

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



ARMONICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE
ENERGIA ELECTRICA

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

GILBERTO REYES CALDERON

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1996

TM

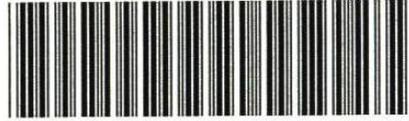
Z5853

.M2

FIME

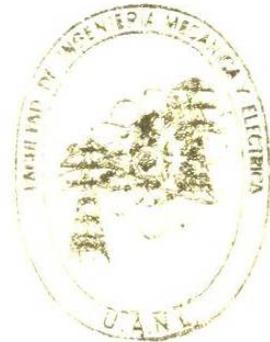
1996

R4



1020115478

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



ARMONICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE
ENERGIA ELECTRICA

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

GILBERTO REYES CALDERON

CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1995

0117-28260

TM
Z5853
.M2
FINE
1996
R4

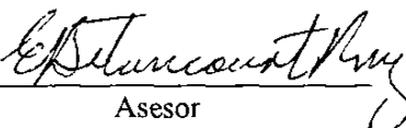


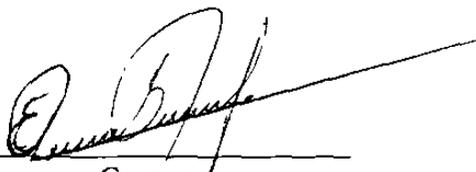
FONDO
TESIS

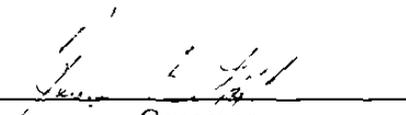
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica" realizada por el Ing. Gilberto reyes Calderón sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El comité de Tesis


Asesor
M. C. Enrique Betancourt Ramírez


Coasesor
M. C. Evelio Gonzalez Flores


Coasesor
Dr. Fernando Betancourt Ramírez


Vo. Bo.
M. C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolas de los Garza, N. L. 6 de junio de 1996

Agradecimientos

Al M. C. Enrique Betancourt Ramírez, asesor de tesis, por su constante orientación y dirección durante todo el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Fernando Betancourt Ramírez y al M. C. Evelio Gonzalez Flores, miembros del comité de tesis, por su interés en el presente trabajo.

Al Dr. Marcos García por proporcionar valiosa información sobre el tema de las armónicas.

Dedicatoria

A Gilberto y Yolanda Lizeth Reyes Gaytan

RESUMEN

Las armónicas son un tema de creciente interés debido a los muchos y variados efectos que ocasionan en las redes de distribución eléctrica; también ocasionan interferencias con los equipos de medición, protección, control y comunicación. Por otra parte la filosofía actual recomienda un aprovechamiento máximo de la energía eléctrica, lo cual conduce a un compromiso entre los proveedores y consumidores de mantener una buena calidad de la energía eléctrica en el punto de acoplamiento común (PAC), a este respecto ya se han emitido por parte de varias instituciones, entre ellas el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE), estándares que recomiendan los límites armónicos permitidos en el PAC.

Con este trabajo se pretende dar a conocer las fuentes y efectos principales de las armónicas en la red eléctrica y los equipos industriales utilizados en la transformación y aprovechamiento de la energía eléctrica, así como también exponer la metodología básica de análisis del problema armónico y los medios de supresión. Normalmente las armónicas no se eliminan completamente sino que se reducen sólo a niveles permisibles y seguros, normalizados por estándares, como los límites establecidos por el estandar 519 del IEEE. En los estudios armónicos se modelan equivalentes de la red eléctrica mediante paquetes computacionales con los que se obtiene valiosa información del comportamiento de la red ante fuentes armónicas, en este trabajo (capítulo 7) se expone un análisis básico mediante el paquete PSPICE.

LISTA DE TABLAS

Número	Título	Página
3.1	Causantes de cambios de amplitud D_u , armónicas K_u y asimetrías A_u de las tensiones en una red eléctrica trifásica.....	12
3.2	Corrientes armónicas características de un convertidor de 6 pulsos por unidad de la corriente fundamental.....	15
3.3	Corrientes armónicas (en A) de 3 tipos de televisores.....	15
3.4	Corrientes armónicas de un horno de arco en dos etapas del ciclo de fusión.....	16
3.5	Niveles armónicos promedios de los hornos de arco expresados como porcentajes de la fundamental	16
3.6	Armónicas y subarmónicas producidas por motores de inducción	18
3.7	Mediciones armónicas en convertidores CD de alto voltaje.....	20
6.1	Base para los límites armónicos de corriente	57
6.2	Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general	58
6.3	Límites de distorsión de voltaje.....	58
6.4	Valores máximos armónicos de voltaje permitidos en sistemas de potencia.....	59
7.1	Componentes armónicos en el puente rectificador 1	63
7.2	Componentes armónicos en el puente rectificador 2	64
7.3	Componentes armónicos en el primario del transformador 1	66
7.4	Componentes armónicos en el primario del transformador 2.....	67
7.5	Voltajes inducidos por las armónicas por las armónicas con compensación reactiva total y carga total.....	68
7.6	Voltajes inducidos por las armónicas por las armónicas con compensación reactiva total y carga parcial.....	71
7.7	Voltajes inducidos por las armónicas por las armónicas con compensación reactiva parcial y carga parcial.....	74

LISTA DE FIGURAS

Número	Título	Página
3.1	Definición de los valores de la ecuación (3.2)	14
4.1	Circuito de resonancia en paralelo.....	24
4.2	Circuito de resonancia serie.....	25
4.3	Impedancia del motor monofásico de inducción contra el orden armónico.....	29
5.1	Componentes de un sistema de medición de armónicas.....	34
5.2	Sistema digital para adquisición de datos armónicos.....	35
5.3	Sistema digital de adquisición de datos.....	36
5.4	Modelo para máquina de inducción para estudios armónicos.....	40
5.5	Modelo del transformador para estudios armónicos.....	41
5.6	Modelo de una carga lineal para estudios armónicos.....	41
5.7	Modelo para cargas no lineales por fuentes de corriente.....	42
6.1	Impedancia del filtro shunt contra la frecuencia.....	44
6.2	Tipos de filtros amortiguadores paso alto: a) Primer orden; b) segundo orden; c) tercer orden; d) tipo C.....	51
6.3	Ejemplo de diseño de filtro CA.....	54
6.4	Configuración básica para la eliminación armónica por compensación de flujo.....	55
7.1	Diagrama unifilar de la instalación de los convertidores.....	60
7.2	Circuito equivalente para modelación de la figura 7.1	62
7.3	Forma de onda de corriente en el puente rectificador 1	63
7.4	Forma de onda de corriente en el puente rectificador 2	64
7.5	Forma de onda de corriente en el primario del transformador 1.....	65
7.6	Forma de onda de corriente en el primario del transformador 2.....	66
7.3	Circuito considerando un convertidor	64
7.4	Equivalente del circuito de la figura 7.3.....	65

7.7 Diagrama unifilar de un solo convertidor69

7.8 Equivalente del circuito de la figura 7.7 70

7.9 Diagrama unifilar de un solo convertidor con compensación parcial.....72

7.10 Circuito equivalente de la figura 7.9.....73

NOMENCLATURA

AB	Ancho de banda
a_e	Constante que depende del material y espesor de laminas del núcleo de transformador.
a_b	Constante que depende de las dimensiones del núcleo del transformador.
a_n	Coefficiente coseno de la serie de Fourier.
a_o	Valor promedio de la función X(t).
B_f	Susceptancia de filtro.
B_m	Valor máximo del flujo magnético.
b_n	Coefficiente seno de la serie de Fourier.
C	Capacitancia.
C_n	Capacitancia a frecuencia resonante.
D	Distorsión de potencia aparente.
E	Eficiencia.
$-e_1$	Fuerza contraelectromotriz.
f	Frecuencia fundamental.
f_n	Frecuencia resonante.
f_p	Frecuencia resonante paralelo.
f_s	Frecuencia resonante serie.
G_f	Conductancia de filtro.
g_h	Constante de proporcionalidad definida por la ecuación (3.3)
HD_1	Distorsión de corriente.
HD_v	Distorsión de voltaje.
I_c	Corriente CD al final de la conmutación de convertidor estático.
I_d	Corriente real CD de convertidor estático.
IDM	Indice de distorsión del motor
I_h	Corriente armónica de un convertidor estático en el lado CA.
Im	Indica parte imaginaria de una función.
I_n	Corriente rms debida a la armónica n.

I_1	Corriente a la frecuencia fundamental.
$I(t)$	Corriente real.
I_{RMS}	Corriente RMS
k	Constante.
L	Inductancia; vida unitaria de lámpara incandescente.
L_{in}	Suma de inductancias efectivas de dispersión del estator y del rotor referidas estator.
L_n	Inductancia a frecuencia resonante.
n	Orden armónico.
N_1	Número de espiras del primario de transformador.
P	Potencia activa.
P_e	Pérdidas por corrientes parásitas.
P_h	Pérdidas armónicas.
P_{RL}	Pérdidas en el motor CA con alimentación senoidal.
pf	Factor de potencia.
Q	Potencia reactiva; factor de calidad de filtro.
R	Resistencia
Re	Indica parte real de una función.
R_n	Resistencia debida a la armónica n .
S	Potencia aparente
S_1	Carga resistiva.
S_r	Deslizamiento de motor CA.
S_t	Capacidad de transformador.
T	Período de la función $X(t)$.
t	Variable el tiempo.
T_r	Torque nominal de motor CA.
T_s	Torque en el arranque de motor CA.
TIF	Factor de influencia telefónica.
V_1	Voltaje primario de transformador.
V_n	Voltaje debido a la armónica n .
$V(t)$	Voltaje real.

- V_1 Voltaje a frecuencia fundamental.
- VDF Factor de distorsión de voltaje.
- $X(t)$ Función periódica dependiente del tiempo.
- X_1 Reactancia a frecuencia fundamental.
- Y_f Admitancia de filtro.
- Z_f Impedancia de filtro.
- δ Desajuste máximo de filtro.
- θ_n Angulo entre formas de ondas de voltaje.
- μ Angulo de conmutación.
- ν Exponente que depende del material del núcleo magnético del transformador.
- ϕ_n Angulo entre las formas de onda de corriente.
- ω_n Frecuencia angular de la armónica n.
- ω_0 Frecuencia angular fundamental.

INDICE

RESUMEN	I
LISTA DE TABLAS	II
LISTA DE FIGURAS	III
NOMENCLATURA	V
1. INTRODUCCION	1
2. ANALISIS ARMONICO	
2.1 Análisis de Fourier.	4
2.2 La transformada de Fourier.	6
2.3 La transformada discreta de Fourier.	7
2.4 La transformada rápida de Fourier.	8
2.5 Definición de corrientes y voltajes armónicos.....	8
3. FUENTES DE ARMONICAS	
3.1 Introducción	10
3.2 Convertidores estáticos de potencia	13
3.3 Hornos de arco	16
3.4 Motores y generadores	17
3.5 Transformadores.....	18
3.6 Condiciones imperfectas del sistema.....	19
3.7 Lámparas de alumbrado.....	21
4. EFECTO DE LAS ARMONICAS	
4.1 Introducción.....	22
4.2 Resonancias	23
4.3 Transformadores	25
4.4 Máquinas de corriente alterna	27

4.5 Interferencia con equipo de medición	29
4.6 Interferencia con equipo de control y protección.....	30
4.7 Interferencia con las comunicaciones	31
5. ANALISIS DE SISTEMAS CON CARGAS QUE GENERAN ARMONICAS	
5.1 Medición de armónicas.....	33
5.2 Análisis de redes con inyección armónica	36
5.3 Datos necesarios para realizar estudios armónicos	38
5.4 Modelado de los componentes de las redes eléctricas.....	39
6. ELIMINACION DE ARMONICAS	
6.1 Propósito de los filtros de armónicas	43
6.2 Criterios de diseño de filtros	45
6.3 Filtros sintonizados	47
6.4 Filtros amortiguadores	50
6.5 Ideas alternativas para la eliminación de armónicas.....	54
6.6 Prevención de armónicas.	56
6.7 Condiciones límite para la inyección de armónicas.....	57
7. EJEMPLOS DE ESTUDIOS DE ARMONICAS.	
7.1 Compensación reactiva total con carga total.....	60
7.2 Compensación reactiva total con carga parcial.....	68
7.3 Compensación reactiva parcial con carga parcial.....	72
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
8.1 Conclusiones del trabajo realizado.	75
8.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	76
9. BIBLIOGRAFIA	77

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Las armónicas son corrientes y voltajes que son múltiplos de la frecuencia fundamental -normalmente 50 o 60 Hz- de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), la fuente principal de armónicas en los SEP son los convertidores estáticos de potencia, que incluyen rectificadores para procesos electroquímicos y electrometalúrgicos, y convertidores que se usan como fuente de energía para transmisiones de velocidad ajustable (de CD y CA). Además hay otros dispositivos tales como los hornos eléctricos de arco y alumbrado por descarga (fluorescente, de vapor de sodio de alta presión, etc.), fuentes de energía para equipo electrónico, máquinas de control numérico y computadoras, prácticamente cualquier carga que se conecte a la red de energía y que requiera para su funcionamiento de una corriente no senoidal será una fuente de corrientes armónicas.

Con referencia a las armónicas en los SEP, fue principalmente en Alemania en la década de 1920 a 1930 cuando se efectuaron los primeros estudios sobre la distorsión armónica causada por los convertidores estáticos de potencia. La fuente de mayor influencia sobre la teoría de los convertidores estáticos publicada durante ese período en idioma inglés fue el libro de Rissik [1]. En 1945 J. C. Read [2] escribió un documento clásico sobre el mismo tema, que sirvió como guía para los estudios armónicos. Durante la década de 1950 y 1960 se avanzó considerablemente en el estudio de las armónicas producidas por los convertidores. Durante ese período se realizaron considerables publicaciones, las cuales editó Kimbark [3] en un libro que contiene más de 60 ponencias. De ahí en adelante el tema de las armónicas se ha discutido regularmente en reuniones internacionales y han surgido grupos de investigación que

periódicamente publican sus trabajos. Un ejemplo es el Grupo de Trabajo Sobre las Armónicas de los SEP del Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE) de los Estados Unidos de Norte América.

Si bien las armónicas han estado siempre presentes en los SEP, su efecto se ve hoy día aumentado debido a dos causas principales: el crecimiento sostenido de consumos no lineales de tensión y corriente; y los cambios en la filosofía de diseño de los equipos que, por razones de aprovechamiento máximo de los materiales, conducen a puntos críticos de operación de los SEP [4]. La tendencia actual es reducir las armónicas a niveles económicamente permisibles y seguros.

Subjetivamente, la consecuencia más obvia de las armónicas en los SEP es la degradación de las comunicaciones telefónicas causadas por el ruido armónico inductivo. No obstante, hay otros efectos menos perceptibles pero de mayores consecuencias, como es el caso de mal funcionamiento de equipo de control y protección, sobrecarga de aparatos y sistemas de potencia. Las armónicas también causan pérdidas de energía y reducen la vida útil de equipos y circuitos de alimentación eléctrica.

El objetivo de este trabajo es describir y analizar la metodología básica para la evaluación de cargas que generan armónicas en los sistemas de distribución de energía eléctrica, y describir los métodos más adecuados para el control y eliminación de las armónicas.

Este trabajo está dividido en 8 capítulos. En el capítulo 1 se efectúa la presente introducción al tema de las armónicas, en el capítulo 2 se indican las bases de los análisis armónicos, los cuales se realizan con herramientas matemáticas que involucran la Transformada de Fourier y un algoritmo -la Transformada Rápida de Fourier- con el que se simplifica y acorta el tiempo de análisis de ondas armónicas. En el capítulo 3 se mencionan las fuentes principales de equipos utilizados para el aprovechamiento de la energía eléctrica y que son fuentes de armónicas. En el capítulo 4 se analizan los efectos de las armónicas en las máquinas eléctricas y las interferencias que causan en el funcionamiento de los equipos de medición, control y comunicación. Luego se

analizan, capítulo 5, los sistemas de potencia que alimentan cargas que generan armónicas y los modelos existentes para la solución del problema armónico. En el capítulo 6 se describen los métodos de eliminación y las condiciones límite para la inyección de armónicas. En el capítulo 7 se proporcionan ejemplos de estudios armónicos en los SEP. En el Capítulo 8 se mencionan las conclusiones de este trabajo, y se efectúan recomendaciones para trabajos futuros relacionados con el tema de las armónicas. En la sección de bibliografía se mencionan sólo los artículos y libros más relevantes para los objetivos de este trabajo.

CAPITULO 2

ANALISIS ARMONICO

2.1 ANALISIS DE FOURIER

El análisis armónico es el proceso de calcular las magnitudes y fases de la armónica fundamental y todas las de orden mayor de una forma de onda periódica. La serie resultante se conoce como la serie de Fourier, la cual para una función periódica $X(t)$ tiene la expresión [5]

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \quad (2.1)$$

Esto constituye una representación en el dominio del tiempo de la función periódica. En esta expresión a_0 es el valor promedio y T el período de la función $X(t)$, mientras que a_n y b_n son los coeficientes de la serie para la n -ésima armónica.

El término constante de la serie de Fourier es dado por

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) dt \quad (2.2)$$

lo cual es el área bajo la curva de $X(t)$ desde $-T/2$ hasta $+T/2$, dividido por el período de la forma de onda T ; es decir, igual al valor promedio de la función. Mientras que a_n y b_n son dados respectivamente por

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1 \rightarrow \infty \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad \text{para } n = 1 \rightarrow \infty \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) se simplifican cuando la forma de onda tiene simetría. Si la forma de onda tiene simetría impar, esto es $X(t) = -X(-t)$, entonces a_n es cero para todos los valores de n , y b_n es dado por

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} X(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (2.5)$$

La serie de Fourier para una función impar tendrá solamente términos seno.

Si la forma de onda tiene simetría par, esto es $X(t) = X(-t)$, entonces b_n es cero para todos los valores de n , y a_n es dado por

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} X(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (2.6)$$

La serie de Fourier para una función par contendrá solamente términos coseno.

2.2 LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

La Transformada de Fourier permite expresar funciones del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. Con la inversa de la Transformada de Fourier se puede pasar funciones del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. La serie de Fourier representa, por consiguiente, el caso especial de la Transformada de Fourier aplicada a una señal periódica. En la práctica, los datos están frecuentemente disponibles en la forma de una función muestreada en el tiempo, representada por una serie en el tiempo de amplitudes separadas por intervalos de tiempo fijo de duración limitada.

El análisis de Fourier cuando se aplica a una señal continua periódica en el dominio del tiempo, produce una serie de componentes de frecuencia discretos en el dominio de la frecuencia [6].

Las ecuaciones (2.7) y (2.8) forman el par de la transformada de Fourier

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.7)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2.8)$$

la ecuación (2.7) se conoce como la "Transformada Adelante" y la ecuación (2.8) la "Transformada Inversa". Generalmente $X(f)$ es compleja y se puede escribir como

$$X(f) = \text{Re}X(f) + j\text{Im}X(f) \quad (2.9)$$

La parte real de $X(f)$ se obtiene de

$$\text{Re}X(f) = \frac{1}{2}[X(f) + X(-f)] \quad (2.10)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cos 2\pi ft dt$$

En forma análoga la parte imaginaria de $X(f)$ se obtiene de

$$\begin{aligned} \text{Im}X(f) &= \frac{1}{2j}[X(f) - X(-f)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\text{sen}2\pi ftdt \end{aligned} \quad (2.11)$$

El espectro de amplitud de la señal de frecuencia se obtiene de

$$[x(t)] = [(ReX(f)^2 + (ImX(f))^2)^{1/2}] \quad (2.12)$$

Y el espectro de fase es

$$\phi(f) = \tan^{-1}\left[\frac{\text{Im}X(f)}{\text{Re}X(f)}\right] \quad (2.13)$$

2.3 LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

En el caso donde el espectro del dominio de frecuencia es una función muestreada, así como la función con dominio en el tiempo, se obtiene un par de la transformada de Fourier de componentes discretos [7]

$$X(f_n) = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1} x(t_n)e^{-j2\pi kn/n} \quad (2.14)$$

$$x(t_n) = \sum_{n=0}^{n-1} X(f_n)e^{-j\pi kn/n} \quad (2.15)$$

La ecuación (2.14) se puede escribir en forma condensada

$$[X(f_n)] = \frac{1}{n}[W^{kn}][x(t_n)] \quad (2.16)$$

En esta ecuación $[X(f_p)]$ es un vector que representa los N componentes de la función en el dominio de la frecuencia, mientras que $[x(t_p)]$ es un vector que representa las N muestras de la función en el dominio del tiempo. El cálculo de los N componentes de frecuencia de N muestras de tiempo requiere un total de N^2 multiplicaciones complejas para resolver la ecuación (2.16).

2.4 LA TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER.

La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo que permite calcular la Transformada Discreta de Fourier de una señal armónica con un ahorro sustancial de cálculos. Para el caso de un número de muestras igual a 2^k , siendo k entero, se requieren sólo $(N/2) \log_2(N)$ multiplicaciones [8]. El ahorro en los cálculos aumenta conforme se incrementa el número de muestras con la relación

$$\frac{N^2}{(N/2)\log_2(N)} = \frac{\ln(4)N}{\ln(N)} \quad (2.17)$$

De este modo para 2^{10} muestras el trabajo se reduce a analizar sólo 10^3 muestras, lo que reduce el número de operaciones 205 veces.

2.5 DEFINICION DE VOLTAJES Y CORRIENTES ARMONICAS.

Las siguientes definiciones, en términos de la serie de Fourier, se usan para describir los sistemas de potencia con corrientes y voltajes armónicos [9]:

$$\text{Voltaje} \quad v(t) = \sum_{n=1}^n V_n \sin(n\omega_o t + \theta_n) \quad (2.18)$$

$$\text{Corriente} \quad i(t) = \sum_{n=1}^n I_n \sin(n\omega_o t + \phi_n) \quad (2.19)$$

$$\text{Potencia Activa} \quad P = \sum_{n=1}^n V_n I_n \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (2.20)$$

$$\text{Potencia Reactiva} \quad Q = \sum_{n=1}^n V_n I_n \sin(\theta_n - \phi_n) \quad (2.21)$$

$$\text{Voltaje RMS} \quad V_{RMS} = \left[\sum_{n=1}^n V_n^2 \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

$$\text{Corriente RMS} \quad I_{RMS} = \left[\sum_{n=1}^n I_n^2 \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

$$\text{Voltamperes Aparentes} \quad S = [V_{RMS}][I_{RMS}] \quad (2.24)$$

$$\text{Voltamperes de Distorsión} \quad D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.25)$$

$$\text{Distorsión de Voltaje} \quad HD_V = \sum_{n=2}^n [V_n^2]^{1/2} / V_1 \quad (2.26)$$

$$\text{Distorsión de Corriente} \quad HD_I = \sum_{n=2}^n [I_n^2]^{1/2} / I_1 \quad (2.27)$$

$$\text{Factor de Potencia} \quad pf = P/S \quad (2.28)$$

CAPITULO 3

FUENTES DE ARMONICAS

3.1 INTRODUCCION

Una clasificación general de las armónicas atendiendo al tipo de carga no lineal y los dispositivos utilizados es [10]: electrónica de potencia, dispositivos ferromagnéticos y dispositivos de arco. Las armónicas también se pueden clasificar en internas y externas a la red eléctrica [11]. En forma general y atendiendo a esta clasificación se tiene fuentes armónicas internas:

1. Deformación o rizo en la forma de onda de voltaje de las máquinas eléctricas debido a pulsaciones y oscilaciones de flujo magnético originado por el movimiento de los polos frente a los dientes de la armadura.
2. Variación de la reluctancia del entrehierro debido a la inclinación de los polos del motor síncrono, lo que origina variaciones en el flujo magnético que afecta la forma de onda y se traduce en generación de armónicas.
3. Distorsión del flujo magnético de motores síncronos debido a efectos de carga. Los cambios grandes de carga provocan cambios súbitos de la velocidad sin cambio en el flujo magnético, lo cual causa una distorsión de la señal.

4. Generación de fem's no senoidales debidas a la distribución no senoidal del flujo magnético en el entrehierro de los motores síncronos.

5. Corrientes no senoidales. Típicas de estas no linealidades son los rectificadores, inversores, soldadoras, hornos de arco eléctrico, controladores de voltaje de estado sólido y convertidores de frecuencia.

Las fuentes armónicas externas son producidas principalmente por dispositivos de estado sólido:

1. Control de eficiencia y carga de motores utilizando semiconductores y computadoras, los cuales producen formas de onda de voltaje y corriente irregular.

2. Dispositivos de control de velocidad, como los utilizados en tracción.

3. Trasmisión de corriente directa en alto voltaje, debido a que la conversión de CD y CA produce corrientes armónicas y la posibilidad de propagación debido a la interconexión. Esta fuente no obstante, está limitada debido al uso de filtros en todas las terminales de CD.

4. Interconexión con convertidores de energía solar y eólica y que debido al enlace con la red eléctrica inyectan armónicas que se propagan en la red.

En la tabla 3.1 se resumen en forma general las causas principales de los cambios de amplitud, asimetrías y armónicas que están presentes en la red eléctrica y que causan desbalances y mal funcionamiento de la red y de los equipos que se conectan a ella. Se menciona en la tabla el sistema de trasmisión y transformación de la energía eléctrica, así como el proceso característico de operación y el tipo de perturbación más representativo. La información contenida en la tabla 3.1 puede servir como una guía general para la identificación de la perturbación típica de los equipos indicados.

Tabla 3.1 Causantes de cambios de amplitud Du, armónicas Ku y asimetrías Au de las tensiones en una red eléctrica trifásica				
Sistema de transmisión y transformación de energía eléctrica	Proceso	Tipo de perturbación		
		Du	Ku	Au
Alimentadores para máquinas herramientas, FFCC, bombas y transportadores	curva tecnológica de carga, arranque	*		
Cargas de todo tipo controladas por grupo de ondas	conexión y desconexión cíclicas	*		
Cargas monofásicas sin distribución uniforme	fenómenos eléctricos de operación.			*
Líneas aéreas principalmente superiores a 110 KV	corona		*	
Lámparas de descarga de alta y baja presión	proceso de operación		*	
Contactos, terminales y conectores de todo tipo	envejecimiento y fallas			*
Líneas con transposición insuficiente	proceso de operación			*
Arco electrometalúrgico	proceso tecnológico de operación	*	*	*
Máquinas soldadoras	proceso tecnológico de operación		*	*
Rectificadores e inversores controlados y no controlados	proceso tecnológico de operación		*	
Transformadores de una y tres fases, de tres y cinco columnas	procesos eléctricos, operación en vacío		*	

3.2 CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA.

La fuente principal de armónicas en las plantas industriales son los convertidores estáticos de potencia y para conocer las armónicas que producen se requiere información precisa de las formas de onda de voltaje CA en las terminales del convertidor, la configuración del convertidor, tipo de control, impedancia del sistema y los parámetros de los circuitos CD [11].

Los convertidores estáticos de potencia se pueden agrupar en 3 grandes áreas de diferente comportamiento armónico: 1) grandes convertidores de potencia como los utilizados en la industria de reducción de metales y transmisión CD en alto voltaje; 2) convertidores de tamaño mediano utilizados en la industria de manufactura para control de motores y también en aplicaciones de ferrocarril; 3) convertidores de baja potencia para fuentes de energía monofásicas y trifásicas.

Las corrientes armónicas teóricas producidas por los convertidores estáticos están relacionadas con el número de pulsos (p) por la expresión general $pk+1$ y su magnitud disminuye en proporción inversa con el orden armónico. Generalmente las armónicas mayores a la número 49 se pueden omitir debido a que su amplitud es muy pequeña. Los grandes convertidores de potencia (del orden de megawatts) generalmente tienen más inductancia en el lado CD que en el lado CA. En un convertidor de 6 pulsos, obtenidos de 2 configuraciones trifásicas, la corriente en la fase A viene dada por [12]:

$$i_A = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega_0 t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t + \frac{1}{7} \cos 7\omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_0 t - \dots \right) \quad (3.1)$$

donde I_d es la corriente real CD. De la ecuación (3.1) se deducen varias observaciones útiles:

1. La ausencia de armónicas triples.
2. La presencia de armónicas de orden $6k+1$.
3. Las armónicas de orden $6k+1$ son de secuencia positiva.
4. Las armónicas de orden $6k-1$ son de secuencia negativa.
5. La magnitud de corriente rms a la frecuencia fundamental es $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)I_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right)I_d$

6. La magnitud rms de la armónica n es $I_n = I_1/n$

La corriente armónica para un convertidor estático trifásico en el lado de CA viene dada por [13]:

$$I_h = I_c \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{h\pi}{3}\right) \sinh\frac{\mu}{2}}{h^2 \frac{\mu}{2}} + \frac{r_c g_h \cos\left(\frac{h\pi}{6}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}\right)} \right] \quad (3.2)$$

y la constante de proporcionalidad viene dada por

$$g_h = \frac{\sin\left[(h+1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right]}{h+1} + \frac{\sin\left[(h-1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right]}{h-1} - \frac{2 \sin\left[h\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}\right)}{h} \quad (3.3)$$

donde I_c es el valor de la corriente CD al final de la conmutación, $r_c = \Delta i/I_c$.

La definición de los valores de la ecuación (3.2) viene en la figura 3.1

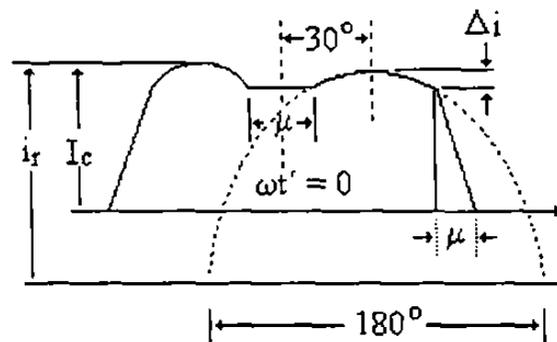


Figura 3.1

Definición de los valores de ecuación (3.2)

La tabla 3.2 muestra los valores típicos y teóricos de las armónicas de un convertidor de 6 pulsos.

Armónica	5	7	11	13	17	19	23	25
Teórica	0.2	0.14	0.09	0.01	0.06	0.05	0.04	0.04
Práctica	0.18	0.11	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

El número de convertidores de tamaño mediano (en decenas y cientos de kilowatts) está aumentando rápidamente en todas las ramas industriales. Las primeras aplicaciones se desarrollaron para transmisiones de CD. No obstante, el énfasis está cambiando al uso de inversores y motores de inducción. Los convertidores de baja potencia alimentan cargas pequeñas que generan armónicas. Dos tipos de estas cargas son los aparatos de televisión y los cargadores de baterías, aunque su contribución armónica es pequeña, el gran número de estos aparatos suman una carga armónica considerable. La tabla 3.3 muestra los componentes impares de corriente armónica de 3 tipos de aparatos de televisión [14]

Orden de la armónica	Tipo de televisor		
	Blanco y negro de transistores	Color puente rectificador	Color tiristores
3	0.32	0.73	0.82
5	0.25	0.59	0.66
7	0.15	0.43	0.34
9	0.08	0.27	0.14
11	0.04	0.15	0.09
15	0.03	0.05	0.04

3.3 HORNOS DE ARCO.

Las armónicas producidas por los hornos de arco eléctrico utilizados en la producción de acero son de magnitud variable debido a que el arco eléctrico cambia de un ciclo de trabajo a otro. La corriente del arco eléctrico no es periódica, y los análisis revelan la existencia de subarmónicas y armónicas preferentemente de la segunda a la séptima, las cuales disminuyen en amplitud conforme aumenta el orden. La tabla 3.4 muestra las corrientes armónicas de un horno de arco en dos etapas de un ciclo típico de producción de acero [13]. Otros investigadores han encontrado otros niveles de corrientes armónicas en los hornos de arco, tabla 3.5

Condición del Horno	% de la fundamental				
	orden armónico				
	2	3	4	5	7
Fusión inicial	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinado	0	2	0	2.1	0

Orden armónico	Nivel		
	Referencia 14	Referencia 15	Referencia 16
2	3.2	4.1	4.5
3	4	4.5	4.7
4	1.1	1.8	2.8
5	3.2	2.1	4.5
6	0.6	1.2	1.7
7	1.3	1	1.6
8	0.4	1	1.1
9	0.5	0.6	1

3.4 MOTORES Y GENERADORES

En un motor trifásico de inducción la corriente de la n-esima armónica se puede calcular por la fórmula [17]

$$I_n = \frac{V_n}{n\omega_0 L_{in}} \quad (3.4)$$

donde I_n , V_n son los valores rms de corriente y voltaje debidas a la n-esima armónica, ω_0 es la frecuencia fundamental de la fuente, L_{in} la suma de inductancias efectivas de dispersión del estator y del rotor referidas estator.

La inductancia efectiva tiende a disminuir conforme aumenta n debido al fenómeno de efecto piel. Las pérdidas en el motor debidas a las corrientes armónicas son influenciadas por una gran variedad de parámetros, las pérdidas a partir de la quinta armónica se pueden calcular mediante [18]

$$\frac{P_h}{P_{RL}} = k \sum_{n=5}^{\infty} \frac{V_n^2}{n^{3/2} V_1^2} \quad (3.5)$$

donde P_h son las pérdidas armónicas, P_{RL} las pérdidas en el motor CA con alimentación senoidal, k una constante de proporcionalidad (definida por la ecuación 3.6)

$$k = \frac{(T_s/T_r)E}{(1-s_r)(1-E)} \quad (3.6)$$

en la que T_s es el torque en el arranque, T_r el torque del motor CA, S_r el deslizamiento, y E la eficiencia.

La tabla 3. 6 muestra las armónicas (base 50 Hz) y subarmónicas producidas por los motores de inducción de un estudio efectuado en un país europeo [19], debidas principalmente a desbalances del flujo magnético.

Tabla 3.6 Armónicas y subarmónicas producidas por motores de inducción	
Frecuencia (en Hz)	% Fundamental
20	3
40	2.4
50	100
100	2.3
200	2.9
300	3
500	0.3
600	0.4

3.5 TRANSFORMADORES

La fuente principal de armónicas en las redes eléctricas en las décadas de 1920 a 1960 era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia. Los transformadores modernos en condiciones de estado estable no causan por sí mismos una distorsión significativa en la red eléctrica. No obstante, durante perturbaciones transitorias pueden aumentar considerablemente su contribución armónica. El voltaje primario sin carga de un transformador prácticamente está balanceado por la fuerza contraelectromotriz debido al efecto de inductancia de los devanados, y la reactancia de dispersión es omisible a bajas corrientes. En cualquier instante, por consiguiente, el voltaje nominal es

$$V_i = -e_1 = -E_m \sin \omega_0 t = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.7)$$

De la ecuación (3.7) se obtiene la expresión del flujo principal

$$\phi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos \omega_0 t = \phi_m \cos \omega t \quad (3.8)$$

Esto es, un voltaje primario senoidal produce un flujo senoidal sin carga. La corriente primaria no obstante, no será puramente senoidal, debido a que el flujo no es directamente proporcional a la corriente de magnetización. La corriente de magnetización simétrica asociada con la saturación del núcleo del transformador contiene todas las armónicas impares. Si la componente fundamental se ignora, y sí se supone que todas las armónicas triples se atrapan en la conexión delta, entonces las armónicas que se generan son las de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc. La magnitud de los componentes armónicos de la corriente de excitación en presencia de corriente directa en el lado secundario del transformador aumenta casi linealmente con el contenido de corriente directa [20].

3.6 CONDICIONES IMPERFECTAS DEL SISTEMA.

En general las partes principales de la red eléctrica tienen cierto grado de error debido a [21]:

1. Los voltajes de sistema CA nunca están perfectamente balanceados en sus tres fases, lo cual puede ser debido a 1) la presencia de frecuencia fundamental de secuencia negativa en el voltaje de conmutación; 2) la distorsión de voltaje armónico de secuencia positiva o negativa; 3) asimetría en las reactancias de conmutación.
2. Modulación de CD. Si se supone una fuente trifásica perfecta con apertura y cierre equidistantes, la adición de una pequeña corriente armónica I_n de orden n en el lado CD generará un componente I_n de diferente orden pero de la misma secuencia en el lado CA.
3. Los sistemas de control de los ángulos de cierre y apertura causan sustanciales errores en su implementación.

La tabla 3.7 muestra los resultados de mediciones armónicas efectuadas en una estación convertidora CD de Nueva Zelanda.

Armónica	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)
1	100	100	100
2	0.5	0.7	1
3	2.9	0.3	1
4	0.6	0.3	0.4
5	0.25	0.15	0.25
6	0.25	0.3	0.35
7	0.15	0.15	0.1
8	0	0.05	0.1
9	0.05	0.05	0.15
10	0.05	0.05	0.05
11	0.1	0.15	0.1
12	0.15	0.05	0.15
13	0.05	0.05	0.05
14	0.05	0.05	0.05
15	0.15	0	0.2
16	0	0.1	0.15
17	0.3	0.3	0.3
18	0	0.05	0.1
19	0.3	0.3	0.7
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0.2	0.2	0.5
23	0.4	0.2	0.3
25	0.2	0.2	0.15

3.7 LAMPARAS DE ALUMBRADO

Las lámparas de descarga gaseosa (fluorescente, arco de mercurio y sodio de alta presión) son una fuente considerable de armónicas, debido a su característica de carga no lineal. El encendido de la lámpara ocurre durante cada medio ciclo, cuando el voltaje aplicado alcanza el potencial de disparo. Durante la conducción la lámpara exhibe una característica de resistencia negativa. La componente de corriente armónica más característica aparte de la fundamental es la tercera armónica la cual, en circuitos trifásicos balanceados, es de secuencia cero y fluye por los cables del neutro y tierra. Estudios realizados por Griffin [22] reportaron corrientes del 21 % y 7 % para la tercera y quinta armónica respectivamente.

Las lámparas incandescentes no producen armónicas, pero sí modifican el contenido armónico del circuito que las alimenta y causan aumento de temperatura que contribuye a acortar la vida de la lámpara. La vida estimada de estas lámparas es [23]:

$$L = \left(\frac{1}{V_1^2 (1 + (VDF)^2)} \right)^{n/2} \quad (3.9)$$

donde L es la vida de la lámpara por unidad, V_1 es el voltaje fundamental por unidad, VDF el factor de distorsión de voltaje

Un valor representativo para n es 13 [24]. Se observa de la ecuación (3.9) que los cambios en el voltaje fundamental influyen más que los cambios del factor de distorsión.

CAPITULO 4

EFEECTO DE LAS ARMONICAS

4.1 INTRODUCCION

En forma general las armónicas presentan los siguientes efectos [26]:

1. Sobrecarga en bancos de capacitores. El esfuerzo dieléctrico es proporcional al voltaje de cresta, el cual puede aumentar o disminuir por los voltajes armónicos.
2. Interferencia en el rango de audiofrecuencias con señales de control y líneas de energía.
3. Corrientes armónicas en motores de inducción y sincrónicos que causan pérdidas adicionales de energía y calentamiento. Estos efectos son, en su mayor parte, atribuibles a armónicas de orden menor y altas magnitudes de amplitud.
4. Inestabilidad dieléctrica de cables aislados como resultado de sobrevoltajes del sistema.
5. Interferencia inductiva con los sistemas de comunicación, que resulta del acoplamiento inductivo entre las frecuencias armónicas y las líneas de comunicación.
6. Errores en los equipos de medición, debido a que generalmente los diseños consideran señales senoidales puras.

4.2 RESONANCIAS

Uno de los efectos de las armónicas es la resonancia, la cual es una condición en la que se igualan las reactancias capacitivas e inductivas a una determinada frecuencia y que la resistencia eléctrica presente es omisible. Se puede presentar en los bancos de capacitores, utilizados para corregir el factor de potencia, o los circuitos asociados a ellos. La resonancia ocasiona el flujo de excesivas corrientes con el subsecuente daño a los capacitores [13]. La resonancia puede ser paralelo o serie.

La resonancia paralelo puede ocurrir de varias formas, la más simple puede ser que el capacitor se conecte al mismo alimentador que la fuente armónica, y entonces ocurra resonancia entre la fuente y el capacitor. Suponiendo que la fuente sea completamente inductiva, la frecuencia resonante es

$$f_p = f \sqrt{\left(\frac{S_s}{S_c}\right)} \quad (4.1)$$

donde f es la frecuencia fundamental (Hz), f_p la frecuencia resonante paralelo (Hz), S_s los (VAr) nominales de corto circuito de la fuente, S_c los (VAr) nominales del capacitor.

Para determinar que condiciones de resonancia prevalecen, es necesario medir las corrientes armónicas en cada carga de los consumidores y la acometida, junto con el voltaje armónico en el bus de alimentación. En general, si la corriente que fluye del bus al sistema de potencia es poca mientras que el voltaje armónico es alto, esto indica que hay resonancia dentro del sistema de potencia. En cambio si una corriente armónica grande fluye en la carga del consumidor A y ocasiona un voltaje armónico en el bus, entonces esto indica resonancia entre la inductancia del sistema y la carga del capacitor. La figura 4.1 muestra el principio básico de la resonancia paralelo.

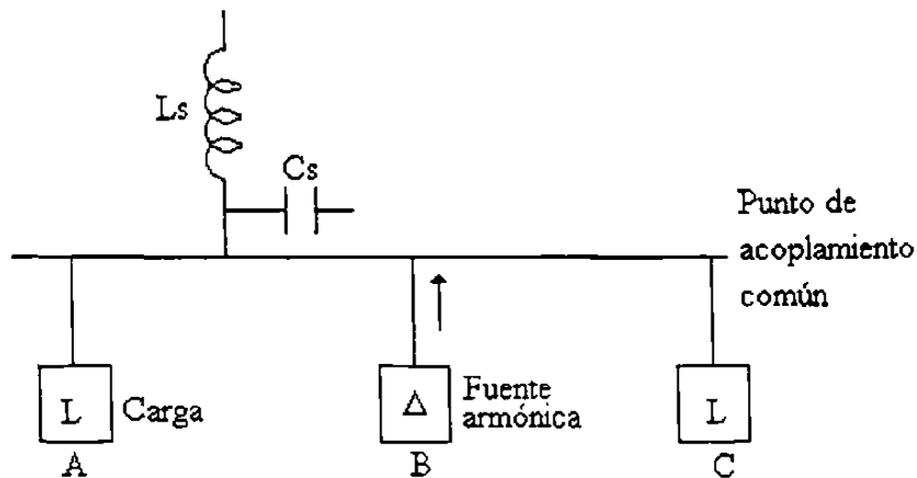


Figura 4.1

Circuito de resonancia en paralelo

La figura 4.2 ilustra la condición de resonancia serie. A altas frecuencias la carga se puede ignorar conforme la reactancia capacitiva se reduce. Bajo estas condiciones la resonancia serie existirá cuando

$$f_s = f \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_1^2}{S_c^2} \right)} \quad (4.2)$$

donde f es la frecuencia fundamental, f_s la frecuencia resonante serie (Hz), S_t la capacidad del transformador, Z_t la impedancia unitaria del transformador, S_1 la carga resistiva, y S_c los (VAr) nominales del capacitor.

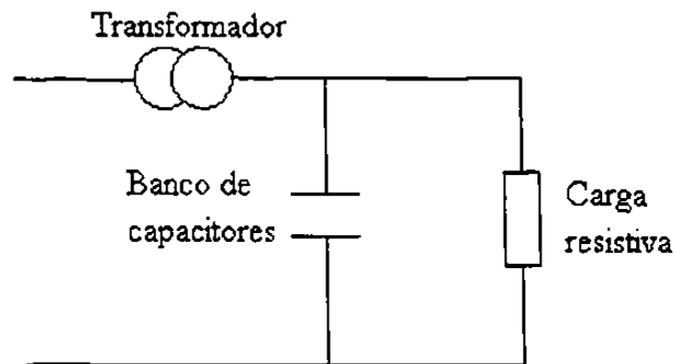


Figura 4.2
Circuito de resonancia serie

La importancia de la resonancia serie es que pueden fluir grandes corrientes por el capacitor con pequeños voltajes armónicos. La corriente real que fluirá dependerá del factor de calidad Q (típicamente del orden de 5 a 500 Hz), del circuito.

4.3 TRANSFORMADORES

Los efectos generales de las armónicas en los transformadores son [27]:

1. Aumento en las pérdidas en el cobre.
2. Aumento en las pérdidas en núcleo.
3. Posibilidad de resonancias entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea.
4. Esfuerzos en el aislamiento.

Las pérdidas en el cobre en presencia de armónicas se pueden calcular por [28]:

$$P_c = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} R_n I_n^2 \quad (4.3)$$

donde I_n el valor pico de la n-esima corriente armónica, y R_n la resistencia de las bobinas a la n-esima armónica.

Las pérdidas en el núcleo se componen de: 1) pérdidas por Histéresis y 2) pérdidas por corrientes de parásitas. Las pérdidas por Histéresis dependen del material magnético y la frecuencia de la corriente alterna, para un núcleo magnético. Las pérdidas por Histéresis se calculan con la ecuación

$$P_h = a_h f B_m^v \quad (4.4)$$

donde a_h es una constante que depende de las dimensiones del núcleo, f la frecuencia de la corriente eléctrica, B_m el valor máximo de la densidad de flujo magnético, v un exponente que depende del material del núcleo (de 1.5 a 2.5).

Las pérdidas por corrientes de parásitas dependen del material del núcleo (resistividad del acero), espesor de las laminas, frecuencia de la corriente eléctrica y densidad de flujo magnético. Para un circuito magnético dado

$$P_e = a_e f^2 B_m^2 \quad (4.5)$$

donde a_e es una constante que depende del material y espesor de laminación, f , B_m como se definieron en la ecuación (4.4).

Los pérdidas del transformador debidas a voltajes y corrientes armónicas dependen de la frecuencia, aumentan al incrementarse la frecuencia. El efecto total es un aumento de temperatura del transformador [29].

4.4 MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

Las máquinas de corriente alterna (CA) se caracterizan por presentar baja impedancia a las armónicas comparada con la impedancia efectiva vista por el voltaje fundamental. Los efectos de las armónicas [20] son:

1. Aumento de calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y el acero.
2. Cambio en el torque que afecta la eficiencia, y oscilaciones torsionales de los motores.

El nivel e importancia de estos efectos depende del diseño eléctrico de los motores y el tipo de fuente armónica. Las armónicas de secuencia cero ($n = 3, 6, 9, 12, \dots$) no producen una densidad de flujo magnético neto, por lo que sólo producen pérdidas óhmicas. Las armónicas de secuencia positiva ($n = 1, 4, 7, 10, 13, \dots$) producen un flujo magnético rotacional que gira con velocidad $n\omega$ en dirección positiva y con una magnitud proporcional a la corriente armónica. Las armónicas de secuencia negativa ($n = 2, 5, 8, 11, \dots$) producen un flujo magnético rotacional que gira con velocidad $-n\omega$ (opuesta a la dirección de rotación) y de magnitud proporcional a la corriente armónica.

La resistencia efectiva de los motores síncronos y de inducción varía con la frecuencia debido al efecto piel. La relación de la resistencia efectiva a la frecuencia de las armónicas es muy compleja por 2 razones: 1) la n -ésima armónica en el estator induce corrientes de frecuencia $(n-1)\omega$ ó $(n+1)\omega$ ó ambas, y 2) los motores de inducción de doble jaula son extremadamente sensibles al efecto piel. En un motor trifásico de inducción la corriente armónica n -ésima se puede calcular por la fórmula [18].

$$I_n = \frac{V_n}{n\omega_o L_{ln}} \quad (4.6)$$

donde I_n , V_n son los valores rms de corriente y voltaje debidos a la n -ésima armónica, ω_o la frecuencia fundamental de la fuente, L_{ln} la suma de inductancias efectivas de dispersión del estator y del rotor referidas estator.

La inductancia efectiva tiende a disminuir conforme aumenta n debido al fenómeno de efecto piel. Las pérdidas en el motor debidas a las corrientes armónicas son influenciadas por una gran variedad de parámetros [19].

Las pérdidas a partir de la quinta armónica se pueden representar como [18]

$$\frac{P_h}{P_{RL}} = k \sum_{n=5}^{\infty} \frac{V_n^2}{n^{3/2} V_1^2} \quad (4.7)$$

donde P_h representa las pérdidas armónicas, P_{RL} las pérdidas en el motor CA con alimentación senoidal, k una constante de proporcionalidad (definida por la ecuación 4.8).

La constante de proporcionalidad viene dada por

$$k = \frac{(T_s/T_R)E}{(1-S_R)(1-E)} \quad (4.8)$$

en la que T_s es el torque en el arranque, T_R el torque del motor CA, S_R el deslizamiento, y E la eficiencia.

La ecuación (4.8) sugiere la definición del índice de distorsión del motor (IDM)

$$IDM = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=5}^{\infty} \frac{V_n^2}{n^{3/2}} \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

donde las armónicas de orden menor son omisibles. El uso de esta ecuación permite una comparación conveniente entre los varios diseños de motores, aunque no evalúa ningún sobrecalentamiento localizado. La amplia variedad de motores monofásicos hace difícil todo análisis general, no obstante se han efectuado mediciones en motores [18] que sugieren que los efectos de calentamiento de los motores monofásicos son de magnitud similar a los efectos de calentamiento en los motores trifásicos. La figura 4.3 muestra en forma aproximada como varía la impedancia de los motores de inducción monofásicos en función del orden armónico.

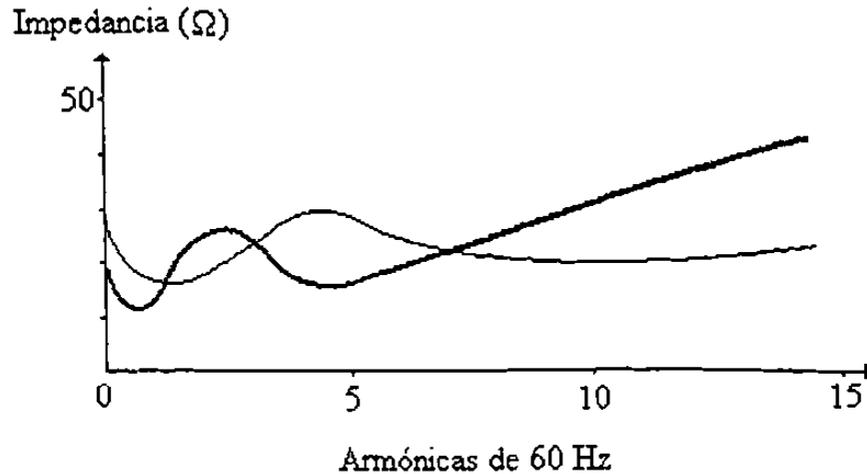


Figura 4.3

Impedancia del motor monofásico de inducción contra el orden armónico (la línea tenue es para los motores monofásicos y la línea gruesa para los motores trifásicos)

4.5 INTERFERENCIA CON EQUIPO DE MEDICION.

La instrumentación de medición es afectada por la presencia de voltajes y corrientes armónicas, ya que estos instrumentos se diseñan y calibran solamente para corriente y voltaje fundamental. La presencia de armónicas genera un torque electromagnético adicional que puede causar operación errónea. Un estudio realizado en Canada [30] indicó que un 20 % de la quinta armónica puede producir un error de 10 a 15 % en un transductor trifásico de 2 elementos. Otros estudios [24] han mostrado que el error debido a la tercera armónica puede ser positivo ó negativo, es decir la medición puede tener un valor mayor o menor que el valor real. Esto, por supuesto, depende del tipo de medidor considerado. Los medidores de estado sólido se comportan adecuadamente sí la distorsión no excede el 20 %.

El instrumento principal de medición de energía es el motor Ferraris tipo kilowattorimetro que responde con imprecisión ante frecuencias y parámetros fuera de diseño. Una expresión para la energía vista por este medidor es

$$\text{Energía Total} = \underbrace{V_{CD}I_{CD}}_{(P_T)} + \underbrace{V_F I_F \cos \phi_F}_{(P_{CD})} + \underbrace{V_H I_H \cos \phi_H}_{(P_H)} \quad (4.10)$$

donde P_F es la energía debida a la frecuencia fundamental, y P_H la energía de la contribución armónica. Toda la energía CD suministrada o generada causará un error proporcional a la relación P_{DC}/P_T . Similarmente cualquier deficiencia en la medición de energía armónica P_H causará un error representativo por $\pm kP_H/P_T$, donde el factor k depende de las características de respuesta a la frecuencia del medidor.

4.6 INTERFERENCIA CON EQUIPO DE CONTROL Y PROTECCION

Las armónicas afectan de muchas y variadas formas el funcionamiento de los dispositivos electrónicos y electromecánicos de control, en los que frecuentemente la operación depende de la determinación exacta del cruce del voltaje por cero, o de otros aspectos de la forma de onda de voltaje [31]. La distorsión armónica puede mover el cruce por cero de la forma de onda de voltaje, lo cual ocasiona una operación errónea de los dispositivos de control con todos los problemas consecuentes.

También las armónicas pueden distorsionar y degradar las características de operación de los relevadores de protección. En la mayoría de los casos, los cambios de las características de operación son pequeños y no presentan problema. Las pruebas que se han efectuado [32] indican que la mayoría de los tipos de relevadores no se afectan significativamente con niveles de voltajes armónicos del 20 %. En forma general se mencionan los efectos principales de las armónicas sobre los relevadores de protección:

1. Los relevadores tienden a operar más lentos y/o con mayores valores que los nominales.

2. Dependiendo del fabricante, los relevadores de sobrevoltaje y sobrecorriente cambian sus características de operación.
3. Dependiendo del contenido armónico, los torques de operación se pueden invertir.
4. Los tiempos de operación pueden variar ampliamente dependiendo del contenido armónico.
5. Las armónicas pueden alterar la velocidad de operación de los relevadores diferenciales.
6. Los relevadores de impedancia pueden operar arriba o abajo de su calibración.

4.7 INTERFERENCIA CON LAS COMUNICACIONES

La presencia de voltajes y corrientes armónicas cerca de los circuitos de comunicación pueden producir campos eléctricos y magnéticos que causan ruido en los sistemas de comunicaciones. A bajos niveles el ruido causa molestia, a altos niveles se degrada la calidad de la transmisión y se puede perder parte de la información, en casos extremos el ruido obstruye completamente la comunicación. Tres factores se combinan para producir el problema de ruido en las líneas de comunicación, estos son:

1. Influencia del sistema de potencia. Esto depende de la fuente de audiofrecuencia del sistema de potencia y la magnitud relativa de las corrientes y voltajes armónicos en el circuito de potencia en la vecindad de los circuitos de comunicación.
2. Acoplamiento de los circuitos de comunicación. Este es el acoplamiento de las corrientes y voltajes que interfieren con el sistema de comunicación.
3. Efecto en los circuitos de comunicación. Lo cual depende de las características de los circuitos y aparatos utilizados en la red de comunicación.

La interferencia que ocasiona el ruido se mide con una cantidad adimensional, el Factor de Influencia Telefónica (TIF) definido [13] por:

$$TIF = \sqrt{\sum \left[\frac{X_f W_f}{X_t} \right]^2} \quad (4.11)$$

donde X_t es la corriente o voltaje rms total, X_f la corriente o voltaje rms a la frecuencia f , W_f el TIF a la frecuencia f .

CAPITULO 5

ANALISIS DE SISTEMAS CON CARGAS QUE GENERAN ARMONICAS.

5.1 MEDICION DE ARMONICAS.

Para mantener una eficiente y efectiva alimentación de electricidad es necesario definir los niveles de distorsión que se puede permitir en las redes eléctricas de distribución. Esta necesidad ha traído como consecuencia el desarrollo de instrumentos y técnicas, que se mejoran día con día, de medición de los niveles armónicos. Los instrumentos para la medición pueden ser analógicos o digitales, cada uno de los cuales es capaz de proveer un rango particular de funciones. Los propósitos de la medición pueden ser:

1. Revisar los niveles armónicos presentes en la red eléctrica para comparar con un estándar.
2. Comprobar las causas de un problema que se sospecha es debido a armónicas.
3. Obtener información de respaldo en sistemas que tienen armónicas.

Actualmente los instrumentos utilizados para la medición de las armónicas presentes en las redes eléctricas de distribución están dentro de 2 categorías: analizadores de armónicas (miden la amplitud de señales de frecuencias armónicas) y analizadores de espectros (exploran un rango

de frecuencia y miden la amplitud de esas frecuencias) básicamente se utilizan los instrumentos siguientes:

1. Osciloscopios, proporcionan información inmediata y cualitativa del grado y tipo de distorsión de las formas de onda de corriente y voltaje.
2. Analizadores de espectros, muestran la distribución de energía de una señal como función de la frecuencia.
3. Analizadores de onda, estos instrumentos miden la amplitud de una función periódica, y proporcionan el espectro de líneas de una señal observada.
4. Analizadores de distorsión, indican directamente la distorsión armónica total (THD).
5. Equipo digital de medición de armónicas, que trabaja con dos técnicas básicas: filtros digitales y la Transformada Rápida de Fourier.

Un Sistema de medición de armónicas está constituido por una combinación apropiada de instrumentos que miden, muestran y guardan información de los niveles armónicos, figura 5.1

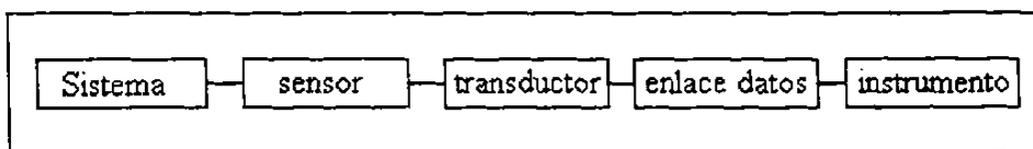


Figura 5.1

Componentes de un sistema de medición de armónicas.

La mayoría de los equipos modernos utilizados para la medición de las armónicas se basan en microprocesadores. La figura 5.2 muestra un diagrama de bloques de la instrumentación para mediciones de campo que utilizaron Govindarajan, Cox y Berry [33] para efectuar más de 5000 mediciones de voltaje y corriente en 76 sitios diferentes.

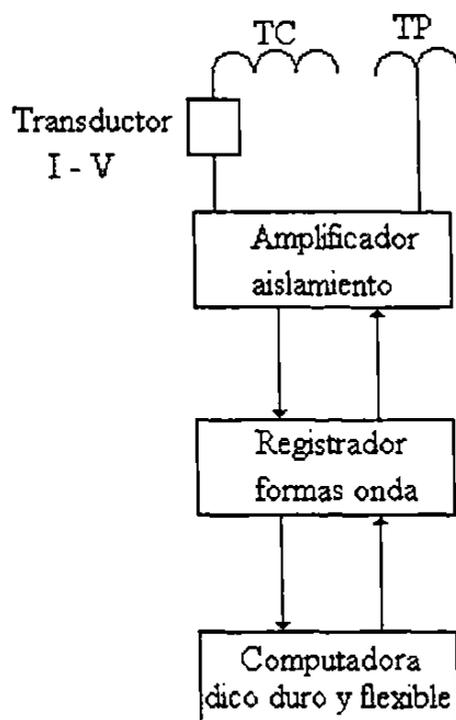


Figura 5.2

Sistema digital para adquisición de datos armónicos

La figura 5.3 muestra el sistema de adquisición de datos utilizado por Girgis et al [34] para medir los niveles armónicos en una subestación de 7500 KVA. También se ha utilizado la técnica de estimación de estado [35] para medir los niveles armónicos presentes en las redes eléctricas.

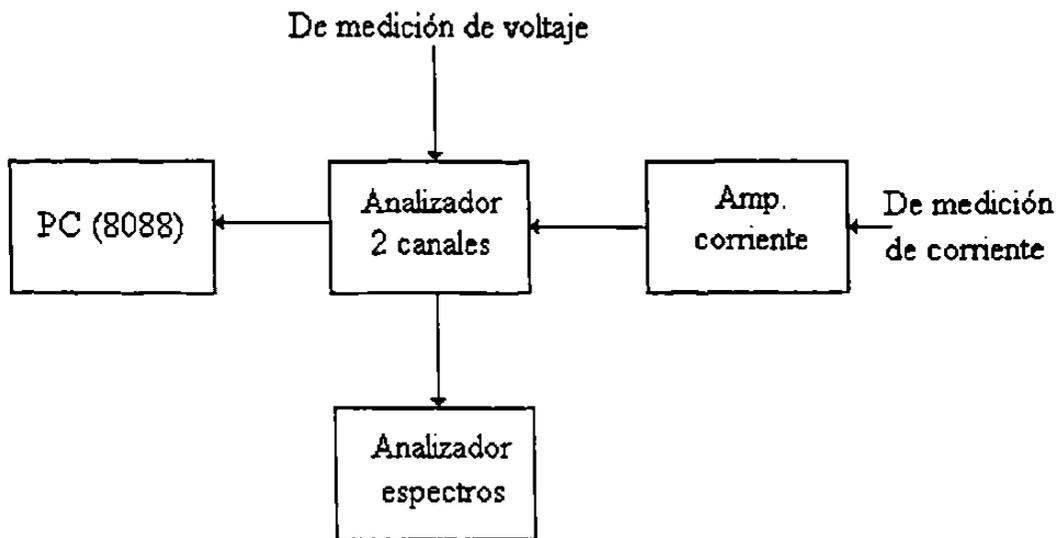


Figura 5.3

Sistema digital de adquisición de datos.

5.2 ANALISIS DE REDES CON INYECCION ARMONICA

El cálculo de los niveles armónicos de la red eléctrica requiere conocer las características de la fuente armónica y una representación de la respuesta a la frecuencia de la red [13]. La metodología para el análisis armónico se puede dividir en dos categorías generales: modelos de dispositivos y análisis de sistemas. Actualmente hay dos razones básicas para efectuar un estudio armónico: primero, analizar el aumento de distorsión de voltaje en la red eléctrica; segundo analizar la efectividad de las soluciones propuestas a los problemas existentes del sistema [36]. La parte preliminar de un estudio armónico generalmente incluirá decisiones en cinco áreas:

1. El modelo del sistema.
2. El número de armónicas consideradas.

3. Flujos armónicos balanceados y desbalanceados.
4. Contingencias consideradas.
5. La técnica analítica.

Al seleccionar un modelo del sistema se considera el número de buses que se van a incluir y la representación de la carga. La consideración más importante al seleccionar que parte del sistema se va a modelar son las capacitancias. Además de los capacitores para corrección del factor de potencia, los estudios armónicos deben incluir las capacitancias de las líneas y cables que frecuentemente se omiten en el análisis a la frecuencia fundamental.

La segunda decisión involucra el número de armónicas que se van a considerar en el estudio. En los estudios de problemas de corrientes armónicas del sistema, la selección será sencilla si existen mediciones que muestren las armónicas principales. El estudio no debe estar limitado a aquellas armónicas para las que se busca solución a problemas de resonancia ya que al cambiar la resonancia de una armónica puede causar resonancia en otra [37].

En los sistemas de distribución, las principales contingencias son las conmutaciones del banco de capacitores. También de interés son los niveles de carga, los cuales son indicados con condiciones de carga ligera y plena carga. En el sistema de transmisión los niveles de salida de las líneas son también de interés.

Las tres primeras decisiones determinan la capacidad total del sistema que se va a modelar. La decisión número cuatro determina el número de soluciones del modelo requerido. Cada una de estas consideraciones son importantes al seleccionar la técnica de modelado que se va a usar [37].

Las técnicas analíticas que se han usado caen en tres categorías generales, y emplean los mismos modelos de los componentes básicos. En particular, los elementos lineales, que constituyen la mayor parte del sistema, se pueden modelar con la misma precisión con las tres técnicas, que difieren en la complejidad de la representación de los elementos no lineales y en la

especificación del punto de operación del sistema. La precisión del análisis depende de dos factores distintos: la precisión de los modelos de los componentes individuales y la precisión del modelo del sistema. Las tres técnicas de análisis difieren en su tratamiento del convertidor, equipo computacional y esfuerzo requerido, además se pueden clasificar como simulación no lineal con dominio en el tiempo, análisis linealizado y análisis no lineal con dominio en la frecuencia.

5.3 DATOS NECESARIOS PARA REALIZAR ESTUDIOS ARMONICOS.

Los siguientes datos son necesarios para un estudio armónico típico.

1. Un diagrama unifilar del sistema que se va estudiar.
2. Capacidad de corto circuito y relación X/R del sistema que suministra la energía eléctrica en el punto de acoplamiento común (PAC).
3. La reactancia subtransitoria y KVA de todas las máquinas rotativas.
4. El porcentaje de reactancia y resistencia de todos los cables, buses, reactores limitadores de corriente y reactores saturables.
5. Las conexiones, por ciento de impedancia y KVA de todos transformadores de potencia.
6. Los KVA_r y KV de todos los capacitores y reactores shunt.
7. Los datos de placa, número de fases, pulsos y conexiones de los convertidores.
8. La configuración específica del sistema y los procedimientos de operación del convertidor que se va a estudiar.

9. El voltaje máximo esperado para el sistema que alimenta las cargas del convertidor.
10. Para instalaciones de hornos eléctricos de arco es necesario conocer las corrientes y voltajes del lado secundario y primario del transformador.
11. Límites armónicos permitidos por la empresa que suministra la energía eléctrica en el PAC.

5.4 MODELADO DE LOS COMPONENTES DE REDES ELECTRICAS.

Los tres métodos mencionados en la sección 5.2 emplean los mismos modelos de los componentes básicos de la red eléctrica. En particular, los elementos lineales, que constituyen la mayor parte del sistema. Con los modelos de los componentes de la red eléctrica y utilizando programas de computadora se pueden realizar análisis que incluyen:

1. Barridos de frecuencia de la respuesta del sistema.
2. Respuesta para diferentes armónicas múltiples.
3. Soluciones para sistemas trifásicos desbalanceados.

Para la mayoría de los estudios armónicos es suficiente una representación monofásica del sistema. Esta regla no se aplica cuando existen las siguientes situaciones:

1. La interferencia telefónica es de interés.
2. Bancos de capacitores monofásicos.
3. Fuente de armónicas desbalanceadas o monofásicas.
4. Fuentes de voltajes trifásicos armónicos de secuencia cero.

En seguida se pasará a describir brevemente los modelos de los componentes principales de la red eléctrica.

1. Máquinas de inducción. Los motores y las máquinas se representan por sus reactancias subtransitorias. En los motores, si no se conoce sus características subtransitorias, se

representan por su impedancia a rotor bloqueado. Un modelo estándar para la máquina de inducción se representa en la figura 5.4

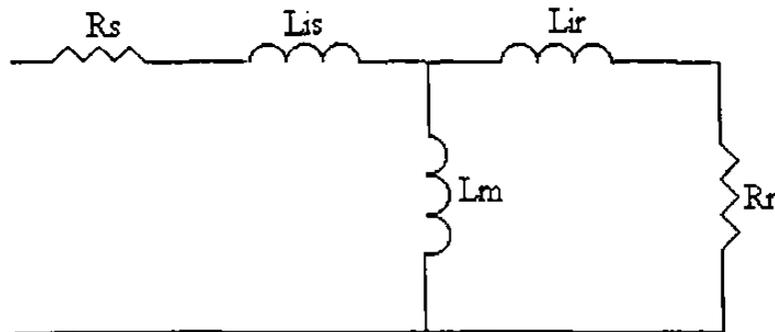


Figura 5.4

Modelo para la máquina de inducción para estudios armónicos

2. Transformador. El transformador tiene dos componentes que son de interés: la impedancia de dispersión y la impedancia de magnetización. La impedancia de dispersión se considera concentrada, no obstante la parte resistiva de esta impedancia no es constante con la frecuencia. Se supone conservadoramente en los estudios armónicos de los sistemas de distribución industrial que la relación X/R del transformador es constante con la frecuencia y es igual a 10. Para transformadores de potencia la relación X/R está típicamente en el rango de 20 a 30 y para transformadores de distribución de 5 a 10. Si el transformador no es una fuente significativa de armónicas, se puede omitir la impedancia de magnetización. Si la producción de armónicas del transformador es considerable, entonces se puede modelar la rama de magnetización como una fuente de corriente armónica. La figura 5.5 muestra un modelo del transformador.

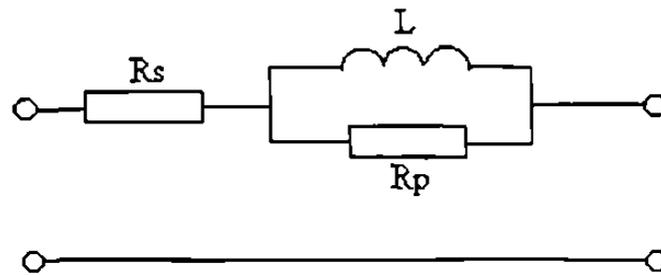


Figura 5.5

Modelo del transformador para estudios armónicos.

3. Cables. Para bajas frecuencias y/o líneas cortas se pueden representar con una impedancia serie. Si el estudio se efectúa para frecuencias armónicas mayores a la 25, entonces es necesario incluir una capacitancia en paralelo con la impedancia serie.

4. Cargas lineales. Generalmente las cargas lineales se pueden modelar por el conjunto en paralelo formado por una resistencia y una capacitancia, figura 5.6.

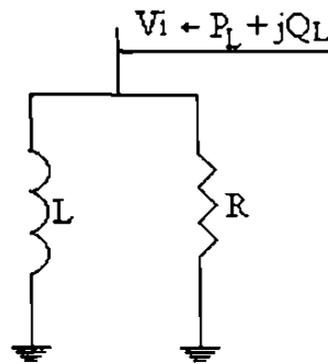


Figura 5.6

Modelo de una carga lineal para estudios armónicos.

Las cargas no lineales son muy variadas y de diferente comportamiento armónico no obstante, se pueden considerar, para propósitos de modelación, como fuentes ideales de corriente. La figura 5.7 representa un modelo de cargas comunes en la industria.

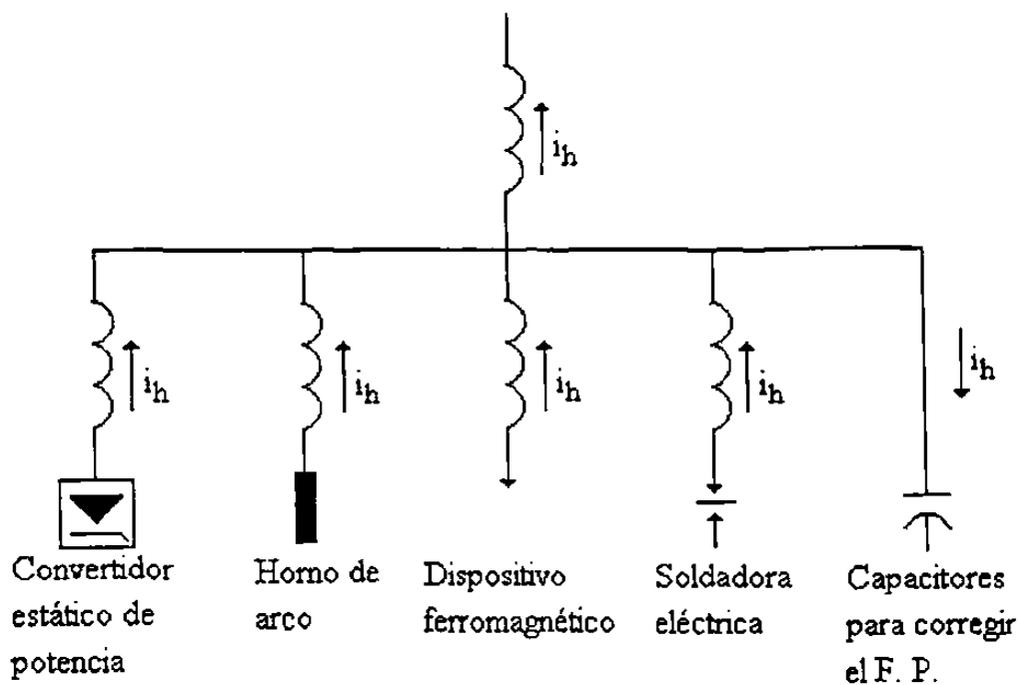


Figura 5.7

Modelo de cargas no lineales por fuentes de corriente.

CAPITULO 6

ELIMINACION DE ARMONICAS

6.1 PROPOSITO DE LOS FILTROS DE ARMONICAS.

El propósito principal de un filtro armónico es reducir la amplitud de una o más frecuencias fijas de corrientes o voltajes.

Cuando el único propósito es evitar una frecuencia particular que afecta a un componente o parte de la red eléctrica es posible usar un filtro serie que consiste de un inductor shunt y un capacitor, que presenta una gran impedancia a la frecuencia relevante. Esa solución, no obstante no se puede aplicar para eliminar las armónicas de la carga, debido a que la producción de armónicas por componentes no lineales de la planta (como transformadores y convertidores estáticos) es esencial para su operación normal.

En el caso de los convertidores estáticos, se evita que las corrientes armónicas entren al resto del sistema proporcionando un camino paralelo de baja impedancia a las frecuencias armónicas. La calidad de un filtro (Q) determina la sensibilidad de sintonización y en este respecto los filtros pueden ser de alta o baja calidad. El filtro de alta Q se sintoniza agudamente a una de las frecuencias armónicas menores, y tiene un valor típico entre 30 y 60. El filtro baja Q , típicamente en la región de 0.5 - 5, tiene una baja impedancia en un amplio rango de

frecuencias. Cuando se usa para eliminar armónicas de alto orden (de la número 17 en adelante) se conoce también como filtro paso alto.

El factor de calidad y el ancho de banda (AB) están relacionados por la expresión

$$Q = \omega_n / AB \quad (6.1)$$

donde ω_n es la frecuencia angular sintonizada en radianes por segundo, figura 6.1.

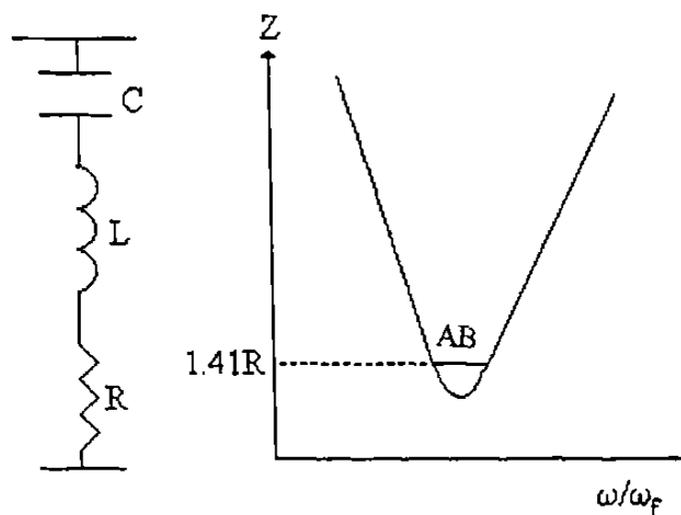


Figura 6.1

Impedancia del filtro shunt contra la frecuencia.

El grado de desintonización del filtro, considerando la frecuencia nominal de sintonía, se representa por un factor δ . Este factor incluye varios efectos:

1. Variaciones en la frecuencia fundamental.
2. Variaciones en la capacitancia del filtro e inductancia por envejecimiento y temperatura.

3. Desajustes iniciales causados por tolerancias de fabricación y tamaño de pasos de ajuste.

El desajuste por unidad de la frecuencia nominal sintonizada es

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (6.2)$$

Además, un cambio de L o C de 2 % causa el mismo desajuste que un cambio de frecuencia del sistema del 1 %. Por consiguiente δ frecuentemente se expresa como

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (6.3)$$

donde Δf , ΔL , ΔC son los incrementos de frecuencia, inductancia y capacitancia respectivamente, y C_n , L_n , f_n son la capacitancia, inductancia y frecuencia resonantes.

6.2 CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS

El tamaño de un filtro se define como la potencia reactiva que el filtro alimenta a la frecuencia fundamental. Es substancialmente igual a la potencia reactiva fundamental suministrada por los capacitores. El tamaño total de todas las ramas de un filtro se determina por la potencia reactiva requerida por la fuente armónica y por la forma en que puede ser suministrada por la red de CA.

El criterio ideal para el diseño de un filtro es la eliminación de todos los efectos causados por la distorsión de la forma de onda, inclusive la interferencia telefónica, que es el efecto más difícil de eliminar completamente. No obstante este criterio ideal no es realizable desde el punto de vista técnico y económico. Desde el punto de vista técnico, es muy difícil estimar por adelantado la distribución de armónicas en toda la red de CA. Desde el punto de vista

económico, la reducción de la interferencia telefónica se puede lograr tomando medidas preventivas en el sistema telefónico y en el sistema de potencia.

Un criterio más práctico es reducir el efecto de distorsión a niveles aceptables en el punto de acoplamiento común con otros consumidores, el problema es expresado en términos de voltaje, corriente o ambos. Un criterio basado en el voltaje armónico es más conveniente para el diseño de filtros, debido a que es más fácil garantizar estar dentro de un límite razonable de voltaje que limitar el nivel de corriente conforme cambie la impedancia de la red de CA.

Para cumplir con las limitaciones armónicas requeridas, el diseño de los filtros involucra los siguientes pasos:

1. El espectro de corrientes armónicas producidas por la carga no lineal es inyectado en un circuito que consiste de filtros en paralelo con el sistema CA a las frecuencias relevantes, y se calculan los voltajes armónicos.
2. Los resultados del paso anterior se usan para determinar los parámetros especificados, esto es, distorsión de voltaje y los factores interferencia telefónica (TIF).
3. Se calculan los esfuerzos en los componentes del filtro, esto es, capacitores, inductores y resistencias y con eso sus rangos y pérdidas.

Tres componentes requieren consideración detallada en el diseño del filtro, estos son la fuente de corriente, la admitancia del filtro y la admitancia del sistema. La fuente de corriente puede variar en el rango de carga, según las condiciones del ángulo de disparo. Es esencial calcular la admitancia equivalente total mínima a cada frecuencia armónica, que resultará en distorsión de voltaje máximo.

6.3 FILTROS SINTONIZADOS

Un filtro sencillo sintonizado es un circuito serie RLC ajustado a la frecuencia de una armónica.

Su impedancia viene dada por

$$Z_1 = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (6.4)$$

la cual a la frecuencia resonante (f_n) se reduce a R.

Hay dos parámetros básicos de diseño que se deben de considerar antes de la selección de R, L, y C. Estos son el factor de calidad (Q) y la desviación (δ) de la frecuencia relativa.

Para expresar la impedancia del filtro en términos de Q y δ se aplican las siguientes relaciones:

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \quad (6.5)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.6)$$

$$X_o = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6.7)$$

$$Q = \frac{X_1}{R} \quad (6.8)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_1} = \frac{1}{\omega_n R Q} \quad (6.9)$$

$$L = \frac{X_1}{\omega_n} = \frac{R Q}{\omega_n} \quad (6.10)$$

Sustituyendo las ecuaciones (6.5), (6.9) y (6.10) en la ecuación (6.4) se tiene

$$Z_f = R \left[1 + jQ\delta \left(\frac{2+\delta}{1+\delta} \right) \right] \quad (6.11)$$

Considerando que δ es relativamente menor que la unidad se tiene

$$Z_f = R(1 + j2\delta Q) = X_o(Q^{-1} + j2\delta) \quad (6.12)$$

$$\|Z_f\| = R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2} \quad (6.13)$$

Generalmente es más conveniente tratar con admitancias que con impedancias en el diseño del filtro.

$$Y_f = \frac{1}{R(1+j2\delta Q)} = G_f + jB_f \quad (6.14)$$

donde

$$G_f = \frac{Q}{X_o(1+4\delta^2 Q^2)} \quad (6.15)$$

$$B_f = \frac{2\delta Q^2}{X_o(1+4\delta^2 Q^2)} \quad (6.16)$$

El voltaje armónico en el bus del filtro es

$$V_n = \frac{I_n}{Y_n + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n} \quad (6.17)$$

Los subíndices indican en condiciones resonantes. Para minimizar la distorsión de voltaje es necesario aumentar la admitancia total del filtro en paralelo con el sistema de CA. Para

predecir el valor más grande de V_n , las variables que no son conocidas se seleccionan pesimistamente siendo éstas la desviación de frecuencia δ y la admitancia de la red Y_m . Dentro de ciertos límites el diseñador puede decidir los valores de Q y tamaño del filtro.

En términos de Q y δ la ecuación (6.17) se puede escribir como sigue:

$$\|V_n\| = I_n \left\{ \left[G_{sn} + \frac{1}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 + \left[B_{sn} + \frac{2Q\delta}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (6.18)$$

El ángulo máximo de fase de la impedancia de la red puede estar limitado a menos de 90° y generalmente disminuye aumentando la frecuencia. El voltaje armónico más alto se obtiene entonces usando ϕ_m con un signo opuesto al de δ y la ecuación (6.18) se transforma a

$$\|V_n\| = I_n \left\{ (\|Y_{sn}\| \cos \phi_{sn} + G_f)^2 + (-\|Y_{sn}\| \operatorname{sen} \phi_{sn} + B_f)^2 \right\}^{-1/2} \quad (6.19)$$

Ya que Y_m no es restringida, la admitancia máxima dada es

$$\|Y_{sn}\| = \frac{\cos \phi_{sn} (2Q\delta \tan \phi_{sn} - 1)}{R(1+4Q^2\delta^2)} \quad (6.20)$$

Hay una óptima Q que resulta en el voltaje armónico más bajo

$$Q = \frac{1 + \cos \phi_{sn}}{2\delta \operatorname{sen} \phi_{sn}} \quad (6.21)$$

para el cual
$$\|V_n\| = I_n \delta_n L \left[\frac{4}{1 + \cos \phi_{sn}} \right] = \frac{2I_n R}{\operatorname{sen} \phi_{sn}} \quad (6.22)$$

6.4 FILTROS AMORTIGUADORES.

Los filtros amortiguadores ofrecen varias ventajas:

1. Su funcionamiento y carga es poco sensitivo a las variaciones de temperatura, desviación de frecuencia y tolerancia de fabricación de los componentes del filtro.
2. Proporciona una baja impedancia para un amplio espectro de armónicas sin la necesidad de subdivisión de ramas paralelo.
3. Son mejores que los filtros sintonizados en condiciones de resonancia paralelo entre el filtro y las admitancias del sistema a frecuencias armónicas bajas.

Las desventajas principales de los filtros amortiguadores son:

1. Para lograr un nivel similar de filtrado necesitan diseñarse para rangos VA mayores que la fundamental.
2. Las pérdidas en la resistencia y el reactor son grandes.

En la Figura 6.2 se muestran los tipos de filtros amortiguadores paso alto.

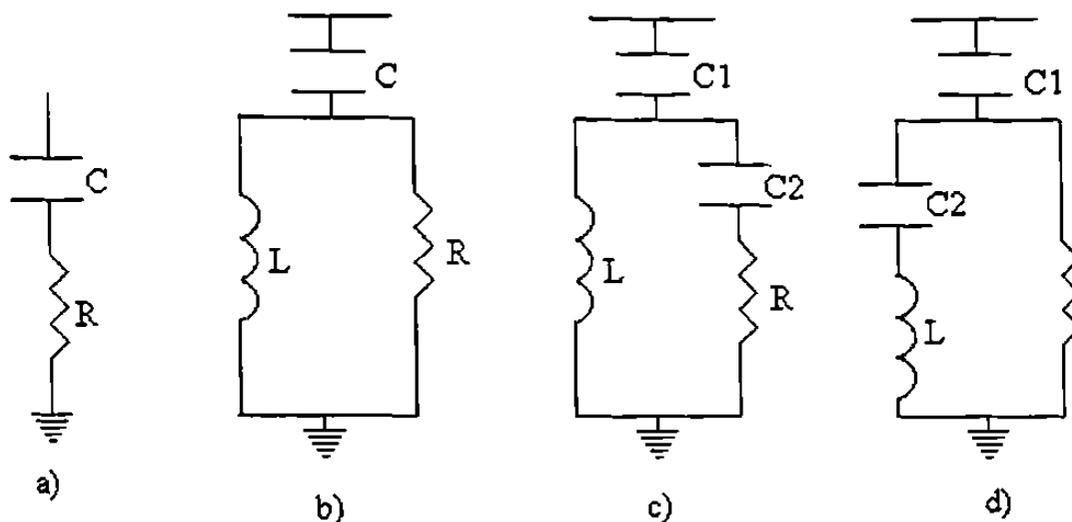


Figura 6.2

Tipos de filtros amortiguadores paso alto: a) primer orden;
b) segundo orden; c) tercer orden; d) tipo C.

1. Los filtros del primer orden a) generalmente no se usan ya que requieren un capacitor grande y tienen excesivas pérdidas a la frecuencia fundamental.
2. El tipo de segundo orden b) proporciona mejor filtrado pero, tiene pérdidas mayores a la frecuencia fundamental comparada con los filtros de tercer orden.
3. La principal ventaja del filtro de tercer orden sobre b) es una reducción substancial a la frecuencia fundamental debida al aumento de impedancia por el capacitor C2, que es pequeño comparado con C1.
4. El filtro tipo C tiene como principal ventaja una considerable reducción en las pérdidas a la frecuencia fundamental ya que C2 y L se sintonizan a esa frecuencia.

Cuando se diseña un filtro amortiguador la Q se selecciona para dar la mejor característica en la banda de frecuencia requerida. El comportamiento de los filtros amortiguadores se describe con la ayuda de dos parámetros:

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (6.23)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi CR} \quad (6.24)$$

Los valores típicos de m están entre 0.5 y 2. Para una capacitancia dada estos parámetros se escogen para lograr una apropiada alta admitancia en el rango de frecuencia requerido.

Los términos de conductancia y susceptancia de un filtro amortiguador son

$$G_f = \frac{m^2 X^4}{R_1 \left[(1-mX^2)^2 + m^2 X^2 \right]} \quad (6.25)$$

$$B_f = \frac{X}{R_1} \left[\frac{1-mX^2+m^2X^2}{(1-mX^2)^2 + m^2 X^2} \right] \quad (6.26)$$

donde $X = f/f_o$

La admitancia total mínima es

$$Y = B_f \cos \phi_m + G_f \sin \phi_m \quad (6.27)$$

Se considera en seguida el diseño convencional de filtros con un ejemplo numérico obtenido de Ainsworth [22]. Un puente convertidor de 6 pulsos a 100 kV, 100 MW CD opera a $\alpha = 15^\circ$. El puente está conectado a un sistema CA de 275 kV, 50 Hz a través de un transformador con 15 % de reactancia de dispersión. La corriente fundamental secundaria es 780 A y la del

primario 236 A. Los filtros que se van a conectar en el lado primario, consisten de ramas resonantes para las armónicas número 5, 7, 11 y 13 y una rama paso alto de segundo orden.

Para una capacidad total del filtro de 50 MVAr, y suponiendo que la capacitancia está igualmente dividida entre las ramas del filtro, cada rama requiere 0.417 μF . Si el coeficiente de temperatura del filtro es 0.05 % por $^{\circ}\text{C}$, el coeficiente de temperatura del inductor 0.01 % por $^{\circ}\text{C}$, la temperatura ambiente $\pm 20^{\circ}\text{C}$ y la tolerancia de frecuencia $\pm 1\%$, entonces de la ecuación (6.3)

$$\delta = \frac{1}{100} \{1 + [0.05 \times 20 + 0.01 \times 20]\} = 0.016$$

La impedancia del sistema puede ser de cualquier magnitud pero su ángulo de fase restringido a $\phi_s < 75^{\circ}$ a cualquier frecuencia. La óptima Q (que de el menor voltaje armónico) se obtiene de la ecuación (6.21)

$$Q = \frac{1 + \cos 75^{\circ}}{2(0.016)\sin 75^{\circ}} = 41$$

Con Q y C conocidas se pueden determinar los valores de L y R de las ramas resonantes. Los componentes de la rama amortiguadora se obtienen de la ecuaciones (6.23) y (6.24) seleccionando $m = 1$ y $f_0 = (17)(50) = 850$ Hz. Ya que C se había fijado (0.41 μF), los valores resultantes del inductor y la resistencia son 0.085 H y 452 Ω respectivamente. El circuito completo de diseño se muestra en la figura 6.3.

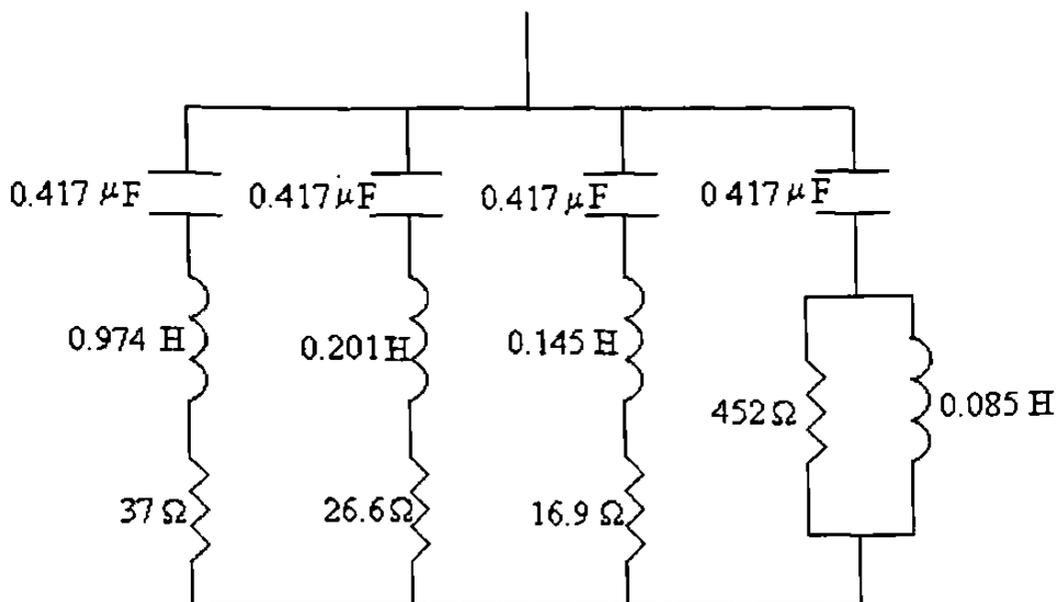


Figura 6.3

Ejemplo de diseño de filtro CA

6.5 IDEAS ALTERNATIVAS PARA LA ELIMINACION DE ARMONICAS

Debido a la complejidad y costo de los filtros, ha habido varios intentos para lograr el control armónico por otros medios. Estos son:

1. Eliminación por compensación de flujo magnético.
2. Eliminación por inyección armónica.
3. Eliminación por inyección de rizo CD.

En seguida se describen brevemente el primer método.

Compensación de flujo magnético.

Este método se representa en la figura 6.4. Un transformador de corriente se usa para detectar los componentes armónicos que provienen de la carga no lineal y se envían, mediante un amplificador, a un tercer embobinado (indicado por T en la figura 6.4) de un transformador de tal manera que cancele las corrientes armónicas de interés. La principal área de interés con este sistema es el acoplamiento de la salida del amplificador al tercer embobinado, de tal forma que la corriente fundamental no dañe el amplificador. Un cuarto embobinado (indicado por Q en la figura 6.4) y un filtro se usan para reducir la corriente fundamental en la salida del amplificador. Una ventaja de este esquema es que toma en cuenta las armónicas no características como la tercera y la novena. Una desventaja del esquema es que sólo puede eliminar las armónicas de bajo orden utilizando un amplificador muy grande.

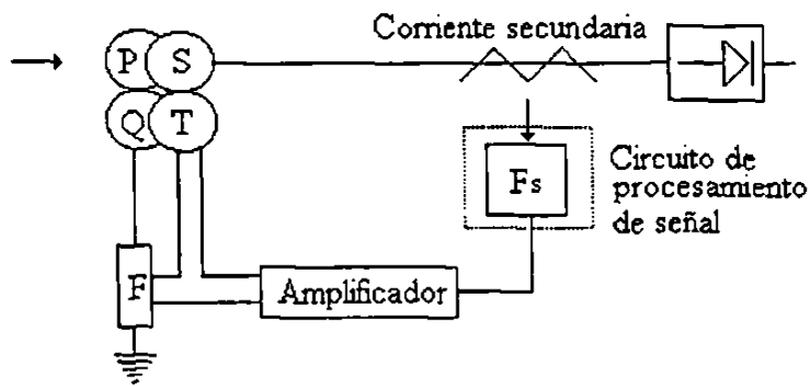


Figura 6.4

Configuración básica para la eliminación armónica por compensación de flujo.

6.6 PREVENCIÓN DE ARMÓNICAS

Las armónicas son un tema de interés creciente que se debe considerar en las etapas de diseño y construcción de nuevas plantas industriales, así como también durante su operación. Cuando se aplican equipos de compensación para limitar los niveles armónicos existen las siguientes posibles medidas de aplicación práctica:

1. Distribuir los rectificadores controlados en transformadores con desplazamiento de fase en las tensiones de $\pi/6$.
2. Aplicación de rectificadores de elevado número de pulsos.
3. Limitar el rizo de la corriente directa de los rectificadores a lo necesario en vez de lo posible.
4. Desplazar el punto de conexión de la red hacia una posición con la mayor potencia de corto circuito.
5. Evitar la operación de los componentes que generan armónicas en periodos de baja carga.
6. Desenergizar los transformadores en vacío.
7. Evitar elevaciones estacionarias de tensión en los transformadores.
8. Limitar la potencia de diseño de los componentes que generan armónicas.
9. Evitar la aplicación de control de ángulo de disparo para equipos domésticos de alta potencia.
10. Aplicación de equipo de compensación.

6.7 CONDICIONES LIMITE PARA LA INYECCION DE ARMONICAS

Los límites de inyección armónica son un compromiso entre los consumidores y proveedores de la energía eléctrica, de modo que se mantenga el sistema dentro de sus características normales. La distorsión de voltaje armónico del sistema será una función de la corriente armónica total inyectada y la impedancia del sistema para cada una de las frecuencias armónicas. La corriente armónica total inyectada dependerá del número de usuarios y la magnitud de la corriente armónica que inyecte cada uno. Los objetivos de los límites de corriente son limitar el voltaje armónico a un 3 % del fundamental, y a un 5 % la distorsión armónica total (DAT) de voltaje para sistemas sin resonancia paralelo a una de las frecuencias armónicas inyectadas.

Los límites de distorsión de corriente suponen que habrá diversidad entre las corrientes armónicas inyectadas por los diferentes consumidores, tabla 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1 Base para los límites armónicos de corriente		
Relación de corto circuitito en el punto de acoplamiento común (PAC)	Máximo voltaje armónico de frecuencias individuales (%)	Suposición
10	2.5 - 3.0 %	Sistema para conversión a CD.
20	2.0 - 2.5 %	1 - 2 consumidores grandes
50	1.0 - 1.5 %	Unos cuantos consumidores grandes
100	0.5 - 1.0 %	5 -20 consumidores mediano
1,000	.05 - 0.10 %	Muchos consumidores pequeños

Tabla 6. 2 Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general (de 120 V a 69000 V)						
Máxima distorsión de corriente armónica en por ciento de I_L						
Orden armónico Individual (armónicas impares)						
I_{sc}/I_L	< 11	11 < h < 17	17 < h < 23	23 < h < 35	35 < h	DDT
< 20 *	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

donde
 I_{sc} = Máxima corriente de corto circuito en el punto de acoplamiento común (PAC)
 I_L = Máx. demanda de corriente por la carga (a frecuencia fundamental) en PAC.
 DDT = Distorsión a demanda total

Los límites de distorsión de voltaje están relacionados con la distorsión armónica total (DAT). Los límites listados en la tabla 6.3 se deben usar para diseño de sistemas para el "peor caso" de operación normal.

Tabla 6.3 Límites de distorsión de voltaje		
Voltaje del alimentador en el PAC	Distorsión de voltaje individual (%)	Distorsión total de voltaje (%)
Hasta 69 KV	3	5
De 68.001 KV hasta 161 KV	1.5	2.5
Arriba de 161.001 KV	1	1.5

En la tabla 6.4 se muestra los niveles armónicos de voltaje permitidos en los SEP en varios países europeos.

Tabla 6.4 Valores máximos de armónicos de tensión permitidos en sistemas de potencia.			
Orden de la armónica	Valores máximos en %		
	Redes de baja tensión (dist. secundaria)	Redes de tensión media y distribución.	Redes de alta tensión
2	1	1	1
3	4	1.5	0.8
4	0.5	0.5	0.5
5	4	5	1
6	0.5	0.2	0.2
7	4	4	1
8	0.5	0.2	0.2
9	0.8	0.8	0.5
10	0.5	0.2	0.2
11	2.5	2.5	0.8
12	0.2	0.2	0.2
13	2	2	0.8
14	0.2	0.2	0.2
15	0.3	0.3	0.3
16	0.2	0.2	0.2
17	1	1	0.5
18	0.2	0.2	0.2
19	0.8	0.8	0.5
20	0.2	0.2	0.2
21	0.2	0.3	0.2
22	0.2	0.2	0.2
23	0.8	0.5	0.3
24	0.2	0.2	0.2
25	0.8	0.5	0.3

En este ejemplo se pide determinar la componente total de voltaje generado por las armónicas en las barras de 115 y 13.8 kV, considerando la carga total y compensación reactiva total. Para resolver este problema se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se establece un modelo equivalente de los componentes del circuito que se quiere analizar, y se utiliza un paquete computacional para ahorrar tiempo en la resolución del circuito.
2. Se determinan las fuentes de corriente armónica para cada convertidor considerando el número de pulsos del convertidor.
3. Se asigna un ángulo de fase a las fuentes armónicas de cada frecuencia, para tomar en cuenta el efecto de la conexión de los transformadores.
4. Se determina el voltaje total generado por las corrientes armónicas y se estima la distorsión armónica total de voltaje en las barras de interés.

Siguiendo el procedimiento indicado se obtuvo el circuito equivalente de los componentes de la figura 7.1, como se muestra en la figura 7.2. Las armónicas características son en este caso las número 5, 7, 11, 13, 17 y 19 para rectificación de 6 pulsos.

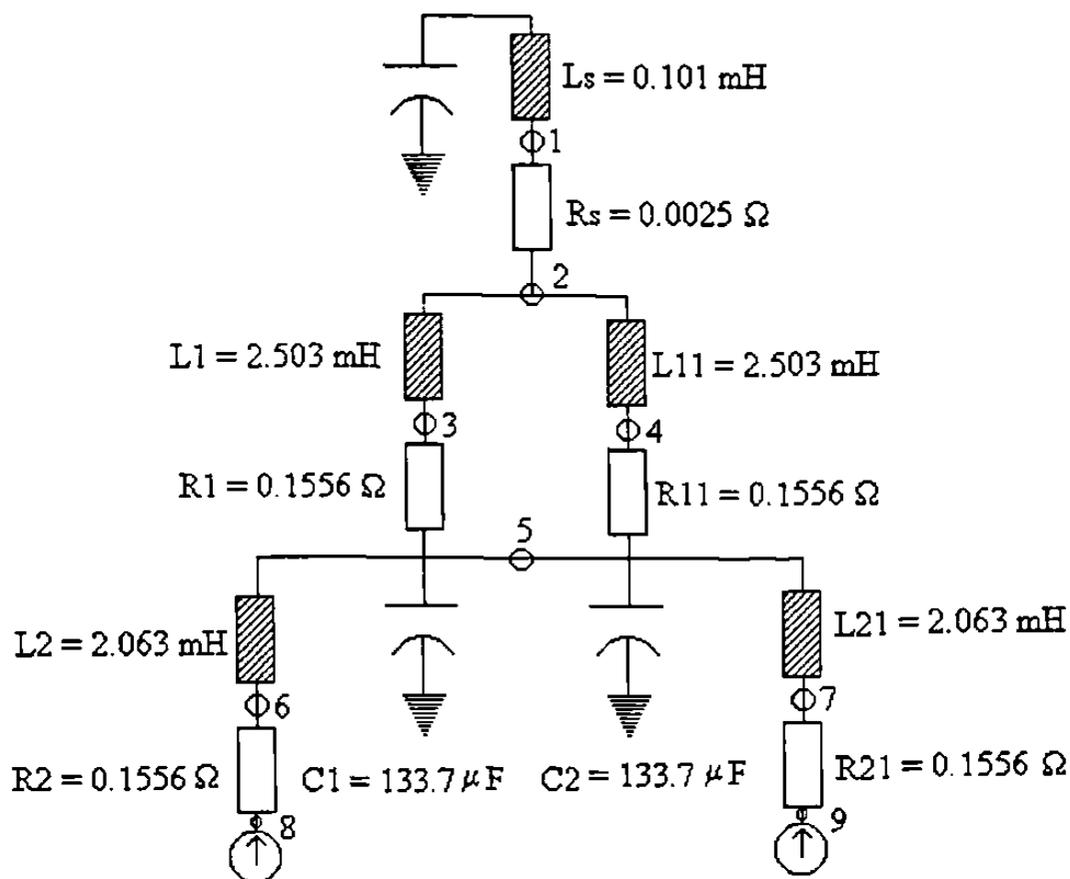


Figura 7.2

Circuito equivalente para modelación de la figura 7.1

Los convertidores de potencia CA - CD absorben una forma de onda de corriente cuasi-rectangular, cuya componente fundamental está en fase con el voltaje de la fuente. Las corrientes en los secundarios de los transformadores de rectificador tendrán formas de onda similares, ya que ambos rectificadores son de 6 pulsos, pero están defasados 30° eléctricos, en forma similar a los voltajes de fase secundarios (conexiones Δ -Y y Δ - Δ).

La corriente en el puente rectificador número 1 (transformador $\Delta - Y$) tendrá una forma similar a la figura 7.3.

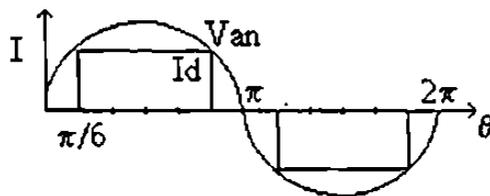


Figura 7.3

Forma de onda en el puente rectificador 1

En la figura 7.3 V_{an} es el voltaje de fase de la conexión estrella, y que está a su vez en fase con la fundamental de la corriente del puente rectificador 1. En la tabla 7.1 se indica la secuencia, orden armónico (n) y el ángulo de la armónica correspondiente, respecto a una onda base coseno positivo del puente rectificador 1.

Tabla 7.1 Componentes armónicos en el puente rectificador 1			
Secuencia	n	I_n/I_1	Angulo
+	1	1	-90°
-	5	119.2	90°
+	7	85.14	90°
-	11	54.18	-90°
+	13	45.84	-90°
-	17	35.05	90°
+	19	31.38	90°

La corriente fundamental (I_1) y la corriente rectificadora I_D guardan la relación [38]:

$$\frac{I_1}{I_D} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.1107$$

La magnitud de la corriente directa I_D se obtiene de [38]:

$$I_D = \frac{10 \times 10^6 W}{1 \cdot 35 \times 1000 V} = 7407 A$$

La corriente del puente rectificador 2 es de la misma forma de onda que la del puente rectificador 1 pero defasada en $+30^\circ (= \pi/6)$, ya que el voltaje secundario del transformador $\Delta - Y$ está 30° atrás del voltaje primario. Se obtiene entonces la forma de onda:

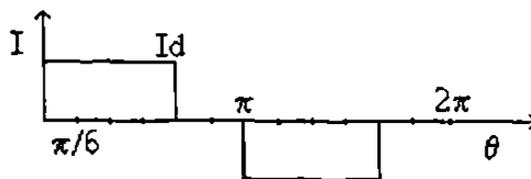


Figura 7.4

Forma de onda de corriente del puente rectificador 2

Tabla 7.2 Componentes armónicos en el puente rectificador 2			
Secuencia	n	I_n/I_1	Angulo
+	1	1	-60°
-	5	119.2	-120°
+	7	85.14	-60°
-	11	54.18	-120°
+	13	45.84	-60°
-	17	35.05	-120°
+	19	31.38	-60°

Dado que se aplica la técnica de análisis lineal, utilizando un equivalente de una sola fase para evaluar el efecto de cada armónica, los valores y ángulos de fase de las ondas de corriente deben referirse al mismo nivel de voltaje dentro del sistema. Ya que los valores de impedancia de la figura 7.1 corresponden al nivel de voltaje de 13.8 kV, las corrientes se refieren también a este voltaje, y los ángulos de fase se ajustan según la rotación causada por la conexión del transformador y la secuencia de fases correspondiente. Para ambos transformadores del rectificador, la razón de transformación de corriente es:

$$a = \frac{1000V}{13800V} = \frac{1}{13.8}$$

La forma de onda de corriente de alta tensión del transformador Δ - Y se obtiene sumando 30° a las armónicas de secuencia positiva y restando 30° a las de secuencia negativa. Las magnitudes de cada armónica se multiplican por la razón de transformación.

En el primario del transformador 1 (Δ - Y) se tiene una forma de onda de corriente como la mostrada en la figura 7.5, y los componentes armónicos se muestran en la tabla 7.3.

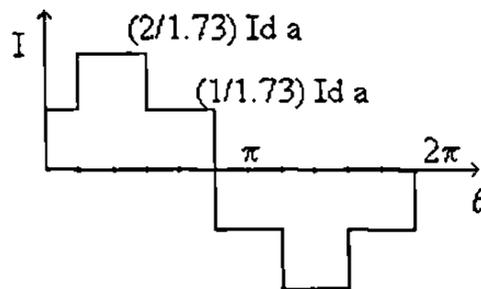


Figura 7.5

Forma de onda de corriente en el primario del transformador 1

Secuencia	n	I_n/I_1	Angulo
+	1	1	-60°
-	5	119.2	60°
+	7	85.14	120°
-	11	54.18	-120°
+	13	45.84	-60°
-	17	35.05	60°
+	19	31.38	120°

En la figura 7.6 se muestra la forma de onda de corriente del transformador 2 ($\Delta - \Delta$) y en la tabla 7.4 se muestran sus componentes armónicos.

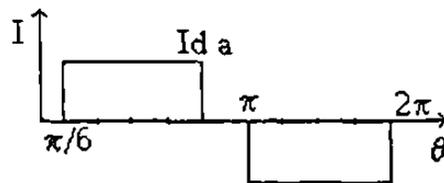


Figura 7.6

Forma de onda de corriente en el primario del transformador 2

Secuencia	n	I_n/I_1	Angulo
+	1	1	-60°
-	5	119.2	-120°
+	7	85.14	-60°
-	11	54.18	-120°
+	13	45.84	-60°
-	17	35.05	-120°
+	19	31.38	-60°

Utilizando los valores de amplitud y ángulo de fase de las corrientes de distinta frecuencia, los voltajes se pueden calcular por superposición de efectos. Nótese que cuando ambos puentes trabajan a plena capacidad, las armónicas 5, 7, 17, 19 tienen ángulos de fase opuestos, por lo que se cancelan y el conjunto se comporta como un rectificador de 12 pulsos.

Se utilizó el paquete computacional PSPICE para resolver el circuito de la figura 7.2, ya que es un paquete accesible, de fácil manejo y de suficiente exactitud como primera aproximación. El programa es el siguiente:

```

LS 0 1 0.101E-3
RS 1 2 2.539E-3
L1 2 3 2.503E-3
R1 3 5 0.1556
L11 2 4 2.503E-3
R11 4 5 0.1556
L2 5 6 2.063E-3
L21 5 7 2.063E-3
R2 6 8 0.1556
R21 7 9 0.1556
C1 5 0 133.7E-6
C2 5 0 133.7E-6
.AC DEC 1 300HZ 300HZ
.PRINT AC VM(2) VM(5) VP(2) VP(5)
.PROBE
.END

```

Los voltajes inducidos por las 6 armónicas consideradas son: 2786 V y 209 V en el bus de 13.8 kV y 115 kV respectivamente, con cuyos valores se obtiene una distorsión armónica total de voltaje de 0.1 % en el bus de 115 kV y 11 % en el bus de 13.8 kV. En la tabla 7.5 describe el voltaje inducido por cada armónica.

Corriente armónica	I_n/I_1	V. Ind. barra 13.8 kV	V. Ind. barra 115 kV
5	119.2	2112 V	158 V
7	85.14	400	30
11	54.18	116	9
13	45.84	79	6
17	35.05	44	3
19	31.38	35	3

7.2 COMPENSACION REACTIVA TOTAL CON CARGA PARCIAL

Tomando como base el circuito de la figura 7.1 y considerando sólo un convertidor y compensación reactiva total, se obtiene el circuito de la figura 7.7, en la figura 7.8 se muestra su equivalente para modelación.

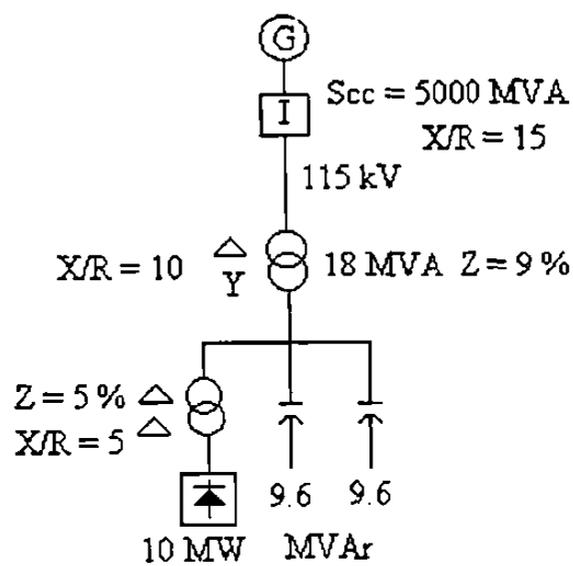


Figura 7.7

Circuito considerando un convertidor

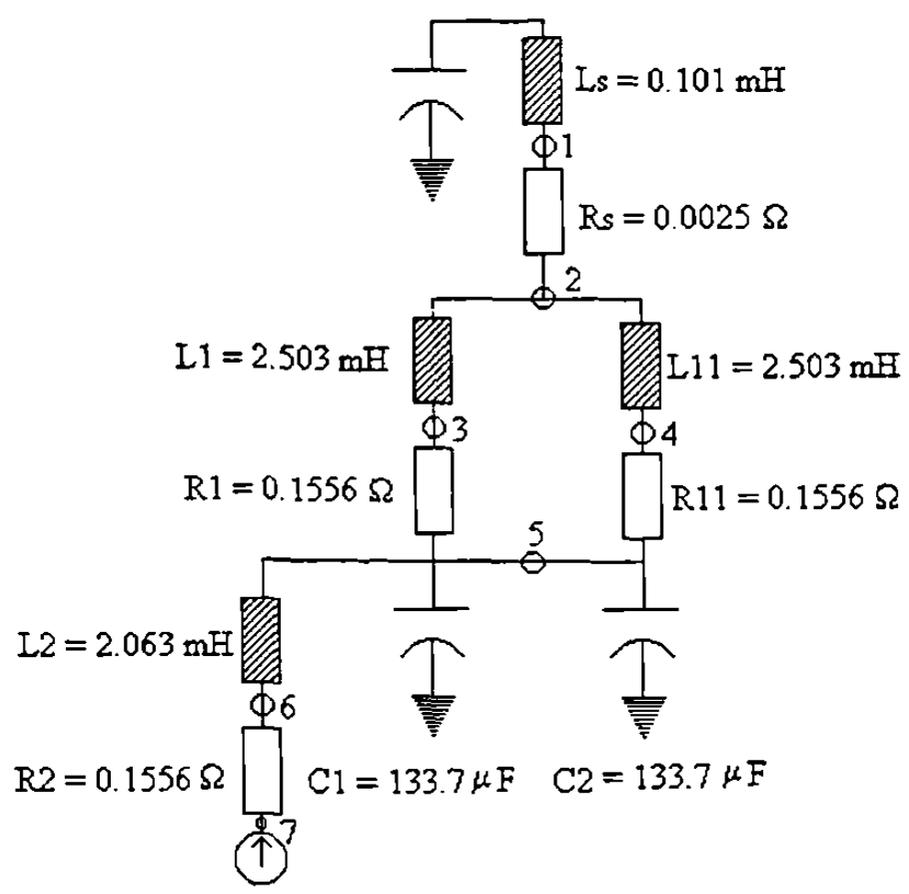


Figura 7.8

Equivalente del circuito de la figura 7.7

El programa utilizado de PSPICE se muestra a continuación:

```

LS 0 1 0.101E-3
RS 1 2 2.539E-3
L1 2 3 2.503E-3
R1 3 5 0.1556
L11 2 4 2.503E-3
R11 4 5 0.1556
L2 5 6 2.063E-3
R2 6 7 0.1556
C1 5 0 133.7E-6
C2 5 0 133.7E-6
IS1 7 0 AC 119.2 0
.AC DEC 1 300HZ 300HZ
.PRINT AC VM(2) VM(5) VP(2) VP(5)
.PROBE
.END

```

Los voltajes armónicos inducidos son 1393 V y 104 V en las barras de 13.8 kV y 115 kV respectivamente, con lo que se obtiene una distorsión total armónica de voltaje de 0.07 % en la barra de 115 kV y 7.8 % en la barra de 13.8 kV. En la tabla 7.6 se muestra la contribución de voltaje de cada armónica

Corriente armónica	I_n/I_1	V. Ind. barra 13.8 kV	V. Ind. barra 115 kV
5	119.2	1056 V	79 V
7	85.14	200	15
11	54.18	58	4
13	45.18	40	3
17	35.05	22	2
19	31.38	17	1

7.3 COMPENSACION REACTIVA PARCIAL CON CARGA PARCIAL

Tomando como base el circuito de la figura 7.1 y considerando un sólo convertidor con carga parcial se obtiene el circuito de la figura 7.9, y su equivalente para modelación en la figura 7.10.

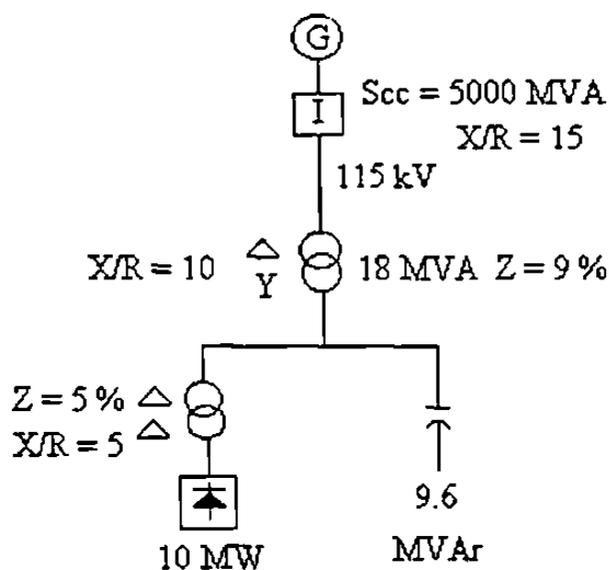


Figura 7.9

Diagrama unifilar de un solo convertidor con compensación parcial

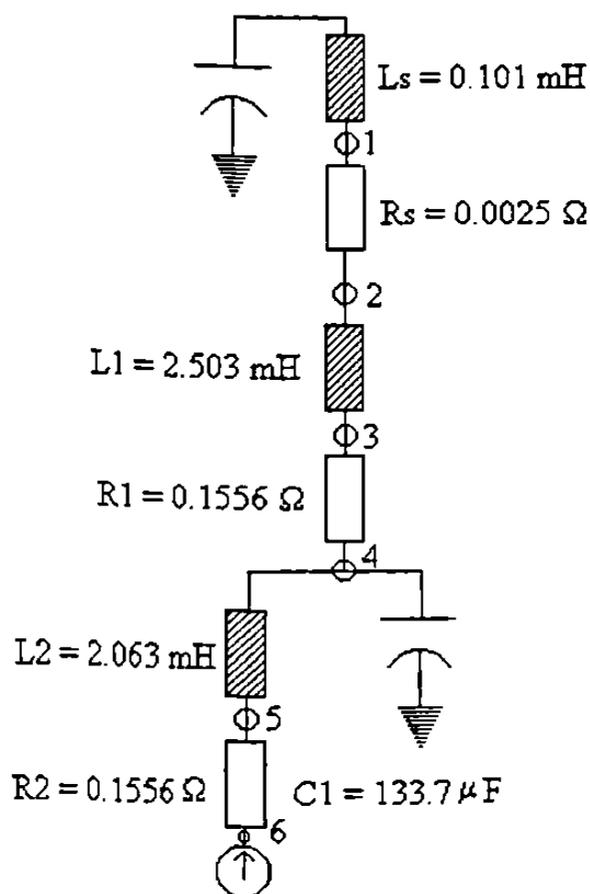


Figura 7.10

Circuito equivalente de la figura 7.9

El programa PSPICE utilizado en esta sección es:

```

LS 0 1 0.101E-3
RS 1 2 2.539E-3
L1 2 3 2.503E-3
R1 3 4 0.1556
L2 4 5 2.063E-3
R2 5 6 0.1556
C1 4 0 133.7E-6
IS1 6 0 AC 119.2 0
.AC DEC 1 300HZ 300HZ

```

```
.PRINT AC VM(1) VM(4) VP(1) VP(4)
.PROBE
.END
```

Los voltajes armónicos inducidos son 3120 V y 121 V en las barras de 13.8 kV y 115 kV respectivamente, con lo que se obtiene una distorsión total armónica de voltaje de 0.08 % en la barra de 115 kV y 18 % en la barra de 13.8 kV. En la tabla 7.7 se muestra la contribución de voltaje de cada armónica

Tabla 7.7 Voltajes inducidos por las armónicas con compensación reactiva parcial y carga parcial			
Corriente armónica	I_n/I_1	V. Ind. barra 13.8 kV	V. Ind. barra 115 kV
5	119.2	2436 V	94 V
7	85.14	410	16
11	54.18	117	5
13	45.18	79	3
17	35.05	44	2
19	31.38	34	1

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO REALIZADO.

1. El estudio de las armónicas es una rama multidisciplinaria de la Ingeniería Eléctrica. Es necesaria una estrecha cooperación de las diferentes actividades eléctricas para entender la importancia de las armónicas presentes en los Sistemas Eléctricos de Potencia.
2. Las armónicas se deben de considerar desde la etapa de diseño de nuevas plantas industriales. Se debe investigar por anticipado las posibles armónicas que estarán presentes en determinadas circunstancias, ya que en cierta medida se pueden evitar.
3. En las plantas industriales en operación es muy importante que se determinen las armónicas presentes y su magnitud antes de tomar medidas correctivas, y evaluar por anticipado si la eliminación de una armónica determinada no está sólo desplazando el problema a otra armónica.
4. La calidad de la energía eléctrica es un compromiso entre los usuarios y proveedores, por lo que debe existir una seria responsabilidad de ambas partes. Los usuarios deben de inyectar lo menos posible componentes armónicos y los proveedores deben entregar una energía libre de armónicas en el punto de acoplamiento común.

8.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

1. Se efectuen estudios de armónicas de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) de la localidad, como una medida de estimación del nivel armónico presente.
2. Se aproveche la versatilidad de los paquetes computacionales como el PSPICE y EMTP, entre otros para simulación de los contenidos armónicos presentes en los SEP de la localidad.
3. Se efectuen estudios en las grandes industrias locales con el fin de mejorar la calidad de la energía eléctrica y su uso.
4. Se efectuen estudios para normalizar un método de análisis de las armónicas presentes en las redes locales de distribución eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

1. H. Rissik, "The Mercury Arc Current Converter". Ed. Pitman, London, 1935.
2. J. C. Read, "The Calculation of Rectifier and Inverter Performance Characteristics".
IEE Pt 11, 1945.
3. E. W. Kimbark, "Direct Current Transmission, Vol I, Wiley - Interscience
New York, 1971.
4. Bibliography of Power System Harmonics, Part I and II, IEEE Presented at the
Winter Power Meeting, Dallas, Jan 1984.
5. J. Arrillaga; D. A. Bradley; P. S. Bodger. Power System Harmonics, pág. 42 - 60.
Editorial John Wiley & Sons. 1989
6. R. B. Randall. "Application of B and K Equipment to Frequency Analyses".
Bruel and Kjaer. 1977
7. E. Kreyzig "Advanced Engineering Mathematics". Ed. John Wiley & Sons. 1989
8. G. D. Bergland "A Fast Fourier Transform Algorithm for Real Valued Series".
Numer. Anal 11, pp 703 - 710. 1986
9. W. M Grady; G. T. Heydt; A. A. Mahmoud; R. D. Schultz "System Response to Harmonics"
EH0221 - 2/84, IEEE 1984.

10. R. Velázquez Sánchez. "Metodología para la predicción y solución de la distorsión armónica en las redes eléctricas de distribución". Boletín IIE, Marzo/Abril 1994.
11. Aly A. Mahmoud, "Power System Harmonics: An Assessment". EH0221 - 2/84 IEEE 1984.
12. Buja, E. S., Indri, G. B. " Optimal Pulse Width Modulation for Feeding AC Motors" IEEE trans., 1A-13(1), 38-44. 1977.
13. IEEE Standard 519 - 1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1993
14. Blommaert, J., Kniel, R. " Analysis of Harmonics in Low Voltage Distribution Networks Caused by Television Receivers". International Conference on Electricity Distribution, Part 1. London. pp 8-12. 1977
15. Lemoine, M. " Resonances en presence des harmoniques crees par les convertisseurs de puissance et les fours a arcs associés a des dispositifs de compensation", Revue Gen. Electricité 87, 945-962. 1978
16. Jahn H. H., Kauferle., J. "Measuring and Evaluating Current Fluctuations of Arc Furnaces" IEE Conf. Publ 110, 105-109. 1974
17. Coates, R., Brewer, G. L. " The Measurement and Analysis of Waveform Distortion Caused by a Large Multi-furnace Arc-furnace Instalation", IEE. Conf. publ. 110, 135-143, 1974
18. H. W. Dommel; A. Yan; Shi Wei. "Harmonics From Transformer Saturation". IEEE Transactions On Power System, Vol. PWRD - 1, No. 2, April 1986.

19. K. Venkatesan and J. F. Lindsay, "Comparative Study of The Losses in Voltaje and Current Source Inverter Fed Induction Motors", IEEE Trans, Vol 1AS - 18 No. 3. May - Jun. pp 240 - 246. 1982.
20. Wallace, A. K., ward, E. S. "Sources of Harmonic Currents in Slip-ring induction Motors", Proc. IEE, 121, PP 1495 - 1500. 1974
21. Yacamini, R. De Oliveira, J. C. " Harmonics Produced by Direct Current in Convertor Transformers". Proc. IEE, 125, pp 873 - 878. 1978
22. Ainsworth, J. D. "Harmonic Instabilities" Paper presented the Conference on Power Systems, London., Sept 1981
23. J. Griffin. "Fluorescent Lamps, Neutral Currents and Standby Generators". Electrical Review. Jan, 1979.
24. G. Golberg, "Behavior of Apparatus Under The Influence of Voltaje and Current Harmonics", Bull. Soc. R. Belge Electr., (Belgium), Vol 91, No. 4 Oct - Dec; pp 225 - 235. 1975.
25. J. E. Kaufman. Lighting Handbook, Illuminating Engineering Society of USA. 1981
26. N. W. Ross. "Harmonic and Ripple Control Carrier Series Resonances with P. F. Correction Capacitors". Trans. Electr. Supply Authority 52, pp 48 - 62. 1982
27. A. P. Meliopoulos; K. R. Chakravarthi; Thomas Ortmeyer. "Effects of Harmonics on Power System Equipment and Loads". EH0221. IEEE 1984.

28. Thomas H. Ortmeier; K. R. Chakravarthi; Aly A. Mahmoud. "The Effects of Power System Equipment and Loads." IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol Pas - 104, No. 9, Sept. 1985.
29. González, D. A. J. C. McCall. "Design of Filters to Reduce Harmonic Distorsion in Industrial Power Systems", IEEE Trans. Ind. Application., Vol1A - 23, No. 3, pp 504 -511. 1989.
30. Jost F. A.; D. F. Menzies, and M. S. Sachev, "Effect of System Harmonics on Power System Relays," CEA System Planning and Operation Section, Power System Protection Committee Spring Meeting, March 1974.
31. Honsinger, V. B. "Induction Motors Operating from Inverters," IEEE IAS Annual Meeting 1980, Pt. II, Cincinnati, OH, pp 1276 - 1285, Oct. 1980
32. Jost, F. A., Menzies, D. F. "Effect of System Harmonics on Power System Relays". Paper Presented at A Power system Committee Meeting, Canadian Electrical Association. 1974
33. Govindarajan S. N.; Cox, M. D.; Berry, F. C. "Survey of Harmonic Levels on The Southwestern Electric Company System". IEEE Trans. on Power Delivery. Vol 6, No. 4, Oct 1991.
34. Aldy A. Girgis et al. "Measurement and Characterization of Harmonic and Hig Frecuency Distortion for a Large Industrial Load". IEEE/PES Trasmission and Distribution Conference, New Orleans, Lousiana 1989.
35. Heydt, G. T. "Identification of Harmonic Sources by State Estimation Technique". IEEE Trans. on Power Delivery. Vol 4, No1. 1989

36. Thomas H. Ortmeier. "Harmonic Analysis Methodology", EH221 - 2/84. 1984 IEEE.

37. Lucero M. Edwuardo. "Medición y Análisis de Armónicas en Redes de Potencia". 1992.

Subcomite de Ingenieria de Sistemas Eléctricos del Comite Nacional Chileno de la CIER.

