

**ISIS NAUTICO
“TOMASO DI SAVOIA DUCA DI GENOVA”
TRIESTE**

**LEZIONI DI
ELETTROTECNICA ed ELETTRONICA**

**CLASSI QUINTE
CAPITANI E MACCHINISTI**

Prof. A. Pascutti

**A cura di Alessio Glavina,
classe 5°A a.s. 2009/10**

1° parte

INDICE:

MODULO DI ELETTROTECNICA

- I. Le sinusoidi**
- II. Corrispondenza biunivoca tra un vettore e una sinusoide**
- III. Vettori e numeri complessi**
- IV. Notazione binomia e polare**
- V. Operazioni con i numeri complessi**
- VI. Impedenze in serie e in parallelo**
- VII. Fattore di potenza**
- VIII. Rifasamento**
- IX. Parallelo di due impedenze**
- X. Linee elettriche**
- XI. Dimensionamento di una linea**
- XII. Dati di targa**
- XIII. Sistemi trifase**
- XIV. Pericolosità della corrente elettrica e protezioni**

CAPITOLO I

LE SINUSOIDI

► **RETI IN REGIME ALTERNATO:** la maggior parte dei circuiti elettrici di potenza è in regime alternato sinusoidale, ovvero:

1. REGIME ALTERNATO SINUSOIDALE MONOFASE
2. REGIME ALTERNATO SINUSOIDALE TRIFASE

Nel monofase la tensione nominale è $V=220\text{ V}$ mentre nel trifase è $V=380\text{ V}$.

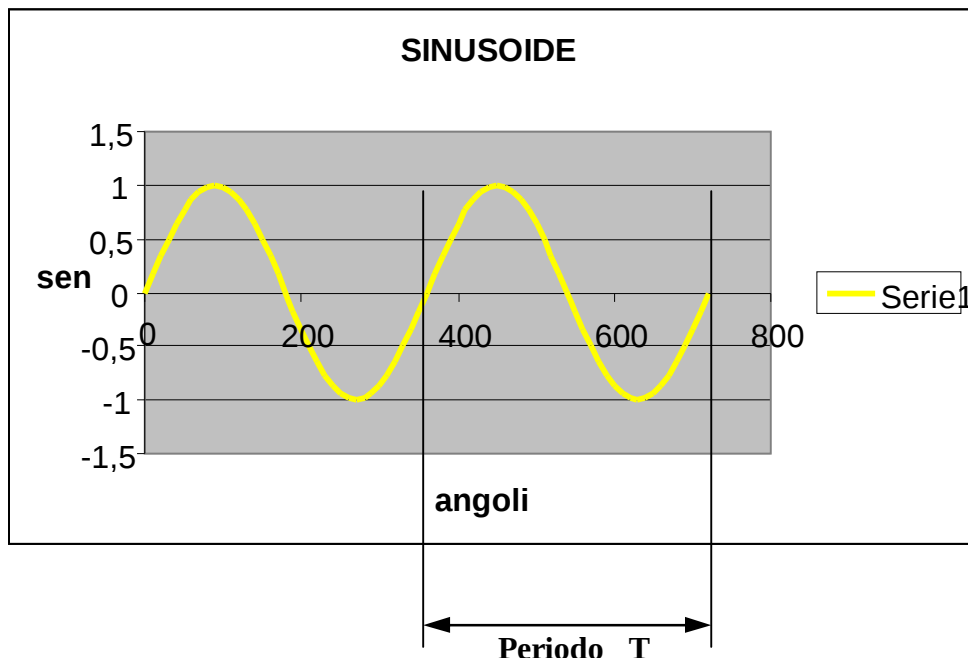
La normativa (norme CEI) definisce **basse tensioni** quelle da 25 V a 1000 V , **medie tensioni** da 1001 V a 20.000 V ed **alte tensioni** da 20.001 V a 380.000 V . Esistono inoltre le **tensioni bassissime** che vanno da 0 V a 24 V .

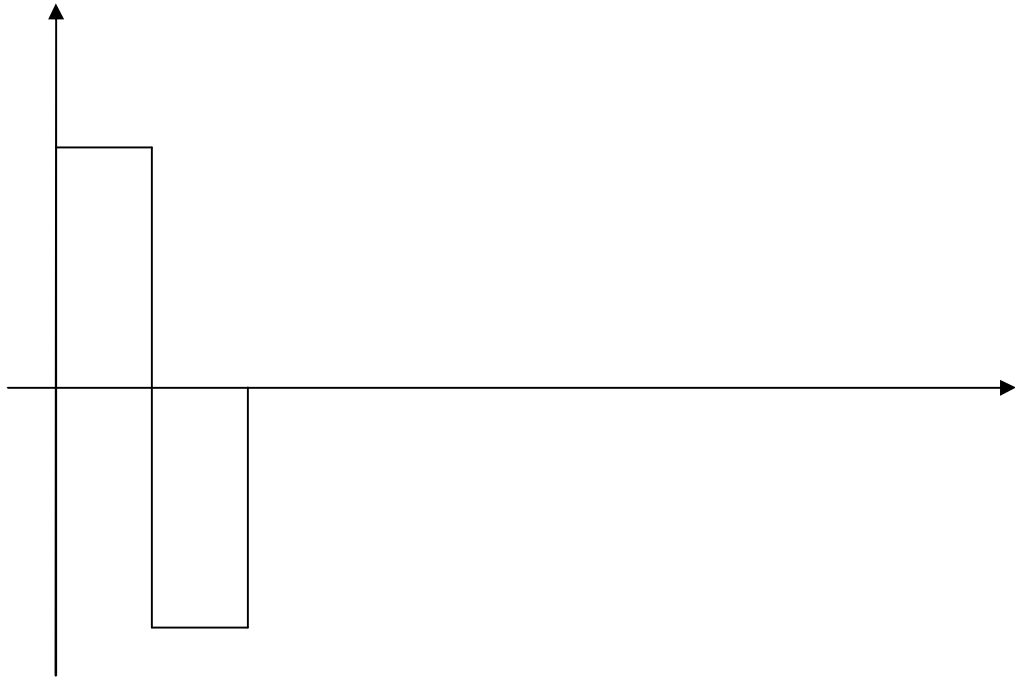
Le basse, medie e alte servono per trasmettere energia elettrica mentre le **bassissime** sono usate per trasmettere segnali elettrici.

I circuiti di trasmissioni dell'energia funzionano con sinusoidi da 50 o 60 Hz .

Mentre i segnali di bassissima tensione possono avere più valori di frequenza, ad esempio: il segnale di clock (del computer) ha una frequenza di $2,64\text{ GHz}$ con una tensione di $\pm 5\text{ V}$ o $2,46\text{ V}$.

► **DEFINIZIONE DI FREQUENZA:** la frequenza indica quante volte una certa “cosa” si ripete in un secondo.





Questo grafico rappresenta la frequenza del clock del computer, che è a 2,4GHz in questo tipo di sinusoide!!!

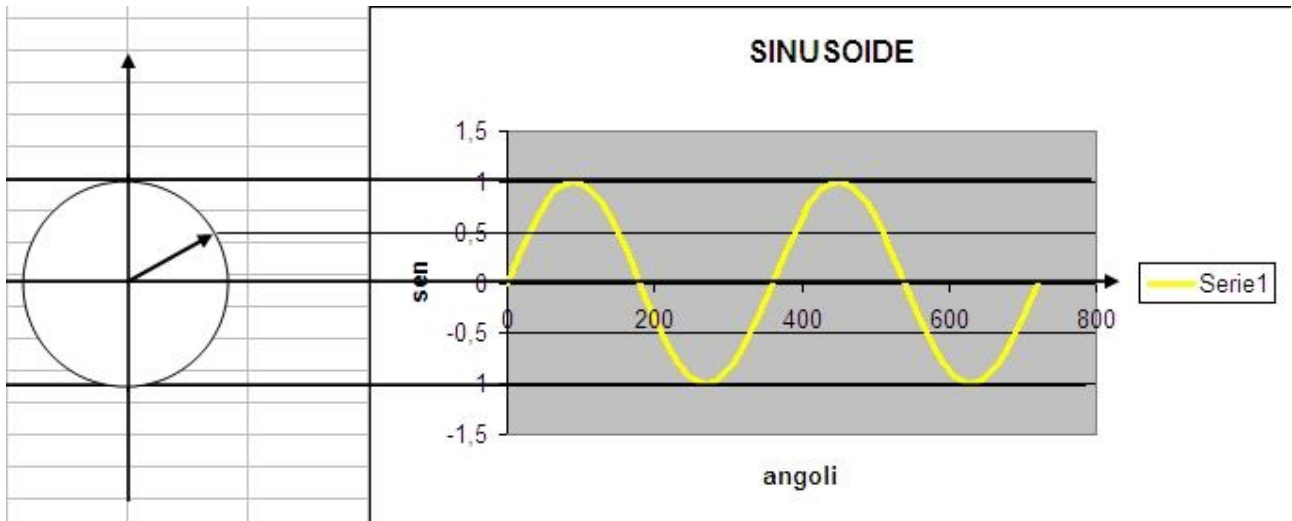
PERIODO (T) = ossia il tempo impiegato per sviluppare un ciclo.

$50 * T = 1 \text{sec}$	$2,4 * 10^9 * T = 1 \text{sec}$
$T = \left(\frac{1}{50} \right)$	$T = \left[\frac{1}{2.4 * 10^9} \right]$

$$f * T = 1$$

$$T = \left(\frac{1}{f} \right) = f^{-1}$$

La sinusoide è legata al moto circolare uniforme perciò...



Dal grafico si osserva che il moto circolare uniforme è associato a una sinusoide.
Nel moto circolare uniforme si definisce la velocità angolare:

<u>MOTO LINEARE</u>	<u>MOTO CIRCOLARE</u>
$v = \left(\frac{s}{t} \right)$	$\omega = \left(\frac{\alpha}{t} \right)$
$\left[\frac{m}{s} \right]$	$\left[\frac{rad}{s} \right]$
$\left[\frac{km}{h} \right]$	$\left[\frac{deg}{s} \right]$

$$\omega = \left(\frac{\alpha}{t} \right) \quad \text{Se } \alpha = \text{angolo giro} = 2\pi$$

$$\alpha = \omega * t \quad t = \text{tempo impiegato per un ciclo} = \text{periodo}(T)$$

$$\left(\frac{1}{T} \right) = f$$

$$\omega = \left(\frac{2\pi}{T} \right) = 2\pi * \left(\frac{1}{T} \right) = 2\pi f$$

Di conseguenza la velocità angolare è legata alla frequenza dell'onda:

Frequenza	$\omega=2\pi f$
50	$2*\pi*50=100*3,14=314 \left[\frac{rad}{s} \right]$
60	$2*\pi*60=120*3,14=377 \left[\frac{rad}{s} \right]$

NUMERO DI GIRI E FREQUENZA:

Il numero di giri, ad esempio di un albero motore, indica quanti giri fa il corpo in un minuto. Per trasformarlo in frequenza andiamo a trovare quanti giri fa in un secondo.

$$n = \left(\frac{\text{num.giri}}{1 \text{ min.}} \right) \xrightarrow{\text{verde}} \left(\frac{n}{60s} \right) \xrightarrow{\text{verde}} \left(\frac{n}{60} \right) = f$$

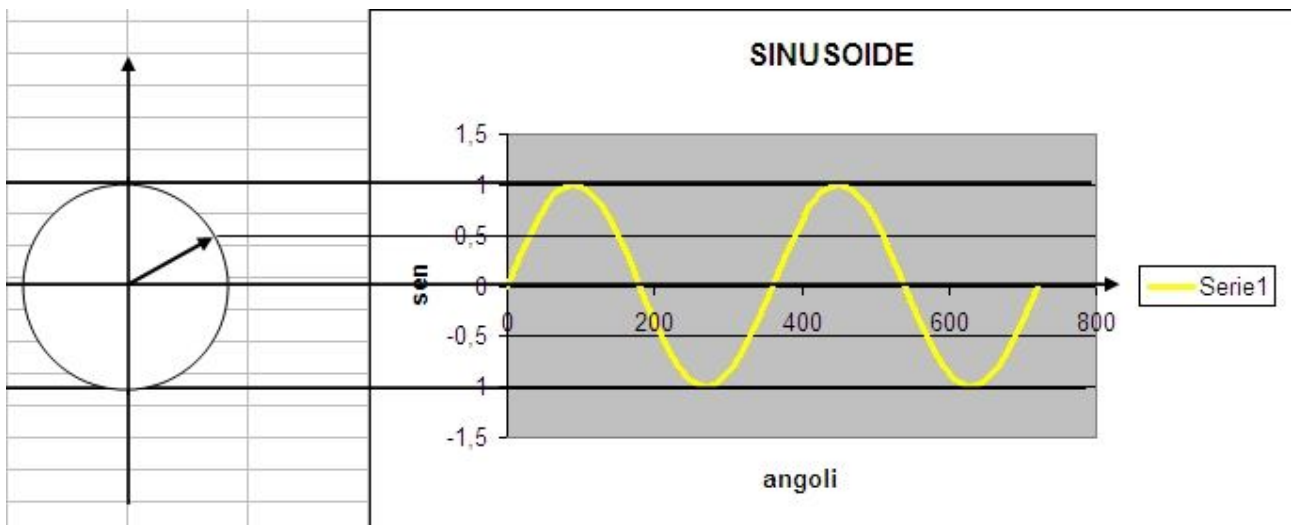
Nei motori elettrici e negli alternatori il numero di giri dipende anche dal numero di poli magnetici P.

$$n = \left(\frac{60 * f}{P} \right)$$

CAPITOLO II

CORRISPONDENZA BIUNIVOCA FRA VETTORE E SINUSOIDE

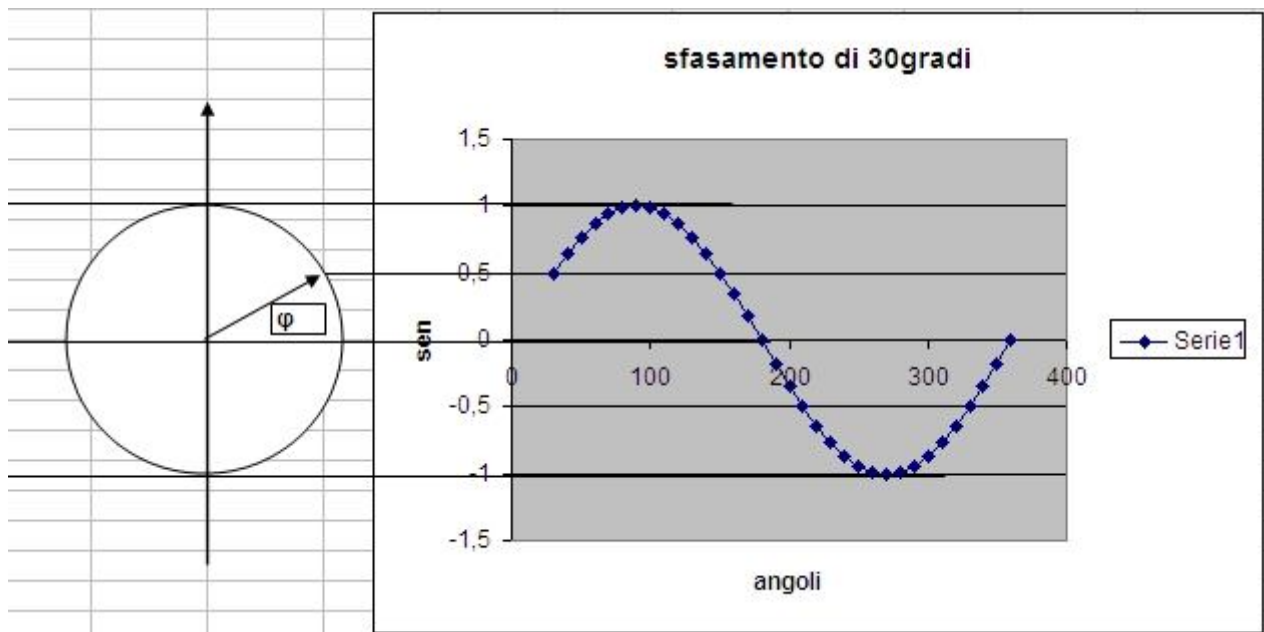
VETTORE CHE RUOTA $\longleftrightarrow$ SINUSOIDE



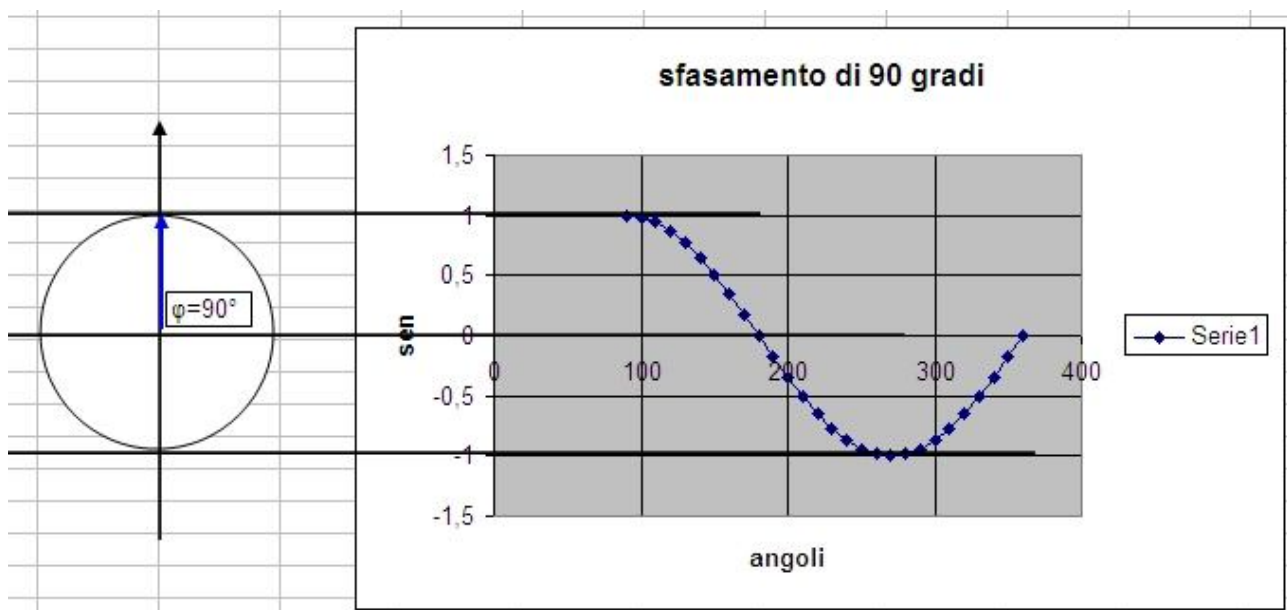
Da quest'ultimo grafico si scopre che esiste una corrispondenza biunivoca tra un vettore che ruota con velocità angolare ω e una sinusoide. In altre parole, se è noto il vettore posso costruire la sinusoide e viceversa.

Di solito si usa "fotografare" il vettore all'istante $t=0$ s

$\text{Sen}(\omega t + 30^\circ) \dots \rightarrow \varphi = 30^\circ$



$\text{Sen}(\omega t + 90^\circ) \dots \rightarrow \varphi = 90^\circ$



Il valore di A si chiama **modulo**, l'angolo φ si chiama **fase o sfasamento**.

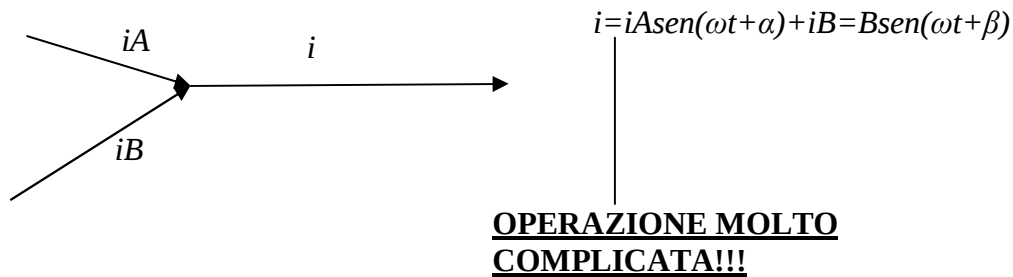
La corrispondenza biunivoca indica che le due entità sono legate assieme; nel senso che conoscendo una entità posso ricavarmi l'altra e viceversa.

Questa proprietà ci permette di studiare le grandezze sinusoidali con il metodo vettoriale. È più semplice studiare le correnti alternate sinusoidali con i vettori, perchè le sinusoidi comportano operazioni trigonometriche molto complesse che con i vettori sono facilmente eseguibili.

Ad esempio se dobbiamo sommare due correnti:

$$\dot{i}_A = A \sin(\omega t + \alpha)$$

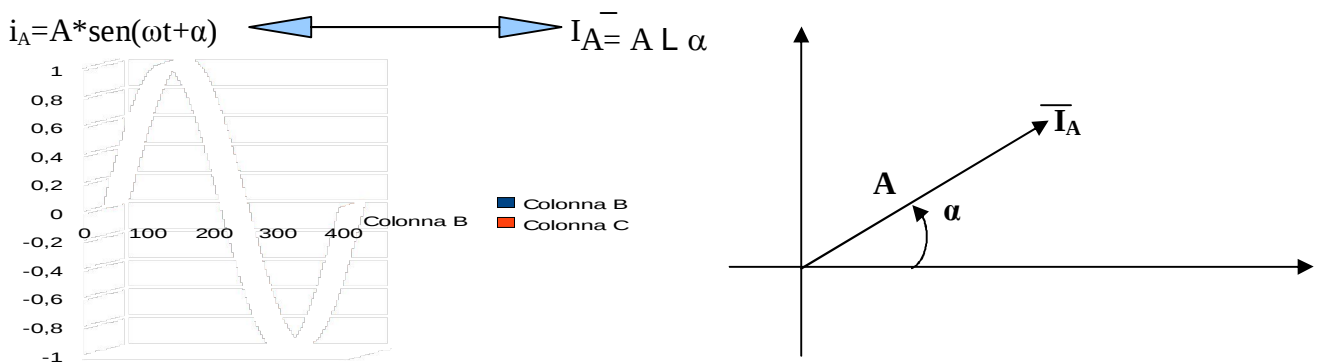
$$\dot{i}_B = B \sin(\omega t + \beta)$$



CON I VETTORI:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &\longleftrightarrow I_a = A * e^{j\alpha} = B L \alpha \\ \dot{i}_B &\longleftrightarrow I_b = B * e^{j\beta} = B L \beta \quad \mathbf{I = I_A + I_B} \\ \mathbf{I} &\longleftrightarrow i = M * \sin(\omega t + \gamma) \end{aligned}$$

Nello studio delle reti elettriche in regime alternato, per semplicità di calcolo si "trasformano" le sinusoidi in vettori, si fanno i calcoli nel campo vettoriale e alla fine si trasformano i vettori calcolati in sinusoidi.



CAPITOLO III

VETTORI E NUMERI COMPLESSI:

Un vettore è agevolmente trattato con l'uso dei numeri complessi. I numeri complessi nascono dall'estrazione della radice quadrata di un numero negativo, l'operazione è la seguente:

$$\sqrt{(-1)} = j \quad j * j = j^2$$

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad X_{12} = \frac{b}{2a} + -\sqrt{\left[\frac{b^2}{4a^2} - \frac{c}{a}\right]}$$

$\downarrow$

$-\Delta \longrightarrow [\sqrt{-1}] * |\Delta|$

$$X_{12} = \left(\frac{b}{2a}\right) + j\sqrt{|\Delta|}$$

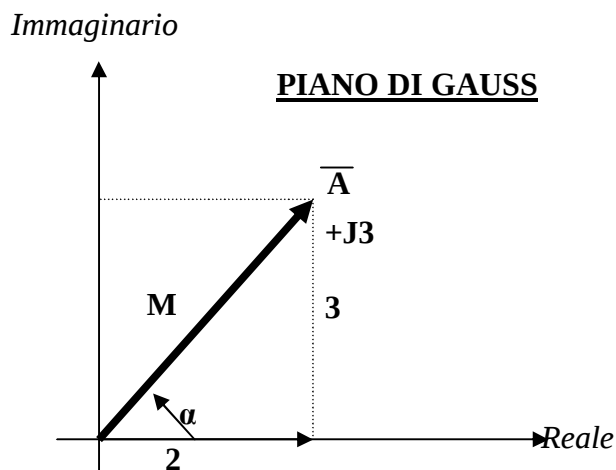
reale immaginario

La porta d'ingresso ai numeri complessi è la risoluzione dell'equazione di 2° grado. Un numero complesso è formato da una parte reale più un'altra immaginaria.

$$\overline{A} = X + jY$$

Parte immaginaria
Parte reale

$$A = 2 + j3$$



Si osserva dal disegno che un numero complesso non è altro che un vettore, per questo motivo viene anche chiamato vettore complesso. Il numero complesso è dotato di modulo e fase, che sono calcolabili con le seguenti formule.

$$M = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ Applico il teorema di Pitagora !!!}$$

$$M = \sqrt{3^2 + 2^2} = 3,61$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = 1,5$$

CAPITOLO IV

NOTAZIONE RETTANGOLARE e NOTAZIONE POLARE

Un numero complesso può essere indicato in due modi, secondo la convenienza:

FORMA BINOMIA

O

RETTANGOLARE:

FORMA POLARE

O ESPONENZIALE

$$\bar{A}=a+jb$$

$$\bar{A}=ML\alpha=M*e^{j\alpha}$$

Dalla forma rettangolare si può passare alla forma polare e viceversa.

$$M = \sqrt{a^2 + b^2} \quad ; \quad \varphi = \arctg\left[\frac{b}{a}\right]$$

$$\bar{A}=a+jb$$

$$A=ML\alpha$$

$$a = M * \cos\alpha \quad ; \quad b = M * \sin\alpha$$

esempio:

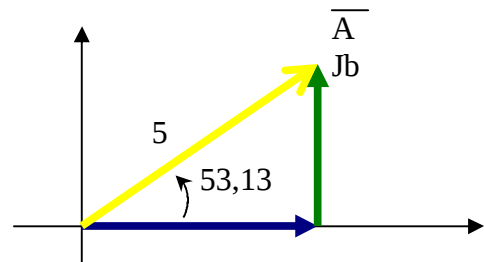
$$A=5L53,13^\circ$$

$$a=M*\cos\alpha=5*\cos(53,13^\circ)=3$$

$$b=M*\sin\alpha=5*\sin(53,15^\circ)=4$$

$$\bar{A}=3+J4$$

a



CAPITOLO V

OPERAZIONI CON I NUMERI COMPLESSI

Con i numeri complessi si possono fare tutte le operazioni matematiche esistenti. Quindi, oltre alle quattro operazioni elementari (+, -, *, /) si possono fare l'elevamento a potenza, le radici quadrate, sen, cos, tan, log, limiti, derivate, integrali, esponenziale, sen e cos iperbolici (si chiamano iperbolici perché evidentemente riguardano un' iperbole, e più precisamente alla curva definita da una catenaria, cioè da una catena appesa).

OPERAZIONI ELEMENTARI CON I NUMERI COMPLESSI

SOMMA:

La somma si esegue usando la forma rettangolare. Per la somma non è possibile usare la forma polare.

$$\underline{\bar{A}} = a + j b = M \angle \alpha$$

$$\underline{\bar{B}} = c + j d = M \angle \beta$$

$$\underline{\bar{S}} = \underline{\bar{A}} + \underline{\bar{B}}$$

$$S = a + j b +$$

$$\frac{c + j d}{(a + c) + j(b + d)}$$

esempio numerico

$$A = 3 + j4 = 5 \angle 53,13^\circ$$

$$\varphi = \arctan \left[\frac{4}{3} \right]$$

$$M = \sqrt{3^2 + 4^2}$$

$$B = 7 + j6 = 9,22 \angle 40,6^\circ$$

$$S = A + B = 3 + j4$$

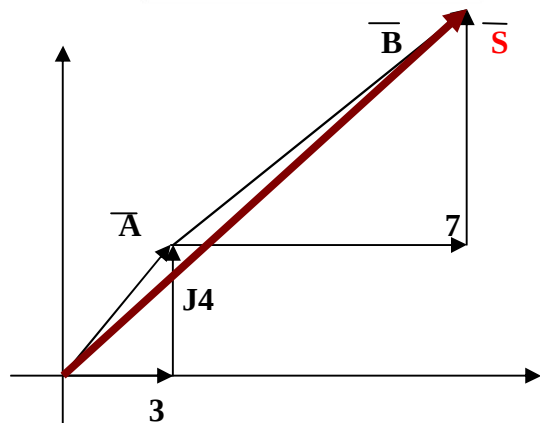
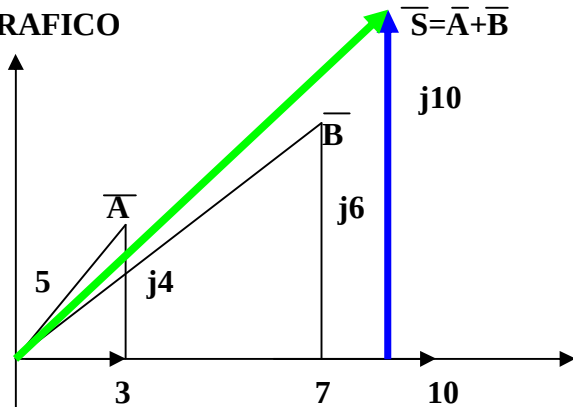
$$\frac{7 + j6}{10 + j10} = 14,1 \angle 45^\circ$$

$$A + B = 5 \angle 53,13^\circ + \frac{9,22 \angle 40,66^\circ}{14,22 \angle 93,79^\circ}$$

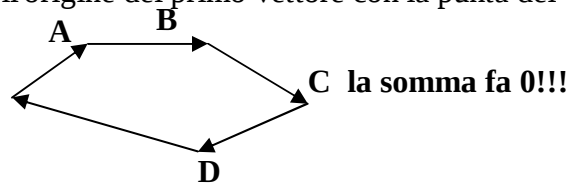
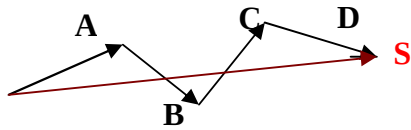


IL MODULO DELLA SOMMA NON E' UGUALE ALLA SOMMA DEI MODULI !!!!!

GRAFICO



La somma di due vettori A e B si esegue graficamente disegnando i vettori uno dietro l'altro e il vettore risultante non è altro che la congiunzione dell'origine del primo vettore con la punta del secondo. La regola vale anche per più vettori.



DIFFERENZA TRA 2 VETTORI

Anche la differenza può essere fatta solo con la forma rettangolare (non si può usare la forma polare).

$$\bar{A} = a + jb = ML\alpha$$

$$\bar{B} = c + jd = MbL\beta$$

$$\beta = \arctan\left[\frac{d}{c}\right]$$

$$M = \sqrt{c^2 + d^2} = \text{PITAGORA}$$

$$\bar{D} = \bar{A} - \bar{B}$$

$$D = a + jb - c + jd =$$

$$(a - c) + j(b - d)$$

esempio numerico:

$$\bar{A} = 3 + j4 = 5 \angle 53,13^\circ$$

$$\bar{B} = 7 + j6 = 9,22 \angle 40,60^\circ$$

$$\bar{D} = \bar{A} - \bar{B}$$

$$\bar{A} = 3 + j4 -$$

$$\bar{B} = 7 + j6 =$$

$$-4 + j(-2) = 4,47 \angle 153,43^\circ$$

POLARE

Se si ha una calcolatrice: **casio S.V.P.A.M fx-82MS.**

La sequenza per eseguire quest'operazione è la seguente:

1) Pol(7,6)

2) =

3) 9,22

4) ALPHA-F

5) =

6) 40,60

7) ALPHA-E

8) =

9) 9,22

OPPURE, UTILIZZANDO SEMPRE UNA CALCOLATRICE: **Casio S.V.P.A.M fx-82MS**.

RettangolarE ←

1) Rect(5,53,13)

2) =

3) 3

4) ALPHA-F

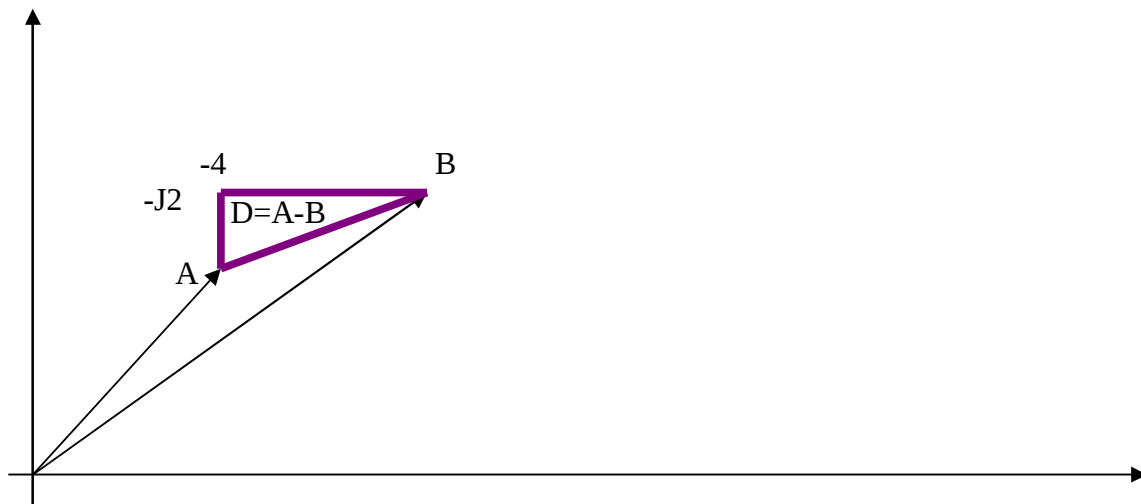
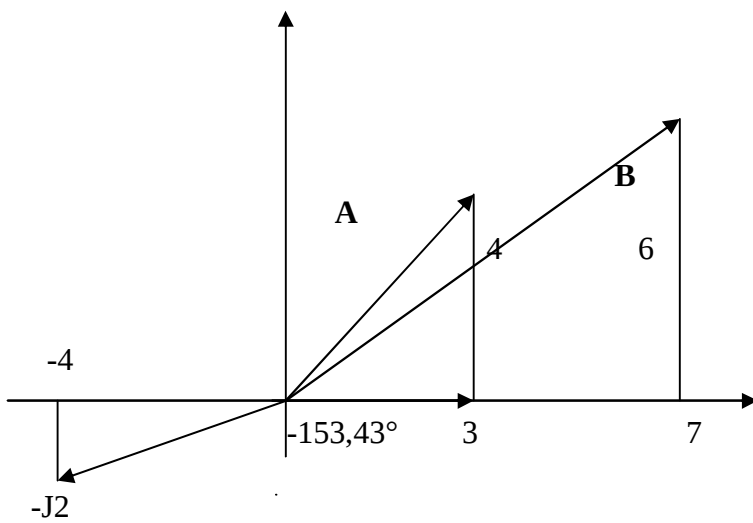
5) =

6) 4

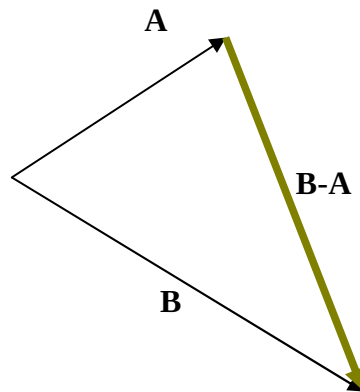
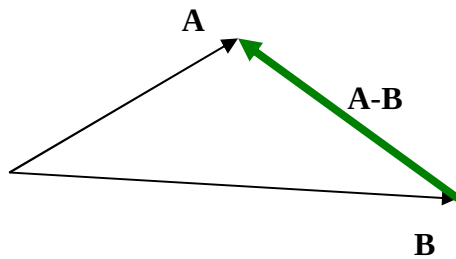
7) ALPHA-E

8) =

9) 3



La differenza tra due vettori è quel vettore che unisce le punte dei due vettori (aventi la stessa origine) e che mostra il primo vettore considerato nella differenza.



PRODOTTO TRA DUE VETTORI:

Il prodotto di due numeri complessi può essere eseguito sia in forma binomia sia in forma polare. Vedremo che, operativamente, è più veloce la forma polare. Pertanto ogni qual volta che dobbiamo eseguire il prodotto useremo la forma polare.

1) PRODOTTO IN FORMA BINOMIA POLARE

$$\begin{aligned}
 A &= a + jb = MA \angle \alpha \\
 B &= c + jd = MB \angle \beta \\
 P &= A * B \\
 &= (a + jb) * (c + jd) \\
 &= a*c + jad + jbc + j^2 bd \\
 &= a*c + j(ad + bc) - bd \\
 &= (a*c - b*d) + j(ad + bc)
 \end{aligned}$$

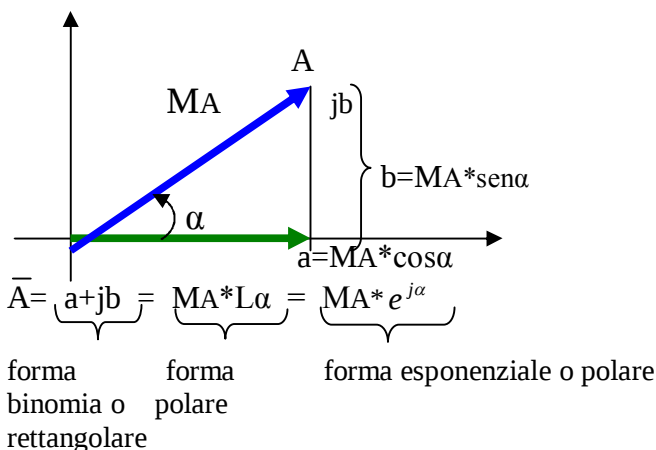
2) PRODOTTO IN FORMA POLARE CON EULERO

Per eseguire il prodotto con la forma polare bisogna prima conoscere la formula di Eulero.

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha + j \sin \alpha &= e^{j\alpha} \\
 \cos \pi + j \sin \pi &= e^{j\pi} \\
 \underbrace{\cos \pi}_{-1} + \underbrace{j \sin \pi}_0 &= e^{j\pi} \\
 -1 &= e^{j\pi}
 \end{aligned}$$

La formula di Eulero si estende nella trasformazione da rettangolare a polare come segue:

$$A = a + jb = MA * \cos \alpha + jMA * \sin \alpha = MA * (\cos \alpha + j \sin \alpha) = MA * e^{j\alpha} \quad \longrightarrow \quad A = MA * e^{j\alpha}$$

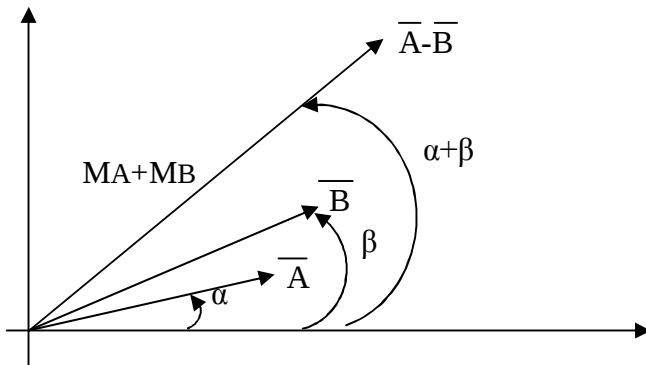


Ora possiamo eseguire il prodotto di due numeri complessi in forma polare.

$$\begin{aligned} \overline{A} &= MA * e^{j\alpha} \\ \overline{B} &= MB * e^{j\beta} \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \overline{P} &= \overline{A} * \overline{B} \\ &= [(MA * e^{j\alpha}) * (MB * e^{j\beta})] \text{ (Proprietà delle potenze...somma degli esponenti)} \\ &= (MA * MB) * e^{j(\alpha+\beta)} \end{aligned}$$

REGOLA DEL PRODOTTO:

Il prodotto si trova in forma polare, moltiplicando i moduli e sommando gli angoli.



QUOZIENTE DI DUE NUMERI COMPLESSI:

Anche la divisione si esegue più facilmente in forma polare ma può essere fatta anche in forma rettangolare.

$$A = MA * e^{j\alpha} = a + jb$$

$$B = MB * e^{j\beta} = c + jd$$

$$Q = \frac{A}{B} = \left[\frac{MA * e^{j\alpha}}{MB * e^{j\beta}} \right] = \left[\frac{MA}{MB} \right] * e^{j(\alpha-\beta)}$$

Da questi passaggi si ricavano anche le regole della divisione.

Per dividere due numeri complessi basta eseguire la divisione dei moduli e la sottrazione degli angoli. In elettrotecnica e in controlli è molto usata la **legge di Ohm**.

$$\overline{Z} = \overline{V} / \overline{I} \quad \left[\begin{array}{l} v = V * \sin(\omega t + \alpha) \\ i = I * \sin(\omega t + \beta) \end{array} \right] \quad v/i = (V * \sin(\omega t + \alpha)) / (I * \sin(\omega t + \beta))$$

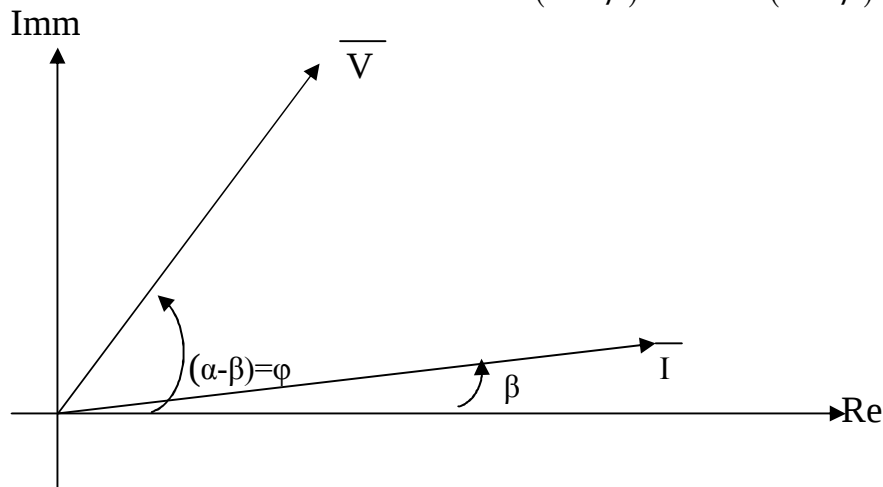
$$Z = \left(\frac{V}{I} \right) = \left(\frac{V * e^{j\alpha}}{I * e^{j\beta}} \right) = \left[\frac{V}{I} * e^{j(\alpha-\beta)} \right] = Z * e^{j\varphi}$$

OSSERVAZIONE: la legge di Ohm dal campo vettoriale si estende al campo dei moduli.

$\overline{Z} = \overline{V} / \overline{I}$ Legge di Ohm dei moduli (sono i valori massimi delle sinusoidi)

Per quanto riguarda l'angolo dell'impedenza è evidente che esso è lo sfasamento fra tensione e corrente:

$$\frac{V}{I} = \frac{V * \sin(\omega t + \alpha)}{I * \sin(\omega t + \beta)} = Z * \frac{\sin(\omega t + \alpha)}{\sin(\omega t + \beta)}$$



Quoziente eseguito in forma binomia: il quoziente può essere calcolato anche in forma binomia ma i calcoli sono molto più lunghi.

$$A = a + jb$$

$$B = c + jd$$

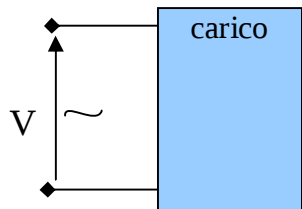
$$Q = A/B = (a + jb)/(c + jd) = \frac{[(a + jb) * (c - jd)]}{[(c + jd) * (c - jd)]}$$

$$= \frac{ac + bd}{Mb^2} + j \frac{bc - ad}{Mb^2}$$

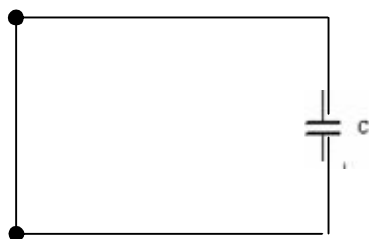
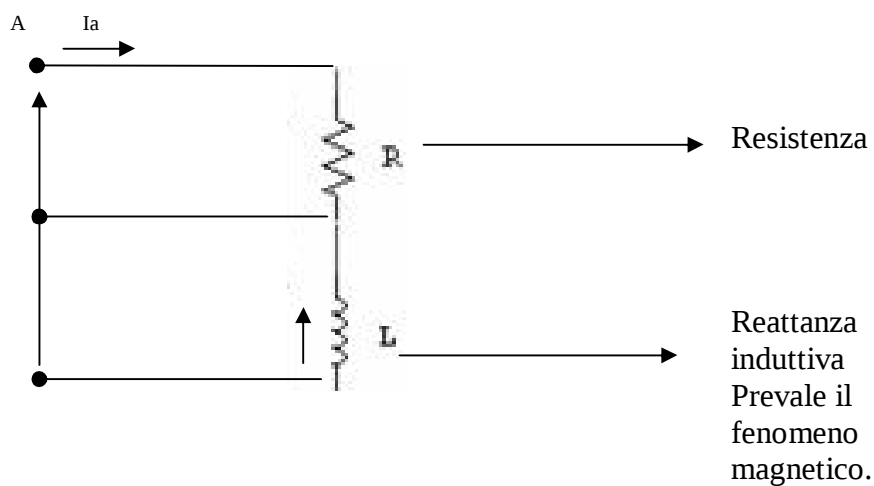
Reti elettriche monofase

IMPEDENZE IN SERIE E IN PARALLELO:

In corrente alternata i carichi, oltre ad offrire una parte resistiva, mostrano una parte reattiva dovuta a fenomeni di natura elettromagnetica che avvengono all'interno del carico.



CIRCUITO EQUIVALENTE:



Reattanza capacitiva
(prevalente il
fenomeno
elettrostatico).

La reattanza (sia induttiva che capacitiva) si misura in Ohm come la resistenza. Valgono le seguenti formule:

$$X_L = \omega * L \qquad x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Si dimostra matematicamente (noi non possiamo farlo) che l'impedenza si ricava con la seguente formula:

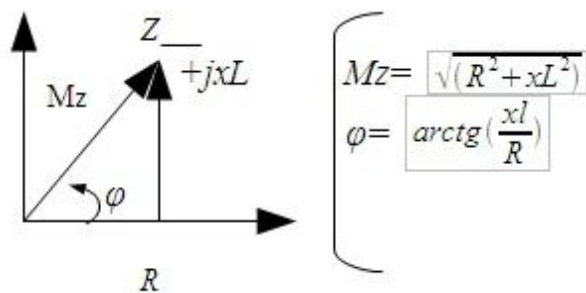
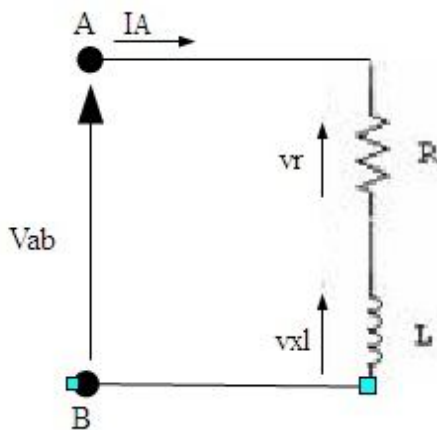
$$z = R + jx_L \qquad z = R - jx_C$$

INDUTTIVA

CAPACITIVA

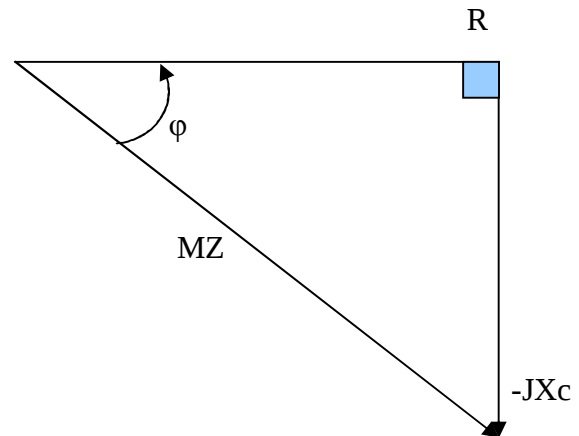
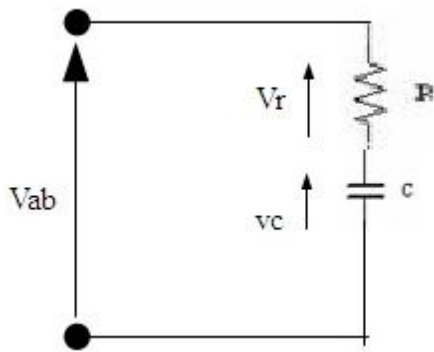
Cioè l'impedenza è un numero complesso.

DEFINIZIONE DI IMPEDENZA



$$\bar{Z} = R + jx_L = (M_Z * e^{j\varphi}) = M_Z \angle \varphi$$

TRIANGOLO DELL'IMPEDENZA



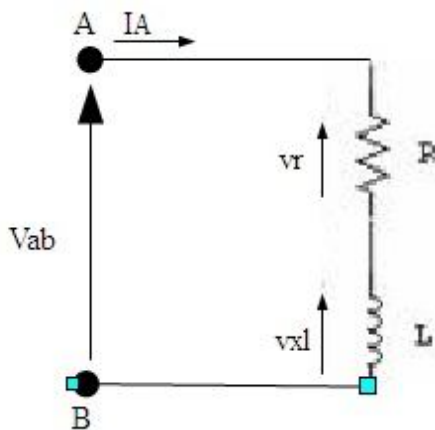
$$Mz = \sqrt{R^2 + Xc^2}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-Xc}{R}\right)$$

$$Z = R - jXc = Mz \cdot e^{j\varphi} = Mz \angle -\varphi$$

1) Es.: un motore elettrico presenta una parte resistiva di 4Ω e una parte induttiva di 22mH .
Determinare l'impedenza equivalente del motore, inoltre sapendo che la corrente assorbita è 2A ,
determinare la tensione applicata al motore e le sue tensioni interne.

TRIANGOLO DELL'IMPEDENZA E DELLE TENSIONI



Dati:

$$R=4\Omega$$

$$L=22mH$$

$$I_a=2L0^\circ$$

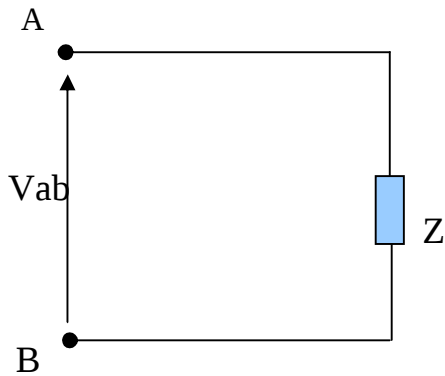
Trovare:

$$x_l, z, V_{ab}, V_r, V_{xl}$$

Soluzione:

$$x_l = \omega L = 314 \cdot 22 \cdot 10^{-3} = 6,908 = 7\Omega$$

$$Z = R + jx_l = 4 + j7 = 8\angle 60^\circ \Omega$$



$$V_{ab} = Z \cdot I_a = \text{siccome è un prodotto dovrò usare la forma polare: } 8\angle 60^\circ \cdot 2\angle 0^\circ = 16\angle 60^\circ = V_{ab} = 8 + j14V$$

$$V_r = R \cdot I_a = 4\angle 0^\circ \cdot 2\angle 0^\circ = 8V$$

$$V_{xl} = x_l \cdot I_a = 7\angle 90^\circ \cdot 2\angle 0^\circ = 14\angle 90^\circ = j14$$

osservazione:

$$V_{ab} = 16\angle 60^\circ = 8 + j14$$

$$V_r = 8$$

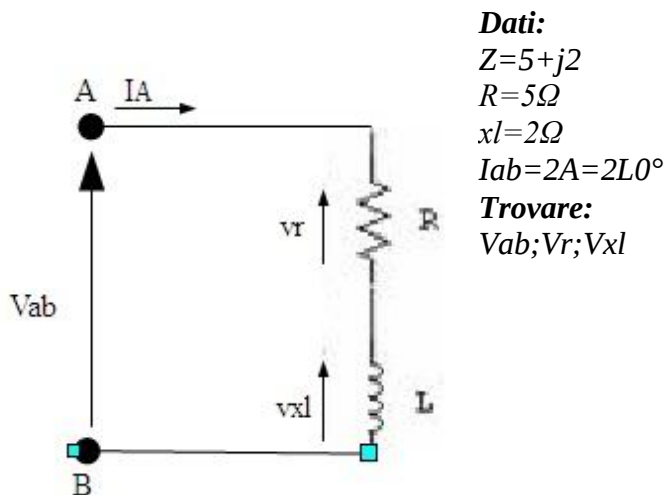
$$V_{xl} = j14$$

$$V_{ab} = V_r + jV_{xl}$$

Si osserva che la parte reale della tensione è V_r e la parte immaginaria è V_{xl} . Quest'osservazione viene posta in evidenza anche dal grafico.



2)Es.: Data l'impedenza $Z=5+j2$, calcolare le tensioni V_r ; V_{xl} ; V_{ab} sapendo che la corrente che l'attraversa vale 2A. Disegnare il grafico dell'impedenza e delle tensioni.



Soluzione:

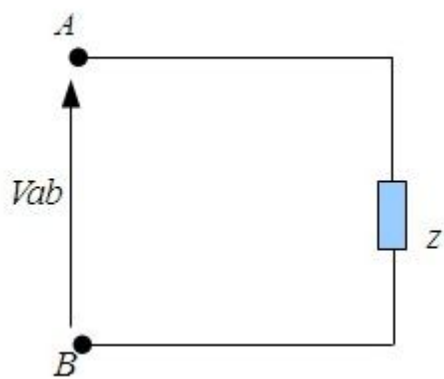
$$Z=5+j2=5,385L21,80^\circ$$

$$V_{ab}=5L21,80^\circ \cdot 2L0^\circ=10,72L21,80^\circ=9,999+j3,999V$$

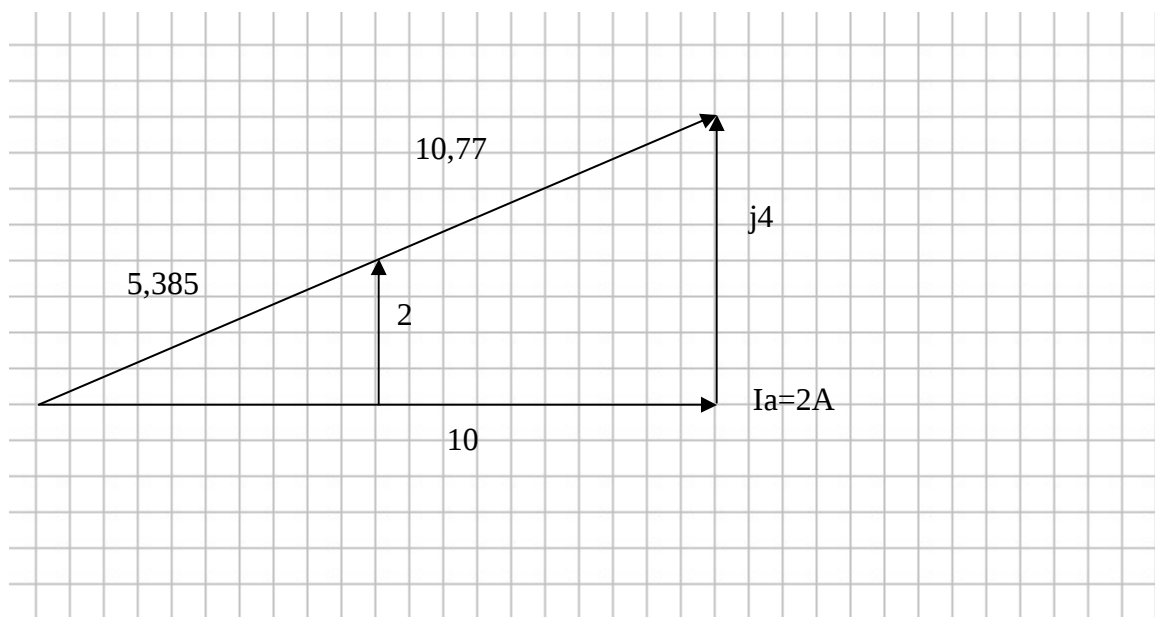
$$V_r=R \cdot I_a=5L0^\circ \cdot 2L0^\circ=10L0^\circ=10V$$

$$V_{xl}=2L90^\circ \cdot 2L0^\circ=4L90^\circ=4V$$

$$V_{ab}=V_r+jV_l=10+j4V$$



TRIANGOLO DELL'IMPEDENZA E DELLE TENSIONI



$$Z = R + jX = Z \angle \varphi / I$$

$$Z \cdot I = R \cdot I + jXL = Z \cdot I \angle \varphi + 0^\circ$$

$$V_{ab} = V_r + jV_L = V_{ab} \angle \varphi / I$$

CALCOLO DELLE POTENZE:

triangolo dell'impedenza, delle tensioni e della potenza di un'impedenza R-L

$V \cdot I = S$ (potenza apparente) $V_R \cdot I = P$ (potenza attiva) $V_L \cdot I = Q$ (potenza reattiva)

$S = [VA]$

$P = [W]$

$Q = [VAR]$

$$S = P + jQ = SL\phi$$

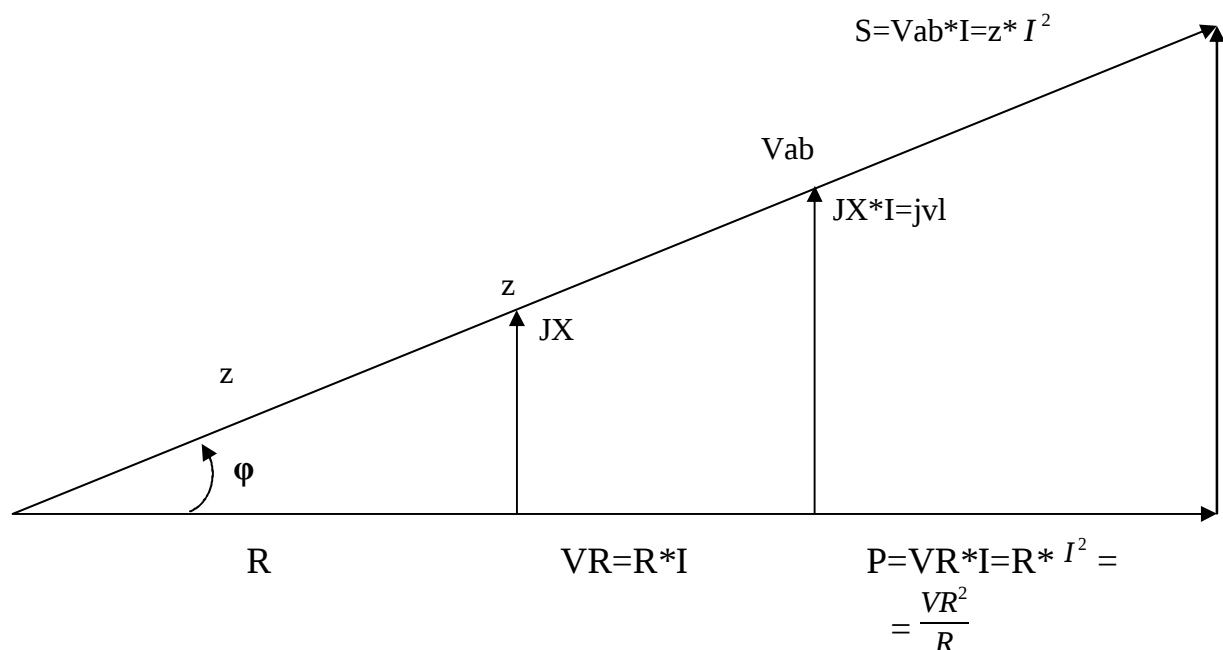
$Z = 5 + j2 = 5,385 \angle 21,8^\circ = \text{TRIANGOLO DELLE } Z$

$Z \cdot I = 5 \cdot 2 + j2 \cdot 2 = 5,385 \cdot 2 \angle 21,8^\circ$

$V_{ab} = 10 + j4 = 10,77 \angle 21,8^\circ = \text{TRIANGOLO DELLE TENSIONI}$

$V_{ab} \cdot I = 10 \cdot 2 + j4 \cdot 2 = 10,77 \cdot 2 \angle 21,8^\circ$

$S = 20 + j8 = 21,54 \angle 21,8^\circ = \text{TRIANGOLO DELLE POTENZE}$



La potenza P, che si misura in Watt, è l'unica a sviluppare lavoro utile e, se non sviluppa lavoro, sviluppa calore.

La potenza Q rappresenta la potenza elettromagnetica accumulata nel dispositivo. E' una potenza che non può essere utilizzata pertanto si cerca di tenerla piccola; è positiva e si misura in [VAR] volt, ampere, reattivi.

L'annullamento di Q o il suo segno negativo possono innescare fenomeni di risonanza che possono danneggiare, oltre al carico stesso, anche la rete elettrica che lo alimenta.

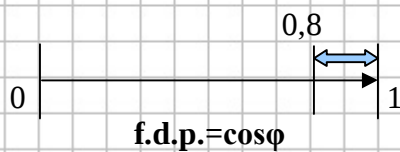
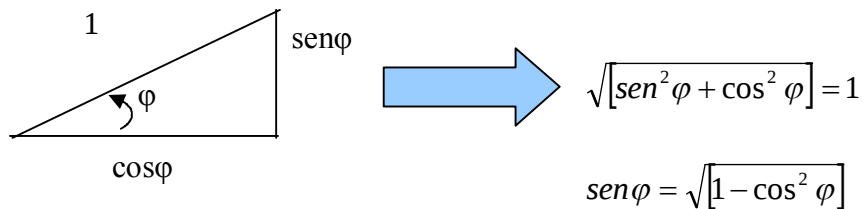
CAPITOLO VII

FATTORE DI POTENZA - f.d.p.

$S=P+J=SL\varphi$ PARTENDO DAL TRIANGOLO DELLE POTENZE, SI POSSONO SCRIVERE LE SEGUENTI FORMULE:

$$V_{ab} \cdot I \longrightarrow P = S \cdot \cos\varphi \quad \text{Fattore di potenza}$$
$$Q = S \cdot \sin\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \varphi = \arctan \frac{Q}{P} \quad \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \cos\varphi = \frac{P}{V_{ab} \cdot i}$$



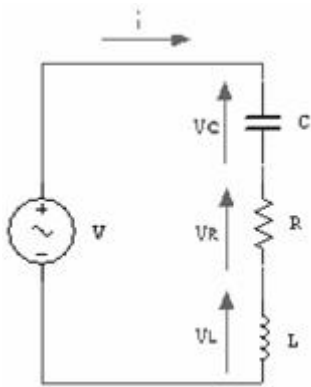
Per tutti i carichi elettrici si tenta di tenere il fattore di potenza (f.d.p.) compreso tra 0,8 e 1. In questo modo ci si assicura una piccola potenza Q come abbiamo scritto prima. Quando il carico non presenta il fattore di potenza richiesto (tra 0,8 e 1), bisogna praticare un rifasamento.

Se in una rete elettrica i carichi sono a norma, si può assumere in linea di massima un $\cos\varphi$ 0,8 in mancanza di dati. Mentre nel caso in cui un carico presenta un $\cos\varphi$ al di fuori della banda (0,8-1), allora il carico deve essere rifasato e il valore di rifasamento viene posto a $\cos\varphi$ 0,9.

CAPITOLO VIII

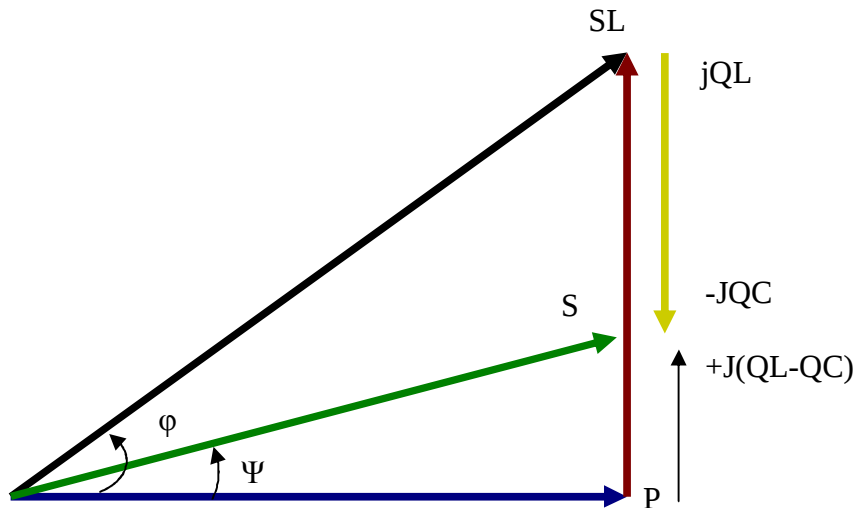
RIFASAMENTO

si tratta di inserire un condensatore in serie o in parallelo al carico R-L



$$S = P + jQL - jQC = P + j(QL - QC)$$

IN QUESTO MODO IL CARICO VIENE RIFASATO A VALORI NORMALI



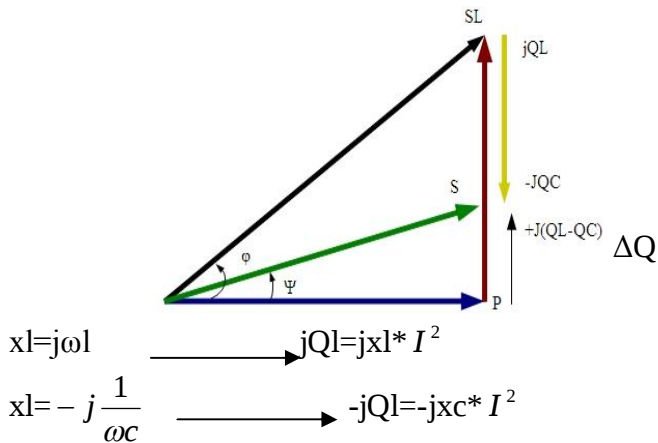
$$S = P + jQL - jQC = P + j(QL - QC)$$

Se il fattore di potenza del carico sta al di fuori della banda, allora significa che l'angolo φ della z è più grande di 36° , pertanto per portare fuori il fattore di potenza dall'interno della banda bisogna diminuire l'angolo. Questa operazione si chiama rifasamento. Il rifasamento è effettuato aggiungendo un condensatore, o in serie o in parallelo al carico. Nella pratica il condensatore è messo in parallelo.

CALCOLO DEL CONDENSATORE DA PORRE IN SERIE:

Il classico problema è il seguente: dato un carico con fattore di potenza $\cos\varphi$, si calcoli il valore del condensatore da porre in serie e da porre in parallelo in modo da portare il fattore di potenza a $\cos\Psi$. La soluzione del problema si trova analizzando il triangolo delle potenze.

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{QL}{P} \quad \operatorname{tg}\Psi = \frac{\Delta Q}{P}$$



$$Q_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I^2 \quad Q_C = Q_L - \Delta Q \quad Q_L = P \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad \Delta Q = P \cdot \operatorname{tg}\Psi$$

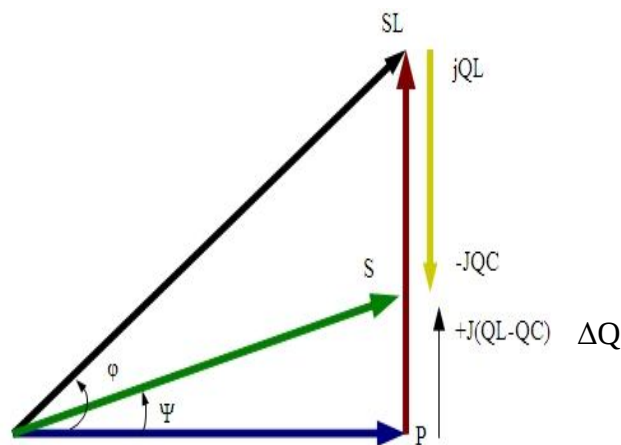
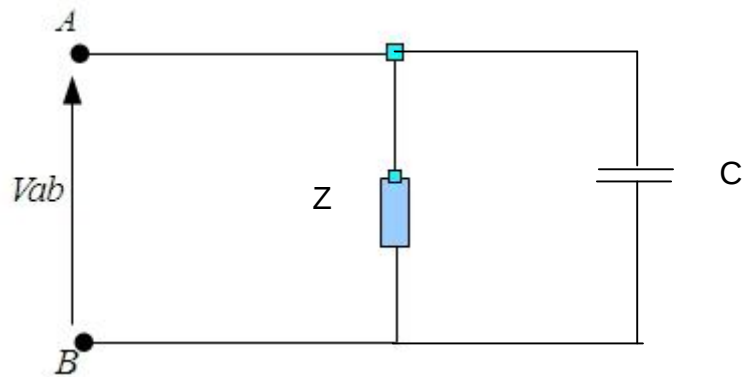
$$\left(\frac{I^2}{\omega C} \right) = P \cdot \operatorname{tg}\varphi - P \cdot \operatorname{tg}\Psi$$

Questa formula ci dà il valore del condensatore da porre in serie all'impedenza z da rifasare. Nella maggior parte dei casi si usa un condensatore in parallelo.

CALCOLO DEL CONDENSATORE IN PARALLELO:

Ricordiamo che, indipendentemente dalla connessione degli elementi, le potenze si sommano sempre, pertanto nel caso del condensatore in parallelo al carico, avremo

$$Q_{\text{tot}} = Q_L - Q_c$$



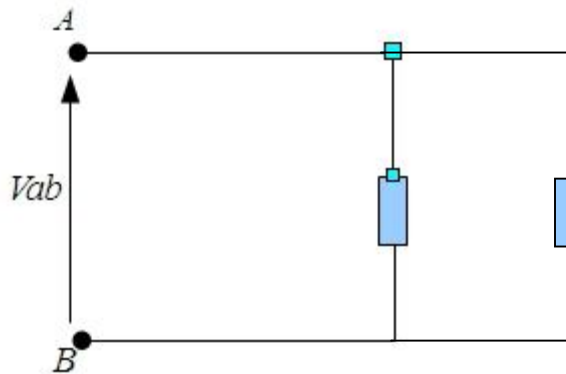
$$Q_c = \frac{V_{ab}^2}{x_c} = Q_c = \frac{V_{ab}}{\frac{1}{\omega c}} = Q_c = \omega c * V_{ab}^2$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_c = \omega c * V_{ab} \\ Q_c = Q_L - \Delta Q \\ Q_L = P * \operatorname{tg} \varphi \\ \Delta Q = P * \operatorname{tg} \Psi \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \omega c * V_{ab}^2 = P * \operatorname{tg} \varphi - P * \operatorname{tg} \Psi \\ C_p = \frac{P * (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \Psi)}{\omega * V_{ab}^2} \end{array}$$

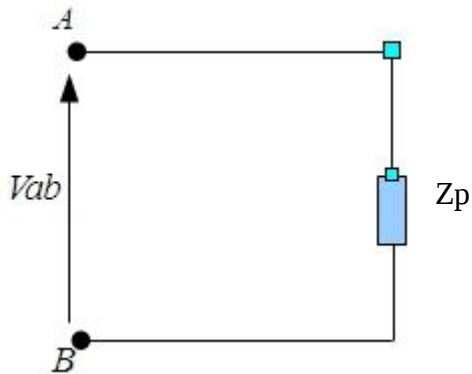
Questa è la formula del condensatore posto in parallelo al carico che lo rifasa da $\cos \varphi$ a $\cos \psi$.
 É possibile porre il condensatore in parallelo poiché più semplice dal punto di vista dell'inserzione,
 e perché il carico lavora sempre con la stessa V_{ab} .

CAPITOLO IX

PARALLELO DI DUE IMPEDENZE



DATI: Z_1 ; Z_2 ; V_{ab} **TROVARE:** Z_p ; I_a ; I_1 ; I_2 (P; Q; S) $1e2, P$



Due o più impedenze sono in parallelo quando hanno la medesima tensione ai loro capi.

$$\Leftrightarrow V_{ab} = Z_p \cdot I_a$$

$$\frac{I_a}{Z_p} = \frac{1}{Z_p}$$

L'impedenza equivalente del parallelo si trova applicando la legge di Ohm e con i seguenti passaggi matematici.

Dal primo disegno: $V_{ab} = Z_p \cdot I_a \longrightarrow \frac{I_a}{Z_p} = \frac{1}{Z_p}$

$$V_{ab} = Z_1 \cdot I_1 \longrightarrow I_1 = \frac{1}{Z_1} \cdot V_{ab}$$

$$V_{ab} = Z_2 \cdot I_2 \longrightarrow I_2 = \frac{1}{Z_2} \cdot V_{ab}$$

$$I_1 + I_2 = \frac{1}{Z_1} \cdot V_{ab} + \frac{1}{Z_2} \cdot V_{ab}$$

$$I_a = \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \cdot V_{ab} / V_{ab}$$

$$\frac{I_a}{V_{ab}} = \frac{1}{Z_p} \longrightarrow \frac{1}{Z_p} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \longleftarrow \frac{I_a}{V_{ab}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

OSSERVAZIONE 1: Il della impedenza equivalente (z_p) è uguale alla somma dei singoli reciproci.

OSSERVAZIONE 2: Il reciproco di una impedenza si chiama AMMETTENZA $Y = \frac{1}{z}$

In termini di ammettenza vale la relazione: **$y_p = y_1 + y_2 \dots$**

La formula con le ammettenze è facilmente estendibile per n utilizzatori collegati in parallelo.

$$Y_p = Y_1 + Y_2 \dots Y_n$$

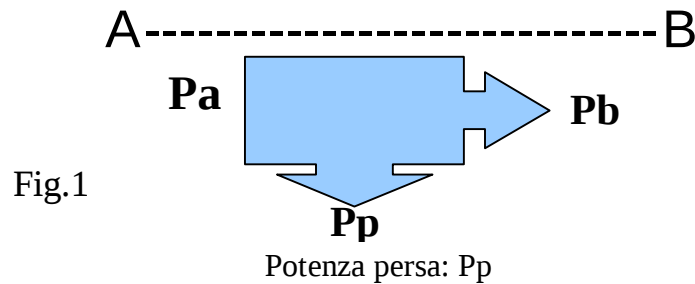
OSSERVAZIONE 3: Nel caso di sole 2 impedenze si potrà applicare anche la seguente formula.

$$Y_p = Y_1 + Y_2 \longrightarrow \frac{1}{Z_p} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 * Z_2} = Z_p = \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z_p = \frac{Z_x}{Z_s}$$

CAPITOLO X

LINEE ELETTRICHE

Una linea elettrica è un sistema conduttore che porta l'energia elettrica da un punto A ad un punto B.



Nella condotta possiamo trovare da un minimo di due cavi ad un massimo di cinque cavi. Nelle linee di alta tensione, in media il numero di cavi è tre. Consideriamo il caso più semplice di due cavi che poi si estenderà a tutti gli altri casi.

Il circuito elettrico equivalente alla fig. 1 è il seguente:



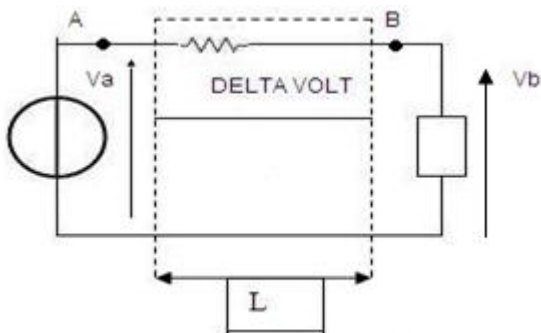
R_l = resistenza di linea.

Ogni filo elettrico di lunghezza L offre una resistenza R_l che si calcola con la seguente formula:

$$R_l = \rho * \frac{l}{s}$$

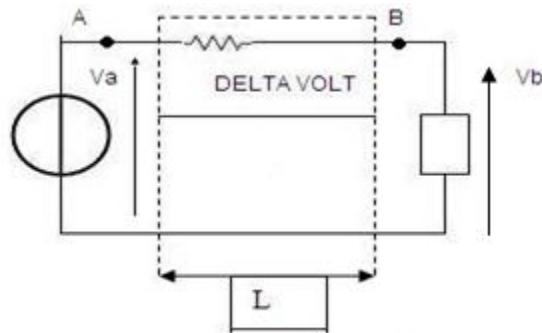
La linea elettrica offre una resistenza pari a $2R_l$ perché comprende il filo d'andata e di ritorno.

Pertanto nel caso di linea (a due fili per convenzione) $R_l = \rho * \frac{l}{s}$ e il circuito equivalente è quello di figura 3.



Il punto A è il punto di partenza, da esso parte una tensione V_a e parte una potenza P_a .
 Il punto B è il punto di arrivo. In tale punto misuriamo una tensione di arrivo V_p e una potenza di arrivo P_a . Durante il tragitto in linea da A a B si perde una potenza P_p e una tensione Δv . La tensione persa è chiamata caduta di tensione in linea. Il parametro normalizzato, che ha la seguente formula $(\Delta v/V_n)*100$, è chiamato caduta percentuale di tensione in linea e viene indicato con il simbolo $\Delta v\%$.

La tensione % normalmente per legge deve essere inferiore al 4% per basse tensioni e al 5% per medie ed alte tensioni.



Si definisce rendimento della linea $\eta = P_u/P_a < 1$ solo nel caso in cui la P_p risulta essere 0w, allora dal bilancio energetico risulta $P_u = P_a$ e quindi $\eta = 1$.

Per avere $P_p = 0$ dovremmo avere anche $R_l = 0$, purtroppo non esistono materiali con $R_l = 0$, quindi $R_l > 0$; $P_p > 0$; $\eta < 1$ sempre. Il numero η ci dà informazione sulla bontà della linea, ovvero tanto più η si avvicina ad 1 tanto più buona è la linea.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{R_c * I_a^2}{(R_c + R_l)} = \frac{R_c}{R_l + R_c}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_p}{P_a} = \frac{P_a}{P_a} - \frac{P_p}{P_a} = 1 - \frac{P_p}{P_a} = \frac{R_l}{R_l + R_c} = 1 - \frac{R_l}{P_a}$$

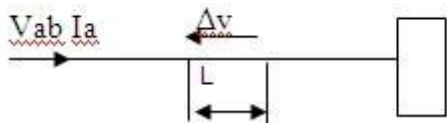
CAPITOLO XI

DIMENSIONAMENTO DI UNA LINEA

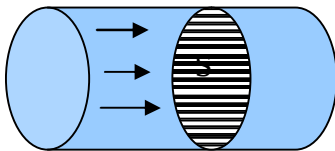
Abbiamo visto che la linea offre una $\Delta v\%$ (caduta di tensione in linea); le norme CEI impongono una caduta massima del 4% per le linee in bassa tensione.

Nasce dunque il problema di cambiare la linea con un'altra che sia a norma. La scelta di una linea a norma implica il problema del suo dimensionamento. Dimensionare una linea vuol dire calcolare la sezione del cavo che in corrispondenza provochi una caduta di tensione inferiore al 4%. Si osserva che la sezione è legata alla caduta tramite la seguente formula:

$$\Delta V = Rl * Ia = 2 * \rho * \frac{L}{S} * Ia$$



Da quest'ultima formula si osserva che per diminuire la Δv (cioè per combinarla sotto i valori del 4%) posso agire solo sulla sezione del cavo.



Il numero **Ia** non si può cambiare perché esso dipende dal carico (il carico ha bisogno di una certa Ia per funzionare bene); il numero L non può variare in quanto dipende dal tragitto che deve fare l'energia per arrivare al carico. Il parametro ρ dipende dal materiale conduttore che solitamente è il rame, quindi ρ è un numero fissato: pertanto l'unico parametro che posso cambiare è S. Per questo, dimensionare la linea vuol dire determinare il giusto valore di S che rende $\Delta v\% < 4\%$.

Il metodo matematico è molto complicato, per cui si usa procedere utilizzando delle apposite tabelle, in particolare le tabelle CEI UNEL 35023.

Nel caso di linee "corte"(<100mt) si usa una tabella semplificata che è la seguente.

Tab. n.1

Ia	Smmq
5	1,5
FINO A 10A	1,5
16A	2,5
25A	4
36A	6
50A	10
75A	16
100A	35

$$S = \pi * \frac{D^2}{4} \quad D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

Le sezioni sono quelle che si trovano in commercio. La sezione e la Δv sono inversamente proporzionali, pertanto se con le formule matematiche calcolo una sezione, ad esempio 8mmq e questa sezione determina il 4%, allora sono costretto a comprare la sezione da 10mmq, perché aumentando la sezione diminuisco la Δv .

I valori di correnti scritti in tabella sono valori nominali che corrispondono anche ai valori degli interruttori automatici che si trovano in commercio. L'interruttore automatico chiamato anche magneto-termico è installato a capo della linea per proteggere la linea stessa.

LINEA	In (A)	Sn (mmq)	Pn a 220v (w)
LINEA LUCE	10	1,5	2200
LINEA PRESE	16	2,5	3500
LINEA CALDAIA	10	1,5	2200
LINEA FRIGO	16	2,5	3500
L.ASCENSORE	50	10	11kw
L.FORNO	75	16	16,5kw

Nel caso di linee lunghe, si usa la tabella seguente estratta dalla CEI UNEL 35023

S	U% mono	U%trifase
1,5	23,9	20,7
2,5	14,4	12,5
4	9,08	7,87
6	6,1	5,28
10	3,72	3,22
16	2,39	2,07
25	1,55	1,34
35	1,15	0,993
50	0,878	0,76
70	0,641	0,555
95	0,494	0,428

Calcolo della linea col metodo pratico e per tentativi: si usa la seguente formula pratica

$$L = \frac{\Delta V\% * 10 * V_n}{\Delta U * I_n} \quad \text{formula pratica}$$

ESERCIZIO

DATI

I_a=32,02 → I_n=36

V_{ab}=220v → V_n=220v

Δv%=4%

L=200ml

TROVARE la sezione S=?

SVOLGIMENTO: dalle tabelle CEI UNEL 35023

1° tentativo)

Si fissa la sezione S=6mmq in base alla tab. n.1,

si calcola L con la formula pratica → L=40,07ml

lunghezza insufficiente quindi si passa a sezione superiore

2° tentativo)

Si fissa la sezione S=10mmq

si calcola L con la formula pratica → L=65ml

lunghezza insufficiente quindi si passa a sezione superiore

3° tentativo)

Si fissa la sezione S=16mmq

si calcola L con la formula pratica → L=102ml

4° tentativo)

Si fissa la sezione S=35mmq

si calcola L con la formula pratica → **L=212ml**

questa lunghezza è adeguata, quindi la sezione da utilizzare è S=35mmq.

Questo metodo viene applicato agevolmente col foglio di calcolo che prepareremo in Laboratorio di Informatica.

CAPITOLO XII

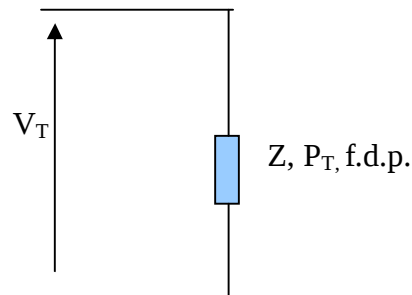
DATI DI TARGA di un utilizzatore elettrico

Ogni carico elettrico viene messo in commercio corredato con una targhetta che porta dati ottimali per i quali il carico è stato costruito.

Troveremo quindi una tensione V_T una frequenza f (normalmente 50 Hz oppure 60Hz) sulla targhetta possiamo anche trovare il valore ottimale di corrente assorbita oppure la potenza e il P_T fattore di potenza f.d.p. (f.d.p.= $\cos\varphi$)

carico	V_T	P_T	f.d.p.
	400v	40kW	0.866

Con questi dati di targa è possibile calcolare il valore dell'impedenza Z in modulo e fase.



Ricordando le formule relative al triangolo delle potenze, possiamo scrivere:

$P_T = V_T I_T \cos\varphi$; sostituendo la legge di Ohm: $I_T = V_T / Z$, si ottiene:

$$P_T = V_T (V_T / Z) \cos\varphi$$

$$P_T = V_T^2 \cos\varphi / Z$$

Da quest'ultima possiamo ricavare l'incognita Z : $\rightarrow Z = V_T^2 \cos\varphi / P_T$

Pertanto possiamo compilare la seguente tabella:

Z	φ	R	X
$V_T^2 \cos\varphi / P_T$	$\cos^{(-1)}(\text{f.d.p.})$	$Z \cos\varphi$	$Z \sin\varphi$

Si deduce che dai dati di targa si ricavano i parametri dell'impedenza:

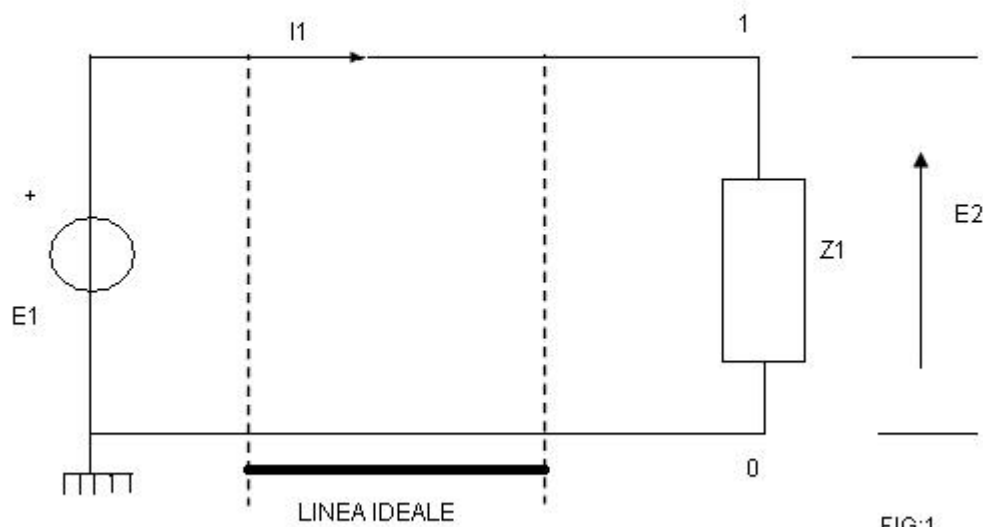
$$Z \angle \varphi = R + jX$$

CAPITOLO XIII

SISTEMI TRIFASE

La maggior parte delle reti elettriche atte al trasporto di energia sono sistemi trifase. Dal sistema monofase al sistema trifase si arriva concettualmente con il seguente ragionamento.

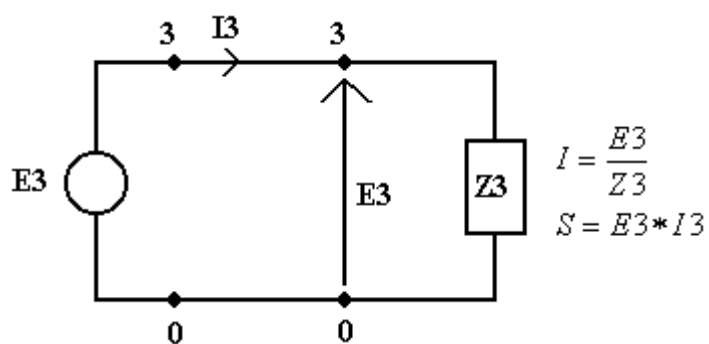
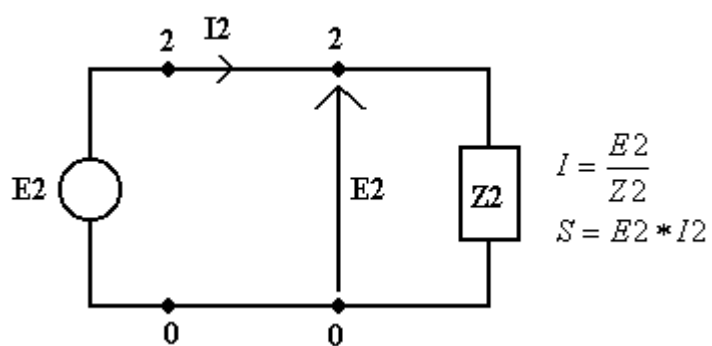
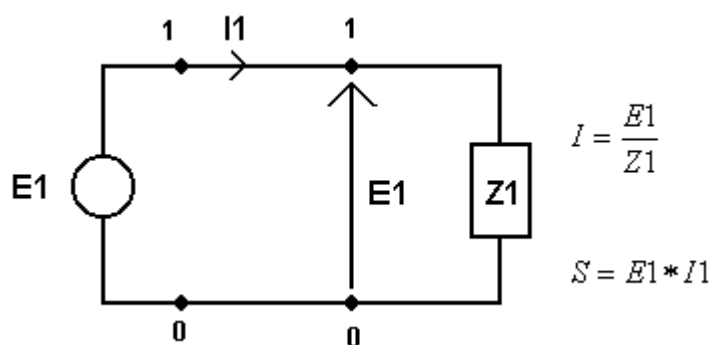
Circuito elettrico monofase (2 fili):



$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{Z_1} =$$

$$P_1 = \bar{E}_1 * \bar{I}_1 * \cos\varphi_1$$

TRE CIRCUITI MONOFASE (6FILI)



$$\overline{I1} = \frac{\overline{E1}}{\overline{Z1}}$$

$$\overline{I2} = \frac{\overline{E2}}{\overline{Z2}}$$

$$\overline{I3} = \frac{\overline{E3}}{\overline{Z3}}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE:

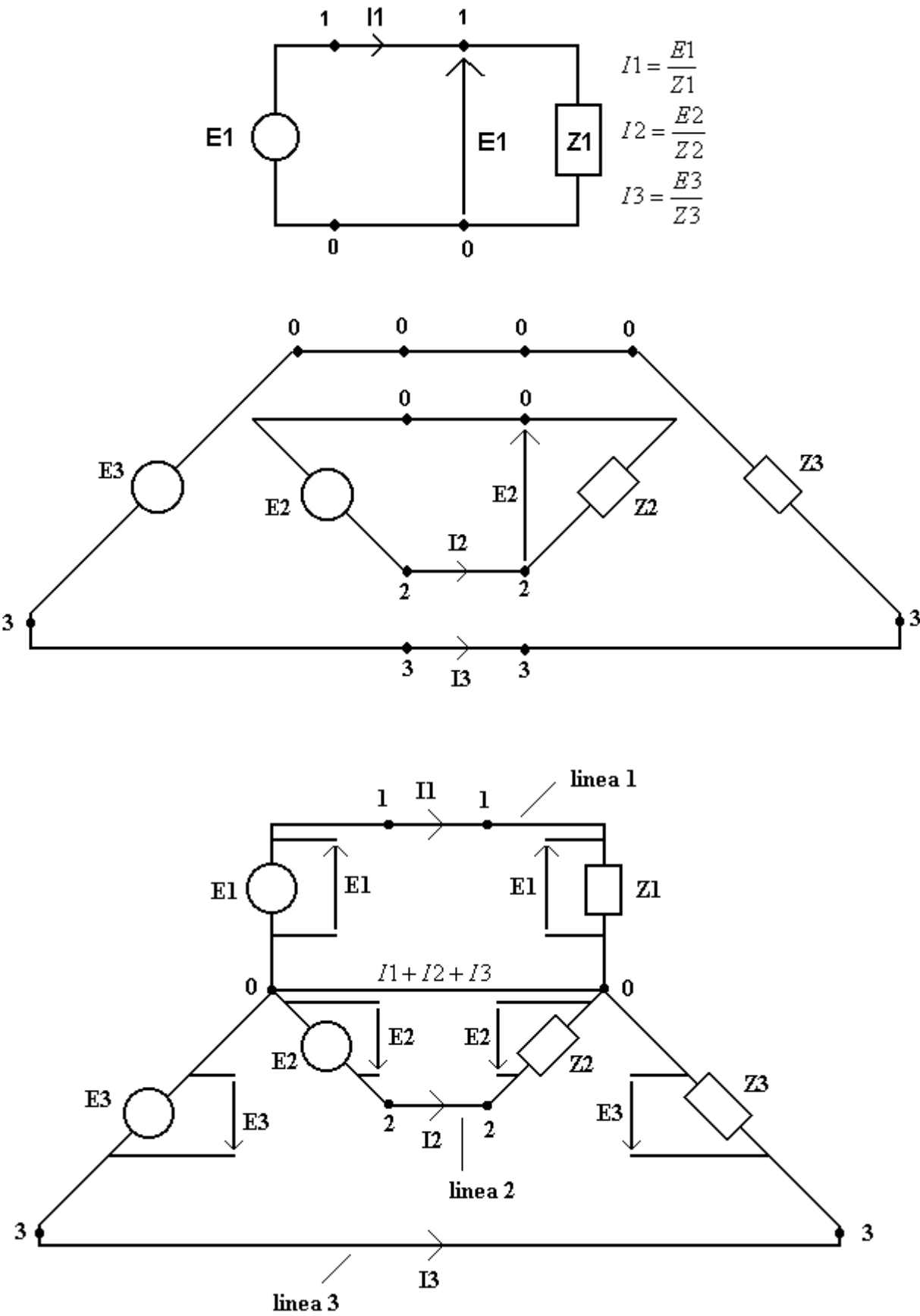


fig.1

E' stato riunito in un unico cavo il ritorno delle tre correnti di linea.

I fili dove scorrono le correnti di linea I_1 , I_2 , I_3 sono chiamati fili di linea, linea 1, linea 2, linea 3. Normalmente i punti 0 sono collegati a terra, cioè assumono il potenziale di 0 V quindi il filo di ritorno per le correnti I_1 , I_2 , I_3 è chiamato filo neutro.

Nel filo neutro scorre la somma delle 3 correnti.

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 \quad \text{Questa è una somma vettoriale}$$

Questo circuito è un circuito trifase;

In un circuito trifase si distingue un generatore trifase e un carico trifase.

CIRCUITO TRIFASE (4 FILI)

Il circuito di fig.1 rappresenta una linea ideale che trasporta la potenza: $P_1 = E_1 * I_1 * \cos\phi_1 = [W]$

Dove ϕ_1 è l'angolo dell'impedenza Z_1 . Questa potenza è trasportata da 2 fili.

Le potenze in gioco sono le seguenti:

$$P_1 = E_1 * I_1 * \cos\phi_1$$

$$P_2 = E_2 * I_2 * \cos\phi_2$$

$$P_3 = E_3 * I_3 * \cos\phi_3$$

Globalmente viene trasportata, con sei fili, la potenza $P_{\text{tot}} = P_1 + P_2 + P_3$

Si può osservare dal disegno che i fili, che trasportano le correnti di ritorno possono essere raggruppate in un unico filo, si arriva quindi al sistema trifase che trasporta tutte e tre le potenze con soli quattro fili. Nel filo di ritorno chiamato filo di neutro scorre la somma vettoriale delle tre correnti. La corrente del neutro è chiamata I_0 quindi vale la seguente formula:

$$\overline{I_0} = \overline{I_1} + \overline{I_2} + \overline{I_3}$$

Vedremmo che sarà possibile togliere anche il filo neutro passando quindi a un sistema trifase con tre fili.

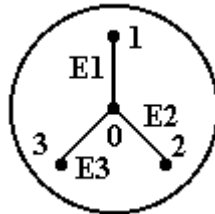
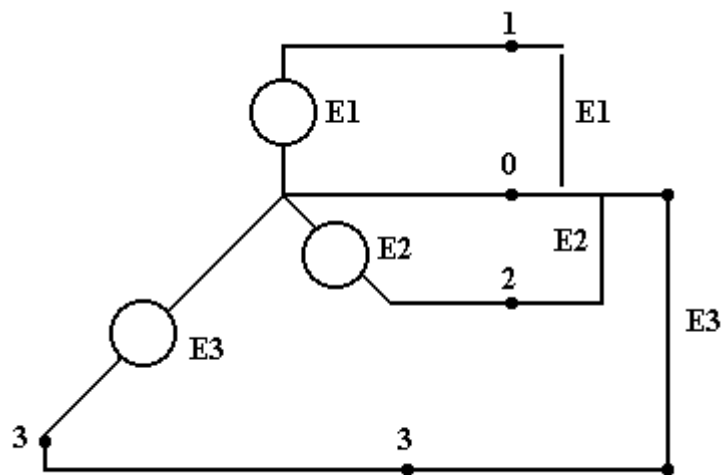
I fili d'andata ovvero linea 1, 2, 3 sono chiamati fili di linea. In un circuito elettrico effettivamente realizzato, il filo neutro deve avere sempre il colore blu. Gli altri fili di solito hanno colori diversi fra loro come ad esempio nero, rosso, grigio, marrone e arancione.

Carico a stella squilibrato. Le impedenze sono non omogenee quindi avranno un modulo diverso, e non si può togliere il cavo del neutro perché la somma delle correnti non fa zero.

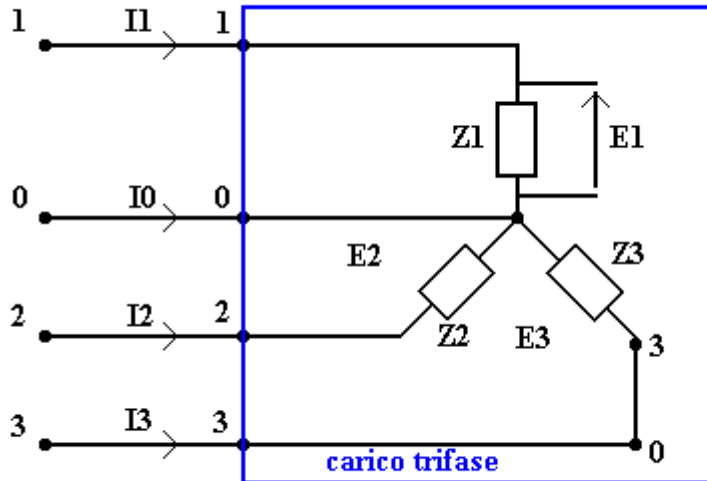
Carico a stella equilibrato. Le impedenze sono omogenee e quindi hanno lo stesso modulo, solamente in questo caso si può togliere il filo del neutro, perché la somma delle correnti dà zero. Le correnti I_1 , I_2 , I_3 sono sfasate di 120° . La potenza del carico trifase è il triplo della potenza di un carico.

Linee trifasi senza neutro: solamente se il carico è equilibrato e la somma delle correnti fa zero.

Generatore trifase



Carico trifase



carico (trifase) a stella con neutro

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1}$$

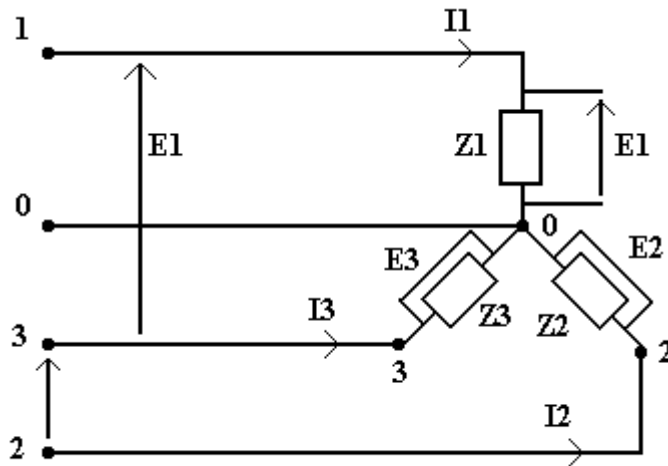
$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z_3}$$

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3$$

Soluzione di un carico trifase a stella con neutro

Dato il carico trifase collegato a stella e con filo neutro (cioè dati i valori numerici di Z_1 - Z_2 - Z_3) e data la terna trifase (E_1 - E_2 - E_3) si vogliono calcolare le correnti di linea (I_1 - I_2 - I_3 - I_0). La soluzione del problema è di seguito riportata:



Dati:

$$\begin{aligned} E_1 &= E \angle 90^\circ \\ E_2 &= E \angle -30^\circ \\ E_3 &= E \angle -150^\circ \end{aligned}$$

Terna trifase

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 = Z_1 \angle \varphi_1 \\ Z_2 &= R_2 + jX_2 = Z_2 \angle \varphi_2 \\ Z_3 &= R_3 + jX_3 = Z_3 \angle \varphi_3 \end{aligned}$$

**Carico (trifase)
a stella con neutro**

Trovare

Correnti di linea cioè I_1 - I_2 - I_3 - I_0

Soluzione

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} = \frac{E \angle 90^\circ}{Z_1 \angle \varphi_1} = \left(\frac{E}{Z_1} \right) \angle 90^\circ - \varphi_1$$

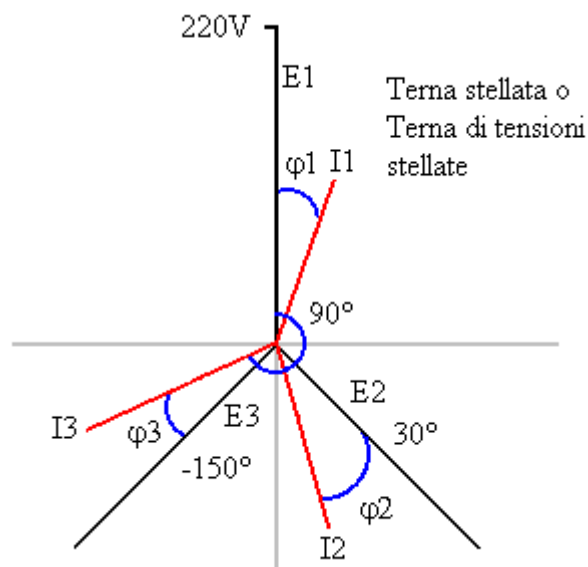
$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E \angle -30^\circ}{Z_2 \angle \varphi_2} = \left(\frac{E}{Z_2} \right) \angle -30^\circ - \varphi_2$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z_3} = \frac{E \angle -150^\circ}{Z_3 \angle \varphi_3} = \left(\frac{E}{Z_3} \right) \angle -150^\circ - \varphi_3$$

Grafico vettoriale

Quindi si parla di grafico vettoriale si devono disegnare i vettori di tensione (E1-E2-E3) e i vettori di corrente (I1-I2-I3-I0).

Prima si disegna la terna di tensione e poi le correnti.



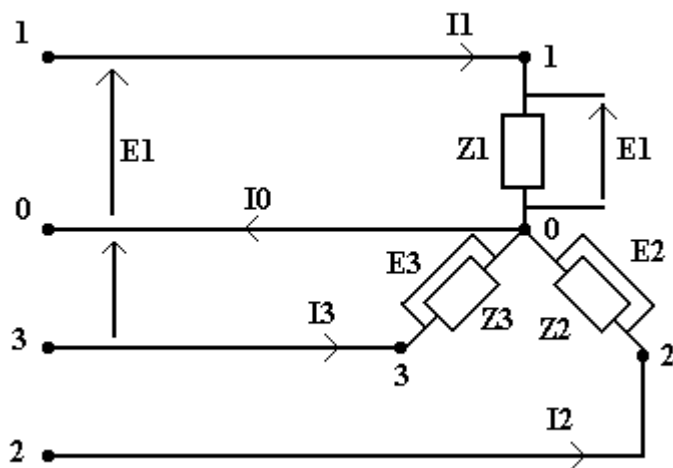
Carico a stella con neutro equilibrato

Il carico si dice equilibrato quando le tre impedenze ($Z_1; Z_2; Z_3$) sono fra loro uguali ossia tutte e tre hanno lo stesso modulo e lo stesso angolo cioè:

$$Z_1 = Z \angle \varphi$$

$$Z_2 = Z \angle \varphi$$

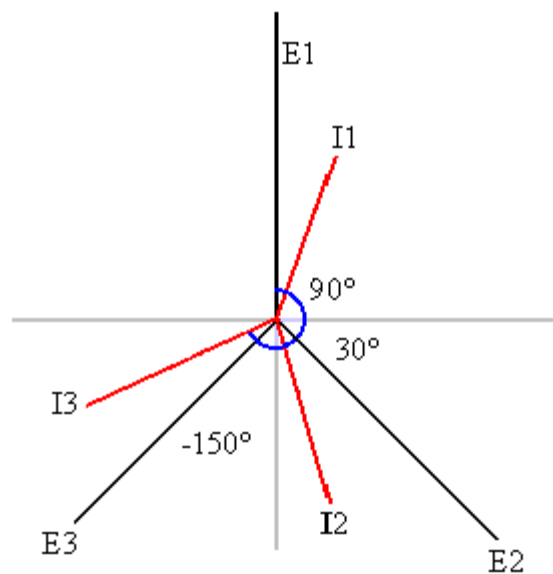
$$Z_3 = Z \angle \varphi$$



$$I_1 = \frac{E \angle 90^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E}{Z} \right) \angle 90^\circ - \varphi = I \angle 90^\circ - \varphi$$

$$I_2 = \frac{E \angle -30^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E}{Z} \right) \angle -30^\circ - \varphi = I \angle -30^\circ - \varphi$$

$$I_3 = \frac{E \angle -150^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E}{Z} \right) \angle -150^\circ - \varphi = I \angle -150^\circ - \varphi$$

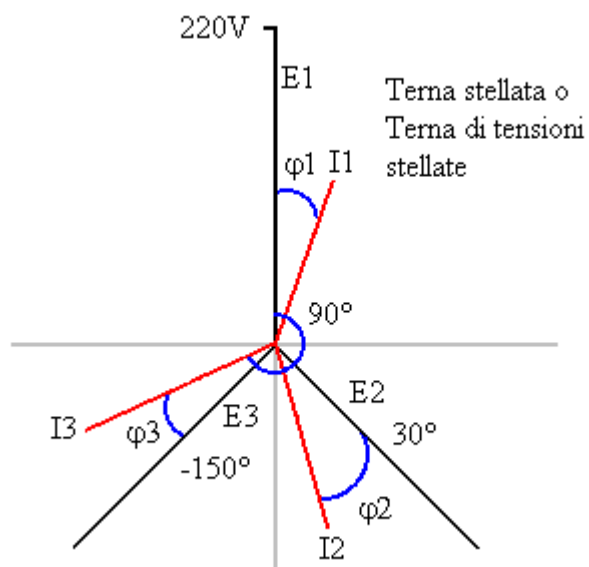


Nuove formule per la P-Q-S

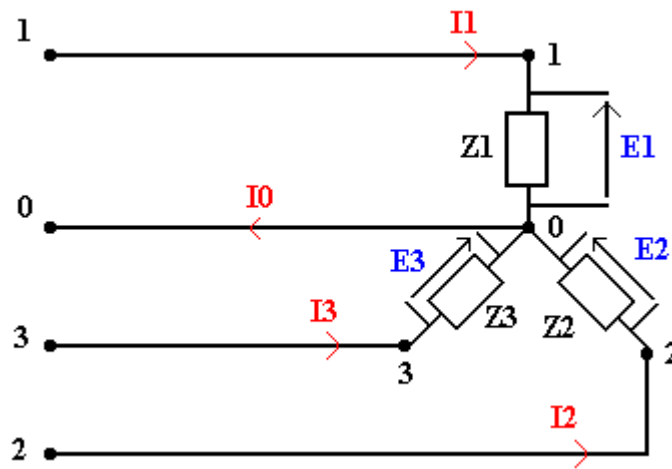
$$\begin{aligned} P_1 &= E_1 * I_1 * \cos \varphi_1 \\ P_2 &= E_2 * I_2 * \cos \varphi_2 \\ P_3 &= E_3 * I_3 * \cos \varphi_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= E_1 * I_1 * \sin \varphi_1 \\ Q_2 &= E_2 * I_2 * \sin \varphi_2 \\ Q_3 &= E_3 * I_3 * \sin \varphi_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= E_1 * I_1 \\ S_2 &= E_2 * I_2 \\ S_3 &= E_3 * I_3 \end{aligned}$$



Triangolo delle potenze di un carico trifase



$$P1 = E1 * I1 * \cos \varphi1$$

$$Q1 = E1 * I1 * \sin \varphi1$$

$$S1 = E1 * I1$$

$$P2 = E2 * I2 * \cos \varphi2$$

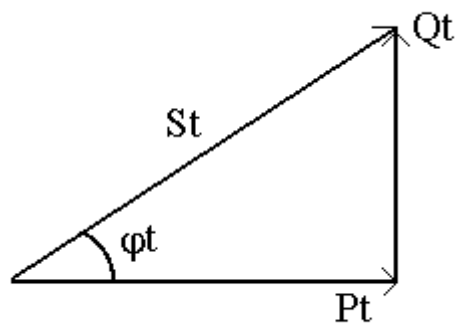
$$Q2 = E2 * I2 * \sin \varphi2$$

$$S2 = E2 * I2$$

$$P3 = E3 * I3 * \cos \varphi3$$

$$Q3 = E3 * I3 * \sin \varphi3$$

$$S3 = E3 * I3$$



$$\varphi_t = \arctg\left(\frac{Q_t}{P_t}\right) \text{ fase del carico trifase}$$

$$\varphi_{dp} = \cos \varphi_t \text{ fattore di potenza del carico trifase}$$

Esempio

$$P_t = 5133W$$

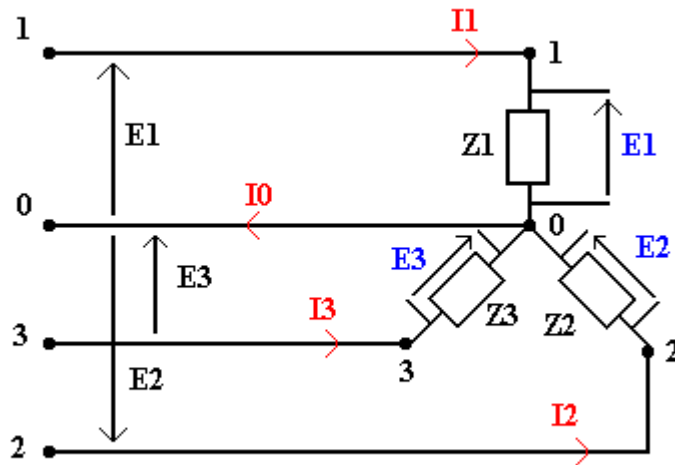
$$Q_t = 5941VAR$$

$$Tg \varphi_t = \left(\frac{Q_t}{P_t}\right) = 1.15$$

$$\varphi_t = \arctg \frac{Q_t}{P_t} = 48.9$$

$$\varphi_{dp} = \cos \varphi_t = 0.65$$

o Studio del carico equilibrato



Dati

$$E_1 = E \angle 90^\circ$$

$$E_2 = E \angle -30^\circ$$

$$E_3 = E \angle -150^\circ$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z \angle \varphi$$

Soluzione

$$I_1 = \frac{E_1}{Z} = \frac{E_1 \angle 90^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E_1}{Z} \right) \angle 90^\circ - \varphi = I \angle 90^\circ - \varphi$$

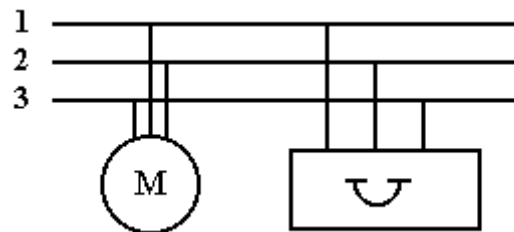
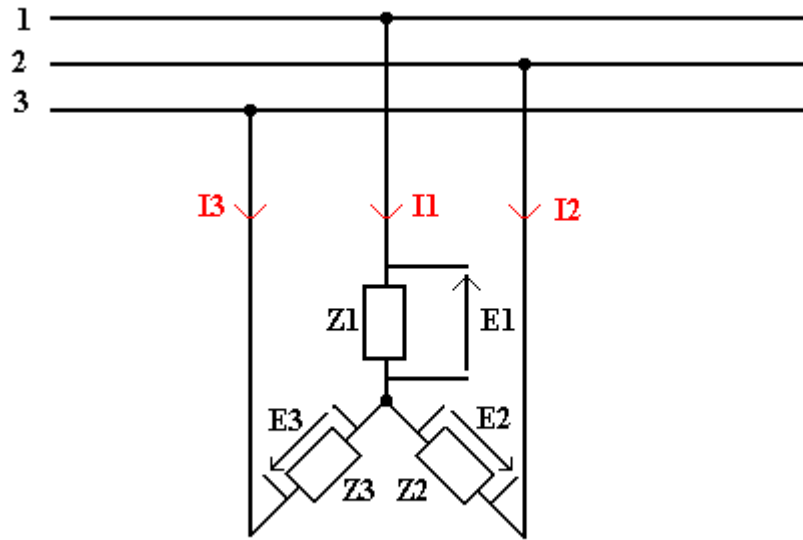
$$I_2 = \frac{E_2}{Z} = \frac{E_2 \angle -30^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E_2}{Z} \right) \angle -30^\circ - \varphi = I \angle -30^\circ - \varphi$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z} = \frac{E_3 \angle -150^\circ}{Z \angle \varphi} = \left(\frac{E_3}{Z} \right) \angle -150^\circ - \varphi = I \angle -150^\circ - \varphi$$

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

In un carico equilibrato la corrente di neutro è sempre 0.
Per un carico equilibrato il filo neutro può essere tolto.

Esempio di circuito senza neutro



Potenze

$$P1 = E * I1 * \cos \varphi1 = E * I * \cos \varphi$$

$$Q1 = E * I1 * \sin \varphi1 = E * I * \sin \varphi$$

$$P2 = E * I2 * \cos \varphi2 = E * I * \cos \varphi$$

$$Q2 = E * I2 * \sin \varphi2 = E * I * \sin \varphi$$

$$P3 = E * I3 * \cos \varphi3 = E * I * \cos \varphi$$

$$Q3 = E * I3 * \sin \varphi3 = E * I * \sin \varphi$$

$$Pt = P1 + P2 + P3 = 3 * (E * I * \cos \varphi)$$

$$Qt = Q1 + Q2 + Q3 = 3 * (E * I * \sin \varphi)$$

$$S1 = E * I1$$

$$S2 = E * I2$$

$$S3 = E * I3$$

$$St = \sqrt{Pt^2 + Qt^2} = \sqrt{(3 * E * I * \cos \varphi)^2 + (3 * E * I * \sin \varphi)^2} =$$

$$\sqrt{9 * E^2 * I^2 * \cos^2 \varphi + 9 * E^2 * I^2 * \sin^2 \varphi} = \sqrt{9 * E^2 * I^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} =$$

$$\sqrt{9 * E^2 * I^2} = 3 * E * I$$

In un carico equilibrato la potenza totale si trova con la formula:

$$P = 3 * E * I * \cos \varphi.$$

In un carico equilibrato la potenza reattiva totale si trova con la formula:

$$Q = 3 * E * I * \sin \varphi.$$

In un carico equilibrato la potenza apparente totale si trova con la formula:

$$S=3 \cdot E \cdot I.$$

In un carico equilibrato il fattore di potenza totale è quello di ogni singola impedenza e si calcola $Fdp = \cos \varphi$.

Nei dati di targa di un carico trifase normalmente troviamo i seguenti valori:

S - E - Fdp

Esempio

15000VA

220V

0.8

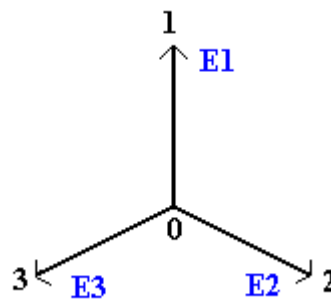
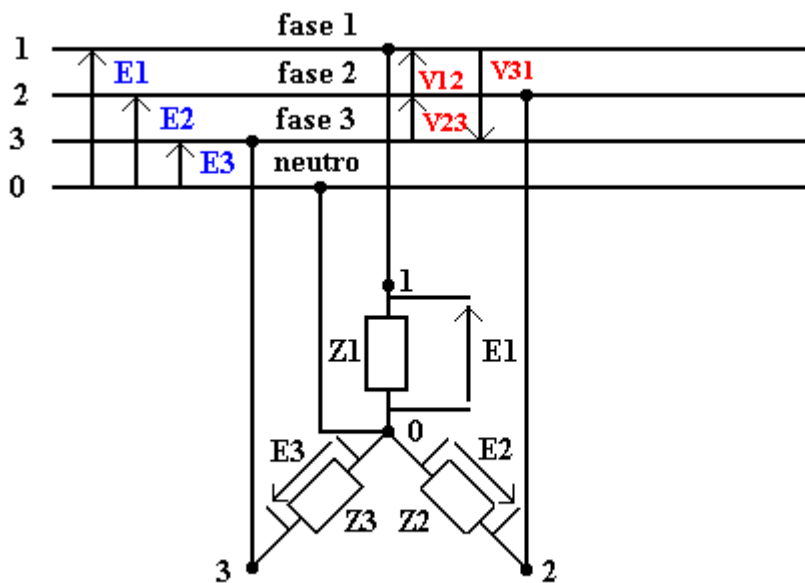
50Hz

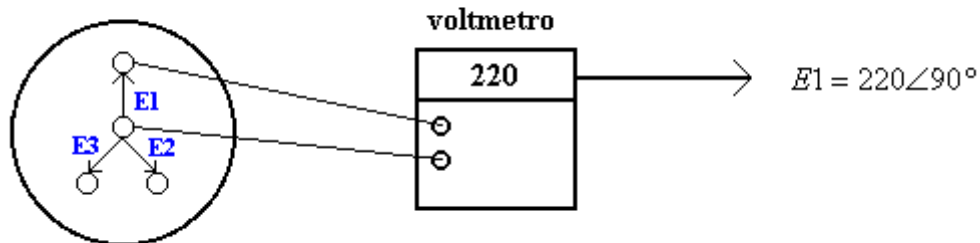
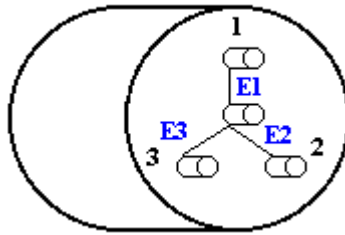
I dati di targa servono solo per calcolare l'impedenza.

Tensioni stellate e tensioni concatenate

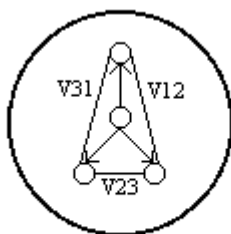
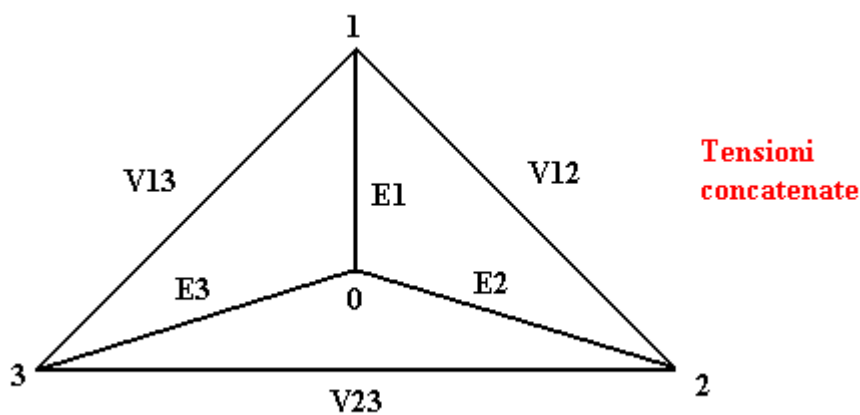
In un sistema trifase si è visto che fra il filo di linea e il filo neutro vi è la tensione stellata. Le tensioni stellate $E_1; E_2; E_3$ hanno lo stesso modulo e angoli prefissati $90^\circ; -30^\circ; -150^\circ$.

I vettori sono dunque : $E_1 = E \angle 90^\circ; E_2 = E \angle -30^\circ; E_3 = E \angle -150^\circ$.



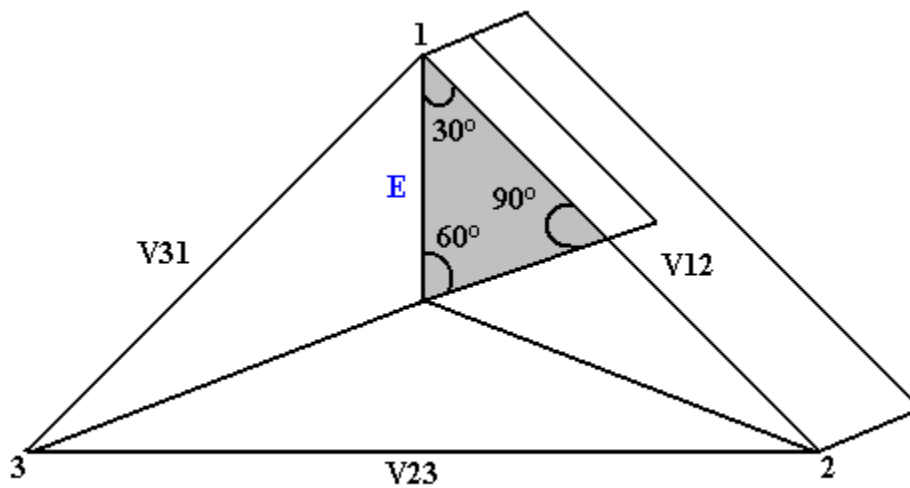


Se si prende un voltmetro e si misura la tensione fra una fase e il neutro si troverà il modulo delle tensioni stellate, nel nostro esempio 220V.



Se invece i puntali del voltmetro sono posizionati fra due fasi allora si leggerà la tensione 380V. Le tre tensioni che leggiamo fra i fili di fase sono chiamate tensioni concatenate. Per convenzione le tensioni concatenate hanno la seguente simbologia : V12;V23;V31. In questo modo i rispettivi vettori si concatenano in senso antiorario (senso positivo di rotazione), inoltre i vettori V12;V23;V31 vanno a formare i lati di un triangolo equilatero.

Relazione fra le tensioni stellate e le tensioni concatenate



$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 + \left(\frac{E}{2}\right)^2 = E^2$$

$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 = E^2 - \left(\frac{E}{2}\right)^2$$

$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 = E^2 - \frac{E^2}{4}$$

$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 = \frac{4E^2 - E^2}{4}$$

$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 = 3\frac{E^2}{4}$$

$$\left(\frac{V}{2}\right)^2 = 3\left(\frac{E}{2}\right)^2$$

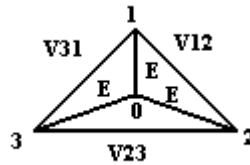
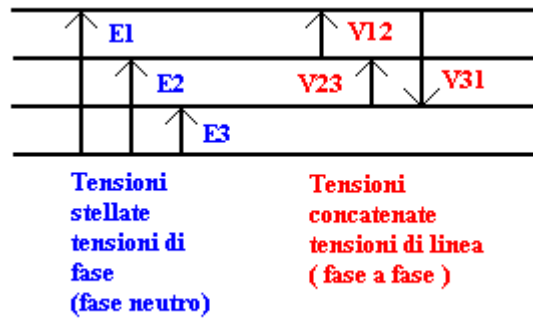
$$\frac{V}{2} = \sqrt{3} \frac{E}{2}$$

$$StE = 220V$$

$$V = \sqrt{3 * E} = 1.73 * 220 = 380V$$

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

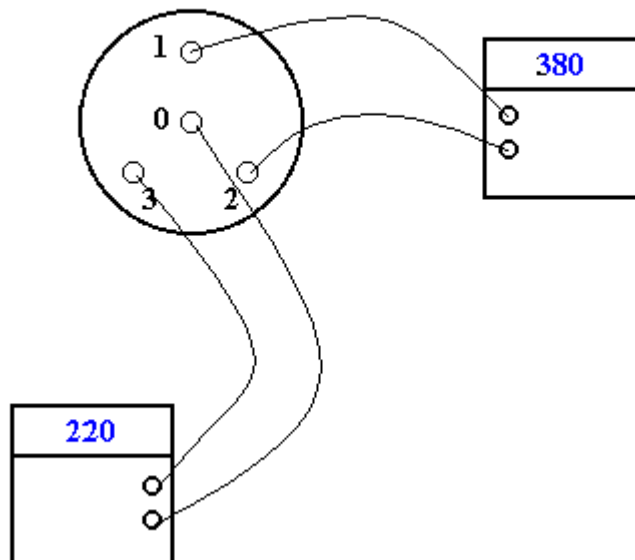
$$E = \frac{V}{\sqrt{3}}$$



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

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

ESEMPIO: $E = 220V \Rightarrow V = E\sqrt{3} = 220\sqrt{3} = 220 * 1.73 = 380V$



Tabellina delle tensioni concatenate

$$V_{12} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{23} = V \angle 0^\circ$$

$$V_{31} = V \angle -120^\circ$$

$$Z_{12} = Z \angle \varphi_{12}$$

$$Z_{23} = Z \angle \varphi_{23}$$

$$Z_{31} = Z \angle \varphi_{31}$$

$$I_1 = ?$$

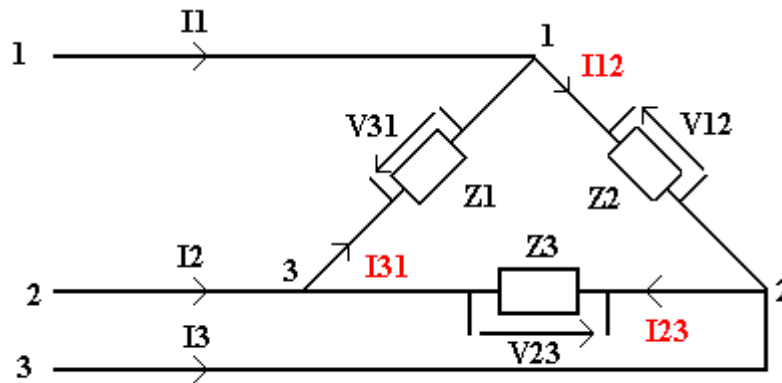
$$I_2 = ?$$

$$I_3 = ?$$

$$I_0 = ?$$

o Studio del carico trifase squilibrato a triangolo

Un carico squilibrato a triangolo ha il seguente circuito:



Nodo 1) $I_1 + I_{31} = I_{12} \Rightarrow I_1 = I_{12} - I_{31}$

Nodo 2) $I_2 + I_{12} = I_{23} \Rightarrow I_2 = I_{23} - I_{12}$

Nodo 3) $I_3 + I_{23} = I_{31} \Rightarrow I_3 = I_{31} - I_{23}$

6/11/2004

Dati

$$V_{12} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{23} = V \angle 0^\circ$$

$$V_{31} = V \angle -120^\circ$$

$$Z_{12} = Z_{12} \angle \varphi_{12}$$

$$Z_{23} = Z_{23} \angle \varphi_{23}$$

$$Z_{31} = Z_{31} \angle \varphi_{31}$$

Soluzione

Nodo 1) $I_1 + I_{31} = I_{12} \Rightarrow I_1 = I_{12} - I_{31}$

Nodo 2) $I_2 + I_{12} = I_{23} \Rightarrow I_2 = I_{23} - I_{12}$

Nodo 3) $I_3 + I_{23} = I_{31} \Rightarrow I_3 = I_{31} - I_{23}$

Calcolo delle correnti di fase

$$I_{12} = \frac{V_{12}}{Z_{12}} = \frac{V \angle 120^\circ}{Z_{12} \angle \varphi_{12}} = \frac{V}{Z_{12}} \angle 120^\circ - \varphi_{12}$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{Z_{23}} = \frac{V \angle 0^\circ}{Z_{23} \angle \varphi_{23}} = \frac{V}{Z_{23}} \angle 0^\circ - \varphi_{23}$$

$$I_{31} = \frac{V_{31}}{Z_{31}} = \frac{V \angle -120^\circ}{Z_{31} \angle \varphi_{31}} = \frac{V}{Z_{31}} \angle -120^\circ - \varphi_{31}$$

Calcolo delle correnti di linea

Nodo 1) $I_1 + I_{31} = I_{12} \Rightarrow I_1 = I_{12} - I_{31}$

Nodo 2) $I_2 + I_{12} = I_{23} \Rightarrow I_2 = I_{23} - I_{12}$

Nodo 3) $I_3 + I_{23} = I_{31} \Rightarrow I_3 = I_{31} - I_{23}$

Calcolo delle potenze

$$P_{12} = V * I_{12} * \cos \varphi_{12}$$

$$Q_{12} = V * I_{12} * \sin \varphi_{12}$$

$$S_{12} = V * I_{12}$$

$$P_t = P_{12} + P_{23} + P_{31}$$

$$P_{23} = V * I_{23} * \cos \varphi_{23}$$

$$Q_{23} = V * I_{23} * \sin \varphi_{23}$$

$$S_{23} = V * I_{23}$$

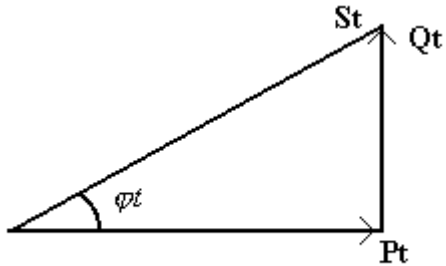
$$Q_t = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}$$

$$P_{31} = V * I_{31} * \cos \varphi_{31}$$

$$Q_{31} = V * I_{31} * \sin \varphi_{31}$$

$$S_{31} = V * I_{31}$$

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2}$$

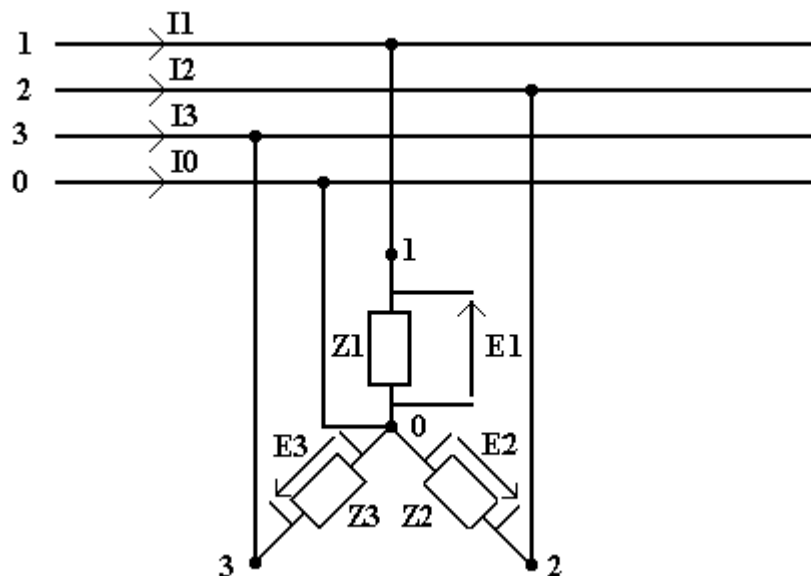


$$\operatorname{Tg} \varphi_t = \frac{Q_t}{P_t}$$

$$\varphi_t = \tan^{-1} \frac{Q_t}{P_t}$$

$$\cos \varphi_t = \frac{P_t}{S_t}$$

Carico squilibrato



$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} = I_1 \angle 90^\circ - \varphi_1; P_1 = E * I_1 * \cos \varphi_1; Q_1 = E * I_1 * \sin \varphi_1$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = I_2 \angle -30^\circ - \varphi_2; P_2 = E * I_2 * \cos \varphi_2; Q_2 = E * I_2 * \sin \varphi_2$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z_3} = I_3 \angle -150^\circ - \varphi_3; P_3 = E * I_3 * \cos \varphi_3; Q_3 = E * I_3 * \sin \varphi_3$$

Carico equilibrato

$$I = \left(\frac{E}{Z} \right)$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = E * I * \cos \varphi$$

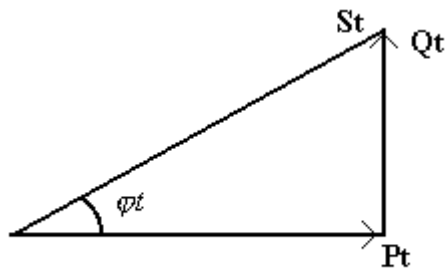
$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = E * I * \sin \varphi$$

$$P_t = 3 * E * I * \cos \varphi$$

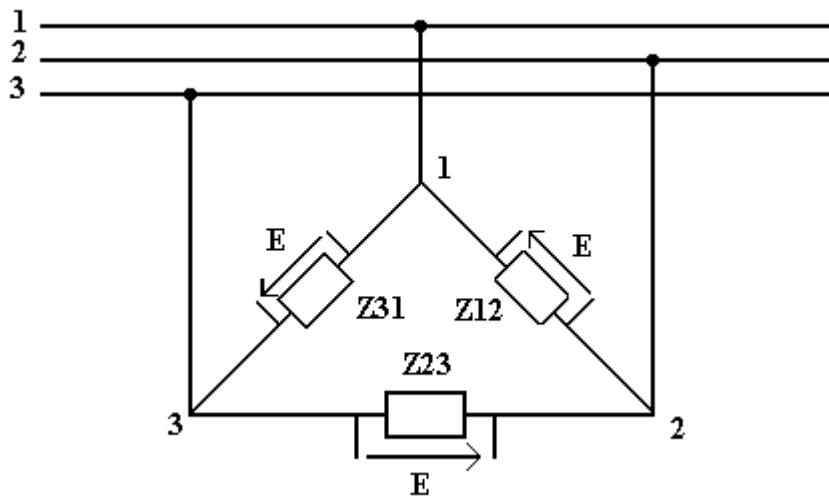
$$Q_t = 3 * E * I * \sin \varphi$$

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 3 * E * I$$

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3$$



o Carico a triangolo squilibrato



$$I_{12} = \frac{V_{12}}{Z_{12}} = I_{12} \angle 120^\circ - \varphi_{12}$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{Z_{23}} = I_{23} \angle 0^\circ - \varphi_{23}$$

$$I_{31} = \frac{V_{31}}{Z_{31}} = I_{31} \angle -120^\circ - \varphi_{31}$$

Nodo 1) $I_1 + I_{31} = I_{12} \Rightarrow I_1 = I_{12} - I_{31}$

Nodo 2) $I_2 + I_{12} = I_{23} \Rightarrow I_2 = I_{23} - I_{12}$

Nodo 3) $I_3 + I_{23} = I_{31} \Rightarrow I_3 = I_{31} - I_{23}$

Verifica $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

$$P_{12} = V * I_{12} * \cos \varphi_{12}; Q_{12} = V * I_{12} * \sin \varphi_{12}; S_{12} = V * I_{12}$$

$$P_{23} = V * I_{23} * \cos \varphi_{23}; Q_{23} = V * I_{23} * \sin \varphi_{23}; S_{23} = V * I_{23}$$

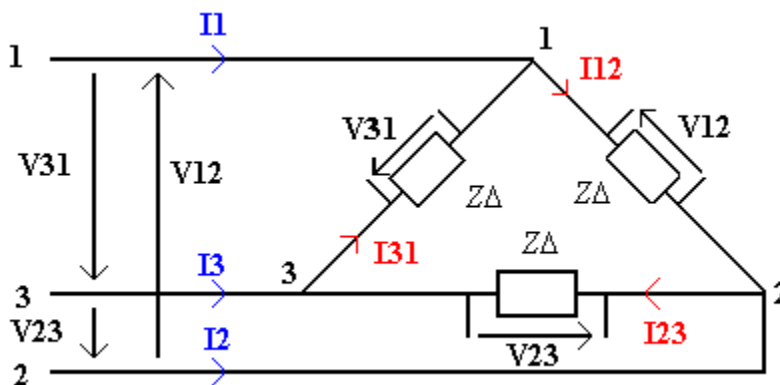
$$P_{31} = V * I_{31} * \cos \varphi_{31}; Q_{31} = V * I_{31} * \sin \varphi_{31}; S_{31} = V * I_{31}$$

$$P_t = P_{12} + P_{23} + P_{31}; Q_t = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}; S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2}$$

9/11/2004

Carico a triangolo equilibrato

Il carico a triangolo equilibrato ha tutte le impedenze uguali, cioè $Z_{12} = Z_{23} = Z_{31}$; $Z_{\Delta} = Z_{\Delta} \angle \varphi_{\Delta}$



dati

$$V_{12} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{23} = V \angle 0^\circ$$

$$V_{31} = V \angle -120^\circ$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3; Z_{\Delta} = Z_{\Delta} \angle \varphi_{\Delta}$$

Soluzione

$$I_{12} = \frac{V_{12}}{Z_{12}} = \frac{V \angle 120^\circ}{Z_{\Delta} \angle \varphi_{\Delta}} = \left(\frac{V}{Z_{\Delta}} \right) \angle 120^\circ - \varphi_{\Delta} = I_{\Delta} \angle 120^\circ - \varphi_{\Delta}$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{Z_{23}} = \frac{V \angle 0^\circ}{Z_{\Delta} \angle \varphi_{\Delta}} = \left(\frac{V}{Z_{\Delta}} \right) \angle 0^\circ - \varphi_{\Delta} = I_{\Delta} \angle 0^\circ - \varphi_{\Delta}$$

$$I_{31} = \frac{V_{31}}{Z_{31}} = \frac{V \angle -120^\circ}{Z_{\Delta} \angle \varphi_{\Delta}} = \left(\frac{V}{Z_{\Delta}} \right) \angle -120^\circ - \varphi_{\Delta} = I_{\Delta} \angle -120^\circ - \varphi_{\Delta}$$

DISEGNO

Correnti di linea

$$I_1 = I_{12} - I_{31}$$

$$I_2 = I_{23} - I_{12}$$

$$I_3 = I_{31} - I_{23}$$

Somma e differenza di due vettori in modo grafico

La somma di due vettori si esegue graficamente utilizzando la regola del parallelogramma in figura:

fig. 1

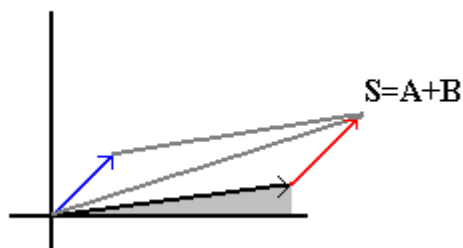
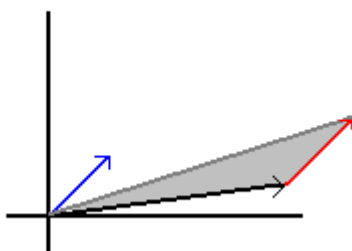
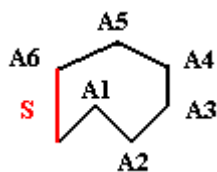


fig. 2

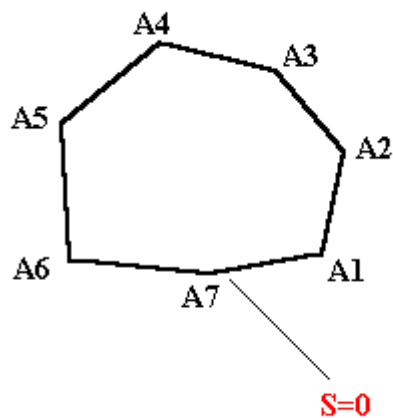


Dalla figura 2, che deriva dalla regola del parallelogramma di figura 1, si ricava la seguente regola: “la somma vettoriale di due o più vettori si esegue graficamente disegnando i vettori uno dietro l’altro unendo la punta del precedente con l’origine del seguente”. Il vettore risultante si ottiene unendo la punta dell’ultimo vettore con l’origine del primo, la freccia della risultante, ad esempio in figura A abbiamo la somma di 6 vettori.

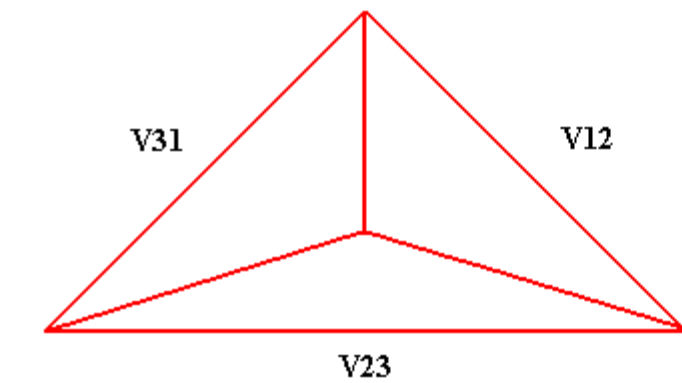


Esempio

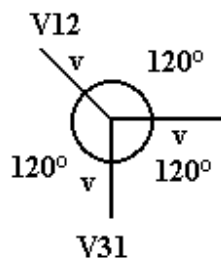
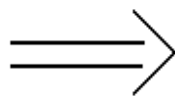
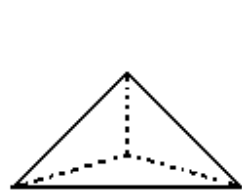
Dati i vettori di figura calcolare graficamente la loro somma:



Quando l’ ultimo tocca il primo la risultante è 0.



$$V_{12} + V_{23} + V_{31} = 0$$



$$V_{23} = V_{12} + V_{23} + V_{31} = 0$$

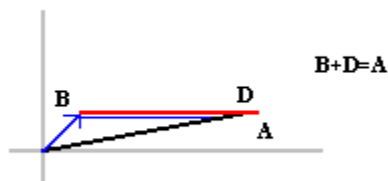
Una terna di vettori sfasati di 120° e aventi lo stesso modulo ha per risultante il vettore nullo

In un carico equilibrato le correnti hanno lo stesso modulo e sono sfasate tra loro di 120° quindi la loro somma è 0.

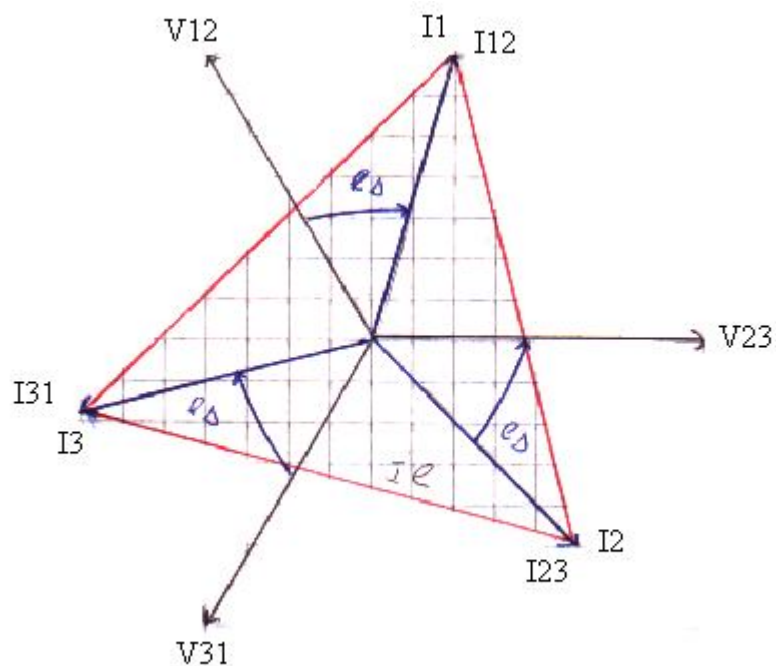
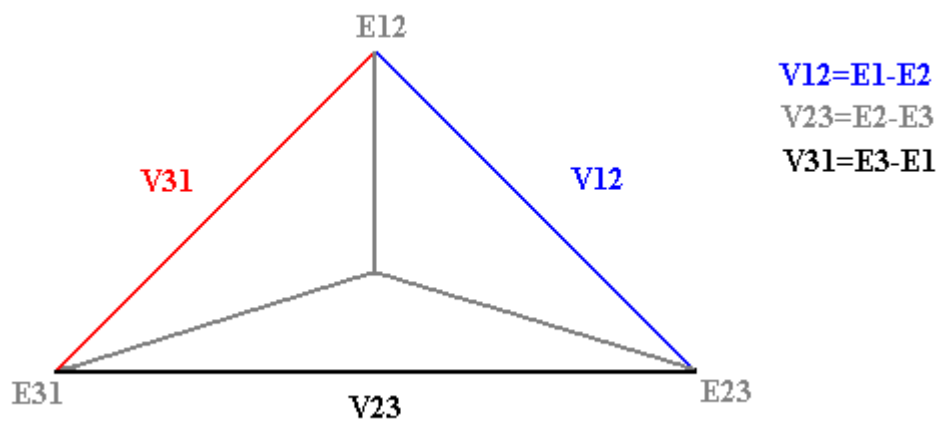
Differenza grafica di due vettori

Consideriamo due vettori A e B come in figura

fig.3



Dalla figura 3 si ricava la regola della differenza grafica di due vettori: “ dati i due vettori A e B disegnati con l' origine in comune il vettore differenza A-B si trova fra le punte dei due vettori e la faccia mostra il primo vettore considerata nella differenza “.



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Perché l'ultimo vettore tocca il primo

$$I_l = I_\Delta * \sqrt{3}$$

Calcolo delle potenze

11/11/2004

$$P_{12} = V * I_{12} * \cos \varphi_{12} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \cos \varphi_{\Delta}$$

$$Q_{12} = V * I_{12} * \sin \varphi_{12} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \sin \varphi_{\Delta}$$

$$S_{12} = V * I_{12} \Rightarrow V * I_{\Delta}$$

$$P_{23} = V * I_{23} * \cos \varphi_{23} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \cos \varphi_{\Delta}$$

$$Q_{23} = V * I_{23} * \sin \varphi_{23} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \sin \varphi_{\Delta}$$

$$S_{23} = V * I_{23} \Rightarrow V * I_{\Delta}$$

$$P_{31} = V * I_{31} * \cos \varphi_{31} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \cos \varphi_{\Delta}$$

$$Q_{31} = V * I_{31} * \sin \varphi_{31} \Rightarrow V * I_{\Delta} * \sin \varphi_{\Delta}$$

$$S_{31} = V * I_{31} \Rightarrow V * I_{\Delta}$$

$$P_t = P_{12} + P_{23} + P_{31} = 3 * V * I_{\Delta} * \cos \varphi_{\Delta}$$

$$Q_t = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31} = 3 * V * I_{\Delta} * \sin \varphi_{\Delta}$$

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 3 * V * I_{\Delta}$$

Osservazione importantissima

$$I_l = \sqrt{3} * I_{\Delta} / \sqrt{3} \Rightarrow \sqrt{3} * I_l = \sqrt{3} * \sqrt{3} * I_{\Delta} = \sqrt{3} * I_l = 3 * I_{\Delta}$$

$$P_t = 3 * V * I_{\Delta} * \cos \varphi_{\Delta} \Rightarrow \sqrt{3} * I_l * V * \cos \varphi_{\Delta}$$

$$Q_t = 3 * V * I_{\Delta} * \sin \varphi_{\Delta} \Rightarrow \sqrt{3} * I_l * V * \sin \varphi_{\Delta}$$

$$S_t = 3 * V * I_l$$

Queste formule sono importantissime perché permettono di calcolare la potenza totale (Pt;Qt;St) utilizzando il valore della tensione concatenata ed il valore della corrente di linea che sono valori esplicitati nei dati di targa.

Carico a stella

$$P_1 = E * I_l * \cos \varphi$$

$$P_2 = E * I_l * \cos \varphi$$

$$P_3 = E * I_l * \cos \varphi$$

$$P_t = 3 * E * I_l * \cos \varphi$$

$$V = \sqrt{3} * E / \sqrt{3} \Rightarrow \sqrt{3} * V = 3 * E$$

$$P_t = \sqrt{3} * V * I_l * \cos \varphi$$

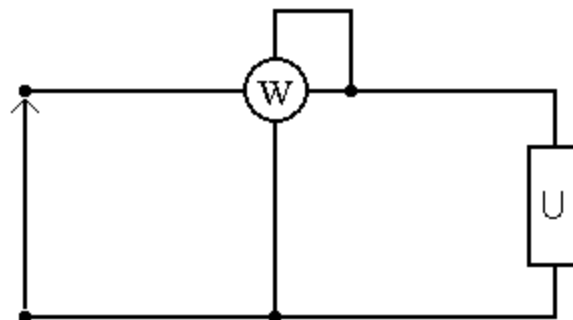
Queste formule vengono usate in qualsiasi carico equilibrato sia a stella che a triangolo.

16/11/2004

A stella $V_{tg} = 400V \Rightarrow E_{tg} = V / \sqrt{3} \cong 230V$ $P_{tg} = 20 \cdot 10^3 W$ $\cos \mu_1 = 0.8 \Rightarrow \mu_1 = 36.86$ $P_{tg} = \sqrt{3} * V * I_{tg} * \cos \mu_1$ $I_{tg} = \frac{P_{tg}}{\sqrt{3} * V_{tg} * \cos \mu_1} = 36.08 A$ $Z_1 = \frac{E_{tg}}{I_{tg}} = \frac{230}{36.08} = 6.4 \angle 36.86^\circ$	A triangolo $V_{tg} = 400V \Rightarrow E_{tg} = V / \sqrt{3} \cong 230V$ $P_{tg} = 25 \cdot 10^3 W$ $\cos \mu_2 = 0.707 \Rightarrow \mu_2 \cong 45$ $P_{tg} = \sqrt{3} * V_{tg} * I_{tg} * \cos \mu_2$ $I_{tg} = \frac{P_{tg}}{\sqrt{3} * V_{tg} * \cos \mu_2} = 51.04 A$ $Z_c = \frac{E_{tg}}{I_{tg}} = \frac{230}{51.04} = 4.52 \angle 45^\circ$
--	---

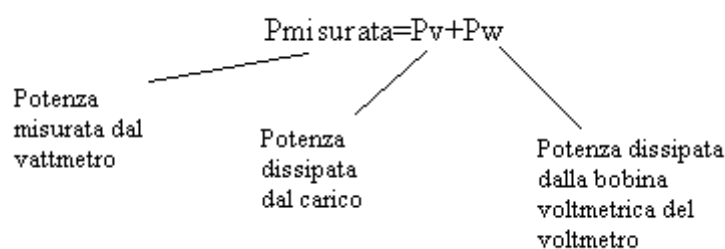
30/11/2004

o Misure di potenza in corrente alternata monofase



Inserzione di un wattmetro con volumetrica a valle

Con questa inserzione il wattmetro indica una potenza attiva che è data dalla somma della potenza attiva dissipata dal carico con la potenza dissipata dalla bobina volumetrica del wattmetro stesso.

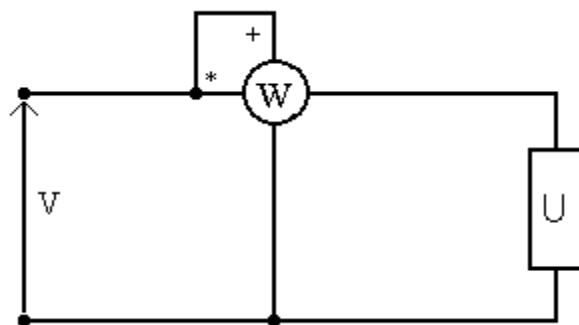
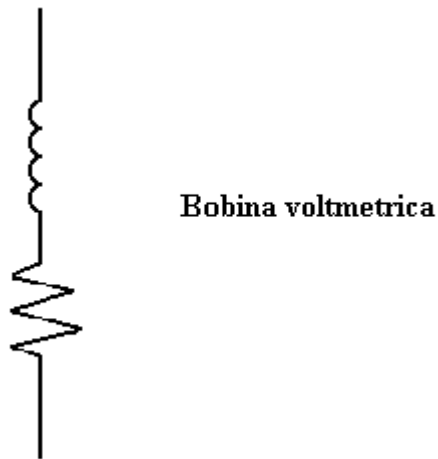


La misura contiene un errore sistematico dovuto al tipo di inserzione utilizzato.

I dati di targa del wattmetro oltre alle portate e al tipo di wattmetro ($\cos \varphi$ normale o basso $\cos \varphi$) riportano anche il valore della resistenza delle bobine amperometriche e voltmetriche.

$$P = \frac{V^2}{R_{vw}}$$

$$P_u = P_{mis} - \frac{V^2}{R_{vw}}$$



Inserzione di un voltmetro
con volumetrica a monte

Con questo tipo di inserzione il wattmetro indica (misura) una potenza data dalla somma della potenza assorbita dal carico con la potenza dissipata dalla bobina amperometrica del wattmetro stesso.

$$P_{mis} = P_u + P_{aw}$$

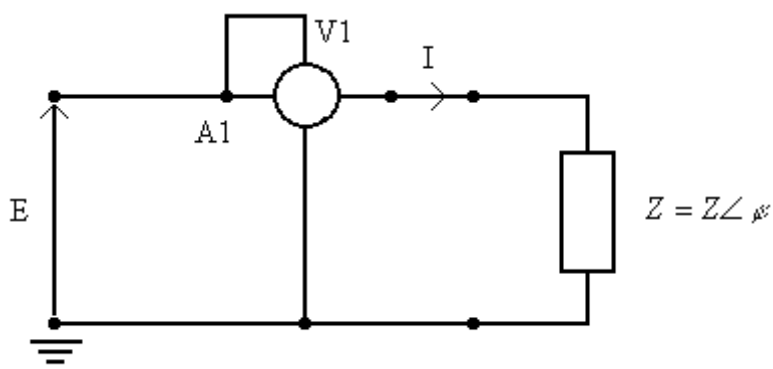
$$P_u = P_{mis} - P_{aw}$$

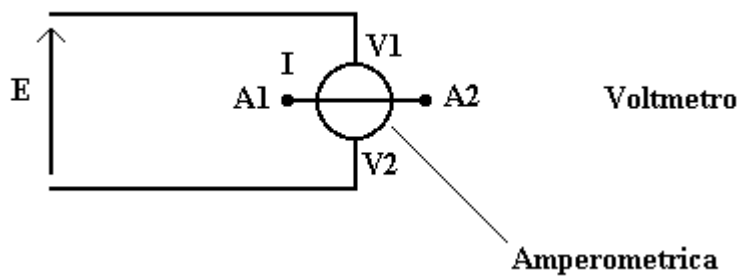
$$P_u = P_{mis} - R_a * I^2$$

2/12/2004

o Misure di potenze con il metodo Aron

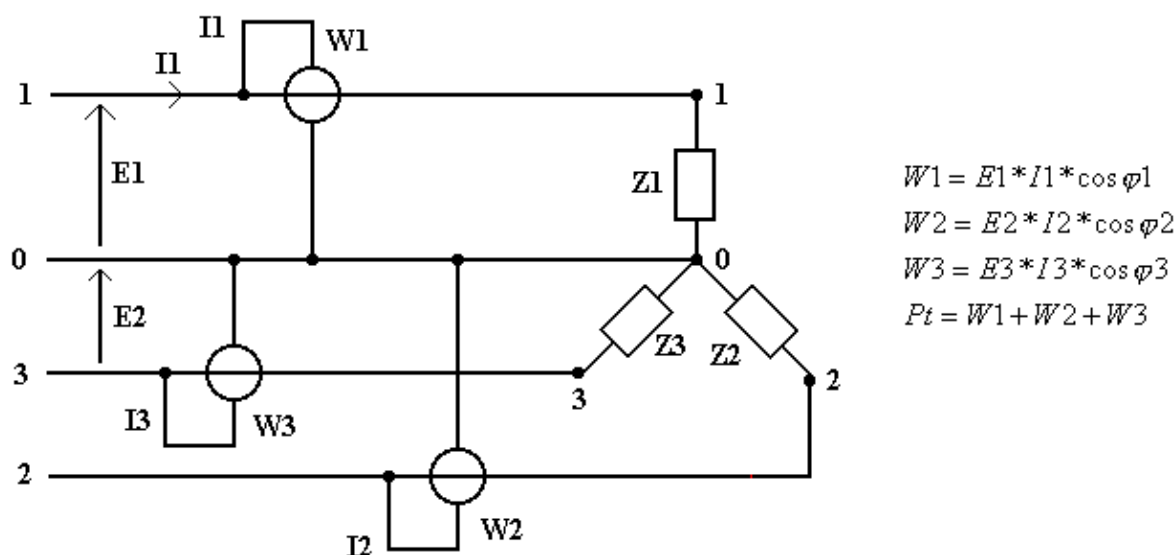
Per misurare la potenza attiva di un carico monofase si usa inserire un wattmetro come in figura A.
Figura A



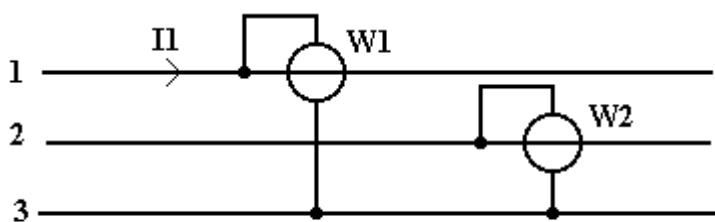


Il wattmetro deve essere inserito correttamente come in figura, al suo interno la volumetrica misura la tensione, l' amperometrica misura la corrente ed automaticamente viene misurato il $\cos\varphi$ e viene eseguito il prodotto $E \cdot I \cdot \cos\varphi$, l' ago indicatore dello strumento si posiziona sul numero $E \cdot I \cdot \cos\varphi$. Per misurare la potenza di un carico trifase si può procedere come in figura B.

Figura B



Con questo metodo si misurano le potenze di tre carichi, poi esso è attuabile solo in presenza di filo neutro e solo per carico a stella. Se il carico è un carico a triangolo e non c'è filo neutro si adotta il metodo Aron.



$$Pt = W1 + W2$$

$$W1 = V13 \cdot I1 \cdot \cos(\angle V13; I1)$$

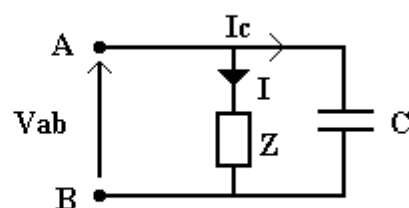
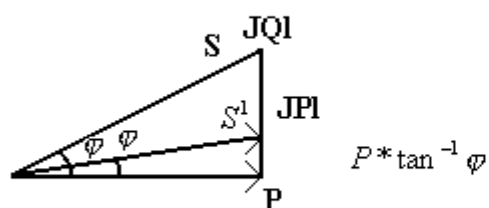
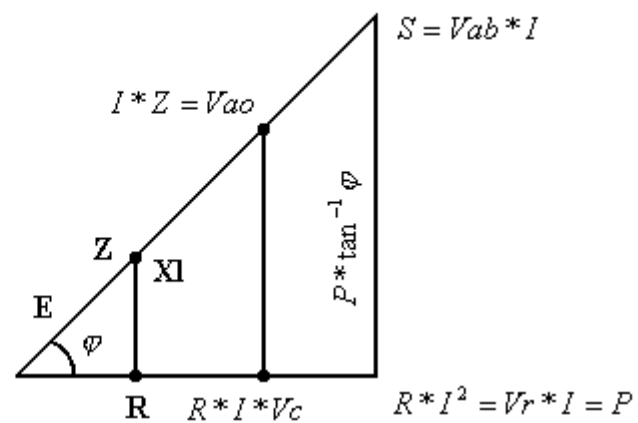
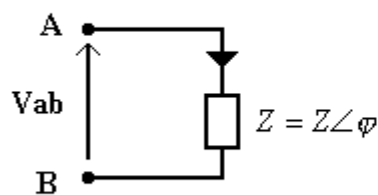
$$W2 = V23 \cdot I2 \cdot \cos(\angle V23; I2)$$

$$\cos\varphi = \frac{1 + X}{2\sqrt{1 - X + X^2}}$$

		
squilibrati	con neutro	senza neutro
	senza neutro	
equilibrati	con neutro	senza neutro
	senza neutro	
rifasamento		

Rifasamento

Ripasso sul rifasamento monofase

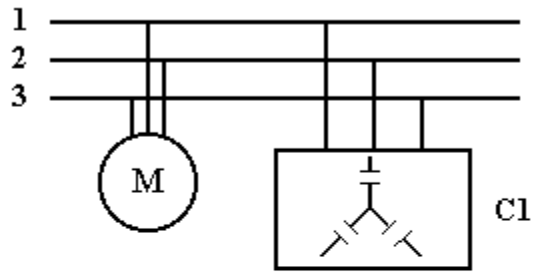


$$C = \frac{P(\tan^{-1} \varphi - \tan^{-1} \varphi^1)}{\omega * V_{ab}^2} \rightarrow Q_c = \omega c * V_{ab}^2$$

$$Q_c = P * (\tan^{-1} \varphi - \tan^{-1} \varphi^1)$$

Rifasamento trifase

1) Rifasamento trifase di un carico equilibrato con batteria di condensatori a stella.



$$\cos \varphi = 0.5$$

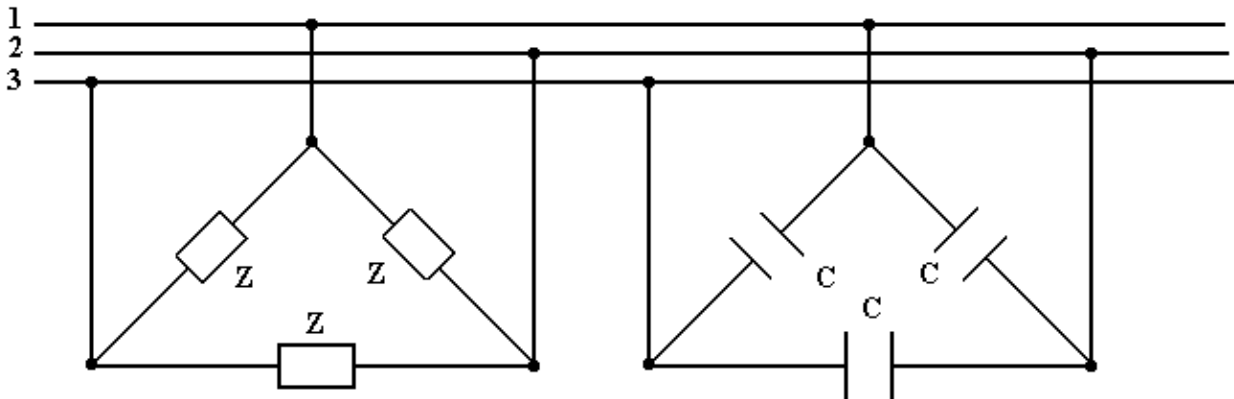
$$\cos \varphi^1 = 0.9$$

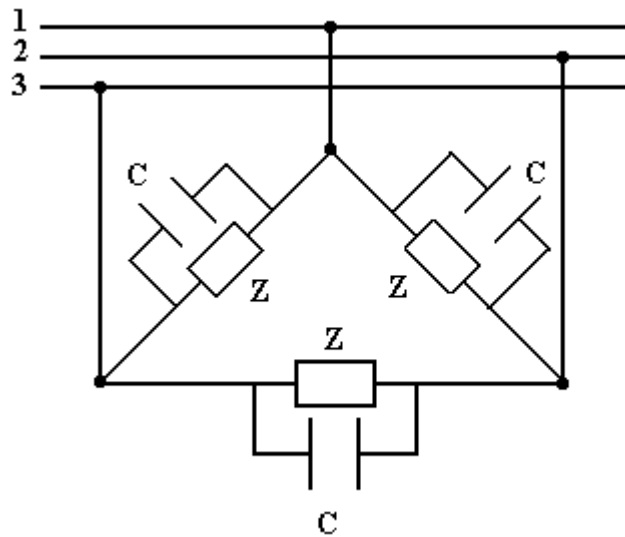
$$C_{\lambda} = \frac{P2(\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{\omega * E^2} \Rightarrow \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{3 * \omega * V^2}$$

$$P_z = \frac{1}{3} * P_t = \frac{P}{3}$$

$$C_{\lambda} = \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{\omega * V^2}$$

2) Rifasamento con batteria a triangolo

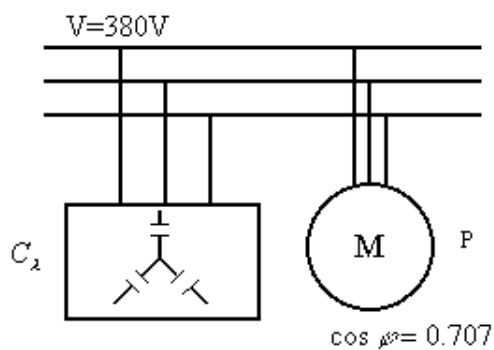




$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} C_{\lambda}$$

$$C_{\Delta} = \frac{P2(\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{\omega * V^2}$$

$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} \frac{P(\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{\omega * V^2}$$

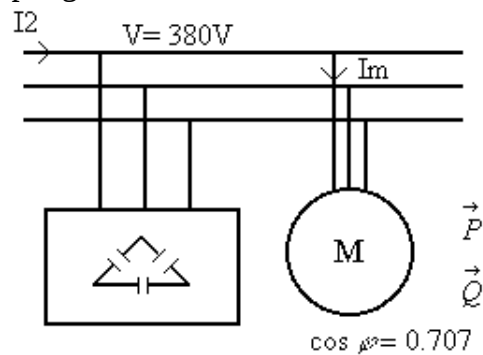


$$\cos \varphi^1 = 0.9$$

Che valore deve avere
(λ affinché l'angolo φ
si rifasi a φ¹)

$$C_{\lambda} = \frac{P * (\tan \varphi - \tan \varphi^1)}{\omega * V^2}$$

Riepilogo



$$\cos \varphi^1 = 0.9$$

$$C_{\Delta} = \frac{1}{3} C_{\lambda}$$

$$Sm = \sqrt{3} * V * Im$$

$$S^1 = \sqrt{3} * V * I$$

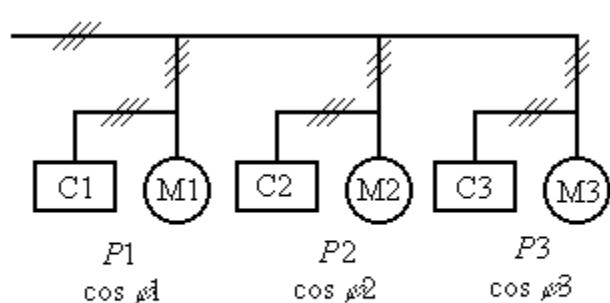
Utilità del rifasamento:

L'ente distributore obbliga il committente (il proprietario di impianti elettrici), quando la potenza P_m supera un certo valore abbastanza elevato (all'incirca 30-40 KW) a rifasare l'impianto con una batteria di condensatori, se il committente non rifasa allora l'ente distributore applica una tariffa più elevata. Se il rifasamento non altera la potenza del motore, cioè la potenza attiva, invece abbassando l'angolo φ si ottiene una riduzione della potenza S e quindi come si vede dalle formule si ottiene una riduzione della corrente assorbita (Il minore I_m). Il motore funziona sempre allo stesso modo perché P_m rimane inalterata ma la corrente assorbita è inferiore. Questo è un grosso vantaggio perché più piccola è la corrente e più piccola è la sezione del cavo che trasporta corrente, quindi meno rame viene utilizzato e meno costoso è l'impianto.

ATTENZIONE: è sempre consigliabile rifasare a 0.9, il migliore rifasamento teoricamente sarebbe a 1, ma in questo caso il circuito elettrico va in risonanza e sviluppa delle sovracorrenti e sovratensioni che possono danneggiare il circuito quindi è sconsigliabile un rifasamento a 1.

Rifasamento distribuito e rifasamento concentrato

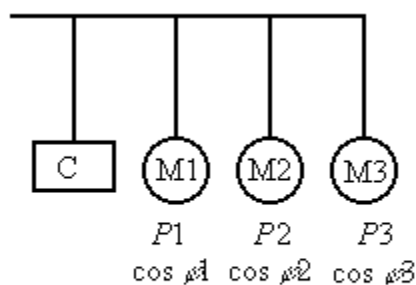
In presenza di più carichi è possibile rifasare ogni singolo carico oppure rifasare contemporaneamente tutti i carichi, nel primo caso si chiama rifasamento e nel secondo concentrato.



$$C1 \lambda = \frac{P1(\tan \varphi1 - \tan \varphi^1)}{\omega V^2}$$

$$C2 \lambda = \frac{P2(\tan \varphi2 - \tan \varphi^1)}{\omega V^2}$$

$$C3 \lambda = \frac{P3(\tan \varphi3 - \tan \varphi^1)}{\omega V^2}$$



$$P_t = P1 + P2 + P3$$

$$Q_t = Q1 + Q2 + Q3$$

$$S = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2}$$

$$\varphi_t = \tan^{-1} \frac{Q_t}{P_t}$$

$$C = \frac{P_t(\tan \varphi_t - \tan \varphi^1)}{\omega V^2}$$

3) Rifasamento di un carico squilibrato

Anche in questo caso è possibile eseguire un rifasamento distribuito o concentrato, nel distribuito applicheremo un condensatore su ogni carico monofase, nel concentrato applicheremo un unico condensatore a monte del carico trifase.

DISEGNO IN MEMORIA

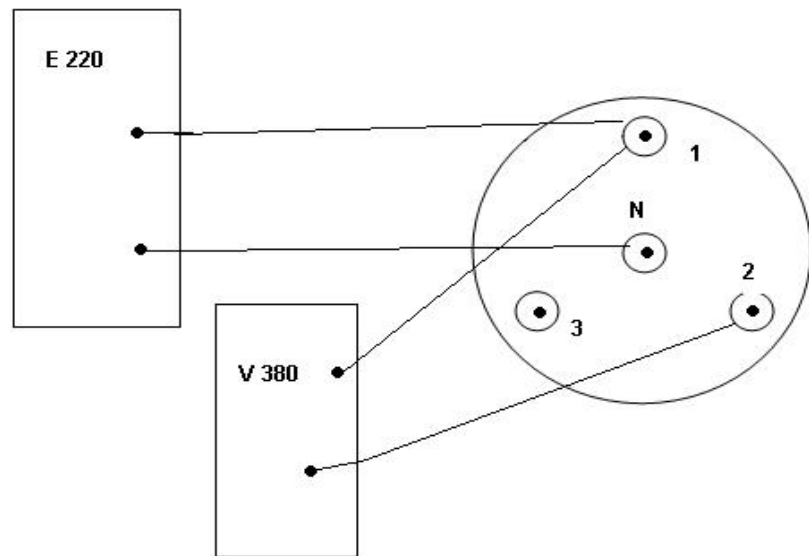
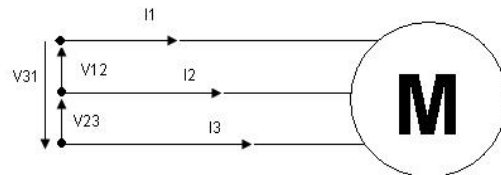
Risulta migliore il rifasamento distribuito perché le correnti diminuiscono in tutte le parti , nella pratica viene eseguito il concentrato subito dopo il contattore di energia. Nella pratica si deve tener presente che non tutti i carichi vengono inseriti contemporaneamente nel circuito quindi bisogna tener conto di un coefficiente di contemporaneità che riduce la potenza totale P_t oppure al giorno d' oggi si installa un apparecchio rifasatore in modo automatico a secondo alla presenza ei carichi.

11/1/05

RIPASSO

→ Le tensioni stellate sono le tensioni che si misurano da neutro a conduttore, e sono sfasate tra di loro di 120° .

→ Le tensioni concatenate sono le tensioni che si misurano da conduttore a conduttore, e non hanno il neutro. Anch'esse sono sfasate di 120° .

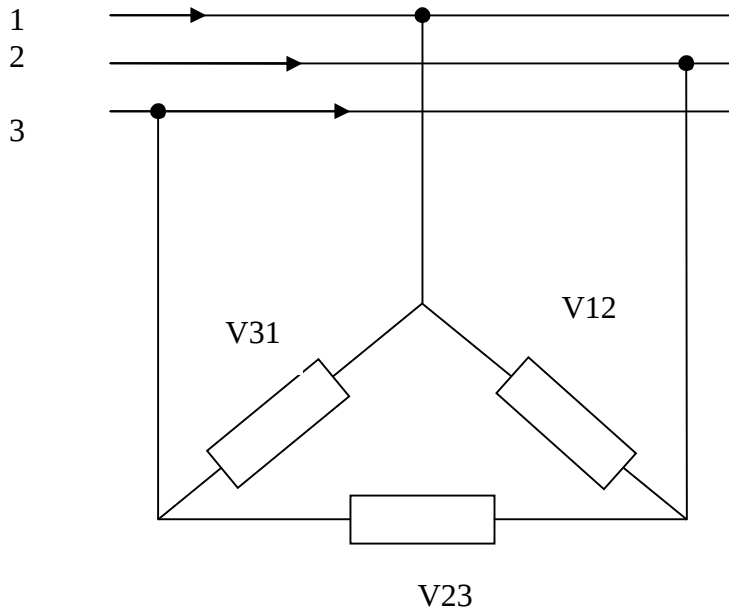


TENSIONI STELLATE	TENSIONI CONCATENATE
$\overline{E1} = E \angle 90^\circ$	$V12 = V \angle 120^\circ$
$\overline{E2} = E \angle -30^\circ$	$V23 = V \angle 0^\circ$
$\overline{E3} = E \angle -150^\circ$	$V31 = V \angle -120^\circ$

Carico a triangolo.

Esercizio.

Una linea trifase, 400V, alimenta un carico squilibrato a triangolo come in figura. Calcolare le correnti di linea, la P del carico trifase e il suo $\cos\varphi$.



$$\begin{aligned} \text{K1)} \quad \overline{I_1} + \overline{I_{31}} &= \overline{I_{12}} \\ \overline{I_1} &= \overline{I_{12}} - \overline{I_{31}} \end{aligned}$$

$$\overline{Z_{12}} = 50 \angle 30^\circ$$

$$\overline{Z_{23}} = 100 \angle 45^\circ$$

$$\overline{Z_{31}} = 200 \angle 60^\circ$$

$$\overline{I_{12}} = \frac{400 \angle 120^\circ}{50 \angle 30^\circ} = 8 \angle 90^\circ = 0 + j8$$

$$\overline{I_{23}} = \frac{400 \angle 0^\circ}{100 \angle 45^\circ} = 4 \angle -45^\circ = 2,83 - j2,83$$

$$\overline{I_{31}} = \frac{400 \angle -120^\circ}{200 \angle 60^\circ} = 2 \angle -180^\circ = -2 + j0$$

$$\overline{I_1} = \overline{I_{12}} - \overline{I_{31}} = 2 + j8$$

$$+ \overline{I_3} = \overline{I_{23}} - \overline{I_{31}} = 4,83 + j2,83$$

$$+ \overline{I_2} = \overline{I_{23}} - \overline{I_{12}} = 2,83 + j5,18$$

$$= 0 + j0$$

CAPITOLO XIV

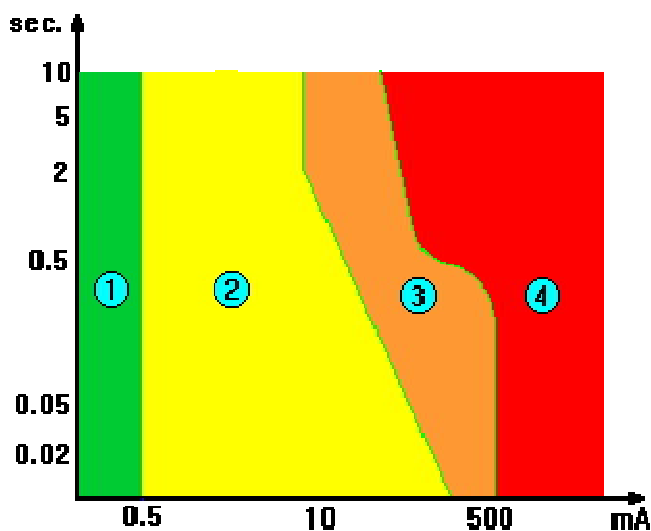
--- Da un esempio di avviso (unificazione Enel) ---

PERICOLOSITA' DELLA CORRENTE ELETTRICA

Normalmente, in presenza di un incidente di natura elettrica, si è abituati a far riferimento alla tensione quale causa dei danni (infatti si leggono o si ascoltano frasi del tipo: "... è rimasto folgorato da un a scarica a 20.000 volt"). In realtà, anche se è dalla tensione che parte il meccanismo, quella che produce direttamente i danni è la corrente.

Quando una corrente elettrica attraversa il corpo umano, i danni conseguenti dipendono dal suo **valore** e dalla **durata** del fenomeno:

- A)** - La **tetanizzazione** si ha quando i muscoli rimangono contratti fino a quando il passaggio di corrente elettrica non cessa: il soggetto può sembrare attaccato alla parte in tensione, in quanto incapace di eseguire movimenti. Paradossalmente può accadere che valori più elevati di tensione provochino una violenta reazione del muscolo, tale da allontanare la persona dalla parte in tensione.
- B)** - Per correnti più alte può intervenire l'**arresto della respirazione**.
- C)** - Il cuore funziona grazie a stimoli elettrici, pertanto una corrente elettrica esterna può alterare il suo funzionamento fino alla **fibrillazione ventricolare**.
- D)** - La corrente elettrica, per effetto Joule, riscalda le parti attraversate. Si possono, quindi, avere **ustioni**.



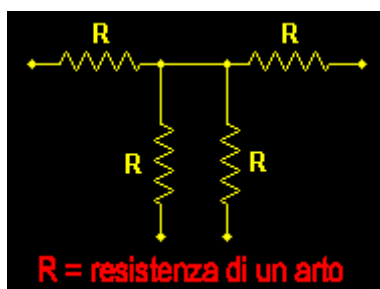
In figura sono rappresentate, in base al valore della corrente (espresso in *mA* - *milliampere*) e alla durata del fenomeno (in *secondi*), quattro zone di pericolosità, per una frequenza compresa tra i 15 e i 100 Hz:

- **zona 1** - al di sotto di 0,5 mA la corrente elettrica non viene percepita (si tenga presente che una piccola lampada da 15 watt assorbe circa 70 mA);
- **zona 2** - la corrente elettrica viene percepita senza effetti dannosi;
- **zona 3** - si possono avere

tetanizzazione e disturbi reversibili al cuore, aumento della pressione sanguigna, difficoltà di respirazione;

- **zona 4** - si può arrivare alla fibrillazione ventricolare e alle ustioni.

Da un punto di vista circuitale il corpo umano può essere rappresentato tramite quattro resistenze (quadripolo equivalente ad una persona):

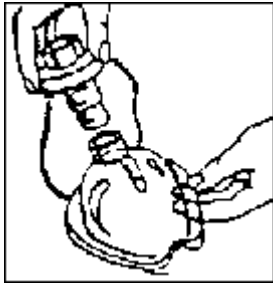


Per gli effetti sul cuore bisogna tener conto anche del percorso della corrente. Ad esempio, tra i più pericolosi, abbiamo i percorsi *mano sinistra-torace*, *mano destra-torace*, *mani-piedi*.

Il valore della corrente elettrica dipende anche dalla *resistenza* che il corpo umano oppone. Questa diminuisce con pelle umida o in presenza di ferite, aumentando la pressione del contatto e aumentando la superficie di contatto. La *resistenza* aumenta, invece, in presenza di zone callose.

Si possono ritenere come livelli di sicurezza i **25 volt** in corrente alternata e i **60 volt** in corrente continua.

Correnti ad **alta frequenza** ($f \gg 50$ Hz) sono meno pericolose di quelle a 50 Hz.



SOCCORSI D'URGENZA DA PRESTARE AI COLPITI DA CORRENTE ELETTRICA

L'esposizione a scariche elettriche può provocare **arresto cardiaco** immediato (per fibrillazione ventricolare o altre aritmie ventricolari gravi) o **apnea** (per inibizione de centri respiratori, contrazione tetanica dei muscoli respiratori o paralisi muscolare prolungata).

AZIONE IMMEDIATA

E' indispensabile quando la folgorazione compromette l'attività della respirazione e del cuore. Se il colpito non viene soccorso entro 3 o 4 minuti, può subire conseguenze irreparabili. Accertare innanzitutto che l'infortunato sia fuori dal contatto con le parti in tensione e dare quindi immediatamente inizio alla respirazione artificiale.

NON RITARDARE IL SOCCORSO NEPPURE PER CHIAMARE IL MEDICO, salvo che i soccorritori siano almeno due o che l'unico soccorritore possa richiamare l'attenzione senza abbandonare l'infortunato.

NON TOCCARE

Non toccare il colpito se non si è ben sicuri che il medesimo non è più in contatto o immediatamente vicino alle parti in tensione. In caso contrario togliere tensione. Qualora il circuito non possa essere prontamente interrotto, isolare adeguatamente la propria persona con guanti isolanti, panni asciutti, collocandosi su tavole di legno secco, ecc. e muovere l'infortunato afferrandolo preferibilmente per i vestiti se asciutti. In alternativa allontanare dall'infortunato - con un solo movimento rapido e deciso - la parte in tensione, usando fioretti, pezzi di legno secco o altri oggetti in materiale isolante. Non toccare con la propria persona altri oggetti specialmente se metallici.

RESPIRAZIONE ARTIFICIALE

CON MASCHERINA ORONASALE

- 1** - Adagiare il colpito sulla schiena e collocarsi dal lato della sua testa.
- 2** - Munirsi dell'apposita maschera oronasale e posizionare correttamente il gruppo valvola nel collo della maschera.
- 3** - Piegare alquanto all'indietro il capo dell'infortunato (per aprire il passaggio dell'aria) ponendogli una mano sotto la nuca mentre con l'altra si fa leva sulla fronte.
- 4** - Applicare la maschera coprendo il naso e la bocca dell'infortunato avendo cura che lo stesso mantenga la posizione.
- 5** - Dare due lente e profonde insufflazioni ed osservare il sollevamento del torace dell'infortunato. Quando il torace ritorna in posizione naturale, praticare un ciclo regolare di 12-15 insufflazioni per minuto.

IMPORTANTE: se l'infortunato vomita togliere la maschera, girare da un lato la testa e ripulire la bocca. Prima di riutilizzare la maschera soffiare per ripulirla.

IN CASO DI INDISPONIBILITA' DELLA MASCHERA ORONASALE POTRA' ESSERE UTILIZZATA LA TECNICA BOCCA-BOCCA O BOCCA-NASO EVENTUALMENTE CON L'INTERPOSIZIONE DI UN FAZZOLETTO O DI UNA GARZA.

MASSAGGIO CARDIACO



Se oltre l'arresto della circolazione si constata l'assenza dei battiti del cuore (per ricercare questo segno comprimere con due dita il collo dell'infortunato ai lati del pomo di Adamo) occorre effettuare il massaggio esterno del cuore mediante compressioni ritmiche sul torace. Per far ciò:

1 - Applicare le due mani sovrapposte con il palmo rivolto in basso in corrispondenza della parte inferiore dello sterno.

2 - Esercitare pressioni ritmiche energiche verticali usufruendo del peso del corpo e staccando ogni volta le mani dal torace per permettergli di espandersi per elasticità.

3 - Continuare con ritmo di 50-60 pressioni al minuto.

Il massaggio cardiaco deve essere sempre preceduto dalla respirazione artificiale con insufflazione orale. Pertanto mentre il primo soccorritore pratica la respirazione con maschera oronasale, un secondo effettuerà contemporaneamente il massaggio cardiaco.

Nel caso in cui il soccorritore sia solo, dovrà comportarsi così:

Iniziare con 5 massaggi del cuore - effettuare una insufflazione orale - riprendere con altri 5 massaggi - effettuare una insufflazione e così via.

Sospendere le operazioni di rianimazione soltanto quando l'infortunato avrà ripreso a respirare da solo e le pupille ritorneranno a restringersi: controllare, però, ancora per qualche tempo se la respirazione spontanea si mantiene. In caso contrario continuare anche durante il trasporto in ospedale e finché subentri personale sanitario specializzato.

Dopo la ripresa il colpito non deve essere rimosso finché non possa respirare normalmente senza assistenza. Egli deve essere esaminato da un medico prima che gli sia permesso di camminare. Non gli deve essere dato nessun stimolante, se non prescritto dal medico. Ricordare ancora: LA TEMPESTIVITA' E' ESSENZIALE.

IN PRESENZA DI USTIONI

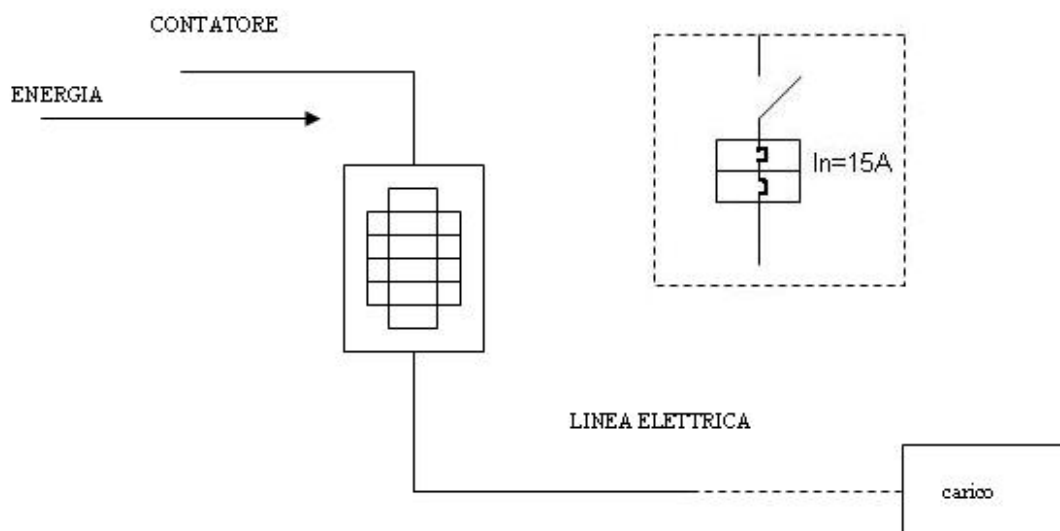
- 1** - Iniziare subito la respirazione artificiale ed eventualmente il massaggio cardiaco se l'infortunato non respira e non presenta attività cardiaca.
- 2** - Non rimuovere i vestiti bruciati e non rompere le vesciche.
- 3** - Non applicare lozioni o pomate.
- 4** - Ricoprire la parte ustionata con garza sterile, asciutta. Trattare in tal modo (ricercando se vi sono) anche le ustioni nel punto di uscita della corrente.
- 5** - Se l'infortunato non ha perso conoscenza ed è in grado di inghiottire, gli si possono dare per bocca 300 grammi di acqua (una scodella) nella quale siano stati disciolti il bicarbonato ed il sale da cucina contenuti nelle bustine in dotazione. Se l'infortunato vomita, cessare la somministrazione del liquido.
- 6** - Trasferire senza indugio l'infortunato all'ospedale.

--- Da un esempio di avviso (unificazione Enel) ---

PERICOLOSITA' DELLA CORRENTE ELETTRICA PROTEZIONI

Nei circuiti elettrici esistono due tipi di protezioni: la prima protegge il circuito elettrico e le apparecchiature, la seconda protegge l'uomo.

La prima si chiama anche protezione magnetotermica ed è realizzata da un interruttore automatico magnetotermico.



L'interruttore magnetotermico scatta quando al suo interno passa una corrente di cortocircuito, che solitamente ha valori molto elevati: 3000A; 4500A (casa); 6000A; 12KA.

Di solito in una stanza di abitazione possiamo avere 3000A di corto circuito; vicino al contatore possiamo avere circa 4500A oppure se la cabina elettrica è vicina all'edificio anche 6000A. I cortocircuiti nascono prevalentemente per il malfunzionamento di un carico, per vetusta dei cavi elettrici o, in casi più rari, per errore umano.

All'interno dell'interruttore automatico c'è un dispositivo magnetico che, quando è attraversato da forte corrente, produce una grande forza elettromagnetica che ha il potere di aprire il circuito mediante un interruttore.

All'interno dell'automatico, oltre ad esserci una parte magnetica, c'è anche una parte termica che protegge il circuito (aprendo il contatto) alla presenza di sovracorrenti.

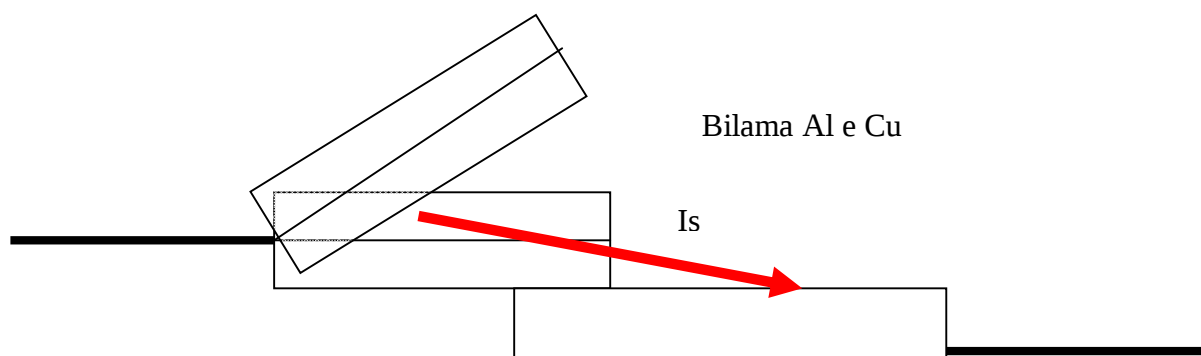
Le sovracorrenti sono correnti non molto elevate come i corto circuiti ma che producono effetti negativi sull'isolante dei fili perché lo surriscaldano e lo fanno invecchiare prima.

Le sovracorrenti hanno valori da 1.5 a 3 volte la I_n .

Sezione [mmq]	Corrente nominale I_n	Potenza [W] con $V=220\text{Volt}$
1,5	10A	2200W
2,5	16A	3,5kW

Se $I_n=10\text{A}$ (circuito luce) allora $I_s=1,5*10=15\text{A}$ oppure $2*10=20\text{A}$

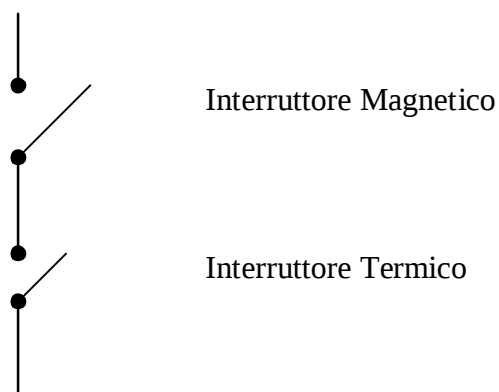
Il meccanismo che fa scattare il contatto è un relè termico in quanto la sovracorrente produce un aumento di temperatura e tale aumento produce l'apertura del contatto.



La corrente I attraversa il contatto a bilama, se la corrente inizia ad essere più grande di quella nominale il dispositivo inizia a surriscaldarsi a provoca la dilatazione termica della lama bimetallica. I 2 metalli si dilatano in modo diverso, uno di più e l'altro di meno; pertanto ponendo il metallo che si dilata di più verso il basso e a contatto con il polo fisso e l'altro metallo viene posto sopra, si ottiene una deformazione che si inarca verso l'alto aprendo il contatto elettrico e bloccando quindi la corrente che ha generato il fenomeno.

Successivamente la barretta raffreddandosi ritorna nella posizione iniziale.

I due interruttori descritti sono in serie (stessa corrente).



PROTEZIONE DELL'UOMO DAI CONTATTI DIRETTI

L'uomo può entrare in contatto con parti elettriche in due modi:

- 1) Modo diretto: toccando direttamente la parte elettrica
- 2) Modo indiretto: toccando una massa metallica che per un malfunzionamento risulta carica elettricamente.

DISEGNO

$$I_{\text{ritorno}} = I_{\text{andata}} - I_d$$

IN NORMALE FUNZIONAMENTO $I_d = 0 \rightarrow I_a = I_r$

IN FUNZIONAMENTO ANORMALE $I_d \neq 0 \rightarrow I_a \neq I_r$

Dal 1990 la legge impone l'installazione dell'interruttore automatico chiamato in gergo "salvavita".

Il salvavita funziona come segue:

Il salvavita misura le correnti I_a ed I_r ; ne fa la differenza (quindi calcola la I_d).

- se $I_d = 0$ il salvavita non entra in azione.
- se $I_d < I_{dn} = 0.03A$ il salvavita non entra in azione.
- Se $I_d > I_{dn}$ allora il salvavita apre i suoi contatti e blocca tutte le correnti nel tempo massimo di 200ms allora l'uomo **forse** si salva (infatti se la corrente è elevatissima anche la durata di 200ms può essere mortale!).

Per eliminare la parola forse dobbiamo accompagnare il salvavita con l'impianto di terra.

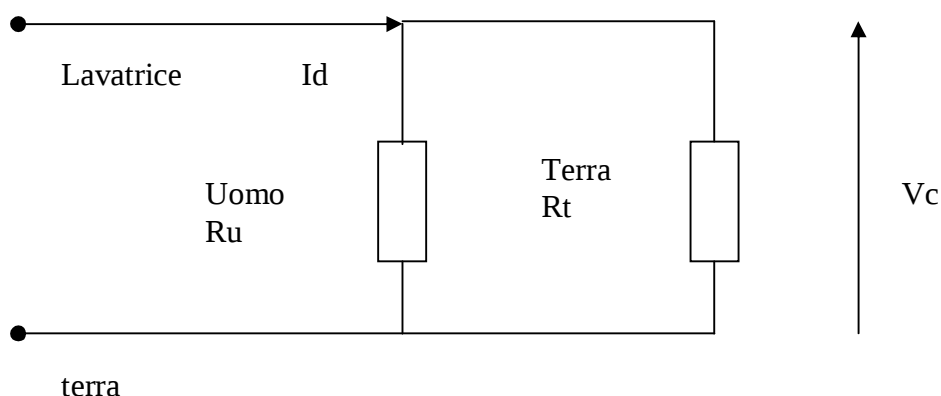
Il salvavita è uno strumento elettromagnetico.

Il differenziale misura $I_d = I_a - I_r$, se questa corrente I_d è $> 0.03A$ e attraversa il corpo umano, essa può anche essere mortale. Dire che I_d è > 0.03 vuol dire che I_d potrebbe anche essere 5, 10, 100 A, qualunque cosa superiore a 0.03 A.

Il salvavita scatta in un tempo di 200msec, ma se il corpo umano è attraversato da 20 A per 200msec c'è il pericolo di morte, quindi il salvavita scatta ma non salva la vita.

SALVAVITA = Il termine tecnico è INTERRUTTORE DIFFERENZIALE.

Per salvare la vita alle persone bisogna accoppiare il differenziale con l'impianto di terra, cioè bisogna fare in modo che in presenza di corrente di dispersione, questa deve essere convogliata in un filo giallo-verde e diretta verso terra e non verso l'uomo.



La corrente di dispersione I_d per andare verso terra ha due strade R_u (attraverso l'uomo) e R_t verso terra (attraverso il filo di terra).

Siccome la resistenza dell'uomo risulta essere 20 volte più grande della resistenza di terra, la corrente I_d viene tutta convogliata verso R_t , si è quindi creato un percorso preferenziale per la corrente I_d .

LIMITAZIONE DELLA TENSIONE DI CONTATTO

La tensione di contatto è quella che si misura fra il corpo soggetto a dispersione e la terra. La tensione di contatto non è pericolosa quando è al di sotto dei 50V. Negli ambienti di lavoro la tensione di contatto è di 25V, bisogna quindi tenere la tensione di contatto al massimo uguale a questo valore. Per fare ciò, bisogna soddisfare la seguente disequazione.

$$V_c \leq R_t * I_d$$

se

$$V_c = 25V$$

$$I_d = 0.03V$$

allora

$$R_t = \frac{25}{0.03} = 833\Omega$$

Quando viene installato l'impianto di terra, il tecnico deve misurare la resistenza che deve essere inferiore o uguale a 833Ω .

Il d.pr. 547/1955 impone per gli ambienti di lavoro una R_t minore o uguale a 20Ω indipendentemente dal tipo di protezione automatica.

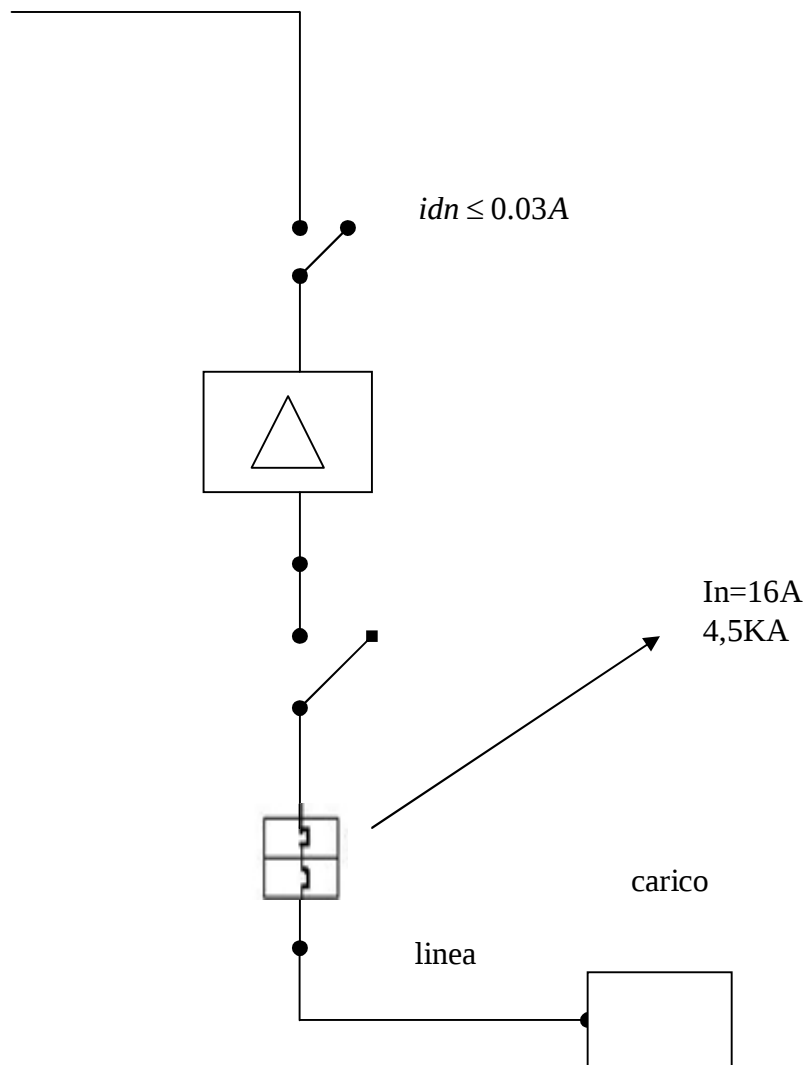
La R_t risulta di valore basso in terreni limosi, sabbiosi, ricchi di acque saline

$$R_t = 1.2\Omega.$$

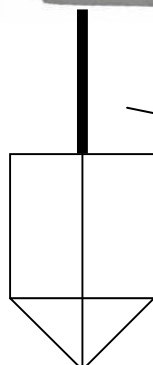
Invece nei terreni rocciosi la corrente trova un grande ostacolo e la resistenza quindi è molto grande,

$$R_t = \text{da } 500 \text{ a } 200 \Omega.$$

La protezione obbligatoria a capo di un impianto elettrico sono quelle riportate in figura di pagina seguente.



Il salvavita è dotato di un interruttore, tasto bianco o arancione con una lettera T che si chiama tasto di prova. Premendo tale tasto il salvavita scatta. Il tasto deve essere premuto una volta al mese per fare in modo che all'interno non si formi polvere o ossido che potrebbero portare a malfunzionamenti.



CAVO di terra $S > 6mm$

PICCHETTO