Tema 8

Sistemas trifásicos equilibrados

Centro Universitario de la Defensa Zaragoza

Índice

Tema 8.- Sistemas trifásicos equilibrados.

8.1. Introducción

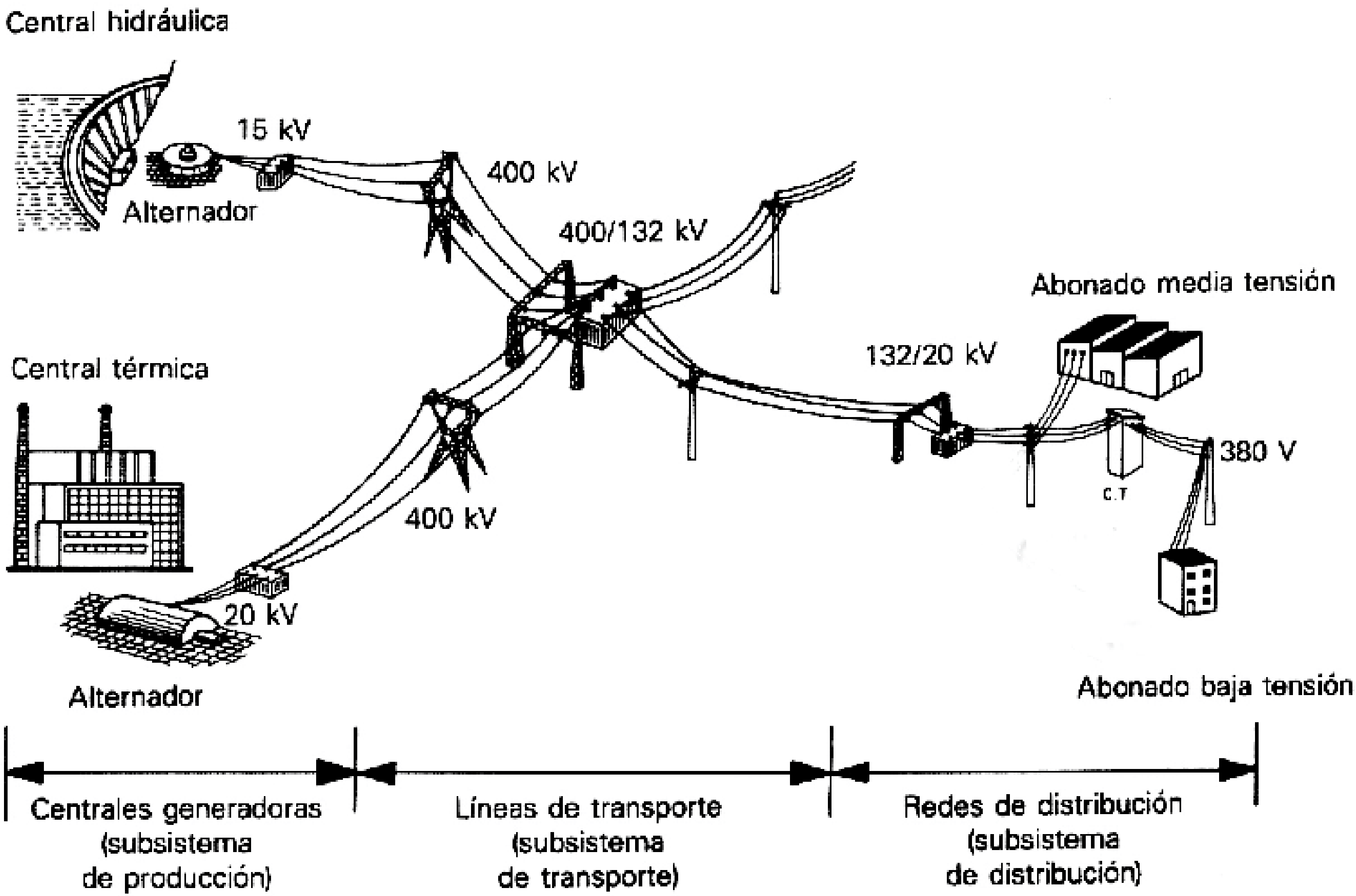
8.1. Introducción

- *Los sistemas trifásicos son los más habitualmente empleados en la generación, el transporte y la distribución de la energía eléctrica.*
- *Esto es debido a que los sistemas trifásicos presentan notables ventajas sobre los monofásicos. Entre estas ventajas se pueden citar:*
  - Para transportar una determinada energía a una determinada tensión, con unas determinadas pérdidas, es más económico el sistema trifásico ya que supone un ahorro de “cobre” del 25%
  - La potencia instantánea es constante. Esto se refleja en un par totalmente uniforme en los motores trifásicos, y las consiguientes menores vibraciones
  - Los motores trifásicos pueden arrancar por sí mismos, mientras que los monofásicos precisan sistemas de arranque especiales
  - Los sistemas trifásicos son capaces de generar campos magnéticos giratorios

8.1. Introducción

- *Las instalaciones de pequeña potencia (por ejemplo las instalaciones domésticas) son monofásicas, pero no se tratan más que de una derivación de un sistema trifásico.*
- *Para conocer y estudiar el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia se hace necesario entonces conocer el análisis de los circuitos trifásicos. No obstante, hay que tener en cuenta que:*
  - Las técnicas de análisis vistas en el caso de circuitos monofásicos son aplicables directamente a sistemas trifásicos.
  - En muchas ocasiones, el análisis de los sistemas trifásicos se efectúa mediante su reducción a sistemas monofásicos equivalentes, cuyo estudio ya se ha visto.

8.1. Introducción



8.1. Introducción

8.1. Introducción

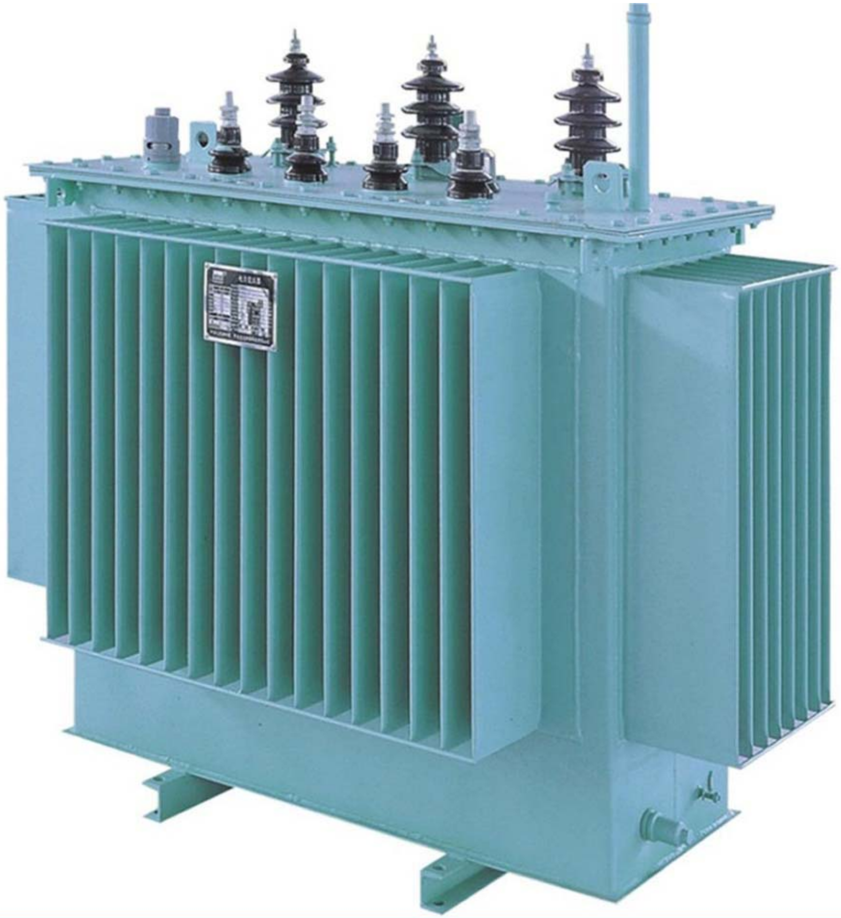
8.1. Introducción

Centro Universitario de la Defensa Zaragoza

PRAUZ 449 (2021/22)

8.1. Introducción

8.1. Introducción

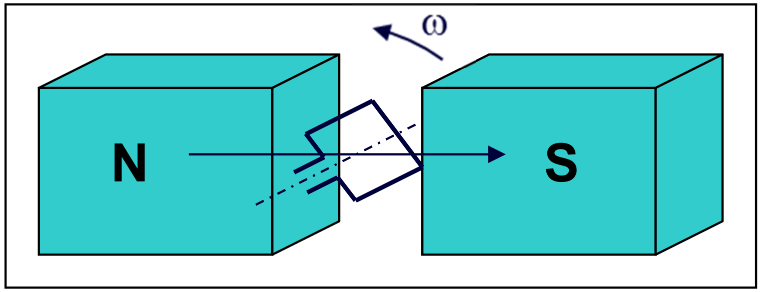


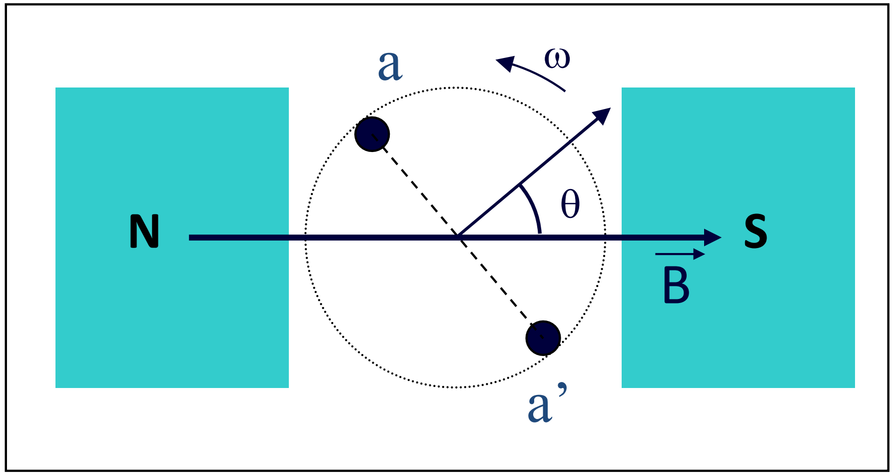
Distribución en baja tensión

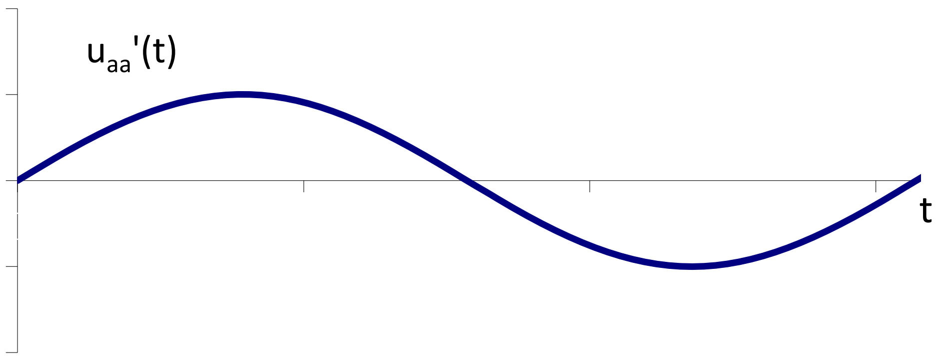
8.2. Generación de un sistema trifásico

8.2. Generación de un sistema trifásico

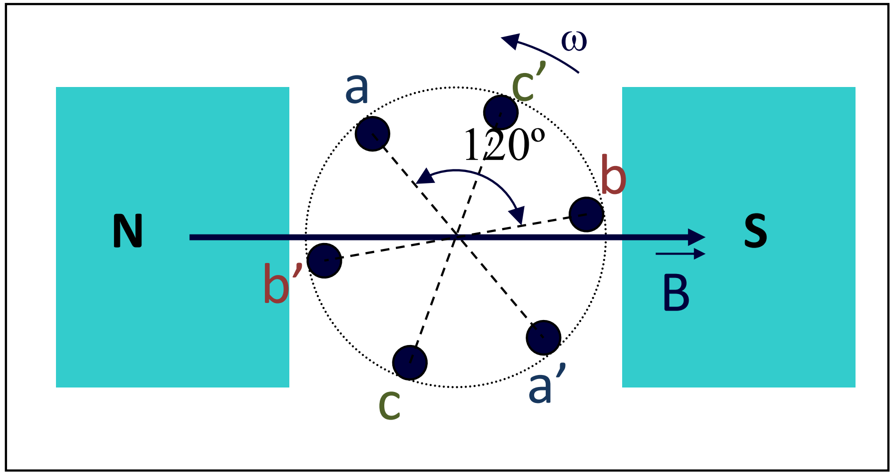
- *Como se ha visto:*

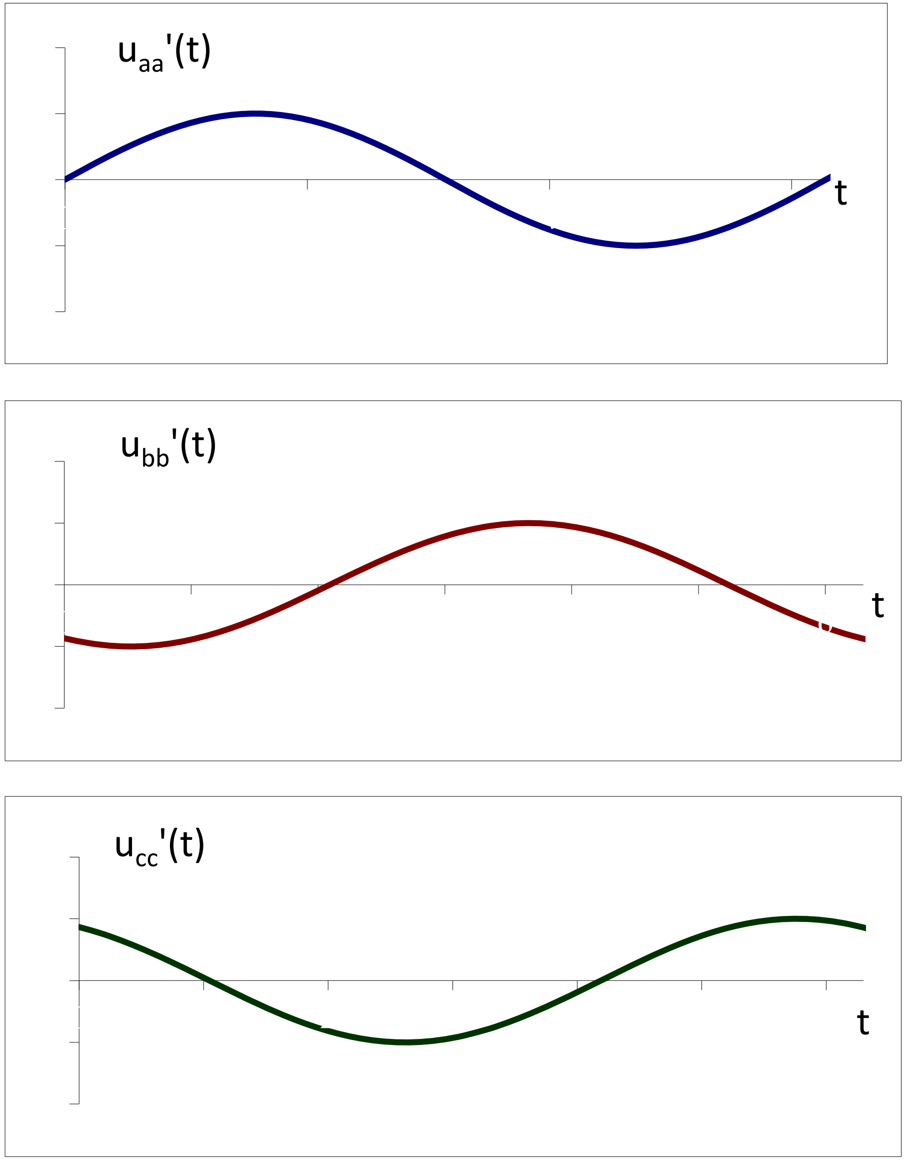




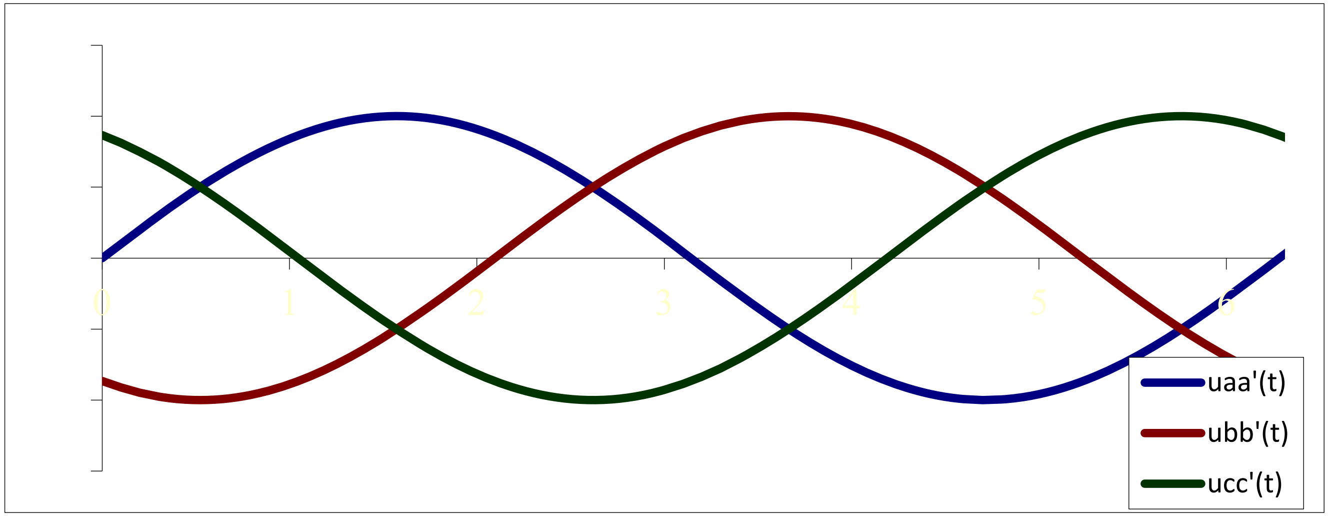


8.2. Generación de un sistema trifásico





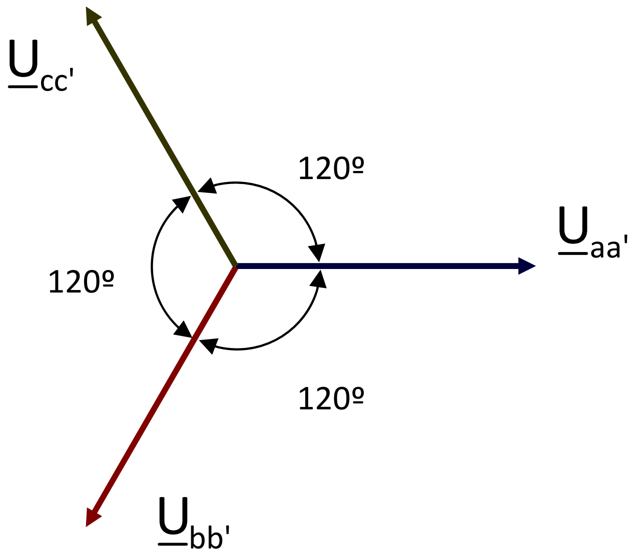
8.2. Generación de un sistema trifásico



$$u_{aa'}(t) = U_0 \mathrm{sen}(\omega t)$$

$$u_{bb'}(t) = U_0 \mathrm{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{cc'}(t) = U_0 \mathrm{sen}\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = U_0 \mathrm{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$



8.2. Generación de un sistema trifásico

Se dispone de tres fuentes reales de tensión con la misma amplitud y desfasadas 120º entre sí

- Fase: cada una de las partes de un circuito trifásico donde se genera, se transporta o se utiliza cada una de las tensiones del sistema

- Secuencia de fases: orden en el que se suceden los valores máximos de las tensiones en las fases

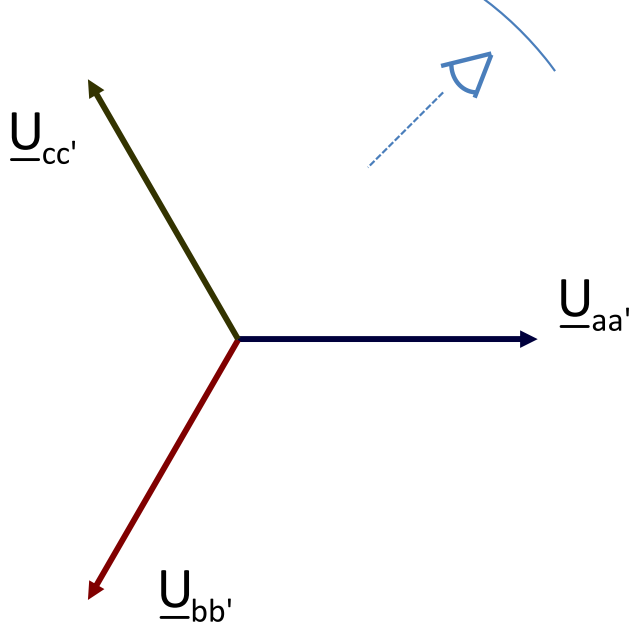
abc: secuencia directa

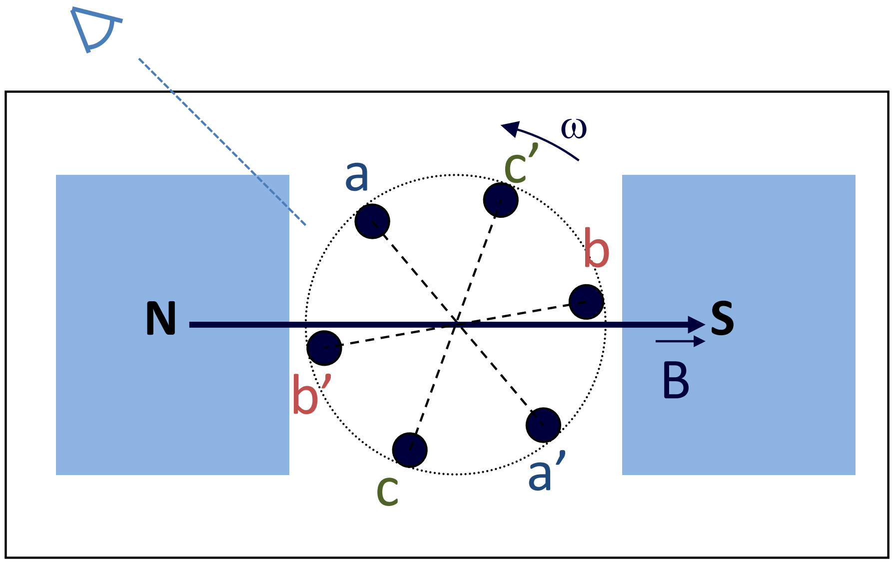
acb: secuencia inversa

8.2. Generación de un sistema trifásico

PRAUZ 449 (2021/22)

Secuencia directa





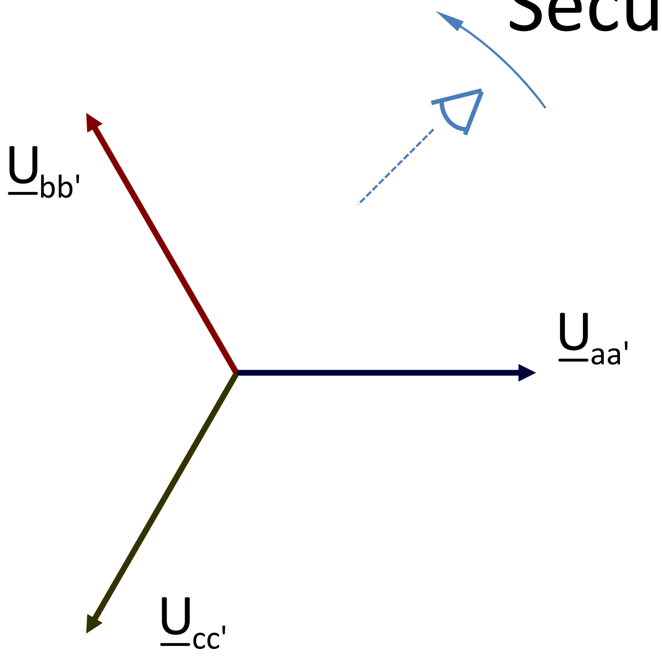
$$\underline{U}_{aa'} = U\angle 0^{\circ}$$

$$\underline{U}_{bb'} = U\angle -120^{\circ}$$

$$\underline{U}_{cc'} = U\angle -240^{\circ} = U\angle 120^{\circ}$$

8.2. Generación de un sistema trifásico

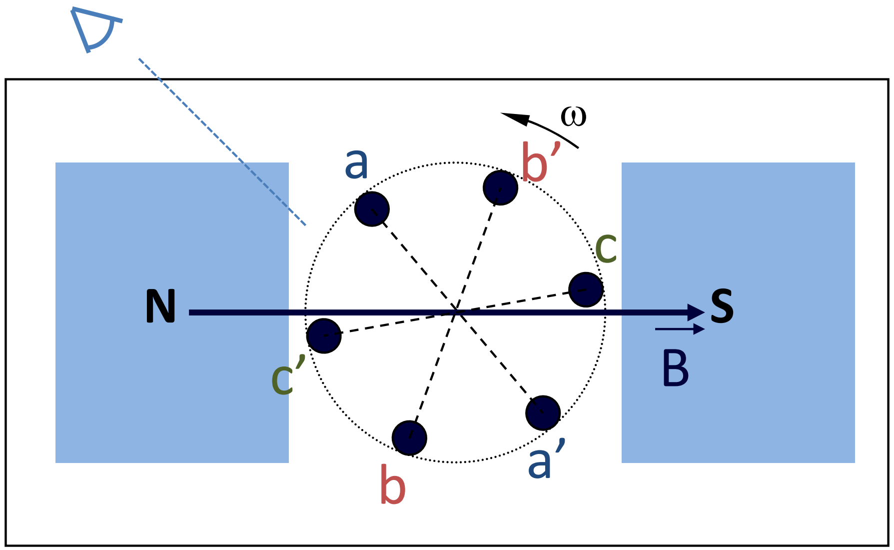
Secuencia inversa



$$\underline{U}_{aa'} = U\underline{|0º}$$

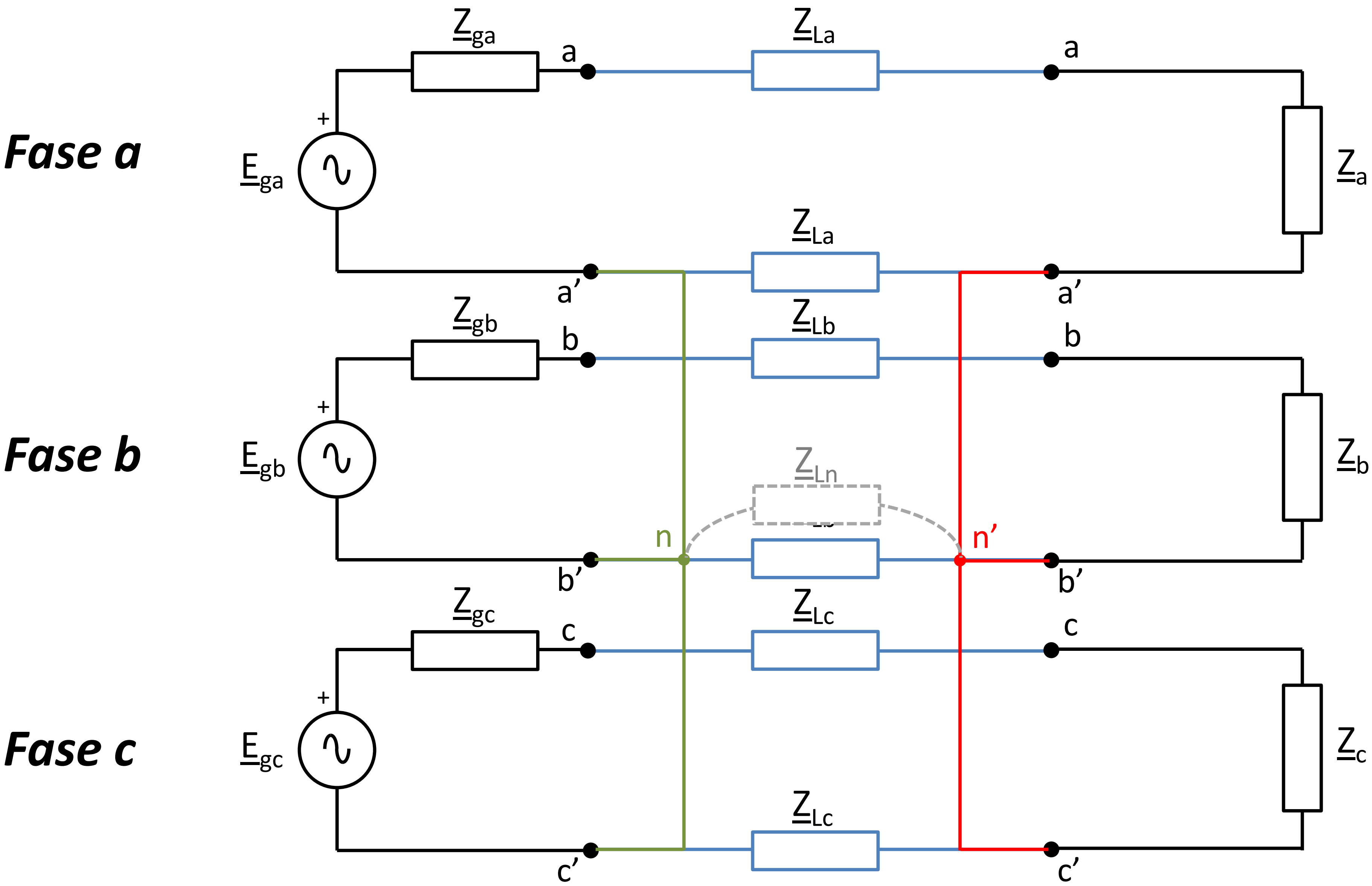
$$\underline{U}_{bb'} = U\underline{|-240º} = U\underline{|120º}$$

$$\underline{U}_{cc'} = U\underline{|-120º}$$



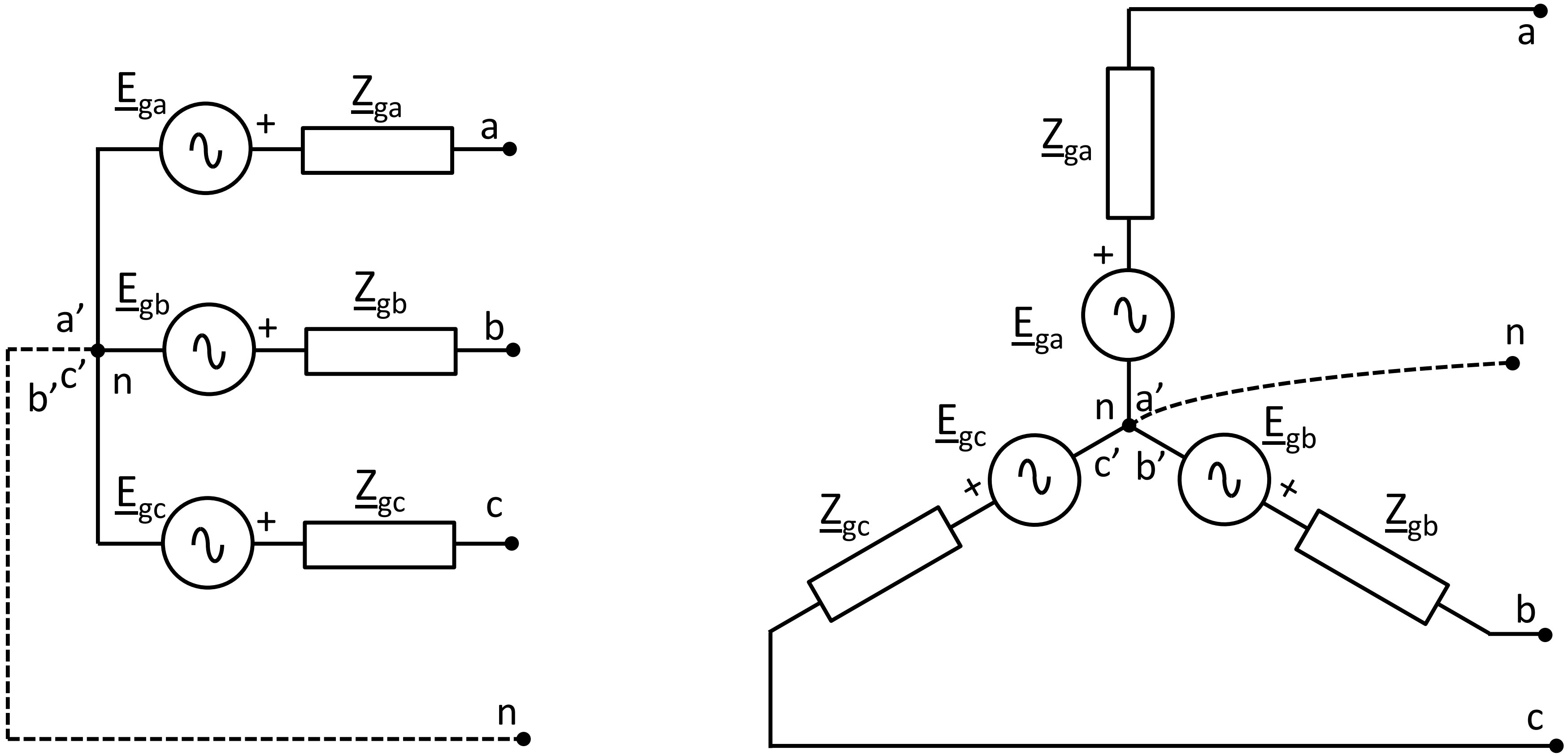
8.3. Conexiones en estrella (Y) y en triángulo(∆)

8.3.1. Conexión en estrella



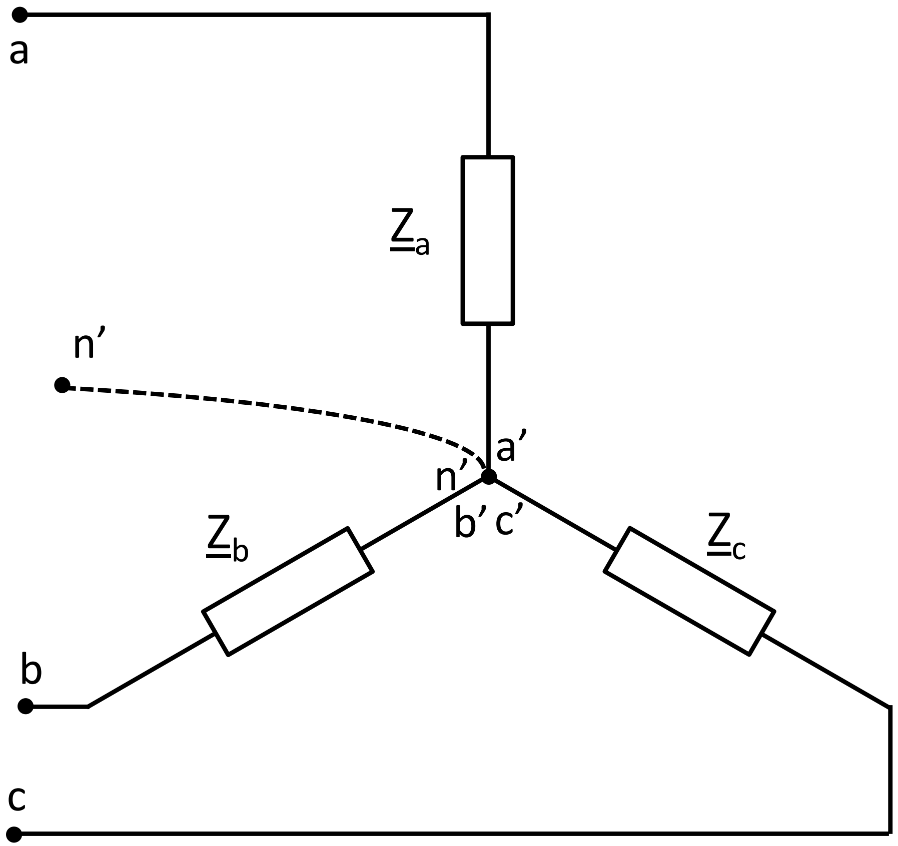
8.3.1. Conexión en estrella

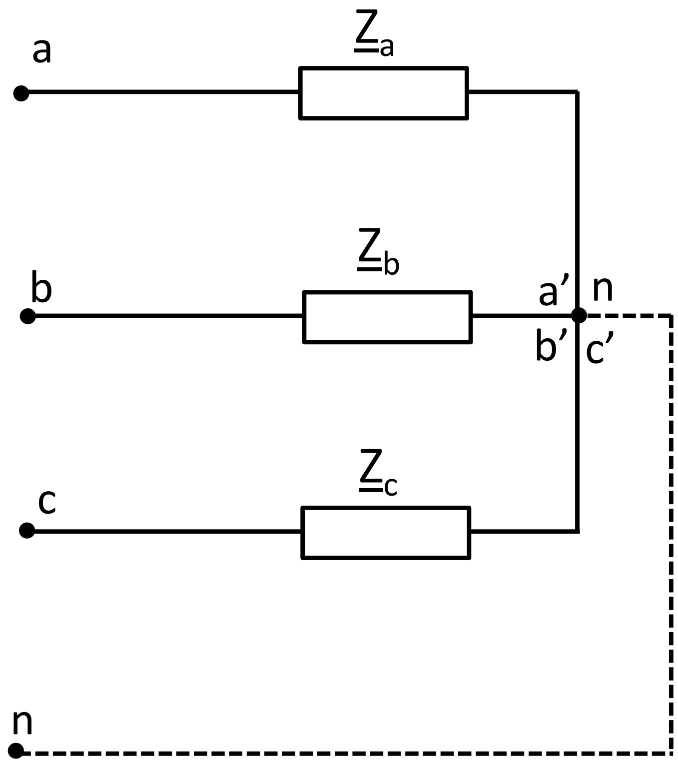
- *Se unen entre sí uno de los terminales de cada una de las fases (punto neutro de la estrella)*



Generador en estrella

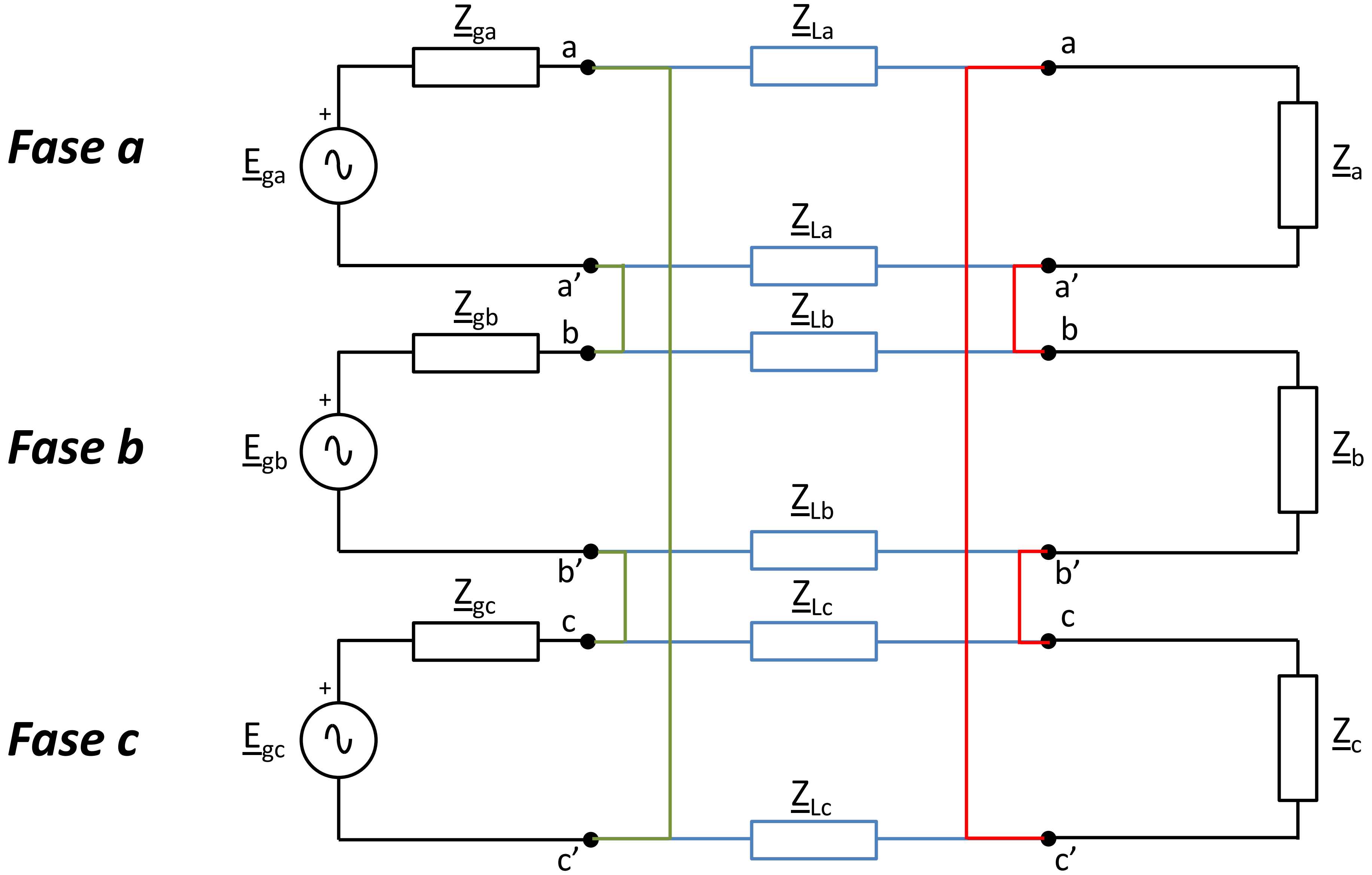
8.3.1. Conexión en estrella





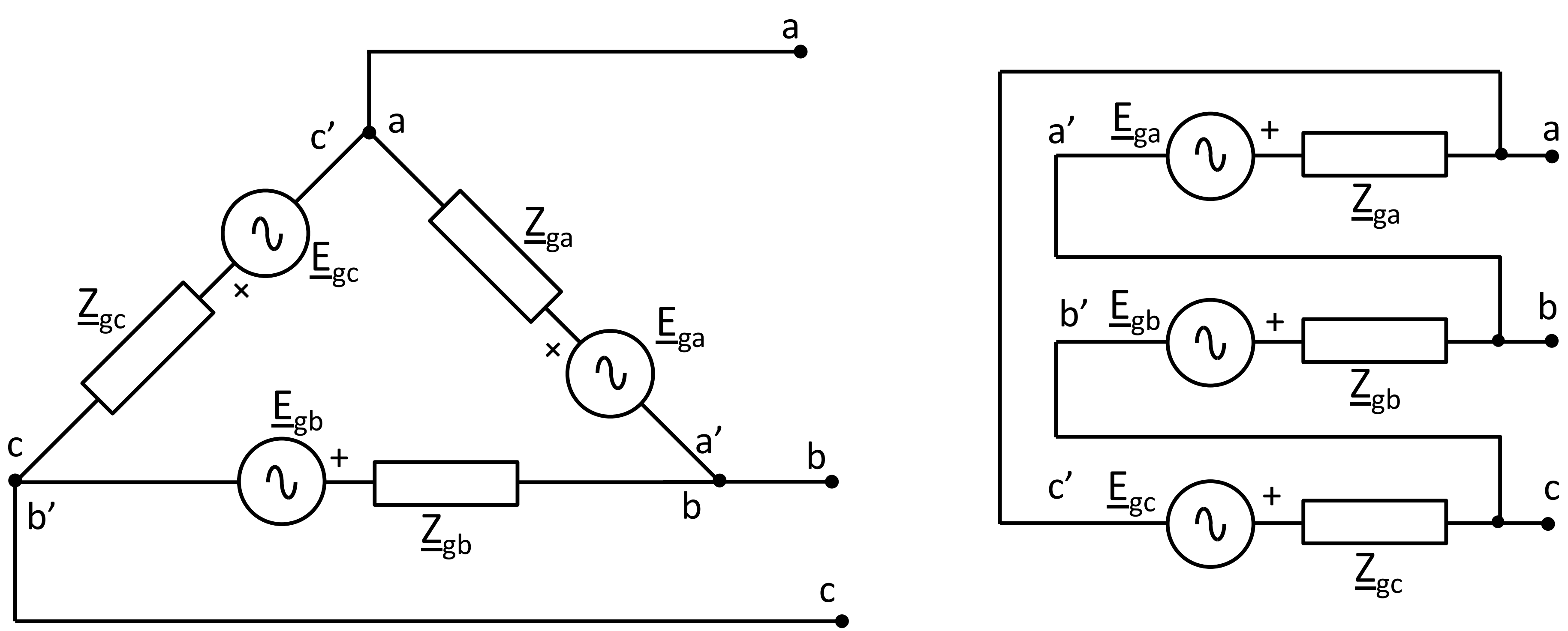
Carga en estrella

8.3.2. Conexión en triángulo



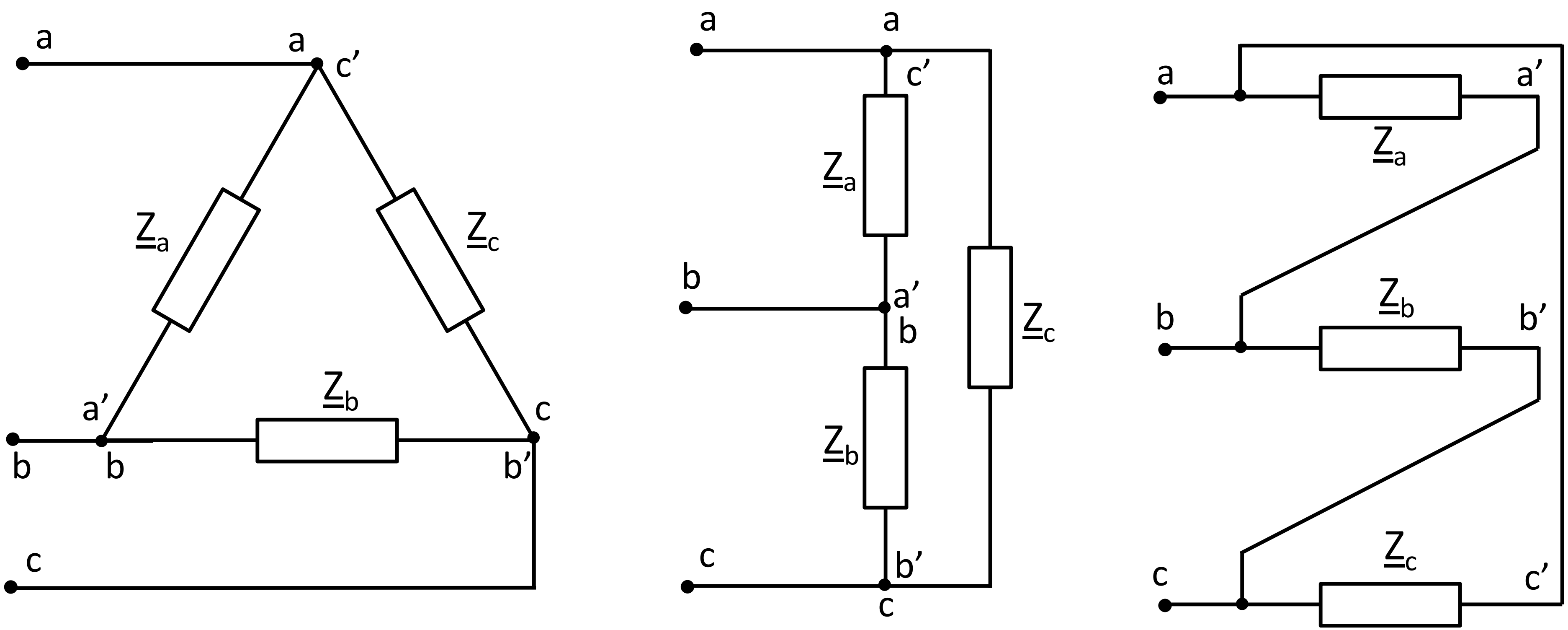
8.3.2. Conexión en triángulo

- *Se unen el terminal "final" de una fase con el terminal "comienzo" de la siguiente:*



Generador en triángulo

8.3.2. Conexión en triángulo



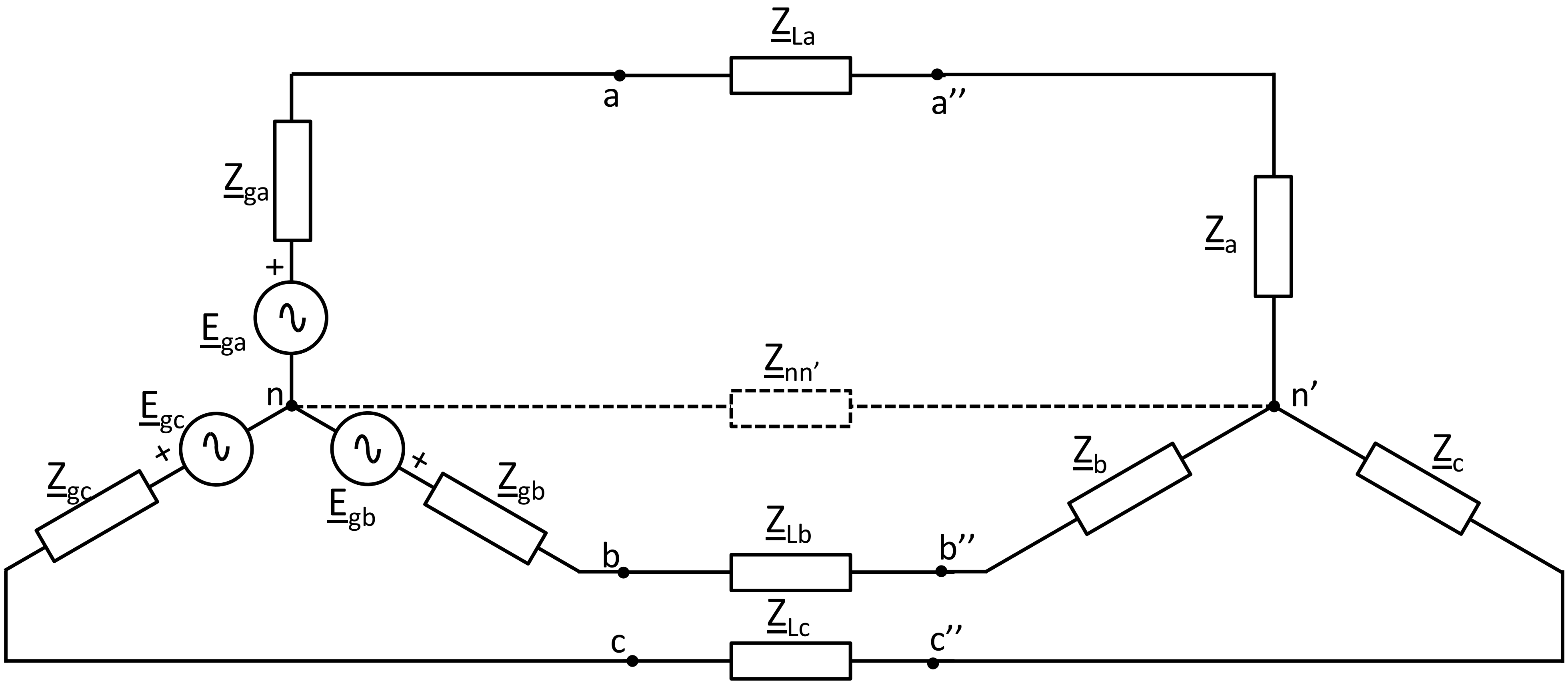
Carga en triángulo

¿En Y ó en D?

8.4. Conexión de sistemas trifásicos

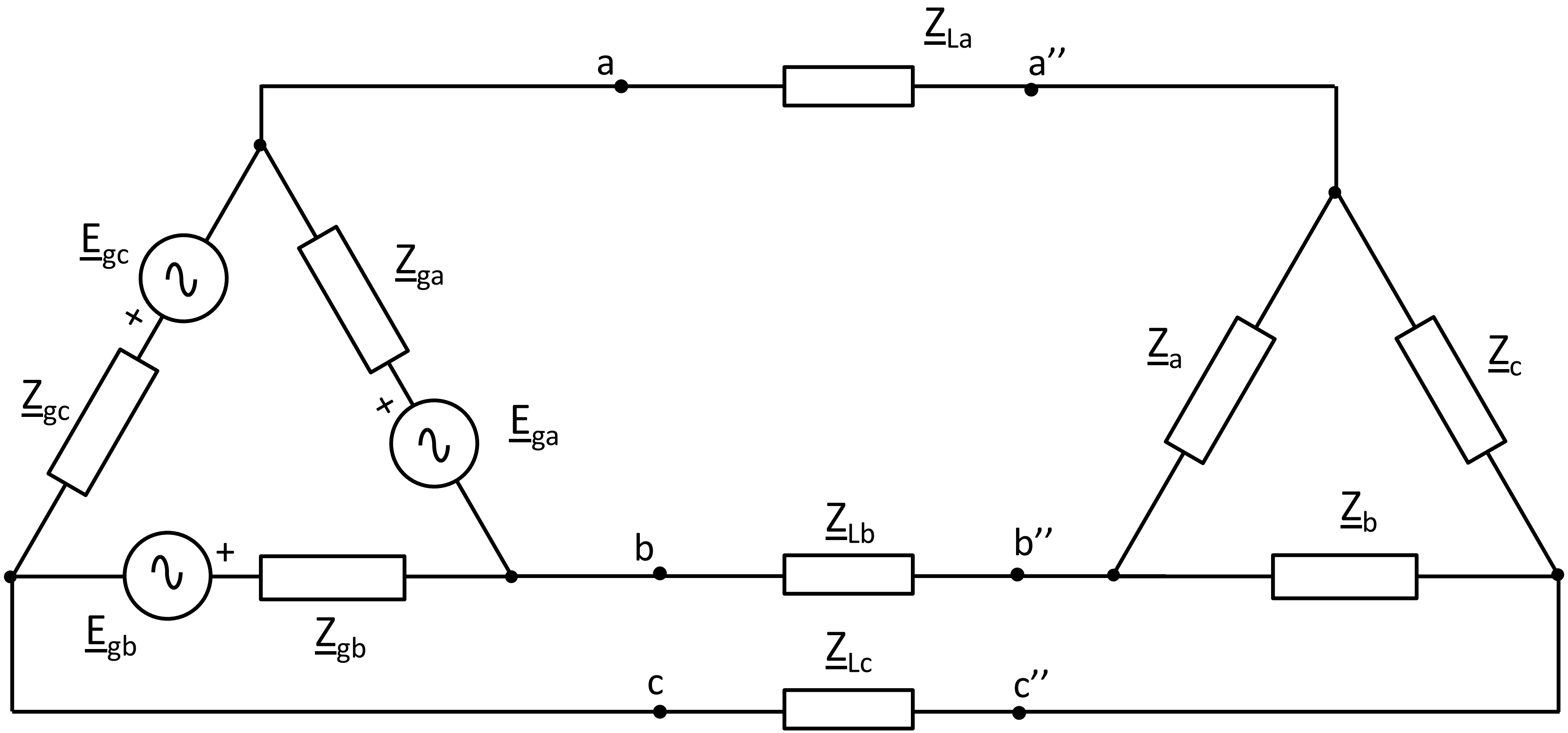
8.4.1. Sistema estrella - estrella

- *Sistema* Y-Y



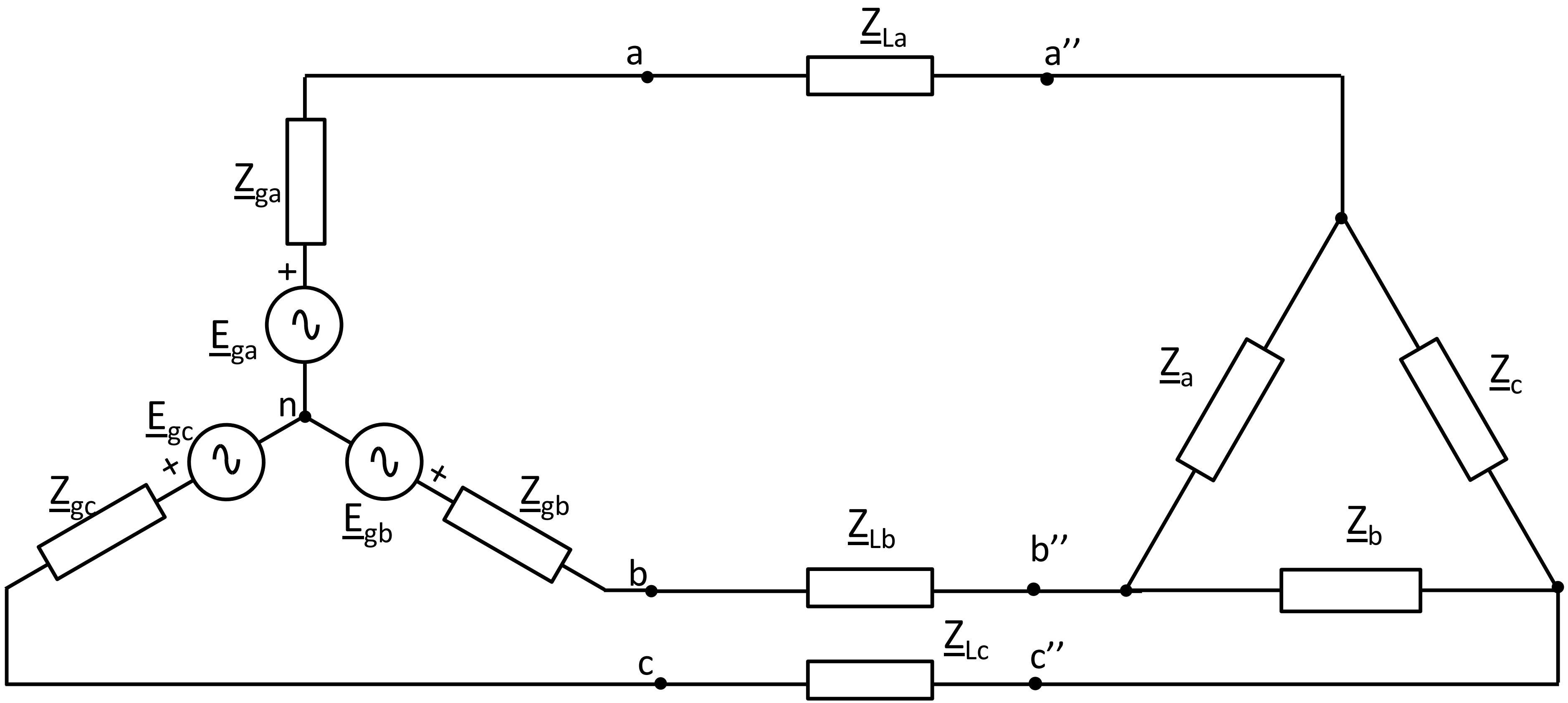
8.4.2. Sistema triángulo - triángulo

- *Sistema Δ-Δ*



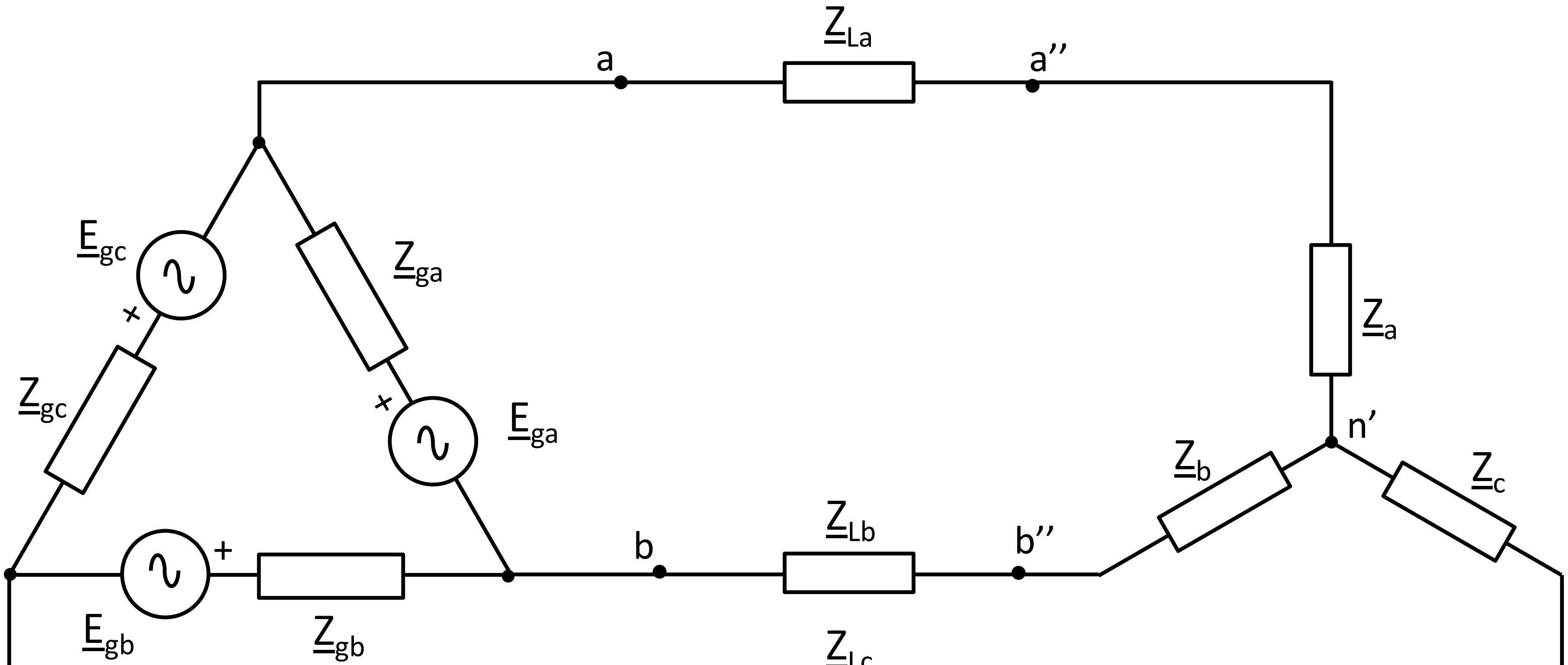
8.4.3. Sistema estrella - triángulo

- *Sistema* Y-Δ



8.4.4. Sistema triángulo - estrella

- *Sistema Δ-Y*




Red aérea tensada
RAFAEL MORALES
Red aérea posada
Tramo protegido hasta 2,5m
Red subterránea


PRUEBA
1 y 4


CGP
Conductor Neutro
LGA dentro de tubo enterrado

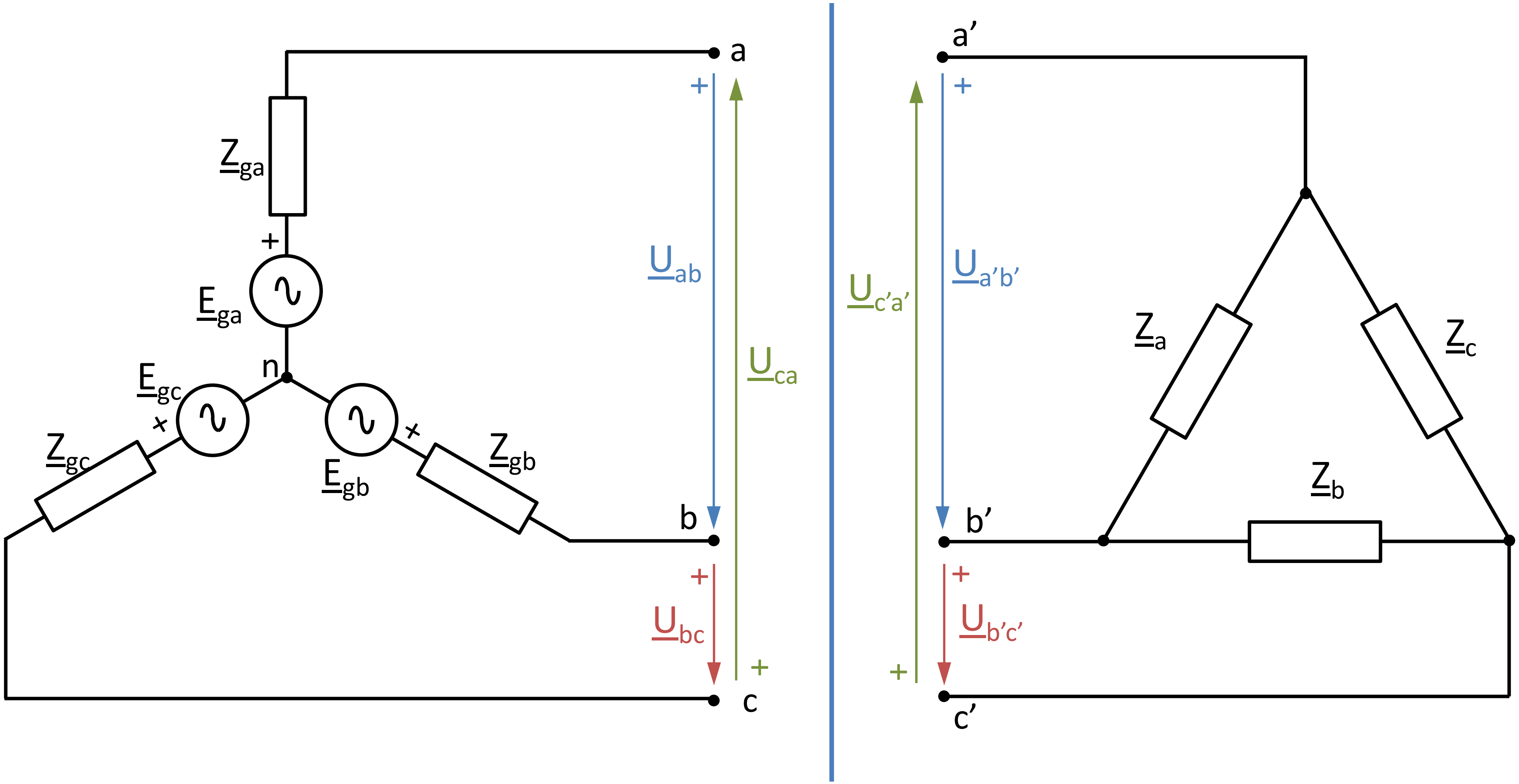

RZ 0,6/1kV Al

“Trenzado”

8.5. Tensiones e intensidades en sistemas trifásicos

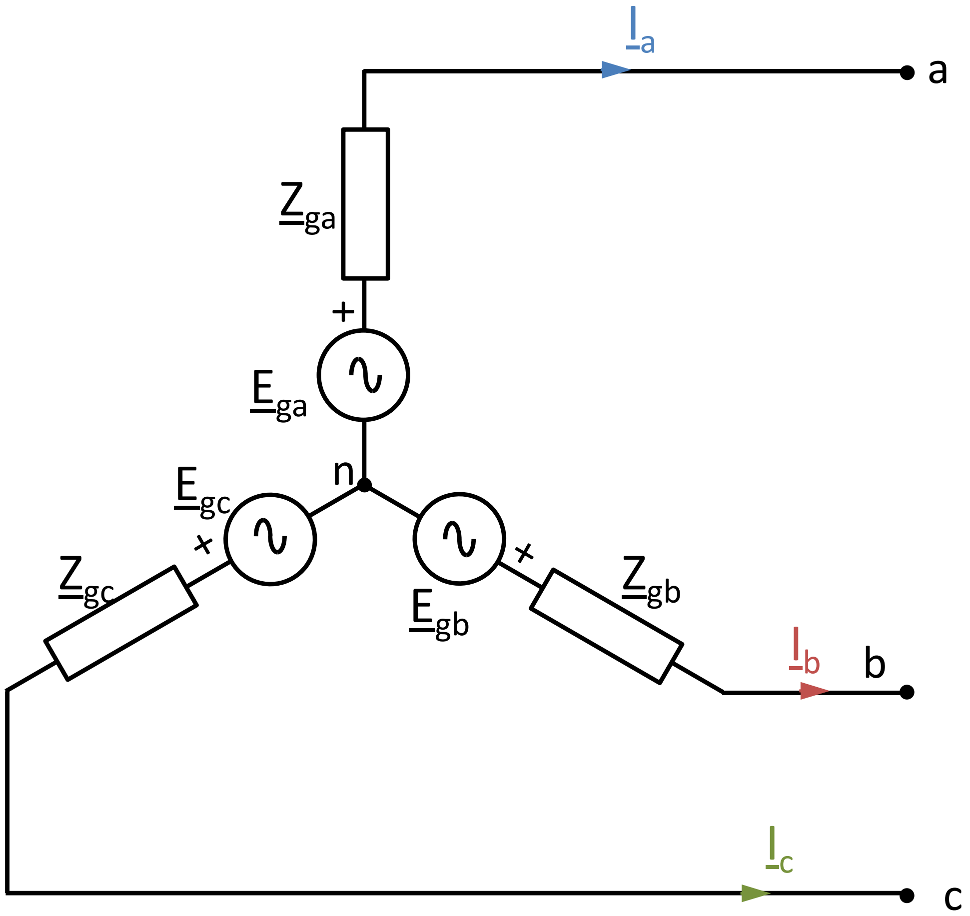
8.5.1. Tensión de línea o tensión compuesta

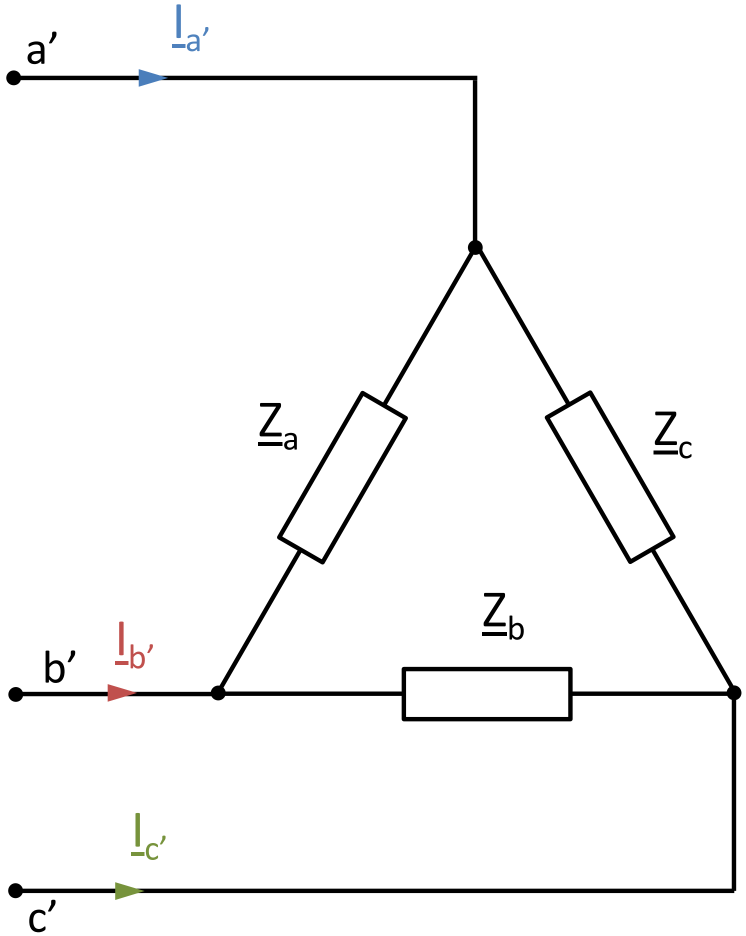
- *Tensión entre dos conductores de línea.*



8.5.2. Intensidad de línea

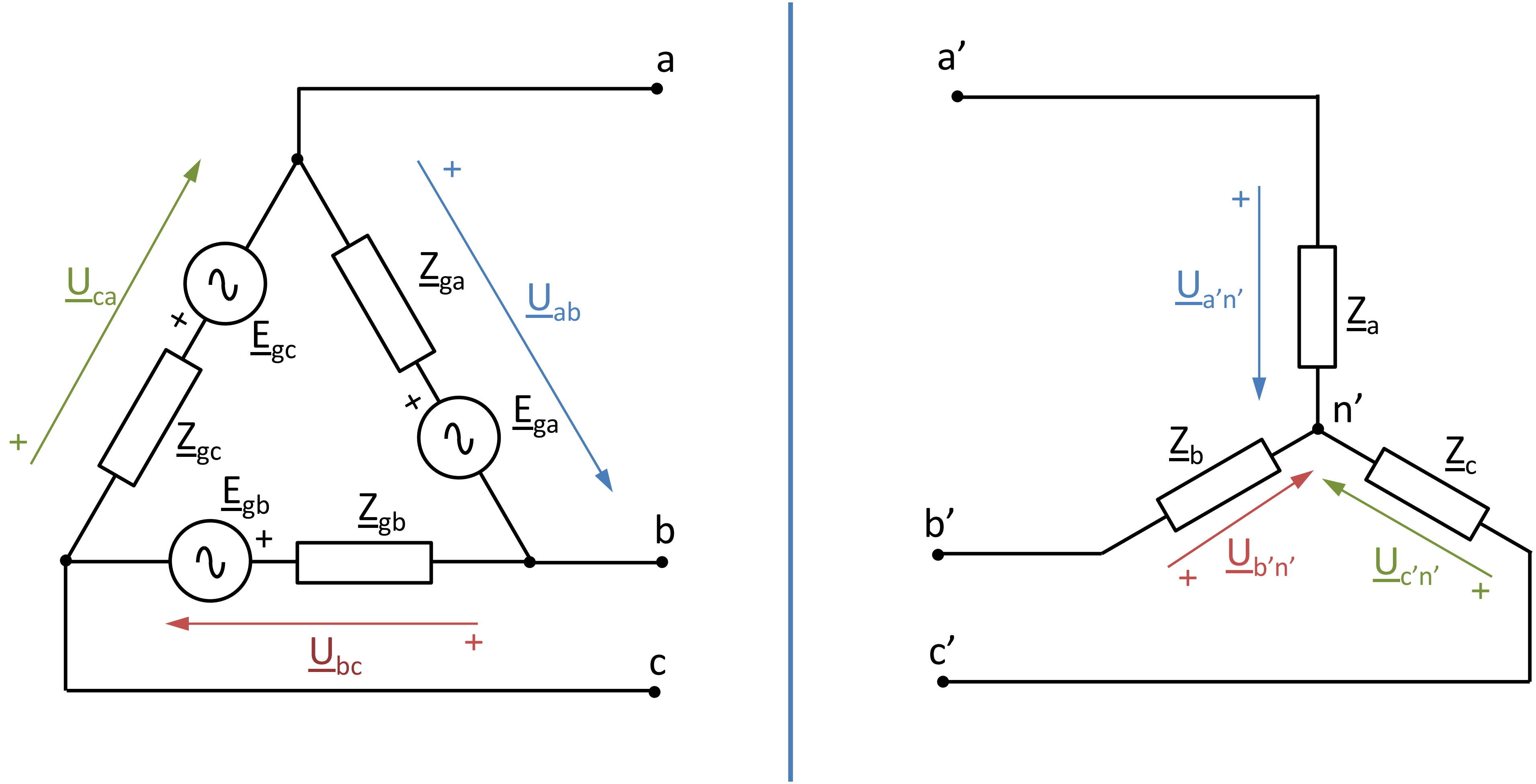
- *Intensidad que circula por cada uno de los conductores de la línea de conexión entre generación y carga.*





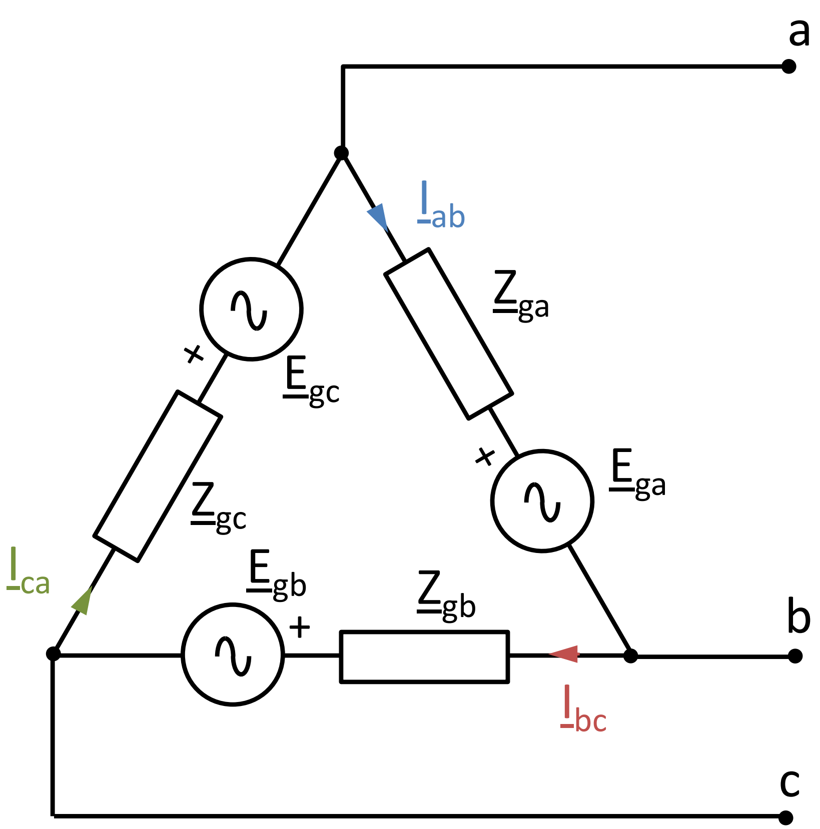
8.5.3. Tensión de fase o tensión simple

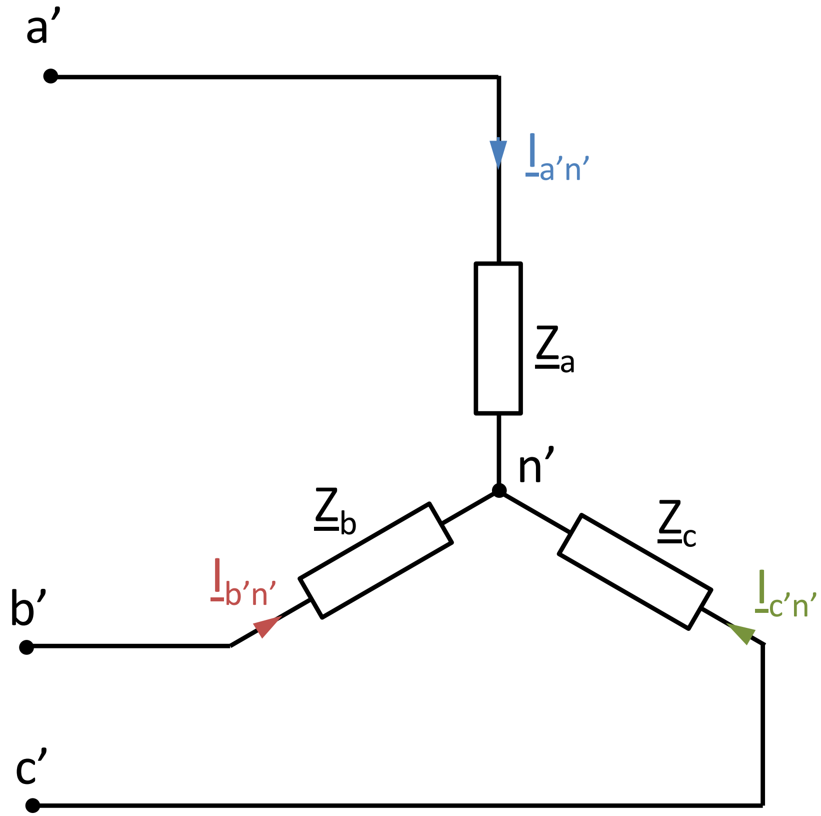
- *Tensión en bornes de cada una de las fases, ya sea de la generación o de la carga*



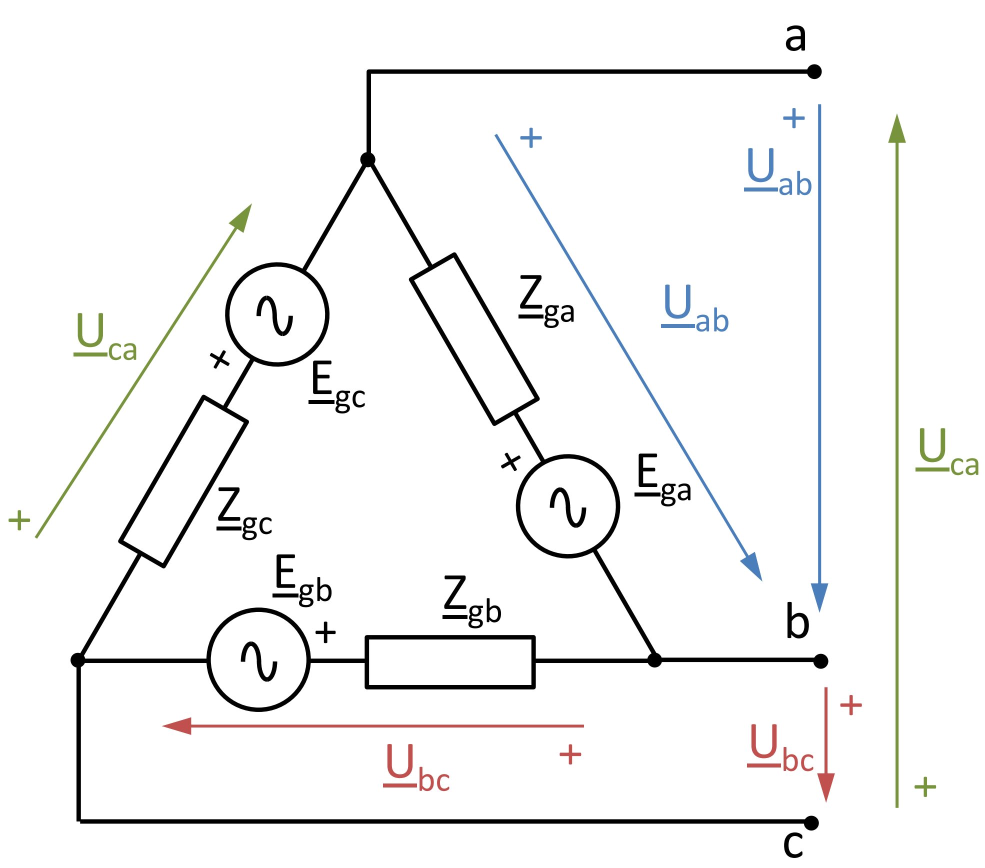
8.5.4. Intensidad de fase

- *Intensidad que circula por cada fuente de la generación o por cada impedancia de la carga.*

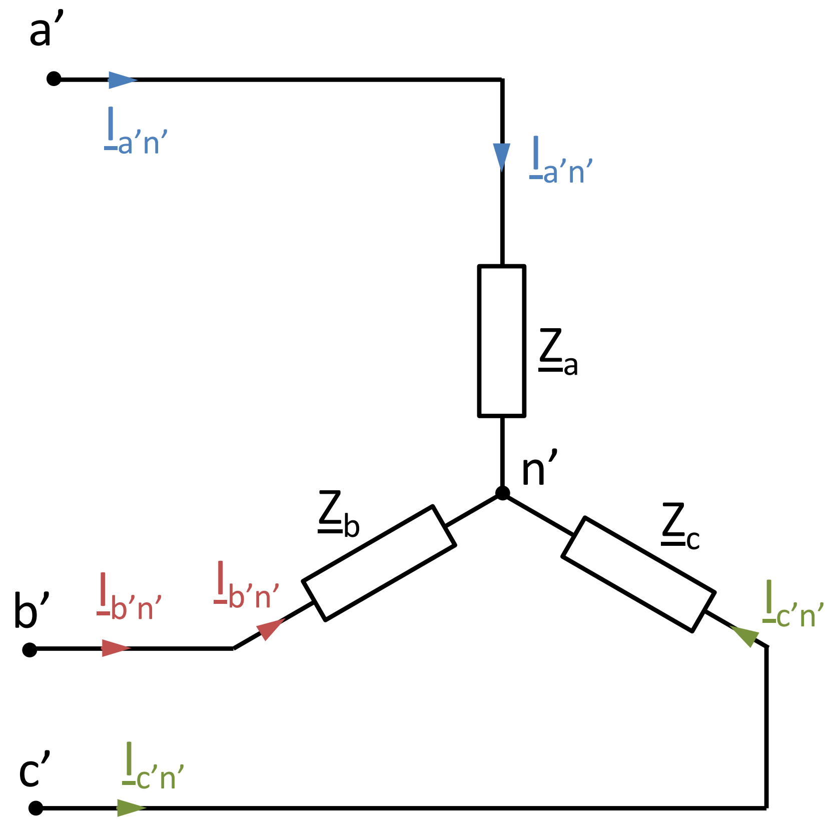




8.5. Tensiones e intensidades



En una conexión en triángulo, las tensiones de línea coinciden con las tensiones de fase.



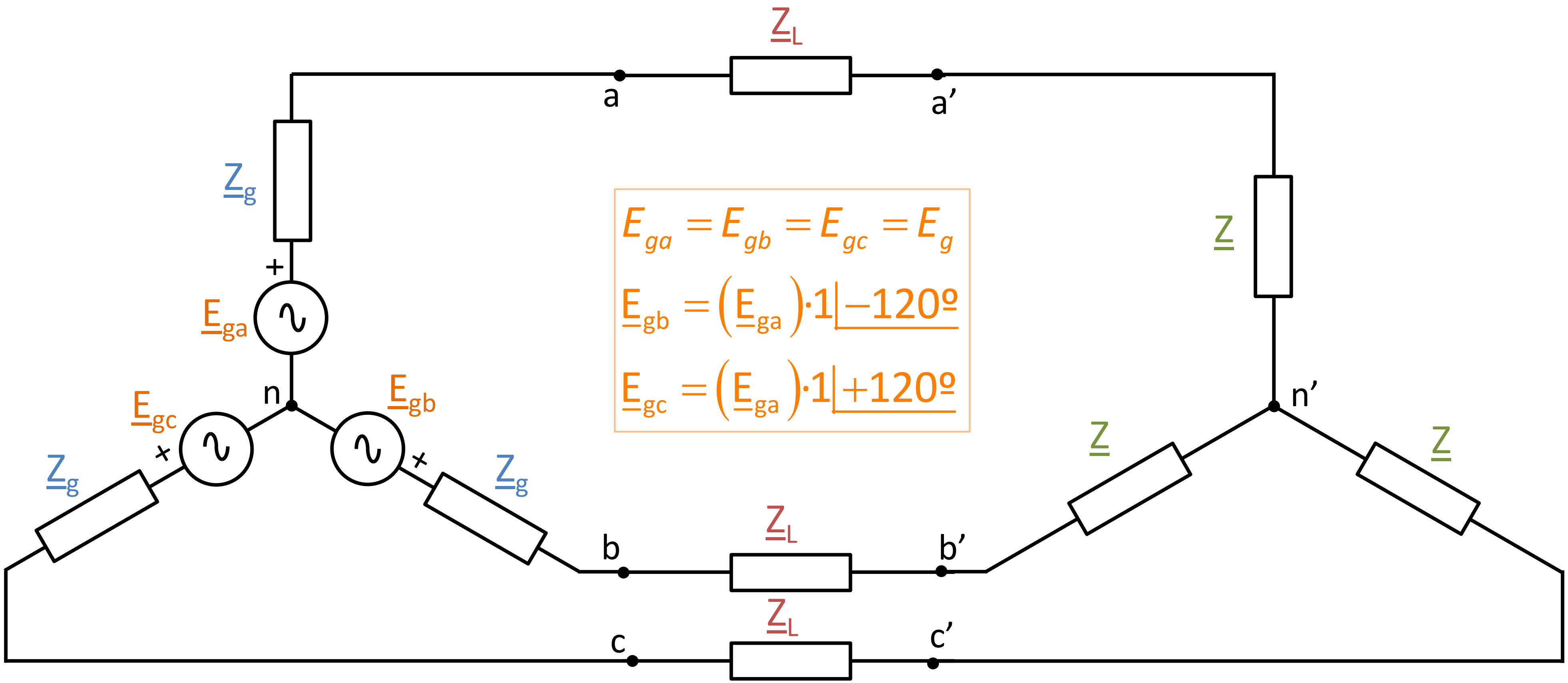
En una conexión en estrella, las intensidades de línea coinciden con las intensidades de fase.

8.6. Sistemas trifásicos equilibrados

8.6. *Sistemas trifásicos equilibrados*

- *Sistema equilibrado: Cuando son iguales las impedancias en cada de las fases que componen las cargas, son iguales las impedancias internas de las fuentes que representan cada fase de la generación y son iguales las impedancias de las tres líneas que unen generación y carga, y las fuentes de tensión que representan la generación tienen el mismo valor eficaz y están defasadas 120º.*

Ejemplo de sistema equilibrado



$$E_{ga} = E_{gb} = E_{gc} = E_g$$

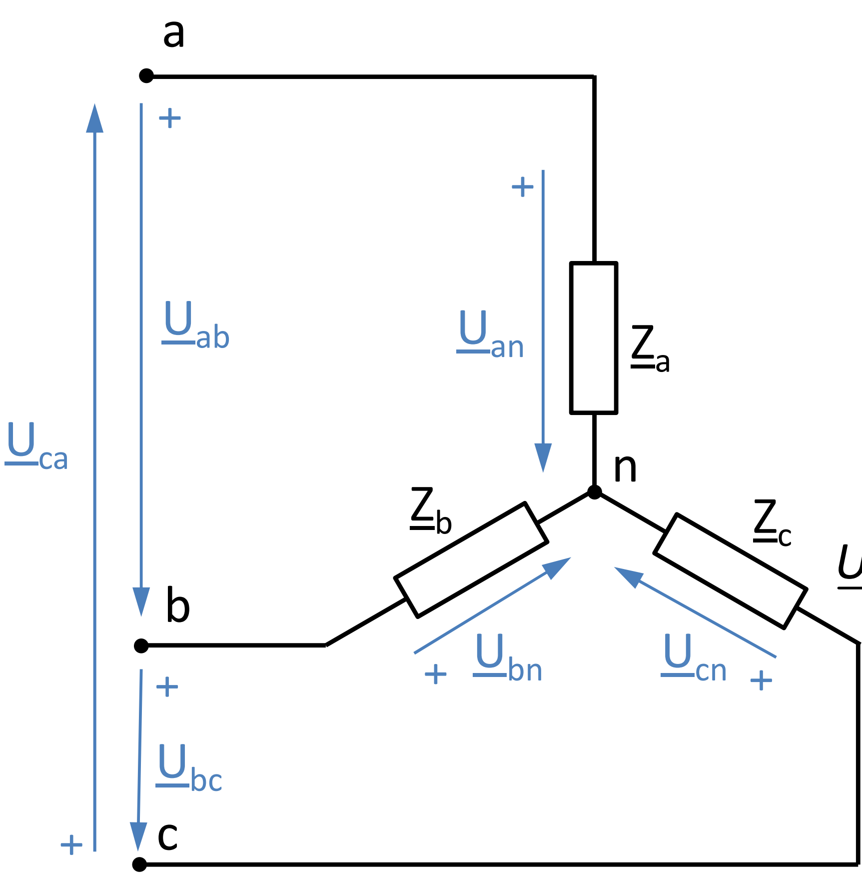
$$\underline{E}_{gb} = \left(\underline{E}_{ga}\right)\cdot 1\underline{\left|-120º\right.}$$

$$\underline{E}_{gc} = \left(\underline{E}_{ga}\right)\cdot 1\underline{\left|+120º\right.}$$

8.6.1. Relación entre magnitudes de línea y de fase

PRAUZ 449 (2021/22)

- *Relación entre tensiones de línea y tensiones de fase*



Secuencia directa

Suponiendo sist. eq. secuencia directa:

$\underline{U}_{an} = U_F \angle 0º$ ← origen de fases

$\underline{U}_{bn} = U_F \angle -120º$

$\underline{U}_{cn} = U_F \angle +120º$

Por LKT:
$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{an} - \underline{U}_{bn}$$
$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{bn} - \underline{U}_{cn}$$
$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{cn} - \underline{U}_{an}$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{an} - \underline{U}_{bn} = U_F \left(1\angle 0º - 1\angle -120º\right) = \sqrt{3} \cdot U_F \left(1\angle 30º\right)$$

Esto es: Si $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_L$

$U_{ab} = U_L = \sqrt{3} \cdot U_F$

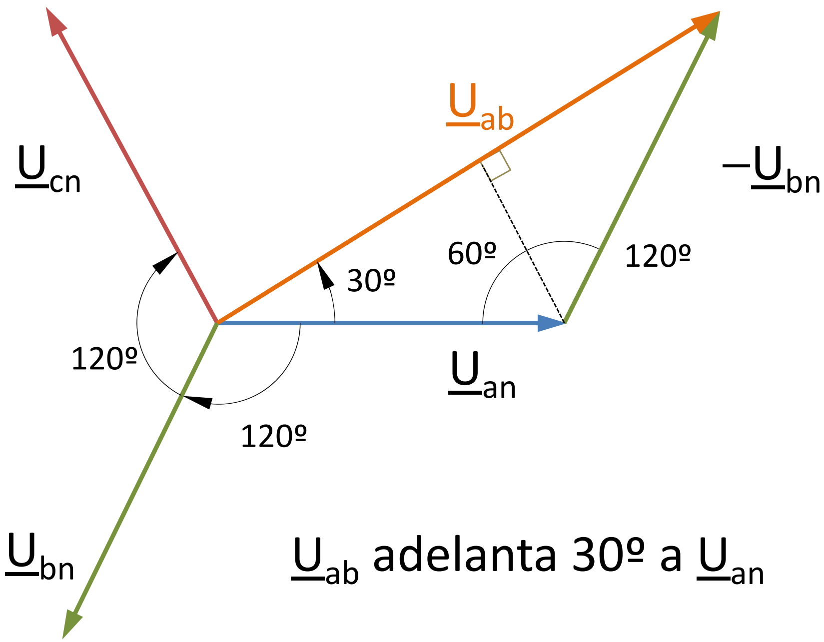
Las tensiones de línea adelantan 30 º

a las tensiones de fase correspondientes

8.6.1. Relación entre magnitudes de línea y de fase

Secuencia directa: $\underline{U}_{an}$, $\underline{U}_{bn}$, $\underline{U}_{cn}$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{an} - \underline{U}_{bn}$$



$\underline{U}_{ab}$ adelanta 30º a $\underline{U}_{an}$

Comprobar que:
$\underline{U}_{bc}$ adelanta 30º a $\underline{U}_{bn}$
$\underline{U}_{ca}$ adelanta 30º a $\underline{U}_{cn}$

En triángulo, las tensiones de línea coinciden con las tensiones de fase

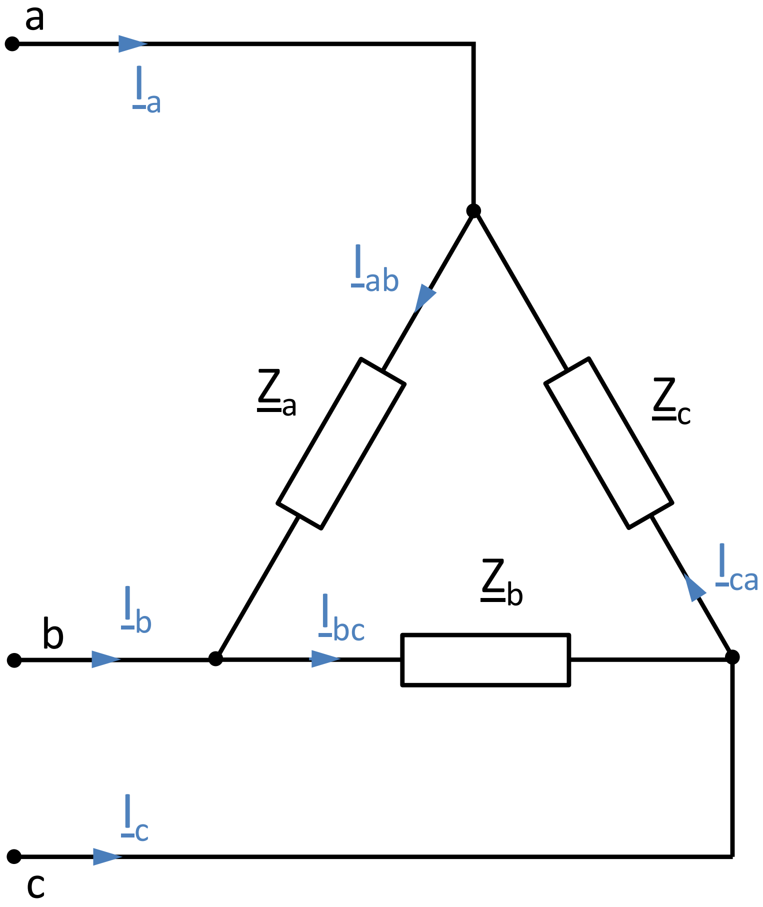
Comprobar que en sist. trifásicos equilibrados de secuencia inversa:

$$\boxed{U_{ab} = U_L = \sqrt{3} \cdot U_F}$$

Las tensiones de línea retrasan 30º respecto de las tensiones de fase correspondientes.

8.6.1. Relación entre magnitudes de línea y de fase

- *Relación entre intensidades de línea e intens. de fase*



Suponiendo sist. eq. secuencia directa:

$\underline{I}_{ab} = I_F \angle 0º$ ← origen de fases

$\underline{I}_{bc} = I_F \angle -120º$

$\underline{I}_{ca} = I_F \angle +120º$

Por 1ª LK:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$$
$$\underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$$
$$\underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = I_F\left(1\angle 0º - 1\angle 120º\right) = \sqrt{3}\cdot I_F\left(1\angle -30º\right)$$

Esto es: Si $I_a = I_b = I_c = I_L$

Secuencia directa

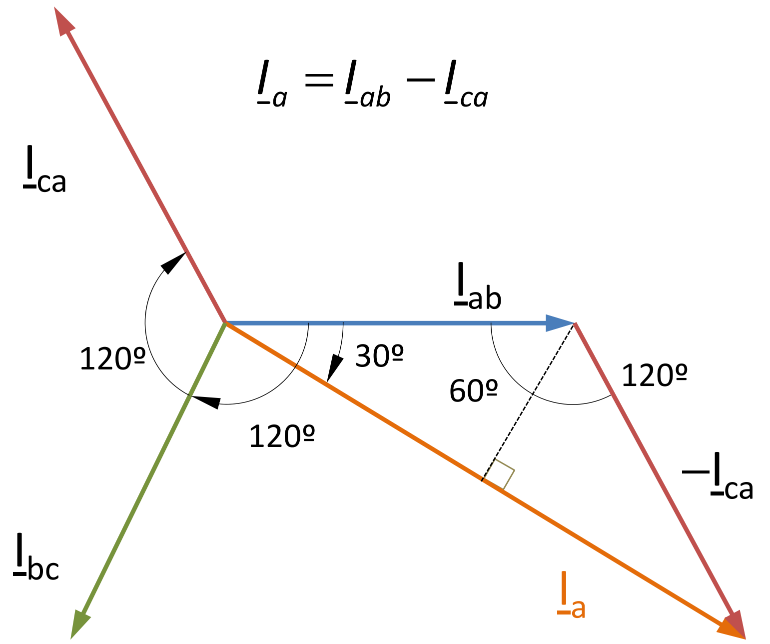
$I_a = I_L = \sqrt{3}\cdot I_F$

Las intensidades de línea restrasan 30 º a las intensidades de fase correspondientes

8.6.1. Relación entre magnitudes de línea y de fase

Secuencia directa: $\underline{I}_{ab}$, $\underline{I}_{bc}$, $\underline{I}_{ca}$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$$



$\underline{I}_a$ retrasa 30º a $\underline{I}_{ab}$

Comprobar que:

$\underline{I}_b$ retrasa 30º a $\underline{I}_{bc}$

$\underline{I}_c$ adelanta 30º a $\underline{I}_{ca}$

En estrella, las intensidades de línea coinciden con las intensidades de fase

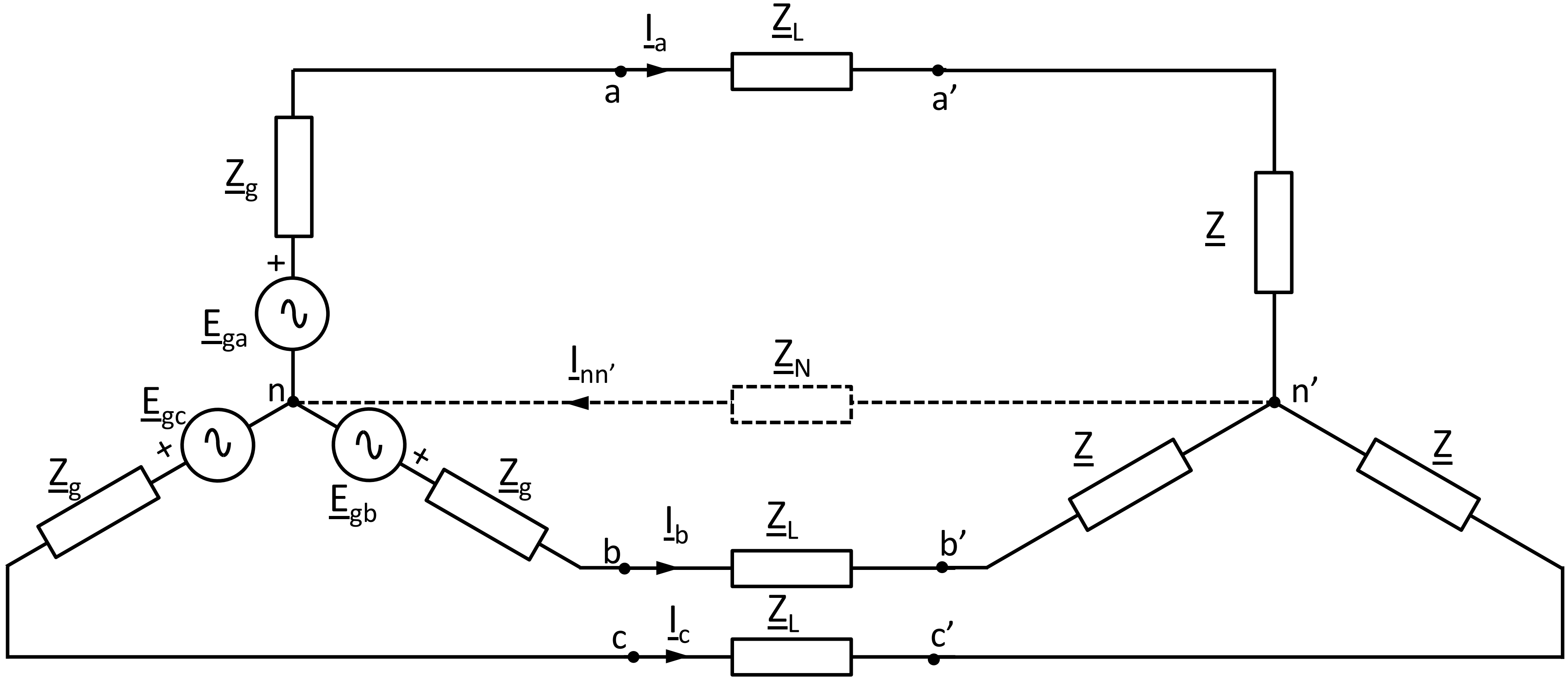
Comprobar que en sist. trifásicos equilibrados de secuencia inversa:

$$\boxed{I_a = I_L = \sqrt{3} \cdot I_F}$$

Las intensidades de línea adelantan 30º respecto de las intensidades de fase correspondientes.

8.6.2. Equivalentes monofásicos

- *Equivalente Y-Y*



8.6.2. Equivalentes monofásicos

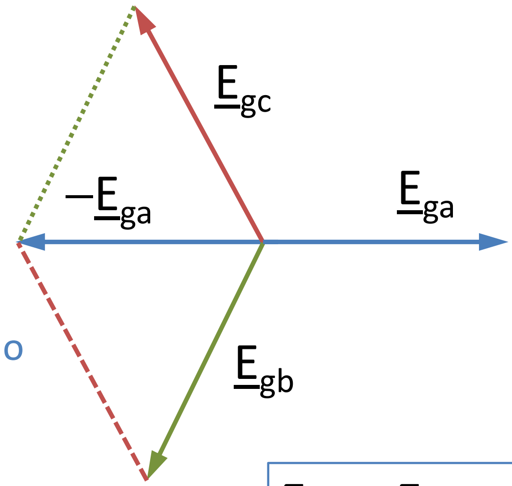
$$\underline{E}_{ga} = \underline{Z}_g \cdot \underline{I}_a + \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_a + \underline{Z} \cdot \underline{I}_a + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'} = \left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)\underline{I}_a + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'}$$

$$\underline{E}_{gb} = \underline{Z}_g \cdot \underline{I}_b + \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_b + \underline{Z} \cdot \underline{I}_b + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'} = \left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)\underline{I}_b + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'}$$

$$\underline{E}_{gc} = \underline{Z}_g \cdot \underline{I}_c + \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_c + \underline{Z} \cdot \underline{I}_c + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'} = \left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)\underline{I}_c + \underline{Z}_N \underline{I}_{nn'}$$

Sumando

$$\underbrace{\underline{E}_{ga} + \underline{E}_{gb} + \underline{E}_{gc}}_{=0} = \left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)\left(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c\right) + 3\underline{Z}_N \underline{I}_{nn'}$$



$$\boxed{\underline{E}_{ga} + \underline{E}_{gb} + \underline{E}_{gc} = 0}$$

Como: $\underline{I}_{nn'} = \left(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c\right)$

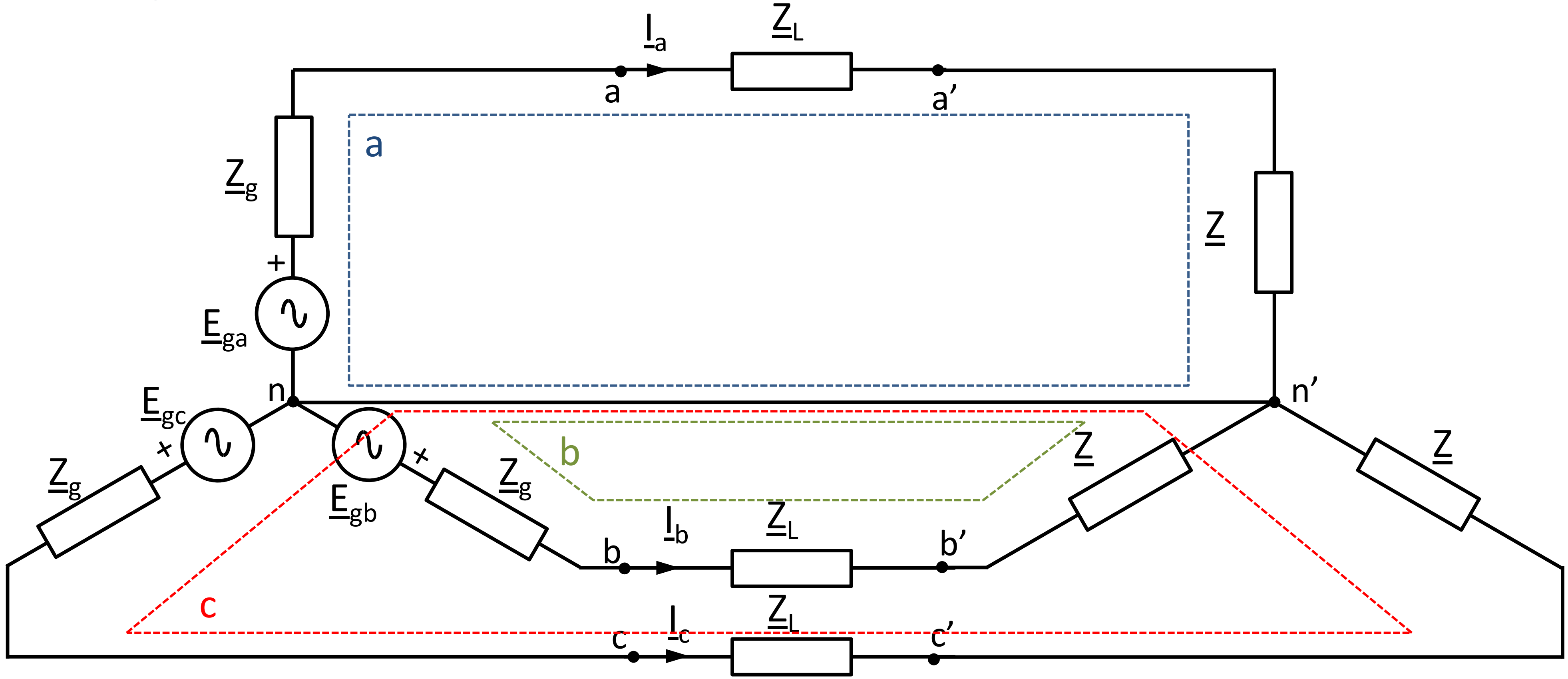
$$\left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z} + 3\underline{Z}_N\right)\left(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c\right) = 0 \;\Rightarrow\; \left(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c\right) = 0 \;\Rightarrow\; \underline{I}_{nn'} = 0 \;\Rightarrow\; \underline{U}_{nn'} = 0$$

Esto es: En un sistema trifásico equilibrado Y-Y, los neutros de las estrellas siempre están a la misma tensión.

Si esto es así, podemos unir dichos neutros mediante un cortocircuito, tal y como se ve en el esquema siguiente:

8.6.2. Equivalentes monofásicos

- *Equivalente Y-Y*

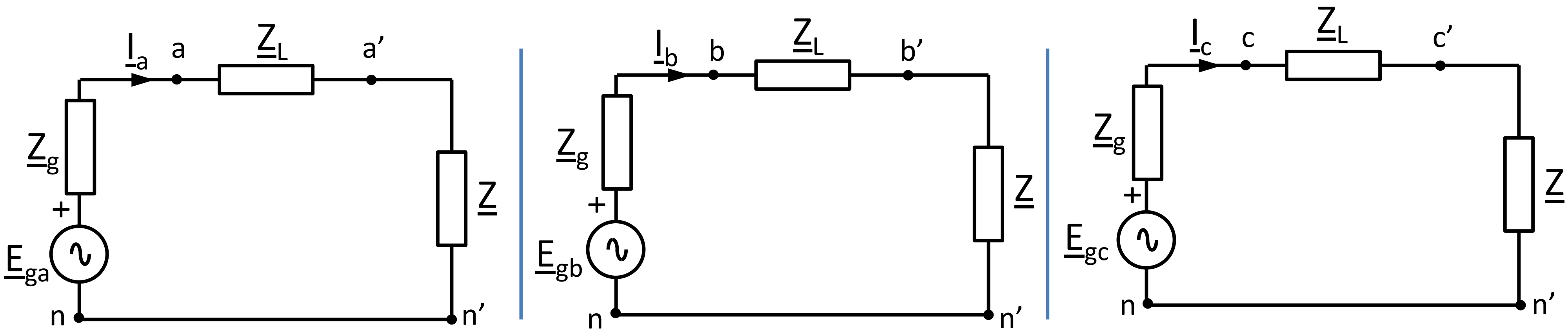


Aplicando la 2ªLK a las trayectorias indicadas en la figura, se tiene que:

8.6.2. Equivalentes monofásicos

a $\underline{I}_a = \dfrac{\underline{E}_{ga}}{\left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)}$ b $\underline{I}_b = \dfrac{\underline{E}_{gb}}{\left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)}$ c $\underline{I}_c = \dfrac{\underline{E}_{gc}}{\left(\underline{Z}_g + \underline{Z}_L + \underline{Z}\right)}$

Intensidades que también se obtienen si se analizan los tres circuitos monofásicos:

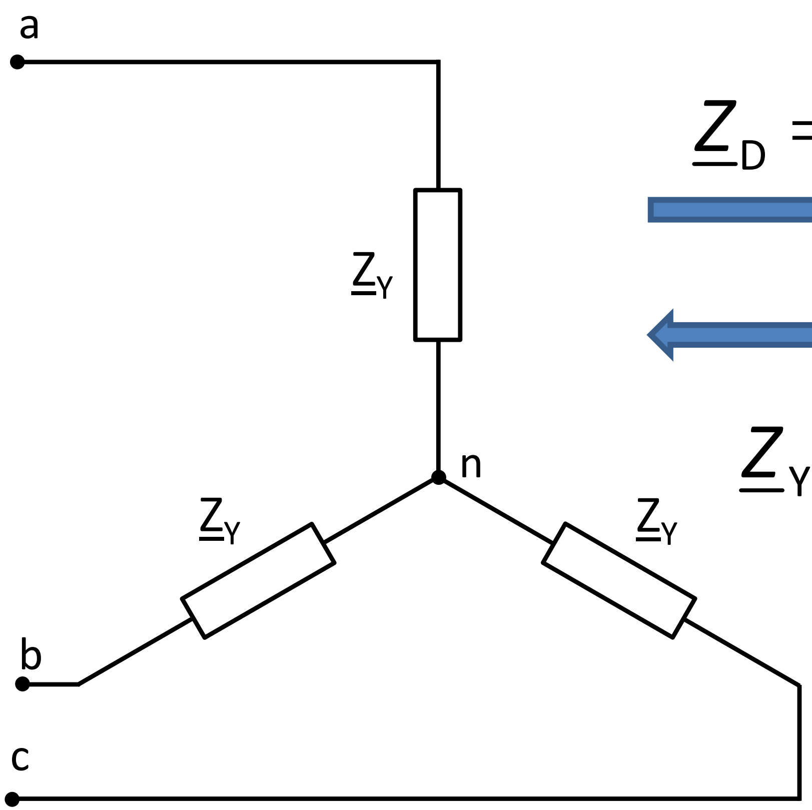


Equivalentes monofásicos de un sistema Y-Y

Basta con analizar uno los equivalentes para obtener las tensiones e intensidades para el resto de las fases. Sólo habrá que tener en cuenta que estas tensiones e intensidades serán fasores desfasados 120º respecto de las calculadas sobre el equivalente elegido.

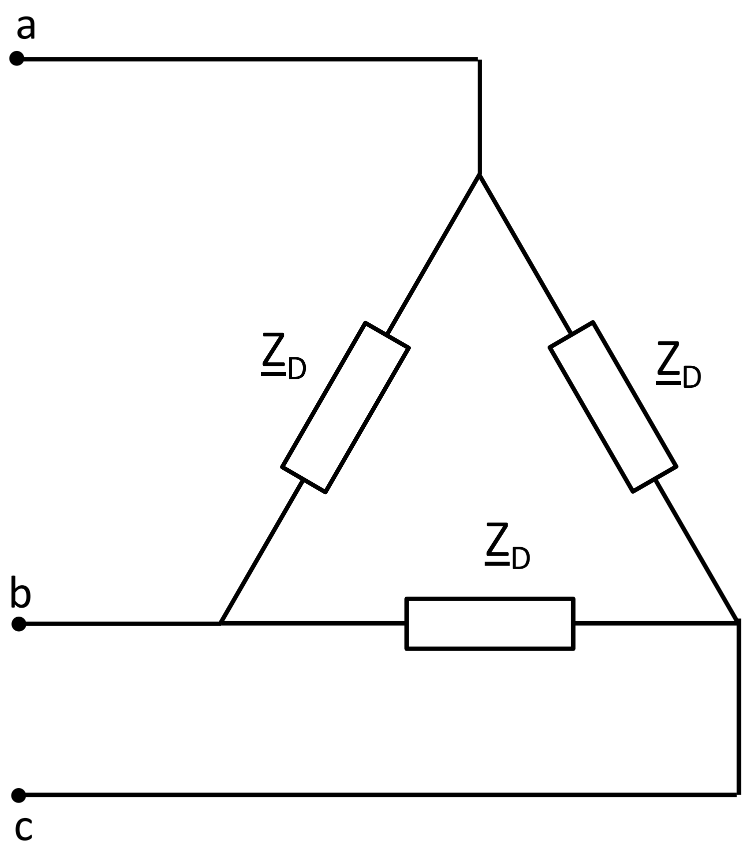
8.6.3. Equivalencia de cargas

- *Equivalencia estrella-triángulo*



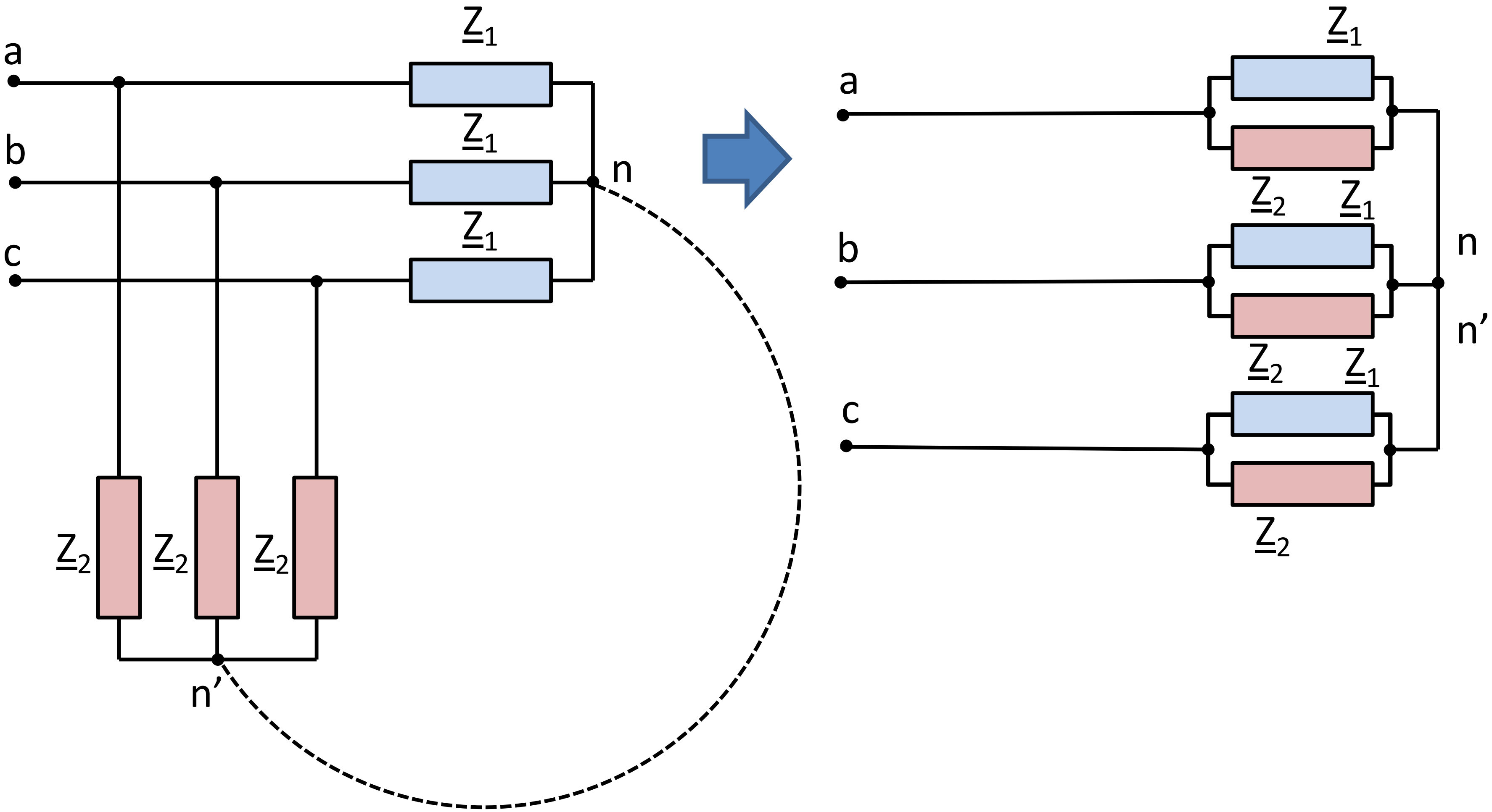
$$\underline{Z}_D = 3\underline{Z}_Y$$

$$\underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_D}{3}$$



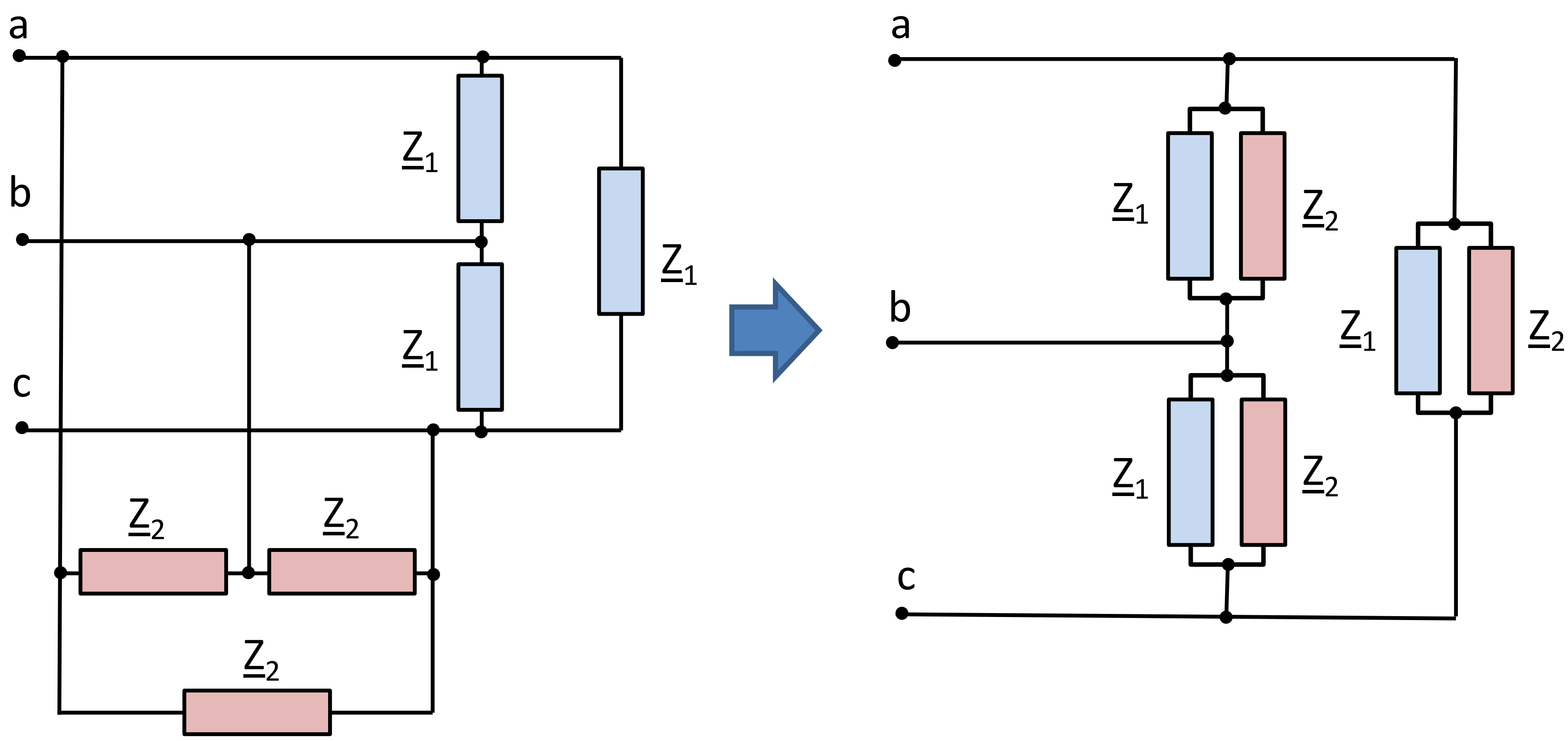
8.6.3. Equivalencia de cargas

- *Cargas en estrella en paralelo*



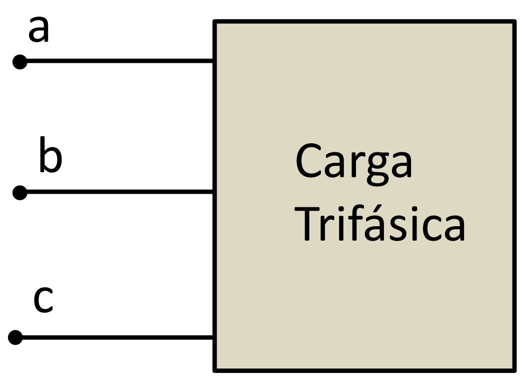
8.6.3. Equivalencia de cargas

- *Cargas en triángulo en paralelo*



8.6.4. Potencia en sistemas trifásicos equilibrados

- *Sea un sistema trifásico equilibrado:*



  - La potencia activa absorbida por una fase vale:

$$P_F = U_F \cdot I_F \cos\varphi$$

  - Como el sistema es equilibrado, la potencia absorbida por las 3 fases vale:

$$P_T = 3P_F = 3U_F \cdot I_F \cos\varphi$$

8.6.4. Potencia en sistemas trifásicos equilibrados

– Dado que en una carga conectada en estrella se cumple:

$$U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_L = I_F$$

– Y si la carga está conectada en triángulo se cumple:

$$U_F = U_L$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

– Entonces, en ambos casos:

$$U_F \cdot I_F = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L \cdot I_L$$

8.6.4. Potencia en sistemas trifásicos equilibrados

– Y entonces se tiene:

$$P_T = \sqrt{3}\, U_L I_L \cos\varphi$$

$$Q_T = \sqrt{3}\, U_L I_L \operatorname{sen}\varphi$$

– ***En los sistemas trifásicos, si se habla de tensión o intensidad y no se indica nada más, se hace referencia, de forma implícita, a magnitudes de línea.*** Entonces:

$$P_T = \sqrt{3}\, U I \cos\varphi$$

$$Q_T = \sqrt{3}\, U I \operatorname{sen}\varphi$$

– Atención: U e I son magnitudes de línea, pero:

$$\varphi = \widehat{U_F, I_F}$$

8.6.4. Potencia en sistemas trifásicos equilibrados

– Dado que la potencia compleja vale:

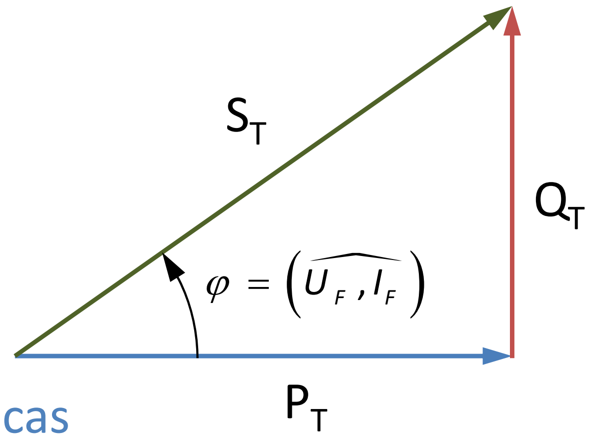
$$\underline{S}_T = P_T + jQ_T$$

– Entonces:

$$\underline{S}_T = P_T + jQ_T = \sqrt{3}\,U\,I\left(\cos\varphi + j\operatorname{sen}\varphi\right)$$

– Por lo que la potencia aparente trifásica vale:

$$S_T = \sqrt{3}\,U\,I$$



Triángulo de potencias trifásicas

Referencias

- *PARRA, V. M.; ORTEGA, J.; PASTOR, A.; PEREZ, A.:* ***"Teoría de Circuitos (Tomo I)"****. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).*
- *BAYOD, A.A.; BERNAL, J.L.; DOMINGUEZ, J.A.; GARCIA GARCIA, M.A.; LLOMBART, A.; YUSTA, J.M.:* ***"Análisis de circuitos eléctricos I".*** *Colección Textos Docentes, vol. 58. Prensas Universitarias de Zaragoza.*
- *SALLÁN, J.:* ***"Sistemas trifásicos"****. Dpto. Ingeniería Eléctrica. Universidad de Zaragoza.*
- *BAYOD, A.A.:* ***"Análisis de circuitos trifásicos en régimen estacionario senoidal".*** *Colección Textos Docentes, vol. 108. Prensas Universitarias de Zaragoza.*