SISTEMA TRIFÁSICO

Definición: Diremos que un sistema trifásico de fuentes sinusoidales de igual frecuencia, es equilibrado si la suma de los fasores asociados a cada fuente es nula. Diremos también que es perfecto si todas las señales tienen la misma amplitud y las diferencia de fase entre dos cualesquiera de las fuentes es 120°.

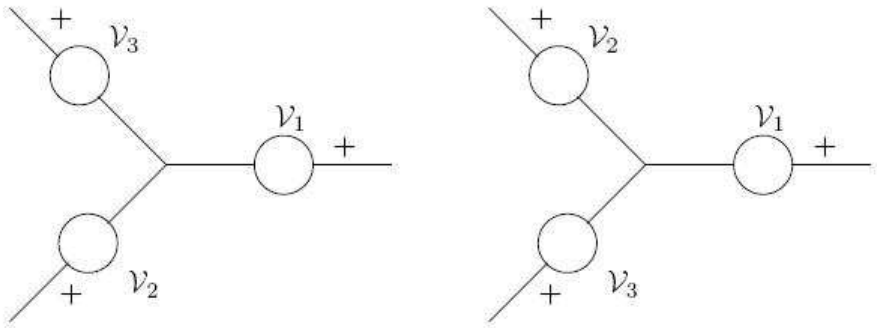


Figura 1: Sistemas trifásicos: secuencia positiva (izq); secuencia negativa (der).

A los cables que conectan el sistema de fuentes con las cargas los denominaremos líneas y a cada una de las cargas las llamaremos fases.

Consideremos un sistema trifásico de fuentes de fasores V_1, V_2 y V_3 en estrella y cargas Z_1, Z_2 y Z_3, que asumimos que forman una estrella o un triángulo. Llamaremos tensión de línea o tensión compuesta ($U_{i\,i+1}$) a la diferencia de potencial entre dos líneas consecutivas:
$U_{i\,i+1} = V_i - V_{i+1}$, i = 1, 2 o 3
Llamaremos tensión de fase (V'_i) a la tensión en bornes de la carga Z_i.
Llamaremos corriente de línea (I_i) a la corriente que circula la línea que sale de la fuente i y, de igual manera, llamaremos corriente de fase (I'_i) a la que circula por cada carga (desde el nodo i al i + 1 en el caso triángulo).

Las magnitudes anteriormente definidas se muestran en la figura 2 con cargas en estrella.

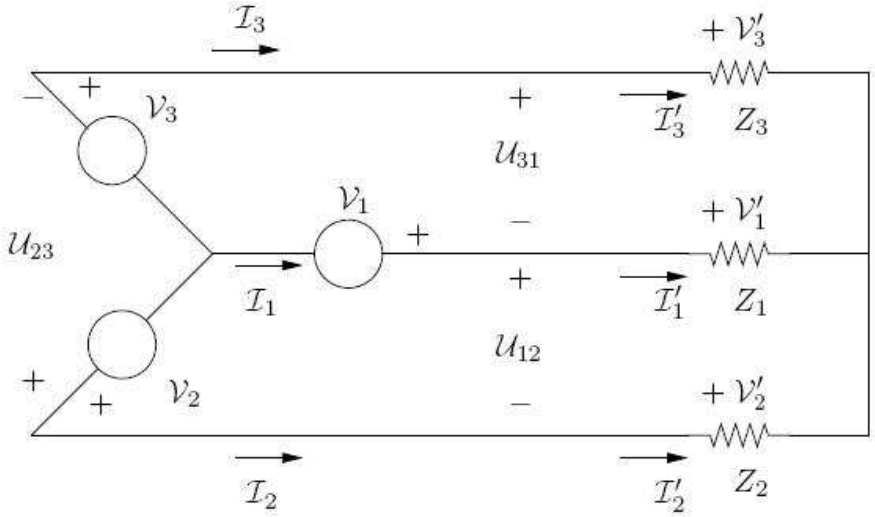


Figura 2: Tensiones y corrientes de fase y de línea.

Cargas en estrella

Consideremos en primer lugar el caso en que las cargas forman una estrella como se muestra en la figura 2.
La primera observación es que en esta configuración la corriente de línea I_i coincide con la corriente de fase I'_i, i = 1, 2 y 3. Sin embargo, esto no sucede con las tensiones compuesta y de fase. Calculemos la relación entre ambas tensiones para U_{12}, V_1 y V_2, en el caso en que las cargas son idénticas entre sí ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$). De la figura 2 surge de inmediato la identidad: $U_{12} = V_1 - V_2$

La simetría que el sistema presenta implica que V_1, V_2, V_3 tienen la misma amplitud y están equiespaciados, es decir, forman un ángulo de 120° e ntre ellos. Gráficamente tenemos la situación de la figura 3.

Los fasores V_1 y V_2 tienen el mismo módulo. Si elegimos como referencia el fasor V_1, tenemos la identidad

$$\mathcal{U}_{12} = \mathcal{V}_1 - \mathcal{V}_2 = |\mathcal{V}_1|.\left[1 - e^{-j\Phi}\right] = |\mathcal{V}_1|.\left[1 - \cos(\Phi) + j.\sin(\Phi)\right]$$

donde hemos asumido que la secuencia de tensiones es positiva. Entonces

$$|\mathcal{U}_{12}|^2 = 2|\mathcal{V}_1|^2.\left[1 - \cos(\Phi)\right]$$
$$\arg\left(\mathcal{U}_{12}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\sin(\Phi)}{1 - \cos(\Phi)}\right] \qquad \text{(I)}$$

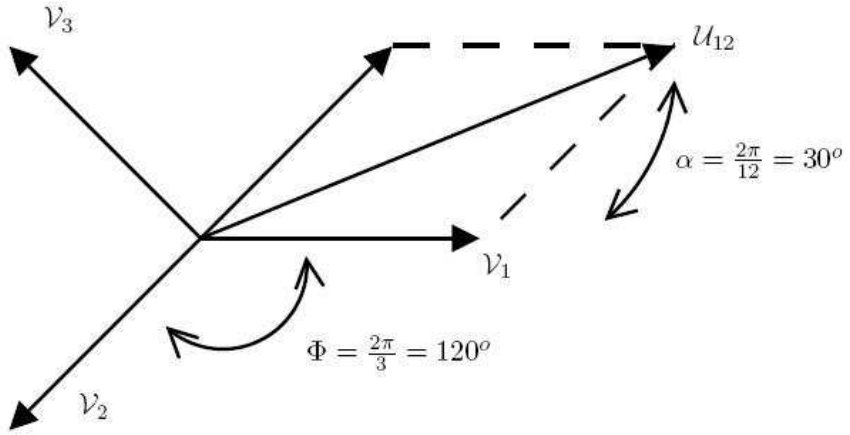


Figura 3 Relación tensión compuesta - tensión de fase para una carga en estrella.

Para el caso trifásico, tenemos que Φ = 120° y de las ecuaciones anteriores dan los siguientes valores:

$$|\mathcal{U}_{12}| = \sqrt{3}.|\mathcal{V}_1|$$

$$\arg\left(\mathcal{U}_{12}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{1 + \frac{1}{2}}\right] = \frac{1}{\sqrt{3}} \Rightarrow \arg\left(\mathcal{U}_{12}\right) = 30^o \ \ (\text{referido a } \mathcal{V}_1)$$

Si la secuencia de tensiones es negativa, entonces el ángulo obtenido cambia de signo.

Cargas en triángulo

Supongamos ahora que las cargas conforman un triángulo, como muestra la figura 4. En este caso coinciden las tensiones de línea y de fase. ¿Qué sucede con las respectivas corrientes?
Aplicando Kirchoff en cada vértice del triángulo obtenemos ecuaciones que vinculan las corrientes de línea con las de fase. Por ejemplo, $I_1 = I'_1 - I'_3$

Asumiendo que las cargas del triángulo son idénticas, nuevamente por razones de simetría concluimos que I'_1 e I'_3 coinciden en módulo y tienen un desfasaje de φ. Si intentamos calcular I_1, llegamos a un juego de ecuaciones similar al de (I) de donde las corrientes de línea son, en modulo, √3 veces mayores que las de fase, y presentan un desfasaje de 30° respecto de ellas.

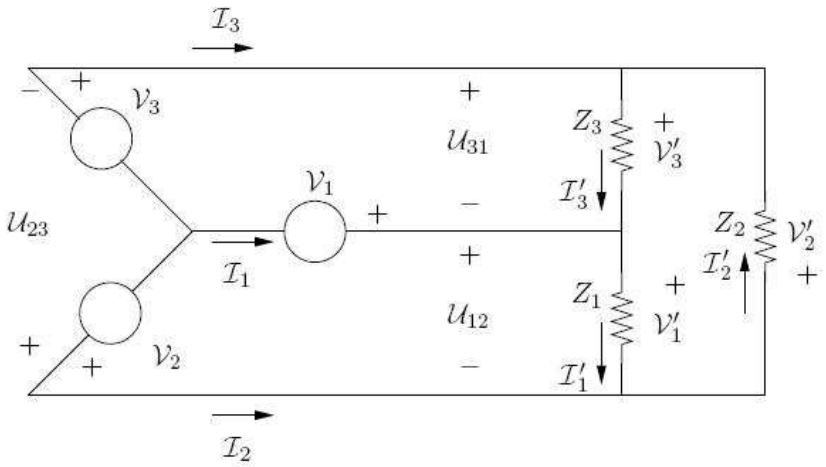


Figura 4: Cargas en triángulo.

Existencia de neutro y análisis por fase

Consideremos nuevamente el circuito de la figura 2, donde las fuentes forman un sistema equilibrado y perfecto, en estrella, y supongamos que la estrella de carga tiene impedancias idénticas. Por razones de simetría las corrientes de fase, iguales a las de línea, tienen todas el mismo módulo y están desfasadas un ángulo φ=120° entre si, por lo que su suma se anula. ¿Qué sucede si conectamos mediante un cable el centro de la estrella de fuentes con el centro de la estrella de cargas?
Nada se altera en nuestro razonamiento anterior, por lo que por este cable no circulará corriente.
Por eso nos referiremos a dicho cable como neutro. Esta situación es cierta incluso si el neutro presentara una resistencia no nula. Por lo tanto concluimos que los respectivos centros de las estrellas de fuentes y carga se encuentran al mismo potencial, ya que al conectar una impedancia entre ellos, no circula corriente por ella. La figura 5 muestra un sistema trifásico con neutro.

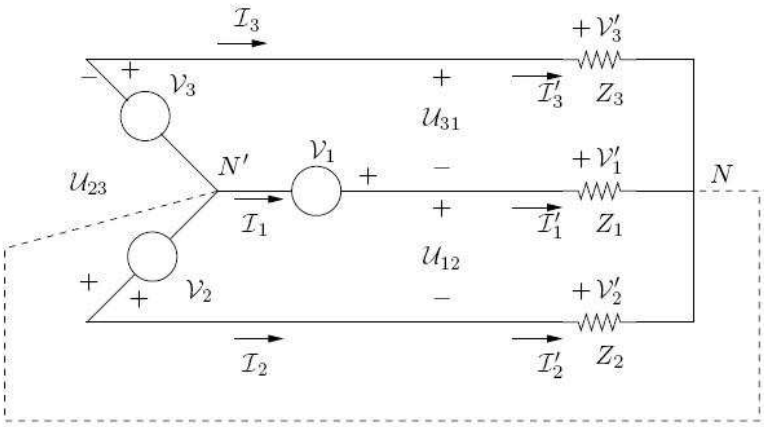


Figura 5: Conexión de neutro entre el centro de la estrella de fuentes y el de la estrella de cargas.

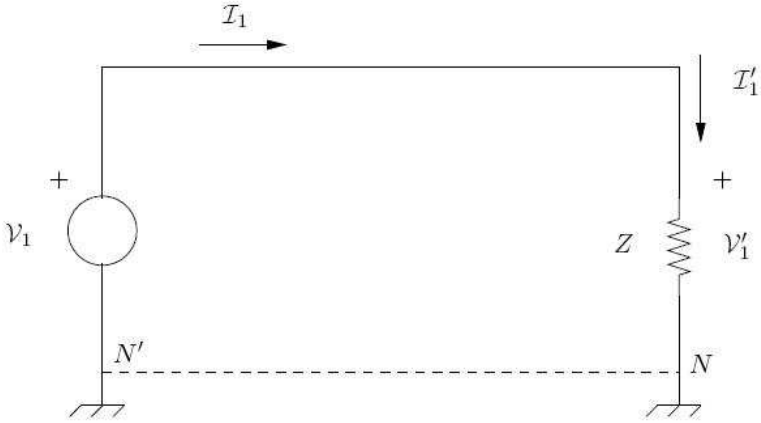
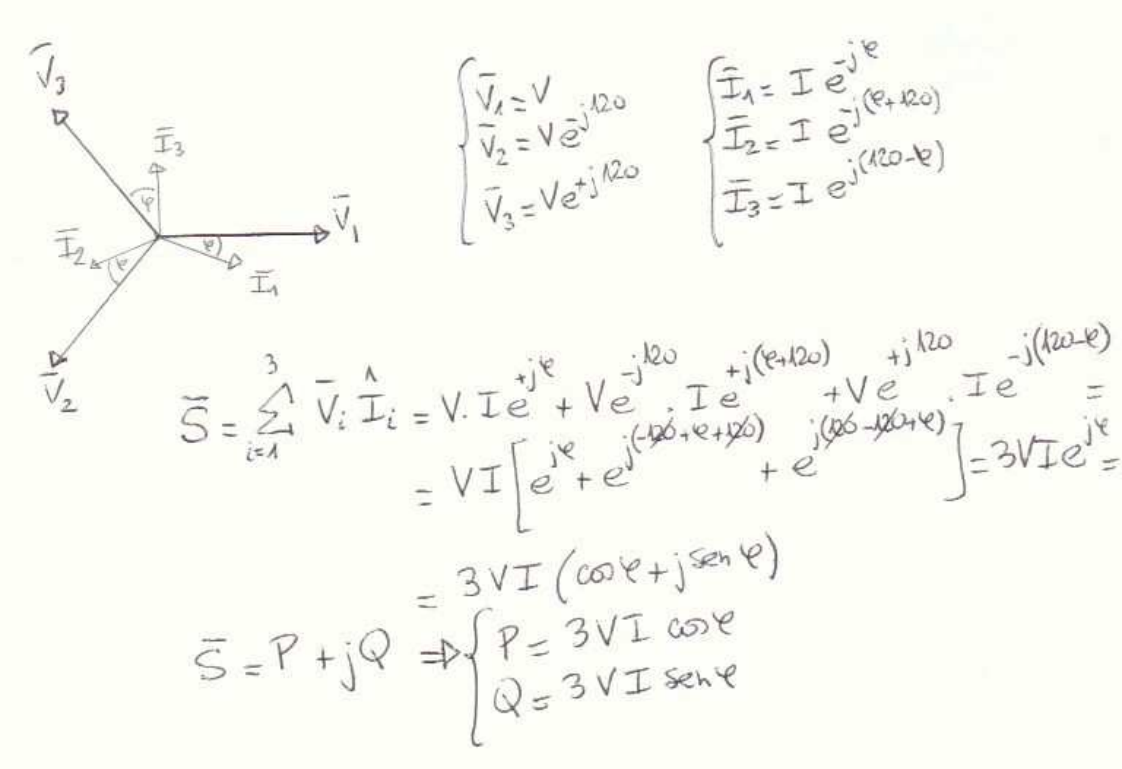


Figura 6: Equivalente monofásico.

La existencia de neutro nos permite considerar el circuito monofásico equivalente de la figura 6, cuya sencilla resolución nos permite determinar cómo es el comportamiento de

cada fase del circuito. A partir de estos datos obtenemos todas las tensiones y corrientes del circuito trifásico, teniendo en cuenta la simetría del mismo.
Destacamos que para que sea posible realizar el estudio por fase de un circuito trifásico (análisis por fase o por equivalente monofásico), las fuentes deben formar un sistema equilibrado y perfecto y las cargas deben ser idénticas y estar en estrella. Si esto no fuera así, pero existe neutro, aún es posible utilizar el análisis por fase.

Potencia en sistemas trifásicos



Si la carga está en estrella, entonces $|\mathcal{U}_{j\,j+1}| = \sqrt{3}.|\mathcal{V}'_j|$ y $|\mathcal{I}_j| = |\mathcal{I}'_j|$ para las tensiones y corrientes de línea respectivamente, de donde la potencia total vale

$$P = 3.\frac{|\mathcal{U}_{12}|}{\sqrt{3}}.|\mathcal{I}'_j|.\cos(\varphi) = \sqrt{3}.|\mathcal{U}_{12}|.|\mathcal{I}_j|.\cos(\varphi)$$

Análogamente, si la carga está en triangulo, $|\mathcal{U}_{j\,j+1}| = |\mathcal{V}'_j|$ y $|\mathcal{I}_j| = \sqrt{3}.|\mathcal{I}'_j|$ y obtenemos nuevamente la misma ecuación.