

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

CONTAMINACION DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EN SISTEMAS
DE POTENICA DEBIDO A CONVERTIDORES ESTATICOS

TESIS

Presentada a la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería

POR

LUIS GUILLERMO GOMEZ CALDERON

Al conferírsele el título de

INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, febrero de 1996

RECORDED BY LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
A.S.A. 1. 3

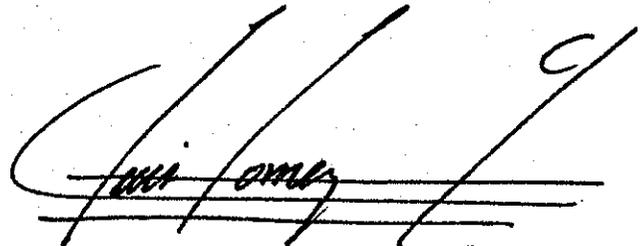
08
T(3683)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

CONTAMINACION DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A CONVERTIDORES ESTATICOS

tema que me fue asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.



Luis Guillermo Gómez Calderón

UNIVERSIDAD DE LA FUERZA ARMADA DE GUATEMALA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
VOCAL 1	ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA
VOCAL 2	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO
VOCAL 3	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ
VOCAL 4	BR. FERNANDO WALDEMAR DE LEON CONTRERAS
VOCAL 5	BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. ROBERTO MAYORGA ROUGE
EXAMINADOR	ING. OTTO GIRON
EXAMINADOR	ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA
EXAMINADOR	ING. GUSTAVO OROZCO
SECRETARIO	ING. RENE ANDRINO GUZMAN

Guatemala, 14 de Julio de 1994

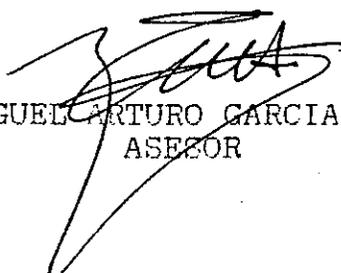
Ingeniero
ANGEL JESUS GARCIA MARTINEZ
Coordinador del Area de Potencia
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Presente.

Estimado Ing. Garcia:

Por medio de la presente le comunico que, habiendo examinado, estudiado y discutido en varias reuniones consecutivas el trabajo de tesis titulado CONTAMINACION DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A CONVERTIDORES ESTATICOS asignado al estudiante LUIS GUILLERMO GOMEZ CALDERON y encontrando satisfactorios los planteamientos y el desarrollo del mismo, luego de efectuadas las enmiendas que consideré necesarias me permito emitir el Dictamen Favorable Aprobado el trabajo como Tesis de Graduación.

Por lo tanto, el autor de esta tesis y, yo como su asesor nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,


ING. MIGUEL ARTURO GARCIA DE LA TORRE
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 5 de octubre de 1,995

Señor Director
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente

Estimado Señor Director:

Me es grato dirigirme a usted, para someter a su consideración la Tesis Titulada: **CONTAMINACION DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A CONVERTIDORES ESTATICOS**, desarrollada por el Señor Luis Guillermo Gómez Calderón, previo al Título de Ingeniero Electricista.

Me permito comunicarle que, en base a la revisión de dicho trabajo de tesis, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos y la he aprobado para que procedan los trámites pertinentes.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Angel Jesús García Martínez
Coordinador Area de Potencia

AJGM/amtr



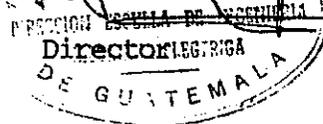
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Luis Guillermo Gómez Calderón, titulada: Contaminación de Armónicas y Oscilaciones en Sistemas de Potencia debido a Convertidores Estáticos, procede a la autorización del mismo.

Ing. Edgar F. Montúfar Urizar



Guatemala, 17 de octubre de 1,995.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Ing. Edgar Montúfar Urizar, al trabajo de tesis CONTAMINACION DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A CONVERTIDORES ESTATICOS, del estudiante LUIS GUILLERMO GOMEZ CALDERON, procede a la autorización para la impresión de la misma.

I M P R I M A S E:

ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK
DECANO



Guatemala, febrero de 1996

AGRADECIMIENTO A

Dios por brindarme la oportunidad de vivir y concluir el presente trabajo.

Mis padres, ya que gracias a su esfuerzo y sacrificio tuve la oportunidad de estudiar y concluir esta carrera.

La Facultad de Ingeniería y a su personal docente.

Mi esposa por el amor, estímulo y apoyo durante la carrera y elaboración del presente trabajo.

Mis amigos y compañeros de la Facultad por su constante apoyo.

ACTO QUE DEDICO A

Dios todo poderoso con mucho respeto.

Mis padres Federico Guillermo y Raquel con mucho amor.

Mi esposa Marictza con mucho amor y felicidad.

Mi beba Andrea Mariana por hacerme muy feliz.

Mi hermana Ady por su esfuerzo y valor.

Todos mis familiares por su cariño de siempre.

Todos mis amigos por su esfuerzo incondicional.

INDICE GENERAL

		PAGINA
	LISTA DE ILUSTRACIONES	I
	LISTA DE SIMBOLOS	IV
	GLOSARIO	XI
	INTRODUCCION	XVI
	CAPITULO I	
	CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA	
1.1	Consideraciones generales	1
1.2	Circuitos básicos y propiedades de los convertidores de tiristores	1
1.3	Condiciones generales de operación de los convertidores de tiristores	5
1.3.1	Condiciones normales de operación	5
1.3.2	Condiciones anormales de operación	5
1.3.3	Clasificación de los convertidores de tiristores	6
1.3.4	Convertidores estáticos para servicio electromecánico	8
1.3.5	Convertidores estáticos de aplicación general	8
1.3.6	Convertidores estáticos para servicio industrial e iluminación industrial	9
1.3.7	Convertidores estáticos para servicio de minería y tracción liviana	9
1.3.8	Convertidores estáticos para servicio de tracción pesado	9
1.3.9	Condiciones de operación de convertidores estáticos por arriba del voltaje nominal	9
1.3.10	Voltaje nominal de corriente directa para convertidores estáticos	10
1.3.11	Valores nominales de temperatura para convertidores estáticos	11

1.3.11.1	Temperatura nominal para la sección de tiristores y equipos	10
1.3.11.2	Temperatura nominal para los transformadores	11

CAPITULO 2

MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

2.1	Consideraciones generales	13
2.2	Regulación de la velocidad ω_m en los motores de corriente directa	16
2.2.1	Regulación de ω_m por variación del flujo magnético	16
2.2.2	Regulación de ω_m por variación de la resistencia del inducido	17
2.2.3	Regulación de ω_m por variación de la tensión en bornes del inducido	17
2.3	Efecto de los convertidores estáticos sobre los motores de corriente directa	18
2.3.1	Voltaje de rizado del convertidor	18
2.3.2	Pruebas a motores de corriente directa alimentados con convertidores estáticos	19

CAPITULO 3

INFLUENCIA DEL CONJUNTO CONVERTIDOR-MOTOR SOBRE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

3.1	Consideraciones generales	23
3.2	Control de las corrientes armónicas	25
3.2.1	Filtros en paralelo	26
3.2.2	Multiplicación de fases	27
3.3	Métodos de cálculo de las corrientes armónicas	32
3.3.1	Cálculo de corrientes armónicas	33
3.3.2	Análisis del sistema de alimentación típico de un convertidor estático	34

3.4	Interrupción de voltaje en la línea	37
3.4.1	Cálculo del área de interrupción	39
3.4.2	Cálculos que definen las inductancias	40
3.5	Factor de distorsión de la tensión	40
3.6	Relación entre el factor de distorsión de la tensión y la interrupción de voltaje en la línea	42
3.7	Circuitos resonantes	44
3.8	Factor de potencia	48
3.9	Variaciones de tensión producidas por los convertidores	51
3.10	Relación de cortocircuito	51

CAPITULO 4

RECOMENDACIONES PRACTICAS Y GUIA DE OPERACION PARA CONVERTIDORES ESTATICOS

4.1	Procedimiento general de prueba	53
4.1.1	Convertidor de tiristores	53
4.1.2	Equipo de transformación del convertidor de tiristores	53
4.2	Pruebas bajo carga para un convertidor estático	53
4.2.1	Prueba de esfuerzo dieléctrico	53
4.2.2	Prueba de voltaje nominal	54
4.2.3	Prueba de corriente nominal	54
4.2.4	Prueba de carga nominal	54
4.2.5	Control de fase	55
4.2.6	Medición de pérdidas	55
4.3	Eficiencia y pérdidas para convertidores estáticos	55
4.3.1	Determinación de la eficiencia	55
4.3.2	Clasificación de la pérdidas	55

4.3.3	Pérdidas en el equipo de transformación	56
4.3.4	Pérdidas especiales	56
4.4	Regulación de voltaje para convertidores estáticos	57
4.4.1	Determinación teórica de la regulación de voltaje	57
4.4.2	Constante de reactancia de conmutación de transformación	59
4.5	Efecto de las armónicas en los voltajes de entrada de convertidores estáticos	59
4.6	Adecuada operación de convertidores en paralelo	60
4.7	Factor de potencia para convertidores estáticos	60
4.7.1	Valor del factor de potencia	60
4.7.2	Especificación del factor de potencia	62
4.7.3	Determinación del factor de potencia de desplazamiento	62
4.8	Características de placa de un convertidor estático	63
4.9	Efecto de las armónicas generadas por convertidores estáticos	63
4.10	Efecto de las armónicas en el voltaje de línea alterno sobre el voltaje de salida directo	64
4.11	Dispositivos de protección para convertidores estáticos de potencia	64
4.11.1	Fallas en los tiristores	71
4.11.2	Cortocircuito de corriente directa	71
4.11.3	Fallas en conmutación	71
4.11.4	Fallas en control	72

CAPITULO 5

MEDICION Y CALCULO DEL NIVEL DE ARMONICOS Y OSCILACIONES EJEMPLO DE APLICACION EN LA INDUSTRIA DE FABRICACION DE CAJAS DE CARTON

5.1	Mediciones	73
5.1.1	Medición de la interrupción de voltaje en la línea	74
5.1.2	Medición de armónicas	75
5.1.3	Medición de oscilaciones	75
5.2	Generalidades del proceso de producción en la industria de fabricación de cajas de cartón	76
5.2.1	Materia prima	76
5.2.2	Máquina corrugadora	76
5.2.3	Máquina flexo-folder	76
5.2.4	Máquina prensadora	76
5.2.5	Máquina pegadora	77
5.2.6	Máquina engrapadora	77
5.2.7	Máquina troqueladora	77
5.2.8	Las calderas	77
5.2.9	Sistema preparador de adhesivo	77
5.2.10	Sistema de aire comprimido	77
5.2.11	Generador de emergencia	77
5.3	Descripción del diagrama unifilar de la planta	78
5.4	Cálculo teórico del factor de distorsión de la tensión	82
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES	93
	BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE ILUSTRACIONES

		PAGINA
Figura 1.1	(a) Circuitos típicos de convertidores más utilizados	3
Figura 1.1	(b) Propiedades de convertidores más utilizados	4
Figura 1.2	Servicio de carga repetitivo	7
Figura 1.3	Servicio de carga pico	7
Figura 2.1	Excitación independiente, serie, paralelo y compuesta	13
Figura 2.2	Características de los motores de corriente continua	15
Figura 2.3	Sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad por medio de la variación de la tensión en bornes del inducido	18
Figura 2.4	Corriente de rizado a voltaje constante versus ancho de banda oscura en % de la corriente nominal	20
Figura 3.1	Sistema general de potencia a) elementos en forma esquemática b) como diagrama unifilar	23
Figura 3.2	Corriente del rectificador No. 1	28
Figura 3.3	Corriente del rectificador No.2	29
Figura 3.4	Corriente del rectificador No.3	30
Figura 3.5	Corriente del rectificador No.4	31
Figura 3.6	Corriente total consumida por los cuatro rectificadores	32
Figura 3.7	Diagrama unifilar típico de alimentación de un convertidor estático	34
Figura 3.8	Convertidor tiristor trifásico de onda completa en puente	37
Figura 3.9	a) Voltaje de línea a neutro, b) voltaje de línea a línea y c) transferencia de corriente de tiristor 1 a 3	38

Figura 3.10	Diagrama unifilar de reactancias	39
Figura 3.11	Circuito equivalente de una línea corta de transporte	45
Figura 3.12	Circuito equivalente de una línea media de transporte	45
Figura 3.13	Circuito típico serie R, L y C	46
Figura 3.14	Diagrama fasorial del circuito serie R, L y C	46
Figura 3.15	Circuito típico paralelo G, B _L y B _C	47
Figura 3.16	Diagrama fasorial del circuito G, B _L y B _C	47
Figura 3.17	Relación entre las componentes de distorsión y desplazamiento y el factor de potencia total	49
Figura 4.1	Diagrama unifilar de un convertidor de alta potencia	67
Figura 5.1	Circuito típico para medir corriente y voltaje, usando un transformador de potencial y un transformador de corriente	73
Figura 5.2	Diagrama unifilar general de alimentación eléctrica	79
Figura 5.3	Diagrama unifilar para la barra de corrugadora	80
Figura 5.4	Diagrama unifilar para la barra de línea central	81
Figura 5.5	Diagrama unifilar general simplificado	84
Figura 5.6	Diagrama unifilar general simplificado en p.u.	87
Tabla 1.1	Incrementos de temperatura para los transformadores de convertidores	11

Tabla 3.1	Valores por unidad de las corrientes armónicas presentes en la corriente de entrada de un convertidor estático de potencia típico con base en la corriente nominal	33
Tabla 3.2	Clasificación de sistemas en bajo voltaje y límites de distorsión en 460 voltios	41
Tabla 3.3	Límites de distorsión para sistemas de medio y alto voltaje	42
Tabla 4.1	Condiciones de falla en convertidores de potencia y acciones que deben ser tomadas	68
Tabla 4.2	Equipo de protección típico y sus funciones	69
Tabla 5.1	Valores base del sistema	83

LISTA DE SIMBOLOS

<p>H 1-2-3</p>	<p>R 1-2-3-</p>	<p>= Marcas de terminales para cada fase del transformador del convertidor</p>
<p>E s</p>		<p>= Voltaje de línea a neutro del lado de DC del transformador</p>
<p>I d</p>		<p>= Corriente de ánodo del tiristor</p>
<p>E L</p>		<p>= Voltaje alterno de línea</p>
<p>E d</p>		<p>= Voltaje directo promedio bajo carga</p>
<p>E do</p>		<p>= Voltaje directo promedio en vacío</p>
<p>E x</p>		<p>= Caída de voltaje directo ocasionada por la reactancia de conmutación</p>
<p>D x</p>		<p>= Constante de reactancia de conmutación de transformación</p>
<p>E cw</p>		<p>= Voltaje de pico de trabajo</p>
<p>I Q</p>		<p>= Valor de la corriente rms para el período t_s</p>
<p>t s</p>		<p>= Duración del ciclo de carga</p>
<p>∫</p>		<p>= Temperatura virtual de la junta</p>
<p>I p</p>		<p>= Corriente de carga pico</p>
<p>t p</p>		<p>= Duración del pico de carga</p>

t o	= Intervalo de operación en vacío
E c	= Constante de trabajo
α	= Angulo de cebado o arranque
E r	= Caída de voltaje directo ocasionada por pérdidas en la resistencia del equipo de transformación
s	= Lado del transformador en donde están los tiristores (fase a neutro)
E f	= Caída total de voltaje directo por cada elemento del circuito
P	= Parámetro inherente al equipo
X c	= Reactancia en ohmios de línea a neutro para un grupo de conmutación
P r	= Pérdidas bajo carga del transformador en vatios
S	= Factor de circuito (1 para convertidores de una vía y 2 para convertidores en puente o doble vía)
X L	= Reactancia de la línea de suministro en ohmios
E n	= Voltaje alterno de línea a neutro
I L	= Corriente alterna de línea rms
I 1P	= Corriente activa de I _L
I 1Q	= Corriente reactiva de I _L

-V-

I H	=	Componente armónica total de I L
I e	=	Corriente de excitación del transformador
E a	=	Fuerza electromotriz inducida en el motor
V t	=	Voltaje en terminales
I a	=	Corriente de armadura
R a	=	Resistencia de armadura
K a	=	Constante que depende del diseño del devanado
O d	=	Flujo de excitación
T a	=	Par electromagnético
W m	=	Velocidad mecánica
R s	=	Resistencia del devanado serie
I L-M	=	Corriente de suministro del motor
I f	=	Corriente del devanado derivación del motor
R f	=	Resistencia del devanado derivación del motor
C	=	Convertidor estático
G	=	Fuente de energía
L ₁ , L ₂ , L ₃	=	Líneas trifásicas
T ₁ , T ₂ , T ₃	=	Transformadores de potencia

X_G	=	Reactancia de la fuente
X_{T1}, X_{T2}, X_{T3}	=	Reactancia de los transformadores
X_{L1}, X_{L2}, X_{L3}	=	Reactancia de la línea trifásica
I_h	=	Corriente armónica
E_h	=	Voltaje armónico
X_h	=	Reactancia de la red a la frecuencia armónica
K_{q+1}	=	Número de orden de las corrientes armónicas de secuencia positiva
K_{q-1}	=	Número de orden de las corrientes armónicas de secuencia negativa
L	=	Inductancia de un dispositivo
C	=	Capacitancia de un dispositivo
Z_c	=	Impedancia del convertidor
Z_T	=	Impedancia del transformador
Z_L	=	Impedancia de la línea
Z_f	=	Impedancia del condensador
I_f	=	Corriente del condensador compensador
I_s	=	Corriente inyectada al sistema de potencia

ρ_s	= Relación de impedancias que determina el valor por unidad de la corriente que podría circular hacia el sistema de potencia
ρ_f	= Relación de impedancias que determina el valor por unidad de la corriente que podría circular por el filtro en paralelo
E_1	= Voltaje fundamental
DF	= Factor de distorsión de la tensión
	= Angulo de conmutación
V_N	= Profundida de la interrupción en voltios de línea a línea
t_N	= Ancho de la interrupción en microsegundos
A_N	= Area de interrupción en voltios microsegundos
e	= Voltaje instantaneo de línea a línea justamente antes de la interrupción
L_L	= Inductancia de la línea
L_T	= Inductancia del transformador
L_C	= Inductancia del convertidor
$Z_{T p.u.}$	= Impedancia de placa del transformador en p.u.
I_1	= Corriente nominal de plena carga
f	= Frecuencia fundamental

ρ	=	Relación de la inductancia del sistema
E H	=	Sumatoria de voltajes armónicos
V s	=	Voltaje alterno de transmisión
R	=	Resistencia de línea de transmisión
X L	=	Reactancia inductiva de línea de transmisión
I R	=	Corriente alterna de recepción en la carga
V R	=	Voltaje alterno de recepción en la carga
X C	=	Reactancia capacitiva de línea de transmisión
f r	=	Frecuencia de resonancia
MVA sc	=	Capacidad de cortocircuito de la red (MVA)
CMVAR	=	Valor del condensador
PF	=	Factor de potencia
E o	=	Tensión en vacío
Δ E	=	Caída de tensión
Q	=	Carga reactiva
Q c	=	Compensación reactiva
P	=	Carga activa
R/X	=	Relación entre la resistencia y reactancia del sistema

SCR

= Relación de cortocircuito

I
s

= Corriente alterna de
transmisión

GLOSARIO

- Angulo de conmutación (μ) El tiempo expresado en grados durante el cual la corriente es conmutada entre dos tiristores del circuito del convertidor
- Angulo de atrazo (α) El tiempo expresado en grados por el cual el punto de inicio de la conmutación es atrasado por el control de fase, en relación con la operación del rectificador sin control de fase
- Amplitud de rizado El valor máximo de la diferencia instantánea entre los valores promedio e instantáneo de la onda pulsante unidireccional del convertidor
- Armónicas Una componente sinusoidal de una onda periódica, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental
- Armónicas características Son las producidas por un convertidor en su operación normal. En un convertidor de seis pulsos, las armónicas características son por ejemplo: 5, 7, 11, 13, etc.
 $h = kq + 1$
 $k =$ cualquier entero
 $q =$ número de pulsos del convertidor
- Armónicas no características Son las no producidas por un convertidor en su operación normal. Estas pueden ser resultado de frecuencias pulsantes, una demodulación de las armónicas características y la fundamental o desbalance en la potencia alterna del sistema

Commutación	La transferencia de corriente unidireccional entre los elementos del circuito del convertidor, los cuales conducen en sucesión
Convertidor	Un equipo que convierte la energía eléctrica alterna en directa
Cortocircuito interno	Un cortocircuito causado por fallas en el convertidor
Control de fase	El proceso de variación del punto en el cual se permite el inicio de la conmutación
Corriente DC nominal	La corriente con la cual todas las pruebas y corrientes nominales de servicio son especificadas, excepto en el caso de cargas pico
Convertidor doble via en puente	Es aquel en el que la corriente entre terminales de AC y los elementos conectados conductivamente del circuito fluye en ambas direcciones
Dispositivos de protección	Son los que se utilizan en el convertidor para limpiar condiciones de falla
Eficiencia	La relación de la potencia de salida a la potencia total de entrada
Falla	Una condición existente cuando los ciclos de conducción de algún semiconductor son anormales
Factor de potencia (PF)	La relación entre la potencia de entrada en vatios y los voltamperios de entrada a el convertidor
Factor de potencia de desplazamiento	La relación entre la potencia activa de la onda fundamental y la potencia aparente de la onda fundamental (incluyendo la corriente de excitación del transformador del convertidor)

Fusibles para tiristor

Fusibles de características especiales conectados en serie con uno o más tiristores para protegerlos

Factor de distorsión (DF)

La raíz cuadrada de la relación entre la sumatoria del cuadrado de las amplitudes de todas las armónicas y el cuadrado de la fundamental, expresado como un porcentaje de la fundamental

Filtro

Un término genérico utilizado para describir aquellos tipos de equipo, cuyo propósito es reducir las corrientes armónicas

Interrupción de voltaje en la línea

Una ranura en el voltaje de suministro a un convertidor, debido al cortocircuito momentáneo de las líneas de AC durante un intervalo de conmutación

Número de pulsos

El número total de conmutaciones sucesivas no simultáneas ocurridas dentro del circuito del convertidor, durante cada ciclo, cuando se opera sin control de fase

Periodo de conducción

La parte de un ciclo de voltaje alterno durante la cual la corriente fluye en la dirección directa

Reactor de AC

Un reactor inductivo que es insertado entre el transformador y el convertidor con el propósito de controlar el porcentaje de aumento de la corriente en el tiristor y posiblemente la magnitud de la corriente de falla

Reactor de DC

Un reactor inductivo colocado entre la salida de DC del convertidor y la carga, con el objeto de limitar la magnitud de la corriente de falla y también en algunos casos, para limitar la magnitud de la corriente de rizado en la carga

Relación de cortocircuito

Es la relación entre la capacidad de cortocircuito de la barra en MVA (en el punto de conexión del convertidor), y la capacidad nominal del convertidor en MW

Sistema de enfriamiento

Equipo en el cual sus partes e interconexiones son usadas para enfriar un convertidor de tiristores

Sobrecarga

Una condición existente cuando la corriente de carga sobrepasa las condiciones nominales continuas de operación de un convertidor en magnitud, tiempo o ambos, pero los ciclos de conducción y forma de onda permanecen esencialmente normales

Servicio de carga pico

Un tipo de servicio en donde las condiciones nominales del convertidor son especificadas en términos de la magnitud y duración del pico de carga juntamente con el tiempo en vacío entre picos

Servicio repetitivo de carga

Un tipo de carga en donde las sobrecargas aparecen intermitentemente pero ciclicas y tan frecuentemente, que el equilibrio térmico no se alcanza entre todas las sobrecargas

Temperatura de equilibrio

La temperatura de estado estable alcanzada por un componente de un convertidor de tiristores bajo condiciones específicas de carga y enfriamiento

Transformador de interfase

Un autotransformador utilizado para obtener múltiple operación entre dos o más convertidores que tienen voltaje de rizado fuera de fase

Tiristor

Es un dispositivo semiconductor biestable compuesto por tres o más juntas, las cuales pueden ser interrumpidas desde un estado de no conducción a un estado de conducción o viceversa; tales interrupciones ocurren al menos dentro del cuadrante principal de las características voltaje-corriente

Unidad convertidora de tiristores

Una sección compuesta por una o más secciones de tiristores juntamente con transformadores, interruptores y otros equipos auxiliares

INTRODUCCION

Los convertidores estáticos de potencia eléctrica son ampliamente utilizados en la industria para una variedad de propósitos, tales como: fuentes de potencia electromecánica, controladores de velocidad variable y fuentes ininterrumpidas de potencia. Estos equipos son útiles porque pueden convertir AC a DC. Esta característica cambia la naturaleza sinusoidal de la corriente alterna, y resulta en el flujo de corrientes armónicas hacia el sistema y consecuentemente interferencia en circuitos de comunicación y otros equipos.

Para el sistema de AC, los convertidores estáticos se comportan como una carga que presenta dos importantes pero indeseables propiedades: la primera es que esta carga nunca tiene un factor de potencia igual a la unidad, y la segunda es que la carga inyecta corrientes armónicas hacia el sistema de AC.

Una de las aplicaciones de estos dispositivos se traduce en uno de los métodos modernos de controlar la velocidad de los motores DC, sin embargo, con el uso de estos dispositivos en el lado de AC, un valor pico de potencia reactiva será experimentado cuando se quieran obtener pequeñas velocidades de los motores, lo cual puede originar indeseables caídas de tensión, sobre todo cuando la potencia de cortocircuito de la red es baja; además, los armónicos que se generan pueden ocasionar severos problemas de resonancia y distorsión de la tensión; es por tanto necesario controlar estos armónicos.

Este trabajo se inicia con una definición general de los convertidores estáticos y sus características más importantes, tomando en cuenta que dichos equipos se utilizan con motores DC. En el segundo capítulo, se encuentra un repaso de las principales características de ellos.

El capítulo tres se relaciona con los métodos de contrarrestar las corrientes armónicas y métodos teóricos de cálculo de éstas; en el capítulo cuatro, encontramos datos importantes relacionados con convertidores, y por último en el quinto, se presenta el caso de estudio y sus conclusiones.

1. CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA

1.1 Consideraciones generales

En un sistema estático para la regulación de velocidad en los motores de corriente continua, el elemento principal lo constituye el rectificador, formado en la mayoría de los casos por un conjunto de dispositivos electrónicos, tales como: diodos, transistores, tiristores, resistencias, condensadores, etc; estos permiten el suministro de una corriente directa a los devanados inducido e inductor del motor, a partir de una red trifásica de corriente alterna. La tensión suministrada, que se regula con los tiristores, controla a su vez cualquiera de los parámetros más importantes de un motor de corriente directa, tales como el par y la velocidad.

Este tipo de equipo es económico, simple de operar y de fácil mantenimiento, si lo comparamos con los equipos antiguos como el sistema Ward-Leonard; además posee una alta eficiencia, la cual es un parámetro importante que se debe considerar en estos días en que el costo de la energía se ha incrementado. Los convertidores estáticos poseen una gran cantidad de aplicaciones que van desde las máquinas herramientas, hasta las grandes industrias de acero, papel, metalurgia, cemento, plástico, etc.

1.2 Circuitos básicos y propiedades de los convertidores

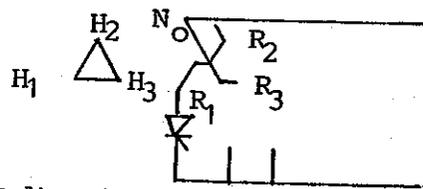
En la figura 1.1 (a), se presentan los circuitos de conexión, nombres y números de identificación para los convertidores estáticos de potencia más relevantes; son estos los generalmente utilizados para alimentar motores de corriente directa. La figura 1.1 (b), muestra los diagramas vectoriales de voltaje, marcas de terminales, relación de fases y voltajes en el devanado de corriente directa. Las marcas de terminales y la relación de fases son seleccionados de tal forma que el secundario y primario estén en fase o que exista entre ellos un desfase mínimo.

La nomenclatura para los circuitos de convertidores estáticos con tiristores, es basada en nombres descriptivos dados en el siguiente orden:

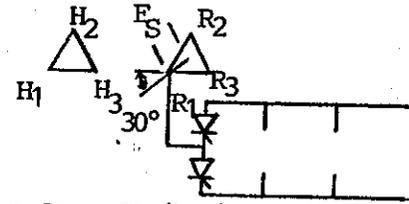
- (1) Conexión de los devanados del transformador en el lado de AC. (H_1 , H_2 , H_3), que pueden ser entre las más comunes: estrella, delta y scott.

- (2) Conexión de los devanados del transformador en el lado de DC. (R₁ , R₂ , R₃ , R₄ , R₅ , R₆), que pueden ser entre las más comunes: estrella, zig-zag, scott y delta.
- (3) Número de fases de los devanados del transformador del lado de DC, que puede ser: tres, cuatro, seis y doce.
- (4) Conexión de los elementos del circuito de tiristores que puede ser: una vía y doble vía.
- (5) Número de pulsos presentes en la salida de DC en un ciclo completo de la fuente de energía, que puede ser: uno, dos, tres, seis y doce pulsos.

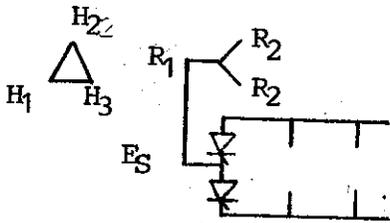
Esta nomenclatura es aplicada en la descripción de las conexiones de los convertidores más utilizados, los cuales se representan en la figura 1.1 (a).



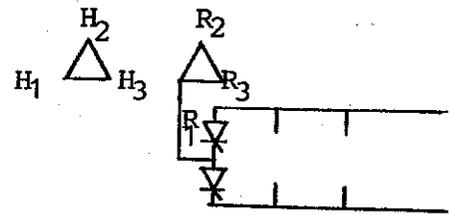
Delta Estrella ZIG ZAG/3 PH/
Una via/tres pulsos



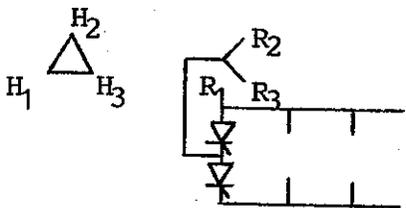
Delta-Delta/3PH/Puente/
DOBLE VIA/6PULSOS/DOBLE VIA



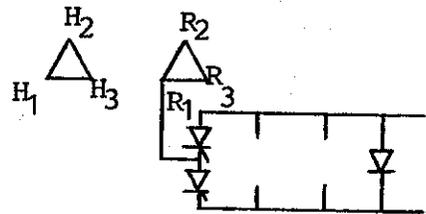
DELTA-ESTRELLA/3PH/PUENTE
DOBLE VIA/6 PULSOS



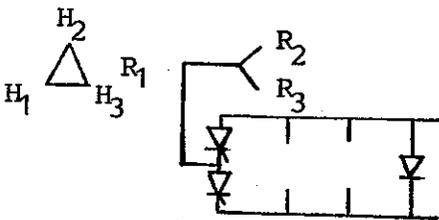
DELTA-DELTA/3PH/
DOBLE VIA/6 PULSOS/PUENTE
SEMI-CONVERTIDOR



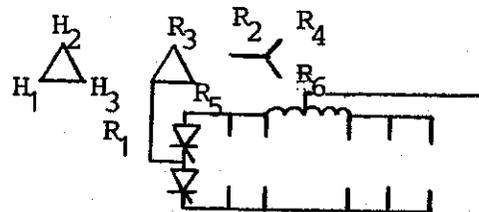
DELTA-ESTRELLA/3PH/
DOBLE VIA 6 PULSOS/PUENTE
SEMICONVERTIDOR



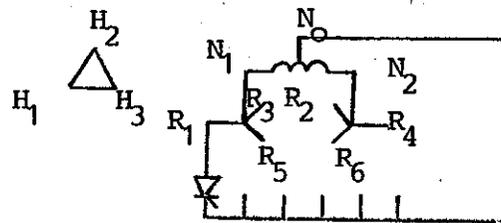
DELTA-DELTA/3PH/
DOBLE VIA/6 PULSOS/PUENTE
SEMICONVERTIDOR CON DIODO DE BY PASS



DELTA-ESTRELLA/3PH
DOBLE VIA/6PULSOS/PUENTE
SEMICONVERTIDOR CON DIODO BY PASS



DELTA-DELTA/ESTRELLA/3PH/
DOBLE VIA/12 PULSOS/
PUENTE MULTIPLE



DELTA-DOBLE ESTRELLA/6PH
UNA VIA/6 PULSOS.

(a) Circuitos típicos de convertidores más utilizados

NOMBRE DEL CIRCUITO	DELTA-ZIG ZAG(Y) 3FH, UNA VIA 3 PULSOS	DELTA-ESTRELLA 3FH PUNTE(2-VIA) 6 PULSOS	DELTA-DELTA, 3FH PUNTE(2-VIA) 6 PULSOS	DELTA-DELTA/ESTRELLA, 3FH MULTIPLE PUNTE(2-VIA) 12PUL.	DELTA-2 ESTRELLA 6FH, UNA VIA 6 PULSOS
NUMERO DE FASES AC	3	3	3	3	3
NUMERO DE PULSOS SALIDA DC	3	6	6	12	6
DIAGRAMA VECTORIAL					
CORRIENTE DEL ANODO					
FORMA DE ONDA					
PROMEDIO EFICAZ	$I_d/3$ $I_d/\sqrt{3}$	$I_d/3$ $I_d/\sqrt{3}$	$I_d/3$ $I_d/\sqrt{3}$	$I_d/6$ $I_d/2\sqrt{3}$	$I_d/6$ $I_d/2\sqrt{3}$
CORRIENTE DEL DEVANADO DC					
FACTOR DE FORMA EFICAZ	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2\sqrt{3}$
KVA NOMINALES	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$
CORRIENTE DEL DEVANADO AC					
FACTOR DE FORMA EFICAZ	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2\sqrt{3}$
KVA NOMINALES	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$	$\sqrt{3} I_d \times I_a \times 10^3$
CORRIENTE DE LINEA AC					
VOLTAJE DC - Edo Ex	$0.477 I_d X_c$	$0.955 I_d X_c$	$0.955 I_d X_c$	$0.477 I_d X_c$	$0.239 I_d X_c$
VOLTAJE DE PICO INVERSO	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$
VOLTAJE DE BARRA + DE CHUVA BARRA - A TIERRA	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$	$I_d E_s$
FRUEBAS PARA PERDIDAS TOTALES EXA	$R_1 - R_2 - R_3$	$R_1 - R_2 - R_3$	$R_1 - R_2 - R_3$	$R_1 - R_2 - R_3$	$R_1 - R_2 - R_3$
DEVIACIONES	$I_a + \frac{1}{3} I_d R_6$	I_a	I_a	I_a	$\frac{I_a + I_b}{2}$

(b) Propiedades de convertidores más utilizados

Figura 1.1: Convertidores más utilizados (a) circuitos típicos (b) propiedades

1.3 Condiciones generales de operación de los convertidores de tiristores

1.3.1 Condiciones normales de operación

- (1) La temperatura ambiente del sitio de montaje de los tiristores y equipos no debe ser menor que 0 °C y no mayor que 40 °C.
- (2) Si el enfriamiento forzado es utilizado para el montaje de los tiristores y equipos, las condiciones del medio de enfriamiento no deben exceder las siguientes características:
 - (a) Para aire forzado, el suministro debe estar entre 0 y 40 °C.
 - (b) Para enfriamiento con agua, ésta debe estar entre 5 y 30 °C.
- (3) La temperatura ambiente y los medios de enfriamiento para los transformadores usados en convertidores deben ser los siguientes:
 - (a) Para equipo exterior enfriado por aire, el transformador debe ser diseñado para operar a una temperatura ambiente del aire que no exceda los 40 °C y que su promedio no sea mayor que 30 °C para cualquier período de 24 horas. Esto se debe a que si la temperatura del aire es de 40 °C; en lugar de enfriar el transformador lo calentará y le ocasionara un disparo por sobrecalentamiento.
- (4) La altitud del lugar de instalación no debe exceder los 1000 metros sobre el nivel del mar.
- (5) La línea de voltaje AC no debe variar a menos del 95%, ni más del 105% de su valor nominal.
- (6) Los transitorios de voltaje deben limitarse a 2.5 veces el valor nominal.

1.3.2 Condiciones anormales de operación

Las condiciones enumeradas a continuación, requieren características de construcción y protección especiales.

- (1) Exposición a gases tóxicos.

- (2) Exposición a excesiva humedad.
- (3) Exposición a polvo excesivo.
- (4) Exposición a polvo abrasivo.
- (5) Exposición a vapor.
- (6) Exposición a vapores de aceite.
- (7) Exposición a mezclas explosivas de polvo o gases.
- (8) Exposición a aire salado.
- (9) Exposición a vibraciones anormales, golpes o inclinaciones.
- (10) Exposición al agua o agua de goteras.
- (11) Exposición a malas condiciones de almacenamiento o transportación.
- (12) Exposición a repentinos o excesivos cambios de temperatura

1.3.3 Clasificación de los convertidores de tiristores

Esta clasificación es aplicable a la unidad completa, incluyendo a componentes tales como conductores, interruptores, reactores y transformadores. Es importante anotar que las constantes térmicas para los tiristores y diodos (incluyendo sus elementos disipadores), son mucho menores que la del transformador del convertidor y el control del motor. Por esta razón, las sobrecorrientes altas de corta duración que ocurren en servicios normales de carga de los reguladores de velocidad para motores de corriente directa, son de mayor significado para el convertidor de tiristores mismo, que para los transformadores y motores. Estas corrientes transitorias tienden a causar altos incrementos rápidos de temperatura en los tiristores y los diodos.

Para los fabricantes de tiristores y diodos, la temperatura máxima de la junta es una limitante sobre la cual se puede perder el control y ocasionar una falla en el dispositivo.

Esta temperatura no puede ser medida en un dispositivo semiconductor, pero sí puede ser calculada por medio de un perfil de cargas proporcionado por el usuario del convertidor.

Quando seleccionamos una clase de servicio, se debe de tener especial cuidado con los requerimientos de cada aplicación en particular; en la actualidad se definen dos diferentes tipos de clasificación en términos de la corriente:

- (1) Clasificación de prueba: esta define la corriente de salida que puede ser suministrada por el equipo a la carga, bajo condiciones bien definidas, sin provocar falla de cualesquiera de sus componentes, o exceder cualesquiera de las limitaciones impuestas para éstos. Esta prueba proporciona una base para la verificación de la capacidad del equipo convertidor.
- (2) Clasificación de servicio: esta define la corriente de salida que puede ser suministrada por el equipo a su carga, bajo condiciones repetitivas cíclicas, sin provocar falla de cualesquiera de sus limitaciones. Esta prueba proporciona una base para la verificación de la capacidad del convertidor para resistir ciclos repetitivos de alguna aplicación específica.

1.3.4 Convertidores estáticos para servicio electromecánico

La clasificación normalizada para las unidades convertidoras de potencia con tiristores, utilizada para este tipo de servicio, es del 100% de su carga nominal continuamente.

Quando el rectificador está operando con su voltaje nominal, al 100% de su corriente nominal y todos sus elementos han alcanzado una temperatura constante, la unidad convertidora puede ser capaz de resistir una sobrecorriente momentánea de tal magnitud y duración mientras sea necesario, hasta que el equipo de regulación automática de carga o de protección de sobrecorriente funcione y proteja todas las partes de la unidad de rectificación de cualquier daño.

1.3.5 Convertidores estáticos de aplicación general (menos de 100 kW)

La clasificación normalizada para este tipo de aplicación es:

- (1) 100% de carga nominal continua.
- (2) 150% de corriente durante un minuto, seguido de 100% de carga nominal.
- (3) 200% de corriente durante 10 segundos, seguidos de 100% de carga nominal.

- (2) 5% arriba del voltaje nominal en los devanados de corriente alterna del transformador a 95% de la corriente nominal de salida.

1.3.10 Voltaje nominal de corriente directa para convertidores estáticos

El voltaje nominal en un convertidor estático es el valor máximo de operación continua asignado por el fabricante. Frecuentemente el convertidor tiene que ser diseñado para voltajes de corriente directa mucho más altos que el nominal, con el propósito de conocer las necesidades de control y permitir un margen adicional para caídas de voltaje, variaciones en la línea de alimentación AC, etc.

El voltaje nominal de DC debe ser mantenido constante para todos los valores específicos de carga, incluyendo las corrientes de servicio de corta duración, aun cuando el 95% del voltaje AC de suministro al convertidor esté presente.

1.3.11 Valores nominales de temperatura para convertidores estáticos

Los límites máximo y mínimo de la temperatura ambiente o de la temperatura de los medios de enfriamiento, deben ser especificados por el usuario o por el fabricante en su oferta. Estos valores preferiblemente deben ser especificados en incrementos de 5°C.

1.3.11.1 Temperatura nominal para la sección de tiristores y equipos

Si otra cosa es especificada, la sección de tiristores y otros elementos deben ser capaces de operar bajo las siguientes condiciones:

- (1) Una temperatura ambiental que no exceda los 40°C en el caso de enfriamiento por aire.
- (2) Una temperatura del líquido de enfriamiento que no debe exceder los 30°C en el caso particular de enfriamiento por líquido.
- (3) La operación de la sección de tiristores y equipos debe incluir períodos sin carga abajo de: 0°C de temperatura ambiente para enfriamiento por aire forzado, 5°C de temperatura de entrada del aceite para enfriamiento por aceite y 5°C de temperatura de entrada del agua para enfriamiento por agua.
- (4) Almacenamiento a temperatura abajo de -30°C (habiendo removido el líquido de enfriamiento)

Es importante anotar, que si el equipo se almacena a bajas temperaturas, se deben tomar precauciones para evitar la condensación de la humedad en los dispositivos, porque esta se puede congelar.

1.3.11.2 Temperatura nominal para los transformadores

- (1) Equipo exterior enfriado por aire: en este caso, el transformador debe ser diseñado para funcionar a una temperatura ambiente que no exceda los 40 °C y no promedie más que 30 °C para cualquier periodo de 24 horas.
- (2) Equipo interior enfriado por aire: en este caso, el transformador debe ser diseñado para funcionar a una temperatura ambiente del aire de 40 C continuamente
- (3) Equipo enfriado por agua: en este caso, el transformador debe ser diseñado para funcionar con el agua de enfriamiento de entrada que no exceda los 30 °C y no promedie más que 25 °C para cualquier período no mayor que 24 horas.
- (4) Límites de incrementos de temperatura: éstos son mostrados en la tabla 1.1.

Clasificación de Servicio para transformadores	Porcentaje de sobrecarga para transformadores	Máximo ciclo de servicio valor rms en p.u.	Clase de aislamiento	
			Inmerso en aceite	Tipo seco
			105 — 120	155 — 220
T ₁	— — — —	1.00	55°C — 65°C	80°C — 150°C
T ₂	125% - 2 horas	1.00	55°C — 65°C	70°C - 140°C
T ₃	125% - 2 horas	1.08	50°C — 60°C	65°C - 130°C
T ₄	125% - 2 horas	1.18	45°C — 55°C	60°C - 120°C

Tabla 1.1: Incrementos de temperatura de °C para los transformadores de convertidores de tiristores

NOTAS:

- (1) Los incrementos de temperatura están basados en una temperatura ambiental máxima de 40°C con una temperatura ambiente diaria promedio que no excede 30°C . Si ambas temperaturas, máxima o promedio, son excedidas, el aumento de temperatura del transformador con la carga nominal sería menor que el mostrado en la tabla 1.1 en 5°C para un exceso o menos en las temperaturas ambientales máxima o promedio
- (2) La clase de temperatura del transformador (105, 120, 155, 220), designa el aislamiento de papel termicamente mejorado; con un punto permisible de temperatura más alto que (105, 120, 155, 220)

2. MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

2.1 Consideraciones generales

Las notables ventajas de las máquinas de corriente directa son consecuencia de la gran variedad de condiciones operativas que se pueden conseguir seleccionando adecuadamente la forma de excitar los devanados inductores, la cual puede ser independiente o autoexcitado. Entre los autoexcitados, se puede mencionar al motor serie, derivación y compuesto. Los diferentes métodos de conexión de motores de DC se pueden apreciar en la figura 2.1.

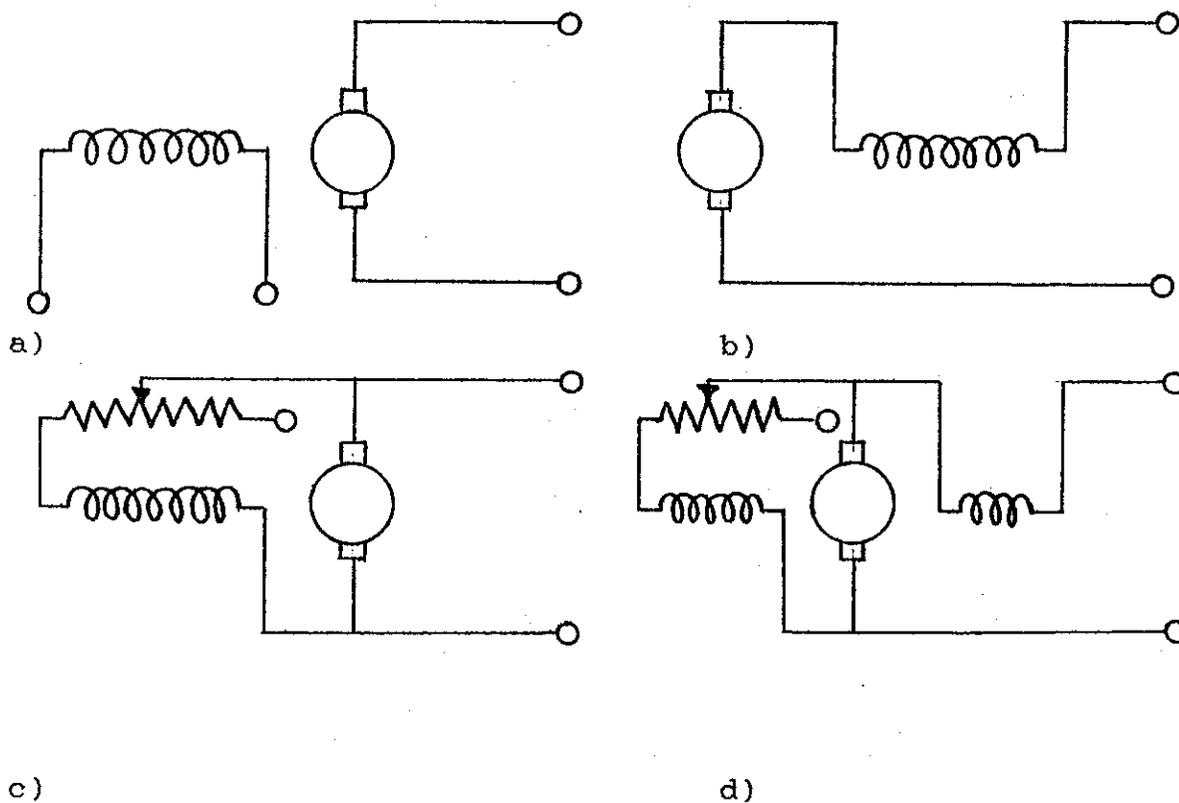


Figura 2.1: a) Excitación independiente b) Excitación serie
c) Excitación paralelo d) Excitación compuesta

La relación entre la fuerza electromotriz (f.e.m.), inducida en el motore E_a y la tensión en bornes V_t es:

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad \text{Ec. 2.01}$$

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad \text{Ec. 2.02}$$

siendo V_t e I_a el voltaje en terminales y la corriente de entrada en el inducido. Por otra parte, la fuerza electromotriz inducida se relaciona con otras variables de la siguiente forma:

$$E_a = K_a \Phi_d \omega_m \quad \text{Ec. 2.03}$$

$$E_a I_a = K_a \Phi_d \omega_m I_a = T_a \omega_m \quad \text{Ec. 2.04}$$

la ecuación 2.04 nos dice que la potencia eléctrica instantánea relacionada con la tensión inducida debida al movimiento, es igual a la potencia mecánica instantánea relacionada con el par magnético; fluye dicha potencia en uno u otro sentido, según si la máquina actúa como generador o como motor.

En los motores con excitación independiente, el flujo es casi constante; un aumento del par va acompañado de un incremento casi proporcional de la intensidad en el inducido y en consecuencia de una ligera disminución de la fuerza contraelectromotriz para permitir el paso de la nueva intensidad aumentada a través de la pequeña resistencia del devanado, y puesto que la fuerza contraelectromotriz viene determinada por el flujo y la velocidad, ésta deberá disminuir un poco.

El motor derivación, al igual que el de inducción de rotor tipo jaula de ardilla, es de velocidad casi constante con una variación máxima del orden del 5% entre su condición de vacío y plena carga. Tanto el par máximo como el de arranque están limitados por la máxima intensidad que puede ser conmutada correctamente, sin que el motor sufra algún desperfecto.

Por otro lado, el motor serie es de velocidad variable con una característica velocidad-par inclinada; ésta característica es ventajosa en aplicaciones en que existan fuertes pares de sobrecarga, ya que el exceso de energía requerida queda atenuada por la disminución de la velocidad. Asimismo, el par de arranque se ve favorecido por el aumento de flujo al aumentar la corriente.

En los motores de excitación compuesta, el devanado en serie puede conectarse de manera que su fuerza magnetomotriz (f.m.m.), se suma a la del devanado derivación, o que se reste, y así se tienen motores de excitación compuesta aditiva o diferencial. La característica velocidad-par es intermedia entre las de los motores serie y derivación. La pérdida de velocidad con la carga depende del número relativo de espiras en cada uno de los devanados.

Las características velocidad-par de los tres tipos de motores de corriente continua se puede observar en la figura 2.2.

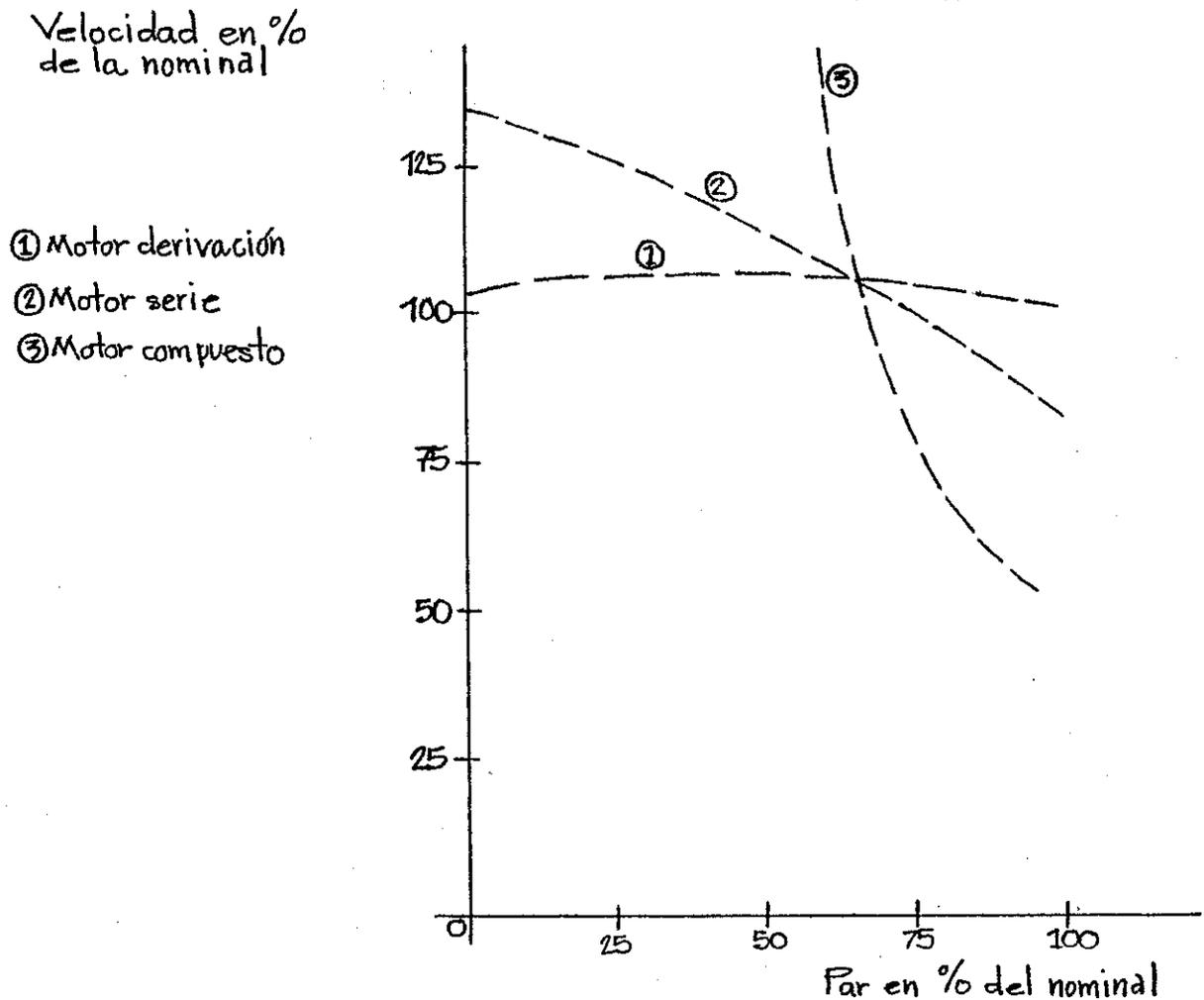


Figura 2.2: Características de los motores de corriente continua

Sólo resta agregar que las ventajas prácticas de los motores de corriente continua residen en la gran variedad de características que se pueden conseguir con los diferentes tipos de excitación que se mencionaron con anterioridad y en su versatilidad, la cual permite su adaptación a los sistemas de control que pueden ser manuales o automáticos.

2.2 Regulación de la velocidad W_m en los motores de corriente directa

Las máquinas de corriente continua en general se adaptan mucho mejor a la regulación de su velocidad que las máquinas de corriente alterna con campos giratorios a velocidad constante. De hecho, esta posibilidad de variar la velocidad dentro de amplios límites ajustándola a las necesidades del servicio, es la que ha situado a las máquinas de continua en una sólida posición competitiva para muchas aplicaciones industriales modernas. Los tres procedimientos más empleados para la regulación de la velocidad son: variación del flujo magnético, variación de la resistencia del inducido y variación de la tensión en bornes del inducido.

2.2.1 Regulación de W_m por variación de flujo magnético

Es el más utilizado y normalmente se consigue disponer de él, usando un reostato en el circuito del devanado derivación. Constituyendo una de las cualidades de los motores derivación, aunque naturalmente es aplicable a los de excitación compuesta. La velocidad mínima es la que corresponde al campo máximo o sea cuando $R_f = 0$ y la máxima que se presenta cuando el flujo es mínimo; es importante hacer notar que esta condición tiene como limitante los efectos de la reacción del inducido cuando el campo es excesivamente débil, ya que esto produciría inestabilidad y una conmutación deficiente. La corriente máxima I_a en el devanado inducido es la nominal para que el motor no se caliente excesivamente y la fuerza contraelectromotriz E_a se mantiene constante, ya que el efecto del cambio de velocidad se ve compensado por el cambio del flujo magnético; el producto $E_a I_a$ y por lo tanto la potencia disponible se mantiene uniforme en todo el campo de velocidades. Por esta razón, se dice que la regulación de W_m por medio de la variación del flujo magnético es a potencia constante. En la siguiente ecuación, se puede apreciar claramente cómo varía la W_m con el flujo magnético.

$$W_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \Phi_d}$$

Ec. 2.05

2.2.2 Regulación de W_m por variación de la resistencia del inducido

Consiste en insertar resistencias en serie con el circuito del inducido; se puede utilizar indistintamente en los motores serie, derivación o excitación compuesta. En todos estos casos, la regulación de la velocidad se debe a que E_a sufre una disminución debido a la caída de tensión que se experimenta al circular I_a por la resistencia insertada. Las pérdidas de potencia en la resistencia exterior son muy grandes, especialmente cuando se necesita una velocidad muy reducida; de hecho si el par resistente es constante, la potencia de entrada en el motor y el reostato se mantienen constantes, mientras que al disminuir W_m la potencia de salida decrece; es por esta razón que los costos de operación son relativamente altos si se trabaja con poca velocidad en períodos largos. Por otra parte, como el costo de instalación inicial es relativamente bajo, este tipo de regulación resulta idóneo para casos en que el tiempo que hay que trabajar a velocidad reducida es pequeño. Para este tipo de regulación, se admite un par constante, ya que tanto el flujo magnético como la corriente de armadura se mantiene constante. Contrariamente a lo que sucede con la regulación de velocidad por variación del flujo magnético, con regulación de velocidad por la resistencia del inducido, se admite un par constante, ya que tanto el flujo como aproximadamente la intensidad en el inducido mantienen su valor, aun cuando varíe la velocidad.

2.2.3 Regulación de W_m por variación de la tensión en bornes del inducido

Este método se basa en que cualquier cambio de la tensión en bornes del inducido va acompañado de una variación de la fuerza contraelectromotriz E_a , y por consiguiente, siendo el flujo constante, la velocidad tiene que experimentar un cambio. En el mayor número de casos, la fuente disponible de energía es una corriente alterna de tensión constante, por lo que se necesita un equipo de rectificación estático o en su defecto un grupo motor-generador que nos proporcione la tensión continua necesaria para poder alimentar el devanado inducido del motor en estudio. El esquema típico de este procedimiento llamado también sistema Ward-Leonard, lo podemos apreciar en la figura 2.3 y consta de un generador que suministra potencia al inducido del motor, cuya velocidad se trata de regular. La tensión en el inducido del motor de DC, se regula ajustando el reostato de excitación del generador de DC con excitación independiente, para obtener así una regulación precisa dentro de un amplio campo de velocidades.

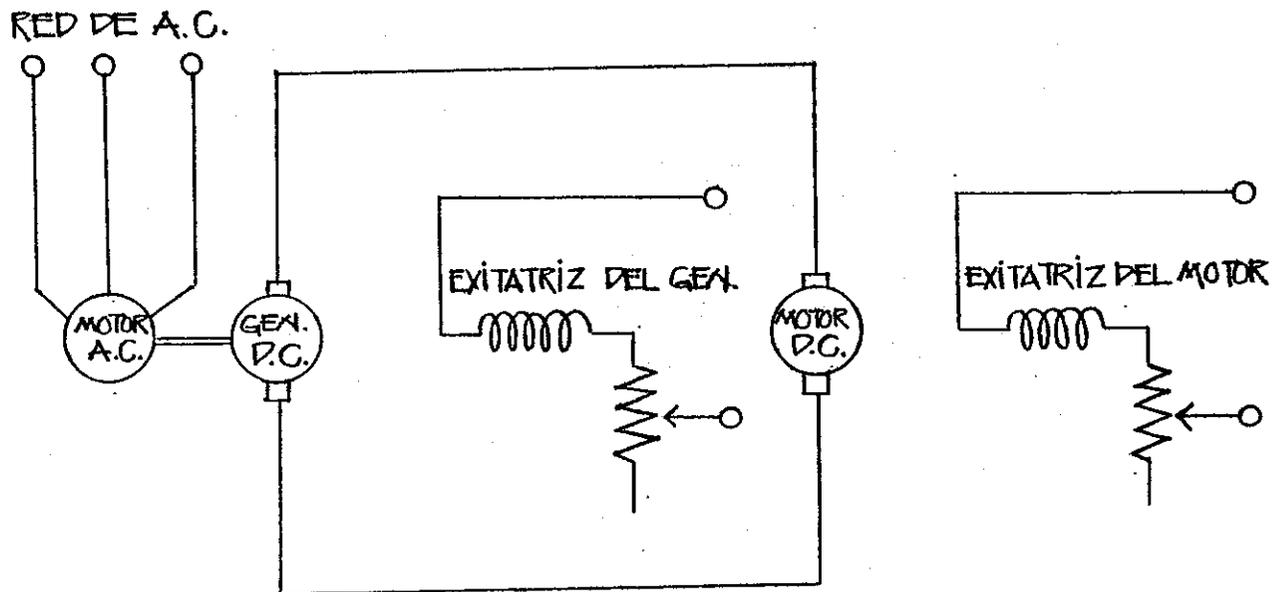


Figura 2.3: Sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad por medio de la variación de la tensión en bornes del inducido

Frecuentemente, para conseguir un campo de velocidades más amplio, la regulación de la tensión del generador se combina con la que se obtiene por medio del campo del motor mismo variando el reostato de la excitatriz. Con esta doble regulación, ya es preciso definir una velocidad base del motor, que será la que corresponde a tener la tensión normal en el inducido y el pleno campo inductor. Las velocidades mayores a la básica se consiguen regulando el campo inductor y la inferiores regulando la tensión en el inducido. En la gama de velocidades por arriba de la básica, el funcionamiento sólo admite potencia constante por medio de la variación del flujo magnético a través del reostato en el inductor derivación, mientras que por debajo de dicha velocidad es admisible mantener el par constante como en la regulación por variación de resistencia del inducido, ya que tanto la intensidad en él, como el flujo se mantienen aproximadamente constantes.

2.3 Efecto de los convertidores estáticos sobre los motores de corriente directa

2.3.1 Voltaje de rizado del convertidor

La diferencia más importante entre una fuente de potencia rotativa y una estática es que la salida de corriente de la fuente estática contiene rizado.

La magnitud del voltaje de rizado depende del número de fases, ángulo de disparo y en menor magnitud de la corriente de carga. El voltaje de rizado aumenta cuando el número de fases es reducido y cuando el ángulo de disparo se incrementa.

La corriente de rizado es función del voltaje de rizado y de la impedancia total del circuito que incluye a la carga y al transformador del convertidor. Los convertidores para motores de corriente directa de gran tamaño son normalmente arreglados para funcionar con 6 o 12 fases. Se podría anticipar que una cantidad de rizado en el suministro de potencia de una máquina electromagnética podría producir efectos adversos en el funcionamiento de la máquina rotativa.

De la misma manera, la generación de corrientes parásitas producidas por la frecuencia pulsante de las armónicas podría producir pérdidas adicionales, desfasamiento del eje en cuadratura y otros disturbios no comunes en máquinas alimentadas con una fuente de potencia constante.

2.3.2 Pruebas a motores de corriente directa alimentados con convertidores de tiristores

El propósito de estas pruebas es para investigar el efecto de la fuente de energía con convertidor sobre la conmutación, calentamiento, vibración y potencia en el eje.

La máquina rotativa más adecuada para realizar estas pruebas es un generador, el cual se hizo funcionar como motor y se alimentó primero desde un generador de DC, para posteriormente alimentarlo desde un convertidor de 6 fases bajo condiciones duplicadas de carga y con varias cantidades de rizado.

Para la prueba de conmutación, se utilizó el método llamado banda oscura, el cual ha demostrado ser el único método confiable para evaluar la conmutación con convertidores y, por lo tanto, es el utilizado aquí. El ancho y forma de la banda oscura es una indicación de la habilidad de conmutación de la máquina. Experiencias prácticas sobre cientos de máquinas de DC han probado que en servicio el ancho de banda es una medida del funcionamiento de la conmutación y del relativo grado de mantenimiento esperado. Las pruebas comparativas ilustraron que una degradación del funcionamiento de la conmutación ocurre cuando un convertidor es utilizado en la alimentación de un gran motor de corriente directa. Este deterioro de la conmutación ocurre por varias razones. La corriente de rizado producida por el convertidor es de una alta frecuencia que es suficiente para incrementar el voltaje de reactancia

de las bobinas pasando por el momento de la conmutación, así el ancho de la banda oscura tiende a plegarse más cuando la magnitud de la corriente de rizado se incrementa. Las corrientes parásitas en el circuito magnético del eje en cuadratura, podrían causar al flujo del polo de conmutación un atraso detrás de las variaciones de las corrientes armónicas.

Un alto grado de saturación, asociado con el incremento en el flujo de dispersión, podrían también incrementar el desfase entre la corriente y el flujo en el eje en cuadratura. La corriente de rizado no es sinusoidal, sino más bien una serie de medias sinusoides.

En la figura 2.4, la reducción del ancho de banda oscura cuando la corriente de rizado varía de 0% a 2% es menor que un 10%, mientras que cuando varía de 0% a 5% se convierte en 25%. Esta diferencia se hace más pronunciada con un bajo voltaje. Por lo tanto, si un motor fuera a ser utilizado con un 5% de rizado eficaz, sería necesario asegurarse de que el motor tuviera una habilidad de conmutación 25% mayor que la necesaria.

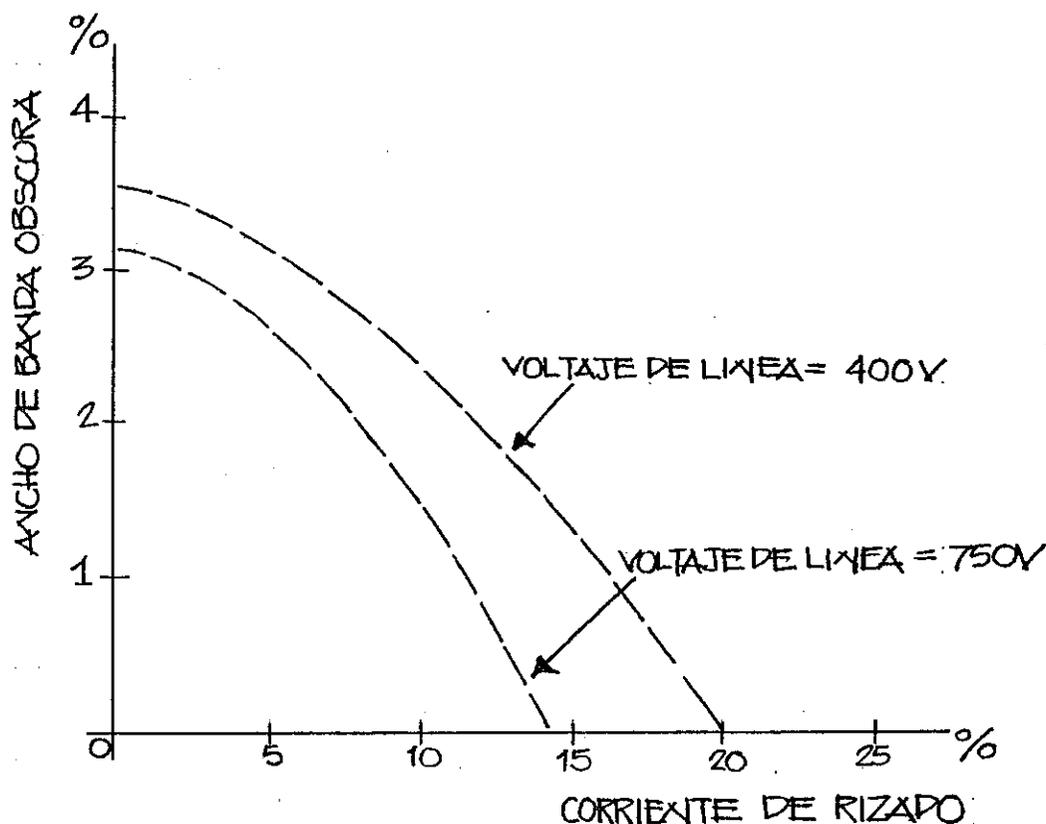


Figura 2.4: Corriente de rizado a voltaje constante (% eficaz) versus ancho de banda oscura en % de la corriente nominal

Los resultados de estas pruebas sugieren que la corriente de rizado para un motor grande de corriente directa no puede excederse de un 2% de la eficaz, si un mantenimiento normal es programado para este equipo. La inductancia de los motores grandes, es generalmente suficiente para limitar la corriente de rizado a menos de un 2% de la eficaz cuando un convertidor de doce fases es utilizado para alimentar los bornes del motor. Las aplicaciones de convertidores de seis fases necesitan el uso de un reactor externo, si se quiere mantener la corriente de rizado en su valor límite; esto se debe al bajo valor de la reactancia del motor en bajas frecuencias y a la gran magnitud del voltaje de rizado.

Cuando un gran motor es seleccionado para utilizarlo con un convertidor, el ingeniero debe encararse con una o varias alternativas adecuadas para asegurar un funcionamiento satisfactorio de la conmutación, entre las que tenemos:

- (1) Utilizar una suficiente cantidad de fases en el rectificador para producir una menor cantidad de rizado.
- (2) Introducir suficiente cantidad de inductancia, para minimizar el contenido de rizado de la corriente de armadura (se recomienda un 2% de rizado eficaz a plena carga).
- (3) Asegurarse de que el motor esté especialmente diseñado para tener un exceso de habilidad de conmutación, para que al valor esperado de rizado, el funcionamiento de la conmutación pueda ser comparado con el que se obtendría, si este mismo motor fuera alimentado con una fuente convencional de corriente directa.

Para la prueba de calentamiento, se deben montar sensores térmicos sobre el motor para evaluar el cambio de calentamiento debido a la corriente de rizado. La mayor parte de estos sensores deben montarse sobre los devanados del estator y la carcasa, y los restantes serán asegurados en las bobinas del rotor y laminaciones. Seis anillos deslizantes proporcionarán la unión del rotor a los sensores térmicos. Las lecturas de calor fueron tomadas con carga nominal y a 120% de carga nominal. El accionamiento del motor fue llevado a cabo primero con un rectificador que contiene varias cantidades de retardo de fase y en seguida desde un generador de corriente directa. La corriente de rizado a voltaje nominal fue de un 6% de la eficaz y su valor se incrementaba cuando el voltaje se reducía. Con el voltaje más bajo de prueba, se reveló un ligero incremento en la temperatura (debido a la corriente de rizado), sobre la observada, con una potencia de generador.

La diferencia de temperatura para ambos componentes; estator y rotor, varió desde 0 a 5 grados centígrados cuando la corriente de rizado fue incrementada desde un 6 a 15.7% de la eficaz. En resumen, el efecto de la corriente de rizado sobre el incremento de temperatura de los motores grandes puede ser calificado categóricamente como inconsecuente. Una corriente de rizado de magnitud significativa como para producir calentamiento, no puede ser obtenida debido al límite impuesto por el funcionamiento de la conmutación.

La prueba de vibración se hace al mismo tiempo que la prueba de calentamiento, y para tal efecto se utiliza un haz luminoso, el cual mide la vibración de los cojinetes, base y carcasa. Esta prueba se realiza también cuando el motor se alimenta desde un generador y desde un convertidor. La mayor parte de estas pruebas no han detectado ningún cambio en la vibración para varias corrientes de rizado. El único cambio observado fue el relacionado con el ruido aerotransportado, el cual nos sugiere que se debe tener especial cuidado en asegurar las laminaciones y otras partes internas que pueden desprenderse y caer dentro del motor.

Para la prueba de potencial en el eje, todos los pedestales fueron aislados de la base y tanto un voltímetro de corriente alterna como un analizador Simpson fueron usados para medir el voltaje alterno como el directo desde el pedestal a la base. Los cojinetes fueron también examinados antes y después de la prueba con el rectificador para poder determinar algún daño en el forro de los mismos. Durante la prueba con el generador de corriente directa, el máximo voltaje medido corresponde a 0.5 voltios. Bajo condiciones dobles de carga con el rectificador, el voltaje del eje se incrementa desde 3 hasta 9 voltios, lo cual depende de la cantidad de retardo de fase. Estas mismas mediciones al ser realizadas con un medidor de alta impedancia como el analizador Simpson, produjeron una lectura de 33 voltios. Los resultados indican que se debe tener gran cuidado para asegurar un adecuado aislamiento de los pedestales cuando los motores son alimentados por un rectificador.

3.

INFLUENCIA DEL CONJUNTO CONVERTIDOR-MOTOR SOBRE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

3.1 Consideraciones generales

El diagrama unifilar de la figura 3.1 muestra al convertidor estático C, que es alimentado de la fuente de energía G por medio de la línea trifásica L. La

reactancia de la fuente $X_G + X_{T2}$ y la línea L están en serie con la reactancia X_t del transformador que alimenta al

convertidor C. Este convertidor genera corrientes armónicas I_h , las cuáles circulan entre éste y el generador.

Lógicamente, esta corriente produce voltajes armónicos, cuya magnitud se puede definir de la siguiente forma:

$$E_h = I_h \times X_h \quad \text{Ec. 3.01}$$

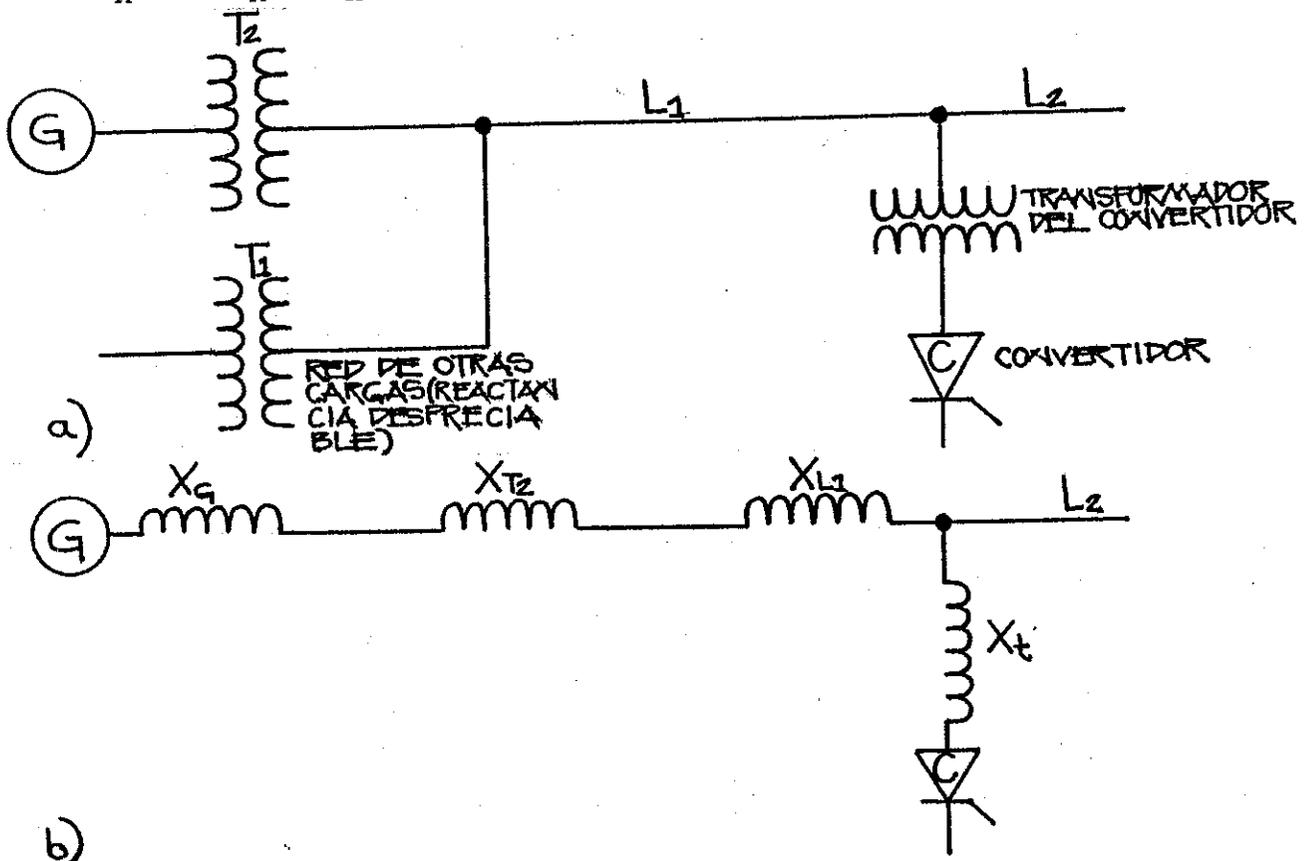


Figura 3.1: Sistema general de potencia a) elementos en forma esquemática b) como diagrama unifilar

Para la línea L que alimenta otras cargas, los voltajes armónicos en el punto A podrían generar corrientes armónicas que circulen por esta línea, aunque la potencia al rectificador sea suministrada únicamente por medio de L .

De esta manera, se puede decir que entre más grande es el valor de X (reactancia armónica), el voltaje armónico será más grande en el punto A ; lo que implica que las corrientes armónicas inyectadas por la línea L , sufrirán un incremento en su magnitud. Las corrientes armónicas generadas por el convertidor pueden fluir a cualquier parte del sistema de corriente alterna, y depende su magnitud del valor que tenga la impedancia de cada ramal a la frecuencia armónica.

De esta forma, la inductancia mutua que existe entre las líneas de potencia y las líneas telefónicas provoca la existencia de voltajes armónicos en los sistemas de comunicación, los cuales a su vez pueden causar niveles considerables de ruido, a tal extremo de que los mensajes transmitidos no se entiendan. En la actualidad, las técnicas de transmisión a base de alta frecuencia y la utilización de cables blindados, minimizan la susceptibilidad de los sistemas de comunicación a las armónicas en los sistemas de potencia.

Las corrientes armónicas pueden causar calentamientos excesivos a las máquinas síncronas y de inducción, de tal forma que a la corriente fundamental se le suman las armónicas de orden $Kq+1$, que son de secuencia positiva, mientras que las de orden $Kq-1$ son de secuencia negativa, y el exceso de temperatura se presenta en partes críticas como son cojinetes y el propio rotor. Esta características particular nos limita la cantidad de carga estática (convertidores), que puede ser manejada con el generador síncrono. Para los sistemas de potencia, las cargas estáticas o no lineales son pequeñas comparadas con el tamaño de los generadores; pero cuando la generación es local, los generadores síncronos pueden sufrir daño si circulan corrientes armónicas por ellos.

El ruido producido por las corrientes armónicas, cuando actúa sobre los sistemas de regulación y control, puede provocar errores en la operación de estos equipos, por tal razón se recomienda aislar los terminales de señal para corregir este tipo de problemas.

En los sistemas de distribución que alimentan cargas domiciliarias, la más notable indicación de la existencia

de corrientes armónicas es la interferencia a las señales televisivas. Los instrumentos de medición son afectados por las corrientes armónicas, particularmente bajo condiciones de resonancia, debido a que en este momento se presentan altos voltajes armónicos. Además, el desbalance creado por este tipo de corrientes causa la operación errónea en los medidores de kilovatios-hora y relevadores de sobrecorriente.

En el caso de los motores, cuando están trabajando con cargas críticas, las pulsaciones del torque producidas por las corrientes armónicas pueden ser dañinas para el proceso. Además, es preciso anotar que el sistema mecánico puede entrar en resonancia, si su frecuencia natural es excitada por las armónicas.

Por otra parte, tanto los balastos de las lámparas fluorescentes, como las de mercurio, muchas veces utilizan condensadores, que juntamente con la inductancia pueden entrar en resonancia con alguna de las corrientes armónicas, y producir con esto excesivo calentamiento y, en el peor de los casos, la falla de la luminaria.

Para finalizar, se puede decir que los convertidores estáticos se comportan como una carga, la cual presenta dos importantes pero indeseables propiedades: la primera es que esta carga nunca tiene un factor de potencia igual a la unidad, y la segunda es de que la carga inyecta corrientes armónicas hacia el sistema de corriente alterna como se vió anteriormente. Vale la pena agregar que una de las aplicaciones de estos dispositivos se traduce en uno de los métodos modernos para controlar la velocidad de los motores de DC, sin embargo, con el uso de estos dispositivos en el lado de corriente alterna se experimentará un valor pico de potencia reactiva, cuando se quieran obtener pequeñas velocidades de los motores, la cual puede originar indeseables caídas de tensión sobre todo cuando la potencia de cortocircuito de la red es baja; además, los armónicos que se generan pueden ocasionar severos problemas de resonancia y distorsión de la tensión, y por eso es necesario controlarlos.

3.2 Control de las corrientes armónicas

Las corrientes armónicas pueden ser controladas por medio de varias técnicas, entre las cuales tenemos:

- (1) Filtros en paralelo.
- (2) Multiplicación de fases.

3.2.1 Filtros en paralelo

Los filtros en paralelo para reducir las corrientes armónicas que fluyen hacia el sistema de potencia, consisten de uno o más circuitos serie L-C, que actúan como filtros para cada una de las armónicas más relevantes. Para los sistemas de transmisión HVDC, los filtros pasa altos se deben sintonizar cerca de la 17 armónica. Los filtros en los sistemas industriales pueden ser simples, debido a la alta restricción en los sistemas de bajo voltaje. La necesidad de filtrar las armónicas superiores depende de los niveles de cortocircuito en el punto de suministro de energía a la industria analizada. El nivel de restricción depende de la relación X/R del circuito equivalente.

En la instalación de un gran convertidor AC/DC, dos o más filtros sintonizados son empleados para las armónicas de orden inferior (uno para cada una), y un filtro pasa altos para las de orden superior. Para los convertidores pequeños, un filtro pasa altos puede ser suficiente para la supresión de las armónicas; esto depende del número de pulsos del convertidor y del análisis de la respuesta de frecuencia característica de la red en estudio.

En términos generales, los filtros para las corrientes armónicas son diseñados para tener dos propósitos; reducir el nivel de armónicas a valores aceptables en los terminales del convertidor AC/DC y suministrar totalmente o parte de la potencia reactiva necesaria para operar el convertidor. El segundo propósito, normalmente, determina el tamaño del banco de filtrado; sin embargo, cuando el convertidor es ligeramente cargado, el exceso de potencia reactiva generada por el o los filtros, puede necesitar un equipo adicional para corregir el adelantamiento de la corriente, y por lo consiguiente del factor de potencia. Los convertidores autoconmutados pueden trabajar a cualquier factor de potencia y no necesitan la compensación de potencia reactiva.

Un importante factor en el diseño del filtro es la impedancia del sistema de potencia vista desde el convertidor. Dicha impedancia está en paralelo con la del filtro y da como resultado una frecuencia de resonancia paralelo; y es ésta la que determina la efectividad del filtro.

En la realidad se puede asumir que el sistema y el filtro pueden entrar en resonancia a la frecuencia deseada, con el inconveniente de que el sistema de potencia posee un límite del ángulo de impedancia. Si este valor fuera excedido cuando el sistema y el filtro entran en resonancia, se tiene que calcular el filtro sin asumir el punto de resonancia.

3.2.2 Multiplicación de fases

Los convertidores monofásicos son comúnmente usados para pequeñas cargas. Por el bajo costo inicial, un circuito de media onda podría ser utilizado cuando el consumo de corriente sea pequeño. Para grandes cargas y tener una menor generación de armónicos, los circuitos de onda completa deben ser utilizados. El más utilizado de los convertidores estáticos polifásicos es el de onda completa con tiristores de seis pulsos. Un convertidor con las mismas características que el anterior, a excepción de que su número de pulsos se multiplica, elimina de la línea de alimentación a la 5, 7, 17, 19, etc. frecuencias armónicas. Posteriores multiplicaciones de fases podrían reducir o eliminar otras corrientes armónicas; por ejemplo, un convertidor de 36 pulsos es construido con 6 circuitos puente de 6 pulsos cada uno y con un desfase de 10 grados eléctricos entre transformadores, los cuales se consiguen ya sea por medio de cambio de conexiones o colocando bobinas adicionales en los devanados primarios de cada transformador. Esta configuración posee la particularidad de que si alguno de los 6 convertidores queda fuera de servicio, las corrientes armónicas equivalentes a él, se hacen presentes en la barra de suministro al convertidor general.

Para el caso de convertidores muy grandes, las corrientes armónicas adquieren niveles perjudiciales que producen un factor de distorsión más grande que los límites especificados en las tablas 3.2 y 3.3 y siempre se hace necesario, además de la multiplicación de fases, la utilización de filtros en paralelo para minimizar las corrientes armónicas. La multiplicación de fases como medio de control de las corrientes armónicas se hace más efectiva en instalaciones en donde los convertidores operan con cargas iguales y todos son de igual tamaño.

Las primeras cuatro décadas de operación y aplicación de los rectificadores fueron limitadas a las industrias de electroquímica y electrometalurgia. Desde mediados de 1960, el desarrollo de los convertidores estáticos de potencia eficientes y de bajo costo, se fue expandiendo y multiplicó la aplicación de este tipo de equipo a cientos de industrias.

El uso de los convertidores en la industria de la electrometalurgia generaba corrientes armónicas, las cuales introducían ruido en el sistema de potencia y en las líneas utilizadas para las comunicaciones. Esto se logró corregir con la implementación de los convertidores múltiples. Las figuras 3.2 a 3.5 muestran las formas de onda de corriente típicas de cuatro convertidores estáticos desfasados 15 grados, el uno de los otros, para hacer un sistema de 24 pulsos. El valor por unidad de las corrientes armónicas es

descrito para cada convertidor, juntamente con la forma de onda.

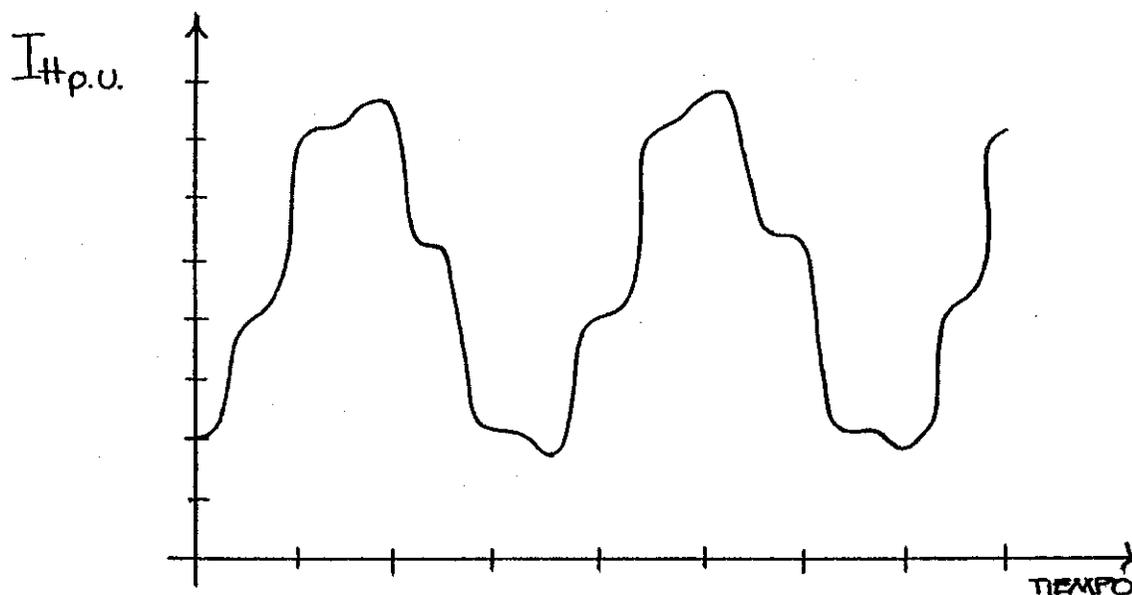


Figura 3.2: Corriente del convertidor estatico número uno, conectado a un transformador delta/delta; su contenido de armónicas es el siguiente:

5 = 18.45 p.u.	7 = 8.14 p.u.
11 = 3.48 p.u.	13 = 2.19 p.u.
17 = 1.33 p.u.	19 = 0.97 p.u.
23 = 0.91 p.u.	25 = 0.64 p.u.

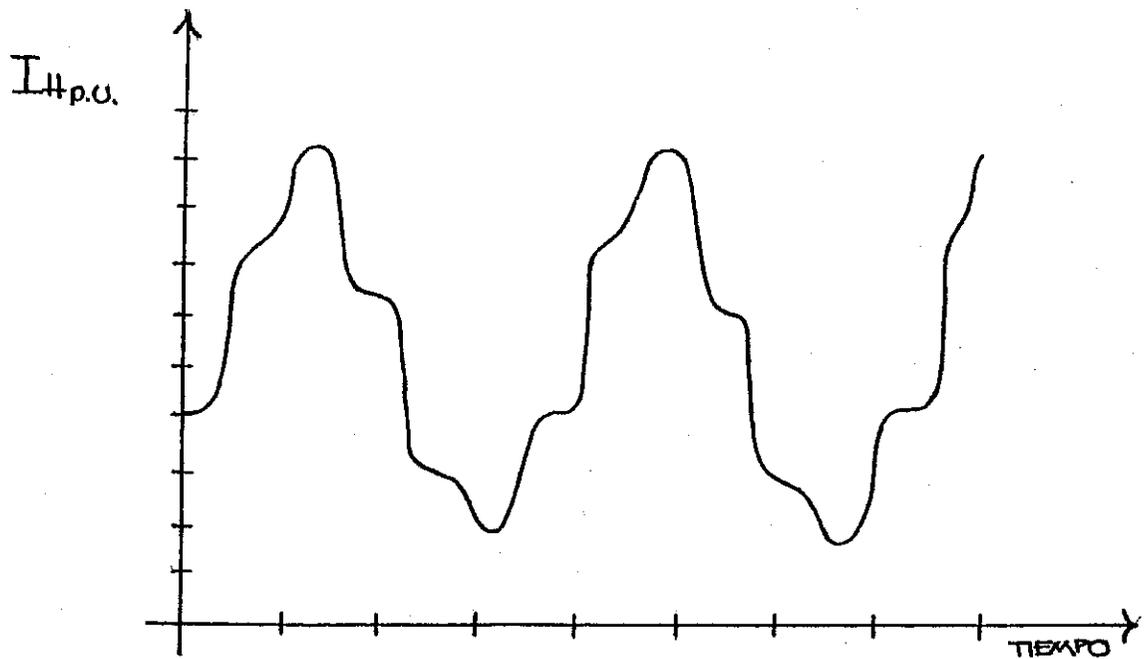


Figura 3.3: Corriente del convertidor estático número dos, conectado a un transformador delta/estrella; su contenido de armónicas es el siguiente:

5 =	19.90 p.u.	7 =	8.69 p.u.
11 =	4.33 p.u.	13 =	2.33 p.u.
17 =	1.59 p.u.	19 =	1.13 p.u.
23 =	1.08 p.u.	25 =	0.74 p.u.

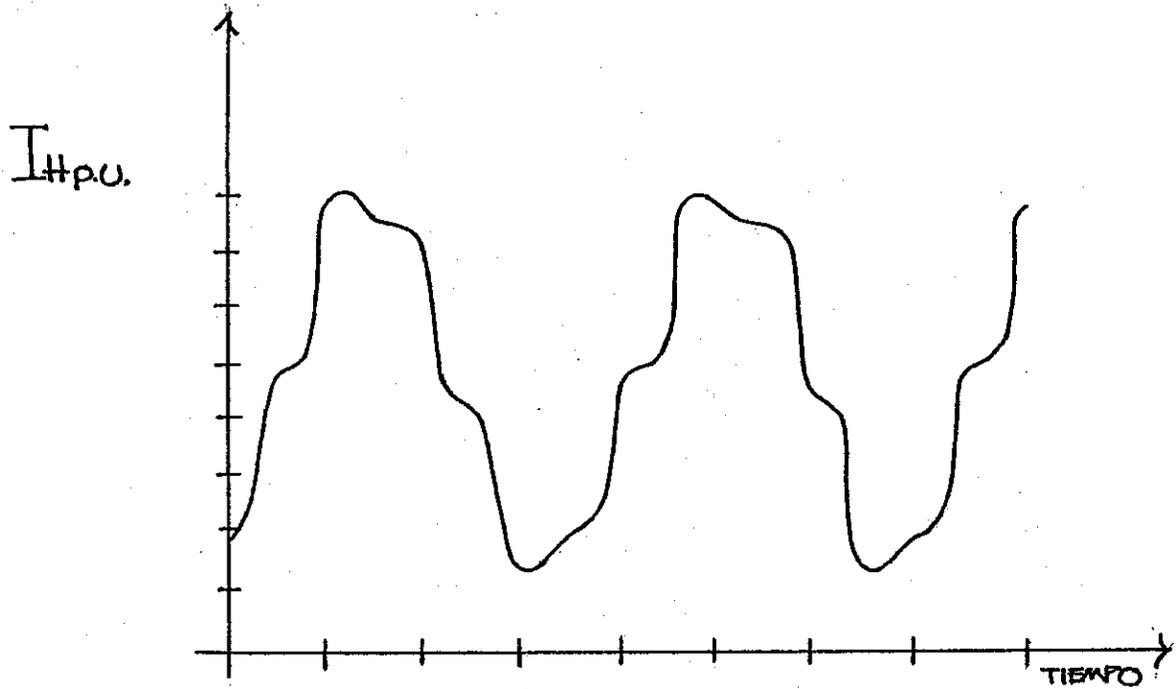


Figura 3.4: Corriente del convertidor estático número tres, conectado a un transformador delta/delta; el contenido de armónicas es el siguiente:

5 = 19.28 p.u.	7 = 7.34 p.u.
11 = 3.19 p.u.	13 = 2.24 p.u.
17 = 1.42 p.u.	19 = 1.13 p.u.
23 = 0.78 p.u.	25 = 0.43 p.u.

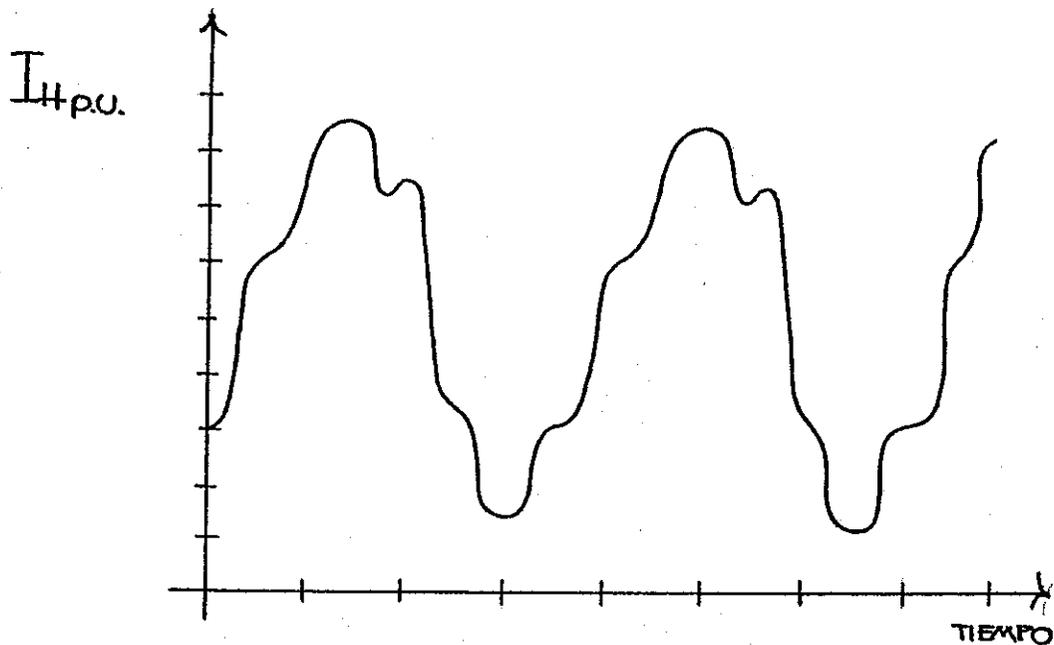


Figura 3.5: Corriente del convertidor estático número cuatro, conectado a un transformador delta/estrella; el contenido de armónicas es el siguiente:

5 =	18.04 p.u.	7 =	9.23 p.u.
11 =	9.23 p.u.	13 =	2.42 p.u.
17 =	1.19 p.u.	19 =	1.15 p.u.
23 =	0.95 p.u.	25 =	0.73 p.u.

En la figura 3.6, se ilustrará la forma de onda registrada en los alimentadores de los cuatro convertidores estáticos con sus respectivas cantidades de corrientes armónicas en valores p.u. ; se demuestra con esto que el sistema de convertidores múltiples, constituye un eficiente y económico medio de eliminar los ruidos ocasionados por las corrientes armónicas en los sistemas de potencia.

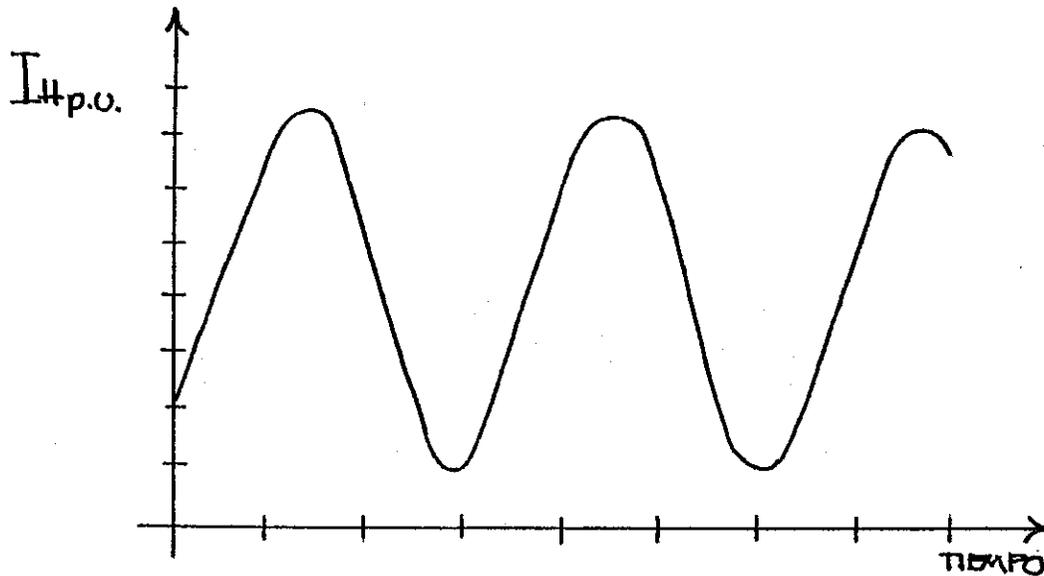


Figura 3.6: Corriente total consumida por los cuatro convertidores estáticos; el contenido de armónicas es el siguiente:

5 =	2.00 p.u.	7 =	0.60 p.u.
11 =	0.29 p.u.	13 =	0.23 p.u.
17 =	0.34 p.u.	19 =	0.25 p.u.
23 =	0.66 p.u.	25 =	0.52 p.u.

Los problemas actuales no se pueden solucionar por este método, debido a la diversidad de tamaños y aplicaciones de los convertidores estáticos de potencia. Así fue como en los 15 años anteriores, no se tuvo el menor cuidado de evitar problemas a los sistemas de potencia que alimentaban los convertidores, y en la mayor parte de los casos los problemas de ruido eran mínimos.

Sin embargo, existen casos en la actualidad en que los parámetros del sistema de potencia son tales que el convertidor estático no se comporta como se esperaba y las corrientes armónicas generadas excitan algún circuito resonante, y da como resultado el incremento de las corrientes o voltajes armónicos.

3.3 Métodos de cálculo de las corrientes armónicas

Esta sección recomienda los métodos de cálculo de las corrientes armónicas y los voltajes generados por los convertidores, que incluye sus efectos sobre los circuitos

telefónicos y los sistemas de potencia. Los efectos sobre los circuitos telefónicos son descritos por el factor de influencia telefónica (TIF) y el producto $I_x T$ que representa la influencia inductiva del convertidor. Los efectos sobre los sistemas de potencia son descritos por medio del factor de distorsión y por las interrupciones de voltaje u oscilaciones de éste. Vale la pena aclarar que en los sistemas de bajo voltaje son de suma importancia en ambos parámetros.

3.3.1 Cálculo de corrientes armónicas

La amplitud de las corrientes armónicas es una función del ángulo de cebado (α) de cada tiristor y de la reactancia de conmutación (X_c) que origina al ángulo de conmutación. Según la norma 519 de la IEEE, los valores típicos de las corrientes armónicas generadas por convertidores en puente de onda completa con tiristores son los presentados en la tabla 3.1.

PULSOS DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO	ORDEN DE LA CORRIENTE ARMÓNICA							
	5	7	11	13	17	19	23	25
6	0.175	0.110	0.045	0.029	0.015	0.010	0.009	0.008
12	0.026	0.016	0.045	0.029	0.002	0.001	0.009	0.008
18	0.026	0.016	0.007	0.004	0.015	0.010	0.001	0.001
24	0.026	0.016	0.007	0.004	0.002	0.001	0.009	0.008

Tabla 3.1 Valores por unidad de las corrientes armónicas presentes en la corriente de entrada de un convertidor estático de potencia típico con base en la corriente nominal.

Teóricamente, un convertidor estático de 12 pulsos no produce corrientes armónicas de 5, 7, 17 y 19 orden; pero debido a los desbalances, algunas de ellas se hacen presentes como lo podemos observar en la tabla anterior. Por norma, se recomienda que el valor de estas corrientes es de un 25% de las que genera un convertidor de 6 pulsos y debe ser calculado en el lado de alto voltaje. Este desbalance puede ser causado por:

- (1) Variaciones en el voltaje o impedancia de línea a línea en sistemas trifásicos (posiblemente mas-menos 2.5%).
- (2) Diferencia entre las relaciones de transformación para conexiones estrella/delta.
- (3) Diferencia en el ángulo de cebado entre tiristores en sistemas multifásicos.
- (4) Variaciones en el tiempo de corte y arranque de cada uno de los tiristores.

3.3.2 Análisis del sistema de alimentación típico de un convertidor estático

El circuito de la figura 3.7 es un diagrama unifilar típico de la alimentación de un convertidor estático de potencia en la industria; en él se muestran las reactancias inductiva de la línea de alimentación, transformador reductor, la reactancia capacitiva del filtro compensador y las trayectorias de las corrientes.

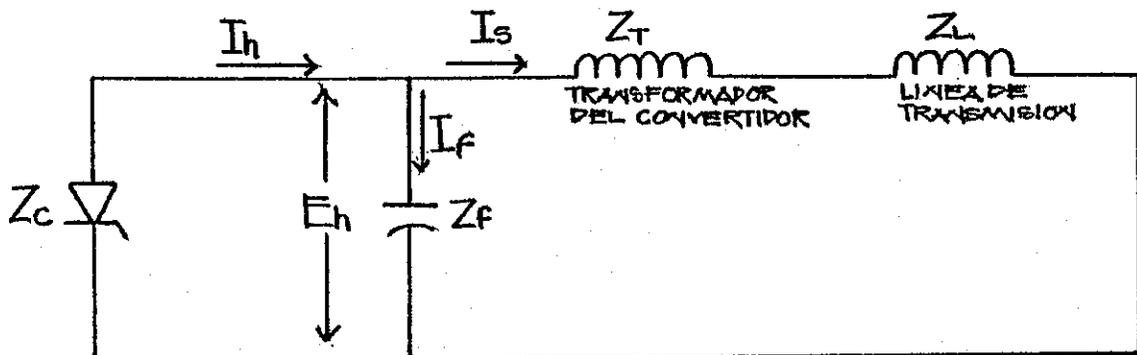


Figura 3.7: Diagrama unifilar típico de alimentación de un convertidor estático

El convertidor es comúnmente considerado como un generador de corrientes armónicas I_h , y es considerado también como una fuente constante de dichas corrientes. Por lo tanto, la impedancia de conmutación Z_c es muy grande y es despreciada en este análisis. Por otro lado, si se considera el convertidor como una fuente de voltaje, la impedancia de

conmutación debe ser tomada en cuenta. Usando las leyes de Ohm y de Kirchhoffs, se puede deducir las siguientes ecuaciones:

$$Z_s = Z_T + Z_L \quad \text{Ec. 3.02}$$

$$I_h = I_s + I_f \quad \text{Ec. 3.03}$$

$$I_f Z_f = I_s Z_s \quad \text{Ec. 3.04}$$

despejando I_f de la ecuación 3.04 y substituyendola en la ecuación 3.03, tenemos:

$$I_f = \frac{Z_s I_s}{Z_f}$$

$$I_h = I_s + \frac{Z_s I_s}{Z_f}$$

factorizando y despejando I_s , deducimos la ecuación 3.05

$$I_s \left[1 + \frac{Z_s}{Z_f} \right] = I_h$$

$$I_s \left[\frac{Z_f + Z_s}{Z_f} \right] = I_h$$

$$I_s = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} I_h$$

Ec. 3.05

de igual forma, se puede obtener la ecuación 3.06

$$I_f = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} I_h \quad \text{Ec. 3.06}$$

de estas dos ecuaciones, se puede definir la efectividad del filtro de la siguiente forma:

$$\rho_s = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \quad \text{Ec. 3.07}$$

$$\rho_f = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} \quad \text{Ec. 3.08}$$

en donde

ρ_s = La relación de impedancias que determina el valor por unidad de la corriente que podría circular hacia el sistema de potencia

ρ_f = La relación de impedancias que determina el valor por unidad de la corriente que podría circular por el filtro en paralelo

Partiendo de estas definiciones, se pueden reescribir las ecuaciones 3.05 y 3.06 de la siguiente forma:

$$I_s = \rho_s I_h \quad \text{Ec. 3.09}$$

$$I_f = \rho_f I_h \quad \text{Ec. 3.10}$$

En la mayoría de los casos, ρ_f debe ser aproximadamente igual a la unidad; ρ_s debe tener un valor pequeño para la frecuencia a la cual es sintonizado el filtro, y la suma de ambos debe ser igual a la unidad, es decir:

$$\rho_s + \rho_f = 1 \quad \text{Ec. 3.11}$$

El voltaje armónico es definido por la siguiente ecuación:

$$E_h = Z_{ss} I_{ss} = Z_{ff} I_{ff} \quad \text{Ec. 3.12}$$

3.4 Interrupción de voltaje en la línea

La figura 3.8 muestra a un convertidor estático típico, trifásico en puente y de onda completa. Los tiristores operan en parejas para convertir un sistema trifásico de corriente alterna a corriente directa, por medio de la interrupción de la carga entre pares de tiristores seis veces cada ciclo. Durante este proceso, cuando deja de conducir el tiristor 1 (que se alimenta desde la fase A), e inicia la conducción el tiristor 3 (que es alimentado desde la fase B) podemos observar en la figura 3.9 b) que la forma de voltaje entre líneas, sufre una breve interrupción de la forma de onda, que recibe el nombre de interrupción de voltaje en la línea.

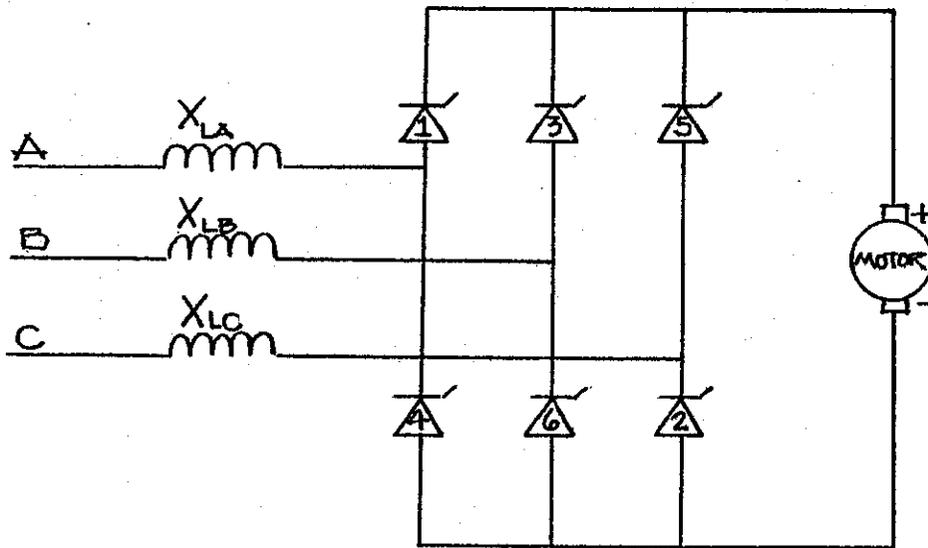


Figura 3.8: Convertidor tiristor trifásico de onda completa en puente

La corriente en el convertidor inicialmente está fluyendo desde la fase A hasta la armadura del motor, a través del tiristor 1. Cuando el tiristor 3 arranca y al tiempo t (30 grados en el voltaje de línea a línea), la corriente empieza a ser transferida desde la fase A para la fase B. La reactancia de la fuente previene la transferencia instantánea de la corriente y el tiempo de conmutación requerido, definido por el ángulo con el mismo nombre (μ), determina el ancho de la interrupción de voltaje (μ). Este proceso se representa en la figura 3.9.

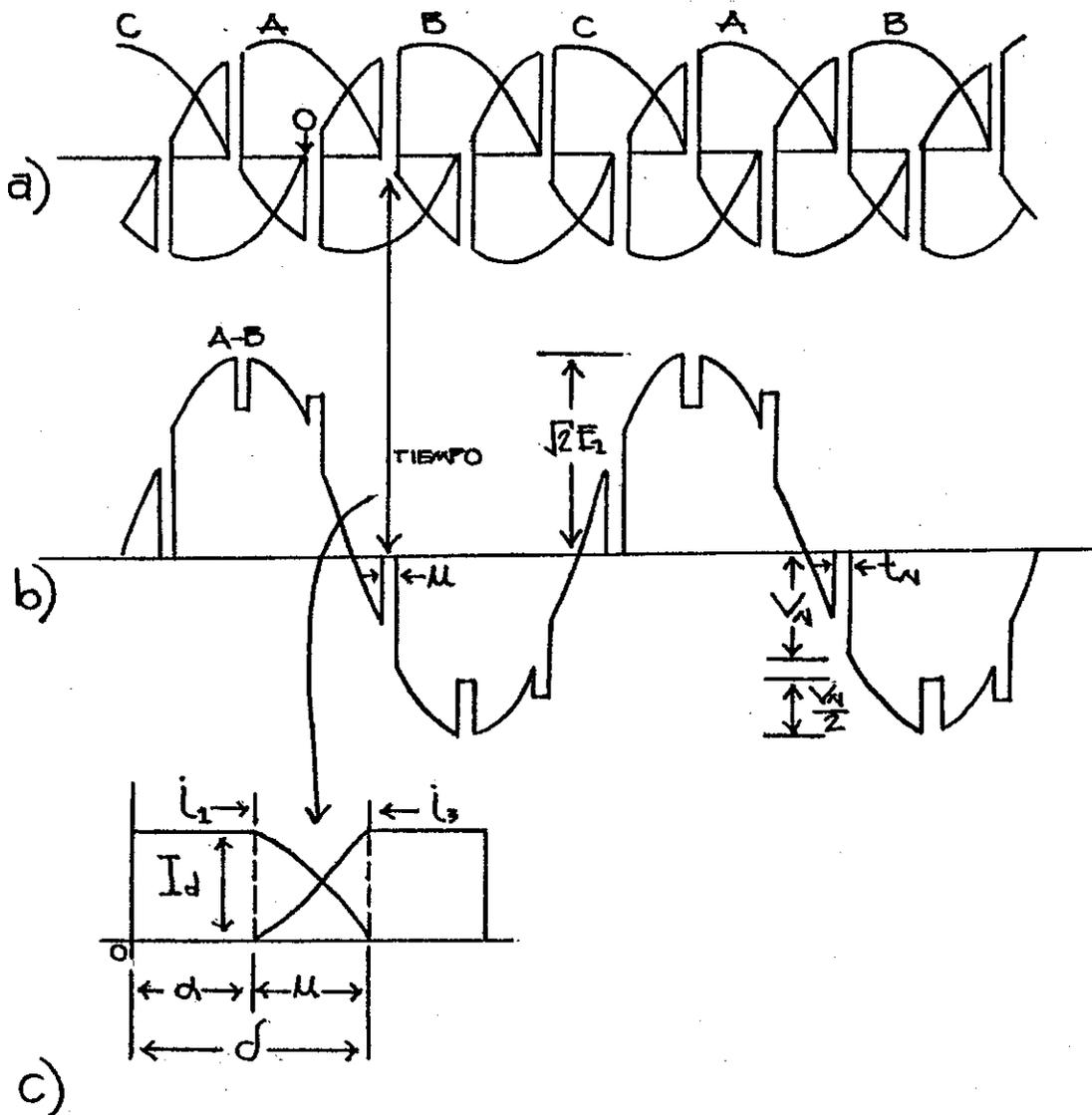


Figura 3.9: a) Voltaje de línea a neutro, b) Voltaje de línea a línea y c) Transferencia de corriente de tiristor 1 a 3

3.4.1 Cálculo del área de interrupción

El área de interrupción de voltaje es dependiente de los voltios-segundos absorbidos en los circuitos desde la fuente de energía al punto de análisis. Esta área es una indicación del efecto que ejerce el convertidor estático sobre las otras cargas conectadas a la barra. Esta se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_N = \frac{L \times e}{L_L + L_T + L_C} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$t_N = \frac{2 \left[L_L + L_T + L_C \right] I_d}{e} \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$A_N = V_N t_N \quad \text{Ec. 3.15}$$

El diagrama unifilar típico de inductancia para poder calcular el área de la interrupción, se puede observar en la figura 3.10.

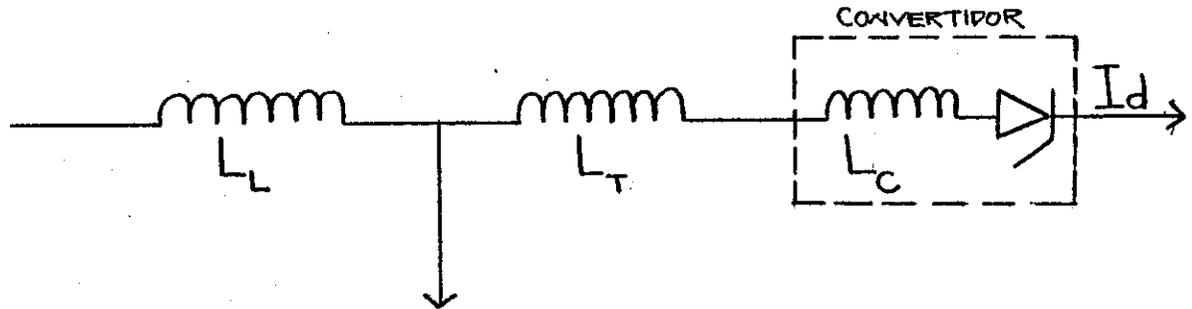


Figura 3.10: Diagrama unifilar de reactancias

Combinando las ecuaciones 3.14 y 3.15, se define más fácilmente el área de interrupción de voltaje, y resulta:

$$A_N = V_N t_N$$

$$A_N = \frac{\left[\frac{L \times e}{L} \right] \left[\frac{2 \left(\frac{L}{L} + \frac{L}{T} + \frac{L}{C} \right) I_d}{e} \right]}{\left[\frac{L}{L} + \frac{L}{T} + \frac{L}{C} \right]} \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$A_N = \frac{2 I_d L}{d L}$$

3.4.2 Cálculos que definen las inductancias

Los transformadores tipo seco que son usados con los convertidores estáticos (para voltajes no mayores a 600 voltios), poseen aproximadamente igual reactancia y resistencia cuando se considera la característica transitoria del fenómeno de la conmutación. La ecuación que se presenta a continuación se puede utilizar para calcular la inductancia del transformador:

$$L_T = \frac{Z_{T \text{ p.u.}}}{\sqrt{2} \cdot 2 \pi f} \times \frac{E_L}{\sqrt{3} I_1} \text{ Henrios} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Aunque no es generalizable, pero para efectos prácticos, se puede considerar que típicamente, la inductancia de línea por fase en un sistema trifásico puede ser de 0.3 microhenrio por pie de línea o aproximadamente 1 microhenrio por metro de línea.

3.5 Factor de distorsión de la tensión

Este parámetro es usado para definir el efecto de las corrientes armónicas sobre el voltaje de los sistemas de potencia. Su aplicación se presenta en sistemas de bajo, medio y alto voltaje.

$$DF = \sqrt{\frac{\text{Sumatoria de las amplitudes de los voltajes armónicos al cuadrado}}{\text{Amplitud del voltaje fundamental al cuadrado}}} \times 100\%$$

$$DF = \sqrt{\frac{\sum_{h=5}^{\infty} \frac{E_h^2}{E_1^2}}{h}} \times 100\% \quad \text{Ec. 3.18}$$

Tres clasificaciones han sido establecidas para sistemas de bajo voltaje, las cuales nos permiten determinar los límites de distorsión que pueden ser permitidos para el uso de convertidores estáticos de potencia. La tabla 3.2 incluye además del factor de distorsión de la tensión, el área de interrupción de voltaje en voltios-microsegundos y la relación de impedancia en un punto común en el sistema.

CLASIFICACION	ρ	A_N VOLTIOS-MICROSEG.	DF %
APLICACIONES ESPECIALES	10	16,400	3
SISTEMA GENERAL	5	22,800	5
SISTEMA DEDICADO	2	36,500	10

Tabla 3.2 Clasificación de sistemas de bajo voltaje y límites de distorsión para 460 voltios

Esta tabla nos indica, por ejemplo, que para un sistema dedicado o sea el que suministra energía sólo a convertidores estáticos se permite un máximo de 10% de factor de distorsión de la tensión, un máximo de 36,500 voltios-microsegundo para el área de interrupción de voltaje y una relación de impedancia igual a 2. Iguales definiciones se obtienen para el sistema general y el de aplicaciones especiales. Para aplicaciones de medio y alto voltaje, se presenta la tabla 3.3.

NIVEL DE VOLTAJE DEL SISTEMA DE POTENCIA	DF% SISTEMA DEDICADO	DF% SISTEMA GENERAL
MEDIO VOLTAJE 24 - 69 KV	8	5
ALTO VOLTAJE 115KV O MAS	15	15

Tabla 3.3 Límites de distorsión para sistemas de medio y alto voltaje

Entre los sistemas de aplicaciones especiales, están aquellos en donde una proporción de cambio o interrupción de voltaje podría producir un evento erróneo en la operación. Por otra parte, un sistema dedicado es aquel que únicamente sirve a los convertidores o a cargas no afectadas por la distorsión del voltaje.

3.6 Relación entre el factor de distorsión de la tensión y la interrupción de voltaje en la línea

Sabemos que:

$$\begin{aligned}
 E_H &= \left[\frac{\infty}{h=5} E_h^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2V^2 t}{N N} + \frac{4 V^2 t}{N N} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left[\frac{1}{f} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left[\left(\frac{2V^2 t}{N N} + \frac{2V^2 t}{N N} \right) f \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{4V^2 t f}{N N 1}} \quad \text{Ec. 3.19}
 \end{aligned}$$

Si definimos los siguientes términos así: la relación de la inductancia total a la inductancia común del sistema (ρ), la profundidad máxima de interrupción ($V_{N \max}$) y el área de interrupción (A_N) tenemos:

$$\rho = \frac{L_L + L_T + L_C}{L_L}$$

Ec. 3.20

$$V_{N \max} = \frac{\sqrt{2} E_L}{\rho}$$

Ec. 3.21

$$A_{N N} = \frac{V_{N N} t}{N N}$$

Ec. 3.15

y tomando en cuenta que el factor de distorsión de la tensión está definido por:

$$DF = \sqrt{\frac{\infty \frac{E^2}{h}}{h=5 \frac{E^2}{1}}}$$

Ec. 3.18

substituyendo 3.19 en 3.18 modificada tenemos:

$$DF = \frac{\sqrt{\frac{\infty \frac{E^2}{h}}{h=5}}}{\frac{E}{1}} = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{4 V^2 t f}{N N 1}} \frac{1}{E}$$

$$DF = \sqrt{\frac{4 V V t f}{N N N 1}} \frac{1}{E}$$

Ec. 3.22

para calcular el factor de distorsión de la tensión máximo, se substituye en la ecuación 3.22 las ecuaciones 3.21 y 3.15

$$DF \%_{\max} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot E \cdot A \cdot f}{L \cdot N \cdot 1}}}{\frac{E}{1} = \frac{E}{L}} \times 100$$

$$DF \%_{\max} = 100 \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot E \cdot A \cdot f}{L \cdot N \cdot 1}}}{\rho \frac{E^2}{L}}$$

$$DF \%_{\max} = 100 \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot A \cdot f}{N \cdot 1}}}{\rho \frac{E}{L}}$$

para $f = 60 \text{ Hz}$ y $E = 460 \text{ voltios}$
 1 L

$$DF \%_{\max} = 0.859 \sqrt{\frac{A}{N \cdot \rho}} \quad \text{Ec. 3.23}$$

3.7 Circuitos resonantes

Los sistemas de potencia están constituidos en su mayoría por líneas de transporte, las cuales funcionan normalmente con cargas trifásicas equilibradas. Aunque no estén dispuestas equilateralmente e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña y se consideran equilibradas las fases. La resistencia, inductancia y capacitancia están uniformemente repartidas a lo largo de la línea de transporte, y en el cálculo exacto de líneas largas se debe considerar de esta forma. En las líneas de longitud media, se considera que la mitad de la capacitancia está agrupada en cada extremo de la línea, sin que por ello se cometa un error apreciable al realizar cálculos con estos valores. Por último, en las líneas cortas es tan pequeña la susceptancia capacitiva total, que puede despreciarse. En general, se puede decir que las líneas aéreas, a 60 hertz y de menos de 100 kilómetros se consideran cortas. Líneas de longitud media son aquellas comprendidas entre 100 y 250 kilómetros aproximadamente, y por último las

que van de 250 a 350 kilómetros son catalogadas como largas. En nuestro medio, por tener líneas que no llegan a 250 kilómetros o más, nos limitaremos a presentar los circuitos equivalentes de las líneas cortas y de media longitud.

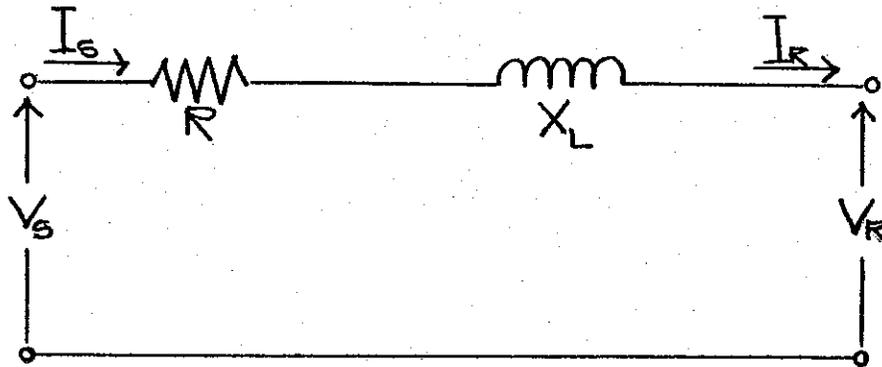


Figura 3.11: Circuito equivalente de una línea corta de transporte

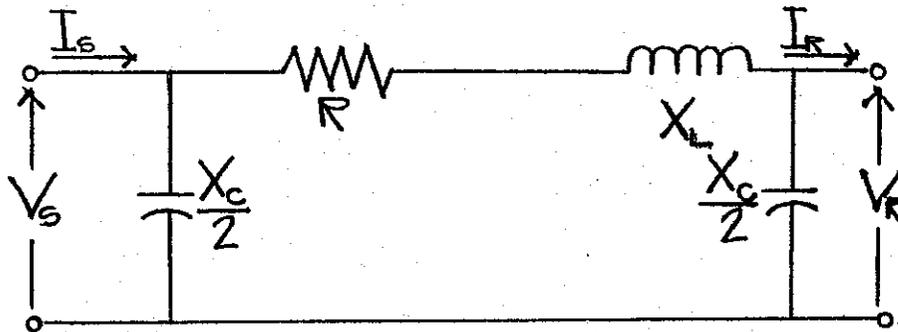


Figura 3.12: Circuito equivalente de una línea media de transporte

Esta combinación de inductancia y capacitancia puede entrar en resonancia a una frecuencia particular. Si únicamente se contara con la frecuencia fundamental de 50 o 60 hertz, se diseñarían los sistemas de potencia de tal manera que nunca se produjera el fenómeno de resonancia. Sin embargo, la no linealidad de los convertidores estáticos produce corrientes de muchas frecuencias y cualquiera de éstas puede estar cerca de la frecuencia de resonancia del circuito, con lo que se provocan los siguientes inconvenientes:

- (1) Un circuito resonante serie posee un valor de impedancia bajo al flujo de corriente a la frecuencia de resonancia, y siendo en este caso la relación entre la corriente y el voltaje inversamente proporcional a la impedancia, es claro que cuando Z es muy baja, I tendrá un valor muy alto. En la figura 3.13, se puede observar un circuito típico serie RLC y en la figura 3.14 su diagrama fasorial correspondiente.

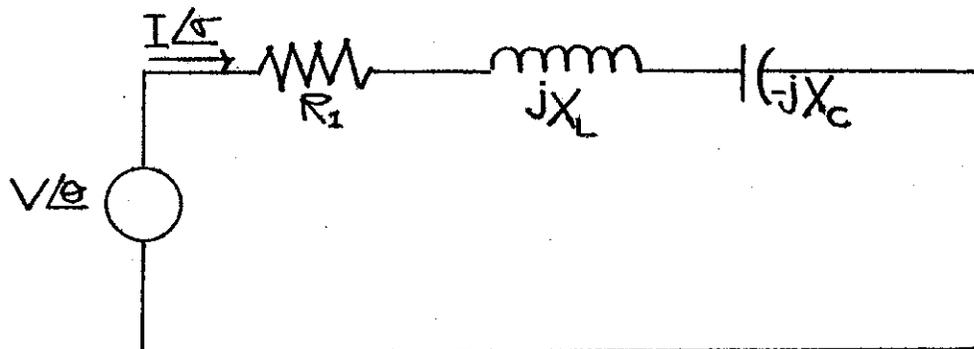


Figura 3.13: Circuito típico serie R, L y C

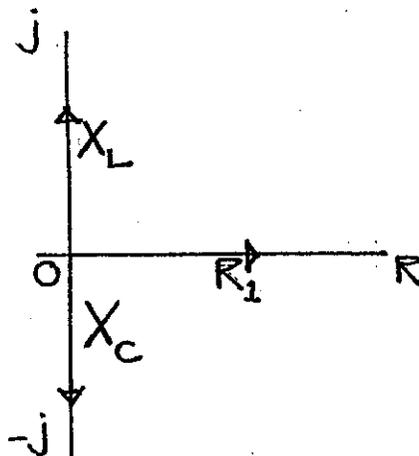


Figura 3.14: Diagrama fasorial del circuito serie R, L y C

En la condición de resonancia, la tensión aplicada y la intensidad de corriente que circula están en fase; por tal razón la impedancia compleja del circuito se reduce exclusivamente a una resistencia pura R . En consecuencia, la intensidad de corriente $I = V/Z$ es máxima en dicha condición.

- (2) Un circuito resonante paralelo es de alta impedancia al flujo de corriente a la frecuencia de resonancia, y siendo la relación entre voltaje y corriente inversamente proporcional a la admitancia, es obvio que en donde Y es muy baja, V tendrá un alto valor. En la figura 3.15, se puede observar un circuito típico paralelo G , B_L y B_C y en la figura 3.16 su diagrama fasorial correspondiente.

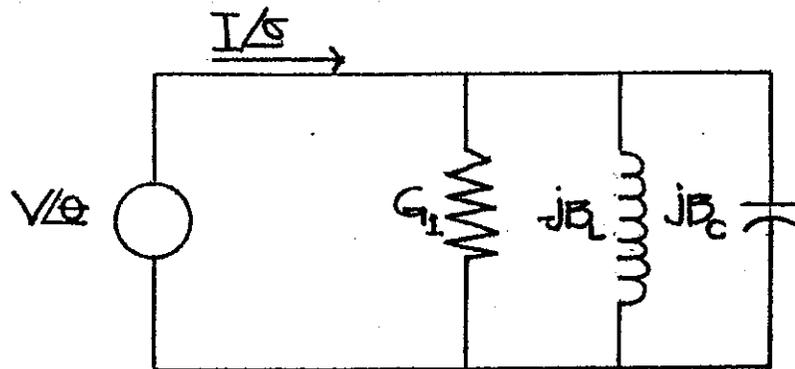


Figura 3.15: Circuito típico paralelo G , B_L y B_C

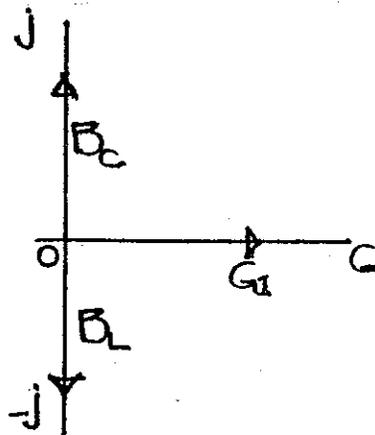


Figura 3.16: Diagrama fasorial del circuito G , B_L y B_C

En la condición de resonancia, la tensión aplicada y la intensidad de corriente que circula están en fase, por tal razón, la admitancia compleja del circuito se reduce exclusivamente a una resistencia pura G . En consecuencia, el voltaje $V = I/Y$ es máximo en dicha condición.

Quando conectamos capacitores estáticos a un sistema para control de voltaje o corrección del factor de potencia, existirá una frecuencia a la cual este capacitor esté en resonancia paralelo con la reactancia del sistema de potencia. La resonancia paralelo es de alta impedancia a la corriente a la frecuencia resonante. La resonancia serie es de baja impedancia. Si la resonancia paralelo está cerca de una de las frecuencias de las armónicas características producidas por el convertidor, el circuito puede ser excitado y grandes corrientes oscilantes pueden fluir entre la reactancia inductiva del sistema de potencia y la reactancia capacitiva de los capacitores estáticos. Estas corrientes sumadas a la caída de voltaje armónica, causan un factor de distorsión de voltaje mayor. Por lo tanto, los capacitores estáticos deben dimensionarse para evitar una resonancia paralelo que esté cerca de las frecuencias de las armónicas características. La frecuencia de resonancia paralelo en valor por unidad es definida de la siguiente forma:

$$f_{r \text{ p.u.}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{\text{capacidad de cortocircuito del sistema en MVA}}{\text{capacidad del banco de capacitores estáticos en MVAR}}} \quad \text{Ec. 3.24}$$

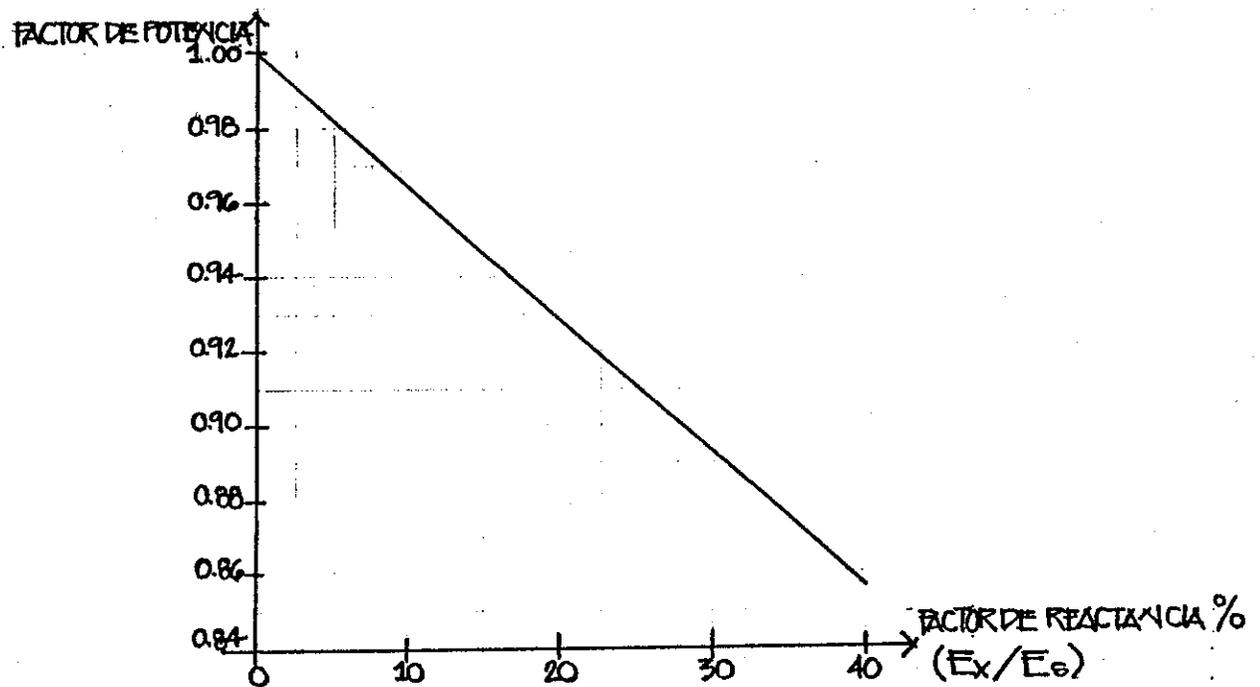
en donde: X_C = reactancia del banco de capacitores estáticos en valores por unidad

X_L = reactancia del sistema de potencia en valores por unidad

La ecuación anterior puede ser aplicada indistintamente, si el circuito que se va a analizar es serie o paralelo.

3.8 Factor de potencia

El factor de potencia de un convertidor estático está compuesto de dos componentes: la de desplazamiento y la de distorsión, y su efecto es combinado en el factor de potencia total. La relación entre estos dos parámetros se puede observar en la figura 3.17.



E_x = CAIDA DE VOLTAJE DIRECTO OCACIONADA POR REACTANCIA DE CONMUTACION
 E_o = VOLTAJE EFICAZ DE LINEA A NEUTRO DEL SECUNDARIO DEL TRANSF.
 P.F. = $\cos \delta + \cos \phi_1$

Figura 3.17: Relación entre las componentes de distorsión y desplazamiento y factor de potencia total

La componente de desplazamiento es la relación entre la potencia activa de la onda fundamental en vatios, a la potencia aparente de la onda fundamental en voltamperios. Este es el factor de potencia visto por los sistemas de medición de las empresas que distribuyen la energía eléctrica. La componente de distorsión es la parte asociada con las corrientes y voltajes armónicos presentes en las líneas de suministro.

El factor de potencia de un convertidor estático de seis pulsos, calculado sobre la base de una forma de onda cuadrada, es:

$$PF = 3/\pi = 0.955 \quad (\alpha = 0)$$

Para un convertidor estático de doce pulsos, el factor de potencia tiene un valor teórico de aproximadamente 0.988 ; o sea que:

$$PF = \frac{q}{\pi} \operatorname{seno} \frac{\pi}{q} \quad \text{Ec. 3.25}$$

en donde: q = número de pulsos del convertidor

$$q \geq 1$$

Además de la definición dada anteriormente, se puede decir que el factor de potencia asociado con la distorsión ($\cos \phi$) es la relación de la componente fundamental de la corriente de línea AC con la corriente total de línea (I_1 / I_L).

Los convertidores estáticos de potencia necesitan una fuente de potencia reactiva, ya sea que esté trabajando como rectificador o inversor. En ambos casos, el tiristor puede únicamente dejar circular corriente por el después de que el voltaje se hace más positivo que el que estaba anteriormente. La potencia reactiva requerida es comúnmente función de la carga y el voltaje de salida. Es posible reducir la cantidad de potencia reactiva necesitada por un convertidor, controlando los siguientes parámetros:

- (1) Reduciendo la cantidad de control de fase requerida durante la operación normal (limitando α).
- (2) Reduciendo el ángulo de conmutación, colocando un transformador de baja reactancia (limitando α).
- (3) Control asimétrico o secuencia de convertidores (limitando μ).

Esta potencia reactiva que necesitan los convertidores para funcionar puede ser reducida, y producir localmente los KVAR necesitados; entre estas fuentes, se pueden mencionar:

- (1) Condensadores estáticos de potencia.
- (2) Máquinas síncronas.
- (3) Conmutación forzada de convertidores.

3.9 Variaciones de tensión producidas por los convertidores

La caída de tensión en un sistema de potencia se puede definir aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta E}{E_o} = \frac{Q - Q_c}{S_{cc}} + \frac{R}{X} \times \frac{P}{S_{cc}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

en donde:

- ΔE = caída de tensión
- E_o = tensión en vacío
- Q = carga reactiva
- Q_c = compensación reactiva
- P = carga activa
- S_{cc} = capacidad de cortocircuito
- R = 0.1 a 0.3 varía según los parámetros del sistema
- X

De la fórmula anterior, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- (1) La caída de tensión producida por el uso de convertidores estáticos es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito de la red. Por ejemplo, si la capacidad de cortocircuito se ve reducida en un 50%, la caída de tensión se incrementa en un 100% para las mismas condiciones de carga activa.
- (2) La caída de tensión es principalmente causada por la demanda de potencia reactiva; esta condición se verá favorecida si el convertidor estático está funcionando con un factor de potencia bajo.

Hechas las observaciones anteriores, se hace pues necesario tener una potencia de cortocircuito elevada para obtener una regulación adecuada de voltaje en las barras que alimentan cargas estáticas, y también se tiene que anotar que los voltajes armónicos disminuyen en magnitud con el incremento de la capacidad de cortocircuito.

3.10 Relación de cortocircuito

La relación entre el tamaño del convertidor estático de potencia respecto al tamaño del sistema eléctrico de alimentación se define con el nombre de relación de cortocircuito (SCR), y se representa de la siguiente forma:

$$\text{SCR} = \frac{\text{capacidad de cortocircuito (MVA)}}{\text{potencia del convertidor (MW)}}$$

Si el convertidor es pequeño comparado con la capacidad del sistema, las corrientes armónicas por unidad serán pequeñas en magnitud, y la impedancia del sistema será baja; por lo tanto, cualquier voltaje armónico tendrá un valor insignificante. Además, si la SCR es mayor que 20 y la frecuencia de resonancia es mayor que 8.5, la probabilidad de que existan problemas es baja. Por otra parte, si la SCR es menor que 20 y la frecuencia de resonancia tiene un valor cercano a una de las frecuencias armónicas características generadas por el convertidor, existirá una alta probabilidad de producción excesiva de voltajes armónicos.

4. RECOMENDACIONES PRACTICAS Y GUIA DE OPERACION
PARA CONVERTIDORES ESTATICOS

4.1 Procedimiento general de prueba

El programa de pruebas para una unidad convertidora de tiristores incluye algunas o todas las siguientes pruebas; algunas de ellas son requeridas para todos los suministros de energía y otras sólo para lo especificado por el comprador.

4.1.1 Convertidor de tiristores

Se le deben realizar las siguientes pruebas:

- (1) Esfuerzo dieléctrico.
- (2) Voltaje nominal.
- (3) Corriente nominal.
- (4) Carga nominal.
- (5) Control de fase.
- (6) Medición de pérdidas.

4.1.2 Equipo de transformación del convertidor de tiristores

Se le deben realizar las siguientes pruebas:

- (1) Medición de pérdidas.
- (2) Reactancia de conmutación.
- (3) Esfuerzo dieléctrico a baja frecuencia.
- (4) Incrementos de temperatura.

4.2 Pruebas bajo carga para un convertidor estático

4.2.1 Prueba de esfuerzo dieléctrico

Las pruebas dieléctricas pueden ser efectuadas a cualquier temperatura entre la temperatura del cuarto de pruebas y la temperatura de operación normal. La frecuencia del voltaje de prueba no debe ser menor que la frecuencia nominal del transformador del rectificador, y se recomienda que la forma de onda sea senoidal.

La duración de la prueba debe ser por un período continuo de 60 segundos, y se debe aplicar voltaje entre cada punto del rectificador y tierra en donde exista voltaje durante la operación normal. Las partes principales del rectificador conectadas a un terminal del transformador del lado de DC deben tener un voltaje de prueba de $1.5 E_{cw} + 1000$ voltios, y para las partes principales del rectificador conectadas a un terminal de DC deben tener un voltaje de prueba de $2.0 E_{cw} + 1000$ voltios, en donde E_{cw} es el voltaje de pico de trabajo.

4.2.2 Prueba de voltaje nominal

El convertidor debe estar sometido a un voltaje alterno nominal de un 110% por un período de cinco minutos con el lado de DC abierto o ligeramente cargado.

4.2.3 Prueba de corriente nominal

La prueba de corriente nominal debe ser realizada de conformidad con las siguientes provisiones: que ya se hayan realizado pruebas idénticas a modelos similares o que a este equipo se le haya efectuado ya la prueba de voltaje nominal.

- (1) La prueba con corriente nominal es realizada a un voltaje de AC reducido, de tal forma que los terminales de DC puedan ser conectados a una muy baja resistencia de carga o cortocircuitados.
- (2) Los convertidores de tres o más fases pueden ser probados a 110% de sus características de placa de DC para compensar las diferencias entre la forma de onda bajo prueba y la de servicio normal.
- (3) La temperatura del medio normal de enfriamiento durante la prueba, debe ser igual a la recomendada para servicio regular.
- (4) La determinación del desbalance de corriente entre tiristores conectados en paralelo, elementos del circuito y la sección del convertidor, sólo puede ser aproximada durante la prueba de corriente a voltaje reducido.

4.2.4 Prueba de carga nominal

La temperatura y el flujo nominal del medio de enfriamiento a través de los pasajes de enfriamiento en el convertidor durante las pruebas, deben ser los mismos que en servicio regular.

El modo de operación durante la prueba debe ser substancialmente el mismo que el que prevalecía en servicio regular. El voltaje alterno aplicado al convertidor y el voltaje de directa de salida para la corriente nominal no debe estar más abajo del voltaje nominal en un 10%. La frecuencia del voltaje de alterna debe estar dentro de un 20% de la frecuencia nominal si no hay un reactor saturable en los circuitos de potencia principales, y dentro de 5%, si existen tales reactores. Las pruebas de campo deben ser realizadas a la frecuencia nominal.

4.2.5 Control de fase

Esta prueba es efectuada para determinar el funcionamiento del rectificador cuando se opera con cargas específicas o para determinar el funcionamiento de los aparatos de control de voltaje del rectificador. La cantidad de control de voltaje se puede determinar midiendo el voltaje directo de salida con un voltímetro de Arsonval, con o sin control de voltaje, mientras se mantiene un voltaje alterno específico y una corriente de carga específica. El ángulo de control de fase de retardo puede ser determinado por medio de la traza de un osciloscopio, y medir el intervalo durante el cual el voltaje es positivo antes, de arrancar la conducción de potencia en cada ciclo.

4.2.6 Medición de pérdidas

En esta prueba, se deben efectuar dos mediciones de pérdidas (P_1 y P_2), P_1 a corriente directa nominal I_d y P_2 a $K I_d$, en donde K es la relación del factor de forma en operación normal a el factor de forma en corto circuito. P_2 es efectuada primero después de alcanzar una temperatura constante a $K I_d$. P_1 es efectuada tan rápido como sea posible después de haber reducido la carga I_d .

4.3 Eficiencia y pérdidas para convertidores estáticos

4.3.1 Determinación de la eficiencia

La eficiencia de una unidad convertidora de tiristores puede ser determinada por medio de cálculos basados en mediciones separadas de pérdidas en los componentes, para valores nominales de voltaje, corriente y frecuencia, y para el modo normal de operación obtenido con la conexión específica del transformador. Los voltajes directos nominales se deben asumir para determinar la eficiencia a cualquier carga.

4.3.2 Clasificación de las pérdidas

Las siguientes pérdidas deben ser incluidas cuando se

calcula la eficiencia de un convertidor simple o para unidades múltiples, alimentando una carga común.

- (1) Pérdidas en tiristores, fusibles, conexiones, divisores de tensión y equipos para balancear la corriente en los tiristores.
- (2) Pérdidas en equipo supresor de transientes.
- (3) Pérdidas en equipos auxiliares tales como la potencia absorbida por ventiladores y bombas para mover los medios de enfriamiento a través del sistema de enfriamiento del convertidor, ya sea que estos equipos estén fuera o dentro del mismo.
- (4) Pérdidas en los controles o equipo de señalización.
- (5) Pérdidas en el transformador del convertidor.
- (6) Pérdidas en los reactores limitadores y balanceadores de corriente.
- (7) Pérdidas en los inductores de DC.
- (8) Pérdidas en los equipos de regulación y desfase de fases, si estos son parte del equipo y permanecen continuamente energizados.
- (9) Pérdidas en las conexiones entre el transformador y el convertidor. En todos los otros casos, cuando estas conexiones son diseñadas por el fabricante, estas pérdidas no deben ser incluidas, a menos que se especifique.

4.3.3 Pérdidas en equipo de transformación

Existen dos renglones de suma importancia, y son:

- (1) Pérdidas en la excitación.
- (2) Pérdidas bajo carga.

Para mayor información al respecto, se debe consultar la sección 93 de la Norma ANSI C 57.18-1964.

4.3.4 Pérdidas especiales

Las pérdidas en los equipos enumerados seguidamente, deben ser incluidas en la determinación de la eficiencia del convertidor, si únicamente son utilizados en este equipo, o en la determinación de la eficiencia de convertidores múltiples, si dichos equipos están sirviendo a todas las unidades.

- (1) Equipo de filtrado, tal como reactores o condensadores en paralelo.
- (2) Reactores limitadores de corriente.
- (3) Transformadores auxiliares de potencia.

Las pérdidas en los equipos enumerados seguidamente no deben ser incluidas en la determinación de la eficiencia del convertidor.

- (1) Equipo de supresión de incrementos de voltaje con cargas ligeras, a menos que esté permanentemente conectado.
- (2) Equipo de freno dinámico.
- (3) Cargas especiales que pueden ser desconectadas entre el transformador y el convertidor.

4.4 Regulación de voltaje para convertidores estáticos

La regulación de voltaje se define como el cambio en el voltaje de salida que ocurre cuando la carga es reducida desde el valor nominal hasta cero, con las otras cantidades que permanecen invariables.

La regulación de voltaje de una unidad convertidora puede ser determinada por medio de cálculos basados en características específicas del sistema de suministro y mediciones realizadas en el convertidor y el transformador por separado; las mediciones son realizadas en la fábrica del convertidor. La regulación debe ser expresada en voltios.

En la determinación de la regulación, cualquier incremento de voltaje debido a un cambio en el modo de operación con cargas livianas, no debe ser tomado en cuenta; por esta razón el voltaje directo del convertidor en vacío, bajo condiciones normales de operación y con el voltaje alterno nominal aplicado, debe ser establecido. Si un equipo de supresión de voltaje en vacío es utilizado, el voltaje de vacío con este equipo en funcionamiento debe ser establecido.

4.4.1 Determinación teórica de la regulación de voltaje

Tomando en cuenta la definición de regulación de voltaje enunciada en 4.4 tenemos:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{\text{voltaje con carga cero} - \text{voltaje con carga nominal}}{\text{voltaje con carga nominal}} \quad \text{Ec. 4.01}$$

asumiendo que:
$$\frac{\text{voltaje con carga cero}}{\text{do}} = E \cos \omega t$$

en donde
$$E = \text{voltaje promedio directo con carga cero, asumiendo cero control de fase y cero caída de voltaje directo.}$$

$$\omega t = \alpha \quad (\text{ángulo de arranque de conducción}).$$

tenemos que:
$$\frac{\text{voltaje con carga cero}}{\text{do}} = E \cos \alpha$$

de igual forma:
$$\frac{\text{voltaje con carga nominal}}{\text{do}} = \frac{\text{voltaje con carga cero}}{\text{do}} - \text{caídas de tensión}$$

siendo las caídas de tensión más importantes las siguientes:

$$SE = \text{caída total de voltaje directo causada por cada tiristor del circuito y S es el factor de circuito (1 para circuitos de una vía y 2 para circuitos de dos vías).}$$

$$E_X = \text{caída de voltaje directo causada por la reactancia de conmutación,}$$

$$E_r = \text{caída de voltaje directo causada por las pérdidas resistivas en el equipo de transformación más las interconexiones no incluida en } E_F.$$

tenemos que:
$$\begin{aligned} \frac{\text{voltaje con carga nominal}}{\text{do}} &= (E \cos \alpha) - (SE + E_X + E_r) \\ &= E \cos \alpha - SE - E_X - E_r \end{aligned}$$

por lo tanto la regulación de voltaje es:

$$\begin{aligned} \text{Regulación de voltaje} &= \left(\frac{E \cos \alpha}{\text{do}} \right) - \left(\frac{E \cos \alpha}{\text{do}} - SE - E_X - E_r \right) \\ &= \frac{E \cos \alpha}{\text{do}} - \frac{E \cos \alpha}{\text{do}} + SE + E_X + E_r \\ &= SE + E_X + E_r \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.02}$$

4.4.2 Constante de reactancia de conmutación de transformación

La reactancia de la línea de suministro debe ser considerada en la determinación de la reactancia total del circuito convertidor. El valor de la reactancia de línea X_L , el cual es equivalente para una reactancia de

conmutación dada X_C o viceversa, y puede ser calculado de la siguiente fórmula:

$$\frac{X_L}{X_C} = D \left(\frac{E_n}{E_s} \right) \quad \text{Ec. 4.03}$$

en donde X_L = reactancia de la línea

X_C = reactancia de conmutación

D = constante de reactancia de conmutación de transformación

E_n = voltaje AC de línea a línea

E_s = voltaje DC de línea a neutro del secundario del transformador

El valor de la constante D para los circuitos de la figura 1.1 del capítulo 1 es igual a la unidad.

4.5 Efecto de las armónicas en los voltajes de entrada de convertidores estáticos

La presencia de armónicas en el voltaje alterno de entrada de un convertidor puede afectar el voltaje directo de salida. El voltaje de salida de un convertidor es determinado por medio del promedio de voltaje aplicado al ánodo durante su período de conducción. Por lo tanto, el efecto de la componente armónica de voltaje dependerá de la magnitud, orden y posición de fase de la componente armónica. En grandes instalaciones que poseen transformadores para desfase de fase conectados entre la línea de AC y la unidades convertidoras, los voltajes de salida de estas unidades pueden diferir debido a las diferentes relaciones de fase entre la fundamental y las componentes armónicas en las unidades.

4.6 Adecuada operación de convertidores en paralelo

Una unidad convertidora puede considerarse que está en una operación en paralelo adecuada con otras unidades similares, si sus corrientes no difieren de su compartimiento proporcional de la corriente total, por más de un 10% entre el 50 y 150% de la capacidad nominal instalada.

El compartimiento proporcional de corriente entre los convertidores se puede definir como: la corriente total multiplicada por la relación entre la corriente nominal propia del convertidor y la sumatoria de las corrientes nominales de todas las unidades convertidoras conectadas en paralelo. Esto no implica que el convertidor pueda operar más allá de sus características de placa.

Un convertidor de corriente regulada debe ser considerado en una adecuada operación en paralelo con otras unidades similares, si sus corrientes no difieren por más que un más-menos 4% de su compartimiento proporcional dentro de un rango de regulación específico.

4.7 Factor de potencia para convertidores estáticos

4.7.1 Valor del factor de potencia

El factor de potencia de un convertidor es menor que la unidad por las siguientes razones:

- (1) Distorsión de la onda de corriente debido a la inherente acción del rectificador. Esto representa componentes armónicas en la corriente alterna de línea, las cuales no se agregan a la potencia activa, pero sí a los voltamperios. El efecto de la distorsión decrece cuando el número de fases es incrementado (esto se explica en referencia No. 4).
- (2) El desplazamiento de la corriente fundamental de línea respecto del voltaje, debido a la reactancia del transformador del convertidor. Si la unidad convertidora es operada con control de fase, el factor de potencia es disminuido más debido al incremento en el ángulo de desplazamiento entre corriente y voltaje (esto se explica en referencia No. 4).
- (3) El efecto de la corriente de excitación del transformador (esto se explica en referencia No. 4).

El factor de potencia es la relación entre los kilovatios y los kilovoltamperios medidos en los terminales de línea alterna del transformador del convertidor. También puede ser expresado como la relación entre la componente en

fase o activa y el valor eficaz de la corriente alterna de línea. La componente activa de la corriente de línea es senoidal, y se asume que el voltaje alterno de línea es también senoidal.

El factor de potencia para una carga específica puede ser determinado por medio de cálculos basados en características medidas en el equipo de transformación y reactores. Por medio del análisis de la forma de onda teórica de la corriente alterna de línea, ésta se puede resolver en sus componentes de la siguiente forma:

$$I_L = \text{corriente alterna de línea (rms)}$$

$$I_{1P} = \text{componente activa fundamental de } I_L$$

$$I_{1Q} = \text{componente reactiva fundamental de } I_L$$

Utilizando las componentes de la corriente alterna de línea, se puede definir la componente armónica total de I_L de la siguiente forma:

$$I_H = \sqrt{I_L^2 - I_{1P}^2 - I_{1Q}^2} \quad \text{Ec. 4.04}$$

= componente armónica total de I_L

La magnitud de estas componentes variará con la carga del convertidor, control del ángulo de fase y la reactancia de conmutación del transformador. Si la corriente de excitación del transformador I_e es asumida totalmente reactiva y sin componentes armónicas, el factor de potencia es definido de la siguiente forma:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{I_{1P}}{\sqrt{I_L^2 - I_{1Q}^2 + (I_{1Q} + I_e)^2}} \quad \text{Ec. 4.05}$$

El error resultante por despreciar la componente activa y los armónicos de I_e , es despreciable en casos prácticos (esto se explica en referencia No. 4).

4.7.2 Especificación del factor de potencia

Excepto cuando se especifique de otra forma, la componente de desplazamiento del factor de potencia para un convertidor es suministrada por el fabricante. El valor es determinado por mediciones hechas en la fábrica y es calculado para el voltaje directo nominal y la corriente con el voltaje nominal alterno aplicado.

4.7.3 Determinación del factor de potencia de desplazamiento

Es definido como la relación entre los kilovatios y los kilovoltamperios de la frecuencia fundamental en los terminales de corriente alterna del transformador del rectificador. Este parámetro se calcula por medio de las ecuaciones 4.04 y 4.05, despreciando el valor de las corrientes armónicas I_H .

$$I_H = \sqrt{I_L^2 - I_{1P}^2 - I_{1Q}^2}$$

$$I_H^2 = I_L^2 - I_{1P}^2 - I_{1Q}^2$$

$$I_H^2 + I_{1Q}^2 = I_L^2 - I_{1P}^2$$

como $I_H = 0$ tenemos que:

$$I_{1Q}^2 = I_L^2 - I_{1P}^2 \quad \text{Ec. 4.06}$$

substituyendo la Ec. 4.06 en la Ec. 4.05 tenemos:

$$\text{Factor de potencia de desplazamiento} = \frac{I_{1P}}{\sqrt{I_L^2 - I_{1Q}^2 + (I_{1Q} + I_e)^2}}$$

$$= \frac{I_{1P}}{\sqrt{I_{1P}^2 + (I_{1Q} + I_e)^2}} \quad \text{Ec. 4.07}$$

4.8 Características de placa de un convertidor estático

La mínima información que debe suministrar la placa de un convertidor estático es la siguiente:

- (1) Nombre del fabricante.
- (2) Nombre descriptivo.
- (3) Designación del tipo.
- (4) Clase de servicio.
- (5) Número de serie.
- (6) Características de entrada.
 - a) voltaje
 - b) corriente
 - c) frecuencia
 - d) fases
- (7) Características de salida.
 - a) kilovatios
 - b) voltaje
 - c) corriente continua
 - d) corriente de servicio (magnitud y duración)
- (8) Temperatura máxima del medio de enfriamiento.
- (10) Volumen del líquido en un sistema cerrado de enfriamiento.
- (11) Peso.
- (12) Número de diagrama esquemático.
- (13) Libro para identificación de partes e instrucciones.

4.9 Efecto de las armónicas generadas por convertidores estáticos

El voltaje de salida de DC de un convertidor consiste de segmentos de ondas senoidales. El orden de los armónicos es igual a nq ; por esta razón, la presencia de voltajes armónicos en el circuito de DC de un motor podría influir en los siguientes aspectos:

- (1) calentamiento dentro del motor,
- (2) ruido acustico dentro del motor,
- (3) conmutación del motor;

(4) armónicos inducidos en los circuitos de campo del motor.

Las corrientes armónicas en el lado de AC geeneran distorsión de voltaje cuando éstas circulan a través de las impedancias del sistema hasta la fuente de potencia. Estas corrientes pueden causar los siguientes problemas:

- (1) Calentamiento extra de otros aparatos en el sistema de potencia.
- (2) Interferencia inductiva con circuitos de comunicación y control.

El grado de control de fase puede afectar las armónicas en el lado de AC y en el de DC. Aunque las armónicas no causen serios problemas en las instalaciones en donde existen convertidores estáticos, las nuevas aplicaciones deben investigarse desde este punto de vista, porque bajo condiciones desfavorables el efecto puede ser importante.

4.10 Efecto de las armónicas en el voltaje de línea alterno sobre el voltaje de salida directo

La presencia de componentes armónicas en el voltaje alterno de línea puede afectar el valor medio del voltaje directo del convertidor. Estas componentes pueden causar un incremento, decremento o un cambio en el voltaje directo, que depende de la longitud del período de conducción en cada ciclo, la magnitud y fase de las armónicas en relación al voltaje fundamental y otras condiciones. Las armónicas podrían tambien causar desbalance de corriente entre fases del convertidor o entre unidades en paralelo, particularmente si el número de fases es 12 o más.

4.11 Dispositivos de protección para convertidores estáticos de potencia

Para reducir los disturbios provenientes de fallas, los convertidores y el sistema de potencia deben estar equipados con interruptores de protección, los cuales deben ser ajustados para operar al menor tiempo posible. Los dispositivos semiconductores deben ser de primera importancia, debido a su pequeña capacidad térmica.

Además de proteger contra sobrecargas y corrientes de falla, cada tiristor debe ser protegido contra picos de voltaje ocasionados por descargas atmosféricas, maniobras de interrupciones y conmutación inadecuada. Por esta razón, los tiristores usados en rectificadores de potencia deben tener un voltaje de pico más grande que los normales.

Equipo de protección con alta velocidad de respuesta debe ser utilizado para proteger el equipo de fenómenos transitorios. La selección de equipo normal o con alta velocidad debe fundamentarse sobre bases económicas y de aplicación, tomando en cuenta los requerimientos de servicio y la posibilidad de fallas severas y frecuentes. Se pueden considerar cuatro clasificaciones de aparatos y sistemas para aplicaciones de convertidores, y son las siguientes:

- (1) CLASE I (corriente directa nominal = 1 p.u., corriente nominal de servicio prolongado = 1 p.u. durante 150 minutos y corriente nominal de servicio corto = 2.25 p.u. durante 10 segundos). Esta aplicación requiere un diseño confiable del convertidor para minimizar el tiempo de parada por falla, y normalmente es utilizado en convertidores de alta potencia, los cuales típicamente pueden ser representados por la figura 4.1 , en la cual se pueden observar los equipos de protección, y en las tablas 4.1 y 4.2 sus funciones y propósitos. Fallas externamente inducidas, tales como corto circuitos de DC, bajones y pérdidas de potencia de AC, deben ser eliminadas por medio de flipones y la protección de la compuerta; la misma protección debe ser aplicada para fallas internas tales como operación equivocada de compuertas durante un ciclo debido a desperfectos en el equipo de control o fallas en el regulador. Los fusibles no se funden con este tipo de fallas. Su función es reservada para aislar un ramal del convertidor que esté defectuoso o equivocadamente disparado. La capacidad de los fusibles puede ser coordinada con la capacidad de los tiristores; en este caso, la protección es diseñada para fallas internas. Estos fusibles proporcionan respaldo si otras protecciones fallan. Las aplicaciones típicas son en grandes motores para fábricas bobinadoras de metales.
- (2) CLASE II. Estas aplicaciones requieren el diseño más confiable para minimizar el tiempo de parada por falla, y generalmente es utilizado en convertidores de menor potencia que los de clase I. Las fallas externas puede ser eliminadas de la misma forma que en la clase I sin fundir los fusibles. Las fallas internas tales como operación equivocada de compuertas, sí pueden fundir los fusibles, pero éstos evitan la falla antes de que ocurran daños en los tiristores. Las aplicaciones típicas pueden ser en fábricas de metal con motores auxiliares, particularmente si estos convertidores se usan como inversores considerablemente.
- (3) CLASE III. Estas aplicaciones requieren buena continuidad de servicio, pero generalmente es menos crítico que los de clase II.

Las fallas de DC que no exceden cinco veces la corriente nominal, como las causadas por arco eléctrico en el motor, error en la apertura de compuertas o fallas en el regulador, pueden ser corregidas por la protección de la compuerta y un contactor de DC sin fundir los fusibles. Sin embargo, las fallas de inversión, grandes cortocircuitos de DC o disturbios severos de AC, pueden hacer que los fusibles se fundan, pero éstos protegen a los tiristores de daños y son fácilmente reemplazados. Las aplicaciones típicas pueden ser en convertidores auxiliares donde el servicio como inversor no existe o es limitado a un corto período de tiempo.

- (4) CLASE IV. Estas aplicaciones comúnmente envuelven convertidores en donde una cerrada coordinación entre tiristores y fusibles, nunca puede ser realizada económicamente. Fallas severas pueden conducir a la fundición de los fusibles y pérdida de los tiristores; sin embargo, ambos pueden ser fácilmente reemplazados. Las aplicaciones típicas se presentan en convertidores que no poseen servicio de inversión.

SISTEMA AC DE POTENCIA

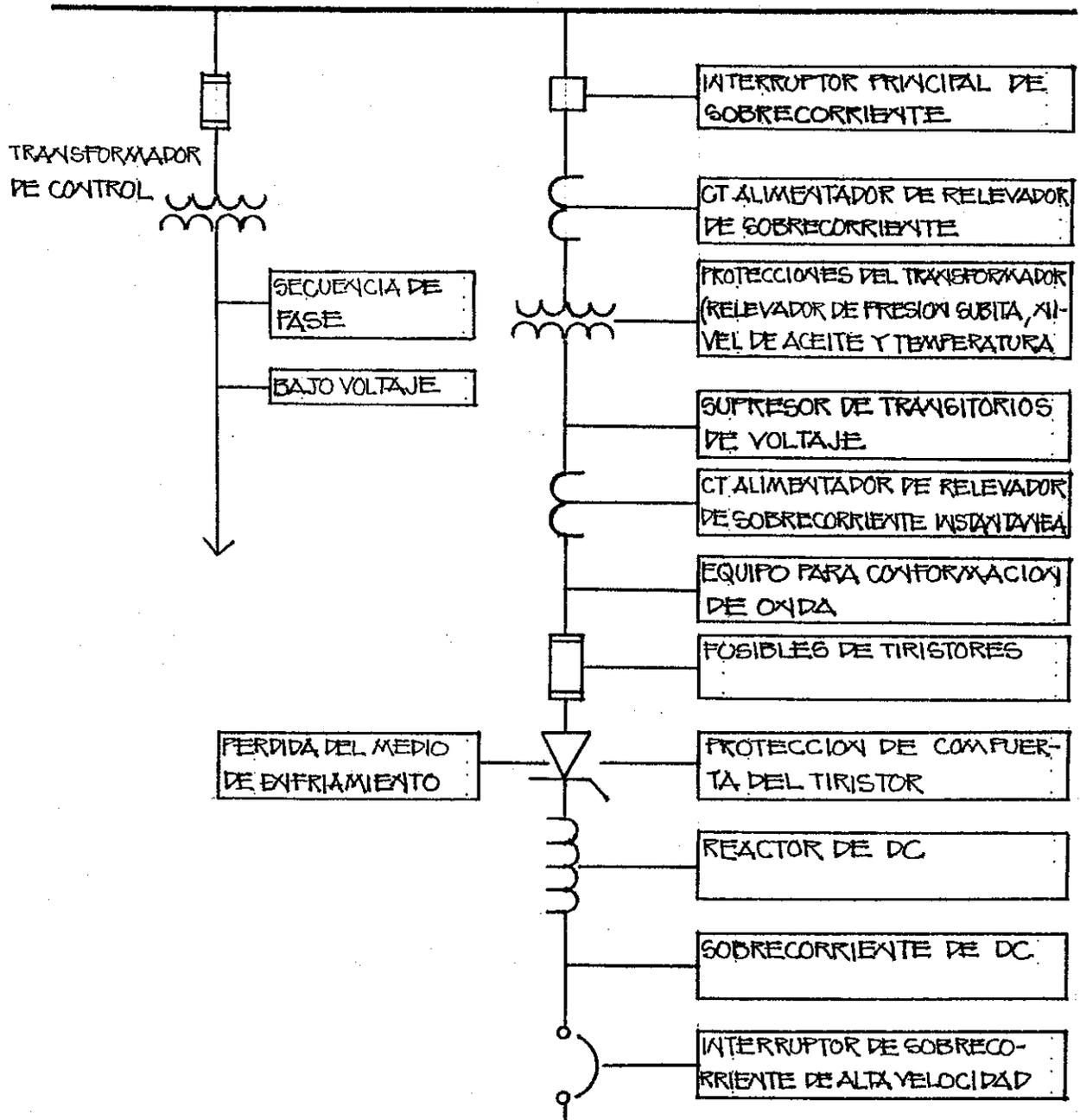


Figura 4.1: Diagrama unifilar de un convertidor de alta potencia.

Tabla 4.1 Condiciones de falla en convertidores de potencia y acciones que deben ser tomadas

FALLA	CONDICIONES	SENSOR	ACCION
SOBRECARGA	(1) CARGAS MAYORES A LA NOMINAL, DONDE LA CORRIENTE NO EXCEDE LA CLASIFICACION DE CORRIENTE DE CORTA DURACION.	SOBRE CARGA DE TIEMPO INVERSO.	(1) INICIAR PARO DEL MOTOR.
	(2) CARGAS INSTANTANEAS MAYORES QUE 1.2 VECES LA CLASIFICACION DE CORRIENTE DE CORTA DURACION.	SOBRE CARGA INSTANTANEA.	(1) INICIAR LA PROTECCION DE LA COMPUERTA. (2) DISPARAR SOBRECORRIENTE DE DC.
FALLA INTERNA DEL CONVERTIDOR.	(1) TIRISTOR EN CORTO. (2) RUPTURA DEL AISLAMIENTO.	FUSIBLES. SOBRECORRIENTE DE AC PARA ACCION INSTANTANEA.	(1) SUBSTITUIR FUSIBLES. (2) DISPARO DE INTERRUPTORES TERMOMAGNETICOS DE AC/DC
CORTO CIRCUITO DE DC EXTERNO.	(1) CHISPAS EN LOS TERMINALES DEL CONVERTIDOR. (2) FLAMEO EN EL MOTOR.	(1) SOBRECORRIENTE DE AC Y DC PARA ACCION INSTANTANEA. (2) IGUAL A (1).	(1) INICIAR LA PROTECCION DE LA COMPUERTA. (2) DISPARAR EL FLIPON DE DC.

Tabla 4.2 Equipo de protección típico y sus funciones

EQUIPO	PROPOSITO	ACCION
INTERRUPTOR PRINCIPAL Y RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE Y PRESIÓN.	ALIMENTACIÓN DE CARGAS Y PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES.	DISPARO.
SECUENCIA DE FASE.	PREVENIR LA SECUENCIA INCORRECTA DE ENTRADA.	DISPARO.
BAJO VOLTAJE DE AC.	PREVENIR EL FUNCIONAMIENTO ABAJO DE LOS LÍMITES DE VOLTAJE DE DISEÑO.	DISPARO.
TRANSFORMADOR. NIVEL DE LÍQUIDO. TEMPERATURA DEL LÍQUIDO. RELEVADOR DE PRESIÓN. TEMPERATURA DEL DEVANADO.	PÉRDIDA DE LÍQUIDO EXCESO DE TEMPERATURA LÍQUIDO SENSOR FALLAS INTERNAS EXCESO DE TEMP. DEL DEVANADO	ALARMA ALARMA DISPARO ALARMA
REACTORES DE AC	LIMITA CORRIENTES DE FALLA Y di/dt EN TIRISTORES COLABORANDO AL BALANCE DE CARGA.	OPERACIONAL
PÉRDIDA DEL MEDIO DE ENFRÍAMIENTO	PROTECCIÓN CONTRA SOBRETEMPERATURA EN EL CONVERTIDOR	DISPARO POR TEMPERATURA
SUPRESOR DE TRANSIENTES DE VOLTAJE	PROTEGER EL CONVERTIDOR CONTRA TRANSITORIOS DE VOLTAJE EN EL SISTEMA	OPERACIONAL
CONFORMACIÓN DE ONDA	PROTEGE CONTRA EXCESIVO dv/dt Y RECUPERACIÓN DE TRANSITORIOS EN TIRISTORES	OPERACIONAL
RELEVADOR DE TIEMPO INVERSO DE AC	PROTEGE AL CONVERTIDOR DE SOBRECARGAS	DISPARO
PROTECCIÓN INSTANTÁNEA DE AC	PROTEGE AL CONVERTIDOR DE DAÑOS DEBIDOS A FALLAS SOSTENIDAS	DISPARO

esta tabla continua en la siguiente página

continuación de tabla 4.2

<p>FUSIBLES PARA SEMICONDUCTORES</p>	<p>AISLAR FALLAS EN TIRISTORES</p> <p>PROTEGE LOS TIRISTORES DE CORRIENTES DE FALLAS INTERNAS</p> <p>PROTEGE LOS TIRISTORES DE CORRIENTES DE FALLAS EXTERNAS</p> <p>PREVIENE LA RUTURA DE LA CARCASA DE LOS TIRISTORES</p>	<p>LIMPIAR LA FALLA</p>
<p>PROTECCIÓN DE COMPUERTA</p>	<p>PROTEGE EL CONVERTIDOR CONTRA CORRIENTES CIRCULANTES Y FALLAS DE CORTO CIRCUITO EN DC</p>	<p>DÍSPARO</p>
<p>SOBRECORRIENTE EN DC</p>	<p>PROTEGE AL CONVERTIDOR DE DAÑOS DEBIDOS A FALLAS SOSTENIDAS</p>	<p>DÍSPARO</p>
<p>REACTOR DE DC</p>	<p>LIMITA di/dt DURANTE FALLAS DE DC O LIMITA LA COMPONENTE DE AC EN LOS CIRCUITOS DEL MOTOR</p>	<p>OPERACIONAL</p>
<p>INTERRUPTOR DE SOBRECORRIENTE DE DC</p>	<p>PROTEGE AL CONVERTIDOR CONTRA FALLAS DE CORTO CIRCUITO DE DC</p>	<p>DÍSPARO</p>

4.11.1 Fallas en los tiristores

En prácticamente todos los convertidores de potencia con semiconductores, la falla de un dispositivo semiconductor impone una corriente de falla sobre otros elementos del circuito, o incrementa el esfuerzo de voltaje sobre los dispositivos remanentes conectados en serie en el mismo elemento del circuito.

Generalmente, la protección es proporcionada por fusibles de disparo rápido colocados en serie con los dispositivos semiconductores. Estos permiten la posibilidad de continuar la operación del convertidor, removiendo el dispositivo fallado antes de que más daños ocurran. En cualquier caso, la pérdida de un tiristor incrementa el servicio de los tiristores remanentes.

La remoción de un dispositivo dañado de una cadena serie no necesita ser realizado instantáneamente, dado que no existen corrientes de falla. Sin embargo, el voltaje que tienen que soportar es ahora aplicado a los tiristores restantes en la cadena. Dependiendo del número de tiristores en serie y sus voltajes nominales, los otros dispositivos en la cadena pueden también fallar, a menos que se tome una acción correctiva.

Cuando el último dispositivo de la cadena es el que falla, la corriente de falla puede circular y el equipo normal de protección puede funcionar.

4.11.2 Cortocircuito de DC

Dependiendo del grado de severidad del corto circuito de DC, éste puede ser restaurado con la mayor velocidad posible. Esto se puede realizar por medio de la acción de protección de compuerta, flipones de alta velocidad o fusibles de tiristores. Si la coordinación entre tiristores y elementos de protección es necesaria, los reactores de DC deben ser requeridos.

4.11.3 Fallas de conmutación

En convertidores con control de fase, es posible que la corriente no sea conmutada entre un ramal y el otro. Esto puede ser provocado por ausencia de disparo de algún tiristor, una abertura o interrupción en el voltaje de línea, fusibles defectuosos, etc.

Si el convertidor está siendo operado como rectificador, esto puede conducir a una temporal reducción de la corriente. Interrupciones de DC de alta velocidad o fusibles limitadores de corriente son necesarios para proteger a los tiristores

contra daños causados por esta condición.

4.11.4 Fallas de control

El control de compuerta para un convertidor de tiristores puede fallar de varias formas:

- (1) El disparo de un ramal puede ser ausente completamente.
- (2) El disparo de un ramal puede ser prematuro o tardío.
- (3) Cada uno de los casos anteriores puede ocurrir en uno o más ramales.

5. MEDICION Y CALCULO DEL NIVEL DE ARMONICAS Y OSCILACIONES EJEMPLO DE APLICACION EN LA INDUSTRIA DE FABRICACION DE CAJAS DE CARTON

5.1 Mediciones

Las técnicas utilizadas para medir la extensión y efecto de las armónicas, difieren de las técnicas ordinarias de medición de potencia, principalmente por el ancho de banda requerido. Mientras las más ordinarias mediciones de voltaje, corriente y potencia pueden ser establecidas con cuidado para una reducida banda de frecuencias de distribución (por ejemplo 50 o 60 Hz), las mediciones de los efectos de las armónicas, requiere atención para un importante y extenso ancho de banda (180 a 1500 Hz).

En general, es más importante medir el efecto de la operación del convertidor sobre el resto del sistema de distribución o transmisión, que conocer la magnitud específica de cada componente armónica. La figura 5.1 representa una generalización aproximada de estas mediciones; el aparato bajo prueba es un convertidor de potencia, el cual puede incluir transformador, inductor, condensador, interruptor, etc., los cuales son necesarios para el funcionamiento del convertidor o han sido agregados para reducir el efecto del convertidor sobre el resto del sistema de potencia.

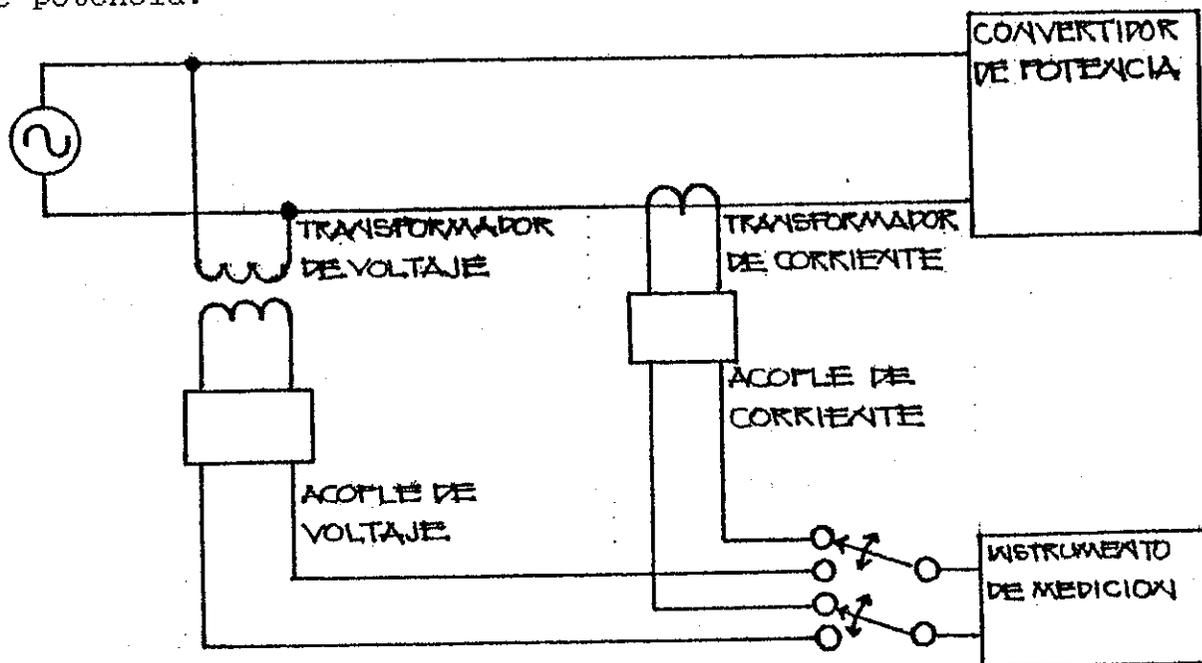


Figura 5.1: Circuito típico para medir corriente y voltaje, usando un transformador de potencial y un transformador de corriente.

El transformador de potencial puede o no ser utilizado, según el voltaje de suministro y de la naturaleza del acoplador de voltaje. Generalmente voltajes arriba de 480 voltios requieren de un transformador o un divisor de voltaje para permitir la operación segura de los instrumentos de medición.

5.1.1 Medición de la interrupción de voltaje en la línea

Este fenómeno es de mayor interés en donde puede ser más pronunciado, esto es, en sistemas de distribución de 600 voltios o menos. Divisores de voltaje y corriente en paralelo son frecuentemente utilizados más que los transformadores. En sistemas de bajo voltaje, estas cantidades pueden ser acopladas directamente a los instrumentos.

Para medir el ancho y la profundidad de la interrupción, se debe utilizar un osciloscopio. Es necesario que el osciloscopio posea barrido único y capacidad de almacenamiento, para así poder asegurar la definición clara del área de interrupción, la cual puede ser medida posteriormente al haber grabado el evento. Un récord de gráficas fotográficas es necesario; éste nos permitirá la comparación de las condiciones antes y después de que las técnicas de compensación hayan sido aplicadas. El osciloscopio debe tener un ancho de banda moderado, como de 25 MHz, lo cual permite adecuada fidelidad de la medición efectuada. La punta exploradora con divisor de tensión es un accesorio del osciloscopio, normalmente suficiente como acoplador de voltaje. Es importante que el osciloscopio posea entrada diferencial para evitar problemas de tierras; la operación del osciloscopio con la carcasa no puesta a tierra o flotante, constituye un serio riesgo y debe ser evitado. Las mediciones del ancho y la profundidad de las interrupciones de voltaje pueden ser realizadas definiendo escalas de tiempo y voltaje en la traza del osciloscopio.

Cuando se planea la instalación de un convertidor en un sistema de distribución existente, es necesario determinar el circuito equivalente de Thevenin del sistema de potencia visto desde la entrada del convertidor. Este conocimiento permite la predicción del tamaño de la compensación necesaria. En sistemas de más alto voltaje, el fenómeno de interrupciones de voltaje llega a ser menos pronunciado y más difícil de medir con exactitud por medio de la traza del osciloscopio.

establecer estadísticas sobre períodos no mayores que unas pocas horas, un registrador de eventos debe ser utilizado.

5.2 Generalidades del proceso de producción en la industria de fabricación de cajas de cartón

El ejemplo de aplicación se realizó en una fábrica de cajas de cartón; para familiarizarnos con los elementos del proceso de producción, se presenta una breve descripción de los elementos que intervienen y se realizan las características más importantes.

5.2.1 Materia prima

Es importada y constituye básicamente de bobinas de papel de diferentes calibres y anchos.

5.2.2 Máquina corrugadora

Esta es la más importante, y es en ella en donde se inicia el proceso sobre las bobinas de papel. Las bobinas son desenrolladas a determinada velocidad y las dos caras lisas llamadas liner son adheridas a una pieza central llamada flauta; una vez se termina el proceso, el producto resultante se llama lámina y dependiendo del programa asignado se cortan y sisan para obtener los tamaños de cajas deseados. Esta máquina en la actualidad utiliza un sistema Ward-Leonard para variar la velocidad del proceso por medio de un motor de corriente directa, y quizá en el futuro se le instale un convertidor estático.

5.2.3 Máquina flexo-folder

Cuando las láminas de cartón procedentes de la corrugadora no poseen un gran tamaño, se trasladan por medio de bandas hasta esta máquina. La flexo-folder troquela, pega, imprime en dos colores y dobla; con lo cual, el producto ya sale acabado y listo para ser entregado. Debido a la variedad de actividades que ejecuta, es la segunda en importancia después de la corrugadora. También es de velocidad variable por medio de un motor de corriente directa; a diferencia de la corrugadora, utiliza un convertidor estático de AC-DC.

5.2.4 Máquina prensadora

Cuando las láminas de cartón procedentes de la corrugadora son muy grandes y no se pueden procesar rápidamente en la flexo-folder, se pasan por esta máquina, la cual troquela e imprime en dos colores. Esta máquina utiliza un sistema Ward-Leonard, ya que es de velocidad variable.

5.2.5 Máquina pegadora

Después de pasar por la prensadora, la lámina en esta máquina es doblada y pegada, y se obtiene el producto terminado. Utiliza al igual que las otras, un producto terminado, así como un sistema Ward-Leonard, ya que es de velocidad variable.

5.2.6 Máquina engrapadora

Si los requerimientos del pedido exigen una caja más resistente, el producto proveniente de la prensadora es llevado a esta máquina, en la cual se engrapa, y queda listo para la venta.

5.2.7 Máquina troqueladora

Esta máquina se emplea cuando los requerimientos de la producción se salen de lo típicamente establecido. Se emplean moldes troquelados, con los cuales se consiguen las formas caprichosas deseadas.

5.2.8 Las calderas

Estas son de vital importancia, ya que sin el vapor por ellas generado, no se puede realizar ninguna de las tareas efectuadas en la máquina corrugadora. Este vapor es el que optimiza el proceso de pegado, ya que sin él la eficiencia del adhesivo es baja.

5.2.9 Sistema preparador de adhesivo

Aquí se preparan los dos tipos de adhesivos utilizados en la corrugadora, al igual que las calderas; este sistema constituye otro elemento básico en el funcionamiento de la corrugadora. Existen dos tipos de adhesivos: el primero utiliza vapor a un 100% de efectividad, y el segundo, un vapor degradado.

5.2.10 Sistema de aire comprimido

Básicamente constituido por compresores de aire tipo abiertos, los cuales también son de vital importancia, ya que este aire que generan es utilizado para accionar los rodillos impresores, y en otros casos mantiene la lámina de cartón fija para evitar que sufra algún daño cuando ésta es ingresada a la flexo-folder, prensa y pegadora.

5.2.11 Generador de emergencia

Actualmente no disponen de este servicio, pero se está implementando para el futuro.

5.3 Descripción del diagrama unifilar de la planta

En este diagrama unifilar, se puede observar el sistema de potencia representado por la barra A. Este sistema alimenta la subestación de la fábrica, la cual es un configuración estrella-delta, formada con tres transformadores monofásicos de 167 KVA cada uno. Al secundario del transformador, está conectado un panel principal en el cual lógicamente está la barra principal; esta barra está protegida por un interruptor de sobrecorriente de 3x800 amperios. De esta barra principal, sale la alimentación de energía para la máquina corrugadora, barra de corrugadora, barra de línea central y sección de particionadora. La carga que nos interesa analizar se encuentra conectada a la barra de línea central.

Tanto la barra de corrugadora como la de línea central, poseen un diagrama unifilar propio, el cual se presenta en las figuras 5.3 y 5.4 respectivamente.

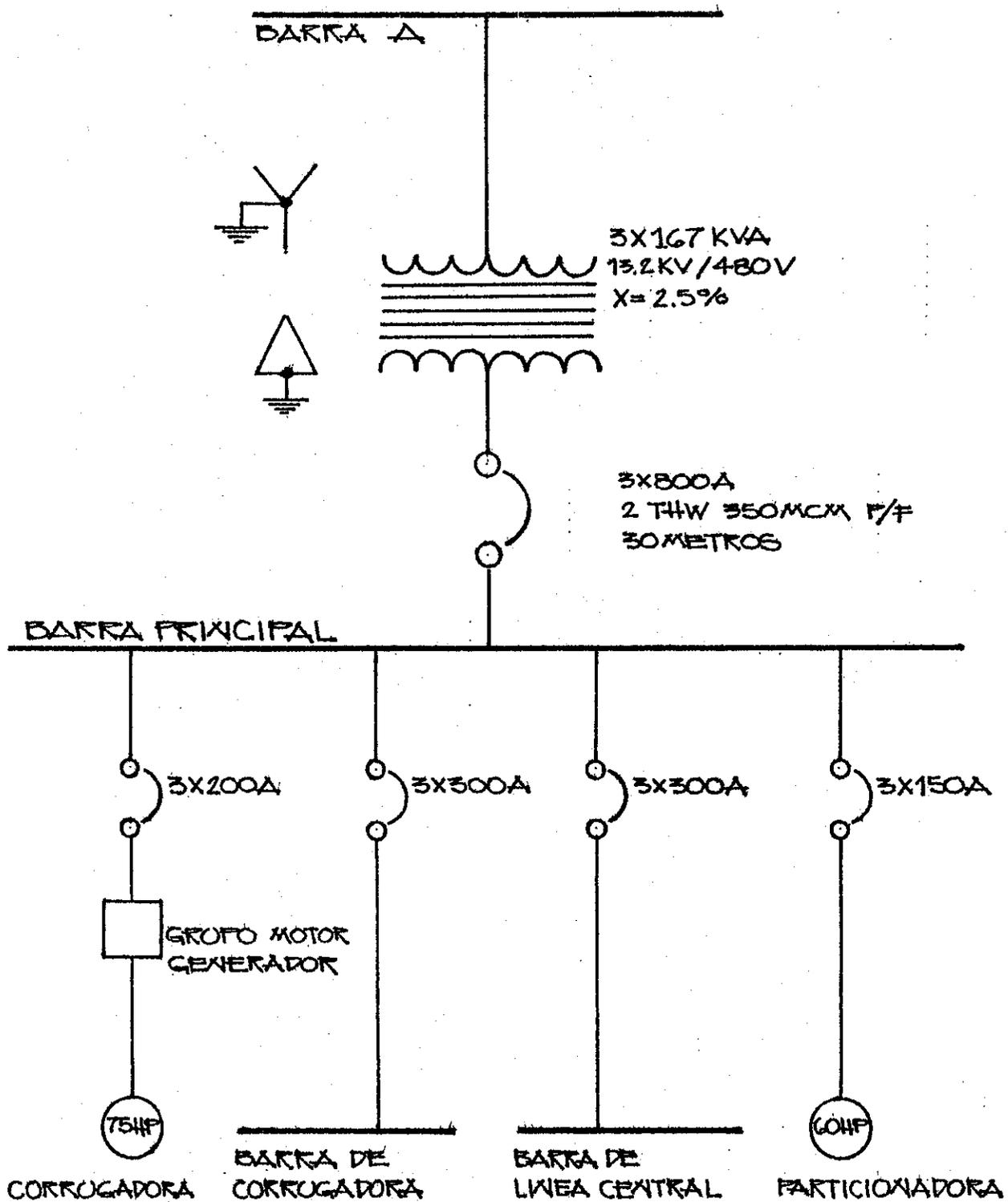


Figura 5.2: Diagrama unifilar general de alimentación eléctrica.

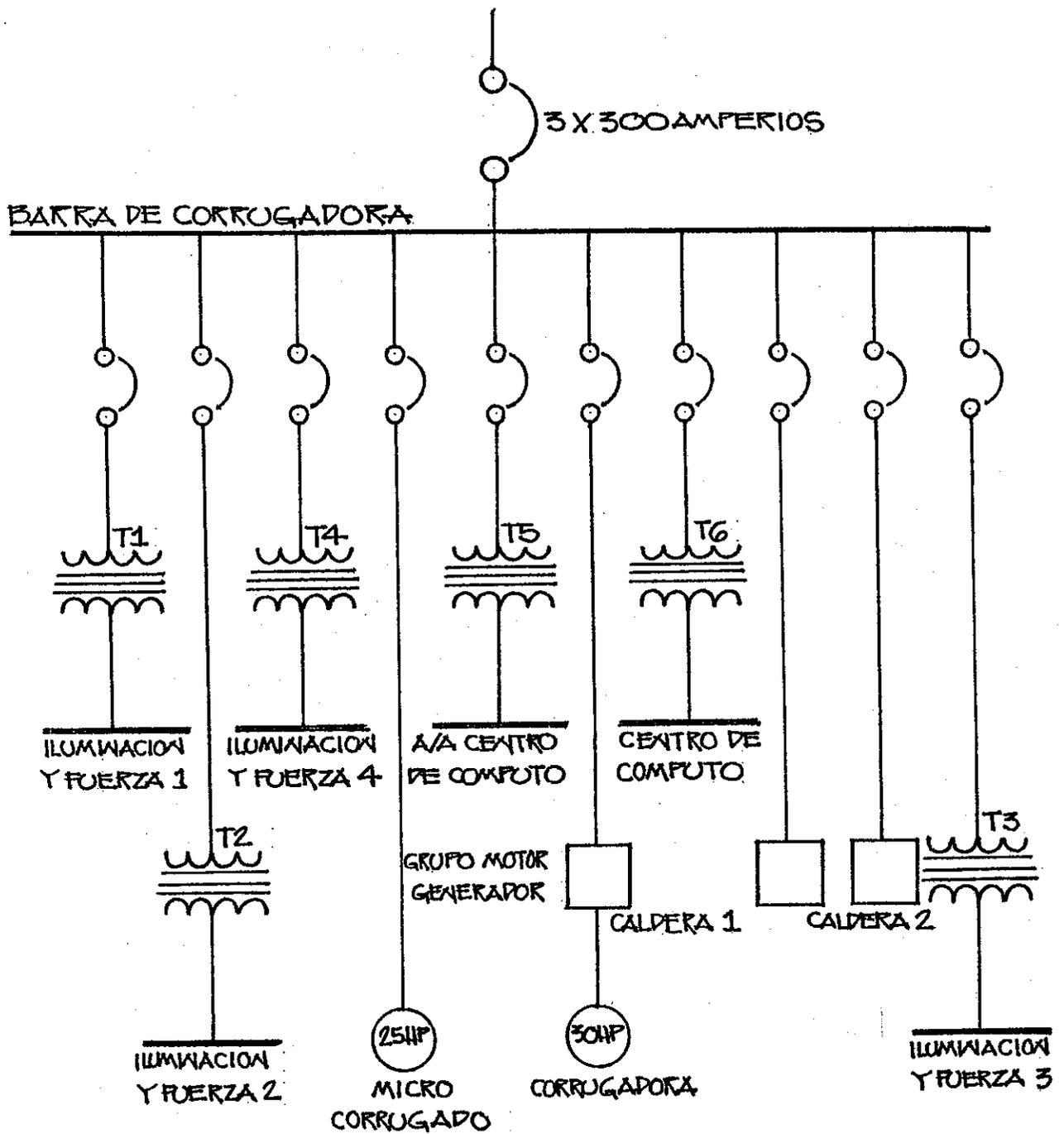


Figura 5.3: Diagrama unifilar para la barra de corrugadora
 T1-T2-T3-T4-T5-T6= 25KVA/480V/220V

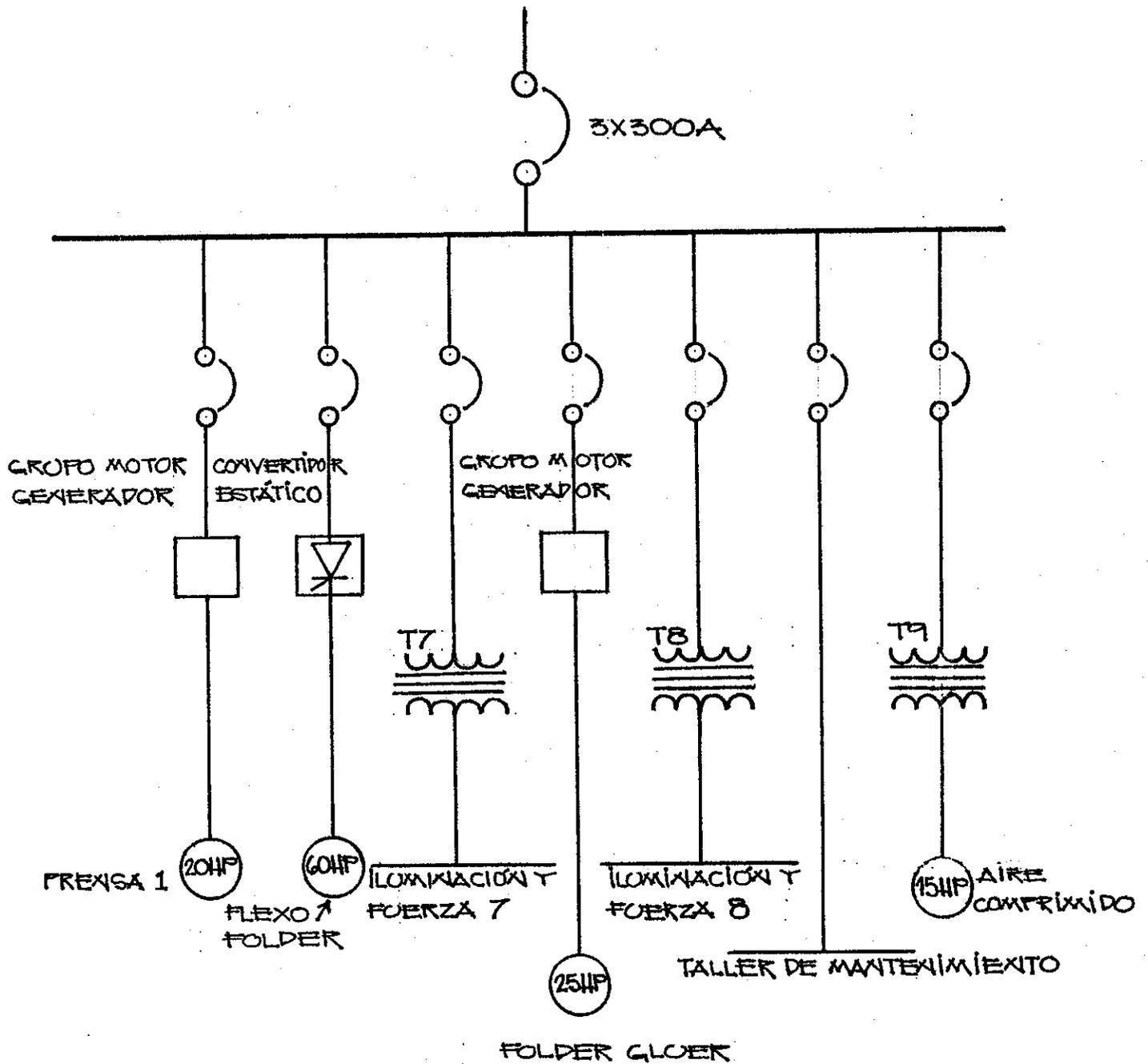


Figura 5.4: Diagrama unifilar para la barra de línea central
 T7=T8= 15KVA/480V/220V
 T9= 25KVA/480V/220V.

Del diagrama unifilar mostrado en las figuras 5.3 y 5.4, nos podemos dar cuenta de que las cargas que pueden ser afectadas por la contaminación de armónicas están conectadas a la barra de corrugadora y a la barra de línea central; esta última posee la única carga generadora de armónicas en toda la planta de producción, ya que ahí está conectado el convertidor estático que alimenta de energía a un motor de corriente directa de 60 HP que utiliza la máquina flexo-folder. Debido a la diversidad de cargas que son alimentadas desde la barra principal, se puede catalogar a este sistema como de aplicación general.

5.4 Cálculo teórico del factor de distorsión de la tensión

Se inicia el análisis matemático definiendo los valores base en el lado de alta tensión 13.2 KV.

$$\text{Potencia base} = 100 \text{ KVA}$$

$$\text{Voltaje base} = 13.2 \text{ KV}$$

Los valores base en el lado de baja tensión 480 V son:

$$\text{Potencia base} = 100 \text{ KVA}$$

$$\text{Voltaje base} = 0.48 \text{ KV}$$

De estos valores, se pueden calcular las corrientes e impedancias base en ambos lados del sistema, las cuales son obtenidas de la siguiente forma:

$$\text{Corriente base (AT)} = \frac{100 \text{ KVA}}{\frac{3\text{PH}}{3 \times 13.2 \text{ KV}} \text{ LL}} = 4.73 \text{ A}$$

$$\text{Corriente base (BT)} = \frac{100 \text{ KVA}}{\frac{3\text{PH}}{3 \times 0.48 \text{ KV}} \text{ LL}} = 120.28 \text{ A}$$

$$\text{Impedancia base (AT)} = \frac{13.2 \text{ KV}}{\frac{\text{LL}}{0.1 \text{ MVA}} \text{ 3PH}} = 1742.4$$

$$\text{Impedancia base (BT)} = \frac{0.48 \text{ KV}^2}{\frac{0.1 \text{ MVA}}{3\text{PH}}} = 2.30$$

Con esta información se puede elaborar la tabla 4.1.

PARÁMETRO BASE	ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN
KVA _{BASE}	100	100
KV _{BASE}	13.2	0.48
I _{BASE}	4.37	120.28
Z _{BASE}	1742.40	2.30

Tabla 5.1 Valores base del sistema.

Tomando en cuenta que la generación de corrientes armónicas ocurre en la carga conectada en la barra de línea central, se puede considerar que el flujo de estas corrientes es desde la barra de línea central hasta la barra principal. Por esta razón, el diagrama unifilar se reduce a presentar la fuente de energía, transformadores, barra principal y barra de línea central. Esta simplificación del diagrama unifilar general se puede observar en la figura 5.5, en la cual se asume para efectos de cálculo la potencia y reactancia del sistema.

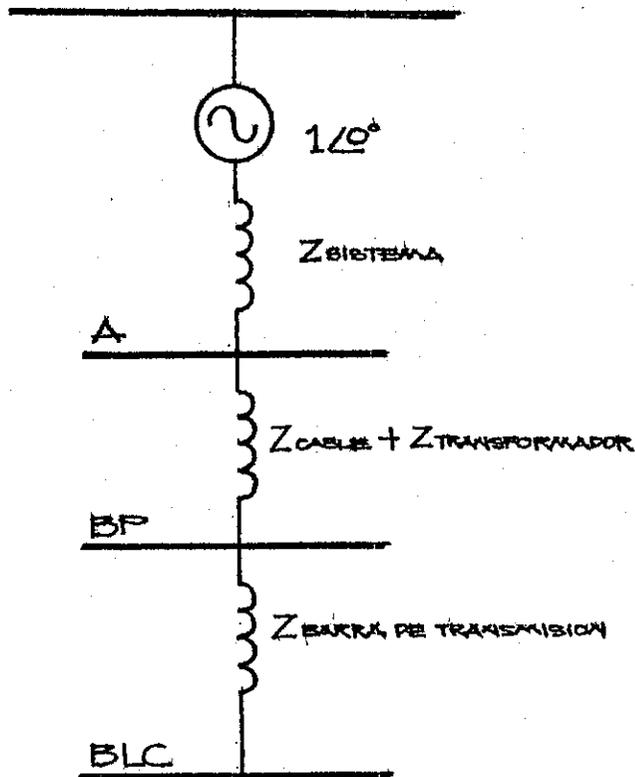


Figura 5.5: Diagrama unifilar general simplificado.

En la figura 5.5, se puede observar de que se cuenta con tres incógnitas, las cuales son: impedancia de transformadores en p.u., impedancia del cable de alimentación de la barra principal e impedancia de la barra que alimenta el convertidor estático de potencia.

Para obtener el valor de la impedancia Z del trafo del banco de transformación, bastó con tomar el valor de la placa de uno de los transformadores que componen el banco; el valor a frecuencia nominal es el siguiente:

$$Z_{\text{trafo}} = 2.5\%$$

El valor de la impedancia del cable que alimenta la barra principal desde la subestación se obtiene tomando en cuenta de que el calibre y la longitud. En la figura 5.2, se puede observar de que el calibre es 350 MCM y que posee una longitud de aproximadamente 92.4 pies. Basándonos en la tabla 2 de IEE Std 242-1975, se presenta el valor de la impedancia del cable en mención; este valor es el siguiente:

$$Z_{\text{cable 350 MCM}} = \frac{0.00397\Omega}{100 \text{ pie}} + \frac{J 0.00352\Omega}{100 \text{ pie}}$$

Tomando en cuenta que la longitud del cable es de 98.4 pie, la impedancia del cable se transforma en el siguiente valor:

$$Z_{\text{eq. cable}} = 3.91 \times 10^{-3}\Omega + J 3.46 \times 10^{-3}\Omega$$

Finalmente por ser dos conductores por fase, la impedancia real total de los cables de alimentación desde la subestación hasta la barra principal es la siguiente:

$$Z_{\text{eq. cable}} = \frac{3.91 \times 10^{-3}\Omega + J 3.46 \times 10^{-3}\Omega}{2}$$

$$Z_{\text{eq. cable}} = 1.96 \times 10^{-3}\Omega + J 1.73 \times 10^{-3}\Omega$$

La última incógnita por despejar es el valor de la impedancia de la barra que alimenta el convertidor estático de potencia. En este caso, nos basamos en la tabla 3 de IEEE Std 242-1975. Tomando en cuenta que la barra es de una capacidad nominal de 225 amperios y que posee una longitud hasta el convertidor de aproximadamente 164 pie, el valor de la impedancia de la barra que alimenta el convertidor es el siguiente:

$$Z_{\text{barra transmisión}} = \frac{0.0836\Omega}{100\text{pie}} + \frac{J 0.0800\Omega}{100 \text{ pie}}$$

$$\begin{aligned}
& 0.0836 (164) \Omega \quad J 0.08 (164) \Omega \\
= & \frac{\quad}{100} + \frac{\quad}{100} \\
= & 0.137 \Omega \quad + \quad J 0.131 \Omega
\end{aligned}$$

Tomando como impedancia base la del lado de baja tensión del transformador, se puede calcular el valor de la impedancia de los transformadores en p.u., la impedancia del cable de alimentación en p.u. y la impedancia de la barra que alimenta el convertidor estático de potencia en p.u.; estos son los valores:

$$\begin{aligned}
Z_{\text{trafo p.u.}} &= \frac{J 2.5\%}{100} = J 0.025
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{eq. cable p.u.}} &= \frac{1.96 \times 10^{-3} + J 1.73 \times 10^{-3}}{2.30} \\
&= 0.85 \times 10^{-3} + J 0.075 \times 10^{-3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{barra transmisión p.u.}} &= \frac{0.137 \Omega + J 0.131 \Omega}{2.30 \Omega} \\
&= 0.060 + J 0.057
\end{aligned}$$

En la figura 5.6, se presenta el diagrama unifilar simplificado en p.u.

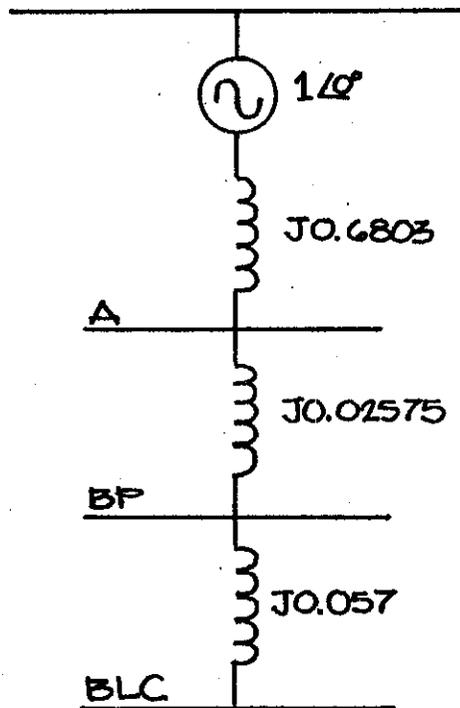


Figura 5.6: Diagrama unifilar general simplificado en p.u.

Luego de efectuar estos cálculos, el objetivo es obtener la distorsión de voltaje en la barra principal BP. Para tal fin, se utiliza la corriente de consumo del motor de corriente directa de 60 HP que utiliza la máquina flexo-folder, y en los valores típicos en p.u. de las corrientes armónicas presentes en la corriente de entrada de un convertidor estático de potencia; éstas fueron presentadas en la tabla 3.1.

La corriente típica de un motor de 60 HP es la siguiente:

$$I_{\text{nominal}} = 73 \text{ A}$$

De este valor, se pueden obtener las corrientes armónicas para un convertidor estático de potencia de seis pulsos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 I_{5} &= I_{\text{nom.}} \times 0.175 = 73\text{A} \times 0.175 = 12.78 \text{ A} \\
 I_{7} &= I_{\text{nom.}} \times 0.110 = 73\text{A} \times 0.110 = 8.03 \text{ A} \\
 I_{11} &= I_{\text{nom.}} \times 0.045 = 73\text{A} \times 0.045 = 3.29 \text{ A} \\
 I_{13} &= I_{\text{nom.}} \times 0.029 = 73\text{A} \times 0.029 = 2.12 \text{ A} \\
 I_{17} &= I_{\text{nom.}} \times 0.015 = 73\text{A} \times 0.015 = 1.10 \text{ A} \\
 I_{19} &= I_{\text{nom.}} \times 0.010 = 73\text{A} \times 0.010 = 0.73 \text{ A} \\
 I_{23} &= I_{\text{nom.}} \times 0.009 = 73\text{A} \times 0.009 = 0.66 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Basandose en la corriente base del lado de baja tensión del transformador, se obtienen los valores en p.u. de las corrientes armónicas del motor de 60 HP.

$$I_{5 \text{ p.u.}} = \frac{12.78 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.106 \text{ p.u.}$$

$$I_{7 \text{ p.u.}} = \frac{8.03 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.067 \text{ p.u.}$$

$$I_{11 \text{ p.u.}} = \frac{3.29 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.27 \text{ p.u.}$$

$$I_{13 \text{ p.u.}} = \frac{2.12 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.018 \text{ p.u.}$$

$$I_{19 \text{ p.u.}} = \frac{1.10 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.009 \text{ p.u.}$$

$$I_{23 \text{ p.u.}} = \frac{0.66 \text{ A}}{120.28 \text{ A}} = 0.005 \text{ p.u.}$$

Los voltajes armónicos en la barra principal, se pueden calcular de la siguiente forma:

$$E_{n \text{ p.u.}} (\text{BP}) = X_{\text{p.u.}} (\text{BP}) \times n \times I_{n \text{ p.u.}} \quad \text{Ec. 5.01}$$

De esta fórmula, la única variable que no se conoce es la que corresponde al valor de la reactancia equivalente en p.u. desde el convertidor estático de potencia hasta la barra principal. Para obtener este valor, se realiza la suma de las reactancias presentadas en la figura 5.6; este es:

$$\begin{aligned} X_{\text{p.u.}} (\text{BP}) &= J 0.06803 + J 0.02575 + J 0.057 \\ &= J 0.763 \end{aligned}$$

De esta forma, los voltajes armónicos en la barra principal son los siguientes:

$$E_{5 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 5 \times 0.106 = 0.0404$$

$$E_{7 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 7 \times 0.067 = 0.358$$

$$E_{11 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 11 \times 0.027 = 0.227$$

$$E_{13 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 13 \times 0.18 = 0.179$$

$$E_{17 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 13 \times 0.009 = 0.117$$

$$E_{19 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 19 \times 0.006 = 0.087$$

$$E_{23 \text{ p.u.}} = 0.763 \times 23 \times 0.005 = 0.008$$

De estos valores, se puede calcular el factor de distorsión de la tensión en la siguiente forma:

$$D. F. = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=23} E_n^2}$$

$$D. F. = \sqrt{(0.440)^2 + (0.348)^2 + (0.227)^2 + (0.179)^2 + (0.117)^2 + (0.117)^2 + (0.087)^2 + (0.088)^2}$$

$$D. F. = 0.64 \%$$

Basándonos en la tabla 3.2 y tomando en cuenta que el sistema analizado es de aplicación general (máximo factor de distorsión permitido del 5 %), se puede concluir que la existencia del convertidor estático en la fábrica no afecta a las cargas susceptibles a distorsiones de voltaje, y por lo tanto no es necesario instalar ningún mecanismo de corrección de la distorsión de voltaje producida por las corrientes armónicas.

CONCLUSIONES

1. Una cantidad de rizado en el suministro de potencia de una máquina electromagnética puede producir efectos adversos en el funcionamiento de la máquina rotativa, y de igual forma, la generación de corrientes parásitas producidas por la frecuencia pulsante de las armónicas puede producir pérdidas adicionales, desfaseamiento del eje en cuadratura y otros disturbios no comunes en máquinas alimentadas con una fuente de potencia constante.
2. El efecto de la corriente de rizado sobre el incremento de temperatura de los motores grandes puede ser calificado categóricamente como inconsecuente, ya que para un incremento de la corriente de rizado de un 10% del valor eficaz, la temperatura del estator y rotor sólo varía 5 °C.
3. Las corrientes armónicas generadas por el convertidor pueden fluir en cualquier parte del sistema de corriente alterna al cual esté conectado, y su magnitud depende del valor que tenga la impedancia de cada ramal a la frecuencia armónica.
4. La generación local de energía, por medio de generadores síncronos, puede sufrir daños si circulan corrientes armónicas por ellos, debido al exceso de temperatura que se presenta en partes críticas como en los cojinetes y el rotor.
5. Los convertidores estáticos se comportan como una carga que nunca tiene un factor de potencia igual a la unidad, e inyectan corrientes armónicas al sistema.
6. La no linealidad de los convertidores estáticos produce corrientes de muchas frecuencias, y cualquiera de éstas puede estar cerca de la frecuencia de resonancia del circuito equivalente de una línea de transmisión de potencia.
7. La componente de desplazamiento del factor de potencia es la vista por los sistemas de medición de las empresas, y la componente de distorsión es la parte asociada con las corrientes y voltajes armónicos presentes en las líneas de suministro.

8. Si la relación de cortocircuito es mayor que 20 y la frecuencia de resonancia paralelo en p.u. es mayor que 8.5, la probabilidad de que existan problemas de voltajes armónicos es baja. Por otra parte, si la relación de cortocircuito es menor que 20 y la frecuencia de resonancia paralelo tiene un valor cercano a una de las frecuencias armónicas características generadas por el convertidor, existirá una alta probabilidad de producción excesiva de voltajes armónicos.
9. Debido a la diversidad de cargas que son alimentadas desde la barra principal de la fábrica en estudio, se puede clasificar a este sistema como de aplicación general.
10. Tomando en cuenta que el factor de distorsión de la tensión calculado en el inciso 5.4 es menor que el 5%, que corresponde a un sistema de aplicación general, se puede afirmar que la influencia del convertidor estático sobre las otras cargas es despreciable.
11. Debido a que el factor de distorsión de la tensión es menor que un 5%, no es necesario instalar ningún sistema de compensación de corriente armónica en la barra de línea central.

RECOMENDACIONES

1. Si en el futuro se aumenta el número de convertidores estáticos en la fábrica en estudio, se recomienda recalcular el factor de distorsión para evitar problemas en las cargas sensibles conectadas a la barra principal.
2. Si el nuevo factor de distorsión fuese mayor que un 5%, es necesario instalar un filtro para la corriente más importante.
3. En la actualidad, se puede instalar un generador de emergencia sin correr el riesgo de que las corrientes armónicas existentes aumenten la temperatura en los cojinetes y el rotor.

BIBLIOGRAFIA

1. ANSI. Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifier. New York, C34.2-1968. pp 7-51.
2. DUNAISKI, R. The Effect of Rectifier Power Supply on Large D-C Motors. New York, pp 253-8.
3. KUSKO, ALEXANDER et.al. Teoria y Analisis de las Máquinas Eléctricas. 2a. edición. España : Edit. Hispano Europea, 1980. pp 215-45.
4. IEEE. Practices and Requirements for Thyristor Converters for Motor Drives. New York, std-444-1973. pp 7-78.
5. IEEE. Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters. New York, std-519-1981. pp 7-42.
6. IEEE. Definitions of Terms for THYRISTORS. New York, std-223-1966. pp 3-6.
7. IEEE. Thyristor Devices for Electric Power Systems. New York, PAS-101-1982. pp 2286-91.
8. IEEE. Considerations on the Application of Improved Power Factor Converter Structures. New York, IA-19-1983. pp 1076-83.
9. IEEE. Rectifier Harmonics in Power Systems. New York, IA-16-1980. pp 271-6.
10. IEEE. Application Considerations in Handling Effects of SCR Generated Harmonics in Cement Plants. New York, IA-17-1981. pp 63-70.
11. IEEE. Power System Harmonics Effects from Adjustable-Speed Drives. New York, IA-20-1984. pp 973-77.
12. IEEE. Distribution System Harmonics: Control for Large Power Converters. New York, PAS-101-1982. pp 644-52.
13. IEEE. Harmonic Pollution on Power Systems. New York, IA-16-1980. pp 617-23.
14. IEEE. Line Harmonics of Converters with DC-Motor Loads. IA-19-1983. pp 84-93.