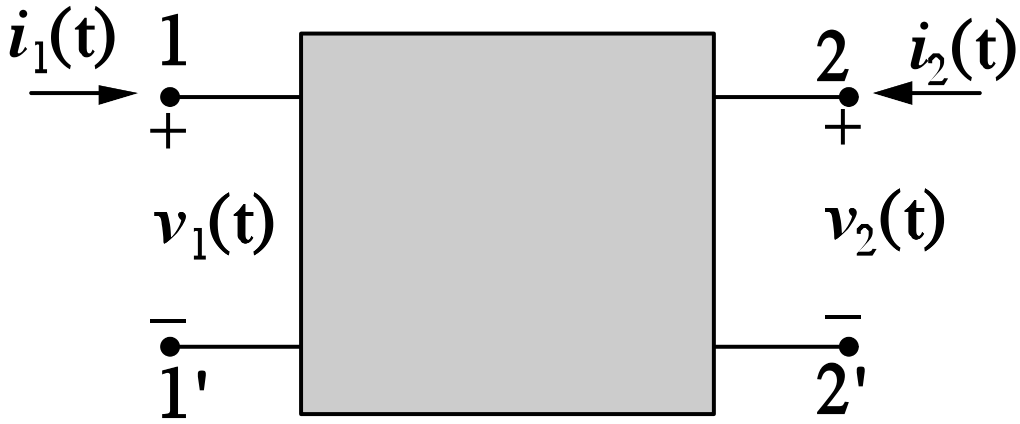
Elettrotecnica
Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia
Prof. Fabrizio Dughiero

Doppi-bipoli di ordine zero

Doppi-bipoli di ordine zero

- Governati da due equazioni

$$\begin{cases} f_1(v_1, v_2, i_1, i_2) = 0 \\ f_2(v_1, v_2, i_1, i_2) = 0 \end{cases}$$



§

§ prive di derivate ed integrali

Equazioni esplicite

- Trasformazione in altre due equazioni equivalenti,
- esplicitate in 2 delle 4 i e v (grandezze dipendenti).

Equazioni esplicite

Esempio

per le due tensioni:

$$\begin{cases} v_1 = f_{1c}(i_1, i_2) \\ v_2 = f_{2c}(i_1, i_2) \end{cases}$$

e per le due correnti:

$$\begin{cases} i_1 = f_{1t}(v_1, v_2) \\ i_2 = f_{2t}(v_1, v_2) \end{cases}$$

e così via per ogni altra coppia di variabili

Doppi-bipoli ideali di ordine zero

- Equazioni algebriche a coefficienti costanti.
- Consideriamo doppi bipoli **ideali inerti**: presentano due equazioni lineari

Rappresentazione controllata in corrente

$$\begin{cases} v_1 = R_{11}\, i_1 + R_{12}\, i_2 \\ v_2 = R_{21}\, i_1 + R_{22}\, i_2 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\boldsymbol{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{v} = \mathbf{R}\, \boldsymbol{i}$$

§ **R** : **matrice di resistenza** o **matrice a vuoto**

Parametri della matrice a vuoto

- Parametri di resistenza [Ω]:

$$
\begin{cases}
R_{11} = \left.\dfrac{v_1}{i_1}\right|_{i_2=0} & R_{12} = \left.\dfrac{v_1}{i_2}\right|_{i_1=0} \\
R_{21} = \left.\dfrac{v_2}{i_1}\right|_{i_2=0} & R_{22} = \left.\dfrac{v_2}{i_2}\right|_{i_1=0}
\end{cases}
$$

- $R_{11}=R_{1v}$ resistenza a vuoto alla porta 1, autoresistenza
- $R_{22}=R_{2v}$ resistenza a vuoto alla porta 2, autoresistenza
- $R_{12}=$ resistenza di trasferimento tra porta 1 e 2, mutua resistenza
- $R_{21}=$ resistenza di trasferimento tra porta 2 e 1, mutua resistenza

Rappresentazione controllata in tensione

$$\begin{cases} i_1 = G_{11}\, v_1 + G_{12}\, v_2 \\ i_2 = G_{21}\, v_1 + G_{22}\, v_2 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\boldsymbol{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad \mathrm{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \quad \boldsymbol{i} = \mathrm{G}\,\boldsymbol{v}$$

§**G : matrice di conduttanza** o **matrice in cortocircuito**

Parametri della matrice a vuoto

- Parametri di conduttanza [S]:

$$\begin{cases} G_{11} = \left.\dfrac{i_1}{v_1}\right|_{v_2=0} & G_{12} = \left.\dfrac{i_1}{v_2}\right|_{v_1=0} \\ G_{21} = \left.\dfrac{i_2}{v_1}\right|_{v_2=0} & G_{22} = \left.\dfrac{i_2}{v_2}\right|_{v_1=0} \end{cases}$$

- $G_{11}=G_{1c}$ conduttanza in c.c. alla porta 1, autoconduttanza
- $G_{22}=G_{2c}$ conduttanza in c.c. alla porta 2, autoconduttanza
- $G_{12}=$ condutt. di trasferimento tra porta 1 e 2, mutua conduttanza
- $G_{21}=$ condutt. di trasferimento tra porta 2 e 1, mutua conduttanza

Rappresentazione ibrida 1

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}\, i_1 + h_{12}\, v_2 \\ i_2 = h_{21}\, i_1 + h_{22}\, v_2 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad \Longrightarrow \quad \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \mathbf{h} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

§ **h : matrice ibrida 1**

Parametri della matrice ibrida 1

- Parametri ibridi h:

$$
\begin{cases}
h_{11} = \left.\dfrac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0} \quad [\Omega] & h_{12} = \left.\dfrac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0} \quad [0] \\[2ex]
h_{21} = \left.\dfrac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0} \quad [0] & h_{22} = \left.\dfrac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0} \quad [S]
\end{cases}
$$

- $h_{11}=R_{1c}$ resistenza in c.c. alla porta 1, autoresistenza
- $h_{22}=G_{2v}$ conduttanza a vuoto alla porta 2, autoconduttanza
- h_{12}= rapporto di trasferimento di tensione
- h_{21}= rapporto di trasferimento di corrente

Rappresentazione ibrida 2

$$\begin{cases} i_1 = g_{11}\, v_1 + g_{12}\, i_2 \\ v_2 = g_{21}\, v_1 + g_{22}\, i_2 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \mathbf{g} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

§**g : matrice ibrida 2**

Parametri della matrice ibrida 2

- Parametri ibridi *g*:

$$\begin{cases} g_{11} = \left.\dfrac{i_1}{v_1}\right|_{i_2=0} \quad [S] & g_{12} = \left.\dfrac{i_1}{i_2}\right|_{v_1=0} \quad [0] \\ g_{21} = \left.\dfrac{v_2}{v_1}\right|_{i_2=0} \quad [0] & g_{22} = \left.\dfrac{v_2}{i_2}\right|_{v_1=0} \quad [\Omega] \end{cases}$$

- $g_{11}=G_{1v}$ conduttanza a vuoto alla porta 1, autoconduttanza
- $g_{22}=R_{2c}$ resistenza in c.c. alla porta 2, autoresistenza
- $g_{12}=$ rapporto di trasferimento di corrente
- $g_{21}=$ rapporto di trasferimento di tensione

Funzioni di trasferimento

I parametri delle precedenti matrici sono rapporti tra un effetto e la sua unica causa

In quanto tali sono

FUNZIONI DI TRASFERIMENTO

Lo sono in particolare i coefficienti mutui

$R_{12}, R_{21} \quad G_{12}, G_{21} \quad h_{12}, h_{21} \quad g_{12}, g_{21}$

Rappresentazione di trasmissione 1

$$\begin{cases} v_1 = \mathrm{A}\ v_2 - \mathrm{B}\ i_2 \\ i_1 = \mathrm{C}\ v_2 - \mathrm{D}\ i_2 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathrm{A} & \mathrm{B} \\ \mathrm{C} & \mathrm{D} \end{bmatrix} \qquad \Rightarrow \qquad \begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

§**T : matrice di trasmissione 1**

Parametri della matrice di trasmissione 1

- Parametri T:

$$
\begin{cases}
A = \left.\dfrac{v_1}{v_2}\right|_{i_2=0} \quad [0] & B = -\left.\dfrac{v_1}{i_2}\right|_{v_2=0} \quad [\Omega] \\
C = \left.\dfrac{i_1}{v_2}\right|_{i_2=0} \quad [S] & D = -\left.\dfrac{i_1}{i_2}\right|_{v_2=0} \quad [0]
\end{cases}
$$

Rappresentazione di trasmissione 2

$$\begin{cases} v_2 = A' v_1 + B' i_1 \\ -i_2 = C' v_1 + D' i_1 \end{cases}$$

- Forma matriciale:

$$\mathbf{T'} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T'} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix}$$

§**T ‘ : matrice di trasmissione 2**

Parametri della matrice di trasmissione 2

- Parametri T':

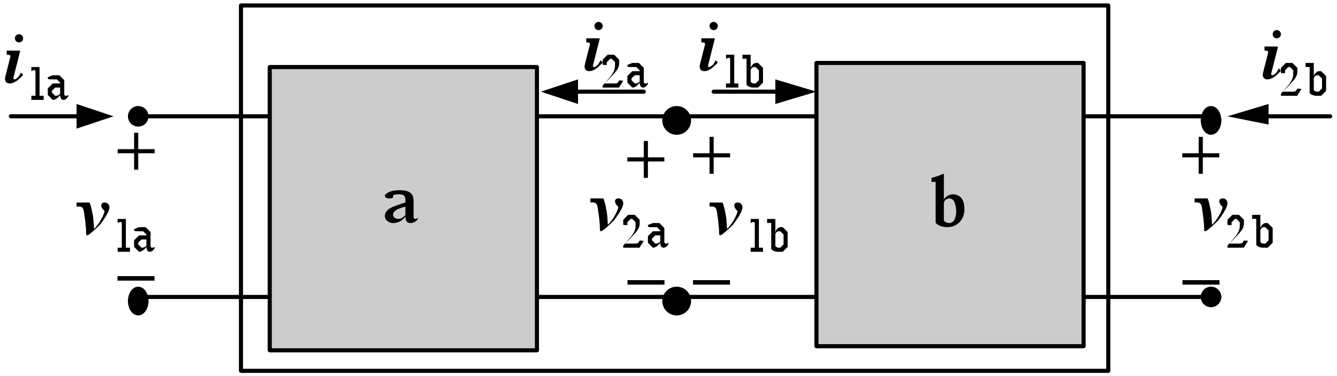
$$
\begin{cases}
A' = \left.\dfrac{v_2}{v_1}\right|_{i_1=0} \quad [0] & B' = \left.\dfrac{v_2}{i_1}\right|_{v_1=0} \quad [\Omega] \\
C' = -\left.\dfrac{i_2}{v_1}\right|_{i_1=0} \quad [S] & D' = -\left.\dfrac{i_2}{i_1}\right|_{v_1=0} \quad [0]
\end{cases}
$$

Parametri di trasmissione

I parametri delle matrici di trasmissione T e T' non sono rapporti tra un effetto e la sua causa =>

non sono funzioni di trasferimento

Applicazione

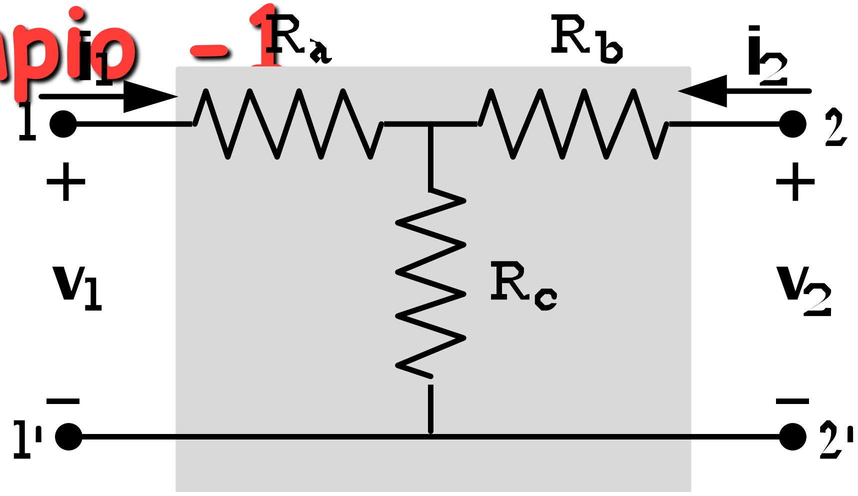


$$\begin{bmatrix} v_{2a} \\ -i_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1b} \\ i_{1b} \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} v_{2a} \\ -i_{2a} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_a} \begin{bmatrix} v_{1a} \\ i_{1a} \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} v_{2b} \\ -i_{2b} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_b} \begin{bmatrix} v_{1b} \\ i_{1b} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{2b} \\ -i_{2b} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_b} \begin{bmatrix} v_{1b} \\ i_{1b} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_b} \begin{bmatrix} v_{2a} \\ -i_{2a} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_b}\,\mathbf{T'_a} \begin{bmatrix} v_{1a} \\ i_{1a} \end{bmatrix} = \mathbf{T'_{eq}} \begin{bmatrix} v_{1a} \\ i_{1a} \end{bmatrix}$$

con $\qquad \mathbf{T'_{eq}} = \mathbf{T'_b}\,\mathbf{T'_a}$

Esempio - 1



$$R_\Delta{}^2 = R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a$$

$$\begin{cases}
i_2 = 0: & v_1 = (R_a + R_c)\, i_1 & v_2 = R_c\, i_1 & v_2 = \dfrac{R_c}{R_a + R_c} v_1 \\[2ex]
i_1 = 0: & v_2 = (R_b + R_c)\, i_2 & v_1 = R_c\, i_2 & v_1 = \dfrac{R_c}{R_b + R_c} v_2 \\[2ex]
v_2 = 0: & v_1 = \dfrac{R_\Delta{}^2}{R_b + R_c} i_1 & i_2 = -\dfrac{R_c}{R_b + R_c} i_1 & i_2 = -\dfrac{R_c}{R_\Delta{}^2} v_1 \\[2ex]
v_1 = 0: & v_2 = \dfrac{R_\Delta{}^2}{R_a + R_c} i_2 & i_1 = -\dfrac{R_c}{R_a + R_c} i_2 & i_1 = -\dfrac{R_c}{R_\Delta{}^2} v_2
\end{cases}$$

Esempio -2

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_a + R_c & R_c \\ R_c & R_b + R_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \dfrac{R_\Delta{}^2}{R_b + R_c} & \dfrac{R_c}{R_b + R_c} \\ \dfrac{-R_c}{R_b + R_c} & \dfrac{1}{R_b + R_c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \dfrac{R_a + R_c}{R_c} & \dfrac{R_\Delta{}^2}{R_c} \\ \dfrac{1}{R_c} & \dfrac{R_b + R_c}{R_c} \end{bmatrix}$$

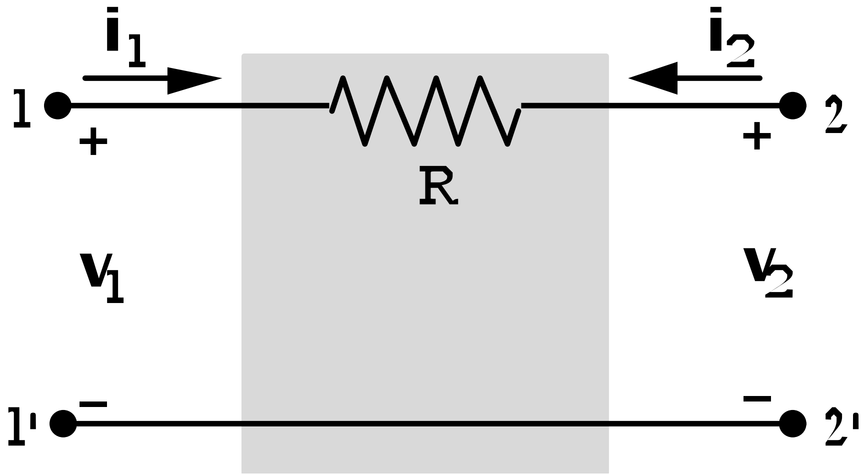
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \dfrac{R_b + R_c}{R_\Delta{}^2} & \dfrac{-R_c}{R_\Delta{}^2} \\ \dfrac{-R_c}{R_\Delta{}^2} & \dfrac{R_a + R_c}{R_\Delta{}^2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{R_a + R_c} & \dfrac{-R_c}{R_a + R_c} \\ \dfrac{R_c}{R_a + R_c} & \dfrac{R_\Delta{}^2}{R_a + R_c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \dfrac{R_b + R_c}{R_c} & -\dfrac{R_\Delta{}^2}{R_c} \\ -\dfrac{1}{R_c} & \dfrac{R_a + R_c}{R_c} \end{bmatrix}$$

Esempio -3

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & -\frac{1}{R} \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & R \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 1 & -R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Relazioni tra parametri

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}^{-1}, \qquad \mathbf{g} = \mathbf{h}^{-1}, \qquad \mathbf{T'} = \mathbf{T}^{-1}$$

$$G_{11} = \frac{R_{22}}{\Delta R} \quad ; \quad G_{22} = \frac{R_{11}}{\Delta R} \quad ; \quad G_{12} = -\frac{R_{12}}{\Delta R} \quad ; \quad G_{21} = -\frac{R_{21}}{\Delta R} \quad ;$$

$$R_{11} = \frac{G_{22}}{\Delta G} \quad ; \quad R_{22} = \frac{G_{11}}{\Delta G} \quad ; \quad R_{12} = -\frac{G_{12}}{\Delta G} \quad ; \quad R_{21} = -\frac{G_{21}}{\Delta G}$$

$$\Delta R = R_{11}R_{22} - R_{12}R_{21} \qquad \Delta G = G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}$$

$$\begin{cases} R_{11} = \dfrac{1}{g_{11}} = \dfrac{A}{C} \\ R_{21} = \dfrac{g_{21}}{g_{11}} = \dfrac{1}{C} \end{cases} \qquad R_{12} = \frac{h_{12}}{h_{22}} = -\frac{1}{C'} \qquad R_{22} = \frac{1}{h_{22}} = -\frac{A'}{C'}$$

Reciprocità

Sussiste se $\left.\dfrac{v_1}{i_2}\right|_{i_1=0} = \left.\dfrac{v_2}{i_1}\right|_{i_2=0}$; $\left.\dfrac{i_1}{v_2}\right|_{v_1=0} = \left.\dfrac{i_2}{v_1}\right|_{v_2=0}$

$$\left.\frac{i_1}{i_2}\right|_{v_1=0} = -\left.\frac{v_2}{v_1}\right|_{i_2=0} \quad ; \quad \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0} = -\left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}$$

Equivalgono a:

$R_{12} = R_{21}$, $G_{12} = G_{21}$,

$h_{12} = -h_{21}$, $g_{12} = -g_{21}$,

$A\,D - B\,C = 1$, $A'\,D' - B'\,C' = 1$

Simmetria

Sussiste se tensioni e correnti non cambiano scambiando tra loro la porta 1 con la porta 2.

Equivalgono alla reciprocità e inoltre:

$$R_{11} = R_{22} \quad , \qquad\qquad G_{11} = G_{22} \quad ,$$

$$h_{11}\, h_{22} + h_{12}^{2} = 1 \quad , \qquad\qquad g_{11}\, g_{22} + g_{12}^{2} = 1 \quad ,$$

$$A = D \quad , \qquad\qquad A' = D' \quad .$$

Passività

$$p(t) = v_1(t)\ i_1(t) + v_2(t)\ i_2(t) \geq 0$$

R => $$p = R_{11}\, i_1^{2} + (R_{12} + R_{21}) i_1\, i_2 + R_{22}\, i_2^{2} \geq 0$$

Pertanto:

$$R_{11} \geq 0 \quad , \qquad\qquad R_{22} \geq 0$$

$$y(x) = R_{11}\, x^2 + (R_{12} + R_{21})\, x + R_{22} \geq 0 \qquad x = i_1/i_2$$

$$R_{11}\, R_{22} \geq \left(\frac{R_{12} + R_{21}}{2} \right)^2$$

G => $$G_{11} \geq 0, \quad G_{22} \geq 0, \quad G_{11}\, G_{22} \geq \left(\frac{G_{12} + G_{21}}{2} \right)^2$$

Doppio bipolo resistivo

Doppio bipolo ideale inerte di ordine zero

Passivo: $R_{11} \geq 0 \quad , \quad R_{22} \geq 0 \quad , \quad R_{11} R_{22} \geq \left(\dfrac{R_{12} + R_{21}}{2} \right)^2$

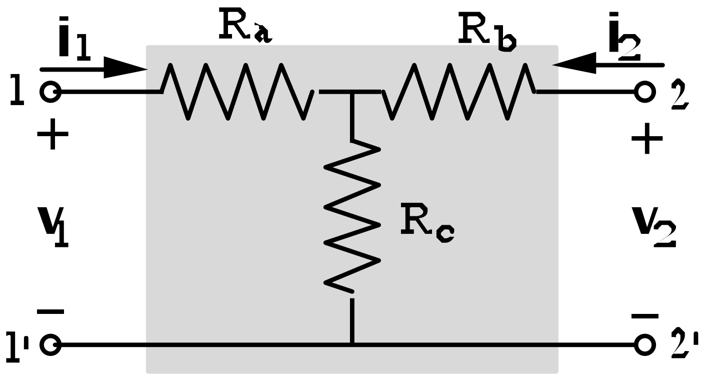
Reciproco: $R_{12} = R_{21}$

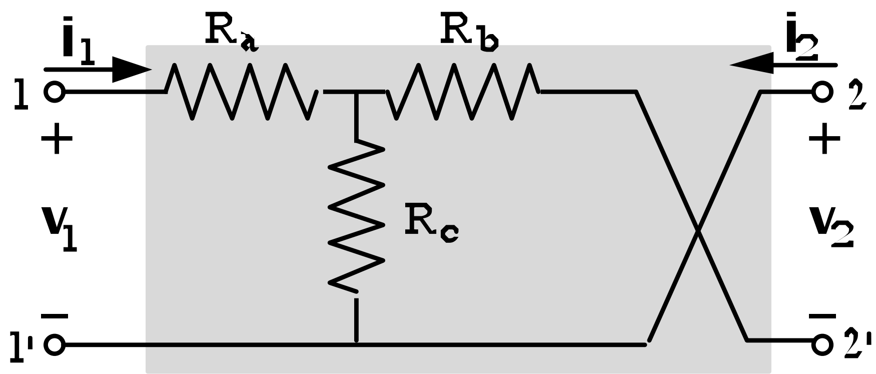
Che non amplifica: $R_{11} \geq |R_{21}| \qquad R_{22} \geq |R_{12}|$

Può essere sintetizzato con una rete di 3 resistori a T o Π

Sitensi a T

a) $R_{12}>0$ b) $R_{12}<0$



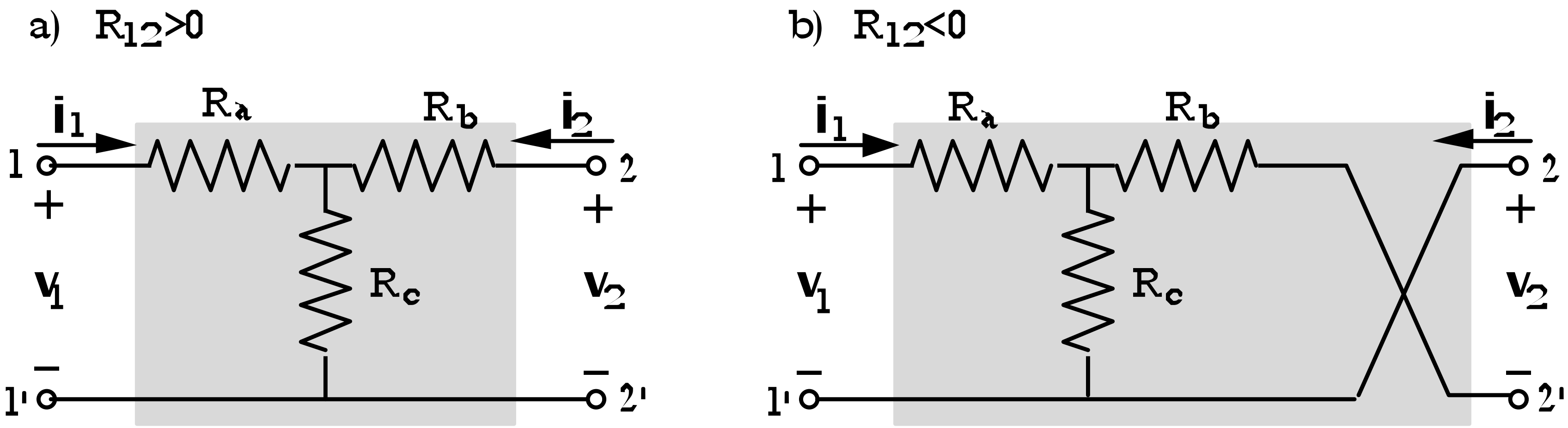


Caso a): $R_{12}>0$

$$\begin{cases} v_1 = R_a i_1 + R_c(i_1 + i_2) = (R_a + R_c)i_1 + R_c i_2 \\ v_2 = R_b i_2 + R_c(i_1 + i_2) = R_c i_1 + (R_b + R_c)i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_a = R_{11} - R_{12} \\ R_b = R_{22} - R_{21} \\ R_c = R_{12} = R_{21} \end{cases}$$

Sitensi a T



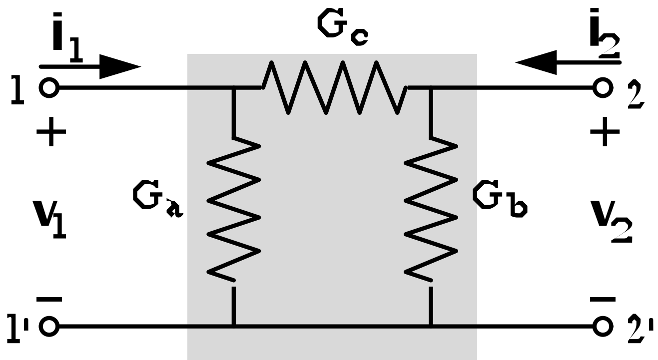
Caso b): $R_{12}<0$

$$\begin{cases} v_1 = R_a i_1 + R_c(i_1 - i_2) = (R_a + R_c)i_1 - R_c i_2 \\ v_2 = R_c(i_2 - i_1) + R_b i_2 = -R_c i_1 + (R_b + R_c)i_2 \end{cases}$$

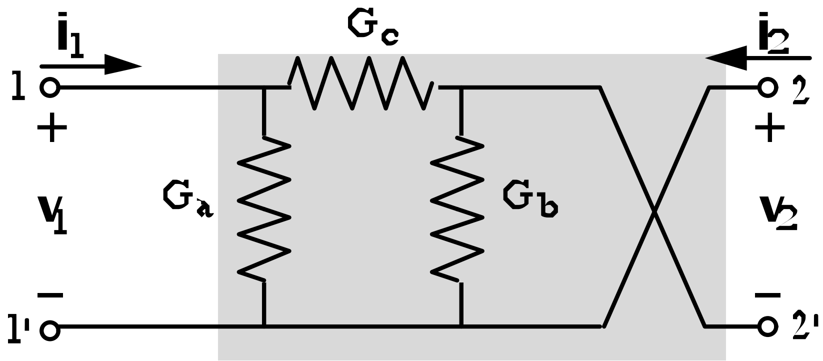
$$\begin{cases} R_a = R_{11} + R_{12} \\ R_b = R_{22} + R_{21} \\ R_c = -R_{12} = -R_{21} \end{cases}$$

Sitensi a Π

a) $G_{12}<0$



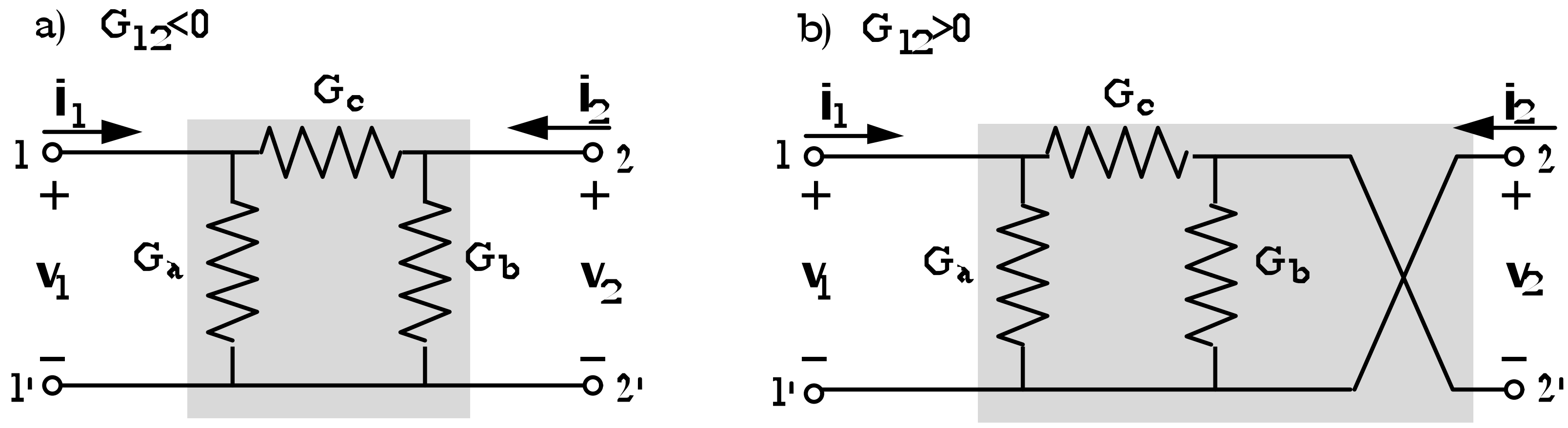
b) $G_{12}>0$



Caso a): $G_{12}<0$

$$\begin{cases} G_a = G_{11} + G_{12} \\ G_b = G_{22} + G_{21} \\ G_c = -G_{12} = -G_{21} \end{cases}$$

Sitensi a Π



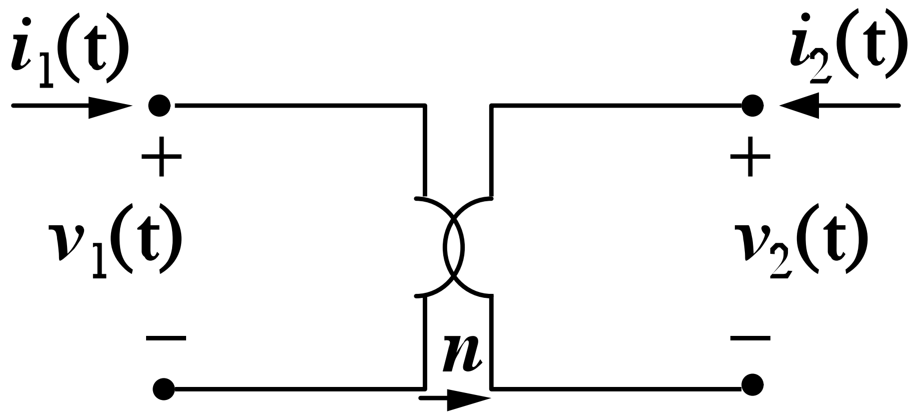
Caso b): $G_{12}>0$

$$\begin{cases} G_a = G_{11} - G_{12} \\ G_b = G_{22} - G_{21} \\ G_c = G_{12} = G_{21} \end{cases}$$

Trasformatore ideale

Equazioni:

$$\begin{cases} v_1(\mathrm{t}) = n\, v_2(\mathrm{t}) \\ i_1(\mathrm{t}) = -\dfrac{1}{n} i_2(\mathrm{t}) \end{cases}$$

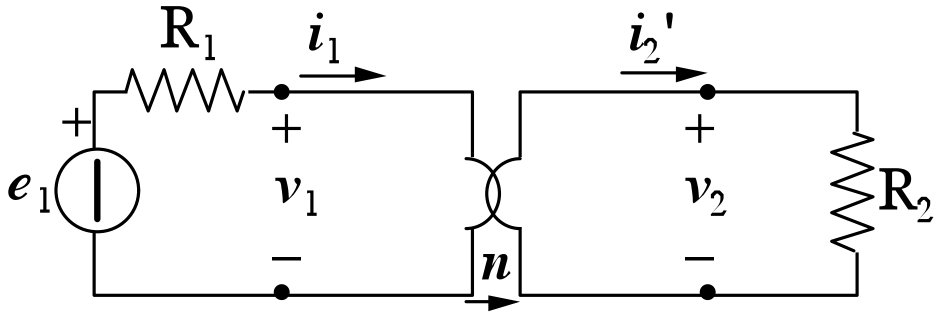


Matrici:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & -\dfrac{1}{n} \\ \dfrac{1}{n} & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{n} \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{n} & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix}$$

Trasformatore ideale

- Amplifica
- Reciproco
- Trasparenza alla potenz
- (passivo):



$$p(t) = v_1(t) i_1(t) + v_2(t) i_2(t) = 0$$

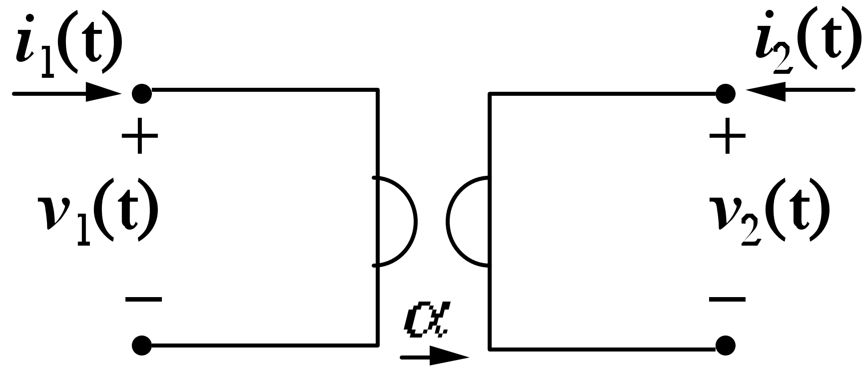
- Trasferimento di resistenza

$$R_{1eq} = \frac{v_1}{i_1} = \frac{n\, v_2}{-\frac{i_2}{n}} = n^2 \frac{v_2}{-i_2} = n^2 \frac{v_2}{i_2'} = n^2 R_2$$

Giratore ideale

Equazioni:

$$\begin{cases} v_1(t) = \alpha\, i_2(t) \\ v_2(t) = -\alpha\, i_1(t) \end{cases}$$

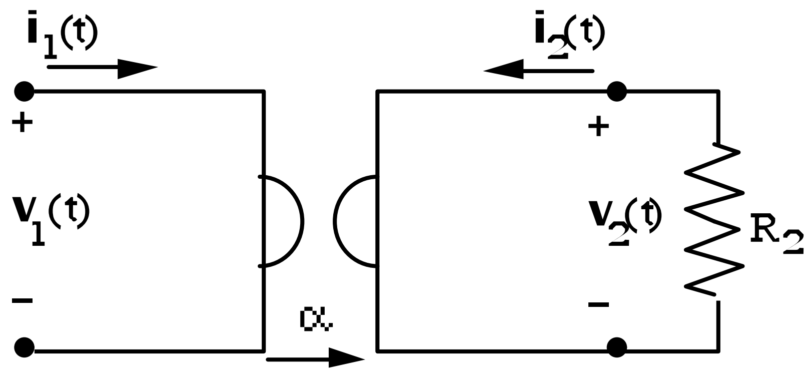


Matrici:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ -\alpha & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\alpha} \\ \frac{1}{\alpha} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha \\ -\frac{1}{\alpha} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha \\ -\frac{1}{\alpha} & 0 \end{bmatrix}$$

Giratore ideale

- Non reciproco



- Trasparenza alla potenza
- (passivo):

$$p(t) = v_1(t)\, i_1(t) + v_2(t)\, i_2(t) = 0$$

- Invertitore di resistenza

$$v_1 = \alpha\, i_2 = \alpha \frac{-v_2}{R_2} = \frac{\alpha^2}{R_2}\, i_1 = R_{1eq}\, i_1$$

Generatori pilotati

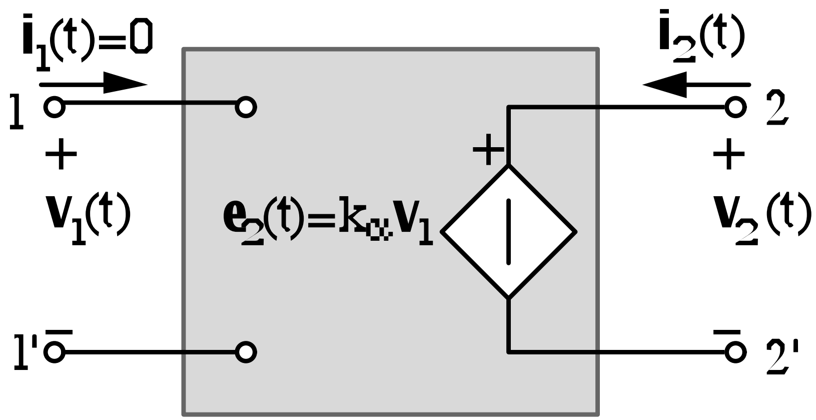
- generatori comandati o generatori dipendenti:
- e o j dipende da v o i di un altro lato.
- sono doppi bipoli ove:

1) alla porta 1 è connesso un circuito aperto oppure un cortocircuito; la grandezza non nulla è detta **grandezza di comando**;
2) alla porta 2 è connesso un generatore ideale con **grandezza impressa** (e o j) funzione (**grandezza comandata**) della grandezza di comando della porta 1.

GTPT ideale

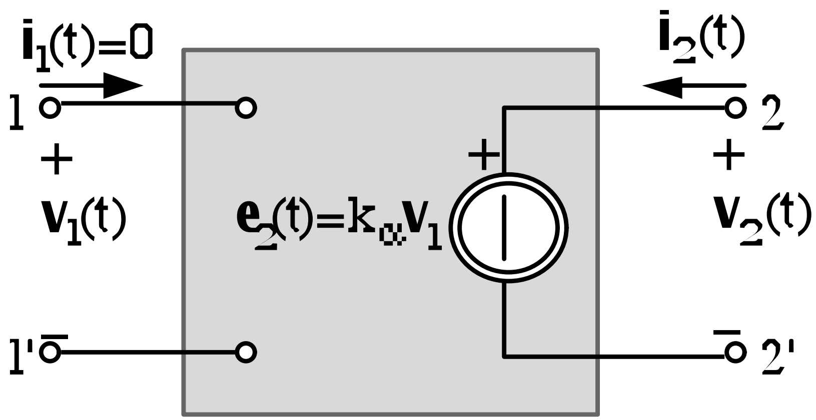
Generatore ideale di tensione pilotato in tensione

$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ v_2 = e_2 = k_\alpha \, v_1 \end{cases}$$



Matrici:

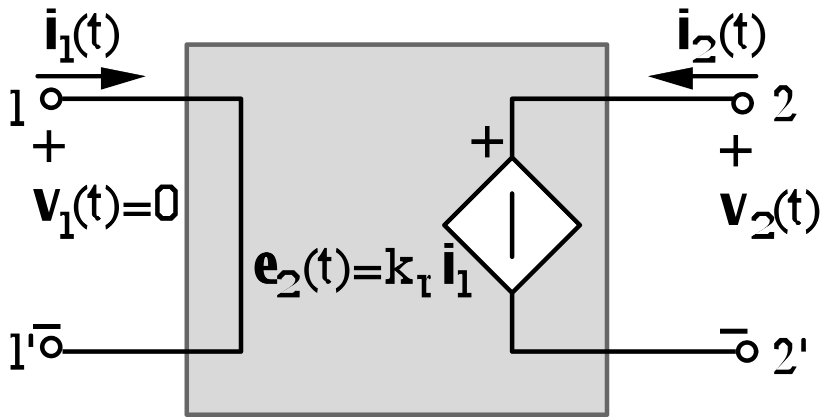
$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{k_\alpha} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$



GTPC ideale

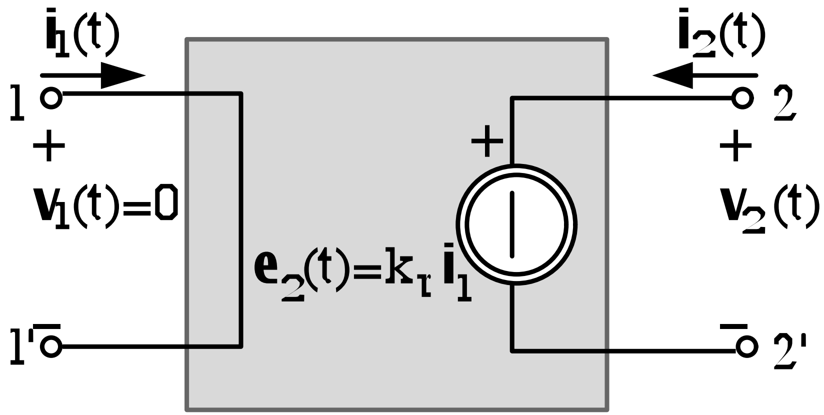
Generatore ideale di tensione pilotato in corrente

$$\begin{cases} v_1 = 0 \\ v_2 = e_2 = \mathrm{k_r}\, i_1 \end{cases}$$



Matrici:

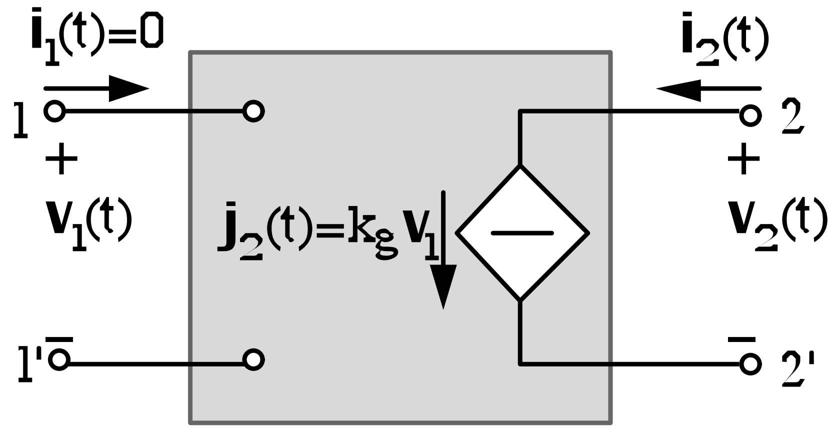
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \mathrm{k_r} & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{\mathrm{k_r}} & 0 \end{bmatrix}$$

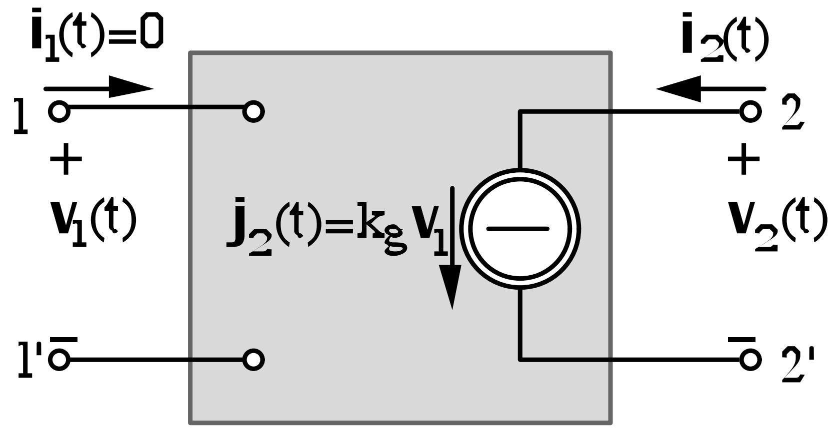


GCPT ideale

Generatore ideale di corrente pilotato in tensione

$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = j_2 = k_g\, v_1 \end{cases}$$





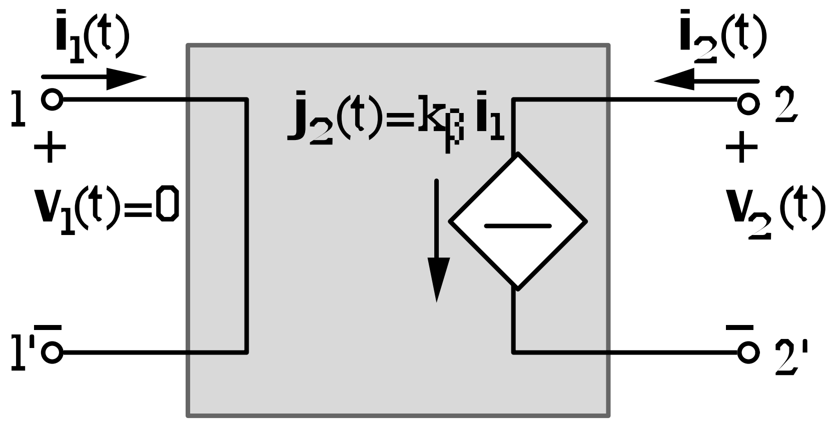
Matrici:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_g & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -\dfrac{1}{k_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

GCPC ideale

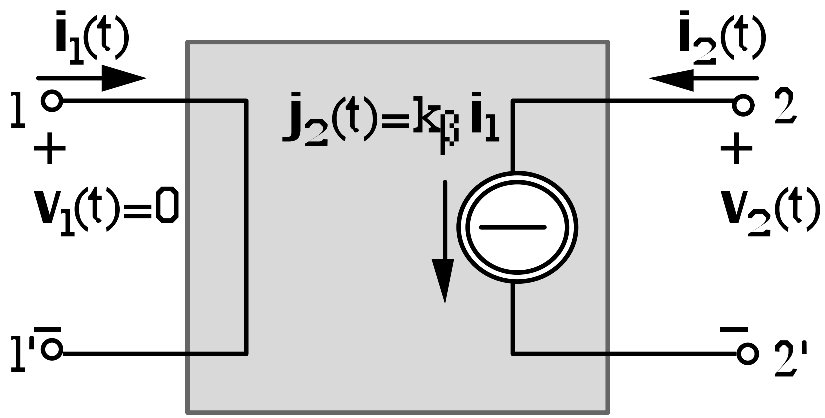
Generatore ideale di corrente pilotato in corrente

$$\begin{cases} v_1 = 0 \\ i_2 = j_2 = k_\beta \, i_1 \end{cases}$$



Matrici:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_\beta & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{k_\beta} \end{bmatrix}$$



Generatori pilotati ideali

- ✓Non reciproci
- ✓Attivi
- ✓Uso in schemi equivalenti

Generatori pilotati ideali

- Esempio per transistor npn