

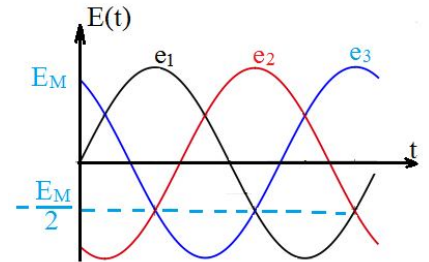
SISTEMI TRIFASE

I sistemi 3fase hanno fondamentale importanza nella produzione, trasformazione e trasmissione dell'energia elettrica.

Il sistema trifase è applicato in campo industriale o comunque per impianti con macchinari di maggiore potenza.

Un sistema trifase di tensione e di corrente viene normalmente generato da un **alternatore trifase**, che una macchina rotante in grado di trasformare potenza meccanica in elettrica. Si può considerare tale macchina come l'insieme di **tre generatori monofase**, ognuno dei quali sviluppa una forza elettromotrice (f.e.m) **alteranata sinusoidale**, che:

- hanno lo stesso **valore efficace** $E = E_M/\sqrt{2}$ (E_M : 300-480 V);
- hanno la **stessa frequenza** (50 Hz);
- sono **sfasati** tra loro di 120° .



In questo caso, il sistema delle tre tensioni viene chiamato **isofrequenziale** e **simmetrico**. In caso contrario il sistema è detto dissimmetrico.

TENSIONI DI FASE E TENSIONI DI LINEA

Il **sistema di distribuzione trifase** si compone di **tre fili di linea** (L_1, L_2, L_3 : indicate anche con le lettere **R,S,T**) e di un **filo neutro** (**0**: indicato con N) che può anche mancare.

Un **generatore trifase** può essere ottenuto collegando tre generatori monofase sinusoidali, isofrequenziali in modo da costituire un tripolo. La connessione è detta a:

- stella (fig. 2);
- triangolo (fig. 3).

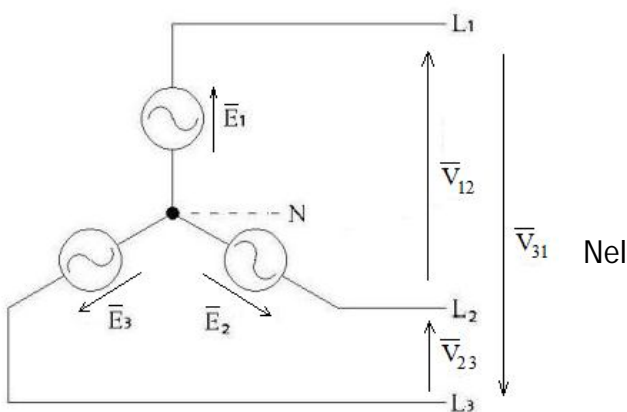


fig. 2

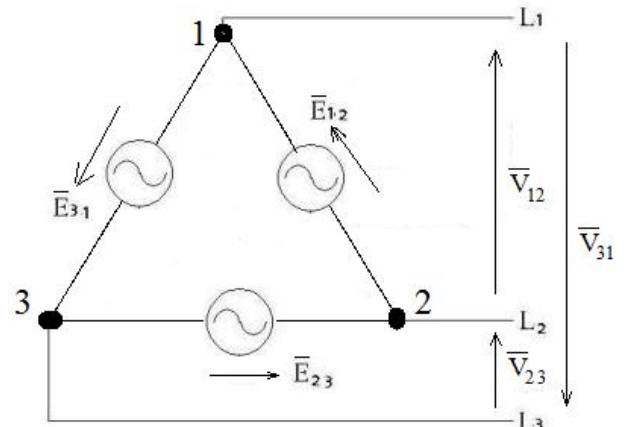


fig. 3

COLLEGAMENTO A STELLA, le tensioni di $e_1(t), e_2(t), e_3(t)$ presenti tra ciascun filo di linea ed il neutro sono chiamate **tensioni stellate** (o **tensioni di fase**) alcune volte sono rappresentate con V_f e sono indicati con i seguenti vettori $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$. Si suppone che, le tre tensioni sono espresse con le formule:

$$e_1(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \quad e_2(t) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad e_3(t) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)$$

Nella forma polare:

$$\bar{E}_1 = E \angle 90^\circ = E e^{j\pi/2} \quad \bar{E}_2 = E \angle -30^\circ = E e^{-j2\pi/3} \quad \bar{E}_3 = E \angle -150^\circ = E e^{-j4\pi/3}$$

Nella forma cartesiana o algebrica:

$$\bar{E}_1 = E (\cos 90 + j \sin 90) = j E \quad \bar{E}_2 = E [\cos(-30) + j \sin(-30)] = E \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} \right)$$

$$\bar{E}_3 = E [\cos(-150) + j \sin(-150)] = -E \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right)$$

Vengono rappresentate nel piano immaginario di Gauss, mediante la fig. 4

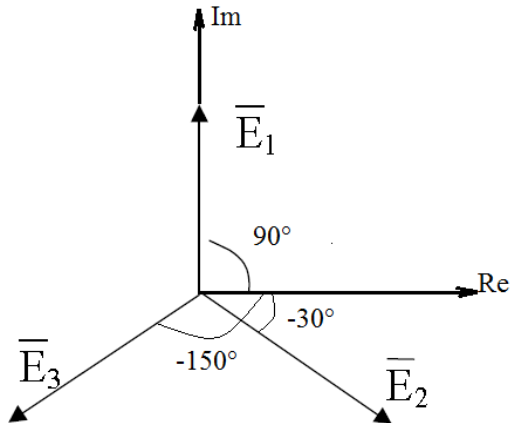


fig. 4

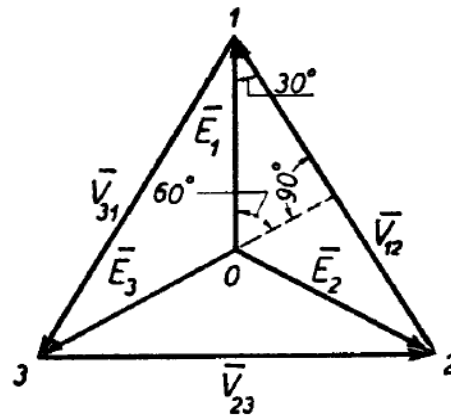


fig. 5

Le **tensioni di linea o concatenate** (fig. 5) sono sfasate fra loro di 120° e vengono rappresentate con i vettori V_{12} , V_{23} , V_{31} attraverso le seguenti formule: $V_{12} = E_1 - E_2$; $V_{23} = E_2 - E_3$; $V_{31} = E_3 - E_1$ **utilizzando la forma cartesiana**, si ottiene che:

$$\bar{V}_{12} = E \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{3}{2} \right) \quad \bar{V}_{23} = \sqrt{3} E \quad \bar{V}_{31} = -E \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{3}{2} \right)$$

Indicando con V_l il **valore efficace** comune delle tre tensioni concatenate, si ha:

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

Nel **COLLEGAMENTO A DELTA O TRIANGOLO**, le tensioni di fase indicati con i vettori E_{12} , E_{23} , E_{31} , risultano uguali alle tensioni di linea V_{12} , V_{23} , V_{31} .

$$V_l = E$$

La proprietà di una terna simmetrica di tensione

In generale, si può dire che la somma algebrica delle tensioni di una terna simmetrica è sempre nulla (2° principio di Kirchhoff alla maglia)

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad \text{oppure} \quad \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 = 0$$

È noto che la distribuzione BT, in Italia, è realizzata con una tensione stellata avente valore efficace di 220V, che corrisponde ad una tensione concatenata avente valore efficace di 380V ($380 = \sqrt{3} \cdot 220$)

CORRENTI DI FASE E CORRENTI DI LINEA

1- collegamento su un carico equilibrato a triangolo

un carico trifase si dice equilibrato, quando è costituito da tre impedenze uguali tra loro sia come modulo che come argomento o fase.

$$(\bar{Z} = \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_3 = Z e^{j\varphi})$$

In questo caso, la somma algebrica delle correnti è uguale a zero (1° principio di Kirchhoff), in caso contrario il carico si dice squilibrato.

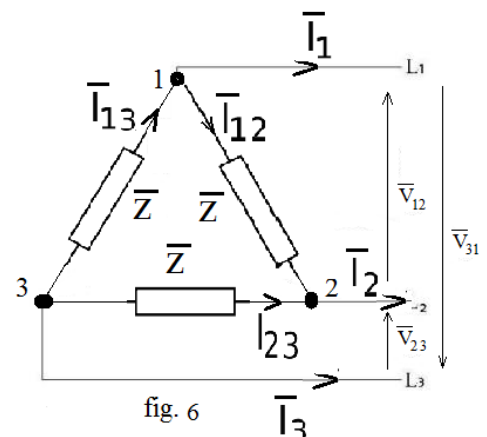


fig. 6

I_1, I_2 e I_3 sono le correnti di linea che, hanno un valore efficace uguale a I_f
 I_{12}, I_{23} e I_{31} sono le correnti di fase che, hanno un valore efficace uguale a I_f
 φ : indica la fase o l'argomento dell'impedenza Z , che determina a sua volta, lo sfasamento tra la tensione e la corrente.

Mediante la legge di Ohm, si ha:

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{V}_{12}}{\bar{Z}} \quad \bar{I}_{23} = \frac{\bar{V}_{23}}{\bar{Z}} \quad \bar{I}_{31} = \frac{\bar{V}_{31}}{\bar{Z}}$$

$V_{12} = V_{23} = V_{31} = V$: le tre tensioni hanno lo stesso valore efficace

I valori efficaci di tutte le correnti di fase, è: $I_f = I_{12} = I_{23} = I_{31}$ e si

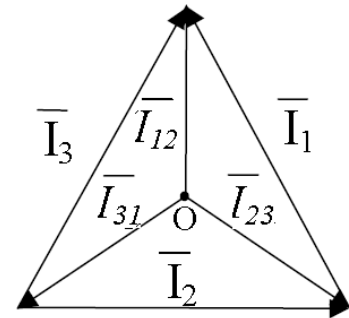
avrà:
$$\bar{I}_f = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}}$$

Le correnti di linea

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{31} \quad \bar{I}_2 = \bar{I}_{23} - \bar{I}_{12} \quad \bar{I}_3 = \bar{I}_{31} - \bar{I}_{23}$$

I valori efficaci di tutte le correnti di linea, è: $I_l = I_1 = I_2 = I_3$

TRA I VALORI EFFICACE DI FASE E DI LINEA, VALE LA RELAZIONE



$$I_l = \sqrt{3} I_f$$

Invece, nel collegamento a stella, le correnti di linea sono uguali alle correnti di fase (fig. 8)

$$I_l = I_f$$

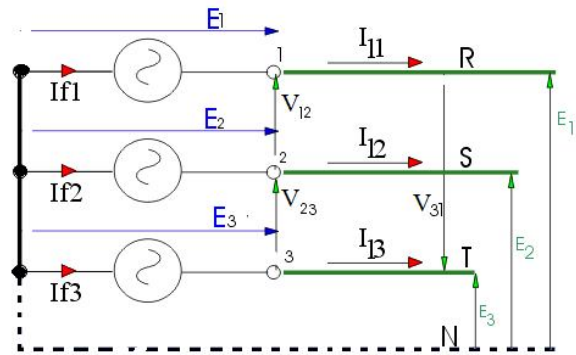


fig. 8

POTENZE NEI SISTEMI TRIFASE SIMMETRICI ED EQUILIBRATI

Anche per i sistemi trifase vengono definite le tre potenze tipiche delle reti in corrente alternata: potenza attiva, potenza reattiva e apparente.

L'IMPEDENZA DEL CARICO: $\bar{Z} = R + j X$ e φ : sfasamento del carico.

Modulo : $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ fase: $\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right)$

Teorema di Boucherot

- LA POTENZA ATTIVA TOTALE È LA SOMMA ARITMETICA DELLE SINGOLE POTENZE ATTIVE

Carico a stella

$$P = 3|E||I_L| \cos \varphi = \sqrt{3}|V||I_L| \cos \varphi$$

$$P = 3 R I_L^2$$

Carico a triangolo

$$P = 3|V||I_f| \cos \varphi = \sqrt{3}|V||I_L| \cos \varphi$$

$$P = 3 R I_f^2$$

- LA POTENZA REATTIVA È LA SOMMA ALGEBRICA DELLE SINGOLE POTENZE REATTIVE

Carico a stella

$$Q = 3|E||I_L| \sin \varphi = \sqrt{3}|V||I_L| \sin \varphi$$

$$Q = 3XI_L^2$$

Carico a triangolo

$$Q = 3|V||I_f| \sin \varphi = \sqrt{3}|V||I_L| \sin \varphi$$

$$Q = 3XI_f^2$$

- LA POTENZA APPARENTE È LA SOMMA VETTORIALE DELLE SINGOLE POTENZE APPARENTI

$$\bar{S} = \bar{P} + j\bar{Q} \quad \text{IL MODULO: } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Carico a stella

$$S = 3|E||I_L| = \sqrt{3}|V||I_L|$$

$$S = 3ZI_L^2$$

Carico a triangolo

$$S = 3|V||I_f| = \sqrt{3}|V||I_L|$$

$$S = 3ZI_f^2$$

IL FATTORE DI POTENZA :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \cos [\operatorname{arctg} \left(\frac{X}{R} \right)]$$

questo parametro ha un ruolo molto importante nei circuiti in corrente alternata.

Dal punto di vista economico:

- per $\cos(\varphi) < 0,7$: l'utente ha l'obbligo di rifasare, per ridurre l'energia reattiva induttiva causata dagli avvolgimenti di motori e trasformatori;
- per $0,7 < \cos(\varphi) < 0,9$: è l'esempio delle reti elettriche domestiche, l'utente in questo caso, paga una penale all'ente fornitrice, per l'energia reattiva prodotta dal rifasamento.

RIFASAMENTO DI UN CARICO TRIFASE

Il RIFASAMENTO viene comunemente impiegato negli impianti elettrici per mantenere rigorosamente costante a 0,9 il FATTORE DI POTENZA di un impianto.

Una carico reattivo (motore, trasformatore) produce unicamente un aumento delle perdite di potenza in linea e allora rifasare serve a ottimizzare il rendimento per una migliore e più economica utilizzazione dell'energia, cioè serve per il risparmio di consumo della corrente elettrica.

Il rifasamento di un carico trifase si può realizzare inserendo tre condensatori che possono essere collegati a stella o a triangolo.

Rifasamento con condensatori collegati a stella (fig. 11)

si indica con:

- φ' : lo sfasamento tra V e I ;
- φ : lo sfasamento tra V e I_L ;
- Q_C : la potenza reattiva capacitativa che il condensatore assorbe dalla rete;
- P, Q e S sono le potenze (attiva, reattiva e apparente) del carico;
- P_r, Q_r e S_r sono le potenze (attiva, reattiva e apparente) dopo il rifasamento;

$$Q_C = Q - Q_r = P \cdot \operatorname{tg}(\varphi) - P \cdot \operatorname{tg}(\varphi') = P \cdot [\operatorname{tg}(\varphi) - \operatorname{tg}(\varphi')]$$

Nota che il valore di Q_C totale è la somma delle singole potenze reattiva

$$C_Y = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{3\omega E^2}$$

<http://digilander.libero.it/alihajj>

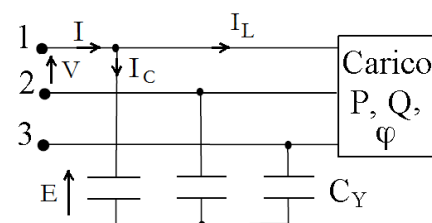


fig. 11

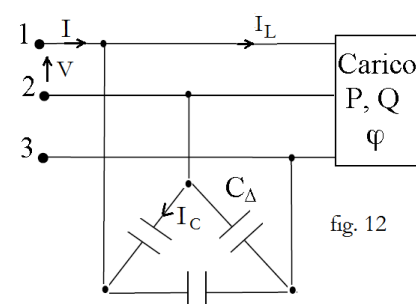


fig. 12

$$Q_C = 3E I_C = 3B_C E^2 = 3\omega C_Y E^2$$

Rifasamento con condensatori collegati a delta o triangolo (fig. 12)

$$|Q_C| = 3\omega C_\Delta V^2 = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad C_\Delta = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{3\omega V^2}$$

NOTA: Nel collegamento a triangolo i condensatori sono sottoposti ad una tensione concatenata mentre nel collegamento a stella sono sottoposti alla tensione di fase. Inoltre,

$$C_\Delta = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{3\omega V^2} = \frac{P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{3\omega 3E^2} = \frac{C_Y}{3}$$

La capacità nel collegamento a stella è tre volte più grande di quella richiesta nel collegamento a triangolo.

La scelta del tipo di collegamento dipende da considerazioni di varia natura.

Nel caso di reti di bassa tensione ($V=380$ V) si privilegia il vantaggio economico offerto dalla riduzione della capacità nel collegamento a triangolo.

Per le reti di media tensione ($V>10$ kV) diventa decisivo il problema della tenuta del dielettrico (isolante): si preferisce quindi la più contenuta tensione di esercizio del collegamento a stella.

CADUTA DI TENSIONE E RENDIMENTO

Si definisce caduta di tensione industriale della linea la differenza aritmetica tra la tensione alla partenza (V_P) e la tensione all'arrivo (V_A) a carico

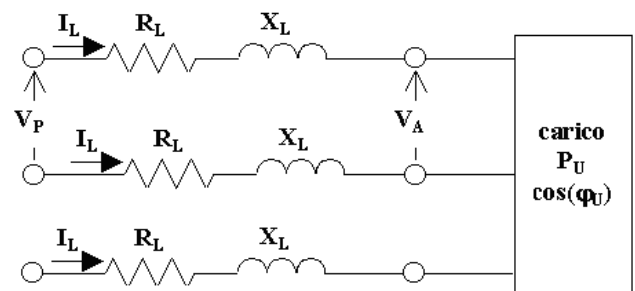


fig. 13

Nel caso di una linea monofase

$$\overline{\Delta V_L} = \overline{V_P} - \overline{V_A} = \overline{Z_L} \overline{I_L}$$

$$\Delta V_L \cong I_L \cdot [R_L \cdot \cos(\varphi_U) + X_L \cdot \operatorname{sen}(\varphi_U)] \quad [V]$$

In termine percentuale riferita alla tensione nominale V_n

$$\Delta V_L \% = \frac{I_L \cdot [R_L \cdot \cos(\varphi_U) + X_L \cdot \operatorname{sen}(\varphi_U)]}{V_n} \cdot 100 \quad [V]$$

Si definisce rendimento della linea: $\eta_L = \frac{P_A}{P_P}$

dove $P_A = P_U$ è la potenza all'arrivo della linea mentre P_P è la potenza alla partenza della linea.

P_L è la potenza persa in linea per effetto joule, $P_L = P_P - P_A$

Al fine di ridurre la c.d.t. industriale ed aumentare il rendimento della linea, se il carico ha un basso fattore di potenza si può procedere al rifasamento del carico stesso che consiste nel porgli in parallelo un condensatore di adeguata capacità. Indicando con φ_A^* lo sfasamento desiderato all'arrivo della linea (con ovviamente $\varphi_A^* < \varphi_U$), il valore della capacità rifasante sarà dato da:

$$C = \frac{P_U \cdot [\operatorname{tag}(\varphi_U) - \operatorname{tag}(\varphi_A^*)]}{\omega \cdot V_A^2} \quad [F]$$

Nel caso di una linea 3fase

$$\Delta V_L = \sqrt{3} I_L \cdot [R_L \cdot \cos(\varphi_U) + X_L \cdot \operatorname{sen}(\varphi_U)] = \sqrt{3} (E_1 - E_2) \quad [V]$$

<http://digilander.libero.it/alihajj>

Il suo valore percentuale non deve superare il 4%.

La potenza persa in linea per effetto joule sulle tre fasi: $P_L = 3 R_L I_L^2$

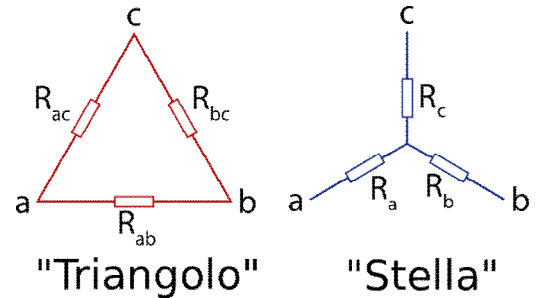
Il rendimento di linea: $\eta_L = \frac{P_A}{P_P}$

passaggio stella-triangolo

$$R_{bc} = \frac{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}{R_a}$$

$$R_{ac} = \frac{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}{R_b}$$

$$R_{ab} = \frac{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}{R_c}$$



passaggio triangolo-stella

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_c = \frac{R_{bc} R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

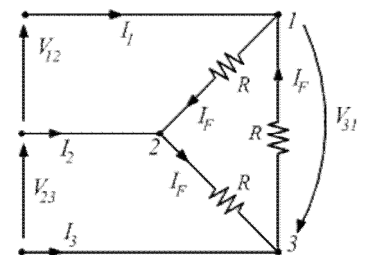
Esercizio no.1

Un carico trifase, costituito da tre resistenze collegate a triangolo di valore ciascuna 8Ω è alimentato con tensioni concatenate di valore $V_L=220V$.

Trovare le correnti di fase sulle tre resistenze e la potenza.

R.[$I_F=27,5A$

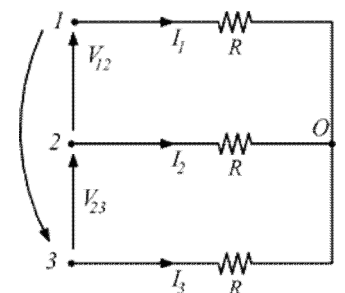
P=18,15kW]



Esercizio no.2

Un carico trifase, costituito da tre resistenze collegate a stella di valore ciascuna 4Ω viene alimentato da un sistema trifase simmetrico con tensioni concatenate di valore $V_L=380V$. Si vogliono conoscere le correnti di linea e la potenza complessiva assorbita dal carico, disegna anche il diagramma vettoriale con le tensioni di fase, le tensioni concatenate e le correnti di linea .

R.[$I_L=55A$ P=36,3kW]



Esercizio no.3

Un sistema di tensioni trifase simmetrico con tensioni concatenate $V_L=260V$ alimenta un carico equilibrato, costituito da tre impedenze uguali di tipo ohmico-induttivo, con $R=4 \Omega$ e $X=3\Omega$ collegate a triangolo. Calcola:

- A) Le correnti di linea.
- B) La potenza attiva e reattiva totale assorbita dal carico.
- C) Ripeti i due precedenti calcoli col carico collegato a stella

R.[$I_L=90A$ $P_T=32,448kW$ $Q_T=24,336kVAR$ $P_S=10,808kW$ $Q_S=8,106kVAR]$