Descrizione dei bipoli

Sommario

1 Descrizione dei bipoli

Come abbiamo già detto nel § 4 della Lezione 1, nella (1.7), la relazione caratteristica di un bipolo tempo-invariante è:

$$f\left(v(t), i(t), \frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}\right) = 0 \tag{2.1}$$

In questo capitolo daremo forma alla relazione caratteristica di ogni tipo di bipolo che utilizzeremo nel corso.

1.1 Il resistore

Il simbolo che rappresenta il bipolo resistore è illustrato in Fig. 2.1.

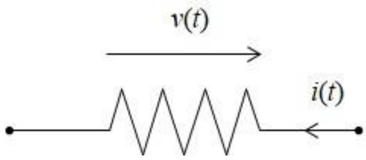


Fig. 2.1 – Simbolo del bipolo resistore.

Un resistore è un bipolo adinamico, nel quale cioè il legame tra tensione e corrente è descrivibile per mezzo di relazioni algebriche, avente la seguente caratteristica:

$$v(t) = r(i(t), t) \ \text{ oppure } \ i(t) = g(v(t), t) \tag{2.2}$$

a seconda che esso sia controllato in corrente o in tensione. Noi tratteremo solo resistori tempo–invarianti e quindi le (2.2) diventano:

$$v(t) = r(i(t)) \ \text{ oppure } \ i(t) = g(v(t)) \tag{2.3}$$

Per quanto appena detto, il resistore è un bipolo controllato sia in corrente che in tensione per cui, per ogni valore di tensione vi è un unico valore di corrente che soddisfa l'equazione caratteristica e viceversa. Si ha, dunque:

$$r(.) = g^{-1}(.) \tag{2.4}$$

Inoltre, noi tratteremo i soli resistori lineari e quindi, avendo usato per il resistore la convenzione dell'utilizzatore come in Fig. 2.1, possiamo scrivere:

$$v(t) = \mathrm{R}i(t) \tag{2.5}$$

Dove R>0 è la ***resistenza*** misurata in ***Ohm*** (Ω). Nel caso in cui avessimo fatto la convenzione del generatore sul bipolo resistore avremmo dovuto considerare un segno negativo davanti al termine al secondo membro della (2.5). Volendo utilizzare la caratteristica controllata in tensione:

$$i(t) = \frac{1}{\mathrm{R}}v(t) = \mathrm{G}v(t) \tag{2.6}$$

dove $\mathrm{G}=\mathrm{R}^{-1} > 0$ è la ***conduttanza*** misurata in ***Siemens*** ($\mathrm{S} = \Omega^{-1}$).

La resistenza R (come la conduttanza G) dipende dalla resistività del conduttore e dalla sua geometria.

In Fig. 2.2 abbiamo rappresentato la ***curva caratteristica*** del resistore lineare, che corrisponde alla relazione caratteristica (2.5), dove la pendenza della retta è la costante R della relazione caratteristica. È stato possibile considerare la curva caratteristica del bipolo in quanto il resistore è un bipolo adinamico.

Dalla Fig. 2.2 possiamo osservare che i punti della retta che costituiscono la curva caratteristica del resistore lineare rappresentano tutte le sue possibili condizioni di funzionamento, ossia tutte le coppie di valori corrente-tensione *(i,v)* che verificano la relazione caratteristica (2.5).

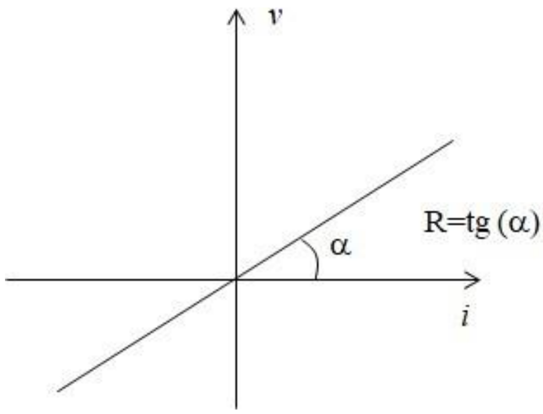


Fig. 2.2 – Curva caratteristica di un resistore lineare.

Introducendo la potenza, come nella (1.4) della Lezione 1, avremo che, avendo fatto la convenzione dell'utilizzatore, la potenza assorbita dal resistore di Fig. 2.1 risulta:

$$\mathrm{p}(t) = v(t)\,i(t) = \mathrm{R}\,\big(i(t)\big)^2 \qquad (2.7)$$

Analizzando la (2.7), otteniamo che il segno della potenza assorbita sarà sempre positivo in quanto R è una costante positiva ed il quadrato della corrente sarà sempre, anch'esso, positivo qualunque sia il segno della corrente. Anche osservando la curva caratteristica di Fig. 2.2 il risultato sarà lo stesso in quanto la retta passa per il primo ed il terzo quadrante nei quali il prodotto ci tensione e corrente risulta sempre positivo. Il resistore è, dunque, un elemento passivo ma la circostanza per la quale la potenza assorbita dallo stesso è nulla solo allorquando tensione e corrente sono entrambe nulle (la sua curva caratteristica passa per l'origine degli assi) ci consente di definire il resistore come un bipolo ***strettamente passivo***.

1.2 Il corto circuito

Il simbolo che rappresenta il bipolo ***corto circuito*** è quello riportato in Fig. 2.3. Il corto circuito si può indicare brevemente anche con ***c.c.***.

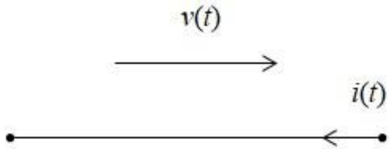


Fig. 2.3 – Simbolo del bipolo corto circuito.

Il corto circuito ha una caratteristica controllata in corrente:

$$v(t) = 0 \tag{2.8}$$

Tale bipolo si può modellare con un resistore di resistenza nulla (R=0). Il c.c. ha una tensione ai suoi capi pari a zero indipendentemente dalla corrente che lo attraversa, o anche per qualsiasi corrente indotta nel corto circuito la tensione è nulla. Osserviamo che il bipolo corto circuito è una idealizzazione. Ogni conduttore per quanto ideale presenta sempre, seppur piccola, una resistenza finita.

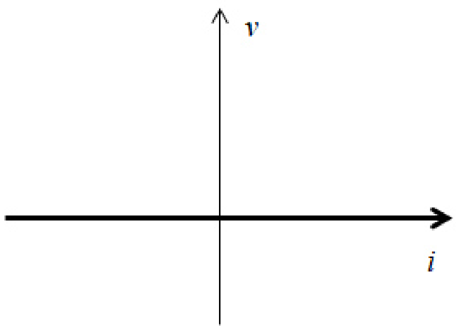


Fig. 2.4 – Curva caratteristica di un corto circuito.

Il c.c. è un bipolo adinamico la cui curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.4. La potenza assorbita o generata da un corto circuito è nulla.

Il bipolo corto circuito è un elemento lineare in quanto verifica la condizione (1.15) della Lezione 1.

1.3 Il circuito aperto

Il simbolo che rappresenta il bipolo ***circuito aperto*** è quello riportato in Fig. 2.5. Il circuito aperto si può indicare brevemente anche con ***c.a.***.

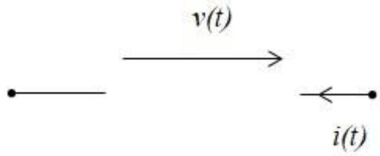


Fig. 2.5 – Simbolo del bipolo circuito aperto.

Il c.a. ha una caratteristica controllata in tensione:

$$i(t) = 0 \tag{2.9}$$

Tale bipolo si può modellare con una conduttanza nulla (G=0). La sua particolarità è di aver una corrente nulla qualunque sia la tensione applicata ai morsetti.

Il c.a. è un bipolo adinamico la cui curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.6. La potenza assorbita o generata da un circuito aperto è nulla.

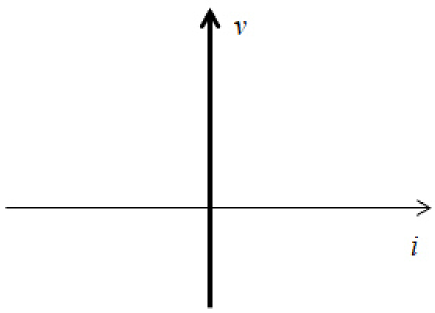


Fig. 2.6 – Curva caratteristica di un circuito aperto.

Il bipolo c.a. è un elemento lineare in quanto verifica la condizione (1.16) della Lezione 1.

1.4 I generatori indipendenti di tensione e di corrente

In questo paragrafo introduciamo i bipoli che alimentano i circuiti, grazie alla cui presenza è possibile osservare valori non nulli delle tensioni e delle correnti nei circuiti. I generatori indipendenti forniscono al circuito l'energia necessaria al suo funzionamento. La caratteristica peculiare di questi bipoli è che le cariche si muovono dal potenziale più basso a quello più alto. Questo accade grazie a delle forze di altra natura (meccaniche, chimiche) esistenti all'interno dei bipoli generatori. Le cariche si muovono in verso contrario al campo elettrico. In questo modo corrente e tensione avranno stesso segno se considerate con lo stesso verso.

I generatori che intendiamo descrivere si chiamano indipendenti per distinguerli da quelli ***dipendenti*** che possono essere controllati o comandati da grandezze presenti nel circuito in cui essi sono inseriti. Si rimanda al § 6 della Lezione 10 lo studio dei generatori controllati.

In questo paragrafo, vedremo prima i bipoli ***generatori ideali*** e poi i ***generatori reali***. L'uso dei generatori ideali, seppur consentito dalla teoria dei circuiti, costituisce una "eccessiva" idealizzazione; pertanto, quando si utilizzano nei circuiti, è necessario verificare che non generino delle configurazioni che mostrino delle "patologie". Nel § 2.2 della Lezione n. 4 sono mostrati alcuni esempi.

1.4.1 I generatori ideali indipendenti di tensione e di corrente

Il simbolo che rappresenta il ***generatore ideale di tensione*** è illustrato in Fig. 2.7.

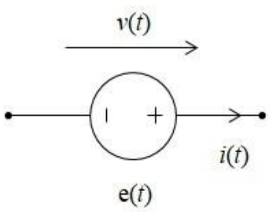


Fig. 2.7 – Simbolo di bipolo generatore ideale indipendente di tensione.

La relazione caratteristica di questo bipolo è la seguente

$$v(t) = \mathrm{e}(t) \tag{2.10}$$

Dove e(t) è una funzione nota. Questo bipolo è un bipolo adinamico, attivo e controllato in corrente. La curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.8. Il grafico di Fig. 2.8 è una "fotografia" della relazione caratteristica in un generico istante. In generale e(t) è una funzione del tempo e quindi i suoi valori non sono costanti.

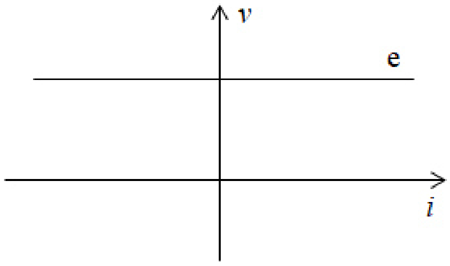


Fig. 2.8 – Curva caratteristica di un generatore ideale indipendente di tensione.

Osserviamo che quando il generatore ideale di tensione è spento si comporta come un corto circuito in quanto $v(t)=0$.

Quando il circuito è a regime stazionario (vedi Lezione 4), i generatori di tensione erogano una tensione costante e in tal caso si usa il simbolo di Fig. 2.9. Si tratta della cosiddetta ***batteria ideale***.

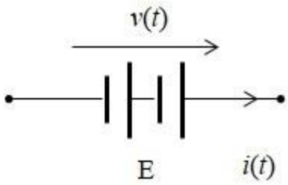


Fig. 2.9 – Simbolo del generatore ideale di tensione costante.

Il simbolo che rappresenta il ***generatore ideale di corrente*** è illustrato in Fig. 2.10.

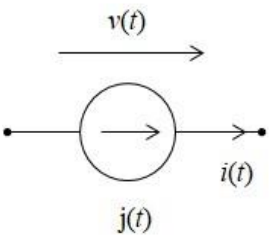


Fig. 2.10 – Simbolo di bipolo generatore ideale indipendente di corrente.

La relazione caratteristica di questo bipolo è la seguente

$$i(t) = \mathrm{j}(t) \tag{2.11}$$

Dove j(*t*) è una funzione data. Questo bipolo è adinamico, attivo e controllato in tensione. La curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.11.

Osserviamo che quando il generatore ideale di corrente è spento si comporta come un circuito aperto in quanto *i*(*t*)=0.

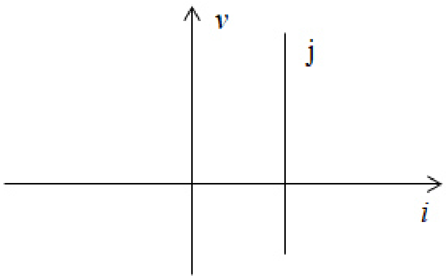


Fig. 2.11 – Curva caratteristica di un generatore ideale indipendente di corrente.

1.4.2 I generatori reali indipendenti di tensione e di corrente

I generatori ideali sono delle idealizzazioni di sistemi elettrici i quali, seppur piccoli, presenterebbero degli effetti resistivi. In particolare, nei generatori ideali di tensione andrebbe considerata una resistenza in serie (vedi § 3 per la definizione di serie) come illustrato in Fig. 2.12. In questo caso possiamo parlare di ***generatore reale di tensione***. Analogamente per il generatore di corrente. In questo caso andrebbe considerata una resistenza in parallelo (vedi § 3 per la definizione di parallelo) come in Fig. 2.14 ottenendo il ***generatore reale di corrente***.

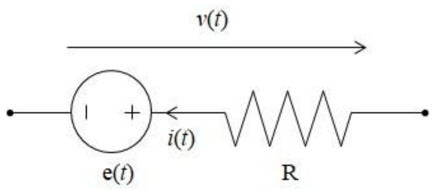


Fig. 2.12 – Rappresentazione di un generatore reale indipendente di tensione.

Il generatore reale di tensione ha in serie (vedi § 3 per la definizione di serie) una resistenza. Se l'avessimo considerata in parallelo (vedi § 3 per la definizione di parallelo), qualora il generatore ideale fosse spento comportandosi come un corto circuito, imporrebbe una tensione nulla alla resistenza in parallelo in modo che il bipolo equivalente si comporti globalmente come un corto circuito. In questo modo gli effetti resistivi comunque ineliminabili non verrebbero tenuti in conto. Il discorso duale vale per il generatore reale di corrente: se avessimo considerato una resistenza in serie (vedi § 3 per la definizione di serie) non avremmo ben modellato la presenza di effetti resistivi interni in quanto a generatore ideale spento, equivalente ad un circuito aperto, la resistenza in serie rimarrebbe fluttuante, ossia non sarebbe interessata da passaggio di corrente.

Avendo scelto i versi della tensione e della corrente come in Fig. 2.12, la relazione caratteristica del generatore reale di tensione è la seguente:

$$v(t) = \mathrm{R}i(t) + \mathrm{e}(t)\,, \tag{2.12}$$

Dove e(t) è una funzione nota, R è la resistenza della Fig. 2.12. Questo bipolo è un bipolo adinamico, attivo e controllato in corrente. La curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.13.

Osserviamo che quando il generatore ideale di tensione è spento il bipolo si comporta come una resistenza di valore R.

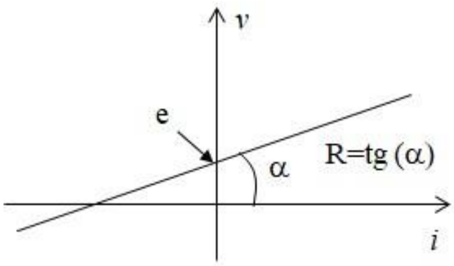


Fig. 2.13 – Curva caratteristica di un generatore reale indipendente di tensione.

Avendo scelto i versi della tensione e della corrente come in Fig. 2.14, la relazione caratteristica del generatore reale di corrente è la seguente:

$$i(t) = \frac{v(t)}{\mathrm{R}} - \mathrm{j}(t) \rightarrow i(t) = \mathrm{G}v(t) - \mathrm{j}(t)\,, \tag{2.13}$$

Dove j(t) è una funzione nota, R è la resistenza della Fig. 2.14. Questo bipolo è un bipolo adinamico, attivo e controllato in tensione. La curva caratteristica è rappresentata in Fig. 2.15.

Osserviamo che quando il generatore ideale di corrente è spento si comporta come un circuito aperto in quanto $i(t)=0$.

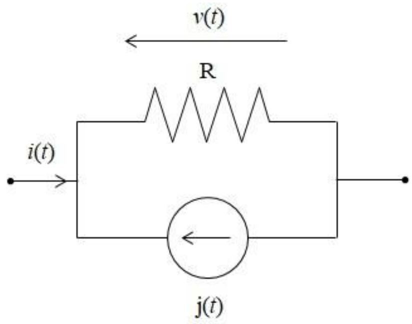


Fig. 2.14 – Rappresentazione di un generatore reale indipendente di corrente.

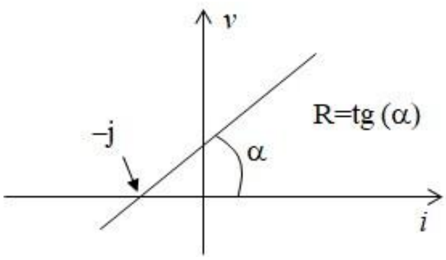


Fig. 2.15 – Curva caratteristica di un generatore reale indipendente di corrente.

Osserviamo che la (2.12) e la (2.13) rappresentano la stessa caratteristica se dovesse risultare verificata la seguente eguaglianza:

$$e(t) = Rj(t) \qquad (2.14)$$

La (2.14) ci dice che i due generatori reali sono equivalenti se si verifica una condizione sui valori delle grandezze erogate. Questo risultato, molto interessante ai fini pratici, sarà ampiamente ripreso nella Lezione 5, quando introdurremo il Teorema del generatore equivalente.

1.5 Il condensatore

Il simbolo che rappresenta il bipolo ***condensatore*** è illustrato in Fig. 2.16.

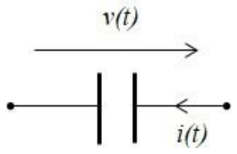


Fig. 2.16 – Simbolo del bipolo condensatore.

Per descrivere fisicamente il condensatore facciamo riferimento ad una realizzazione molto semplice e consideriamo il condensatore piano. Questo è costituito da due lastre piane conduttrici, le cosiddette *armature*, poste frontalmente (esistono geometrie non per forza piane), ciascuna delle quali è collegata ad un morsetto mediante un conduttore supposto ideale (conducibilità infinita) come in Fig. 2.17.

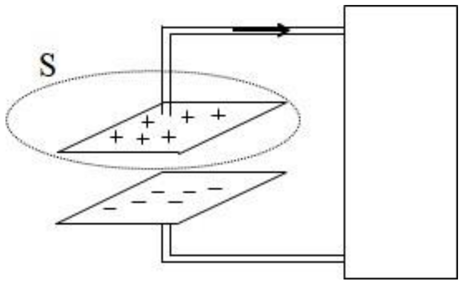


Fig. 2.17 – Schema di un condensatore piano collegato ad un circuito.

Tra le due armature del condensatore è posto del materiale dielettrico (ad esempio l'aria) che impedisce il passaggio di corrente all'interno delle due piastre. Supponendo l'idealità del conduttore e del dielettrico, le cariche opposte si possono distribuire uniformemente su ciascuna armatura che sarà una superficie equipotenziale. Quando il condensatore presenta ai suoi morsetti una tensione non nulla, allora vorrà dire che vi sono sulle due armature due distribuzioni di cariche di segno opposto.

Il condensatore può immagazzinare energia, in questo caso elettrostatica. Grazie alla distribuzione di cariche sulle due armature, il condensatore in ogni istante immagazzina una certa energia. Tale energia può variare coerentemente al variare della distribuzione delle cariche. Se queste diminuiscono vuol dire che l'energia del condensatore è ceduta al suo esterno (il condensatore si scarica), se queste aumentano vorrà dire che il condensatore sta assorbendo energia (il condensatore si carica).

Un condensatore scarico può essere caricato collegandolo ad un generatore reale di tensione o di corrente (vedi Fig. 2.18). In questo caso, il generatore “forza” le cariche a separarsi e le distribuisce sulle armature. È possibile poi scollegare il condensatore dal generatore. In questa situazione, anche se i morsetti del condensatore non sono collegati ad altri bipoli, grazie al fatto che possono esserci comunque le distribuzioni di cariche sulle armature, possiamo misurare una tensione non nulla tra le armature. In seguito, il condensatore carico si collega ad un resistore. L’energia immagazzinata viene messa a disposizione del resistore e l’energia che era immagazzinata tra le armature si dissiperà per effetto Joule nel resistore fino a che ai capi dei due componenti vi sarà una tensione nulla (il resistore consentirà alle cariche “separate” sulle armature del condensatore di ricombinarsi).

Un condensatore scarico può essere caricato. In questo caso occorrerà un generatore reale, come vedremo nelle prossime lezioni, che lo carichi, portando la tensione dal valore nullo ad un valore dato non nullo.

In Fig. 2.18 abbiamo rappresentato i circuiti di carica di un condensatore, circuito ***RC serie*** (a) e ***RC parallelo*** (b).

Cerchiamo ora la relazione caratteristica del condensatore. La carica sulle sue armature è legata alla tensione ai suoi capi con una relazione di proporzionalità:

$$q(t) = \mathrm{C}v(t) \tag{2.15}$$

Dove q indica la ***carica elettrica*** su una armatura misurata in ***Coulomb*** (C), v la tensione tra le armature e C la ***capacità***. La capacità dipende dal dielettrico impiegato e dalla geometria, si misura in ***Farad*** (F).

La corrente che attraversa il condensatore è data dalla (1.1) della Lezione 1:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \tag{2.16}$$

Utilizzando la (2.15) nella (2.16) possiamo infine scrivere:

$$i(t) = C\,\frac{dv(t)}{dt} \tag{2.17}$$

avendo supposto C costante nel tempo. La (2.17) è la ***relazione caratteristica del condensatore***.

La relazione caratteristica (2.17) è data con la convenzione dell'utilizzatore (vedi § 4 della Lezione 1). Nel caso in cui avessimo fatto la convenzione del generatore sul bipolo condensatore dovremmo considerare un segno negativo davanti al termine al secondo membro della (2.17).

Il condensatore è un bipolo dinamico, in quanto la sua relazione caratteristica è di tipo differenziale (compare una derivata), e passivo, la definizione (1.12) della Lezione 1 risulterà verificata. Da un punto di vista fisico questo vuol dire che il condensatore può immagazzinare e poi, eventualmente, cedere energia ma mai in misura maggiore rispetto a quella ricevuta precedentemente da una fonte esterna.

Se la capacità C è una costante, il condensatore è lineare e tempo invariante.

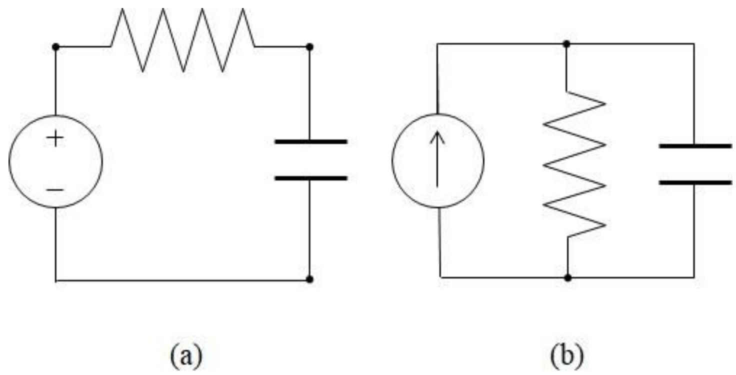


Fig. 2.18 – Circuiti di carica di un condensatore, serie (a) e parallelo (b).

Osserviamo che:

se "cortocircuitassimo" un condensatore ideale carico (cioè se lo collegassimo ad un resistore di resistenza nulla) avremmo un'incompatibilità. Infatti la tensione non nulla sul condensatore non sarebbe bilanciata dalla tensione nulla sul corto circuito. Ma noi sappiamo che il corto circuito è una idealizzazione in quanto ogni conduttore, anche se molto piccola, ha pur sempre una resistività non nulla. Pertanto, seppur piccola, una resistenza andrebbe comunque considerata nel modello circuitale e, in tal modo, la tensione del condensatore carico sarebbe bilanciata dalla tensione sul resistore. Quindi MAI considerare circuiti con un c.c. in parallelo ad un condensatore.

Osserviamo che:

se tra le armature non può esserci passaggio di corrente come può essere verificata la legge di conservazione della carica che mi dice che scelta una qualunque superficie chiusa (per esempio la **S** di Fig. 2.17) la somma algebrica delle correnti entranti (o uscenti) deve essere nulla? Come sarebbe bilanciata la corrente del conduttore che taglia la **S**? La risposta è che tra le due armature va considerata la corrente di spostamento (supposta presente solo tra le due armature) e il bilancio è salvo grazie a tale corrente di spostamento $\left(\propto \partial \mathrm{E}(t) / \partial t\right)$ che necessita di un campo elettrico variabile all'interno delle armature del condensatore. In questo caso tutte le grandezze varierebbero nel tempo. Questo vuol dire che, se siamo in regime stazionario – cioè se nel circuito tutte le grandezze sono costanti - non c'è corrente di spostamento e il condensatore si comporta come un bipolo circuito aperto anche se si può misurare una tensione non nulla ai suoi capi.

1.6 L'induttore

Il simbolo che rappresenta il bipolo ***induttore*** è mostrato in Fig. 2.19.

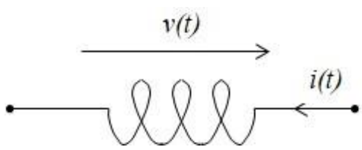


Fig. 2.19 – Simbolo del bipolo induttore.

Descriviamo rapidamente l'induttore da un punto di vista fisico. Tale bipolo è costituito da un avvolgimento di un certo numero di spire, diciamole *N*, su un supporto tipicamente di materiale con elevata permeabilità magnetica. Per l'induttore dobbiamo fare una considerazione riguardo la possibilità di trattarlo nel modello circuitale:

dobbiamo verificare la possibilità di poter definire una tensione tra i morsetti di tale bipolo. Infatti, non è detto che, all'esterno dell'avvolgimento, non ci sia una variazione di campo magnetico tale da rendere il campo elettrico non più irrotazionale. Per affermare che tale sistema è un bipolo, trascureremo, rispetto alla regione interna all'avvolgimento, gli effetti di variazione del campo magnetico all'esterno dell'avvolgimento. Del resto, abbiamo fatto lo stesso per il condensatore quando abbiamo trascurato la corrente di spostamento fuori delle armature e l'abbiamo considerata solo al suo interno.

Se consideriamo una singola spira, sappiamo che la corrente che circola nella spira produce un campo magnetico cui è associato un ***flusso di campo magnetico*** concatenato con l'avvolgimento stesso, chiamiamolo $\Phi_B(t)$. Inoltre, sappiamo che il legame tra tale flusso e la corrente che lo ha prodotto è di tipo proporzionale:

$$\Phi_B(t) = L_0 i(t), \qquad (2.18)$$

dove L_0 rappresenta ***l'induttanza*** della singola spira. Questa dipende dalla geometria della spira e dal tipo di materiale magnetico impiegato su cui è avvolta la spira.

Nel nostro caso, l'avvolgimento è costituito da N spire, pertanto scriveremo

$$\Phi_B(t) = NL_0 i(t) = Li(t), \qquad (2.19)$$

dove abbiamo posto $NL_0=L$. L'induttanza si misura in ***Henry*** (H).

Se chiudiamo in corto circuito l'induttore (il condensatore lo chiudevamo su un circuito aperto), abbiamo che l'induttore, potendo circolare in esso la corrente $i(t)$, immagazzina energia magnetica proprio attraverso la presenza del flusso Φ_B legato alla corrente $i(t)$. In questo caso, diciamo che l'induttore è carico.

È possibile notare una dualità tra l'induttore ed il condensatore. Così come il condensatore era carico grazie alla presenza della carica q, ora l'induttore è carico grazie al flusso Φ_B. Nel condensatore misuriamo una tensione a vuoto, nell'induttore misuriamo una corrente di corto circuito. Entrambi i bipoli, per caricarsi, devono immagazzinare energia fornitagli da fonti esterne, mentre per scaricarsi, devono essere collegati ad una resistenza.

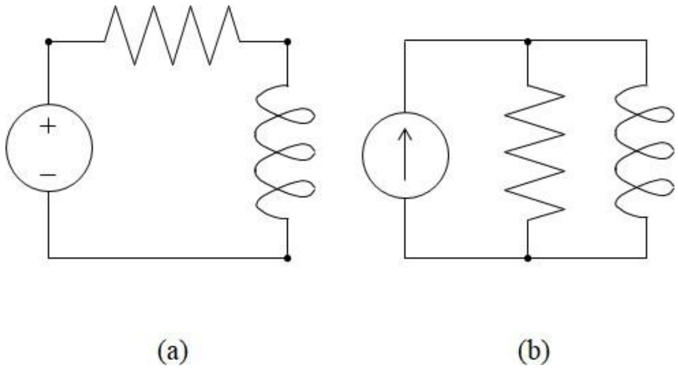


Fig. 2.20 – Circuiti di carica di un induttore serie (a) e parallelo (b).

In Fig. 2.20 abbiamo mostrato i circuiti di carica di un induttore.

Cerchiamo ora la relazione caratteristica dell'induttore. Sempre dai campi, ricordiamo la legge di Faraday-Neumann che abbiamo introdotto nel § 2.2 della Lezione 1. Questa ci dice che ai capi di una spira in cui circola una corrente $i(t)$, cui è legato il flusso Φ_B, si misura una tensione $v(t)$ data da

$$v(t) = \frac{d\Phi_B(t)}{dt} \tag{2.20}$$

e quindi dalla (2.19) sostituita nella (2.20) si ha:

$$v(t) = \mathrm{L}\,\frac{di(t)}{dt} \tag{2.21}$$

in cui abbiamo supposto L costante nel tempo. La (2.21) è ***la relazione caratteristica dell'induttore***.

Si osservi che la relazione caratteristica (2.21) è data avendo scelto la convenzione dell'utilizzatore. Nel caso in cui avessimo fatto la convenzione del generatore sul bipolo induttore avremmo dovuto considerare un segno negativo davanti al termine al secondo membro della (2.21).

Anche l'induttore è un bipolo dinamico passivo. Se l'induttanza L è costante l'induttore è lineare e tempo invariante.

1.7 L'interruttore

In ultimo, vediamo un tipo di bipolo che utilizzeremo nei nostri circuiti per la sua utilità nello studio dei transitori: l'***interruttore***. Il simbolo è rappresentato in Fig. 2.21 a seconda che l'interruttore sia in apertura (a) o in chiusura (b) all'istante t_0.

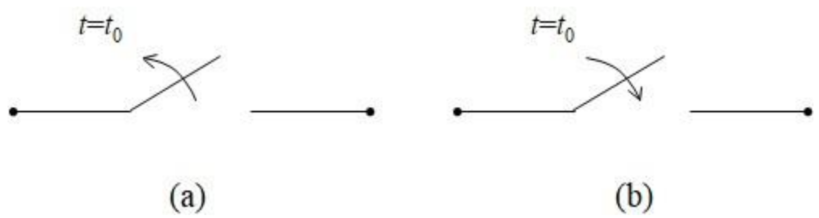


Fig. 2.21 – a: Interruttore in apertura; b: Interruttore in chiusura.

L'interruttore si comporta in questo modo: quando si considera chiuso, si comporta come un corto circuito; quando si considera aperto, si comporta come un bipolo circuito aperto.

La relazione caratteristica del bipolo interruttore di Fig. 2.21 (a) è:

$$v(t) = 0 \text{ per } t < t_0; \quad i(t) = 0 \text{ per } t \geq t_0 \tag{2.22}$$

La relazione caratteristica del bipolo interruttore di Fig. 2.21 (b) è:

$$i(t) = 0 \text{ per } t < t_0; \quad v(t) = 0 \text{ per } t \geq t_0 \tag{2.23}$$

Il bipolo interruttore è un bipolo passivo adinamico non lineare e tempo variante.

2 I bipoli in serie e in parallelo

Introduciamo due concetti fondamentali, la serie e il parallelo di bipoli. Anche se queste nozioni riguardano la connessione dei bipoli piuttosto che la loro natura, preferiamo introdurli in questa Lezione perché per descrivere alcuni bipoli abbiamo già utilizzato questi due concetti.

Due bipoli si dicono ***connessi in serie***, o più brevemente si dicono in serie, quando hanno un solo morsetto in comune in esclusiva e quando la corrente di un bipolo entrante nel morsetto comune è uguale a quella dell'altro bipolo uscente dal morsetto comune (vedi Fig. 2.22). In formule:

$$i_1(t) = i_2(t) \tag{2.24}$$

Due bipoli si dicono ***connessi in parallelo***, o più brevemente si dicono in parallelo, quando hanno tutti e due i morsetti in comune e quando la tensione su entrambi è la stessa (vedi Fig. 2.23). In formule:

$$v_1(t) = v_2(t) \tag{2.25}$$

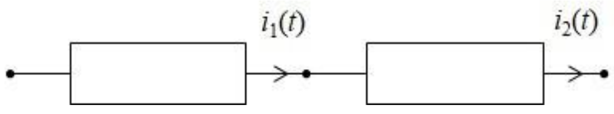


Fig. 2.22 – Bipoli in serie.

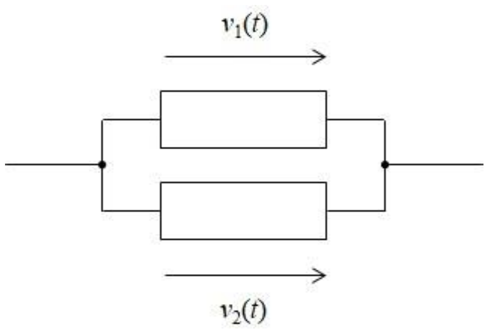


Fig. 2.23 – Bipoli in parallelo.

Come esercizio proviamo a stabilire quante resistenze in serie e in parallelo ci sono nella Fig. 2.24.

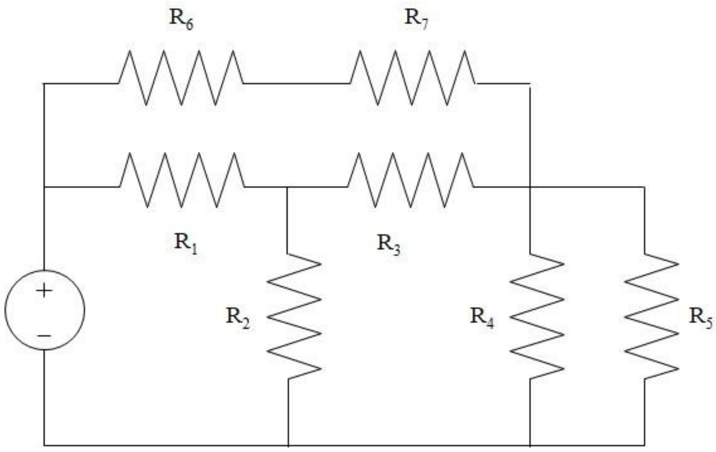


Fig. 2.24 – Circuito resistivo con serie e parallelo di resistenze.

Nel circuito di Fig. 2.24 c'è una serie e un parallelo: R_4 è in parallelo a R_5, R_6 è in serie a R_7!

È facile dimostrare che è possibile invertire la posizione di bipoli in serie, e allo stesso modo è possibile invertire la posizione di bipoli in parallelo. Ad esempio, nella Fig. 2.24 è possibile invertire la posizione dei due resistori R_6 e R_7, e allo stesso modo è possibile invertire la posizione di R_4 e R_5. Ad esempio, nella Fig. 2.18a possiamo invertire la posizione del generatore di tensione con quella del resistore. Ciò può tornare utile, quando, nell'analisi di un circuito si vuole procedere con delle semplificazioni apportando modifiche alla topologia.

3 Il voltmetro, l'amperometro e il wattmetro

In riferimento alla Fig. 2.25, immaginiamo di voler conoscere la tensione $v(t)$ e la corrente $i(t)$ del bipolo B quando il sotto-circuito a cui è collegato si presenta come una scatola chiusa. Non è possibile, quindi, accedere a ciò che presente all'interno del sotto-circuito C e non è possibile eseguire calcoli che ci restituiscano le grandezze cercate. In questo caso, l'unica soluzione è intervenire sul sistema fisico con delle misure. È necessario praticare delle misure elettriche che ci permettano di rilevare mediante opportuni strumenti il valore delle grandezze elettriche. Gli strumenti idonei a tali misure sono due: il ***Voltmetro*** e l'***Amperometro***. Si comprende dal nome degli strumenti, che essi servono a misurare rispettivamente la tensione e la corrente.

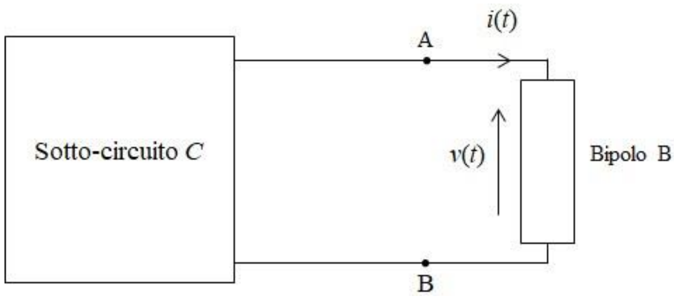


Fig. 2.25 – Generico circuito nel quale un sotto-circuito non è accessibile all'interno.

Illustriamone brevemente l'utilizzo indicando nella Fig. 2.26 l'inserimento del Voltmetro (simbolo V) e nella Fig. 2.27 l'inserimento di un Amperometro (simbolo A). Come si vede il Voltmetro per la misura di tensione è collegato in parallelo al bipolo, mentre l'Amperometro per la misura di corrente è collegato in serie al bipolo.

Abbiamo utilizzato un segno + sue due strumenti per indicare il verso delle grandezze utilizzato dallo strumento di misura. Il Voltmetro si riferirà al verso della tensione preso con la freccia che punta sul segno positivo. Nel caso della Fig. 2.26 il Voltmetro misura proprio la nostra $v(t)$. Per l'amperometro vale il discorso analogo e cioè che misura la corrente che entra dal terminale indicato con il segno +. Nella Fig. 2.27 misuriamo proprio la corrente $i(t)$.

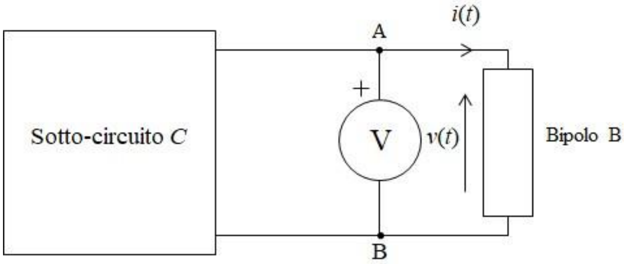


Fig. 2.26 – Inserimento di un voltmetro V.

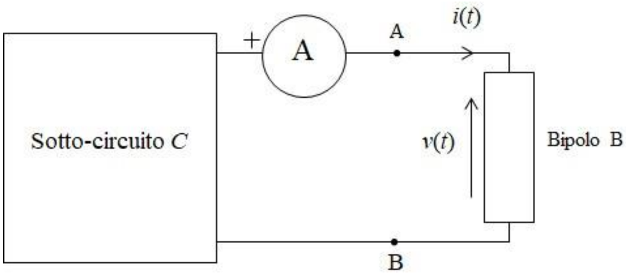


Fig. 2.27 – Inserimento di un Amperometro A.

Infine, volendo determinare il valore della potenza p(t) assorbita dal bipolo B dobbiamo poter valutare il prodotto $v(t)i(t)$ (si osservi che sul bipolo B abbiamo fatto la convenzione dell'utilizzatore). Pertanto potremmo operare nei due seguenti modi:

Una volta determinato il valore della tensione $v(t)$ con il Voltmetro determiniamo la corrente $i(t)$ utilizzando la relazione caratteristica, supposta nota, del bipolo *B* e poi calcoliamo p(t). O, analogamente, una volta determinato il valore della corrente i(t) con l'Amperometro determiniamo la tensione $v(t)$ utilizzando la relazione caratteristica del bipolo *B* e poi calcoliamo p(t).

Oppure utilizziamo uno strumento di misura denominato Wattmetro.

Il ***wattmetro*** (W) è uno strumento che misura la potenza p(t) assorbita o erogata da un bipolo. Questo strumento è dotato di 4 morsetti due per la cosiddetta ***voltmetrica*** e due per la cosiddetta ***amperometrica***. In Fig. 2.28 abbiamo mostrato il suo inserimento. Si osservi come i morsetti della voltmetrica sono collegati in parallelo e quelli dell'amperometrica in serie al bipolo B.

Come nel caso del Voltmetro e dell'Amperometro, anche nel Wattmetro è necessario indicare gli opportuni segni positivi per il verso della tensione e della corrente. Nella Fig. 2.28 il Wattmetro misura, avendo scelto i segni mostrati per i quattro morsetti, la potenza assorbita dal bipolo *B* e, quindi, quella erogata dal sotto-circuito *C*. Conviene sempre indicare esplicitamente i 4 morsetti come indicato in Fig. 2.28. Si osservi come l'amperometrica è indicata dalla presenza dei due cerchietti vuoti.

Vedremo nella Lezione 9 come si può utilizzare un wattmetro per misurare la potenza media assorbita o erogata da un bipolo in regime sinusoidale. In particolare, nel § 3 della Lezione 9 affronteremo la soluzione di un esercizio che riguarda un circuito in cui è inserito un wattmetro.

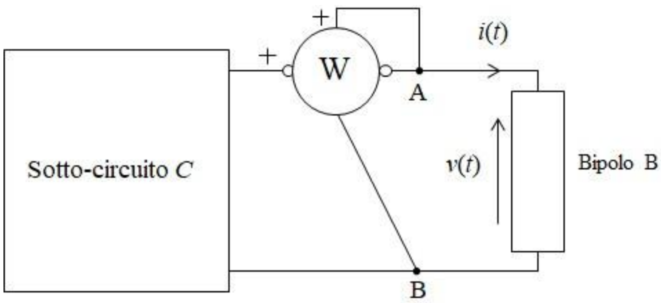


Fig. 2.28 – Inserimento di un Wattmetro per misurare la potenza assorbita da un bipolo.

Indice delle figure

Domande

Teoria

Relazione caratteristica

2.1) Siano $i(t)$ e $v(t)$ corrente e tensione di un bipolo, quale delle seguenti relazioni caratteristiche corrisponde ad un bipolo tempo-invariante?

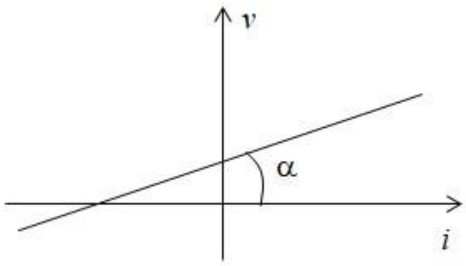
2.2) Siano $i(t)$ e $v(t)$ corrente e tensione di un bipolo, quale delle seguenti relazioni caratteristiche corrisponde ad un bipolo dinamico?

2.3) Siano $i(t)$ e $v(t)$ corrente e tensione di un bipolo, quale delle seguenti relazioni caratteristiche corrisponde ad un bipolo lineare?

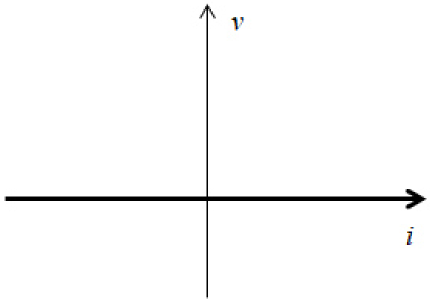
2.4) Siano $i(t)$ e $v(t)$ corrente e tensione di un bipolo, quale delle seguenti relazioni caratteristiche corrisponde ad un bipolo passivo?

2.5) Quale delle seguenti relazioni caratteristiche è controllata sia in tensione che in corrente?

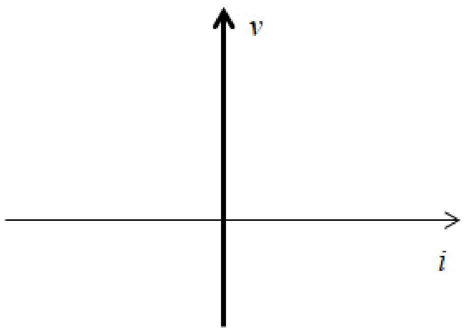
2.6) Quale bipolo ha la curva caratteristica mostrata in figura?



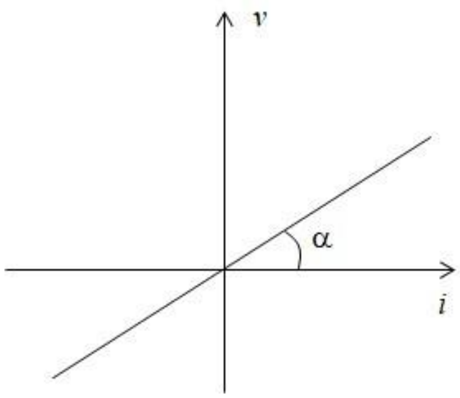
2.7) Quale bipolo ha la curva caratteristica mostrata in figura?



2.8) Quale bipolo ha la curva caratteristica mostrata in figura?



2.9) Quale bipolo ha la curva caratteristica mostrata in figura?



Resistore

2.10) Quale delle seguenti è la caratteristica di un resistore lineare?

2.11) Quale delle seguenti è la caratteristica di un resistore tempo-invariante?

2.12) Data la relazione caratteristica $i(t)=3v(t)$ di un bipolo, quale delle seguenti risposte descrive tutte le caratteristiche del bipolo?

2.13) Quale è l'unità di misura della resistenza?

2.14) Da quali fattori dipende la resistenza R (la conduttanza G) di un resistore?

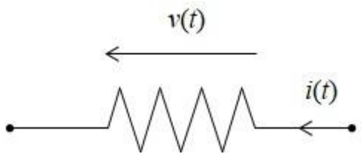
2.15) Cosa è la conduttanza di un bipolo resistore?

2.16) Quale tra le seguenti è la relazione corretta che lega resistenza R e conduttanza G?

2.17) Data la relazione caratteristica $v(t)= -2i(t)$ di un resistore, quanto vale la sua conduttanza?

2.18) Come si misura la conduttanza di un resistore?

2.19) In riferimento al resistore di figura, quale, tra le seguenti è la corretta relazione caratteristica?



2.20) Perché il resistore è un bipolo adinamico?

2.21) Perché il resistore è un bipolo adinamico passivo?

2.22) È possibile rappresentare in un piano cartesiano *i*-*v* la relazione caratteristica del bipolo resistore?

2.23) Quale è il tipo di curva nel piano *i*-*v* che rappresenta un resistore lineare e tempo invariante?

2.24) A cosa è uguale, nel piano *i*-*v*, la pendenza della retta passante per l'origine di un resistore lineare?

2.25) Che segno ha la potenza assorbita da un resistore?

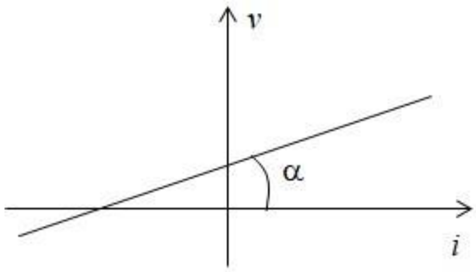
2.26) Che segno ha la potenza generata da un resistore?

2.27) Quale tra le seguenti è la corretta espressione della potenza assorbita da un resistore?

2.28) Data la relazione caratteristica $v(t) = 4\ i(t)$ di un bipolo, possiamo dire che tale bipolo è controllato in corrente?

2.29) Quale delle seguenti relazioni caratteristiche è controllata in tensione?

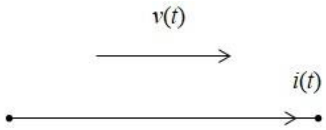
2.30) Che cosa rappresenta l'angolo che la curva caratteristica di figura forma con l'asse delle ascisse?



Corto circuito

2.31) Quale è, tra le seguenti, la corretta relazione caratteristica di un corto circuito?

2.32) Quale è la relazione caratteristica del bipolo in figura?



2.33) È possibile rappresentare in un piano cartesiano *i*-*v* la relazione caratteristica del bipolo c.c.?

2.34) In che modo il bipolo corto circuito può essere modellato con un resistore?

2.35) Quale delle seguenti risposte contiene le corrette caratteristiche del bipolo c.c.?

2.36) Il c.c. è un bipolo passivo?

2.37) Quanto vale la potenza assorbita da un c.c.?

2.38) Quanto vale la potenza generata da un c.c.?

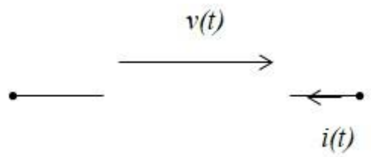
2.39) Il c.c. è un bipolo lineare?

2.40) Il c.c. è controllato in tensione o in corrente?

Circuito aperto

2.41) Quale è, tra le seguenti, la corretta relazione caratteristica di un circuito aperto?

2.42) Quale è la relazione caratteristica del bipolo mostrato in figura?



2.43) È possibile rappresentare in un piano cartesiano *i*-*v* la relazione caratteristica del bipolo c.a.?

2.44) In che modo il bipolo circuito aperto può essere modellato con un resistore?

2.45) Quale delle seguenti risposte contiene le corrette caratteristiche del bipolo c.a.?

2.46) In che modo il bipolo circuito aperto può essere modellato a partire da un resistore lineare?

2.47) Il c.a. è un bipolo passivo?

2.48) Quanto vale la potenza assorbita da un c.a.?

2.49) Quanto vale la potenza generata da un c.a.?

2.50) Il c.a. è un bipolo lineare?

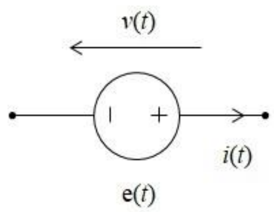
2.51) Il c.a. è controllato in tensione o in corrente?

Generatori

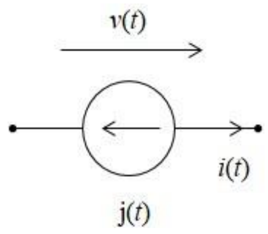
2.52) Posto $v(t)$ e $i(t)$ con la convenzione del generatore, quale, tra le seguenti, è la relazione caratteristica di un generatore ideale di tensione?

2.53) Posto $v(t)$ e $i(t)$ con la convenzione dell'utilizzatore, quale, tra le seguenti, è la relazione caratteristica di un generatore ideale di corrente?

2.54) Quale è la relazione caratteristica del bipolo mostrato in figura?



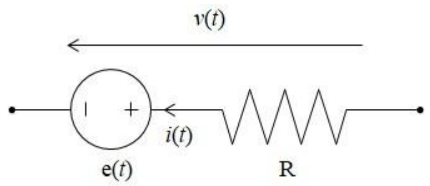
2.55) Quale è la relazione caratteristica del bipolo mostrato in figura?



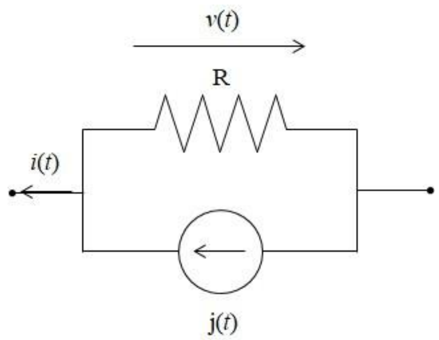
2.56) Posto $v(t)$ e $i(t)$ con la convenzione dell'utilizzatore, quale, tra le seguenti, è la relazione caratteristica di un generatore reale di tensione?

2.57) Posto $v(t)$ e $i(t)$ con la convenzione del generatore, quale, tra le seguenti, è la relazione caratteristica di un generatore reale di tensione?

2.58) Quale è la relazione caratteristica del bipolo mostrato in figura?



2.59) Quale è la relazione caratteristica del bipolo mostrato in figura?



2.60) La relazione caratteristica di un generatore ideale di tensione o di corrente si può rappresentare nel piano *i*-*v*?

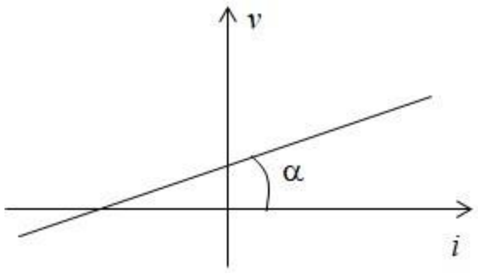
2.61) La relazione caratteristica di un generatore reale di tensione o di corrente si può rappresentare nel piano *i*-*v*?

2.62) Che tipo di curva è quella dei generatori ideali di tensione e di corrente?

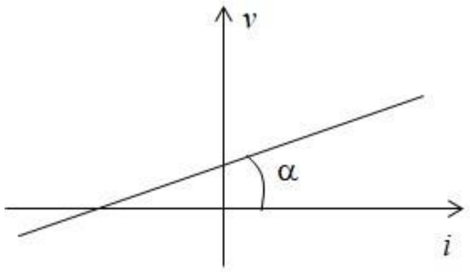
2.63) Che tipo di curva è quella dei generatori reali di tensione e di corrente?

2.64) Come si risolve la presenza di effetti resistivi nei generatori reali di tensione?

2.65) Cosa rappresenta il punto di intersezione della curva caratteristica di figura con l'asse delle ordinate?



2.66) Cosa rappresenta il punto di intersezione della curva caratteristica di figura con l'asse delle ascisse?



2.67) Come si risolve la presenza di effetti resistivi nei generatori reali di corrente?

2.68) Perché per il generatore reale di tensione bisogna mettere una resistenza in serie?

2.69) Perché per il generatore reale di corrente bisogna mettere una resistenza in parallelo?

2.70) Perché non è possibile avere un circuito con due generatori di corrente in serie?

2.71) Perché non è possibile avere un circuito con due generatori di tensione in parallelo?

2.72) Che differenza esiste tra i generatori ideali e i generatori reali?

2.73) Come si comporta un generatore di tensione ideale spento?

2.74) Come si comporta un generatore di corrente spento?

2.75) Che segno ha la potenza assorbita da un generatore ideale?

2.76) Che segno ha la potenza erogata da un generatore ideale?

Condensatore

2.77) Il condensatore è un bipolo lineare?

2.78) Quale delle seguenti è la caratteristica di un condensatore lineare?

2.79) Quale delle seguenti è la caratteristica di un condensatore tempo-invariante?

2.80) La relazione caratteristica $i(t) = -3 * \mathrm{d}v(t)/\mathrm{d}t$ rappresenta un …

2.81) Che cos'è la corrente di spostamento?

2.82) Quando le grandezze v e i del bipolo condensatore sono costanti, quanto vale la tensione ai suoi capi?

2.83) Quando le grandezze v e i del bipolo condensatore sono costanti, quanto vale la corrente che lo attraversa?

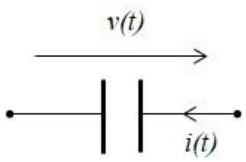
2.84) Quando le grandezze v e i del condensatore sono costanti, come si comporta il bipolo?

2.85) In quali bipoli si può considerare la corrente di spostamento?

2.86) È possibile rappresentare in un piano cartesiano i-v la relazione caratteristica del bipolo condensatore?

2.87) Quale è la unità di misura della capacità?

2.88) Per il condensatore di figura si può scrivere la seguente relazione caratteristica:



2.89) Perché il condensatore è un bipolo dinamico?

2.90) Che significa che un bipolo è un sistema dinamico?

2.91) Il condensatore è un bipolo passivo?

2.92) Che segno ha la potenza assorbita da un condensatore?

2.93) Che segno ha la potenza generata da un condensatore?

2.94) Quale tra le seguenti è la corretta espressione della potenza assorbita da un condensatore?

2.95) Data la relazione caratteristica $i(t)=3dv(t)/dt$ di un bipolo, quale delle seguenti risposte descrive tutte le caratteristiche di tale bipolo?

2.96) Quale delle seguenti affermazioni utilizziamo per dire che il condensatore è un bipolo passivo?

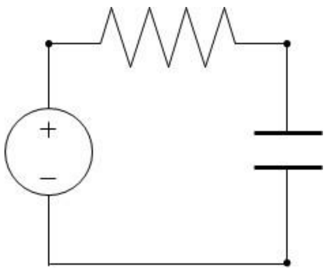
2.97) È possibile considerare un condensatore come un circuito aperto?

2.98) Quando è possibile considerare un condensatore come un circuito aperto?

2.99) Quanto vale la corrente del condensatore se il circuito si trova a regime stazionario?

2.100) Il condensatore è controllato in tensione o in corrente?

2.101) Come si chiama il circuito mostrato in figura?



Induttore

2.102) L'induttore è un bipolo lineare?

2.103) Quale delle seguenti è la caratteristica di un induttore lineare?

2.104) Quale delle seguenti è la caratteristica di un induttore tempo-invariante?

2.105) La relazione caratteristica $v(t)= 5*di(t)/dt$ rappresenta un …

2.106) Quando le grandezze v e i del bipolo induttore sono costanti, quanto vale la tensione ai suoi capi?

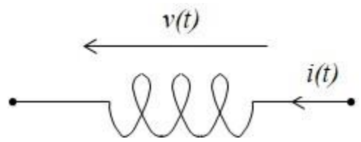
2.107) Quando le grandezze v e i del bipolo induttore sono costanti, quanto vale la corrente che lo attraversa?

2.108) Quando le grandezze *v* e *i* dell'induttore sono costanti, come si comporta il bipolo?

2.109) È possibile rappresentare in un piano cartesiano *i*-*v* la relazione caratteristica del bipolo induttore?

2.110) Quale è la unità di misura dell'induttanza?

2.111) Per l'induttore di figura si può scrivere la seguente relazione caratteristica:



2.112) Perché l'induttore è un bipolo dinamico?

2.113) L'induttore è un bipolo passivo?

2.114) Che segno ha la potenza assorbita da un induttore?

2.115) Che segno ha la potenza generata da un induttore?

2.116) Quale tra le seguenti è la corretta espressione della potenza assorbita da un induttore?

2.117) Data la relazione caratteristica $v(t) = -di(t)/dt$ di un bipolo, quale delle seguenti risposte descrive tutte le caratteristiche di tale bipolo?

2.118) Quale delle seguenti affermazioni utilizziamo per dire che l'induttore è un bipolo passivo?

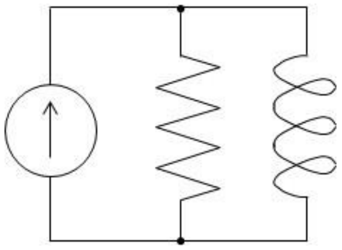
2.119) È possibile considerare un induttore come un corto circuito?

2.120) Quando è possibile considerare un induttore come un corto circuito?

2.121) Quanto vale la tensione dell'induttore se il circuito si trova a regime stazionario?

2.122) L'induttore è controllato in tensione o in corrente?

2.123) Come si chiama il circuito mostrato in figura?



Interruttore

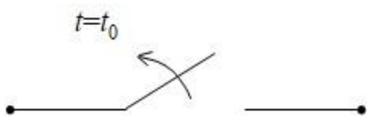
2.124) Cosa caratterizza un interruttore chiuso?

2.125) Cosa caratterizza un interruttore aperto?

2.126) Quali sono le caratteristiche di un bipolo interruttore (linearità, tempo invarianza, ….)?

2.127) Il bipolo interruttore è controllato in tensione o in corrente?

2.128) Quale è la relazione caratteristica dell'interruttore di figura?

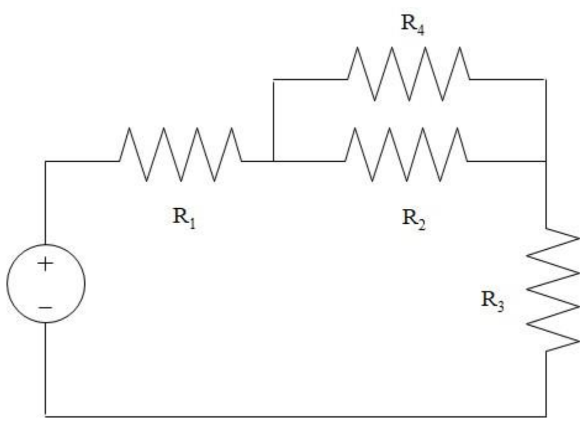


Serie e parallelo

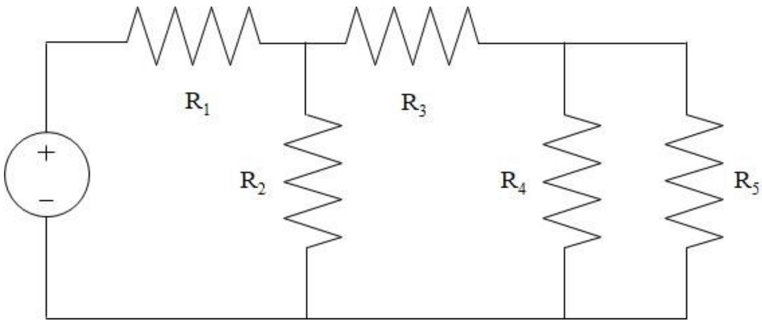
2.129) Quando possiamo affermare che due bipoli sono in parallelo?

2.130) Quando possiamo affermare che due bipoli sono in serie?

2.131) In riferimento al circuito di figura, quali sono i resistori in serie?



2.132) In riferimento al circuito di figura, quali sono i resistori in parallelo?



Voltmetro, amperometro, wattmetro

2.133) Quale dei seguenti affermazioni corrisponde alla corretta inserzione di un voltmetro se voglio misurare la tensione di un bipolo presente in un circuito?

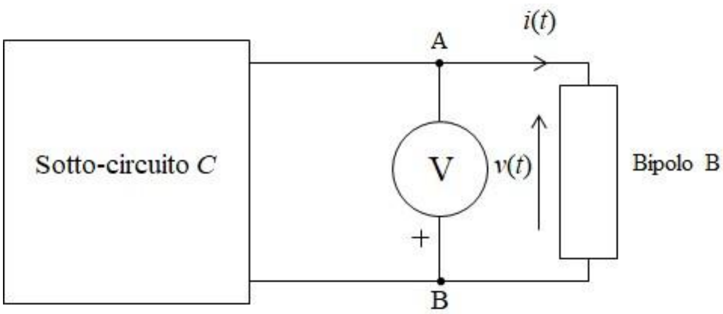
2.134) Quale dei seguenti affermazioni corrisponde alla corretta inserzione di un amperometro se voglio misurare la tensione di un bipolo presente in un circuito?

2.135) Come devo inserire un voltmetro se voglio misurare la tensione di un bipolo presente in un circuito?

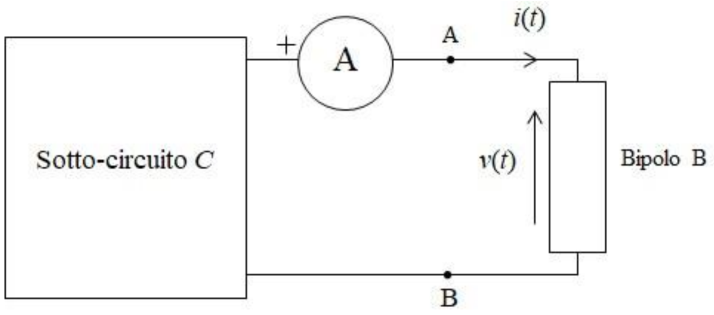
2.136) Come devo inserire un amperometro se voglio misurare la tensione di un bipolo presente in un circuito?

2.137) Come devo inserire un wattmetro se voglio misurare la potenza di un bipolo presente in un circuito?

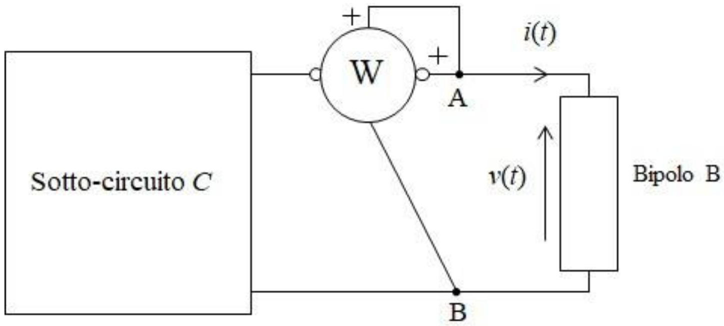
2.138) Cosa misura il voltmetro di figura?



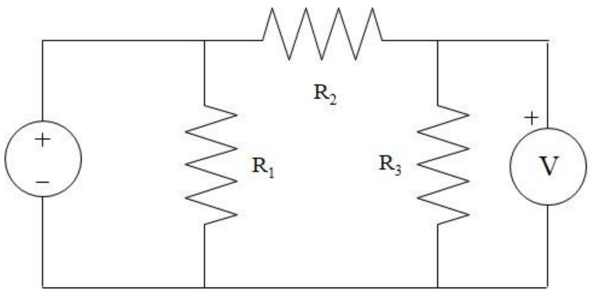
2.139) Cosa misura l'amperometro di figura?



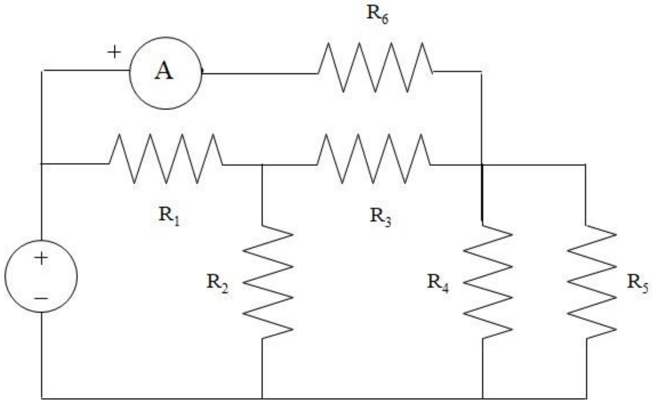
2.140) Cosa misura il wattmetro di figura?



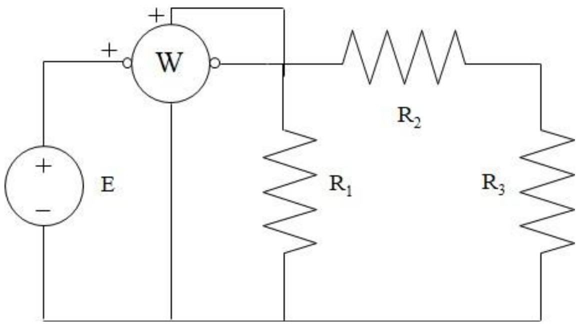
2.141) Cosa misura il voltmetro di figura?



2.142) Cosa misura l'amperometro di figura?



2.143) Cosa misura il wattmetro di figura?


W
E
R1
R2
R3