

Università di Padova - Facoltà di Ingegneria

Massimo Guarnieri

Elettrotecnica

Capitolo 2

Energetica degli m-bipoli

Considera gli eventi energetici **interni** agli m-bipoli.

Lavoro elettrico

Integrando la potenza elettrica su un dato intervallo temporale $\Delta t=[t_o,t]$, si ottiene il lavoro elettrico scambiato alla porta elettrica in quell'intervallo:

$$\mathcal{L}(t_o,t) = \int_{t_o}^t p \, dt \quad [\text{J, Wh}]$$

Condizioni stazionarie: $\mathcal{L}(t_o,t) = P \Delta t$

$\mathcal{L}(t_o,t)$ è entrante, $\mathcal{L}_e(t_o,t)$, o uscente, $\mathcal{L}_u(t_o,t)$, in base alle stesse convenzioni usate per la potenza p .

Spesso è chiamato, impropriamente, energia elettrica.

Energetica degli m-bipoli

M-bipoli attivi

Sono gli m-bipoli che possono erogare lavoro elettrico per conversione da altre forme energetiche, che assumiamo fornite da serbatoi di capacità infinita \rightarrow gli m-bipoli attivi possono erogare illimitatamente; inoltre assumiamo che il processo sia reversibile \rightarrow gli m-bipoli attivi possono anche assorbire illimitatamente:

$$\mathcal{L}_u(t_0, t) \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} 0 \quad \forall t_0, \forall t > t_0$$

Sono costituiti dai **generatori elettrici** che, appunto, generano potenza e lavoro elettrico per conversione da altre forme energetiche.

Energetica degli m-bipoli

M-bipoli passivi

Sono gli m-bipoli che possono al più immagazzinare il lavoro assorbito in energia di tipo elettrico, necessariamente limitata \rightarrow possono al più erogare lavoro elettrico uguale all'energia precedentemente immagazzinata

$$\mathcal{L}_u(t_o, t) \leq w(t_o) \quad \forall t_o, \forall t > t_o$$

Più precisamente, non possono erogare più lavoro del contemporaneo decremento di energia immagazzinata

$$\mathcal{L}_u(t_o, t) \leq -\Delta w(t_o, t) \quad \forall t_o, \forall t > t_o$$

Condizioni stazionarie ($W=\text{cost}$): $P_u \leq 0$

Energetica degli m-bipoli

Perfezione energetica = un solo tipo di trasformazione energetica (idealmente, nella realtà non è così)

Generatore perfetto: può solo convertire (erogare e assorbire) lavoro elettrico in modo reversibile ed illimitatamente (scambio bidirezionale con serbatoio non elettrico di capacità infinita)

Resistore perfetto: può solo assorbire lavoro elettrico in modo irreversibile ed illimitatamente (scambio unidirezionale con serbatoio non elettrico di capacità infinita)

Accumulatore perfetto: può solo accumulare in modo reversibile e limitatamente lavoro in forma elettrica (scambio bidirezionale con serbatoio elettrico)

Tipologie di m-bipoli

Costituiscono una classificazione diversa da quella energetica, ma molto importante.

Riguardano il comportamento **esterno** degli m-bipoli e sono individuate dai legami matematici (relazioni tipologiche, equazioni esterne) che vincolano tensioni e correnti alle porte degli m-bipoli;

ogni tipo di legame matematico definisce una specifica **tipologia** di m-bipolo;

Ciò vale in particolare per i bipoli:

il legame tensione-corrente si esprime con un'equazione →

Tipologie di bipoli

bipolo adinamico o di ordine zero: l'equazione è del tipo:

$$f(v,i)=0 \quad (1)$$

- non comprende derivate o integrali
- significa che non dipende dalla dinamica (ossia dall'evoluzione temporale di tensione e corrente)

bipolo dinamico o di ordine superiore (1, 2 ...): l'equazione è del tipo:

$$F[v(t),i(t)]=0 \quad (2)$$

- comprende derivate o integrali
- Significa che dipende dalla dinamica (da come e quanto velocemente stanno variando tensione e corrente)

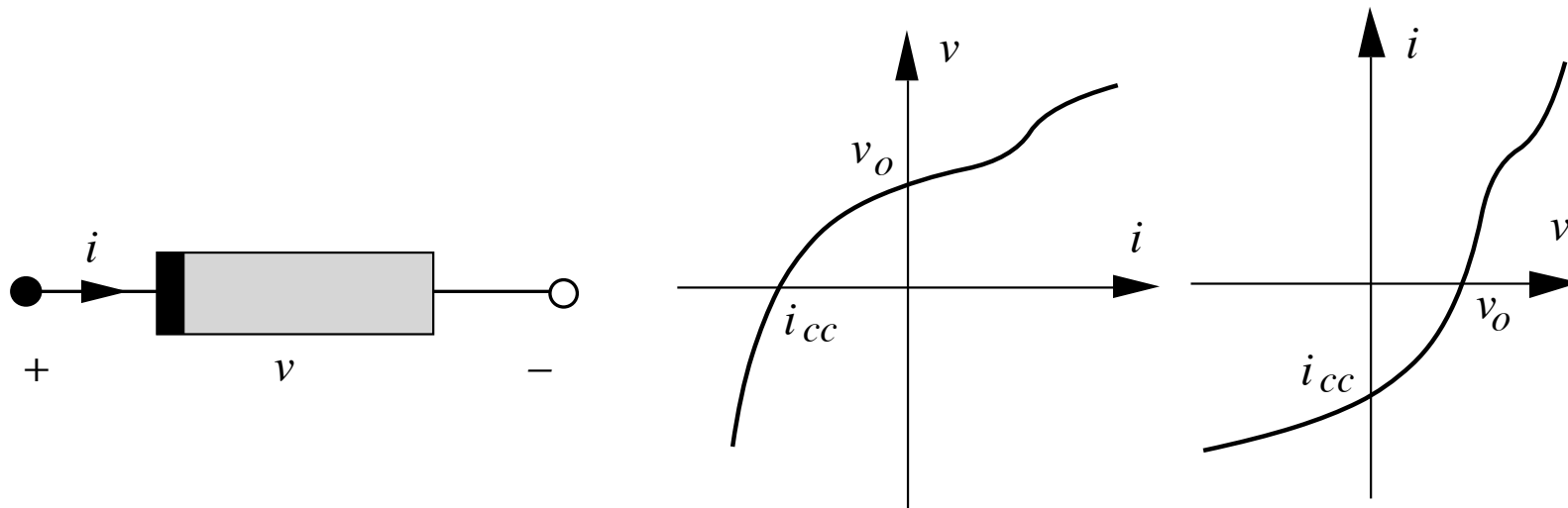
Punto di lavoro

- È costituito da una coppia di valori (v^*, i^*) di tensione (v) e corrente (i) compatibili con la relazione tipologica (1) o la (2).
- Costituisce uno stato di funzionamento possibile per quel particolare bipolo.

Caratteristica esterna

- È la curva del piano cartesiano (v,i) o (i,v) espressa dal legame matematico $f(v,i)=0$ (oppure $F[v(t),i(t)]=0$)

→ È il luogo dei punti di lavoro.



Caratteristica esterna

- **Un bipolo adinamico** ha una sola caratteristica esterna, per qualsiasi regime di funzionamento (perché il legame tipologico non vede la velocità di variazione di tensione e corrente)
- **Un bipolo dinamico** ha infinite caratteristiche esterne, che dipendono dalla dinamica, ossia dal regime di funzionamento (perché il legame tipologico vede la velocità di variazione di tensione e corrente);
- in particolare ha una caratteristica statica (V e I costanti) e tante caratteristiche dinamiche.

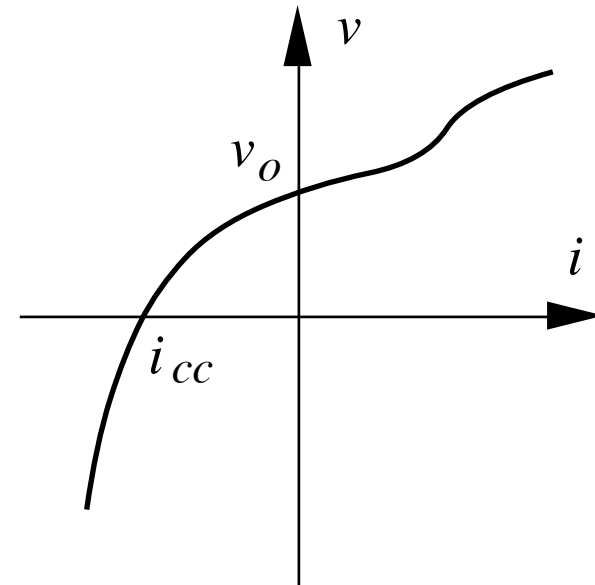
Punti lavoro notevoli

- Punto di lavoro a vuoto:

$$i=0 \quad \text{e} \quad v=v_0$$

- Punto di lavoro in cortocircuito:

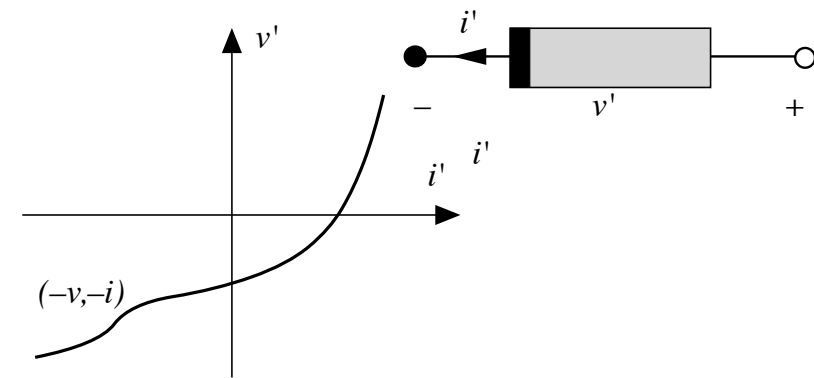
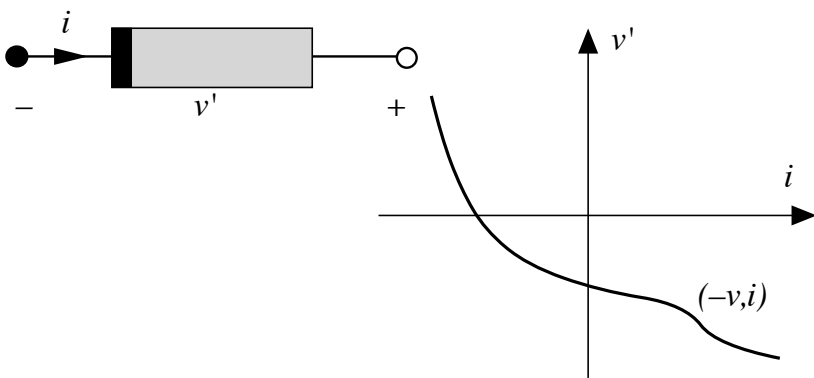
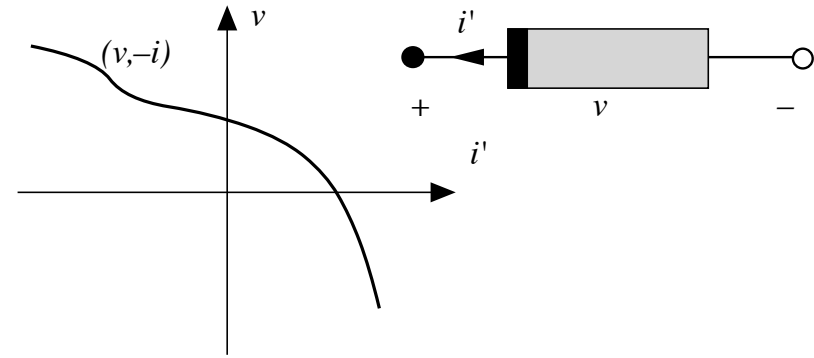
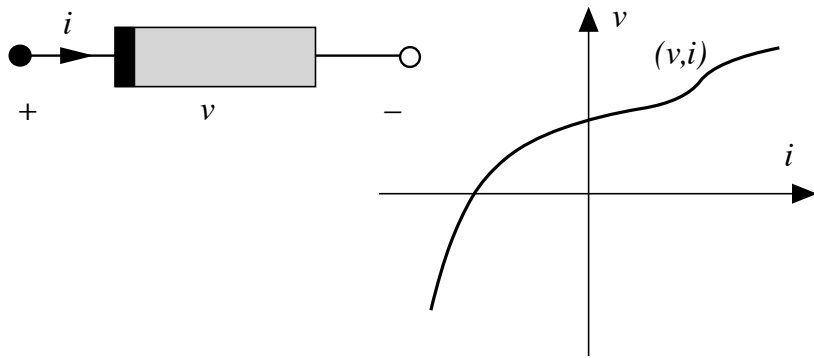
$$i= i_{cc} \quad \text{e} \quad v=0$$



n.b.: in alcuni casi i punti di lavoro a vuoto e/o in cortocircuito possono non esistere

Caratteristica esterna

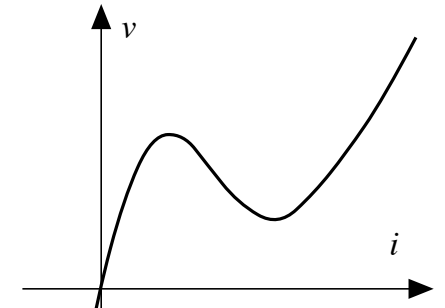
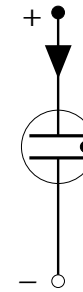
Dipendenza dai riferimenti



Caratteristiche specifiche di bipoli

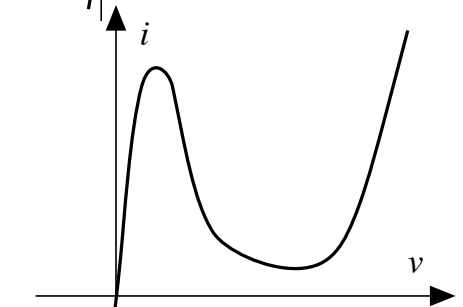
controllato in corrente: esiste $v=f(i)$

es.: tubo a gas



controllato in tensione: esiste $i=f(v)$

es.: diodo a effetto tunnel

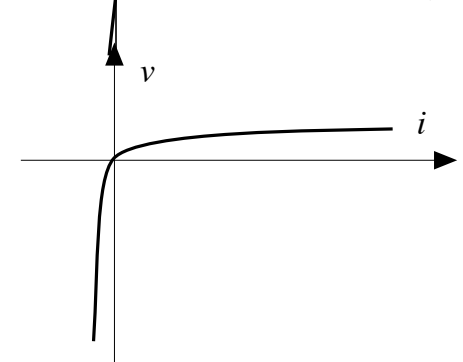


controllato in tensione e corrente:

esistono $v=f(i)$ e $i=f(v)$

e sono reciprocamente inverse

es. diodo a giunzione



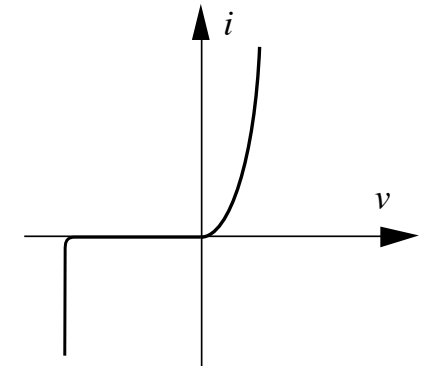
inerte: $i=0$ se e solo se $v=0$

es. tutti i precedenti

Caratteristiche specifiche di bipoli

controllato né in corrente né in tensione: non esistono $v=f(i)$ e $i=f(v)$

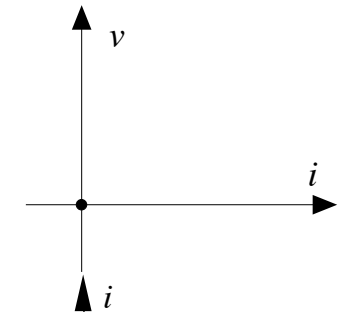
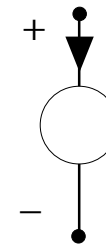
es.: diodo zener



a zero gradi di libertà

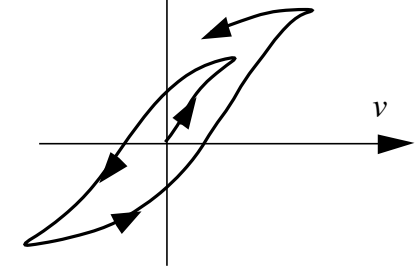
(due vincoli, un punto di lavoro)

es.: nullatore



isteretico: invade un area del piano $i-v$

es.: resistore con isteresi



Caratteristiche specifiche di bipoli

bilaterale: caratteristica simmetrica rispetto all'origine

→ non è necessario distinguere i morsetti

es. vari resistori

comandato (pilotato):

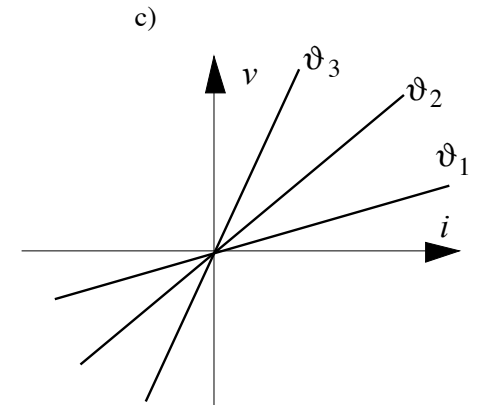
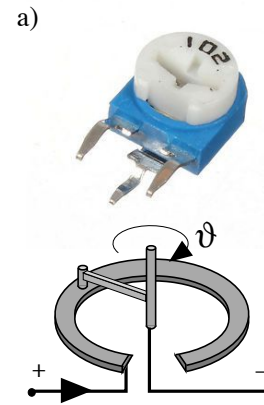
ha famiglia di curve $v=f(v,i)$

controllate da una terza grandezza

«di comando»

es.: trimmer, reostato,

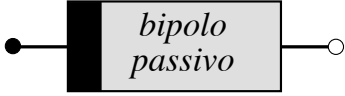
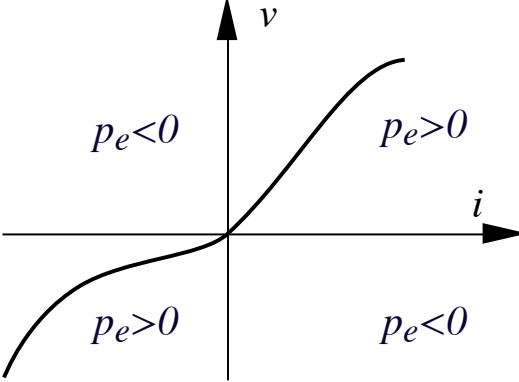
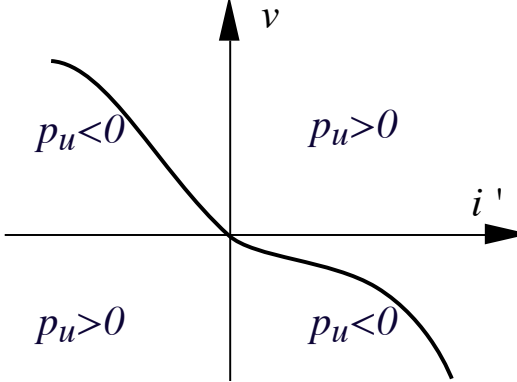

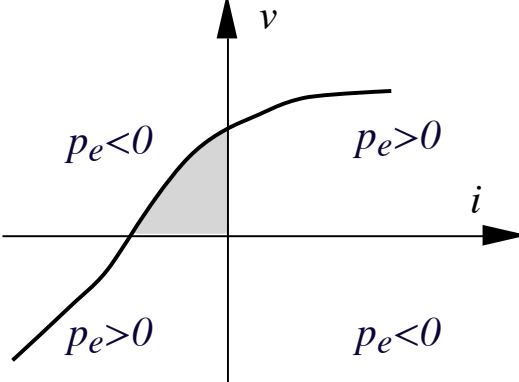
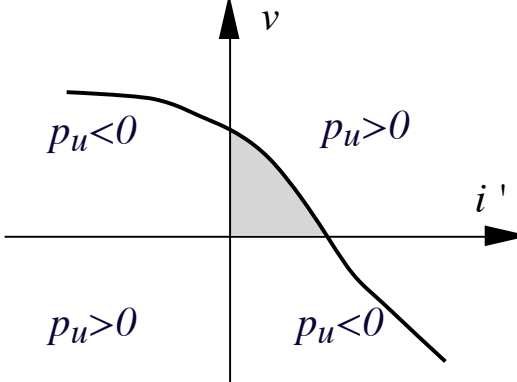
termoresistore, fotoresistore, ...



tempo-variante: la grandezza di comando è il tempo = la caratteristica esterna cambia istante dopo istante

Caratteristiche specifiche di bipoli

passivo: caratteristica esterna = caratteristica statica deve dare sempre $P_e \geq 0$ o $P_u \leq 0$, a seconda della convenzione delle potenze

	<i>convenzione degli utilizzatori</i>	<i>convenzione dei generatori</i>
<p>A</p> 		
<p>B</p> 		

M-bipoli e bipoli ideali

- sono astrazioni «spinte» ma molto comode dei componenti reali
- le relazione tipologiche sono espresse da equazioni estremamente semplici, quindi facili da trattare, anche quando son in gran numero.

Bipoli ideali adinamici

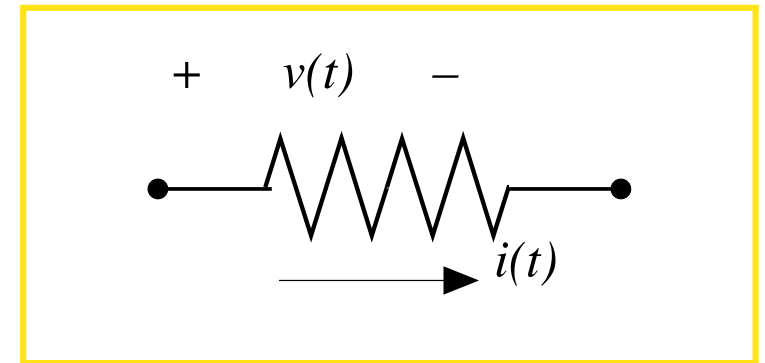
- Il legame $f(v,i)=0$ è costituito da un'equazione algebrica molto semplice
- Che esprime l'unica caratteristica esterna (= **caratteristica statica**)

Resistore ideale

È il bipolo di equazione (convenzionato da utilizzatore):

$$v = R i \quad , \quad i = G v$$

(equivalgono a: $v - R i = 0$, $i - G v = 0$)



R : resistenza [Ω]

G : conduttanza [S]

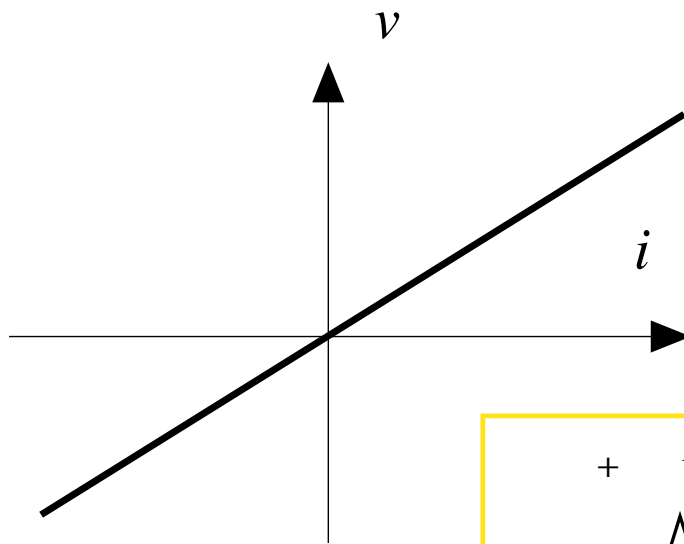
Nel resistore ideale $R = 1/G$ sono costanti

*n.b.: è una definizione assiomatica, non parte da osservazioni fisico-
euristiche*

Caratteristica esterna

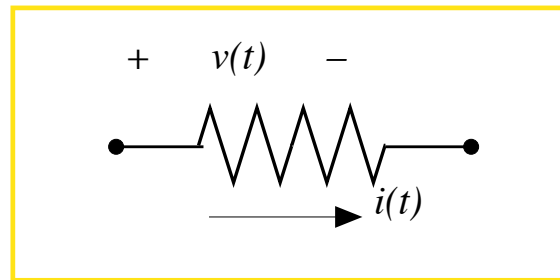
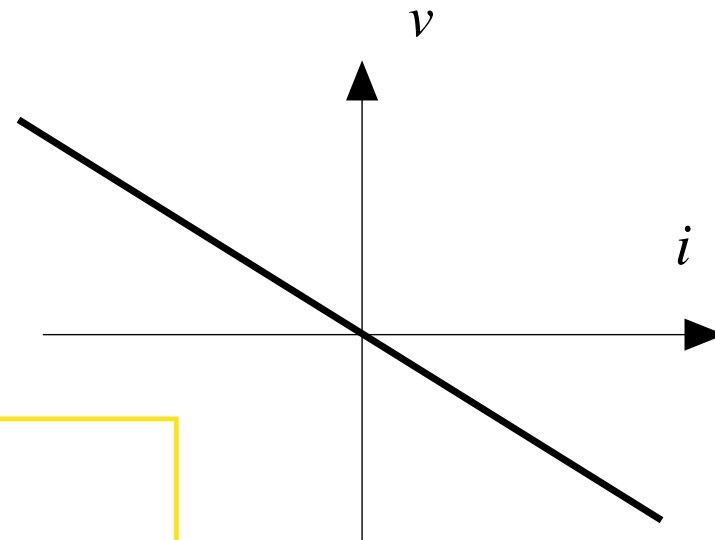
Resistore passivo:

$$R > 0$$



Resistore attivo:

$$R < 0$$



- È lineare
- È bilaterale: invertendo entrambi i riferimenti (rimane la convenzione degli utilizzatori) la caratteristica non cambia

Potenza elettrica del resistore

Potenza entrante (convenzione degli utilizzatori):

$$p_e = v i = R i^2 = G v^2 \quad [\text{W}]$$

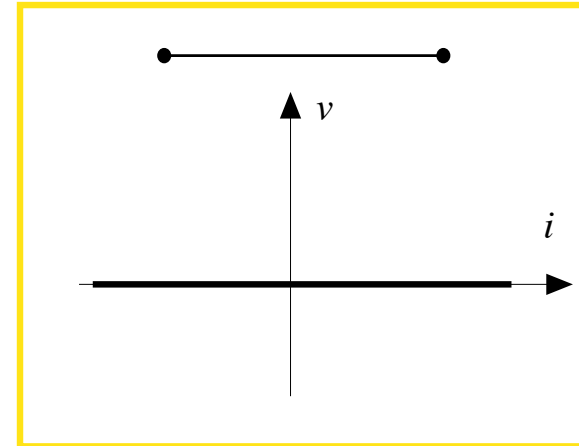
- se $R > 0 \rightarrow p \geq 0 \rightarrow$ il resistore passivo può solo assorbire potenza (in modo irreversibile):
è un **bipolo passivo**
- se $R < 0 \rightarrow p \leq 0 \rightarrow$ il resistore attivo può solo erogare potenza:
è un **bipolo attivo**

Casi limite del resistore

Cortocircuito:

$$R = 0 \quad (G = \infty)$$

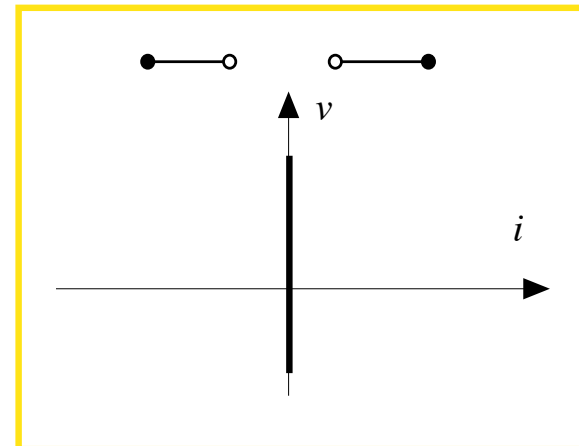
→ per ogni i : $v = 0$, $p = 0$



Circuito aperto:

$$G = 0 \quad (R = \infty)$$

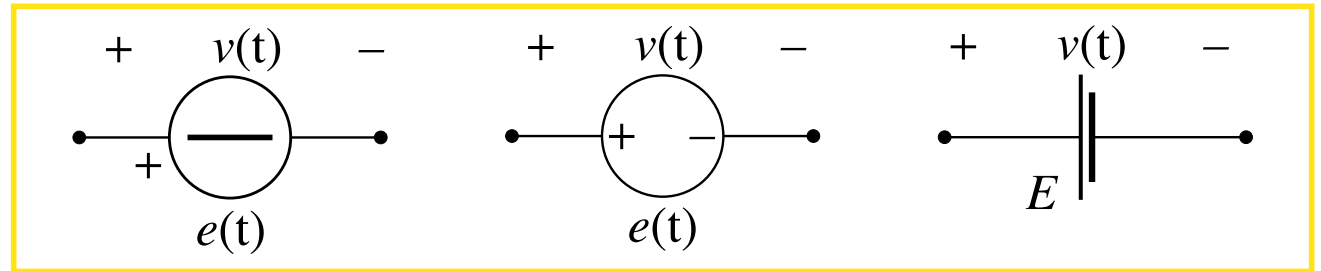
→ per ogni v : $i = 0$, $p = 0$



Generatore ideale di tensione - GIT

È il bipolo di equazione:

$$v = e(t) \quad \text{per ogni } i$$



e : **tensione impressa (fem)**, nota

Può essere:

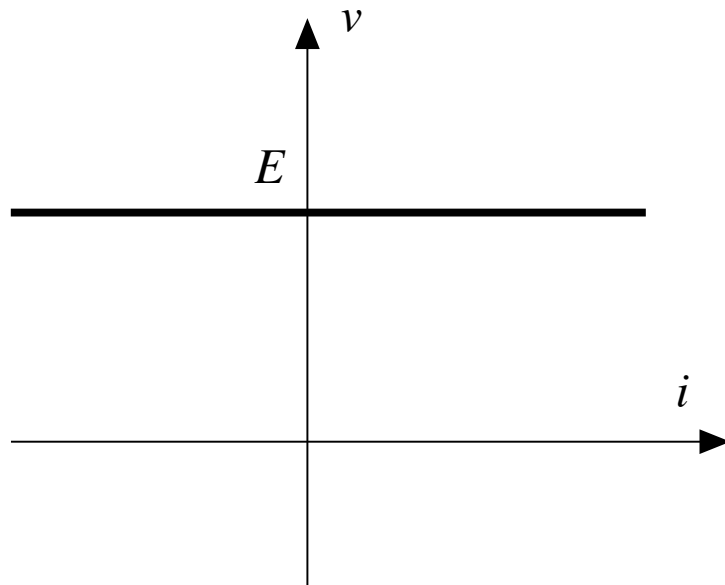
costante $\rightarrow V = E$

variabile con legge qualsiasi (sinusoidale, ...)

Caratteristica esterna

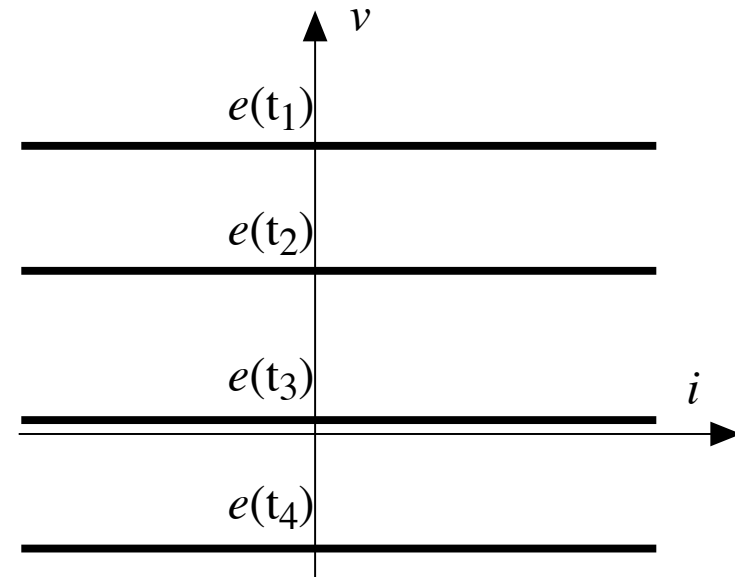
Generatore
tempo-invariante

$$V = E$$



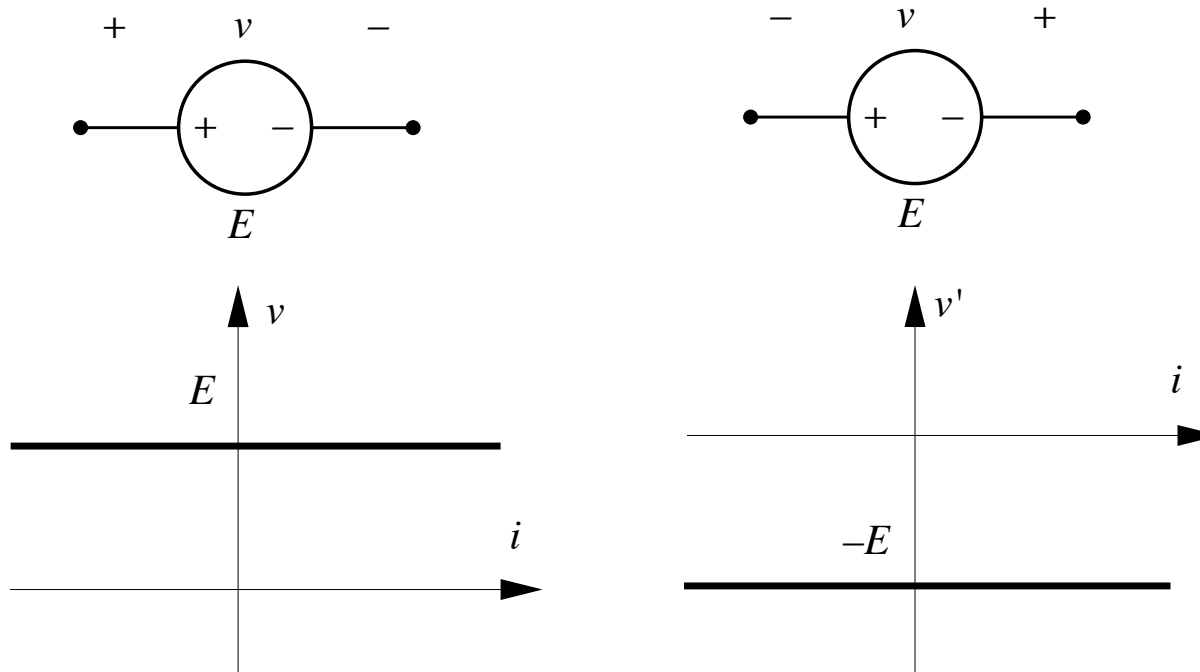
Generatore
tempo-variante

$$v = e$$



Proprietà del generatore di tensione

- È affine (non è lineare)
- Invertendo il riferimento di v la caratteristica si ribalta
- Invertendo il riferimento di i non cambia



- Non è bilaterale \rightarrow simbolo asimmetrico

Potenza del generatore di tensione

$$p = v i = e i \quad [\text{W}]$$

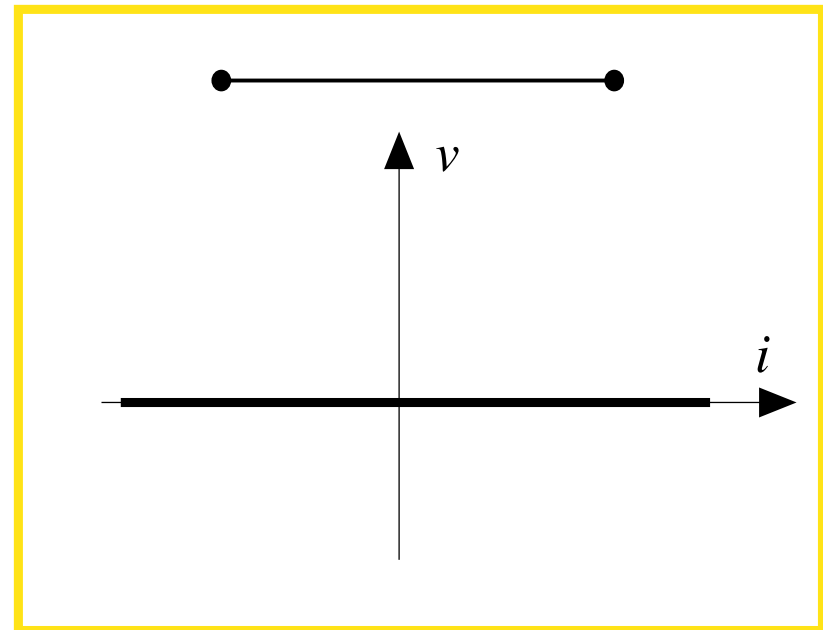
- è uscente (convenzione dei generatori).
 - può essere >0 , $=0$, <0 .
- il generatore di tensione può erogare o assorbire potenza (in modo reversibile): è un **bipolo attivo**.

Caso limite del generatore di tensione

Cortocircuito:

$e = 0$ per ogni i

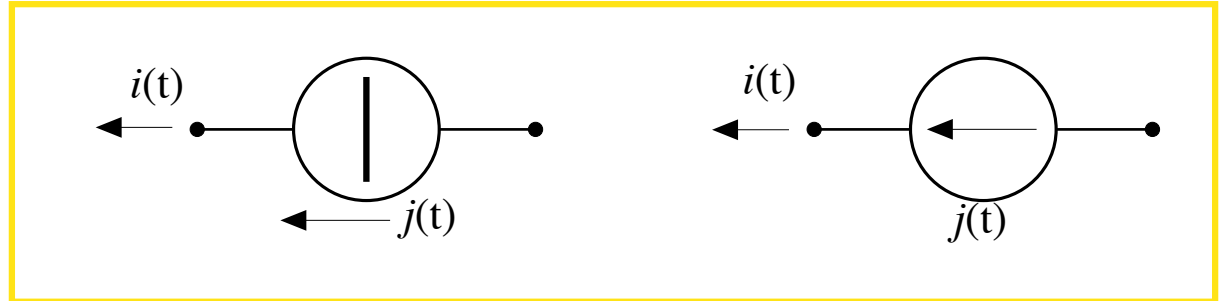
$\rightarrow v = 0$, $p = 0$



Generatore ideale di corrente - GIC

È il bipolo di equazione:

$$i = j(t) \quad \text{per ogni } v$$



j : **corrente impressa**, nota

Può essere:

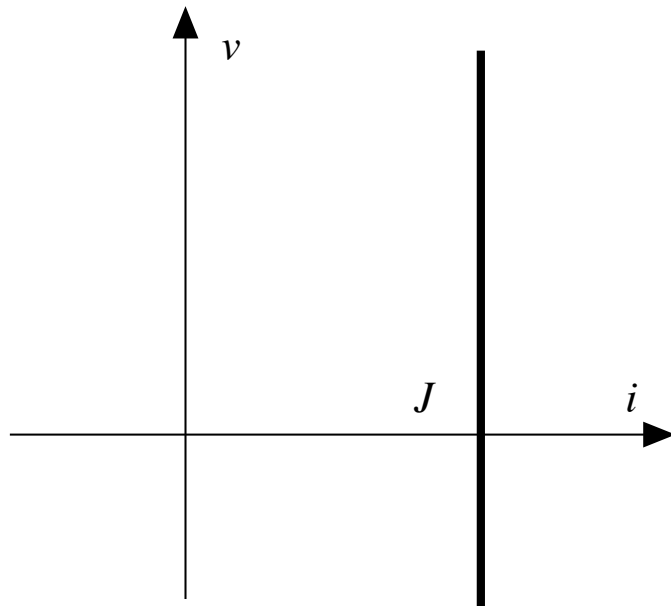
costante $\rightarrow I = J$

variabile con legge qualsiasi (sinusoidale, ...)

Caratteristica esterna

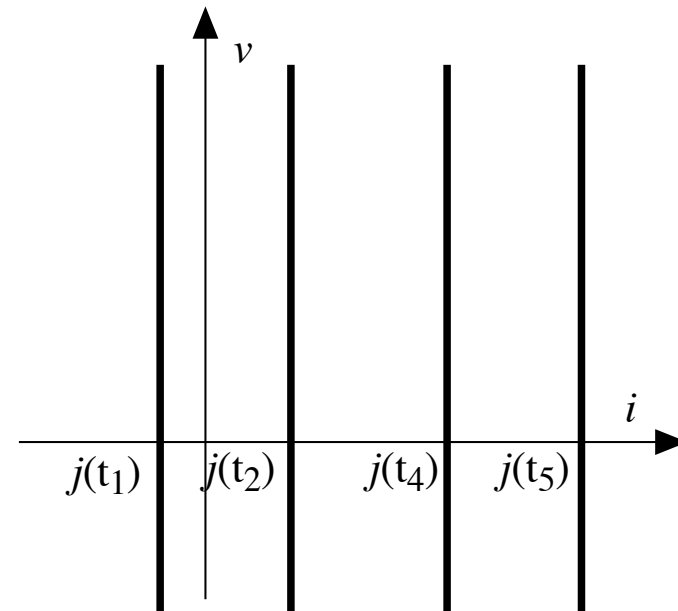
Generatore
tempo-invariante

$$I = J$$



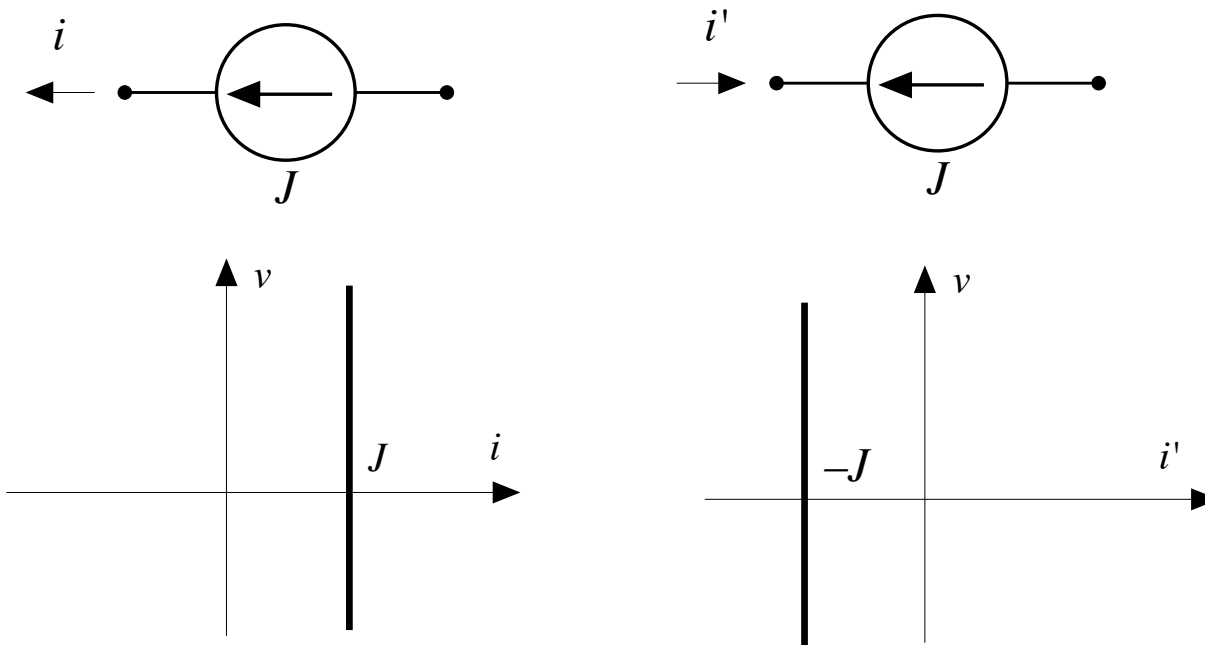
Generatore
tempo-variante

$$i = j$$



Proprietà del generatore di corrente

- È affine (non è lineare)
- Invertendo il riferimento di i la caratteristica si ribalta
- Invertendo il riferimento di v non cambia



- Non è bilaterale \rightarrow simbolo asimmetrico

Potenza del generatore di corrente

$$p = v i = v j \quad [\text{W}]$$

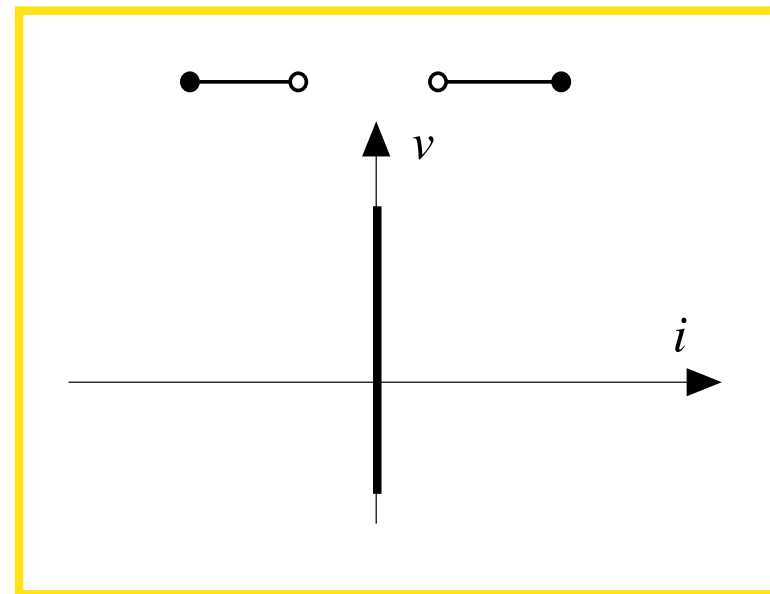
- è uscente (convenzione dei generatori).
 - può essere >0 , $=0$, <0 .
- il generatore di corrente può erogare o assorbire potenza (in modo reversibile): è un **bipolo attivo**

Caso limite del generatore di corrente

Circuito aperto:

$$j = 0 \quad \text{per ogni } v$$

$$\rightarrow i = 0, \quad p = 0$$



Diodo ideale

È il bipolo di equazione (convenzionato da utilizzatore):

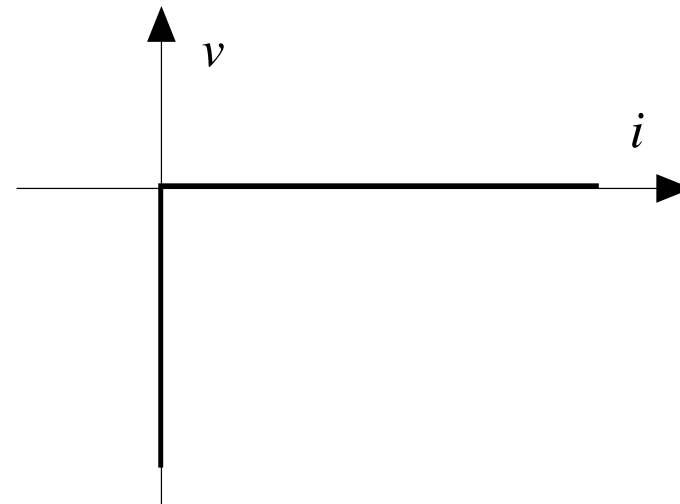
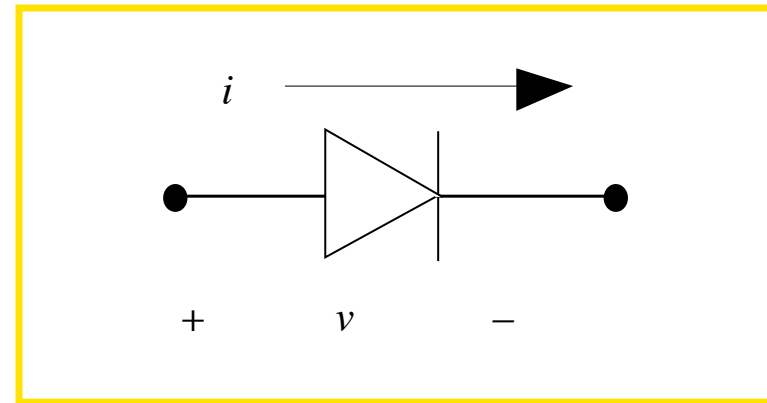
$$i = 0 \quad v \leq 0$$

$$v = 0 \quad i \geq 0$$

resistore non lineare con

$$G = 0 \quad (R = \infty) \quad v \leq 0$$

$$R = 0 \quad (G = \infty) \quad i \geq 0$$



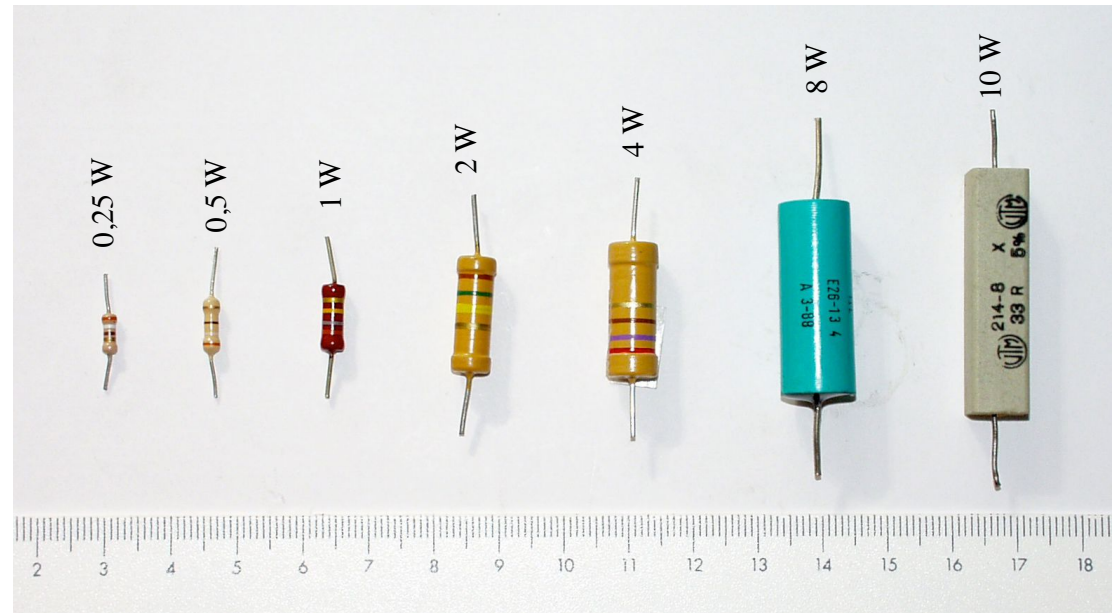
Bipoli reali di ordine zero

**Resistori per circuiti di segnale
o piccola potenza**

ragionevolmente lineari

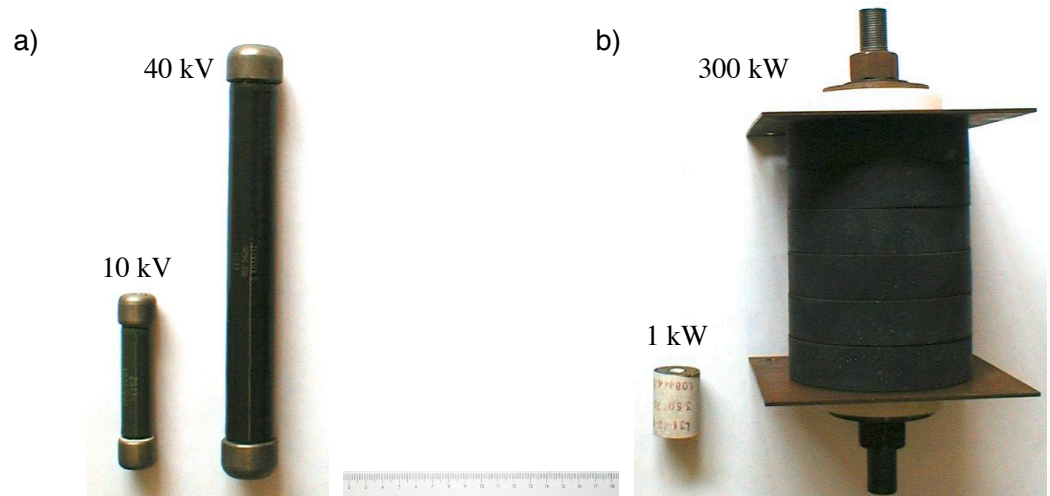
Potenze dissipabili:

da 0,25 W a 10 W



**a) Resistori per elevate tensioni
da 10 kV e 40 kV**

**b) Resistori per elevate potenze
da 1 kW e 300 kW**

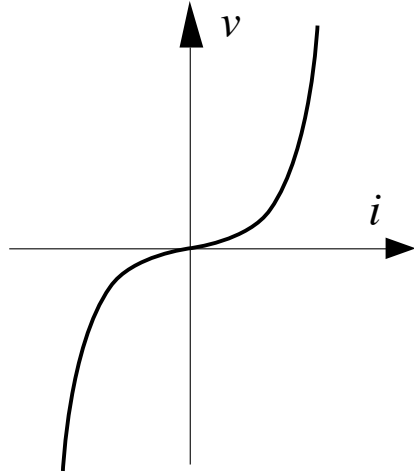


Bipoli di ordine zero non ideali

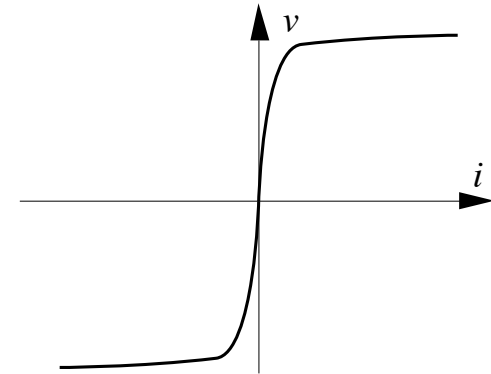
Resistori

non lineari

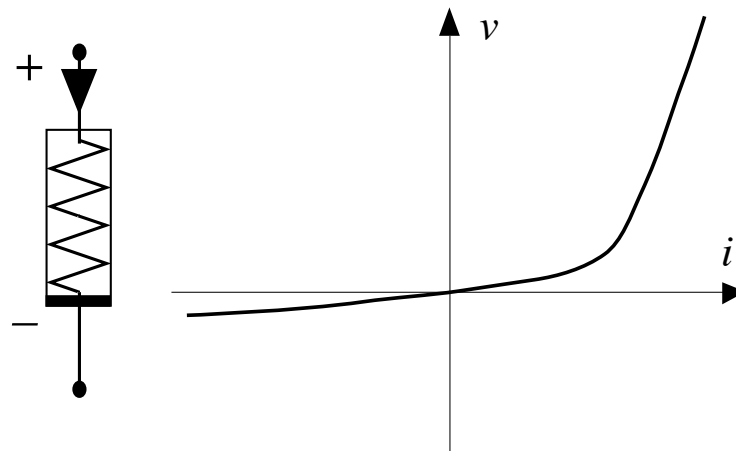
stufa elettrica



varistore

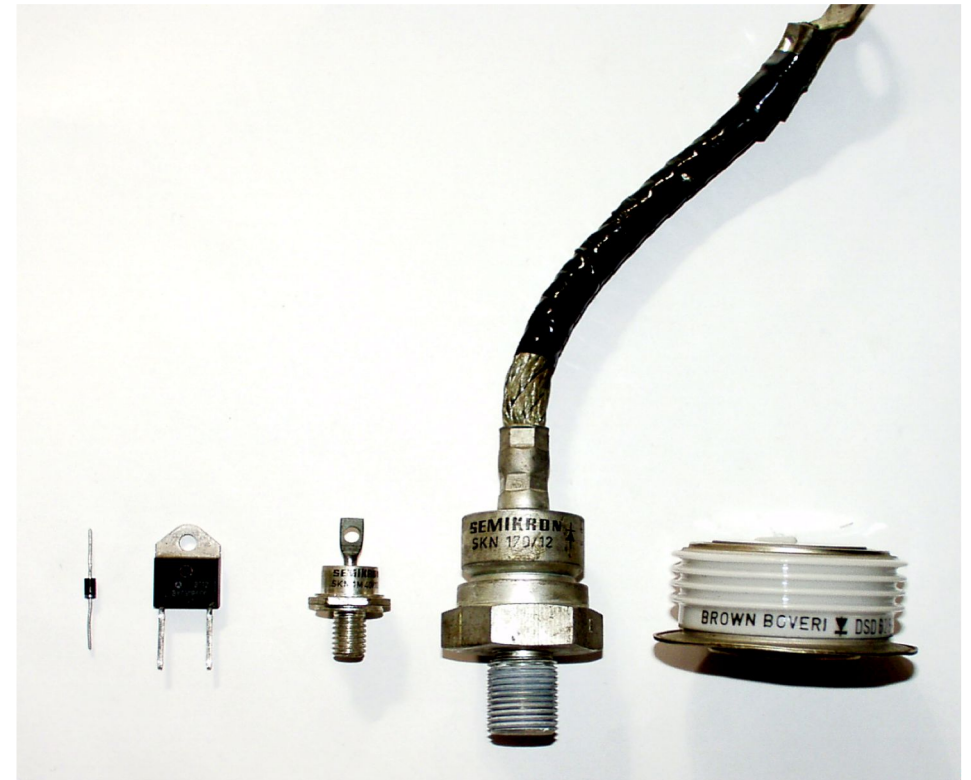
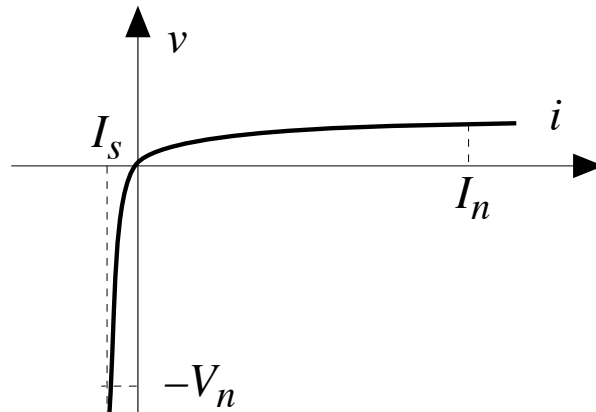
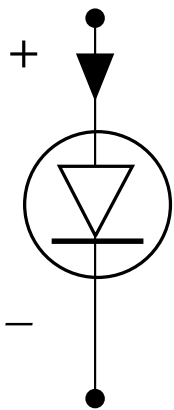


non bilaterali



Bipoli reali di ordine zero

Diodi

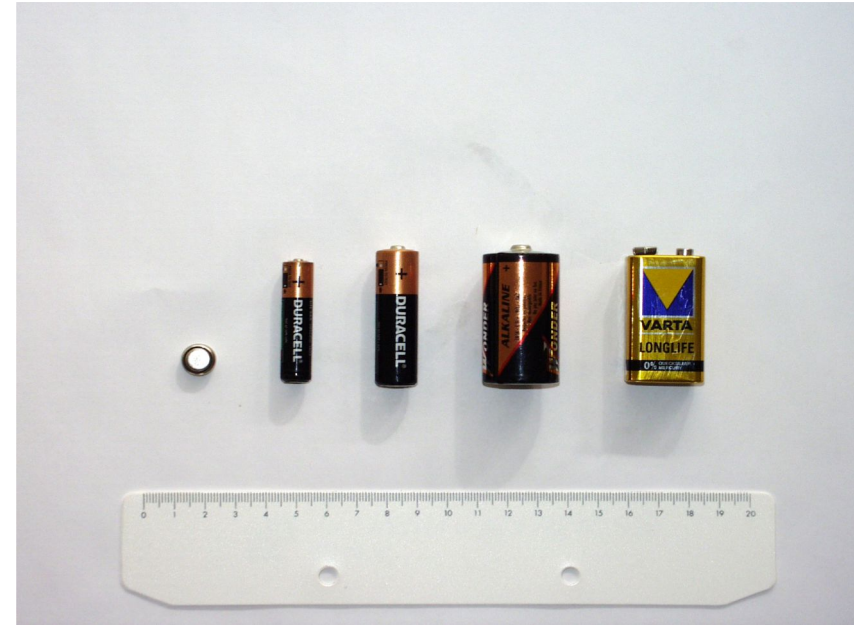


da circa 10 V e 1 A
a circa 1 kV e 1 kA

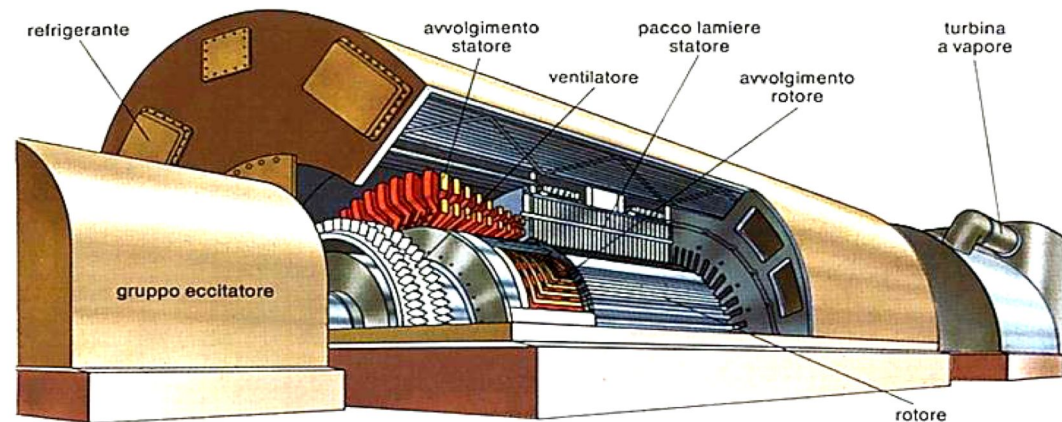
Bipoli reali di ordine zero

Generatori

per pochi volt e
piccole o piccolissime
potenze

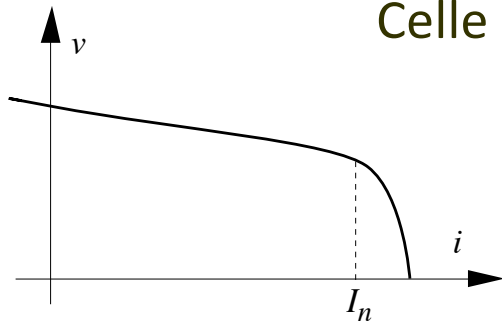
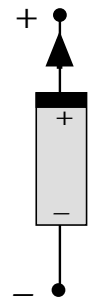
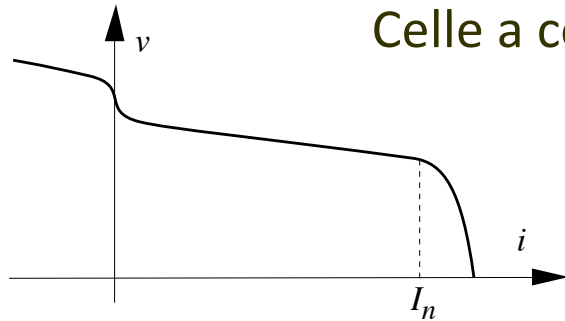
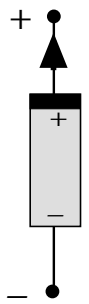


per tensioni di decine
di kV e potenze di
centinaia di MW



Bipoli di ordine zero non ideali

Generatori elettrochimici



Bipoli di ordine zero non ideali

Pannelli fotovoltaici

