Appunti di Teoria dei circuiti

Giacomo Simonetto

Secondo semestre 2024-25

Sommario

Appunti del corso di Teoria dei circuiti della facoltà di Ingegneria Informatica dell'Università di Padova.

Indice

1 Introduzione alla teoria dei circuiti

Definizione di circuito

Un circuito elettrico è un insieme di dispositivi elettrici interconnessi, deputati alla produzione, trasmissione ed utiizzazione dell'energia elettrica.

Equazioni di Maxwell

È possibile risolvere un circuito attraverso le equazioni di Maxwell, ma si otterrebbe un sistema troppo complesso da gestire e da risolvere, per cui si utilizzano approssimazioni e modelli definiti dalla teoria dei circuiti.

Modello zero-dimensionale

Il modello zero-dimensionale non tiene conto di cosa avviene all'interno dei componenti elettrici, ma solo di come interagiscono tra di loro. In altre parole viene trascurata la loro dimensione.

Grandezze fisiche

Le grandezze fisiche utilizzate sono: tensione, corrente, potenza, energia e frequenza

Modello a parametri concentrati

Il modello a parametri concentrati prevede che:

1. i componenti RLC sono idealizzati e considerati puntiformi (modello zero-dimensionale)
2. tensioni e correnti dipendono dal tempo e non dallo spazio: si può evitare di considerare eventuali propagazioni elettromagnetiche
3. l'interazione tra componenti avviene solo attraverso connessioni elettriche

Il suo scopo è di:

- analizzare i comportamenti di tensioni e correnti (flussi di potenza)
- prevedere comportamenti dei dispositivi reali mediante modelli semplificati
- progettare e ottimizzare sistemi elettrici

Validità

La teoria dei circuiti è valida se la dimensione del circuito è inferiore alla lunghezza d'onda del segnale che circola all'interno:

- corrente alternata di rete $\rightarrow$ 50 Hz $\rightarrow \lambda = 6000$ km
- radiofrequenza $\rightarrow$ 100 MHz $\rightarrow \lambda = 3$ m
- microonde $\rightarrow$ 10 GHz $\rightarrow \lambda = 3$ cm (limite della TdC)

Tipi di circuiti

- circuiti elettrici di segnale, lavorano con mW
- circuiti elettrici di potenza, lavorano con kW

Flusso e trasmissione di energia

Per flusso di energia si intende come viene utilizzata la potenza in un circuito. La trasmissione di energia può avvenire in due modi: attraverso onde elettromagnetiche (radio, antenne, ...) o per conduzione (linee elettriche).

2 Interpretazione fisica dell'elettrostatica

2.1 Campi e grandezze fisiche

Campo fisico

Un campo fisico è la distribuzione su un volume o su una superficie di una certa grandezza fisica rappresentabile tramite vettore o scalare. I campi fisici di grandezze scalari si dicono campi scalari, mentre i campi fisici di grandezze vettoriali si dicono campi vettoriali.

Grandezze fisiche

Una grandezza fisica è una quantità misurabile di un oggetto. Il processo di misura consiste nel comparare una quantità campione (detta unità di misura) con l'oggetto da misurare. Le grandezze fondamentali del Sistema Internazionale sono: m, kg, s, K, A, cd, mol.

2.2 Carica elettrica e densità di carica

Carica elettrica

- la quantità di carica è una grandezza che misura la carica elettrica di un oggetto
- si osserva che esiste una forza che dipende dalla quantità di carica dei corpi e può essere attrattiva tra corpi con cariche di segno opposto o repulsiva tra corpi con cariche dello stesso segno
- la carica è quantizzata con quanto $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\ C$

Densità di carica

La carica di una distribuzione è data da $q = \int_V \rho d\tau$, ovvero la somma complessiva delle cariche positive e negative di un corpo:

- densità volumica: $\rho(P,t) = [C_{oulomb}/m^3] = \lim_{V \to 0} \frac{q}{V}, \quad q = \int_V \rho(P,t) d\tau$
- densità superficiale: $\sigma(P,t) = [C_{oulomb}/m^2] = \lim_{\Sigma \to 0} \frac{q}{\Sigma}, \quad q = \int_\Sigma \sigma(P,t) d\Sigma$

2.3 Corrente elettrica e densità di corrente

Densità di corrente

Si genera per conduzione elettrica attraverso due modi:

- corrente di conduzione: moto delle cariche libere (es. nei metalli)
- corrente di convezione: moto delle cariche libere e/o vincolate (es. soluzioni elettrolitiche)

$$\vec{J}(P,t) = \rho^+ + v_d^+ + \rho^- + v_d^- \qquad \begin{cases} \rho^+ & \to \text{densità delle cariche positive} \\ v_d^+ & \to \text{velocità di deriva delle cariche positive} \\ \rho^- & \to \text{densità delle cariche negative} \\ v_d^- & \to \text{velocità di deriva delle cariche negative} \end{cases}$$

Corrente

La corrente è la quantità di cariche che attraversano una superficie in un'unità di tempo. Dipende dalla superficie e dal suo orientamento. Non dipende dal resto dello spazio. Se si inverte l'orientamento della superficie o il riferimento, il segno della corrente si inverte. Si misura in Ampère $[A_{mpere}] = [C_{oulomb}/s]$.

$$i(t) = \int_\Sigma \vec{J}(P,t) \cdot d\vec{\Sigma} \qquad \Leftrightarrow \qquad i(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q_{\text{ attraverso } \Sigma}(t)}{\Delta t}$$

In caso di conduttori filiformi (dove $\Sigma \ll$ lunghezza), vale $i(t) = \vec{J} \cdot \vec{\Sigma}$

Conservazione della carica e continuità della corrente

La carica elettrica non si crea, non si distrugge, si conserva sempre.

$$q_{\text{interna}}(t+\Delta t) = q_{\text{interna}}(t) + \Delta q_{\text{uscente}}$$
$$i_{\text{uscente}}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q_{\text{uscente}}}{\Delta t} = -\frac{dq_{\text{entrante}}}{dt} = -i_{\text{entrante}}$$

- la variazione di carica corrisponde ad una corrente
- in assenza di corrente, la carica non varia
- la carica entrante è pari a quella uscente (in modulo)

Corrente solenoidale

La corrente si dice solenoidale quando:
- si è in regime stazionario: non si hanno accumuli o prelievi di carica in nessun punto del volume, la carica entrante e quella uscente sono uguali e il campo $\vec{J}$ forma linee di flusso chiuse
- in regioni di carica nulla: $\rho = 0$ ad esempio nei metalli

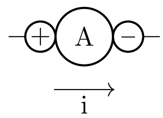
si è in regime stazionario

Tubo di flusso

Il tubo di flusso è un conduttore rivestito da materiale isolante che può essere attraversato da corrente. In condizioni stazionarie (con campo di corrente solenoidale) si ha che la corrente i_1 attraverso una superficie Σ_1 è uguale alla corrente i_2 attraverso una superficie Σ_2. Ovvero non si hanno perdite di corrente: $i_{\text{uscente}} = 0$.

Amperometro

L'amperometro è uno strumento per misurare la corrente in un circuito. Il verso del sistema è dal $+$ al $-$ (ovvero la corrente entra dal connettore $+$ ed esce dal connettore $-$). Si usa in serie al circuito. Un amperometro si dice ideale se non influisce sul circuito e se la misura avviene senza ritardi.



2.4 Campo elettrostatico

Legge di Coulomb e campo elettrostatico

Il campo elettrostatico si definisce a partire dalla forza di Coulomb, per questo è anche chiamato campo coulombiano.

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1\,q_2}{{r_{1,2}}^2}\hat{u}_{1,2} \qquad \vec{F}_{\text{elettr}} = q\vec{E} \qquad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{u}_{1,2} = [N/C_{oulob}] = [V_{olt}/m]$$

Il campo elettrostatico è additivo: $\vec{E}(P) = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\displaystyle\sum_{k=1}^{n}\frac{q_k}{{r_{PO_k}}^2}\vec{u}_k(P) \qquad \vec{E}(P) = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\displaystyle\int_V \frac{\rho}{r^2}\vec{u}_k d\tau$

Campo elettrostatico nei conduttori

Un conduttore è un materiale che conduce corrente. Le cariche sono libere di muoversi e, muovendosi, generano una corrente. In condizione di equilibrio il campo all'interno è nullo, ovvero non c'è nessuna forza che agisce sulle cariche e le cariche sono ferme (altrimenti non ci sarebbe equilibrio).

Campo elettrostatico nei dielettrici - isolanti

Un dielettrico o isolante è un materiale che non conduce corrente. Le cariche sono bloccate a meno di piccoli spostamenti responsabili della polarizzazione dei dielettrici. I dielettrici possono essere:

- omogenei: se ε non dipende dalla posizione
- lineari: se ε non dipende dal modulo del campo elettrico $||\vec{E}||$
- isotropi: se ε non dipende dalla direzione del campo elettrico $\vec{u} = \vec{E}/||\vec{E}||$

Un dielettrico omogeneo, lineare e isotropo si dice uniforme e per esso valgono tutte le leggi viste finora.

Permittività dielettrica di un mezzo

La permittività dielettrica di un mezzo indica come tale mezzo reagisce al campo elettrico:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{relativa del mezzo}} \cdot \varepsilon_{0\text{ - nel vuoto}} = [F_{araday}/m] = [{C_{oulomb}}^2/J] \qquad \varepsilon > \varepsilon_0 \;\; \varepsilon_r > 1$$

Campo elettrico conservativo

Il campo elettrostatico è conservativo ovvero:

$$\oint_{\mathcal{L}} = \vec{E}\cdot d\vec{l} = 0 \qquad \oint_{\mathcal{L}_1} = \vec{E}\cdot d\vec{l} = \oint_{\mathcal{L}_2} = \vec{E}\cdot d\vec{l} \quad \text{con} \begin{array}{c} \mathcal{L}_{1,\text{iniziale}} = \mathcal{L}_{2,\text{iniziale}} \\ \mathcal{L}_{1,\text{finale}} = \mathcal{L}_{2,\text{finale}} \end{array}$$

2.5 Potenziale elettrostatico

Potenziale elettrostatico

Essendo $\vec{E}$ un campo conservativo, si definisce il potenziale elettrostatico:

$$\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\Delta V = V_A - V_B \qquad V(P) = \int_P^C \vec{E}\cdot d\vec{s} = [V_{olt}] \qquad (V(C) = 0)$$

Lavoro di una forza elettrostatica

Il lavoro compiuto dalla forza elettrostatica per spostare una carica q vale:

$$\mathcal{L}_{AB} = \int_A^B \vec{F}\cdot d\vec{l} = q\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{l} = -q\Delta V = q(V_A - V_B)$$

Energia potenziale elettrostatica

Si definisce l'energia potenziale di una carica come il lavoro compiuto per portare la carica da distanza ∞ alla posizione in cui si trova:

$$\psi(P) = q_0 V(P)$$

Sorgenti del campo elettrico - distribuzioni di carica

- **distribuzioni di carica statiche - condizioni elettrostatiche**:
  le cariche che generano il campo sono in quiete e non ci sono correnti
- **distribuzione di carica stazionarie - regime stazionario**:
  le cariche sono in moto a velocità costante nel tempo e di conseguenza sono presenti correnti costanti nel tempo
- **distribuzione di carica variabile - regime variabile**:
  le cariche sono in moto variabile e le correnti variano nel tempo, il campo non è più conservativo in quanto avrà una componente non conservativa $\vec{E}_{\text{indotta}}$

Forza di una carica in moto

Le forze agenti su cariche in moto immerse in un campo magnetico hanno una componente dovuta al campo elettrico e una al campo magnetico:

$$\vec{F} = q_0\vec{E} + q_0\vec{v} \times \vec{B}$$

2.6 Tensioni e forze elettromotrici

Tensione

La tensione è definita come il lavoro elettrico per unità di carica speso a muovere una carica elettrica di prova lungo una linea L.

$$u(t) = \int_L \vec{E}(P,t) \cdot \vec{t}(P)\; dl = \frac{W_e}{q_0} = [V_{olt}] = [J/C] = [J/A_{mpere}\, s] \qquad \vec{t}(P) = \text{versore della curva in P}$$

Questa definizione permette di essere indipendenti dalla conservatività del campo elettrico: se il campo elettrico è conservativo, la tensione equivale al potenziale (a meno di un segno), mentre se il campo elettrico non è conservativo non si definisce nessun potenziale, ma si può calcolare lo stesso la tensione.

$$\begin{array}{rcl} \text{campo conservativo} & \rightarrow & \text{potenziale} = -\text{tensione} \\ \text{campo non conservativo} & \rightarrow & \xcancel{\text{potenziale}} = -\text{tensione} \end{array}$$

Forza elettromotrice indotta

Un campo elettrico non conservativo, è formato da una parte conservativa e da un campo elettrico indotto non conservativo. Di conseguenza la circuitazione non è più nulla e si definisce la forza elettromotrice indotta fem come il lavoro compiuto dal campo elettrico lungo una linea chiusa L:

$$fem \;\; e(t) = \oint_L \vec{E}(P,t) \cdot \vec{t}(P)\; dl$$

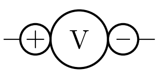
Forza elettromotrice mozionale

La forza elettromotrice complessiva agente sulle cariche in moto è data da una componente dovuta al campo elettrico e da una dovuta al campo magnetico, detta forza elettromotrice mozionale, provocata dal movimento delle cariche in un campo magnetico:

$$\oint_L (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{t}\, dl = \oint_L \vec{E} \cdot \vec{t}\, dl + \oint_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{t}\, dl = e(t) + e_m(t)$$

Voltmetro

Il voltmetro è uno strumento per misurare la tensione, si collega in parallelo alla sezione di circuito di cui si vuole conoscere la tensione. La direzione del sistema è data dal vettore $\vec{t}$ dal + al −. Un voltmetro si dice ideale se non altera il regime del circuito.



3 Modello a parametri concentrati - *mpc*

3.1 Teorema

Obiettivo

1. ogni componente elettrico si può modellare con equazioni algebriche o differenziali che dipendono solo da tensioni o correnti (ovvero non da componenti spaziali)
2. le tensioni sono definite tra coppie di morsetti e le correnti sono definite ai terminali
3. i terminali terminano con morsetti utilizzati per collegare il componente con il resto del circuito

Ipotesi

1. all'esterno dei componenti elettrici
   - il campo $\vec{E}$ è conservativo
   - la densità $\vec{J}$ è solenoidale (regime stazionario, no accumuli o prelievi)
2. i terminali e i morsetti sono superfici equipotenziali senza accumuli o prelievi di carica in essi

Teoria

1. è possibile modellare ogni componente attraverso Equazioni
2. per formare un circuito si collegano più morsetti tra loro attraverso conduttori detti connessioni o interconnessioni che soddisfano le ipotesi dei morsetti/terminali
3. se più morsetti sono attaccati insieme, si formano nodi di volume e carica nulla per cui vale la legge dei nodi (o legge di continuità $\rightarrow \sum i_{\text{entranti}} + \sum i_{\text{uscenti}} = 0$)

3.2 Componenti

Introduzione

I componenti sono elementi del circuito:

- rappresentati graficamente da una curva chiusa (detta superficie limite) con due (o più) tratti filiformi detti terminali con cui si possono collegare ad altri componenti
- modellabili con un'equazione differenziale o algebrica

Si definiscono:

- corrente entrante e corrente uscente (per ogni morsetto) rappresentata con $\rightarrow$
- tensione (per ogni coppia di morsetti) rappresentata con $+ \; -$

Porte elettriche, bipoli, n-poli m-bipoli, (n-1)-bipoli

- **porta elettrica**: coppia di terminali in cui la corrente entrante in un terminale è pari alla corrente uscente dall'altro terminale; si definisce la corrente di porta $i_{AB}(t)$ e la tensione di porta $u_{AB}(t)$
- **bipolo elettrico**: componente con due terminali
- **n-polo**: componente con n terminali
- **m-bipolo**: componente con m porte e $2m$ terminali
- **n-polo come (n-1)-bipolo**: componente in cui si sceglie un polo N come polo di riferimento e si definiscono:
  - n-1 porte tra il polo di riferimento e gli altri n-1 poli del componente
  - n-1 correnti $i_{kN}(t)$ che entrano dagli n-1 morsetti ed escono dal morsetto N, per cui la corrente uscente dal polo N è la somma di tutte le correnti di porta
  - n-1 tensioni $u_{kN}(t)$ di porta

3.3 Reti elettriche o circuiti

Introduzione

Una rete è formata da interconnessioni tra n-poli e m-bipoli. Le interconnessioni prendono il nome di nodi e i morsetti collegati allo stesso nodo sono superfici equipotenziali.

Suddivisione

- **reti in regime stazionario**: valgono le ipotesi del *mpc*
- **reti in regime variabile**: in teoria non si potrebbe applicare il *mpc*, ma si definiscono le ...
- **reti in regime variabile-quasi-stazionario**: ovvero reti in regime variabile in cui è possibile applicare il *mpc* se i campi $\vec{E}$ e $\vec{J}$ variano lentamente nel tempo e non si hanno propagazioni di onde elettromagnetiche all'esterno dei componenti

Tipologia tipo dei componenti utilizzati nel circuito (resistivo, capacitativo, RLC, ...)

Topologia tipo di connessioni utilizzate nel circuito (serie, parallelo, ...)

3.4 Potenza di bipolo, convenzione dei generatori e utilizzatori

Potenza di una porta

Data una porta elettrica, la potenza è data dal prodotto:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \qquad [W_{\text{att}}] = [V_{\text{olt}}] \cdot [A_{\text{mpere}}]$$

Convenzione degli utilizzatori

Un componente (o meglio una porta o bipolo) soddisfa la convenzione degli utilizzatori se la corrente entra nel morsetto $+$. Se $p > 0$, la porta assorbe potenza, se $p < 0$ la porta eroga energia.

Convenzione dei generatori

Un componente (o meglio una porta o bipolo) soddisfa la convenzione dei generatori se la corrente entra nel morsetto $-$. Se $p > 0$, la porta eroga energia, se $p < 0$ la porta assorbe potenza.

Lavoro elettrico

Il lavoro elettrico compiuto da una porta nell'intervallo $[t_0, t_1]$ vale:

$$\mathcal{L}(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} p(t)dt = \int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot i(t) \qquad \begin{array}{l} [J_{\text{oule}}] = [W_{\text{att}}] \cdot [\text{sec}] \\ [kWh] = 3.6 \cdot 10^6 \ [J] \end{array}$$

Il lavoro è entrante per potenza entrante e viceversa.

Wattmetro

Il wattmetro è uno strumento per misurare la potenza ed è costituito da un amperometro (in serie) e un voltmetro (in parallelo) combinati.

... disegno ....

Potenza di un m-bipolo

La potenza di un m-bipolo in cui tutte le porte sono convenzionate allo stesso modo è la somma di tutte le potenze delle singole porte.

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + \cdots + p_n(t) \qquad\qquad \mathcal{L}(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} p(t)dt = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{n=1}^{m} u_n(t) \cdot i_n(t)dt$$

In base al segno e alla convenzione utilizzata, si avrà potenza dissipata o erogata.

Potenza di un n-polo

Per calcolare la potenza di un n-polo, uso la corrispondenza tra n-polo e (n-1)-bipolo.

Bipolo passivo

Un bipolo si dice passivo se il lavoro elettrico uscente da un certo tempo t_0 in poi è minore dell'energia immagazzinata fino a t_0. Ovvero un bipolo passivo è capace di accumulare energia, ma non ne può emettere più di quella che ha immagazzinato. In condizioni stazionarie $p_{\text{uscente}}(t) < 0$

$$\mathcal{L}_{\text{lavoro uscente}}(t_0, t) \ < \ W_{\text{energia immagazzinata}}(t_0)$$

Bipolo attivo

Un bipolo si dice attivo se per certe condizioni non è rispettata la legge sopra, ovvero se per certe condizioni vale:

$$\mathcal{L}_{\text{lavoro uscente}}(t_0, t) \ > \ W_{\text{energia immagazzinata}}(t_0)$$

In generale un bipolo attivo fornisce lavoro elettrico convertendolo da altre fonti e in condizioni stazionarie $p_{\text{uscente}}(t) > 0$

4 Componenti elettrici

4.1 Caratteristica esterna

Caratteristica esterna di un bipolo e di un m-bipolo

La caratteristica esterna è un'equazione che lega tutte le variabili (tensione e corrente) di ogni porta di un determinato componente. Per un m-bipolo si avranno 2m variabili (tensione e corrente delle m-porte), per un bipolo si avranno 2 variabili.

- caratteristica esterna m-bipolo: $F(u_1(t), i_1(t), u_2(t), i_2(t), \ldots, u_m(t), i_m(t)) = 0$
- caratteristica esterna bipolo: $F(u(t), i(t)) = 0$

Bipolo controllato in corrente o in tensione

È possibile scrivere l'equazione per un bipolo in funzione di una delle due variabili:

- bipolo controllato in corrente: $u(t) = f(i(t))$
- bipolo controllato in tensione: $i(t) = f(u(t))$

Bipolo ideale

Un bipolo si dice ideale se la sua caratteristica esterna è lineare a tratti, ovvero è possibile usare un'equazione lineare per descriverne il comportamento in un intorno del punto (U^*, I^*)

4.2 Componenti

Resistenza

- equazione costitutiva: $R = U/I$ $\quad [\Omega_{(\mathrm{ohm})}] = [V_{\mathrm{olt}}]\ /\ [A_{\mathrm{mpere}}]$
- caratteristica esterna: $F(u,i) = 0 \ \rightarrow\ \frac{U}{I} - R = 0$
- effetto Joule: $\Delta Q = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$
- bilancio energetico: $P_{\mathrm{entrante}} = u \cdot i$, $P_{\mathrm{uscente}} = R \cdot i^2$ $\quad u \cdot i = R \cdot i^2 \ \rightarrow\ P_{\mathrm{entrante}} = P_{\mathrm{uscente}}$
- resistività: $R = \rho \cdot L/S$ $\quad \rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$ $\quad \rho_0 =$ resistività a 20°C, $\Delta T = \Delta$temp. rispetto a 20°C
  - conduttori: $\rho_{\mathrm{Cu}} = 1.8 \cdot 10^{-8} \Omega m$
  - semiconduttori: $\rho_{\mathrm{Si}} = 2.3 \cdot 10^{3} \Omega m$
  - isolanti: $\rho_{\mathrm{PVC}} = 10^{10} - 10^{13} \Omega m$

Resistore ideale

modello grafico	equazioni costitutive	parametri caratteristici
	$\begin{cases} u(t) = R\, i(t) \\ i(t) = G\, u(t) \end{cases}$	$\begin{cases} R = \text{resistenza } [\Omega_{\mathrm{ohm}}] \\ G = \text{conduttanza } [S_{\mathrm{iemens}}] \end{cases}$

Cortocircuito ideale

modello grafico	equazioni costitutive	descrizione
———	$u(t) = 0 \quad \forall t$	resistore con $R = 0$

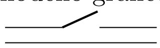
Circuito aperto

modello grafico	equazioni costitutive	descrizione
—— ——	$i(t) = 0 \quad \forall t$	resistore con $R = +\infty$

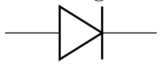
Interruttore ideale

modello grafico	descrizione
	dipolo in grado di commutarsi tra due stati: 1. cortocircuito ideale 2. circuito aperto

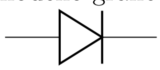
Interruttore reale

modello grafico	descrizione
	unipolare: interrompe la continuità di un solo conduttore

Diodo ideale

modello grafico	descrizione
	dipolo in grado di commutarsi tra due stati: se $u > 0 \rightarrow$ conduzione se $u < 0 \rightarrow$ interdizione

Diodo reale

modello grafico	descrizione
	dipolo con tre stati: se $u > 0 \rightarrow$ conduzione se $V_{bd} < u < 0 \rightarrow$ interdizione se $u < V_{bd} \rightarrow$ rottura/conduzione ottenuto con giunzione PN (materiali drogati positivamente o negativamente)

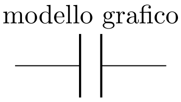
Induttore ideale

modello grafico	equazioni costitutive	parametri caratteristici	descrizione
	$u(t) = L\dfrac{di(t)}{dt}$	$L =$ induttanza $[H_{\text{enry}}]$	in regime stazionario agisce come un cortocircuito

Induttore reale

Usato nei circuiti AC, $e(t) = -\dfrac{d\Phi}{dt}$

Condensatore ideale

modello grafico	equazioni costitutive	parametri caratteristici	descrizione
	$i(t) = C\frac{du(t)}{dt}$	$C =$ capacità $[C_{\text{oulomb}}]$	in regime stazionario agisce come un circuito aperto

Condensatore reale

Usato nei circuiti AC, $\oint \vec{D} \cdot d\vec{\Sigma} = q_{\text{int}}$

4.3 Generatori

Forze elettriche generatrici e generatori

In condizioni stazionarie si ha che $\vec{J}$ è solenoidale e che $Q = L + \Delta W \rightarrow Q = L$ ovvero il lavoro compiuto dal circuito è tutto dissipato in calore dalle resistenze ($\Delta W = 0$). Per cui si ha:

$$Q = L = \oint \vec{F}_{\text{gen}} \cdot d\vec{l} \neq 0$$

Esistono delle forze generatrici non conservative $\vec{F}_{\text{gen}}$ la cui circuitazione non è nulla che mettono in moto le cariche. Le parti del circuito in cui si sviluppano tali forze non conservative sono detti generatori.

Forza elettrica generatrice specifica

Si definisce quindi la forza elettrica generatrice specifica come forza per unità di carica:

$$\vec{E}_{\text{gen}} = \frac{\vec{F}_{\text{gen}}}{q} \qquad [N_{\text{ewton}}/C_{\text{oulomb}}] = [V_{\text{olt}}/m]$$

Generatori a vuoto

- si hanno forze $\vec{E}_{\text{gen}}$ che inducono accumuli di cariche ai capi del generatore e l'accumulo forma un campo $\vec{E}_{\text{coulombiano}}$ ($\vec{E}_c$) contrario a $\vec{E}_{\text{gen}}$
- in regime stazionario $\vec{E}_g = -\vec{E}_c$ e le cariche non si muovono (o hanno $a = 0$, v costante)
- si ottiene che la forze elettromotrice è pari alla tensione ai capi del generatore:

$$fem_{AB} = \int_B^A \vec{E}_g(P,t) \cdot d\vec{l} = \int_B^A -\vec{E}_c(P,t) \cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{E}_c(P,t) \cdot d\vec{l} = u_{0,AB}(t)$$

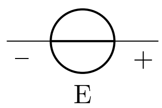
- se $U_{0,AB}(t)$ è costante, il generatore è in regime DC e $E_{AB} = U_{0,AB}$
- se $U_{0,AB}(t)$ è sinusoidale, il generatore è in regime AC e $E_{AB}(t) = u_{0,AB}(t)$
- il campo $\vec{E}_c$ tende a muovere le cariche positive dal $+$ al $-$
- il campo $\vec{E}_g$ tende a muovere le cariche positive dal $-$ al $+$

Generatori a carico

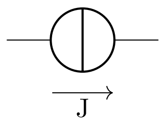
- $\vec{E}_g \neq -\vec{E}_c$, si ha uno spostamento di cariche
- la caratteristica esterna vale $U = E_{AB} - R_i I$ con R_i = resistenza interna

Generatori ideali

generatore ideale di tensione $U = E$



generatore ideale di corrente $I = J$



Esempi di generatori

- elettrochimici (sede di reazioni chimiche, esempio pile a secco e accumulatori)
- fotovoltaici (fotone "convertito" in elettrone, funzionamento basato su fotodiodi)
- termoelettrici (giunzioni bimetalliche a temperature diverse formano una f.e.m. per effetto Seebeck)
- piezoelettrici (cristalli soggetti a stress meccanico formano un campo elettrico, quindi una f.e.m.)
- elettromeccanici (macchine rotanti con di statore e rotore, convertono energia meccanica in elettrica)

5 Topologia delle reti

6 Analisi di circuiti lineari a corrente continua