

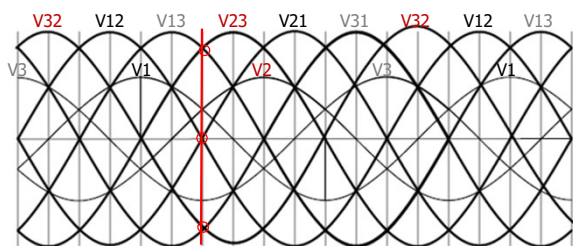
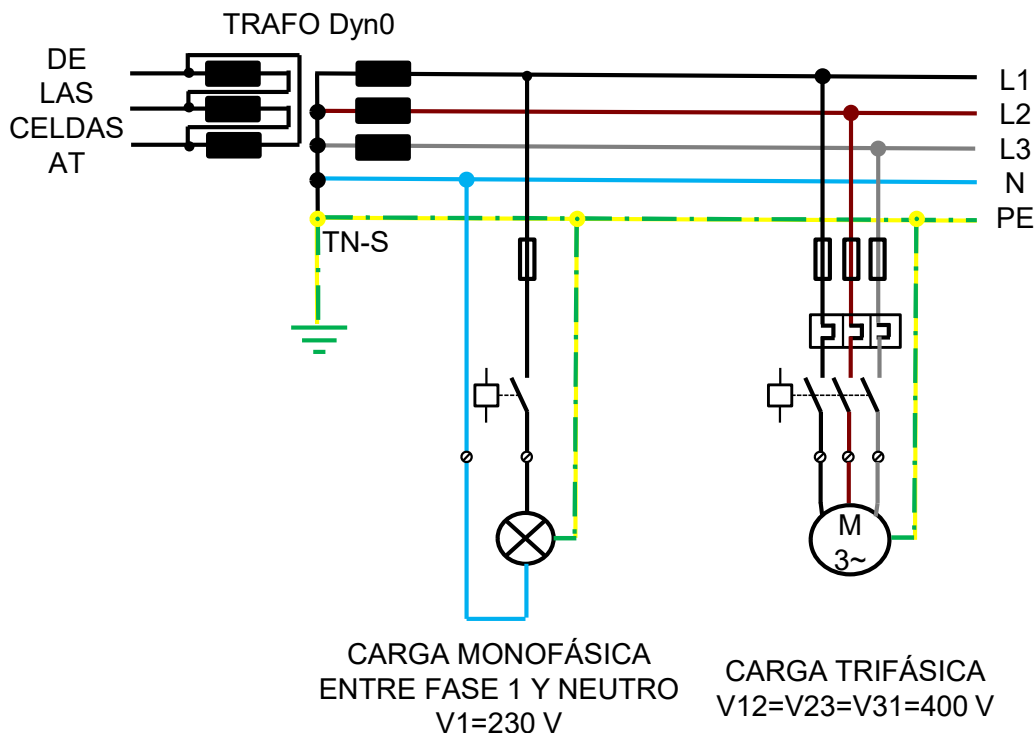
RYSEL

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

LOS CONSUMOS ALINEALES Y EL NEUTRO

2025

El neutro de un sistema trifásico ofrece muchas ventajas (la principal sería disponer en cualquier lugar de la tensión simple para alimentar cargas monofásicas) pero la presencia de consumos alineales genera algunos inconvenientes.



En un sistema de tensiones trifásicas alimentando cargas equilibradas lineales (=todas trifásicas que consuman igual por las tres fases, tengan desfase o no, pero manteniendo la misma forma senoidal que las excitó) la suma de la corriente instantánea en las tres fases siempre es **NULA** y por tanto, de haber un neutro, no habría circulación de corriente por él.

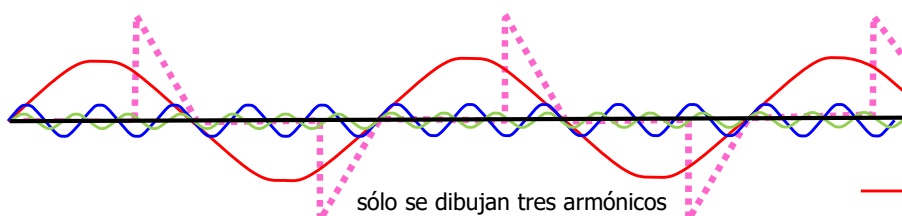
Pero si tenemos cargas monofásicas y/o trifásicas reales, que en general siempre tienen desequilibrio de consumos ya no se cumple lo mencionado respecto de la corriente del neutro.

Bueno, pues en el mundo industrial ya nos podemos olvidar de que la corriente por el neutro es nula. Por lo tanto, habrá que lidiar con el neutro y con el auge de la electrónica, con cargas alineales por todos lados.

Con las cargas monofásicas tradicionales se suele realizar un reparto entre las fases para intentar equilibrar el consumo. Veremos que ocurre cuando hay muchas cargas alineales (ya les adelanto que nada bueno...).

Por si acaso, recordarles que una carga alineal es aquella que alimentada con una tensión senoidal consume una corriente no senoidal. Hoy en día casi todas...

Recordarles también que la electrotecnia clásica "no digiere bien" las formas de onda no senoidales. La transformada armónica de Fourier permite estudiar cualquier forma de onda periódica como una suma infinita de senos y cosenos que tienen amplitud decreciente y frecuencia creciente y que llamamos "términos armónicos" de la serie.



ONDA PERIÓDICA ORIGINAL (p.ej. de 50 Hz) CON SIMETRÍA DE CUARTO DE ONDA QUE SÓLO CONTENDRÁ ARMÓNICOS IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3 (ver ste. Pág.).

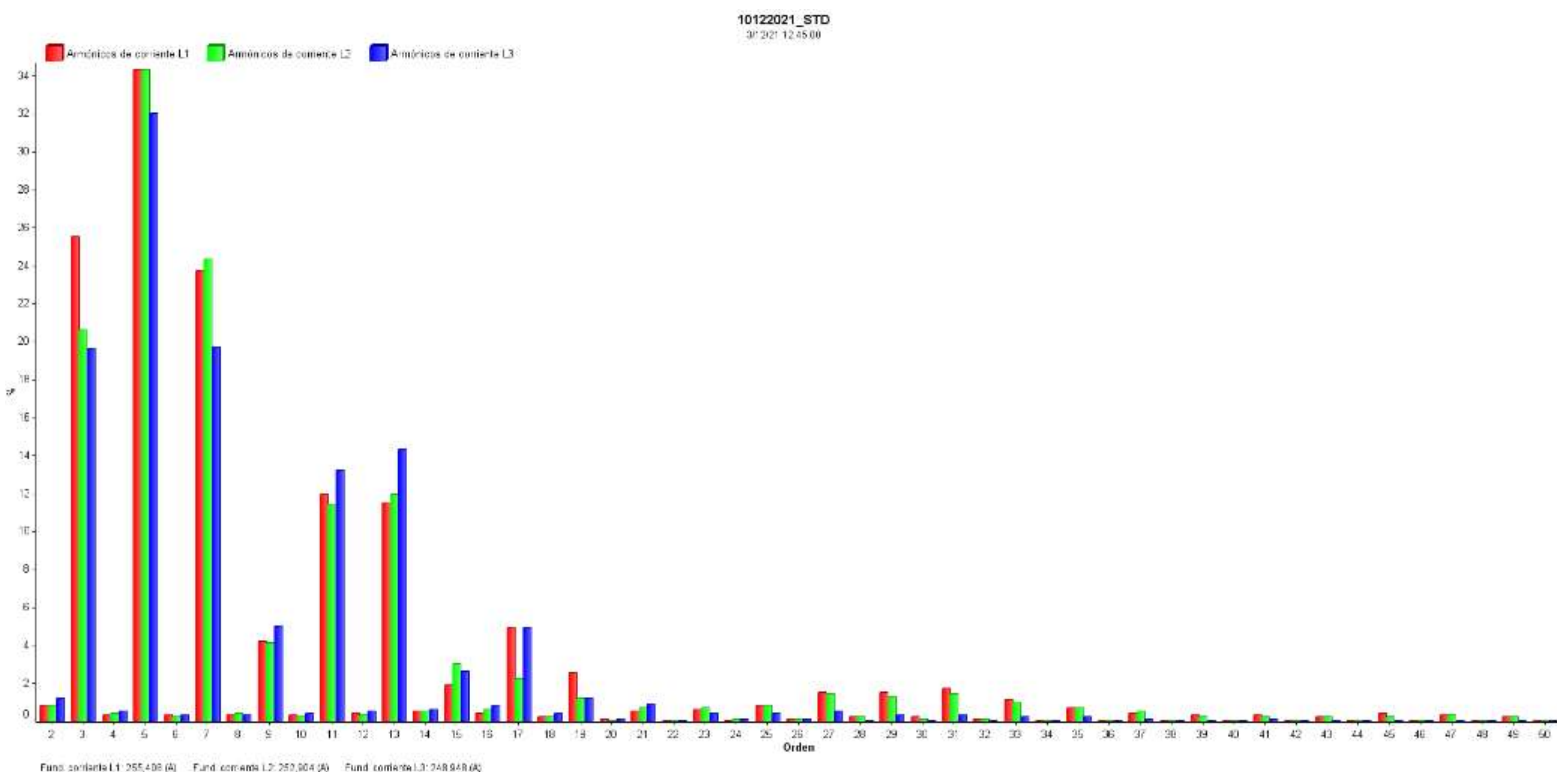
ARMÓNICO 1 (50 Hz) ARMÓNICO 3 (150 Hz) ARMÓNICO 5 (250 Hz)

sólo se dibujan tres armónicos

Así que en vez de estudiar la onda original estudiamos su equivalente armónico. No todas las formas de onda periódica de partida tienen todos los armónicos. Por ejemplo:

- Formas de onda de partida con simetría par (respecto del eje x como por ejemplo la función coseno). El equivalente armónico sólo tiene armónicos con cosenos.
 - Formas de onda de partida con simetría impar (respecto del eje y, como por ejemplo la función seno). El equivalente armónico sólo tiene armónicos con senos.
 - Formas de onda de partida con simetría de media onda (cualquier valor medio período más tarde se repite con el signo opuesto). El equivalente armónico tiene sólo armónicos con cosenos y senos impares.
 - Formas de onda de partida con simetría escondida (desplazando los ejes se convierte en una onda más fácilmente identificable como un tipo de las anteriores).
 - Formas de onda de partida con combinaciones de la anteriores:
 - Par+media onda= cuarto de onda par.
 - Impar+media onda= cuarto de onda impar.
- Estas últimas aplican lo dicho para ambos tipos de onda.

Hay un método matemático para calcular los coeficientes de la serie armónica equivalente y cuando estudiábamos en la universidad lo teníamos que saber hacer para aprobar cálculo (¡qué tiempos!). Hoy día lo normal es que el cálculo lo realice un analizador de calidad de energía, mostrándonos lo que denominamos “diagrama espectral” que no es otra cosa que la representación gráfica de las amplitudes de cada armónico presente. Por ejemplo:



En el ejemplo real se puede ver un espectro armónico de corriente de un sistema trifásico (habrá tres medidas simultáneas) en la que podemos ver la amplitud de cada armónico calculado en un momento dado (tenga en cuenta que la medida instantánea de corrientes generará un espectro armónico instantáneo equivalente). Incluso cada fase tiene una componente armónica diferente porque la forma real de consumo de cada fase es distinta a las otras.

Pueden observar como a medida que la frecuencia aumenta, la amplitud (aportación que hace el armónico al equivalente original) disminuye. En el mundo industrial y a diferencia del matemático, a partir de un cierto momento desestimamos “el resto de armónicos” porque ya no aportan gran cosa al resultado final para el trabajo práctico que supone considerarlos en una posible compensación.

En los estudios armónicos que realizamos para la industria y salvo que vamos algo anómalo, no solemos ocuparnos por encima del armónico 11 y todas las soluciones que se proponen se centran en los primeros (los de mayor amplitud).

Cuando proponemos una solución como por ejemplo, un filtro pasivo para atenuar los armónicos 3, 5 y 7, de la corriente, que son los de mayor amplitud que hemos visto en el equivalente armónico, lo que estamos haciendo en realidad es conectar algo a la red que atenúa la alinealidad del consumo de corriente en las frecuencias bajas (150, 250 y 350 Hz), atacando fundamentalmente a esos equivalentes armónicos.

Imaginen que el equivalente armónico del consumo de nuestra instalación tuviera sólo armónicos impares. Vamos a trabajar con el equivalente armónico en lugar de con la onda alineal verdadera.

$$i_{L1}(t) = I_{L11} \cdot \sin(\omega t) + I_{L13} \cdot \sin 3(\omega t) + I_{L15} \cdot \sin 5(\omega t) \dots \text{ para la fase L1}$$

$$i_{L2}(t) = I_{L21} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) + I_{L23} \cdot \sin 3(\omega t - 120^\circ) + I_{L25} \cdot \sin 5(\omega t - 120^\circ) \dots \text{ para la fase L2}$$

$$i_{L3}(t) = I_{L31} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) + I_{L33} \cdot \sin 3(\omega t - 240^\circ) + I_{L35} \cdot \sin 5(\omega t - 240^\circ) \dots \text{ para la fase L3}$$

- La corriente de neutro será la suma de las corrientes por las tres fases (aplicando nudos en el neutro del trafo).
- Ya sabemos que en las fórmulas habría que poner los ángulos en radianes, lo indico así para que se entienda mejor.
- Si consideramos que el sistema es equilibrado (para no complicarlo mucho inicialmente) los coeficientes de cada término armónico serían iguales en las tres fases ($I_{L11}=I_{L21}=I_{L31}$ y en todos los demás términos).

$$I_n(t) = i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t)$$

- Si además recordamos que $\sin(a-b) = \sin a \cdot \cos b - \cos a \cdot \sin b$ y tenemos paciencia para desarrollar toda la fórmula anterior podríamos llegar a que:

$$I_n(t) = \sum I_{6k+3} \cdot \sin(6k+3)\omega t \text{ con } k=0, 1, 2, \dots, \infty$$

- Recordemos el concepto de valor eficaz (o valor cuadrático medio) de una corriente variable senoidal: correspondería al valor de una corriente continua que generaría la misma potencia disipada sobre una resistencia.

Si $i(t) = I_o \sin \omega t$ entonces $I = \sqrt{[(1/T) \cdot \int i^2(t) dt]}$ y que sería $I = I_o / \sqrt{2}$ para esa forma de onda

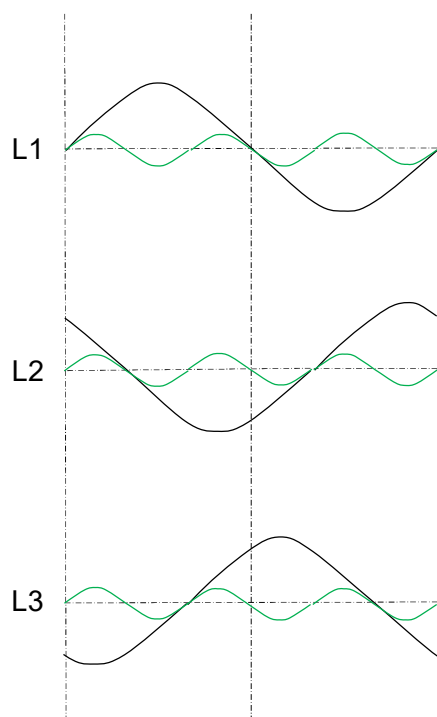
- ¿Cuál sería entonces la relación entre los valores eficaces de la corriente de neutro y la de fase en nuestro caso, desde el punto de vista del equivalente armónico?. Si recordamos la integral del seno al cuadrado:

$$\int \sin^2 x dx = (1/2) \cdot (x - 1/\sin 2x) + cte$$

$$I_N/I_F = [\sqrt{\sum (3I_{6k+3})^2}] / [\sqrt{\sum (3I_{6k+1})^2 + (3I_{6k+3})^2 + (3I_{6k+5})^2 + \dots}] \text{ con } k=0, 1, 2, \dots, \infty$$

De donde se deduce que habrá más corriente de neutro con respecto de fase cuando haya más armónico 3 (bueno, y cuando haya menos de los demás, pero ya hemos focalizado el problema con el neutro y el armónico 2 (el de 150 Hz).

Y ¿qué equipos generan mucho armónico tres?. Pues ya se pueden imaginar... Por la forma de onda de consumo de corriente que generan, los rectificadores monofásicos no controlados (de diodos) generan mucho armónico impar. Y este tipo de equipos están por todos lados.



EXPLICADO DE OTRA MANERA

En las gráficas de la izquierda se dibuja el primer armónico (negro) y el tercero (verde) de un hipotético sistema trifásico equilibrado con neutro.

¿Ve que el tercer armónico está en fase en L1, L2 y L3?. Pues en el neutro se suman...

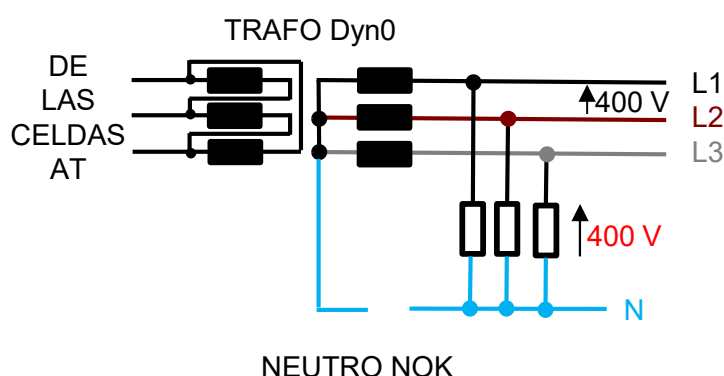
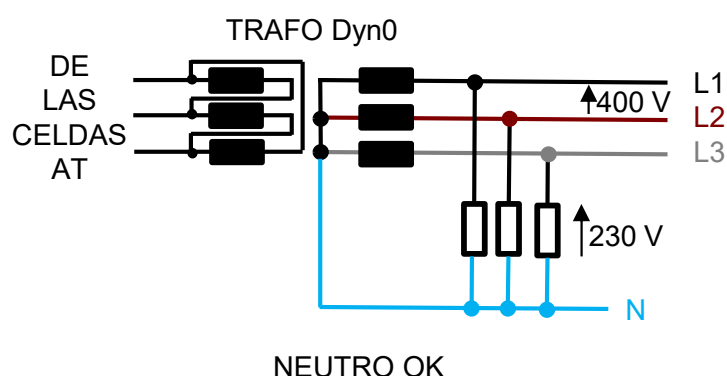
La transformada de Fourier nos confirma (no podría ser de otro modo) que cuando la onda original es alineal y su equivalente matemático contiene este armónico, algo malo puede pasar con el neutro.

Si adicionalmente el sistema es desequilibrado (la realidad) todo se complica aún más. El grado de desequilibrio también afecta al contenido armónico.

Con un registrador de calidad de la energía se puede constatar la presencia de este fenómeno (digo siempre que es como con la tensión y el colesterol, siempre lo hay) pero ¿Qué consecuencias puede acarrear?.

- Si la instalación ha evolucionado desde hace años y se han incorporado consumidores alineales, podría suceder que la sección original del neutro sea insuficiente en este nuevo escenario. Hoy día se especifica igual sección que en las fases.
- Para empeorar las cosas, cuando la forma de onda es alineal, puede perderse sección efectiva debido a la tendencia de la corriente a circular por la superficie libre de los conductores (efecto skin).

- Por las razones mencionadas, un interruptor automático de 4 polos en la cabecera de la instalación podría disparar si que se observara un consumo justificado por las fases.
- Si como consecuencia de lo anterior se corta el neutro, tendremos sobretensiones en las cargas monofásicas.



SOLUCIONES:

- Interesa balancear las cargas monofásicas. Si se tiene una fuente poco cargada en una fase y otras más cargadas en las demás, perjudicará el régimen de neutro.
- Mejorar la instalación compensando las cargas alineales, evitará deformaciones en la tensión del trafo (THDv alto) que, de existir, generaría corrientes alineales hasta cuando se alimentaran cargas lineales.
- Homogeneizar la instalación de consumidores monofásicos (en lo posible) sobre todo a nivel de diseño, utilizando productos iguales (por ejemplo, el mismo modelo de fuente de alimentación o de variador) y realizando acometidas de alimentación lo más iguales posible, mejorarán la situación que nos ocupa.
- Hay equipos que pueden compensarse localmente mediante la instalación de reactancias de entrada opcionales (o que las incorporen de serie). Esto es típico con los variadores de velocidad electrónicos y con algunas fuentes conmutadas.

NECESIDAD DE MEDIR: para saber a lo que se enfrenta y darle solución deberá tomar mediciones.



BIBLIOGRAFIA:

- Apuntes de la carrera de Ingeniería técnica industrial (EUITI Gijón).
- Parámetros que afectan a la corriente del neutro en presencia de armónicos (Juan A. Suárez, Guillermo F. di Mauro, Daniel O. Anaut, Carlos Agüero) Universidad Nacional de Mar Del Plata.
- Guía de armónicos con accionamientos de CA (ABB).