

Elementi pratici di elettrotecnica

In questo capitolo faremo una breve e semplice introduzione agli elementi dell'elettrotecnica senza addentrarci nella complessità di calcolo approfondito della materia. Ci indirizzeremo solo agli elementi di base, alla nomenclatura essenziale e alle formule indispensabili e pratiche che dovremo usare nel dimensionamento degli elementi che costituiranno l'impianto.

Questo ci permetterà inoltre di poter comprendere, in modo soddisfacente, alcune prescrizioni normative, la corretta applicazione degli apparecchi elettrici e degli elementi circuitali utilizzati ai fini della sicurezza.

□ 1.1. Elementi essenziali

Iniziamo definendo il significato di **Tensione elettrica**.

La tensione è la differenza di potenziale elettrico fra due poli che genera un flusso di corrente elettrica, fra i poli stessi, se questi ultimi sono fra loro collegati attraverso un utilizzatore. Facciamo un classico paragone con un sistema idraulico.

Immaginiamo due serbatoi di acqua collegati fra loro da un tubo, come illustrato nella figura seguente.

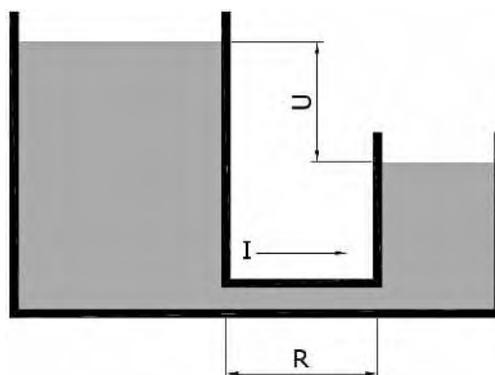


Fig. 1. Analogia idraulica dei sistemi elettrici

La tensione elettrica U (differenza di potenziale elettrico o forza elettromotrice) possiamo, per analogia, paragonarla alla differenza di livello dell'acqua dei serbatoi, l'unità di misura è il Volt (abbreviato V). Ad esempio tensione a 230 Volt, come il valore di quella generalmente utilizzata nelle abitazioni.

Per il principio dei vasi comunicanti, fra i serbatoi dell'acqua si cercherà di ristabilire lo stesso livello facendo passare una parte dell'acqua dal serbatoio con livello più alto a quello più basso, attraverso il tubo di collegamento.

La **corrente elettrica** è paragonabile all'acqua che scorre nel tubo.

La corrente si misura in Ampere (A).

L'intensità di corrente si indica con la lettera *i* maiuscola (I).

Pertanto diciamo che l'intensità di corrente *I*, che percorre un conduttore, è un determinato valore misurato in A (es. 10 A).

Il flusso di corrente (acqua) che percorre un conduttore elettrico (il tubo nel nostro esempio) nell'unità di tempo, sempre facendo riferimento alla figura precedente, dipende da un fattore specifico, oltre che dalla differenza di potenziale. Questo fattore è definito **Resistenza**, che nel caso del tubo dipende dalla sezione del tubo stesso e dal coefficiente di attrito causato dalle pareti della tubazione all'acqua, dalla lunghezza del tubo, ecc.. I conduttori e gli utilizzatori elettrici sono anch'essi elementi caratterizzati da una resistenza elettrica, che "impediranno", parzialmente, al flusso di corrente di attraversarli.

Questi tre elementi: tensione, corrente e resistenza, sono legati fra loro da una relazione matematica fondamentale e ricorrente (anche in forme più specifiche, come vedremo in seguito) chiamata Legge di Ohm.

Ci riferiamo per ora ad un sistema definito: **corrente continua** (c.c.).

Questo sistema ha un polo positivo ed un polo negativo che rimangono costanti nel tempo.

La legge di Ohm dice che: La tensione è data dal prodotto dell'intensità della corrente elettrica, moltiplicata per la resistenza elettrica dei conduttori e degli utilizzatori.

$$U = I \times R$$

Di conseguenza, essendo generalmente la tensione elettrica il fattore costante, possiamo determinare gli altri due fattori variabili.

$$I = U / R \quad \text{e} \quad R = U / I$$

In riferimento all'esempio di figura 1 supponiamo che:

- la Tensione *U* sia pari a 230 V;
- la resistenza introdotta dal tubo sia di 10 Ohm (Ω).

Dalla Legge di Ohm abbiamo:

$$I = U / R = 230 / 10 = 23 \text{ A}$$

Introduciamo il concetto di **Potenza** elettrica *P*. La potenza è il lavoro compiuto nell'unità di tempo di 1 secondo. È determinata dal prodotto della tensione per la corrente, e si misura in Watt (W):

$$P = U \times I$$

di conseguenza

$$U = P / I \quad \text{e} \quad I = P / U$$

e anche secondo le equazioni precedenti:

$$P = R \times I^2 \quad \text{e} \quad R = P / I^2$$

La potenza elettrica fornita per un periodo di tempo determina l'**Energia** elettrica E (fornita dal generatore o assorbita dall'utilizzatore).

Ad esempio un motore di potenza elettrica P di 1 kW (mille Watt) che funziona per un'ora, richiede l'energia E , di 1 kWh, (1 kilowatt ora).

Analogamente, un motore di 0,5 kW funzionante per 2 ore, assorbe l'energia E , di 1 kWh. Portiamo il tutto in un circuito elettrico ed otteniamo:

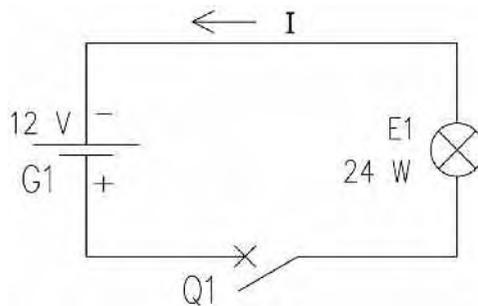


Fig. II. Circuito corrente continua

La tensione della pila di 12 V che alimenta una lampadina da 24 W, farà circolare nell'impianto e quindi nella lampada stessa la corrente pari a:

$$I = P / U = 24 / 12 = 2 \text{ A}$$

Di conseguenza la resistenza della lampada è pari a:

$$R = U / I = 12 / 2 = 6 \text{ } \Omega$$

oppure

$$R = P / I^2 = 24 / 4 = 6 \text{ } \Omega$$

Quindi, una lampada da 24 W funzionante a 12 V, parametri tecnici fondamentali che la caratterizzano, avrà il filamento che introdurrà fisicamente una resistenza di 6 Ω .

Come accennato in precedenza, anche i conduttori elettrici che alimentano la lampada introducono una resistenza, che in questo caso sarà determinata dai parametri fisici del conduttore stesso, con la seguente relazione:

$$R = \rho \times L / s$$

dove:

L lunghezza del conduttore in metri;

s sezione del conduttore in mm^2 ;

ρ (si legge *ro*) è la resistenza specifica o resistività di un conduttore di lunghezza pari ad un metro e di sezione di 1 mm^2 . Per il rame $\rho = 0,017 \div 0,018$ circa.

Quindi sempre per la legge di Ohm $U = R \times I$, sostituendo R otteniamo:

$$U = I \times \rho \times L / s$$

Se nel circuito precedente, i conduttori sono di sezione pari ad 1 mm^2 , e la loro lunghezza complessiva è pari a 100 metri, otteniamo che:

$$R_{\text{conduttori}} = \rho \times L / s = 0,017 \times 100 / 1 = 1,7 \text{ } \Omega$$

La corrente che circolerà nel circuito sarà pari a:

$$I = U / (R_{\text{lampada}} + R_{\text{conduttori}}) = 12 / (6 + 1,7) = 1,56 \text{ A}$$

Ai due capi della conduttura si creerà una tensione, definita caduta di tensione (ΔU) data da:

$$\Delta U = I \times (\rho \times L / s) = 1,56 \times 1,7 = 2,65 \text{ V}$$

La tensione ai capi della lampada U_l sarà quindi pari a:

$$U_l = U - \Delta U = 12 - 2,65 = 9,35 \text{ V}$$

che in percentuale è pari a:

$$\Delta U\% = \Delta U / U \times 100 = 2,65 / 12 \times 100 = 22\%$$

Da quanto sopra calcolato, risulta che la potenza della lampada, che sarà trasformata in energia luminosa, si riduce a:

$$P_{\text{lampada}} = U_{\text{lampada}} \times I = 9,35 \times 1,56 = 14,59 \text{ W}$$

e la potenza dissipata dai conduttori vale:

$$P_{\text{conduttori}} = \Delta U \times I = 2,65 \times 1,56 = 4,13 \text{ W}$$

Questa potenza sarà dissipata sotto forma di calore. Questo è definito Effetto Joule (si pronuncia gioul).

Questo effetto è sfruttato in modo positivo per alcune applicazioni, come ad esempio per un riscaldatore, quando si richiede una generazione di calore. È invece negativo il riscaldamento dei rivestimenti isolanti dei cavi, che possono resistere fino a temperature prefissate, oltre le quali il deterioramento è precoce. Vedremo quindi, nel dimensionamento delle condutture elettriche, che di questi valori se ne dovrà tenere conto nel calcolo di dimensionamento del circuito.

Inoltre i risultati di cui sopra sarebbero, se il circuito fosse realmente realizzato, particolarmente sconvenienti. La lampada avrebbe un rendimento pessimo, ed il circuito dissiperebbe 4,13 Wh di energia, che andrebbe dispersa in calore.

Nella pratica, secondo i criteri della norma CEI 64-8, oltre al contenimento delle temperature, si farà in modo che la caduta di tensione percentuale sia contenuta a valori determinati, in relazione al tipo di utilizzatore alimentato. In ogni caso verrà mantenuta inferiore al 5%.

Corrente alternata

Quanto fino ad ora detto vale per i circuiti in corrente continua, vale a dire in quei circuiti il cui valore della tensione e della corrente hanno un valore costante nel tempo.

La corrente alternata si differenzia in quanto i valori delle due grandezze, tensione e corrente, sono variabili nel tempo, assumendo i valori vettoriali indicati nella forma tipica *sinusoidale* che li contraddistingue (Fig. III).

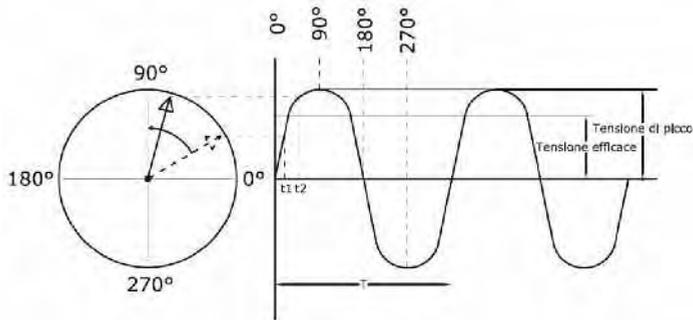


Fig. III. Sinusoide

Il motivo della forma d'onda dipende dal modo di generazione dell'energia.

Un generatore elettrico a corrente alternata, o più semplicemente *alternatore*, è basato sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, che è il fenomeno che si manifesta in un conduttore elettrico che ruoti a velocità costante in un campo magnetico uniforme, attorno ad un asse parallelo al conduttore.

Nel conduttore, che taglia le linee di forza del campo magnetico, si genera una forza elettromotrice indotta.

Otteniamo quindi un sistema capace di generare rispetto al punto N (neutro), inteso come punto a valore zero del sistema stesso, una corrente ed una tensione che, a partire dal punto zero, assume il valore massimo (o di picco) positivo, per ridiscendere al punto zero, per poi invertire il flusso e raggiungere il valore massimo negativo, per poi ritornare al punto zero e ricominciare un successivo periodo T . Il numero di volte in cui ciò accade in un secondo è definita **frequenza** f .

Nel nostro sistema di distribuzione la frequenza è di 50 Hz (hertz).

La frequenza ed il periodo sono legati dalla relazione:

$$f = 1 / T$$

Corrente alternata monofase

I conduttori che trasportano l'energia sono due, il **neutro**, che equivale al valore zero costante del sistema, ed il conduttore di **fase**, che è il conduttore che assume valori di tensione e corrente con grandezze variabili alternate. Questo sistema è costituito da una singola fase, oltre al neutro, e quindi è denominato **monofase**.

Il valore di picco Y_m è il valore massimo, positivo o negativo, che la grandezza può assumere.

Il valore **efficace** Y , che acquista per noi un valore più funzionale nell'attività pratica, è l'analogo valore che assumerebbe una corrente continua tale da produrre gli stessi effetti termici generati dalla sinusoide di valore Y_m .

Le due grandezze sono legate dalla relazione $Y = Y_m / \sqrt{2}$

Questo significa che per il nostro sistema di distribuzione a tensione di 230 V il valore di picco deve essere pari a:

$$230 \times \sqrt{2} = 325 \text{ V}$$

Rapporto di fase

Come abbiamo detto, l'onda sinusoidale si genera sia per grandezze di tensione, sia per grandezze di corrente. Questo permette l'applicazione della legge di Ohm, prima definita, anche alle correnti alternate. Questo può essere fatto alla sola condizione che le grandezze tensione e corrente siano sovrapponibili, cioè che entrambe le grandezze raggiungano il valore massimo nel medesimo istante.

Nella realtà i valori non sono "in fase" fra loro, ciò dipende dalle reattanza induttiva e capacitiva del circuito e degli utilizzatori.

La **reattanza induttiva** può essere definita, in modo semplicistico, come l'impedimento che il circuito oppone al passaggio della corrente, dovuto al campo magnetico che la corrente alternata provoca attorno al conduttore.

Vale cioè lo stesso concetto citato prima: se un conduttore taglia un campo magnetico genera al suo interno una corrente, se invece facciamo scorrere nel conduttore una corrente, questa genera un campo magnetico attorno al conduttore stesso. Dalle caratteristiche fisiche del conduttore e dal modo in cui si sviluppa, otteniamo un valore di induttanza "L" misurata in henry.

La reattanza induttiva X_L misurata anch'essa in Ohm, essendo comparabile ad una resistenza, è data da:

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

Un ulteriore effetto che si manifesta fra i conduttori percorsi da corrente è la generazione di campi elettrostatici, da qui si sviluppa la **reattanza capacitiva**.

(Capacità elettrica è definita come la quantità di elettricità presente in un conduttore riferita al potenziale da cui è alimentato).

In effetti fra i conduttori, o fra il conduttore e la terra, si crea un **condensatore**. Il condensatore elettrico è un apparecchio che accumula cariche elettriche di segno opposto e quindi energia elettrostatica.

Anche la reattanza capacitiva X_C crea una certa opposizione al passaggio della corrente e uno sfasamento, che però risulta essere in anticipo alla tensione. Si verifica quindi l'effetto contrario della reattanza induttiva.

In relazione alla frequenza e al valore della **Capacità**, espressa in farad, la reattanza capacitiva è data, in Ohm, dalla seguente formula:

$$X_C = 1 / (2\pi \times f \times C)$$

La reattanza del circuito quindi, assume valore, misurato in Ohm, pari a:

$$X = X_L - X_C$$

Si determina un ulteriore elemento che esprime l'effetto di "opposizione", che tiene conto di entrambi i fenomeni che "impediscono" il passaggio della corrente, ossia: la resistenza e la reattanza (induttiva e capacitiva).

Abbiamo quindi l'**Impedenza "Z"**, che è data, in Ohm, da:

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

Quindi la relazione $I = U / R$, sarà più correttamente espressa nei circuiti a corrente alternata in:

$$I = U / Z$$

Potendo rappresentare le grandezze sinusoidali come vettori, lo sfasamento può essere espresso dall'angolo φ fra i due vettori: tensione e corrente.

Per comprendere il concetto di sfasamento, (Fig. IV), la corrente risulta essere in ritardo rispetto alla tensione.

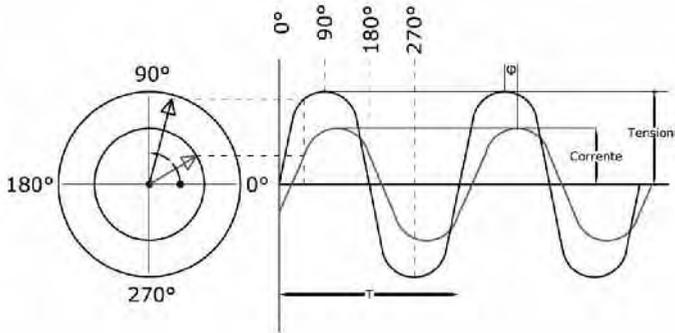


Fig. IV. Sfasamento tensione corrente

Per il calcolo della potenza dobbiamo tener conto dello sfasamento fra le due grandezze, pertanto la potenza, sarà così definita:

potenza apparente data da:

$$S = U \times I \text{ (VA)}$$

potenza attiva pari a:

$$P = U \times I \times \cos\varphi \text{ (W)}$$

potenza reattiva.

$$Q = U \times I \times \sin\varphi \text{ (VAR)}$$

Da queste definizioni possiamo trarre le seguenti informazioni.

La corrente che circolerà nel circuito sarà effettivamente la corrente I complessiva, ma agli effetti pratici la potenza utilizzabile "attiva" sarà inferiore. La potenza reattiva misura quella parte di potenza perduta. In genere i circuiti risultano di tipo induttivo, proprio a causa degli utilizzatori e dei conduttori utilizzati, dove l'effetto capacitivo è più ridotto.

I circuiti dovranno però essere dimensionati per la corrente complessiva, e l'Ente Erogatore Pubblico, a cui siamo connessi, dovrà comunque metterci a disposizione una quantità di energia che andrà persa. Per utenze importanti, generalmente dopo i 30 kW, il misuratore posto dall'Azienda Erogatrice sarà composto da un doppio contatore, uno che misura la potenza attiva, l'altro che misura la potenza reattiva. Una parte di quest'ultima sarà addebitata all'utente.

Per questo motivo è bene che il $\cos\varphi$ non sia minore di 0,9 (angolo di sfasamento di circa 25°).

Per ottenere questo, in alcune installazioni in cui il $\cos\varphi$ è inferiore a 0,9, si dovrà procedere al rifasamento. Di questo tratteremo nel dettaglio in seguito.

Corrente alternata trifase

La corrente alternata trifase segue gli stessi principi di quella esposta, denominata monofase.

In questo caso le fasi che trasportano l'energia sono tre, F_1 , F_2 e F_3 ed il neutro, che può o meno essere distribuito, rimane comunque uno solo. Le tre fasi sono tra loro sfasate di 120° , come indicato in figura seguente (da non confondere con lo sfasamento fra tensione e corrente).

Si potrebbe immaginare un generatore trifase come tre generatori di corrente monofase, contemporaneamente funzionanti alla stessa frequenza, ma con le fasi traslate di 120° .

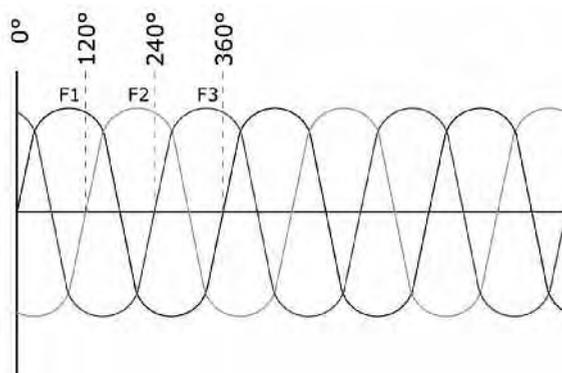


Fig. V. Sistema trifase

La **tensione concatenata** U , avrà un valore (convenzionalmente in Italia è pari a 400 V) legato alla tensione applicata ai poli fase-fase. Mentre **tensione di fase** U_0 (che per le utenze in Italia ha un valore di 230 V), è la tensione fra una fase ed il neutro, legate dalla relazione:

$$U_0 = U / \sqrt{3}$$

cioè:

U_0 Tensione di fase (230 V);

U Tensione concatenata (400 V).

La potenza sarà così determinata:

potenza apparente data da:

$$S = \sqrt{3} \times U \times I \text{ (VA)}$$

potenza attiva pari a:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \text{ (W)}$$

potenza reattiva.

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin\varphi \text{ (Var)}$$

Va notato che in qualsiasi istante la somma vettoriale delle tensioni sarà pari a zero volt. Se il circuito sarà sostanzialmente equilibrato. La somma vettoriale delle correnti di fase sarà uguale a zero ampere, dando come risultato di somma vettoriale un valore nullo di corrente di neutro. Se differentemente l'assorbimento di corrente sulle tre fasi è di valore differente, la sommatoria vettoriale della corrente che percorre il conduttore di neutro assumerà un valore diverso da zero.

I vantaggi per i quali la distribuzione e l'utilizzazione dell'energia avviene in sistema trifase sono sostanzialmente due. Il primo, facilmente comprensibile, consiste nella maggior energia trasportabile da un circuito con perdite sostanzialmente inferiori, e questo permette anche l'ottimizzazione dei conduttori, non avendo la necessità di eguagliare il numero di conduttori di neutro a quelli delle fasi, come avviene per i circuiti monofase. Il secondo perché la distribuzione trifase permette la creazione di un **campo magnetico rotante**. Praticamente lo sfasamento fra le fasi crea automaticamente un campo magnetico che ruota, condizione facilmente sfruttabile nella realizzazione dei motori elettrici, supposti ovviamente alla rotazione. Nei motori elettrici monofase lo sfasamento che permette la rotazione deve essere creato in modo artificioso, con conseguente perdita di rendimento.

□ 1.2. Applicazioni nella pratica

Diamo in primo luogo una idea pratica delle applicazioni del paragrafo precedente riferita alla tecnica degli impianti elettrici.

Vediamo le principali applicazioni e le rispettive grandezze elettriche con cui ci troveremo a lavorare.

Correnti continue

Troveremo alcune applicazioni in corrente continua principalmente in impianti in cui sarà necessario poter accumulare una certa quantità di energia elettrica. Ricordiamo che l'energia in corrente alternata non può essere conservata, mentre quella continua è accumulabile in batterie elettriche. Oggi si fa molto uso di gruppi di continuità statici, gli UPS (Uninterruptible Powew Supply = alimentatore non soggetto a interruzioni).

Per grandi centri di elaborazione dati, ad esempio, l'energia elettrica alternata viene convertita in corrente continua, proprio per essere accumulata in batterie.

In questo modo in caso di assenza della fonte di energia primaria, verrà riconvertita in corrente alternata l'energia accumulata nelle batterie. In altri casi, in centri di elaborazione dati o in armadi di telecomunicazione (che comprende anche comunicazione dati), vengono direttamente alimentate le apparecchiature in corrente continua. Qui, dato l'uso di tensioni piuttosto basse, in genere le batterie lavorano a 12 o 24 V, le correnti in gioco possono essere notevoli. Ovviamente dipenderà dallo specifico impianto e dalla sua estensione.

Esistono numerose soluzioni d'uso delle correnti continue, specialmente nel funzionamento di macchinari o dispositivi elettronici, ma in genere fanno parte di impianto a "bordo macchina", assemblato cioè con la macchina stessa, che richiederà molto probabilmente una alimentazione in corrente alternata, provvedendo poi, attraverso le proprie specifiche funzioni alle applicazioni in corrente continua.

Ci troveremo sicuramente molto più frequentemente a dover dimensionare gli impianti in correnti monofase o trifase di tipo alternato.

Gli impianti monofase, prevedono generalmente potenze limitate. Sono indicate per utenze domestiche o piccole attività.

Generalmente l'ente pubblico di distribuzione non fornisce utenze monofase superiori a 10 kW. Per potenze maggiori si opta per distribuzioni trifase. Ovviamente dipenderà anche dagli utilizzatori che dovremo alimentare. Non sarebbe possibile alimentare una apparecchiatura trifase, disponendo di tensioni monofase.

Per potenze superiori a 100 kW, l'Ente erogatore potrebbe non essere in grado di fornire l'utenza in bassa tensione, quindi sarà necessario ricorrere a cabine di trasformazione per trasformare appunto l'energia in Media Tensione fornita dall'Ente, in Bassa Tensione, utilizzabile per i nostri scopi (cabine MT/BT).

Il limite di potenza oltre il quale la fornitura sarà in media tensione andrà verificata con il Fornitore. Dipenderà dalle caratteristiche della rete pubblica.

I calcoli di base presentati al capitolo precedente entreranno in gioco nel dimensionamento dell'impianto. Ovviamente non saranno gli unici ma da questi potremo però comprendere ed approfondire i calcoli essenziali per un corretto dimensionamento.