Introduzione

Programma del Corso

L'ingegneria elettrica riguarda i campi elettromagnetici e i circuiti elettrici. Questo corso è principalmente dedicato ai circuiti. I circuiti e le loro operazioni si basano sulle leggi con cui sono governati i fenomeni EM. I capitoli del corso sono:

1. **Grandezze e fenomenologia dell'Elettromagnetismo**
2. **Teoria dei circuiti**
3. **Elementi circuitali**
4. **Metodi di analisi**
5. **Regime sinusoidale**
6. **Risposta in frequenza**
7. **Il transitorio**
8. **Sistemi trifase**
9. **Circuiti magnetici**
10. **Conversione elettromeccanica**

A. **Appendice: Campi ed operatori vettoriali**

Conoscenze richieste

- **Fisica dell'Elettromagnetismo (Fisica Generale)**
- **Matematica:**
  - ✓ **Trigonometria**
  - ✓ **Teoria dei numeri complessi**
  - ✓ **Calcolo infinitesimale**
  - ✓ **Operatori vettoriali**

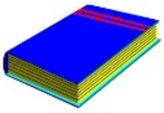
Perché il corso di elettrotecnica? A giorno d'oggi usiamo diversi tipi di energia (nella macchina abbiamo energia chimica della benzina che si trasforma in energia meccanica, i mulini a vento hanno energia meccanica trasformata in energia elettrica).

Perché è così diffusa l'energia elettrica? Per l'immediatezza del trasporto. Inoltre è facile da convertire (da meccanica a elettrica con macchine elettriche; oppure in energia luminosa quando accendiamo una luce; oppure possiamo trasformare energia continua in energia alternata).

Obiettivo del Corso

- ***Fornire gli elementi fondamentali della tecnica su cui si basano buona parte delle applicazioni dei fenomeni EM (teoria dei circuiti sia per l'energia che per i campi di informazione).***

Bibliografia



- **Diapositive del Corso (Slides su Virtuale)**
- **Appunti delle lezioni**
- **C. K. Alexander and M.N.O. Sadiku, *Circuiti Elettrici*, 4ª edizione, McGraw Hill, milano, 2014.**
- **G. Rizzoni, *Elettrotecnica – Principi e applicazioni,* 2ª edizione, McGraw Hill, Milano, 2008.**
- **J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, New York, 1975**
- **L.O. Chua, C.A. Desoer, E.S. Kuh, *Circuiti lineari e non Lineari*, McGraw Hill, Milano, 1998**

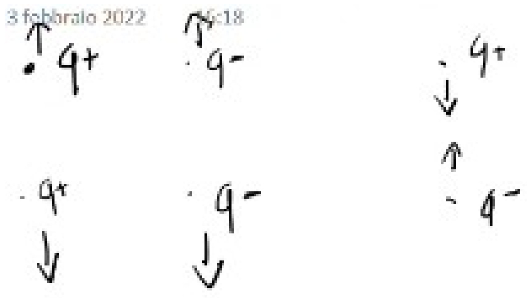
- *Il docente è disponibile sia durante le lezioni che a fine lezione per eventuali chiarimenti e riceve su appuntamento (mattia.ricco@unibo.it)*

Tutor didattico: **Dr. Riccardo Barbone** (*riccardo.barbone@unibo.it*)

- *L'**esame si svolgerà al PC**. Ci saranno più esami per sessione.*

Forza di Coulomb

La forza di Coulomb descrive la forza tra due cariche, possono essere positive e negative.
Se hanno lo stesso segno si respingono, se sono opposte si attraggono.



A cosa è proporzionale la forza di Coulomb?

$$F_c \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La carica si misura in Coulomb, la distanza in metri.

Cenni dell’elettromagnetismo

Qual è la forza che agisce su una carica puntiforme?

23 febbraio 2022 16:58

$$\underbrace{\bar{F}}_{\text{FORZA [N]}} = \underbrace{q}_{\text{CARICA [C]}}\left(\overbrace{\bar{E}}^{\text{CAMPO ELETTRICO}} + \underbrace{\bar{v}}_{\text{VELOCITÁ [m/s]}} \times \overbrace{\bar{B}}^{\text{VETTORE INDUZIONE MAGNETICA}}\right)$$

Cominciamo supponendo che il vettore induzione magnetica sia nullo.

$$\bar{B} = \emptyset \rightarrow \bar{F} = q\bar{E}$$

Cosa dice questa equazione? Come un corpo è attratto verso la terra, la carica elettrica si muoverà lungo le linee del campo elettrico (in verso opposto alle linee del campo se negativa).

$$\bar{B} = \emptyset \rightarrow \bar{F} = q\underbrace{\bar{E}}_{[N/C] = [V/m]}$$

Il campo elettrico descrive il suo effetto sulla carica.

Se invece il campo E fosse 0?

$$\bar{E} = \emptyset \rightarrow \bar{F} = q(\bar{v} \times \bar{B})$$

Ci possiamo ricavare l’unità di misura di B.

$$\bar{E} = \emptyset \rightarrow \bar{F} = q(\bar{v} \times \underbrace{\bar{B}}_{\left[\frac{N}{C}\frac{s}{m}\right] = [T]})$$

Normalmente viene indicata come tesla. Questo indica che se la carica si muove, abbiamo un campo a induzione magnetica e la carica deflette usando la regola della mano destra. Si chiama anche forza di Lorentz.

- $\bar{E} = \emptyset \rightarrow \bar{F} = q(v \times \bar{B})$ $\rightsquigarrow$ Forza di Lorentz

  $\hookrightarrow \left[\frac{N}{C}\frac{s}{m}\right] = [T]$

Densità volumetrica di carica

Supponiamo di avere un volume delta V e abbiamo una certa quantità di carica nel volume delta Q.

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad \left[\frac{C}{m^3}\right]$$

Densità di corrente

Cosa descrive la densità di corrente? Andiamo a vedere quanta carica si muove nell'unità di tempo e nell'unità di superficie.

Supponiamo di avere una superficie S, un vettore normale n e un flusso j.

$$\vec{J}\cdot\hat{n} = \lim_{\substack{\Delta S \to 0 \\ \Delta t \to 0}} \frac{\Delta Q}{\Delta S \, \Delta t} \qquad \left[\frac{C}{m^2\, s}\right]$$

Come in precedenza, il limite è una questione matematica.

Descrive il flusso delle cariche all'interno di questa superficie.

Se integrassimo la densità di corrente sulla superficie, otterremo la corrente elettrica.

Corrente elettrica

$$i = \iint_S \bar{J} \cdot \hat{n} \, dS \left[\frac{C}{s}\right] = [A]$$

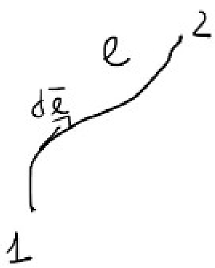
Questo è un modo per definire la corrente: integrare sulla superficie la densità di corrente.

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

È la variazione di carica rispetto al tempo.

Tensione elettrica

Consideriamo 2 punti uniti da una linea l, versore dl. La tensione elettrica è il lavoro che il campo deve compiere per spostare una carica dal punto 1 al punto 2.



LA TENSIONE ELETTRICA È IL LAVORO CHE SI COMPIE PER SPOSTARE UNA CARICA DAL PUNTO 1 AL PUNTO 2.

$$\ell_{12} = \int_{1,\ell}^{2} \bar{E} \cdot d\bar{\ell}$$

Introduciamo un concetto: la tensione si può definire in termini di differenza di potenziale se il campo è conservativo, cioè se il lavoro non dipende dal percorso scelto per andare da 1 a 2.

· Se $\bar{E}$ É CONSERVATIVO $\Rightarrow \ell_{12} = \int_{1,\ell}^{2} \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \int_{1}^{2} -dv$

Perché abbiamo il meno? È dovuto al fatto che le cariche che si spostano siano negative.

$$\ell_{12} = \int_{1,\ell} \bar{E} \cdot d\bar{\ell}$$

É DOVUTO AL FATTO CHE LE CARICHE SONO NEGATIVE

· Se $\bar{E}$ É CONSERVATIVO $\Rightarrow \ell_{12} = \int_{1,\ell}^{2} \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \int_{1}^{2} - dv = -(v_2 - v_1) =$

$$= v_1 - v_2 = v_{12}$$

La tensione elettrica si può definire come differenza di potenziale se il campo è conservativo, è il nostro caso.

Legge della circuitazione magnetica

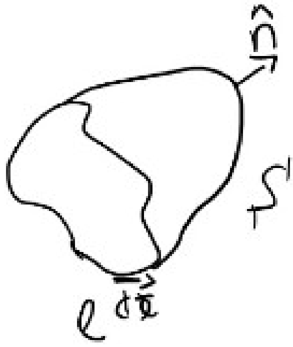
È anche conosciuta come legge di Ampere-Maxwell.

Dice che se noi abbiamo una corrente, questa corrente genera un campo magnetico.

Ovviamente, l’equazione dice molto di più, cioè come si genera il campo.

Prendiamo una curva chiusa l con versore dl.

Su questa curva, appoggiamo una superficie S con la normale n.



$$\oint_l \bar{H}\, d\bar{l} = \iint_S \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \hat{n}\, dS$$

Cosa sono queste grandezze?

$\left[\frac{A}{m}\right]$ → CAMPO MAGNETICO

→ DENSITÀ DI CORRENTE

→ VETTORE DI INDUZIONE ELETRICA

$$\oint_l \bar{H}\, d\bar{l} = \iint_S \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \hat{n}\, dS =$$

Come leggerla? Dato un flusso di corrente o una variazione di induzione elettrica, si crea un campo magnetico.

$$= \iint_S \bar{J} \cdot \hat{n}\, dS + \iint_S \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\, \hat{n}\, dS$$

$$= i + \frac{\partial \Phi(\bar{D})}{\partial t} = i + i_s = i_t$$

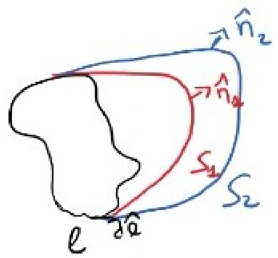
Quindi questa legge ci descrive un fenomeno fisico: se avessimo una batteria collegati ai capi, se avviciniamo una bussola, l'ago si muove, a causa del campo magnetico. Collegando una batteria su un componente dove non può passare corrente, l'ago della bussola si muove lo stesso, quindi non c'è solo una corrente di conduzione, c'è una corrente di spostamento, anch'essa genera il campo magnetico.

$i \rightarrow$ CORRENTE DI CONDUZIONE [A] METALLI

$i_s \rightarrow$ CORRENTE DI SPOSTAMENTO [A] ISOLANTI

$i_t \rightarrow$ CORRENTE TOTALE [A]

Riprendiamo la linea chiusa l e poggiamo 2 superfici S1 e S2 con le relative normali n1 e n2.



$$\oint_\ell \bar{H} \cdot d\bar{\ell} = \iint_{S_1} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \cdot \hat{n}_1\, dS_1 = \iint_{S_2} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \cdot \hat{n}_2\, dS_2$$

CONSIDERIAMO UNA SUPERFICIE CHIUSA $S_c = S_1 \cup S_2$

Consideriamo cioè la superficie più esterna unita alla superficie più interna (cioè una superficie chiusa risultante, hanno in comune la stella linea chiusa, questo le chiude).

$$\oint\!\!\!\oint_{S_c} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \cdot \hat{n}_c \, dS_c = \iint_{S_1} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \cdot \hat{n}_1 \, dS_1 - \iint_{S_2} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \hat{n}_2 \, dS_2 =$$

$$\Rightarrow \quad \oint\!\!\!\oint_{S_c} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right) \hat{n}_c \, dS_c = \emptyset$$

Il meno è dato dal fatto che il flusso entra ed esce dalla superficie. Gli integrali sono uguali, quindi abbiamo 0.

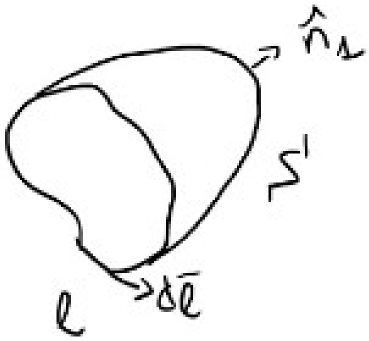
$$\rightarrow \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}\right)$$ VETTORE SOLEINC

Ciò implica di avere un vettore solenoidale, vale a dire che se entra un flusso, deve anche uscire.

Legge della circuitazione elettrica

Questa è detta legge di Faraday-Neumann-Lenz.

Definiamo una linea chiusa l con versore dl, dove inseriamo una superficie S con versore n1. Ci dice che se abbiamo una variazione nel tempo del vettore induzione magnetica, si crea un vettore forza elettromotrice.



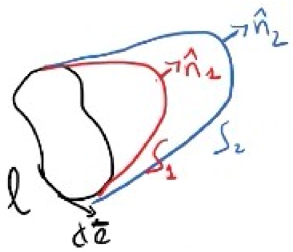
DATA UNA VARIAZIONE NEL TEMPO DEL VETTORE INDUZIONE MAGNETICA, SI GENERA UNA FORZA ELETTROMOTRICE (f.e.m.)

$$\oint_{\ell} \bar{E}\, d\bar{\ell} = -\iint_{S'} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot \hat{n}_1 \, dS$$

Come la leggiamo? Se abbiamo una variazione nel tempo del vettore induzione magnetica, questa ci genera una forza elettromotrice.

$$\underbrace{\oint_{\ell} \bar{E}\, d\bar{\ell}}_{f.e.m.} = -\iint_{S'} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot \hat{n}_1 \, dS$$

Consideriamo la linea chiusa l e le superfici S1 e S2, con relative normali.



$$\oint_l \bar{E}\, d\bar{l} = -\iint_{S_1} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot \hat{n}_1\, dS_1 = -\iint_{S_2} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot \hat{n}_2\, dS_2$$

Anche in questo caso, consideriamo la superficie chiusa Sc.

ae

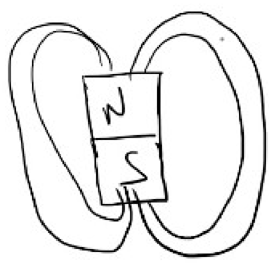
CONSIDERANDO UNA SUPERFICIE CHIUSA S_c

$$\Rightarrow \oiint_{S_c} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\, \hat{n}_c\, dS_c = \emptyset$$

VETTORE SOLENOIDALE

E anche in questo caso, il vettore è solenoidale.

Se per esempio prendiamo una calamita, avremo 2 poli e delle linee di campo.



Tutte le linee di campo che escono, entrano dall'altro lato (non si chiudono su loro stesse). Anche se spezzassimo la calamite abbiamo sempre polo nord e sud per calamita, se c'è un nord c'è un sud.

Vettore spostamento elettrico

Dato D vettore spostamento elettrico.

ebbraio 2022 18:33

COSTANTE DIELETTRICA RELATIVA

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{E}$$

COSTANTE DIELETTRICA NEL VUOTO

epsilonr dipende dal materiale. Allo stesso modo, possiamo definire il campo magnetico.

Vettore induzione magnetica

ORE INDUZIONE MAGNETICA

$$\bar{B} = \mu \bar{H} = \mu_0 \mu_r \bar{H}$$

μ_r → PERMEABILITÁ MAGNETICA RELATIVA

μ_0 → PERMEABILITÁ MAGNETICA NEL VUOTO

Più un materiale è permeabile, più si dispone per le linee di campo magnetiche (per esempio la ferrite).