

INDICE

A.	PRINCIPI DI ELETTROTECNICA ED ELETTROMAGENTISMO	3
A.1	Introduzione	3
A.2	Concetti generali.....	3
A.2.1	L'elettricità	3
A.2.2	I fenomeni elettrostatici	3
A.2.3	La struttura atomica.....	4
A.3	Grandezze fondamentali	5
A.3.1	Unità di misura dell'energia elettrica	6
A.3.2	La tensione elettrica	6
A.3.3	Potenziale di massa e potenziale di terra	7
A.3.4	L'intensità di corrente	7
A.4	Il circuito elettrico.....	7
A.4.1	Resistenza elettrica	8
A.4.2	La legge di Ohm	9
A.4.3	Collegamenti di resistenze in serie e parallelo.....	10
A.4.4	Caduta di tensione di una linea elettrica	14
A.4.5	Corto circuito	15
A.4.6	Messa a terra.....	15
A.4.7	I Condensatori	16
A.5	Potenza elettrica.....	18
A.5.1	L'effetto Joule	18
A.5.2	Problematiche tecniche dell'effetto Joule.....	19
A.6	Generatori di corrente continua.....	19
A.6.1	La pila	19
A.6.2	Caratteristiche della pila	20
A.6.3	Batterie di pile.....	21
A.6.4	L'accumulatore	22
A.7	Analogia tra circuiti elettrici e circuiti idraulici	22
A.7.1	Corrente elettrica	22
A.7.2	Differenza di potenziale.....	23
A.7.3	Resistenza elettrica	24
A.7.4	Condensatore	24
A.7.5	Circuito elettrico.....	24
A.8	Magnetismo ed elettromagnetismo	25

A.8.1	I fenomeni magnetici	25
A.8.2	I materiali magnetici.....	26
A.8.3	I fenomeni elettromagnetici	28
A.8.4	Caratteristiche del circuito elettromagnetico	29
A.8.5	L'induzione elettromagnetica.....	30
A.8.6	Azioni elettromagnetiche	34
A.8.7	Induzione mutua	34
A.8.8	Autoinduzione e Induttanza.....	35
A.8.9	Analogia tra induzione magnetica e inerzia dei corpi.....	37
A.8.10	Correnti parassite	38
A.9	La corrente alternata	39
A.9.1	Caratteristiche della corrente alternata	39
A.9.2	Circuiti resistivi e induttivi - reattanza, impedenza e sfasamento	39
A.9.3	Circuiti capacitivi e risonanza	42
A.9.4	Potenza Elettrica in Corrente Alternata	43
A.9.5	Fattore di potenza.....	46
A.9.6	Rifasamento	47
A.10	Sistemi trifase	47
A.10.1	La fase in corrente alternata.....	47
A.10.2	Tensione alternata trifase	48
A.10.3	Collegamenti trifase.....	50
A.10.4	Collegamento a stella.....	51
A.10.5	Collegamento a triangolo	51
A.10.6	Potenza attiva nei sistemi trifase.....	52
A.10.7	Campo magnetico rotante nei sistemi trifase	52

A. PRINCIPI DI ELETTROTECNICA ED ELETTROMAGENTISMO

A.1 Introduzione

Questa appendice descrive i concetti di base dell'elettricità e del magnetismo nella maniera più semplice possibile, compatibilmente con le difficoltà intrinseche degli argomenti, al fine di comprendere meglio gli argomenti descritti nei Capitoli 4 e 5, più specifici per il superamento dell'esame e il successivo svoglimento delle attività di capo servizio.

Questa appendice è ideata e fortemente consigliata per coloro che hanno poche o nessuna nozione di elettrotecnica di base, mentre chi ha già studiato tali argomenti può comunque consultarli come utile ripasso ma, se le proprie conoscenze in materia sono sufficienti, può cominciare lo studio dal Capitolo 4.

A.2 Concetti generali

A.2.1 L'elettricità

L'elettricità è una forma di energia invisibile i cui effetti vengono percepiti durante la sua utilizzazione quotidiana. Ricordiamo che l'energia è la capacità che ha un corpo di compiere un lavoro. Ad esempio un'auto in corsa è dotata di una certa energia (l'energia cinetica) e se investe un muro può essere in grado di deformarlo; ha compiuto un lavoro. In natura vi sono diverse forme di energia e l'elettricità, o meglio l'energia elettrica, è una di queste. L'energia elettrica è una forma di energia facilmente trasportabile, disponibile e controllabile. Proprio per questo motivo dal XIX secolo in poi essa si è affermata, insieme all'energia chimica, come una delle forme di energia maggiormente utilizzate per lo svolgimento delle attività umane.

A.2.2 I fenomeni elettrostatici

L'uomo fin dall'antichità ha fatto esperienza quasi quotidiana dell'elettricità attraverso fenomeni di tipo elettrostatico quali, ad esempio, l'elettrizzazione per strofinio e le scariche atmosferiche.

Il termine elettrico deriva dalla parola greca elektron che significa ambra. L'ambra è un materiale resinoso di origine fossile che, se è opportunamente strofinato, presenta delle interessanti proprietà elettriche. Bisogna attendere il XIX secolo perché l'uomo inizi a dare una spiegazione scientifica compiuta ai fenomeni elettrostatici.

Oggi sappiamo che le forze elettriche condizionano fortemente le proprietà fisiche e chimiche di tutta la materia, ma un tempo, ad eccezione del grandioso spettacolo del fulmine, le normali manifestazioni della natura, dall'acqua che gela alla pianta che cresce, non sembravano avere alcun legame col curioso comportamento degli oggetti elettrizzati.

Esperienze elettrostatiche fondamentali

Prendiamo due bacchette, una di vetro ed una di plastica, le strofiniamo entrambe con un panno di lana, le appendiamo con filo in modo che stiano orizzontali e sufficientemente libere di muoversi. Se avviciniamo le due bacchette notiamo che esse tendono ad attrarsi.

Ripetiamo l'esperimento con due bacchette dello stesso materiale, ad esempio il vetro. Si può osservare che le bacchette in questo caso tendono a respingersi.

Da queste due esperienze si possono trarre le seguenti deduzioni:

- strofinando tra loro due corpi, questi si elettrizzano;

- la carica elettrica acquisita può provocare due comportamenti opposti (la bacchetta di vetro è attirata dalla bacchetta di plastica ed è respinta da un'altra bacchetta di vetro elettrizzata).

Per distinguere questi due comportamenti è necessario ipotizzare che la carica elettrica acquisita per strofinio siano di due tipi diversi. E' ragionevole ipotizzare che due bacchette dello stesso materiale, in questo caso vetro o plastica, strofinate allo stesso modo si elettrizzino nello stesso modo. Queste due varietà di cariche elettriche ormai da diverso tempo sono state chiamate positiva e negativa

In sintesi si può affermare che:

- esistono due tipi di cariche elettriche denominate positiva e negativa.
- corpi elettricamente carichi dello stesso segno si respingono e corpi elettricamente carichi di segno opposto si respingono.

Inoltre, poiché un corpo non elettrizzato non ha la proprietà di esercitare forze elettriche sui corpi circostanti si deduce che esso contiene cariche elettriche positive e negative in ugual numero: in pratica esso è elettricamente neutro.

A.2.3 La struttura atomica

Per comprendere i fenomeni elettrici è importante conoscere la struttura dell'atomo.

Nel 1803 lo scienziato inglese John Dalton (1766 – 1844) arrivò alla conclusione che la materia è costituita da particelle piccolissime ed indivisibili a cui venne dato il nome di atomi. Inoltre egli pensava che i composti fossero costituiti da piccole particelle, denominate molecole, contenenti un piccolo numero di atomi.

Alla luce della teoria atomica di Dalton si inizia a fare una distinzione chiara all'interno delle sostanze semplici tra elementi chimici e composti chimici.

Anche se nei primi anni del XIX secolo era già chiara l'esistenza di cariche elettriche positive e negative, bisogna attendere il 1897 perché si iniziò a chiarire il legame esistente tra cariche elettriche e struttura atomica. In quell'anno l'inglese Joseph John Thomson (1856 - 1940) scoprì che in tutti gli atomi sono presenti particelle di carica negativa, a cui egli diede il nome di elettroni.

Nel corso dei primi trenta anni del XX secolo furono fatte in rapida successione numerose esperienze che hanno permesso di chiarire la struttura interna degli atomi. In particolare si scoprì che gli atomi non erano indivisibili ma anzi, che erano formati da tre particelle fondamentali: l'elettrone, il protone ed il neutrone.

L'elettrone è dotato di una carica elettrica negativa pari a $-1,6 \cdot 10^{-17}$ coulomb.

Il protone è dotato dello stesso tipo e della stessa quantità di carica del positrone, ma a differenza di esso, e quindi anche dell'elettrone, è dotato di una massa molto più grande.

Il neutrone è così chiamato perché non manifesta proprietà elettriche. Esso è dotato di una massa appena più grande del protone.

Il protone ed il neutrone formano insieme il nucleo atomico, il punto centrale dell'atomo dove risiede la stragrande maggioranza della sua massa.

Nel 1911, il fisico neozelandese Ernest Rutherford arrivò alla conclusione sorprendente che il raggio del nucleo era di circa 10.000 volte inferiore di quello dell'atomo.

In modo approssimato possiamo immaginare l'atomo come un minuscolo sistema solare.

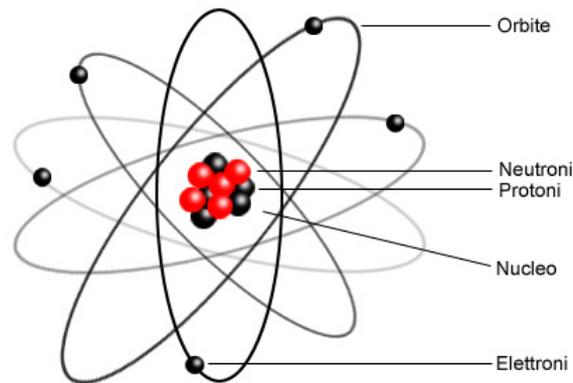


Figura 1 – Struttura dell'atomo

Ad esempio l'atomo del rame è costituito da 29 elettroni, 35 neutroni e 29 protoni.

Un atomo normale ha un numero uguale di elettroni e protoni e la carica positiva e negativa si annullano a vicenda, si dice che l'atomo è **elettricamente neutro**.

Gli elettroni in condizioni normali ruotano liberamente lungo orbite fisse attorno al nucleo senza sfuggire, essendo trattenuti in questo movimento dalle cariche positive del nucleo stesso.

Cioè le cariche elettriche del nucleo e le cariche negative degli elettroni, si compensano, determinando uno stato di equilibrio per cui le sostanze pur possedendo delle cariche elettriche, in condizioni normali non manifestano elettricità.

A.3 Grandezze fondamentali

Da quanto descritto nel paragrafo precedente si può concludere che esiste nell'interno degli atomi, e quindi nei corpi, una forza di attrazione originata dall'esistenza di cariche elettriche.

Lo spazio esistente tra il nucleo e gli elettroni, in cui si risentono tali forze di attrazione, viene detto **campo elettrico**.

Gli elettroni presenti in qualsiasi materiale sono dunque influenzati da tali campi elettrici, ma normalmente questi non impediscono agli elettroni delle orbite più esterne degli atomi che compongono il materiale di essere in continuo movimento nella materia, passando da un atomo all'altro in maniera casuale e senza una particolare direzione. Questo movimento di elettroni non costituisce un flusso di elettroni. Per avere un flusso di elettroni è necessario che ci sia un movimento continuo in cui la maggior parte degli elettroni liberi si muove nella stessa direzione.

Lo spostamento delle cariche elettriche viene definita **corrente elettrica**.

Il senso di spostamento è quello determinato dalle cariche negative che si spostano verso quelle positive.

Convenzionalmente e per ragioni storiche, invece, si assume che siano le cariche positive a spostarsi verso le negative. Cioè si assume che la corrente vada dal + al -. Il punto da cui partono le cariche si dice **polo positivo** ed il punto in cui arrivano **polo negativo**.

Non tutte le sostanze, hanno uguale attitudine a lasciarsi attraversare dalle cariche elettriche. Quelle che più facilmente consentono il passaggio, si dicono **conduttori**.

Sono conduttori i metalli in genere, il carbone, ecc.

Si dicono **isolanti** quei materiali che non si lasciano attraversare con facilità dalle cariche elettriche e quindi oppongono una notevole resistenza.

Sono isolanti: la gomma, il vetro, l'olio, l'aria, il legno, le vernici, la carta, la mica, la porcellana, ecc.

I **semiconduttori**, come il silicio, sono materiali con proprietà conduttrici inferiori a quelle dei conduttori, ma superiori agli isolanti. Opportunamente trattati ed in particolari condizioni, tali materiali possono presentare un numero di elettroni, nelle orbite più esterne degli atomi che li compongono, superiore o inferiore alla norma, e quindi possono variare la propria conducibilità. Questa proprietà è fondamentale per la realizzazione dei circuiti elettronici.

Le cariche elettriche che si spostano in un conduttore compiono un **lavoro**.

Il lavoro che possono compiere le cariche elettriche, viene definito **energia elettrica**.

L'energia elettrica, come tutte le forme di energia, può essere ottenuta dalla trasformazione di altre energie e può nuovamente essere trasformata in quest'ultima.

Alcuni esempi di sorgenti di energia elettrica sono le seguenti:

Attrito

Lo strofinamento di materiali, come visto, determina la formazione di cariche; probabilmente tale situazione è stata da voi sperimentata quando passeggiate su alcuni tipi di tappeti.

Azione chimica

Una batteria elettrica utilizza l'azione chimica di diversi materiali per produrre energia elettrica.

Pressione

Se su alcuni tipi di cristalli applicate una pressione è possibile produrre energia elettrica.

Calore

Il principio della termocoppia sfrutta proprio il calore applicato alla giunzione di due materiali diversi.

Magnetismo

Il movimento di un filo costituito da materiale conduttore in un campo magnetico determina il movimento degli elettroni verso un capo del filo.

Luce

Alcuni dispositivi, come le fotocellule, se colpiti da luce possono produrre energia elettrica.

A.3.1 Unità di misura dell'energia elettrica

L'energia elettrica è una particolare forma di energia e, in quanto tale, si misura in Joule. Per motivi storici e tecnici nei vari ambiti tecnologici, si sono affermate anche altre unità di misura dell'energia, tra cui le più usate sono la Caloria (Cal) e la Kilocaloria (Kcal).

Nel settore elettrico le unità di misura dell'energia più utilizzate sono:

Wattora: 1Wh = 1 Watt × 3600 secondi

Kilowattora: 1kWh = 1000 Wh

A.3.2 La tensione elettrica

La tensione elettrica è la forza che agendo tra le cariche elettriche di segno opposto cerca di avvicinarle, spingendole attraverso i conduttori.

Essa viene indicata in genere con la lettera V e può essere paragonata, in idraulica, alla differenza di livello dell'acqua contenuta in due serbatoi collegati tra loro da un tubo.

Ad esempio, perché un liquido possa scorrere in un tubo, occorre una differenza di livello del liquido tra le estremità del tubo stesso. In maniera analoga per avere un passaggio di cariche elettriche in un conduttore, occorre una differenza di potenziale, cioè occorre che tra le estremità del conduttore esista una tensione.

La tensione elettrica o **differenza di potenziale (d.d.p.)** viene detta anche **Forza elettromotrice (f.e.m.)** e la sua unità di misura è il **Volt (V)**.

Se la tensione è molto piccola, il suo valore si può esprimere in millivolt (mV). Il millivolt corrisponde alla millesima parte del Volt. Mentre, se è molto grande si esprime in kilovolt (kV).

Il kilovolt corrisponde a mille Volt.

Gli strumenti usati per misurarla sono i **voltmetri**.

A.3.3 Potenziale di massa e potenziale di terra

In un sistema elettrico sono sempre presenti punti a potenziale elettrico differente. Per comodità quando si studia un sistema elettrico si considera un punto del sistema come riferimento, per lo stesso motivo per cui per misurare l'altitudine sulla crosta terrestre si considera il livello del mare come altitudine di riferimento. Questo particolare punto della rete elettrica è denominato massa ed il suo potenziale elettrico potenziale di massa. I potenziali di tutti gli altri punti della rete vengono valutati rispetto al potenziale di massa.

Un altro punto di riferimento molto usato nel settore elettrico è la terra, a cui generalmente vengono connesse le parti metalliche delle apparecchiature elettriche al fine di proteggere gli utenti che operano con esse. Il potenziale elettrico a cui si trova la terra è per convenzione nullo. Pertanto la massa di un circuito elettrico può trovarsi ad un potenziale diverso da quello della terra, e quindi da zero.

A.3.4 L'intensità di corrente

L'intensità di corrente è la quantità di cariche elettriche o elettricità che passa attraverso un conduttore nell'unità di tempo. Essa viene indicata con la lettera **I**.

L'intensità di corrente può essere paragonata in idraulica alla quantità di liquido che passa attraverso un tubo nell'unità di tempo, cioè alla sua portata.

L'intensità di corrente viene detta comunemente **Corrente** e la sua unità di misura è l' **Ampère (A)**.

Se l'intensità di corrente è molto piccola, il suo valore si può esprimere in milliampere (mA). Il milliampere corrisponde alla millesima parte dell'ampere. Mentre, se è molto grande si può esprimere in kiloampere (kA). Il kiloampere corrisponde a mille Ampere.

Gli strumenti usati per misurarla sono gli **amperometri**.

A.4 Il circuito elettrico

Il circuito elettrico è costituito da un insieme di apparecchiature collegate tra loro per mezzo dei conduttori, attraverso i quali può passare la corrente elettrica. Il circuito elettrico più semplice possibile è quello mostrato nella figura seguente, costituito da un **generatore** di tensione e da una resistenza (una lampadina nella figura) come **utilizzatore**.

Perché la corrente elettrica possa circolare è necessario che il circuito sia continuo, cioè che non vi siano interruzioni e che alle due estremità sia applicata una tensione elettrica.

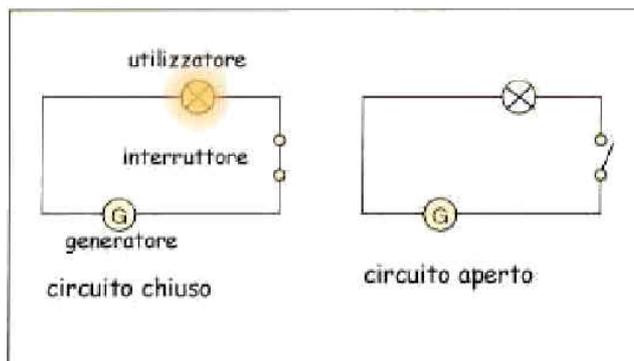


Figura 2 – Circuito elettrico con interruttore aperto e chiuso

Se l'interruttore è **aperto**, la corrente non può circolare, conseguentemente la lampadina è spenta ed il circuito viene detto **aperto**.

Se l'interruttore è **chiuso**, la corrente passa attraverso i conduttori, giunge alla lampadina che si accende e ritorna alla linea, per cui il circuito viene detto **chiuso**.

Non tutti i conduttori, si lasciano attraversare dalla corrente elettrica con la stessa facilità, in quanto offrono, a seconda della loro natura, un diverso ostacolo al passaggio della stessa (resistenza).

Gli isolanti riescono ad opporsi completamente al passaggio della corrente. Quando un materiale isolante non è più in grado di opporsi al passaggio della corrente si verifica, attraverso esso, la **scarica elettrica**.

A.4.1 Resistenza elettrica

La resistenza elettrica rappresenta l'ostacolo che si oppone al passaggio delle cariche elettriche; cioè come già visto, è la caratteristica che hanno tutti i corpi a non lasciarsi attraversare con facilità dalla corrente elettrica. Essa viene indicata con la lettera **R**.

Il valore della resistenza elettrica, dipende dai seguenti elementi:

- **Resistività (ρ)**

La resistività è la resistenza che presenta un conduttore della lunghezza di 1 metro e della sezione di un metro quadrato, essa varia al variare della natura del conduttore.

L'inverso della resistività si chiama **conducibilità**.

- **Lunghezza (l)**

La lunghezza di un conduttore, rappresenta il percorso effettivo che deve compiere la corrente elettrica e viene misurata in metri (m).

- **La sezione (S)**

La sezione di un conduttore è l'area della superficie che esso presenta quando è tagliato trasversalmente, essa viene misurata in metri quadrati (m^2). La forma della sezione dei conduttori normalmente usati è rettangolare o circolare.

Il valore della resistenza viene calcolato mediante la seguente formula:

$$\text{RESISTENZA} = \rho \frac{l}{S}$$

L'unità di misura della resistenza elettrica è l'Ohm e viene indicata con la lettera greca **omega (Ω)**.

Se la resistenza è molto piccola il suo valore si esprime in microohm (Il microohm corrisponde alla milionesima parte dell'ohm).

Mentre se la resistenza è molto grande il suo valore si può esprimere in megaohm (Il megaohm corrisponde ad un milione di ohm).

Il valore della resistenza elettrica, oltre ad essere calcolato, può anche essere misurato mediante uno strumento detto Ohmmetro.

Il valore della resistenza elettrica dei conduttori non è costante, ma varia al variare della temperatura. All'aumentare della temperatura la resistenza elettrica dei conduttori aumenta, mentre diminuisce la resistenza dei liquidi, degli isolanti e del carbone. Fanno eccezione alcuni materiali, come la manganina e la costantana, per i quali la resistenza rimane costante a qualsiasi valore della temperatura.

In analogia con i sistemi idraulici, differenti resistenze possono essere rappresentate da tubazioni di differenti sezioni.

A.4.2 La legge di Ohm

La tensione, la corrente e la resistenza sono strettamente legate tra loro, come in idraulica sono legate tra loro: il dislivello, la quantità di acqua che passa in un tubo, la natura e la dimensione della condotta.

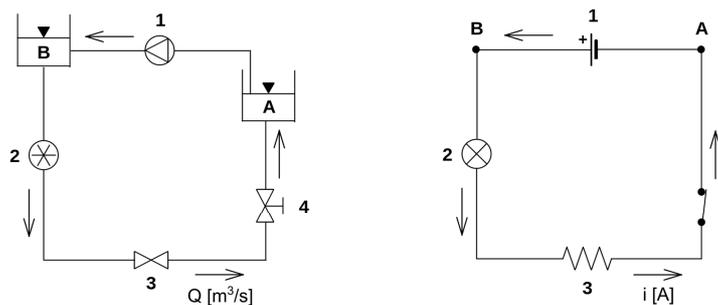


Figura 3 – Analogia tra circuito idraulico e circuito elettrico

Nella figura precedente viene mostrata una analogia tra un circuito idraulico (a sinistra) e un circuito elettrico (a destra): la differenza di potenziale elettrico tra i due punti A e B del circuito elettrico è analoga alla differenza di pressione tra i due punti A e B del circuito idraulico corrispondente. Nella figura sono indicati inoltre i seguenti dispositivi, tra loro analoghi:

- 1 - pompa idraulica / generatore di tensione;
- 2 - turbina / lampadina;
- 3 - valvola di laminazione / resistore;
- 4 - valvola di chiusura / interruttore.

Infatti, a parità di resistenza idraulica del tubo, la quantità d'acqua che lo attraversa è tanto maggiore quanto maggiore è il dislivello.

A parità di resistenza elettrica la corrente è tanto maggiore quanto maggiore è la tensione.

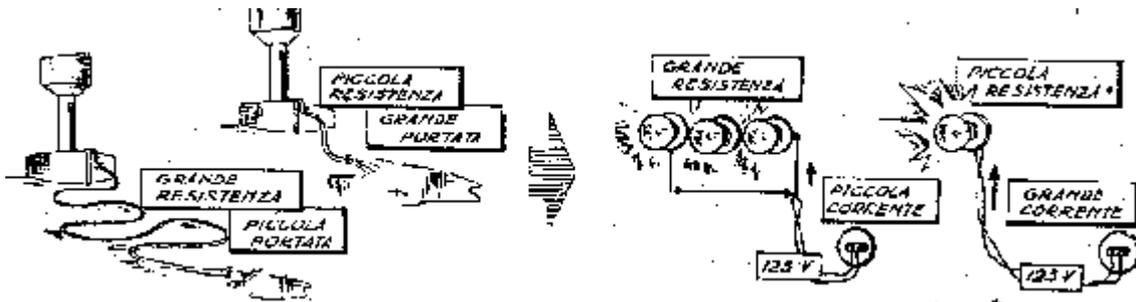


Figura 4 – Analogia tra corrente e portata

La relazione tra la tensione elettrica, l'intensità di corrente e la resistenza elettrica, rappresenta la **Legge di Ohm** e viene espressa dalle seguenti formule:

$$R = V/I \quad V = R \times I \quad I = V/R$$

A.4.3 Collegamenti di resistenze in serie e parallelo

Il collegamento delle resistenze elettriche di un circuito può essere effettuato in modi diversi:

Resistenze collegate in serie

Un circuito con resistenze in serie viene realizzato collegando le singole resistenze una di seguito all'altra.

Il valore della resistenza totale è dato dalla somma delle singole resistenze:

$$R_{totale} = R_1 + R_2 + R_3$$

Pertanto, la resistenza totale è tanto maggiore quanto maggiore è il numero delle resistenze collegate.

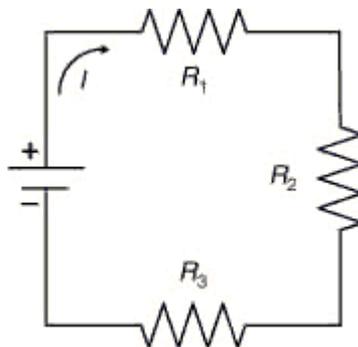


Figura 5 – Circuito con resistenze in serie

Due o più resistenze collegate in serie, ed inserite in un circuito elettrico, vengono attraversate dalla stessa intensità di corrente; infatti, la corrente che attraversa la prima resistenza, per ritornare alla linea, deve passare attraverso tutte le altre.

L'intensità di corrente, che attraversa le resistenze in serie, dipende dalla tensione V applicata al circuito e dalla resistenza totale del circuito stesso, ed è data da:

$$I = \frac{V}{R_{totale}}$$

La caduta di tensione, provocata da ogni resistenza, dipende dal valore della resistenza R e dall'intensità di corrente I che la attraversa ed è data da:

$$V_1 = R_1 \times I \quad V_2 = R_2 \times I \quad V_3 = R_3 \times I$$

La tensione totale, applicata al circuito, è uguale alla caduta di tensione totale del circuito stesso che è pari alla somma delle singole cadute di tensione:

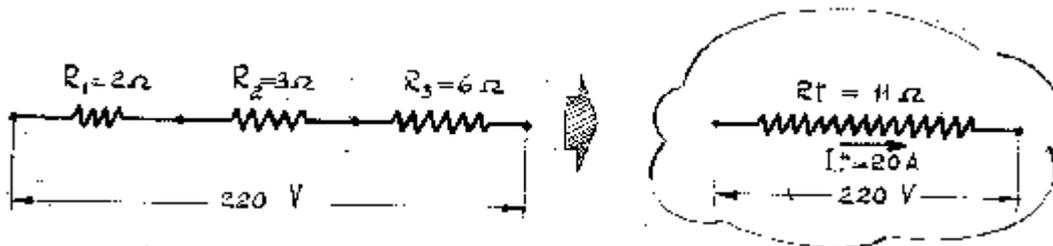
$$V_{\text{totale}} = V_1 + V_2 + V_3$$

Ad esempio: un circuito costituito da tre resistenze collegate in serie del valore di 2 ohm, 3 ohm e 6 ohm, presenta una resistenza totale di:

$$R_{\text{totale}} = R_1 + R_2 + R_3 = 2 + 3 + 6 = 11 \Omega$$

Se il circuito viene alimentato a 220 Volt, esso è attraversato da una corrente di:

$$\frac{V}{R_{\text{totale}}} = \frac{220}{11} = 20 \text{ A}$$

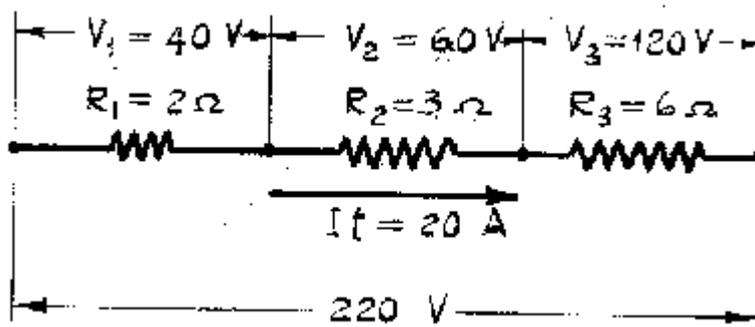


Ogni resistenza provoca una caduta di tensione di:

$$V_1 = R_1 \times I = 2 \times 20 = 40\text{V} \quad V_2 = R_2 \times I = 3 \times 20 = 60\text{V} \quad V_3 = R_3 \times I = 6 \times 20 = 120\text{V}$$

La somma delle singole cadute di tensione è pari alla tensione totale applicata al circuito:

$$V_{\text{totale}} = V_1 + V_2 + V_3 = 40 + 60 + 120 = 220\text{V}$$



Concludendo, in un circuito costituito da resistenze in serie:

- La resistenza totale aumenta all'aumentare del numero delle singole resistenze ed è determinato principalmente dalla resistenza più grande.
- La corrente percorre tutte le resistenze con uguale intensità.
- La tensione applicata è uguale alla somma delle tensioni esistenti ai capi delle singole resistenze.

Resistenze collegate in parallelo

Un circuito con resistenze in parallelo viene realizzato collegando tra loro le estremità delle singole resistenze.

Due o più resistenze collegate in parallelo ed inserite in un circuito elettrico, sono sottoposte alla stessa tensione.

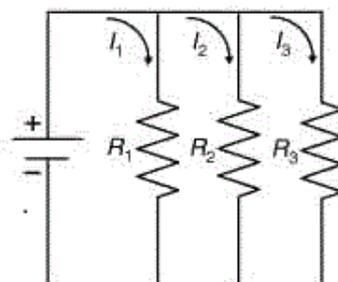


Figura 6 – Circuito con resistenze in parallelo

L'intensità di corrente totale, che attraversa il circuito, dipende dalla tensione V applicata ai morsetti delle resistenze e dalla resistenza totale del circuito, ed è data da:

$$I_{\text{totale}} = \frac{V}{R_{\text{totale}}}$$

L'intensità di corrente, che attraversa ogni resistenza, dipende dalla tensione V applicata ai suoi morsetti e dalla resistenza R , ed è data da:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \quad I_2 = \frac{V}{R_2} \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

L'intensità di corrente totale si ripartisce tra le resistenze in maniera inversa al loro valore. Cioè, a parità di corrente totale assorbita, ogni resistenza viene percorsa da una corrente tanto maggiore, quanto minore è il valore della resistenza stessa rispetto alle altre.

La somma delle correnti, che attraversano le varie resistenze, è sempre uguale alla corrente totale assorbita:

$$I_{\text{totale}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_{\text{totale}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

$$I_{\text{totale}} = V \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

da cui segue la regola per la combinazione di resistenze in parallelo:

$$\frac{1}{R_{\text{totale}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

In un collegamento in parallelo il reciproco (inverso) della resistenza complessiva equivalente R_{totale} è uguale alla somma dei reciproci (inversi) delle singole resistenze.

Ad esempio: un circuito costituito da tre resistenze collegate in parallelo del valore di 2 ohm, 8 ohm e 5 ohm, presenta una resistenza totale di:

$$\frac{1}{R_{\text{totale}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + \frac{1}{5} = \frac{(5 \times 8) + (5 \times 2) + (2 \times 8)}{2 \times 5 \times 8} = \frac{66}{80}$$

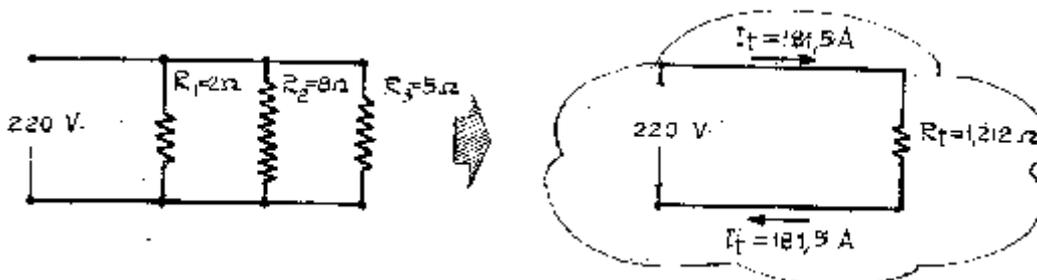
80

$$R_{\text{totale}} = \frac{80}{66} = 1,212 \Omega$$

66

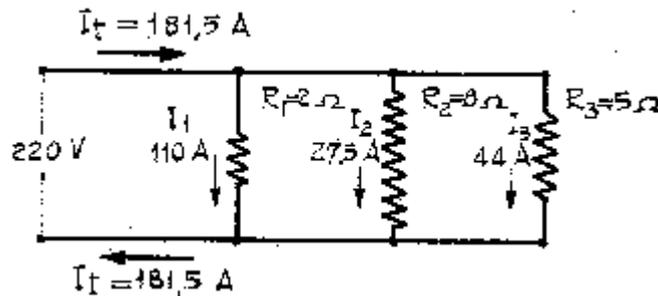
Se il circuito viene alimentato a 220 Volt, esso è attraversato da una corrente totale di:

$$I_{\text{totale}} = \frac{V}{R_{\text{totale}}} = \frac{220}{1,212} = 181,5 \text{ A}$$



L'intensità di corrente che attraversa ogni singola resistenza risulta di

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{V}{R_1} = \frac{220}{2} = 110\text{A} & I_2 &= \frac{V}{R_2} = \frac{220}{8} = 27,5\text{A} & I_3 &= \frac{V}{R_3} = \frac{220}{5} = 44\text{A} \\
 R_1 &= 2 & R_2 &= 8 & R_3 &= 5 \\
 I_{\text{totale}} &= I_1 + I_2 + I_3 = 110 + 27,5 + 44 = 181,5\text{A}
 \end{aligned}$$



Concludendo, in un circuito costituito da resistenza in parallelo:

- La resistenza totale diminuisce all'aumentare del numero delle singole resistenze ed è determinato principalmente dalla resistenza più piccola.
- La corrente che circola nell'interno del circuito è uguale alla somma delle correnti che circolano nelle singole resistenze.
- La tensione applicata è uguale per tutte le singole resistenze.

A.4.4 Caduta di tensione di una linea elettrica

Normalmente nei circuiti elettrici la tensione fornita da un **generatore**, sia esso una batteria, un gruppo elettrogeno o la rete elettrica generale, si considera per semplicità tutta utilizzata dagli altri componenti del circuito, detti appunto **utilizzatori**, trascurando così la resistenza dei conduttori che collegano i vari componenti del circuito.

Tuttavia, in alcuni casi la resistenza dei cavi non può essere trascurata, in quanto una parte significativa della tensione fornita dal generatore viene dissipata da questi cavi e non arriva agli utilizzatori.

La caduta di tensione (c.d. t) rappresenta il valore della tensione che si stabilisce ai capi del conduttore quando è percorso da corrente. Essa è data da:

$$\text{Caduta di tensione } V = R \times I$$

Ad esempio: la caduta di tensione di una linea elettrica della resistenza di 2 ohm quando è percorsa da una corrente di 20 A è di:

$$2\Omega \times 20\text{A} = 40\text{V}$$

Cioè, se la tensione in partenza è di 220V, in arrivo si ha una tensione di;

$$220\text{V} - 40\text{V} = 180\text{V}$$

La caduta di tensione della linea non viene utilizzata dall'utente e quindi rappresenta sempre una perdita, perché la potenza elettrica diminuisce al diminuire della tensione.

Pertanto, per ridurre le perdite, occorre ridurre la caduta di tensione della linea riducendo:

- **La resistenza della linea**
- **L'intensità della corrente che l'attraversa.**

A.4.5 Corto circuito

Il corto circuito si verifica quando in parallelo ad un circuito in tensione, si stabilisce una resistenza di valore piccolissimo che provoca un elevato passaggio di corrente.

Un caso pratico di corto circuito si verifica quando, per un difetto di isolamento o per altre cause, due conduttori sotto tensione vengono a contatto tra loro.

In questo caso, tra i due punti di contatto, si stabilisce una resistenza di valore piccolissimo che risulta in parallelo a quella dell'utilizzatore, per cui, con tensione normale, la linea assorbe un'elevata corrente sviluppando una notevole quantità di calore che può fondere i conduttori stessi.

Ad esempio: una lampada avente una resistenza di 440 ohm, alimentata a 220 V, assorbe una corrente di 0,5 A.

Se i due fili di alimentazione vengono a contatto tra loro inseriscono, in parallelo alla lampada, una resistenza di contatto.

Supponendo che la resistenza di contatto R_c sia di 0,2 ohm, la resistenza totale del circuito diminuisce e risulta inferiore a 0,2 ohm.

Pertanto l'intensità di corrente che ora attraversa il circuito risulta molto elevata e può fondere i conduttori della linea.

Per eliminare questo inconveniente, si ricorre all'impiego di **valvole fusibili** o di **dispositivi automatici** inseriti in serie al circuito, che provvedono ad interromperlo quando la corrente supera il valore normale.

A.4.6 Messa a terra

La messa a terra consiste nel collegare al terreno, mediante conduttori e dispersori, le parti metalliche degli impianti elettrici che normalmente non sono in tensione. Essa si effettua per limitare eventuali tensioni, dovute a guasti, che si possono stabilire tra la custodia delle macchine o delle apparecchiature elettriche e la terra.

Infatti se, per un guasto, la custodia di una macchina elettrica risulta sottoposta a tensione, tra la custodia e la terra si ha un passaggio di corrente, di conseguenza la tensione che la custodia assume verso terra è data da:

$$V = I \times R$$

(in cui V è la tensione della custodia, I è la corrente di terra, R è la resistenza di terra.)

Per cui, la tensione che si stabilisce tra la custodia e la terra sarà tanto minore, quanto minore è la resistenza esistente tra la custodia ed il terreno stesso.

Ad esempio:

Se la resistenza della macchina è di 10 ohm e la resistenza tra la custodia e la terra è di 2190 ohm; se la macchina è alimentata a 220 volt, la tensione che, per un guasto, si stabilisce tra la custodia e la terra risulta di 219 volt.

Mentre, effettuando la messa a terra della custodia, se la resistenza di terra viene ridotta ad 1 ohm, la tensione che, per un guasto, si stabilisce tra la custodia e terra risulta di 20 volt.

Lo scopo della messa a terra è quello di proteggere il personale che viene a contatto delle custodie. Infatti, la persona che viene a contatto della custodia non messa a terra è sottoposta ad una tensione elevata, per

cui essa può essere attraversata da una corrente pericolosa. Mentre, se la custodia è messa a terra, la persona è sottoposta ad una tensione bassa, per cui essa viene attraversata da una debole corrente.

Nel capitolo 4 viene trattato in maniera dettagliata l'argomento della sicurezza negli impianti elettrici, la messa a terra e i dispositivi di protezione.

A.4.7 I Condensatori

I condensatori sono dei dispositivi costituiti da due conduttori appaiati, detti armature, separati da un sottile strato di materiale isolante. Sulle due armature si accumulano cariche di segno opposto in quantità uguale quando ad esse viene applicata una tensione. Essi sono caratterizzati da una costante, detta **capacità**, data da $C = Q \times \Delta V$, dove Q è la carica accumulata sull'armatura e ΔV è la differenza di potenziale tra le due armature.

La capacità si misura in Farad (F)

La capacità di un condensatore dipende dalla sua forma e dalla sue dimensioni, ma non dalle grandezze elettriche (carica o differenza di potenziale).

Per riassumere i processi di carica e scarica di un condensatore, consideriamo il semplice circuito di Figura 7, in cui è riportato un condensatore, un generatore di tensione, due interruttori, oltre un amperometro A che ha il compito di misurare l'intensità di corrente elettrica.

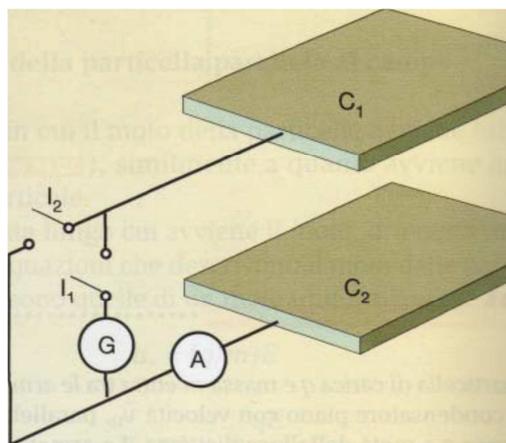


Figura 7 - Circuito con condensatore

Consideriamo inizialmente l'interruttore I2 chiuso e l'interruttore I1 aperto; in questa posizione l'amperometro A non registra alcuna corrente, il circuito elettrico è in uno stato statico caratterizzato da flusso nullo di carica elettrica.

Invertiamo ora il ruolo dei due interruttori, in modo da avere I1 chiuso e I2 aperto: l'amperometro registra ora un flusso transitorio di carica elettrica da C1 a C2, il cui andamento è indicato in Figura 7 dal tratto BC della curva. La corrente fluisce dal conduttore collegato al polo negativo del generatore verso il conduttore collegato al polo positivo: si ha così uno spostamento di carica elettrica dal primo al secondo conduttore (processo di carica del condensatore).

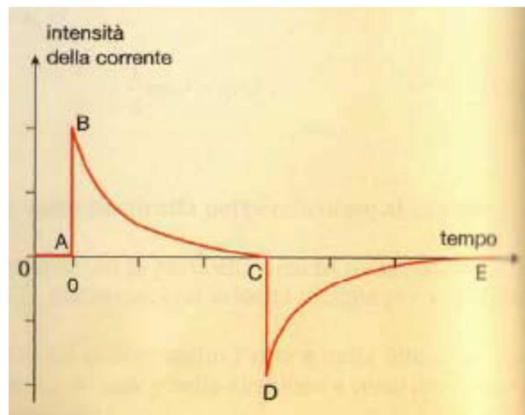


Figura 8 - Andamento della corrente del circuito con condensatore

Dopo un certo intervallo di tempo la corrente si riduce a zero: lo stato del sistema diventa stazionario e la carica fluiva da un conduttore all'altro resta immagazzinata sul conduttore collegato al polo positivo del generatore.

Quest'ultimo conduttore possiede perciò, rispetto alla situazione iniziale, un eccesso di carica elettrica. L'altro conduttore presenta invece un difetto di carica.

Invertiamo ora di nuovo il ruolo dei due interruttori, in modo da avere I2 chiuso e I1 aperto: si osserva, in base alle indicazioni dell'amperometro A, che nel circuito avviene un nuovo flusso di carica da C2 a C1 (tratto DE in Figura 8), in verso opposto rispetto al flusso precedente, così da ripristinare la situazione di equilibrio iniziale (processo di scarica del condensatore).

L'andamento della d.d.p. ai capi di un condensatore reale, durante le operazioni di carica e scarica, è riportato in Figura 9.

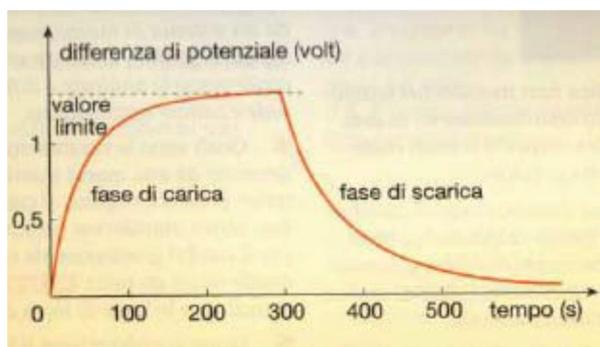


Figura 9 - d.d.p. ai capi del condensatore (fase di carica e scarica)

Il condensatore è quindi un **elemento reattivo**, perché può restituire al circuito in cui è inserito l'energia, sotto forma di cariche elettriche accumulate, che in precedenza aveva ricevuto, ed è **passivo** perché l'energia restituita non può eccedere quella precedentemente fornitagli.

Inoltre bisogna notare che, al momento in cui viene variata la tensione applicata (inversione dei due interruttori), la **variazione della corrente è praticamente immediata**, dopodiché tende annullarsi, mentre la **tensione ai capi del condensatore varia lentamente** fino a portarsi al valore della tensione applicata.

Questo fenomeno è particolarmente importante se la tensione applicata è alternata in regime sinusoidale (vedi § A.9). In questo caso il condensatore esegue ciclicamente fasi di carica e scarica a causa del fatto che la tensione applicata cambia di valore e di segno con andamento sinusoidale. Tuttavia **la tensione ai capi del condensatore varia sempre in ritardo**, e questo comportamento fa sì che, con correnti alternate, i

condensatori vengano utilizzati per immagazzinare energia, per filtrare correnti di determinate frequenze e, in circuiti di tipo induttivo come quelli dei motori elettrici, è possibile sfruttare questo fenomeno per compensarne lo sfasamento.

A.5 Potenza elettrica

La potenza elettrica è il lavoro compiuto, cioè l'energia erogata o assorbita, in ogni istante dalle cariche elettriche durante lo spostamento tra due punti di un conduttore a diverso potenziale.

Essa viene indicata con la lettera **P** e può essere paragonata alla potenza idraulica. Infatti come la potenza di una corrente di acqua è proporzionale al dislivello e alla portata, cioè alla quantità di acqua che passa nel tubo in ogni istante di tempo, analogamente la potenza elettrica è proporzionata a :

- **La tensione V**
- **L'intensità di corrente I**

La potenza elettrica è data dal prodotto della tensione per l'intensità di corrente e quindi risulta tanto maggiore quanto maggiore è la tensione e quanto maggiore è l'intensità di corrente

$$P = V \times I \quad V = P/I \quad I = P/V$$

La potenza elettrica viene misurata in Watt (W), cioè

$$\text{Volt} \times \text{Ampere} = \text{Watt}$$

Per valori elevati di potenza, normalmente si usa il (KW), che corrisponde a 1000 W.

La potenza può essere espressa anche in Cavallo-Vapore (CV).

Il CV ed il KW sono legati tra loro dalle seguenti formule:

$$\text{kW} \times 1,36 = \text{CV} \quad \text{CV} / 1,36 = \text{kW}$$

Ad esempio: la potenza assorbita da un motore elettrico, alimentato con una tensione di 600 Volt e da una corrente di 2700 Ampère $600 \text{ V} \times 2700 \text{ A} = 1620000 \text{ W} = 1620 \text{ KW}$.

Questa potenza, espressa in Cavalli-Vapore risulta di:

$$1620 \text{ KW} \times 1,36 = 2200 \text{ CV}$$

Infine, richiamando le definizioni del § A.3.1, si ricava che un'energia elettrica generata o assorbita di 1 (kilo)wattora, corrisponde alla potenza elettrica di 1 (kilo)watt, erogata o assorbita per 3600 secondi.

A.5.1 L'effetto Joule

L'effetto joule o effetto termico, è prodotta dalla resistenza elettrica quando è percorsa da corrente. Infatti, la resistenza elettrica quando è attraversata dalla corrente provoca sempre uno sviluppo di calore.

La potenza elettrica trasformata in calore si misura in Watt e dipende dal valore:

- **Della resistenza**
- **Dell'intensità di corrente al quadrato**

Infatti, come si è visto, la potenza elettrica P è data da:

$$P = V \times I$$

Dove V, dalla legge di Ohm, è data da:

$$V = R \times I$$

Sostituendo V nella formula della potenza, si ha che la potenza trasformata in calore è data da:

$$P = R \times I \times I$$

$$\text{POTENZA TRASFORMATA IN CALORE} = R \times I^2$$

L'effetto termico, negli impianti non destinati alla produzione di calore, costituisce sempre una perdita di potenza elettrica.

Per limitare questa perdita, quando non è possibile ridurre la corrente, occorre diminuire il valore della resistenza elettrica dei conduttori, aumentandone la sezione ed impiegando materiali a bassa resistività. Naturalmente occorre tener presente le caratteristiche dell'impianto e del relativo costo.

NOTA: In pratica, la sezione più idonea da assegnare ai conduttori viene ricavata dalle tabelle C.E.I che riportano l'intensità di corrente e la tensione massima ammissibile nei conduttori per diverse sezioni unificate, per tipo di cavo e condizioni di esercizio.

A.5.2 Problematiche tecniche dell'effetto Joule

L'effetto Joule è particolarmente importante ai fini della costruzione e del funzionamento delle apparecchiature elettriche.

Il fenomeno del riscaldamento dei conduttori al passaggio della corrente elettrica è quasi sempre dannoso, a meno che esso non sia appositamente ricercato, come nel caso della stufa elettrica.

Quando un conduttore elettrico è attraversato da una corrente elettrica eccessiva, in termini tecnici sovracorrente, esso può essere soggetto a danni irreversibili a causa dell'eccessivo riscaldamento. E' dimostrato che la maggiore causa di incendi nelle abitazioni civili è dovuta all'effetto delle sovracorrenti negli impianti elettrici.

Esistono due tipi di sovracorrenti:

- le correnti di sovraccarico;
- le correnti di cortocircuito.

I conduttori elettrici presenti negli impianti elettrici vengono protetti dalla presenza di eventuali sovracorrenti mediante l'utilizzazione di apparecchiature di protezione quali i fusibili e gli interruttori magnetotermici.

Il fusibile è il più semplice tra i dispositivi di protezione e viene utilizzato generalmente per proteggere una linea dalle correnti di cortocircuito. Esso viene posto in serie alla linea che si vuole proteggere ed interviene interrompendo la linea quando il valore della corrente che lo attraversa è tale da provocare la fusione di un suo elemento fusibile, da cui il nome di fusibile.

Gli interruttori automatici magnetotermici sono dispositivi meccanici di interruzione della corrente. Essi sono dotati di un apposito dispositivo di sgancio che provoca l'apertura automatica dei contatti quando la corrente che lo attraversa supera un determinato valore per un certo tempo. Il tempo di intervento dipende dal valore della corrente di guasto.

A.6 Generatori di corrente continua

A.6.1 La pila

La generazione della tensione e della corrente continua può essere effettuata mediante la pila.

La pila, in genere, è costituita da un recipiente di vetro, contenente una soluzione di acido solforico ed acqua distillata, detta **elettrolito**. Nella soluzione sono immerse due lamine, una di rame e l'altra di zinco dette **elettrodi**.

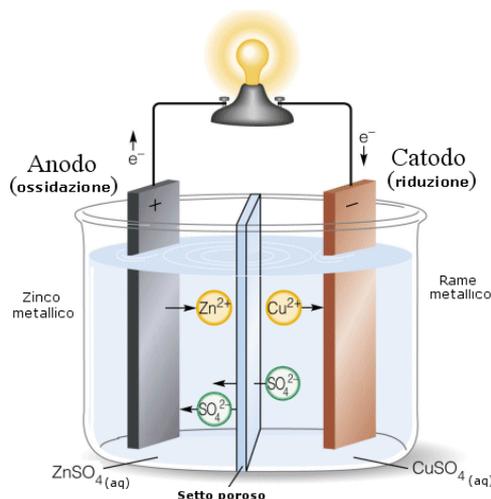


Figura 10 - Schema di principio di una pila

Tra gli elettrodi e l'elettrolito avvengono due fenomeni elettrochimici, cioè l'elettrolito sottrae cariche positive allo zinco per passarle al rame. Di conseguenza la lamina di rame diventa polo positivo e la lamina di zinco polo negativo. Pertanto, tra i due elettrodi si genera una **forza elettromotrice (f.e.m.)** che si rende disponibile ai morsetti della pila, detta anche **tensione a vuoto**.

Collegando il polo positivo ed il polo negativo per mezzo di conduttori ad una resistenza (utilizzatore) si realizza il circuito elettrico.

Chiudendo il circuito per mezzo dell'interruttore, la f.e.m. generata dalla pila fa circolare nei conduttori e quindi nell'utilizzatore una corrente che, **avente sempre lo stesso verso e valore costante, viene detta corrente continua**.

La corrente erogata dalla pila, oltre a circolare nel circuito esterno, circola anche nel circuito interno della pila, cioè fra gli elettrodi e l'elettrolito. Pertanto la corrente incontra nel suo passaggio, oltre alla resistenza esterna dell'utilizzatore, la resistenza interna R_i degli elettrodi e dell'elettrolito.

A causa di questa resistenza, la tensione V ai morsetti della pila non è rigidamente costante, ma diminuisce leggermente all'aumentare della corrente erogata dalla pila, cioè all'aumentare del carico.

A.6.2 Caratteristiche della pila

Le caratteristiche della pila sono:

- **il valore della forze elettromotrice (f.e.m.) o tensione a vuoto**
- **l'intensità massima di corrente erogabile**
- **la quantità di corrente che può erogare sino ad esaurirsi o capacità di corrente**

Il valore della f.e.m. generata da un determinato tipo di pila è fisso e dipende dalla natura degli elettrodi e dell'elettrolito.

Il valore dell'intensità di corrente che la pila può erogare, dipende dalla capacità della pila stessa.

La capacità della pila si esprime in Amperora e varia al variare delle dimensioni della pila. La capacità viene determinata misurando l'intensità di corrente erogata ed il tempo impiegato da essa ad esaurirsi.

Ad esempio:

Una pila che eroga una corrente di 1 ampere per il tempo di 10 ore, possiede una capacità di 10 amperora. Se la stessa pila eroga una corrente di 2 ampere si scarica in circa 5 ore; cioè a parità di capacità, aumentando la corrente erogata la pila si scarica in un tempo più breve.

A.6.3 Batterie di pile

La batteria di pile viene realizzata quando necessita una tensione ed una corrente maggiore di quella che può essere fornita da una sola pila. La batteria di pile può essere formata da pile collegate tra loro: In serie ed in parallelo.

Il collegamento in serie viene effettuato per ottenere una tensione maggiore di quella ottenibile con una sola pila e viene realizzato come in figura:

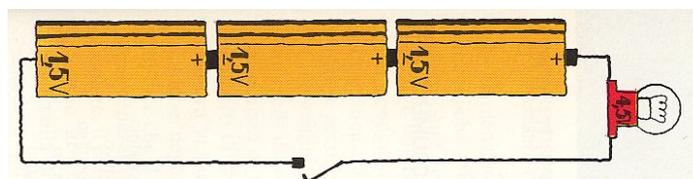


Figura 11 – Pile in serie

Il valore della tensione generata dalla batteria di pile in serie è dato dal prodotto della tensione generata da una pila per il numero di pile collegate:

$$V \text{ batteria} = V \text{ pila} \times n^{\circ} \text{ pile}$$

Mentre, la corrente che attraversa il circuito è uguale a quella erogata da ogni singola pila collegata.

Il collegamento in parallelo viene effettuato per ottenere un'intensità di corrente maggiore di quella ottenibile con una sola pila e viene realizzato come in figura:

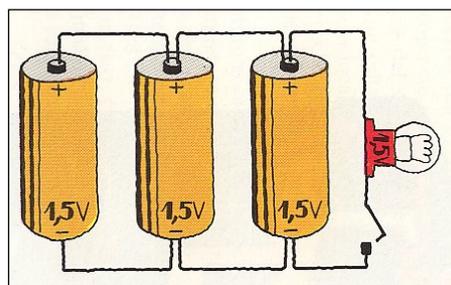


Figura 12 – Pile in parallelo

Il valore della corrente erogata dalla batteria di pile in parallelo è dato dal prodotto della corrente erogata da una pila per il numero di pile collegate:

$$I \text{ batteria} = I \text{ pila} \times n^{\circ} \text{ pile}$$

Mentre, la tensione generata dalla batteria di pile in parallelo è uguale a quella generata da ogni singola pila collegata.

NOTA – Quando occorre aumentare sia il valore della tensione che quello della corrente, la batteria di pile viene realizzata collegando le pile in serie-parallelo.

A.6.4 L'accumulatore

L'accumulatore ha la caratteristica di immagazzinare energia elettrica e di fornirla quando necessita. E' l'equivalente di una pila ricaricabile.

Il periodo di tempo durante il quale l'accumulatore immagazzina energia elettrica, viene detta **fase di carica**; mentre il periodo di tempo durante il quale l'accumulatore fornisce energia elettrica, viene detto **fase di scarica**.

La carica dell'accumulatore viene effettuata inviando nell'accumulatore una corrente continua, in senso inverso a quello di scarica, che viene in genere fornita da un gruppo di **raddrizzatori** (vedi Capitolo 4).

Il valore della tensione fornita da un determinato tipo di accumulatore è fisso e dipende dalla natura delle piastre. Ad esempio per l'accumulatore al piombo, il valore della tensione è di circa 2 Volt.

Per aumentare la tensione si collegano in serie più accumulatori; mentre per aumentare la corrente si collegano in parallelo, come già visto per le pile.

Più accumulatori collegati tra loro, vengono detti **batterie di accumulatori** ed ogni accumulatore, viene detto **elemento**.

A.7 Analogia tra circuiti elettrici e circuiti idraulici

Lo studio di un circuito elettrico, ovvero delle proprietà relative alla corrente elettrica che vi fluisce ed ai componenti che costituiscono il circuito (conduttori, resistenze, interruttori, generatori etc.) può essere paragonato, con le dovute differenze, allo studio di un circuito idraulico, ovvero al flusso di un fluido. attraverso condutture.

A.7.1 Corrente elettrica

Si può paragonare la corrente elettrica, generata dal movimento di portatori di carica elettrica (elettroni) in materiali conduttori, al flusso di un liquido attraverso un tubo.

Consideriamo due serbatoi (Figura 13) contenenti un liquido (es. acqua), collegati tramite un tubo. Per fare scorrere l'acqua nel tubo occorre che il liquido si trovi a livelli diversi nei serbatoi, in modo che un volume d'acqua posto ai due livelli abbia una differenza di energia potenziale.

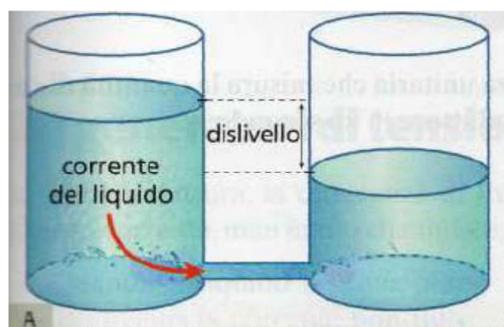


Figura 13- Flusso di un liquido fra due serbatoi

Così come la differenza di livello tra due liquidi è in grado di creare una corrente del liquido, è necessaria una differenza di potenziale elettrico per far muovere le cariche.

La quantità di acqua che passa nel tubo nell'unità di tempo viene chiamata portata, cioè $q = V \times t$ dove V è il volume dell'acqua e t è il tempo. In modo analogo si definisce intensità di corrente elettrica la quantità di cariche elettriche che transitano nella sezione di un conduttore nella unità di tempo, ovvero $i = Q \times t$.

A.7.2 Differenza di potenziale

La differenza di livello esistente fra due serbatoi (Figura 2) genera un flusso del liquido nel momento in cui li colleghiamo tramite una conduttura. Questo flusso tende ad annullare nel tempo il dislivello iniziale, finché il liquido non scorre più raggiunte le condizioni di equilibrio (dislivello nullo, Figura 14).

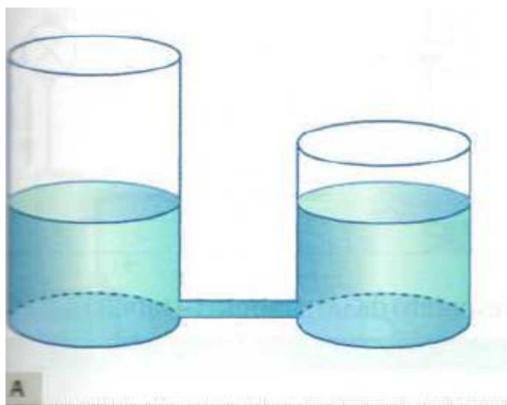


Figura 14- In condizioni di equilibrio il liquido non scorre nella conduttura

Per mantenere la corrente del liquido, occorre che sia ripristinato il dislivello, compito svolto da una pompa idraulica.

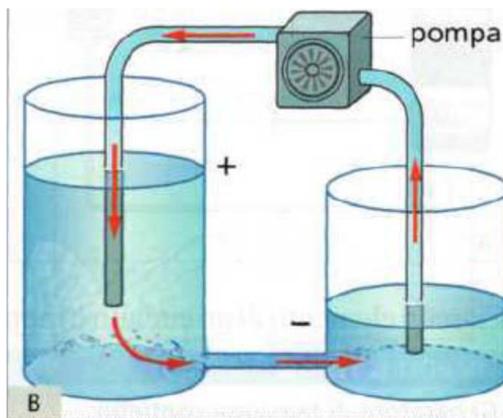


Figura 15- Pompa idraulica

La pompa toglie l'acqua dove il livello è basso e la trasporta dove il livello è alto, mantenendo costante il dislivello che causa il flusso del liquido. Per svolgere tale compito, la pompa deve fornire la necessaria energia (pressione). Tanto maggiore è il dislivello da mantenere fra i due serbatoi, tanto maggiore sarà l'energia che deve fornire la pompa.

La pompa è caratterizzata dalla differenza di pressione ai suoi due estremi, che indichiamo con Δp (delta p), pari al prodotto tra l'energia (E) necessaria per mandare in circolo un volume d'acqua e il volume stesso (V), cioè $\Delta p = E \times V$.

In modo simile, la differenza di potenziale elettrico (o tensione) genera una corrente elettrica. Man mano che fluisce, la corrente tende ad annullare la differenza di potenziale iniziale, a meno che non intervenga un componente con compito analogo a quello della pompa idraulica. Tale compito è svolto da un generatore di tensione elettrico, un dispositivo che consente di mantenere ai suoi capi una differenza di potenziale costante e quindi un flusso di corrente all'interno del circuito.

A.7.3 Resistenza elettrica

La resistenza "idraulica" indica la difficoltà che incontra il liquido al suo passaggio nella tubazione, ad esempio dovuta ad una strozzatura. Più in generale, la resistenza idraulica può dipendere da differenti fattori: viscosità del liquido, curve nelle tubazioni, filtri, materiale poroso che interagisce per attrito e rallenta il flusso del liquido, altri ostacoli presenti nelle condutture.

In conseguenza di ciò si sperimenta la cosiddetta **perdita di carico**, cioè la diminuzione della pressione tra l'ingresso e l'uscita di una condotta. Quest'ultima dipende dalla viscosità del fluido, ma anche considerando il fluido ideale, le perdite di carico dipendono dalla portata e dalle caratteristiche del tubo: essa è tanto maggiore quanto più lungo è il tubo e più piccola è la sua sezione, mentre è indipendente dalla pressione.

Nel caso elettrico, la resistenza rappresenta, in modo analogo al caso idraulico, l'ostacolo che la corrente incontra al suo passaggio nel conduttore.

Gli elettroni, infatti, non scorrono del tutto liberamente nei conduttori ma incontrano una certa resistenza. Questa resistenza dipende dal tipo di materiale di cui è fatto il conduttore e dipende inoltre da altri fattori quali la sezione del conduttore (cavi sottili hanno una resistenza maggiore di cavi grossi) e la sua lunghezza (cavi lunghi hanno una resistenza maggiore di cavi corti).

Ciò significa che aumentando la tensione aumenta anche la corrente elettrica mentre aumentando la resistenza diminuisce la corrente elettrica, secondo la legge di Ohm indicata al § A.4.2.

A.7.4 Condensatore

Un condensatore può essere paragonato a una coppia di serbatoi per liquidi, per esempio a forma di parallelepipedo, identici. Se essi sono alla stessa altezza e contengono la stessa quantità di liquido, la differenza tra i livelli nei due serbatoi è nulla e, anche se collegati tramite un condotto, non c'è un flusso di liquido tra i serbatoi (condizione di equilibrio).

Se, mediante una pompa idraulica, trasferiamo del liquido da un serbatoio all'altro, si produce una differenza di livello, tanto più grande quanto più piccola è la sezione dei parallelepipedi. Collegando i due serbatoi dopo aver prodotto un certo dislivello, si ha un flusso di liquido che dura finché si è ristabilito l'equilibrio.

Un analogo comportamento è riscontrabile in un condensatore. Lo spostamento di liquido tra i due serbatoi, tramite una pompa, corrisponde al processo di carica del condensatore, ottenuto collegando un generatore al condensatore; la quantità di acqua in eccesso in un serbatoio rispetto all'altro è analoga alla carica Q del condensatore, la differenza di livello alla differenza di potenziale ΔV . La minore o maggiore sezione orizzontale dei serbatoi corrisponde alla minore o maggiore capacità del condensatore.

A.7.5 Circuito elettrico

Il circuito elettrico è un percorso chiuso nel quale si muovono gli elettroni. Alcuni elementi che possiamo trovare in un circuito elettrico sono stati descritti nei paragrafi precedenti: conduttori, interruttori, resistori, generatori e condensatori.

In particolare, in un circuito possiamo avere un utilizzatore che ha la funzione di assorbire e quindi utilizzare l'elettricità. Sono utilizzatori ad es. le lampade, gli elettrodomestici, ecc.

Consideriamo la Figura 16. Possiamo fare un'analogia tra il circuito elettrico e quello idraulico. La corrente elettrica, dovuta allo spostamento di elettroni nei conduttori, si muove in modo analogo all'acqua nella tubazione del circuito idrico. I fili conduttori corrispondono ai tubi nei quali scorre il liquido, l'interruttore elettrico funziona in modo analogo ad un rubinetto, al generatore corrisponde la pompa, alla lampada il serbatoio.

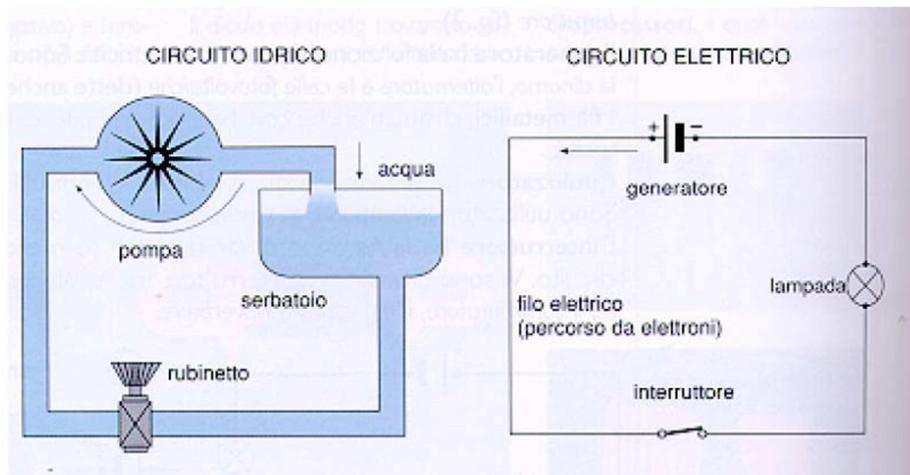


Figura 16- Analogia tra circuito elettrico e idraulico

Una differenza che si può notare tra il circuito elettrico e quello idraulico, è che mentre nel primo l'interruttore deve essere chiuso perché possa passare elettricità, nel secondo il rubinetto deve essere aperto perché possa passare l'acqua.

Affinché i due circuiti possano funzionare e fornire l'acqua o la corrente ai rispettivi utilizzatori è necessario che vi siano dei componenti in grado di fornire energia, ovvero la pompa e il generatore rispettivamente.

Se manca la pompa, l'acqua non si muove avendo continuo bisogno di essere rifornita dell'energia che ha perso nel passaggio attraverso i tubi. Inoltre, l'acqua non si consuma, ma passa sempre, fino a che la pompa viene spenta, oppure viene interrotto il flusso di acqua con il rubinetto.

Analogamente, la lampadina si accende solo se il circuito è chiuso e, se non ci fosse il generatore non ci sarebbe la corrente e la lampadina si spegnerebbe. Per mantenere accesa la lampadina, è necessario rifornire continuamente l'energia che si perde nel passaggio delle cariche elettriche attraverso i fili, e soprattutto attraverso gli utilizzatori.

A.8 Magnetismo ed elettromagnetismo

A.8.1 I fenomeni magnetici

Il magnetismo è un fenomeno dovuto ai magneti, detti comunemente **calamite**.

Le calamite hanno la proprietà di attirare frammenti di materiali ferrosi, quali il ferro, l'acciaio, la ghisa, ecc. quando questi si trovano ad una certa distanza dalla calamita. Lo spazio, in cui si risentono le azioni della calamita, viene detto **campo magnetico** ed è rappresentato con curve dette **linee di forza magnetica**.

Le estremità della calamita, da cui escono le linee di forza, vengono dette **poli magnetici**.

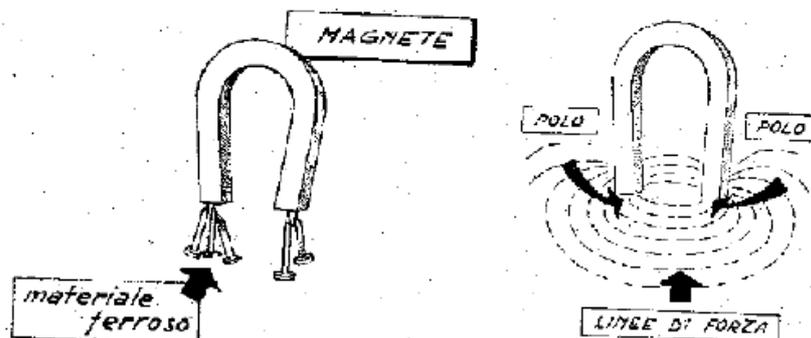


Figura 17: I magneti e i poli magnetici

Sospendendo una calamita a forma di barra, in modo che possa ruotare liberamente, essa si orienterà in modo da disporsi con un polo verso il nord terrestre e con l'altro verso il sud.

L'estremità della calamita rivolta verso il nord, viene detta **polo nord** e l'altra, viene detta **polo sud**.

Disponendo due calamite rispettivamente con un polo nord e con un polo sud affacciati, si genera tra esse una forza di attrazione che tende ad avvicinarle.

Invece disponendo due calamite, rispettivamente con i poli nord o i poli sud affacciati, si genera una forza di repulsione che tende ad allontanarle.

Pertanto si può dire:

POLI DI SEGNO OPPOSTO SI ATTRAGGONO

POLI DI SEGNO UGUALE SI RESPINGONO

A.8.2 I materiali magnetici

I materiali magnetici sono quelli che posti in vicinanza dei magneti subiscono un'attrazione.

Sono sostanze magnetiche il ferro, la ghisa, il nichel, il cobalto, ed alcune loro leghe. Esse a loro volta, in particolari condizioni, hanno la possibilità di diventare dei magneti (magnetizzazione).

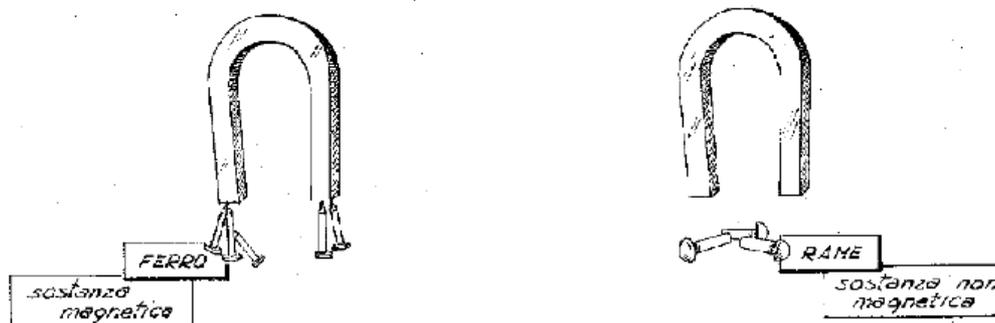


Figura 18: Materiali magnetici e non magnetici

Il fenomeno della magnetizzazione delle sostanze magnetiche, può essere spiegato ritenendo che le piccolissime particelle di cui sono costituite, siano esse stesse dei piccolissimi magneti, provvisti ciascuno di un polo nord e un polo sud.

Quando la sostanza magnetica non è magnetizzata, le piccolissime particelle che la compongono sono disposte disordinatamente. Ma, non appena la sostanza viene magnetizzata, le particelle si dispongono ordinatamente, con i poli orientati in modo che il nord dell'una corrisponda al polo sud dell'altra.

Cioè tutti i polo nord ed i polo sud si orientano in una direzione ben definita, per cui all'estremità della sostanza magnetica si ottengono le polarità nord e sud.

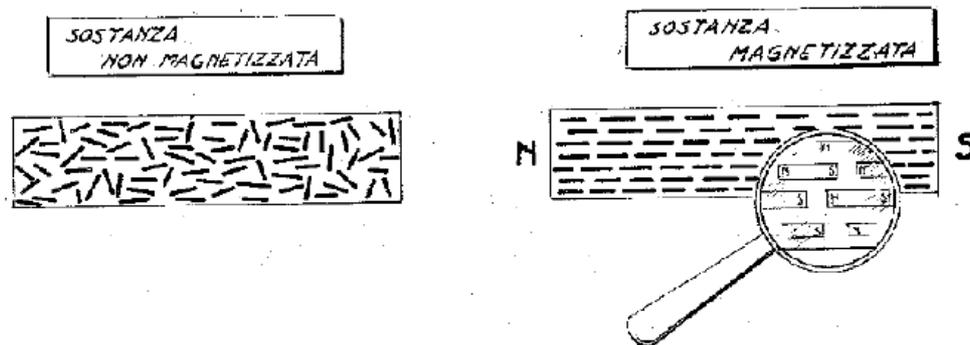


Figura 19: Le particelle nelle sostanze magnetizzate

Se attraverso le linee di forza viene disposta una sostanza non magnetica, le linee di forza mantengono invariato il loro andamento come se la sostanza non esistesse.

Mentre, se vi si dispone una sostanza magnetica, ad esempio il ferro, le linee di forza tendono a lasciare l'aria per attraversare il ferro, in quanto esse incontrano notevole difficoltà ad attraversare l'aria che non è magnetica.



Figura 20: Le linee di forza del campo magnetico

Infatti, disponendo un oggetto costituito da una sostanza magnetica in un campo magnetico e tenendolo fermo nel modo indicato nella figura successiva, le linee di forza deviano dalla loro direzione primitiva e tendono a passare attraverso la sostanza stessa.

Mentre, disponendo l'oggetto in modo da poter ruotare, esso è costretto dalle linee di forza a disporsi in maniera che esse percorrano, per ritornare al polo sud, la via più breve. In pratica l'oggetto **si allinea con il campo magnetico da cui è attraversato**, analogamente all'ago di una bussola, il quale ruota per allinearsi con le linee del campo magnetico terrestre.

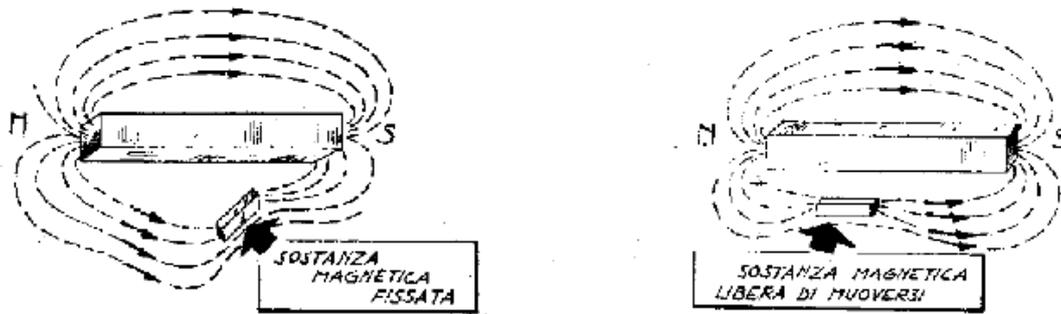


Figura 21: Sostanze magnetiche si allineano con il campo magnetico

A.8.3 I fenomeni elettromagnetici

L'elettromagnetismo è un fenomeno dovuto alla creazione dei campi magnetici da parte della corrente elettrica. Infatti, la corrente elettrica che percorre un conduttore genera attorno ad esso un campo magnetico che però scompare al cessare della corrente stessa.

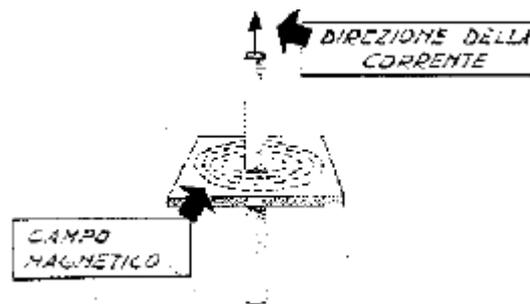


Figura 22: Campo magnetico e direzione della corrente

L'effetto del campo magnetico è più intenso vicino al conduttore ed è tanto più intenso quanto maggiore è la corrente che attraversa il conduttore stesso.

La direzione delle linee di forza di un campo magnetico creato da una corrente, dipende dal verso della corrente stessa.

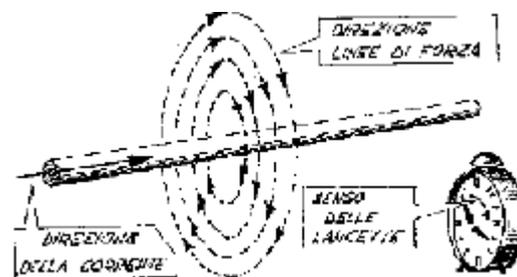


Figura 23: Senso di rotazione delle linee di forza

Immaginando di guardare lungo il conduttore nel senso della corrente, le linee di forza hanno lo stesso senso di rotazione delle lancette dell'orologio.

Avvolgendo un conduttore a forma di elica, si ha un solenoide, ed inviando corrente continua attraverso esso, le linee di forza si chiuderanno attorno al conduttore. Mentre, se le spire del solenoide vengono avvicinate tra loro, le linee di forza non compiono più dei cerchi completi intorno alle spire, ma si congiungono sommandosi, producendo un **campo magnetico avente le stesse caratteristiche di quello prodotto da una calamita**.

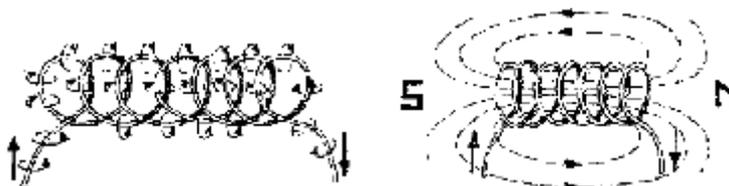


Figura 24: Il solenoide

Un solenoide, percorso da una corrente, crea alle sue estremità due poli, le cui polarità dipendono dal senso della corrente che percorre il solenoide stesso.

Le polarità del solenoide, possono essere individuate disponendo la mano destra con il palmo appoggiato al solenoide e le dita distese nel senso della corrente; il pollice indicherà da quale parte si avrà il polo Nord.

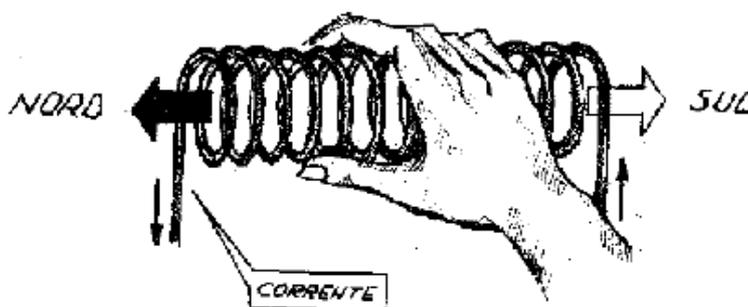


Figura 25: Verso della corrente nel solenoide

Per invertire le polarità del solenoide è sufficiente invertire il senso della corrente che circola in esso.

Avvicinando i poli creati da due solenoidi, liberi di muoversi, si hanno effetti simili a quelli dei magneti, cioè :

- Poli di segno uguale si respingono.
- Poli di segno contrario si attraggono.

A.8.4 Caratteristiche del circuito elettromagnetico

Il solenoide è la base con cui si realizza un circuito elettromagnetico, il quale a sua volta è il componente fondamentale di tutte le macchine elettriche, cioè i motori elettrici e i trasformatori.

Un circuito elettromagnetico è costituito generalmente da sostanze magnetiche (ma la sostanza può essere anche non magnetica, ad esempio l'aria), attraverso le quali possono passare le linee di forza del campo magnetico, generate da un solenoide avvolto attorno alla sostanza magnetica.

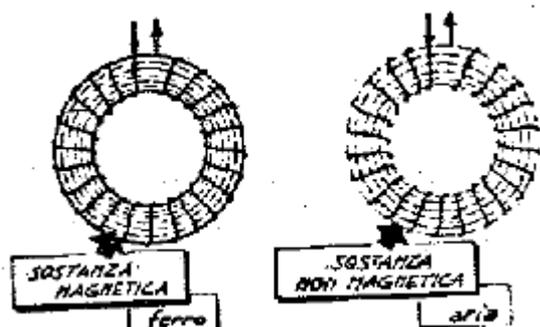


Figura 26: I circuiti elettromagnetici

Quando nel solenoide scorre della corrente, all'interno del materiale magnetico viene generato un campo magnetico il cui **flusso**, che viene indicato con la lettera Φ (fi), è **tanto più grande, quanto più grande è la corrente e il numero di spire del solenoide**. Il flusso magnetico generato dipende inoltre dalle caratteristiche fisiche del materiale magnetico (la sua facilità o meno a magnetizzarsi) e dalla sua forma. A parità di corrente e spire, un materiale magnetico lungo e sottile presenterà un flusso più piccolo rispetto ad un materiale corto e di sezione ampia.

Questo comportamento dei circuiti elettromagnetici è alla base del funzionamento dei motori elettrici e dei trasformatori, grazie al fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

A.8.5 L'induzione elettromagnetica

L'induzione elettromagnetica è un fenomeno che si verifica quando un conduttore, immerso in un campo magnetico, viene spostato in modo da tagliare le linee di forza del campo stesso. Questo fenomeno genera uno spostamento di cariche elettriche all'interno del conduttore, cioè una corrente elettrica.

Su questo principio si basa il funzionamento del generatore elettrico.

Per spiegare meglio questo fenomeno si può effettuare il seguente esperimento: muoviamo rapidamente una calamita dentro una bobina collegata a una lampadina. Se la calamita si muove in su e in giù, la lampadina si accende: nel circuito circola una corrente.

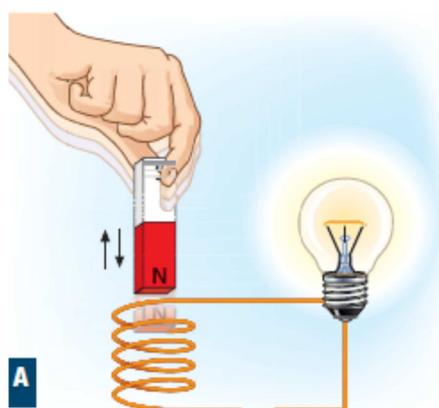


Figura 27: Induzione: il movimento della calamita produce una corrente

Invece, se la calamita è ferma, la lampadina non si accende; quindi nel circuito non c'è corrente.

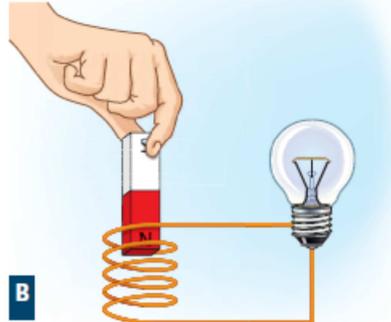


Figura 28: Induzione: la calamita ferma non produce una corrente

La corrente non è creata da una pila o da una batteria, ma dal movimento della calamita, ovvero dalla variazione del campo magnetico all'interno della bobina. Infatti, il campo magnetico della calamita diventa intenso quando la calamita è vicina, e ritorna debole quando essa è lontana.

La variazione del campo magnetico genera una corrente, detta corrente indotta.

L'intensità della **corrente indotta** dipende da tre grandezze:

- la **variazione del campo** magnetico;
- l'**area del circuito** indotto attraversata dal campo magnetico;
- l'**orientamento del circuito** rispetto al campo magnetico.

Quindi, facendo degli esempi, si verifica che la corrente indotta è più intensa quando:

A - muoviamo con maggiore rapidità la calamita, per ottenere un campo magnetico che varia più velocemente;

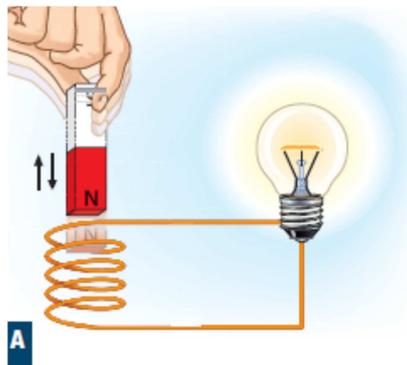


Figura 29: Induzione: velocità di variazione del campo magnetico

B - la bobina ha un maggior **numero di spire**, così che l'area del circuito attraversato dal campo magnetico è più grande;

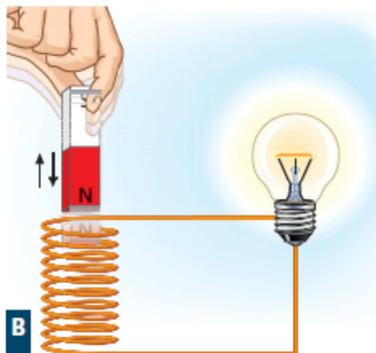


Figura 30: Induzione: numero di spire della bobina

C - cambiamo più rapidamente l'orientamento del circuito rispetto alle linee del campo magnetico, in modo che i conduttori della spira taglino le linee di campo più velocemente.

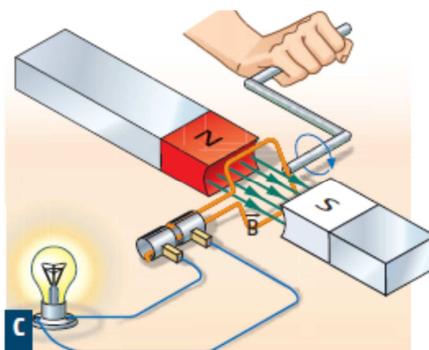


Figura 31: Induzione: orientamento della bobina

In tutti e tre i casi sopra visti, **quello che varia** sono le linee del campo magnetico che attraversano l'area del circuito, vale a dire **il flusso magnetico Φ (fi) che attraversa la spira**.

Infatti, quando il campo magnetico è perpendicolare alla spira, si ha che il flusso del campo magnetico ha valore massimo;

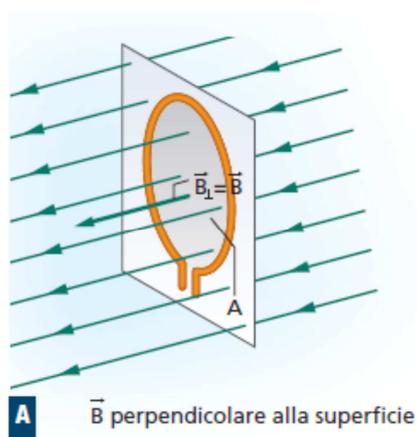


Figura 32: Induzione: campo magnetico perpendicolare alla spira

Quando il campo magnetico è obliquo rispetto alla spira, le linee di forza che la attraversano sono in numero minore, quindi il valore del flusso è minore rispetto al caso precedente.

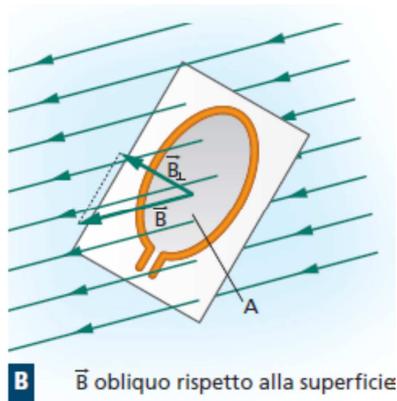


Figura 33: Induzione: campo magnetico obliquo rispetto alla spira

Quando il campo magnetico è parallelo alla spira, nessuna linea di forza la attraversa. In questo caso il flusso del campo magnetico è nullo.

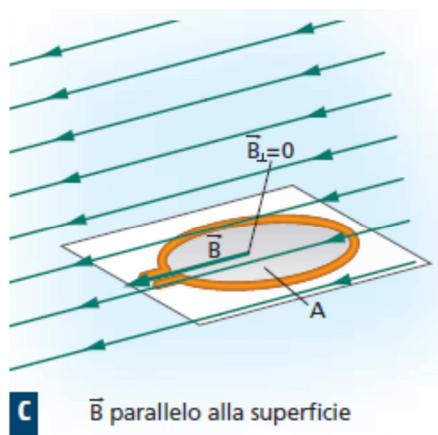


Figura 34: Induzione: campo magnetico parallelo alla spira

Muovere un magnete, variare una corrente, deformare un circuito oppure ruotarlo sono operazioni diverse che generano in un circuito una variazione del flusso magnetico, quindi, una corrente indotta.

La legge dell'induzione elettromagnetica semplifica il quadro: essa afferma che, indipendentemente dai dettagli, **la sola cosa che conta per produrre una corrente indotta è la rapidità con cui varia il flusso del campo magnetico attraverso il circuito.**

Pertanto, per avere correnti indotte intense occorre variare il flusso di molto in poco tempo, per esempio cambiando velocemente il campo magnetico nella zona dove si trova il circuito, oppure variando rapidamente l'orientazione del circuito rispetto alle linee del campo.

E' importante notare **che la corrente indotta nel circuito, provoca anche essa un campo magnetico.** Dall'esperienza si evince che questo campo magnetico indotto è sempre di senso contrario alla variazione del campo magnetico che lo ha generato, per cui si può concludere che:

Il verso della corrente indotta è sempre tale da opporsi alla variazione di flusso Φ che la genera.

A.8.6 Azioni elettromagnetiche

Le azioni elettromagnetiche sono forze che si esercitano tra un conduttore percorso da corrente ed il campo magnetico, nel quale si trova immerso il conduttore stesso.

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che una spira che viene fatta ruotare applicando una forza esterna e che è attraversata da un campo magnetico produce una corrente. Viceversa, se nella spira attraversata dal campo magnetico viene immessa una corrente e la spira viene lasciata libera di muoversi, il campo magnetico crea una forza sulla spira, detta **coppia elettromagnetica**, che tende a farla ruotare. La rotazione continua fino a quando la spira diventa perpendicolare alle linee del campo magnetico.

Questo fenomeno si verifica perché la corrente nella spira produce anch'essa un campo magnetico, il quale tende ad allinearsi con il campo magnetico esterno, come l'ago di una bussola che ruota per allinearsi con il campo magnetico terrestre.

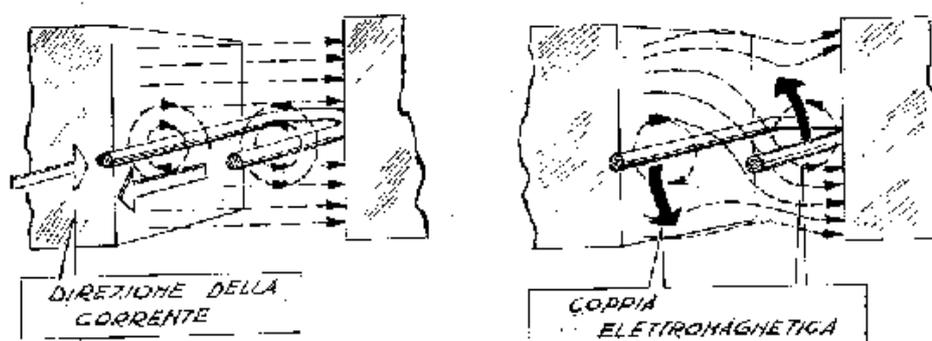


Figura 35: la coppia elettromagnetica

La forza con cui viene fatta ruotare la spira dipende: dall'intensità del campo magnetico esterno, dalla lunghezza del conduttore immerso nel campo magnetico e dall'intensità della corrente che percorre il conduttore stesso.

Su questo principio si basa il funzionamento del motore elettrico.

A.8.7 Induzione mutua

L'induzione mutua è un fenomeno che si manifesta tra due circuiti, quando uno di essi, attraversato da corrente elettrica, crea un campo magnetico le cui linee di forza investendo i conduttori dell'altro circuito determinano in esso il passaggio di una corrente.

Il numero delle linee di forza del campo magnetico del primo circuito che investe il secondo circuito può essere maggiore o minore a seconda che il mezzo che unisce i due circuiti elettrici sia costituito da una sostanza magnetica (ferro) o non magnetica (aria).

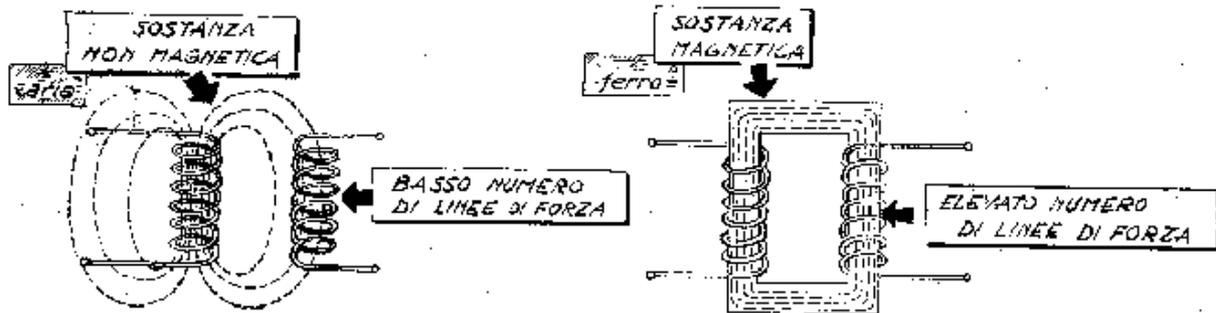


Figura 36: il principio dell'induzione mutua

Se il primo circuito è percorso da una corrente costante, nel secondo circuito non si verifica alcun fenomeno, in quanto non c'è alcuna variazione del campo magnetico che lo attraversa. Mentre, se il primo circuito è percorso da corrente variabile, questa produce un campo magnetico variabile che, attraversando il secondo circuito, farà sì che su questo scorra una corrente indotta variabile, come abbiamo visto al § A.8.5.

Nota: **nel circuito secondario la corrente può scorrere se questo è chiuso su un utilizzatore**, ad esempio una lampadina, come nella figura seguente. Se il circuito rimane aperto, ci sarà una tensione detta **tensione a vuoto**, ma senza circolazione di corrente.

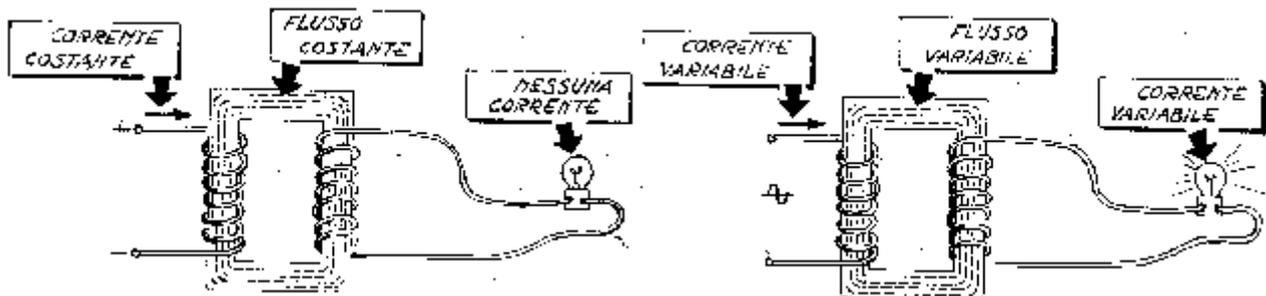


Figura 37: induzione mutua: corrente costante e corrente variabile

Il fenomeno di induzione mutua, come vedremo in seguito, permette di trasferire l'energia elettrica da un circuito primario a un circuito secondario, mediante un semplice accoppiamento magnetico.

Su questo principio si basa il funzionamento del trasformatore.

A.8.8 Autoinduzione e Induttanza

L'autoinduzione è un fenomeno che si verifica quando un circuito percorso da corrente elettrica crea un campo magnetico che produce degli effetti non su altri circuiti, ma sul circuito stesso che lo ha prodotto.

Nel § A.8.5 abbiamo visto che la corrente indotta da un campo magnetico in un circuito, tende ad opporsi alla variazione del campo magnetico.

Se consideriamo una bobina costituita da un certo numero di spire, e vi applichiamo una tensione costante, in modo da produrre una corrente costante, viene creato un campo magnetico costante, ma non si verifica alcun fenomeno aggiuntivo.

Invece se la bobina è attraversata da una corrente variabile, si crea un campo magnetico variabile. Il campo provoca nello stessa bobina una corrente indotta che tende ad opporsi alla variazione del campo magnetico, e quindi ha segno contrario rispetto alla corrente iniziale. Questa corrente indotta è molto alta all'inizio, ma diminuisce fino ad annullarsi con il passare del tempo.

Il risultato è che la variazione della corrente complessiva che circola nella bobina (corrente iniziale + corrente indotta), è praticamente nulla all'inizio e cresce nel tempo, fino a raggiungere il livello della corrente iniziale: vale a dire che la corrente complessiva **si muove in ritardo** per effetto della corrente indotta che ha segno contrario alla variazione della corrente iniziale.

In pratica la corrente indotta all'interno della bobina, viene determinata da una f.e.m, detta di **autoinduzione, opposta rispetto alla tensione applicata dall'esterno**.

Il circuito formato da una bobina avvolta attorno a del materiale magnetico viene chiamata **induttanza**. Il suo valore viene indicato con la lettera L e dipende dal numero delle spire e dalle caratteristiche del materiale.

Per spiegare cosa succede in un caso pratico, consideriamo il circuito seguente, formato da un generatore di tensione costante V, una resistenza R, un'induttanza L e un interruttore.

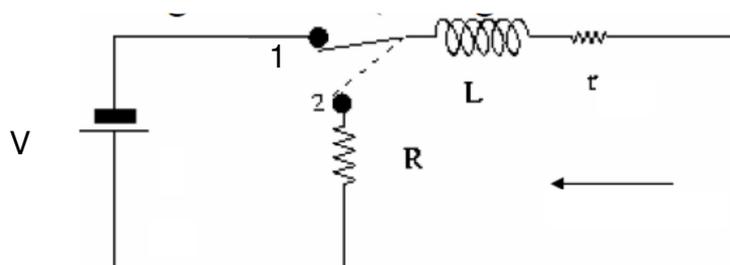


Figura 38: circuito con un'induttanza

Quando l'interruttore passa dalla posizione 2 alla 1, la tensione applicata all'induttanza passa da 0 a V. Dopodiché, quando passa dalla posizione 1 alla 2, la tensione torna da V a 0. Nel frattempo la corrente complessiva che scorre nell'induttanza assume l'andamento descritto nella figura seguente:

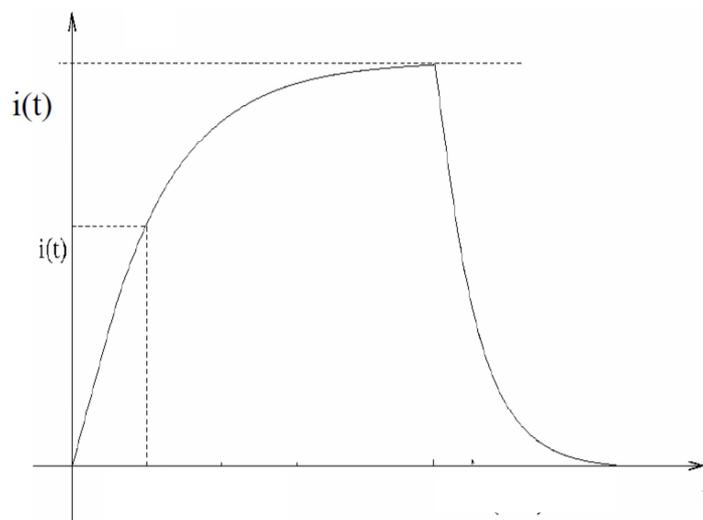


Figura 39: la corrente nell'induttanza

Nella prima parte la corrente cresce lentamente, per effetto della corrente indotta opposta a quella creata dal generatore. Nella seconda parte, quando l'interruttore scollega il generatore, la corrente non torna a zero immediatamente, perché la f.e.m. interna all'induttanza continua a far circolare la corrente indotta fino a che si annulla.

Da ciò deriva che **in corrente continua questo fenomeno si verifica solamente alla apertura e alla chiusura di un circuito elettrico**. Nel § A.9 vedremo che in corrente alternata, poiché questa varia in continuazione, gli effetti dell'autoinduzione nelle induttanze permangono nel tempo.

Dato che l'induttanza fa scorrere della corrente anche in assenza di generatore, essa può essere considerata come un serbatoio di energia, immagazzinata nel campo magnetico, che può essere restituita successivamente (l'induttanza è un componente **reattivo**). Inoltre, l'energia complessiva restituita non può mai essere superiore a quella accumulata (in tal senso quindi l'induttanza è anche un componente **passivo**), per cui la corrente indotta non potrà mai essere superiore alla corrente iniziale.

Da notare **l'analogia con il condensatore**, in cui però l'energia immagazzinata è dovuta alla carica elettrica presente negli elementi del condensatore, (vedi § A.4.7). La differenza è che **nel condensatore è la tensione che si muove in ritardo, mentre la corrente può assumere valori molto elevati. Nell'induttanza è la corrente che si muove in ritardo, mentre la tensione può assumere valori molto elevati**.

A.8.9 Analogia tra induzione magnetica e inerzia dei corpi

Il fenomeno dell'induzione magnetica è una proprietà dei campi magnetici che ha un effetto sulle correnti elettriche, analogo all'effetto che ha l'inerzia di un corpo sulla sua velocità.

Per spiegare meglio tale fenomeno, supponiamo di avere una pesante ruota che viene posta in rotazione, **applicandovi una forza**, ad esempio tramite una manovella. **La massa del corpo si oppone alla variazione**, impedendoci di raggiungere immediatamente la velocità desiderata.

Una volta raggiunta questa velocità, la forza applicata servirà solo a mantenerla costante, contrastando essenzialmente l'attrito generato durante il movimento. **A velocità costante l'inerzia del corpo non ha più effetto**.

Quando si cessa di applicare la forza al corpo, esso rallenta per effetto degli attriti, ma **la sua velocità non si ferma immediatamente a causa dell'inerzia**.

Analogamente, applicando una tensione ad un'induttanza, il fenomeno dell'autoinduzione contrasta l'aumento della corrente circolante fino a che questa non raggiunge il valore previsto in base alla resistenza del circuito e alla tensione applicata (legge di Ohm).

Quando la tensione cessa di essere applicata, la corrente diminuisce fino ad annullarsi più o meno lentamente in base alla resistenza R del circuito (vedi Figura 38). **Questa resistenza serve a dissipare l'energia della corrente circolante**, come l'attrito dissipa l'energia della ruota che gira quando la forza esterna non è più applicata. Quindi, se un attrito maggiore ferma la ruota più velocemente, **una resistenza maggiore annulla la corrente più velocemente**.

Nota bene: se la resistenza R è molto grande, al limite non presente (**circuito aperto**), la corrente, cioè l'energia accumulata, non può circolare liberamente e si arresta in un tempo brevissimo.

Se l'energia (corrente) è molto grande e quindi non riesce ad essere dissipata completamente lungo il conduttore collegato all'induttanza (il conduttore si riscalda), essa **viene dissipata in maniera incontrollata e violenta**. Infatti in questo caso si può osservare un aumento improvviso e incontrollato della tensione ai capi dell'induttanza, provocata dall'autoinduzione, che può raggiungere valori pericolosi e può danneggiare i circuiti con una forte scarica elettrica.

Questo fenomeno è **analogo a quello di un corpo in movimento il cui moto viene arrestato bruscamente**: la sua velocità si annulla in un tempo molto piccolo e, se l'inerzia e la velocità del corpo sono molto grandi, esso può danneggiarsi o distruggersi (ad esempio se si blocca improvvisamente la manovella della ruota dell'esempio precedente o si ferma un'auto contro un ostacolo fermo).

A.8.10 Correnti parassite

Le correnti parassite sono correnti indotte che si generano nei nuclei metallici quando vengono attraversati dal flusso di un campo magnetico.

Queste correnti circolano nell'interno dei nuclei secondo percorsi chiusi, provocando in essi un forte sviluppo di calore che comporta una perdita di potenza.

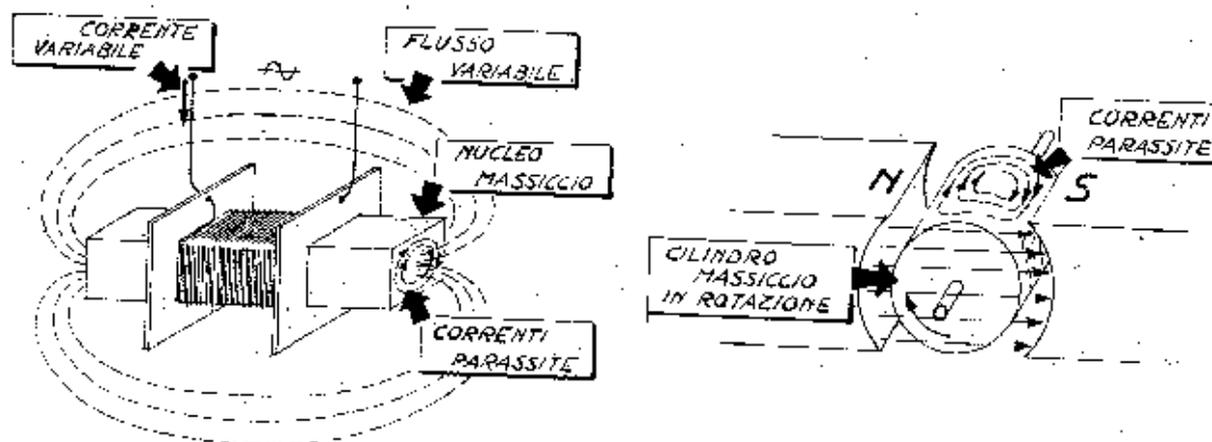


Figura 40: le correnti parassite nei nuclei metallici

Per limitare la circolazione di queste correnti si aumenta la resistenza dei nuclei, sostituendo ai nuclei massicci, nuclei formati con lamierini sottili, isolati tra loro e disposti parallelamente alle linee di forza del campo magnetico.

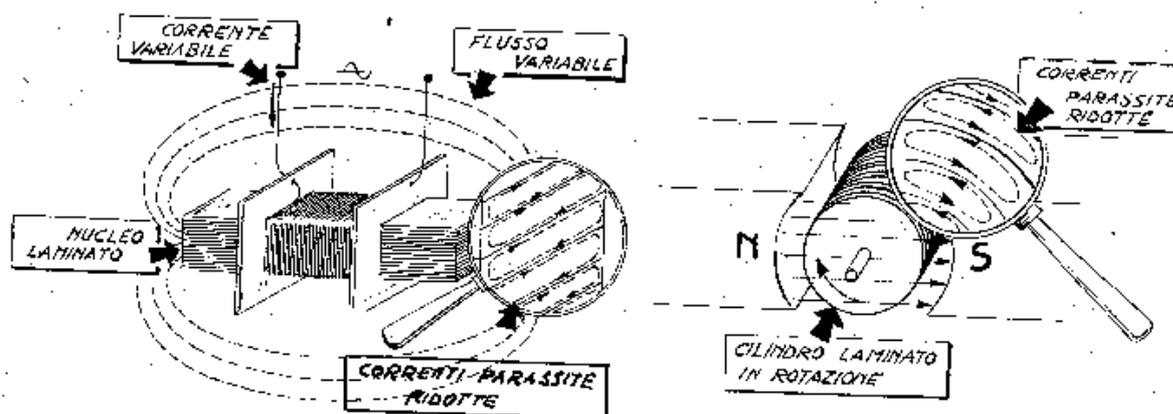


Figura 41: le correnti parassite con i lamierini

I lamierini usati nella costruzione dei nuclei, delle macchine e delle apparecchiature elettriche, hanno uno spessore che varia da 0.3 a 0.8 mm, e l'isolamento tra di essi viene realizzato con carta sottilissima o con vernice.

A.9 La corrente alternata

A.9.1 Caratteristiche della corrente alternata

La corrente alternata è un tipo di corrente che circola prima in un senso e poi nel senso opposto.

Essa si genera ad esempio in una spira, collegata ad un circuito chiuso, che ruota in un campo magnetico (principio dell'induzione magnetica, vedi § A.8.5). Il valore della corrente generata non è costante, ma varia a seconda della posizione che la spira assume durante la rotazione.

La rappresentazione della tensione o della corrente alternata può essere effettuata graficamente, come indicato nella sottostante figura; essa ha un andamento definito **sinusoidale**.

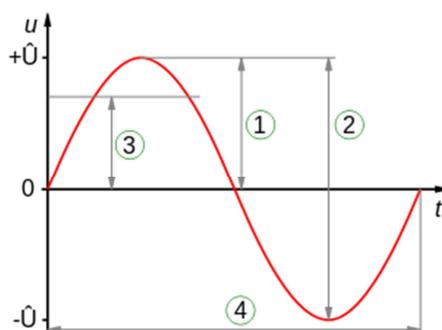


Figura 42: grafico di tensione o corrente alternata

Nel grafico sono rappresentate le caratteristiche fondamentali della tensione o corrente alternata:

- **valore di picco (1):** corrisponde al valore massimo che in un periodo la tensione o corrente assume rispetto al valore medio, che in questo caso si presume nullo;
- **valore picco-picco (2)** (a volte indicato come **p-p**): è la differenza tra il valore massimo e il minimo che la tensione o corrente assume durante un periodo. Corrisponde al doppio del valore di picco;
- **valore efficace (3):** corrisponde a quel valore di **tensione o corrente continua** che, percorrendo la stessa resistenza, provoca la stessa dissipazione di potenza per effetto termico (cioè trasporta la stessa energia). Esso è dato da:

$$\text{VALORE EFFICACE} = \text{VALORE DI PICCO} / \sqrt{2} = \text{VALORE DI PICCO} / 1.41$$

Ad esempio: quando si dice che il valore di una tensione alternata è di 220 V si intende il valore efficace. In questo caso, il valore massimo è di 310V. Per 230 V di valore efficace, il valore massimo è invece 324 V.

- **periodo (4):** Il periodo di una tensione o corrente alternata è il tempo impiegato da essa per descrivere un ciclo completo. Il numero di cicli compiuti in un secondo, viene detto **frequenza** e la sua unità di misura è l'Hertz (Hz). La frequenza viene misurata mediante strumenti detti **frequenzimetri**. La frequenza della corrente alternata generata in Italia è normalmente di 50 Hz.

A.9.2 Circuiti resistivi e induttivi - reattanza, impedenza e sfasamento

Circuito puramente resistivo

Il circuito puramente resistivo o ohmico è quel circuito composto da semplici resistenze. In pratica, sono considerati puramente resistivi i circuiti composti da: lampade ad incandescenza, stufe elettriche, ecc.

Il calcolo dei circuiti puramente ohmici in corrente alternata non differisce da quello in corrente continua, e quindi anche per questi tipi di circuiti vale la legge di Ohm:

$$V=R \times I$$

Dove V e I sono generalmente i valori efficaci di tensione e corrente.

La rappresentazione della tensione e della corrente può essere effettuata graficamente riportando sull'asse verticale su scale diverse, i valori della tensione e della corrente in un generico istante t .

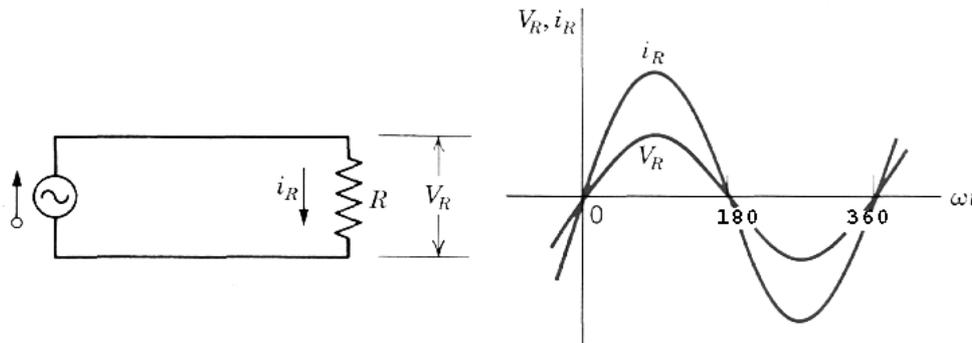


Figura 43: tensione e corrente alternata in circuiti resistivi

La corrente elettrica che attraversa un circuito puramente resistivo segue la stessa legge di variazione della tensione. Nell'istante in cui la tensione è uguale a zero la corrente è zero, e nell'istante in cui la tensione è massima, la corrente è massima.

In questo caso si dice che in un circuito puramente ohmico la tensione e la corrente sono **in fase**.

Circuito puramente induttivo

Le resistenze si oppongono al passaggio della corrente sottraendo ad essa parte dell'energia trasportata e dissipandola sotto forma di calore, attenuandone quindi l'intensità.

Nel circuito puramente induttivo, le induttanze presenti si oppongono alla variazione della corrente, ma, a causa del fenomeno dell'autoinduzione, non ne dissipano l'energia, ne accumulano una parte quando la corrente aumenta e la restituiscono quando questa diminuisce, ritardando quindi la variazione della corrente circolante.

Questo particolare tipo di opposizione al passaggio della corrente, può essere considerato come l'effetto di un particolare tipo di resistenza, che viene detta **reattanza induttiva**.

La reattanza induttiva viene anch'essa misurata in Ohm come la resistenza ma, contrariamente a quest'ultima, viene definita come una resistenza **apparente**, in quanto provoca effetti completamente diversi, infatti:

- la resistenza ohmica presenta al passaggio della corrente elettrica un certo ostacolo, che dà luogo ad una dissipazione di potenza che viene trasformata in calore;
- la reattanza induttiva per effetto dell'autoinduzione, invece, ostacola le variazioni della corrente alternata, ritardandone sia l'aumento che la diminuzione.

Quest'ultimo fenomeno prende il nome di **effetto reattivo** ed è tanto maggiore quando maggiore è la **frequenza** della corrente alternata.

Quindi, uno stesso circuito induttivo presenta una piccola reattanza alle correnti a bassa frequenza, ed una reattanza maggiore, per le frequenze più elevate. Cioè, i circuiti induttivi si lasciano attraversare facilmente dalle correnti a bassa frequenza, e tendono a bloccare invece, le correnti ad alta frequenza.

Il circuito puramente induttivo, in corrente continua, equivale ad un corto circuito in quanto, essendo la frequenza zero, la reattanza è nulla e quindi l'intensità di corrente può essere elevatissima (la bobina dell'induttanza è praticamente un filo di resistenza quasi nulla).

La corrente in un circuito puramente induttivo, non è in fase con la tensione perché, come già visto, l'autoinduzione del circuito genera un f.e.m. di autoinduzione che si oppone alle variazioni e quindi al passaggio della corrente stessa, provocandone un ritardo, che viene detto sfasamento.

L'andamento della corrente e della tensione in un circuito puramente induttivo è descritto nello schema seguente.

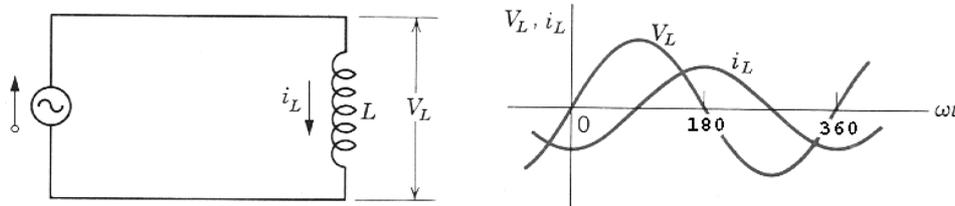


Figura 44: tensione e corrente alternata in circuiti induttivi

In particolare si può dimostrare che la corrente raggiunge i valori massimi e lo zero $\frac{1}{4}$ di periodo dopo la tensione, cioè, **in un circuito puramente induttivo, lo sfasamento della corrente rispetto alla tensione è di 90° in ritardo.**

Circuito resistivo-induttivo

Il circuito puramente induttivo è un circuito ideale. Nella realtà ogni circuito induttivo ha anche una componente resistiva e può essere semplificato in un circuito composto da una resistenza e da una induttanza collegate fra loro.

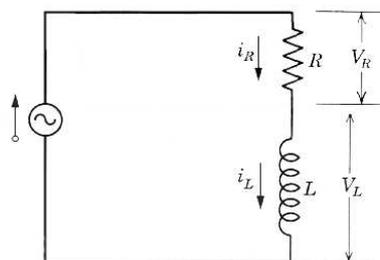


Figura 45: Circuito resistivo-induttivo

In pratica sono considerati resistivo-induttivi tutti i circuiti composti da bobine. Ad esempio: gli avvolgimenti dei trasformatori, dei motori, le bobine delle elettrocalamite, i circuiti di eccitazione dei relé, ecc.

Applicando una tensione alternata a questo tipo di circuiti, essi saranno percorsi da una corrente alternata di intensità minore di quella che circolerebbe se applicassimo una tensione continua. Infatti, la corrente alternata per attraversare una bobina incontra sia un'opposizione dovuta alla resistenza, sia un'opposizione dovuta alla reattanza.

L'azione combinata dalla resistenza e della reattanza in un circuito percorso da corrente alternata, viene detta:

IMPEDENZA

L'impedenza di un circuito viene misurata in ohm per la componente resistiva, che provoca l'attenuazione della corrente circolante secondo la legge di ohm, e in gradi per la componente reattiva, che ne provoca lo sfasamento.

Infatti, come già visto, nel caso del circuito ohmico la tensione e la corrente sono in fase, mentre nel circuito induttivo la corrente è sempre sfasata in ritardo di 90° rispetto alla tensione.

Pertanto la corrente che attraversa il circuito resistivo-induttivo risulta sfasata di un valore compreso tra 0° e 90° . Lo sfasamento risulterà tanto maggiore, quanto maggiore è la reattanza induttiva del circuito rispetto alla resistenza.

Lo sfasamento tra tensione e corrente, viene indicato con $\cos\varphi$, e viene espresso con un numero che varia da 0 a 1.

- **Al valore $\cos\varphi = 0$ si ha uno sfasamento di 90°**
- **Al valore $\cos\varphi = 1$ non si ha sfasamento, cioè tensione e corrente sono in fase.**

Il $\cos\varphi$ di un circuito resistivo-induttivo è dato dal rapporto tra la resistenza e l'impedenza del circuito stesso, e viene misurata con degli strumenti detti **fasometri o cosfimetri**, a seconda che mostrino valori in gradi o in numeri.

Vedremo in seguito l'importanza dello sfasamento tra la tensione e la corrente ai fini della potenza elettrica.

A.9.3 Circuiti capacitivi e risonanza

Il circuito capacitivo in presenza di correnti alternate, si comporta in maniera simile a quello induttivo. La differenza, come spiegato nel § A.8.8, consiste nel fatto che nei condensatori è la tensione che si muove in ritardo rispetto alla corrente.

In questo caso la **reattanza capacitiva**, cioè l'accumulo dell'energia sotto forma di cariche elettriche ai capi del condensatore, è **tanto minore quanto maggiore è la frequenza** della corrente alternata, in quanto ad alta frequenza le cariche non hanno il tempo di accumularsi.

Quindi i circuiti capacitivi si lasciano attraversare facilmente dalle correnti ad alta frequenza, e tendono a bloccare invece, le correnti a bassa frequenza

L'andamento della corrente e della tensione in un circuito puramente capacitivo è descritto nello schema seguente.

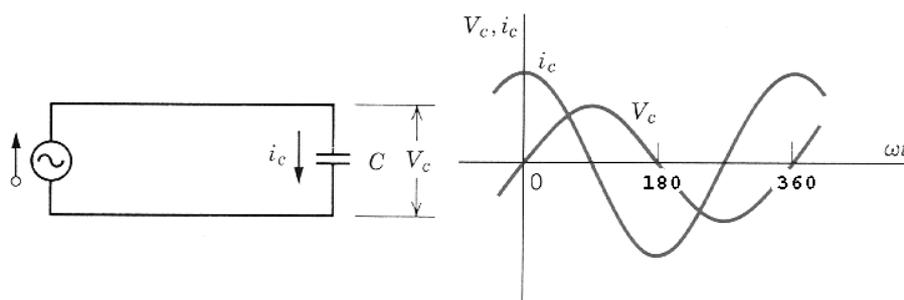


Figura 46: tensione e corrente alternata in circuiti capacitivi

Per convenzione lo sfasamento viene sempre indicato come quello della corrente rispetto alla tensione, per cui si può concludere che **in un circuito puramente capacitivo, lo sfasamento della corrente rispetto alla tensione è di 90° in anticipo.**

Anche in questo caso i circuiti reali sono in genere di tipo resistivo-capacitivo, cioè formati sia da resistenze sia da condensatori. Quindi la corrente circolante risulta sia sfasata sia attenuata.

In alcuni casi i circuiti possono essere di tipo resistivo-induttivo-capacitivo, cioè caratterizzati dalla presenza di una resistenza, di un'induttanza e di una capacità, che possono essere collegate tra loro in serie o in parallelo (vedi figura successiva).

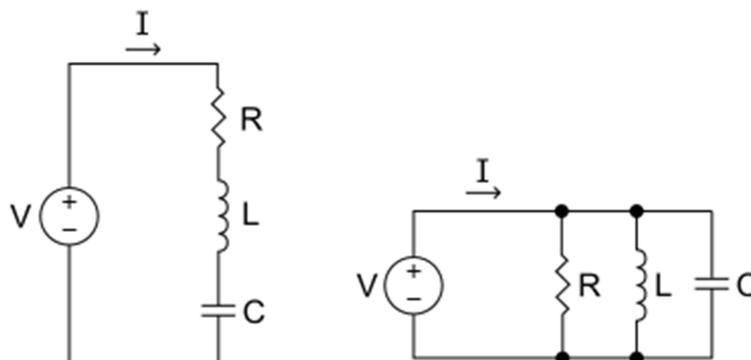


Figura 47: circuito resistivo–induttivo–capacitivo in serie e in parallelo

Sia nei circuiti in serie, sia in parallelo, si hanno sfasamenti della tensione e corrente variabili a seconda che prevalga il valore della reattanza induttiva o capacitiva. Infatti come già visto, l'induttanza tende a sfasare la corrente in ritardo rispetto alla tensione, mentre la capacità tende a sfasarla in anticipo.

Bisogna però ricordarsi che le reattanze hanno valori che dipendono dalla frequenza della corrente alternata, quindi lo sfasamento è variabile con la frequenza. Inoltre esiste sempre un valore di frequenza per cui le due reattanze (capacitiva e induttiva) sono uguali e contrarie, e lo **sfasamento risulta nullo**. Tale frequenza è detta di **risonanza**, ed è caratterizzata dal fatto che l'energia passa dall'induttanza alla capacità con molta facilità.

In questa condizione, la reattanza complessiva è nulla e quindi, **nel circuito in serie l'impedenza complessiva è minima**. Inoltre le correnti e le tensioni cui sono sottoposti i componenti del circuito sono le massime possibili e, **se la resistenza è molto piccola**, possono raggiungere livelli molto alti, se non pericolosi per l'integrità del circuito stesso.

Viceversa, alla frequenza di risonanza, **nel circuito in parallelo l'impedenza complessiva è massima**, in quanto a frequenze differenti o la reattanza capacitiva è più piccola (alta frequenza), o la reattanza induttiva è più piccola (bassa frequenza), e in un circuito parallelo l'impedenza totale è determinata dall'impedenza più piccola (vedi capitolo A.4.3). Di conseguenza alla risonanza la corrente richiesta al generatore è la minima possibile, mentre la corrente circolante nell'induttanza e nel condensatore, vale a dire l'energia in essi accumulata, può essere molto elevata se il valore della resistenza è troppo elevato per poterla dissipare in maniera sufficiente.

A.9.4 Potenza Elettrica in Corrente Alternata

La potenza elettrica in corrente alternata viene calcolata come la potenza elettrica in corrente continua, tenendo conto però, dello sfasamento dovuto alla reattanza del circuito.

La tensione e corrente durante il loro ciclo, a seconda del loro sfasamento, possono assumere, invertendo le loro polarità, segno uguale o segno contrario.

Si ricorda che il prodotto di due grandezze di segno uguale dà sempre una terza grandezza di segno positivo, mentre il prodotto di due grandezze di segno contrario, dà sempre una terza grandezza di segno negativo, quindi anche nel caso della tensione e della corrente, si avrà che:

$$\begin{aligned}
 + X + &= + \\
 - X - &= + \\
 + X - &= - \\
 - X + &= -
 \end{aligned}$$

In un circuito puramente resistivo, cioè privo di reattanza, tensione e corrente sono in fase, quindi si verificano solo i primi due casi. Nel primo sono entrambe positive, e quindi la potenza è positiva; nel secondo sono entrambe negative, quindi la potenza risulta ancora positiva.

Riportando in un diagramma i valori di tali prodotti, si ottiene la curva della potenza, che è sempre positiva, che non ha andamento alternato ma pulsante.

In questo caso, la potenza attiva è data da:

$$\text{POTENZA ATTIVA} = V \times I$$

Dove V e I sono i **valori efficaci** della tensione e corrente. Si usano i valori efficaci perché rappresentano il valore dell'energia trasferita da un generatore ad un circuito utilizzatore (vedi § A.9.1).

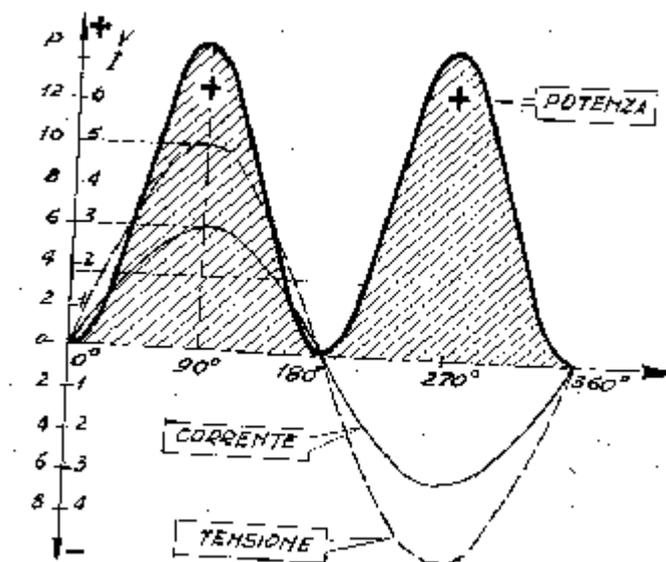


Figura 48: Potenza in corrente alternata in circuito resistivo

In un circuito resistivo-induttivo, la cui reattanza abbia un valore tale da produrre, ad esempio, uno sfasamento di 45°, si ha che:

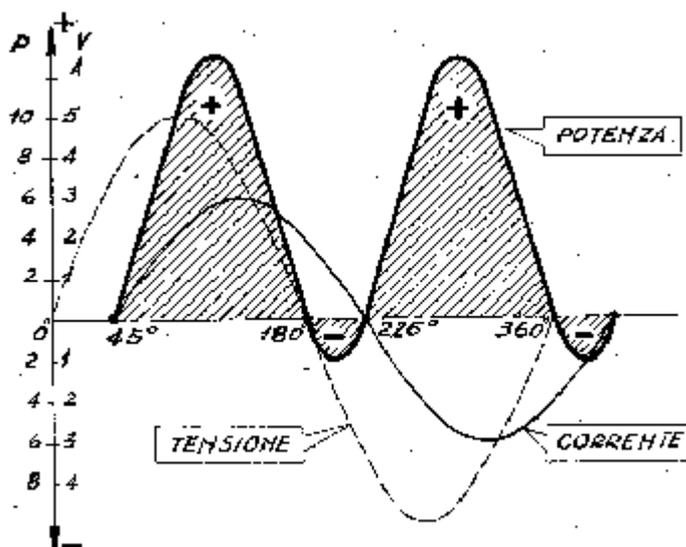


Figura 49: Potenza in corrente alternata in circuito resistivo-induttivo

- Da 45° a 180° sia I che V sono positive e quindi la potenza risulta positiva.
- Da 180° a 225° la I è positiva e la V è negativa, quindi la potenza risulta negativa.
- Da 225° a 360° La I e la V sono negative, e quindi la potenza risulta positiva.

Pertanto la potenza è sempre data dal prodotto $V \times I$ ma, a causa dello sfasamento, certe volte tale prodotto diventa negativo, per cui, la potenza utile non è più quella indicata dalla parte della curva che si trova sopra la linea dello zero, ma risulta minore.

Inoltre, si è visto che la reattanza non provoca alcuna dissipazione di potenza, ma la accumula per poi restituirla, quando i valori di tensione sono tali da renderne possibile il ritorno.

Pertanto, in un circuito comprendente resistenza e reattanza ed alimentato con corrente alternata, si avrà:

- Una potenza, detta **apparente**, che è quella totale fornita dal generatore al circuito.
- Una potenza, detta **reattiva**, considerata negativa, che è quella accumulata dalla reattanza e restituita al generatore.
- Una potenza, detta potenza **attiva**, considerata positiva, che è quella utilizzata dal circuito, e quindi trasformata in lavoro utile, oppure dissipata in calore dalle resistenze nel circuito.

Quindi, la potenza attiva di un circuito alimentato con tensione alternata non è sempre data dal prodotto dei valori efficaci di tensione e corrente $V \times I$, ma può risultare minore a causa dell'effetto reattivo, che dà luogo allo sfasamento tra tensione e corrente, cioè al $\cos \varphi$ (vedi § A.9.2).

Pertanto la potenza attiva di un circuito è uguale al prodotto della potenza apparente per il $\cos \varphi$.

$$\text{POTENZA ATTIVA} = V \times I \times \cos \varphi.$$

- La **potenza attiva** P_a viene misurata in **Watt (W)**, come in corrente continua;
- La **potenza apparente** P viene misurata in **Voltampere (VA)**;
- La **potenza reattiva** P_r viene misurata in **Voltampere reattivi (VAR)**.

$$\text{POTENZA ATTIVA} = V \times I \times \cos \varphi. \text{ (WATT)}$$

$$\text{POTENZA APPARENTE} = V \times I \text{ (Voltampere)}$$

POTENZA REATTIVA = $V \times I \sin \varphi$ (VAR)

Di conseguenza valgono le seguenti relazioni:

$$\text{Potenza attiva} = \text{Potenza apparente} \times \cos \varphi$$

$$\text{Potenza reattiva} = \text{Potenza apparente} \times \sin \varphi$$

A.9.5 Fattore di potenza

In un circuito alimentato con corrente alternata, il fattore di potenza è un numero che permette di quantificare la potenza attiva ricevuta da un utilizzatore, rispetto alla potenza totale fornita (potenza apparente).

Pertanto, esso viene espresso dal rapporto:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

Se il $\cos \varphi$ di un utilizzatore è alto, cioè prossimo a 1, significa che quasi tutta la potenza apparente viene trasformata in potenza attiva.

Se il $\cos \varphi$ è basso, cioè prossimo a 0, significa che solo una piccola parte di potenza apparente viene trasformata in potenza attiva.

La potenza reattiva rimanente, dà luogo ad un passaggio di corrente che non compie alcun lavoro utile.

Ad esempio: un utilizzatore della potenza di 5000 W alimentato a 500 V e funzionante con un $\cos \varphi = 1$ assorbe dalla linea una corrente di 10 A.

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{5000}{500 \times 1} = \frac{5000}{500} = 10$$

Mentre, se funzionasse a $\cos \varphi = 0,2$, assorbirebbe dalla linea una corrente di 50 A, di cui solo 10 A compiono un lavoro utile

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{5000}{500 \times 0,2} = \frac{5000}{100} = 50$$

Pertanto, un basso $\cos \varphi$ rappresenta sempre un danno, a causa delle correnti che assorbe l'utilizzatore senza compiere lavoro utile; gli inconvenienti principali che ne derivano sono:

- Aumento delle perdite per effetto termico sulla linea
- Aumento della caduta di tensione sulla linea ($V = R \times I$)
- Limitazione della potenza utilizzabile dai generatori, poiché gli avvolgimenti dei generatori stessi sono proporzionati in modo che vi possa circolare una determinata corrente massima, indipendentemente dal fatto che questa sia più o meno in fase con la tensione.

Ciò spiega perché le società distributrici di energia elettrica applicano una tariffa tanto più onerosa quanto più bassi sono i fattori di potenza degli impianti utilizzatori.

A.9.6 Rifasamento

Il rifasamento è una operazione che si effettua per elevare il fattore di potenza dei circuiti che funzionano con un basso $\cos\varphi$. Infatti, un circuito avente un basso $\cos\varphi$, cioè un basso fattore di potenza, comporta come visto degli inconvenienti notevoli sia per la linea che per il generatore.

In pratica, il basso $\cos\varphi$ è provocato dall'induttanza delle macchine elettriche (ad esempio motori, trasformatori), ed in genere da tutte quelle apparecchiature che creano dei campi magnetici.

Lo sfasamento risulta maggiore nelle macchine elettriche funzionanti a vuoto, perché la potenza attiva assorbita è molto piccola, mentre la potenza reattiva necessaria a creare il campo magnetico rimane costante.

Invece, se la macchina elettrica funziona a pieno carico, la potenza attiva assorbita è molto maggiore della potenza reattiva, e quindi lo sfasamento risulterà minore.

Il rifasamento si effettua collegando al circuito da rifasare uno o più condensatori, proporzionati in maniera tale da assorbire una potenza reattiva sfasata in anticipo, di valore tale che annulli buona parte della potenza reattiva sfasata, in modo da lasciar passare sulla linea la sola potenza attiva.

Il condensatore viene inserito nel circuito da rifasare in parallelo, perché collegando il condensatore in serie, si possono stabilire ai suoi capi ed a quelli degli apparecchi da rifasare delle tensioni molto elevate, che possono risultare pericolose (vedi capitolo A.9.3).

L'inserimento dei sistemi di rifasamento in punti opportuni dell'impianto utilizzatore, fa sì che l'energia reattiva immagazzinata ad esempio in un motore elettrico durante il suo funzionamento, non venga restituita, verso la rete elettrica, ma rimanga all'interno dell'impianto utilizzatore, dove circola tra motori e rifasatori come in un circuito risonante, (vedi § A.9.3), mentre viene dissipata dalle resistenze dell'impianto. Questo significa che le correnti lungo i conduttori della rete elettrica sono inferiori rispetto al caso senza rifasatori, mentre lungo i conduttori dell'impianto utilizzatore continuano a essere elevate ma entro limiti accettabili, se tutti i componenti dell'impianto sono progettati correttamente.

In generale, siccome il $\cos\varphi$ può variare molto a seconda delle condizioni operative dell'impianto, i sistemi di rifasamento vengono realizzati tramite batterie di condensatori, i quali possono essere inseriti o disinseriti per mezzo di sistemi automatici. In alcuni casi l'inserimento viene effettuato tutto nello stesso momento ma ad esempio "a gradini", seguendo l'andamento nel tempo dello sfasamento da correggere. Nei casi pratici con questo sistema si può ottenere un valore medio nel tempo del $\cos\varphi$ anche superiore allo 0,9.

A.10 Sistemi trifase

A.10.1 La fase in corrente alternata

La **fase** in corrente alternata rappresenta la posizione di una corrente o di una tensione nel suo ciclo. Ad esempio: si è visto che corrente e tensione sono in fase quando raggiungono i loro valori zero e massimo negli stessi istanti, mentre sono fuori fase quando sono spostati nel ciclo di un certo angolo.

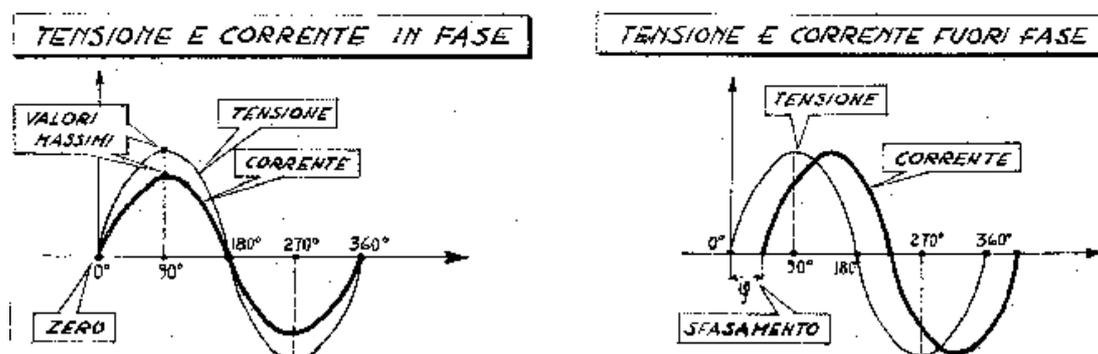


Figura 50: Sfasamento tra tensione e corrente

La parola fase viene usata anche riferita a due o più tensioni e a due o più correnti esistenti nello stesso tempo in un unico circuito.

Ad esempio, quando nel circuito esiste una sola corrente si ha una sola fase. In questo caso il circuito viene detto **monofase**.

Invece se nello stesso circuito esistono due o più correnti sfasate di un certo angolo si ha un sistema **polifase**. In questo caso se le correnti sono due il sistema viene detto **bifase**, se sono tre viene detto **trifase**.

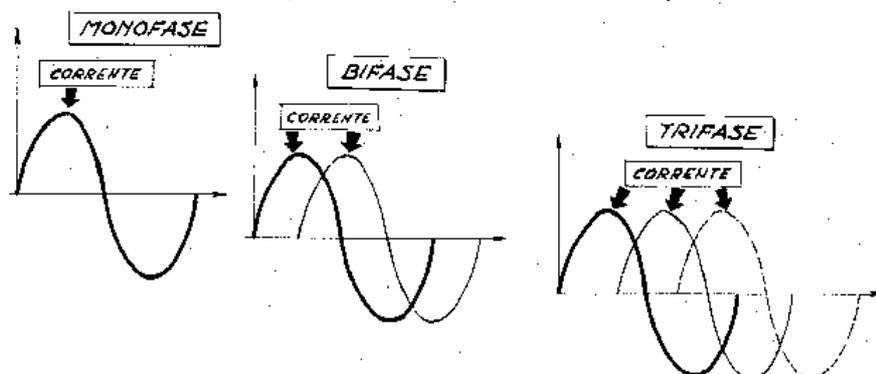


Figura 51: Correnti monofase, bifase e trifase

A.10.2 Tensione alternata trifase

La tensione alternata trifase è un tipo di tensione che si genera in tre avvolgimenti indipendenti ed ugualmente distanziati tra loro, in un campo magnetico ruotante.

La tensione è composta da tre tensioni sfasate tra loro di 120° , che danno luogo, in un circuito chiuso, ad un passaggio di tre correnti sfasate anch'esse di 120° ; cioè tensioni e correnti raggiungono i valori zero ed i valori massimi, $1/3$ di ciclo in ritardo l'una rispetto all'altra.

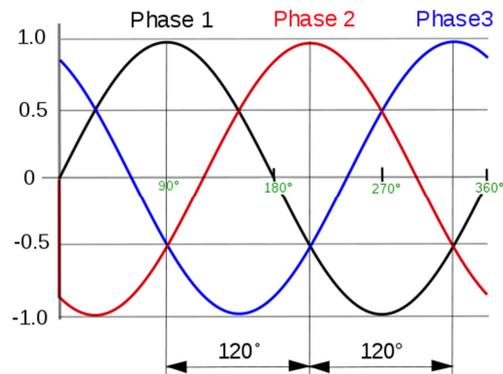


Figura 52: Sfasamento tra correnti trifase

Collegando i tre avvolgimenti del generatore, mediante sei conduttori, a tre utilizzatori, si ottiene un sistema trifase a sei fili, in cui i singoli circuiti funzionano indipendentemente, come tre circuiti monofasi.

Sostituendo ai tre conduttori di ritorno della corrente un unico conduttore si realizza un sistema trifase a quattro fili, in cui l'unico conduttore di ritorno, nel quale le tre correnti si sommano viene chiamato **neutro**.

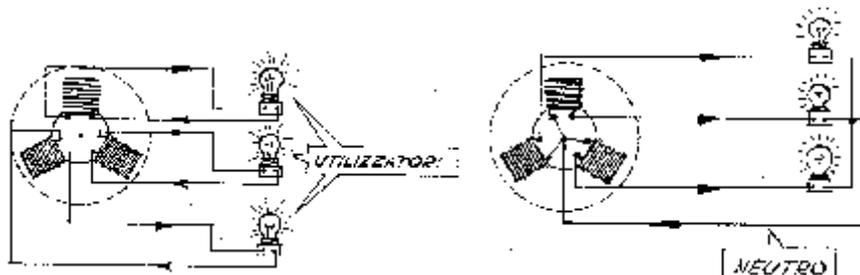


Figura 53: Neutro dei sistemi trifase

- Se le tre correnti sono uguali, la loro somma in ogni istante è uguale a zero ed in questo caso il neutro non risulta attraversato da corrente.
- Se le correnti non sono uguali, la loro somma in ogni istante non è uguale a zero e pertanto il neutro risulta attraversato da corrente.

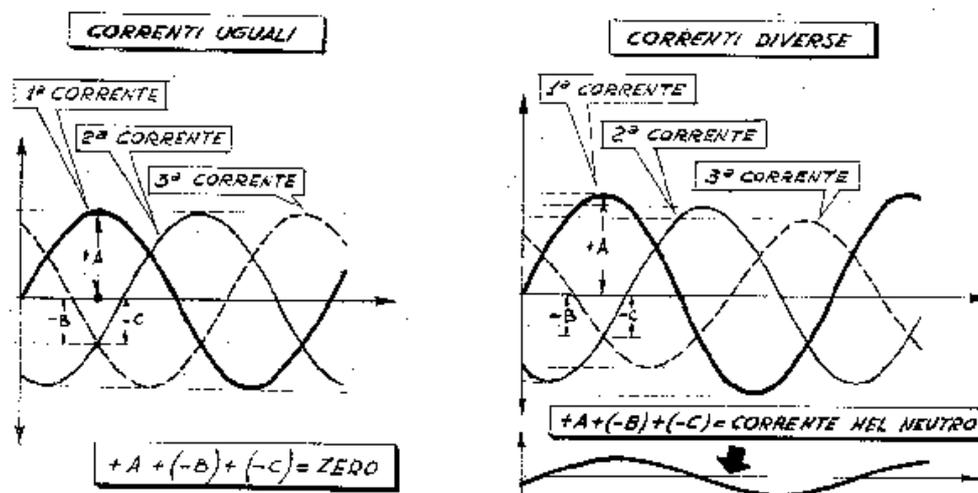


Figura 54: Le correnti nel neutro

A.10.3 Collegamenti trifase

Con i collegamenti trifasi si possono ottenere con un unico sistema due diversi valori della tensione.

Infatti, come si è visto, collegando assieme tre conduttori di ritorno di un generatore trifase, si ottiene un sistema trifase a quattro fili, in cui i tre conduttori di andata vengono detti **conduttori di fase** ed il conduttore di ritorno, comune a tutti e tre gli avvolgimenti, viene detto **neutro**.

Pertanto, la tensione esistente tra un conduttore di fase ed il neutro è uguale a quella generata da un avvolgimento del generatore. Essa viene detta **tensione di fase e viene in genere indicata con la lettera E**.

Invece, la tensione esiste tra i due conduttori di fase, non è doppia di quella generata da un avvolgimento ma, a causa dello sfasamento di 120° tra le tensioni di fase, risulta 1,73 volte maggiore. Essa viene detta **tensione concatenata e viene indicata con la lettera V**.

$$V = \sqrt{3} E = 1.73 E$$

Ad esempio, ad una tensione di fase di 220 V, corrisponde una tensione concatenata di circa 380 V, ad una tensione di fase di 230 V, corrisponde una tensione concatenata di quasi 400 V.

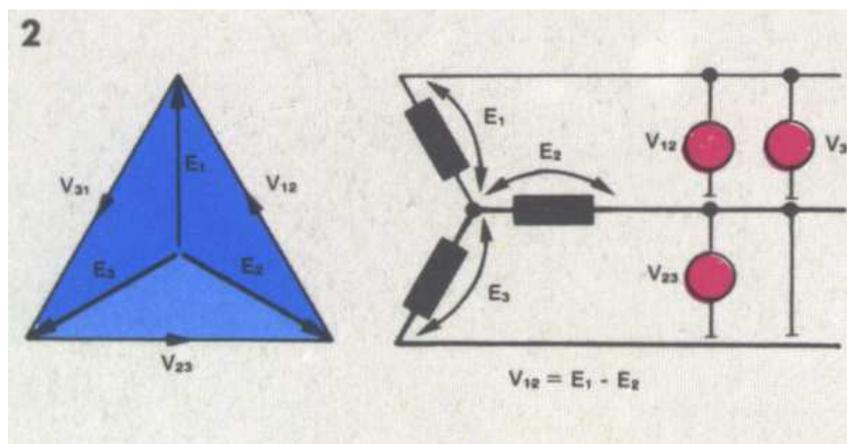


Figura 55: Tensioni di fase e tensioni concatenate

Quindi gli utilizzatori a seconda di come vengono collegati in un sistema trifase, possono essere sottoposti o alla tensione di fase o alla tensione concatenata; nel primo caso si ha il **collegamento a stella**, nel secondo caso il **collegamento a triangolo**.

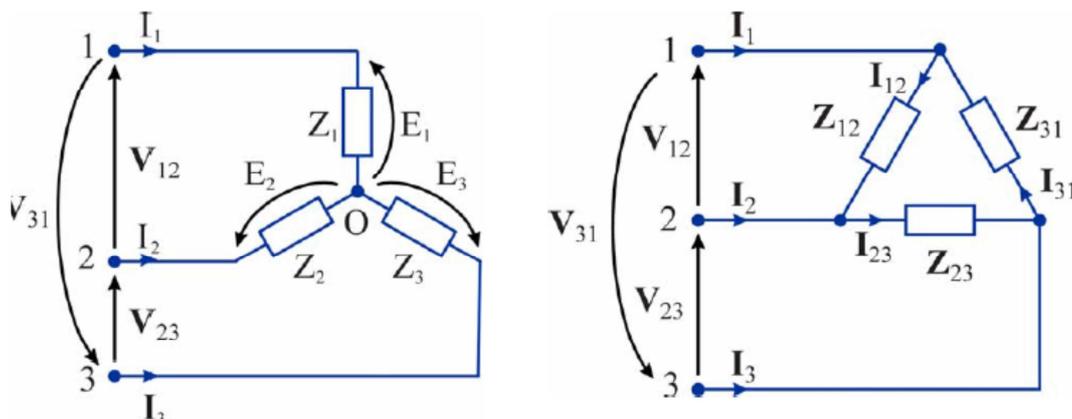


Figura 56: Utilizzatori collegati a stella e a triangolo

A.10.4 Collegamento a stella

Nel collegamento a stella gli utilizzatori risultano sottoposti alla tensione esistente tra un conduttore di fase ed il neutro che è dato da:

$$\text{TENSIONE SULL'UTILIZZATORE} = \text{TENSIONE di FASE}$$

L'intensità di corrente che attraversa i vari utilizzatori, cioè la **corrente di fase** è la stessa che attraversa i conduttori di ogni linea.

$$\text{CORRENTE SULL'UTILIZZATORE} = \text{CORRENTE di FASE} = \text{CORRENTE di LINEA}$$

Quando i valori dell'impedenza Z degli utilizzatori sono uguali, i tre conduttori di linea sono attraversati da un'intensità di corrente uguale. In questo caso si dice che il carico è **equilibrato**, e come già visto il neutro non risulta attraversato da corrente.

Quando i valori dell'impedenza degli utilizzatori non sono uguali, i tre conduttori di linea risultano attraversati da intensità di corrente diverse. In questo caso si dice che il carico è **squilibrato**, ed il neutro risulta attraversato da una certa intensità di corrente.

Nota: Se in un circuito squilibrato non esiste il neutro, si hanno delle perturbazioni in quanto ogni linea, oltre che a funzionare da alimentatrice, deve funzionare da conduttore di ritorno per le altre.

Quindi, quando il carico è squilibrato, le correnti di linea possono assumere valori notevolmente diversi e di conseguenza variano anche le tensioni di fase. Pertanto alcuni utilizzatori risultano sottoposti a tensione superiore a quella di funzionamento, mentre altri risultano sottoposti a tensione inferiore.

A.10.5 Collegamento a triangolo

Nel collegamento a triangolo, gli utilizzatori risultano sottoposti alla tensione concatenata, poiché vengono collegati tra i due conduttori di fase.

$$\text{TENSIONE SULL'UTILIZZATORE} = \text{TENSIONE CONCATENATA}$$

L'intensità di corrente che attraversa ogni utilizzatore, cioè la corrente di fase, è data da:

$$\text{CORRENTE di FASE} = \text{TENSIONE CONCATENATA} / \text{IMPEDEENZA}$$

Se gli utilizzatori, hanno impedenza uguale, essi risultano attraversati da tre correnti di fase uguali e sfasate tra loro di 120° . In questo caso l'intensità di corrente che circola nella linea, non è data dalla somma delle correnti di fase, ma a causa del loro sfasamento di 120° , è data, come per la tensione da:

$$\text{CORRENTE SULL'UTILIZZATORE} = \text{CORRENTE di FASE} = \text{CORRENTE di LINEA} / 1.73$$

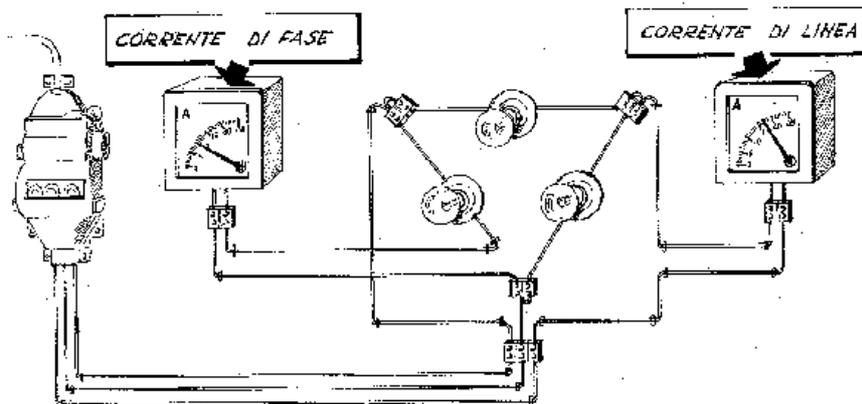


Figura 57: Corrente di fase e corrente di linea in un collegamento a triangolo

Ciò significa che la corrente che circola nella linea, con gli utilizzatori collegati a triangolo, è 1,73 volte maggiore della corrente che attraversa gli utilizzatori.

Nota: Se i valori delle tre impedenze sono diversi, si ha che ogni utilizzatore è percorso da una corrente di fase diversa, e le correnti di linea non più date dalla relazione precedente, ma vengono calcolate con formule trigonometriche.

A.10.6 Potenza attiva nei sistemi trifase

Il calcolo della potenza attiva in un circuito trifase non differisce molto da quello nei circuiti monofasi.

Infatti collegando tre utilizzatori **a stella** ad una linea trifase a quattro fili si ha che ogni singolo utilizzatore viene alimentato con la tensione di fase E ed è attraversato dalla corrente di linea I , per cui la potenza attiva, che esso assorbe, è data da:

$$\text{POTENZA ATTIVA} = E I \cos\varphi$$

Mentre la potenza totale assorbita dai tre utilizzatori, risulta di:

$$\text{POTENZA ATTIVA} = 3 E I \cos\varphi = 1.73 V I \cos\varphi$$

Invece, se gli utilizzatori sono collegati **a triangolo**, si ha che ogni utilizzatore viene alimentato con la tensione V che coincide con la tensione concatenata, ed è attraversato da una corrente di fase I_f che è 1,73 volte minore della corrente di linea I , cioè $I_f = I/1,73$ per cui la potenza totale assorbita dall'utilizzatore, funzionante con un certo $\cos\varphi$, risulta di:

$$\text{POTENZA ATTIVA} = 3 (V \times I / 1.73) \times \cos\varphi = 1.73 V I \cos\varphi = 3 E I \cos\varphi$$

Pertanto, la potenza attiva totale assorbita da un utilizzatore trifase può essere calcolata, indipendentemente dal fatto che l'utilizzatore sia collegato a stella o a triangolo.

A.10.7 Campo magnetico rotante nei sistemi trifase

Una corrente alternata monofase che percorre una bobina, genera un campo magnetico alternato sinusoidale che risulta in fase con la corrente stessa. Cioè le linee di forza che si generano nella bobina, invertono di direzione e variano di intensità al variare della corrente.

Pertanto:

- quando la corrente è massima positiva, agli estremi della bobina si ha “ un polo nord e un polo sud”
- quando la corrente è zero non si avrà polarità.

- quando la corrente è massima negativa, le polarità della bobina sono invertite.

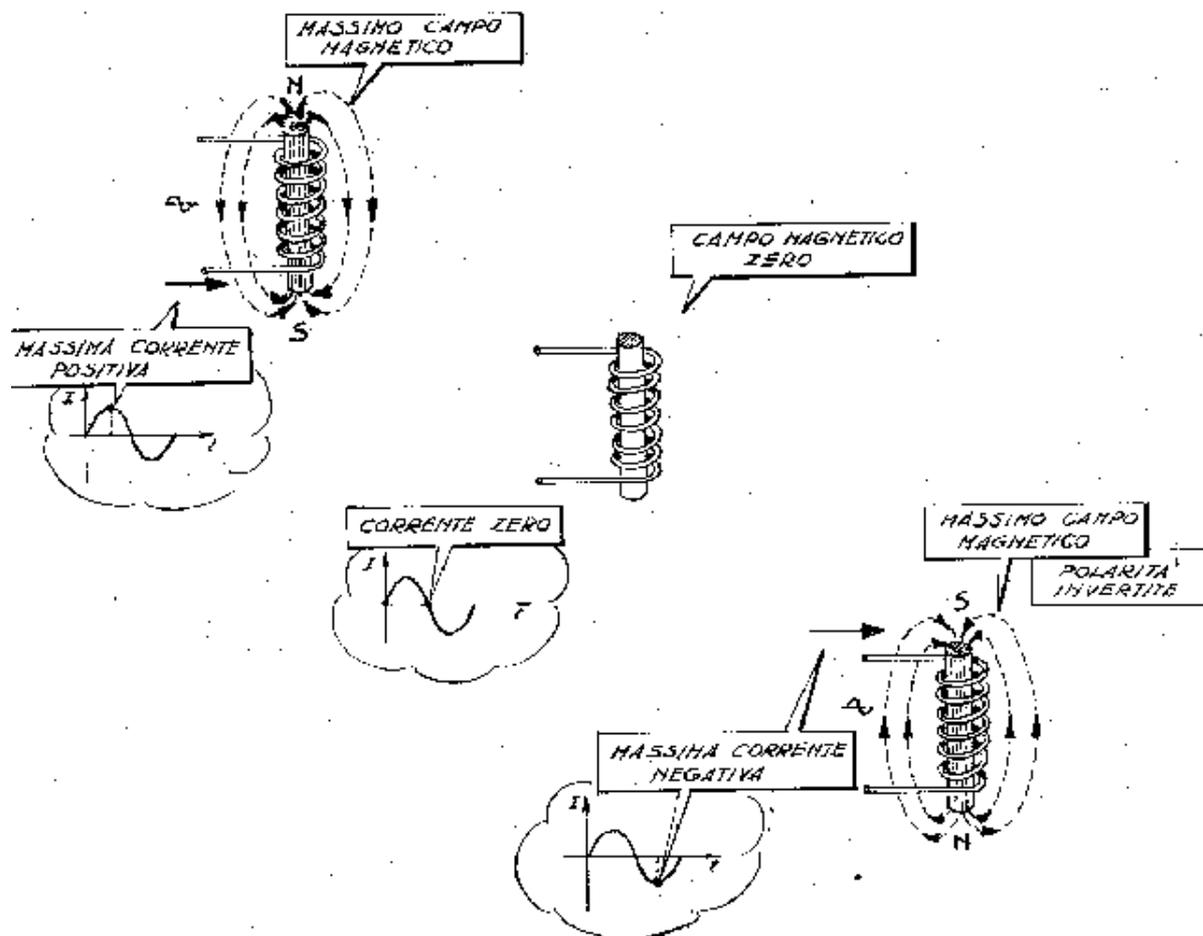


Figura 58: Variazione del campo magnetico con la corrente in una bobina

Invece, alimentando tre bobine disposte a 120° tra loro, con tre correnti alternate sinusoidali di eguale frequenza e sfasate di $1/3$ di periodo, si hanno tre campi magnetici alternati che si sommano tra loro producendo un campo unico, che viene detto **campo magnetico rotante**.

Infatti, quando la bobina A viene percorsa dalla massima corrente positiva, la bobina C viene percorsa da una corrente negativa che tende a zero e la bobina B viene attraversata da una corrente negativa che tende al valore massimo.

Quindi, nella bobina A il flusso è massimo, nella bobina C tende ad annullarsi e ad invertire polarità e nella bobina B tende ad aumentare verso il valore massimo negativo.



Figura 59: Variazione dei campi magnetici in un sistema trifase

Dopo $1/3$ di periodo, il flusso è massimo nella bobina C, in quanto essa viene percorsa dalla massima corrente positiva, nella bobina B il flusso tende ad annullarsi e nella bobina A tende al massimo negativo.

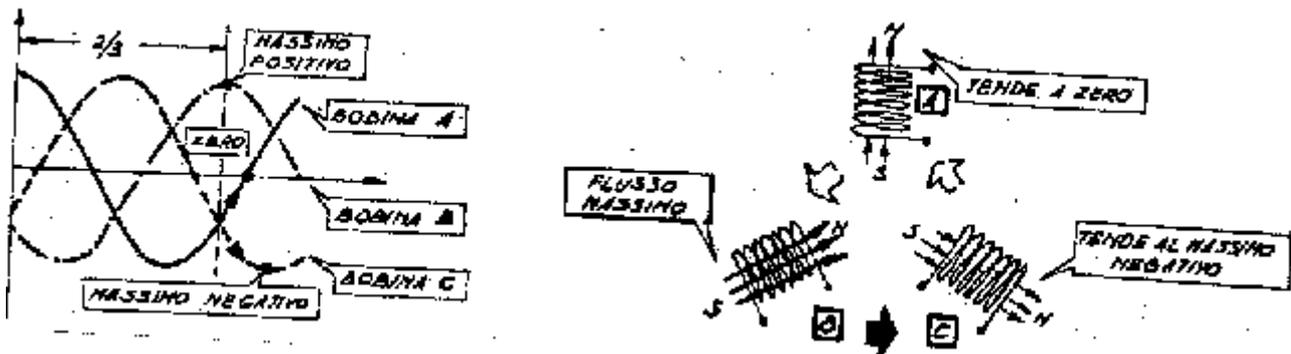


Figura 60: Variazione dei campi magnetici in un sistema trifase dopo $1/3$ di periodo

Si ha così che il valore massimo del campo magnetico tende a spostarsi da una bobina alla successiva, ruotando con una velocità uguale alla frequenza della corrente che lo ha generato, provocando un effetto che può essere paragonato a quello prodotto da una calamita rotante.

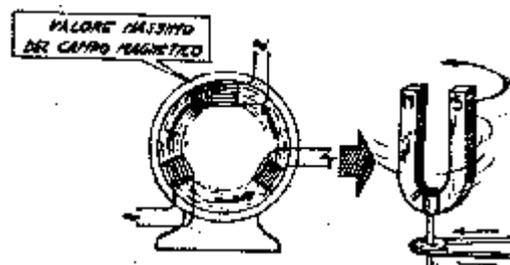


Figura 61: Campo magnetico rotante di un motore trifase e di una calamita