

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN A LAS CORRIENTES Y VOLTAJES ARMÓNICOS

En un sistema eléctrico de potencia (SEP) ideal, el voltaje (tensión) suministrado a los usuarios y la corriente de carga son ondas perfectamente senoidales, en la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, así que las formas de onda son a veces bastante distorsionadas.

La desviación de la senoide perfecta se expresa en términos de *Distorsión Armónica (DH)* de las formas de onda de corriente y voltaje.

La Distorsión Armónica (*DH*), anteriormente fue causada por la saturación magnética de transformadores o por ciertas cargas industriales, tales como hornos de arco eléctrico ó soldadoras. Los efectos de las armónicas se dieron en las máquinas síncronas y de inducción, en interferencia telefónica y fallas en capacitores de potencia. En el pasado, problemas armónicos fueron tolerados por el diseño conservador del equipo y por las conexiones delta-estrella aterrizada de los transformadores.

Actualmente, se ha incrementado la instalación de cargas no lineales (convertidores estáticos de potencia aplicados a controladores de velocidad, equipo controlado por computadoras, trenes eléctricos, soldadoras, hornos de arco eléctrico, molinos, remachadoras, tv`s, taladros, hornos de microondas, lámparas electrónicas y de arco, etc.), la mayoría, cargas no lineales operan a bajo factor de

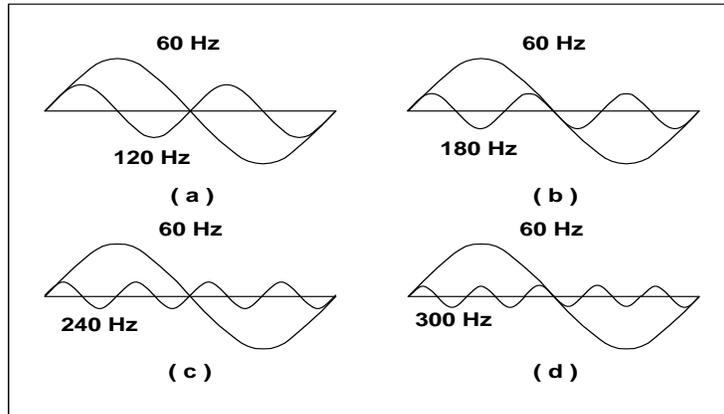
potencia (FP), por lo que se tienen que compensar los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), instalando bancos de capacitores en plantas industriales, comerciales y sistemas de distribución de las empresas suministradoras, con lo que se busca mejorar el FP, reduciendo las pérdidas y obteniendo una mejor regulación de voltaje. Con la instalación de un banco de capacitores se da origen a la resonancia paralelo entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva de la fuente que da como resultado corrientes oscilatorias de gran magnitud y consecuentemente altos voltajes armónicos.

Reconociendo que muchas nuevas cargas que están siendo conectadas a los sistemas eléctricos (tales como pc's) son sensibles a la distorsión armónica, los problemas armónicos deberán ser estudiados y tomados en consideración durante la planeación de los sistemas eléctricos, ya que afectan tanto a empresas industriales y comerciales como de suministro eléctrico.

Definición de Armónica: El término Armónica se origina en el campo de la acústica, y se refiere a la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de repetición básica (fundamental). Similarmente para señales eléctricas una armónica es definida como una componente senoidal de una onda periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Así en sistemas de potencia de 60 Hz, una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por: $f_{\text{armónica}} = n \times 60 \text{ Hz}$.

Donde: n es un entero y es el orden de armónica.



La Fig. 1.1. Muestra una onda senoidal de 60 Hz y su a)2^a, b)3^a, c)4^a Y d)5^a Armónica.

✚ Característica de la Distorsión Armónica (DH) composición de una onda distorsionada.

La Fig.1.2 Muestra el efecto de superposición de una onda armónica sobre la fundamental. Cuando la onda e_1 de 60 Hz (de 1 pu de magnitud) se combina con la onda e_2 que es la tercera armónica en fase con la fundamental (de magnitud 0.3 pu) y da como resultado una forma de onda distorsionada e_r con la misma frecuencia que la fundamental.

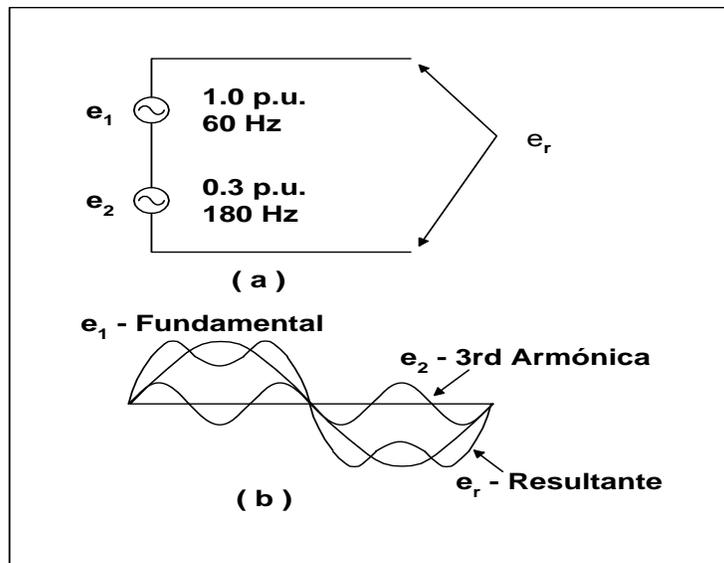


Fig. 1.2. (a) Circuito, (b) Onda Resultante (e_r) Obtenida de la superposición de la 3^a armónica (e_2) En fase sobre la fundamental (e_1).

Usando otras frecuencias armónicas y otras amplitudes, podemos producir una forma de onda distorsionada de alguna onda concebible. Por ejemplo la onda periódica cuadrada de la fig. 1.3 es creada por la superposición de un número infinito de armónicas impares (con amplitudes decrecientes) sobre la fundamental de 1 pu de magnitud. La n ésima armónica (donde n es un entero impar) tiene una frecuencia de $60n$ y una amplitud de $1/n$ en pu's de la amplitud fundamental.

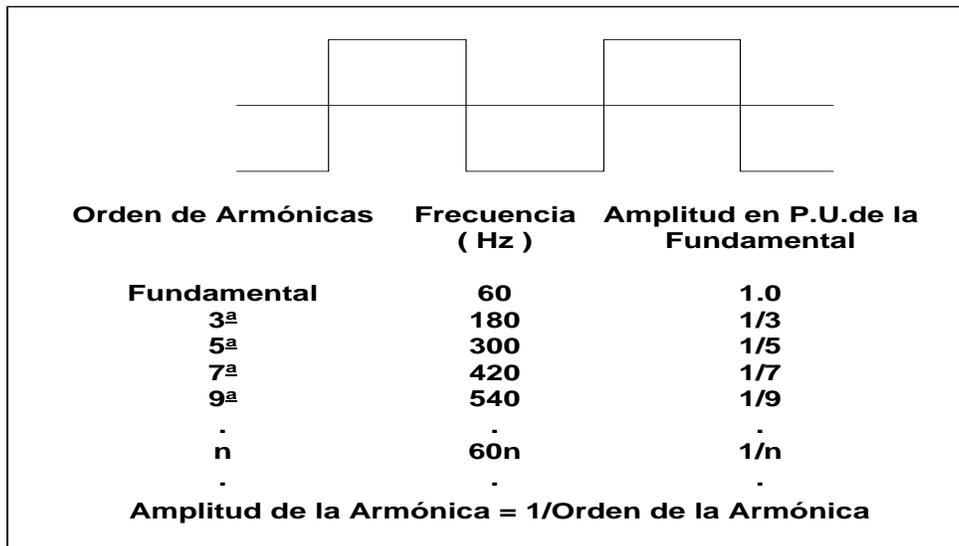


Fig.1.3. Onda cuadrada creada por la superposición de un número infinito de armónicas impares sobre la fundamental de 1 p.u.

🔧 Descomposición de una onda distorsionada.

Así como una forma de onda periódica distorsionada puede ser compuesta, ésta también puede ser descompuesta en una onda fundamental y sus armónicas.

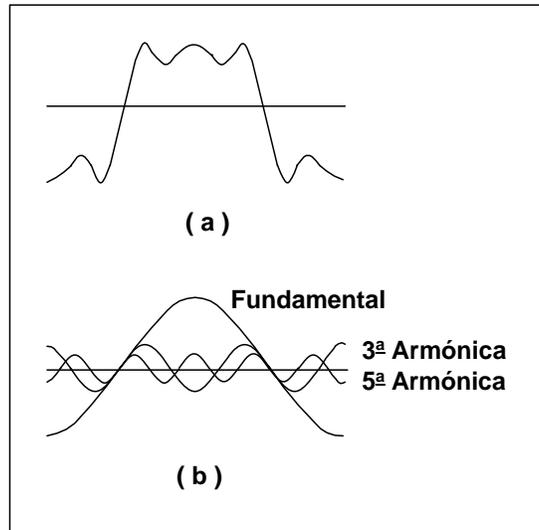


Fig. 1.4. (a) Onda Distorsionada, (b) Su descomposición en una fundamental y sus componentes armónicas.

La habilidad para descomponer alguna forma de onda periódica considerando su grado de distorsión, es significativa desde el punto de vista de análisis de sistemas, así se puede considerar separadamente cada componente senoidal de la onda distorsionada y sus componentes armónicas.

✚ POTENCIA FUNDAMENTAL Y ARMÓNICA.

En circuitos de C.A., el voltaje y la corriente fundamental producen potencia fundamental.

$$P_{\text{fund}} = V_{\text{fund}} I_{\text{fund}} \cos \theta_1 \quad (\text{Representa potencia útil})$$

Dónde θ_1 es el ángulo de fase entre V_{fund} e I_{fund} .

$P_{\text{arm}} = V_{\text{arm}} I_{\text{arm}} \cos \theta_2$ (potencia armónica disipada en forma de calor, efecto indeseable, excepto en ciertos procesos industriales que requieren calor). Las corrientes y voltajes armónicos deberán ser tan pequeños como sea posible.

✚ RELACIÓN ENTRE COMPONENTES ARMÓNICOS Y DE SECUENCIA

Cuando las armónicas son generadas en sistemas trifásicos, ellas pueden ser analizadas en términos de componentes de secuencia. En una red balanceada donde todas las armónicas son el resultado de la distorsión balanceada trifásica de los voltajes de secuencia positiva, hay un patrón que relaciona las armónicas con su correspondiente secuencia, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1- Relación entre secuencia de fase y orden armónico

Sec de fase	Positiva	Negativa	Cero
Orden de	1	2	3
La	4	5	6
Armónica	7	8	9

En la fig.1.5. Se muestra que las corrientes o voltajes fundamentales están balanceados, además, la 3^a armónica de la fase "a", la 3^a armónica de la fase "b" y la 3^a armónica de la fase "c," están en fase entre ellas y son de igual magnitud (sec 0), las componentes de 5^a armónica de las tres fases, están fuera de fase entre ellas por 120 grados, con una secuencia a,c,b (secuencia negativa).

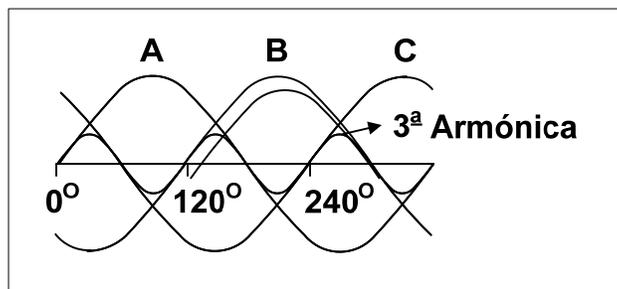


Fig. 1.5. Corrientes o voltajes trifásicos balanceados con 3^a armónica,

La 5ª armónica es importante cuando se considera el comportamiento de motores y generadores ya que causa calentamiento en el rotor y par negativo en las máquinas. La tabla 1. Muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica

✚ FACTOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICO (DF).

El factor de distorsión o factor armónico expresa la cantidad de distorsión armónica contenida en la onda distorsionada y es determinado por la siguiente ecuación:

$$DF(\%) = \frac{\sqrt{\text{SUMA DE LOS CUADRADOS DE TODAS LAS AMPLITUDES ARMÓNICAS}}}{\text{AMPLITUD DE LA FUNDAMENTAL}} \times 100$$

Para ilustrar la aplicación de ésta ecuación, considere la forma de onda distorsionada de corriente de la fig.1.6.

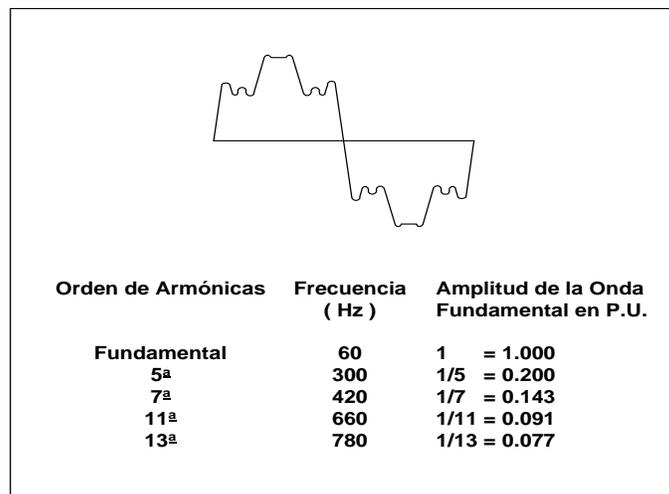


Fig. 1.6. Contenido armónico de una onda distorsionada.

$$DF = \frac{\sqrt{(0.2)^2 + (0.143)^2 + (0.091)^2 + (0.077)^2}}{1.0} \times 100 = 27\%$$

✚ IMPORTANCIA DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Los problemas de distorsión fueron observados por el personal de operación de empresas suministradoras (1910) y dicha distorsión fue causada por cargas no-lineales conectadas a los sistemas de distribución de las empresas suministradoras. Por ejemplo, un horno de arco eléctrico es una carga no lineal que demanda corrientes no senoidales (ricas en armónicos). En el pasado, las armónicas a menudo fueron mitigadas con el uso de los transformadores con conexión delta-estrella aterrizada. Actualmente es necesario resolver problemas de armónicas por tres razones principales:

- 1.- El uso de convertidores estáticos de potencia (CEP) han proliferado recientemente. (convertidores estáticos de potencia se refiere a dispositivos semiconductores que convierten potencia de una frecuencia a otra.)
- 2.- Las resonancias de red se han incrementado.
- 3.- El equipo del sistema eléctrico de potencia y las cargas son más sensibles a las armónicas.

La mayor aplicación de los CEP, es en controladores de velocidad para motores que incrementan la eficiencia y mejoran el control de la velocidad. En la mayoría de las aplicaciones, las cargas con CEP demandan corrientes del sistema, que consisten de pulsos positivos y negativos, separados por intervalos de corriente cero.

Las armónicas generadas por el CEP se propagan a través del sistema causando la distorsión de voltaje en el bus remoto y las corrientes distorsionadas fluyen en

los circuitos de carga. La fig. 1.7 ilustra el efecto remoto causado por una fuente de armónicos en el sistema, este CEP, genera: 5^a, 7^a, 11^a y 13^a corrientes armónicas dominantes, el problema de armónicos con frecuencia se agrava con la tendencia a instalar bancos de capacitores para mejorar el FP y/o controlar voltaje.

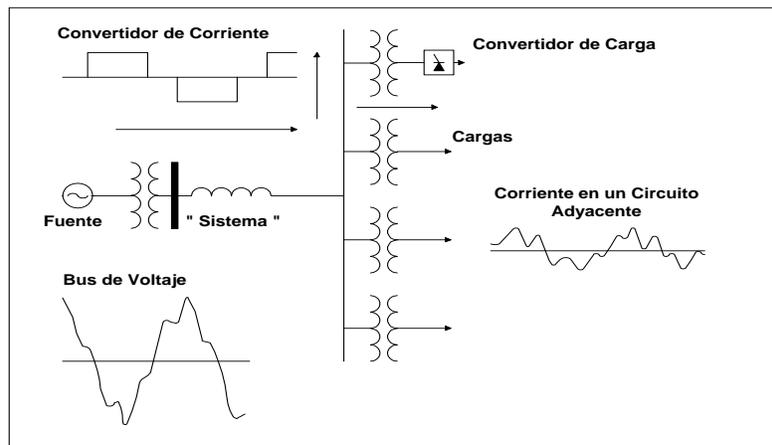


Fig. 1.7. Propagación de corrientes y voltajes armónicos a través del sistema de potencia.

Si una corriente armónica es inyectada (de una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia), una gran corriente de oscilación fluirá y causará fusión de fusibles y altos voltajes armónicos.

Los problemas con armónicas en la actualidad tienen consecuencias más serias y más extendidas que en el pasado, ya que los equipos utilizados son más sensibles a las armónicas, como ejemplos:

1.- Computadoras, máquinas herramienta controladas por computadoras y varios tipos de controladores digitales, son susceptibles a las armónicas.

2.- Las armónicas pueden dañar por calentamiento al dieléctrico de cables subterráneos.

3.- Las fallas en los bancos de capacitores con frecuencia se deben a los armónicos.

4.- Los armónicos pueden ser las causantes de problemas en las comunicaciones.

5.- Diseños modernos de generadores y transformadores, agravan los problemas térmicos causados por armónicas.