

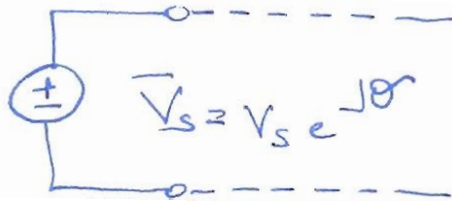
## □ SISTEMI TRIFASE

①

La produzione, trasmissione, distribuzione, e l'utilizzazione industriale dell'energia elettrica prevede l'utilizzo di sistemi trifase, perché si ottengono notevoli vantaggi:

1. Riduzione dei costi di impianto (lo dimostreremo)
2. Macchine elettriche trifasi più efficienti (generatori e motori)

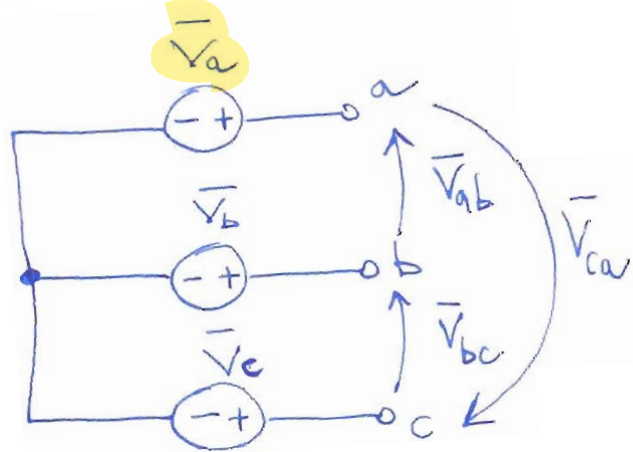
### • GENERATORE MONOFASE (2 conduttori) DI TENSIONE



L'utilizzo di due conduttori, connessi ad un generatore (una fase), è il modo più semplice per distribuire energia elettrica, ma non è la soluzione migliore dal punto di vista industriale.

# GENERATORE TRIFASE SIMMETRICO DI TENSIONE (3 conduttori)

(2)



Le tensioni  $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$  sono dette **TENSIONI DI FASE**. Hanno uguale modulo e sono sfasate tra loro di  $120^\circ$ .

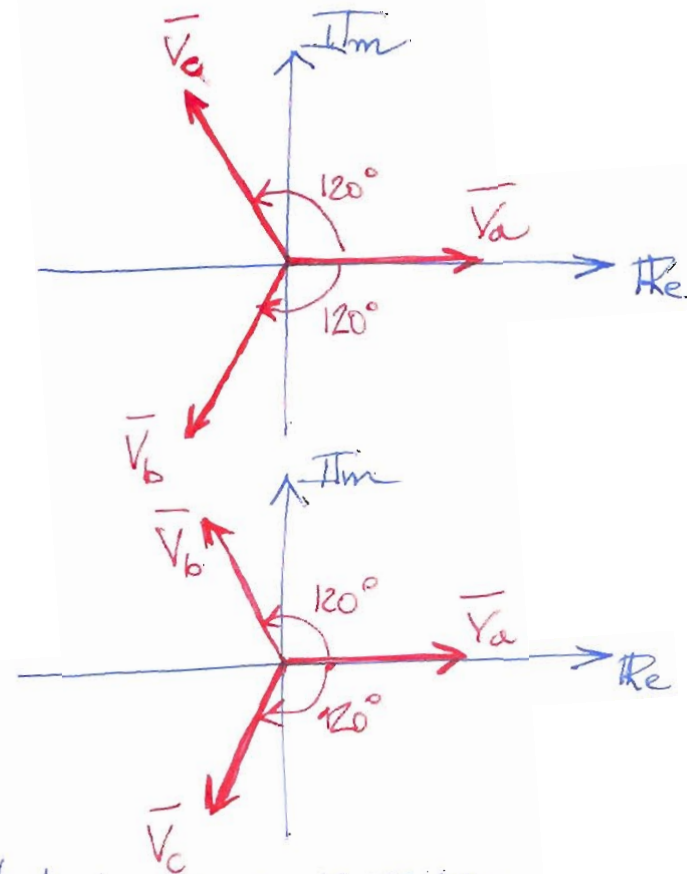
Ci sono due possibilità:

$$\begin{cases} \bar{V}_a = V_f \\ \bar{V}_b = V_f e^{-j120^\circ} \\ \bar{V}_c = V_f e^{j120^\circ} \end{cases}$$

è detta  
"TERNA DIRETTA" o  
"SEQUENZA DIRETTA" o  
"SEQUENZA POSITIVA"

$$\begin{cases} \bar{V}_a = V_f \\ \bar{V}_b = V_f e^{j120^\circ} \\ \bar{V}_c = V_f e^{-j120^\circ} \end{cases}$$

è detta  
"TERNA INVERSA" o  
"SEQUENZA INVERSA" o  
"SEQUENZA NEGATIVA"



In ogni caso:

$$\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c = 0$$

Basta scambiare due fili per trasformare una seq. diretta in inversa, e viceversa.

- 3
- Le tensioni fra i conduttori sono dette **TENSIONI DI LINEA** o **TENSIONI CONCATENATE**.  
Per es. con la seq. diretta:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b = V_f - V_f e^{-j120^\circ} = V_f - V_f \cos 120^\circ + j V_f \sin 120^\circ = V_f + \frac{V_f}{2} + j \frac{V_f \sqrt{3}}{2} = \\ &= \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) V_f = \frac{V_f}{2} \sqrt{9+3} e^{j \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{2} e^{j30^\circ} = \sqrt{3} V_f e^{j30^\circ}\end{aligned}$$

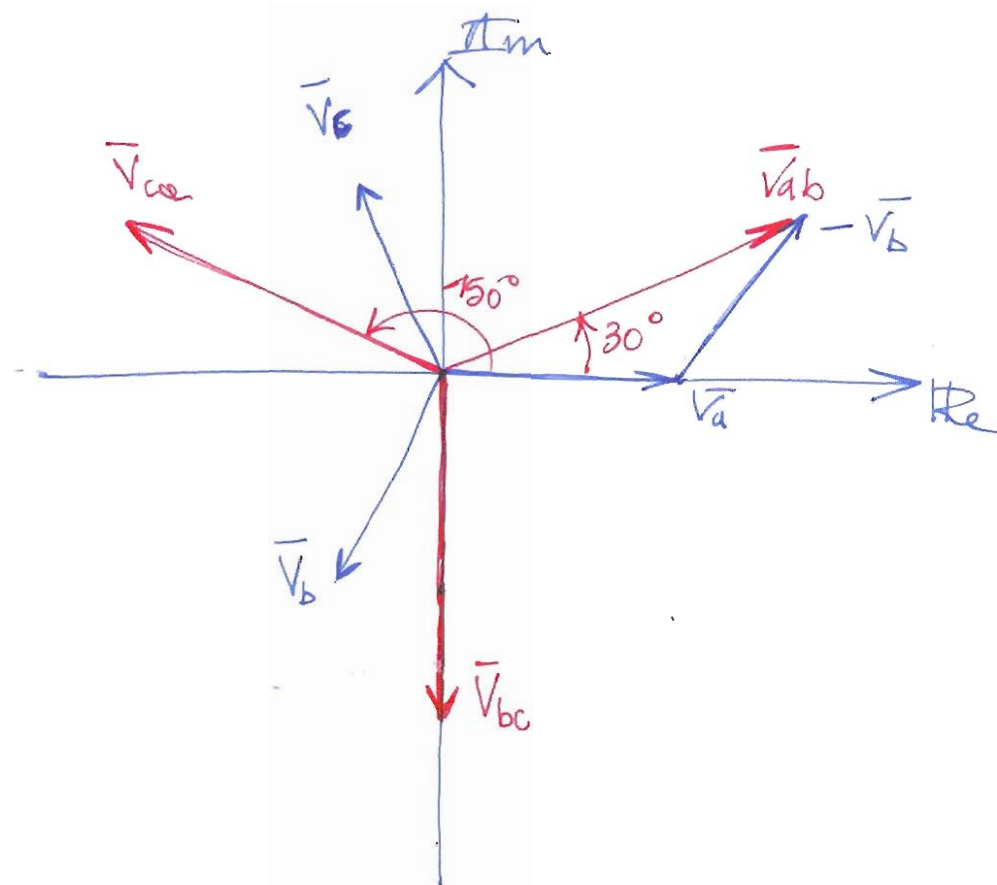
$$\bar{V}_{bc} = \sqrt{3} V_f e^{-j90^\circ}$$

$$\bar{V}_{ca} = \sqrt{3} V_f e^{j150^\circ}$$

$$\bar{V}_{ab} + \bar{V}_{bc} + \bar{V}_{ca} = 0 \quad (\text{KVL!})$$

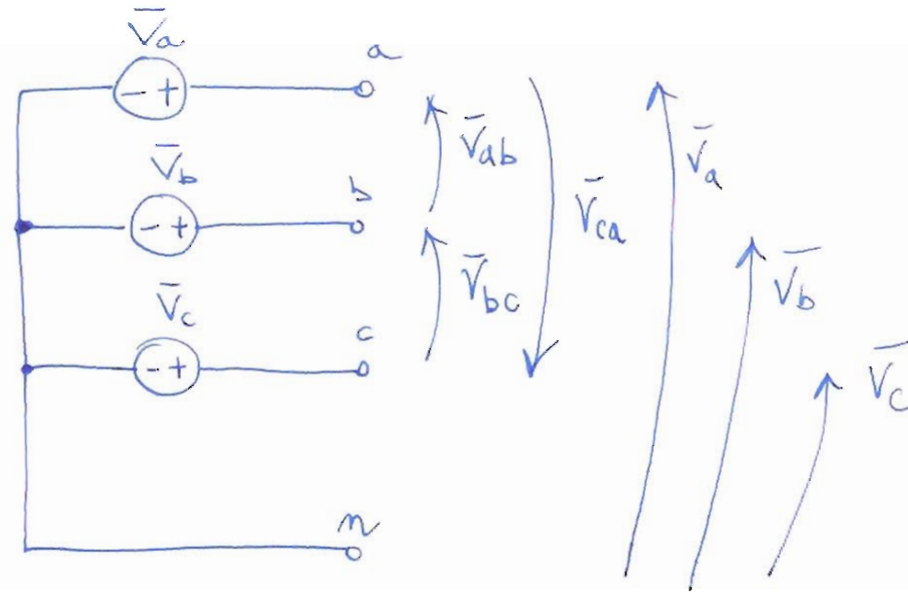
Anche le tensioni concatenate sono sfasate di  $120^\circ$ ; hanno la stessa sequenza (diretta o inversa) di quelle di fase; e hanno modulo:

$$V_L = \sqrt{3} V_f$$



## □ GENERATORE TRIFASE SIMMETRICO DI TENSIONE, CON NEUTRO (4 conduttori)

Questo generatore rende accessibile il centro-stella all'esterno, attraverso un conduttore detto **NEUTRO** (n), cosicché è disponibile la tensione di fase oltre a quella concatenata (di linea)



## □ DISTRIBUZIONE IN BASSA TENSIONE IN ITALIA

$$V_l \cong 380 \text{ V} \quad \text{tensione di linea o tensione concatenata}$$

$$V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}} \cong 220 \text{ V} \quad \text{tensione di fase}$$

In valore efficace, alla frequenza di  $f=50 \text{ Hz}$

Aggiornamento:

Attualmente i valori efficaci nominali di bassa tensione sono:

$V_{\text{linea}}=400 \text{ V}$

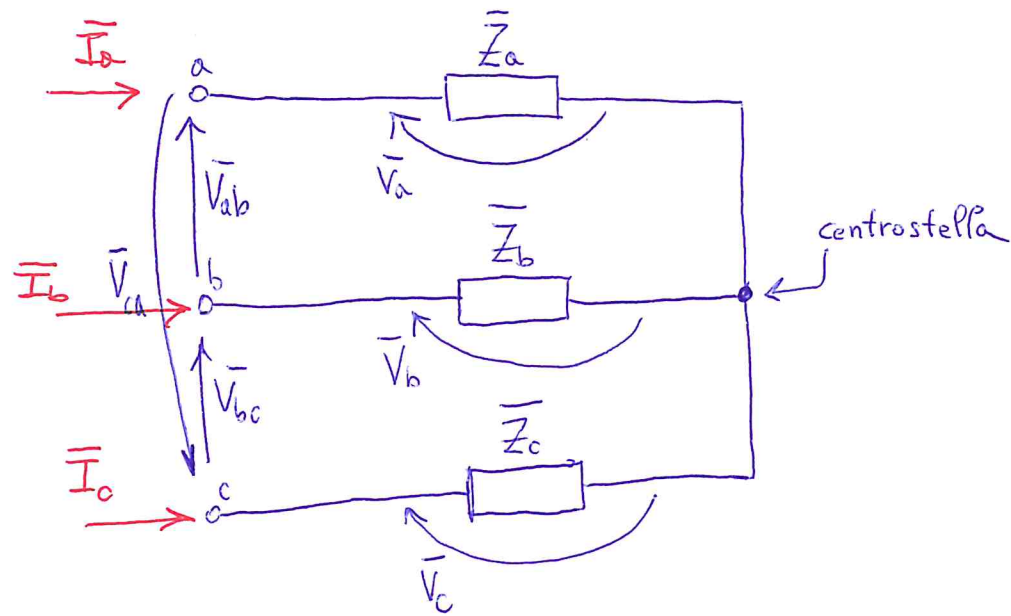
$V_{\text{fase}}=230 \text{ V}$

con tolleranza tipica  $\pm 5 \%$



# □ CARICHI TRIFASE

## A STELLA (Y)



$\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$  TENSIONI DI FASE  
 $\bar{V}_{ab}, \bar{V}_{bc}, \bar{V}_{ca}$  " " LINEA  
 $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$  CORRENTI DI LINEA

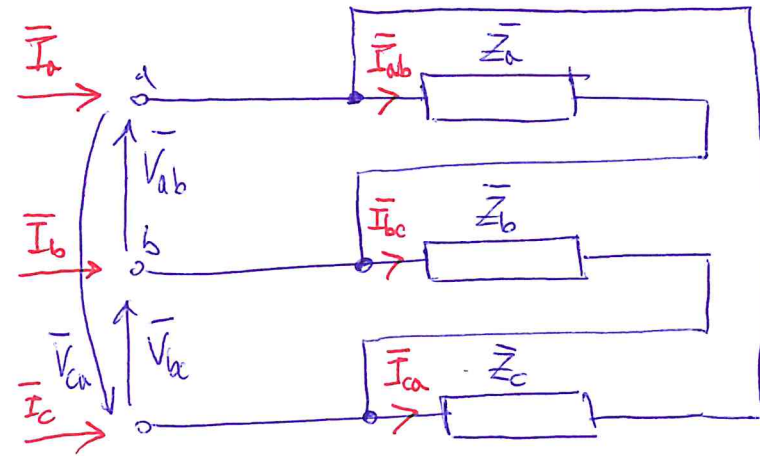
Le correnti nelle impedenze coincidono con le correnti di linea

SE  $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_c \Rightarrow$  CARICO "EQUILIBRATO"

## ● EQUIVALENZA STELLA-TRIANGOLO

Ai morsetti esterni, un carico equilibrato ( $\bar{Z}_\Delta$ ) se

## A TRIANGOLO ( $\Delta$ )



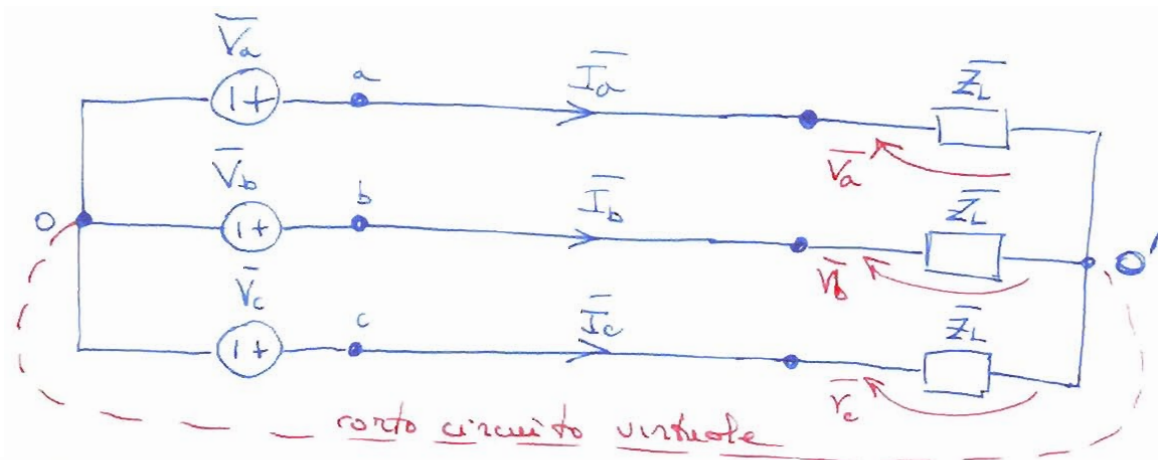
$\bar{V}_{ab}, \bar{V}_{bc}, \bar{V}_{ca}$  TENSIONI DI LINEA  
 $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$  CORRENTI DI LINEA  
 $\bar{I}_{ab}, \bar{I}_{bc}, \bar{I}_{ca}$  CORRENTI DI FASE

Le tensioni sulle impedenze coincidono con le tensioni di linea

Un carico equilibrato ( $\bar{Z}_Y$ ) è equivalente a un carico  $\Delta$   
 $\bar{Z}_Y = \frac{\bar{Z}_\Delta}{3}$      $\bar{Z}_\Delta = 3 \bar{Z}_Y$

# CIRCUITI TRIFASE SIMMETRICI ED EQUILIBRATI

(7)



generatore simmetrico  
(sequenza diretta o inversa)  
connesso ad un carico equilibrato  
(stello oppure triangolo).

Consideriamo il caso  $\gamma$   
(per il caso  $\Delta$ , basta trasformare  
 $\Delta \rightarrow \gamma$  e ci riconduce al caso  
trattato)

Quanto vale  $\bar{V}_{o'o} = ?$  tensione fra i due centristelle?

Millman

$$\bar{V}_{o'o} = \frac{\frac{\bar{V}_a}{\bar{Z}_L} + \frac{\bar{V}_b}{\bar{Z}_L} + \frac{\bar{V}_c}{\bar{Z}_L}}{\frac{1}{\bar{Z}_L} + \frac{1}{\bar{Z}_L} + \frac{1}{\bar{Z}_L}} = \frac{\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c}{3} = 0 \quad \text{infatti: } \bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c = 0$$

$\bar{V}_{o'o} = 0$  CORTO-CIRCUITO "VIRTUALE"

$o'$  e  $o$  hanno lo stesso potenziale

Allora

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a}{\bar{Z}_L}; \quad \bar{I}_b = \frac{\bar{V}_b}{\bar{Z}_L}; \quad \bar{I}_c = \frac{\bar{V}_c}{\bar{Z}_L}$$

- Terna simmetrica di correnti:  $|\bar{I}_a| = |\bar{I}_b| = |\bar{I}_c|$
- Stessa sequenza delle tensioni
- Sfasamenti di  $120^\circ$

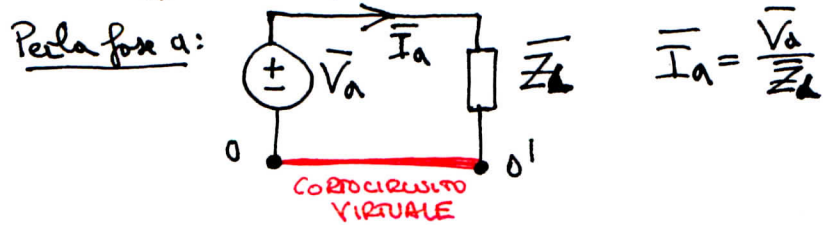
e

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$$

Anche se collegassi un conduttore di neutro, per cortocircuito  
effettivamente  $o'$  e  $o$  non cambierebbe nulla: il conduttore  
di neutro sarebbe percorso da corrente nulla.

Ogni fase funziona per conto proprio, senza interazioni con le altre.

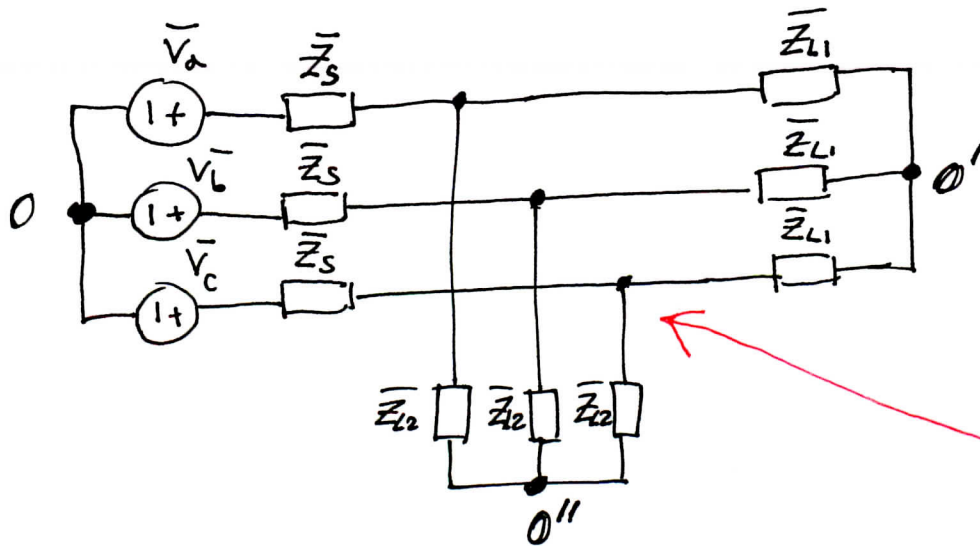
Ciò suggerisce la possibilità di estrarre un CIRCUITO MONOFASE EQUIVALENTE:



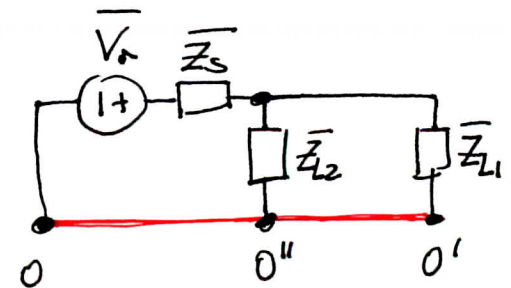
Risolvendo il circuito monofase otteniamo le grandezze per la fase a. Lo stesso procedimento può essere seguito per la fase b e c (ma è più comodo dedurre i risultati della fase b e c sfasando opportunamente di  $\pm 120^\circ$  quelli della fase a, applicando la sequenza).

Qualunque sia il numero di centri-stella, questa proprietà continua a valere! Tutti i centri-stella sono equipotenziali in un sistema trifase simmetrico ed equilibrato.

Esempio: due carichi in // trifase:



MONOFASE EQUIVALENTE FASE a



I circuiti monofasi equivalenti hanno una topologia "a scala".

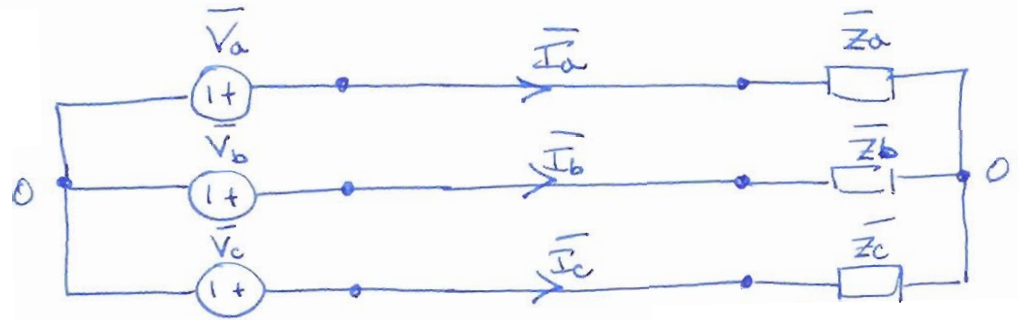
Questa connessione si chiama PARALLELO TRIFASE; il perché è chiaro guardando il circuito monofase equivalente ( $\bar{Z}_{L1} \parallel \bar{Z}_{L2}$ ).



# □ CIRCUITI TRIFASE CON CARICHI NON EQUILIBRATI

("SQUILIBRATI")

8



Sia  $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$  una terna simmetrica  
(diretta o inversa)

Sia  $\bar{Z}_a \neq \bar{Z}_b \neq \bar{Z}_c$

$$\bar{V}_{0'0} = \frac{\frac{\bar{V}_a}{\bar{Z}_a} + \frac{\bar{V}_b}{\bar{Z}_b} + \frac{\bar{V}_c}{\bar{Z}_c}}{\frac{1}{\bar{Z}_a} + \frac{1}{\bar{Z}_b} + \frac{1}{\bar{Z}_c}} \neq 0$$

$$\Rightarrow \bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a - \bar{V}_{0'0}}{\bar{Z}_a} ; \quad \bar{I}_b = \frac{\bar{V}_b - \bar{V}_{0'0}}{\bar{Z}_b} ; \quad \bar{I}_c = \frac{\bar{V}_c - \bar{V}_{0'0}}{\bar{Z}_c}$$

in generale  $\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$

ma  $|\bar{I}_a| \neq |\bar{I}_b| \neq |\bar{I}_c|$

sfasamenti diversi da  $120^\circ$

terna non simmetrica di correnti

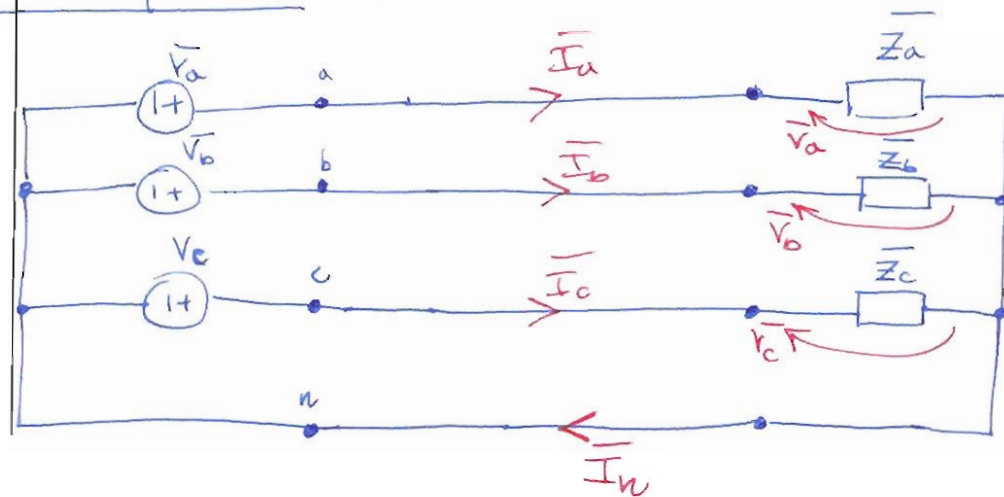


## □ CIRCUITI TRIFASE CON NEUTRO

10

- caso simmetrico ed equilibrato: il neutro non ha alcun effetto (vedi slide precedente), infatti  $\nexists$  gr<sup>a</sup> corrente virtuale, e il neutro sarebbe percorso da  $I_n$  nulla

- circuiti squilibrati:



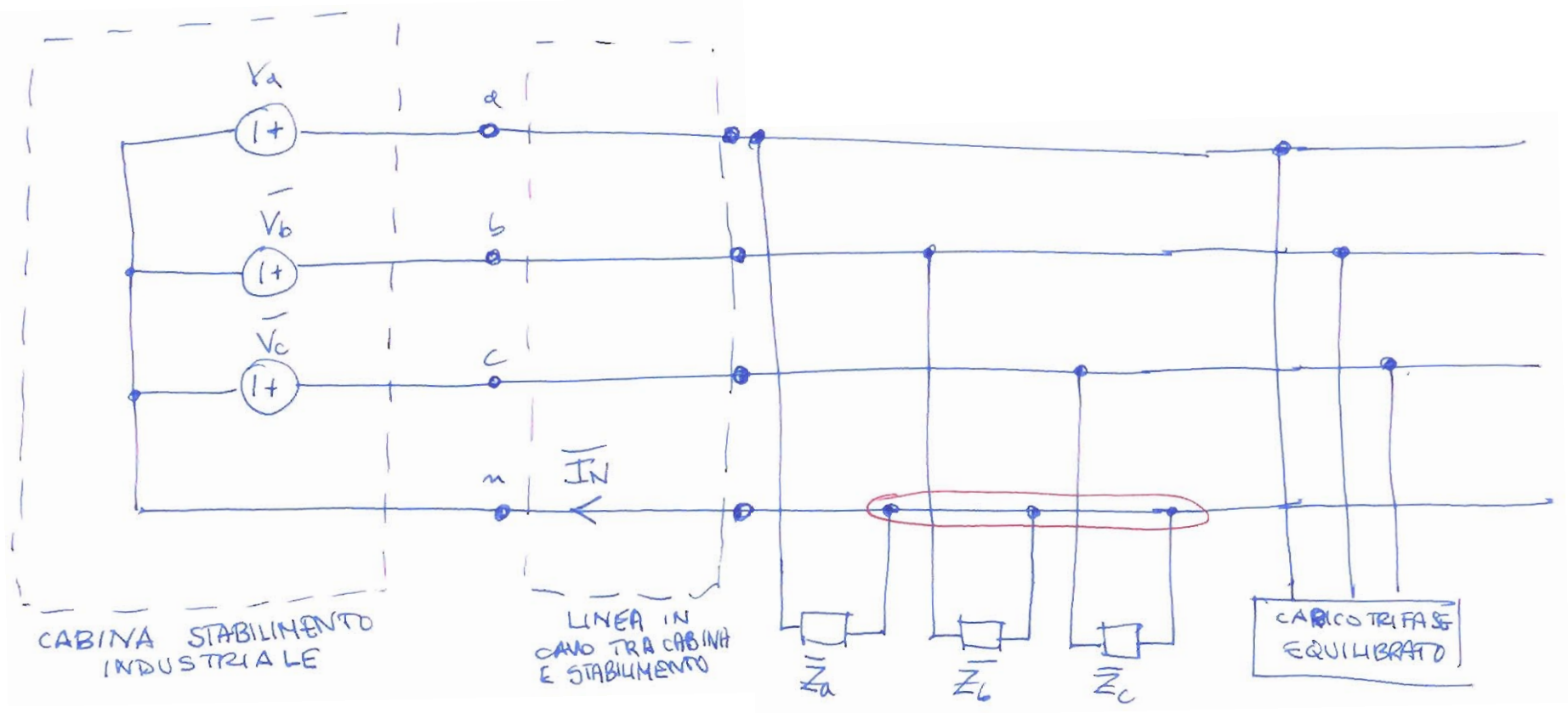
$$\begin{cases} \bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a}{\bar{Z}_a} \\ \bar{I}_b = \frac{\bar{V}_b}{\bar{Z}_b} \\ \bar{I}_c = \frac{\bar{V}_c}{\bar{Z}_c} \end{cases}$$

in generale  $|\bar{I}_a| \neq |\bar{I}_b| \neq |\bar{I}_c|$  (funz. non simmetrica di correnti spostamenti  $\neq 120^\circ$ )

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = \bar{I}_n$$

Il neutro e' percorso dalla somma delle tre correnti di linea.

- Se  $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = \bar{Z}_c$  (equilibrato)  $\rightarrow$  corrente di neutro nulla; la corrente di neutro dipende dal grado di squilibrio del carico. E' meglio avere carichi equilibrati sulle tre fasi



- Se distribuisco i carichi monofasi equamente sulle tre fasi ( $\bar{Z}_a \approx \bar{Z}_b \approx \bar{Z}_c$ ) posso avere correnti  $\bar{I}_N$  a monte più piccole  $\Rightarrow$  dimensionamento meno oneroso. dal foto di vista economico.
- Lo stesso principio è adottato dall'ente distributore di energia: distribuire le utenze domestiche di un quartiere equamente sulle tre fasi in uscita dalla cabina.