

L'elettricità facile

INTRODUZIONE

Questo manuale è destinato a coloro che desiderano acquisire una maggiore conoscenza dei fenomeni elettrici e della tecnica collegata all'uso della corrente elettrica.

Le nozioni elementari, esposte in modo per quanto possibile semplice e tralasciando complesse trattazioni matematiche, permetteranno di avvicinarsi ai dispositivi elettrici con uno spirito diverso, rendendosi conto dei principi che stanno alla base del loro funzionamento e dei motivi per cui a volte le cose non vanno per il verso giusto.

Intento di questo manuale è anche quello di sfatare alcuni luoghi comuni, alcuni “si dice” che, se seguiti senza una opportuna conoscenza, portano spesso a determinare situazioni di pericolo o, quanto meno, dei malfunzionamenti.

Vorrei tuttavia ricordare, anche a costo di ripetere frasi scontate, che l'utilizzo della corrente elettrica comporta notevoli pericoli, se non si osservano gli adeguati criteri di protezione e sicurezza.

Pertanto, l'uso di questo manuale e dei consigli che vi si trovano, non può e non deve sostituirsi all'intervento di personale qualificato, il solo che può garantire il funzionamento sicuro di un impianto elettrico e la necessaria incolumità delle persone che lo usano.

L'autore

Nozioni teoriche di base

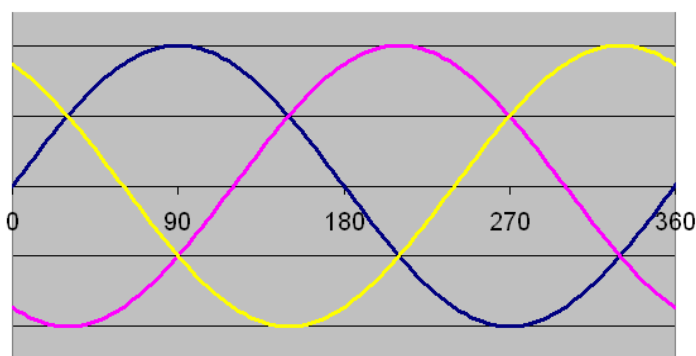
Produzione e trasporto dell'energia elettrica

La maggior parte dell'energia elettrica che usiamo quotidianamente viene prodotta da alternatori, all'interno di strutture apposite chiamate "centrali di produzione".

L'alternatore è una macchina rotante che trasforma energia meccanica in energia elettrica; è costituito da una parte fissa, detta "statore", all'interno della quale gira il "rotore".

Il movimento del rotore genera un campo magnetico rotante, che, per induzione, determina la nascita di una corrente elettrica negli avvolgimenti dello statore.

In virtù della loro conformazione, tali macchine forniscono in uscita una tensione alternata denominata "trifase"; come si vede nella figura in basso, una tensione trifase si può considerare composta da tre tensioni sinusoidali, sfasate l'una dall'altra di 120 gradi.



Nelle centrali termoelettriche, funzionanti a carbone, olio combustibile o gas, il calore prodotto dalla combustione viene utilizzato per far evaporare l'acqua che si trova nei tubi di apposite caldaie; il vapore così prodotto va ad azionare una turbina che, essendo meccanicamente collegata all'alternatore, mette in rotazione quest'ultimo.

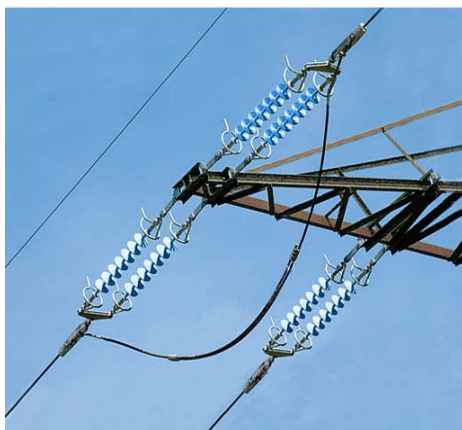
Nelle centrali idroelettriche, si sfrutta l'energia potenziale dell'acqua raccolta in invasi appositamente realizzati, in presenza di fiumi o torrenti; l'acqua che precipita verso il basso scarica la sua energia sulle pale di una turbina, facendola ruotare insieme all'alternatore ad essa collegato. In tutti i casi, l'energia elettrica prodotta non viene naturalmente utilizzata sul posto, ma deve essere trasportata a notevoli distanze. Trattandosi di potenze enormi, sulle reti elettriche dovrebbero fluire correnti di intensità elevatissima, con conseguenti perdite dovute al riscaldamento degli stessi cavi destinati al trasporto. Si preferisce allora elevare la tensione in uscita dagli alternatori, usando speciali trasformatori che la portano a valori altissimi, per esempio 380 kV.

Siccome la potenza elettrica è data dal prodotto della tensione per la corrente, è chiaro che

utilizzando una tensione elevata si può trasmettere la stessa potenza facendo passare nei cavi una corrente minore.

Osservando le linee elettriche ad alta tensione, si notano subito quelle catene formate da numerosi isolatori, che hanno lo scopo di sostenere i fili evitando contemporaneamente qualsiasi contatto con le strutture collegate a terra. Fermandosi in prossimità di una di queste linee, è facile ascoltare una specie di sfrigolio, dovuto ai campi elettrici generati dall'alta tensione.

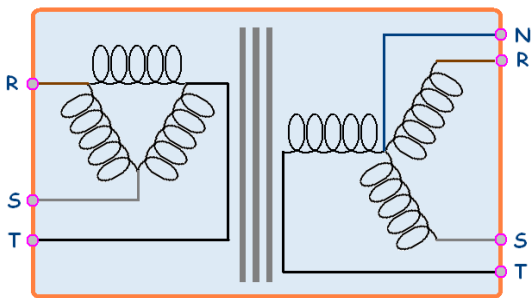
Inizialmente, quando si iniziò a produrre energia elettrica, questa veniva generata come tensione continua; il grande limite delle tensioni continue è tuttavia la necessità che gli utilizzatori si trovino a poca distanza dai centri di produzione.



Si passò quindi in breve tempo alle tensioni alternate trifase, che presentano molti vantaggi: oltre alla possibilità di elevarne facilmente il valore, esse sono in grado di generare un campo rotante che consente di utilizzare macchinari dalle caratteristiche vantaggiose come i motori asincroni trifase.

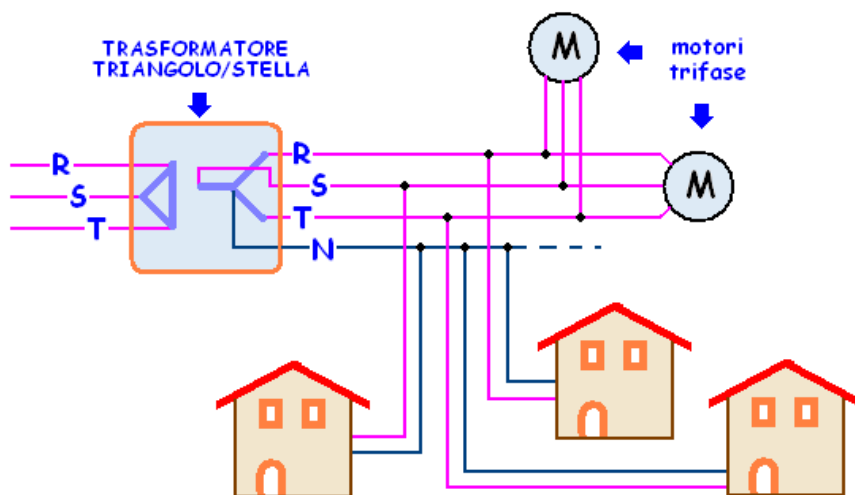
Come detto in precedenza, gli alternatori generano delle tensioni trifase, il cui valore può variare da 10 a 30 kV. Nelle stesse centrali, trasformatori di grande potenza elevano tali tensioni a valori di 220 o 380 kV, prima che l'energia venga istradata sugli elettrodotti ad alta tensione per il trasporto a grandi distanze. Le linee in alta tensione sono sempre costituite da 3 conduttori, ciascuno formato da una treccia di rame con all'interno un'anima di acciaio, che serve per sostenere il peso della linea.

Giunta alle porte delle città o comunque dei luoghi di utilizzazione, l'energia elettrica arriva in sottostazioni, dove la tensione viene nuovamente ridotta al valore di 10 kV. Dalle sottostazioni l'energia viene poi distribuita tramite reti a maglia, comprendenti numerose cabine di trasformazione dislocate nei vari quartieri, dove la tensione viene ancora abbassata ai valori di comune impiego, e cioè di 380 e 220 V. I trasformatori che operano questa trasformazione sono



del tipo "triangolo – stella". Come si vede nella figura a lato, i tre avvolgimenti dal lato di entrata (lato sinistro) sono collegati a formare un triangolo, e ciascuno dei fili in arrivo risulta collegato ad un vertice del triangolo; dal lato di uscita, invece, i tre avvolgimenti sono collegati con un estremo in comune (il centro stella, da dove nasce il "neutro") mentre gli altri estremi sono liberi. Grazie alla presenza di questo quarto conduttore, è possibile ricavare dal sistema trifase anche delle tensioni alternate monofase del valore di 220V, che rappresentano la tensione comunemente presente nelle nostre case.

Facciamo un breve riepilogo, osservando lo schema sotto: l'energia che arriva alle cabine di



distribuzione ha la forma di una tensione alternata trifase, che viaggia su tre fili, denominati appunto "fasi" e contraddistinti con le lettere "R, S, T". Il trasformatore che riduce la tensione nelle cabine di distribuzione è del tipo "triangolo – stella"; per tale motivo trasforma il sistema a tre fili in entrata in un sistema a quattro fili in uscita: R, S, T + N. In questo modo si può disporre di un sistema di tensioni a tre fili, adatto a a

far funzionare i motori trifase, come, per esempio, quelli degli ascensori civili o dei macchinari di officina, e allo stesso tempo è possibile ricavare tante utenze monofase a 220 V, derivandole da una qualsiasi delle tre fasi e dal quarto conduttore (il neutro).

Tensione, corrente e resistenza

Cercherò adesso di descrivere molto semplicemente queste tre grandezze caratteristiche che sono alla base di tutti i fenomeni elettrici.

Sicuramente si parla più spesso di “corrente” piuttosto che di “tensione”. Ma cos'è esattamente la corrente? Possiamo definire la corrente come un flusso di cariche elettriche che scorrono all'interno di un corpo “conduttore”; tali cariche tuttavia non arrivano dall'esterno, ma sono contenute nella materia, essendo le cariche elettroniche degli atomi che la costituiscono.

In certi materiali, queste cariche sono saldamente vincolate agli atomi di appartenenza, per cui non possono spostarsi: si dice allora che il materiale è “isolante” e non può condurre la corrente elettrica. Esempio di isolanti sono il vetro, la plastica, la gomma.

In altri materiali si riscontra la presenza di elettroni disponibili a spostarsi da un atomo all'altro, sotto l'azione di una particolare forza: questi materiali possono quindi far passare la corrente, e sono detti “conduttori”. Esempi di conduttori sono tutti i metalli e, purtroppo, i tessuti organici (quindi il nostro corpo ed il corpo di qualsiasi animale).

Tuttavia, anche nei materiali conduttori, le cariche si spostano solo se dall'esterno viene applicata una particolare “forza”, in grado di “spingere” le cariche e farle transitare da un atomo all'altro: questa forza è la “forza elettromotrice” o, come la si chiama comunemente, la “tensione”.

D'altra parte, se consideriamo un corpo conduttore cui sia applicata una certa tensione, troviamo da un lato la tensione che spinge per far muovere le cariche, e dall'altro il conduttore che cerca di contrastare di più o di meno questo movimento: ebbene, la forza con cui il conduttore si oppone al passaggio della corrente, viene definita “resistenza elettrica”.

Come tutte le grandezze fisiche, anche quelle elettriche si possono misurare. Così si è deciso di misurare

- la tensione in “volt” (che si abbrevia scrivendo una **V** maiuscola)
- la corrente in “ampere” (che si abbrevia scrivendo una **A** maiuscola)
- la resistenza in “ohm” (che si indica con la lettera greca omega: Ω)

Si può calcolare la resistenza di un corpo conduttore? Certamente, se si sa di che materiale è fatto. Ci sono materiali che richiedono una forza maggiore per farsi attraversare dalla corrente, ed altri che fanno passare la corrente più facilmente: questa caratteristica si definisce “resistività”. Per esempio, le resistività dell'argento e del rame sono tra quelle di valore più basso, ed infatti entrambi i metalli sono ottimi conduttori; la resistività del ferro è invece più alta, e quindi la corrente vi passa con maggiore difficoltà.

Come le altre grandezze fisiche, anche la resistività ha una sua espressione dimensionale: così come la temperatura si misura in gradi e la velocità in metri/secondo, la resistività si misura in $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ cioè in ohm x millimetri quadrati / metro.

Per indicare la resistività si usa come simbolo la lettera greca ρ (si legge “ro”)

Nella tabella che segue sono riportati i valori di resistività per alcuni materiali:

| Materiale | Resistività ($\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$) |
|------------------|--|
| Argento | 0,015 |
| Rame | 0,016 |
| Oro | 0,021 |
| Alluminio | 0,026 |
| Ferro | 0,13 |
| Nichel-Cromo | 1,07 |

La formula per calcolare la resistenza è

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

dove ρ è la resistività del materiale di cui è composto il conduttore, L è la sua lunghezza ed S è la sua sezione.

Ricordiamo sempre che:

- la resistività ρ deve essere espressa in $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
- la lunghezza L deve essere espressa in metri
- la sezione S deve essere espressa in millimetri quadrati

Come esempio supponiamo di voler calcolare la resistenza di un conduttore in alluminio, avente sezione circolare con diametro di 0,6 mm ed una lunghezza di 12 metri:

Dalla tabella precedente vediamo che l'alluminio ha una resistività di $0,026 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
la sezione sarà $S = \pi \times d^2 / 4 = 3,1416 \times 0,36 / 4 = 0,2827 \text{ mm}^2$
per cui la resistenza sarà $R = 0,026 \times 12 / 0,2827 = 1,103 \text{ ohm}$

Se lo stesso conduttore fosse realizzato in ferro, la sua resistenza sarebbe:
 $R = 0,13 \times 12 / 0,2827 = 5,517 \text{ ohm}$

A questo punto dovrebbe essere chiara la differenza fra resistività e resistenza:

- la resistività è un valore caratteristico che varia da un materiale all'altro
- la resistenza è un valore determinato dal materiale e dalle dimensioni del conduttore

Cosa succede quando la corrente passa in un conduttore?

Uno degli effetti è la produzione di calore: maggiore è la resistenza del conduttore, maggiore è il calore che si genera; ma, soprattutto, il calore dipende dalla quantità di corrente che passa nel conduttore.

Il riscaldamento dei conduttori attraversati dalla corrente viene definito "Effetto Joule". La potenza elettrica che viene trasformata in calore per effetto Joule si calcola con la formula seguente: $P = R \times I^2$

dove R è la resistenza del conduttore ed I è la corrente che lo attraversa.

Fino ad ora abbiamo parlato di tensione, corrente e resistenza: ma c'è una formula che mette in relazione queste tre grandezze? Naturalmente la formula esiste ed è alla base di tutta la fisica dei fenomeni elettrici; è la formula che esprime la "Legge di Ohm" e si presenta come segue: $I = V / R$

La formula ci dice che la corrente I che passa in un conduttore aumenta se aumenta la tensione V applicata e diminuisce se la resistenza R del conduttore è maggiore.

La stessa formula può essere scritta nel modo che segue: $R = V / I$

Se ne deduce che, applicando una certa tensione V ad un conduttore, la sua resistenza può essere calcolata dividendo il valore di tale tensione per il valore della corrente che passa nel conduttore.

La potenza elettrica

Parlando di apparecchiature che utilizzano la corrente elettrica, si nomina spesso il termine “potenza”. Si dice, per esempio, che una lampadina è da 40 watt, oppure che il motore di un aspirapolvere è da 1200 watt. Probabilmente si intuisce che il valore di “watt” relativo ad un utilizzatore elettrico ha a che fare con la potenzialità delle sue prestazioni, anche se non si sa esattamente in quali termini.

In effetti, i watt fanno proprio riferimento alla “potenza”, che è una grandezza elettrica ben precisa, anch'essa esattamente definibile.

Consideriamo ad esempio delle lampadine adatte a funzionare nelle nostre case, quindi con una tensione di 220 V. Sappiamo che ne esistono di vari tipi ma soprattutto di varie potenze: 15 W, 25 W, 40 W, 100 W ecc. Ma se tutte funzionano a 220 V, cosa distingue l'una dall'altra? La risposta è: la corrente assorbita. La lampadina da 15 W, collegata alla rete di 220 V assorbe una corrente di 0,068 A, mentre quella da 100 W assorbe una corrente di 0,45 A.

$R=3200\Omega$



lampada
da 15 W



lampada
da 100 W

Il motivo per cui la corrente assorbita varia da una lampadina all'altra è la resistenza del filamento della lampadina stessa: quella da 15 W ha una resistenza maggiore, che fa passare meno corrente; la sua resistenza sarà di circa 3200 ohm; la lampadina da 100 W avrà una resistenza minore (circa 480 ohm) e quindi farà passare più corrente (figura a lato).

Ma ci sono anche lampadine da 15 W che funzionano a 12 V; tali lampadine devono avere necessariamente una resistenza più bassa, per consentire il passaggio di una maggiore intensità di corrente. Facendo due conti si

conclude che una lampadina da 15 W funzionante a 12 V deve avere più o meno una resistenza di 9,6 ohm ed assorbire una corrente di 1,25 A

Possiamo allora concludere che la potenza di una lampadina, così come di qualunque altro dispositivo elettrico, dipende dalla tensione a cui viene alimentata, ma anche dalla corrente che assorbe: a parità di potenza, se la tensione di funzionamento è più bassa occorre che la corrente assorbita sia più alta.

Nel calcolo della potenza, quindi, entrano in gioco sia la tensione che la corrente; per tale motivo la potenza si calcola con la formula: $P = V \times I$ ovvero moltiplicando il valore della tensione di funzionamento per il valore della corrente assorbita.

L'unità di misura della potenza è il “watt”, e si indica con una “W”

Allo scopo di fornire degli esempi facilmente comprensibili, ho parlato delle lampadine e delle resistenze che esse devono avere nei vari casi; nella realtà, i valori sono alquanto diversi, poiché, a lampadina accesa, il filamento raggiunge temperature molto elevate e il valore della sua resistenza a caldo è diverso dal valore a lampada spenta.

Da quello che si è detto fino ad ora, deriva una osservazione: se un macchinario elettrico ha bisogno di funzionare con potenze elevate, deve necessariamente essere progettato per funzionare con tensioni elevate; se dovesse funzionare a bassa tensione, il macchinario assorbirebbe correnti troppo intense, al punto da renderne praticamente impossibile l'utilizzo. Di seguito vedremo alcuni esempi per chiarire questo concetto.

1) Stufetta elettrica della potenza di 1500 W

Una stufetta di tale potenza genera un bel calduccio, anche se consuma parecchia energia elettrica e quindi il suo uso per tempi lunghi è senz'altro da sconsigliare.



Se la stufetta è progettata per funzionare a 220 V, assorbirà una corrente di circa 6,8 A

Supponiamo, per assurdo, che la stufetta fosse progettata per funzionare a 12 V; in questo caso, per erogare lo stesso calore di 1500 W, dovrebbe assorbire una corrente di 125 A !

E' facile rendersi conto che una simile corrente è difficilmente gestibile, in primo luogo perchè richiederebbe dei cavi di collegamento enormi: dovrebbero avere una sezione di 35 mm², ovvero un diametro di circa 6,5 mm; senza contare che, per il collegamento alla rete elettrica, occorrerebbero spine enormi, come quelle che si usano in ambito industriale, per evitare il surriscaldamento dei contatti.

2) Trasporto ferroviario: locomotore elettrico FS E.402

Una macchina ancora di uso comune nelle nostre ferrovie è la E402. Si tratta di un locomotore in grado di sviluppare una potenza di 5600 kW , progettato per essere alimentato da linee aeree a



3000 V. E' semplice farsi un'idea della corrente assorbita alla massima potenza: dividiamo il valore della potenza (espresso in W = 5600000) per la tensione, e otteniamo una corrente di 1866 A (valore già molto elevato!) Se un locomotore di questa potenza dovesse funzionare a 220 V, dovrebbe prelevare dalla rete una corrente di 25454 A, che rappresenta un valore enorme, non realizzabile in pratica nemmeno se lo si volesse. Si comprende quindi come tutti i macchinari di grande potenza abbiano bisogno di funzionare a tensioni elevate.

3) Piccola lampadina da 0,2 W

Le lampadine caratterizzate da potenze così basse si trovano in commercio per tensioni ugualmente basse, dell'ordine di 1 o 2 volt. Per farsi un'idea più precisa, una lampadina da 0,2 W funzionante ad 1,5 V assorbe una corrente di circa 0,13 A. Se volessimo una lampadina della stessa potenza, ma adatta a funzionare a 220 V, dovremmo fare in modo che questa assorbisse una corrente di 0,0009 A; ma per ottenere tale risultato, il filamento della lampadina dovrebbe avere una resistenza di 242000 ohm. Realizzare un simile filamento sarebbe praticamente impossibile, perchè si dovrebbe usare un filo sottilissimo e di una lunghezza tale che il bulbo in vetro della lampadina non riuscirebbe a contenerlo.

Si conclude pertanto che questo è un caso opposto ai precedenti: quando sono in gioco piccole potenze, è sempre conveniente (se non indispensabile) prevedere un funzionamento con basse tensioni.

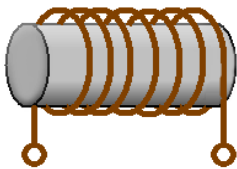
Un'ultima osservazione sulle formule:

La formula per il calcolo della potenza può anche essere scritta come $P = V^2 / R$ il che ci dice che è possibile calcolare la potenza di un utilizzatore dividendo il valore della tensione, elevato al quadrato, per il valore della resistenza.

Induttanza e reattanza

Non tutti i circuiti possono essere considerati delle semplici resistenze per cui sia valida sempre e comunque la legge di ohm. Esistono circuiti e componenti elettrici dalle caratteristiche particolari, in grado di alterare i comportamenti fin qui descritti.

Se avvolgiamo del filo elettrico intorno ad un nucleo ferroso, otteniamo quella che viene definita "elettrocalamita". Si sa, infatti, che, facendo passare corrente nelle spire, il nucleo si magnetizza e diventa in grado di attrarre altri pezzi di metallo. Ebbene, questo insieme di spire intorno ad un nucleo magnetizzabile, costituisce un "induttore". La sua caratteristica è quella di opporre al passaggio della corrente due tipi di resistenze:



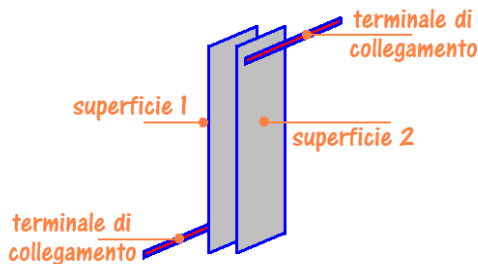
elettrocalamita

- la prima è la resistenza del filo elettrico, che è tanto maggiore quanto più il filo è lungo e sottile
- la seconda è una forza particolare, che si manifesta soltanto quando si

verifica una variazione nel valore della tensione applicata, e che chiameremo "reattanza"

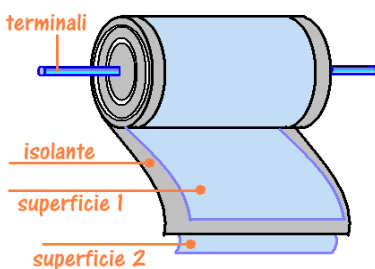
Poiché questa seconda forma di resistenza è causata dall'induttanza della bobina, essa viene definita come **reattanza induttiva**.

Nel momento in cui diamo tensione all'elettrocalamita, la corrente che non raggiunge subito il valore previsto dalla legge di Ohm: è come se fosse respinta da una molla. Al contrario, quando stacciamo la tensione, la corrente impiega un certo tempo per scendere completamente a zero. Per questo comportamento, si dice che **in un componente induttivo la corrente è in ritardo sulla tensione**, o, in altre parole, che si determina uno sfasamento fra la tensione e la corrente.



Un altro componente dal comportamento particolare è il "condensatore". Con tale termine si definisce un dispositivo elettrico costituito da due superfici conduttrici, poste una di fronte all'altra a brevissima distanza, e separate dall'aria o da un altro isolante (figura a lato). Se si applica una tensione fra le due superfici, si determina un afflusso di cariche elettriche, che vanno a formare un campo elettrico nel ristrettissimo spazio che isola le due superfici. Tale flusso di cariche termina appena il condensatore risulta "carico"; la quantità di cariche che un condensatore può immagazzinare dipende dalle sue dimensioni e dal tipo di

isolante interposto fra le superfici, e viene definita "**capacità**".



Nella realtà i condensatori si costruiscono con diverse tecnologie, quasi sempre arrotolando le due superfici in modo da ottenere un corpo cilindro di dimensioni contenute (figura a lato); le due superfici sono completamente isolate l'una dall'altra, e a ciascuna di esse viene applicato un terminale che permette il collegamento al circuito esterno.

Al contrario dell'induttanza, quando si applica tensione ad un condensatore si osserva immediatamente un passaggio di corrente, mentre la tensione ai suoi capi sale lentamente. Questo comportamento è dovuto ad un'altra forma di reattanza, che in questo caso chiameremo **reattanza capacitiva** (essendo la capacità la caratteristica principale dei condensatori).

Nel caso del condensatore si osserva quindi che la corrente è in anticipo sulla tensione.

Corrente continua e corrente alternata

La corrente elettrica può avere diversi aspetti; in base a come fluisce nei conduttori, essa può essere definita per esempio come continua, alternata, pulsante ed in altri modi ancora. In questo caso cominceremo parlando della corrente “continua”

Non si ripeterà mai abbastanza che se la “corrente” è la conseguenza, la causa prima è la “tensione”: se in un conduttore scorre una corrente continua, vuol dire che ai suoi capi è stata applicata una tensione continua.



Le sorgenti di tensioni continue non sono molte: ricordiamo per esempio le batterie, come quelle per auto, a 12V, e le comuni pile usate nelle apparecchiature portatili e nei giocattoli.

Una tensione continua, come quella della batteria in figura, applicata ad una lampadina, fa scorrere nel circuito una certa corrente (indicata dalle frecce). Tale corrente scorre sempre seguendo il verso indicato, ovvero esce dal polo positivo, attraversa la lampadina e rientra dal polo negativo; il suo valore, tra l'altro, è costante nel tempo. Una corrente con simili caratteristiche viene definita “continua”.

Il verso della corrente è definito “per convenzione” come diretto dal polo positivo al polo negativo; in realtà, dal punto di vista fisico, essendo la corrente costituita da cariche elettriche negative, essa dovrebbe spostarsi dal negativo verso il positivo.

Il verso di scorrimento della corrente non è importante per una lampadina, che si accenderà allo stesso modo sia collegandola in un verso che al contrario; è invece importante quando, per esempio, la corrente deve far girare un motore elettrico: in tal caso, il senso di rotazione del motore dipenderà da come esso viene collegato alla tensione continua.

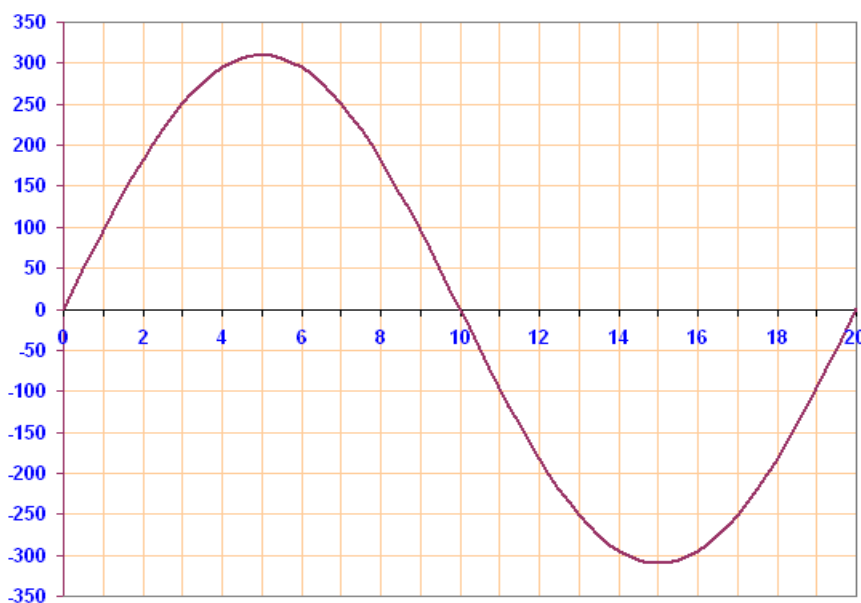


Poter cambiare facilmente il verso di rotazione è uno dei vantaggi della corrente continua. Ma esistono anche aspetti negativi, come quello, già citato in precedenza, di non poter variare il valore della tensione se non ricorrendo a complicati circuiti elettronici.

Ed eccoci a parlare della corrente alternata, ovvero della corrente che passa in un utilizzatore alimentato con una tensione alternata.

Abbiamo detto che la tensione alternata è per esempio quella disponibile nelle prese di corrente delle nostre case. Sappiamo che essa ha un valore di 220 V, ma è giunto il momento di chiarire il vero significato di questo valore.

In realtà la tensione alternata non ha un solo valore, ma tanti valori che si susseguono in modo ripetitivo (ovvero ciclico) 50 volte al secondo. Lo si può capire meglio osservando il grafico che segue, dove i valori della tensione sono stati riportati in funzione del tempo.



Nel grafico sopra è raffigurata un'intera onda della tensione alternata di rete. Come si legge sulla scala orizzontale, la durata complessiva è di 20 ms (millesimi di secondo).

Sulla scala verticale possiamo leggere i valori che assume la tensione: vediamo che in un primo istante essa è zero, poi aumenta man mano ed arriva ad un massimo di circa 310 V dopo 5 ms. Nei 5 ms che seguono la tensione torna a scendere fino a zero. Quel che capita dopo è la cosa più singolare di tutte: sulla scala delle tensioni vediamo infatti che i valori sono preceduti da un segno meno; questo significa che sono diventati negativi. Anche in questo settore la tensione diventa massima dopo 5 ms, ma il valore non è più 310 V, bensì -310 V. Cosa significano questi valori negativi? Significa che la tensione cambia di polarità: di conseguenza, la corrente che fluisce nell'utilizzatore inverte il suo verso, e comincia a scorrere in senso contrario !

E tutto questo succede 50 volte in un secondo.

Quando una grandezza fisica cambia secondo una serie di valori che si ripetono sempre uguali in intervalli di tempo successivi, si dice che è una grandezza **“periodica”**. La serie di valori che si ripete sempre uguale può presentarsi un certo numero di volte ogni secondo: questa caratteristica viene definita **“frequenza”**.

La tensione alternata di rete è una grandezza periodica che ripete tutti i suoi valori 50 volte al secondo: si dirà quindi che ha una frequenza di 50 Hz (la frequenza si misura in “Hertz”).

Perché si dice allora che la tensione di rete è di 220 V? Perché tale valore è una specie di media fra tutti i valori istantanei. Per l'esattezza, il valore 220 V si definisce “valore RMS” o “valore efficace” e viene calcolato in base all'effetto termico.

La definizione di valore RMS deriva dall'inglese “Root Mean Square” e sintetizza il procedimento adoperato per il calcolo:

- 1) si considerano tutti i valori di un intero periodo (tutti quelli dell'onda riportata nel grafico) e si elevano al quadrato
 - 2) si calcola la media dei valori quadrati
 - 3) si calcola la radice quadrata della media ottenuta
- (In inglese: Root = Radice, Mean = Media, Square = Quadrato)

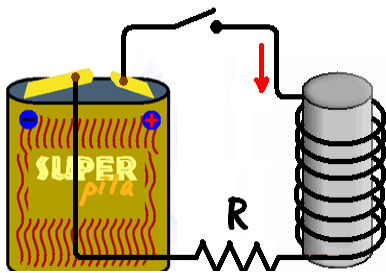
Anche la definizione di “valore efficace” rispecchia il metodo di valutazione utilizzato: si valuta cioè “l'efficacia” della tensione alternata nel provocare un certo effetto termico, confrontandola con una tensione continua. Il valore che deve avere una tensione continua per provocare lo stesso riscaldamento ottenuto con quella determinata tensione alternata, viene considerato come valore efficace della tensione alternata.

La caratteristica più importante della tensione alternata è proprio il continuo mutare del suo valore. Se vogliamo far accendere una lampada a filamento (quelle di vecchio tipo) o vogliamo far funzionare una stufa, possiamo usare indifferentemente una tensione continua oppure una alternata, ottenendo lo stesso risultato.

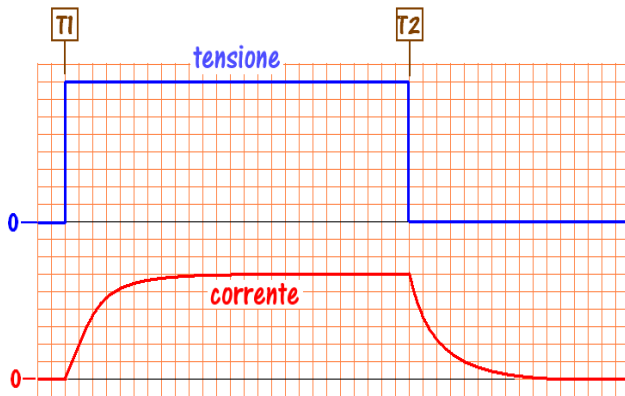
Il discorso cambia quando si utilizzano apparecchiature dotate di avvolgimenti, come sono ad esempio i motori od i trasformatori. Come detto in precedenza, in questi circuiti ove sono presenti componenti "induttivi", occorre considerare il fenomeno dell'induttanza.

L'induttanza del circuito non si manifesta in presenza di tensioni continue, le quali hanno un valore sempre uguale nel tempo.

Con le tensioni alternate invece il fenomeno diventa importante, ed è tanto più evidente quanto più numerose sono le spire dell'avvolgimento e quanto più è alta la frequenza della tensione alternata (infatti ad una frequenza più alta corrisponde una più veloce variazione dei valori).

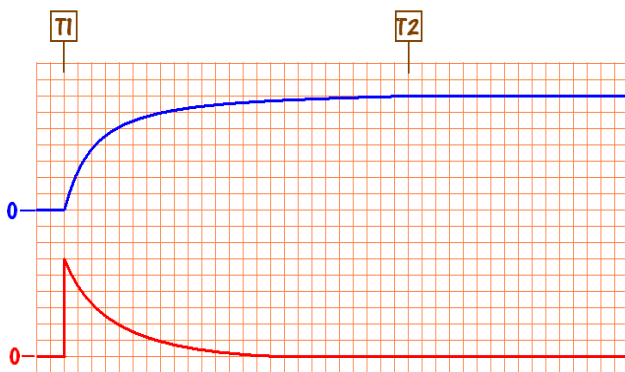


Vediamo adesso come si comportano le induttanze ed i condensatori sia in corrente continua che in corrente alternata. Nel circuito a lato vediamo una sorgente di tensione continua (una batteria) collegata ad un'induttanza attraverso un interruttore ed una resistenza R. Nel grafico che segue (in basso) è raffigurato l'andamento della tensione e della corrente nel circuito. Si nota che alla chiusura dell'interruttore (istante T1) la corrente non passa istantaneamente, ma raggiunge il valore massimo gradualmente.



All'istante T2, quando l'interruttore si apre, la corrente non s'interrompe immediatamente, ma scende a zero in modo ugualmente graduale. Risulta quindi evidente quanto già affermato in precedenza, e cioè che nei circuiti induttivi la corrente è in ritardo sulla tensione.

Vediamo invece cosa succede se nel circuito visto sopra mettiamo, invece di un'induttanza, un condensatore. La linea rossa rappresenta la corrente che scorre nel circuito, mentre la linea blu indica la tensione ai capi del condensatore. Notiamo che all'istante T1, quando si chiude l'interruttore e si dà tensione al circuito, c'è il passaggio istantaneo di una forte corrente; si tratta del valore massimo che la corrente raggiungerà in questo circuito, infatti essa calerà negli istanti successivi, per scendere a zero. La tensione sul condensatore è inizialmente zero; sale poi gradualmente fino a raggiungere il suo valore massimo.

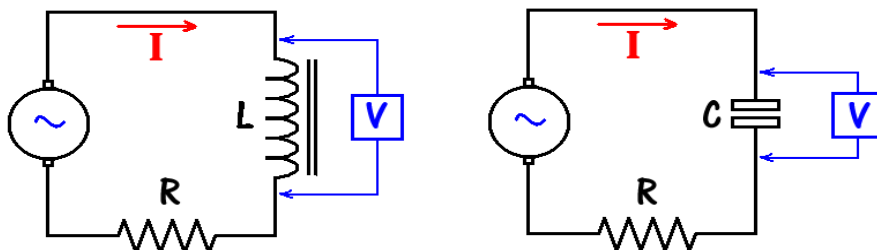


Osserviamo che anche in presenza di tensione, dopo i primi istanti non circola più corrente; d'altra parte, anche togliendo tensione al circuito (istante T2), la tensione sul condensatore rimane al valore che aveva raggiunto: il

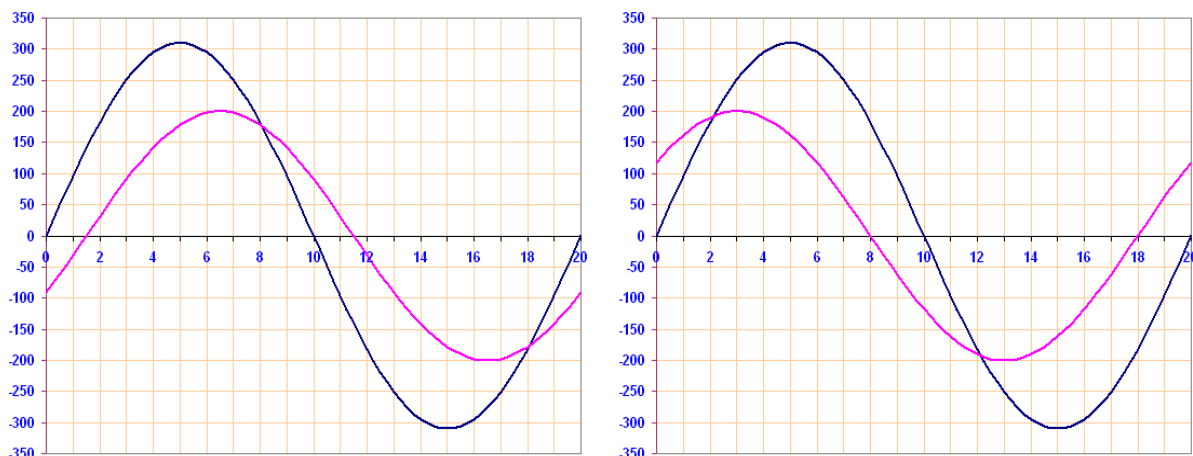
condensatore si è caricato.

Anche in questo caso, come conferma il grafico appena descritto, ripetiamo quanto già detto, e cioè che nei circuiti capacitivi la corrente è in anticipo sulla tensione.

Rimane adesso da analizzare il comportamento di questi componenti circuitali in corrente alternata, usando un circuito come quello che segue:



Vediamo a sinistra l'induttanza L , collegata ad un generatore di tensione alternata; in serie è stata disposta una resistenza R . Nel circuito di destra, al posto dell'induttanza è stato inserito un condensatore. In entrambi i casi misureremo la corrente I che scorre nel circuito e la tensione V ai capi dell'induttanza o del condensatore. Ricordiamo che, essendo la tensione alternata, anche la corrente nel circuito sarà una corrente alternata, e quindi il suo verso non sarà sempre quello indicato dalla freccia rossa, ma si invertirà 50 volte ogni secondo.



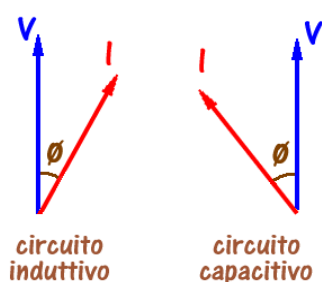
Nei due diagrammi qui sopra vediamo il comportamento della tensione (in blu) e della corrente (in rosso) nei due casi corrispondenti ai due circuiti in alto.

Nel grafico di sinistra, che si riferisce al circuito con l'induttanza, si nota che la sinusoide della corrente è in ritardo rispetto a quella della tensione; possiamo anche leggere lo sfasamento, che nel caso specifico appare essere di 27 gradi.

Nel grafico di destra, che si riferisce al circuito con la capacità, si nota che la sinusoide della corrente è in anticipo rispetto a quella della tensione; nel caso specifico, lo sfasamento letto sul grafico risulta di 36 gradi.

Naturalmente i due valori di 27 e 36 gradi sono casuali, e servono solo come esempio. In realtà, lo sfasamento dipende dal rapporto fra il valore della resistenza e il valore della reattanza, sia essa induttiva o capacitiva. Vediamo ora alcuni casi particolari:

- 1) In un circuito formato solo da resistenze lo sfasamento è uguale a zero, perchè la corrente varia di pari passo col variare della tensione.
- 2) In un circuito formato solo da un'induttanza, priva di qualunque resistenza, la corrente sarebbe sfasata di 90 gradi esatti rispetto alla tensione.
- 3) In un circuito formato solo da una capacità, la tensione sarebbe sfasata di 90 gradi esatti rispetto alla corrente.



Per descrivere matematicamente queste relazioni temporali, è necessario rappresentare le grandezze elettriche non più con dei semplici numeri, ma con espressioni più complesse, ovvero con dei “**vettori**”.

In parole semplici, i vettori sono delle frecce, la cui lunghezza indica quanto è grande il valore rappresentato; hanno però un'altra caratteristica, che è il loro orientamento nello spazio. Nella figura a lato, per esempio, vediamo la rappresentazione vettoriale che corrisponde ai due grafici della pagina precedente: per il circuito induttivo si traccia il vettore tensione (azzurro) ed il vettore corrente

(rosso), ruotato in senso orario rispetto al primo di un angolo (27 gradi) che rappresenta il ritardo; per il circuito capacitivo si traccia il vettore V e quindi il vettore I in anticipo di un angolo di 37 gradi. L'angolo ϕ (si legge “fi”) rappresenta lo sfasamento fra il vettore **V** (la tensione) ed il vettore **I** (la corrente), ed è tanto più grande quanto maggiore è la reattanza, induttiva o capacitiva, rispetto alla resistenza del circuito.

Nei circuiti alimentati con tensioni alternate esiste quasi sempre un certo sfasamento fra la tensione e la corrente, per cui il calcolo della potenza deve considerare non solo la tensione e la corrente in gioco, ma anche il valore dell'angolo di sfasamento ϕ .

La formula vista in precedenza diventa quindi: **$P = V \times I \times \cos(\phi)$**

In tale formula appare l'espressione $\cos(\phi)$, che sta per “coseno dell'angolo ϕ ”

Il coseno è una funzione trigonometrica che ha dei valori caratteristici: diventa uguale a zero quando l'angolo misura 90° e diventa uguale a 1 per un angolo di 0° .

Quindi, per i circuiti solo resistivi dove non c'è sfasamento e l'angolo ϕ è uguale a zero, l'espressione $\cos(\phi)$ diventa 1, e, giustamente, non influisce sul valore del prodotto $V \times I$. Una osservazione ancora più importante è che, in un circuito puramente induttivo, dove lo sfasamento è di 90° , l'espressione $\cos(\phi)$ vale zero: questo sta a significare che, in un simile circuito, la potenza diventa uguale a zero. In effetti, facendo passare corrente in un circuito puramente induttivo, questo non consuma alcuna potenza; è quello che succede, o meglio dovrebbe succedere, collegando alla rete un trasformatore col secondario aperto (nella realtà, poiché il filo degli avvolgimenti ha sempre una certa resistenza, questa determina uno sfasamento diverso da 90° e di conseguenza un consumo di energia, anche se minimo). La stessa cosa sarebbe valida per un circuito puramente capacitivo, che, collegato alla rete, non dovrebbe assorbire alcuna potenza; ma anche questa è un'astrazione teorica, poiché un condensatore perfetto non esiste e, alla capacità, si aggiunge sempre l'effetto delle correnti di dispersione.

Così come si calcola la resistenza di un conduttore, è ugualmente possibile calcolare la reattanza, ovvero quella forma di resistenza con cui le componenti induttive e capacitive si oppongono al passaggio della corrente.

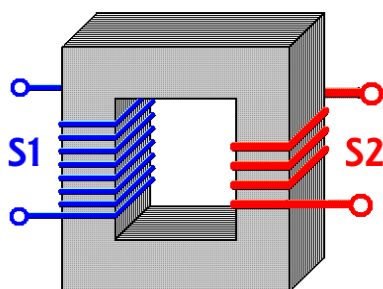
Abbiamo visto che delle spire di filo avvolte su di un nucleo magnetico costituiscono un elemento circuitale chiamato “induttore” e caratterizzato dall'induttanza: questa dipende dal numero di spire e dalle caratteristiche del nucleo magnetico, cioè dalla sua forma e dal materiale di cui è fatto. La resistenza che l'induttanza oppone al passaggio della corrente alternata si chiama “reattanza induttiva” e si calcola con la seguente formula: **$X_L = \omega L$** dove **L** è il valore dell'induttanza ed ω (si legge “omega”) è la pulsazione della corrente alternata, pari al valore della frequenza moltiplicato per 2π

Analogamente, la reattanza capacitiva si calcola con la formula: **$X_C = -1 / \omega C$** dove **C** è la capacità del condensatore.

Dalle formule viste risulta chiaro che la reattanza induttiva aumenta con l'aumentare della frequenza mentre la reattanza capacitiva diminuisce.

Trasformatori ed autotrasformatori

Si è visto che delle spire avvolte intorno ad un nucleo magnetico costituiscono un induttore, e che, nel momento in cui passa corrente nelle spire, il nucleo diventa sede di un campo magnetico. Se le spire vengono alimentate con una tensione alternata, per cui nell'avvolgimento scorre una corrente alternata, anche il campo magnetico che si produce avrà le stesse caratteristiche della corrente: sarà cioè un campo che cambia direzione alternativamente come la corrente, seguendone i valori anche nell'ampiezza.



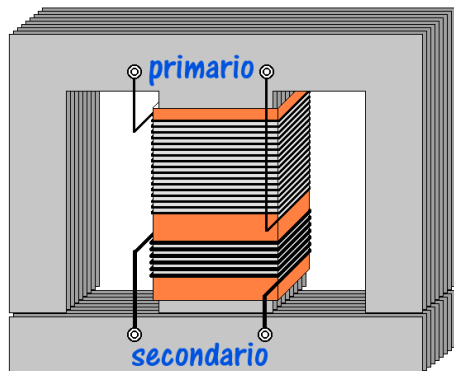
Supponiamo di avvolgere le spire di un primo avvolgimento (S1) su un nucleo magnetico chiuso e di realizzare quindi un secondo avvolgimento separato (S2), sempre sullo stesso nucleo. Alimentiamo il primo avvolgimento S1 con la solita tensione alternata: la corrente, passando nelle spire di S1, darà origine ad un campo magnetico che interesserà tutto il nucleo. Ed ecco il fenomeno che sta alla base del funzionamento dei trasformatori: per le leggi dell'induzione, il campo magnetico originato nel nucleo dalla corrente che circola in S1 farà nascere nell'avvolgimento S2 una tensione avente la stessa forma sinusoidale della prima. Si conclude pertanto che se due

avvolgimenti sono concatenati con lo stesso circuito magnetico, dando tensione ad uno di essi, nasce nell'altro una tensione indotta.

Il valore delle tensioni dipende esattamente dal numero delle spire: ad un maggior numero di spire corrisponde una tensione più alta. Come esempio, supponiamo che l'avvolgimento S1 sia composto da 100 spire e che l'avvolgimento S2 sia composto da 50 spire; se alimentiamo S1 con una tensione di 220 V, troviamo in S2 una tensione di 110 V. Viceversa, se applichiamo 110 V ad S2, troviamo 220 V su S1.

La possibilità di ottenere facilmente una tensione più alta o più bassa è uno dei vantaggi della corrente alternata e dei trasformatori; con tensioni continue un trasformatore non potrebbe mai funzionare, poiché il fenomeno dell'induzione si verifica solo in presenza di campi magnetici variabili.

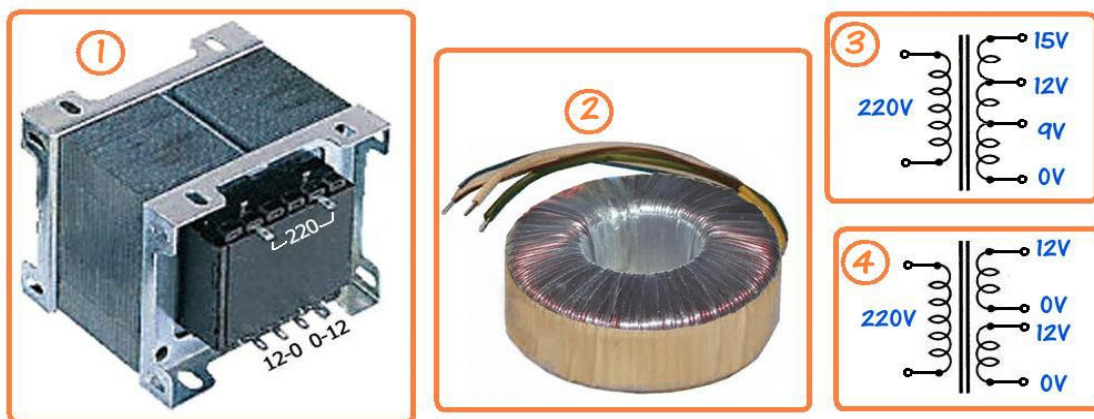
Occorre ancora considerare che il trasformatore è una macchina che non crea potenza, ma si limita a trasformarne i parametri; in altre parole, la potenza elettrica disponibile sull'avvolgimento primario è necessariamente la stessa che si ritroverà dal secondario. Per tale motivo, ad un aumento della tensione deve sempre corrispondere una diminuzione della corrente. Chiamando V_1 ed I_1 la tensione e la corrente relative all'avvolgimento S1, e chiamando V_2 ed I_2 la tensione e la corrente relative all'avvolgimento S2, vale la relazione: $V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$. Si conclude quindi che, nel caso dell'esempio precedente, ad una tensione dimezzata corrisponde una corrente di valore doppio.



Naturalmente i trasformatori reali sono costruiti con tecniche diverse; come nucleo magnetico si utilizzano quasi sempre dei pacchi di lamierini di varie forme, e gli avvolgimenti sono realizzati con filo di rame smaltato avvolto su cartocci di materiale isolante (figura a lato). In genere si distinguono almeno due avvolgimenti: uno formato da più spire di filo sottile, che viene collegato alla tensione più alta e viene definito "primario" ed uno formato da un numero ridotto di spire di filo più grosso, che fornisce una tensione più bassa (ma con maggiore corrente) e viene definito "secondario".

Quando vi sia necessità di disporre di varie tensioni di valore diverso, il trasformatore viene realizzato con più avvolgimenti, che possono essere completamente separati uno dall'altro oppure avere un estremo in comune.

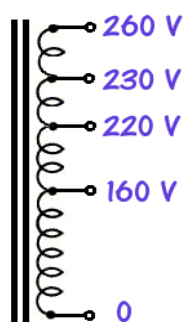
Al posto dei pacchi di lamierini, alcuni trasformatori utilizzano un nucleo a forma toroidale in ferroxcube (materiale ferromagnetico ottenuto per sinterizzazione di ossidi di ferro, zinco, manganese, nichel), col vantaggio di un minor peso a parità di potenza.



Nella tavola in alto sono raffigurati alcuni tipi di trasformatori: in **1** il classico trasformatore col nucleo formato da un pacco di lamierini, in **2** un trasformatore avvolto su nucleo toroidale.

Col numero **3** vediamo lo schema di un trasformatore che presenta un avvolgimento primario per 220 V ed un secondario dotato di varie prese, che consentono di ricavare tensioni diverse (9, 12 e 15 V)

Col numero **4** vediamo lo stesso trasformatore, ma con due avvolgimenti secondari da 12 V, completamente separati l'uno dall'altro; i due avvolgimenti possono essere collegati in serie per ottenere 24 V, oppure in parallelo, per ottenere a 12 V una corrente doppia.



Un caso a parte è rappresentato dagli “**autotrasformatori**”. Essi sono in realtà dei trasformatori caratterizzati da un unico avvolgimento, che disponendo di più prese lungo le sue spire, permette di ottenere tensioni diverse da quella di entrata (figura a lato).

E' possibile applicare tensione ad una qualsiasi delle entrate, potendo così disporre di tutte le altre tensioni in uscita; se ad esempio si applica la tensione di 160 V alla presa corrispondente, saranno disponibili in uscita le tensioni di 220, 230 e 260 V.

Esiste tuttavia una differenza fondamentale: nei trasformatori l'avvolgimento di entrata è elettricamente separato da quello di uscita, per cui esiste un completo isolamento elettrico che, in certi casi, è utile per operare in

sicurezza; gli autotrasformatori, invece, avendo un unico avvolgimento, non realizzano l'isolamento fra tensioni di entrata e tensioni di uscita.

Il loro vantaggio è un costo minore, nonché minori peso e dimensioni a parità di potenza elettrica.

Esistono poi dei trasformatori a rapporto variabile, detti “**variac**”, il cui avvolgimento, che è eseguito su di un nucleo magnetico circolare, presenta una zona priva di isolante: su di essa scorre un contatto strisciante che viene fatto ruotare azionando una manopola esterna; in base

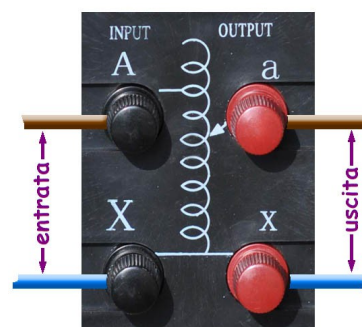
alla posizione della manopola, è possibile variare il numero di spire che contribuiscono alla tensione di uscita, ottenendo quindi il valore che si desidera.



Variac

Il variac consente quindi di ottenere in uscita una tensione che può essere liberamente regolata in funzione dell'utilizzatore da collegare, e questo senza alcuna perdita di potenza.

Come si vede nell'immagine a destra, il variac dispone di due morsetti neri di entrata, indicati con "A" e "X": a tali morsetti va applicata la tensione nominale prevista (in genere 230 V); la tensione di uscita viene invece prelevata ai morsetti rossi "a" ed "x", ed il suo valore dipende



dalla posizione in cui è stata ruotata la manopola: come indica la freccetta presente sullo schema dell'apparecchio, è anche possibile ottenere in uscita una tensione superiore a quella di entrata.

E se occorre la corrente continua?

Ci sono situazioni, anche se non proprio frequenti, in cui c'è necessità di una sorgente di corrente continua; in tali casi, si può far ricorso a delle batterie, oppure alla corrente di rete opportunamente trasformata.

Nel caso delle batterie, è bene chiarire quello che succede in funzione di come esse vengono collegate.

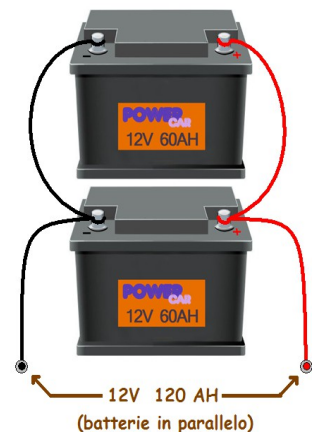
Prendiamo come esempio una batteria per auto, quindi con tensione di 12V ed avente una capacità di 60 Ah (per capacità s'intende la quantità di carica che la batteria può contenere: 60 Ah significa che essa può erogare 4 A per 15 ore, 5 A per 12 ore, 6 A per 10 ore, e così via; l'importante è che il prodotto corrente x ore



sia uguale a 60).

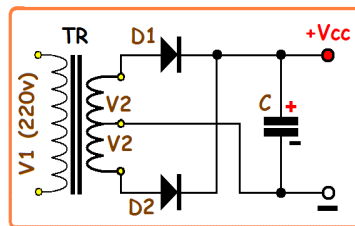
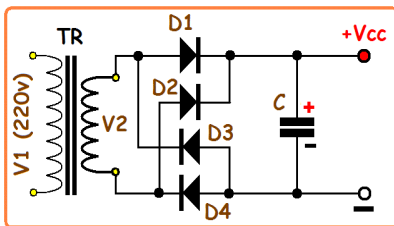
Se mettiamo due batterie in serie (figura a sinistra), otteniamo una tensione di 24 V, con una corrente uguale a quella di una batteria (per esempio, disporremo di 5 A per 12 ore)

Se mettiamo le due batterie in parallelo (figura a destra), avremo sempre una tensione di 12 V, ma con una corrente doppia (per esempio, disporremo di 10 A per 12 ore).



E' possibile ottenere corrente continua anche dalla tensione di rete:

occorre un trasformatore, dei diodi rettificatori e, non necessariamente, un condensatore elettrolitico. Se volete in uscita una tensione V_2 di 12 V con disponibilità di 1,5 A, vi occorre un trasformatore di potenza $12 \times 1,5 = 18$ VA. I diodi devono essere adatti a sopportare la corrente richiesta (quindi circa 2 A).



Potete usare uno dei due schemi della figura a lato: il primo va bene se avete un trasformatore con secondario unico; il secondo è da usare se il trasformatore ha due avvolgimenti secondari, oppure uno con presa centrale (che

viene definito 12 – 0 -12).

Il trasformatore **TR** avrà un primario adatto alla tensione di rete (in genere 230 V).

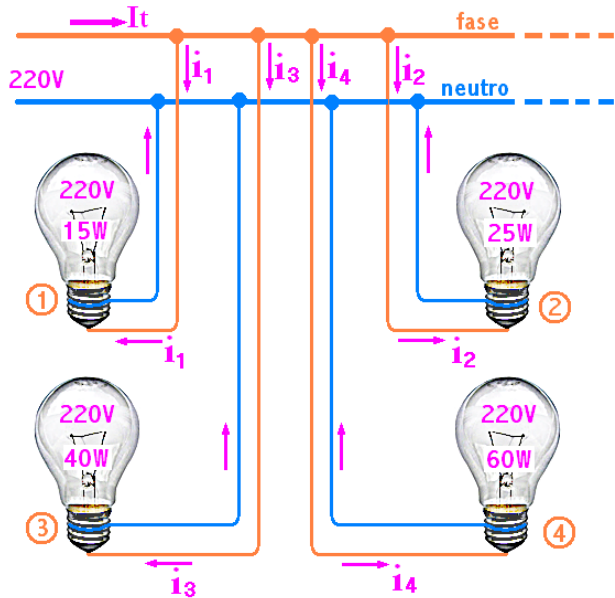
Al posto dei quattro diodi **D1, D2, D3 e D4** potete usare un ponte rettificatore già fatto, facendo attenzione a collegare i terminali nel modo giusto.

Il condensatore C è del tipo elettrolitico ed ha lo scopo di livellare la tensione continua in uscita; va bene un valore di 1000 o 2000 μF (microfarad), mentre la sua tensione di lavoro è bene che sia almeno una volta e mezzo quella di uscita. Attenzione a collegare il condensatore rispettando le polarità indicate sull'involucro!

Tenete presente che il condensatore tende ad alzare il valore della tensione alternata del secondario del trasformatore, quindi se ne usate uno con secondario a 12 V, aggiungendo il condensatore troverete una tensione di uscita **Vcc** di circa 16 V.

Collegamento in parallelo e in serie

In tutti i casi in cui si collegano alla rete elettrica diversi utilizzatori (o apparecchiature) si verifica una determinata ripartizione delle correnti o delle tensioni a seconda di come le varie apparecchiature sono collegate.



Osserviamo subito che le apparecchiature funzionanti a tensione di rete (220 V) sono in genere collegate “in parallelo”; con riferimento alla figura a lato, vediamo più in dettaglio come si realizza questo tipo di collegamento. Allo scopo di fornire un esempio immediato e per cui fosse semplice fare dei calcoli, si è scelto di rappresentare quattro comuni lampade, di quelle vecchio tipo con filamento incandescente. Le lampade, tutte da 220V, hanno potenze diverse (15, 25, 40 e 60W); ogni lampada è direttamente collegata ai due fili principali (fase e neutro). Nei fili di alimentazione principali scorre una corrente I_t che è la somma

delle correnti che vanno a ciascuna lampada, e cioè i_1 , i_2 , i_3 e i_4 . Possiamo anche divertirci a calcolare le quattro correnti, con la formula $I = W / V$ ottenendo:

$$i_1 = 15 : 220 = 0,068 \text{ A}$$

$$i_2 = 25 : 220 = 0,11 \text{ A}$$

$$i_3 = 40 : 220 = 0,18 \text{ A}$$

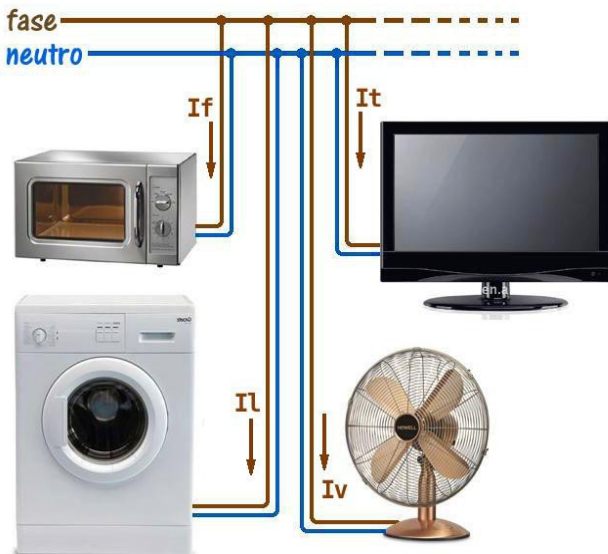
$$i_4 = 60 : 220 = 0,27 \text{ A}$$

Pertanto, la corrente totale sarà $I_t = 0,068 + 0,11 + 0,18 + 0,27 = 0,628 \text{ A}$

Il tipo di collegamento che abbiamo descritto viene definito, come già detto, **collegamento in parallelo**; si osserva che in tale collegamento:

-tutti gli utilizzatori devono avere la stessa tensione di funzionamento, perché sono collegati direttamente alla tensione di alimentazione

-gli utilizzatori possono avere potenze diverse, poiché ciascuno assorbe la sua corrente indipendentemente dagli altri

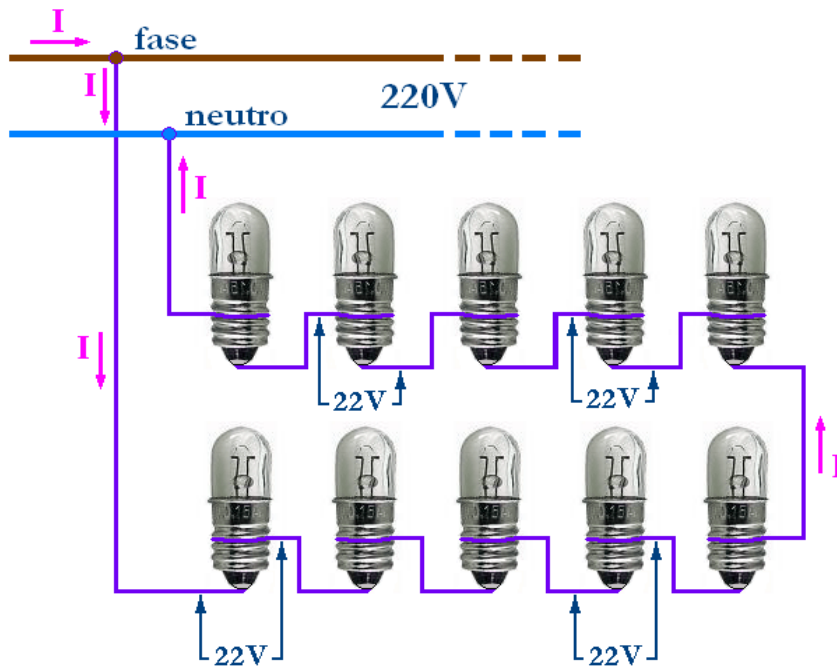


Naturalmente questo era un esempio, ma gli utilizzatori in parallelo potrebbero essere di qualunque tipo, come nella figura a lato, dove vediamo che ogni apparecchio assorbe la sua corrente: I_f il forno, I_t la televisione, ecc.

Nei fili di alimentazione principali passa una corrente che è la somma di $I_f + I_t + I_l + I_v$

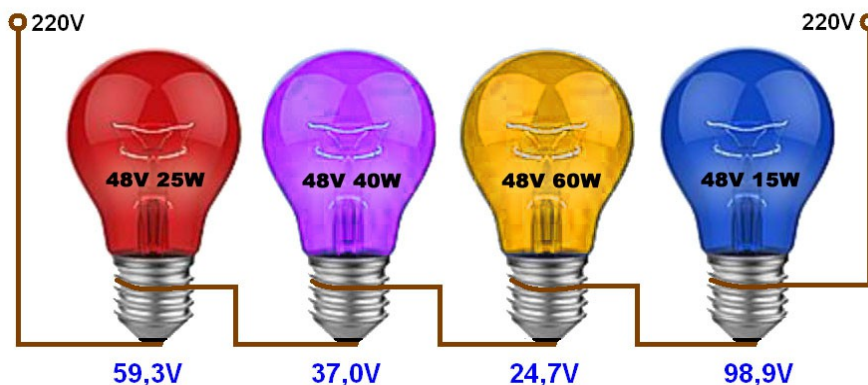
Concettualmente opposto è invece il **collegamento in serie**, dove osserviamo che c'è una sola corrente, che attraversa uno dopo l'altro tutti gli utilizzatori. Varia invece la tensione che viene a trovarsi su ciascuno di essi.

In effetti, il collegamento in serie è poco utilizzato, tranne qualche caso particolare, come ad esempio le luci dell'albero di Natale. Un esempio è illustrato nella figura che segue: si tratta di 10 lampadine tutte uguali, ciascuna della potenza di 1,5 W e progettate per una tensione di 22 V.



Chiaramente non sarebbe possibile alimentare una di queste lampadine collegandola direttamente a 220 V, poiché si brucerebbe all'istante. Le lampadine vengono allora disposte una di seguito all'altra, in modo che la corrente I uscendo da una entri in quella successiva. Succede in tal modo che la tensione totale di 220 V non va a gravare su di una sola lampadina, ma si ripartisce fra tutte quelle della serie. Nel caso della figura, poiché le lampadine sono tutte uguali, ognuna di esse si ritroverà a funzionare con un decimo della tensione totale. Se proviamo a misurare la tensione ai capi di una qualsiasi delle lampadine, troviamo sempre 22 V.

Bisogna invece fare attenzione quando si intende collegare in serie lampadine di potenza diversa, poiché quelle di maggiore potenza hanno una minore resistenza; succede allora che la tensione totale non si suddivide in parti uguali fra le varie lampadine, ma appare una tensione più alta ai capi delle lampadine di minore potenza. Come si vede nella figura che segue, nel caso di 4 lampadine da 48V, ma aventi potenze diverse: la tensione più alta, di 98,9 V, si ritrova sulla lampadina da 15W (che naturalmente si brucerà in pochi istanti).



Indice generale

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE..... | 2 |
| Nozioni teoriche di base..... | 3 |
| Produzione e trasporto dell'energia elettrica..... | 4 |
| Tensione, corrente e resistenza..... | 6 |
| La potenza elettrica..... | 8 |
| Induttanza e reattanza..... | 10 |
| Corrente continua e corrente alternata..... | 11 |
| Trasformatori ed autotrasformatori..... | 16 |
| E se occorre la corrente continua?..... | 19 |
| Collegamento in parallelo e in serie..... | 20 |