

PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA

DISTORSION ARMONICA

SLITE

Ponente
Ing. Eugenio Téllez Ramírez



AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. de C.V.
16 SUR 2122 Col. Bellavista C.P. 72500 Puebla, Pue.
Tel/Fax : (222) 243-5437 e-mail : apc@mail.precitool.com.mx

INTRODUCCION

La energía eléctrica comúnmente se genera en las grandes centrales utilizando máquinas rotatorias síncronas cuyo campo es excitado con un voltaje de CD e impulsado mecánicamente por una turbina, produciendo una tensión senoidal trifásica en las terminales de su armadura. Dicha forma de onda es característica del diseño de la máquina y de la disposición de sus devanados.

Cuando un voltaje senoidal es aplicado a un circuito lineal las corrientes que fluye en el sistema y caídas de voltaje también son senoidales.

Durante los últimos 20 años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y voltajes en alimentadores y buses se ha corrompido por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, debido principalmente a la introducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como a la operación, cada vez más extendida, de grandes hornos de arco usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control.

Estudios realizados por el Electric Power Research Institute (EPRI) muestran que al año 2000, cerca del 60% de la energía eléctrica consumida en los Estados Unidos pasa a través de algún dispositivo semiconductor antes de llegar a la carga. Esta cifra era 40% en 1995.

Ante esta situación es indispensable aplicar medidas que conlleven a mantener los sistemas eléctricos con una calidad de energía adecuada y aprovechar las ventajas de la tecnología de los equipos electrónicos que ayudan a incrementar la productividad, confort y ahorro de energía.

1.0 DISTORSION ARMONICA

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada.

La distorsión puede deberse a:

- *Fenómenos transitorios* tales como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.

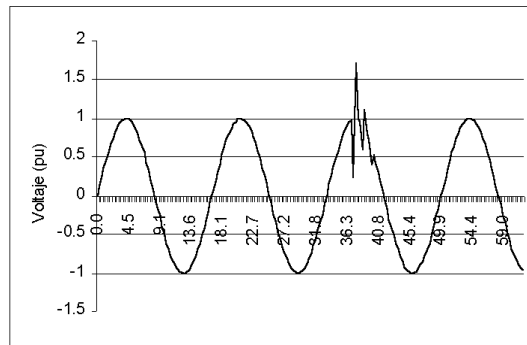


Fig. 1.1.1) Efecto en el voltaje por la conmutación de capacitores

- *Condiciones permanentes* que están relacionadas con armónicas de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.

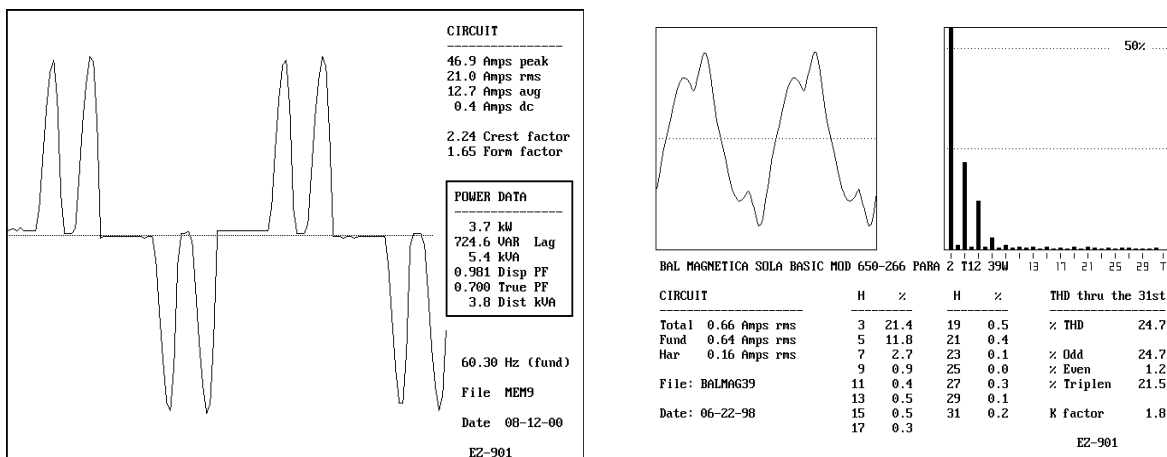


Fig. 1.1.2) Forma de onda de corriente en a) variador de velocidad de CA b) balastra magnética

1.2 Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben de cumplir las siguientes condiciones :

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- Permanente.- Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

1.3 Definición de armónicas

Este concepto proviene del teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original.

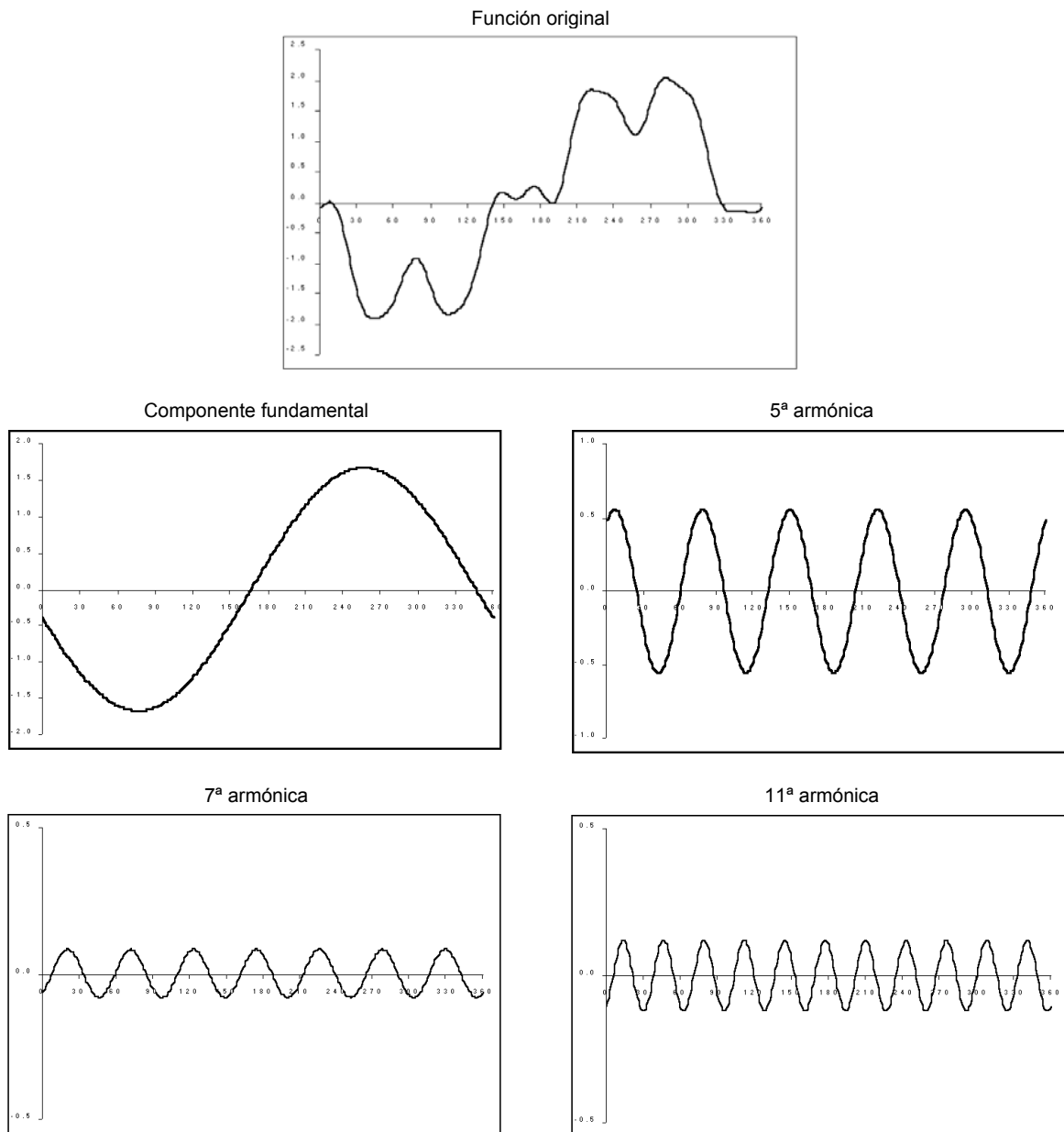


Fig. 1.3.1) Forma de onda original y sus componentes armónicas: 1ª ,5ª ,7ª ,11ª

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares.

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o voltaje utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes A_h que expresadas con relación a la amplitud A_1 de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida.

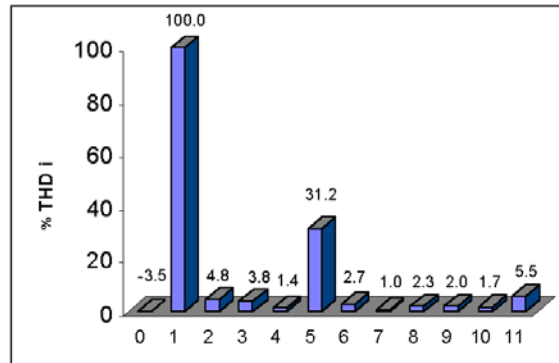


Fig. 1.3.2) Componentes armónicas relativas a la fundamental de la señal de la Fig. 1.3.1

Estas señales pueden visualizarse en un sistema tridimensional en el que se representan su magnitud, ubicación en frecuencia y a lo largo del tiempo.

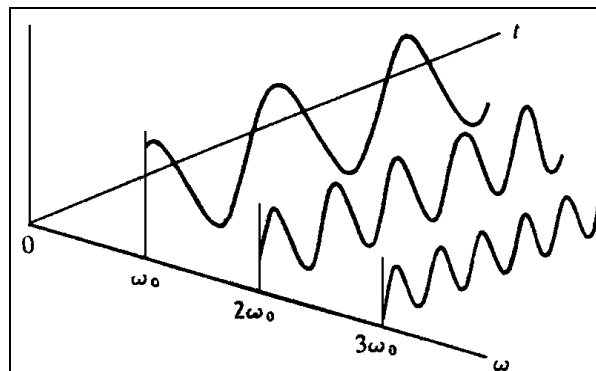


Fig. 1.3.3) Componentes en el dominio del tiempo y de la frecuencia

1.4 Cargas lineales y no lineales

Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales.

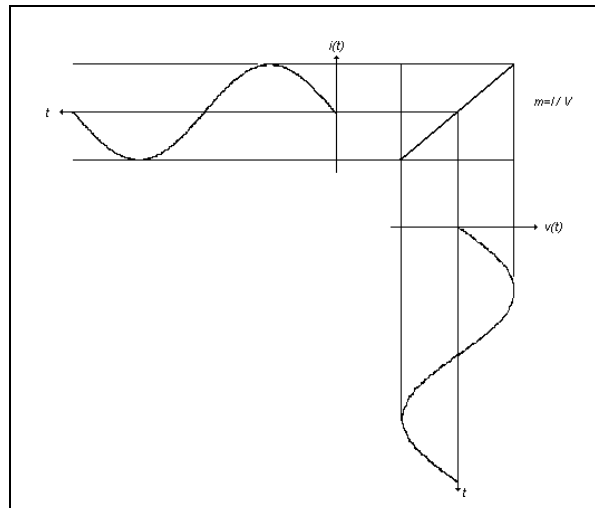


Fig. 1.4.1) Carga lineal . La corriente y el voltaje siempre son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.

En los circuitos en los que su curva corriente – voltaje no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal.

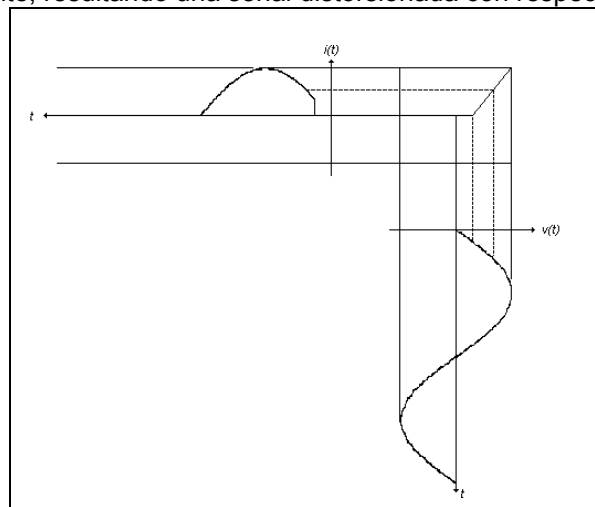


Fig. 1.4.2) Carga no lineal de una resistencia controlada por SCR en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales

La curva característica corriente – voltaje de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. Existen aplicaciones donde se emplean SCR's conectados en antiparalelo con control de cruce por cero en los que prácticamente no existe distorsión, considerándose lineales y por otro lado una resistencia con control de fase es una carga no lineal.

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y pudiendo afectar incluso a otros usuarios que únicamente posean cargas lineales.

1.6 Medidas de la distorsión en voltaje y corriente

Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación se presentan las expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

Valor eficaz (rms)

Cuando se suman señales de voltaje o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.

$$\text{Corriente eficaz (rms)} \quad I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.6.1)$$

$$\text{Voltaje eficaz (rms)} \quad V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (1.6.2)$$

Cofactor de distorsión (Cd)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y su valor eficaz (rms). Su valor se ubica entre 0% y 100%. También se conoce como thd y es el índice más ampliamente usado en Europa.

Con una distorsión baja, Cd cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$\text{Cd: Cofactor de distorsión} \quad C_d = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{rms}} \times 100\% \quad (1.6.3)$$

Distorsión armónica total (THD)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales (I y V). Al igual que el Cd es útil cuando se trabaja con equipos que deben responder sólo a la señal fundamental, como en el caso de algunos relevadores de protección.

$$\text{THD: Distorsión armónica total} \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1.6.4)$$

Distorsión de demanda total

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519

TDD: Distorsión de demanda total

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (1.6.5)$$

donde:

I_h = Magnitud de la armónica individual

h = orden armónico

I_L = demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

1.7 Potencia fundamental y armónica

Para definir la relación de potencias en sistemas eléctricos se utiliza ampliamente la relación:

$$S = P + j Q \tag{1.7.1}$$

donde:

- S : Potencia aparente
- P : Potencia activa
- Q : Potencia reactiva

Su representación fasorial es el triángulo de potencias y muestra que P se ubica en el eje real, mientras Q esta en el imaginario, estando ambos en cuadratura y S es la resultante.

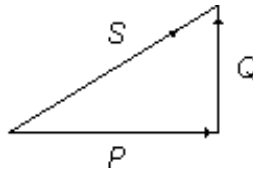


Fig. 1.7.1) Triángulo de Potencias

Con esta expresión pero utilizando las energías medidas, los suministradores de la electricidad en México, calculan el factor de potencia para efectos de facturación. Estos conceptos son válidos mientras el sistema sea lineal, es decir no exista distorsión armónica.

Las cargas no lineales son las que generan la distorsión armónica en corriente, que al fluir por el cableado y el transformador de distribución, producen la distorsión en voltaje.

Para aquellos sistemas en los que la distorsión en voltaje es nula o mínima y existe distorsión armónica en corriente, se utiliza la pirámide de potencias para considerar tanto los valores fundamentales como los armónicos.

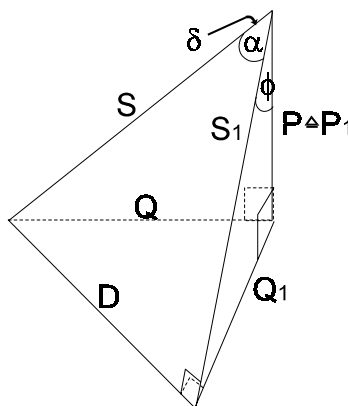


Fig. 1.7.2) Pirámide de Potencias

Para poder aplicarlo correctamente, se revisarán los conceptos relacionados.

Las siguientes expresiones aplican cuando el voltaje es senoidal y la corriente esta distorsionada:

Potencia aparente $S=V I_{rms}=V \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$ (1.7.2)

Potencia eficaz $P=P_1=VI_1\cos(\phi_1)$ (1.7.3)

Potencia reactiva $Q=\sqrt{S^2 - P^2}$ (1.7.4)

Potencia reactiva fundamental $Q_1=VI_1\sin(\phi_1)$ (1.7.5)

Potencia distorsionante $D=V \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$ (1.7.6)

Factor de potencia fundamental: $FP_1=P/S_1=\cos(\phi_1)$ (1.7.7)

Factor de potencia: $FP=\cos(\alpha)*\cos(\phi_1)=\cos(\delta)=P/S$ (1.7.8)

Relación entre Potencias

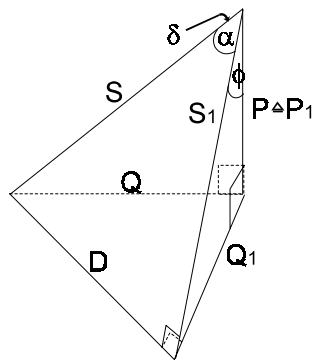
$S^2 = P^2 + Q^2$ (1.7.10)

$S_1^2 = P^2 + Q_1^2$ (1.7.11)

$Q^2 = Q_1^2 + D^2$ (1.7.12)

$S^2 = S_1^2 + D^2$ (1.7.13)

$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D^2$ (1.7.14)



2.0 NIVELES DE ARMÓNICAS PERMITIDOS POR LAS NORMAS

2.1 Normalización

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía.

Resulta especialmente delicada la relación usuario / compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

En México existe la especificación CFE L0000-45 denominada “ *Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica*” concerniente a la distorsión armónica permisible.

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519 “ *Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia* ” define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible.

Ambas normatividades están diseñadas para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en voltaje en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

- **Suministrador.** Es su responsabilidad que en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje THDv se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.
- **Usuarios.** Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

2.2 Límites de distorsión en Voltaje

El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

IEEE 519

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 69$ kV	3.0%	5.0%
69 kV $< V_n \leq 161$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 161$ kV	1.0%	1.5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (2.2.1)$$

donde:

- V_h : Magnitud de la componente armónica individual
- h : orden armónico
- V_n : Voltaje nominal fundamental del sistema

CFE L0000-45

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 1$ kV	5.0%	8.0%
$1 < V_n \leq 69$ kV	3.0%	5.0%
69 kV $< V_n \leq 138$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 138$ kV	1.0%	1.5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (2.2.2)$$

donde:

- V_h : Magnitud de la componente armónica individual
- h : orden armónico
- V_n : Voltaje nominal fundamental del sistema

2.3 Límites de distorsión en Corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

IEEE 519

Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

* Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación I_{cc}/I_L .

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- No se permite la existencia de componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.
- Si las cargas que producen las armónicas utilizan convertidores con número de pulsos q mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por un factor

$$\sqrt{\frac{q}{6}} \quad (2.3.1)$$

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2.3.2)$$

donde:

- I_h : Magnitud de la armónica individual
- I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga
- h : orden armónico impar

- I_{cc} : Debe utilizarse aquella que bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación I_{cc}/I_L y la evaluación es mas severa.
- I_L : Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida y puede calcularse como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación.

- Los límites son mas estrictos para los usuarios que representan mayor carga al sistema, ya que la relación I_{cc}/I_L es menor.

Los sistemas mas robustos pueden transmitir mayores niveles de corrientes armónicas sin producir una distorsión excesiva de voltaje que los sistemas mas débiles.

CFE L0000-45

Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ Kv}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	6.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 50$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$I_{cc}/I_L \geq 50$	3.75%	3.0%	1.5%	1.15%	0.45%	0.22%

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- Los límites deben ser usados como el caso mas desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites en 50%
- No se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

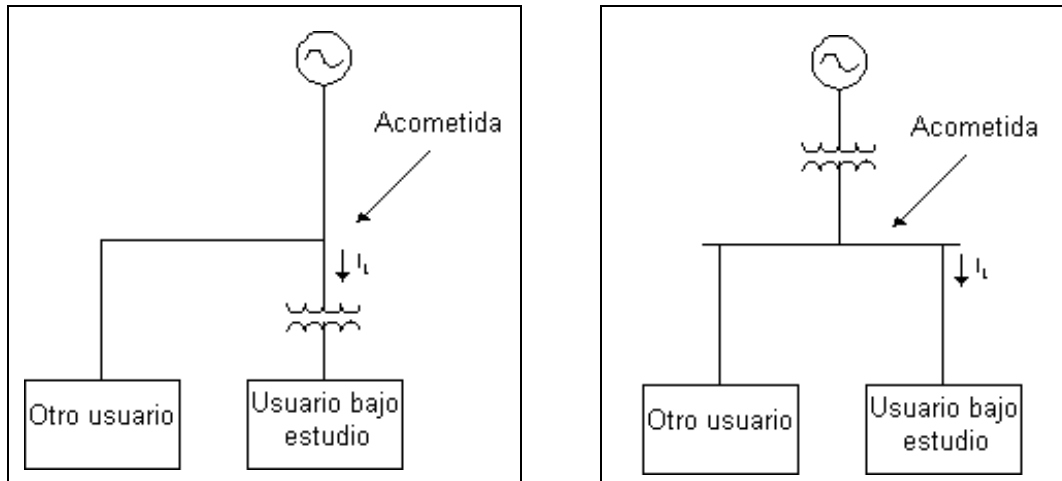
$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \tag{2.3.3}$$

donde:

- I_h : Magnitud de la armónica individual
- I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga
- h : orden armónico impar

2.4 Punto de medición del nivel de armónicas

Los límites establecidos en la norma IEEE 519-1992 deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario.



La norma puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación, pero diferentes límites de distorsión podrían aplicarse en estos casos ya que aunque en un punto dado los límites se excedan, la interacción de diversas cargas puede producir cancelaciones de armónicas que arrojen valores dentro de los límites en la acometida.

3.0 FUENTES QUE PRODUCEN LAS ARMÓNICAS

La norma IEEE 519-1992, relativa a “*Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia*” agrupa a las fuentes emisoras de armónicas en tres categorías diferentes:

- Dispositivos electrónicos de potencia
- Dispositivos productores de arcos eléctricos
- Dispositivos ferromagnéticos

Algunos de los equipos y procesos que se ubican en estas categorías son:

- Motores de corriente directa accionados por tiristores
- Inversores de frecuencia
- Fuentes ininterrumpidas UPS
- Computadoras
- Equipo electrónico
- Hornos de arco
- Hornos de inducción
- Equipos de soldadura
- Transformadores sobreexcitados

3.1 Armónicas Características

Ciertas armónicas son inherentes al proceso de conversión que realizan los equipos, a las que se les nombra armónicas características.

En el caso de convertidores estáticos y rectificadores las armónicas características pueden definirse a partir del número de pulsos p con que cuentan, asumiendo que los dispositivos funcionan correctamente.

$$\text{donde:} \quad h=np\pm 1 \quad (3.1.1)$$

h = orden armónico
 $n=1,2,3\dots$
 p = número de pulsos del convertidor

4.0 EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS

Las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales, están desfasadas noventa grados con respecto al voltaje que las produce, fluyendo una potencia distorsionante de la fuente a la red eléctrica y viceversa, que solo es consumida como pérdidas por efecto Joule que se transforman en calor, de forma equivalente a la potencia reactiva fundamental relacionada al factor de potencia de desplazamiento.

Algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son:

- Aumento en las pérdidas por efecto Joule (I^2R).
- Sobrecalentamiento en conductores del neutro.
- Sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores y cables, reduciendo su vida.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla de bancos de capacitores.
- Falla de transformadores.
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.

Los efectos dependerán de la proporción que exista entre la carga no lineal y la carga total del sistema, aunado a que se debe mantener la distorsión dentro de los límites establecidos por las normas.

Generalmente cuando la carga no lineal representa menos del 20% de la carga total, la distorsión armónica en corriente estará dentro de los límites establecidos en IEEE 519, sin que exista la necesidad de efectuar algún tipo de filtrado.

Si se cuenta con equipo electrónico sensible en plantas industriales o instalaciones médicas, donde las cargas no lineales sean solo una pequeña proporción, pueden llegar a ocurrir problemas en su funcionamiento atribuibles al sistema de puesta a tierra, conmutación de capacitores remotos, transitorios, o distorsión armónica producida por otros usuarios, debiendo de identificar las causas y tomar las acciones correctivas, que pudiera requerir la instalación de protecciones o filtros.

Los problemas causados por la distorsión armónica, ocurren usualmente cuando la carga no lineal representa más del 20% de la total y por la presencia de bancos de capacitores se presentan condiciones de resonancia.

4.1 Impacto en la vida de los equipos

Los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada, sin embargo, cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla.

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando lo siguiente:

1. La sobre elevación de 10 °C en la temperatura del aislamiento en conductores, reduce su vida a la mitad.
2. Un incremento del 10% en la tensión nominal del dieléctrico de un capacitor, reduce su vida a la mitad.

Estudios realizados sobre los efectos de la distorsión armónica, muestran reducciones de 20% a 30% en la vida de capacitores y de 10% a 20% en la vida de transformadores.

4.2 Condiciones de resonancia

En un sistema con cargas no lineales, las corrientes armónicas fluyen hacia la red a través del transformador de distribución.

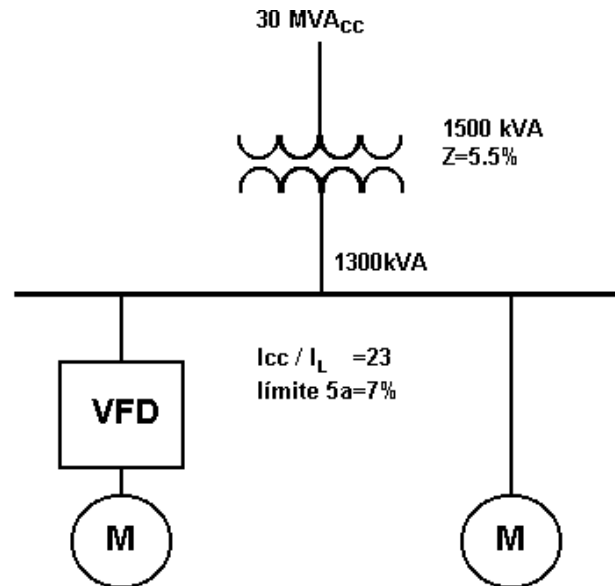


Fig. 4.2.1) Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales

Al no existir capacitores en la red, el espectro de corriente se distribuye en los diferentes componentes de la misma, sin variar su composición relativa, aunque su magnitud dependerá de sus admitancias respectivas, sin que se magnifiquen las corrientes armónicas.

Los mayores problemas en las redes eléctricas relacionados con la distorsión armónica, se presentan al instalar capacitores para compensar el factor de potencia de desplazamiento en presencia de cargas no lineales significativas.

Un voltaje con contenido armónico que alimenta a bancos de capacitores, provoca que su corriente se incremente ya que su impedancia se reduce con la frecuencia.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.2.1)$$

La magnitud del incremento de la corriente eficaz con relación a la corriente nominal fundamental, es función del contenido armónico de la señal de voltaje.

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \sqrt{1 + 9\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + 25\left(\frac{V_5}{V_1}\right)^2 + \dots} \quad (4.2.2)$$

Los capacitores al ser cargas lineales no generan armónicas, pero si las magnifican, produciéndose disparos frecuentes de sus interruptores o fallas en los mismos capacitores.

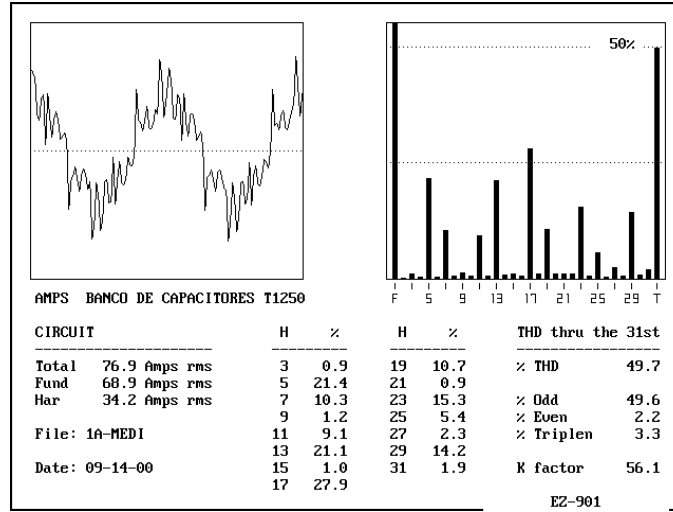


Fig. 4.2.3) Corriente en capacitor instalado en sistema con cargas no lineales

La instalación de bancos de capacitores en el lado de baja tensión del transformador de distribución produce una resonancia paralela con la reactancia inductiva de la fuente.

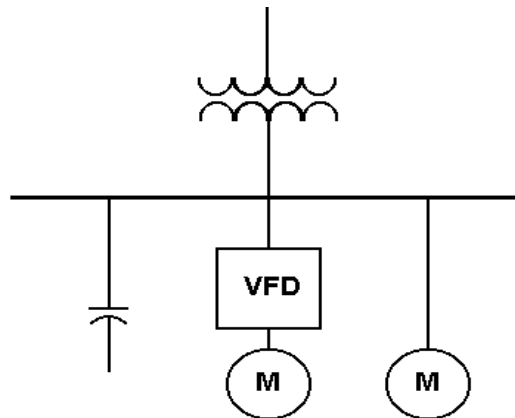


Fig. 4.2.4) Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales a la que se agregan capacitores

4.3 Efectos en los transformadores

En los transformadores de propósito general la potencia nominal esta definida para señales senoidales de voltajes balanceados y corrientes que no excedan de 0.5% THD, en una magnitud dada que no se exceda el límite de elevación de temperatura, estableciéndose dichos parámetros en la placa de datos.

Durante su operación, los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos los cuales degradan el sistema de aislamiento aceite/ papel, siendo la temperatura excesiva, la presencia de oxígeno y humedad combinadas con los esfuerzos eléctricos los factores principales que aceleran dicha degradación. Como causas secundarias se ubican los esfuerzos mecánicos originados por la excitación del núcleo y corto circuitos, así como los ácidos y lodos como productos generados por la descomposición del aceite.

El proceso de degradación del sistema aislante aceite / papel evoluciona gradualmente hasta presentarse la falla en el transformador de potencia. En México, la estadística de fallas de transformadores de potencia de la CFE en 1999 está clasificada de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia.

Tipo de falla	Frecuencia de Ocurrencia
Problemas de aislamiento en devanados	49%
Boquillas	26%
Cambiador de derivaciones	10%
Explosiones por incendio	3%
Núcleo	2%
Otras causas	10%

Las corrientes armónicas producen un calentamiento adicional en los devanados de los transformadores, por el incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de eddy, que son función tanto de la corriente eficaz que circula como de la frecuencia al cuadrado de la señal, debiéndose de considerar su capacidad en forma reducida con respecto a su nominal, cuando alimentan cargas no lineales de acuerdo al estándar ANSI/IEEE C.57.110 . La distorsión en voltaje causa pérdidas adicionales en el núcleo pero su impacto es poco significativo.

Esta situación explica los incrementos considerables en la temperatura de los transformadores que alimentan cargas no lineales, aun cuando la corriente de carga este por debajo de su capacidad nominal, exponiéndose a fallas prematuras.

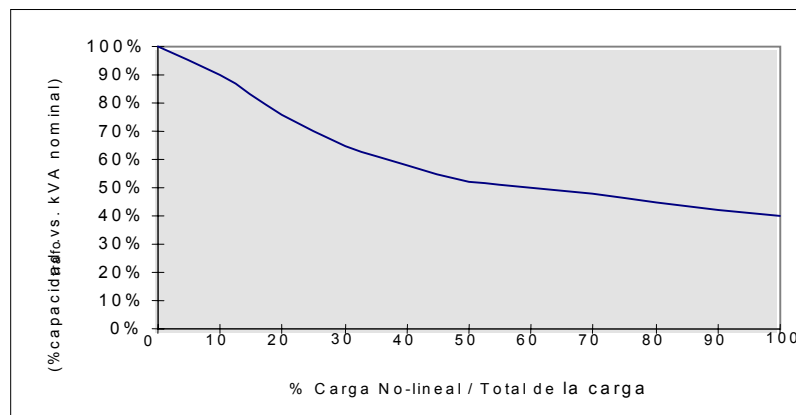


Fig. 4.3.1) Reducción en la capacidad de transformadores con relación a la carga no lineal que alimenta

La capacidad disponible del transformador puede llegar a ser únicamente el 50% de su nominal, cuando el 70% de su carga es no lineal, aplicando típicamente a transformadores de 440 / 220V que alimentan en su totalidad equipo electrónico. En los transformadores principales de distribución la reducción es menos severa debido a la cancelación de armónicas entre diversas cargas.

Underwriters Laboratories (UL) establece el método denominado factor K para transformadores secos, que es un índice de la capacidad del transformador para soportar los efectos del calentamiento producidos por las cargas no lineales, siendo diseñados para operar a su capacidad nominal con corrientes que tengan niveles de distorsión de acuerdo a dicho factor, sin que se excedan los límites nominales de elevación de temperatura. Los valores de factor K normalizados en transformadores son 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, siendo los mas usados 4, 13 y 20.

Algunas de las ventajas y características de diseño de los transformadores con factor K son:

- Incorporan un blindaje electrostático entre los devanados primario y secundario para la atenuación de picos de voltaje, ruido de línea y transitorios
- Ciertos fabricantes elaboran los devanados utilizando tiras de lámina (foil), generalmente de aluminio, en lugar de alambre magneto para reducir las corrientes de eddy y minimizar el calentamiento adicional. Así mismo, se tiene la ventaja de reducir los esfuerzos por voltaje entre las capas de los devanados ya que se utiliza una vuelta por capa.
 - Por ejemplo, si en el diseño de un transformador de 200V se consideran 10V por vuelta, usando alambre y definiendo 2 capas se tienen hasta 200V entre 2 espiras contiguas de 2 diferentes capas, pero para devanados con lámina se tienen 20V entre capas contiguas.
 - En el arreglo donde se utilizan láminas se puede devanar el primario y secundario en la misma altura axial reduciendo su volumen y las corrientes de eddy.
- La barra de neutro esta dimensionada para manejar el 200% de la corriente de línea
- Ocupan menos espacio que los convencionales
- Tienen una menor corriente de inrush

El *factor K* es un índice que considera las pérdidas adicionales que las corrientes de eddy provocan en el transformador, debido a la presencia de armónicas, siendo proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Un *factor K* unitario corresponde a una corriente senoidal pura.

$$\text{Factor K} = \frac{\sum_1^h (h^{2*} [I_h]^2)}{\sum_1^h (I_h)^2} \tag{4.3.1}$$

donde h : orden armónico
 I_h : contenido armónico individual

Considerando un rectificador trifásico, se calcula su *factor k* y la máxima corriente que el transformador puede manejar con respecto a su nominal.

h	I_h %	I_h^2	$h^2 I_h^2$
1	100	10,000.00	10,000.00
5	17.5	306.25	7,656.25
7	11	121.00	5,929.00
11	4.5	20.25	2,450.25
13	2.9	8.41	1,421.29
17	1.5	2.25	650.25
19	1	1.00	361.00
Suma		10,459.16	28,468.04

Factor K	$\sum h^2 I_h^2 / \sum I_h^2$	2.72
I_{max}	$(1.15/1+0.15K)^{.5}$	90.4%

Tabla 4.3.1) Cálculo del factor k para un transformador que alimenta a un rectificador

Cuando las pérdidas parásitas de los devanados de los transformadores a frecuencia fundamental son multiplicadas por el *factor K* se obtienen las pérdidas reales causadas por las corrientes armónicas.

$$P_{ec} = P_{ec \text{ fund}} * \text{factor } k \tag{4.3.2}$$

donde:
 P_{ec} : Pérdidas por corrientes de eddy reales
 $P_{ec \text{ fund}}$: Pérdidas por corrientes de eddy a frecuencia fundamental

En el caso de equipo de cómputo, la CBMA (Computer Business Manufacturer Association) establece un procedimiento aproximado para determinar la capacidad disponible de un transformador, en el que considera que las armónicas de bajo orden son las dominantes requiriendo conocer la corriente pico y la corriente eficaz de la carga.

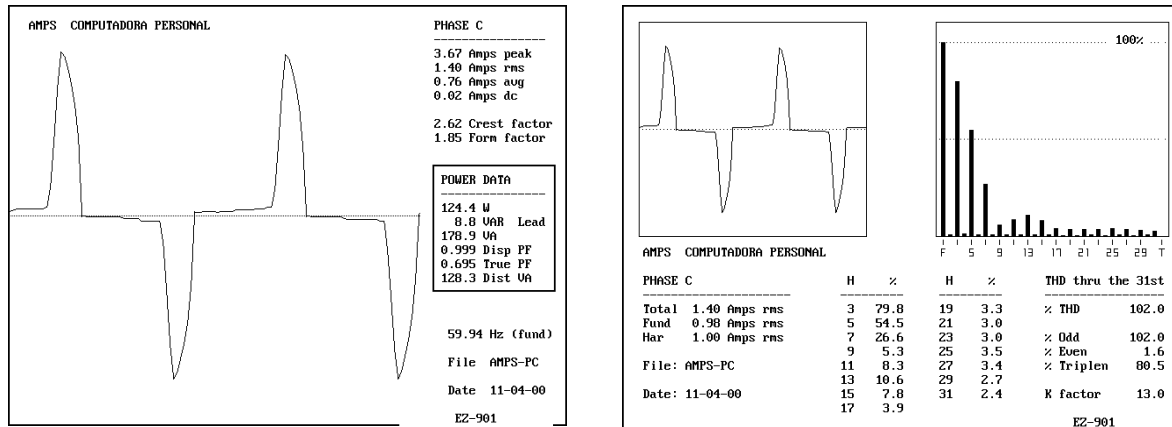


Fig. 4.3.2) Forma de onda y espectro armónico de voltaje y corriente de una Computadora Personal

$$\text{Factor de degradación} = \frac{1.4142}{I_{\text{pico}} / I_{\text{eficaz}}} \quad (4.3.3)$$

Para un transformador que alimente un grupo de computadoras cuya forma de onda individual sea la mostrada en la Fig. 4.3.2 el factor de degradación es:

$$\text{Factor de degradación} = \frac{1.4 \cdot 1.4142}{3.67} = 0.54$$

Por lo que un transformador que opere bajo estas condiciones, puede proporcionar el 54% de su capacidad nominal.

Otro efecto perjudicial ocurre cuando las cargas no lineales consumen su corriente en fracciones de un semiciclo que coincide con el valor máximo de voltaje, tal como sucede en los circuitos que alimentan a computadoras personales, afectando la regulación de tensión del sistema.

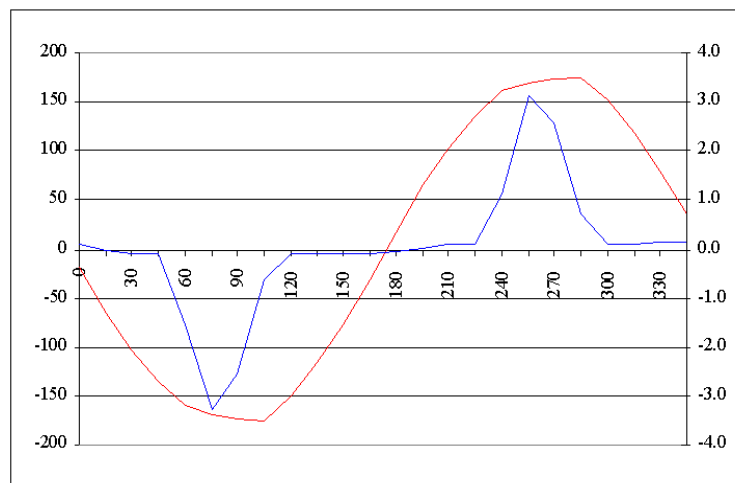


Fig. 4.3.3) Corriente que ocurre cerca del valor máxima de Voltaje, deformándolo

En resumen los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- Reducción de la eficiencia provocada tanto por el incremento en la corriente eficaz como por las corrientes de eddy que son función del cuadrado de la frecuencia
- Incremento en los costos de operación
- Capacidad de operación reducida con relación a su nominal
- Inversión en capital adicional
- Incremento en la temperatura, pudiendo exceder los límites de elevación sobre la temperatura ambiente, provocando fallas prematuras
- Incremento en los costos de mantenimiento por servicio y por reemplazo
- Reducción de la productividad de la empresa por paros inesperados

4.4 Efectos en los motores

La gran mayoría de los motores de inducción fueron diseñados para operar con ondas senoidales, siendo la corriente fundamental en fase con el voltaje la que produce trabajo útil en la flecha en términos de par y velocidad.

Cuando un motor es alimentado con una señal de voltaje distorsionado, sus componentes armónicos generan calor en los devanados lo que incrementa su resistencia y reduce su eficiencia.

Cuando un motor es alimentado por un VFD, esta sujeto a señales de alta frecuencia, calentándose, reduciendo su eficiencia y acortando su vida, por lo que en ocasiones deben sobredimensionarse para soportar estas condiciones o utilizar motores para uso con inversores (inverter duty).

La corriente fundamental produce un par que rota en el sentido de giro del motor a una velocidad definida por su frecuencia radial. Las señales de secuencia negativa producen pares en sentido inverso, cuyas velocidades de rotación dependen del orden armónico.

La interacción de los pares de diferentes velocidades y sentidos de giro, pueden producir pares pulsantes, causando vibración y esfuerzos en las partes mecánicas del sistema, repercutiendo en su eficiencia.

Las armónicas de secuencia cero, no producen pares rotativos, solo agregan calentamiento al motor.

Los motores de alta eficiencia son menos sensibles a la distorsión armónica comparados con los motores estándar, debido a su mayor capacidad térmica y factores de diseño que minimizan las pérdidas parásitas o indeterminadas, aun cuando su eficiencia se ve reducida por el incremento en las pérdidas.

En resumen, los efectos mas significativos producidos por las armónicas en los motores son:

- Incremento de pérdidas por calor
- Reducción del par efectivo en la flecha
- Vibración
- Reducción de eficiencia
- Disminución de su vida

5.0 REDUCCION DE ARMONICAS

En las plantas industriales se busca operar a factores de potencia superiores a 0.90 para evitar la penalización por este concepto e incluso es conveniente alcanzar valores cercanos a la unidad, que típicamente se ubican en un factor de potencia de 0.97, para lo cual se instalan capacitores que pueden provocar resonancias paralelas en el rango de la 3ª y 16ª armónica.

En una red en la que la proporción de cargas no lineales con relación a la carga total es superior a 10%, no se deben instalar capacitores ya que la distorsión armónica se incrementará provocando problemas en los equipos. Incluso ha sucedido que usuarios que solo tienen cargas lineales, experimentan fallas en sus capacitores y distorsión en voltaje debido a la importación de las armónicas de otros usuarios que se alimentan de la misma red de alta tensión.

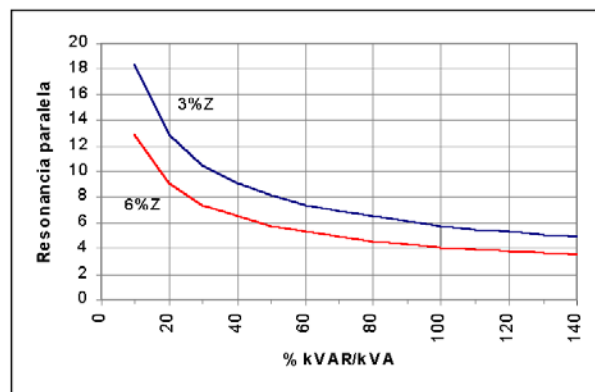


Fig. 5.1.1) Armónica en que ocurre la resonancia paralela en función de la relación kVAR capacitores / kVA transformador para voltajes secundarios de 480V e impedancia del transformador de 3% y 6%

En los sistemas eléctricos donde el contenido armónico de las señales está afectando su desempeño, se instalan filtros, con el propósito de reducir la distorsión, aproximando dichas señales a la forma de onda senoidal.

Los filtros son equipos cuyo propósito es interactuar con una frecuencia específica o rango de frecuencias de una señal dada, teniendo el mayor impacto cuando se instalan los mas cercano posible a las cargas no lineales.

5.1 Efectos asociados a la reducción de armónicas

Con la reducción de armónicas se obtienen beneficios tales como:

- Elevación del factor de potencia
- Reducción de consumo de energía reactiva de las redes de C.F.E.
- Reducción de pérdidas producidas por efecto Joule (I^2R)
- Prolongar la vida de equipo electrónico
- Reducción de sobrecalentamientos en el cableado
- Reducción de pérdidas en transformadores
- Incremento en la eficiencia y prolongación de la vida de motores

5.2 Reactores de Línea

Los reactores de línea se diseñan para manejar corrientes distorsionantes considerando, tanto la corriente fundamental como la armónica y el efecto de las frecuencias que esto implica, instalándose entre la alimentación y el VFD o grupo de estos.

Para obtener la reducción del contenido armónico deseado, se debe instalar un reactor de línea cuya corriente nominal fundamental sea cercana a la de operación, ya que si se sobredimensiona, el THD que se conseguirá será muy por encima del calculado.

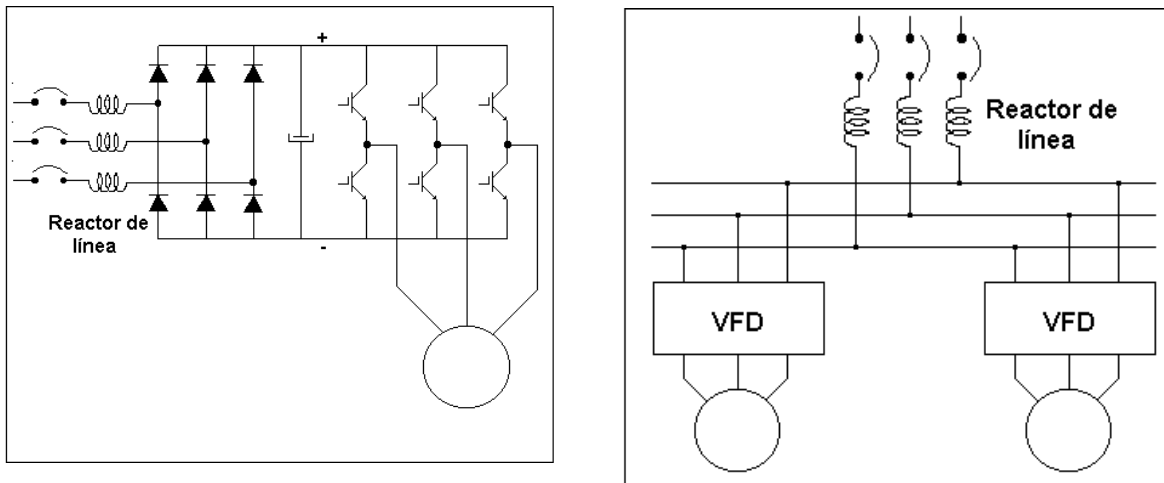


Fig. 5.2.1) Conexión de reactores de línea a) VFD individual b) Grupo de VFD

Los efectos que se producen al instalar los reactores de línea son:

- Reducen la razón de crecimiento de la corriente di/dt , mejorando la forma de onda.
- Limitan la corriente de corto circuito en caso de que la falla ocurra en la alimentación del VFD.
- Amortiguan los picos generados por la conmutación de capacitores en la red, reduciendo los disparos y fallas de los VFD.
- Producen una caída de tensión proporcional a su impedancia, reduciendo el voltaje en la alimentación del VFD.

En forma alternativa, se puede instalar un reactor monofásico entre la salida del puente rectificador y el capacitor, denominado reactor de obstrucción en CD (DC choke), considerando que en este caso su porcentaje de impedancia sería el doble con respecto al de un reactor de línea para lograr el mismo efecto, es decir, si la reducción de armónicas deseada se consigue con un reactor de línea de 3%, la impedancia del reactor de obstrucción equivalente sería de 6%.

5.3 Filtros Sintonizados

Son filtros pasivos que se conectan en paralelo al sistema de distribución general o a cargas individuales significativas, para reducir el contenido armónico generado por los dispositivos no lineales, además de proporcionar potencia reactiva fundamental para compensar el factor de potencia de desplazamiento, debiendo de coordinar su operación con la demanda de la carga.

Cuando los filtros se instalan en el bus principal de distribución, su potencia total esta conformada por grupos o pasos que son accionados por contactores y que a su vez son comandados por un regulador que determina los requerimientos específicos de potencia reactiva del sistema ante una condición dada, permitiendo compensarla en una amplia gama de demandas.

En aquellos sistemas en los que se cuenta con diversas cargas no lineales de potencia significativa y de funcionamiento prolongado, se puede instalar un filtro para cada una de estas cargas, coordinando su operación y reduciendo tanto la corriente fundamental como la distorsionante desde el punto de conexión.

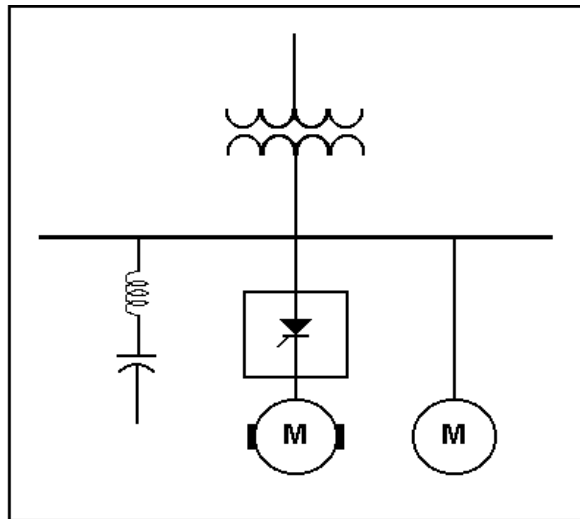


Fig. 5.3.1) Conexión del filtro desintonizado en paralelo al bus de distribución del sistema

Están compuestos por una inductancia en serie con un capacitor que puede estar conectado en delta o en estrella y cuyos valores definen la frecuencia de sintonía.

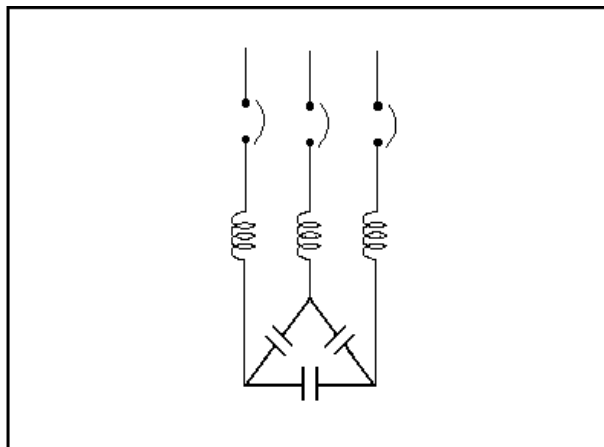


Fig. 5.3.2) Arreglo de Filtro sintonizado con capacitor en conexión delta

La frecuencia de sintonía o frecuencia de resonancia serie, es aquella en la que la impedancia del filtro se hace cero, provocando que las corrientes de esa frecuencia fluyan en su totalidad a través de él.

Se elige generalmente un valor de frecuencia de sintonía que sea ligeramente inferior a la menor armónica dominante para que atenúe a esta y a las de orden superior, comportándose el filtro a partir de este punto como un elemento inductivo, por lo que las corrientes correspondientes a armónicas de mayor orden ya no estarán expuestas a condiciones de resonancia, reduciéndose efectivamente la potencia distorsionante del sistema.

Al instalar los filtros sintonizados se debe considerar que su corriente estará compuesta por la corriente de la potencia reactiva fundamental y por la corriente distorsionante producida tanto por las cargas no lineales del usuario, como por la importación de la red de alta tensión.

El reactor utilizado en el filtro debe soportar la corriente de diseño sin que se deteriore su aislamiento y mantener su linealidad con la sobrecarga armónica, siendo conveniente que cuente con un detector de sobrecalentamiento que lo proteja ante la importación excesiva de armónicas.

Los capacitores operarán a voltajes superiores a los de línea debido al efecto del reactor en serie, debiendo de diseñarse para no exceder los límites establecidos en el estándar IEEE 18-1980.

Voltaje pico	120%
Corriente máxima	180%
KVAR	135%
Voltaje eficaz	110%

Tabla 5.3.1) IEEE 18-1980 Límites en capacitores con relación a sus valores nominales

Si la carga no lineal del sistema comprende una combinación de motores de CD, VFD y computadoras, es conveniente, iniciar mitigando las armónicas con reactores de línea para los VFD y con transformadores delta – estrella o filtros de 3ª armónica para las cargas monofásicas y que el filtro sintonizado absorba su remanente así como las armónicas generadas por los motores de CD, compensando adicionalmente el factor de potencia de desplazamiento.

Es importante tomar en cuenta las probables ampliaciones de carga no lineal al dimensionar los filtros ya que ante esta nueva condición se pueden exceder los límites de diseño, provocando su falla.

En los sistemas trifásicos es poco común encontrar señales con 2ª armónica, que implica una señal asimétrica, sin embargo, cuando los controladores de los puentes de tiristores no funcionan correctamente, esta situación se presenta, pudiendo causar problemas en el filtro ya que el núcleo del reactor se satura con la componente de corriente directa que acompaña a la 2ª armónica, sobrecalentándolo.

Los efectos más importantes de los filtros sintonizados en el sistema son:

- Reducción considerable de las armónicas en el sistema.
- Compensar el factor de potencia a frecuencia fundamental.

5.4 Filtros Desintonizados

En esencia los filtros desintonizados tienen el mismo arreglo y conexión a la red que los sintonizados pero se sintonizan a una frecuencia que no se espera que exista en el sistema y muy por debajo de la armónica característica de menor orden, típicamente entre la 3ª y 4ª armónica.

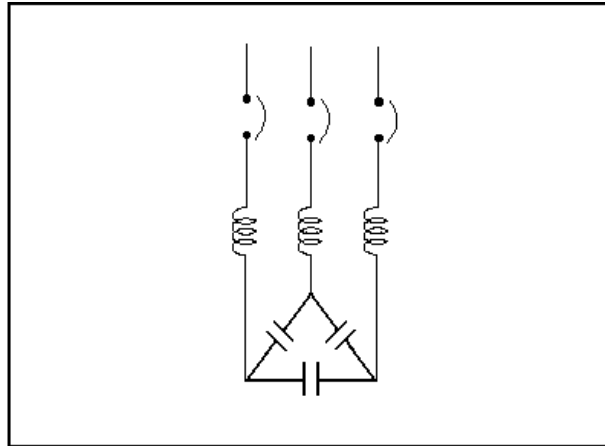


Fig. 5.4.1) Arreglo de Filtro desintonizado

Su aplicación principal es cuando se requiere compensar el factor de potencia de desplazamiento en un sistema donde la proporción de la carga no lineal con relación a la total es inferior al 40% y se desea proteger a los capacitores contra sobrecargas armónicas.

Al establecer la frecuencia de sintonía en un valor bajo, presentará una impedancia reducida a mayores frecuencias absorbiendo una proporción de armónicas.

Los filtros desintonizados tienen la ventaja con respecto a los sintonizados de ser más económicos, ya que sus componentes están expuestos a corrientes armónicas menores y pueden funcionar adecuadamente ante ciertas ampliaciones de carga no lineal, sin embargo su aplicación no será conveniente cuando la carga distorsionante exceda el 40% de la total y se requiera cumplir con los límites establecidos en la norma IEEE 519

Su funcionamiento debe estar coordinado con la demanda de potencia reactiva de la carga para evitar sobrecargar al transformador de distribución.

Los efectos más importantes de los filtros desintonizados en el sistema son:

- Proteger a los capacitores.
- Evitar resonancias.
- Compensar el factor de potencia de desplazamiento.