

L'induzione elettromagnetica

Immaginiamo una spira di materiale conduttore chiusa su sè stessa; in essa verrà provocata una circolazione di corrente allorchè:

- viene avvicinato o allontanato un campo magnetico nelle sue vicinanze.
- la spira viene messa in movimento rispetto ad un campo magnetico nelle sue vicinanze.
- il campo magnetico vicino alla spira subisce variazioni di intensità.
- l'area della spira che si "affaccia" sul campo magnetico subisce delle variazioni.

In generale ogni volta che un circuito elettrico viene sollecitato da una variazione di un campo magnetico in cui è immerso, in esso si genera una circolazione di corrente: tale fenomeno viene denominato **induzione elettromagnetica**.

In particolare l'esistenza della corrente indotta permane finchè esiste variazione del campo magnetico.

La differenza di potenziale indotta sul circuito è determinabile mediante la relazione:

$$\Delta V = \Delta \Phi / t$$

nota come **legge di Faraday-Neumann** (pn. Noimann).

La legge di Faraday-Neumann ha una forma intrinsecamente derivativa e ci fa capire che la differenza di potenziale che nasce e che chiameremo **forza elettromotrice indotta E**, perdura solo ed esclusivamente durante le variazioni del magnetismo indotto sul circuito. Se il circuito è aperto vi sarà solo la presenza della tensione E, se il circuito è chiuso la presenza di E, genererà una corrente indotta nel circuito.

Un'altra importante caratteristica delle leggi sull'induzione elettromagnetica è che la forza elettromotrice indotta ha segno tale da opporsi alla variazione di campo che l'ha generata; in altre parole se il campo magnetico induttore cresce la tensione E tende ad avere un segno tale da opporsi all'aumento e viceversa. Per questi motivi la legge di Faraday-Neumann si trova spesso espressa nella forma:

$$\Delta V = - \Delta \Phi / t$$

nota come **Legge di Lenz**; in questa forma il segno negativo sta ad indicare il comportamento suddetto.

La legge di Lenz è in pratica una forma del principio di conservazione dell'energia; infatti se non fosse valida e la f.e.m indotta concordasse con la variazione del campo induttore si avrebbe un fenomeno impossibile. Per esempio un aumento del campo induttore porterebbe ad un aumento della f.e.m indotta e questo creerebbe un ulteriore aumento del campo. Ci si troverebbe di fronte ad un aumento dell'energia in gioco, senza alcun apporto dall'esterno e questo è ovviamente contro ad ogni legge della fisica.

Oltre che nei conduttori elettrici, le correnti indotte si generano anche all'interno di corpi metallici massicci. In questo caso esse vengono chiamate **correnti di Foucault**. Anche in questo caso le correnti che si generano seguono la suddetta legge di Lenz e hanno verso tale da opporsi alla variazione di flusso magnetico che le ha generate. Ad esempio, immaginando di fare ruotare un disco di rame tra le espansioni polari di una calamita, in esso si generano correnti di Foucault, tali da opporsi alla coppia che crea la rotazione del disco stesso. L'energia spesa per vincere la resistenza diventa fonte di calore per effetto Joule e il disco si surriscalda. Questo è il motivo per cui in quasi tutte le macchine elettriche i nuclei utilizzati non sono corpi massicci, ma sono formati da **lamierini**.

L'autoinduzione

In un circuito elettrico percorso da corrente esiste sempre un flusso magnetico dovuto al passaggio di corrente, chiamato **autoflusso** o **flusso di autoinduzione**; tale flusso è proprio del circuito e non è dovuto a campi esterni.

Il valore del flusso di autoinduzione è determinato dalla relazione:

$$\Phi_a = LI$$

dove I è la corrente circolante e L un coefficiente del circuito stesso, chiamato **coefficiente di mutua induzione** o **induttanza**. Finché si ha un flusso di corrente costante il flusso di autoinduzione resta costante. Al variare della corrente circolante si otterrà una variazione dell'autoflusso tale da opporsi alla variazione stessa (applicazione della legge di Lenz). La variazione del flusso genererà una f.e.m. indotta di valore:

$$E_a = - \Delta \Phi_a / t = -L \Delta I / t$$

Dalla formula si capisce che la tensione indotta avrà tendenza ad opporsi e avrà valore tanto più grande quanto maggiore è la variazione di corrente nel circuito, quanto più repentina sarà la variazione nel tempo e quanto maggiore sarà il comportamento induttivo nel circuito (ad esempio se nel circuito sono presenti avvolgimenti tipo solenoidi o elettromagneti); da questo si deduce che L è un indice di quanto il circuito tende a reagire in modo da opporsi alle variazioni di corrente che circola. In pratica L è una sorta di "inerzia" del circuito. Il valore L è espresso in **Henry** ed è sostanzialmente derivato dalle caratteristiche costruttive del circuito. Per esempio in un elettromagnete sarà determinato dal numero di spire, dalla lunghezza dell'avvolgimento e dalla permeabilità del mezzo, in pratica si presenta come l'inverso della riluttanza.

In particolare si ha che $L = \Phi_a / I$ e che il campo magnetico generato per autoinduzione vale

$$B = \mu_0 * n * I = \mu_0 * N * I / l$$

dove n è il numero di spire per metro, visto quindi come N/l .

ricordando che il flusso Φ è pari a $\Phi = \mathbf{B} * \mathbf{S}$, il flusso autoindotto vale, in ogni singola spira:

$$\Phi_a = \mathbf{S} * \mathbf{B} = \mathbf{S} * \mu_0 * \mathbf{N} * \mathbf{I} / l$$

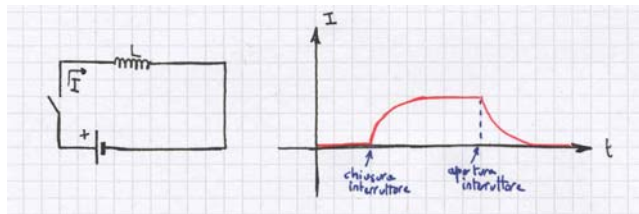
quindi il flusso totale vale il flusso di una singola spira moltiplicato il numero di spire ovvero: $\mathbf{N} * \mathbf{S} * \mu_0 * \mathbf{N} * \mathbf{I} / l$

Dividendo ambo i membri per \mathbf{I} si ha:

$$\mathbf{L} = \mathbf{S} * \mu_0 * \mathbf{N}^2 / l$$

che è la formula che ci permette di calcolare il valore dell'induttanza di un solenoide. Ovviamente se inseriamo un materiale ferromagnetico al suo interno dovremo moltiplicare il valore per la permeabilità relativa del materiale.

L'esempio di figura ci aiuta a capire cosa accade quando in un circuito è presente un'induttanza o più precisamente un componente atto a presentare induttanza, un **induttore**.



All'atto della chiusura dell'interruttore la corrente circolante non va subito a regime, ma viene "frenata" dalla f.c.e.m indotta da L ; a mano a mano che L si magnetizza la corrente cresce in maniera esponenziale fino a raggiungere il valore massimo, in corrispondenza della saturazione di L . La corrente si mantiene a tale livello e L si comporta come un cortocircuito (l'unica resistenza è data dal filo costituente gli avvolgimenti, quindi un valore molto basso). All'apertura dell'interruttore, si ha una variazione della corrente circolante e quindi la f.c.e.m indotta tende a compensarla. Però l'interruttore è aperto e avviene un fenomeno simile ad un arco voltaico ai capi dell'interruttore: questo fenomeno è dovuto all'energia residua presente nell'induttore ed è appunto originato dalla f.c.e.m indotta. Energeticamente parlando si può dire che l'energia immagazzinata dall'induttore sotto forma di campo magnetico viene restituita all'atto dell'apertura dell'interruttore.

Si possono fare considerazioni per lo studio dei transistori nei circuiti induttivi, prendendo come spunto lo studio dei transistori nei condensatori. Si deve tenere presente che in questo tipo di circuiti la costante di tempo è determinata dalla relazione:

$$\tau = L/R$$

infatti L è un rapporto tra un flusso e una corrente, quindi sarebbe rappresentabile in Wb/A , ma il flusso è dimensionalmente una tensione su un tempo. Quindi:

$$\tau = (V/As) * R = (V/As) * A/V = s$$

E' necessario ricordare soprattutto che la tensione ai capi di un condensatore e la corrente circolante in un induttore non possono variare subendo delle discontinuità e richiedono per la variazione un certo tempo.

Test di verifica

Esercizio 11-1

Una spira circolare di raggio 15 cm si trova immersa in un campo magnetico di 0.05T. Qual è il valore del flusso al suo interno? Il campo magnetico viene annullato nell'arco di 1/10 di secondo, quanto vale la tensione indotta durante la variazione? ([soluzione](#))

Esercizio 11-2

Se la spira viene sostituita da un solenoide di 100 spire? Quali sono i nuovi valori? ([soluzione](#))

Esercizio 11-3

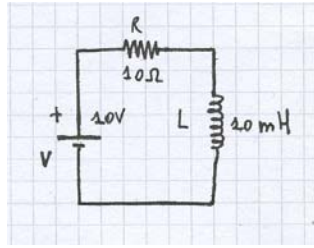
Determinare l'induttanza di un solenoide costituito da 100 spire, lungo 30mm e avente raggio pari a 5 mm ([soluzione](#))

Esercizio 11-4

Determinare il nuovo valore di induttanza del solenoide dell'esercizio 11-3 se al suo interno poniamo un nucleo di ferro dolce, assumendo per questo materiale una permeabilità relativa pari a 2000 ([soluzione](#))

Esercizio 11-5

Nel circuito di figura determinare quanto vale la corrente trascorsi 2mS, presupponendo l'induttore completamente scarico ad inizio transitorio ([soluzione](#))



prossimo capitolo



torna alla pagina dell'elettronica

); //-->

11-4

Il nuovo valore sarà determinabile, semplicemente moltiplicando il precedente per μ_r , infatti:

$$L = \frac{\mu_0 S N^2}{l} \quad e \quad L' = \frac{\mu S N^2}{l} = \frac{\mu_r \mu_0 S N^2}{l} = 2000 \cdot L$$

$$L' = \underline{20,94 \text{ mH}}$$

11-3

Il valore dell'induttanza del solenoide si determina mediante la:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot N^2}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 100^2}{30 \times 10^{-3}} = \underline{10,47 \mu\text{H}}$$

11-2

Il valore del flusso è

$$\Phi = nBS = 100 \cdot 3,53 \times 10^{-3} = 353 \text{ mWb}$$

la nuova tensione indotta vale

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{353 \times 10^{-3}}{0,1} = \underline{3,53 \text{ V}}$$

11-1

Il valore iniziale del flusso vale

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot \pi r^2 = 0.05 \cdot (0.15)^2 \cdot \pi = \underline{3,53 \text{ mWb}}$$

La tensione indotta può essere determinata come variazione del flusso nel tempo:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{3.53 \times 10^{-3}}{0.1} = \underline{35.3 \text{ mV}}$$

1.1 - 5

La corrente nel circuito ha un andamento come in figura e la sua funzione è determinabile dalla generica:

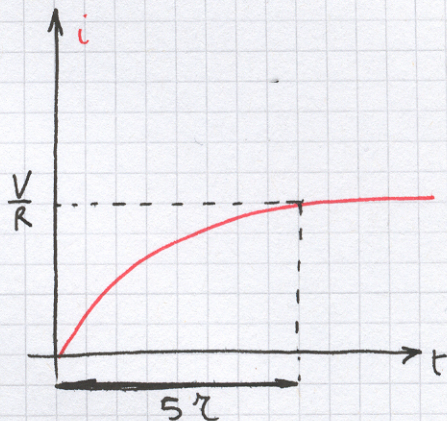
$$y = y_{FIN} - (y_{FIN} - y_{IN})e^{-t/\tau}$$

La costante di tempo τ vale

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10\text{mH}}{10\Omega} = 1\text{ms}$$

la funzione y diviene:

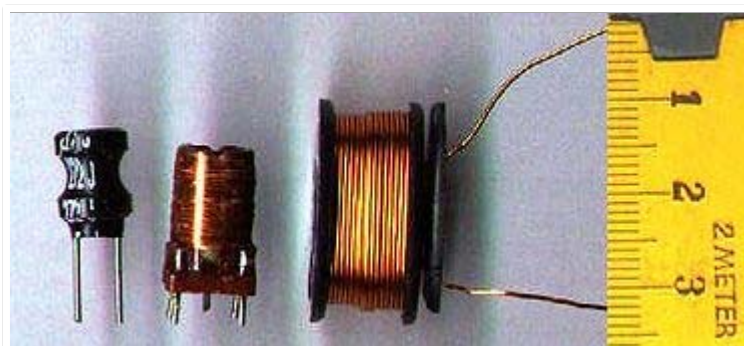
$$i = \frac{V}{R} - \left(\frac{V}{R} - 0\right)e^{-\frac{2 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}}} = \frac{10}{10} - \left(\frac{10}{10} - 0\right)e^{-2} = 1 - 1e^{-2} = \underline{\underline{0,86\text{A}}}$$



Induttore

L'**induttore** è un **componente elettrico** che genera un **campo magnetico** al passaggio di **corrente elettrica** (*continua* o *alternata* od *impulsiva*).

Nella **teoria dei circuiti** l'induttore è un componente *ideale* (la cui grandezza fisica è l'induttanza) in cui tutta l'energia elettrica assorbita è immagazzinata nel campo magnetico prodotto. Gli induttori reali, realizzati con un avvolgimento di un filo conduttore, presentano anche fenomeni dissipativi e capacitativi di cui si deve tenere conto.



Vari tipi di piccoli induttori

Inoltre nei circuiti in regime sinusoidale permanente l'induttore determina una differenza di fase di **90 gradi** fra la tensione applicata e la corrente che lo attraversa: in particolare, in queste condizioni di funzionamento la **corrente** che attraversa un induttore ideale risulta essere *sfasata in ritardo* di un quarto di periodo rispetto alla tensione applicata ai suoi morsetti.

Gli induttori sono impiegati in una varietà di dispositivi elettrici ed elettronici, tra i quali i **trasformatori** ed i **motori elettrici** nonché in svariati circuiti a corrente alternata ad alta frequenza.

Indice

1 Fisica dell'induttore

1.1 Realizzazione

1.2 Induttanza

1.3 Energia

1.4 Nei circuiti elettrici

1.5 Reti di induttori

2 Applicazioni

3 Fattore Q

4 Formule per il calcolo dell'induttanza

5 Storia

6 Immagini

7 Sinonimi

8 Note

9 Voci correlate

Fisica dell'induttore

Realizzazione

Un induttore è costituito da un **avvolgimento** di **materiale conduttivo**, generalmente filo di **rame** ricoperto da una sottile pellicola isolante. In pratica si può assumere un induttore come un **solenoid**e. Per aumentare l'**induttanza** si usa spesso realizzare l'avvolgimento su un nucleo di materiale con elevata **permeabilità magnetica** (ad es.: **ferriti**). Un induttore può anche essere inserito in un **circuito integrato**. In questo caso comunemente si usa l'**alluminio** come materiale conduttore. È, tuttavia, raro che un induttore sia inserito in un circuito integrato: limiti pratici rendono molto più comune l'uso di un circuito chiamato "**giratore**" che usa un **condensatore** per simulare il comportamento di un induttore. Piccoli induttori usati per frequenze molto alte sono talvolta realizzati con un semplice filo che attraversa un cilindro o una perlina (piccolo anello) di **ferrite**.



Altri tipi di induttori. Quello in alto e quello in basso al centro sono induttori toroidali

Induttanza

L'induttore è l'elemento fisico, la sua grandezza fisica si chiama **induttanza**. Naturalmente, il filo di rame ha una **resistenza elettrica**, particolarmente alle alte frequenze (**effetto pelle**), e tra le spire vicine vi è un accoppiamento **capacitivo**. Inoltre, vanno tenute presenti le perdite nel nucleo magnetico eventualmente introdotto. Questi ed altri fenomeni parassiti (parassiti perché non voluti) differenziano l'induttore reale dall'induttore ideale. Spesso, nella pratica l'induttore viene chiamato con la sua grandezza fisica (induttanza).

Energia

L'**energia** immagazzinata nell'induttore (misurata in **Joule** nel **SI**) è uguale alla quantità di lavoro richiesta per ottenere la corrente che scorre in esso e quindi per generare il campo magnetico. Questa è data da:

$$E_{\text{induttore}} = W = \frac{1}{2}LI^2$$

dove *I* è la corrente che scorre nell'induttore e *L* l'induttanza. *W* invece corrisponde all'energia immagazzinata nell'induttore, infatti viene anche espressa con questa lettera dell'alfabeto.

Nei circuiti elettrici

Un induttore si oppone solo alle *variazioni* di corrente. Se fosse ideale non presenterebbe nessuna resistenza alla **corrente continua** se non quando viene attivata e quando viene tolta (in questi fenomeni transitori l'induttore tende a smorzare le *variazioni* della corrente). Ma l'induttore reale presenta una resistenza elettrica non nulla e, quindi, il circuito in cui è inserito spende energia anche per mantenere una corrente costante che non varia il campo magnetico creato, ma si dissipa nella resistenza presentata dal filo di rame. In generale, trascurando i fenomeni parassiti (resistenza e **capacità**), la relazione tra la **tensione** applicata agli estremi dell'induttore con induttanza *L* e la corrente *i(t)* che varia nel tempo e scorre nell'induttore è descritta dall'**equazione differenziale**:



Induttore di precisione per esperimenti in fisica

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

se ne deduce che se una corrente variabile nel tempo, come ad esempio una [corrente alternata sinusoidale](#), scorre nell'induttore, una tensione variabile nel tempo ([alternata](#) nel caso di corrente alternata) o [forza elettromotrice](#) (abbr. f.e.m.) viene indotta ai capi dell'induttore stesso. Questa relazione può essere dedotta dalle equazioni di base dell'elettromagnetismo considerando i fenomeni di induzione elettromagnetica ([legge di Faraday-Neumann-Lenz](#)) e la relazione costitutiva del campo magnetico prodotto da un solenoide. Infatti essendo il campo magnetico B prodotto da un [solenoid](#):

$$B = \mu \cdot \frac{N}{\ell} \cdot I$$

(con N numero di spire, ℓ lunghezza del solenoide, μ permeabilità magnetica del mezzo posto all'interno al solenoide ed I intensità di corrente che vi scorre) se la corrente I che scorre nel solenoide/induttore è variabile nel tempo, anche B sarà variabile nel tempo. Essendo B variabile nel tempo, si produce una variazione di flusso del campo magnetico concatenato con il solenoide stesso il che produce, per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, un f.e.m. auto-indotta ai capi dell'induttore. Questa differenza di potenziale indotta si oppone, per la [legge di Lenz](#) alla causa che l'ha generata ovvero alla corrente variabile che scorre inizialmente sull'induttore (tramite quindi una corrente di segno opposto) da cui l'opposizione dell'induttore alle *variazioni* di corrente stessa di cui prima. L'energia elettrica iniziale perduta viene immagazzinata sotto forma di energia del campo magnetico nel solenoide/induttore e poi nuovamente rilasciata in forma di energia elettrica (corrente) al cessare dell'alimentazione elettrica dell'induttore, da cui l'aggettivo di elemento 'reattivo' riferito a tale componente.

L'ampiezza della f.e.m. è correlata con l'intensità della corrente e con la frequenza delle sinusoidi dalla seguente equazione:

$$V = I \times \omega L$$

dove ω è la pulsazione della sinusoide legata alla [frequenza](#) f da:

$$\omega = 2\pi f$$

Si definisce reattanza induttiva (dimensionalmente uguale alla resistenza ed alla reattanza capacitiva):

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

dove X_L è la reattanza induttiva, ω è la pulsazione, f è la frequenza [Hertz](#), e L è l'induttanza.

La reattanza induttiva è la componente immaginaria positiva dell'[impedenza](#). L'impedenza complessa di un induttore è data da:

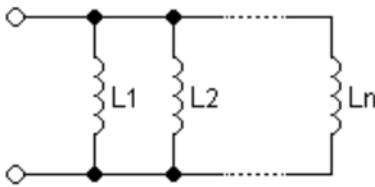
$$Z = j\omega L = j2\pi f L$$

dove j è l'[unità immaginaria](#).

A meno di fenomeni parassiti come dissipazioni presenti nei casi reali, l'induttore ideale ha quindi impedenza puramente immaginaria pari alla sua reattanza indicando con essa la sua capacità di immagazzinare energia magnetica.

Reti di induttori

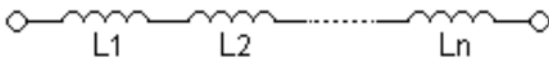
Se vi sono più induttori in **parallelo** nell'ipotesi che la **mutua induzione** tra di loro sia trascurabile, sono equivalenti ad un unico induttore con induttanza equivalente (L_{eq}):



$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Infatti la corrente che viene iniettata su tale rete si distribuisce tra in vari induttori in maniera tale che i prodotti delle loro induttanze per le correnti che li attraversano siano eguali. Questo in virtù del fatto che se la corrente iniettata varia nel tempo, la differenza di potenziale ai capi dei vari induttori deve essere eguale.

Se consideriamo n induttori in **serie** la corrente che li attraversa è la stessa, se la loro mutua induzione è trascurabile, il flusso concatenato all'insieme degli induttori è pari alla somma del flusso concatenato ad ogni singolo elemento.



Ne segue:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

Applicazioni

Un induttore assomiglia ad un **elettromagnete** come struttura, ma è usato per uno scopo diverso: immagazzinare energia in un campo magnetico.

Un'applicazione molto comune è negli **alimentatori** a commutazione (ad esempio: gli alimentatori per **computer**) che, rispetto agli alimentazioni tradizionali lineari, hanno un rendimento molto maggiore.

Per la loro capacità di modificare i segnali in corrente alternata, gli induttori sono usati nell'**elettronica analogica** e nel trattamento dei segnali elettrici, incluse le trasmissioni via etere.

Visto che la reattanza induttiva X_L cambia con la frequenza, un **filtro** elettronico può usare induttori assieme a **condensatori** ed altri componenti per filtrare parti specifiche dello spettro di frequenza di un segnale. Due o più induttori (con il campo magnetico in comune) costituiscono un **trasformatore** comunemente usato sia negli apparati elettronici che in **elettrotecnica**.

Fattore Q

Un induttore ideale non presenta fenomeni dissipativi: l'**energia** immagazzinata nel campo magnetico viene restituita

integralmente. In un induttore reale la corrente percorre un filo conduttore, con una sua resistenza, e genera un campo magnetico che attraversa il nucleo (se presente) ed eventuali altri oggetti nelle vicinanze (schermature o altro). La resistenza nel filo a frequenze elevate aumenta per l'**effetto pelle**, proporzionale in modo approssimativo con la radice quadrata della frequenza. Il nucleo ed eventuali materiali magnetici nelle vicinanze hanno un'isteresi che determina perdite proporzionali alla frequenza e **correnti parassite** proporzionali con il quadrato della frequenza. Se i materiali vicini sono conduttori avremo solo perdite per correnti parassite (proporzionali al quadrato della corrente). Tutto questo viene indicato mediante un **fattore di qualità Q** (in inglese: *Q factor*):

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

Più grande è il suo valore, migliore è il rendimento dell'induttore. In pratica è una funzione piuttosto complessa della frequenza (la frequenza compare al numeratore in ω , la pulsazione, ma la resistenza R che compare al denominatore è, come detto, fortemente legata ad essa). Si dovrà scegliere l'induttore in corrispondenza del massimo di questa funzione. In tutto questo non si è tenuto conto dei fenomeni di **saturazione** (corrente troppo intensa) che determinano un crollo dell'induttanza e quindi del fattore Q e che vanno anche tenuti presenti nella scelta dell'induttore.

Formule per il calcolo dell'induttanza

1. Formula per il calcolo dell'induttanza in un induttore cilindrico (con nucleo magnetico):

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

L = Induttanza in **henry** (H)

μ_0 = **Permeabilità magnetica** assoluta dell'aria (praticamente uguale a quella dello **spazio vuoto**) = $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$

μ_r = permeabilità relativa del materiale costituente il nucleo magnetico

N = numero di spire

A = area della sezione del nucleo magnetico in **metri quadri** (m^2)

l = lunghezza del nucleo in **metri** (m)

2. Induttanza di un filo diritto conduttore:

$$L = l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 200 \times 10^{-9}$$

L = induttanza in H

l = lunghezza del conduttore in metri

d = diametro del conduttore in metri

Quindi un conduttore lungo 10 mm con un diametro di 1 mm ha un'induttanza di circa 5,38 nH ma lo stesso filo lungo 100 mm ha un'induttanza di 100 nH.

3. Induttanza di un induttore corto cilindrico senza nucleo magnetico in funzione dei suoi parametri geometrici:

$$L = \frac{r^2 N^2}{9r + 10l} \quad (\text{è disponibile un calcolatore } on \text{ line. Vedi nota: } \supseteq)$$

L = induttanza in μH

r = raggio esterno dell'avvolgimento in pollici

l = lunghezza dell'avvolgimento in pollici

N = numero di spire

4. Induttanza di un induttore cilindrico a più strati in aria (senza nucleo magnetico):

$$L = \frac{0.8r^2 N^2}{6r + 9l + 10d}$$

L = induttanza in μH

r = raggio medi dell'avvolgimento in pollici

l = lunghezza degli avvolgimenti in pollici

N = numero di spire

d = spessore degli avvolgimenti (cioè raggio esterno meno raggio interno)

5. Induttanza di un filo avvolto a spirale piatta senza nucleo magnetico:

$$L = \frac{r^2 N^2}{(2r + 2.8d) \times 10^5}$$

L = induttanza in H

r = raggio medio della spirale in metri

N = numero di spire

d = spessore dell'avvolgimento (cioè raggio esterno meno raggio interno)

Quindi un avvolgimento a spirale di 8 spire, raggio medio di 25 mm e spessore di 10 mm dovrebbe avere un'induttanza di 5,13 μH .

6. Induttanza di un avvolgimento su un materiale magnetico di forma toroidale (di sezione circolare) di cui sia nota la permeabilità magnetica relativa μ_r :

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 r^2}{D}$$

L = induttanza in H

μ_0 = permeabilità del vuoto = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r = permeabilità relativa del materiale magnetico

N = numero di spire

r = raggio dell'avvolgimento in metri

D = diametro totale del toroide in metri

Le formule riportate sopra danno risultati approssimativi (specialmente la seconda, quella di un filo conduttore diritto).

La più precisa è la sesta che si riferisce ad un induttore toroidale.

Va notato che, negli avvolgimenti circolari, l'induttanza è proporzionale al quadrato del numero delle spire. Questo è utile nella pratica perché, nota l'induttanza ed il numero di spire di un induttore, si può facilmente modificarne l'induttanza variando il numero di spire con una discreta precisione.

Storia

Nel 1885, [William Stanley, Jr.](#) realizzò il primo induttore basandosi su un'idea di [Lucien Gaulard](#) e [John Gibbs](#). Era il precursore del moderno [trasformatore](#).

Immagini

Immagini di induttori per [circuiti stampati](#):

			
Induttore per circuito stampato	Vista esplosa dello stesso induttore	Induttore per circuito stampato con le spire realizzate sul circuito stampato stesso	Vista esplosa dello stesso induttore

Varie forme di nuclei magnetici per induttanze (immagini realizzate al computer):

			
Nucleo C	Nucleo U	Nucleo E	Nucleo ER
			
Nucleo EFD	Nucleo toroidale	Nucleo EP	Nucleo RM

Sinonimi

Induttanza, bobina, avvolgimento induttivo, reattore, solenoide.

Note

- ↑ [Calcolatore *on line* per induttore \(sia in pollici che centimetri\)](#). *66pacific.com Resources for amateur scientists* (http://www.66pacific.com/calculators/coil_calc.aspx)

Voci correlate

- Condensatore
- Induttanza
- Autoinduzione
- Mutua induzione
- Legge di Lenz
- Elettromagnete
- Convertitore buck
- Convertitore boost
- Convertitore buck-boost
- Convertitore DC-DC
- Fattore Q
- Induzione elettromagnetica
- Circuito RL
- Circuito RLC
- Trasformatore
- Giratore

Categorie: Componenti elettrici | Teoria dei circuiti

Induttanza

L'**induttanza** è la proprietà dei **circuiti elettrici** tale per cui la **corrente** che li attraversa induce una **forza elettromotrice** che, per la **legge di Lenz**, si oppone alla variazione dell'intensità della corrente stessa.

La grandezza fisica associata, detta anche **coefficiente di autoinduzione** *L* del circuito, è il rapporto tra il flusso del **campo magnetico** concatenato col circuito e la corrente elettrica passante.

Il termine fu utilizzato per la prima volta da **Oliver Heaviside** nel Febbraio 1886.^[1]

Indice

- 1 [Definizione](#)
- 2 [Proprietà dell'induttanza](#)
- 3 [Cenni sull'induttore](#)
- 4 [Circuito RL](#)
- 5 [Circuito RLC](#)
- 6 [Note](#)
- 7 [Bibliografia](#)
- 8 [Voci correlate](#)

Definizione

Una corrente elettrica *i* che scorre in un circuito elettrico produce un **campo magnetico** nello spazio circostante: se la corrente varia nel tempo il **flusso magnetico** Φ del campo concatenato al circuito risulta variabile, determinando entro il circuito una f.e.m. indotta che si oppone alla variazione del flusso. Il coefficiente di autoinduzione *L* del circuito è il rapporto tra il flusso del campo magnetico concatenato e la corrente, che nel caso semplice di una **spira** è dato da:

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

L'unità di misura dell'induttanza è detta **henry**: 1 H = 1 Wb /1 A, in onore di **Joseph Henry**.

In un induttore di 1 henry, quindi, una variazione di corrente di 1 ampere al secondo genera una forza elettromotrice di 1 **volt**.

Proprietà dell'induttanza

L'equazione che definisce l'induttanza può essere girata in questo modo:

$$\Phi = Li$$

Derivando entrambi i membri rispetto al tempo:

$$\frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}$$

In molti casi fisici l'induttanza può essere considerata costante (o tempo-invariante), per cui:

$$\frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

Dalla [legge di Faraday](#) si ha:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\mathcal{E} = v$$

dove \mathcal{E} è la [forza elettromotrice](#) (f.e.m.) e v è il potenziale indotto ai morsetti del circuito in questione.

Combinando le equazioni precedenti si ha:

$$L \frac{di(t)}{dt} = -\mathcal{E} = v(t)$$

da cui si evince che l'induttanza L di un componente attraversato da corrente variabile si può definire operativamente come l'opposto del rapporto tra la f.e.m. autoindotta e generata ai morsetti del componente e la derivata della corrente $di(t)/dt$ che lo attraversa.

L'origine del segno meno è una conseguenza della [legge di Lenz](#) che applicata a un induttore afferma in sostanza che la f.e.m. autoindotta ai capi di un componente si oppone alla variazione di corrente che lo attraversa. Per questo motivo l'induttanza è definita positiva.

L'energia immagazzinata in un [solenoid](#)e può essere espressa per mezzo della sua induttanza caratteristica L e della corrente i che scorre nelle sue spire.

La relazione è

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

dove W è l'energia immagazzinata.

La [legge di Ohm](#) esprime la relazione fra la tensione e una corrente stazionaria, mentre quella di [Faraday](#) il legame fra tensione e una corrente elettrica variabile.

Cenni sull'induttore



Per approfondire, vedi la voce [Induttore](#).

In termini circuitali, l'induttore è un [componente passivo](#) in cui l'aspetto induttivo prevale su quello [capacitivo](#) e su quello [resistivo](#). Esso è generalmente costituito dall'avvolgimento di un filo conduttore intorno ad un nucleo di materiale magnetico (ferrite). La relazione costitutiva di un induttore di induttanza L è la stessa riportata sopra. Valori tipici di

induttanza vanno dai nanohenry (*nH*) ai millihenry (*mH*).

Se un'impedenza di tipo puramente induttivo viene attraversata da una corrente sinusoidale del tipo:

$$i(t) = I_M \cos(\omega t + \phi_i),$$

dove I_M è il valore di corrente massimo, ω è la pulsazione angolare della sinusoide e ϕ_i è la fase della corrente, la tensione che comparirà sul ramo dell'impedenza sarà :

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -L\omega I_M \operatorname{sen}(\omega t + \phi_i) = L\omega I_M \cos(\omega t + \phi_i + \frac{\pi}{2}).$$

Nel ramo di un'impedenza completamente induttiva, quindi, le sinusoidi di tensione e corrente risultano sfasate di 90° e, in particolare, la tensione è in anticipo sulla corrente di 90°.

Nel dominio dei fasori le espressioni di corrente e tensione diventano:

$$\mathbf{I} = I_M e^{j\phi_i}$$

e

$$\mathbf{V} = \omega L I_M e^{j\phi_i} e^{j\frac{\pi}{2}} = j\omega L I_M e^{j\phi_i}.$$

Dalla legge di Ohm delle impedenze :

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}$$

si ha che l'impedenza di un induttore puro è:

$$\mathbf{Z} = j\omega L,$$

dove ω è la [pulsazione complessa](#) espressa in [radianti al secondo](#) (pari alla frequenza in [hertz](#) moltiplicata per 2π), e j è l'[unità immaginaria](#).

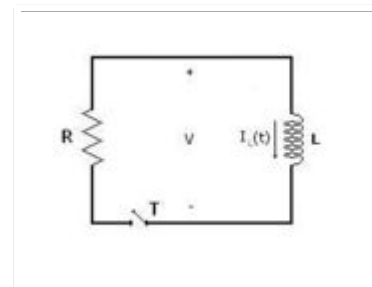
Data la relazione costitutiva dell'induttore, la corrente in esso è una funzione continua, mentre la tensione non lo è necessariamente.

In condizioni statiche ([corrente continua](#)), l'induttore ideale è equivalente ad un [corto circuito](#).

Data la necessità di inserire un nucleo di ferrite per ottenere valori apprezzabili di induttanza, l'induttore è il componente meno facile da integrare, e quindi viene spesso simulato tramite opportuni componenti attivi ([convertitore d'impedenza generalizzato](#) o GIC). A frequenze molto elevate, dell'ordine di centinaia di megahertz, l'impedenza mostrata dall'induttore diventa accettabile anche in presenza di basse induttanze, ed è quindi possibile realizzare induttori senza nucleo (induttore *in aria*).

Circuito RL

Si chiama *circuito RL* in **evoluzione libera** il circuito mostrato in figura composto da una resistenza e da un **induttore** percorso da **corrente**. Evoluzione libera significa che il circuito non ha sorgenti esterne di **tensione** o di **corrente**.



Circuito RL in evoluzione libera

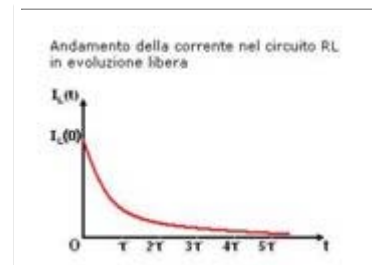
Per trattare questo circuito è conveniente usare i teoremi che riguardano le correnti vista la dualità lineare del comportamento dei circuiti tra la tensione e la corrente. Al tempo $t_0 = 0$ la corrente ai capi di L è $i_{L(0)} \neq 0$, questa viene presa come condizione iniziale.

Applicando la **legge di Kirchhoff** per le intensità di corrente, l'equazione del circuito è:

$$i(t) + i_L(t) = 0 \rightarrow \frac{v(t)}{R} + i_L(t) = 0$$

dove $i(t)$ è la **corrente elettrica** circolante. Ricordando che la relazione caratteristica dell'induttore è:

$$v(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$



Andamento della corrente circolante in L per il circuito RL in evoluzione libera

la legge di Kirchhoff diventa un'**equazione differenziale omogenea del primo ordine**:

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{di_L(t)}{dt} + i_L(t) = 0 \rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} + \frac{R}{L}i_L(t) = 0.$$

Per la teoria delle equazioni differenziali, la soluzione è:

$$i_L(t) = i_L(0) \cdot e^{-tR/L}$$

e di conseguenza la tensione è

$$v(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = -R \cdot i_L(0) \cdot e^{-tR/L}$$

Al rapporto $\frac{L}{R} = \tau$ [s] viene dato il nome di **costante di tempo** del circuito ed una quantità caratteristica costante del circuito.

Fisicamente la quantità di corrente contenuta nell'induttore tramite la relazione al momento iniziale, nel momento in cui l'interruttore T viene chiuso, viene scaricata entro il circuito: tale corrente elettrica si dissipa completamente nella resistenza R secondo la soluzione appena trovata: la corrente tende esponenzialmente a zero per $t \rightarrow \infty$. Il tempo caratteristico di questa caduta di corrente è proprio determinato dalla costante di tempo: essa è il valore dell'istante per il quale la corrente prende il valore di:

$$i(\tau) = \frac{1}{e}.$$

Circuito RLC

 Per approfondire, vedi la voce [Circuito RLC](#).

In generale, si dice **RLC** un circuito che contenga solo [resistenze](#) (R), [induttori](#) (L) e [condensatori](#) (C). Per estensione, viene spesso definito RLC un circuito che contenga anche altri elementi passivi, ma nessun elemento attivo.

I circuiti RLC sono [sistemi](#) lineari, per lo più stazionari (ma non necessariamente). In particolare, ciò significa che un circuito RLC *non può* creare frequenze dal nulla: può eventualmente sopprimerle. Infatti, la nascita di nuove frequenze (distorsione) avviene soltanto negli elementi attivi a [semiconduttore](#) e negli elementi non lineari, come [diodi](#) e [transistor](#).

Note

- ↑ (EN) Heavyside, O. Electrician. Feb. 12, 1886, p. 271. See reprint (<http://books.google.com/books?id=bywPAAAAIAAJ&printsec=frontcover&dq=electrical+papers+heavyside>)

Bibliografia

- Frederick W. Grover, *Inductance Calculations*, Dover Publications, New York, 1952.
- Griffiths, David J., *Introduction to Electrodynamics (3rd ed.)*, Prentice Hall, 1998. ISBN 0-13-805326-X
- Roald K. Wangsness, *Electromagnetic Fields*, 2nd ed., Wiley, 1986. ISBN 0-471-81186-6
- Hughes, Edward., *Electrical & Electronic Technology (8th ed.)*, Prentice Hall, 2002. ISBN 0-582-40519-X
- [Küpfmüller K.](#), *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*, Springer-Verlag, 1959.
- Heavyside O., *Electrical Papers*. Vol.1. – L.; N.Y.: Macmillan, 1892, p. 429-560.

Voci correlate

- [Autoinduzione](#)
- [Forza elettromotrice](#)
- [Induzione elettromagnetica](#)
- [Mutua induzione](#)
- [Circuito RL](#)
- [Circuito RLC](#)

Categoria: [Grandezze fisiche](#)