

4. EFECTOS CAUSADOS POR LOS ARMÓNICOS

Al igual que sucede con la corriente reactiva las corrientes armónicas son un mal necesario. Es decir, al igual que la corriente reactiva es indispensable para el funcionamiento de las máquinas eléctricas, podríamos afirmar que los armónicos son necesarios para el funcionamiento de los equipos electrónicos. Un rectificador, por ejemplo, distorsiona la corriente absorbida alejándola de la forma senoidal a que estamos acostumbrados, lo cual es consustancial con su principio de funcionamiento. Esta distorsión equivale a decir que la corriente absorbida por este tipo de receptores no lineales, aparte de la corriente fundamental contiene también armónicos.

Pero los problemas con los armónicos no se limitan como la corriente reactiva a cargar innecesariamente las redes eléctricas y producir pérdidas, sino que causan más efectos colaterales.

Con el fin de introducirnos someramente y esperemos que de forma amena en el problema, propongo al lector la siguiente lectura:

¿Son tan perniciosos los armónicos?

El lector deberá sacar sus propias conclusiones sin olvidar que si bien los armónicos pueden dar lugar a diversos fenómenos, estos están naturalmente sometidos a las inexorables leyes de la física, es decir, no cabe atribuirlos a fenómenos que no comprendemos por simple asociación de la incomprensión de ambos.

Los armónicos cuestan dinero

Con independencia de la penalización que existe en varios países por inyectar un exceso de armónicos a la red, estos producen pérdidas en receptores y líneas, y estas pérdidas son kWh que consumimos innecesariamente.

En los transformadores producen pérdidas tanto en los devanados como en el hierro (núcleo, cuba y otras partes), así mismo en los motores, aparte de vibraciones mecánicas.

En las líneas o cables eléctricos causan también pérdidas por el aumento del valor eficaz de la corriente y por acentuar el efecto skin, traducido al castellano, efecto piel o pelicular. Este fenómeno produce un aumento de la resistencia de los conductores al reducir la sección de paso de la corriente por concentrarse esta en la periferia del conductor.

Por otra parte, al deformar la onda de tensión, provocando picos de tensión, contribuyen a deteriorar el aislamiento de las máquinas eléctricas.

En consecuencia, podríamos decir que los armónicos son caros de mantener y, por tanto, no está de más evitarlos y si eso no es posible será mejor eliminarlos.

¿Son ruidosos los armónicos?

Podríamos decir que no solo son ruidosos sino que también producen «temblores» por donde circulan. ¿Será el motivo del miedo a los armónicos? De todos modos son conocidas las vibraciones de núcleos de chapa magnética en transformadores y motores, vibración y zumbido inversamente asociado a la calidad de la máquina y directamente a la abundancia de nuestros molestos compañeros: los armónicos.

Los cables tendidos, por ejemplo, sobre una bandeja metálica pueden ofrecer tonos que recuerdan una melodía de Rimsky-Korsakov.

Los armónicos provocan el disparo de interruptores automáticos, la fusión de fusibles, la desconexión de diferenciales y más fenómenos que inducen a algún electricista a cambiar de profesión.

Las corrientes armónicas pueden ser la causa de disparos intempestivos o de la fusión de fusibles sin causa aparente. En estos casos no solo influye el aumento del valor eficaz de la corriente y el calentamiento por efecto pelicular, sino también la frecuencia de los armónicos más destacados. Así puede producirse el disparo de un interruptor automático aunque no se alcance el valor eficaz de la corriente de disparo debido al excesivo pico de corriente causado por los armónicos.

En los fusibles se produce un calentamiento adicional que puede llegar a fundirlos intempestivamente. En cuando a los diferenciales, para que engañarnos, son bastante raros pero no disparan sin causa, si lo hacen es porque se producen fugas en la que los armónicos a veces pueden resultar imputados.

Las fugas a tierra pueden producirse por defectos de aislamiento y por corrientes capacitivas debidas a las capacidades de las propias líneas respecto a tierra o por condensadores de filtros de determinados dispositivos (reactancias electrónicas y PCs por ejemplo). Las tensiones armónicas al ser de frecuencia superior a la de la red encontrarán reactancias capacitivas más bajas y, por tanto, provocarán corrientes de fugas a tierra más altas, que pueden contribuir a disparos más frecuentes. Cuando se alimenta a receptores con líneas de gran longitud y además estos descargan corrientes de AF a tierra, ya tenemos al electricista con un problema. Las soluciones a este tipo de problemas una vez detectados consisten en:

1º) Limitar el número de circuitos para un mismo diferencial.

2º) Utilizar diferenciales tipo A inmunizados o superinmunizados (SI).⁶⁷

67. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los diferenciales SI están pensados para evitar disparos a causa de corrientes transitorias como las producidas por maniobras o descargas atmosféricas en la red. La inmunización se consigue con filtros que bloquean las frecuencias altas, ya que estas afectan mucho menos al cuerpo humano. Pero este no es el caso de los armónicos, cuyas frecuencias son bajas, y, por tanto, el diferencial puede limitar pero no eliminar el paso de la mayor parte de ellos.

Los armónicos empeoran el factor de potencia

Antes debemos de precisar que el factor de potencia no es igual al $\cos\phi$. Así el factor de potencia (FP) debe de expresarse por:

$$FP = FD \cdot \cos\phi$$

Siendo FD el cociente entre la corriente fundamental y la eficaz del circuito en cuestión. Por supuesto, si no fuera por los armónicos el FD será la unidad y $FP = \cos\phi$, como toda la vida se ha venido diciendo.

La afirmación, por tanto, es correcta y los armónicos si bien no afectan al $\cos\phi$ empeoran el factor de potencia. Así, mejorar el FP en receptores no lineales debería incluir también la reducción de las corrientes armónicas.

Es conveniente recordar que un FP bajo implica reducir la potencia activa, o sea, los kW disponibles en una red y, por tanto, infrautilizar transformadores y líneas.

4.1 Pérdidas de energía causadas por los armónicos

Uno de los primeros aspectos que suele contemplarse en nuestro economicista mundo son las pérdidas que acarrea cualquier actividad y, como no puede ser menos, en el transporte de energía las pérdidas eléctricas constituyen una cuestión de interés primordial de tal forma que son motivo de importantes inversiones con el fin de reducirlas. Tampoco sería justo subestimar las emisiones innecesarias de gases de efecto invernadero que comportan las pérdidas.

Los armónicos causan pérdidas en los principales componentes de la red: transformadores y líneas y, por tanto, estos serán los primeros en los que vamos a estudiar las pérdidas debidas a la circulación de corrientes armónicas por ellos. También es cierto que los armónicos causan pérdidas en receptores, destacando los motores asíncronos, si bien su incidencia, como tendremos ocasión de ver, es sensiblemente menor.

Pero no solo son las pérdidas lo que debe preocupar al proyectista, sino el hecho de que estas obligan a sobredimensionar y, por tanto, encarecer la inversión en la red al exigir el aumento de la potencia a los transformadores o de la sección de los conductores de las líneas.

4.1.1 Pérdidas por corrientes armónicas en transformadores

En los transformadores se distinguen dos tipos de pérdidas, la de vacío y las de carga. Las primeras se pueden ver afectadas por la distorsión en la tensión primaria pero su bajo valor hace que su incidencia en las pérdidas armónicas sea despreciable. Sin embargo, este no es el caso de las pérdidas en carga ya que dependen de la corriente del transformador, la cual puede tener una elevada distorsión y, por consiguiente, componentes armónicas de valores comparables a la corriente fundamental.

Según IEEE C57 110-1998 [1] las pérdidas en carga P_{LL} pueden expresarse por:

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL}$$

Siendo:

P , pérdidas por defecto Joule o producto de la corriente eficaz o rms, incluyendo armónicos, al cuadrado por la resistencia de los devanados medida en c.c.

P_{EC} , pérdidas en los devanados no comprendidas en P . Se trata por tanto, de pérdidas debidas al efecto pelicular y de proximidad, consecuencia del flujo de dispersión. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de corriente y frecuencia.

$$P_{EC} \approx I^2 h^2$$

P_{OSL} , pérdidas debidas también al flujo de dispersión pero producidas en partes distintas de los devanados como son el circuito magnético y componentes estructurales del transformador. Estas pérdidas dependen también de la corriente al cuadrado y de la frecuencia pero elevada a un exponente 0,8.

Tanto P_{EC} como P_{OSL} son debidas a las corrientes de Foucauld causadas por el flujo de dispersión y son también denominadas parásitas y en la literatura inglesa *eddy current loss*.

$$P_{OSL} \approx I^2 h^{0.8}$$

Las pérdidas P_{OSL} solo se consideran en transformadores en aceite, depreciándose en transformadores secos.

En el siguiente ejemplo se puede apreciar la importancia de las distintas pérdidas y la incidencia de los armónicos.

Ejemplo 4.1.1-1

En la tabla siguiente se indican las pérdidas de un transformador sumergido en aceite de 1.600 kVA, de 2.199 A de corriente nominal a 420 V.

Pérdidas nominales	W	p.u.
P_0 , en vacío	1.700	
P_{LL} , en carga a 75 °C	14.000	
Compuestas por		
P 10.920		1,00
P_{EC} 1.260		0,115
P_{OSL} 1.820		0,167
Total	15.700	

Tabla 4.1.1-1 Pérdidas nominales de un transformador en baño de aceite de 1.600 kVA. Valores extraídos de [2].

En el supuesto de trabajar con cargas lineales a plena carga, es decir, suministrando una corriente de 2.199 A a 50 Hz, las pérdidas serán las indicadas en la tabla 4.1.1-1. Se trata de determinar las pérdidas en el supuesto de que la corriente de carga contenga, por ejemplo, un 5º armónico del 30 %, manteniendo su valor nominal.

Las pérdidas en estas condiciones se calcularán según lo anteriormente expuesto por:⁶⁸

$$P_{EC} = 1.260[0,958^2 + (0,3 \cdot 0,958)^2 \cdot 5^2] = 3.758 \text{ W}$$

$$P_{OSL} = 1.820[0,958^2 + (0,3 \cdot 0,958)^2 \cdot 5^{0,8}] = 2.215 \text{ W}$$

Y puesto que las pérdidas por efecto Joule P permanecen invariables, la suma asciende a 16893 W contra los 14.000 W de pérdidas nominales, es decir, las pérdidas en carga se ven incrementadas en un 20,7 % por efecto del 5º armónico mencionado.

El proceso de cálculo seguido en el ejemplo anterior puede resumirse en la siguiente expresión extraída de [1] y también contemplada en [3].

$$P_{LL}(\text{pu}) = I^2(\text{pu})(1 + F_{HL}P_{EC-R}(\text{pu}) + F_{HL-ST}P_{OSL-R}(\text{pu}))$$

En donde «pu» en este caso se refiere a por unidad de la base elegida, es decir, la potencia de pérdidas ohmicas nominales I²R. Siendo F_{HL} y F_{HL-ST} los factores de pérdidas armónicas definidos por:

$$F_{HL} = \frac{\sum_1^H \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 \cdot h^2}{\sum_1^H \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad F_{HL-ST} = \frac{\sum_1^H \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 \cdot h^{0,8}}{\sum_1^H \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Si aplicamos las anteriores expresiones al ejemplo 4.1.1-1 obtendríamos:

$$F_{HL} = \frac{1 + 0,3^2 \cdot 5^2}{1 + 0,3^2} = 2,982$$

$$F_{HL-ST} = \frac{1 + 0,3^2 \cdot 5^{0,8}}{1 + 0,3^2} = 1,217$$

Y por tanto,

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1(1 + 2,982 \cdot 0,115 + 1,217 \cdot 0,167) = 1,547$$

Con lo que las pérdidas P_{LL} en W serán: P_{LL} = 10.920 · 1,547 = 16.893 W

Como se determinó con el procedimiento anterior.

4.1.2 Factor de reducción

Por las consideraciones precedentes se pone en evidencia que un transformador que deba suministrar una corriente distorsionada aún a pesar de ser del mismo valor eficaz que su

68. En los cálculos siguientes cabe observar que al considerar que el valor eficaz de la corriente nominal no se altera por el hecho de considerar incluido el 5º armónico, el valor de la corriente fundamental varía y cumple con $I_1^2(1 + 0,3^2) = I_N^2$, de donde se deduce $I_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,3^2}} I_N = 0,958 I_N$.