

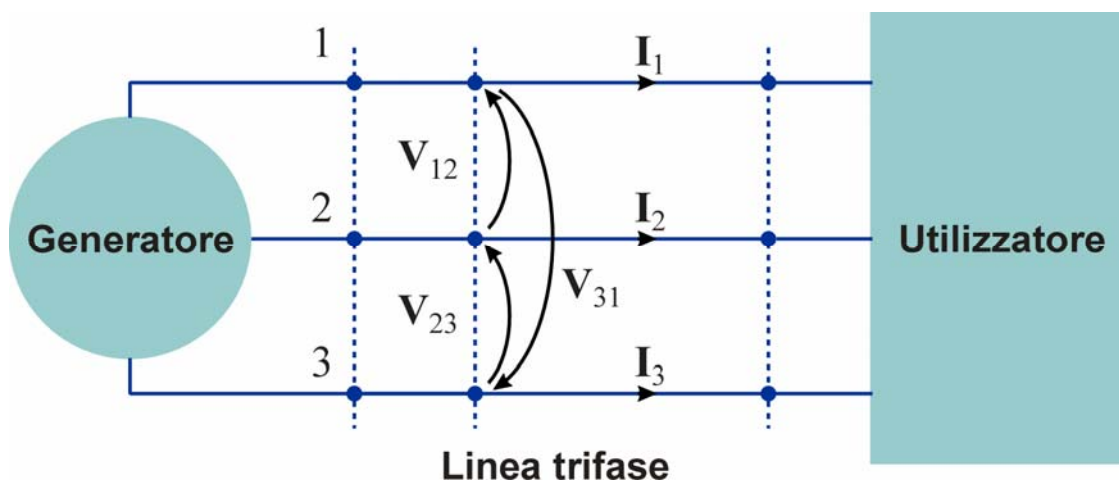
Sistemi trifase

Parte 1

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 28-11-2013)

Sistemi trifase

- Il trasporto e la distribuzione di energia elettrica avvengono in prevalenza per mezzo di linee trifase
- Un sistema trifase è alimentato mediante generatori a tre terminali rappresentabili mediante terne di generatori sinusoidali isofrequenziali
- Il collegamento tra i generatori e gli utilizzatori è realizzato mediante linee di collegamento a tre fili



Correnti di linea e tensioni concatenate

- **Correnti di linea**

- ◆ Correnti nei tre conduttori della linea
- ◆ Dalla legge di Kirchhoff per le correnti si ricava

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$$

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 = 0$$

- **Tensioni concatenate**

- ◆ Tensioni tra i conduttori in una generica sezione della linea
- ◆ Se l'impedenza della linea è trascurabile le tensioni concatenate non dipendono dalla sezione considerata
- ◆ Dalla legge di Kirchhoff per le tensioni si ricava

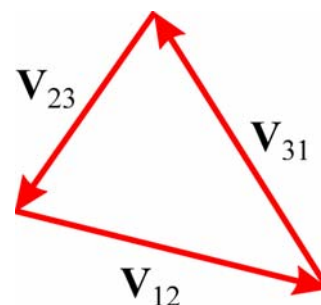
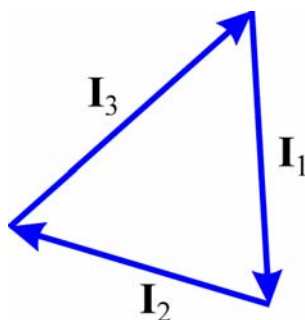
$$v_{12}(t) + v_{23}(t) + v_{31}(t) = 0$$

$$\mathbf{V}_{12} + \mathbf{V}_{23} + \mathbf{V}_{31} = 0$$

3

Correnti di linea e tensioni concatenate

- Nel piano complesso, i fasori delle correnti di linea e delle tensioni concatenate possono essere rappresentati da tre vettori disposti a triangolo (➡ somma vettoriale nulla)



4

Terne di tensioni simmetriche

- Una terna di tensioni trifase si dice **simmetrica** se
 - le tensioni hanno uguale ampiezza
 - la loro somma è nulla in ogni istante
- Ciò richiede che lo sfasamento tra due tensioni consecutive sia
 - $-\frac{2}{3}\pi$ ➔ **terna simmetrica diretta**

$$v_{12}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12})$$

$$v_{23}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} - \frac{2}{3}\pi)$$

$$v_{31}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} - \frac{4}{3}\pi) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} + \frac{2}{3}\pi)$$
 - $+\frac{2}{3}\pi$ ➔ **terna simmetrica inversa**

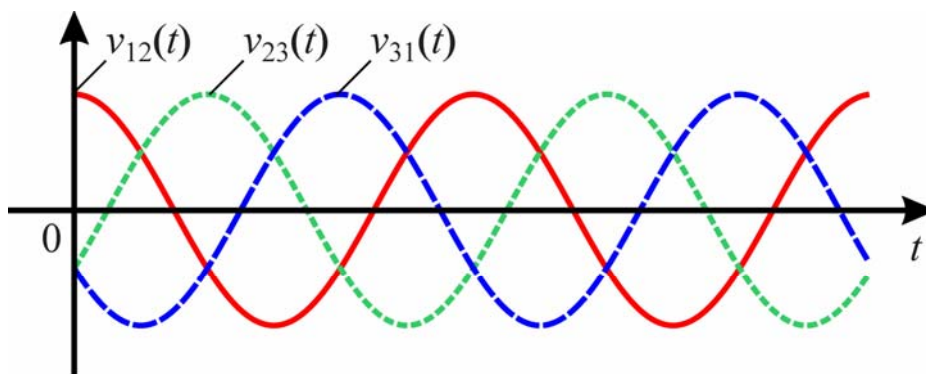
$$v_{12}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12})$$

$$v_{23}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} + \frac{2}{3}\pi)$$

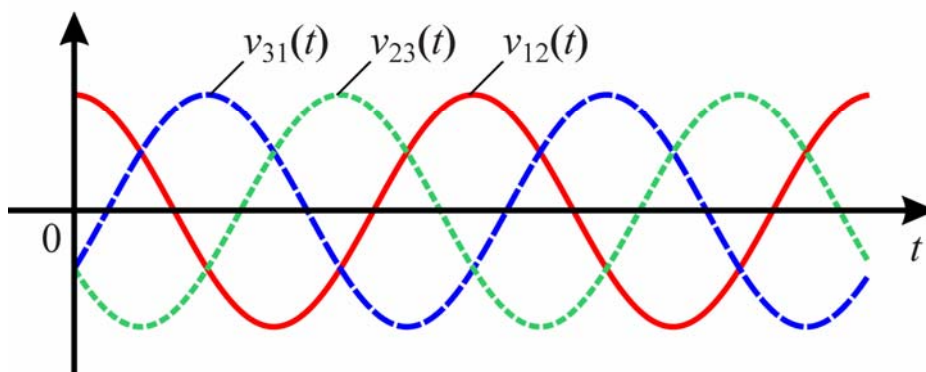
$$v_{31}(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} + \frac{4}{3}\pi) = \sqrt{2}V \cos(\omega t + \alpha_{12} - \frac{2}{3}\pi)$$

5

Terne di tensioni simmetriche



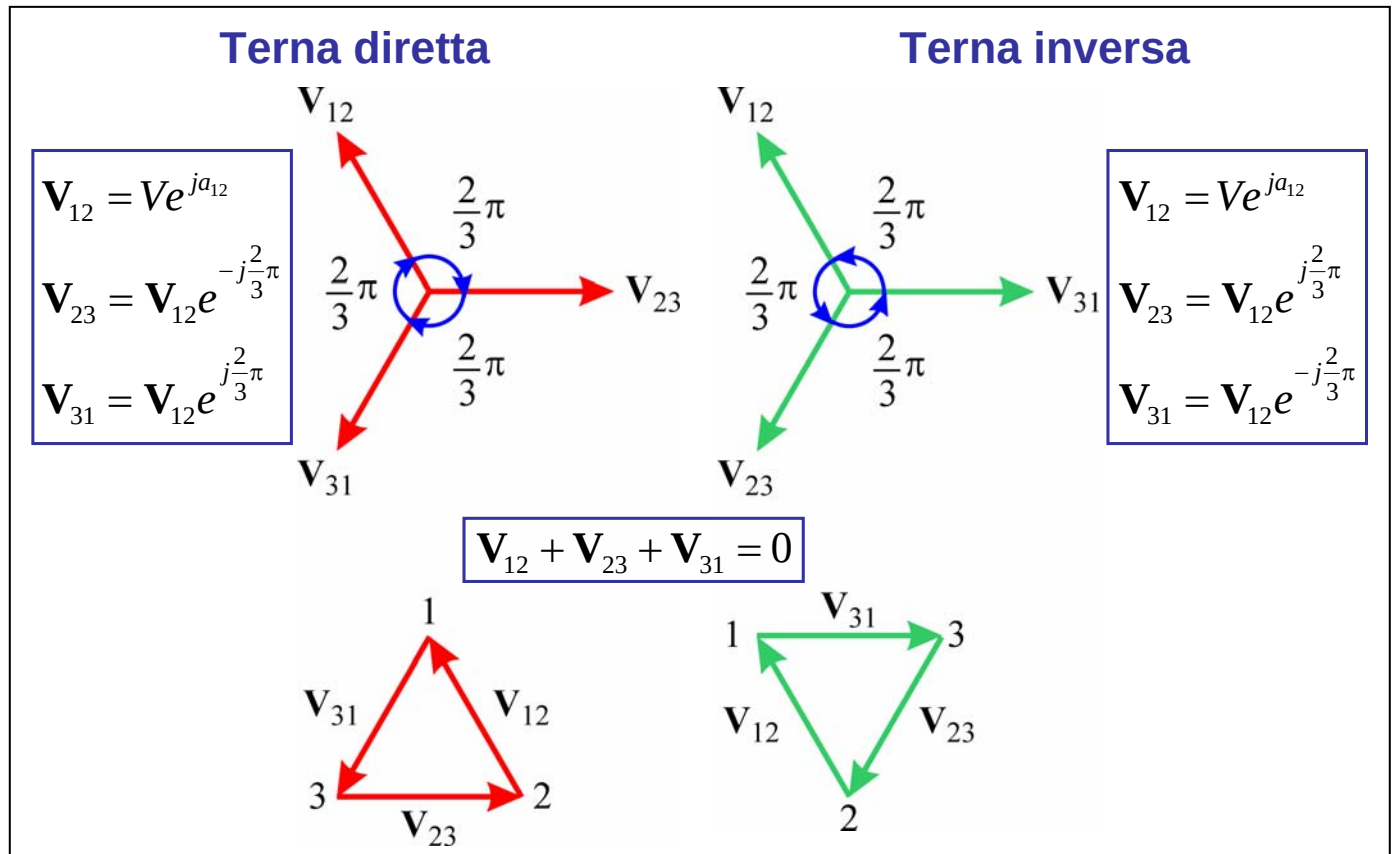
Terna diretta



Terna inversa

6

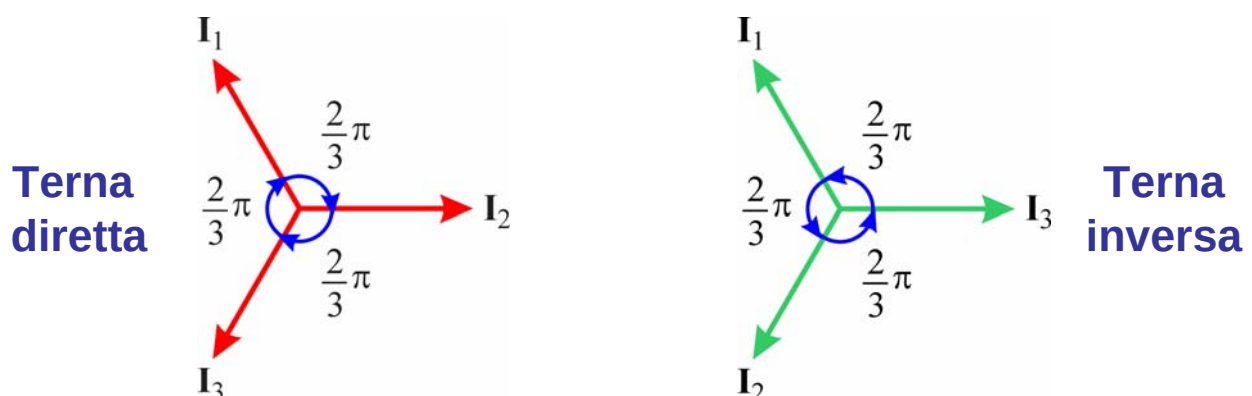
Terne di tensioni simmetriche



7

Terne di correnti equilibrate

- Una terna di correnti trifase si dice **equilibrata** se
 - le correnti hanno uguale ampiezza
 - la loro somma è nulla in ogni istante
- Per le terne di correnti equilibrate valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per le terne di tensioni simmetriche
- Lo sfasamento tra due correnti consecutive di una terna equilibrata può essere $-2\pi/3$ (**terna diretta**) o $+2\pi/3$ (**terna inversa**)



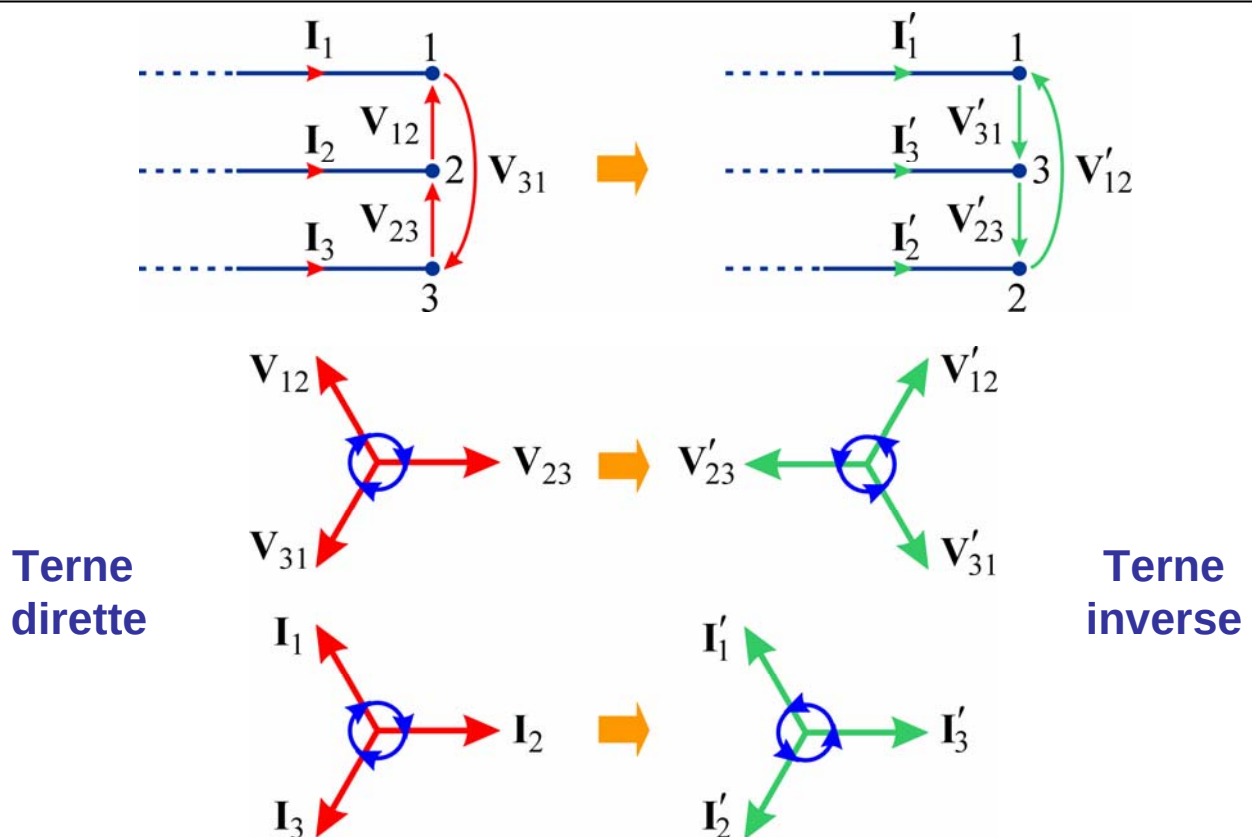
8

Note

- Nello studio dei sistemi trifase, si utilizzeranno esclusivamente fasori il cui modulo coincide con il valore efficace (non con il valore massimo) delle tensioni e delle correnti
 - ♦ i valori efficaci delle tensioni e correnti saranno indicati con le lettere maiuscole V , E , I
- Le stesse terne di tensioni concatenate e di correnti di linea possono essere interpretate come dirette o inverse a seconda di come sono numerati i conduttori
 - ➔ In seguito, se non indicato esplicitamente, si considereranno sempre terne dirette
 - ➔ data l'arbitrarietà della numerazione dei conduttori, questo non comporta perdita di generalità

9

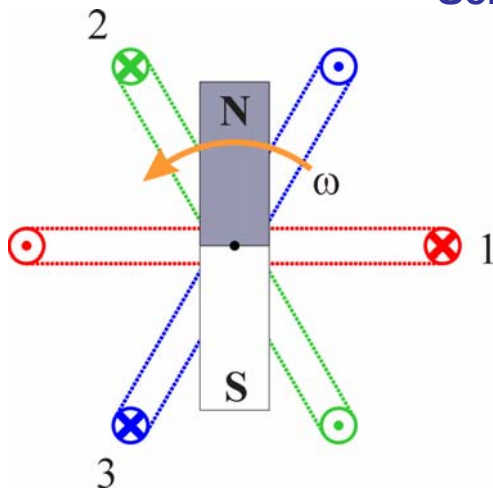
Terne dirette e inverse



10

Generatori trifase

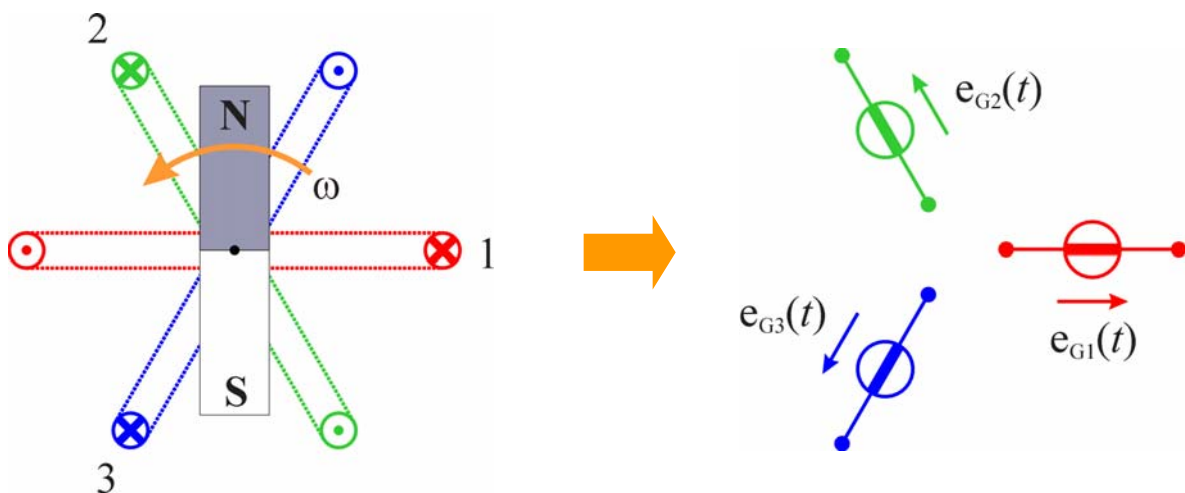
Schema di principio



- Parte mobile (**rotore**)
 - ◆ schematizzata con un magnete permanente che ruota con velocità angolare ω
- Parte fissa (**statore**)
 - ◆ tre avvolgimenti identici (rappresentati con una spira)
 - ◆ ruotati l'uno rispetto all'altro di 120°
- I flussi di induzione magnetica concatenati con gli avvolgimenti sono funzioni periodiche con periodo $T = 2\pi/\omega$
- ➔ In ciascun avvolgimento viene indotta una f.e.m. periodica
- Dimensionando opportunamente il sistema è possibile ottenere f.e.m. sinusoidali

11

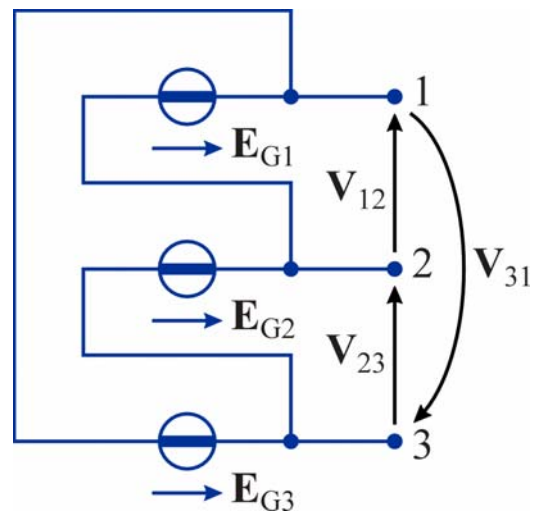
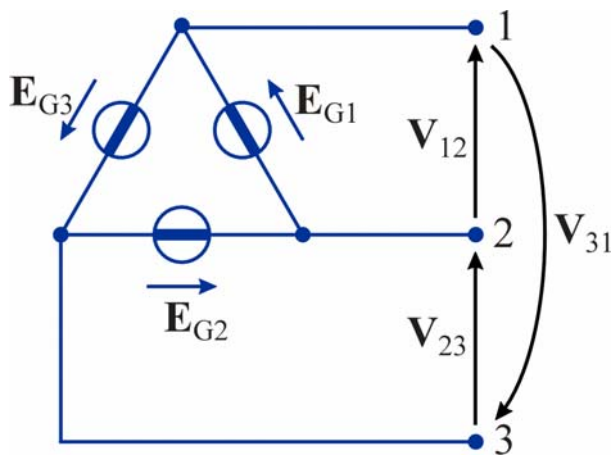
Generatori trifase



- I tre avvolgimenti (**fasi del generatore**) equivalgono a tre generatori sinusoidali con tensioni sfasate tra loro di $2\pi/3$
- Gli avvolgimenti vengono collegati a stella o a triangolo

12

Generatori a triangolo



Le tensioni concatenate coincidono con le tensioni dei generatori

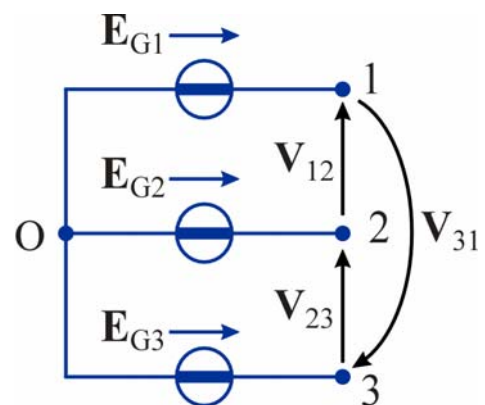
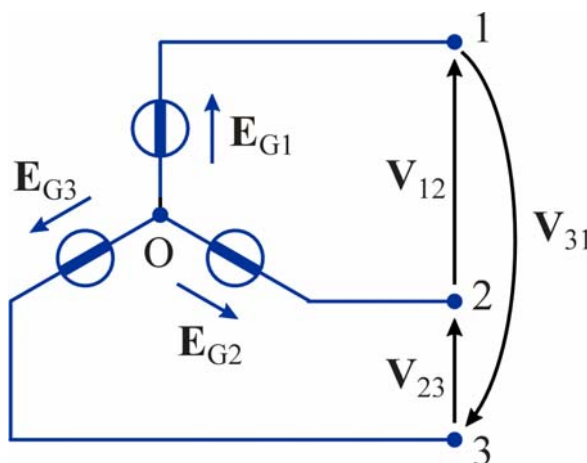
$$V_{12} = E_{G1} = E_G e^{j\alpha_1}$$

$$V_{23} = E_{G2} = E_{G1} e^{-j\frac{2}{3}\pi}$$

$$V_{31} = E_{G3} = E_{G1} e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

13

Generatori a stella



**Tensioni di fase
(stellate)**

$$E_{G1} = E_G e^{j\alpha_1}$$

$$E_{G2} = E_{G1} e^{-j\frac{2}{3}\pi}$$

$$E_{G3} = E_{G1} e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

**Tensioni
concatenate**

$$V_{12} = E_{G1} - E_{G2}$$

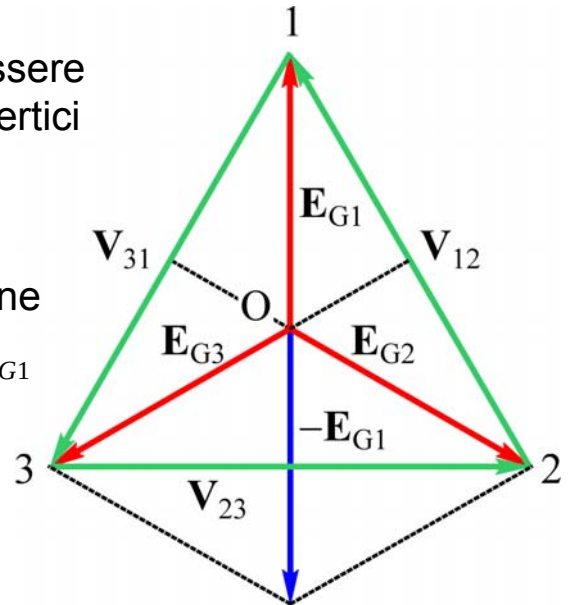
$$V_{23} = E_{G2} - E_{G3}$$

$$V_{31} = E_{G3} - E_{G1}$$

14

Tensioni concatenate e tensioni di fase

- Nel piano complesso, i fasori delle tensioni concatenate possono essere rappresentati da tre vettori disposti in modo da formare un triangolo equilatero
- I fasori delle tensioni stellate possono essere rappresentati da vettori che uniscono i vertici del triangolo ad un punto O (**centro delle tensioni di fase**)
- Le tensioni stellate soddisfano la relazione $\mathbf{E}_{G1} + \mathbf{E}_{G2} + \mathbf{E}_{G3} = 0 \Rightarrow \mathbf{E}_{G2} + \mathbf{E}_{G3} = -\mathbf{E}_{G1}$
- ➔ Quindi Il punto O coincide con il baricentro del triangolo (= punto di intersezione delle mediane)



15

Tensioni concatenate e tensioni di fase

- Con semplici considerazioni geometriche si può riconoscere che valgono le relazioni

$$|\mathbf{V}_{12}| = V = 2|\mathbf{E}_{G1}| \cos \frac{\pi}{6} = \sqrt{3} E_G$$

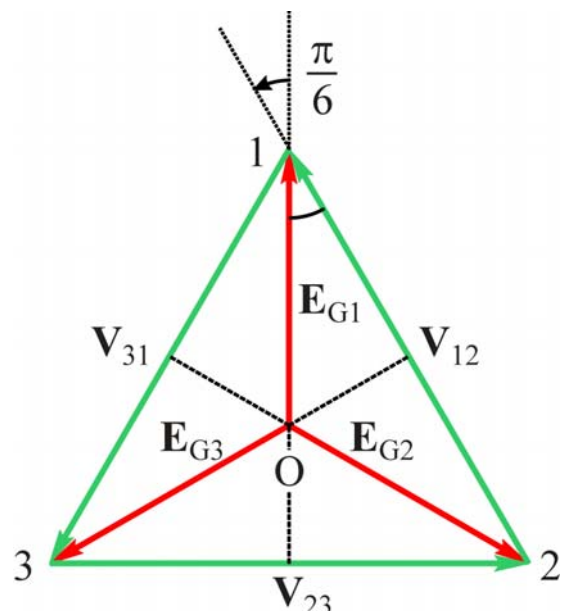
$$\arg(\mathbf{V}_{12}) = \arg(\mathbf{E}_{G1}) + \frac{\pi}{6}$$

- ➔ Le tensioni concatenate sono

$$\mathbf{V}_{12} = \sqrt{3} \mathbf{E}_{G1} e^{j\frac{\pi}{6}}$$

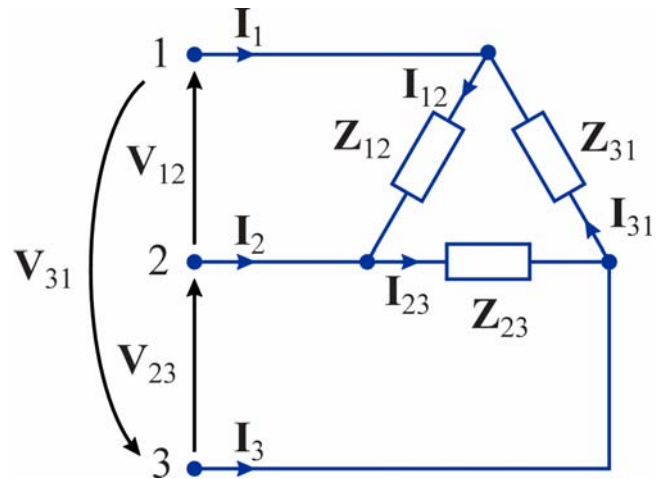
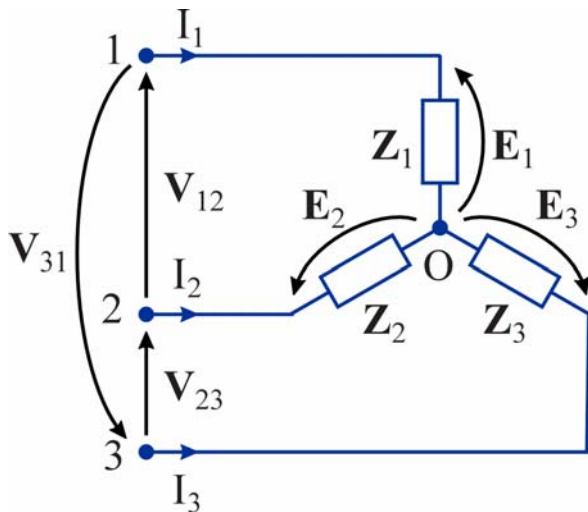
$$\mathbf{V}_{23} = \sqrt{3} \mathbf{E}_{G2} e^{j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathbf{V}_{31} = \sqrt{3} \mathbf{E}_{G3} e^{j\frac{\pi}{6}}$$



16

Utilizzatori trifase

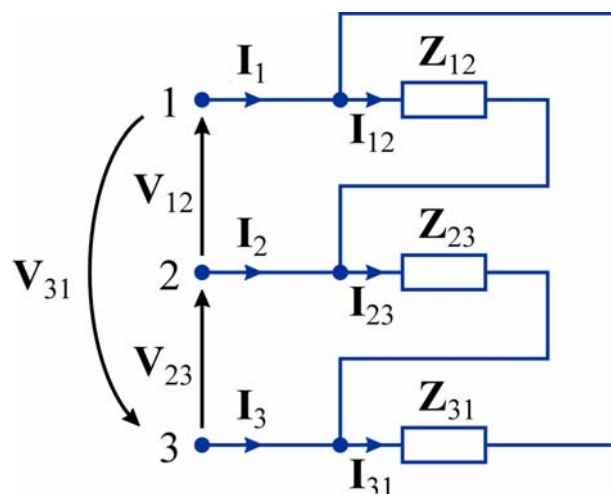
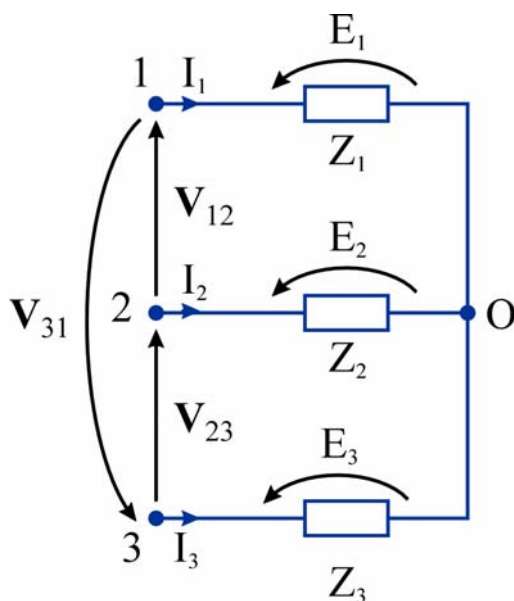


- Gli utilizzatori trifase sono normalmente rappresentabili mediante terne di impedenze (**fasi dell'utilizzatore**) collegate a stella o a triangolo

17

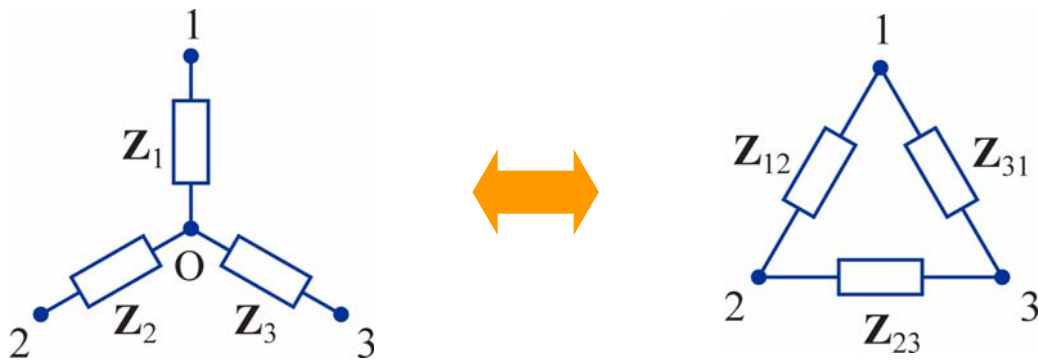
Nota

- I collegamenti a stella e a triangolo vengono rappresentati anche nel modo seguente



18

Equivalenza stella-triangolo



$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$$

$$Z_3 = \frac{Z_{13} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}$$

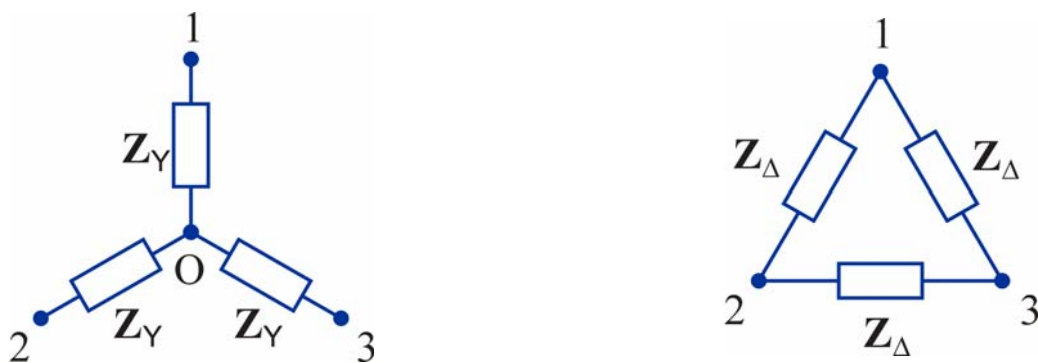
$$Z_{12} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_3}$$

$$Z_{31} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_2}$$

$$Z_{23} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_1}$$

19

Carichi regolari



$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_Y$$

$$Z_{12} = Z_{23} = Z_{31} = Z_{\Delta}$$

- **Carico regolare** (o **equilibrato**): le tre impedenze sono uguali
- ➔ Formule di trasformazione stella triangolo

$$Z_Y = \frac{Z_{\Delta}}{3}$$

$$Z_{\Delta} = 3Z_Y$$

20

Carico a triangolo

- Le tensioni delle tre impedenze coincidono con le tensioni concatenate

➔ Correnti di fase:

$$I_{12} = \frac{V_{12}}{Z_{12}}$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{Z_{23}}$$

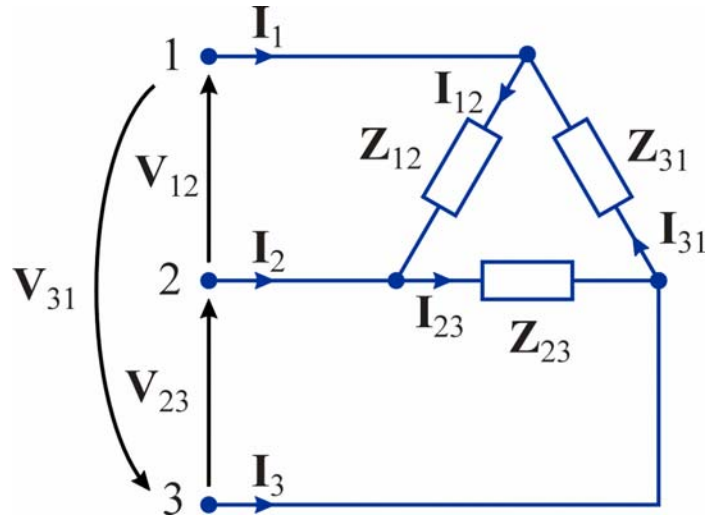
$$I_{31} = \frac{V_{31}}{Z_{31}}$$

➔ Correnti di linea:

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

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

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



21

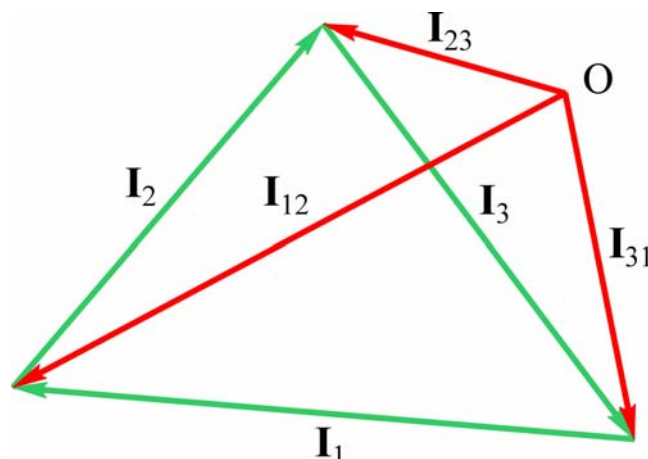
Carico a triangolo

- Si considera il caso più generale in cui le tensioni concatenate possono essere dissimmetriche e il carico può essere irregolare
- Nel piano complesso, i fasori delle correnti di fase possono essere rappresentati da tre vettori che collegano i vertici del triangolo delle correnti di linea ad un punto O

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

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

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



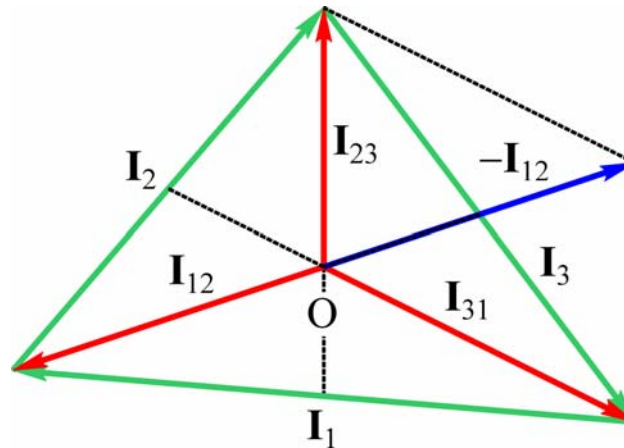
22

Carico a triangolo regolare

- Se il carico è regolare ($Z_{12} = Z_{23} = Z_{31} = Z$), anche la somma delle correnti di fase è nulla

$$\mathbf{I}_{12} + \mathbf{I}_{23} + \mathbf{I}_{31} = \frac{\mathbf{V}_{12} + \mathbf{V}_{23} + \mathbf{V}_{31}}{Z} = 0$$

- ➔ In queste condizioni il punto O coincide con il baricentro del triangolo



23

Carico a triangolo regolare

- Nel caso di un carico a triangolo regolare è possibile anche ricavare le correnti di fase a partire dalle correnti di linea
- Risolvendo il sistema formato da due delle equazioni

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_{12} - \mathbf{I}_{31}$$

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_{23} - \mathbf{I}_{12}$$

$$\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_{31} - \mathbf{I}_{23}$$

e dall'equazione

$$\mathbf{I}_{12} + \mathbf{I}_{23} + \mathbf{I}_{31} = 0$$

si ottiene

$$\mathbf{I}_{12} = \frac{\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2}{3} \quad \mathbf{I}_{23} = \frac{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3}{3} \quad \mathbf{I}_{31} = \frac{\mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_1}{3}$$

24

Carico a triangolo regolare – sistema simmetrico

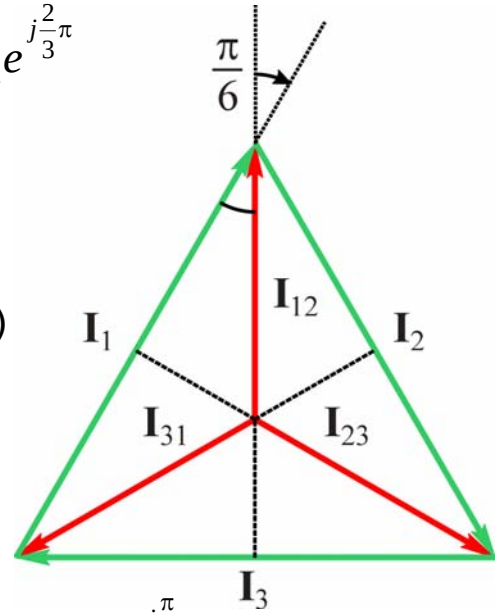
- Se il carico è regolare e le tensioni concatenate costituiscono una terna simmetrica, le correnti di fase costituiscono una terna equilibrata

$$\mathbf{I}_{12} = \frac{\mathbf{V}_{12}}{|\mathbf{Z}|} e^{-j\varphi} \quad \mathbf{I}_{23} = \mathbf{I}_{12} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad \mathbf{I}_{31} = \mathbf{I}_{12} e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

$$\varphi = \arg(\mathbf{Z})$$

- Anche le correnti di linea costituiscono una terna equilibrata (→ il triangolo è equilatero)
- Con semplici considerazioni geometriche si può riconoscere che le espressioni delle correnti di linea sono

$$\mathbf{I}_1 = \sqrt{3} \mathbf{I}_{12} e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{I}_2 = \sqrt{3} \mathbf{I}_{23} e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{I}_3 = \sqrt{3} \mathbf{I}_{31} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$



25

Carico a stella

- Le correnti delle impedenze coincidono con le correnti di linea
- Le correnti di linea possono essere ottenute risolvendo il sistema

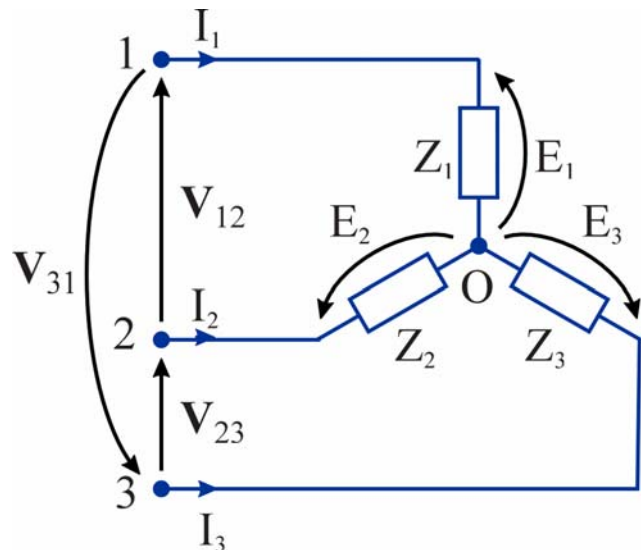
$$\mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_1 - \mathbf{Z}_2 \mathbf{I}_2 = \mathbf{V}_{12}$$

$$\mathbf{Z}_2 \mathbf{I}_2 - \mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_3 = \mathbf{V}_{23}$$

$$(\mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_3 - \mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_1 = \mathbf{V}_{31})$$

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 = 0$$

(La terza equazione non serve perché è conseguenza delle prime due)



- Note le correnti di linea si ricavano le tensioni di fase

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_1 \quad \mathbf{E}_2 = \mathbf{Z}_2 \mathbf{I}_2 \quad \mathbf{E}_3 = \mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_3$$

26

Carico a stella

- Metodo alternativo per il calcolo delle tensioni di fase
 - ♦ Le stesse tensioni ai terminali della stella potrebbero essere ottenute mediante due soli generatori aventi tensioni uguali a due delle tensioni concatenate (come nell'esempio in figura)

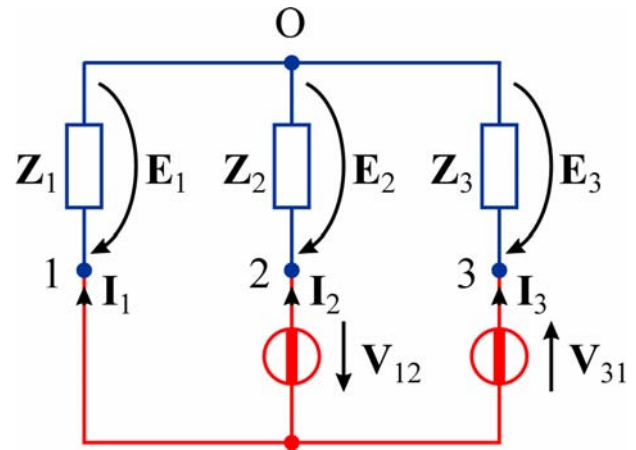
➔ Dalla formula di Millman si ottiene direttamente

$$E_1 = \frac{Y_2 V_{12} - Y_3 V_{31}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

➔ Quindi si ha anche

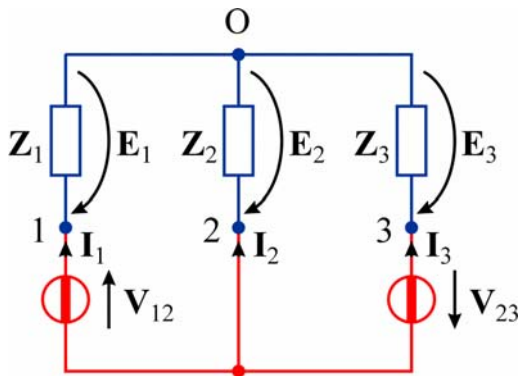
$$I_1 = \frac{Y_1 Y_2 V_{12} - Y_3 Y_1 V_{31}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

- ♦ Considerando le altre possibili coppie di generatori si possono ottenere le altre tensioni di fase



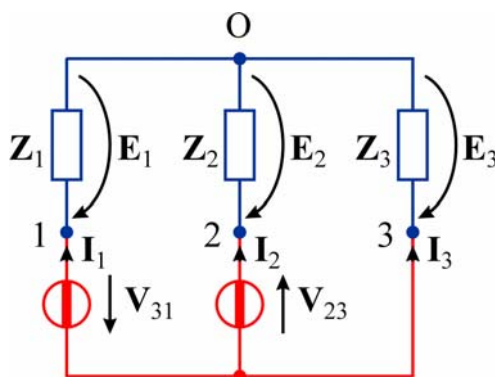
27

Carico a stella



$$E_2 = \frac{Y_3 V_{23} - Y_1 V_{12}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

$$I_2 = \frac{Y_2 Y_3 V_{23} - Y_1 Y_2 V_{12}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$



$$E_3 = \frac{Y_1 V_{31} - Y_2 V_{23}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

$$I_3 = \frac{Y_3 Y_1 V_{31} - Y_2 Y_3 V_{23}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

28

Carico a stella

- Se i generatori sono collegati a stella, è possibile ricavare le tensioni di fase del carico anche senza passare attraverso il calcolo delle tensioni concatenate
- Mediante la formula di Millman si determina la tensione tra i centri della stella di impedenze e della stella di generatori

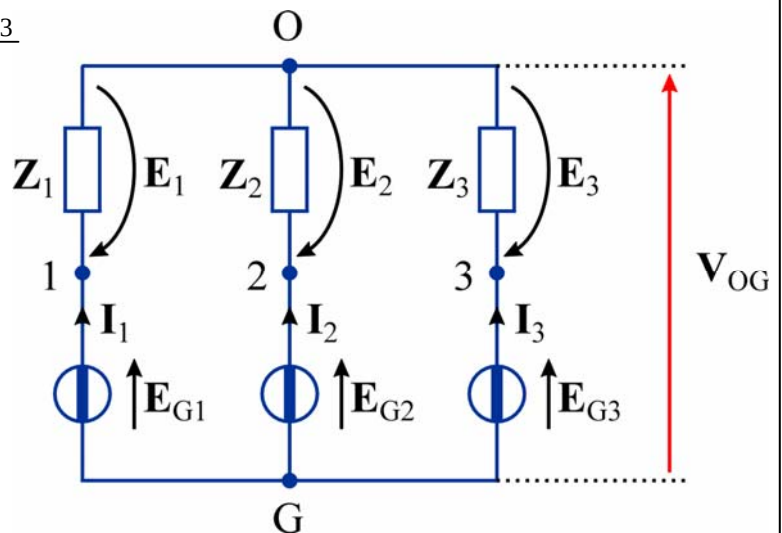
$$V_{OG} = \frac{Y_1 E_{G1} + Y_2 E_{G2} + Y_3 E_{G3}}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

- Nota V_{OG} si calcolano le tensioni di fase del carico

$$E_1 = E_{G1} - V_{OG}$$

$$E_2 = E_{G2} - V_{OG}$$

$$E_3 = E_{G3} - V_{OG}$$



29

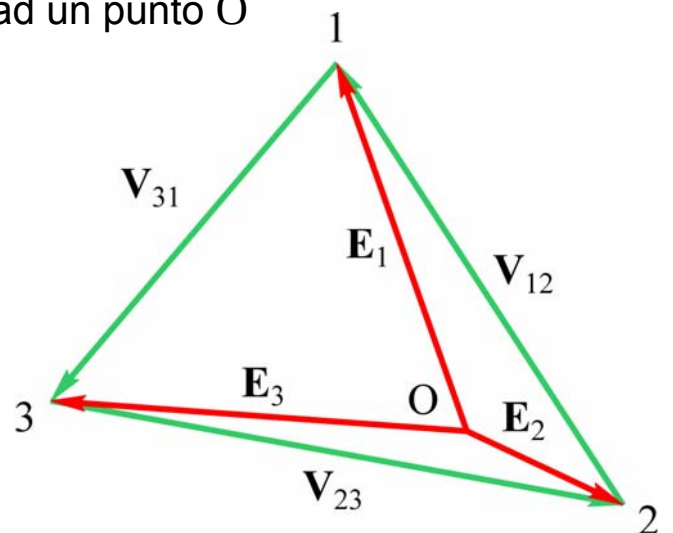
Carico a stella

- Si considera il caso più generale in cui le tensioni concatenate possono essere dissimmetriche e il carico può essere irregolare
 - Dato che $V_{12} + V_{23} + V_{31} = 0$, le tensioni concatenate possono essere rappresentate da tre vettori che formano un triangolo
 - Le tensioni di fase possono essere rappresentate da vettori che collegano i vertici del triangolo ad un punto O (**centro delle tensioni di fase**)

$$V_{12} = E_1 - E_2$$

$$V_{23} = E_2 - E_3$$

$$V_{31} = E_3 - E_1$$



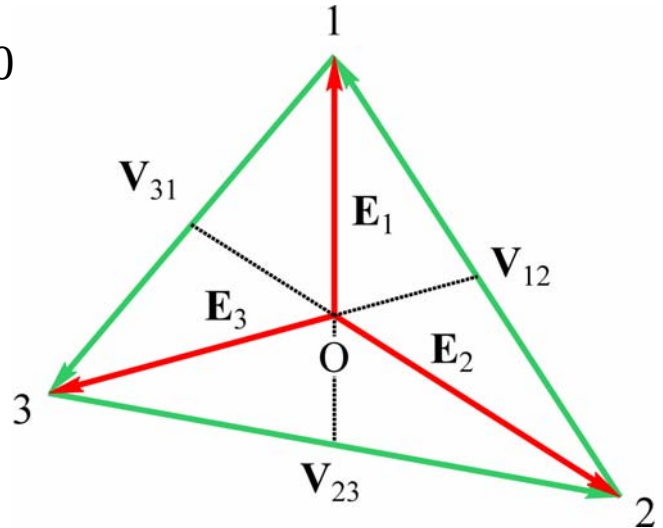
30

Carico a stella regolare

- Se il carico è regolare ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$), anche la somma delle tensioni di fase è nulla
- Per verificarlo si esprimono le tensioni di fase in funzione delle correnti di linea

$$\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 = Z(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3) = 0$$

- ➔ In queste condizioni il centro delle tensioni di fase coincide con il baricentro del triangolo



31

Carico a stella regolare

- Nel caso di un carico a stella regolare è possibile anche ricavare le tensioni stellate direttamente dalle tensioni concatenate
- Risolvendo il sistema formato da due delle equazioni

$$\mathbf{V}_{12} = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2$$

$$\mathbf{V}_{23} = \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_3$$

$$\mathbf{V}_{31} = \mathbf{E}_3 - \mathbf{E}_1$$

e dall'equazione

$$\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 = 0$$

si ottiene

$$\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{V}_{12} - \mathbf{V}_{31}}{3} \quad \mathbf{E}_2 = \frac{\mathbf{V}_{23} - \mathbf{V}_{12}}{3} \quad \mathbf{E}_3 = \frac{\mathbf{V}_{31} - \mathbf{V}_{23}}{3}$$

32

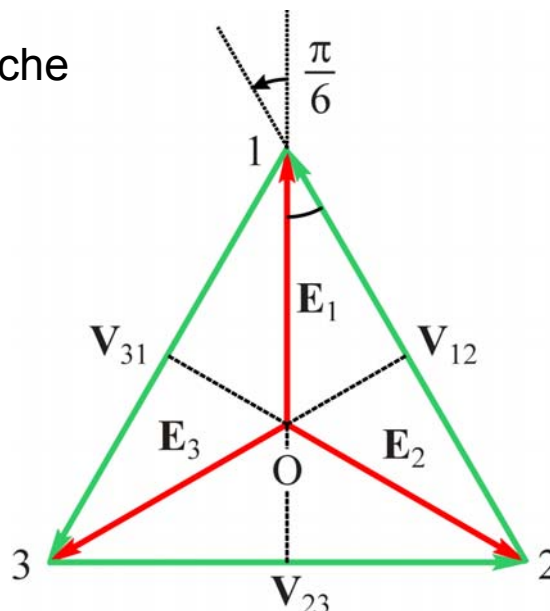
Carico a stella regolare - sistema simmetrico

- Se il carico è regolare e le tensioni concatenate formano una terna simmetrica, anche le tensioni di fase formano una terna simmetrica
- In questo caso si può verificare che valgono le relazioni

$$\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{V}_{12}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{\mathbf{V}_{23}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathbf{E}_3 = \frac{\mathbf{V}_{31}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$



33

Nota

- La relazione tra le correnti di linea e le correnti di fase di un carico a triangolo e la relazione tra le tensioni concatenate e le tensioni di fase di un carico a stella sono simili, ma non hanno esattamente la stessa forma

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_{12} - \mathbf{I}_{31}$$

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_{23} - \mathbf{I}_{12}$$

$$\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_{31} - \mathbf{I}_{23}$$

$$\mathbf{V}_{12} = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2$$

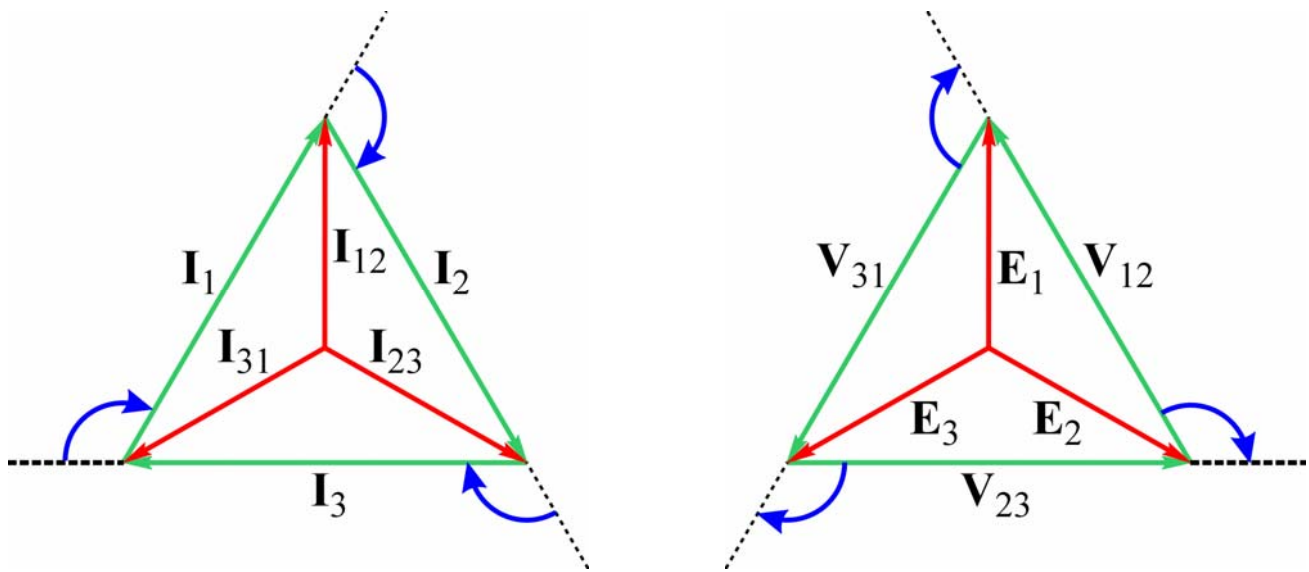
$$\mathbf{V}_{23} = \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_3$$

$$\mathbf{V}_{31} = \mathbf{E}_3 - \mathbf{E}_1$$

- ➔ Questo ha come conseguenza che, nel caso di terne dirette,
 - ♦ i vettori che rappresentano le correnti di fase “circolano” in senso orario
 - ♦ i vettori che rappresentano le tensioni concatenate “circolano” in senso antiorario
- Si noti, comunque, che le terne delle correnti di linea e delle tensioni concatenate sono entrambe dirette

34

Nota



- Ciascun vettore si ottiene applicando al precedente una rotazione di 120° in senso orario (➡ terna diretta)

35

Tensioni principali di fase

- Ad una terna di tensioni concatenate si possono associare infinite terne di tensioni stellate, rappresentate da vettori che collegano un punto O del piano complesso ai vertici del triangolo delle tensioni concatenate
- Le tensioni $\mathbf{E}_{10}$, $\mathbf{E}_{20}$, $\mathbf{E}_{30}$, aventi centro coincidente con il baricentro del triangolo delle tensioni concatenate (quindi corrispondenti alle tensioni di fase di un carico regolare), sono dette **tensioni principali di fase**
- In generale le tensioni principali di fase possono essere ricavate dalle tensioni concatenate mediante le relazioni

$$\mathbf{E}_{10} = \frac{\mathbf{V}_{12} - \mathbf{V}_{31}}{3} \quad \mathbf{E}_{20} = \frac{\mathbf{V}_{23} - \mathbf{V}_{12}}{3} \quad \mathbf{E}_{30} = \frac{\mathbf{V}_{31} - \mathbf{V}_{23}}{3}$$

- Se le tensioni concatenate costituiscono una terna simmetrica si ha

$$\mathbf{E}_{10} = \frac{\mathbf{V}_{12}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{E}_{20} = \frac{\mathbf{V}_{23}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \mathbf{E}_{30} = \frac{\mathbf{V}_{31}}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

36

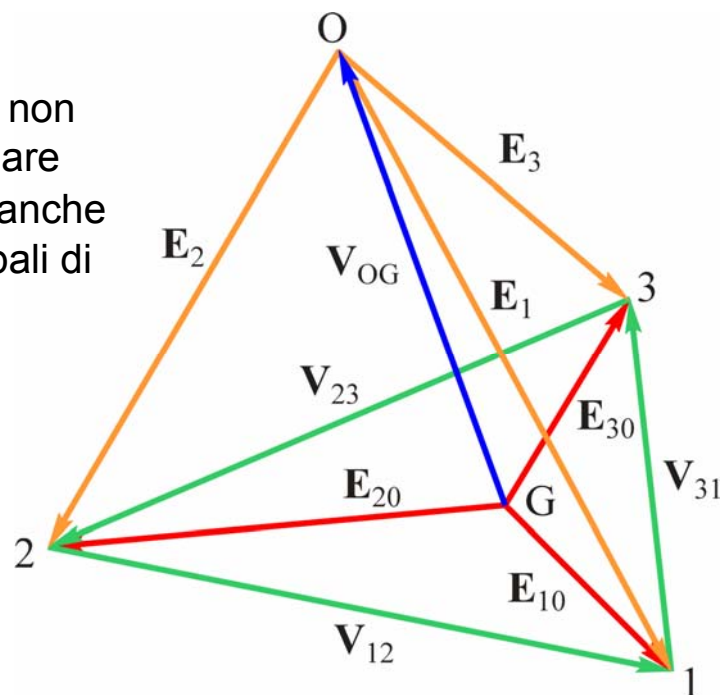
Spostamento del centro delle tensioni fase

- Nel caso di un carico a stella non regolare è possibile determinare le tensioni di fase E_1 , E_2 , E_3 anche a partire dalle tensioni principali di fase e dalla tensione V_{OG} (➔ **spostamento del centro delle tensioni di fase**)

$$E_1 = E_{10} - V_{OG}$$

$$E_2 = E_{20} - V_{OG}$$

$$E_3 = E_{30} - V_{OG}$$



37

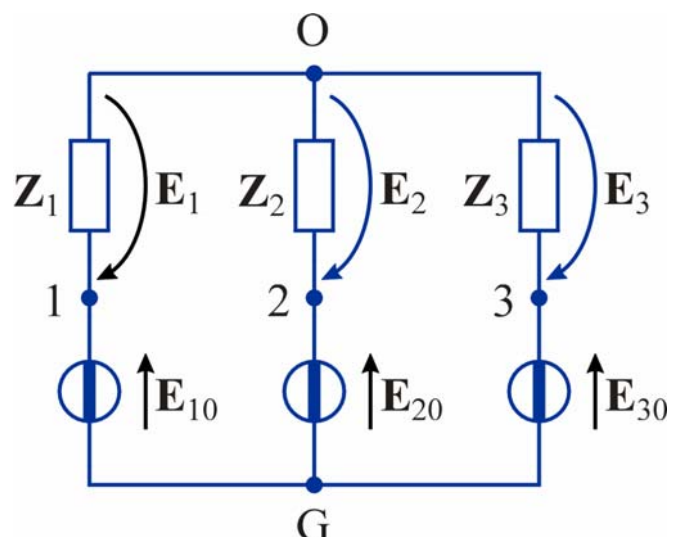
Spostamento del centro delle tensioni di fase

- La terna di tensioni concatenate che alimenta il carico a stella può essere ottenuta mediante tre generatori collegati a stella aventi tensioni coincidenti con le tensioni principali di fase
- ➔ La tensione V_{OG} può essere calcolata mediante la formula di Millman

$$V_{OG} = \frac{E_{10} Y_1 + E_{20} Y_2 + E_{30} Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

- Per un carico regolare si ha

$$V_{OG} = \frac{E_{10} + E_{20} + E_{30}}{3} = 0$$



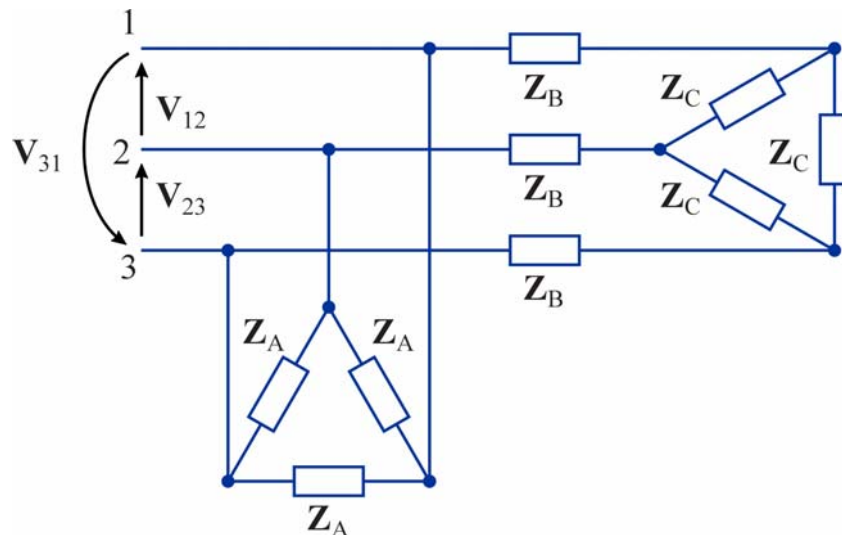
38

Rete ridotta monofase

Ipotesi:

- Le tensioni concatenate costituiscono una terna simmetrica
- I carichi sono regolari

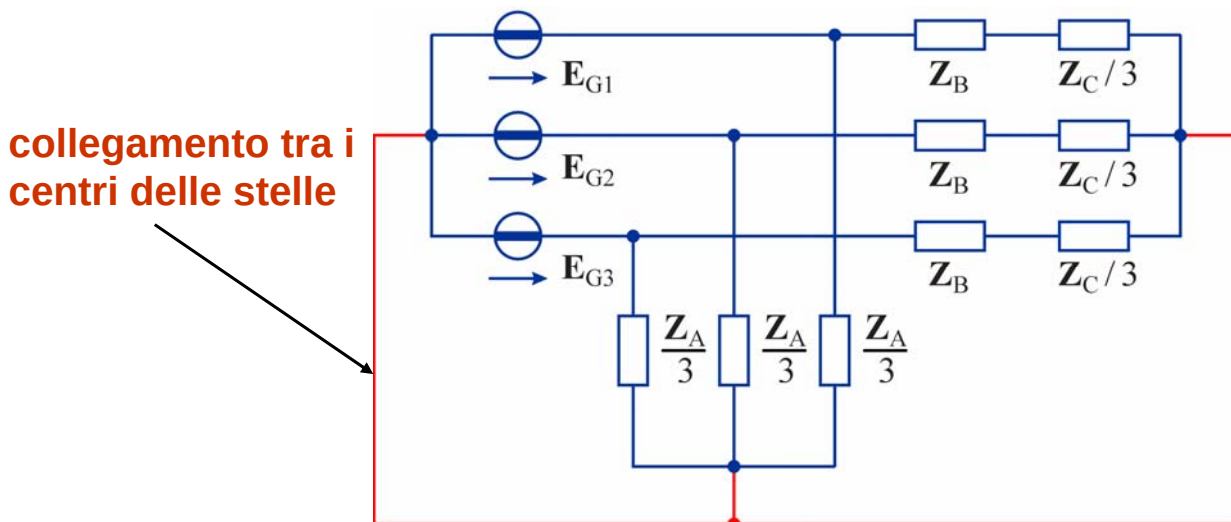
Esempio



39

Rete ridotta monofase

- Si sostituiscono eventuali generatori a triangolo con generatori a stella
- Si trasformano eventuali carichi a triangolo in stelle equivalenti

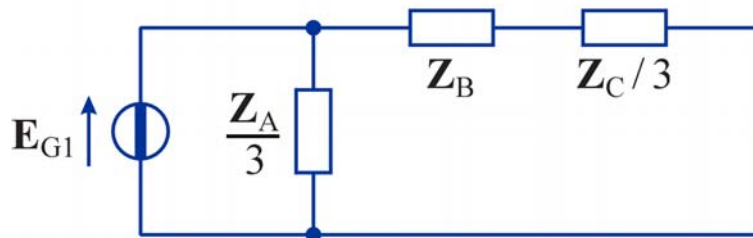


- Tutti i carichi sono regolari
 - i centri di tutte le stelle sono allo stesso potenziale
 - collegandoli tra loro non si altera il comportamento del circuito

40

Rete ridotta monofase

- Nel circuito così ottenuto, ciascuna delle fasi può essere studiata separatamente dalle altre
- I circuiti relativi alle tre fasi sono identici, a parte la rotazione di fase dei generatori

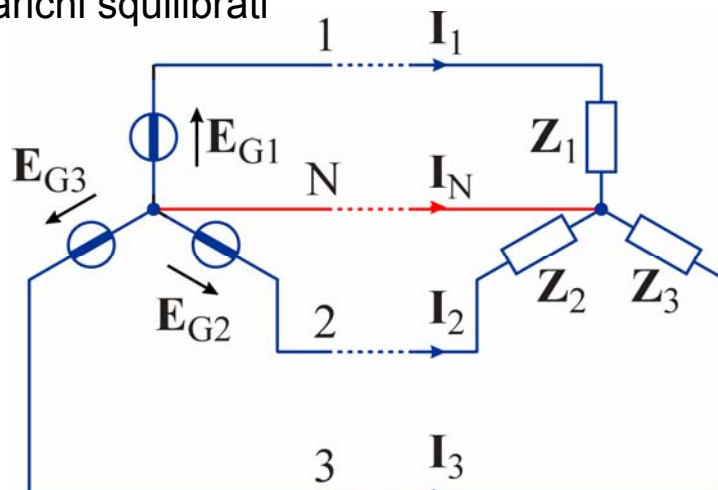


- ➔ Risolta la rete relativa alla prima fase (**rete ridotta monofase**) è possibile determinare le tensioni e le correnti delle altre due fasi introducendo i corrispondenti sfasamenti di $\pm 2\pi/3$

41

Sistemi trifase con neutro

- Nel caso di generatori e carico a stella è possibile aggiungere un quarto conduttore (**neutro**) che collega il centro della stella di generatori al nodo centrale del carico
- Le tensioni di fase del carico coincidono con le tensioni dei generatori e quindi non dipendono dalle impedenze di carico
- ➔ Il neutro consente di garantire valori prefissati delle tensioni di fase in presenza di carichi squilibrati



42

Sistemi trifase con neutro

- Il neutro è percorso dalla corrente

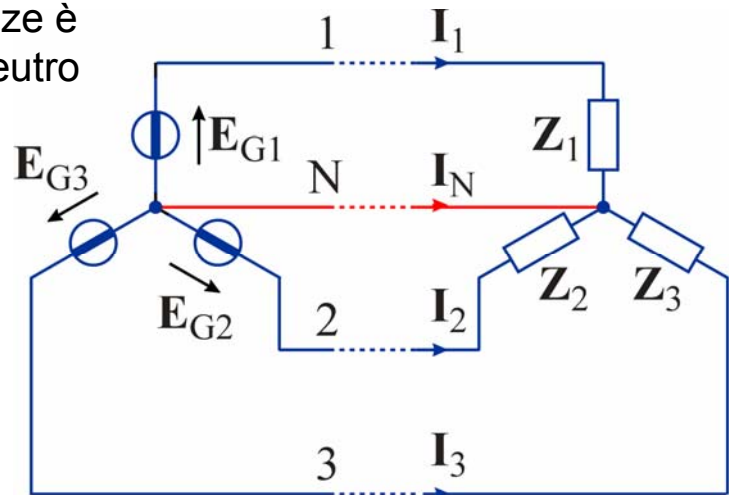
$$\mathbf{I}_N = -(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3) = -\left(\frac{\mathbf{E}_{G1}}{\mathbf{Z}_1} + \frac{\mathbf{E}_{G2}}{\mathbf{Z}_2} + \frac{\mathbf{E}_{G3}}{\mathbf{Z}_3}\right)$$

- ➔ $\mathbf{I}_N$ si annulla se le tre impedenze sono uguali (carico regolare)

- In questo caso la tensione tra il centro della stella di generatori e il centro della stella di impedenze è nulla anche in assenza del neutro

- ➔ la presenza del neutro è irrilevante

- Se il carico è irregolare nel neutro circola una corrente la cui intensità è tanto maggiore quanto più il carico è squilibrato



43

Sistemi trifase con neutro

- I sistemi con neutro sono utilizzati nella distribuzione di energia a bassa tensione
- In Italia il valore normalizzato delle tensioni di fase per la distribuzione a bassa tensione è di 230 V efficaci, corrispondenti a tensioni concatenate di 400 V efficaci
- Le tensioni di fase sono utilizzate per alimentare carichi monofasi indipendenti (es. utenze domestiche)
 - ➔ normalmente il carico risulta squilibrato
- Le tensioni concatenate sono utilizzate per carichi trifase o per carichi monofase che richiedono potenze più elevate

44