



Università degli Studi di Cassino

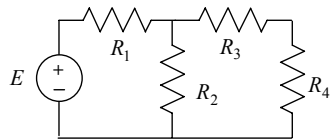
Esercitazioni di Elettrotecnica: circuiti in regime stazionario

Antonio Maffucci

ver.3 – settembre 2005

1. Serie, parallelo e partitori.

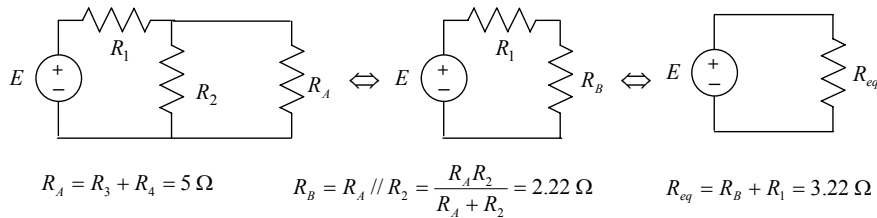
ES. 1.1 Calcolare la resistenza equivalente vista ai capi del generatore E.



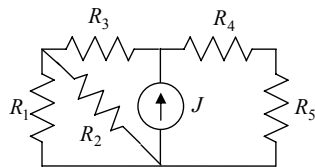
$$R_1 = 1 \Omega \quad R_2 = 4 \Omega$$

$$R_3 = 3 \Omega \quad R_4 = 2 \Omega$$

Utilizzando l'equivalenza serie e parallelo, il circuito di resistenze visto da E si può ridurre ad un unico resistore attraverso i seguenti passi:



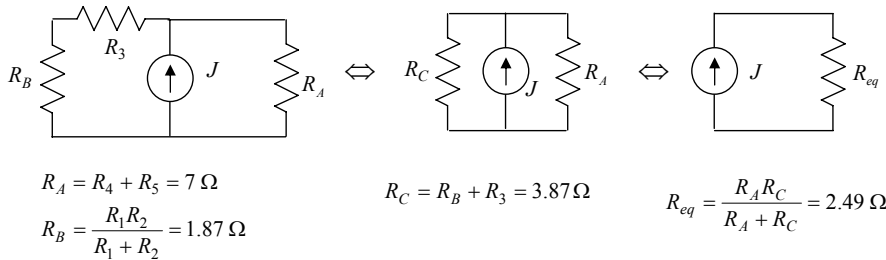
ES. 1.2 Calcolare la resistenza equivalente vista dal generatore J.



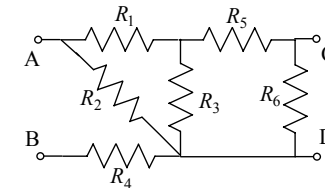
$$R_1 = R_4 = 5 \Omega \quad R_2 = 3 \Omega$$

$$R_3 = R_5 = 2 \Omega$$

Utilizzando l'equivalenza serie e parallelo, il circuito di resistenze visto da E si può ridurre ad un unico resistore attraverso i seguenti passi:



ES. 1.3 - Calcolare la R_{eq} vista ai morsetti A-B e quella vista ai morsetti C-D.



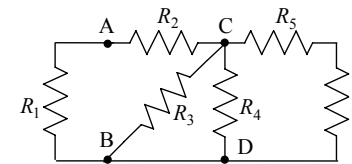
$$R_1 = R_2 = 5 \Omega \quad R_3 = 10 \Omega$$

$$R_4 = 4 \Omega \quad R_5 = 3 \Omega$$

$$R_6 = 2 \Omega$$

Risultato: $R_{eqAB} = 7.125 \Omega$, $R_{eqCD} = 1.600 \Omega$.

ES. 1.4 - Calcolare la R_{eq} vista ai morsetti A-B e quella vista ai morsetti C-D.

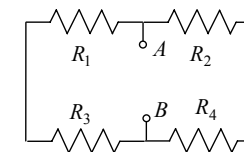


$$R_1 = R_3 = 0.2 \Omega \quad R_2 = 0.4 \Omega$$

$$R_4 = R_5 = 1 \Omega \quad R_6 = 3 \Omega$$

Risultato: $R_{eqAB} = 0.147 \Omega$, $R_{eqCD} = 0.126 \Omega$.

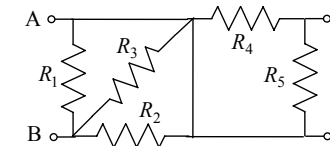
ES. 1.5 - Calcolare il valore di R_4 tale che ai morsetti A-B si abbia $R_{eq} = R$.



$$R_1 = R_2 = R \quad R_3 = R/2$$

Risultato: $R_4 = 2R$.

ES. 1.6 - Calcolare la R_{eq} vista ai morsetti A-B e quella vista ai morsetti C-D.

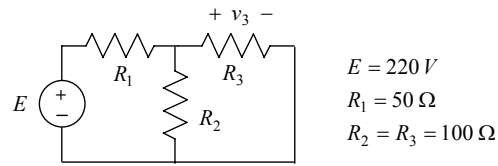


$$R_1 = 2.3 \text{ m}\Omega \quad R_2 = 1.4 \text{ m}\Omega$$

$$R_3 = 1 \text{ m}\Omega, \quad R_4 = 3 \text{ m}\Omega, \quad R_5 = 0.8 \text{ m}\Omega$$

Risultato: $R_{eqAB} = 0.47 \text{ m}\Omega$, $R_{eqCD} = 0.63 \text{ m}\Omega$.

ES. 1.7 - Calcolare la tensione v_3 usando il partitore di tensione.

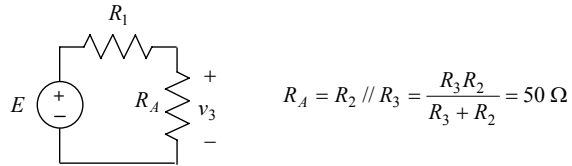


$$E = 220 \text{ V}$$

$$R_1 = 50 \ \Omega$$

$$R_2 = R_3 = 100 \ \Omega$$

Il partitore di tensione si applica a due resistori in serie, quindi occorre preliminarmente ricondursi alla rete equivalente seguente:

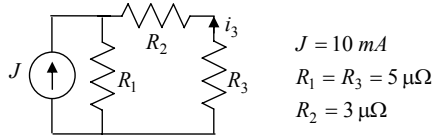


$$R_A = R_2 // R_3 = \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = 50 \ \Omega$$

Applicando ora il partitore di tensione si ha:

$$v_3 = E \frac{R_A}{R_A + R_1} = 110 \text{ V}.$$

ES. 1.8 - Calcolare la corrente i_3 usando il partitore di corrente.

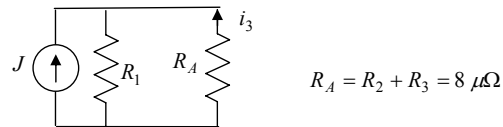


$$J = 10 \text{ mA}$$

$$R_1 = R_3 = 5 \ \mu\Omega$$

$$R_2 = 3 \ \mu\Omega$$

Il partitore di corrente si applica a due resistori in parallelo, quindi occorre riferirsi alla rete equivalente seguente:

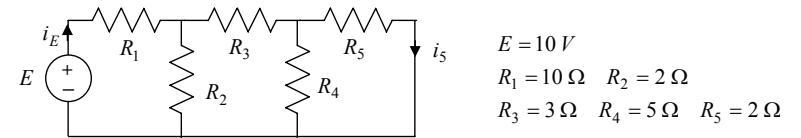


$$R_A = R_2 + R_3 = 8 \ \mu\Omega$$

Applicando ora il partitore di corrente si ha (tenuto conto dei versi):

$$i_3 = -J \frac{R_1}{R_A + R_1} = -3.84 \text{ mA}.$$

ES. 1.9 - Calcolare la potenza erogata dal generatore E e quella assorbita dal resistore R_5



$$E = 10 \text{ V}$$

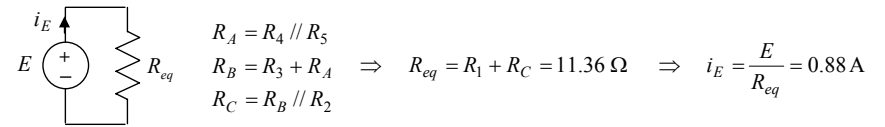
$$R_1 = 10 \ \Omega \quad R_2 = 2 \ \Omega$$

$$R_3 = 3 \ \Omega \quad R_4 = 5 \ \Omega \quad R_5 = 2 \ \Omega$$

Scegliendo le correnti come in figura, le potenze richieste sono date da:

$$P_E^{erog} = E i_E, \quad P_{R_5} = R_5 i_5^2.$$

La i_E si valuta a partire dal calcolo della resistenza equivalente vista ai capi del generatore:



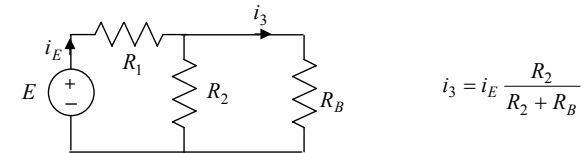
$$R_A = R_4 // R_5$$

$$R_B = R_3 + R_A \Rightarrow R_{eq} = R_1 + R_C = 11.36 \ \Omega \Rightarrow i_E = \frac{E}{R_{eq}} = 0.88 \text{ A}$$

$$R_C = R_B // R_2$$

da cui si ricava: $P_E^{erog} = 8.80 \text{ W}$.

Nota la corrente i_E , si può ricavare la i_5 applicando due volte il partitore di corrente. Dapprima ricaviamo i_3 dalla rete equivalente seguente

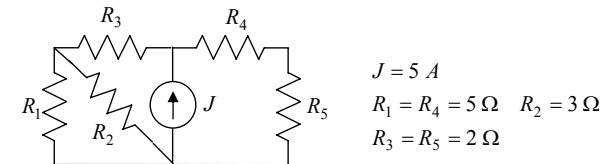


$$i_3 = i_E \frac{R_2}{R_2 + R_B}$$

quindi ricaviamo i_5 ripartendo i_3 tra i resistori R_4 ed R_5 :

$$i_5 = i_3 \frac{R_4}{R_4 + R_5} = 0.19 \text{ A} \Rightarrow P_{R_5} = 72.20 \text{ mW}.$$

ES. 1.10 - Calcolare la potenza erogata dal generatore J e quella assorbita dal resistore R_1 .



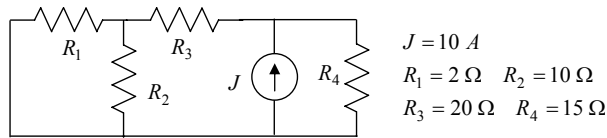
$$J = 5 \text{ A}$$

$$R_1 = R_4 = 5 \ \Omega \quad R_2 = 3 \ \Omega$$

$$R_3 = R_5 = 2 \ \Omega$$

Risultato: $P_J^{erog} = 62.25 \text{ W}$, $P_{R_1} = 7.25 \text{ W}$.

ES. 1.11 - Calcolare la potenza erogata dal generatore e quella assorbita da ogni resistore. Verificare la conservazione delle potenze.



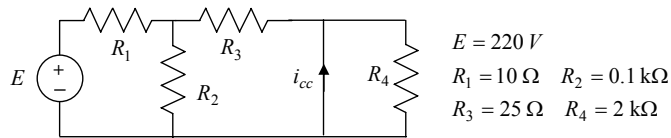
$$J = 10 \text{ A}$$

$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = 10 \Omega$$

$$R_3 = 20 \Omega \quad R_4 = 15 \Omega$$

Risultato: $P_J^{erog} = 0.886 \text{ kW}$, $P_{R_1} = 0.023 \text{ kW}$, $P_{R_2} = 0.004 \text{ kW}$, $P_{R_3} = 0.335 \text{ kW}$, $P_{R_4} = 0.524 \text{ kW}$.

ES. 1.12 - Calcolare la corrente i_{cc} che circola nel corto-circuito.



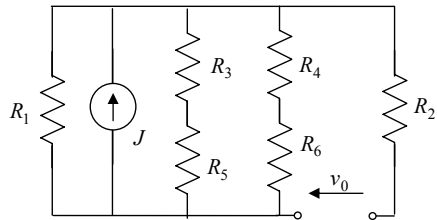
$$E = 220 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \Omega \quad R_2 = 0.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 25 \Omega \quad R_4 = 2 \text{ k}\Omega$$

Risultato: $i_{cc} = -5.87 \text{ A}$.

ES. 1.13 - Calcolare la tensione v_0 sul circuito aperto in figura.



$$J_1 = 1 \text{ A}$$

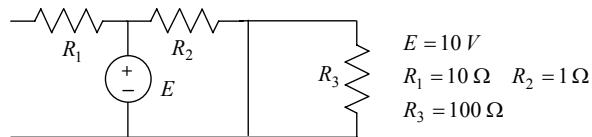
$$R_1 = 10 \Omega \quad R_2 = 10 \Omega$$

$$R_3 = 15 \Omega \quad R_4 = 5 \Omega$$

$$R_5 = 30 \Omega \quad R_6 = 25 \Omega$$

Risultato: $v_0 = -6.43 \text{ V}$.

ES. 1.14 - Valutare la potenza assorbita dai resistori della rete in figura.



$$E = 10 \text{ V}$$

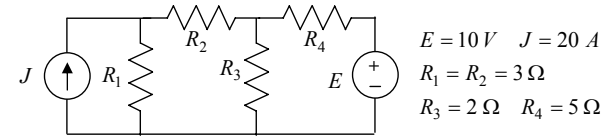
$$R_1 = 10 \Omega \quad R_2 = 1 \Omega$$

$$R_3 = 100 \Omega$$

Risultato: $P_{R_1} = P_{R_3} = 0$, $P_{R_2} = 100 \text{ W}$.

2. Sovrapposizione degli effetti.

ES. 2.1 - Calcolare la potenza totale erogata dai generatori.



$$E = 10 \text{ V} \quad J = 20 \text{ A}$$

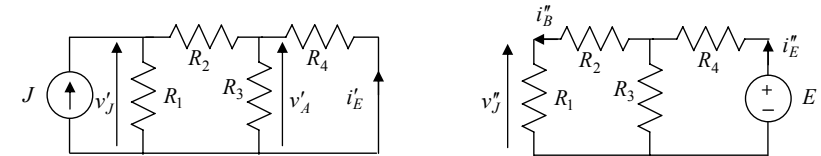
$$R_1 = R_2 = 3 \Omega$$

$$R_3 = 2 \Omega \quad R_4 = 5 \Omega$$

Adottando la convenzione del generatore sui due generatori della rete, la potenza erogata da ciascuno di essi sarà data da:

$$P_E^{erog} = E i_E, \quad P_J^{erog} = J v_J.$$

La tensione v_J e la corrente i_E si possono valutare applicando la sovrapposizione degli effetti, risolvendo i due circuiti ausiliari ottenuti considerando un solo generatore acceso:



Con riferimento al primo circuito ausiliario, il contributo v'_J è ottenuto valutando la resistenza equivalente vista dal generatore:

$$R_{eqJ} = (R_3 // R_4 + R_2) // R_1 = 1.79 \Omega \Rightarrow v'_J = R_{eqJ} J = 35.80 \text{ V}.$$

Per valutare i'_E si può utilizzare la tensione v'_A sul parallelo $R_A = R_3 // R_4$:

$$v'_A = v'_J \frac{R_A}{R_2 + R_A} \Rightarrow i'_E = -\frac{v'_A}{R_4} = -2.31 \text{ A}$$

(nell'ultimo passaggio si è tenuto conto della convenzione adottata su R_4). Nel secondo circuito ausiliario, il contributo i''_E è ottenuto valutando la resistenza equivalente vista dal generatore:

$$R_{eqE} = (R_1 + R_2) // R_3 + R_4 = 6.50 \Omega \Rightarrow i''_E = E / R_{eqE} = 1.54 \text{ A}.$$

Per valutare v''_J è utile passare attraverso il calcolo della corrente i''_B della serie $R_B = R_1 + R_2$:

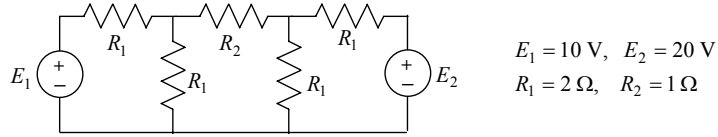
$$i''_B = i''_E \frac{R_3}{R_B + R_3} \Rightarrow v''_J = R_1 i''_B = 1.14 \text{ V}.$$

Se ne conclude che:

$$P_E^{erog} = E i_E = E (i'_E + i''_E) = -7.70 \text{ W}, \quad P_J^{erog} = J v_J = J (v'_J + v''_J) = 0.74 \text{ kW}.$$

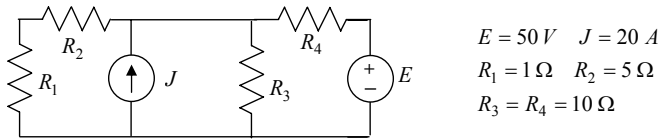
(Si osservi che in questa rete il generatore di tensione sta assorbendo potenza elettrica positiva).

ES. 2.2 - Calcolare la potenza totale erogata dai generatori.



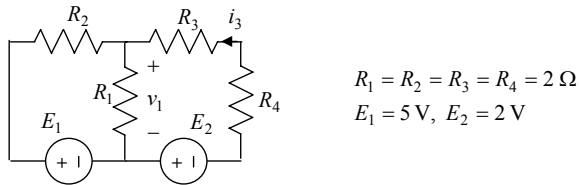
Risultato: $P_{E_1}^{erog} = 16.67 \text{ W}, P_{E_2}^{erog} = 0.12 \text{ kW}$.

ES. 2.3 - Calcolare la potenza totale erogata dai generatori.



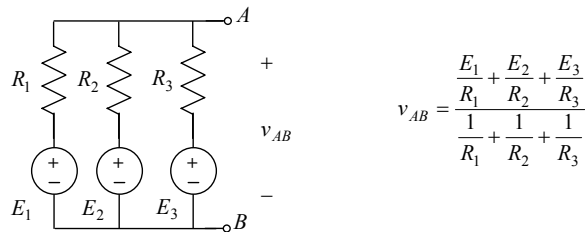
Risultato: $P_E^{erog} = -0.09 \text{ kW}, P_J^{erog} = 1.36 \text{ kW}$.

ES. 2.4 - Calcolare la tensione v_1 e la corrente i_3 .

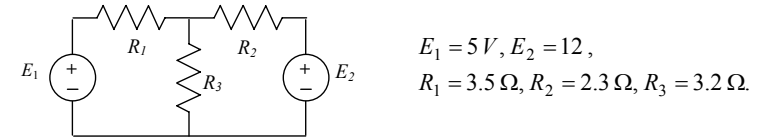


Risultato: $v_1 = 1.60 \text{ V}, i_3 = -0.90 \text{ A}$.

ES. 2.5 - Utilizzando la sovrapposizione degli effetti, dimostrare la Formula di Millmann.

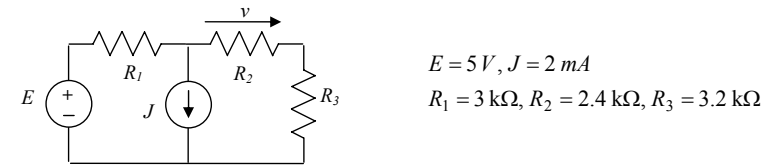


ES. 2.6 - Determinare la potenza erogata dal generatore E_1 .



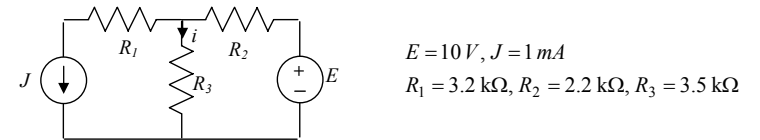
Risultato: $P_{E_1}^{erog} = -2.05 \text{ W}$.

ES. 2.7 - Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, determinare la tensione v .



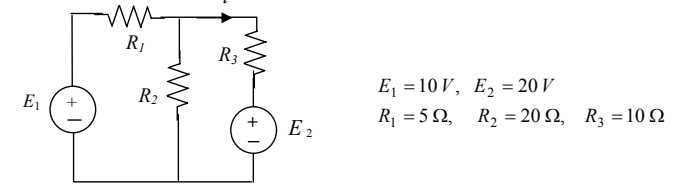
Risultato: $v = -0.32 \text{ V}$.

ES. 2.8 - Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, determinare la corrente i e la potenza assorbita da R_3 .



Risultato: $i = 1.37 \text{ mA}, P = 6.57 \text{ mW}$.

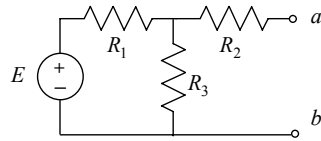
ES. 2.9 - Valutare la corrente i e la potenza erogata dal generatore E_1 .



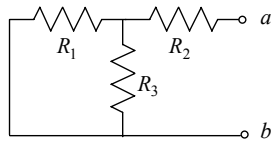
Risultato: $i = -0.86 \text{ A}, P_{E_1}^{erog} = -2.86 \text{ W}$.

3. Generatori equivalenti di Thévenin e di Norton.

ES. 3.1 - Calcolare l'equivalente di Thévenin visto ai capi dei morsetti a-b.



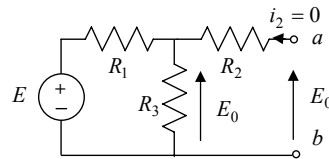
La resistenza equivalente si ottiene spegnendo l'unico generatore, quindi studiando la rete seguente



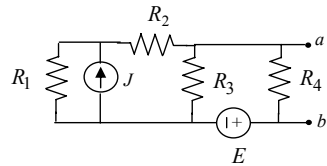
$$R_{eq} = R_2 + R_1 // R_3 = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

La tensione a vuoto E_0 si ottiene valutando la tensione tra i morsetti aperti. Tenuto conto che in queste condizioni non circola corrente sul resistore R_2 è evidente che la E_0 è anche la tensione su R_3 . Poiché R_1 ed R_3 sono in serie, la tensione E_0 si può ricavare da un semplice partitore di tensione:

$$E_0 = E \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$



ES. 3.2 - Calcolare l'equivalente di Norton visto ai capi dei morsetti a-b.



$$\begin{aligned} J &= 20 \text{ A} & E &= 10 \text{ V} \\ R_1 &= R_2 = 2 \Omega \\ R_3 &= R_4 = 4 \Omega \end{aligned}$$

La resistenza equivalente si ottiene spegnendo i generatori:

$$R_{eq} = R_4 // [R_3 // (R_1 + R_2)] = 1.33 \Omega$$

La corrente I_{cc} è la corrente che circola da a a b quando i due morsetti sono in corto-circuito. Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, il contributo I'_{cc} dovuto al solo generatore di corrente si valuta sostituendo il generatore di tensione con un corto-circuito e applicando la formula del partitore di corrente:

$$I'_{cc} = J \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \text{ A}$$

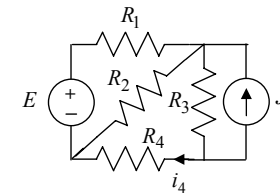
(si noti che R_3 ed R_4 sono cortocircuitate). Il contributo I''_{cc} dovuto al generatore di tensione si valuta sostituendo il generatore di corrente con un circuito aperto. In questo circuito I''_{cc} è proprio la corrente che circola nel generatore di tensione (si noti che su tale generatore è fatta la convenzione dell'utilizzatore):

$$I''_{cc} = -\frac{E}{R_E} = -5 \text{ A},$$

dove $R_E = (R_1 + R_2) // R_3 = 2 \Omega$. Pertanto la I_{cc} sarà

$$I_{cc} = I'_{cc} + I''_{cc} = 5 \text{ A}.$$

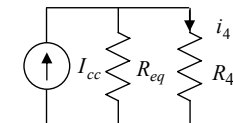
ES. 3.3 - Utilizzando l'equivalente di Norton calcolare la corrente che circola in R_4 .



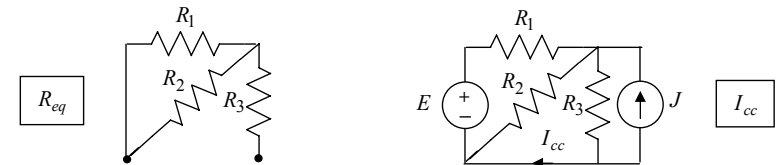
$$\begin{aligned} E &= 54 \text{ V} \\ J &= 10 \text{ A} \\ R_1 &= 6 \Omega & R_2 &= R_3 = 4 \Omega \\ R_4 &= 12 \Omega \end{aligned}$$

Riducendo la rete vista ai capi di R_4 con il teorema di Norton, si ottiene la rete seguente, dalla quale si evince che

$$i_4 = I_{cc} \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_4}$$



I circuiti per valutare i parametri di Norton sono riportati di seguito:



Si avrà allora

$$R_{eq} = R_1 // R_2 + R_3 = 6.40 \Omega.$$

La corrente I_{cc} si può valutare applicando il principio di sovrapposizione degli effetti. Il contributo I'_{cc} dovuto al solo generatore di corrente si valuta sostituendo il generatore di tensione con un corto-circuito e applicando la formula del partitore di corrente:

$$I'_{cc} = -J \frac{R_3}{R_3 + (R_1 // R_2)} = -6.250 \text{ A}$$

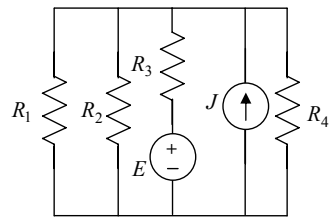
Il contributo I'_{cc} dovuto al generatore di tensione si valuta sostituendo il generatore di corrente con un circuito aperto. Applicando il partitore di tensione si può ricavare la tensione sul parallelo $R_p = R_2 // R_3$ e quindi ricavare la corrente richiesta (che circola in R_3).

$$v_p'' = E \frac{R_p}{R_1 + R_p} \Rightarrow I''_{cc} = \frac{v_p''}{R_3} = 3.375 \text{ A}.$$

Si ottiene in definitiva

$$I_{cc} = I'_{cc} + I''_{cc} = -2.875 \text{ A} \Rightarrow i_4 = -1.000 \text{ A}.$$

ES. 3.4 - Utilizzando il teorema di Thévenin calcolare la potenza assorbita dal resistore R_2 .



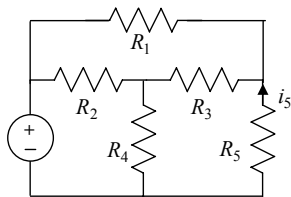
$$E = 1 \text{ V} \quad J = 2 \text{ mA}$$

$$R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 5 \text{ k}\Omega$$

Risultato: $P_{R_2} = 0.85 \text{ mW}$.

ES. 3.5 - Utilizzando il teorema di Thévenin calcolare la corrente i_5 .



$$E = 12 \text{ V}$$

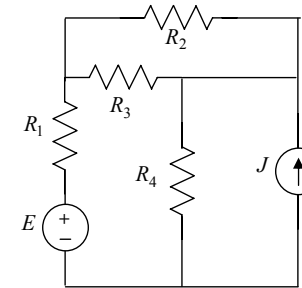
$$R_1 = R_3 = 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 0.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = R_5 = 0.4 \text{ k}\Omega$$

Risultato: $i_5 = -18 \text{ mA}$.

ES. 3.6 - Utilizzando il teorema di Norton calcolare la potenza assorbita dal resistore R_3 .



$$E = 5 \text{ V}$$

$$J = 1 \mu\text{A}$$

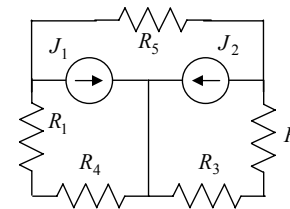
$$R_1 = R_3 = 2 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 800 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 300 \text{ k}\Omega$$

Risultato: $P_{R_3} = 0.43 \mu\text{W}$.

ES. 3.7 - Utilizzando il teorema di Thévenin calcolare la potenza assorbita da R_5 .



$$J_1 = 2 \text{ mA}$$

$$J_2 = 1 \text{ mA}$$

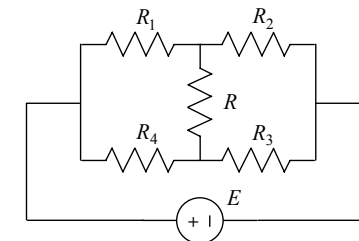
$$R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 3 \text{ k}\Omega$$

Risultato: $P_{R_5} = 54.87 \mu\text{W}$.

ES. 3.8 - Verificare che il resistore R non è percorso da corrente se tra le resistenze vi è la seguente relazione (ponte di Wheatstone):

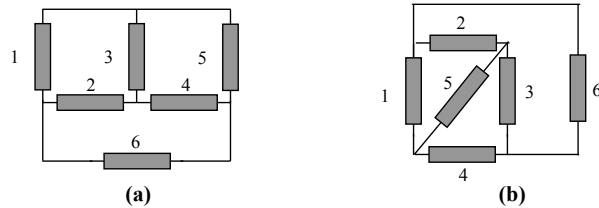


$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

(Suggerimento: applicare Norton ai capi di R ed imporre che sia nulla la corrente I_{cc})

4. Metodi generali per l'analisi delle reti in regime stazionario.

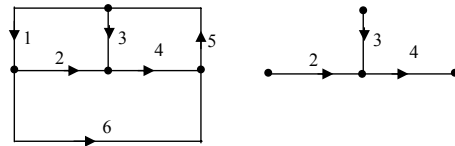
ES. 4.1 - Date le seguenti reti di bipoli, scrivere un sistema completo di equazioni di Kirchhoff indipendenti.



Rete (a)

Orientando il grafo come in figura e scegliendo, ad esempio, l'albero indicato, un possibile sistema completo di equazioni di Kirchhoff è dato da:

$$\text{LKC} \begin{cases} -i_1 + i_2 + i_6 = 0 \\ -i_2 - i_3 + i_4 = 0 \\ -i_4 + i_5 - i_6 = 0 \end{cases}$$

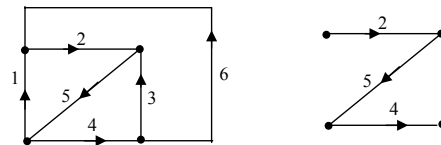


$$\text{LKT} \begin{cases} v_1 + v_2 - v_3 = 0 \\ v_3 + v_4 + v_5 = 0 \\ -v_2 - v_4 + v_6 = 0 \end{cases}$$

Rete (b)

Orientando il grafo come in figura e scegliendo, ad esempio, l'albero indicato, un possibile sistema completo di eq. di Kirchhoff è dato da:

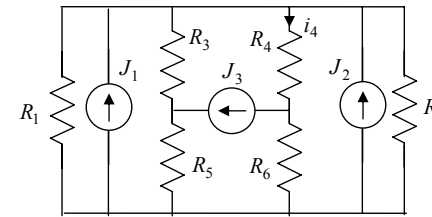
$$\text{LKC} \begin{cases} -i_1 + i_2 - i_6 = 0 \\ -i_2 - i_3 + i_5 = 0 \\ i_3 - i_4 + i_6 = 0 \end{cases}$$



$$\text{LKT} \begin{cases} -v_1 - v_2 - v_5 = 0 \\ v_2 + v_4 + v_5 + v_6 = 0 \\ v_3 + v_4 + v_5 = 0 \end{cases}$$

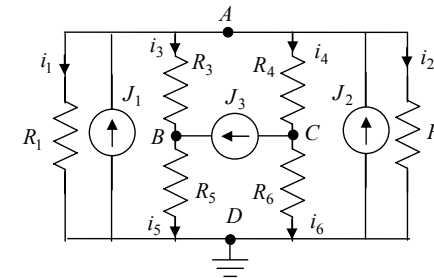
Si osservi che su tutti i bipoli delle reti (a) e (b) è stata adottata la stessa convenzione.

ES. 4.2 - Utilizzando il metodo dei potenziali nodali calcolare la corrente nel resistore R_4 .



$$\begin{aligned} J_1 = J_2 = 1 \text{ A} \quad J_3 = 3 \text{ A} \\ R_1 = 30 \Omega \quad R_2 = 10 \Omega \\ R_3 = 25 \Omega \quad R_4 = 5 \Omega \\ R_5 = 35 \Omega \quad R_6 = 15 \Omega \end{aligned}$$

Si individuino i nodi della rete e si orientino tutte le correnti nei resistori, adottando su di essi la convenzione normale:



Avendo scelto come potenziale di riferimento quello del nodo D, le incognite saranno i potenziali degli altri tre nodi: e_A, e_B, e_C . Per le convenzioni adottate si ha:

$$v_1 = v_2 = e_A, \quad v_3 = e_A - e_B, \quad v_4 = e_A - e_C, \quad v_5 = e_B, \quad v_6 = e_C.$$

Applicando la LKC ai nodi A, B, C e sostituendo le caratteristiche dei resistori (scritte con riferimento alle conduttanze) si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = J_1 + J_2 \\ -i_3 + i_5 = J_3 \\ -i_4 + i_6 = -J_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_1 e_A + G_2 e_A + G_3 (e_A - e_B) + G_4 (e_A - e_C) = J_1 + J_2 \\ -G_3 (e_A - e_B) + G_5 e_B = J_3 \\ -G_4 (e_A - e_C) + G_6 e_C = -J_3 \end{cases}$$

Si osservi che tale sistema può essere posto nella forma matriciale:

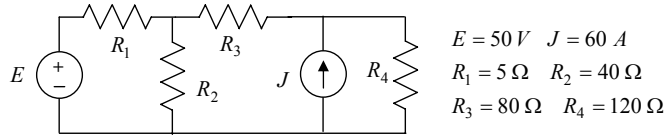
$$\begin{vmatrix} G_1 + G_2 + G_3 + G_4 & -G_3 & -G_4 \\ -G_3 & G_3 + G_5 & 0 \\ -G_4 & 0 & G_4 + G_6 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 + J_2 \\ J_3 \\ -J_3 \end{vmatrix}$$

Risolviendo tale sistema si ottiene:

$$e_A = 7.500 \text{ V}, \quad e_B = 48.125 \text{ V}, \quad e_C = -5.625 \text{ V}$$

da cui: $i_4 = \frac{v_4}{R_4} = G_4 (e_A - e_C) = 2.625 \text{ A}.$

ES. 4.3 - Utilizzando il metodo dei potenziali nodali modificato calcolare la potenza erogata dai due generatori e la potenza assorbita dai resistori (verificare la conservazione delle potenze).

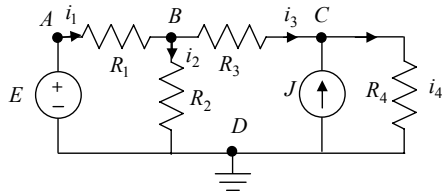


$$E = 50 \text{ V} \quad J = 60 \text{ A}$$

$$R_1 = 5 \Omega \quad R_2 = 40 \Omega$$

$$R_3 = 80 \Omega \quad R_4 = 120 \Omega$$

Si individuino i nodi della rete e si orientino tutte le correnti nei resistori, adottando su di essi la convenzione normale:



Avendo scelto come potenziale di riferimento quello del nodo D, le incognite saranno i potenziali degli altri tre nodi: e_A, e_B, e_C . Per la presenza del generatore di tensione tra nodo A e nodo D, si ha banalmente $e_A = E$. Con le convenzioni adottate si ha:

$$v_1 = E - e_B, \quad v_2 = e_B, \quad v_3 = e_B - e_C, \quad v_4 = e_C.$$

Applicando la LKC ai nodi B e C e sostituendo le caratteristiche dei resistori (scritte con riferimento alle conduttanze) si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} -i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ -i_3 + i_4 = J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (G_1 + G_2 + G_3)e_B - G_3e_C = G_1E \\ -G_3e_B + (G_3 + G_4)e_C = J \end{cases}$$

Risolvendo tale sistema si ottiene:

$$e_B = 0.20 \text{ kV}, \quad e_C = 3.00 \text{ kV}.$$

Adottando la convenzione del generatore sui due generatori si ha:

$$P_E^{erog} = E i_E = E i_1 = E G_1 v_1 = E G_1 (E - e_B) = -1.50 \text{ kW}$$

$$P_J^{erog} = J v_J = J v_4 = J e_C = 180.00 \text{ kW}$$

$$P_{R_1} = G_1 v_1^2 = G_1 (E - e_B)^2 = 4.50 \text{ kW}$$

$$P_{R_2} = G_2 v_2^2 = G_2 e_B^2 = 1.00 \text{ kW}$$

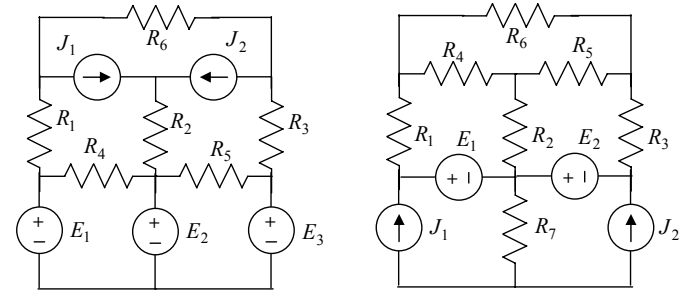
$$P_{R_3} = G_3 v_3^2 = G_3 (e_B - e_C)^2 = 98.00 \text{ kW}$$

$$P_{R_4} = G_4 v_4^2 = G_4 e_C^2 = 75.00 \text{ kW}$$

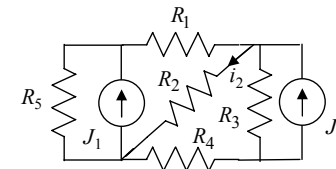
È facile verificare che $P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + P_{R_4} = P_E^{erog} + P_J^{erog}$.

ES. 4.4 - Con riferimento alla seguenti reti:

- scrivere il sistema completo delle equazioni di Kirchhoff e delle equazioni caratteristiche (utilizzare grafo, albero e co-albero).
- scrivere il suddetto sistema in forma matriciale, individuando le matrici di incidenza ridotta e di maglia fondamentale.



ES. 4.5 - Utilizzando il metodo delle correnti di maglia calcolare la corrente in R_2 .



$$J_1 = 10 \text{ A}$$

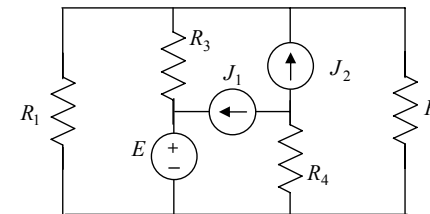
$$J_2 = 5 \text{ A}$$

$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = R_3 = 3 \Omega$$

$$R_4 = R_5 = 5 \Omega$$

Risultato: $i_2 = -1.5 \text{ A}$.

ES. 4.6 - Utilizzando il metodo delle correnti di maglia calcolare la potenza erogata da ciascun generatore della rete.



$$J_1 = J_2 = 1 \text{ mA}, \quad E = 2 \text{ mV}$$

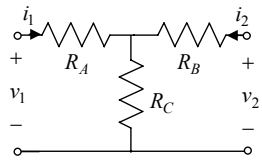
$$R_1 = 0.3 \Omega \quad R_2 = 0.2 \Omega$$

$$R_3 = 0.4 \Omega \quad R_4 = 0.5 \Omega$$

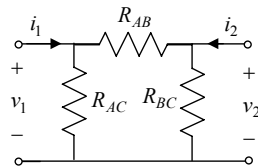
Risultato: $P_E^{erog} = 5.2 \mu\text{W}$, $P_{J_1}^{erog} = 3.0 \mu\text{W}$, $P_{J_2}^{erog} = 1.6 \mu\text{W}$.

5. Analisi di reti con doppi-bipoli resistivi e generatori pilotati

ES. 5.1 - Analizzando i seguenti doppi-bipoli:



schema a T (stella)



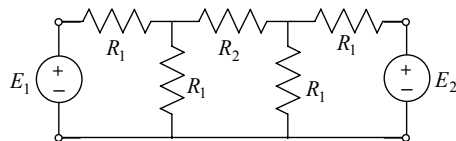
schema a Π (triangolo)

- a) verificare che lo schema a T realizza una qualunque matrice R con le posizioni seguenti (formule di sintesi): $R_A = R_{11} - R_m$, $R_B = R_{22} - R_m$, $R_C = R_m$;
- b) verificare che lo schema a Π realizza una qualunque matrice G con le posizioni seguenti (formule di sintesi): $G_{AC} = G_{11} + G_m$, $G_{BC} = G_{22} + G_m$, $G_{AB} = -G_m$;
- c) verificare le seguenti formule di trasformazione stella-triangolo (suggerimento: imporre l'equivalenza tra gli schemi a T e a Π):

$Y \rightarrow \Delta$	$\Delta \rightarrow Y$
$R_{AB} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_C}$	$R_A = \frac{R_{AB} R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$
$R_{AC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_B}$	$R_B = \frac{R_{AB} R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$
$R_{BC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_A}$	$R_C = \frac{R_{AC} R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$

ES. 5.2 - Con riferimento alla seguente rete:

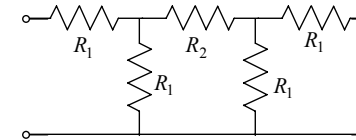
- a. caratterizzare attraverso la matrice G il doppio bipolo resistivo visto ai capi dei generatori;
- b. utilizzare la matrice G per calcolare la potenza assorbita dal doppio-bipolo;



$E_1 = E_2 = 10 V$
 $R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = 1 \Omega$

a.) L'elemento G_{11} è definito come:

$$G_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0}$$

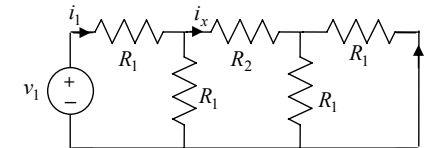


quindi corrisponde alla conduttanza di ingresso della rete descritta in alto. Applicando le regole di equivalenza serie e parallelo di conduttanze si ottiene:

$$G_{11} = \frac{G_1 \left(G_1 + \frac{2G_1 G_2}{2G_1 + G_2} \right)}{2G_1 + \frac{2G_1 G_2}{2G_1 + G_2}} = 0.33 S.$$

Per la simmetria della rete rispetto alle due porte, si ha anche $G_{11} = G_{22}$ (si provi a dimostrarlo). L'elemento G_{12} è definito come:

$$G_{12} = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0}$$



Il circuito per il calcolo di tale parametro è disegnato in alto. Si osservi che:

$$G_{12} = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0} \cdot \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0} = G_{11} \cdot \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0}$$

quindi ci si riporta al calcolo di $\left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0}$, che può essere effettuato con l'applicazione reiterata del partitore di corrente:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_x / 2}{i_1} = -\frac{1}{2i_1} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_1 / 2} = -0.25$$

da cui: $G_{12} = -0.25 \cdot G_{11} = -0.08 S.$

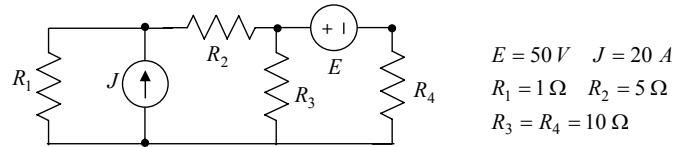
Si provi a verificare che $G_{12} = G_{21} = G_m$, proprietà valida per tutti i doppi-bipoli reciproci.

b.) Introdotta il vettore $\mathbf{e}^T = [E_1 \quad E_2]$, la potenza assorbita dal doppio-bipolo è esprimibile come:

$$P = \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{i} = \mathbf{e}^T \cdot \underline{\underline{G}} \cdot \mathbf{e} = G_{11} E_1^2 + G_{22} E_2^2 + 2G_m E_1 E_2 = 50 W.$$

ES. 5.3 - Con riferimento alla seguente rete:

- a) caratterizzare attraverso la matrice H il doppio bipolo resistivo visto ai capi dei generatori;
- b) utilizzare la matrice H per calcolare la potenza assorbita da tale doppio-bipolo;



$$E = 50 \text{ V} \quad J = 20 \text{ A}$$

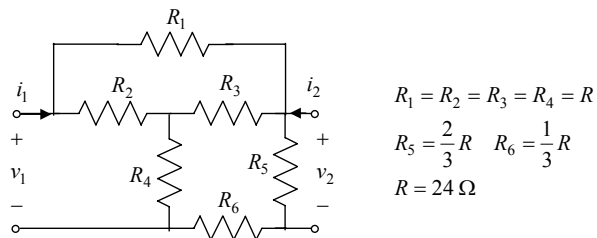
$$R_1 = 1 \Omega \quad R_2 = 5 \Omega$$

$$R_3 = R_4 = 10 \Omega$$

Risultato: a) $H_{11} = 0.909 \Omega$, $H_{22} = 0.073 \text{ S}$, $H_{12} = -H_{21} = 0.045$; b) $P = 0.546 \text{ kW}$.

ES. 5.4 - Con riferimento al seguente doppio-bipolo:

- a) caratterizzarlo attraverso la matrice R;
- b) sintetizzare un doppio-bipolo equivalente con uno schema a T;



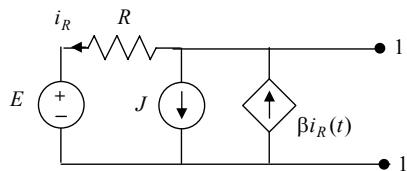
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$R_5 = \frac{2}{3}R \quad R_6 = \frac{1}{3}R$$

$$R = 24 \Omega$$

Risultato: a) $R_{11} = 24 \Omega$, $R_{22} = 12 \Omega$, $R_m = 8 \Omega$; b) $R_A = 16 \Omega$, $R_B = 4 \Omega$, $R_C = 8 \Omega$.

ES. 5.5 - Valutare l'equivalente di Thévenin ai capi dei morsetti 1-1'



Risultato: $V_0 = E + \frac{RJ}{\beta - 1}$, $R_{eq} = \frac{R}{1 - \beta}$.

Per calcolare V_0 basta applicare la LKC e la LKT:

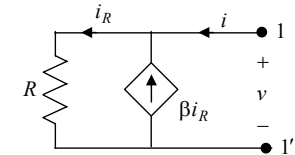
$$i_R - \beta i_R = -J \Rightarrow i_R = \frac{J}{\beta - 1}, \quad V_0 = E + Ri_R = E + \frac{RJ}{\beta - 1}$$

Per calcolare R_{eq} occorre spegnere tutti (e soli) i generatori indipendenti, cioè E e J, e valutare

$$i = i_R - \beta i_R \Rightarrow i = (1 - \beta)i_R$$

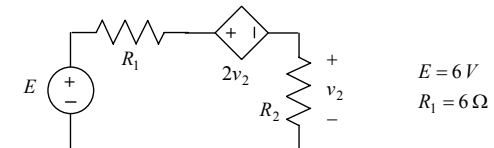
$$i_R = \frac{v}{R}$$

$$R_{eq} = \frac{v}{i} = \frac{R}{1 - \beta}$$



Per $\beta > 1$ si ha $R_{eq} < 0$, risultato plausibile visto che nella rete è presente un bipolo attivo. Per $\beta = 1$ non esiste il circuito equivalente di Thévenin.

ES. 5.6 - Per il circuito in esame, determinare il valore di R_2 che rende massima la potenza assorbita dallo stesso resistore R_2 .

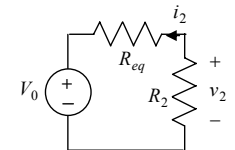


$$E = 6 \text{ V}$$

$$R_1 = 6 \Omega$$

La condizione di massimo trasferimento di potenza su R_2 si può trovare immediatamente una volta rappresentata tutta la rete vista ai capi di R_2 attraverso il generatore equivalente di Thévenin: $R_2 = R_{eq}$.

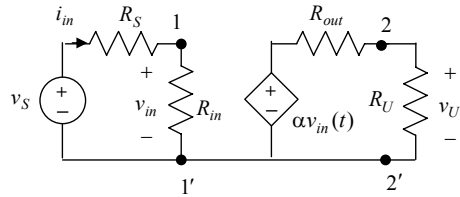
Il calcolo di R_{eq} può essere effettuato facilmente applicando Kirchhoff:



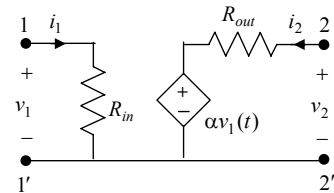
$$R_{eq} = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{E=0} = \frac{v_2}{\frac{v_2 + 2v_2}{R_1}} = \frac{R_1}{3} = 2 \Omega.$$

ES. 5.7 - Per il circuito Il seguente circuito rappresenta lo schema equivalente di un amplificatore di tensione. Calcolare:

- a) la matrice delle conduttanze del doppio bipolo ai capi dei morsetti 1-1' e 2-2';
- b) il guadagno di tensione $A_v = v_U / v_S$
- c) i valori dei parametri R_{in} ed R_{out} per cui il guadagno A_v è massimo.



a) Orientando correnti e tensioni del doppio-bipolo come nella figura a lato, la matrice delle conduttanze si valuta applicando la definizione:



$$G_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0} = \frac{i_1}{R_{in} i_1} = \frac{1}{R_{in}};$$

$$G_{12} = \left. \frac{i_1}{v_2} \right|_{v_1=0} = \frac{v_1}{R_{in} v_2} \Big|_{v_1=0} = 0;$$

$$G_{21} = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0} = -\frac{\alpha v_1}{R_{out} v_1} = -\frac{\alpha}{R_{out}}; \quad G_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{v_1=0} = \frac{v_2}{R_{out} v_2} = \frac{1}{R_{out}}.$$

Si osservi che $G_{12} \neq G_{21}$, cioè il doppio-bipolo non è reciproco.

b) analizzando la maglia alla porta 1 e quella alla porta 2 si ottiene:

$$v_{in} = v_S \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S}, \quad v_u = \alpha v_{in} \frac{R_U}{R_{out} + R_U},$$

da cui

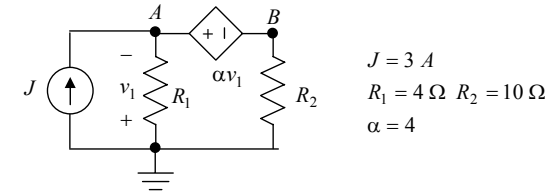
$$A_v = \frac{v_u}{v_S} = \alpha \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \frac{R_U}{R_{out} + R_U}.$$

c) Osservando l'espressione di A_v è semplice verificare che il massimo è dato da

$$A_{v,max} = \alpha$$

e si ottiene per $R_{in} \rightarrow \infty, R_{out} \rightarrow 0$.

ES. 5.8 - Calcolare i potenziali di nodo del circuito seguente.



$$J = 3 \text{ A} \\ R_1 = 4 \Omega \quad R_2 = 10 \Omega \\ \alpha = 4$$

Indicando con V_A, V_B i potenziali dei nodi A e B si ha che

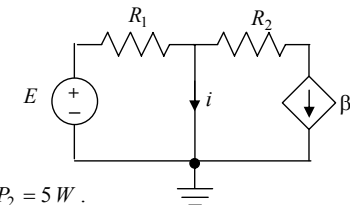
$$V_A = -v_1 \Rightarrow V_A - V_B = \alpha v_1 = -\alpha V_A \Rightarrow V_B = (1 + \alpha)V_A.$$

Applicando il metodo dei potenziali nodali (modificato) si ha:

$$\begin{cases} \frac{V_A}{R_1} - i = J \\ \frac{V_B}{R_2} + i = 0 \end{cases} \Rightarrow \frac{V_A}{R_1} + \frac{V_B}{R_2} = J \Rightarrow \frac{V_A}{R_1} + \frac{(1 + \alpha)V_A}{R_2} = J \Rightarrow V_A = \frac{J}{\frac{1}{R_1} + \frac{(1 + \alpha)}{R_2}} = 4 \text{ V}$$

$$V_B = (1 + \alpha)V_A = 20 \text{ V}.$$

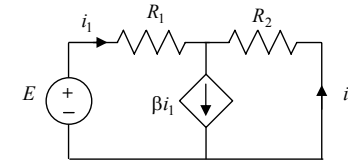
ES. 5.9 - Calcolare la potenza dissipata in R_2 .



$$E = 6 \text{ V} \\ R_1 = 10 \Omega \quad R_2 = 20 \Omega \\ \beta = 5$$

Risultato: $P_2 = 5 \text{ W}$.

ES. 5.10 - Con riferimento al seguente circuito, valutare l'equivalente di Norton ai capi di R_2 e la corrente i_2 circolante in tale resistenza.



$$\text{Risultato: } I_{cc} = (1 - \beta) \frac{E}{R_1}, \quad R_{eq} = \frac{R_1}{1 - \beta}, \quad i_2 = -I_{cc} \frac{R_{eq}}{R_2 + R_{eq}}.$$