

2. INTRODUCCIÓN A LOS ARMÓNICOS

2.1 Las ondas periódicas

Una onda periódica puede expresarse como la suma de ondas sinusoidales o armónicas,¹⁰ las cuales pulsán con una frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental o propia de la onda original.

El método que permite efectuar esta descomposición es denominado *desarrollo de Fourier* en honor a su creador, Jean Baptiste Fourier, quien en 1822 publicó su método de cálculo originalmente aplicado a la transmisión del calor (anexo A2.1).

Los armónicos o armónicas son un concepto puramente matemático sin entidad física, es decir, un artificio matemático,¹¹ eso sí enormemente útil, gracias al cual las ondas distorsionadas periódicas pueden analizarse utilizando las conocidas herramientas de la técnica de c.a.

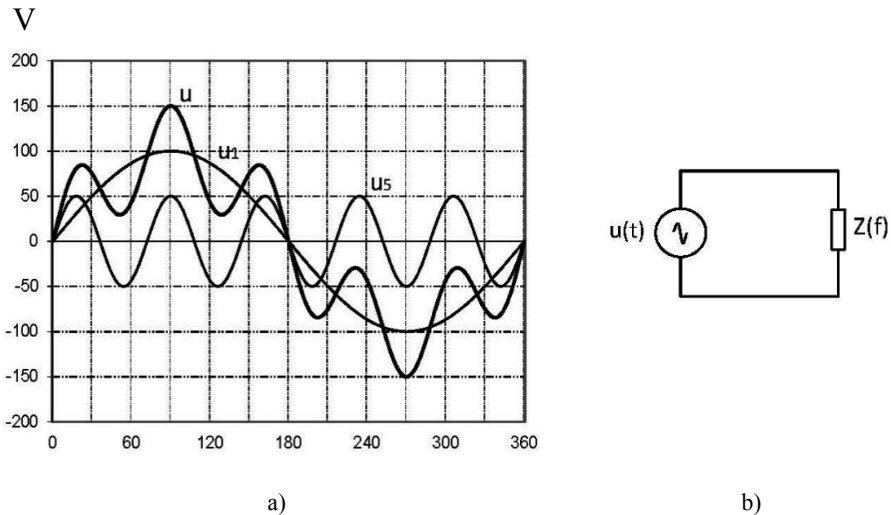


Figura 2.1-1. a) Onda de tensión $u(t)$ distorsionada pero periódica y su descomposición en una fundamental $u_1(t)$ de 50 Hz y otra $u_5(t)$ de 250 Hz con un 50% de amplitud respecto a la fundamental. b) Circuito compuesto por una fuente de tensión de $u(t)$ como la representada en a) y una impedancia Z .

10. Incluso las funciones no periódicas permiten la descomposición armónica (anexo A2.1, nota 31).

11. Naturalmente puede haber opiniones discordantes amparadas en el hecho de que se pueden medir y detectar sus efectos.

Con un sencillo ejemplo puede demostrarse la gran utilidad del método de Fourier.

Ejemplo 2.1-1

Supóngase un circuito tan simple como el representado en la figura 2.1-1b alimentado por una fuente de tensión periódica $u(t)$ representada en la figura. 2.1-1a y cuyo valor eficaz es $U = 100$ V, compuesta por una componente fundamental de 89 V y otra de 45 V a 250 Hz.¹²

Se trata de calcular la corriente eficaz I que circula por el circuito de 2 ohm de impedancia en tres supuestos: en el primero la impedancia es una simple resistencia, en el segundo una inductancia y en el tercero una capacidad.

Caso $Z = R$

Como R no se ve alterada por la frecuencia de la onda de la corriente que circula por ella, podemos afirmar que el valor de la corriente del circuito será:

$$I = \frac{100}{2} = 50 \text{ A}$$

Caso $Z = X_L$

Erróneamente podríamos suponer que puesto que el valor de la impedancia es igualmente 2 ohm la corriente será también de 50 A, como sucedería si la tensión fuera sinusoidal.

Debemos recordar que si bien la inductancia al igual que la resistencia es un valor constante, no sucede lo mismo con la reactancia X_L , que para el caso de corrientes alternas sinusoidales vale:

$$X_L = \omega L = (2\pi f)L$$

¿Pero qué pasa si la corriente no es sinusoidal?

Pues sencillamente que la expresión anterior no es válida y, por tanto, la corriente no valdrá 50 A.

Sin embargo, podemos recurrir a un «truco» para resolver el problema. Como se ha mencionado, la tensión $u(t)$ está compuesta por la suma de una onda fundamental de 89 V y un 5º armónico de 45 V. Luego, como ambas son ondas sinusoidales se puede aplicar el procedimiento clásico de c.a. para el cálculo de las corrientes, teniendo en cuenta que puesto que el valor de la reactancia es directamente proporcionado a la frecuencia, su valor para el 5º armónico será 5 veces superior, por tanto:

$$I_1 = \frac{89}{2} = 44,5 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{45}{5 \times 2} = 4,5 \text{ A}$$

12. Estos valores no son arbitrarios ya que $\sqrt{89^2 + 45^2} \approx 100$ (ver 2.4).

Por tanto, la corriente eficaz del circuito será:¹³

$$I = \sqrt{44,5^2 + 4,5^2} = 44,7 \text{ A}$$

En lugar de 50 A como erróneamente podría suponerse.

Caso $Z = X_c$

El procedimiento para calcular la corriente del circuito es igual al del caso anterior:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

Salvo que X_c depende de la frecuencia pero en este caso inversamente proporcional a ella, por lo que el 5º armónico será la quinta parte del valor a 50 Hz.

Las corrientes se calculan como sigue:

$$I_1 = \frac{89}{2} = 44,5$$

$$I_5 = \frac{45}{2/5} = 112,5$$

$$I = \sqrt{44,5^2 + 112,5^2} = 121 \text{ A}$$

El resultado refleja el dispar comportamiento de inductancias y capacidades frente a ondas distorsionadas con contenido de armónicos, hecho que anticipa los problemas que pueden aparecer en las instalaciones con las baterías de condensadores para la compensación de energía reactiva.

2.2 Desarrollo de Fourier

Según lo expuesto en el anexo 2.1 y 2.2 la expresión matemática de la descomposición o desarrollo por Fourier de una señal periódica $x(t)$ es:

$$X(t) = X_0 + \sqrt{2} X_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} X_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots \sqrt{2} X_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h)$$

La suma de términos debería ser extendida teóricamente a infinito si bien en los cálculos habituales se limita a 25 o a 50 en casos donde cabe esperar problemas de resonancia a frecuencias elevadas.

El método de Fourier permite calcular los coeficientes y ángulos del desarrollo anterior como se muestra en un ejemplo desarrollado a efectos didácticos en el anexo A2.2.

13. Ver 2.4.

En el desarrollo de $X(t)$ se distingue:

- X_0 , amplitud de la componente continua, nula en la mayoría de casos.
- h , orden o rango del armónico.
- X_h , valor eficaz o rms del armónico de orden h .
- φ_h , ángulo de fase de X_h respecto a la referencia ($t = 0$).

El orden del armónico h puede definirse como la relación entre la frecuencia del armónico correspondiente y la fundamental o frecuencia de red.

2.3 Clasificación de los armónicos

A pesar de que en los próximos capítulos irán apareciendo los armónicos descritos, a continuación puede resultar de interés resumir aquí los diferentes tipos.

Armónicos pares e impares. Los de mayor presencia en la red eléctrica son los impares debido a que la gran mayoría de ondas distorsionadas presentan una simetría de semionda como la tensión $u(t)$ representada en la figura 2.1-1a. Como puede observarse en esta simetría la semionda negativa es igual a la positiva pero con los valores invertidos, lo cual exige según el desarrollo de Fourier que solo aparezcan armónicos impares [1]. Los armónicos pares son, por el motivo descrito, poco frecuente en las redes eléctricas.¹⁴

Los armónicos múltiplos de 3 son tratados en el anexo A2.3.

Armónicos característicos. Suele denominarse así a los armónicos generados por convertidores de 6 pulsos, es decir, los de orden $6k \pm 1 = \{5, 7, 11, 13 \dots\}$, con $k = \{1, 2, 3, 4 \dots\}$, (ver 3.1.4).

Interarmónicos y subarmónicos. No son propiamente armónicos ya que su frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Mientras los interarmónicos poseen una frecuencia superior a la fundamental, los subarmónicos tienen una frecuencia inferior a esta.

A pesar de que la amplitud en este rango de frecuencias es muy reducida, sus efectos pueden ser apreciables provocando fenómenos como el de flicker, causa de la fluctuación luminosa en lámparas incandescentes o fluorescentes (capítulo 6, anexo A6.3).

14. Un ejemplo de onda sin simetría de semionda es, por ejemplo, la corriente debida a un rectificador de media onda cuya incidencia en la red eléctrica es inapreciable. La mayor generación de armónicos pares se produce en hornos de arco y en convertidores por un mal funcionamiento o fallo de sus semiconductores.

2.3.1 Secuencia de los armónicos

En una red trifásica equilibrada las tensiones y corrientes de la frecuencia fundamental poseen una misma secuencia denominada directa o positiva.

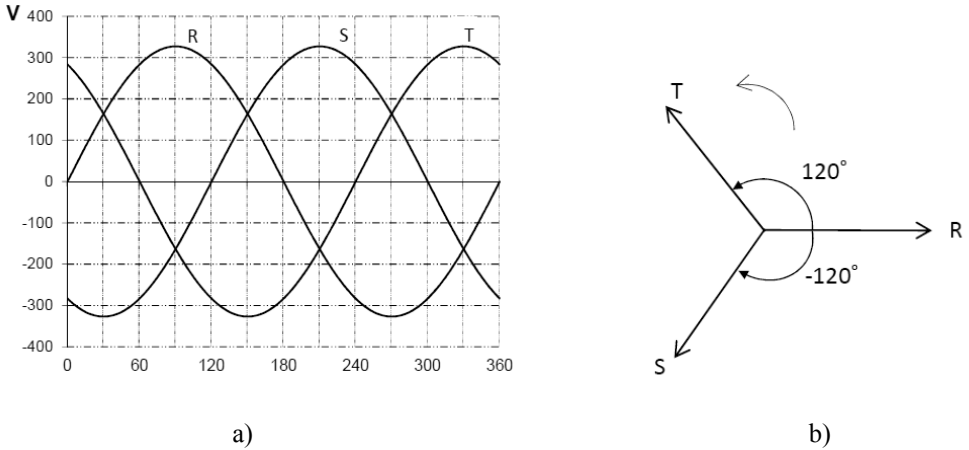


Figura 2.3.1-1 Sistema trifásico de secuencia directa.
a) Representación temporal. b) Representación fasorial

En un sistema de secuencia positiva por convención sus fasores R-S-T giran en sentido contrario a las agujas del reloj. Así en la figura 2.3.1-1b el fasor S alcanza la posición de R al girar 120° , o sea, al cabo de $20/3$ ms para una red de 50 Hz.

Cuando el sistema es desequilibrado este se puede descomponer gracias al método de componentes simétricas, basado en el Teorema de Fortescue [2], en tres sistemas equilibrados:

- Un sistema trifásico de secuencia directa o positiva.
- Un sistema trifásico de secuencia inversa o negativa.
- Un sistema de tres fasores en fase denominado de secuencia homopolar o nula.

En la figura 2.3.1-2 se muestran los tres sistemas descritos.

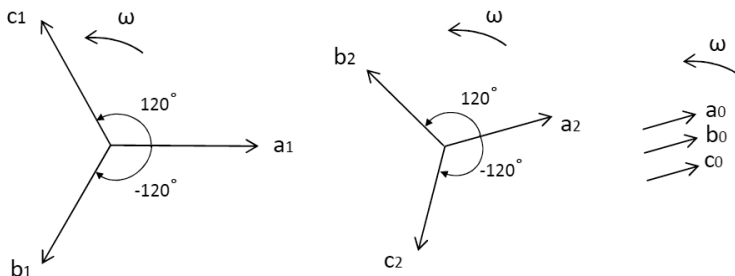


Figura 2.3.1-2 Descomposición de Fortescue.