

## EL COSTE DE LOS ARMÓNICOS

J. Balcells,

Profesor Titular del Depart. d'Enginyeria Electrónica UPC. Asesor Técnico de CIRCUTOR S.A.

### RESUMEN

La proliferación de equipos que incorporan "convertidores electrónicos de potencia", ha dado lugar a un tipo de consumo en las redes, donde las ondas se apartan notablemente de la forma senoidal. Decimos entonces que la corriente contiene armónicos y surgen una serie de preguntas tales como: ¿Cómo afecta la presencia de armónicos al funcionamiento de una instalación? , ¿provocan consumo de potencia? , ¿se deterioran los equipos por el hecho de existir armónicos?, ¿tiene algún coste el hecho de que haya armónicos?, ¿quién es el culpable de que existan dichos armónicos? .... , etc. Este artículo intenta dar una respuesta a estas preguntas, sin entrar en excesivos detalles técnicos y enfocando más hacia las repercusiones económicas que supone la presencia de corrientes armónicas en una red.

### 1 INTRODUCCIÓN

Los receptores, tanto domésticos como industriales incorporan cada vez más convertidores electrónicos (rectificadores, onduladores, etc.). Éstos toman energía de la red en forma de corriente alterna pero para su uso la convierten en corriente continua. En este proceso, la forma de onda de la corriente que consumen resulta alterada, de forma que ya no es una onda senoidal, sino una superposición de ondas senoidales con frecuencias múltiplos de la frecuencia de red. Las figuras 1 y 2 muestran el consumo típico de una red con rectificadores monofásicos y otra con rectificadores trifásicos. Este tipo de consumos son los más abundantes en las redes y en ellos, tanto la corriente como la tensión están formadas por una componente de 50 ó 60Hz (frecuencia fundamental de la red) y una serie de componentes de frecuencias múltiplos en distintos porcentajes. Estos porcentajes pueden medirse mediante un analizador de armónicos, así como la tasa de distorsión total, THD, que da la relación entre el valor eficaz del rizado y el eficaz de la componente fundamental.

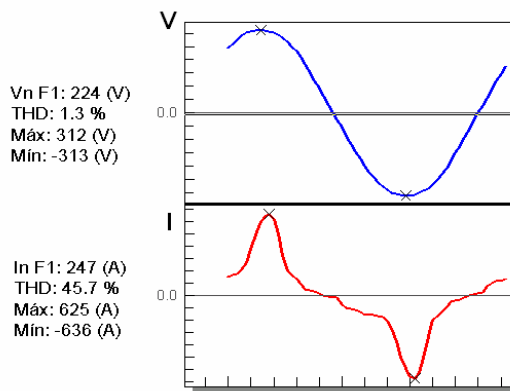


Fig. 1. Formas de onda típicas en red monofásica

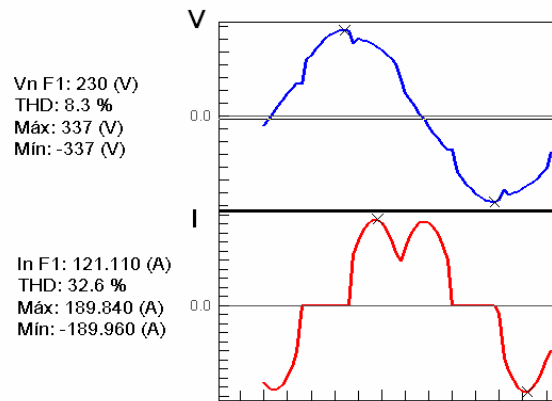


Fig. 1. Formas de onda típicas en red trifásica

En los registros puede observarse que la tensión tiende a ser senoidal, con THD bajos, mientras que la corriente tiene formas más distintas de la senoidal y por tanto tiene THD más altos.

## 2 ORIGEN Y EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

El origen del problema de armónicos son los receptores que consumen corrientes distorsionadas (no senoidales). A pesar de que la tensión en origen suele ser senoidal, las caídas de tensión provocadas por dichas corrientes no senoidales hacen que en los puntos de consumo (PCC, "Point of common coupling, en fig. 2) se tenga una tensión distorsionada y por tanto los usuarios conectados a la red distorsionada sufren los efectos de los usuarios que generan la distorsión de corriente.

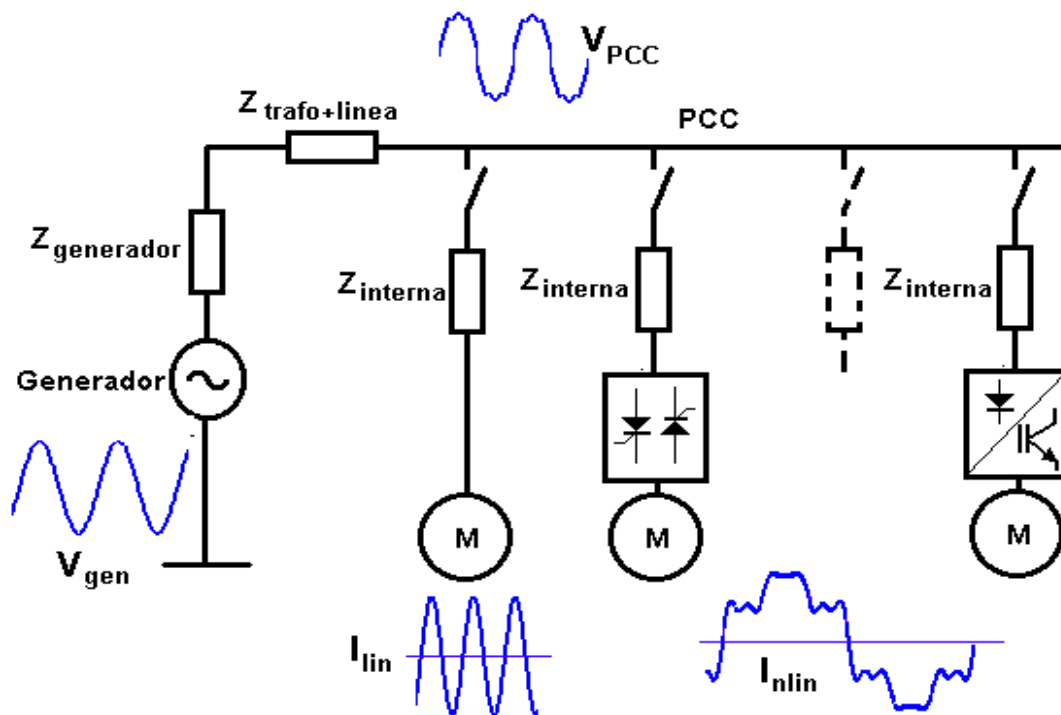


Fig. 3. Armónicos de corriente y armónicos de tensión en el PCC

La presencia de armónicos en la red tiene varias consecuencias. Las más importantes son las siguientes:

- Deterioro de la calidad de la onda de tensión, afectando a algunos receptores sensibles.
- Empeoramiento de factor de potencia. La capacidad de la red para suministrar potencia se ve limitada por ello.
- Sobrecarga de cables y sobre todo de transformadores (aumento muy significativo de las pérdidas en el hierro)

Para garantizar un suministro con unos límites de calidad de onda y con unas pérdidas aceptables, la distorsión de tensión debe limitarse a ciertos valores dados por normas internacionales (IEC-EN en Europa y IEEE en Estados Unidos). Concretamente para el entorno industrial la norma europea que regula la calidad de onda de tensión en lo que a armónicos se refiere es la IEC-61000-2-4 (Niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia). La tabla 1 indica los límites de calidad de onda o límites de compatibilidad establecidos por dicha norma para el entorno industrial en BT. Las distintas clases mencionadas en dicha tabla corresponden a :

Clase 1: Entorno industrial previsto para alimentación de equipos electrónicos sensibles

Clase 2: Entorno industrial normal. Límites habituales para redes públicas

Clase 3: Entorno industrial degradado (generalmente por la presencia de convertidores). No apto para alimentación de equipos sensibles.

Tabla 1.- Límites de compatibilidad: Armónicos de tensión (Un%) en redes industriales de BT

Orden del armónico h	Clase 1 Un%	Clase 2 Un%	Clase 3 Un%
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
>10 mult. de 2	0,2	0,2	1
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
15	0,3	0,3	2
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
21	0,2	0,2	1,75
>21 mult de 3	0,2	0,2	1
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25 no mult de 2 ni 3	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	$5 \times \sqrt{11/h}$
THD(V)	5%	8%	10%

### 3 LÍMITES DE ARMÓNICOS PARA LOS RECEPTORES INDUSTRIALES

Según hemos visto en el apartado anterior, el problema de armónicos tiene dos vertientes. Por un lado la compañía distribuidora debe garantizar una cierta calidad de la onda de tensión, pero por otra parte son los propios consumos de los usuarios los que deterioran dicha calidad de onda. No obstante, no hay que olvidar que el deterioro de la onda de tensión depende de dos factores: De los armónicos de corriente consumidos por el usuario (responsabilidad del usuario) y de la impedancia de la red en el punto de distribución (responsabilidad de la compañía suministradora). Es lógico pues que las normas IEC-61000-3-4 (Europa) y IEEE-519 (USA), que limitan la máxima cantidad de armónicos de corriente que un receptor o una instalación pueden absorber de la red, lo hagan en función de la impedancia de la red o si se prefiere de la potencia de cortocircuito, que es un índice de dicha impedancia.

La medida de la potencia de cortocircuito y de los armónicos de corriente debe hacerse en el punto de conexión a la red pública, denominado, PCC (Point of common coupling). Así pues el usuario debe interesarse por limitar las posibles distorsiones adicionales dentro de su instalación, procurando que la impedancia de su red de distribución sea lo más baja posible. Hay que recalcar que dicha impedancia suele depender básicamente de la inductancia por metro de las líneas de distribución, parámetro que puede estar muy degradado en caso de que los cables de las distintas fases estén muy separados entre sí.

Las tablas 2, 3 y 4 dan un resumen de los límites establecidos por la norma IEC-61000-3-4 (Europa), relativos a corrientes armónicas que pueden consumir las instalaciones industriales. Para comprender dichas tablas damos a continuación algunas definiciones.

**Potencia de cortocircuito**  $S_{sc}$  : Es un indicador de la impedancia propia de la red, se define como:

$$S_{sc} = U_{nom}^2 / Z_{cc}$$

**Potencia nominal del equipo**  $S_{equ}$  : Se calcula de distinta forma según el tipo de carga

$$S_{equ} = U_{fase-N} \cdot I_{equ} \text{ para equipos entre fase y neutro;}$$

$$S_{equ} = U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \text{ para equipos entre fase y fase ;}$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \text{ para equipos trifásicos equilibrados.}$$

**Relación de cortocircuito**  $R_{scc}$  . Es un índice de la carga que supone un equipo para una red. Se define como:

$$R_{scc} = S_{sc} / 3S_{equ} \text{ para equipos entre fase y neutro;}$$

$$R_{scc} = S_{sc} / 2S_{equ} \text{ para equipos entre fase y fase ;}$$

$$R_{scc} = S_{sc} / S_{equ} \text{ para equipos trifásicos equilibrados.}$$

**Distorsión armónica total**  $THD\%$  . Se define como:

$$THD\% = 100 \cdot \sum_{h=2}^{40} (I_h / I_1)^2$$

**Distorsión parcial ponderada**  $PWHD$  : Para la norma citada (IEC-61000-3-4) se usa la distorsión ponderada de los armónicos 14 al 40:

$$PWHD\% = 100 \cdot \sum_{h=14}^{40} h \cdot (I_h / I_1)^2$$

Tabla 2. Valores límites de emisión para equipos de  $I > 16A$  cuando  $S_{\text{equ}} \leq S_{\text{sc}}/33$ 

Armónico h	Corriente admisible $I_n/I_1\%$			Corriente admisible $I_n/I_1\%$
3	21,6		21	$\leq 0,6$
5	10,7		23	0,9
7	7,2		25	0,8
9	3,8		27	$\leq 0,6$
11	3,1		29	0,7
13	2		31	0,7
15	0,7		$\geq 33$	$\leq 0,6$
17	1,2			
19	1,1		Pares	$\leq 8/n$ ó $0,6$

Tabla 3. Límites de emisión para equipos monofásicos o trifásicos desequilibrados con  $R_{\text{sc}} > 33$ 

$R_{\text{sc}}$ (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles					
	THD%	PWHD%	$I_3/I_1\%$	$I_5/I_1\%$	$I_7/I_1\%$	$I_9/I_1\%$	$I_{11}/I_1\%$	$I_{13}/I_1\%$
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

NOTAS: (1) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar  $16/h$  %

(2) Para valores de  $R_{\text{sc}}$  intermedios interpolar; (3) En caso de redes desequilibradas los valores de la tabla se aplican a cada una de las fases individualmente

Tabla 4. Límites de emisión para equipos trifásicos equilibrados con  $R_{\text{sc}} > 33$ 

$R_{\text{sc}}$ (2)	Tasa total admisible		Tasas individuales admisibles			
	THD%	PWHD%	$I_5/I_1\%$	$I_7/I_1\%$	$I_{11}/I_1\%$	$I_{13}/I_1\%$
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

NOTAS: (1) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar  $16/h$  %

(2) Para valores de  $R_{\text{sc}}$  intermedios interpolar

#### 4 INCIDENCIA EN EL COSTE DE LA ENERGÍA.

En la mayor parte de países del mundo, no existe actualmente ningún concepto en la tarifa para penalizar el consumo de armónicos de corriente. No obstante, dada la magnitud del problema, son muchos los países que están en vías de estudio de algún tipo de recargo en caso de que se sobrepasen los límites de la norma.

En realidad a las compañías de distribución, la existencia de armónicos de corriente les supone un coste significativo en pérdidas y en pérdida de aprovechamiento de sus instalaciones.

En la valoración del problema deben considerarse básicamente cuatro factores: Aumento de sección de cables, aumento de pérdidas en el cobre, aumento de potencia de los transformadores de distribución y aumento de pérdidas en el hierro.

#### 4.1 Aumento de sección de cables y pérdidas Joule.

El aumento de sección de los cables es una consecuencia de tener que transportar los armónicos. Dicho aumento ha de ser proporcional al valor eficaz total de la corriente.

$$I_{ef\_total} = \sqrt{\sum_I^h I_h^2}$$

El coste por este concepto es relativamente bajo. Basta ver por ejemplo que una corriente de 100A con un armónico de 20A superpuesto (20%) supondría solamente un 2% de aumento de la sección de cables necesaria.

$$I_{ef\_total} = \sqrt{\sum 100^2 + 20^2} \cong 102$$

En cuanto a las pérdidas Joule, éstas dependen del cuadrado de la corriente eficaz, con lo cual, en el mismo ejemplo anterior, tendríamos.

$$\text{Pérdidas de } I \text{ fundamental} = R \cdot 100^2 = R \cdot 10.000$$

$$\text{Pérdidas de } I \text{ fundamental} = R \cdot 20^2 = R \cdot 400 \quad (4\% \text{ adicional de pérdidas})$$

#### 4.2 Aumento de tamaño y de pérdidas en los transformadores.

En los transformadores, reactancias, etc. , las pérdidas en el hierro en caso de existir armónicos crecen muy significativamente, esto hace que deban sobredimensionarse los kVA nominales de forma notable. El factor que se suele emplear para ello es el llamado factor  $K$  de los transformadores que se define como:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \cdot \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

donde  $e$  es un factor que representa la relación entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro del transformador. Este factor puede obtenerse de los datos de ensayo del transformador, o en su defecto puede tomarse como valor aproximado  $e=0,3$  y el exponente  $q$  suele tomarse de 1,7 a 1,8.

En cuanto a las pérdidas en el hierro, también son muy significativas ya que aumentan con la frecuencia a una potencia  $q$  entre 1 y 2.

$$P_{Fe} = k_{Fe} \cdot \sum h^q \cdot I_n^2$$

En el mismo ejemplo anterior, con 100A de fundamental y 20A de 5º armónico por ejemplo, las pérdidas en el hierro debidas al armónico 5º, serían

$$\text{Pérdidas de } I \text{ fundamental} = k \cdot 100^2 = k \cdot 10.000$$

$$\text{Pérdidas de } I \text{ fundamental} = k \cdot 5^{1,5} \cdot 20^2 = k \cdot 4472 \quad (44,72\% \text{ adicional de pérdidas})$$

## 5 CONCLUSIONES

La presencia de armónicos en las redes causa una serie de problemas de deterioro de la calidad de la onda de tensión, hace necesario un sobredimensionamiento de las instalaciones de transporte y ocasiona pérdidas adicionales significativas. Aunque existen normas que limitan el consumo de dichos armónicos, hoy por hoy existen muchas instalaciones cuyos consumos en corrientes armónicas están

muy por encima de los límites aceptados. Esto tiene un coste significativo para las compañías distribuidoras, hasta el punto de que en muchos países se está considerando la creación de un recargo sobre la tarifa de consumo, para compensar económicamente a las compañías por la infraestructura adicional de transporte y por las pérdidas.

No obstante, la solución del problema no debería ser el resignarse a pagar un recargo, sino que debería evitarse este consumo adicional, con sus correspondientes pérdidas y la necesidad de ampliación de las redes de distribución. La alternativa son los filtros de armónicos, que reducen la ondulación de la corriente a límites tolerables, para los cuales los efectos de dichos armónicos no sean significativos. Como siempre la solución es un compromiso entre la eliminación de ondulación de corriente y el coste del filtro. La eliminación total es muy costosa, pero la reducción hasta alcanzar los límites de compatibilidad es perfectamente justificable económicamente.

