Lezione 5

Il teorema del generatore equivalente

*Lezioni di **Elettrotecnica** per studenti di **Ingegneria Gestionale***

ideate e scritte da

Lorenza Corti

con il contributo di **Vincenzo Paolo Loschiavo**

Sommario

1 Il teorema del generatore equivalente

Il Teorema del Generatore Equivalente (TGE) è una delle più importanti applicazioni del ***principio di equivalenza*** che abbiamo introdotto nel § 1.1 della Lezione 4.

Il TGE è molto importante dal punto di vista concettuale e dal punto di vista pratico in quanto serve a semplificare un sotto–circuito presente in un circuito grazie alla sostituzione di questo con un altro sotto–circuito molto semplice ad esso equivalente.

In generale, il teorema del generatore equivalente (TGE) vale per sotto–circuiti costituiti da resistori, condensatori, induttori e generatori purché lineari e tempo invarianti. Tuttavia, per introdurre il teorema, considereremo sotto–circuiti adinamici e cioè costituiti da soli resistori e generatori. Tuttavia, vedremo nel seguito (Lezione 8) come quanto trovato in questo caso si possa estendere ad un sotto–circuito avente anche condensatori e induttori che lavora in regime sinusoidale se trattato nel dominio dei fasori con il metodo simbolico. Ancora più in generale, in corsi avanzati, si può mostrare come con il metodo della trasformata di Laplace è possibile estendere il TGE a tutti i circuiti lineari e tempo invarianti e non solo a quelli che lavorano in regime sinusoidale. Sottolineiamo il fatto che questo importante teorema vale per circuiti costituiti da resistori lineari e generatori ideali.

Consideriamo il circuito rappresentato in Fig. 5.1. Questo è costituito da due sotto–circuiti collegati attraverso i terminali A e B. Il circuito N_R è costituito da soli generatori ideali di tensione e corrente e da resistori lineari, viceversa il circuito N_D può essere un generico circuito dinamico.

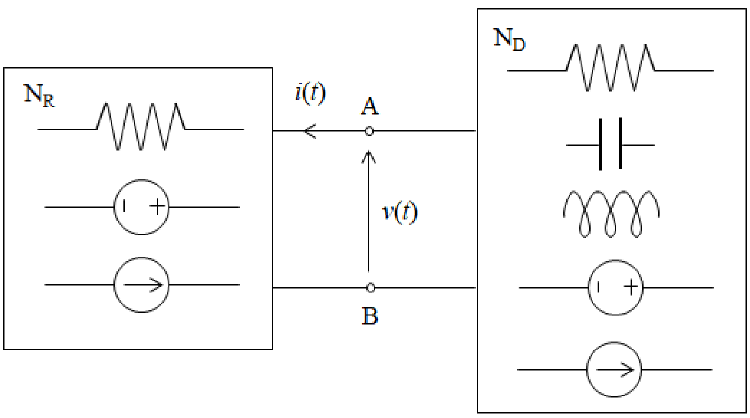


Fig. 5.1 – Circuito composto da due sotto–circuiti.

Il valore della tensione $v(t)$ e della corrente $i(t)$ dipendono da entrambi i sotto–circuiti N_R e N_D. Ognuno dei due sotto–circuiti imporrà ai terminali A–B la propria relazione caratteristica tensione-corrente. Il valore della tensione $v(t)$ e della corrente $i(t)$ si determina considerando simultaneamente le due relazioni caratteristiche e imponendo le leggi di Kirchhoff al nodo A e alla maglia costituita dai due sotto–circuiti N_R e N_D. Il circuito N_R visto ai morsetti A–B sarà quello di Fig. 5.2. Il tratteggio a destra dei morsetti A e B sta a ricordare che i due morsetti saranno collegati a qualche sotto–circuito da specificare e che il valore di $i(t)$ e $v(t)$ dipende da questo sotto–circuito, ma per quello che dobbiamo fare ora non ci interessa specificarlo[1]. Noi dobbiamo infatti occuparci di trovare la relazione caratteristica che definisce il sotto–circuito N_R.

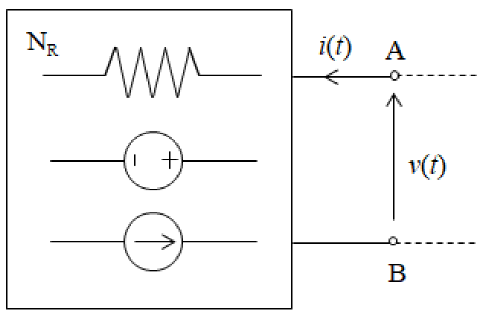


Fig. 5.2 – Sotto–circuito N_R di Fig. 5.1.

Obiettivo di questa lezione è studiare la relazione caratteristica di un bipolo N_R come quello mostrato in Fig. 5.2. Per fare ciò bisognerà determinare la relazione funzionale tra la tensione $v(t)$ e la corrente $i(t)$:

$$v(t) = r(i(t)) \tag{5.1}$$

$$i(t) = g(v(t)) \tag{5.2}$$

Per quanto già detto in precedenza, la differente scrittura delle (5.1) e (5.2) sottende, rispettivamente, una caratterizzazione in corrente o in tensione. Il caso in cui $g(t)=r^{-1}(t)$ si ha nel caso in cui il bipolo è controllato in tensione e corrente allo stesso tempo.

---

[1] In questa Lezione useremo la $v(t)$ e $i(t)$ al posto di V e I perché Nr è collegato a N_D e quindi fa parte di un circuito in generale dinamico.

Essendo i resistori nel circuito N_R lineari ci aspettiamo che la relazioni funzionali tensione-corrente (5.1) e (5.2) siano del tipo:

$$v(t) = R_{eq} i(t) + g_v(t) \tag{5.3}$$

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_{eq}} + g_i(t) \tag{5.4}$$

In particolare, abbiamo scritto la (5.3) con riferimento alla Fig. 5.4, caso in cui si è scelto di caratterizzare il circuito con un generatore di corrente (di caratterizzazione appunto, messo ai capi dei morsetti A−B) per cui la tensione $v(t)$ ai capi del bipolo A−B sarà data, sfruttando la sovrapposizione degli effetti, dalla somma dei contributi del generatore di caratterizzazione (primo termine al secondo membro) e dei generatori indipendenti interni (g_v, nel caso considerato). Affinché la (5.3) sia dimensionalmente corretta, R_{eq} avrà le dimensioni di una resistenza e, come vedremo a breve, dipenderà dalle resistenze presenti nel circuito; $i(t)$ è la corrente erogata dal generatore di caratterizzazione mentre $g_v(t)$ è la tensione ai capi di A−B erogata dai generatori indipendenti presenti nel circuito N_R. La (5.4) è la relazione duale rispetto alle (5.3) per la quale abbiamo considerato un generatore di tensione (di caratterizzazione).

Nelle (5.3) e (5.4) si è indicata con R_{eq} la resistenza equivalente del circuito in quanto è intuitivo immaginare che esse siano uguali per le due relazioni che, seppur con approcci differenti, descrivono lo stesso sotto−circuito. Del resto, se rendiamo passivo (o "passivizziamo") il sotto−circuito di Fig. 5.2 spegnendo i generatori indipendenti di tensione e corrente presenti (sostituendo al loro posto, rispettivamente, corto circuiti e circuiti aperti) otteniamo il circuito di Fig. 5.3. Così facendo, è facile convincersi che il sotto−circuito visto ai terminali A−B equivale ad una resistenza equivalente, quella che abbiamo detto R_{eq} e che ciò è vero in entrambi i casi delle (5.3) e (5.4).

Osserviamo che avendo fatto la convenzione dell'utilizzatore al sotto−circuito N_R di Fig. 5.2, nelle (5.3) e (5.4), come nelle (2.12) e (2.13) della Lezione 2, troviamo un segno positivo davanti alla R_{eq} e $1/R_{eq}$ rispettivamente.

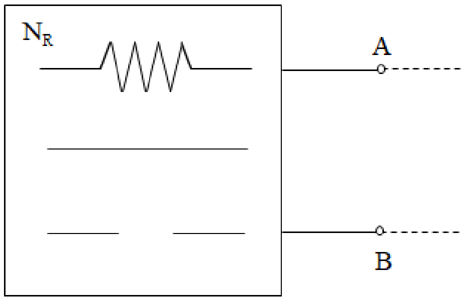


Fig. 5.3 – Sotto−circuito di Fig. 5.2 reso passivo.

Dalle (5.3) e (5.4) deduciamo anche che le relazioni caratteristiche sono uguali quando si verifica:

$$g_v(t) = -\mathrm{R}_{eq} g_i(t) \tag{5.5}$$

Ora quello che vogliamo fare in dettaglio, però, è dare una interpretazione approfondita delle relazioni (5.3) e (5.4).

Cominciamo con la relazione (5.3). Questa relazione caratteristica è "controllata in corrente" e allora alimento la coppia di terminali A−B del sotto−circuito di Fig. 5.2 con un generatore di corrente (di caratterizzazione) che eroga una corrente $i(t)$ e misuro la tensione ai terminali A−B, $v(t)$, con un voltmetro come in Fig. 5.4.

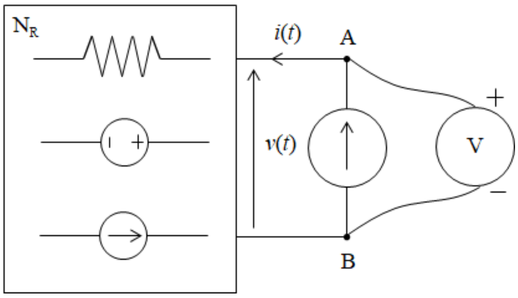


Fig. 5.4 – Sotto−circuito N_R controllato in corrente ai terminali A−B.

Si osservi che quando il generatore di corrente è spento ed erogherà corrente nulla[2], allora il voltmetro misurerà la *tensione a vuoto* V_0 come indicato in Fig. 5.5.

[2] Si ricordi a tal proposito che spegnere un generatore ideale di corrente significa sostituirlo con un circuito aperto.

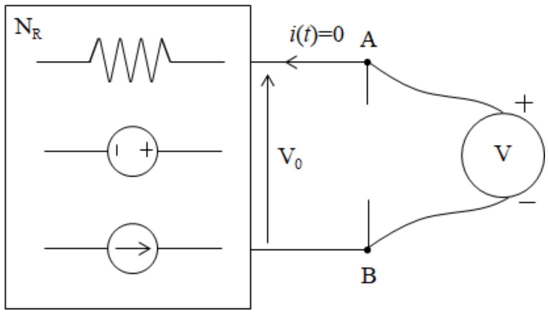


Fig. 5.5 – Sotto–circuito N_R controllato in corrente, con corrente nulla.

Dualmente la relazione (5.4) è controllata in tensione. In tal caso, alimento la coppia di terminali A−B con un generatore di tensione $v(t)$ e misuro la corrente $i(t)$ che attraversa il generatore di tensione con un amperometro come in Fig. 5.6.

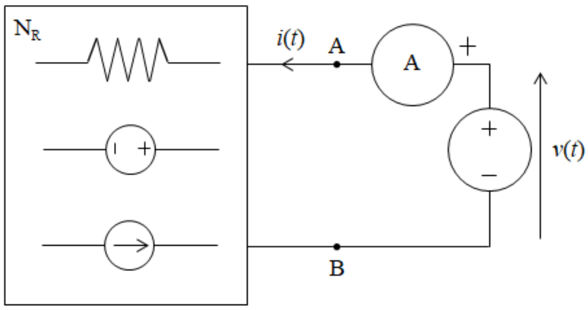


Fig. 5.6 – Sotto–circuito N_R controllato in tensione ai terminali A–B.

Si osservi che quando il generatore di tensione erogherà tensione nulla allora l'amperometro misurerà la *corrente di corto circuito* I_{cc} come indicato in Fig. 5.7.

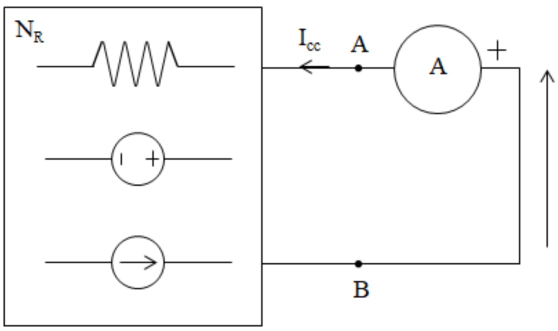


Fig. 5.7 – Sotto–circuito N_R controllato in tensione e con tensione nulla.

Si osservi che, per il circuito di Fig. 5.4 e Fig. 5.6, l'utilizzo rispettivamente del voltmetro e dell'amperometro non deve farci preoccupare in quanto non altera il funzionamento del circuito[3].

Procediamo con la nostra analisi.

Ora, in riferimento alla Fig. 5.4, osserviamo che la tensione che misura il voltmetro dipende dai generatori interni al sotto−circuito N_R e dal generatore di corrente (di caratterizzazione) opportunamente posto tra i terminali A−B. Possiamo, quindi, fare riferimento al principio di sovrapposizione degli effetti e scrivere:

$$v(t) = v_{est}(t) + v_{int}(t), \tag{5.6}$$

La (5.6) va confrontata con la (5.3), cercando una relazione tra le due.

Osserviamo che ognuno dei due termini $v_{est}(t)$ e $v_{int}(t)$ della (5.6), contributi alla tensione relativi rispettivamente ai generatori esterni (quello di caratterizzazione) ed a quelli interni (indipendenti), va valutato quando i generatori non interessati sono spenti. Quindi utilizzeremo nei due casi due circuiti ausiliari per poter considerare la sovrapposizione degli effetti.

Quando il generatore di corrente $i(t)$ è spento abbiamo $v_{int}(t)$. Questo è il caso del circuito di Fig. 5.5 e quindi la tensione $v_{int}(t)=V_0$.

Quando spegniamo i generatori interni abbiamo la $v_{est}(t)$. Il sotto−circuito N_R reso passivo è quello che si ottiene spegnendo tutti i generatori indipendenti presenti al suo interno come abbiamo fatto in Fig. 5.8. In questo caso i terminali A−B vedono il sotto−circuito

---

[3] Affinché questo sia verificato deve accadere che il voltmetro non deve avere passaggio di corrente e l'amperometro non deve avere una caduta di tensione. Questo accadrebbe se i due dispositivi fossero ideali. Nella realtà avranno al loro interno una resistenza seppure trascurabile che introduce un passaggio di corrente e una caduta di tensione rispettivamente. Pertanto, ciò che dovremmo ammettere per garantire che la presenza dei due strumenti di misura non alteri il funzionamento del circuito è che la corrente deviata nel voltmetro deve essere trascurabile rispetto alla corrente del generatore di corrente e la tensione dell'amperometro deve essere trascurabile rispetto a quella del generatore di tensione. Ciò si realizza con, rispettivamente, una resistenza elevatissima interna al voltmetro (nel caso ideale illimitata) e una resistenza piccolissima interna all'amperometro (nel caso ideale nulla).

N_R composto unicamente da resistenze e dunque in questo caso ha senso introdurre per il circuito una resistenza equivalente che abbiamo chiamato R_{eq}.

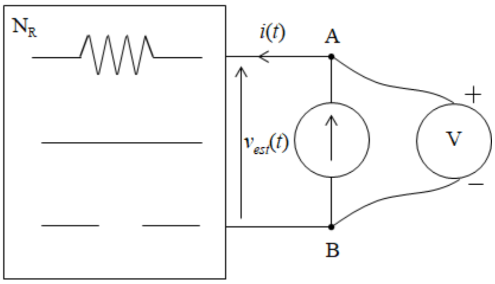


Fig. 5.8 – Sotto−circuito N_R controllato in corrente e reso passivo.

Dunque, abbiamo $v_{est}(t)$=$R_{eq}i(t)$ dove R_{eq} rappresenta la resistenza equivalente vista dai terminali A−B del sotto−circuito reso passivo di Fig. 5.8. In conclusione, possiamo scrivere dalla (5.6):

$$v(t) = R_{eq}i(t) + V_0 \tag{5.7}$$

La (5.7) è la (5.6) nella quale abbiamo sostituito al posto di $v_{est}(t)$, $R_{eq}i(t)$ e al posto di $v_{int}(t)$, V_0.

Ora confrontando la (5.3) e la (5.7) ne deduciamo che $g_v(t)$= V_0. Pertanto, possiamo affermare che la relazione caratteristica di un sotto−circuito resistivo lineare controllato in corrente ha la forma della (5.7) e cioè è la somma di un contributo dovuto alla resistenza interna al circuito reso passivo (o "passivizzato") e un contributo dato dai generatori interni che si sostanzia ai terminali A−B con la tensione a vuoto V_0 diversa da zero.

In riferimento alla Fig. 5.6, dualmente rispetto al caso trattato in precedenza, osserviamo che la corrente misurata dall'amperometro dipende dai generatori indipendenti interni a N_R e dal generatore di tensione (di caratterizzazione) opportunamente posto tra i terminali A−B. Possiamo, come già fatto in precedenza, fare riferimento al principio di sovrapposizione degli effetti e quindi scrivere:

$$i(t) = i_{est}(t) + i_{int}(t), \tag{5.8}$$

Ognuna delle due componenti della (5.8) va valutata quando i generatori non interessati sono spenti. Ossia:

Quando il generatore di tensione $v(t)$ è spento abbiamo $i_{int}(t)$. Questo è il caso del circuito di Fig. 5.7 e quindi la corrente $i_{int}(t)=\mathrm{I}_{cc}$. Quindi utilizzeremo nei due casi due circuiti ausiliari per poter considerare la sovrapposizione degli effetti.

Quando spegniamo i generatori interni abbiamo la $i_{est}(t)$. Il sotto−circuito $\mathrm{N_R}$ reso passivo è quello che si ottiene spegnendo tutti i generatori presenti al suo interno come abbiamo fatto in Fig. 5.9. In questo caso i terminali A−B vedono il sotto−circuito $\mathrm{N_R}$ come composto unicamente da resistenze e dunque in questo caso ha senso introdurre una resistenza equivalente che abbiamo chiamato $\mathrm{R_{eq}}$.

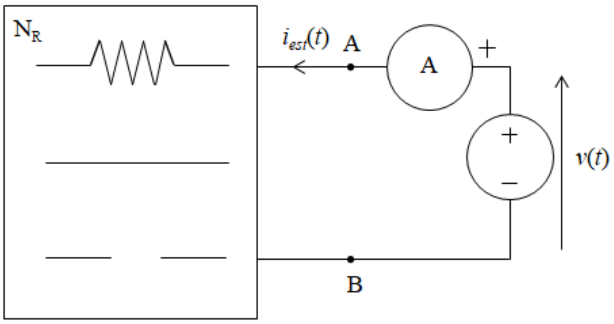


Fig. 5.9 – Sotto−circuito N_R controllato in tensione e reso passivo.

Dunque, abbiamo $i_{est}(t)=v(t)/\mathrm{R_{eq}}$ dove $\mathrm{R_{eq}}$ rappresenta la resistenza equivalente vista dai terminali A−B del sotto−circuito reso passivo di Fig. 5.9. In conclusione, possiamo scrivere dalla (5.8):

$$i(t) = \frac{v(t)}{\mathrm{R_{eq}}} + \mathrm{I_{cc}} \tag{5.9}$$

La (5.9) è la (5.8) dove abbiamo sostituito al posto di $i_{est}(t)$, $v(t)/\mathrm{R_{eq}}$ e al posto di $i_{int}(t)$, $\mathrm{I_{cc}}$.

Ora confrontando la (5.4) e la (5.9) ne deduciamo che $\mathrm{g}_i(t)= \mathrm{I_{cc}}$. Pertanto, possiamo affermare che la relazione caratteristica di un sotto−circuito resistivo lineare controllato in tensione ha la forma della (5.9) e cioè è la somma di un contributo dovuto alla resistenza interna al circuito reso passivo e un contributo dato dai generatori indipendenti interni che si sostanzia ai terminali A−B con la corrente di corto circuito $\mathrm{I_{cc}}$ diversa da zero.

Osserviamo che poiché il sotto−circuito N_R è adinamico (non ci sono elementi dinamici) possiamo sottintendere la dipendenza dal tempo e procedere nel seguito con grandezze indicate con la lettera maiuscola. Consideriamo allora le relazioni (5.7) e (5.9) e le riscriviamo come:

$$V = R_{eq}\, I + V_0 \tag{5.10}$$

$$I = \frac{V}{R_{eq}} + I_{cc} = G_{eq} V + I_{cc} \tag{5.11}$$

dove è facile verificare che, coerentemente alla (5.5) si ha:

$$V_0 = -R_{eq}\, I_{cc} \tag{5.12}$$

Osserviamo che confrontando la (5.10) con la relazione caratteristica di un generatore reale di tensione data dalla 2.12 della Lezione 2, troviamo una perfetta concordanza. Viceversa, confrontando la (5.11) con la relazione caratteristica di un generatore reale di corrente data dalla 2.13 della Lezione 2, troviamo una discordanza di segno davanti al termine noto al secondo membro. Ciò è dovuto al fatto che, avendo fatto la convenzione dell'utilizzatore in tutti i casi, il generatore j della Lezione 2 è stato scelto con verso opposto a quello del generatore che erogherà corrente I_{cc}. In altre parole, dobbiamo porre $j = -I_{cc}$ se vogliamo utilizzare un generatore reale di corrente che generi una corrente del verso indicato nella Fig. 2.14 della Lezione 2.

Le relazioni caratteristiche equivalenti (5.10) e (5.11) le possiamo rappresentare nel piano *I-V* attraverso un'unica retta caratteristica. Ricordando la Fig. 2.13 e Fig. 2.15 della Lezione 2, e tenendo conto che per le (5.10) e (5.11) abbiamo fatto la convenzione dell'utilizzatore, in Fig. 5.12 abbiamo rappresentato tale retta. Osserviamo che questa retta interseca gli assi in due punti notevoli: V_0 e I_{cc}.

Interpretiamo V_0 e I_{cc}.

Ricordiamo che, quando colleghiamo i terminali A−B con un generatore di corrente spento (vedi la Fig. 5.5 e poi la Fig. 5.10) abbiamo che la corrente I si annulla e che la tensione V assume valore V_0 che rappresenta la cosiddetta ***tensione a vuoto***.

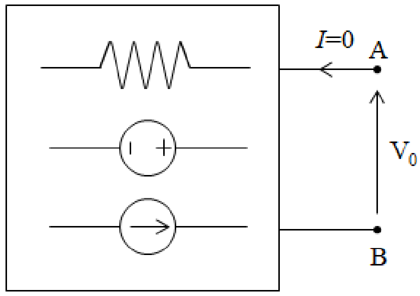


Fig. 5.10 – Tensione a vuoto ai terminali A–B del circuito N_R di Fig. 5.2.

Ricordiamo anche che, quando colleghiamo i terminali A–B con un generatore di tensione spento (vedi la Fig. 5.7 e poi la Fig. 5.11) abbiamo che la tensione V si annulla e la corrente I assume il valore I_{cc} che rappresenta la cosiddetta ***corrente di corto circuito***.

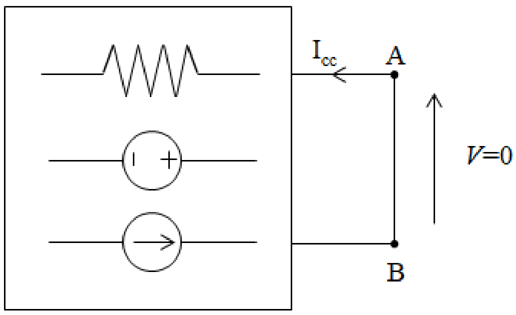


Fig. 5.11 – Corrente di corto circuito ai terminali A–B del circuito N_R di Fig. 5.2.

La R_{eq} è la pendenza della retta di Fig. 5.12. Ricordiamo che questa resistenza rappresenta la resistenza equivalente di N_R vista ai terminali A–B quando al suo interno sono stati spenti i generatori.

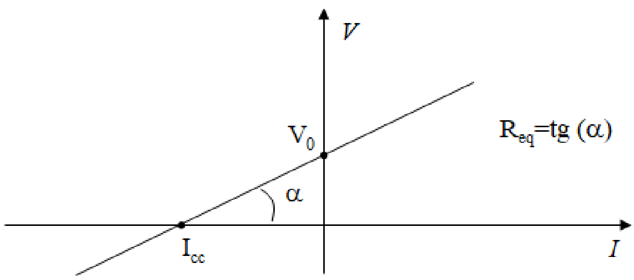


Fig. 5.12 – Retta caratteristica del sotto–circuito N_R di Fig. 5.2.

Osserviamo che, non conoscendo la natura interna del circuito N_R siamo in grado di individuare la sua retta caratteristica se misuriamo la tensione a vuoto e la corrente di corto circuito ai morsetti A−B, oppure se conosciamo la resistenza equivalente del circuito e la tensione a vuoto o se, infine, conosciamo la resistenza equivalente e la corrente di corto circuito.

È chiaro che ai terminali A−B misuriamo una tensione a vuoto o una corrente di corto circuito non nulle se in N_R vi sono generatori.

Ora veniamo al nocciolo del teorema del generatore equivalente.

Il fatto che la caratteristica tensione-corrente del sotto−circuito N_R abbia l'espressione (5.10) e (5.11) suggerisce di "costruire" un circuito semplice (perché semplice è la caratteristica!) che "simuli" il comportamento di N_R sfruttando la sua stessa caratteristica. Il TGE asserisce che esistono due circuiti equivalenti a N_R che realizzano questo proposito. Abbiamo rappresentato in Fig. 5.13 il ***circuito equivalente secondo Thévenin*** e abbiamo rappresentato in Fig. 5.14 ***il circuito equivalente secondo Norton***. Si tratta rispettivamente di un generatore reale di tensione e di un generatore reale di corrente. Entrambi hanno per resistenza la resistenza equivalente R_{eq}. Nel primo caso il generatore ideale di tensione eroga una tensione pari alla tensione a vuoto V_0; mentre nel secondo caso il generatore ideale di corrente eroga una corrente pari alla corrente di corto circuito I_{cc}.

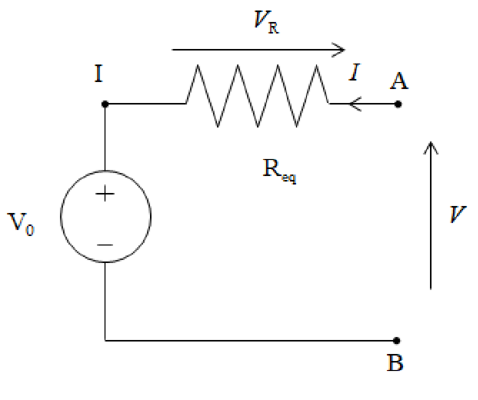


Fig. 5.13 – Circuito equivalente secondo Thevenin.

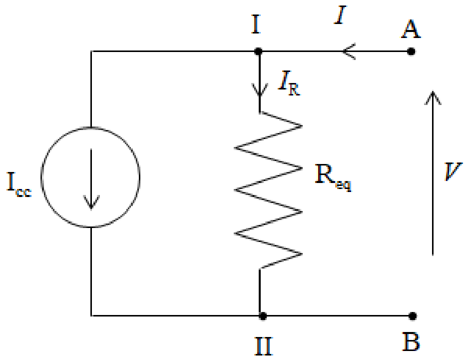


Fig. 5.14 – Circuito equivalente secondo Norton.

Si osservi come sono stati scelti il verso della tensione del generatore di Fig. 5.13 e il verso della corrente del generatore di Fig. 5.14.

Per convincerci di quanto afferma il TGE nelle due versioni Thevenin e Norton. Cominciamo con il calcolare la relazione caratteristica *I-V* ai terminali A−B dei semplici circuiti rappresentati in Fig. 5.13 e Fig. 5.14. Lo abbiamo fatto per entrambi i generatori reali nella Lezione 2 ed abbiamo ottenuto la (2.12) e (2.13). Tuttavia, ricordiamo che in quel caso, il generatore di corrente aveva un verso opposto a quello di Fig. 5.14.

Cominciamo dal circuito equivalente secondo Thévenin di Fig. 5.13. Applicando la seconda legge di Kirchhoff all'unica maglia del circuito di figura, si ha:

$$\mathrm{V}_0 + V_\mathrm{R} - V = 0. \tag{5.13}$$

Sostituendo nella (5.13) la relazione caratteristica del resistore $V_\mathrm{R} = \mathrm{R}_{eq}\, I$ si ha, ugualmente alla (2.12) della Lezione 2:

$$V = \mathrm{R}_{eq}\, I + \mathrm{V}_0, \tag{5.14}$$

Che corrisponde proprio alla (5.10). E quindi abbiamo dimostrato che il circuito di Fig. 5.13 realizza la caratteristica (5.10).

Consideriamo il circuito equivalente secondo Norton di Fig. 5.14. Applicando la I legge di Kirchhoff al nodo I si ha:

$$I - \mathrm{I}_{cc} - I_\mathrm{R} = 0. \tag{5.15}$$

Sostituendo nella (5.15) la relazione caratteristica $I_R = V/R_{eq}$ del resistore si ha, analogamente alla (2.13) della Lezione 2 (a meno del segno davanti al termine forzante dovuto alla scelta diversa del verso della corrente forzato dal generatore):

$$I = \frac{V}{R_{eq}} + I_{cc} = G_{eq}V + I_{cc} \tag{5.16}$$

E quindi abbiamo dimostrato che il circuito di Fig. 5.14 realizza la caratteristica (5.11).

Osserviamo che, confrontando la (5.14) e la (5.16) si ricava che i circuiti di Fig. 5.13 e Fig. 5.14 sono equivalenti se si sceglie:

$$V_0 = -R_{eq}\, I_{cc} \tag{5.17}$$

e quindi ritroviamo la (5.5) e la (5.12). In questo caso, i due circuiti sono equivalenti! Converrà utilizzarne uno piuttosto che un altro a seconda se conviene calcolare ai terminali A−B la tensione a vuoto o la corrente di corto circuito. In ogni caso si potrà passare da uno all'altro utilizzando la (5.17). Ma c'è di più. Grazie alla (5.17) è sempre possibile trasformare, in un circuito, un generatore reale di tensione in uno di corrente e viceversa, basta garantire che le resistenze siano le stesse e che è verificata la (5.17). Utilizzeremo questo strumento nella risoluzione dell'esercizio 1.1.3 nel seguito.

Osserviamo che la (5.17) può essere utilizzata per calcolare la R_{eq} quando non abbiamo accesso all'interno del sotto−circuito. Possiamo, infatti, ai terminali A−B, calcolare la tensione a vuoto V_0 e la corrente di corto circuito I_{cc} e poi calcolare la R_{eq}:

$$R_{eq} = -\frac{V_0}{I_{cc}} \tag{5.18}$$

Le relazioni (5.14) e (5.16) bastano a dimostrare il teorema e quindi abbiamo mostrato che un qualsiasi sotto−circuito N_R può essere sostituito da un circuito come quello di Fig. 5.13 e Fig. 5.14 e che questi due sono equivalenti tra loro se si verifica la condizione (5.17).

In conclusione:

ogni sotto−circuito resistivo lineare può essere sostituito da un circuito semplice realizzato da un generatore reale di tensione (Thevenin) (Fig. 5.13) o da un generatore reale di corrente (Norton) (Fig. 5.14), purché:

- la resistenza utilizzata sia pari a quella equivalente del sotto−circuito visto dai terminali A−B quando è stato reso passivo;
- la tensione del generatore di tensione sia pari alla tensione a vuoto V_0 che si misura ai terminali A−B. (La corrente del generatore di corrente sia pari alla corrente di corto circuito I_{cc} ai terminali A−B).

1.1 Applicazioni del teorema

Il TGE può essere molto utile quando vogliamo isolare un componente di un circuito o in generale una parte del circuito così come abbiamo rappresentato in Fig. 5.1 con il circuito N_D.

In particolare, possiamo avere il caso che il circuito N_D sia composto da un unico elemento dinamico, un induttore o un condensatore (vedi l'esercizio 1.1.1 e 1.1.2); oppure che sia composto da un elemento non lineare come un diodo (vedi esercizio 1.1.3).

Come vedremo negli esercizi 1.1.4 e 1.1.5, il TGE può essere anche utile quando vogliamo isolare una resistenza come vedremo nei prossimi due esercizi.

1.1.1 Esercizio con induttore

Consideriamo il circuito di Fig. 5.15. Vogliamo isolare l'induttore e determinare il circuito equivalente visto dall'induttore. Dobbiamo operare sul circuito di Fig. 5.16

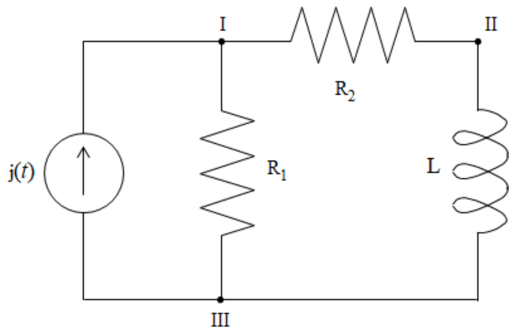


Fig. 5.15 – Circuito con un induttore.

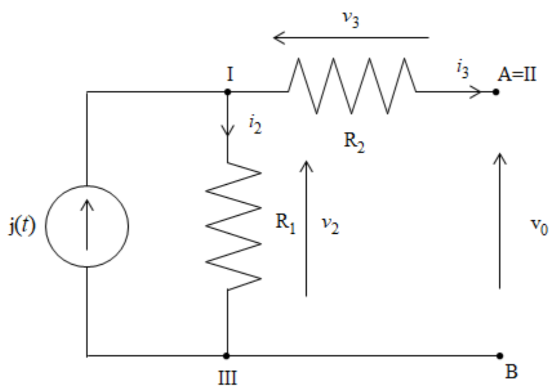


Fig. 5.16 – Sotto–circuito adinamico del circuito di Fig. 5.15 su cui operare.

Vogliamo determinare il circuito equivalente visto dai terminali A–B di Fig. 5.16. Dobbiamo decidere se secondo Thevenin o secondo Norton. Poiché in serie ai terminali A–B si trova una resistenza possiamo considerare conveniente voler determinare Thevenin e quindi calcolare una tensione a vuoto.

Cominciamo con il calcolo della resistenza equivalente R_{eq} utilizzando il circuito di Fig. 5.17. Per far ciò bisogna innanzitutto passivizzare la rete spegnendo i generatori indipendenti interni (ossia j(t)). È facile verificare che R_1 è in serie a R_2, e quindi si ha:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \tag{5.19}$$

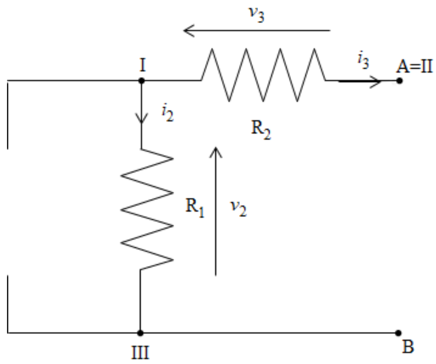


Fig. 5.17 – Sotto−circuito Fig. 5.16 reso passivo per il calcolo della resistenza equivalente.

ATTENZIONE! Dalla Fig. 5.17 potrebbe sembrare che il resistore R_2 venga a trovarsi in serie ad un corto circuito inducendoci a pensare che esso non conti affatto! In realtà, però, ricordando il teorema del generatore equivalente di Thèvenin, allorquando si vuole calcolare R_{eq} bisogna, dopo aver passivizzato la rete, collegare ai morsetti A−B un generatore di caratterizzazione (di corrente) che ci aiuterà anche a visualizzare meglio il circuito che stiamo considerando!

Ora calcoliamo la tensione a vuoto $v_0(t)$[4]. In riferimento alla Fig. 5.16, è facile verificare che la tensione a vuoto è uguale alla tensione v_2 in quanto nella resistenza R_2 la corrente è nulla (essendo in serie ad un circuito aperto) e quindi non vi è caduta di tensione. Di questo ci si può convincere anche considerando la maglia costituita dalla resistenza R_1, dalla R_2 e dalla coppia di terminali A−B. La tensione v_2 si può ricavare dalla relazione caratteristica del resistore R_1 tenendo conto che la corrente i_2:

$$i_2(t) = \mathrm{j}(t) \tag{5.20}$$

In conclusione, possiamo scrivere:

$$\mathrm{v}_0(t) = v_2(t) = \mathrm{R}_1 i_2(t) = \mathrm{R}_1 \mathrm{j}(t) \tag{5.21}$$

[4] Abbiamo utilizzato in simbolo $v_0(t)$ invece di V_0 in quanto l'esercizio che stiamo svolgendo riguarda un circuito dinamico in cui la dipendenza temporale, come vedremo nella prossima lezione, ha un ruolo importante nella soluzione del circuito.

In conclusione, possiamo affermare che il circuito di Fig. 5.15 è equivalente a quello di Fig. 5.18 dove R_{eq} è data dalla (5.19) e $v_0(t)$ è data dalla (5.21).

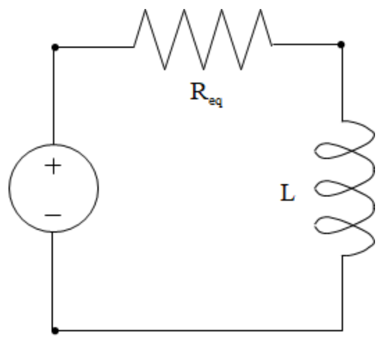


Fig. 5.18 – Circuito semplificato equivalente a quello di Fig. 5.15.

1.1.2 Esercizio con condensatore

Consideriamo il circuito di Fig. 5.19. Vogliamo isolare il condensatore e determinare il circuito equivalente visto dal condensatore.

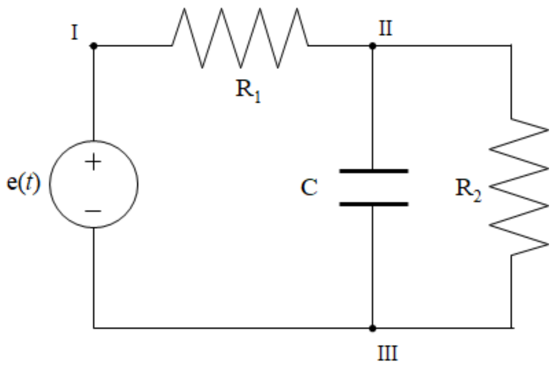


Fig. 5.19 – Circuito con un condensatore.

Vogliamo determinare il circuito equivalente visto dai terminali A–B di Fig. 5.20. Dobbiamo decidere se secondo Thevenin o secondo Norton. Poiché in parallelo ai terminali A–B si trova una resistenza, possiamo considerare conveniente voler determinare Norton e quindi calcolare una corrente di corto circuito come abbiamo rappresentato in Fig. 5.21.

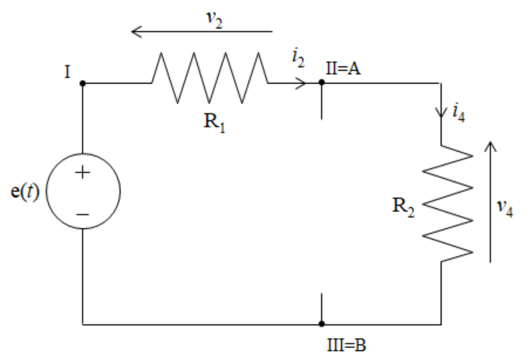


Fig. 5.20 – Sotto–circuito adinamico del circuito di Fig. 5.19 su cui operare.

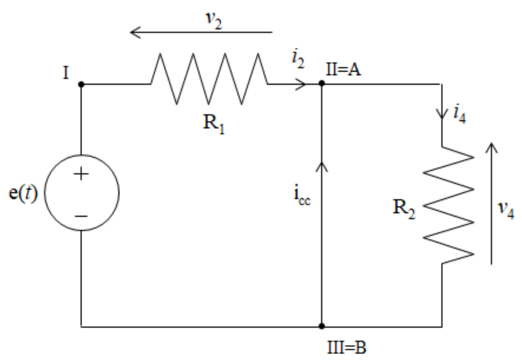


Fig. 5.21 – Sotto–circuito adinamico del circuito di Fig. 5.19 su cui operare.

Cominciamo con il calcolo della resistenza equivalente R_{eq} utilizzando il circuito di Fig. 5.22. È facile verificare che, rispetto ai terminali A–B, R_1 è in parallelo ad R_2, e quindi si ha:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.22}$$

ATTENZIONE: Ancora una volta, per visualizzare correttamente la R_{eq} conviene inserire tra i morsetti A–B un generatore di caratterizzazione (di tensione, stavolta, in accordo con il Teorema di Norton) nella rete passivizzata.

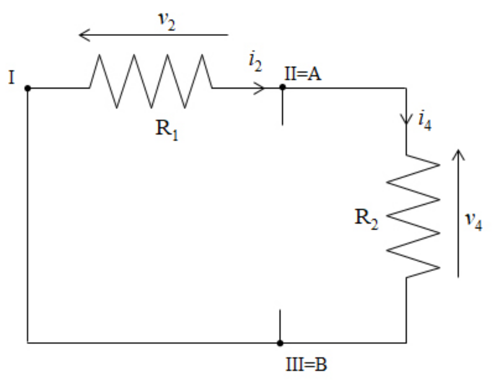


Fig. 5.22 – Sotto–circuito Fig. 5.21 reso passivo per il calcolo della resistenza equivalente.

Ora calcoliamo la corrente di corto circuito $\mathrm{i_{cc}}(t)$[5]. In riferimento alla Fig. 5.21, è facile verificare che la corrente di corto circuito è uguale all'opposto della corrente i_2. Vediamo perché. Innanzitutto, osserviamo che il corto circuito impone sul resistore R_2 una tensione nulla, in questo caso diciamo che il corto circuito tra i terminali A–B ha "cortocircuitato" la resistenza R_2. Se la tensione su R_2, la v_4, è nulla lo è necessariamente anche la corrente i_4, e pertanto al nodo II possiamo scrivere:

$$i_2(t)+\mathrm{i_{cc}}(t)+i_4(t)=i_2(t)+\mathrm{i_{cc}}(t)=0 \Rightarrow \mathrm{i_{cc}}(t)=-i_2(t) \qquad (5.23)$$

Essendo poi la tensione $v_2(t)$ uguale alla tensione del generatore $\mathrm{e}(t)$ poiché uniche tensioni presenti nella maglia costituita dal generatore, dalla resistenza R_2 e dai terminali in corto circuito A–B, si ha:

$$i_2(t)=\frac{v_2(t)}{\mathrm{R}_2}=\frac{\mathrm{e}(t)}{\mathrm{R}_2} \qquad (5.24)$$

[5] Abbiamo utilizzato in simbolo $\mathrm{i_{cc}}(t)$ invece di $\mathrm{I_{cc}}$ in quanto l'esercizio che stiamo svolgendo riguarda un circuito dinamico in cui la dipendenza temporale, come vedremo nella prossima lezione, ha un ruolo importante nella soluzione del circuito.

E quindi infine:

$$i_{cc}(t) = -\frac{e(t)}{R_2} \tag{5.25}$$

In conclusione, possiamo affermare che il circuito di Fig. 5.19 è equivalente a quello di Fig. 5.23 dove R_{eq} è data dalla (5.22) e $i_{cc}(t)$ è data dalla (5.25).

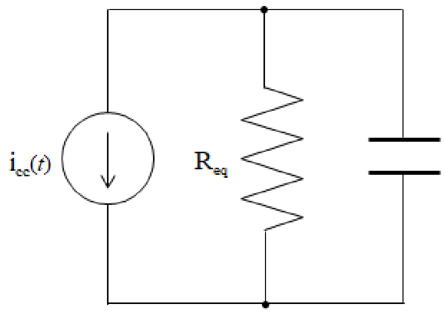


Fig. 5.23 – Circuito semplificato equivalente a quello di Fig. 5.19.

Si osservi come abbiamo scelto il verso del generatore di corrente $i_{cc}(t)$ in Fig. 5.23 e il verso che abbiamo scelto per il calcolo della $i_{cc}(t)$ nella Fig. 5.21

1.1.3 Esercizio con diodo

Consideriamo il circuito di Fig. 5.24. Vogliamo isolare il diodo[6] e determinare il circuito equivalente visto dal diodo.

---

[6] In elettronica, il diodo è un componente elettronico passivo non-lineare a due terminali (bipolo), la cui funzione ideale è quella di permettere il flusso di corrente elettrica in un verso e di bloccarla quasi totalmente nell'altro.

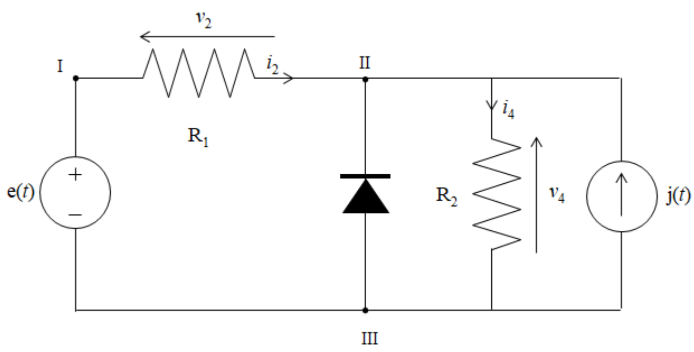


Fig. 5.24 – Circuito con un diodo.

Dobbiamo operare sul circuito di Fig. 5.25. Si osservi come nella figura abbiamo invertito la posizione del bipolo in cui vi era presente il diodo e del parallelo tra il generatore ideale di corrente e la resistenza R_2. Ciò è possibile in quanto non abbiamo alterato la topologia del circuito di partenza, nel senso che i bipoli sono rimasti collegati tra loro così come lo erano nel circuito originale[7].

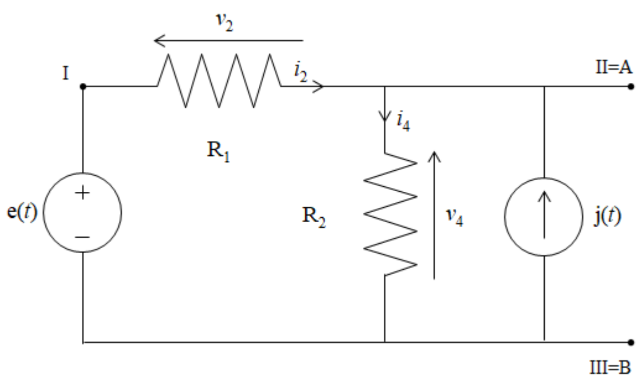


Fig. 5.25 – Sotto–circuito adinamico del circuito di Fig. 5.24 su cui operare.

Vogliamo determinare il circuito equivalente visto dai terminali A–B di Fig. 5.25.

Invece di procedere come nei precedenti esercizi 1.1.1 e 1.1.2, in cui stabilivamo il tipo di generatore reale da sostituire e poi procedevamo con il calcolo delle grandezze richieste, utilizziamo la (5.17) nel modo che segue.

[7] Nella soluzione degli esercizi risulta talvolta molto utile ridisegnare i circuiti in maniera diversa e più vantaggiosa per la risoluzione. E' necessario, però, garantire sempre il rispetto della topologia.

Osserviamo che i terminali A−B vedono il parallelo di due generatori reali: uno di tensione ($e(t)$,R_1) e uno di corrente ($j(t)$,R_2). Come abbiamo già spiegato a pagina 13 commentando la (5.17), è sempre possibile trasformare un generatore reale di tensione in uno di corrente e viceversa se si sceglie la stessa resistenza e se per i valori delle grandezze prodotte dai generatori si utilizza la (5.17).

Decidiamo di trasformare il generatore di tensione ($e(t)$,R_1) in uno di corrente così come abbiamo rappresentato in Fig. 5.26 con:

$$j'(t) = -\frac{e(t)}{R_1} \tag{5.26}$$

Dove abbiamo anche garantito che le resistenze dei due generatori reali ($e(t)$, R_1) e ($j'(t)$, R_1) siano le stesse.

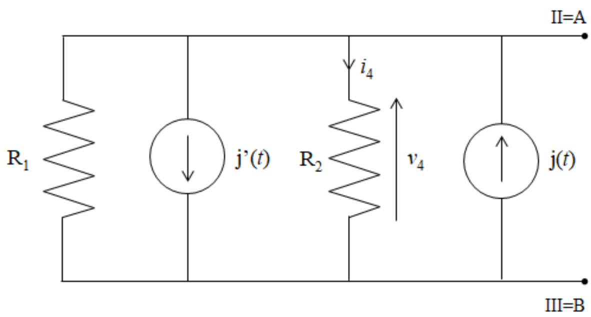


Fig. 5.26 – Sotto−circuito equivalente a quello di Fig. 5.25.

Passare dal sotto−circuito di Fig. 5.26 ad un altro con un unico generatore reale di corrente (vedi la Fig. 5.27) è immediato, e risulterà (per quanto detto sinora):

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.27}$$

e, ricordandoci la (4.38) della Lezione 4 e tenendo conto della (5.26):

$$i_{cc}(t) = j'(t) - j(t) = -\frac{e(t)}{R_1} - j(t) \tag{5.28}$$

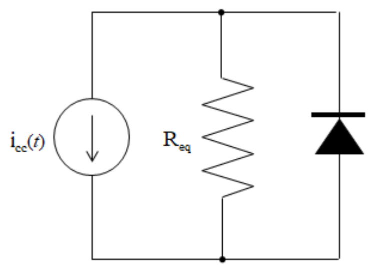


Fig. 5.27 – Circuito equivalente a quello di Fig. 5.24.

Per esercizio si potrebbe verificare che, utilizzando la strategia risolutiva utilizzata negli esercizi 1.1.1 e 1.1.2, si ottiene lo stesso risultato trovato.

1.1.4 Esercizio numerico con TGE secondo Thevenin in un circuito adinamico

Vogliamo calcolare il valore della tensione *V* su R_2 utilizzando il circuito equivalente di tensione (TGE secondo Thevenin) visto dalla resistenza R_2 del circuito di Fig. 5.28.

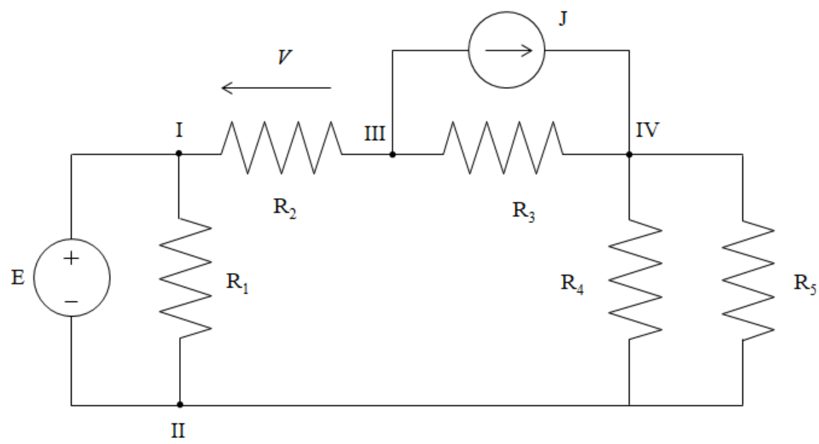


Fig. 5.28 – Circuito resistivo con due generatori su cui utilizzare Thevenin..

I dati del problema sono:

DATI: E=10V; J=3A; R_1=10Ω; R_2=20 Ω; R_3=30 Ω; R_4=4 Ω; R_5=5 Ω.

La prima cosa da fare è isolare o per meglio dire scollegare la R_2 dal circuito di Fig. 5.28 come abbiamo fatto nella Fig. 5.29, dove abbiamo evidenziato i terminali A–B.

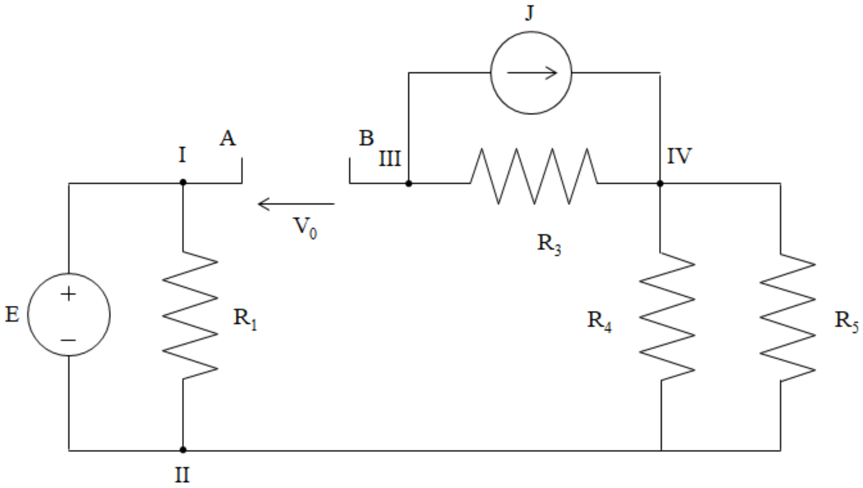


Fig. 5.29 – Calcolo del circuito equivalente visto dai terminali A-B.

La determinazione del generatore equivalente secondo Thevenin consiste nel calcolo della resistenza equivalente R_{eq} vista dai morsetti A–B e nel calcolo della tensione a vuoto V_0 esistente tra i morsetti A–B come indicato in Fig. 5.29.

Cominciamo con il calcolo della resistenza. Sempre immaginando di utilizzare un generatore di caratterizzazione tra i morsetti A–B, conviene considerare la resistenza equivalente parallelo R_{45}=20/9 Ω come in Fig. 5.30. Sempre dalla figura vediamo che il corto circuito derivante dalla presenza del generatore di tensione spento mette fuori gioco la resistenza R_1; pertanto la resistenza equivalente risulta:

$$R_{eq}=R_3+R_{45}=30+20/9=290/9\ \Omega \qquad (5.29)$$

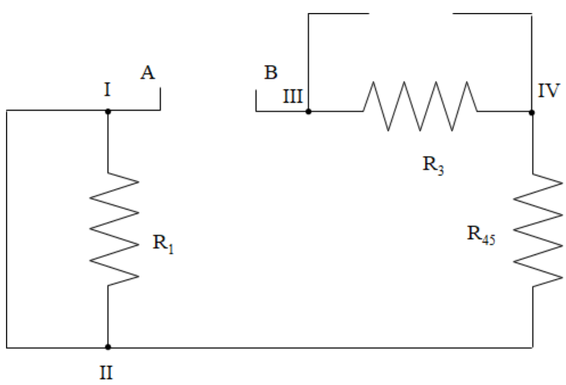


Fig. 5.30 – Circuito utile al calcolo della resistenza equivalente vista dai morsetti A e B del circuito di Fig. 5.29.

Per il calcolo della tensione a vuoto dobbiamo utilizzare il principio di sovrapposizione degli effetti nel circuito di Fig. 5.29.

Possiamo scrivere:

$$V_0=V_{0J}+V_{0E} \tag{5.30}$$

Dove il primo contributo è dovuto al generatore J e il secondo al generatore E. I circuiti da considerare per la determinazione delle due tensioni sono rispettivamente quello di Fig. 5.31 per V_{0J} e quello di Fig. 5.32 per V_{0E}.

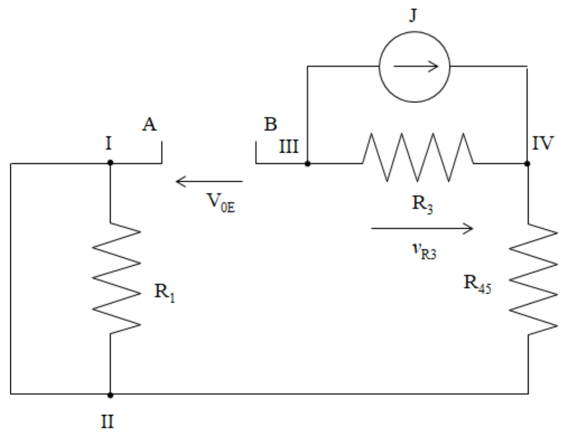


Fig. 5.31 – Calcolo della tensione a vuoto con generatore di tensione spento del circuito di Fig. 5.29.

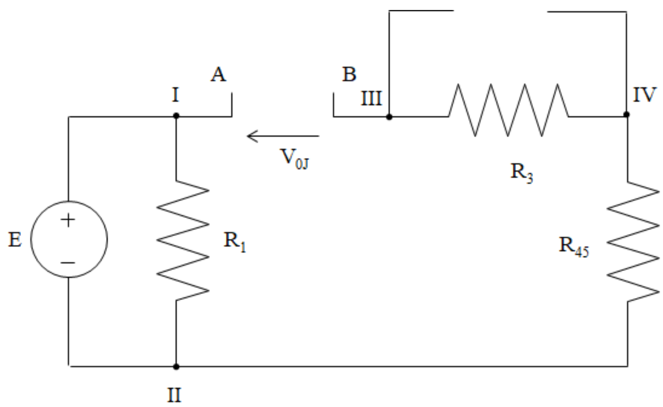


Fig. 5.32 – Calcolo della tensione a vuoto con generatore di corrente spento del circuito di Fig. 5.29.

Cominciamo con il calcolo di V_{0J}. Osserviamo che la resistenza R_1 è cortocircuitata e quindi ha tensione nulla, inoltre in R_{45} non c'è corrente in quanto i morsetti A–B sono aperti; quindi la tensione V_{0J} è pari alla caduta di tensione sul resistore R_3:

$$V_{0J} = V_{R3} = R_3 J = 90V \tag{5.31}$$

Procediamo con il calcolo di V_{0E}. Osserviamo che non vi è passaggio di corrente in R_3 e R_{45} in quanto entrambe sono in serie con un circuito aperto e quindi la tensione in A–B è pari alla caduta di tensione sul resistore R_1 nonché alla tensione del generatore di tensione E:

$$V_{0E} = E = 10V \tag{5.32}$$

Quindi dalla (5.31), (5.32) e (5.33) abbiamo:

$$V_0 = 100V \tag{5.33}$$

Abbiamo ottenuto il circuito equivalente di Fig. 5.33!

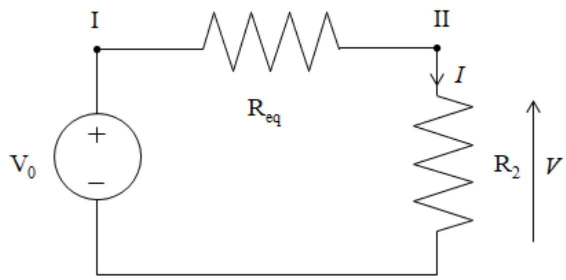


Fig. 5.33 – Circuito equivalente al circuito di Fig. 5.28.

L'ultimo sforzo da compiere è il calcolo della tensione V su R_2 come mostrato in Fig. 5.33. Utilizziamo un partitore di tensione:

$$V = \frac{R_2}{R_2 + R_{eq}} V_0 = \frac{1800}{47} V \tag{5.34}$$

E l'esercizio è risolto! 😊

1.1.5 Esercizio numerico di TGE secondo Norton in un circuito adinamico

Vogliamo determinare il valore della tensione *V* del circuito di Fig. 5.34 con il circuito equivalente secondo Norton visto dalla resistenza R_4.

I dati del problema sono:

DATI: E=10V; J=3A; R_1=10Ω; R_2=20 Ω; R_3=30 Ω; R_4=4 Ω; R_5=5 Ω.

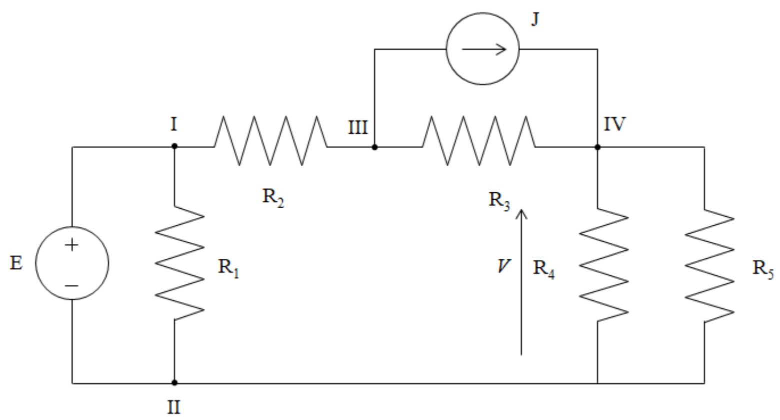


Fig. 5.34 – Circuito resistivo con due generatori su cui utilizzare Norton.

La prima cosa da fare è scollegare o isolare la R_4 dal circuito di Fig. 5.34 come abbiamo fatto in Fig. 5.35. In questo circuito abbiamo evidenziato i morsetti A–B.

<u>La determinazione del circuito equivalente secondo Norton consiste nel calcolo della resistenza equivalente R_{eq} vista dai morsetti A–B e nel calcolo della corrente di corto circuito, diciamola I_{cc}</u>, tra i morsetti A–B.

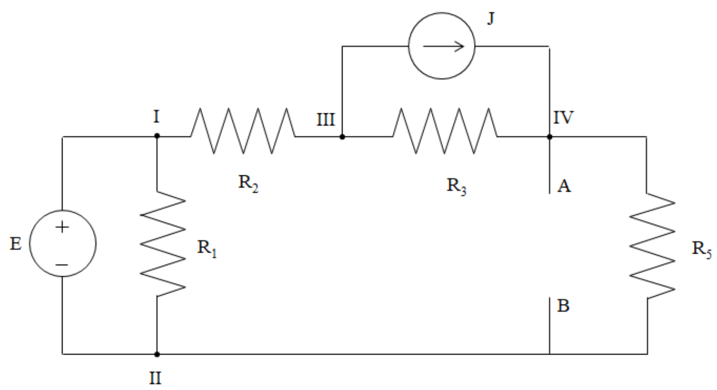


Fig. 5.35 – Calcolo del circuito equivalente visto dai terminali A–B.

Cominciamo con il calcolo della resistenza R_{eq} utilizzando la Fig. 5.36. Dalla figura, sempre immaginando di porre un generatore di caratterizzazione tra i morsetti A–B, vediamo che il corto circuito derivante dalla presenza del generatore di tensione spento mette fuori gioco la resistenza R_1; pertanto la resistenza equivalente risulta essere il parallelo di R_2 e R_3 (in serie tra loro) con R_5:

$$R_{eq}=(R_2+R_3)\|R_5=50/11\ \Omega \tag{5.35}$$

Dove abbiamo usato il simbolo || per indicare il parallelo.

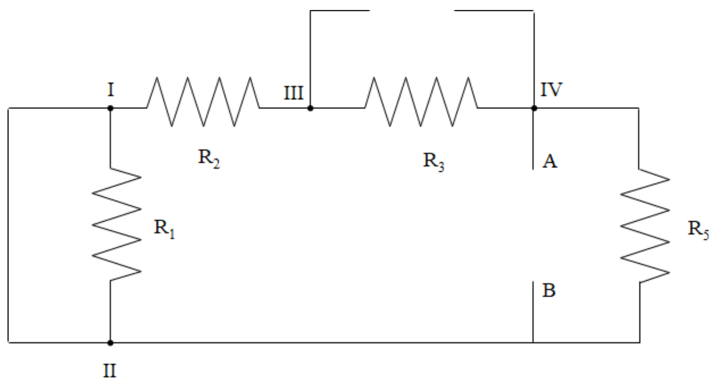


Fig. 5.36 – Calcolo della resistenza equivalente vista dai morsetti A–B.

Per il calcolo della corrente di corto circuito I_{cc} dobbiamo utilizzare il principio di sovrapposizione degli effetti nel circuito di Fig. 5.37.

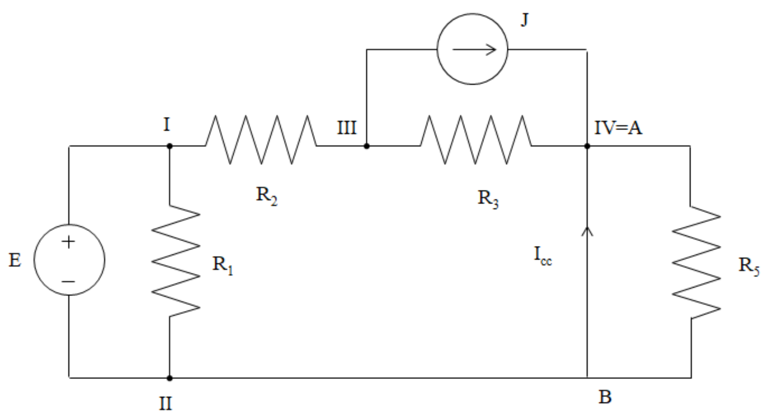


Fig. 5.37 – Calcolo della corrente di corto circuito per il circuito equivalente a quello di Fig. 5.34 secondo Norton visto dai terminali A–B.

Possiamo scrivere:

$$I_{cc}=I_{ccJ}+I_{ccE}. \tag{5.36}$$

I circuiti da considerare per la determinazione delle due correnti sono rispettivamente quello di Fig. 5.38 per la I_{ccJ} e quello di Fig. 5.39 per la I_{ccE}.

Cominciamo con il calcolo di I_{ccJ}. Osserviamo che la resistenza R_1 è cortocircuitata e quindi ha tensione nulla, inoltre in R_5 non c'è tensione in quanto i morsetti A–B sono chiusi in cc; quindi la corrente I_{ccJ} si può calcolare con un partitore tra i resistori R_2 e R_3:

$$I_{ccJ}=-\frac{R_3}{R_2+R_3}J=-9/5\ \text{A} \tag{5.37}$$

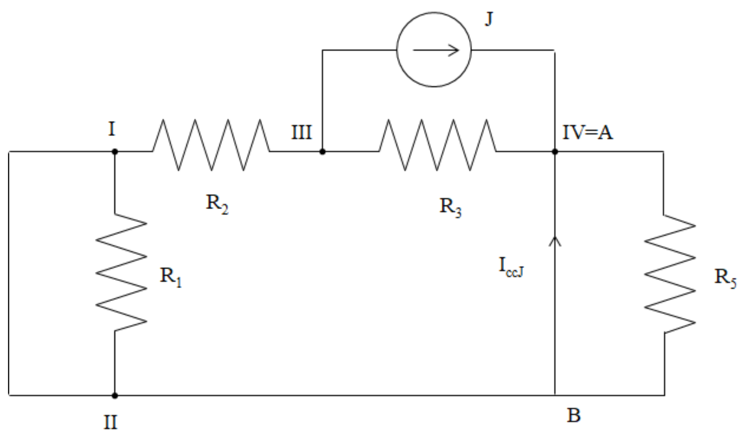


Fig. 5.38 – Calcolo della corrente di corto circuito con generatore di tensione spento.

Procediamo con il calcolo di I_{ccE}. Osserviamo che non vi è passaggio di corrente in R_5 per lo stesso motivo del caso precedente. La corrente I_{ccE} sarà dunque quella che passa nei resistori in serie R_2 e R_3. Ci basta quindi calcolare:

$$I_{ccE}=-\frac{E}{R_2+R_3}=-1/5\text{A} \tag{5.38}$$

Quindi dalle (5.36), (5.37) e (5.38) abbiamo:

$$I_{cc}=-2\ \text{A}. \tag{5.39}$$

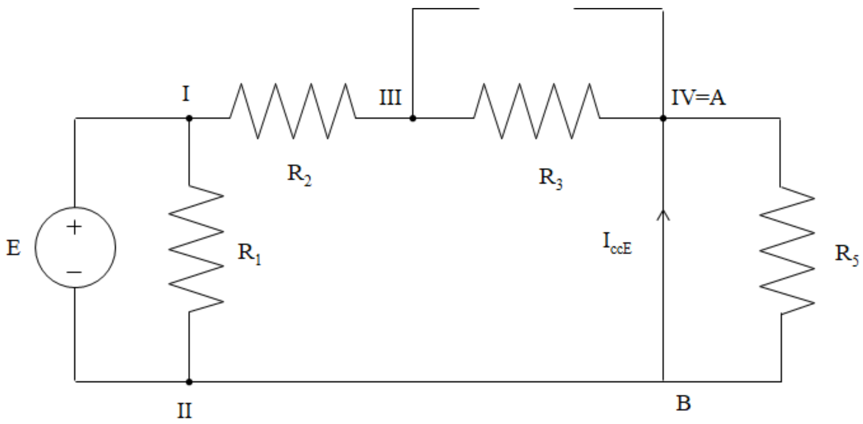


Fig. 5.39 – Calcolo della corrente di corto circuito con generatore di corrente spento.

Possiamo ora calcolare la tensione su R_4 utilizzando il circuito equivalente appena individuato rappresentato in Fig. 5.40.

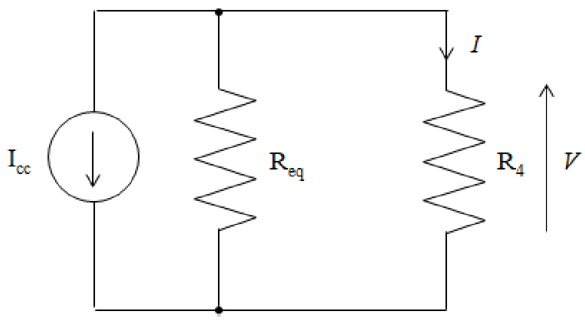


Fig. 5.40 – Circuito equivalente al circuito di Fig. 5.34.

Utilizziamo un partitore di corrente per calcolare la corrente *I*:

$$I = -\frac{R_{eq}}{R_4 + R_{eq}} I_{cc} = \frac{50}{47}\,\mathrm{A} \tag{5.40}$$

E da questa, utilizzando la relazione caratteristica si ottiene:

$$V = R_4 I = \frac{200}{47}\,\mathrm{V} \tag{5.41}$$

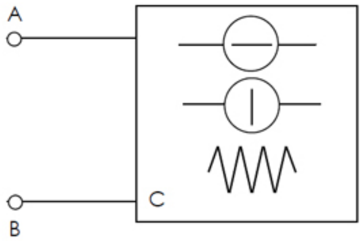
E l'esercizio è risolto! 😉

Indice figure

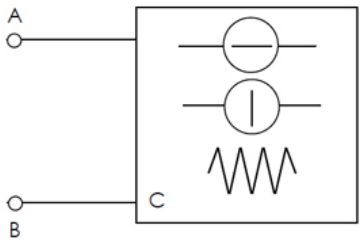
Domande

Teoria

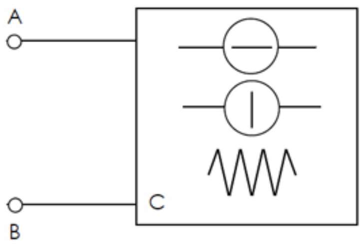
5.1 La resistenza equivalente R_{eq} vista ai morsetti A–B del sotto-circuito di figura, necessaria al calcolo del generatore equivalente secondo Thevenin o Norton, si calcola:



5.2 Come si calcola il valore della tensione erogata dal generatore ideale di tensione utilizzato nel circuito equivalente al sotto-circuito adinamico di figura?

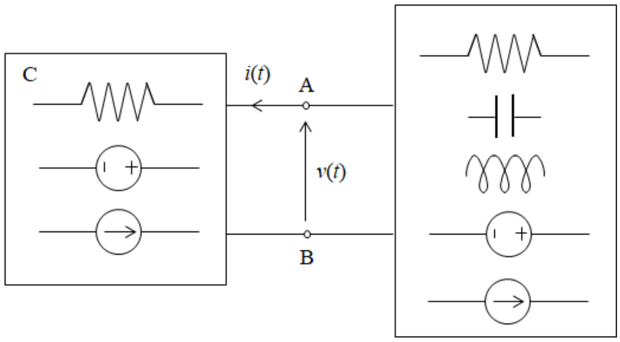


5.3 Come si calcola il valore della corrente erogata dal generatore ideale di corrente utilizzato nel circuito equivalente ad un sotto-circuito adinamico?



5.4 Un generatore reale di tensione (E,R) è equivalente ad uno di reale di corrente (J,R) se ….

5.5 Quale è la relazione caratteristica definita ai morsetti A–B del sotto-circuito C di figura?



5.6 Come si calcola il valore della tensione erogata dal generatore ideale di tensione equivalente al circuito secondo Thevenin?

5.7 Come si calcola il valore della corrente erogata dal generatore ideale di corrente equivalente al circuito secondo Norton?

5.8 In base a quale principio possiamo affermare che un sotto-circuito è equivalente ad un generatore equivalente di tensione o corrente?

5.9 La scelta del generatore equivalente secondo Thevenin o secondo Norton ai morsetti A–B di un sotto-circuito C NON dipende da:

5.10 Quando conviene utilizzare un generatore reale di tensione anziché di corrente quando dobbiamo determinare un circuito equivalente ad un sotto-circuito adinamico C?

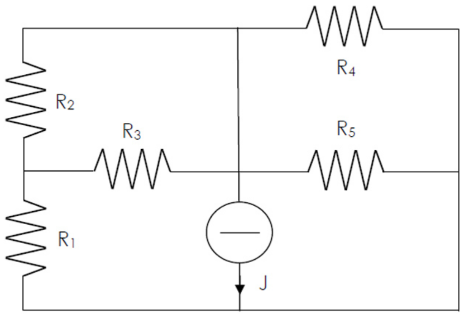
5.11 Cosa stabilisce Il Teorema di Thevenin per circuiti in regime stazionario?

5.12 Cosa stabilisce Il Teorema di Thevenin per circuiti in regime stazionario?

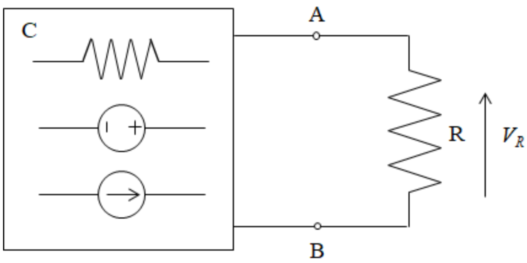
5.13 Quando si può utilizzare il TGE di Norton?

5.14 Quando si può utilizzare il TGE di Thevenin?

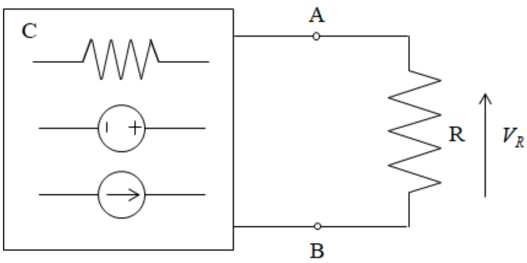
5.15 Per determinare il generatore equivalente visto dalla resistenza R_3 conviene calcolare la tensione a vuoto o la corrente di corto circuito?



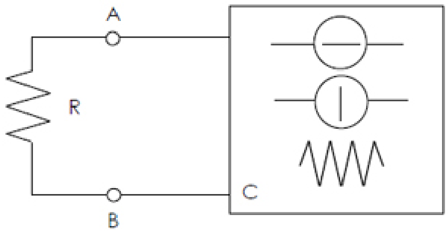
5.16 Nel circuito in figura si consideri il bipolo equivalente di Thevenin del sotto-circuito C. Sia V_0 la tensione a vuoto e R_{eq} la resistenza equivalente. Quale delle seguenti formule è quella corretta per la determinazione della tensione V_R ai capi della resistenza R:



5.17 Nel circuito in figura si consideri il bipolo equivalente di Norton del sotto-circuito C. Sia I_{cc} la corrente di corto circuito e R_{eq} la resistenza equivalente. Quale delle seguenti formule è quella corretta per la determinazione della tensione V_R ai capi della resistenza R:



5.18 Ai fini della determinazione del generatore equivalente alla sotto-rete C in figura, la resistenza R viene utilizzata?



Esercizi

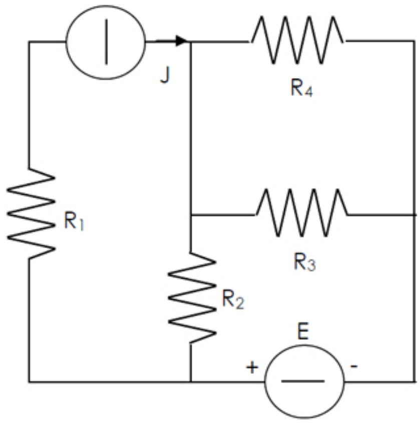
Quando indicato dalla presenza del simbolo @ si tratta di esercizi risolti presi dal sito:

https://autocircuits.org/autocir_home.html. È possibile generare altri esercizi risolti utilizzando il sito che prevede varie categorie di esercizi. Quando trovate il simbolo @, vuol dire che è possibile utilizzare il sito per la tipologia di esercizi che si stanno risolvendo.

5.19 Calcolare il generatore equivalente di Norton visto dalla resistenza R_3

(J=5A, E=10 V; R_1=10 Ω, R_2=2 Ω, R_3=5 Ω, R_4=5 Ω)

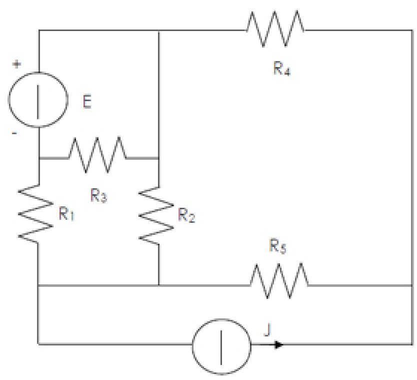
I_{cc} = 10 A



5.20 Al fine di determinare il generatore equivalente di Thevenin visto dalla resistenza R_4, determinare il valore assoluto della corrispondente tensione a vuoto E_0.

(E=20V, J=3A, R_1=10 Ω, R_2=10 Ω, R_3=8 Ω, R_4=6 Ω, R_5=6 Ω)

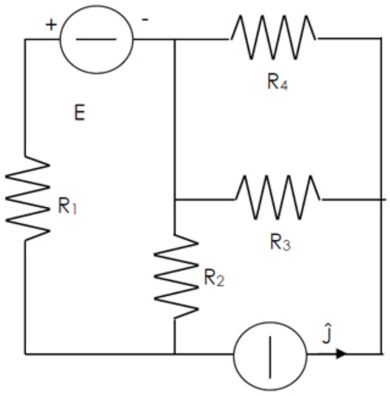
$E_0 = 8$ V



5.21 Calcolare il valore assoluto della corrente di corto circuito I_{cc} che serve al calcolo del bipolo equivalente di Norton visto dalla resistenza R_4. Calcolare anche la R_{eq}.

(J=10A, E=10 V; R_1=10 Ω, R_2=10 Ω, R_3=5 Ω, R_4=5 Ω)

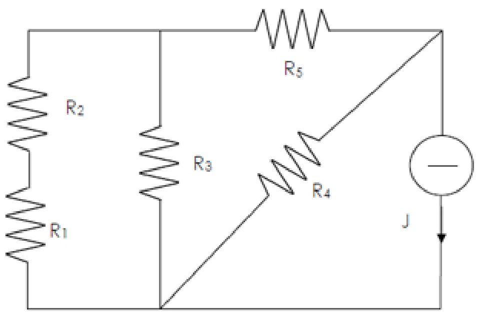
$I_{cc} = 10$ A



5.22 Calcolare il valore assoluto della corrente di corto circuito I_{cc} che serve al calcolo del generatore equivalente di Norton visto dalla resistenza R_2

(J=10A, R_1=12 Ω, R_2=10 Ω, R_3=12 Ω, R_4=8 Ω, R_5=2 Ω)

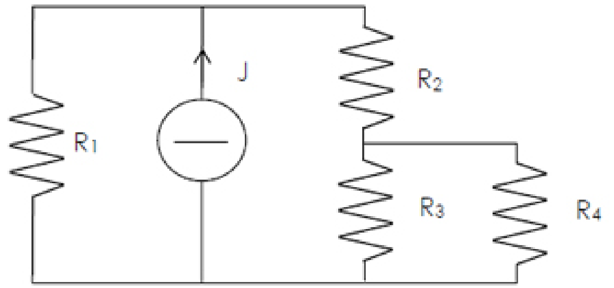
$I_{cc} = 5/2$



5.23 Calcolare il valore assoluto della tensione a vuoto V_0 che serve al calcolo bipolo equivalente di Thevenin visto dalla resistenza R_4

(J=10A, R_1=12 Ω, R_2=10 Ω, R_3=2 Ω, R_4=6 Ω)

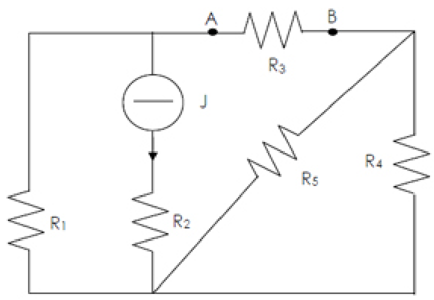
V_0 = 10 Volt



5.24 Calcolare il valore assoluto della tensione a vuoto ai morsetti A-B al fine di calcolare il circuito equivalente di Thevenin visto dal resistore R_3

(J=10A, R_1=12 Ω, R_2=10 Ω, R_3=8 Ω, R_4=6 Ω, R_5=6 Ω)

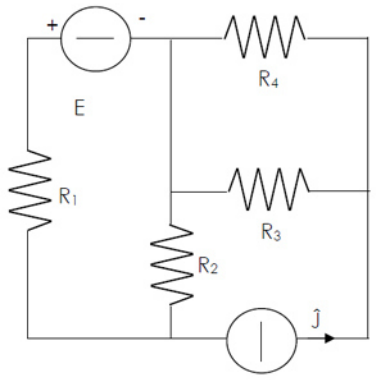
E_0 = 120 V



5.25 Calcolare il valore assoluto della tensione a vuoto V_0 che serve al calcolo del bipolo equivalente di Thevenin visto dalla resistenza R_1

(J=5A, E=10 V; R_1=10 Ω, R_2=2 Ω, R_3=5 Ω, R_4=5 Ω)

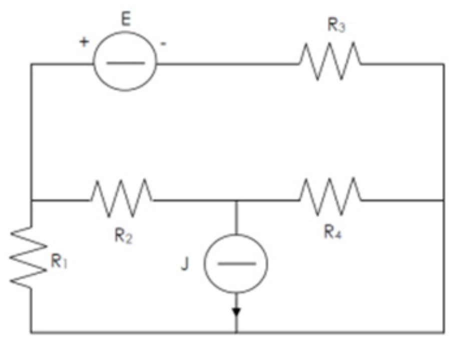
V_0 = 20 V



5.26 Al fine di determinare il generatore equivalente secondo Norton visto dalla resistenza R_2, determinare il valore assoluto della corrente di corto circuito I_{cc} del generatore ideale

(E=3V, J=10A, R_1=12 Ω, R_2=10 Ω, R_3=8 Ω, R_4=6 Ω)

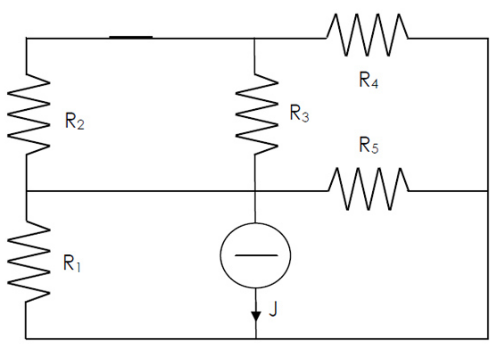
I_{cc} = 103/18 A



5.27 Al fine di determinare il generatore equivalente visto dalla resistenza R_3, determinare la corrente di corto circuito del generatore equivalente secondo Norton

(J=10A, R_1=1 Ω, R_2=2 Ω, R_3=2 Ω, R_4=6 Ω, R_5=2 Ω)

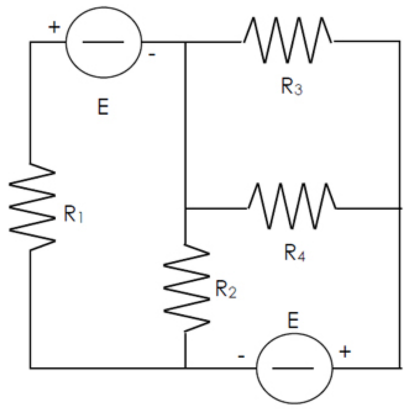
I_{cc}=1 A



5.28 Calcolare il valore assoluto della tensione a vuoto V_0 che serve al calcolo del bipolo equivalente di Thevenin visto dalla resistenza R_2

($E=10$ V; $R_1=10\ \Omega$, $R_2=2\ \Omega$, $R_3=4\ \Omega$, $R_4=4\ \Omega$)

$V_0 = 20/3$ V



5.29 @ Calcolare il circuito equivalente di Thevenin visto dai terminali A–B

$V_0 = -3/2$ V; $R_{eq}=3/4\Omega$