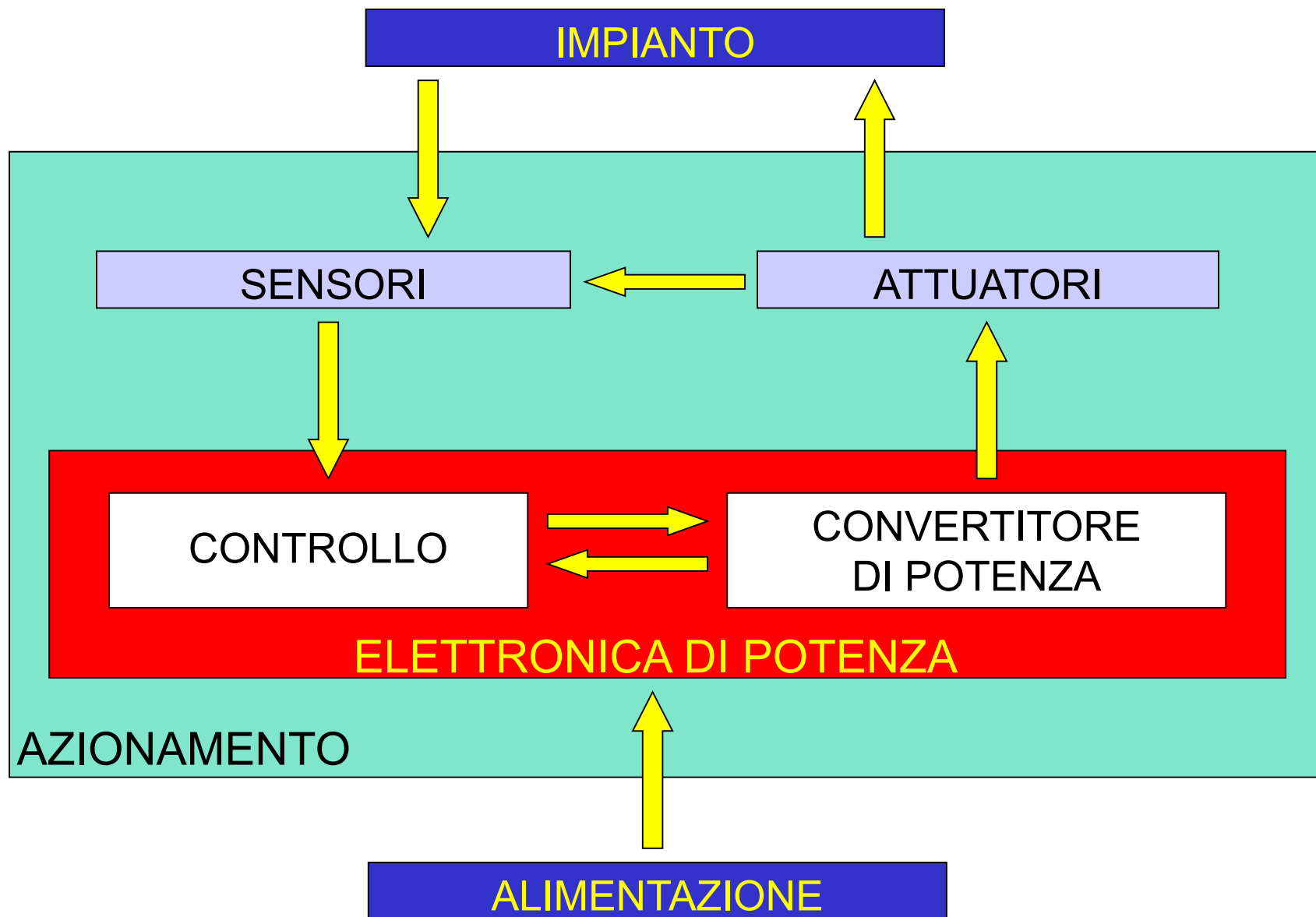
Programma

- Introduzione ai circuiti e dispositivi elettronici di potenza
- Rettificatori non controllati, monofase e trifase
- Convertitori DC/DC 'switching'
- Inverter monofase e trifase

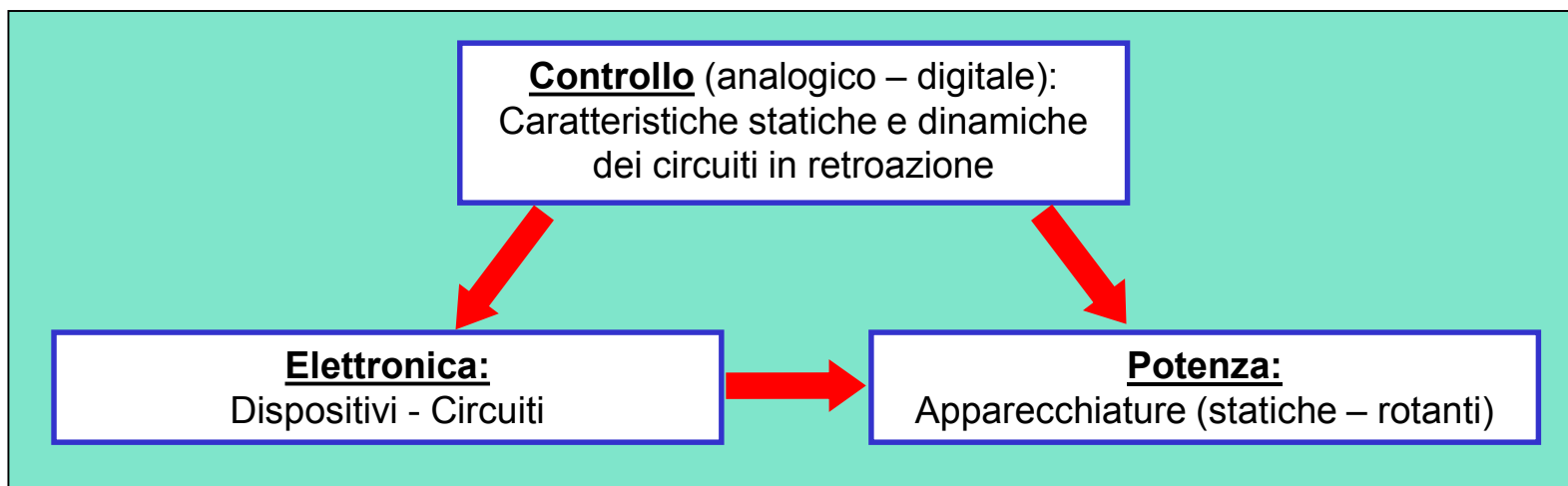
Testo di riferimento

M. H. Rashid, *Elettronica di potenza: dispositivi e circuiti*, volume 1, 3^a Edizione, Prentice-Hall, 2007

AZIONAMENTO ELETTRICO



ELETRONICA DI POTENZA



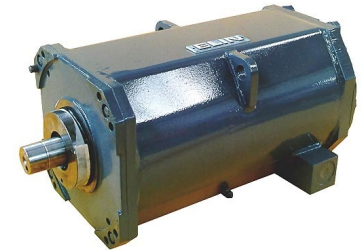
- Interruttori a **stato solido** \Rightarrow **economicità**, **flessibilità**, **affidabilità**, **rendimento**
- Sviluppo della **tecnologia** \Rightarrow aumento di **velocità** e **potenza**, riduzione dei **costi**
- **Microprocessori** (cervello) \Rightarrow migliori strategie di controllo e pilotaggio
- **Costo dell'energia** \Rightarrow richiesta di **mercato** in un campo sempre più vasto

APPLICAZIONI DELL'ELETTRONICA DI POTENZA

- **Railway and automotive transport**
- DC-AC regulated power supplies
- High voltage DC system
- **Motor control**
- Induction heating
- Heating and lighting control
- Electronic welding
- Electro-chemical processes
- Variable speed, constant frequency systems
- Solid state circuit breakers



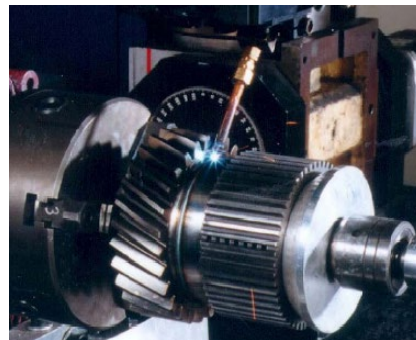
Motor control



Heating



Traction



Electronic welding



High voltage DC lines (HVDC)



CLASSIFICAZIONE DEI CONVERTITORI

A. Convertitori di linea

È la tensione di linea a favorire lo spegnimento dei dispositivi a stato solido e anche la loro accensione è agganciata alla frequenza di linea (50 Hz)

B. Convertitori switching

Utilizzano internamente interruttori commutanti a frequenza molto maggiore di quella di linea, per fornire in uscita un segnale continuo o a bassa frequenza

- Rettificatori non controllati (a diodi)

Conversione AC-DC (sia da trifase che da monofase)

- Convertitori AC-DC controllati (a SCR)

Conversione AC-DC con controllo del valore medio

- Convertitori AC-AC

Output AC di ampiezza variabile da sorgente AC fissa (variando il periodo di conduzione)

- Convertitori DC-DC

Conversione DC-DC con controllo del valore medio (variando il periodo di conduzione)

- Convertitori DC-AC (inverter)

Conversione DC-AC sfruttando gli interruttori controllati

PRINCIPALI DISPOSITIVI DI POTENZA

- Diodi di potenza →



- Tiristori (SCR) →

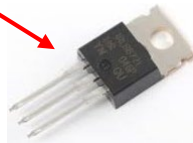


- GTO →



- Transistori bipolari (BJT) di potenza

- MOSFET di potenza →



- IGBT →

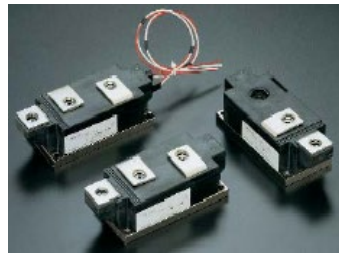
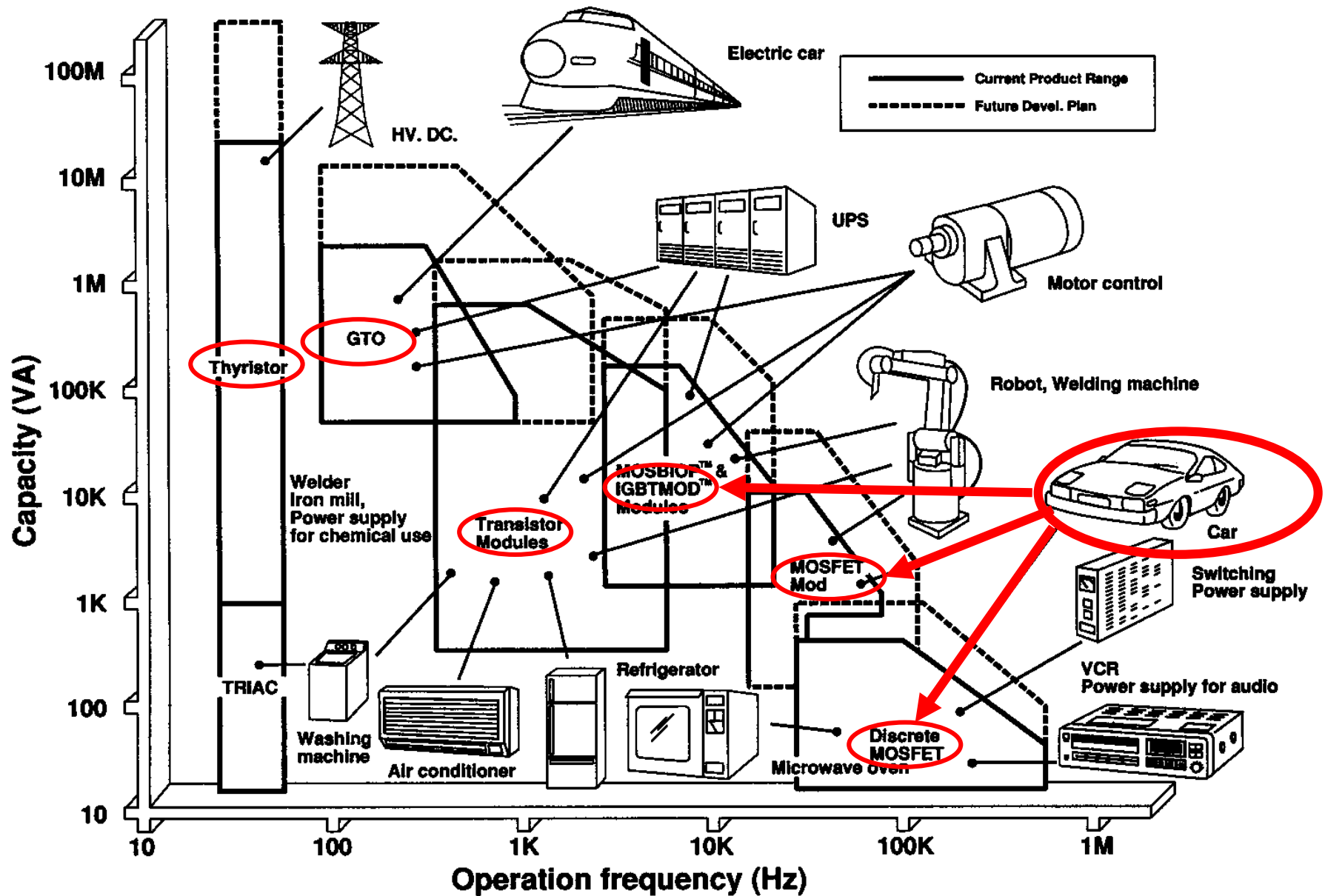


TABLE 1.2 Ratings of Power Semiconductor Devices

Device Type	Devices		Voltage/Current Rating	Upper Frequency (Hz)	Switching Time (μs)	On-State Resistance (Ω)	
Power Diodes	Power diodes	General purpose	4000 V/4500 A	1 k	50–100	0.32 m	
			6000 V/3500 A	1 k	50–100	0.6 m	
			600 V/9570 A	1 k	50–100	0.1 m	
			2800 V/1700 A	20 k	5–10	0.4 m	
		High speed	4500 V/1950 A	20 k	5–10	1.2 m	
	6000 V/1100 A		20 k	5–10	1.96 m		
	600 V/17 A		30 k	0.2	0.14		
	Schottky	150 V/80 A	30 k	0.2	8.63 m		
		Power Transistors	Bipolar transistors	Single	400 V/250 A	25 k	9
	400 V/40 A				30 k	6	31 m
630 V/50 A	35 k				2	15 m	
Darlington	1200 V/400 A			20 k	30	10 m	
MOSFETs	Single		800 V/7.5 A	100 k	1.6	1	
	COOLMOS		Single	800 V/7.8 A	125 k	2	1.2 m
600 V/40 A				125 k	1	0.12 m	
1000 V/6.1 A				125 k	1.5	2 Ω	
IGBTs	Single		2500 V/2400 A	100 k	5–10	2.3 m	
			1200 V/52 A	100 k	5–10	0.13	
		1200 V/25 A	100 k	5–10	0.14		
		1200 V/80 A	100 k	5–10	44 m		
		1800 V/2200 A	100 k	5–10	1.76 m		
Thyristors (Silicon-Controlled Rectifiers)	SITs	1200 V/300 A	100 k	0.5	1.2		
		Phase control thyristors	Line-commutated low speed	6500 V/4200 A	60	100–400	0.58 m
				2800 V/1500 A	60	100–400	0.72 m
				5000 V/4600 A	60	100–400	0.48 m
				5000 V/3600 A	60	100–400	0.50 m
	5000 V/5000 A			60	100–400	0.45 m	
	Forced-turned-off thyristors	Reverse blocking high speed	2800 V/1850 A	20 k	20–100	0.87 m	
			1800 V/2100 A	20 k	20–100	0.78 m	
			4500 V/3000 A	20 k	20–100	0.5 m	
			6000 V/2300 A	20 k	20–100	0.52 m	
4500 V/3700 A			20 k	20–100	0.53 m		
Bidirectional RCT		4200 V/1920 A	20 k	20–100	0.77 m		
		GATT	2500 V/1000 A	20 k	20–100	2.1 m	
		GATT	1200 V/400 A	20 k	10–50	2.2 m	
		Light triggered	6000 V/1500 A	400	200–400	0.53 m	
		Self-turned-off thyristors	GTO	4500 V/4000 A	10 k	50–110	1.07 m
HD-GTO	4500 V/3000 A			10 k	50–110	1.07 m	
Pulse GTO	5000 V/4600 A			10 k	50–110	0.48 m	
SITH	4000 V/2200 A			20 k	5–10	5.6 m	
MTO	4500 V/500 A			5 k	80–110	10.2 m	
ETO	4500 V/4000 A		5 k	80–110	0.5 m		
	IGCT		4500 V/3000 A	5 k	80–110	0.8 m	
	TRIACs		Bidirectional	1200 V/300 A	400	200–400	3.6 m
				MCTs	Single	4500 V/250 A	5 k
	1400 V/65 A		5 k			50–110	28 m

DISPOSITIVI DI POTENZA E APPLICAZIONI



CARATTERISTICHE

TIPO DI CONTROLLO

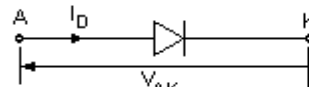

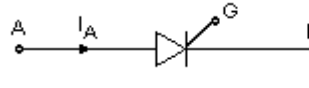



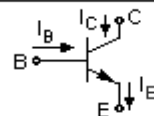

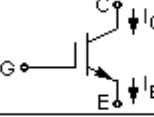
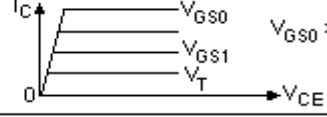
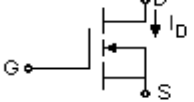
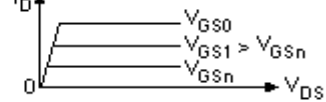
- Assenza del controllo (diodi)
- Solo turn-on (SCR)
- Turn-on e turn-off (GTO)
- Continuo (BJT, MOS, IGBT)

TIPO DI ISOLAMENTO

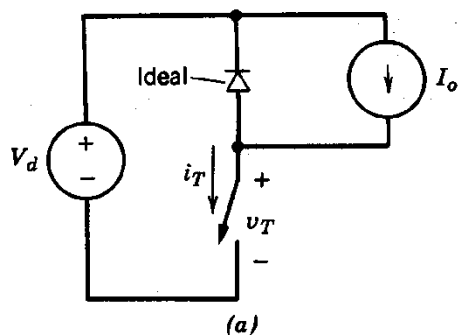
- Unipolare (diodi, BJT, MOS)
- Bipolare (SCR, GTO, IGBT)

CONDUZIONE DI CORRENTE

- Unidirezionale (tutti)

Devices	Symbols	Characteristics
Diode		
Thyristor		
GTO		
NPN BJT		
IGBT		
N-Channel MOSFET		

INTERRUTTORI CONTROLLATI



INTERRUTTORE IDEALE:

- Off-state: blocca qualunque tensione con $I_T = 0$
- On-state: conduce qualunque corrente con $V_T = 0$
- Commuta istantaneamente
- Potenza nulla per il controllo

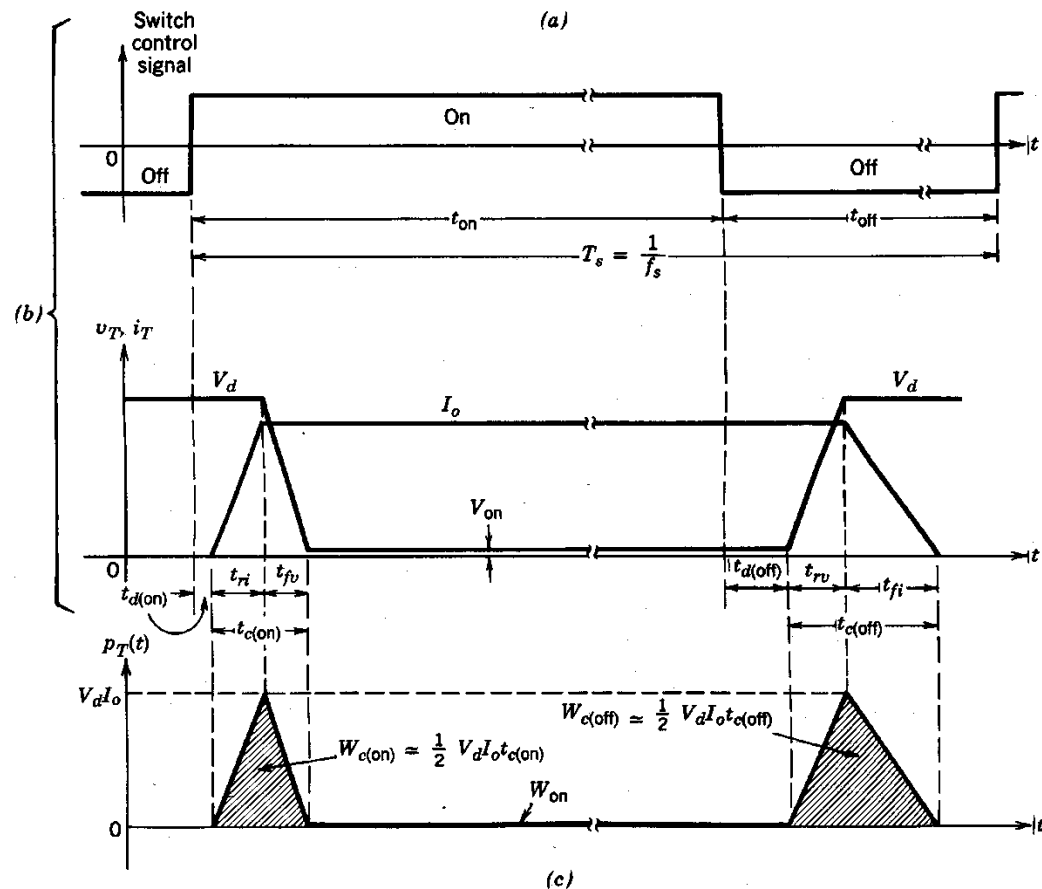


Figure 2-6 Generic-switch switching characteristics (linearized): (a) simplified clamped-inductive-switching circuit, (b) switch waveforms, (c) instantaneous switch power loss.

INTERRUTTORI REALI:

$$P_S = \frac{1}{2} V_d I_o f_s [t_{c(on)} + t_{c(off)}] \Rightarrow \propto f_s, t_c \quad (f_s: \text{frequenza di commutazione})$$

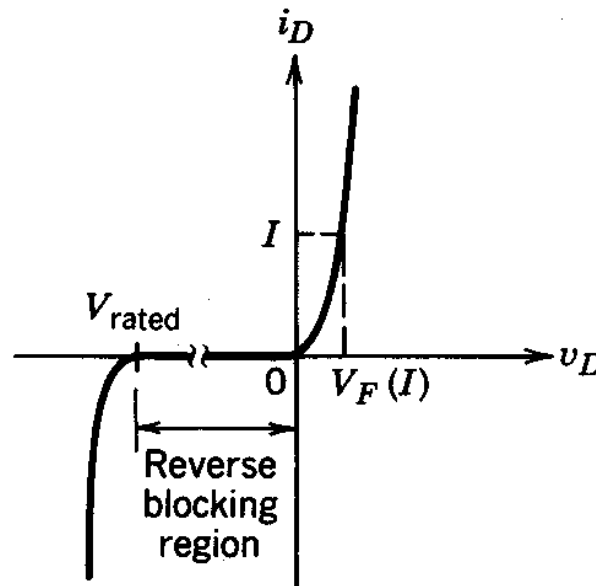
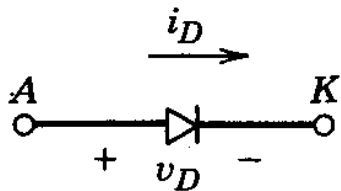
$$P_{ON} = V_{ON} I_o \frac{t_{on}}{T_s} = V_{ON} I_o t_{on} f_s$$

$$P_{TOT} = P_S + P_{ON}$$

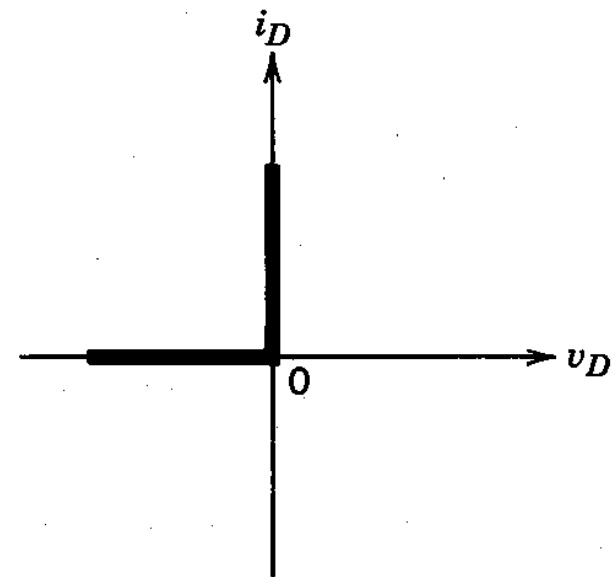
$$(P_{OFF} \text{ è trascurabile})$$

DIODI DI POTENZA

- Accensione e spegnimento controllati dal circuito di potenza
- Accensione: ~ ideale
- Spegnimento: reverse recovery time (t_{RR})
- Stato di conduzione: resistenza serie (r_{ON}) $\Rightarrow V_F$
- Frequenze da 50 Hz a 1 MHz
- Bassa caduta diretta ($V_F = 0.7 \div 2 \text{ V}$)
- $V_{\text{block}} = 600 \div 6000 \text{ V}$
- $I_F = 700 \div 10000 \text{ A}$

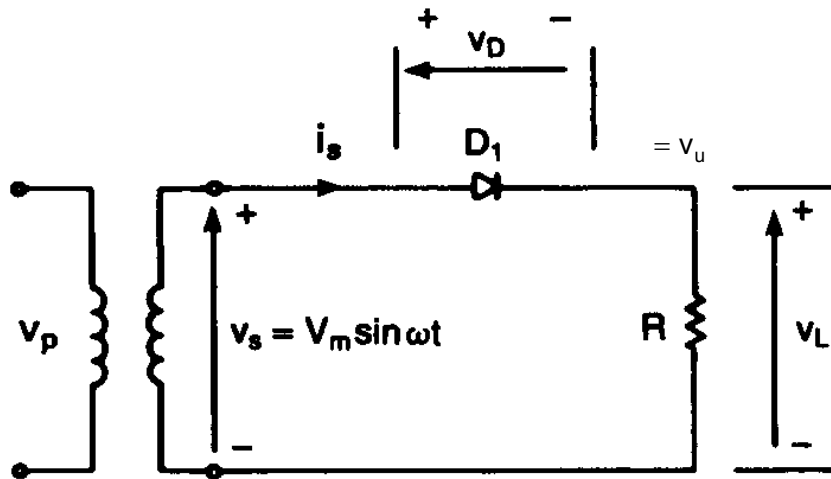


Caratteristica I-V reale

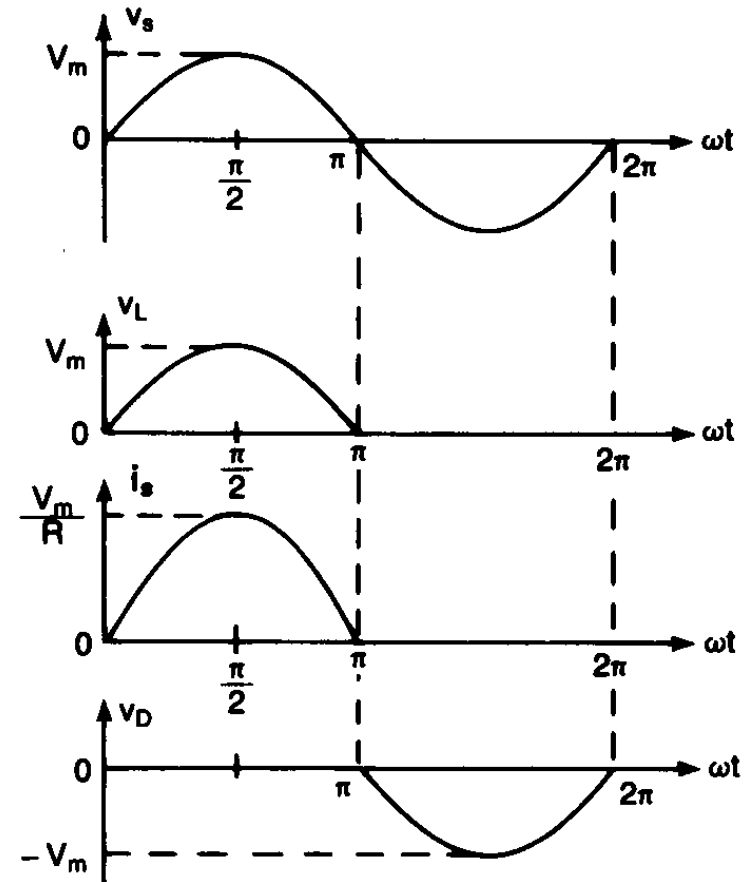


Caratteristica I-V idealizzata

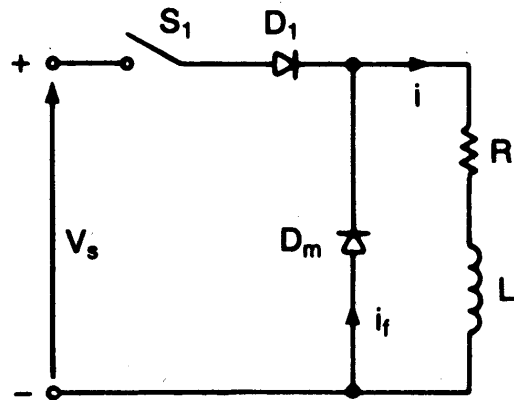
Utilizzo del diodo: RETTIFICATORE



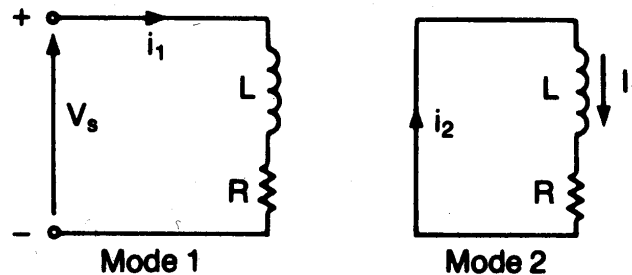
- Solo la semionda positiva della tensione di ingresso viene riportata al carico
- L'accensione del diodo non può essere controllata, quindi valore medio e valore efficace del segnale di uscita sono fissati



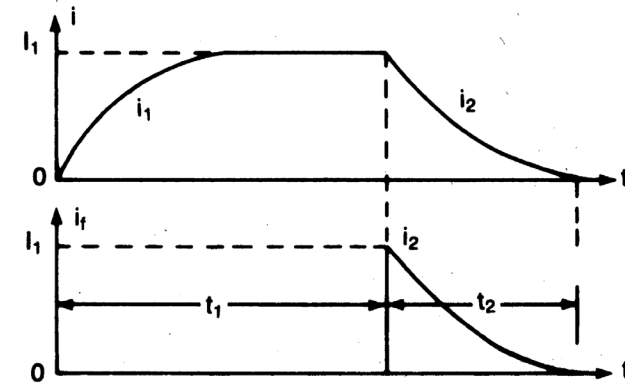
Utilizzo del diodo: FREE-WHEELING



(a) Circuit diagram



(b) Equivalent circuits



(c) Waveforms

Modo 1, S_1 chiuso:
$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1(t) = V_s, \quad i_1(0) = 0 \Rightarrow i_1(t) = \frac{V_s}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

se t_1 è sufficientemente lungo: $i_1 = I_s = \frac{V_s}{R}$

Modo 2, S_1 aperto ($t(0) = t_1 = 0$):

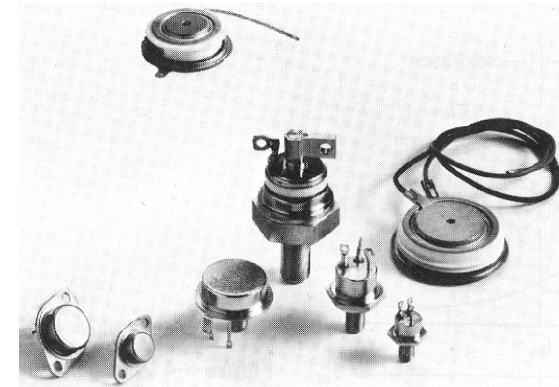
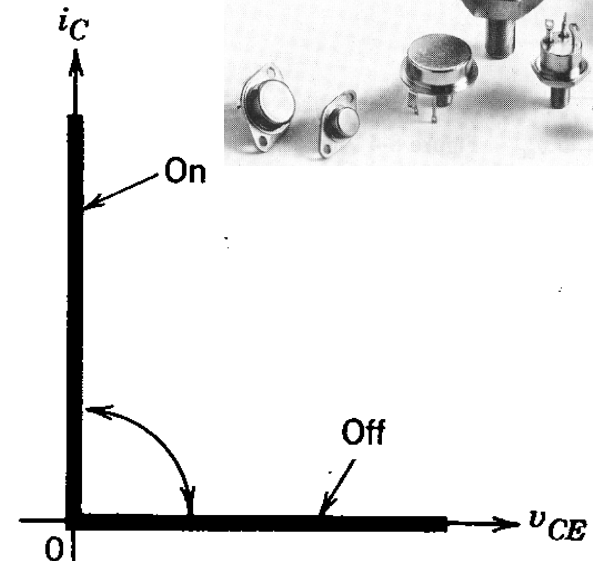
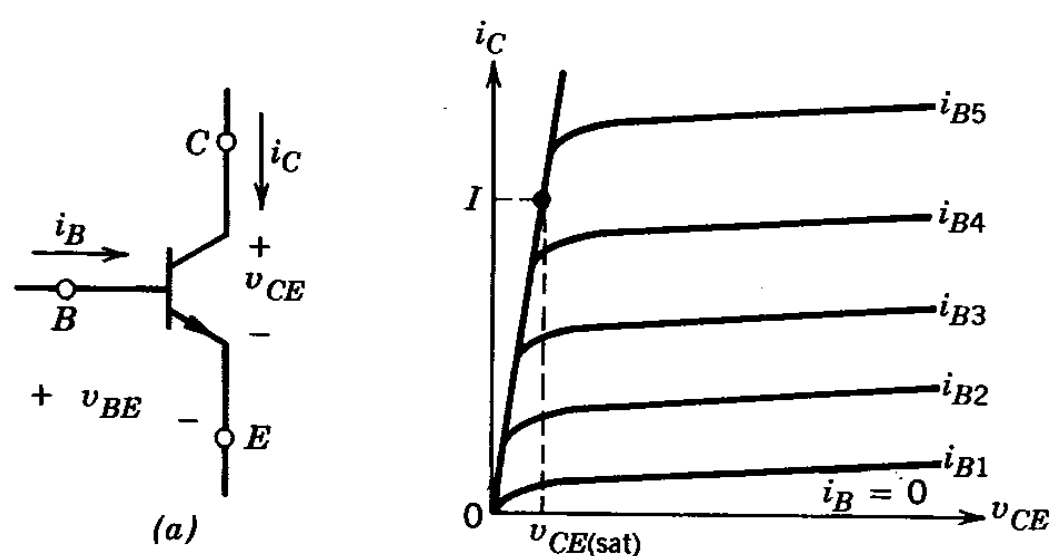
$$L \frac{di_2}{dt} + Ri_2(t) = 0 \quad \text{con} \quad i_2(0) = I_s = \frac{V_s}{R}$$

$$\Rightarrow i_2(t) = \frac{V_s}{R} e^{-tR/L}$$

D_m fornisce il cammino per la corrente causata dall'energia immagazzinata in L .

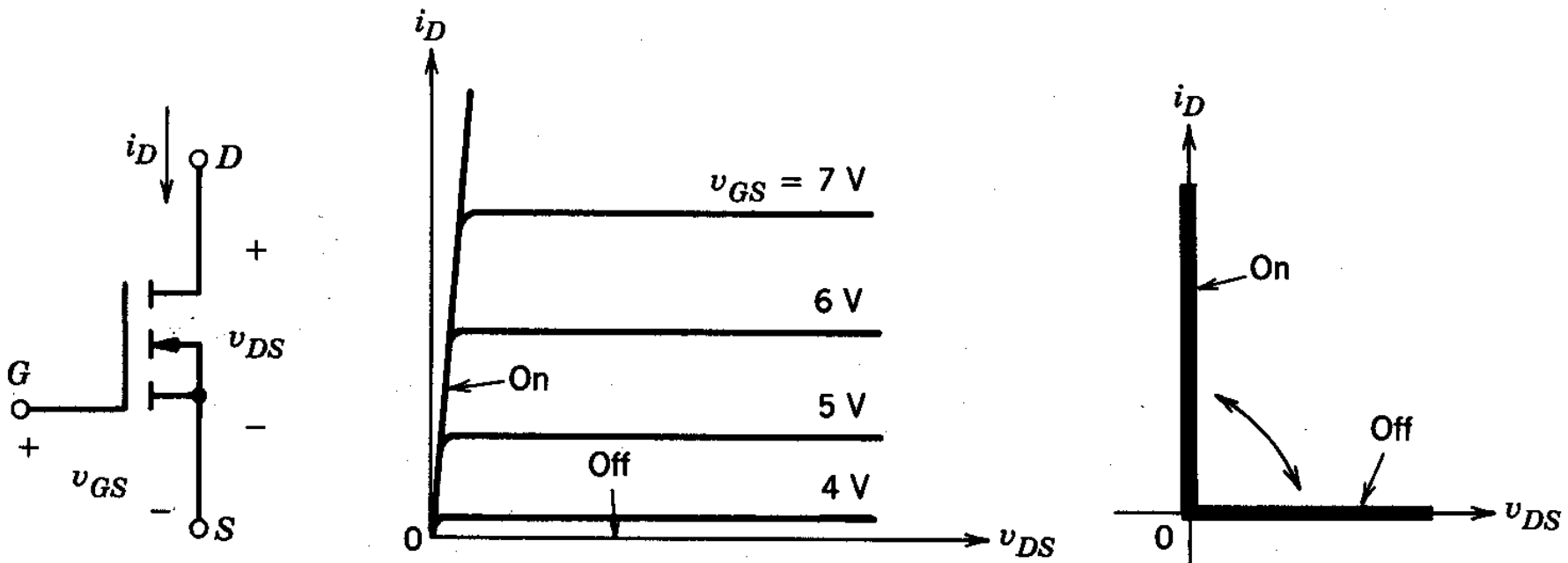
BJT di potenza

- Bassa dissipazione in on-state ($V_{CEsat} \approx 1 \div 2 \text{ V}$)
- Lunghi tempi di storage in spegnimento (tempi di commutazione: svariati μs)
- $V_{block} < 1500 \text{ V}$; $I_{max} \approx 100 \text{ A} \Rightarrow$ connessioni in parallelo
- Pilotaggio in corrente: $\beta = I_C/I_B$ in zona attiva diretta
- Base molto spessa, per evitare reach-through $\Rightarrow \beta$ basso ($\approx 10 \div 20$)
- Funzionamento in quasi-saturazione durante i transitori
- Breakdown secondario



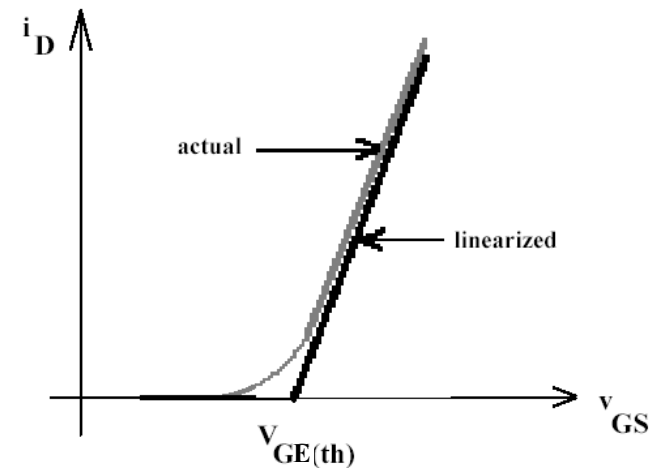
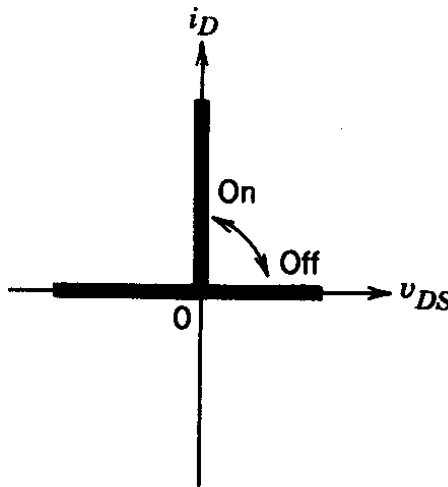
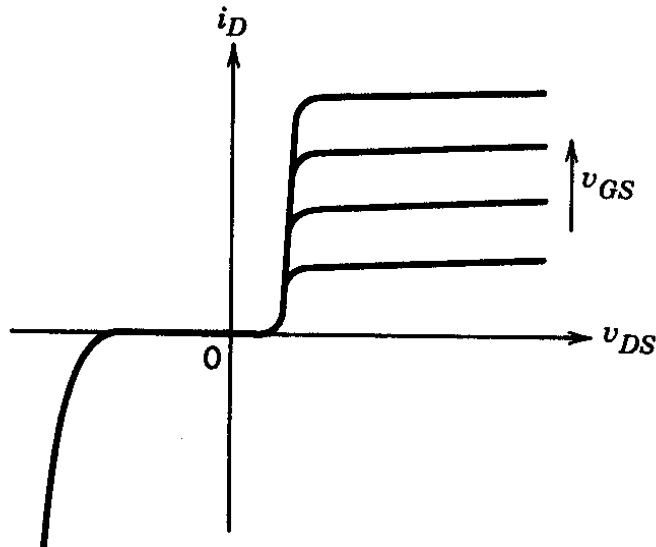
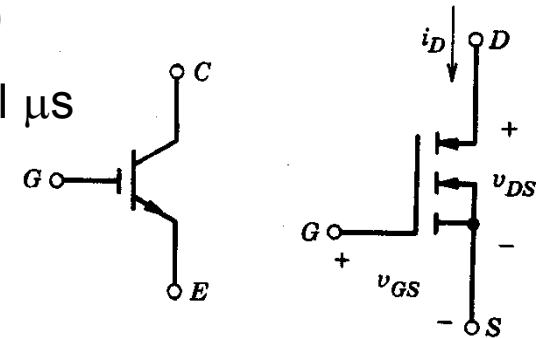
MOSFET di potenza

- Controllo in tensione (accensione per $V_{GS} > V_T$)
- Facilità di pilotaggio e dissipazione statica nulla in ingresso
- Commutazione veloce ($10 \div 100 \text{ ns}$) \Rightarrow perdite di commutazione ridotte
- Elevata dissipazione in on-state ($r_{DS(on)} \approx \text{k}\Omega$)
- $V_{\text{block}} < 1000 \text{ V}$; $I_{\text{MAX}} \approx 100 \text{ A} \Rightarrow$ connessioni in parallelo

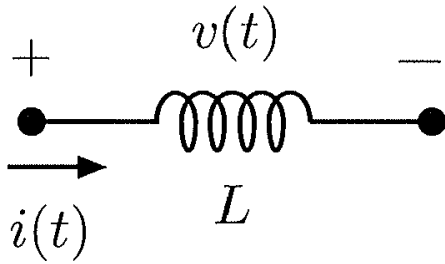


IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

- Ingresso ad alta impedenza e transcaratteristica lineare (**MOSFET**)
- Piccola V_F (2÷3 V) e grande V_{block} (6500 V) (**BJT**)
- Capacità di bloccare tensioni di entrambe le polarità (**GTO**)
- Spegnimento e accensione in tempi anche molto inferiori al μs
- $I_{\text{max}} \approx 100 \text{ A} \Rightarrow$ connessioni in parallelo



INDUTTORE

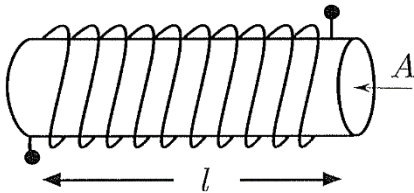


Relazione caratteristica:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

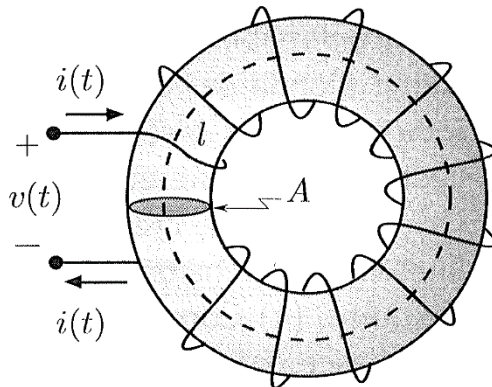


- se $i(t)$ è costante equivale ad un cortocircuito
- $i(t)$ è una funzione continua



Induttanza: $L = \mu \frac{NA^2}{l}$

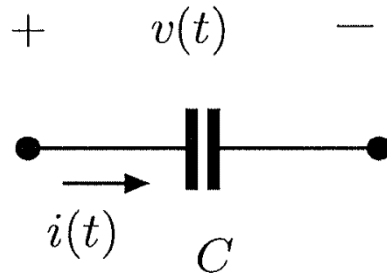
$$\mu = \mu_0 \mu_r$$



L'induttore immagazzina l'energia del campo magnetico:

$$w = \frac{1}{2} L i^2$$

CONDENSATORE

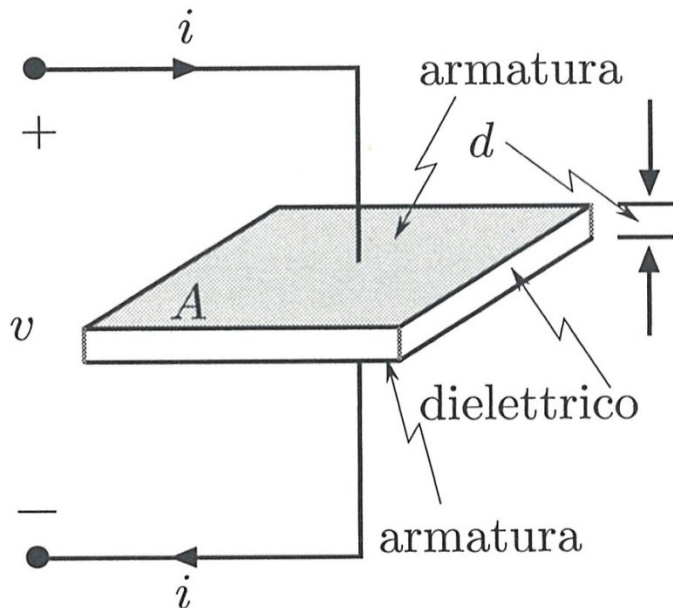


Relazione caratteristica:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$



- se $v(t)$ è costante equivale ad un circuito aperto
- $v(t)$ è una funzione continua



Capacità: $C = \varepsilon \frac{A}{d}$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

Il condensatore immagazzina l'energia del campo elettrico:

$$w = \frac{1}{2} C v^2$$