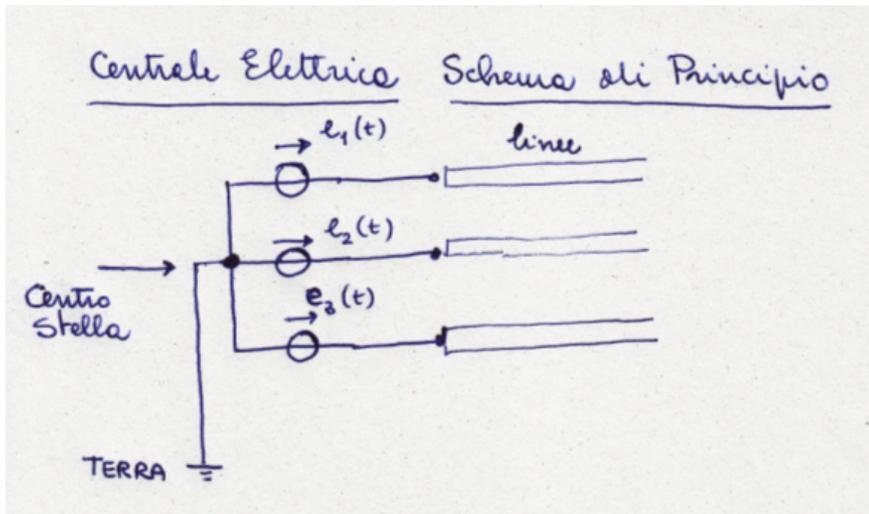


Argomenti

- Richiami teorici sul Sistema Trifase
- Schema di Principio sulla Produzione-Trasmissione e distribuzione dell'Energia Elettrica
- Principio di funzionamento del Trasformatore
- Linee Elettriche: Portata dei conduttori, Caduta di Tensione e Rifasamento
- Impianti di terra
- Stato del neutro in MT e in BT
- Sovracorrenti e relative Protezioni
- Sovratensioni e relative protezioni
- Cabine di trasformazione
- Quadri Elettrici

Richiami teorici sul Sistema Trifase



$$f := 50\text{Hz}$$

frequenza di rete

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

pulsazione di rete

$$E_{\text{fase}} := 230\text{volt}$$

valore efficace della tensione STELLATA

$$e_1(t) := \sqrt{2} \cdot E_{\text{fase}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

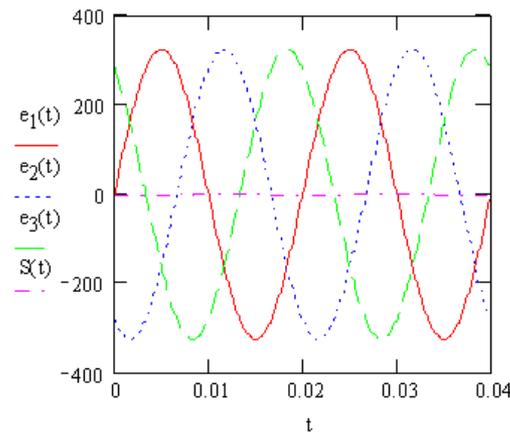
Terna di tensioni Simmetrica

$$e_2(t) := \sqrt{2} \cdot E_{\text{fase}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$e_3(t) := \sqrt{2} \cdot E_{\text{fase}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$S(t) := e_1(t) + e_2(t) + e_3(t)$$

La somma delle tre tensioni è identicamente nulla per ogni arbitrario istante t



Richiami sul trifase

Tensioni concatenate

$u_{12}(t) := e_1(t) - e_2(t)$ "voltmetro" tra fase 1 e fase 2

$u_{23}(t) := e_2(t) - e_3(t)$ "voltmetro" tra fase 2 e fase 3

$u_{31}(t) := e_3(t) - e_1(t)$ "voltmetro" tra fase 3 e fase 1

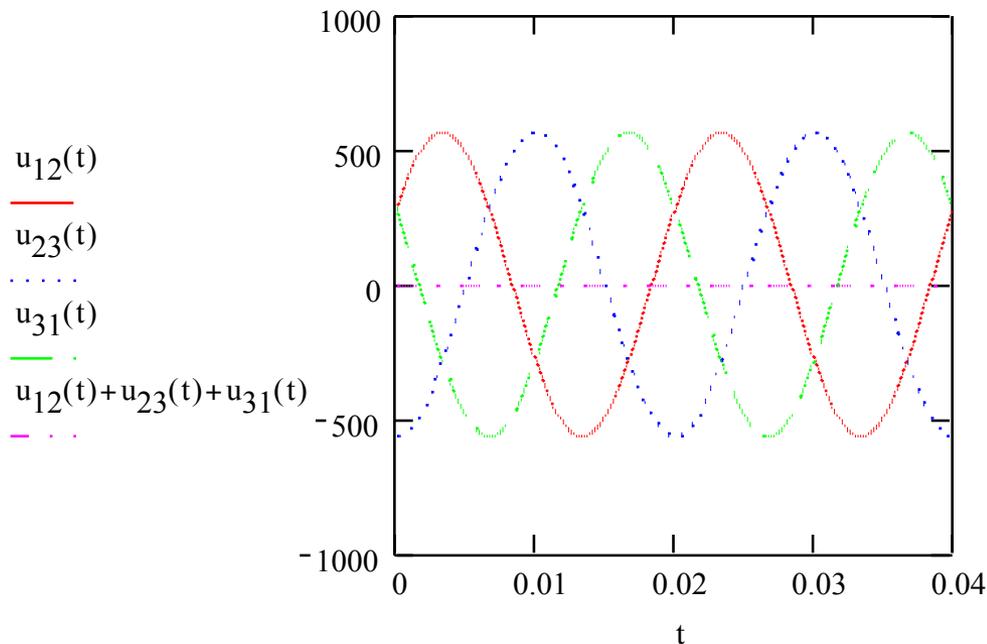
Relazione tra l'ampiezza della tensione concatenata e l'ampiezza della tensione di fase

$$U_{\text{Max}} := 563.383 \text{ volt}$$

$$E_{\text{Max}} := \sqrt{2} \cdot E_{\text{fase}}$$

$$\frac{U_{\text{Max}}}{E_{\text{Max}}} = 1.732$$

$$\sqrt{3} = 1.732$$



Richiami sul trifase

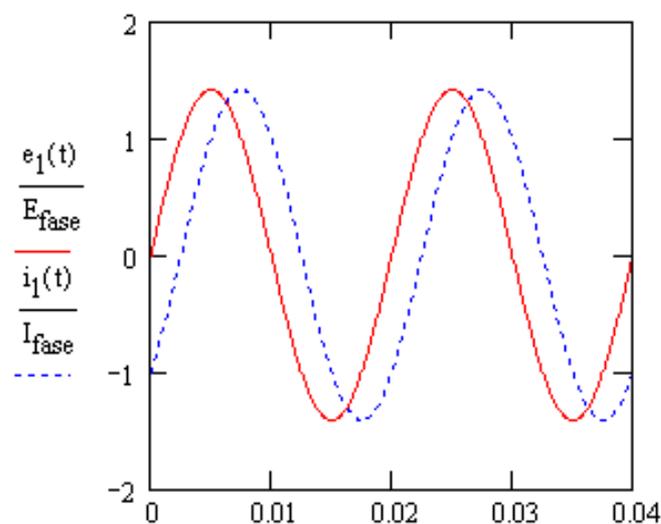
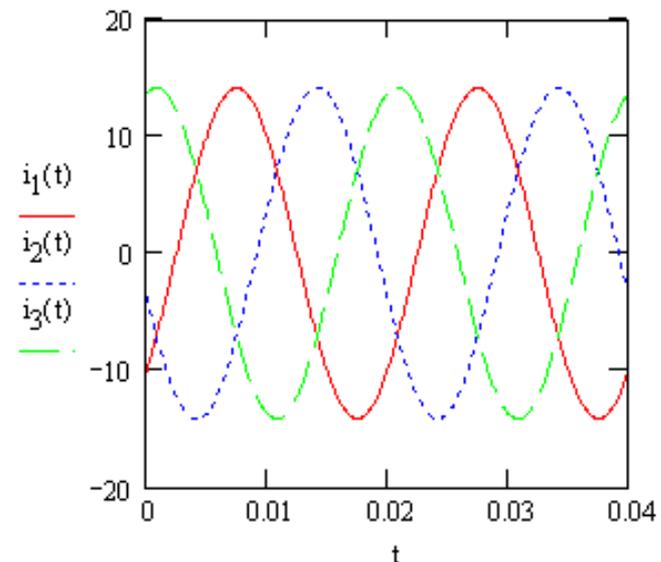
Terna equilibrata di correnti

$I_{fase} := 10\text{amp}$ valore efficace della corrente di fase
 $\varphi := \frac{\pi}{4}$ un possibile sfasamento tra tensione e corrente

$$i_1(t) := \sqrt{2} \cdot I_{fase} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

$$i_2(t) := \sqrt{2} \cdot I_{fase} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$i_3(t) := \sqrt{2} \cdot I_{fase} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

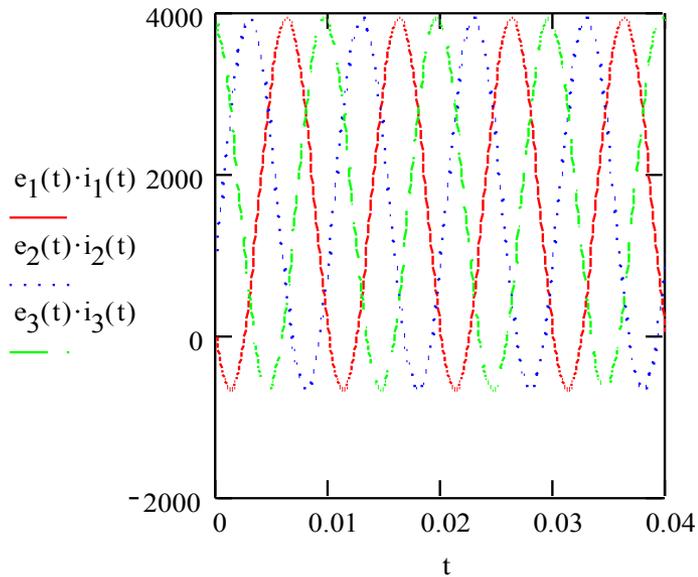


Richiami sul trifase

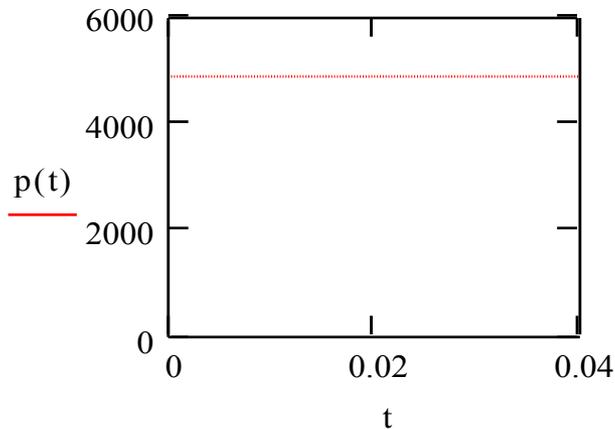
Potenza elettrica

$$p(t) := e_1(t) \cdot i_1(t) + e_2(t) \cdot i_2(t) + e_3(t) \cdot i_3(t)$$

potenza Istantanea



andamento nel tempo della
potenza su ciascuna singola fase



andamento COSTANTE nel tempo
della potenza istantanea dell'intero
Sistema Trifase

Richiami

$$T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega}$$

periodo della tensione e della corrente

$$T = 0.02\text{s}$$

Potenza Attiva

$$P := \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt$$

nel nostro esempio: $P = 4.879 \times 10^3 \text{ W}$

Richiami

Si dimostra che

$$P := 3 \cdot E_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \cos(\varphi)$$

ovvero, avendo definito il valore efficace della tensione concatenata:

$$U := \sqrt{3} \cdot E_{\text{fase}}$$

$$P := \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{fase}} \cdot \cos(\varphi)$$

$\cos(\varphi)$ viene definito FATTORE DI POTENZA

Richiami

E' importante notare che, a parità di potenza e di tensione di alimentazione, la corrente sarà tanto più elevata quanto più il fattore di potenza sarà depresso, cioè tanto più lo sfasamento tra corrente e tensione tenda a

$$\frac{\pi}{2}$$

Esempio numerico:

per ottenere una potenza attiva $P = 4.879 \times 10^3 \text{ W}$

$$I_{\text{fase}} = 10 \text{ A} \quad \text{con} \quad \varphi = 0.785 \text{ rad} \quad \text{cioé} \quad \cos(\varphi) = 0.707$$

ma se lo sfasamento fosse $\varphi := 1.2 \text{ rad}$ cioè $\cos(\varphi) = 0.362$

$$I_{\text{fase}} := \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)} \quad I_{\text{fase}} = 19.514 \text{ A} \quad \text{diventerebbe quasi il doppio a pari}$$

$$P = 4.879 \times 10^3 \text{ W}$$

Questa considerazione ci porterà a parlare di RIFASAMENTO per contenere l'intensità di corrente a parità di tensione per una voluta potenza P

Richiami

Invece di parlare di sfasamento, i tecnici preferiscono parlare sempre in termini di potenza. Per questo, per misurare la dipendenza dell'intensità di corrente dal fattore di potenza per trasmettere un'assegnata potenza attiva, si introduce il concetto di **POTENZA REATTIVA Q**

$$Q := 3 \cdot E_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin(\varphi)$$

ovvero

$$Q := \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin(\varphi)$$

nel nostro esempio numerico avremmo:

$$Q = 4.879 \times 10^3 \text{ VAR} \quad \text{con} \quad \cos(\varphi) = 0.707$$

Richiami

ATTENZIONE: La potenza reattiva non è una potenza reale, cioè qualcosa che si trasforma da energia elettrica ad energia di altra forma (termica, luminosa, meccanica, chimica, ecc.). Essa è un **ENTE MATEMATICO** che serve a parlare degli effetti dello sfasamento tra tensione e corrente in termini di potenza. Essendo una potenza **NON-REALE** la **Q** non può essere misurata utilizzando il **WATT** perché con tale unità si misura la potenza reale, cioè quella **ATTIVA**.

Per la **Q** si introduce una nuova unità di misura che è il **VoltAmpereReattivo = VAR**.

Ovviamente **Watt** e **VAR** sono grandezze omogenee.

Richiami

La potenza reattiva prenderà il segno del seno dello sfasamento. Quindi può essere positiva o negativa.

Si conviene di definire negativa una potenza reattiva erogata, nel viceversa si dirà assorbita.

Si dimostra che i Condensatori hanno potenza reattiva negativa, mentre agli induttori compete una potenza reattiva positiva.

Quindi si dirà che

- un induttore assorbe potenza reattiva (si dice che la corrente è in quadratura in ritardo sulla tensione)
- Un condensatore eroga potenza reattiva (si dice che la corrente è in quadratura in anticipo sulla tensione)

Sia l'induttore che il condensatore non gestiscono alcuna potenza attiva (a meno delle perdite nei casi reali).

Richiami

Il contrario avviene per il resistore che non ha potenza reattiva ma solo potenza attiva (si dice che la corrente è in fase con la tensione = fattore di potenza unitario).

Il prodotto tra le letture di un voltmetro e di un amperometro, ripetuto fase per fase, NON ci restituisce allora la VERA Potenza, cioè la Potenza ATTIVA perché non abbiamo informazioni sul fattore di Potenza. La somma dei prodotti delle letture Volt-amperometriche, ci definiscono quindi una POTENZA APPARENTE A che si misura in

Volt per Ampere = VA

$$A := 3 \cdot E_{\text{fase}} \cdot I_{\text{fase}}$$

Si dimostra facilmente che

$$A := \sqrt{P^2 + Q^2}$$

nel nostro esempio:

$$A = 6.9 \times 10^3 \text{ VA}$$

Risalire al valore del fattore di potenza è possibile dalle letture degli strumenti voltmetro amperometro e wattmetro, in quanto:

$$\cos(\varphi) := \frac{P}{A}$$

nel nostro esempio, infatti

$$\frac{P}{A} = 0.707 \quad \text{e} \quad \arccos\left(\frac{P}{A}\right) = 0.785$$

Richiami

Una funzione ad andamento sinusoidale nel dominio del tempo è rappresentabile con un vettore nel dominio dei numeri complessi. Tale vettore si dice FASORE.

Prendiamo ad esempio la corrente di fase 1, precedentemente vista:

$$i_1(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

Di essa sappiamo A PRIORI che è SINUSOIDALE, di pulsazione ω e che per definirla interamente è sufficiente conoscere il suo valore efficace e la sua fase iniziale:

I_{fase}

φ

Richiami

Quindi avremo

$$i_1(t) = \sqrt{2}I_{fase} \sin(\omega t - \varphi) \Leftrightarrow \bar{I} = I_{fase} e^{-j\varphi}$$

Dove appare l'unità immaginaria

$$j = \sqrt{-1}$$

mentre e è il numero di Nepero

Richiami

Quindi tornando al nostro esempio iniziale la terna simmetrica di tensioni diventa nel dominio dei numeri complessi:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{E}_1 = E_{fase} \Leftrightarrow \sqrt{2}E_{fase} \sin(\omega t) \\ \bar{E}_2 = E_{fase} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \Leftrightarrow \sqrt{2}E_{fase} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \bar{E}_3 = E_{fase} e^{-j\frac{4}{3}\pi} \Leftrightarrow \sqrt{2}E_{fase} \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{array} \right.$$

$$E_{fase} = 230\text{V}$$

$$E_{fase} \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -115 - 199.186j$$

$$E_{fase} \cdot e^{-j\frac{4}{3}\pi} = -115 + 199.186j$$

Richiami

Similmente per le correnti simmetriche

$$i_1(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

$$I_{\text{fase}} \cdot e^{-j \cdot \varphi} = 7.071 - 7.071iA$$

$$i_2(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$I_{\text{fase}} \cdot e^{-j \cdot \left(\varphi + \frac{2}{3} \cdot \pi\right)} = -9.659 - 2.588iA$$

$$i_3(t) := \sqrt{2} \cdot I_{\text{fase}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$I_{\text{fase}} \cdot e^{-j \cdot \left(\varphi + \frac{4}{3} \cdot \pi\right)} = 2.588 + 9.659iA$$

Richiami

Per la potenza avremo

$$P + jQ = \sum_{k=1}^3 E_{fase} I_{fase} e^{j\varphi} = \sum_{k=1}^3 \bar{E}_k \bar{I}_k^*$$

dove appare il coniugato del fasore della corrente

$$\bar{I}_k^* = I_{fase} e^{+1j(\varphi + \frac{2}{3}(k-1))}$$

Richiami

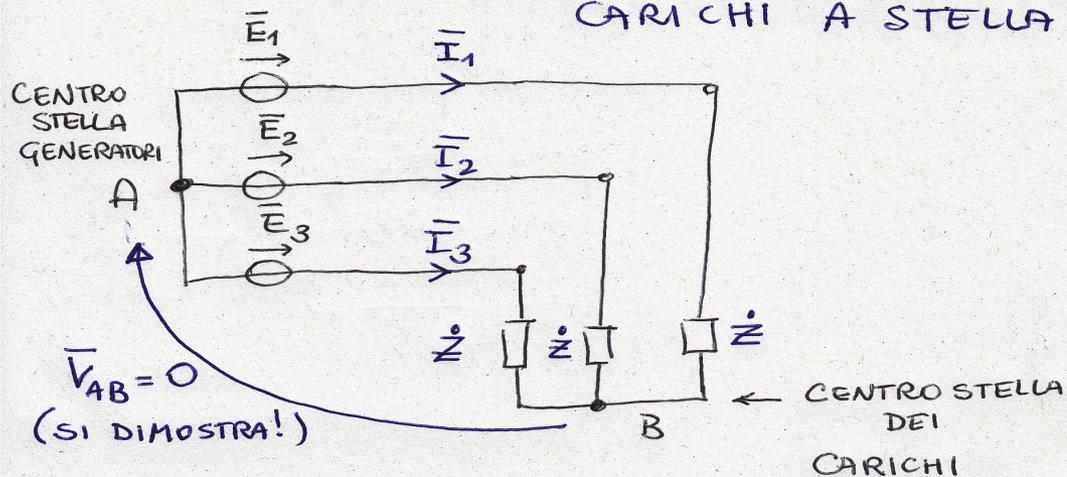
Anche i carichi possono essere matematicamente rappresentati da particolari enti chiamati **IMPEDENZE** nel dominio dei numeri complessi. Nel dominio Complesso la legge di Ohm si scrive:

$$\bar{V} = Z \bar{I}$$

Dove a seconda dei casi il fasore della tensione può essere la tensione stellata o la tensione concatenata.

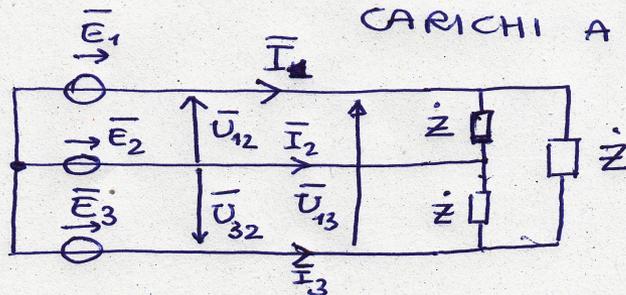
Nel primo caso si dice che i carichi sono collegati a **STELLA**, nel secondo caso a **TRIANGOLO**.

CARICHI A STELLA



$$\vec{I}_k = \frac{\vec{E}_k}{\dot{Z}}$$

* * * CARICHI A TRIANGOLO



$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{U}_{12}}{\dot{Z}} + \frac{\vec{U}_{13}}{\dot{Z}}$$

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{U}_{32}}{\dot{Z}} + \frac{\vec{U}_{21}}{\dot{Z}}$$

$$\vec{I}_3 = \frac{\vec{U}_{32}}{\dot{Z}} + \frac{\vec{U}_{31}}{\dot{Z}}$$

Perché conviene il trifase rispetto al monofase?

1. A pari grado di isolamento (Stessa U), a pari potenza trasmessa e a parità di perdite joule, si risparmia il 25% di volume di rame
2. La potenza istantanea non presenta fluttuazioni, ma è costante nel tempo. Ciò vuol dire che un motore trifase non ha vibrazioni
3. Si genera un campo magnetico rotante (G. Ferraris) per le macchine elettriche ad induzione: Sincrone e Asincrone

L'impedenza di un resistore non ha parte immaginaria

L'impedenza di un induttore ha solo parte immaginaria positiva (che si chiama Reattanza) e non ha parte reale.

L'impedenza di un condensatore ha parte immaginaria negativa (che si chiama Reattanza) e non ha parte reale

Il Neutro e il Conduttore di neutro

Il centro stella dei generatori si chiama Neutro.

Il Neutro può essere distribuito o meno. Se il Neutro non è distribuito il sistema si dice a tre fili, viceversa a quattro fili.

Nell'AT e MT il neutro non è distribuito

In BT il neutro è generalmente distribuito.

Il motivo sta nel fatto che più un sistema è di piccole dimensioni più ammette l'alimentazione di utenze monofasi che squilibrano il carico

Carico Squilibrato

Se il carico è equilibrato tra neutro e centro stella dei carichi la tensione è nulla (unicità dei centri stella).

Se il carico si squilibra allora lacune fasi “lavorano” più di altre e il centro stella dei carichi assume tensione diversa da zero rispetto al neutro la cui intensità dipende dal grado di squilibrio.

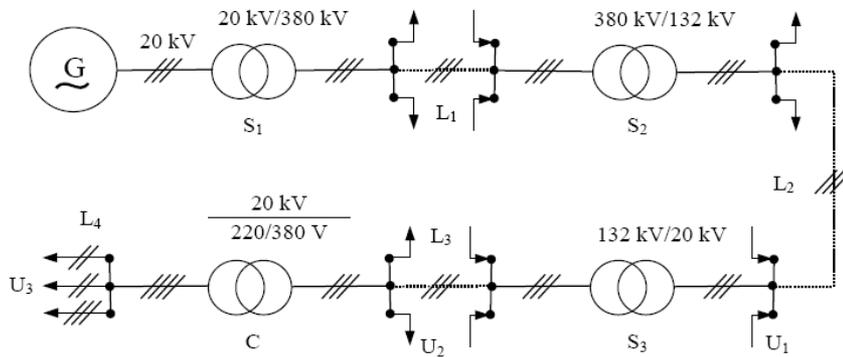
Ciò creerebbe un'inaccettabile arbitrarietà sul livello di tensione relativo a diverse utenze collegate a diverse fasi

Corrente nel conduttore di Neutro

Di conseguenza il centro stella dei carichi deve essere “forzato” ad assumere (...circa) tensione zero rispetto al neutro. Ciò viene realizzato attraverso un CONDUTTORE DI NEUTRO che CORTOCIRCUITA i centri stella di generatori e carichi.

Di conseguenza la somma delle tre correnti di linea non è più uguale a zero, ma sarà pari all'intensità di corrente che fluirà sul neutro. Tale corrente di neutro ha intensità dipendente dal grado di squilibrio.

Schematizzazione di un Sistema di Potenza Elettrica



- *Produzione* di energia elettrica mediante centrali di vario genere, funzionanti a tensione non molto elevata, per problemi di isolamento degli alternatori.
- *Trasformazione* delle grandezze elettriche (tensione e corrente) al fine di avere in ogni punto del sistema il valore di tensione più opportuno. Tale funzione viene svolta dalle stazioni di trasformazione (S₁, S₂, S₃) e dalle cabine di trasformazione (C). Le stazioni S₁ e S₂ sono dette primarie, le S₃ secondarie.
- *Trasmissione* dell'energia elettrica, ossia il trasporto di notevoli quantità di energia a grandi distanze e con valori elevati di tensione, mediante linee aeree o in cavo. Nella figura 2 il tratto L₁ rappresenta una linea di trasmissione ed L₂ una linea di trasmissione secondaria.
- *Distribuzione*: è l'ulteriore livello del trasporto dell'energia ed interessa il collegamento tra le stazioni, le cabine e le utenze. Si distingue una distribuzione in media tensione (MT) svolta dalla linea L₃ ed una in bassa tensione (BT), propria delle linee L₄^(o). Nelle zone di elevata densità di utenza queste linee sono generalmente in cavo.
- *Utilizzazione* dell'energia elettrica, ossia trasformazione di tale energia in una forma adatta ad utilizzazioni civili ed industriali (illuminazione, movimentazione di organi meccanici, ecc.). Nella figura 2 si distinguono le utenze alimentate in AT (U₁), in MT (U₂) e in BT (U₃). La consegna dell'energia elettrica viene effettuata in AT o MT solo per le utenze più importanti (utenze industriali). Per le utenze minori, quali officine o abitazioni (utenze domestiche), le cabine garantiscono una tensione concatenata nominale di circa 380 V oppure una tensione fase - neutro di 220 V.

Secondo la pratica corrente, pur se non sancita da alcuna norma, si parla di bassa, media ed alta tensione secondo il seguente criterio:

- *Bassa tensione* (BT) quando la tensione nominale è minore di 1000 V;
- *Media tensione* (MT) quando la tensione nominale è maggiore di 1000 V e minore di 30000 V;
- *Alta tensione* (AT) quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V.

La norma CEI 64-8 classifica invece i sistemi elettrici in base alla tensione nominale nel seguente modo:

- *Categoria zero* quando la tensione nominale è minore di 50 V in alternata o di 120 V in continua;
- *Prima categoria* quando la tensione nominale è di 50 + 1000 V in alternata o di 120 + 1500 V in continua;
- *Seconda categoria* quando la tensione nominale è di 1000 + 30000 V in alternata o di 1500 + 30000 V in continua;
- *Terza categoria* quando la tensione nominale è maggiore di 30000 V sia in alternata sia in continua.

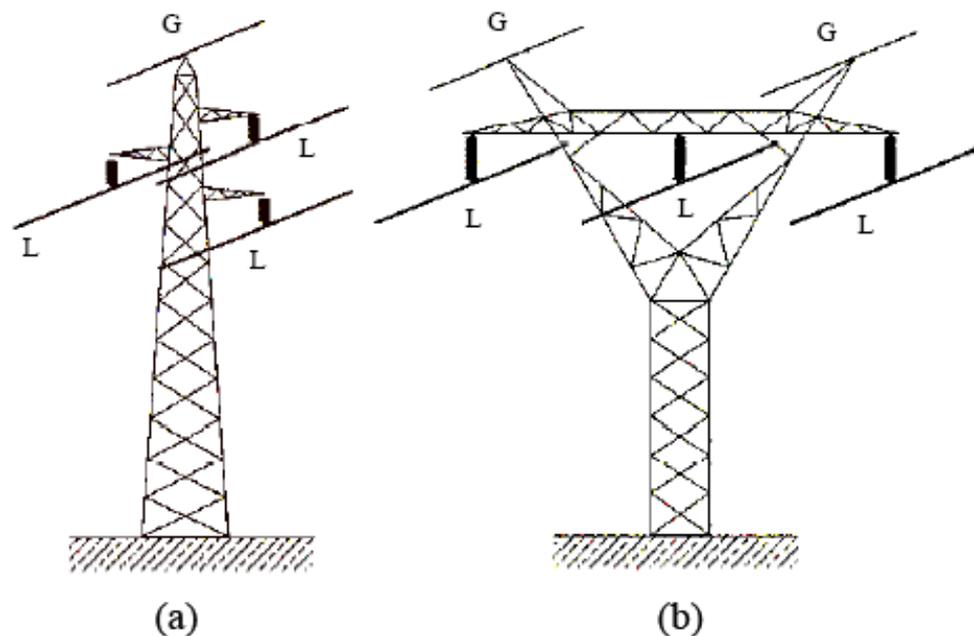
È da notare infine che, ai fini antinfortunistici, il DPR n. 547 considera di bassa tensione gli impianti con tensione nominale inferiore a 400 V in alternata e 600 V in continua; tutti gli altri sono da considerarsi di alta tensione.

Cenni sulle linee aeree

L'isolamento è costituito dall'aria e garantito dalla distanza (rigidità aria 30 kV/cm in condizioni standard)

Le linee di trasporto sono realizzate, generalmente, con conduttori nudi che si appoggiano ad appositi sostegni. Valutazioni di carattere sia elettrico (livello di tensione e di corrente) che meccanico (lunghezza dei tratti di conduttore fra due sostegni, presenza di sollecitazioni aggiuntive, quali vento e neve o ghiaccio) sono alla base dei criteri che conducono alla scelta del materiale conduttore per le linee e la loro organizzazione strutturale. I conduttori (in rame o alluminio) sono realizzati in fili o corde. A parità di resistenza elettrica, un conduttore di alluminio deve avere una sezione maggiorata del 60% rispetto ad un conduttore di rame: il suo peso risulta tuttavia circa la metà di quello in rame. Generalmente sono irrobustiti meccanicamente da un'anima interna costituita da una fune di acciaio.

Le linee ad alta tensione prevedono la presenza di un conduttore supplementare (indicato con G nella figura), denominato fune di guardia, generalmente posto in cima al traliccio di supporto. La sua funzione è quella di costituire una schermatura protettiva dei cavi sottostanti (indicati con L nella figura 3) nei confronti di eventuali fulminazioni dirette. Inoltre, la fune di guardia, metallicamente connessa ai tralicci, abbassa la resistenza di terra complessiva dei singoli tralicci, collegati in parallelo verso terra. La fune di guardia è generalmente costituita da corde in acciaio zincato o *aluminumweld*, un conduttore con anima in acciaio e strato esterno in alluminio.



Tralicci per MT (a) ed AT (b).

L'impiego di conduttori nudi comporta la necessità di provvedere ad un loro adeguato isolamento dai supporti (tralicci), interponendo opportuni isolatori costruiti perlopiù in vetro, porcellana o resine polimeriche. Gli isolatori sono formati spesso da elementi assemblati in maniera da formare una catena la cui rigidità dielettrica complessiva risulta circa multipla di quella dell'isolatore singolo. Un ulteriore parametro di progetto è costituito dalla forma degli isolatori. Il problema della forma è particolarmente curato per gli isolatori per esterno. A differenza di quelli per interni, infatti, devono far fronte a condizioni di esercizio certamente più gravose per la presenza di fattori ambientali sfavorevoli, quali la pioggia, l'umidità e l'azione di agenti contaminanti (fumi industriali e/o salsedine nelle zone costiere).

Cenni sulle linee in cavo

I cavi per energia, normalizzati dal CT 20 del CEI, servono per trasmettere energia elettrica da un punto all'altro di un impianto, in alternativa alle linee aeree o quando l'esecuzione di queste ultime non risulta tecnicamente possibile; rispetto ad esse presentano minor ingombro e maggior sicurezza, ma costo maggiore.

Nel settore della distribuzione in bassa tensione l'uso di cavi è ormai generalizzato e lo stesso sta avvenendo nella distribuzione in media tensione nelle zone ad elevata densità di carico.

Cavi

I cavi si distinguono in base alla tensione di esercizio in:

- *cavi per bassa tensione*, impiegati nei sistemi di categoria zero e prima;**
- *cavi per media e alta tensione*, impiegati nei sistemi di categoria seconda e terza.**

Cavi

In funzione del tipo di isolante impiegato, i cavi si possono distinguere in:

- *cavi isolati con materiale elastomerico*, costituito da mescole a base di gomma naturale (sempre meno usata) o sintetica come la gomma butilica, etilenpropilenica (EPR), siliconica, con temperatura massima ammissibile di 85 °C e tensione nominale fino a 20 kV, anche se si stanno sperimentando cavi isolati con elastomeri fino a 150 kV.
- *cavi isolati con materiale termoplastico*, costituito da resine termoplastiche come il polivinilcloruro (PVC) e il polietilene (PE);
- *cavi con isolamento minerale* a base di ossido di magnesio, aventi buone caratteristiche di resistenza al fuoco;
- *cavi isolati in carta impregnata*, distinti a loro volta in base al tipo di impregnazione (normali, a olio fluido, a pressione di gas), con temperatura massima ammissibile di (6570) °C e tensione nominale fino a 66 kV.

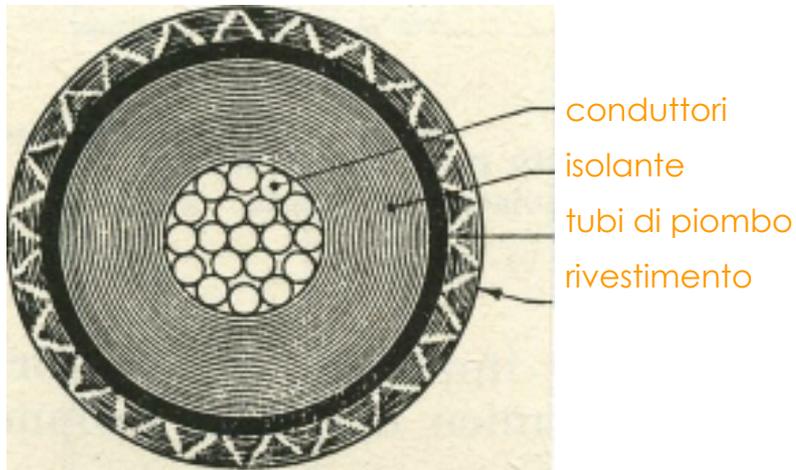
Cavi

Un'ulteriore distinzione viene fatta, in base al numero delle anime, in cavi *unipolari*, *bipolari*, *tripolari*, *multipolari* e a seconda della presenza o meno del conduttore di protezione per il collegamento all'impianto di terra.

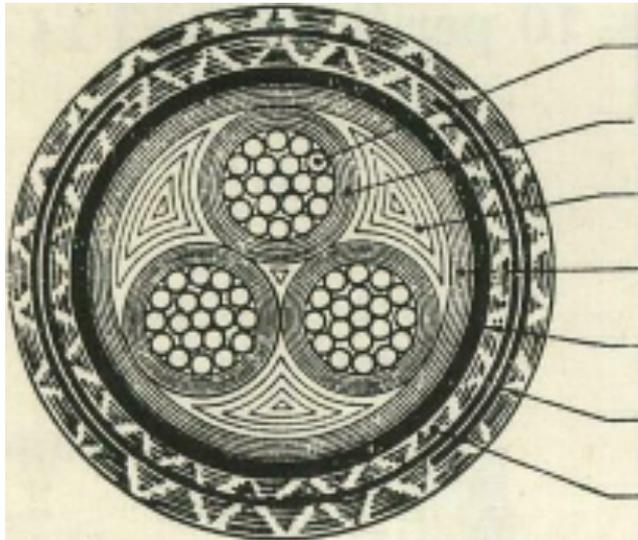
Cavi

Un cavo è un sistema elettrico costituito da tre sottosistemi:

- uno conduttore
- uno isolante
- uno di protezione del conduttore e dell'isolante.



La figura riportata in seguito rappresenta la sezione di un cavo tripolare, con evidenziate le varie parti che lo costituiscono.



conduttori

isolante delle anime

riempitivi

cintura

tubo di piombo

armatura

imbottitura

Cavi

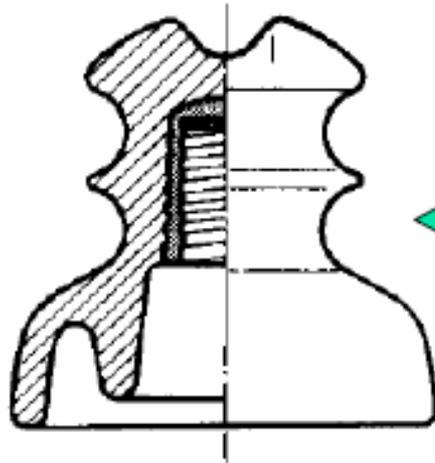
Il cavo trifase si usa per linee in M.T. e per linee a B.T., nel caso in cui si alimenta una utenza di forza motrice che non ha bisogno del neutro; in alcuni casi si usano, sempre in B.T., cavi quadripolari costituiti da 3 conduttori di fase ed un conduttore per il neutro; quest'ultimo deve avere sezione S pari a:

- $S = S_f$ per $S_f \leq 16 \text{ mm}^2$
- $S = 16 \text{ mm}^2$ per $16 \text{ mm}^2 \leq S \leq 35 \text{ mm}^2$
- $S = S_f/2$ per $S \geq 35 \text{ mm}^2$.

Posa dei Cavi

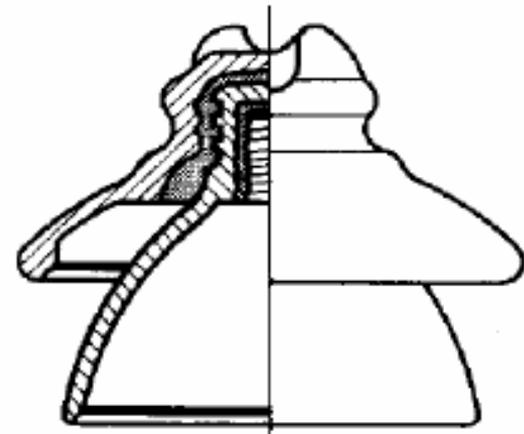
I cavi elettrici possono essere posati direttamente nel terreno o immersi nell'acqua, oppure entro cunicoli, tubazioni, ecc. Il loro impiego si impone nella distribuzione di energia nei centri urbani e negli stabilimenti industriali per ovvie ragioni di ordine estetico, di praticità, di minore ingombro e di sicurezza. E' bene però tener presente che il costo delle linee elettriche in cavo è molto superiore a quello delle linee aeree nelle quali l'isolamento è costituito essenzialmente dall'aria ambiente.

Isolatori

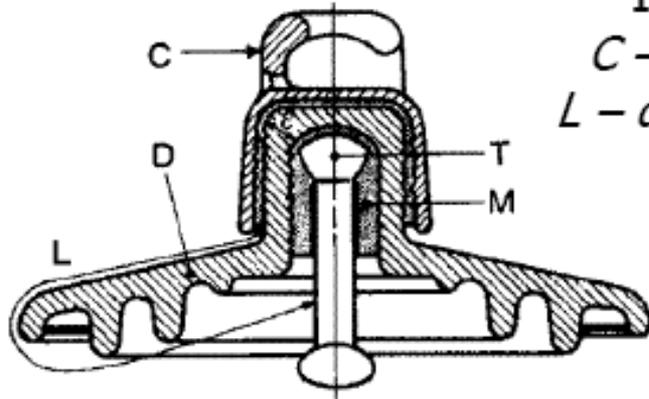


Isolatore rigido per
tensione fino a 1 kV

Isolatore rigido per
tensione superiore a 1 kV



Isolatori



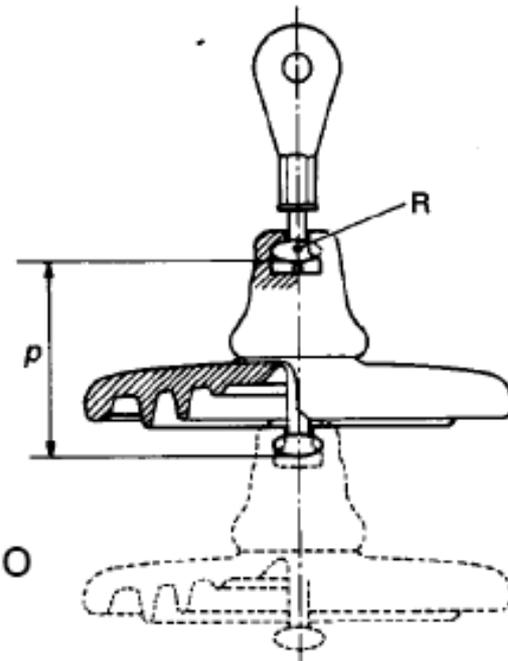
Isolatore sospeso a cappa e perno
*C – cappa; T – perno; D – materiale isolante;
L – distanza minima in aria, esterna all'isolatore;
M- materiale cementante.*

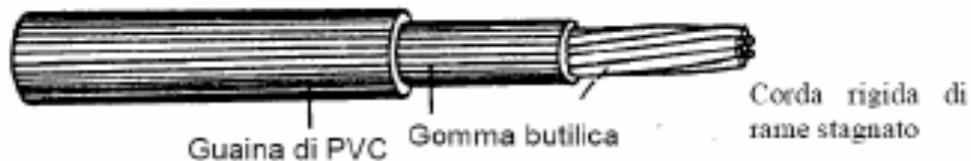
n° elementi
della catena

$$n = \frac{V_{kV}}{15} + 1$$

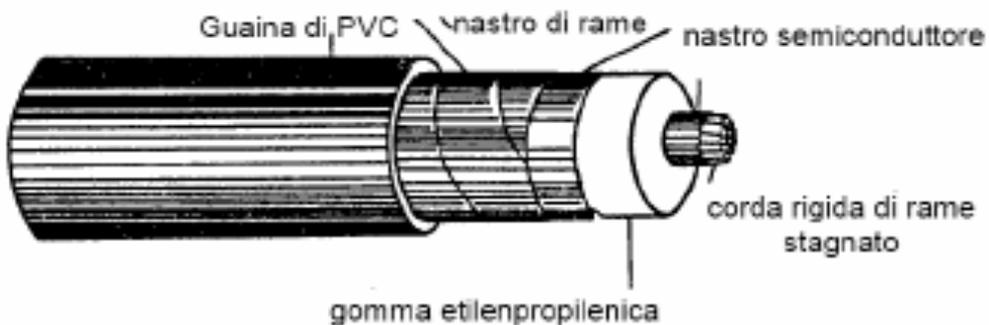
Catena di isolatori a cappa e perno

R – rotula; p – passo.

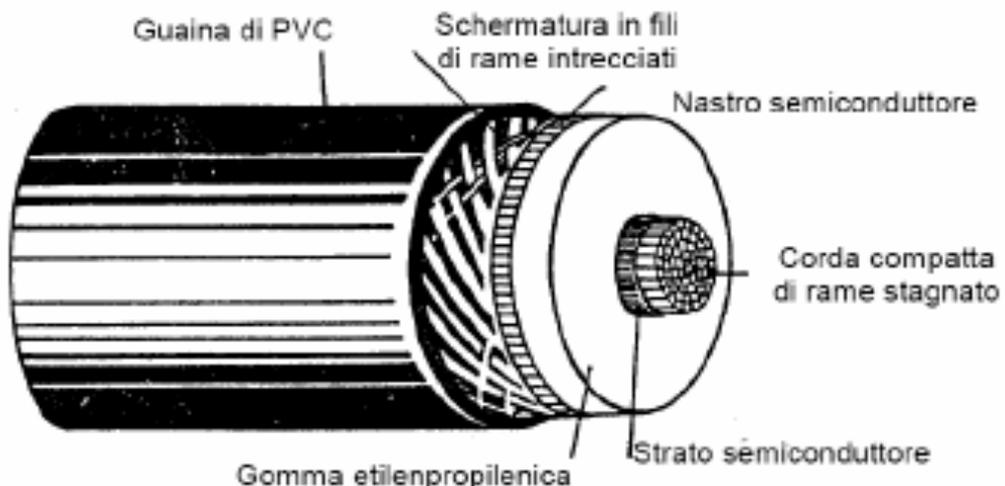




per BT



per MT



per AT

Importanti Requisiti Particolari

- Propagazione del fuoco lungo i cavi: i cavi in aria installati singolarmente, cioè distanziati tra loro di almeno 250 mm, devono rispondere alla prova di non propagazione della fiamma prevista dalla Norma CEI 20-35; quando i cavi sono raggruppati in ambiente chiuso in cui sia necessario contenere il pericolo di propagazione di un eventuale incendio, devono essere conformi alla Norma CEI 20-22.
- Provvedimenti contro il fumo: nel caso di installazione di notevoli quantità di cavi in ambienti chiusi, frequentati dal pubblico e di difficile e lenta evacuazione, devono essere adottati sistemi di posa atti ad impedire il dilagare del fumo negli ambienti stessi o, in alternativa, cavi a bassa emissione di fumo come prescritto dalle Norme CEI 20-37 e 20-38.
- Problemi connessi allo sviluppo di gas tossici e corrosivi: se i cavi sono installati in ambienti chiusi frequentati dal pubblico, oppure si trovano a coesistere in ambienti chiusi con apparecchiature particolarmente vulnerabili da agenti corrosivi, deve essere tenuto presente il pericolo che i cavi, bruciando, sviluppino gas tossici o corrosivi. Ove tale pericolo sussista occorre fare ricorso all'impiego di cavi aventi la caratteristica di non sviluppare gas tossici e corrosivi (Norma CEI 20-37 e 20-38).

Importanti Requisiti Particolari

Colori dei Cavi

I conduttori impiegati nell'esecuzione degli impianti devono essere contraddistinti dalle colorazioni previste dalle tabelle CEI-UNEL 00722 e 00712. In particolare i conduttori di neutro e di protezione devono essere contraddistinti rispettivamente con il colore blu chiaro e con il bicolore giallo-verde. I conduttori di fase, devono essere contraddistinti in modo univoco, in tutto l'impianto, dai colori: nero, grigio cenere, marrone.

Il Trasformatore

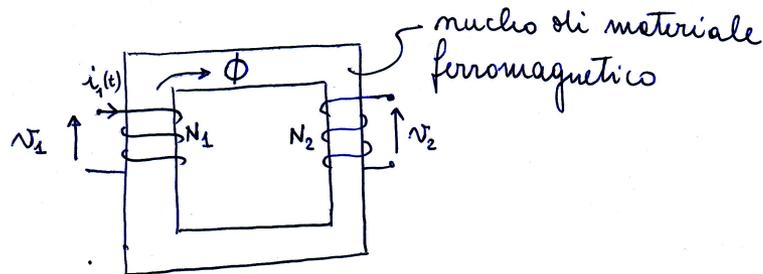


ANAS S.p.A.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:

LEGGE DELL'INDUZIONE:

$$\mathcal{V}(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$



$$\mathcal{V}_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} ; \mathcal{V}_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_2} = \frac{N_1}{N_2} = \text{RAPPORTO SPIRE} = K_N$$

Il trasformatore di potenza

Poichè il trasformatore, tolte le perdite nel rame e nel ferro è **TRASPARENTE ALLA POTENZA**, si avrà che i moduli dei valori efficaci delle correnti primarie e secondarie sono nel rapporto inverso rispetto alle tensioni misurate su rispettivi avvolgimenti.

Quindi in un trasformatore MT/BT tipo 20/0.4 la tensione primaria vale 20 kV e la secondaria 400 V. Le correnti saranno invece nel rapporto inverso cioè la corrente secondaria sarà $200/4=50$ volte maggiore della corrente primaria.

Quindi il lato BT si distingue ad occhio dal lato MT. Esso avrà isolatori più piccoli dai quali usciranno cavi di sezione maggiore rispetto al lato MT.

Link utile

<http://www.electroportal.net/admin/wiki/trasformatori1>

Trasformatore di potenza a isolamento solido

- Il raffreddamento di un trasformatore ad **isolamento solido** si effettua ad **aria** a convezione naturale o forzata



Il Trasformatore di potenza in olio

- Nel caso di isolamento **in olio**, l'olio circola dal basso verso l'alto all'interno del cassone:
 - convezione naturale
 - convezione forzata (per grandi macchine)
 - a sua volta l'olio si raffredda per convezione naturale (o forzata) dell'aria esterna, circolando dall'alto verso il basso in tubi saldati alla superficie laterale del cassone, o in radiatori esterni



Trasformatori in olio MT/AT



Parametri delle Linee e Circuito equivalente

PARAMETRI LONGITUDINALI

1) Resistenza chilometrica: effetti ohmici del passaggio di i

$$r = k \frac{\rho}{S} \quad [\Omega/\text{km}]$$

con $\rho =$ resistività del conduttore $[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}]$

$S =$ sezione trasversale del conduttore $[\text{mm}^2]$

$1.02 \leq k \leq 1.05$ coefficiente linee aeree

$k \approx 1.02$ " linee cavo interretato

2) Induttanza chilometrica (Induttanza di servizio):

Effetti di auto e mutua induzione causati dai campi magnetici generati dalle correnti di linea.

$$l = 0,4606 \log_{10} \frac{2D}{d} + K \quad [\text{mH}/\text{km}]$$

con $D =$ distanza tra il centro dei conduttori sulla sezione trasversale circolare

$d =$ diametro (equivalente) della sezione trasversale

$K =$ contributo del campo interno

Parametri delle Linee e Circuito equivalente

PARAMETRI
LONGITUDINALI



3) CAPACITÀ CHILOMETRICA DI SERVIZIO: accoppiamenti elettrici tra fase e fase e tra fase e terreno

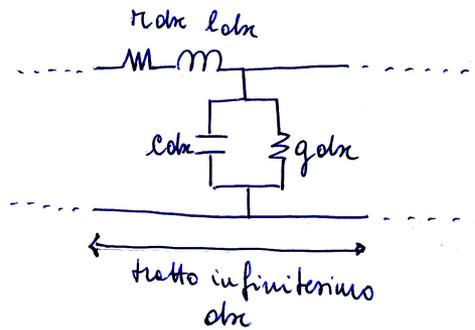
$$C = \frac{0,02413}{\log \frac{2D}{r_m d}} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

4) CONDUZZANZA CHILOMETRICA TRASVERSALE: PERDITE DI POTENZA NELL'AMBIENTE (WAT PRINCIPALMENTE PER EFFETTOCORONA)

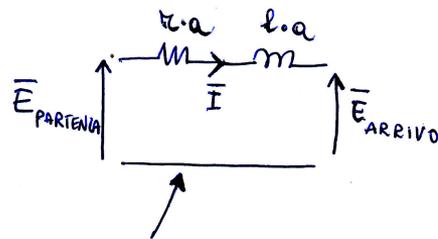
$$\frac{P_{\text{PERSA}}}{a} = 3g E^2$$

$$[g] = [\Omega^{-1}/\text{km}]$$

Modello Monofase-
equivalente



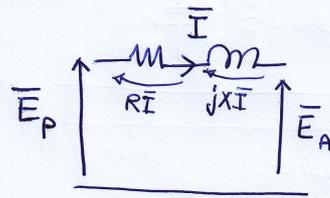
se la linea è corta (dell'ordine di qualche km)
allora i parametri trasversali sono trascurabili:



a = lunghezza
del tratto di linea.

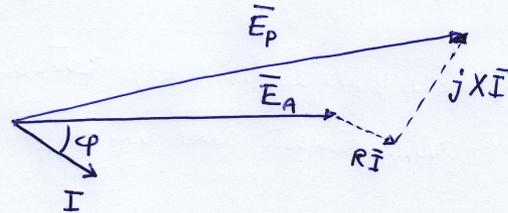
indica l'unicità del centro stella e non
è un reale conduttore, ma è un "modello"
matematico di corto-circuito (corto circuito
virtuale tra il neutro e il centro-stelle dei
carichi)

CADUTA DI TENSIONE TRA PARTENZA E ARRIVO PER CARICO INDUTTIVO-OHMICO



$$R = r_a$$

$$X = \omega l_a$$



$$100 \frac{\Delta E}{E_{nom}} = \frac{|\bar{E}_P| - |\bar{E}_A|}{E_{nom}} \cdot 100 = \frac{RP + XQ}{U_{nom}} \cdot 100 = \Delta U\%$$

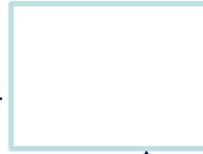
$\Delta U\%$ non deve superare il 10% totale.

ridurre R (aumento sezione)

ridurre Q (RIFASAMENTO)

RIDURRE Q significa ridurre φ a φ'
con $\varphi' < \varphi$

RIFASAMENTO

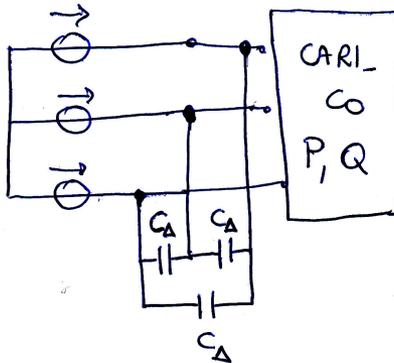


Il rifasamento per carico ohmico-induttivo si opera con banchi di condensatori collegati in BT a triangolo.

La capacità di ciascun condensatore dei 3 collegati a triangolo è:

$$C_{\Delta} = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{3 \omega U_{\text{nom}}^2}$$

Scheme



La Terra

Un impianto di terra, a seconda della funzione che deve assolvere, può distinguersi in:

- *messa a terra di protezione*, è una misura atta a proteggere le persone dai contatti diretti;
- *messa a terra di funzionamento*, ha lo scopo di stabilire un collegamento a terra di particolari punti del circuito elettrico per esigenze di esercizio, come la messa a terra del neutro nei sistemi TT e TN;
- *messa a terra per lavori*, collega a terra temporaneamente una sezione di impianto per esigenze di manutenzione.

Tutte le funzionalità citate, vengono realizzate da un unico impianto di terra che deve essere quindi progettato per soddisfare contemporaneamente tutti questi vincoli.

Le norme richiedono che tutti i componenti che realizzano una messa a terra nell'ambito di un impianto elettrico siano tra loro collegati insieme, costituendo un unico sistema.

Impianto di terra

L'impianto di terra è dunque un sistema, limitato localmente, costituito

- ❖ da dispersori, o da parti metalliche in contatto con il terreno**
- ❖ da conduttori di terra e**
- ❖ da conduttori equipotenziali.**

Dispersore

Conduttore in contatto elettrico con il terreno,

(o conduttore annegato nel calcestruzzo a contatto con il terreno attraverso un'ampia superficie, per esempio una fondazione).

Conduttore di terra

Conduttore che collega ad un dispersore una parte dell'impianto che deve essere messo a terra, o che collega tra loro più dispersori,

Definiamo Terra di riferimento (terra lontana)

La zona della superficie del terreno al di fuori dell'area di influenza di un dispersore o di un impianto di terra, dove cioè, tra due punti qualsiasi non si hanno percettibili differenze di potenziale dovute alla corrente di terra.

Resistività del terreno

Proprietà elettriche del terreno

Le proprietà elettriche del terreno sono caratterizzate dalla sua resistività.

Nonostante la semplicità della definizione di resistività la determinazione del suo valore è spesso un compito difficile per due ragioni principali:

❖il terreno non ha una struttura omogenea, ma al contrario è composto da strati di materiale diverso;

❖la resistività di un dato tipo di terreno varia notevolmente ed è molto influenzata dal contenuto di umidità.

Resistività del terreno

Tipo di terreno	Resistività del terreno ρ [Ωm]	
	Intervallo dei valori	Valor medio
Paludoso	2 - 50	30
Argilloso	2 - 200	40
Limo e sabbia argillosa, humus	20 - 260	100
Sabbia e terra sabbiosa	50 - 3.000	200 (umido)
Torba	> 1.200	200
Ghiaia umida	50 - 3.000	1.000 (umido)
Terreno pietroso e sassoso	100 - 8.000	2.000
Calcestruzzo: 1 parte cemento + 3 di sabbia	50 - 300	150
Calcestruzzo: 1 parte cemento + 5 di sabbia	100 - 8.000	400

Resistività del terreno ρ per diverse tipologie di terreno

Resistività del terreno

Il calcolo della resistenza di terra richiede una conoscenza accurata delle proprietà del terreno ed in particolare della sua resistività ..

La variabilità della resistività costituisce un problema progettuale.

In molte situazioni pratiche si può ipotizzare una struttura del terreno omogenea e si può assumere un valore medio di resistività che deve essere determinato sulla base di un'analisi del suolo oppure attraverso una misurazione.

Esistono tecniche consolidate per misurare la resistività del terreno. Durante la misura è importante che la distribuzione di corrente negli strati di terreno sia coincidente con quella che produrrebbe l'impianto in fase di dispersione effettive.

.

Resistività del terreno

Nel caso in cui non si disponga di alcun dato circa il valore di resistività del terreno è possibile desumerlo da opportune tabelle. (un valore usuale è $100 \text{ ohm} \cdot \text{m}$).

Comunque, come indicato nella prossima tabella il valore realmente misurato della resistività può essere molto differente dal valore progettuale;

per questo motivo devono essere eseguiti un collaudo finale dell'impianto e una valutazione delle probabili variazioni dovute sia alle condizioni atmosferiche sia all'invecchiamento dell'impianto.

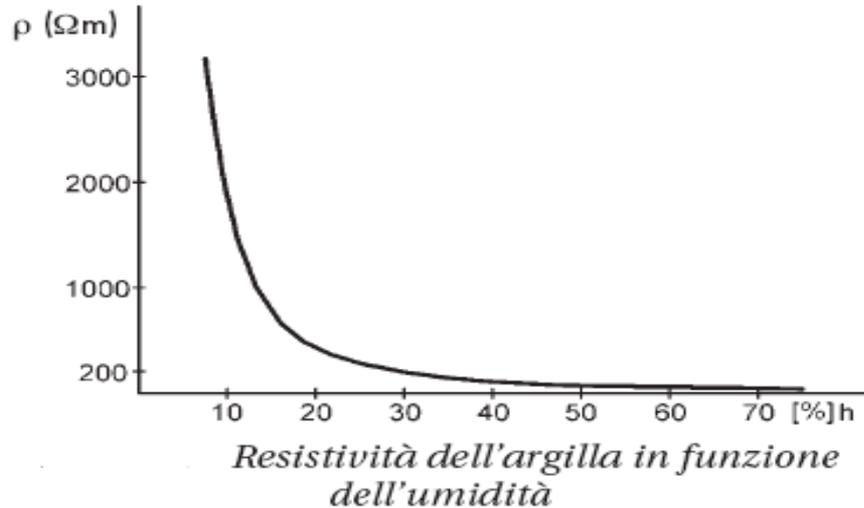
Resistività del terreno

Un ulteriore problema che si presenta nella determinazione della resistività del suolo è dato dal contenuto di umidità nel terreno.

Questo può variare in un ampio intervallo, in funzione della posizione geografica e delle condizioni atmosferiche: da percentuali basse come nel caso delle regioni desertiche fino a valori prossimi all'80% in zone paludose.

La resistività del terreno dipende in maniera significativa da questo parametro.

Resistività del terreno



La figura illustra la relazione tra resistività ed umidità nel caso dell'argilla. Si può notare come per valori di umidità superiori al 30% le variazioni siano modeste e poco significative mentre quando con terreno secco, ovvero per valori di umidità inferiori al 20% la resistività varia rapidamente.

Resistività del terreno

In regioni con un clima temperato, come ad esempio i paesi europei, la resistenza di terra varia al variare della stagione dell'anno in virtù della sua dipendenza dall'umidità del suolo.

In Europa questa relazione ha un andamento più o meno sinusoidale con il massimo valore in febbraio ed il minimo in agosto;

il valor medio si può manifestare in maggio e novembre per i paesi dell'Europa del centro – nord.

In paesi con clima simile a quello italiano si hanno valori di resistività elevati nei periodi dicembre - febbraio e luglio – settembre e valori bassi nei rimanenti periodi.

L'ampiezza in febbraio è superiore alla media di circa il 30% mentre in agosto è inferiore di circa 30%.

Resistività del terreno

Bisogna ricordare che l'effetto prodotto dal gelo è simile a quello dell'essiccazione: la resistività aumenta in maniera significativa.

Per queste ragioni il calcolo della resistenza di terra e il dimensionamento dei dispersori non può essere condotto con un'accuratezza troppo spinta. (necessità di collaudo)

**resistenza di terra;
configurazione dei dispersori.**

La resistenza di terra determina la relazione tra il valore della tensione totale di terra V_T ed il valore della corrente di terra.

A parità di resistenza di terra, la particolare configurazione dei dispersori determina la distribuzione del potenziale sulla superficie del terreno conseguente al passaggio di corrente.

Resistenza di terra

La resistenza di terra è costituita da due componenti: la resistenza di dissipazione R_D che è la resistenza del terreno tra il dispersore e il punto di terra di riferimento a potenziale 0;

la resistenza R_L delle parti metalliche dei dispersori e dei conduttori di terra.

La resistenza R_L è generalmente molto più piccola della resistenza di dissipazione R_D .

Quindi normalmente la resistenza di terra viene considerata pari alla resistenza di dissipazione.

In letteratura il termine resistenza di terra si riferisce sempre alla resistenza di dissipazione.

Resistenza di terra

I collegamenti a terra resi disponibili dal fornitore di energia elettrica ci si può aspettare che abbiano un'impedenza più bassa sia alla frequenza fondamentale che alle frequenze delle armoniche. Nonostante ciò la disponibilità e le caratteristiche di questo impianto di terra sono al di fuori del controllo del progettista e quindi non devono essere considerate nella progettazione dell'impianto di terra dell'edificio, che deve essere adeguato alle prestazioni richieste autonomamente.

distribuzione del potenziale

Nei circuiti in corrente alternata bisognerebbe far riferimento all'impedenza di terra Z_T che è l'impedenza tra l'impianto di terra e il potenziale di riferimento, ad una data frequenza.

La reattanza dell'impianto di terra è data dalla reattanza dei conduttori di terra e delle parti metalliche dei dispersori.

Per basse frequenze (la frequenza di alimentazione e le eventuali armoniche associate) la reattanza è generalmente trascurabile .

Conseguentemente si assume che l'impedenza di terra sia uguale alla resistenza di terra che a sua volta si assume approssimativamente pari alla resistenza di dissipazione

Al fine di ottenere bassi valori di resistenza di terra, la densità di corrente che fluisce dal dispersore verso il terreno dovrebbe essere bassa o in alternativa il volume del terreno interessato dalla corrente dovrebbe essere il più grande possibile.

Una volta che la corrente passa dal metallo al terreno, si diffonde, riducendo la sua densità.

Se il dispersore è fisicamente piccolo, ad esempio un punto, il fenomeno assume dimensioni rilevanti.

Invece nel caso di una piastra, nella quale la diffusione della corrente avviene solo in corrispondenza degli spigoli, il fenomeno è meno evidente.

Questo significa che elettrodi lineari (picchetti, tubi, conduttori) hanno una resistenza di dissipazione più bassa di dispersori ad esempio a piastra, a parità di superficie.

Calcolo

Il calcolo della resistenza di terra viene normalmente svolto ipotizzando che il terreno sia di dimensioni infinite ed abbia struttura uniforme con un dato valore di resistività.

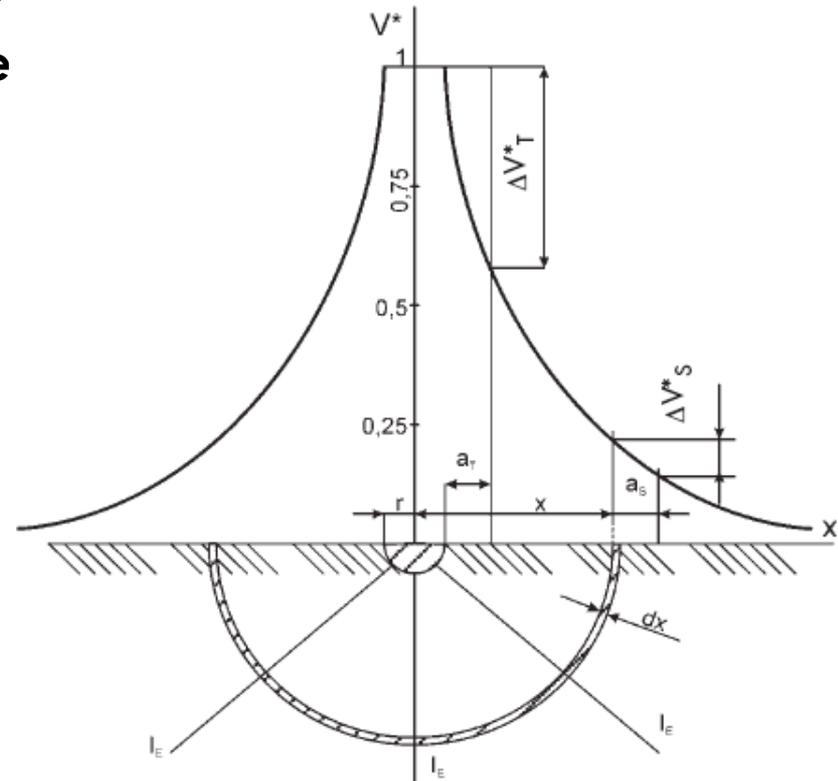
È possibile determinare esattamente le equazioni della resistenza di terra, ma in pratica la loro utilità è limitata soprattutto nel caso di dispersori complessi e magliati, per i quali le espressioni analitiche diventano molto complicate.

Inoltre anche una piccola inesattezza del valore di resistività ha un'influenza significativa sul reale valore della resistenza di terra dei dispersori, ed è spesso molto difficile determinare la resistività del terreno con l'accuratezza richiesta.

Calcolo

Il modello base che viene usato per i calcoli fondamentali di un dispersore è quello

$$R_T = \rho \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$



Schema di un dispersore emisferico interrato con l'indicazione dei parametri necessari per il calcolo della resistenza di terra

Stato del Neutro

In alta tensione (220 kV ÷ 380 kV) il neutro non è distribuito ed è collegato efficacemente a terra in ogni condizione della rete.

Nelle trasmissioni a 120 kV ÷ 150 kV il neutro non è distribuito ed è collegato a terra ma non in ogni condizione della rete.

Le linee in media tensione (10 kV ÷ 35 kV) solitamente sono tutte realizzate a neutro isolato (in parte compensato con una elevata impedenza induttiva).

In bassa tensione (230 V ÷ 400 V) ormai è quasi sempre distribuito salvo le alimentazioni concatenate.

Problema termico nei conduttori

Un conduttore percorso da corrente è soggetto all'effetto joule. Detta R la sua resistenza in Ohm, si ha che la sua potenza istantanea dissipata in calore vale:

$$p_j(t) = Ri(t)^2$$

Questa potenza termica verrà parzialmente smaltita per scambio termico (conduzione, convezione e irraggiamento) con l'ambiente e per la restante parte causerà l'aumento di temperatura del conduttore.

Problema termico

In linea di principio, possiamo schematizzare il problema termico attraverso la seguente equazione dello scambio termico :

dove

$$p_j(t) = c_T \boxed{L} \frac{d\Theta^\Delta(t)}{dt} + \lambda A \Theta^\Delta(t)$$

$p_j(t)$ = potenza termica per effetto Joule [W]

$\Theta^\Delta(t)$ = differenzadi temperatura tra ambiente e conduttore [$^\circ\text{C}$]

c_T = capacità termica del conduttore p.u. di volume [$\frac{\text{Ws}}{^\circ\text{C m}^3}$] = [$\frac{\text{J}}{^\circ\text{C m}^3}$]

\boxed{L} = lunghezza del conduttore [m]

S = sezione trasversale del conduttore [m^2]

λ = coefficiente di scambio termico globale [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$]

A = superficie esterna del conduttore attraverso cui si ha lo scambio termico con l'ambiente [m^2]

Problema termico

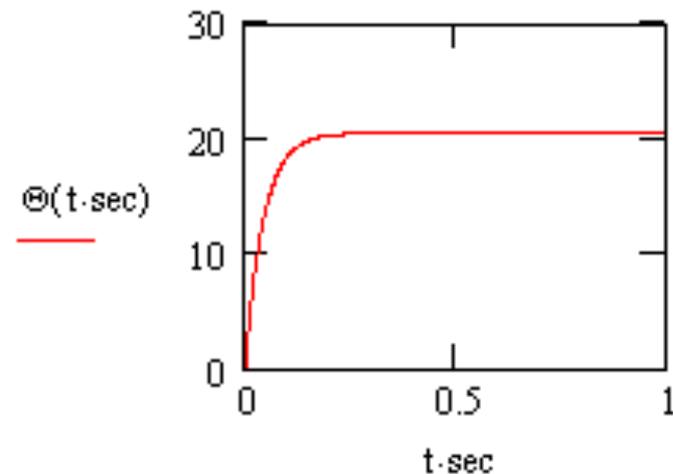
Poiché la costante di tempo elettrica è molto più piccola della costante di tempo termica, possiamo approssimare la potenza dissipata per effetto joule come una costante di valore pari alla potenza attiva calcolata a regime permanente sinusoidale. In tal caso, otteniamo un andamento “plausibile della temperatura” nel conduttore al variare del tempo

Problema termico

In figura riportiamo l'andamento della temperatura in un conduttore cilindrico ottenuto tramite integrazione dell'equazione dello scambio termico considerando il conduttore alla temperatura ambiente all'istante iniziale (i.e :

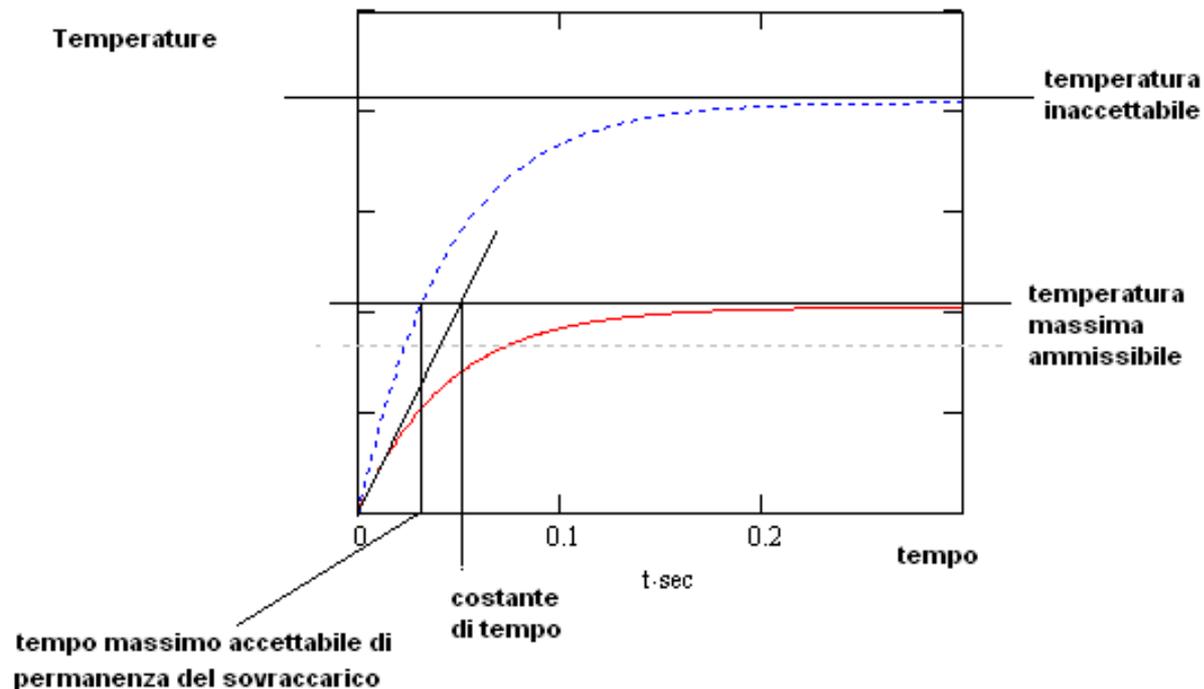
$$\Theta^{\Delta}(0) = 0$$

$$\Theta(t) := \frac{P}{\lambda \cdot A} \cdot \left(1 - e^{-\lambda \cdot \frac{A}{c_T \cdot S \cdot \text{lungh}} \cdot t} \right)$$



Portata di un conduttore

Ovviamente, a regime permanente è necessario che la temperatura massima raggiunta sia non superiore alla temperatura ammissibile per preservare la durata di vita del conduttore.



Portata

La temperatura massima ammissibile è relativa ad una potenza dissipata per effetto joule, cioè ad un valore massimo di corrente a regime:

$$\frac{\rho \cdot a}{S} \cdot I_z^2 = \Theta_{\max}^{\Delta} \cdot \lambda \cdot A$$

$$I_z^2 = \frac{\Theta_{\max}^{\Delta} \cdot \lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} \cdot S \cdot a}{\rho \cdot a} = \frac{\Theta_{\max}^{\Delta} \cdot \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S^{\frac{3}{2}}}{\rho}$$

$$I_z = \sqrt{\frac{\Theta_{\max}^{\Delta} \cdot \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi}}{\rho}} \cdot S^{\frac{3}{4}} = K \cdot S^{\frac{3}{4}}$$

Sovracorrenti

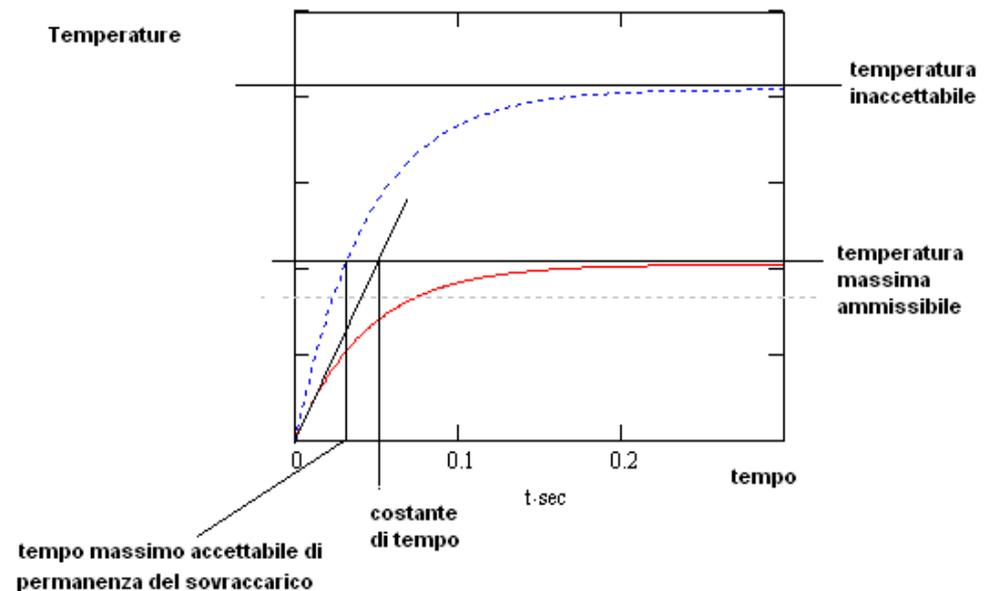
Ogni valore di corrente che a regime supera il valore della portata è detto sovracorrente.

Le sovracorrenti sono di due tipi:

- Sovraccarico
- Cortocircuito

Sovraccarico

Il sovraccarico consiste in una iper-sollecitazione del conduttore quando l'utenza assorbe una potenza non ammissibile. Il sovraccarico è compatibile con la curva di riscaldamento del conduttore.



Cortocircuito

Il Cortocircuito è un guasto per cui due parti dell'impianto, che nel normale funzionamento devono trovarsi elettricamente isolate tra loro, si vengono a trovare a diretto contatto elettrico.

Il cortocircuito comporta due gravi sollecitazioni:

- 1) Sforzi Elettrodinamici
- 2) Stress Termico

Corrente totale di cortocircuito

L'intensità della corrente di cortocircuito dipende:

- 1) Dal tipo di cortocircuito (trifase, bifase, fase neutro, a terra)
- 2) Dal punto in cui avviene il guasto rispetto al quadro di alimentazione

La massima corrente di cortocircuito è

- Di tipo Trifase
- Nel punto più prossimo all'alimentazione (partenza della linea)

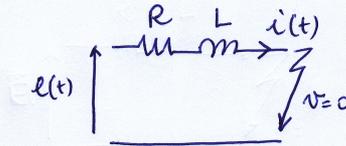
La minima corrente di cortocircuito è

- Di tipo Fase-Neuro (Bifase se il neutro non è distribuito)
- Nel Punto più prossimo al terminale di linea (arrivo).

Il cortocircuito



Corrente di corto circuito



$$e(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{con } e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \gamma')$$

Soluzioni:

$$i(t) = i_p(t) + i_{tr}(t)$$

↑
Componente
permanente

↑
componente
transitoria

$$\left\{ \begin{array}{l} i_p(t) = \sqrt{2} \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \gamma' - \varphi) \quad \text{con } \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \\ i_{tr}(t) = \sqrt{2} \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\varphi - \gamma') \cdot e^{-\frac{R}{L} t} \end{array} \right.$$

Il cortocircuito

$$E := 230$$

$$I_p := \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}$$

VALORE EFFICACE DELLA COMPONENTE SIMMETRICA

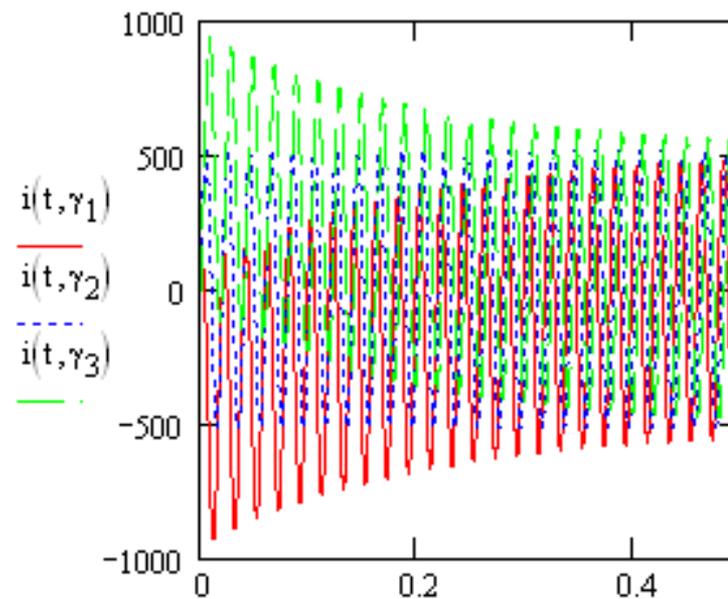
$$i(t, \gamma) := \sqrt{2} \cdot I_p \cdot \left(\sin(\omega \cdot t + \gamma - \varphi) + \sin(\varphi - \gamma) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$\gamma_1 := \varphi + 1$$

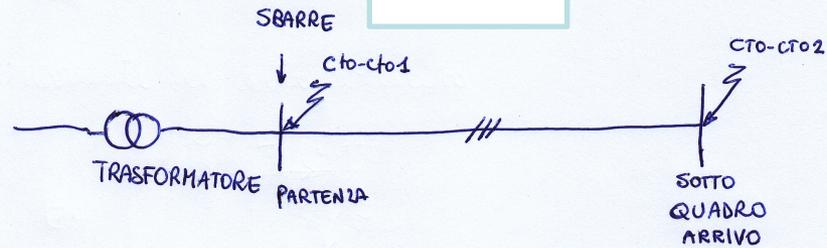
$$\gamma_2 := \varphi$$

$$\gamma_3 := \varphi - 1$$

$$t := (0, 10^{-4} .. 0.5) \cdot \text{sec}$$



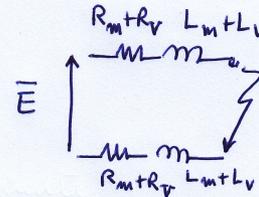
Il cortocircuito



MAX: CTO-CTO 1 TRIFASE FRANCO

$$I_{P1} = \frac{E}{\sqrt{R_{\text{moute}}^2 + (WL_{\text{moute}})^2}} =$$

MIN: CTO-CTO 2 FASE-NEUTRO



$$I_{P2} = \frac{E}{2 \sqrt{(R_m + R_v)^2 + \omega^2 (L_m + L_v)^2}}$$

$$I_{P1} < I_{P2}$$

Il cortocircuito

Per definire nel linguaggio tecnico l'intensità del cortocircuito, si usa definire l'intensità della corrente di cortocircuito con il valore efficace della componente simmetrica I_p .

Mentre, invece di parlare della costante di tempo t si fornisce il fattore di potenza di cortocircuito $\cos \phi$ perché $j / \omega = t$.

Effetti termici del Cortocircuito

Il corto circuito deve essere subito interrotto da opportuni sistemi di protezione. Essi intervengono in tempi dell'ordine decine di ms (pochi periodi a 50Hz).

Ciò fa sì che all'atto dell'interruzione lo scambio termico con l'ambiente non si sia attivato. Il fenomeno viene dunque studiato nell'ipotesi di adiabaticità. Ciò significa porre $I=0$ nell'equazione dello scambio termico:

$$p_j(t) = c_T \frac{d\Theta^\Delta(t)}{dt}$$

Energia specifica: Integrale di Joule

Sviluppando, dobbiamo ora tener conto che la resistività è anch'essa crescente con la temperatura:

$$\rho(1 + \alpha\Theta^\Delta(t)) \frac{1}{S} i(t)^2 = c_T \frac{d\Theta^\Delta(t)}{dt}$$

$$\rho(1 + \alpha\Theta^\Delta(t)) \frac{1}{S} i(t)^2 = c_T S \frac{d\Theta^\Delta(t)}{dt}$$

$$i(t)^2 dt = c_T S^2 \frac{d\Theta^\Delta(t)}{\rho(1 + \alpha\Theta^\Delta(t))}$$

$$\int_0^{t^*} i(t)^2 dt = \int_0^{\Theta^\Delta(t^*)} \frac{c_T S^2 d\Theta^\Delta(t)}{\rho(1 + \alpha\Theta^\Delta(t))}$$

Lo calcola il Costruttore dei cavi →

$$\int_0^{\Theta^\Delta_{\max}} \frac{c_T S^2 d\Theta^\Delta(t)}{\rho(1 + \alpha\Theta^\Delta(t))} = K^2 S^2$$

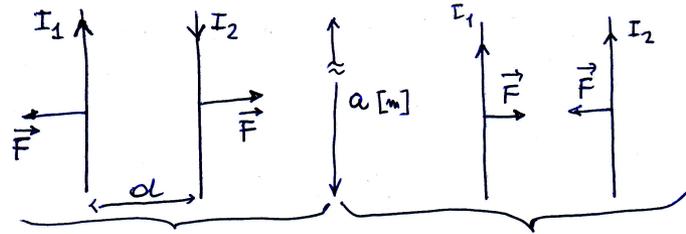
Lo determina il costruttore dell'interruttore →

$$\int_0^{t_{\text{intervento}}} i(t)^2 dt$$

Effetti del cortocircuito: Sforzi Elettrodinamici



Sollecitazione elettrodinamica



$$|\vec{F}| = \frac{\mu_0 a I_1 I_2}{2\pi d}$$

se $I_1^{(+)} = I_2^{(+)} = I_M \sin \omega t$

$$|\vec{F}| = f(t) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot a \cdot I_M^2 \sin^2 \omega t}{2\pi d} \quad [N]$$

attenzione che nel cortocircuito c'è anche la componente transitoria che può far raddoppiare, momentaneamente, l'intensità delle forze $|\vec{F}|$.

Sovratensioni

Mentre le sovratensioni sollecitano termicamente e elettrodinamicamente un conduttore, altre anomalie di servizio riguardano le Sovratensioni che sollecitano l'isolamento.

Le sovratensioni (valore di tensione superiore a quello nominale) si distinguono in:

- sovratensioni **di origine atmosferica**, legate ai fulmini che possono colpire direttamente le apparecchiature elettriche o essere a loro trasmessi dalle linee aeree; hanno forma impulsiva unidirezionale (fenomeni molto rapidi $\tau \cong 1 \mu\text{s}$);
- sovratensioni **interne**, originate da manovre effettuate nell'esercizio dell'impianto (per esempio apertura di circuiti induttivi, fenomeni lenti $\tau \cong 1 \text{ms}$).

Organi di manovra e protezioni

Per potere utilizzare in sicurezza l'energia elettrica sono inseriti nell'impianto degli organi di manovra e dei sistemi di protezione.

Gli **organi di manovra** devono consentire il funzionamento dell'impianto in condizioni normali. Essi sono costituiti dagli interruttori e dai sezionatori,

- gli **interruttori** sono in grado di **aprire e chiudere un circuito a carico**;
- i **sezionatori** sono in grado di **aprire e chiudere un circuito a vuoto**.

Gli **organi di protezione** devono intervenire, in caso di guasto, per proteggere i dispositivi elettrici (protezione dalle sovracorrenti e dalle sovratensioni) e le persone (protezione dai contatti diretti od indiretti). Essi sono costituiti da:

- **interruttori automatici** (interruttori comandati automaticamente da un dispositivo che prende il nome di **relè**).
- **fusibili**;
- **scaricatori di tensione**;
- **impianto di terra**.



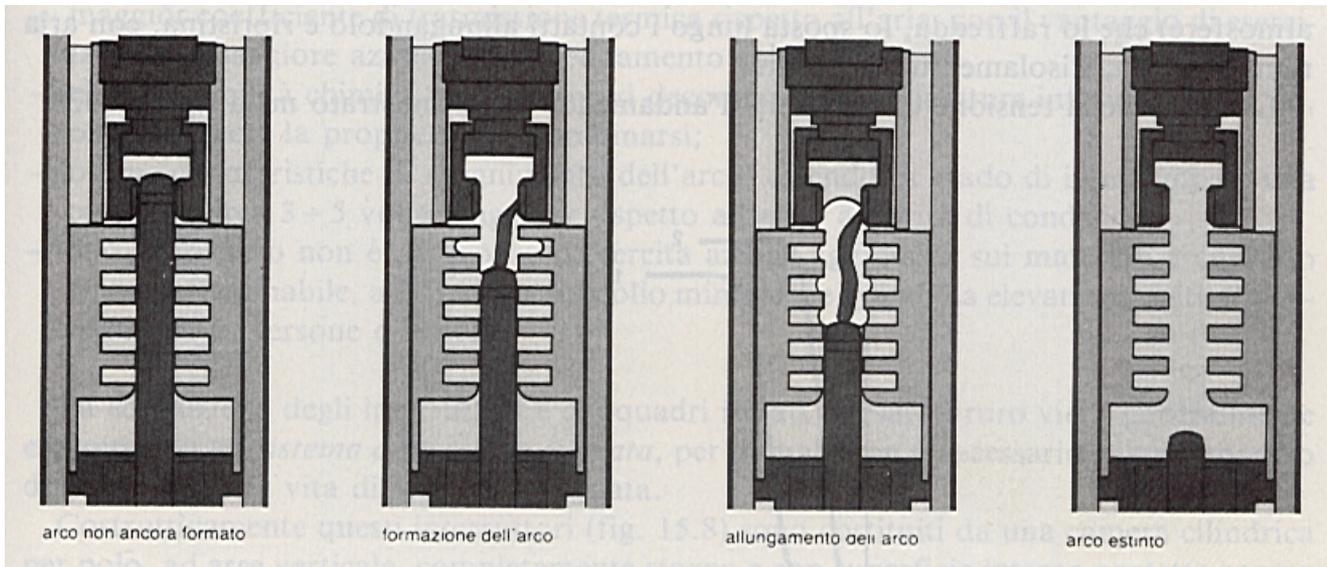
Simboli dell'interruttore manuale (a) ed automatico (b).

Protezione dalle Sovracorrenti:INTERRUTTORI

Un interruttore è generalmente realizzato mediante due elettrodi: uno fisso ed uno mobile.

- Nella posizione di interruttore chiuso l'elettrodo mobile è pressato contro l'elettrodo fisso.
- Nella posizione di interruttore aperto l'elettrodo mobile è separato dall'elettrodo fisso da uno spessore di materiale isolante

Durante il processo di apertura dell'interruttore, al momento del distacco dell'elettrodo mobile da quello fisso, nasce un arco elettrico ($E = V/d > K =$ rigidità dielettrica del materiale isolante) che si estingue prima che l'elettrodo mobile abbia raggiunto la posizione di fine corsa, corrispondente allo stato di interruttore aperto.



Esempio di
interruttore in
olio per MT

Protezione dalle Sovracorrenti:INTERRUTTORI

TIPI DI INTERRUTTORI

- Interruttori in olio
- Interruttori ad aria compressa
- Interruttori ad esafluoruro di zolfo (SF_6)
- Interruttori in aria a deionizzazione magnetica (DEION)
- Interruttori sotto vuoto

PRINCIPALI CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEGLI INTERRUTTORI

- **Tensione nominale:** tensione che l'interruttore è in grado di sostenere indefinitamente nella posizione di interruttore aperto.
- **Corrente nominale:** corrente che l'interruttore è in grado di sostenere indefinitamente nella posizione di interruttore chiuso.
- **Potere di interruzione:** massima corrente (valore efficace se in corrente alternata) che l'interruttore è in grado di interrompere
- **Potere di Chiusura:** massima corrente (valore efficace se in corrente alternata) che permette la richiusura dei contatti per manovra di chiusura su cortocircuito

Sganciatori Relè Termici e Magnetici

Un interruttore automatico, sottoposto a una corrente elevata, apre automaticamente il circuito, su comando dei propri sganciatori, secondo una caratteristica d'intervento tempo-corrente.

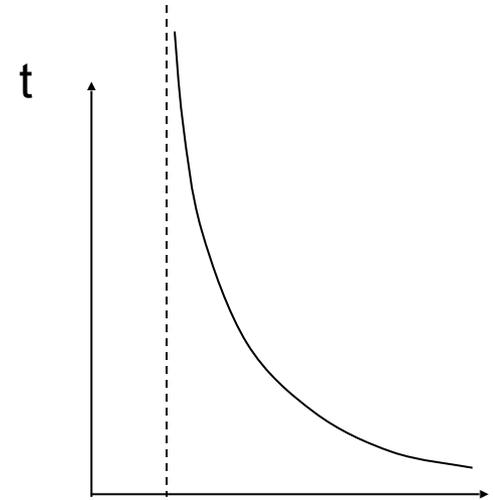
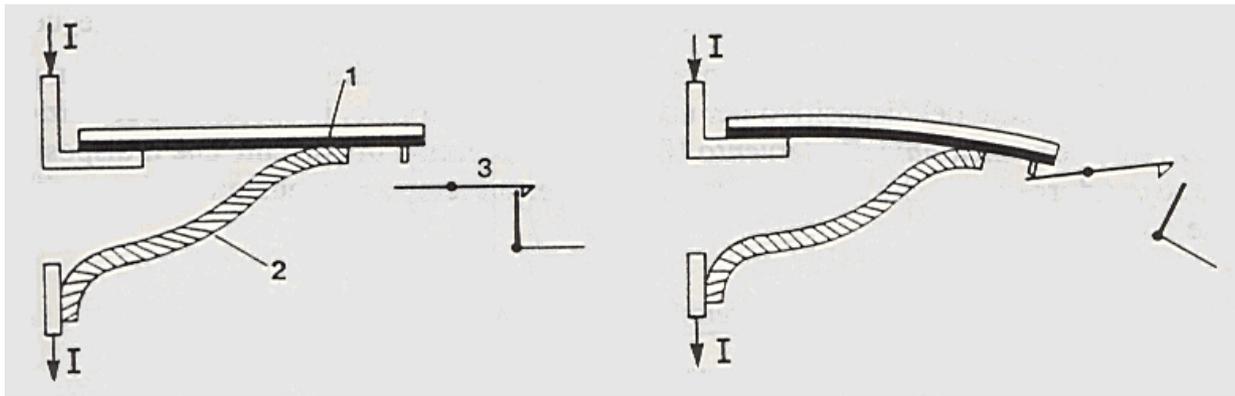
Tempo d'intervento (o apertura): tempo intercorrente tra l'istante in cui la corrente raggiunge il valore di funzionamento degli sganciatori e l'istante in cui i contatti dell'interruttore risultano separati su tutti i poli.

Gli sganciatori generalmente sono di due tipi: **termico e magnetico**.

Per sovracorrenti di debole intensità è lo sganciatore termico a provocare l'intervento dell'interruttore, secondo tempi tanto più brevi quanto più grande è la corrente. **sovraccarico**

Per correnti di elevato valore, lo sganciatore magnetico provoca l'apertura istantanea dell'interruttore, cioè senza ritardo intenzionale. **cortocircuito**

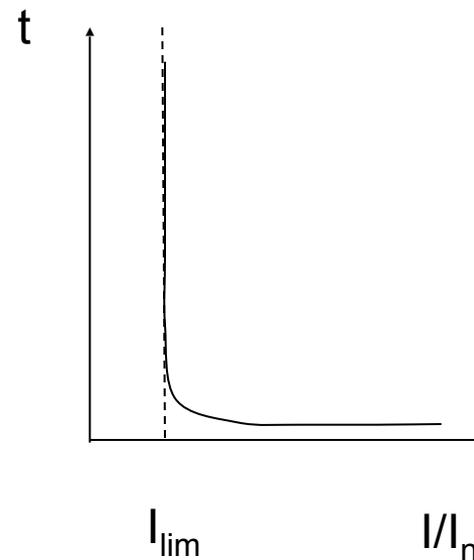
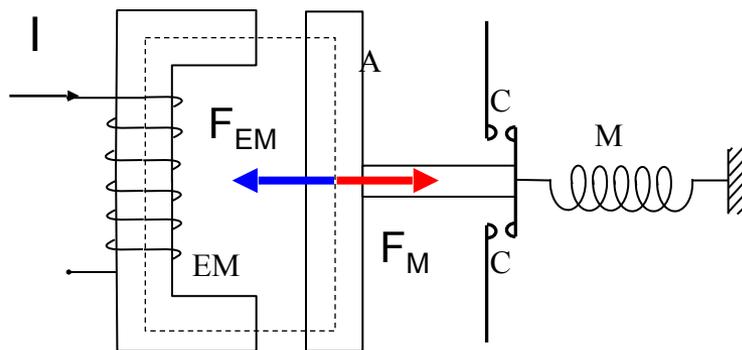
RELÈ TERMICO



Il **relè termico** più semplice è costituito da una lamina bimetallica.

- Ad ogni valore della corrente I corrisponde un valore della temperatura di regime della lamina, tanto più alto quanto più elevato è il valore della corrente.
- Tanto più alta è la temperatura della lamina, tanto maggiore è la curvatura della stessa, dovuta al diverso valore del coefficiente di dilatazione termica dei metalli costituenti.
- Quando la temperatura raggiunge il valore di intervento, la curvatura della lamina fa sì che venga attivato il meccanismo di apertura dell'interruttore.
- **Il tempo di intervento è tanto più breve quanto più alta è la sovracorrente.**

RELÈ MAGNETICO



Il **relè magnetico** è costituito da un nucleo di materiale ferromagnetico diviso in una parte fissa (EM) ed una parte mobile (A). La parte mobile è tenuta in posizione da una **forza di natura magnetica** (F_{EM}), proporzionale alla corrente I , ed una **forza di natura meccanica**, dovuta alla molla M.

- Ad ogni valore della corrente I corrisponde una posizione di equilibrio della parte mobile, tanto più prossima alla parte fissa quanto più elevato è il valore della corrente.
- Quando la corrente raggiunge il valore di intervento, la posizione di equilibrio della parte mobile fa sì che venga attivato il meccanismo di apertura dell'interruttore.
- **Il tempo di intervento è molto breve, praticamente indipendente dal valore della corrente.**

Caratteristiche d'intervento

Corrente convenzionale di non intervento (I_{nf}): valore specificato di corrente che non provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore per un intervallo di tempo convenzionale.

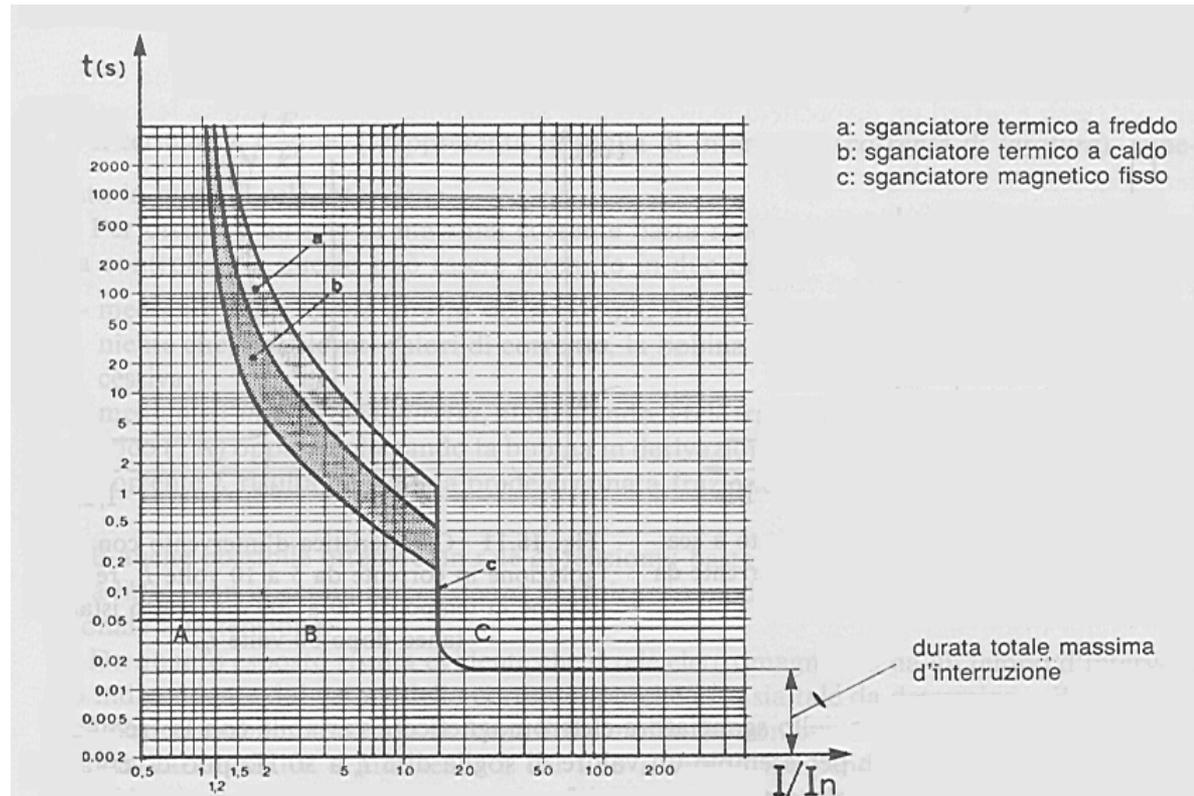
Corrente convenzionale di intervento (I_f): valore specificato di corrente che provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore entro un intervallo di un tempo convenzionale.

<i>Interruttori automatici</i>		I_{nf}	I_f	<i>Tempo convenzionale</i>
<i>Regolabili</i> <i>(CEI 17-5)</i>	<i>Non regolabili</i> <i>(CEI 23-3)</i>			
	I_n	$1.13 I_n$	$1.45 I_n$	1h
$I_r < 63 \text{ A}$	-	$1.05 I_r$	$1.3 I_r$	1h
$I_r > 63 \text{ A}$	-	$1.05 I_r$	$1.3 I_r$	2h

I_r è la corrente di regolazione del dispositivo

RELÈ MAGNETO-TERMICO

Il relè magneto-termico è costituito da un relè magnetico ed un relè termico le cui correnti di intervento sono coordinate in modo che:

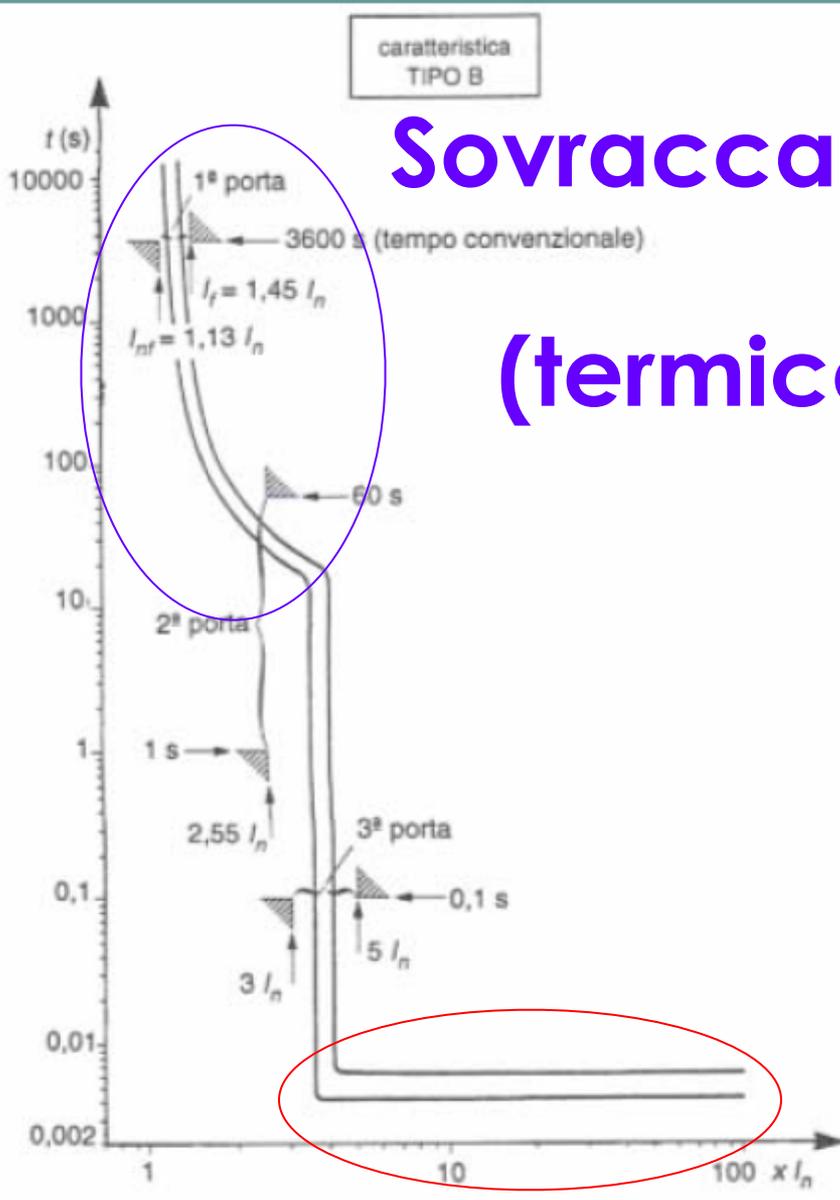


- il relè magnetico interviene rapidamente solo in caso di sovracorrenti di elevata intensità (15-20 volte quella nominale), sicuramente dovute a corto-circuiti presenti nell'impianto.

- Il relè termico interviene con un tempo di intervento inversamente proporzionale alla intensità della sovracorrente in caso di sovracorrenti di modesta entità (sovraccarichi) che possono anche essere dovute a "normali" transitori dell'impianto.

Sovraccarichi

(termico)

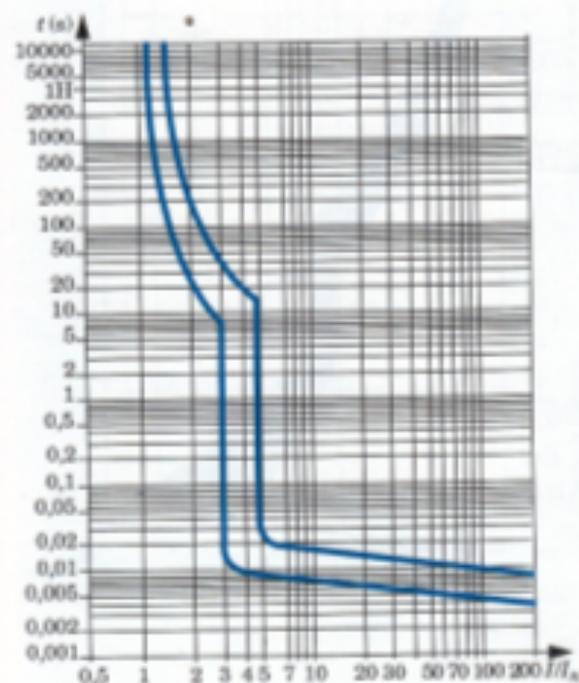


Le norme non stabiliscono la forma che deve avere la caratteristica di intervento ma solo alcune porte entro cui deve essere contenuta. In relazione alla posizione delle porte si distinguono gli interruttori per impianti domestici e similari di tipo B, C e D.

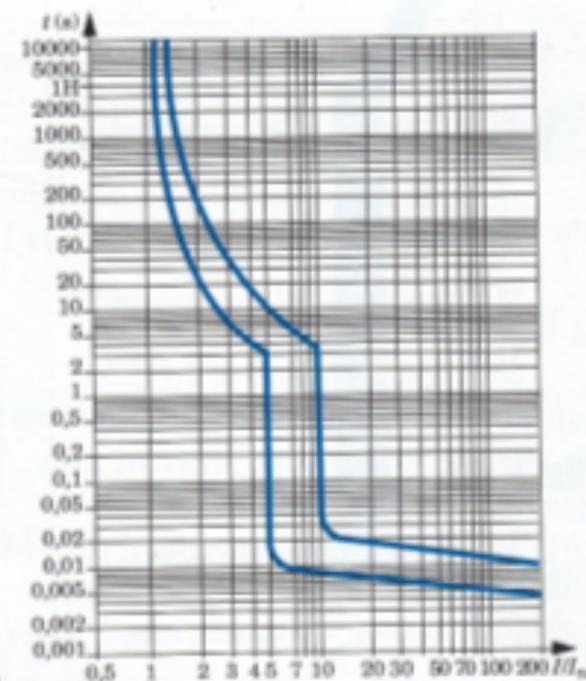
Cortocircuiti

(magnetico)

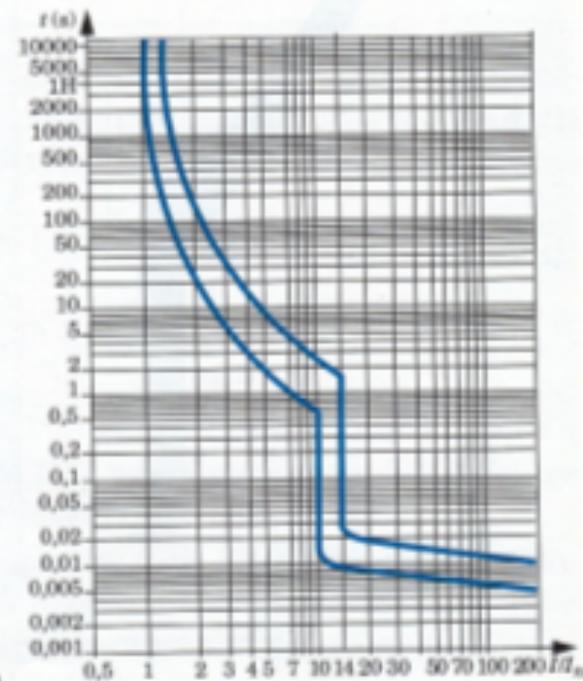
Caratteristica d'intervento tipo B secondo la norma CEI EN 60898 (produzione Schneider Electric spa).



Caratteristica d'intervento tipo C secondo la norma CEI EN 60898 (produzione Schneider Electric spa).

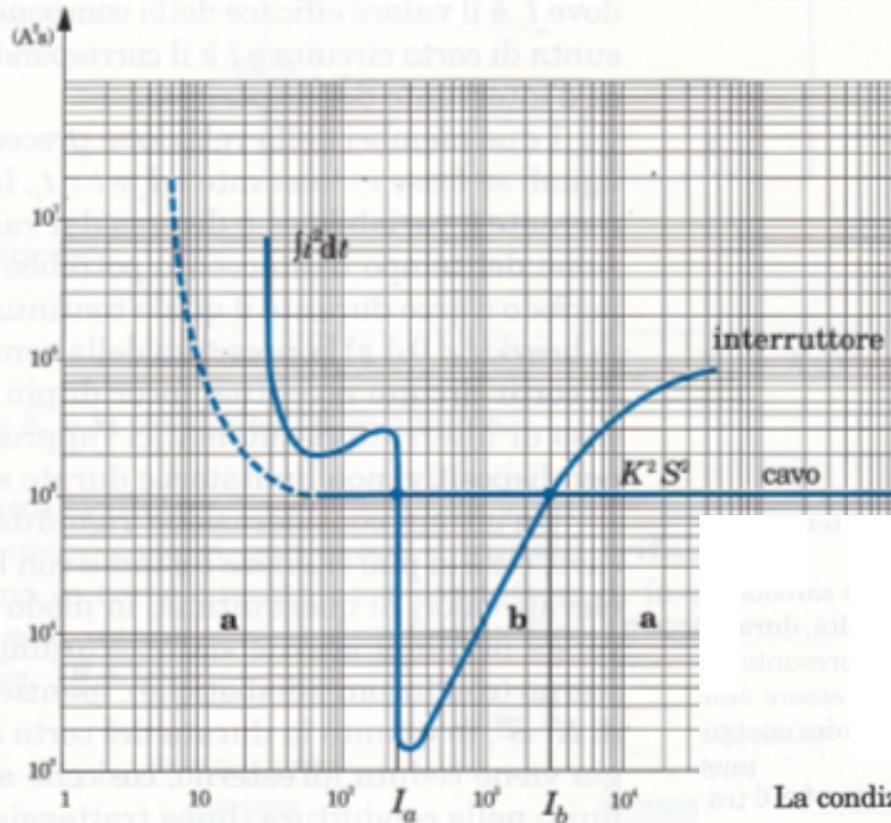


Caratteristica d'intervento tipo D (produzione Schneider Electric spa). Secondo la norma CEI EN 60898 l'intervento magnetico può arrivare fino a 20 I_n .



Energia specifica

Confronto tra le energie specifiche di un cavo e di un interruttore.

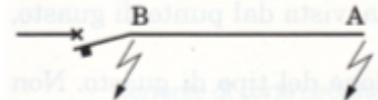


- a Protezione non conforme
- b Protezione conforme

La condizione $\int_0^t i^2 dt \leq K^2 S^2$ è verificata solo nella **zona b** e quindi per

valori della componente simmetrica della corrente presunta di corto circuito compresi tra i limiti I_a e I_b .

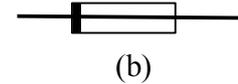
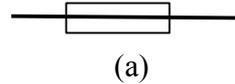
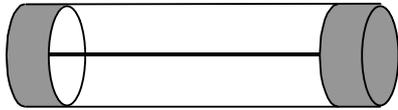
Il valore I_a rappresenta il limite inferiore della corrente minima di corto circuito, a fine linea, mentre I_b è il limite superiore della corrente massima di corto circuito a inizio linea (in modo da non considerare l'effetto limitatore del cavo). Si hanno pertanto due punti critici, A e B



Fusibili

Mentre gli interruttori sono organi di protezione e manovra, i fusibili sono solo organi di protezione. Il loro principio di funzionamento è semplicissimo. Essi sono inseriti in serie al componente da proteggere e sono realizzati con un conduttore che si distrugge termicamente se un determinato valore di corrente lo attraversa per un certo tempo. Quindi il fusibile si “sacrifica” immolandosi al posto del componente.

FUSIBILE



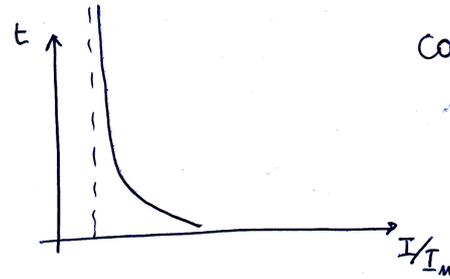
I fusibili sono i più semplici dispositivi di protezione contro le sovracorrenti. Sono costituiti essenzialmente da un corto conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato entro un apposito contenitore. Il simbolo del fusibile è riportato in figura (a); il simbolo di figura (b) si riferisce invece al fusibile dotato di indicazione a tratto spesso dell'estremo che rimane in tensione dopo l'intervento.

Dopo l'intervento, il fusibile va sostituito per ristabilire la connessione elettrica dell'impianto.

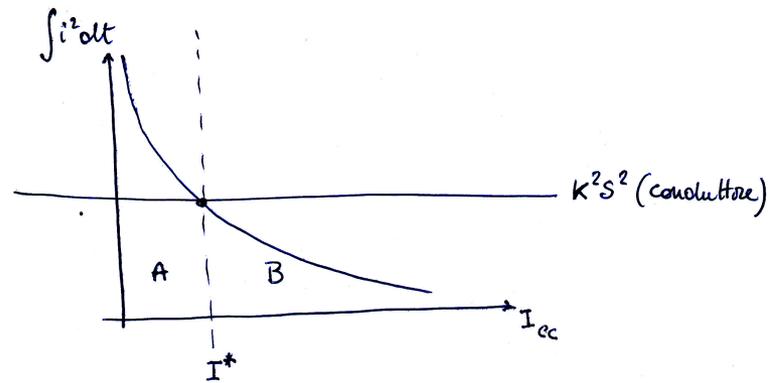
Fusibile: Caratteristica d'intervento



FUSIBILE



Caratteristiche
d'intervento

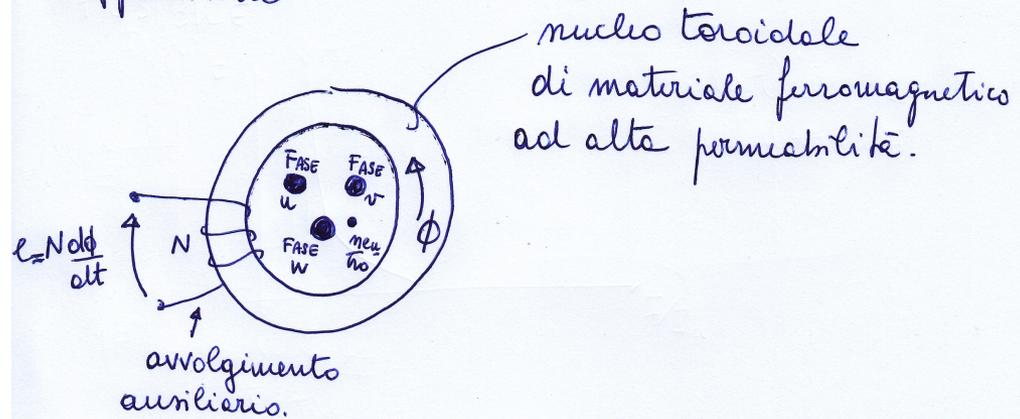


A = zona protetta

B = zona non-protetta

I^* è tanto più piccolo quanto più la linea
è lunga \Rightarrow Esiste una lunghezza massima oltre
la quale il conduttore non è più protetto.

Differenziale



- In assenza di guasto a terra $\phi \approx 0$ perché è nullo la somma delle correnti di ciascuna fase e del neutro: $\bar{I}_u + \bar{I}_v + \bar{I}_w + \bar{I}_N = 0$ e quindi $\frac{d\phi}{dt} = 0$.
- In presenza del guasto invece $\bar{I}_u + \bar{I}_v + \bar{I}_w + \bar{I}_N \neq 0$ perché una fase, quella a terra, trasporta una corrente che non si richiude né nelle altre due fasi, né nel neutro. Allora sarà $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$ e sorgere una tensione ai capi dell'avvolgimento ausiliario che potrà essere utilizzata come il segnale di presenza di guasto a terra.