

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DESBALANCE DE VOLTAJE

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

JAMI CÓNDOR FABIÁN GUILLERMO

DIRECTOR: ING. MILTON TOAPANTA

Quito, Octubre del 2003

DECLARACIÓN

Yo, JAMI CÓNDOR FABIÁN GUILLERMO, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley, Reglamento de Propiedad Intelectual y por la normatividad institucional vigente.



**JAMI CÓNDOR
FABIÁN GUILLERMO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por JAMI CÓNDOR FABIÁN GUILLERMO, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Toapanta', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Ing. MILTON TOAPANTA
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Milton Toapanta, por su acertada y enorme colaboración para el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Carlos Maldonado T. y a los compañeros del Proyecto de Reducción de Pérdidas Técnicas de la EEQSA por la ayuda brindada para la realización del mismo.

DEDICATORIA

A mi padre y a mi madre por el apoyo e incondicional ayuda que me brindaron para la culminación de mi carrera. Les agradezco de todo corazón ya que con su enorme sacrificio y ejemplo he logrado alcanzar mis metas, que Dios los bendiga y los cuide.

A mis hermanas Daysi y Nancy, a mis sobrinas Taty y Fernanda por el apoyo constante durante toda mi carrera.

A mi esposa e hija por brindarme el cariño y apoyo durante la elaboración del presente trabajo y que gracias a ustedes pude culminar con éxito mi carrera.

Este trabajo va dedicado muy especialmente a mi hija y sobrinas, esperando que sirva como ejemplo para que en un futuro, ustedes puedan cumplir sus metas.

**JAMI CÓNDROR
FABIÁN GUILLERMO**

CONTENIDO	PÁG.
RESUMEN	i
PRESENTACIÓN	ii
CAPITULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
2.1 OBJETIVO	2
3.1 ALCANCE	3
4.1 METODOLOGÍA	3
CAPITULO 2	5
DESCRIPCIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. DEFINICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SEGÚN LA ASOCIACIÓN ELÉCTRICA NACIONAL DE FABRICANTES (NEMA)	7
2.3. DEFINICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SEGÚN EL INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE)	8
2.4. DEFINICIÓN DEL "FACTOR DESBALANCE DE VOLTAJE" SEGÚN LA COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC)	8
2.4.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS	9
2.4.2. FÓRMULA APROXIMADA DE LA DEFINICIÓN IEC	12
2.5. DIFERENCIAS Y ACEPTACIÓN DE LAS DEFINICIONES SOBRE DESBALANCE DE VOLTAJE	12
2.5.1. COMENTARIO DE LOS RESULTADOS	15
2.6. NORMAS GENERALES SOBRE DESBALANCE DE VOLTAJE	19
CAPITULO 3	24
CAUSAS Y EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	24
3.1. INTRODUCCIÓN	24
3.2. CAUSAS Y EFECTOS SOBRE EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	25
3.2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN	26
3.2.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN	27
3.2.3. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	27
3.2.3.1. Capacidad de transformadores, cables y líneas	30

3.3.	CAUSAS Y EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE MOTORES ELÉCTRICOS	30
3.4.	EFECTOS DE DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE CONVERSORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA Y VARIADORES DE VELOCIDAD	38
3.4.1.	DISTORSIÓN ARMÓNICA	43
	3.4.1.1.Fuentes de Armónicas	44
3.5.	TÉCNICAS PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	42
3.5.1.	TÉCNICAS PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE VOLTAJE EN UN SISTEMA DE POTENCIA	46
	3.5.1.1.Transposición de líneas de transmisión	47
	3.5.1.2. Reconfiguración de primarios en un sistema de Distribución	48
	3.5.1.3.Regulación de voltaje	51
	3.5.1.3. Compensador estático de voltio-amperios reactivos (VAR).	52
	3.5.1.5.Distribución balanceada de cargas	53
3.5.2.	TÉCNICAS PARA REDUCIR PROBLEMAS DE DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE EQUIPOS ELÉCTRICOS	55
3.5.2.1.	Solución a los problemas de calidad de energía	56
	3.5.2.1.1. Filtros	56
	3.5.2.1.2. Filtros pasivos y activos	58
3.5.2.2.	Filtro activo serie para compensar armónicos de corriente y simultáneamente desbalance de voltaje	60
	3.5.2.2.1. Principio de operación	62
	3.5.2.2.2. Fuente inversora de voltaje PWM	63
	3.5.2.2.3. Transformador serie	64
	3.5.2.2.4. Filtro de rizado en el secundario	64
3.5.3.	RECOMENDACIONES PARA ASEGURAR LA CALIDAD DE ENERGÍA	65
 CAPITULO 4		 67
MONITOREO DEL DESBALANCE DE VOLTAJE		67
4.1	INTRODUCCIÓN	67
4.2	EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE PARA DIFERENTES NIVELES DEL SISTEMA	68
4.3	REQUERIMIENTOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	69
4.3.1	IEC 61000-4-30	69
4.3.2	CENELEC EN 50160	70

4.3.3	MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE USANDO EL VOLTAJE FASE-NEUTRO	71
4.4	EQUIPOS DE MEDIDA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	72
4.4.1	TIPOS DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	73
4.4.1.1	Multímetros	75
4.4.1.2	Registradores Digitales	76
4.4.2	TRANSDUCTORES REQUERIDOS PARA LA MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE	77
4.5	PROPUESTA DE ESTUDIO DEL DESBALANCE DE VOLTAJE EN UNA INDUSTRIA	78

CAPITULO 5 80

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE MONITOREO 80

5.1	INTRODUCCIÓN	80
5.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN	81
5.2.1	ANALIZADOR DE PERTURBACIONES MEMOBOX 300	81
5.2.2	MEDIDOR ELECTRÓNICO DE ENERGÍA SPECTRUM SFX	83
5.3	SELECCIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN A SER MONITOREADOS	85
5.4	DESCRIPCIÓN DEL PRIMARIO "B" DE LA SUBESTACIÓN #16 (RÍO COCA)	86
5.5	CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN A SER MONITOREADOS EN EL PRIMARIO "B" DE LA SUBESTACIÓN # 16	88
5.6	DESCRIPCIÓN DEL PRIMARIO "C" DE LA SUBESTACIÓN #19 (COTOCOLLAO)	90
5.7	CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN A SER MONITOREADOS EN EL PRIMARIO "C" DE LA SUBESTACIÓN 19	93
5.8	CRONOGRAMA DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN	94
5.9	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE LAS MEDICIONES	95
5.9.1	SALIDA PRIMARIO "B" DE LA SUBESTACIÓN #16 (PUNTO A)	96
5.9.1.1	Desbalance de voltaje	97
5.9.1.2	Variaciones de Voltaje	99
5.9.1.3	Desbalance de Corriente	101
5.9.1.4	Desbalance de Carga	102
5.9.1.5	Factor de Potencia Total	103
5.9.2	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 75 KVA EN EL PRIMARIO "B" DE LA SUBESTACIÓN #16 (PUNTO B)	104
5.9.2.1	Desbalance de voltaje	104
5.9.2.2	Variaciones de Voltaje	106
5.9.2.3	Desbalance de Corriente	108
5.9.2.4	Desbalance de Carga	109
5.9.2.5	Distorsión armónica total de voltaje	110

5.9.2.6	Flicker de corta duración	114
5.9.2.7	Factor de potencia	119
5.9.3	SALIDA PRIMARIO "C" DE LA SUBESTACIÓN #19 (PUNTO C)	120
5.9.3.1	Desbalance de voltaje	121
5.9.3.2	Variaciones de Voltaje	123
5.9.3.3	Desbalance de Corriente	125
5.9.3.4	Desbalance de Carga	126
5.9.3.5	Factor de Potencia Total	127
5.9.4	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 50 KVA EN EL PRIMARIO "C" DE LA SUBESTACIÓN # 19 (PUNTO D)	128
5.9.4.1	Desbalance de voltaje	128
5.9.4.2	Variaciones de Voltaje	131
5.9.4.3	Desbalance de Corriente	133
5.9.4.4	Desbalance de Carga	134
5.9.4.5	Distorsión armónica total de voltaje	135
5.9.4.6	Flicker de corta duración	139
5.9.4.7	Factor de potencia	144
5.9.4.8	Comparación del desbalance de voltaje en los primarios monitoreados	145
5.9.4.9	Comparación del desbalance de voltaje a diferente nivel de voltaje	147
CAPITULO 6		148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
6.1.	CONCLUSIONES	148
6.2.	RECOMENDACIONES	156

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

RESUMEN

La tarea del presente trabajo es presentar un comprensivo análisis de las causas y efectos del desbalance de voltaje, conocer las definiciones presentadas en los diferentes estándares y técnicas para minimizar los efectos de desbalance.

Para lo cuál, se indican los problemas en el sistema eléctrico y en los consumidores finales en presencia de desbalance de voltaje, como también los efectos adversos sobre los equipos eléctricos, tales como motores de inducción, convertidores de potencia y variadores de velocidad. Además los estándares que se refieren al desbalance de voltaje son discutidos y clarificados con la ayuda de ejemplos. Posteriormente, se indica varias técnicas para corregir los problemas de desbalance de voltaje.

Adicionalmente, se presenta un ejemplo de aplicación de monitoreo en el primario "B" de la S/E 16 (Río Coca) y el primario "C" de la S/E 19 (Cotocollao), pertenecientes a la Empresa Eléctrica Quito S.A., donde se realiza un análisis de los niveles de desbalance de voltaje y establecer si cumplen los límites establecidos en el estándar EN 50160 de CENELEC.

Para realizar el monitoreo de cada primario, se instaló el registrador de disturbios MEMOBOX 300 y el medidor electrónico de energía NANSEN en dos puntos simultáneamente, obteniendo las mediciones de voltaje, corriente y distorsiones armónicas de voltaje durante 7 días continuos.

Finalmente, se presenta un análisis gráfico y estadístico mediante histogramas y frecuencias acumuladas de las mediciones obtenidas del desbalance de voltaje y demás variables eléctricas que afectan la calidad del servicio eléctrico.

PRESENTACIÓN

En un sistema eléctrico trifásico los voltajes generados son sinusoidales y en magnitudes iguales, separados 120° entre cada fase. Sin embargo, los voltajes en el sistema eléctrico y en el punto de utilización pueden ser desbalanceados por varias razones. La naturaleza del desbalance de voltaje presenta magnitudes desiguales de voltajes, desviación de los ángulos entre fases y un desigual nivel de distorsión armónica entre las fases.

La principal causa del desbalance de voltaje es la distribución desigual de cargas monofásicas, debido al cambio continuo a través de las tres fases del sistema eléctrico de distribución. Por ejemplo las áreas que pueden tener problemas son los sistemas rurales con extensas líneas de distribución, como también grandes sistemas eléctricos urbanos donde las cargas monofásicas tienen una demanda alta, tal como la iluminación que utilizan los grandes centros comerciales. Adicionalmente las causas del desbalance de voltaje en el sistema de potencia pueden ser por transformadores con impedancias asimétricas, banco de transformadores en delta abierto, líneas de transmisión asimétricas posiblemente causado por una incompleta transposición de las líneas de transmisión, y fusibles quemados sobre bancos de capacitores.

Frente a este escenario, es de vital importancia realizar un estudio relacionado al desbalance de voltaje, para establecer un mecanismo de evaluación, diagnóstico y de reducción de los problemas de desbalance en caso de haberlos. En el Capítulo 5 se presenta un ejemplo de aplicación de monitoreo, para el análisis del desbalance de voltaje sobre el primario "B" de la S/E 16 y el primario "C" de la S/E 19 pertenecientes a la Empresa Eléctrica Quito S.A.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El desbalance de voltaje es visto como un problema en la calidad del servicio eléctrico de significativa preocupación para los niveles de servicio que entregan las empresas eléctricas de distribución. Aunque los voltajes están realmente bien balanceados a la salida del generador y en el sistema de transmisión, los niveles de voltaje en el punto de utilización llegan a ser desbalanceados debido a la distribución desigual de las cargas monofásicas.

Los consumidores industriales y comerciales deberían tener voltajes balanceados a la entrada de la alimentación eléctrica de sus instalaciones, pero el desbalance de voltaje puede presentarse dentro de las instalaciones debido a que las cargas monofásicas no son uniformemente distribuidas entre las tres fases. En las industrias, el desbalance de voltaje puede también ser causado por el desbalance y sobrecarga de equipos, y conexiones de alta impedancia, por ejemplo contactos malos o flojos. Un ejemplo del desbalance de voltaje en los equipos es la impedancia desbalanceada del motor, el cuál se incrementa con el tiempo, posiblemente por el calentamiento de las bobinas del estator. El desbalance de voltaje en el motor puede ser debido a problemas de fabricación, como el número de vueltas desiguales en los devanados, una falta de alineación del rotor o un estator asimétrico. El desbalance en los devanados del motor puede también ocurrir en el proceso de reparación donde los devanados quemados son reparados deprisa, al utilizar aislamientos baratos y de mala calidad, así, de esta manera reduciendo la impedancia en las fases reparadas.

El problema de desbalance de voltaje llega a ser particularmente dificultoso para compensar cuando el desbalance está continuamente variando, debido a grandes

cargas industriales tales como los hornos eléctricos. Adicionalmente, cuando se desea emplear planes de ahorro de energía como el uso de los variadores de velocidad (ASDs), la carga del consumidor puede variar continuamente con variaciones frecuentemente largas. Cuando un gran número de ASDs monofásicos son empleados, pueden presentarse variaciones continuas de cargas desbalanceadas. Los ASDs son cargas no-lineales, la mayoría contiene diodos rectificadores que presentan corrientes no sinusoidales, principales generadoras de distorsión armónica.

Algunas Empresas Eléctricas de Distribución no cuentan con estudios sobre el desbalance de voltaje en sus redes eléctricas, porque los efectos adversos no son inmediatamente evidentes o reconocidos y así el desbalance es solamente señalado cuando hay un problema. Por lo tanto, reconocer los efectos que produce el desbalance de voltaje sobre el sistema eléctrico es imprescindible.

2.1 OBJETIVO

El propósito del presente trabajo se puede resumir en los siguientes objetivos:

- Determinar las definiciones aceptadas para calcular el Desbalance de Voltaje según estándares vigentes.
- Investigar las causas y efectos del Desbalance de Voltaje en el Sistema de Distribución y en el consumidor final.
- Identificar los efectos del desbalance de voltaje sobre equipos eléctricos.
- Identificar técnicas de mitigación para el sistema de distribución y para las industrias.
- Realizar un ejemplo de aplicación de monitoreo en el alimentador primario "B" de la S/E 16 y en el primario "C" de la S/E 19 de la Empresa Eléctrica Quito S.A., a fin de que permita analizar el desbalance de voltaje, en el estado actual que operan los primarios citados.

3.1 ALCANCE

El presente trabajo consta de 6 capítulos, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo 1 se presenta la introducción al problema que se aborda en este trabajo y se hace una breve exposición de los antecedentes del tema. Adicionalmente se justifica y plantea el objetivo del trabajo de tesis. En el capítulo 2 se presenta brevemente una descripción acerca del fenómeno del desbalance de voltaje, incluyendo las definiciones y normas generales.

El propósito del capítulo 3 es plantear las causas y efectos de desbalance de voltaje, inclusive señalar varias técnicas para reducir los efectos de desbalance. En el capítulo 4 se muestran los mecanismos de monitoreo y evaluación según los estándares de IEC y CENELEC. El capítulo 5 contiene los resultados del monitoreo del desbalance de voltaje y se realiza el análisis de los parámetros eléctricos en cada primario, para posteriormente, presentar un resumen de los niveles de desbalance de voltaje de acuerdo a los límites establecidos en el estándar EN 50160 de CENELEC y una comparación de los niveles de desbalance de voltaje entre los puntos monitoreados. Finalmente el capítulo 6 contiene las conclusiones generales de esta tesis, así como recomendaciones para futuros trabajos.

4.1 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se recopiló normas e información técnica especializada y actualizada en el tema, adquirida principalmente de papers de la IEEE, regulaciones vigentes y artículos publicados en Internet citados en la bibliografía.

Para el ejemplo de aplicación de monitoreo, se recopiló la información técnica del alimentador primario "B" de la S/E 16 y en el primario "C" de la S/E 19, proporcionados por la Empresa Eléctrica Quito S.A., lo cual permitió seleccionar los puntos para el monitoreo del desbalance de voltaje, y así, determinar si cumplen los límites establecidos por los estándares internacionales. Para el proceso de medición se utilizó dos tipos de equipos electrónicos que cuenta la EEQSA, como son: el registrador de disturbios MEMOBOX 300 y el medidor electrónico de energía NANSEN SFX.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE

2.1. INTRODUCCIÓN

El desbalance de voltaje es un evento (disturbio) de estado estable y es frecuentemente encontrado cuando se analiza los índices de calidad de energía en un sistema eléctrico de distribución. Este fenómeno usualmente puede ocurrir por la asimetría de las impedancias en líneas de distribución y/o transmisión, distribución desigual de las cargas en un sistema trifásico, tales como motores de inducción, convertidores de potencia, hornos eléctricos, iluminación, etc. (Ver figura N° 2.1). Además en sistemas residenciales y/o comerciales por ser la mayoría de consumidores de energía eléctrica, es donde se presenta el mayor porcentaje de desbalance de voltaje, debido a la variación de las cargas y cambios continuos en la configuración de las redes eléctricas.

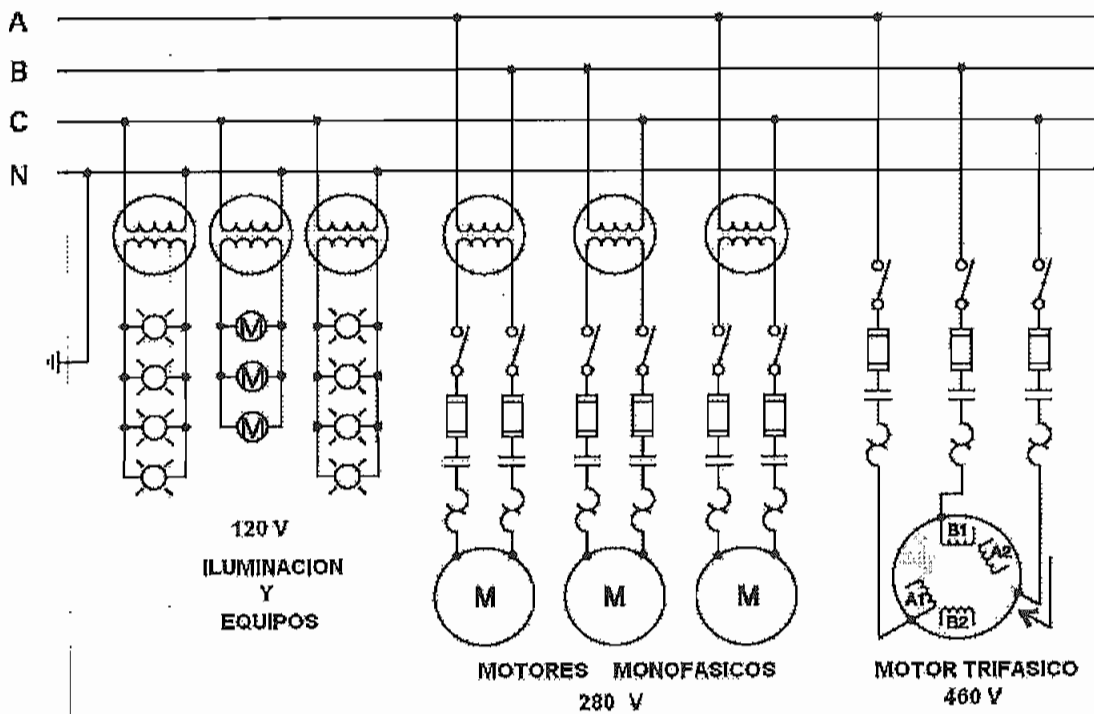


Figura N° 2.1

Distribución desigual de las cargas en la red eléctrica. La mayoría de equipos es conectada a la fase C

En un sistema trifásico la condición de desbalance de voltaje tiene lugar cuando las magnitudes de las fases de voltaje son distintas y los ángulos de fase difieren de las condiciones balanceadas, o ambas a la vez. Esto se muestra en la figura N° 2.2 y en el diagrama fasorial de los voltajes en la figura N° 2.3.

Este capítulo presenta rápidamente algunas definiciones de desbalance de voltaje desarrolladas por estándares internacionales, tales como NEMA, IEEE, IEC, además se complementa con un análisis de comparación que indica las diferencias entre las mismas y finalmente se hace referencia sobre los límites permitidos que garantizan un suministro eléctrico continuo y confiable.

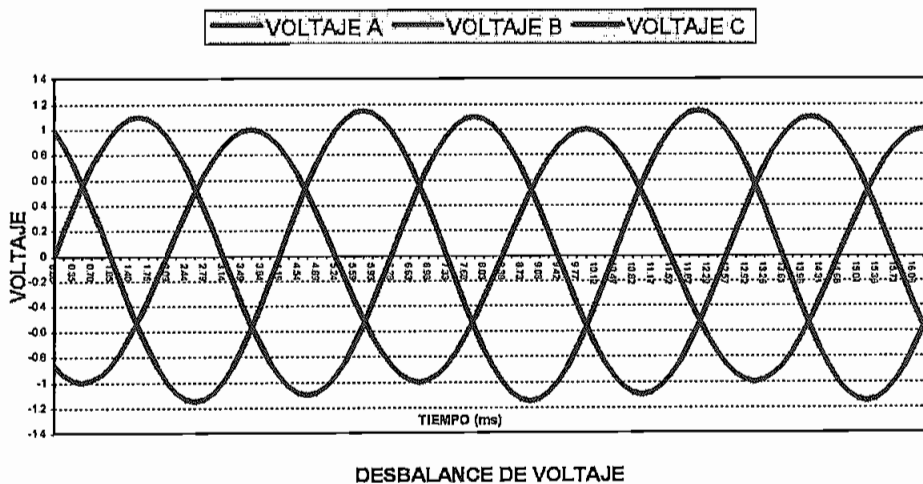


Figura N° 2.2 Variación de los voltajes en magnitud y ángulo.

Por otra parte, estas definiciones tienen una vital importancia cuando se estudia por ejemplo, los efectos de desbalance de voltaje sobre el funcionamiento de los motores trifásicos de inducción, variadores de velocidad, etc. A continuación se detalla cada una de las definiciones.

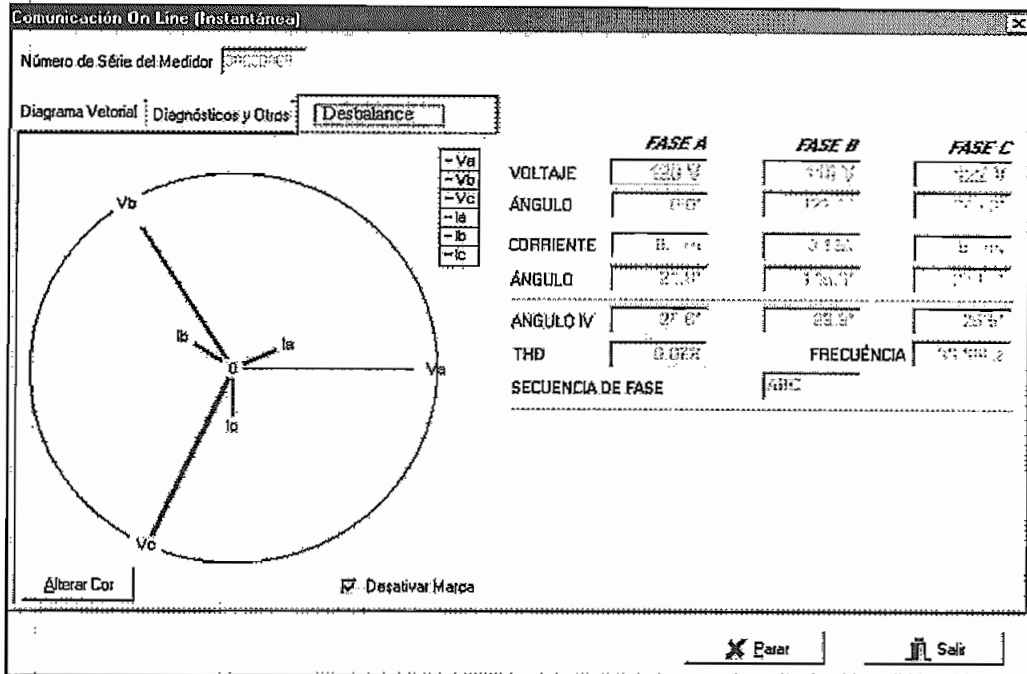


Figura N° 2.3: Diagrama Fasorial de los voltajes.

2.2. DEFINICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SEGÚN LA ASOCIACIÓN ELÉCTRICA NACIONAL DE FABRICANTES (NEMA)

El desbalance de voltaje es definida por la Asociación Nacional Eléctrica de Fabricantes (NEMA) en el estándar MG 1-1993, como la relación entre la desviación máxima del voltaje promedio y el voltaje promedio de los tres voltajes:

$$\%LUVR = \frac{\text{desviación} \cdot \text{m} \cdot \text{del} \cdot \text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{l} \cdot \text{promedio}}{\text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{l} \cdot \text{promedio}} * 100 \quad (2.1)$$

donde:

LUVR: Porcentaje de desbalance de voltaje de línea, con sus siglas en ingles "line voltage unbalance rate (LVUR)".

Según el estándar MG 1-1993 al trabajar solamente con magnitudes, esto quiere decir que no se incluye los ángulos de fase, la NEMA asume el voltaje promedio siempre igual a un valor, el cual es 480 V para un sistema trifásico de los Estados Unidos.

2.3. DEFINICIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SEGÚN EL INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (IEEE)

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) publica en el año 1995 el estándar Std. 1159, donde define al desbalance de voltaje instantáneo como:

$$\%PUVR = \frac{\text{máxima} \cdot \text{desviación} \cdot \text{del} \cdot \text{valor} \cdot \text{promedio} \cdot \text{del} \cdot \text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{fase}}{\text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{fase} \cdot \text{promedio}} * 100 \quad (2.2)$$

donde:

%PVUR: Porcentaje del desbalance de voltaje de fase, con sus siglas en ingles.

Como se observa, la IEEE usa la misma definición para el desbalance de voltaje como NEMA, la única diferencia esencial es que la IEEE utiliza el voltaje de fase-fase en vez de voltaje línea-línea. Por otra parte la información del ángulo de fase es extraído puesto que solo se considera magnitudes.

El estándar Std. 1159 considera un error del 13% al evaluar el factor de desbalance de voltaje.

2.4. DEFINICIÓN DEL “FACTOR DESBALANCE DE VOLTAJE” SEGÚN LA COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC)

La definición del desbalance de voltaje en el estándar IEC-610002-2 Ed.2, publicado el 29 de septiembre del 2000, define al desbalance de voltaje como la relación entre la componente de secuencia negativa del voltaje y la componente

de secuencia positiva del voltaje, el porcentaje del factor de desbalance de voltaje (%VUF), viene dada por:

$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} * 100 \quad (2.3)$$

donde: V_1 es la componente de secuencia positiva del voltaje, y
 V_2 es la componente de secuencia negativa del voltaje.

Las componentes de secuencia positiva V_1 y componente de secuencia negativa V_2 del voltaje, son obtenidas a partir de las componentes simétricas, que se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

2.4.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS

El análisis de un circuito trifásico en donde el voltaje y la corriente están balanceadas (igual magnitud de las tres fases y desplazados 120° entre sí), en el cual todos los elementos del circuito en cada fase están balanceados y son simétricos, es relativamente simple el tratamiento del sistema mediante el análisis en una sola fase. En un sistema trifásico que está normalmente balanceado, las condiciones desbalanceadas, como por ejemplo cargas desbalanceadas fallas o corto circuitos en las tres fases ocasionan, por lo general, que haya corrientes y voltajes desbalanceados en cada una de las tres fases y el análisis mediante las Leyes de Kirchhoff es más dificultoso cuando el sistema presenta estas condiciones.

Las componentes simétricas o también llamadas "Componentes de Fortescue"¹ es el método que generalmente se adopta para analizar este tipo de circuitos. El principio fundamental del teorema de Fortescue como aplicación a un sistema trifásico, es que un grupo de vectores desbalanceados (por ejemplo tres vectores desbalanceados de voltaje o de corriente) pueden ser resueltos mediante la

¹ C.L. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Poliphase Networks" (Metodo de las coordenadas simetricas aplicado a la solucion de redes polifasicas)

descomposición de tres sistemas balanceados simétricos. Los conjuntos balanceados de componentes son:

1. **Componentes de secuencia positiva** que consisten en tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de 120° y que tienen la misma secuencia de fase que los fasores originales,
2. **Componentes de secuencia negativa** que consisten en tres fasores iguales en magnitud, desplazados en fase uno de otro en 120° , y que tienen una secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales y
3. **Componentes de secuencia cero** que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno del otro.

Cuando se resuelve un sistema desbalanceado a partir de las componentes simétricas, es costumbre designar las tres fases del sistema como a, b y c, de forma que la secuencia de fase de voltajes y corrientes del sistema es abc. Así, la secuencia de fase de las componentes de secuencia positiva de los fasores desbalanceados es abc, y la secuencia de fase de las componentes de secuencia negativa es acb (Ver figura N° 2.4).

Las componentes simétricas de secuencia positiva (V_1), secuencia negativa (V_2) y secuencia cero (V_0) mediante la introducción del operador "a", pueden ser obtenidas a partir de la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

donde: $a = 1\angle 120^\circ$ y $a^2 = 1\angle 240^\circ$

Mediante la inversión de la matriz anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Separando cada término común se puede encontrar las componentes de secuencia, así:

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.6)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (2.7)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \quad (2.8)$$

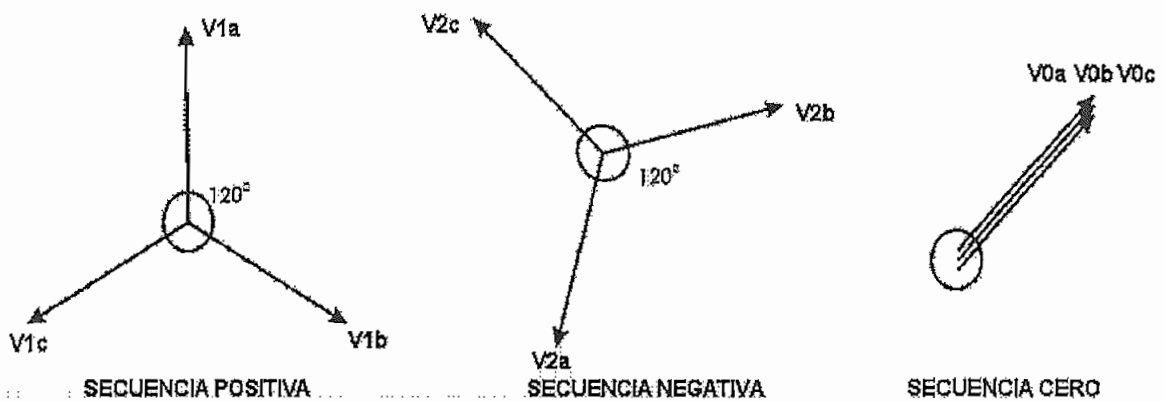


Figura N° 2.4. Representación gráfica de las componentes simétricas.

En la ecuación (2.6) se muestra que no hay componentes de secuencia cero si la suma de los fasores desbalanceados es cero. Como la suma de los fasores de voltaje línea a línea en un sistema trifásico es siempre cero, las componentes de secuencia cero nunca estarán presentes en los voltajes de línea, independientemente del grado del desbalanceo, excepto durante la presencia de alguna falla. La suma de los tres fasores de voltaje línea a neutro no es necesariamente cero, y los voltajes al neutro pueden contener componentes de secuencia cero.

Finalmente, con estas definiciones se puede calcular el desbalance de voltaje a partir de las componentes simétricas. Sin embargo, debido que se necesitan conocimientos adicionales para encontrar el factor de desbalance usando componentes simétricas, a continuación se presenta la simplificación de la definición anterior mediante la fórmula expresada en el estándar IEC-61000-2-2.

2.4.2. FÓRMULA APROXIMADA DE LA DEFINICIÓN IEC

La definición usada en el estándar de la IEC implica el uso de magnitudes y ángulos de fase (complejidad matemática) al calcular las componentes de secuencia positiva y componente de secuencia negativa, la siguiente fórmula expresada por la IEC evita la utilización de términos algebraicos complejos.

$$\%voltage_unbalance = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{voltaje_promedio} \quad (2.9)$$

donde:

V_{abe} = diferencia entre el voltaje de línea V_{ab} y el voltaje promedio

2.5. DIFERENCIAS Y ACEPTACIÓN DE LAS DEFINICIONES SOBRE DESBALANCE DE VOLTAJE

Debido al gran número de definiciones existentes entre las diferentes comunidades es imprescindible, definir claramente cuales son las diferencias existentes y establecer cuál será la definición más apropiada para realizar los análisis sobre desbalance de voltaje y de esta manera realizar los cálculos correspondientes en el presente trabajo.

El siguiente ejemplo muestra como se usa las diferentes definiciones del desbalance de voltaje descritas anteriormente y observar que diferencias existen entre las mismas.

Suponiendo que se tiene tres voltajes línea-línea desbalanceados y que son aplicados a un motor de inducción. (Ver figura N° 2.5)

$$V_{ab} = 576 \angle 0^\circ,$$

$$V_{bc} = 480 \angle 221.4^\circ \text{ y}$$

$$V_{ca} = 384 \angle 124.2^\circ$$

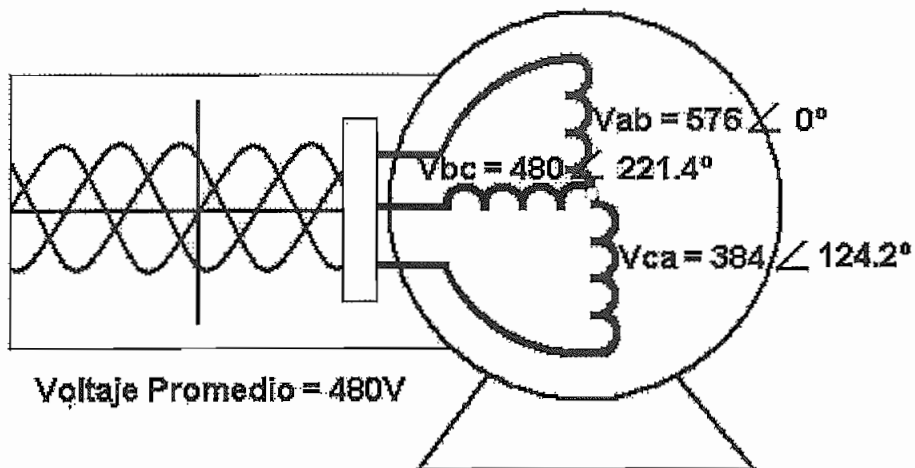


Figura N° 2.5. Alimentación trifásica a un motor de inducción.

Como anteriormente se explico, la diferencia esencial entre las definiciones desarrolladas por NEMA y la IEEE es definir al voltaje de fase en vez de voltaje de línea, por lo tanto la utilización de las definiciones para calcular el % del desbalance de voltaje brinda el mismo resultado.

Por lo tanto, de acuerdo a la definición de la NEMA (2.1) el porcentaje del desbalance de voltaje es igual a:

$$\%LUVR = \frac{\text{m}{\acute{a}}\text{xima} \cdot \text{desviaci}{\acute{o}}\text{n} \cdot \text{del} \cdot \text{valor} \cdot \text{promedio} \cdot \text{del} \cdot \text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{l}{\acute{i}}\text{n}\text{ea}}{\text{voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{l}{\acute{i}}\text{n}\text{ea} \cdot \text{promedio}} * 100$$

Donde el valor promedio de las magnitudes es:

$$(576 + 480 + 384) / 3 = 480V$$

Y la m{axima desviaci{on} del valor promedio es $(576 - 480) = 96 V$.

De esta manera el valor obtenido es:

$$\%LUVR = \frac{96V}{480V} * 100 = 20\%$$

Por otra parte al determinar el % de desbalance de voltaje usando la definici{on} establecida por la IEC **(2.3)**, se observa que es muy diferente a las anteriores definiciones, esta definici{on} tiene la particularidad de utilizar las componentes sim{etricas}, teniendo en cuenta el grado de dificultad matem{atica} que existe para encontrar las componentes de secuencia positiva y secuencia negativa del voltaje, su aplicaci{on} no es muy frecuente. Sin embargo su utilizaci{on} es importante cuando se requiere un buen grado de precisi{on}, como a continuaci{on} se observa.

Para encontrar las componentes sim{etricas} se emplea las ecuaciones **(2.7)** y **(2.8)**

Secuencia positiva:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(576 \angle 0^\circ + a \cdot 480 \angle 221.4^\circ + a^2 \cdot 384 \angle 124.2^\circ)$$

$$V_1 = 473.1 \angle -5.04^\circ V$$

Secuencia negativa:

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(576 \angle 0^\circ + a^2 \cdot 480 \angle 221.4^\circ + a \cdot 384 \angle 124.2^\circ)$$

$$V_2 = 112.6 \angle 21.74^\circ \quad V$$

Por lo tanto el factor del desbalance de voltaje obtenido es el siguiente:

$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} * 100$$

$$\%VUF = \frac{112.6}{473.1} * 100$$

$$\%VUF = 23.8\%$$

Aplicando la fórmula aproximada (2.9) al ejemplo anterior resulta que:

$$V_{abe} = (576 - 480) = 96,$$

$$V_{bce} = (480 - 480) = 0 \quad y$$

$$V_{cae} = (480 - 384) = 96$$

el valor del porcentaje del desbalance de voltaje es igual a:

$$\%voltage_unbalance = \frac{82 \cdot \sqrt{96^2 + 0^2 + 96^2}}{380}$$

$$\%voltage_unbalance = 23.2\%$$

2.5.1. COMENTARIO DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el ejemplo anterior, difieren al aplicar las diferentes definiciones de desbalance de voltaje para los mismos valores de voltaje. El motor de inducción responde al factor de desbalance de voltaje con un valor de 23.8% según IEC y el valor encontrado mediante la fórmula aproximada es de 23.2% muy cercano. Pero a la vez NEMA está asumiendo 20% de desbalance para el mismo grupo de voltajes.

Para tener una mejor idea sobre la aplicación de las definiciones de desbalance de voltaje, se realiza el siguiente análisis. Primeramente, como las definiciones de desbalance de voltaje desarrolladas por la IEEE y por Nema son similares y de acuerdo a la curva de derating realizados por la NEMA, se va a comparar la definición de la NEMA con la definición de desbalance de voltaje desarrollada por el IEC, de ésta forma se podrá comparar los resultados para un mismo grupo de voltajes.

Supóngase tres voltajes de línea desbalanceados dados a continuación:

$$\bar{E}_{ab} = E_{ab} \angle 0^\circ, \quad \bar{E}_{bc} = E_{bc} \angle \theta_{bc}, \text{ y } \bar{E}_{ca} = E_{ca} \angle \theta_{ca}$$

Asumiendo un porcentaje del 5% de desbalance de voltaje para la definición de la NEMA, un voltaje promedio de 460V y el voltaje de línea E_{ab} como la máxima desviación del voltaje promedio. Así:

$$\begin{aligned} \%LVUR &= \frac{E_{ab} - 460}{460} = 0.05 \\ E_{ab} - 460 &= 0.05 * 460 = 23 \quad \therefore E_{ab} = 483 \\ \text{Voltaje}_{\text{Promedio}} &= \frac{E_{ab} + E_{bc} + E_{ca}}{3} = 460 \\ \therefore E_{bc} + E_{ca} &= 897 \quad \text{y} \quad E_{ca} = 897 - E_{bc} \end{aligned}$$

E_{bc} y E_{ca} pueden ser escritas como $|E_{bc} - 460| < 23$ y $|E_{ca} - 460| < 23$, respectivamente. Esto se da porque E_{ab} es la máxima desviación del voltaje promedio y el valor del promedio es de 460V. Por lo tanto

$$437 < E_{bc} < 460 \quad \text{y} \quad 437 < E_{ca} < 460$$

La suma vectorial de los voltajes de línea es $\bar{E}_{ab} + \bar{E}_{bc} + \bar{E}_{ca} = 0$, debido que la componente de secuencia cero del voltaje debe ser cero en ausencia de falla, esta ecuación puede ser resuelta como sigue:

$$E_{ab}\angle 0^\circ + E_{bc}\angle \theta_{bc} + E_{ca}\angle \theta_{ca} = 0$$

$$483 + E_{bc} \cdot \cos\theta_{bc} + jE_{bc} \cdot \text{sen}\theta_{bc} + (897 - E_{bc}) \cdot \cos\theta_{ca} + j(897 - E_{bc}) \cdot \text{sen}\theta_{ca} = 0$$

Para encontrar el voltaje E_{bc} , el ángulo θ_{bc} y el ángulo θ_{ca} se debe separar la parte real e imaginaria de la ecuación anterior y resolver mediante un sistema de dos ecuaciones.

Entonces a partir de los cálculos anteriores, la definición del desbalance de voltaje según la IEC queda de esta manera:

$$\%VUF = \frac{483\angle 0^\circ + a^2 \cdot E_{bc}\angle \theta_{bc} + a \cdot (897 - E_{bc})\angle \theta_{ca}}{483\angle 0^\circ + a \cdot E_{bc}\angle \theta_{bc} + a^2 \cdot (897 - E_{bc})\angle \theta_{ca}} * 100$$

donde: $a = 1\angle 120^\circ$ y $a^2 = 1\angle 240^\circ$. Y finalmente para trabajar con cálculos más simples se utiliza la fórmula aproximada obteniendo lo siguiente:

$$\%desbalance_de_voltaje = \frac{82 \cdot \sqrt{(483 - 460)^2 + (E_b - 460)^2 + ((897 - E_b) - 460)^2}}{460}$$

De este análisis, se establece que al dar valores diferentes de % de desbalance de voltaje basado en la definición de la NEMA, existe un rango de diferencia entre los valores de desbalance al usar las definiciones basados en la definición según IEC y la fórmula aproximada. Esto se muestra en la Figura N° 2.6 para 2%, 5%, 10% y 20% de desbalance de voltaje según la definición de la NEMA. La línea sólida representa la definición de la IEC y la línea punteada representa la fórmula aproximada.

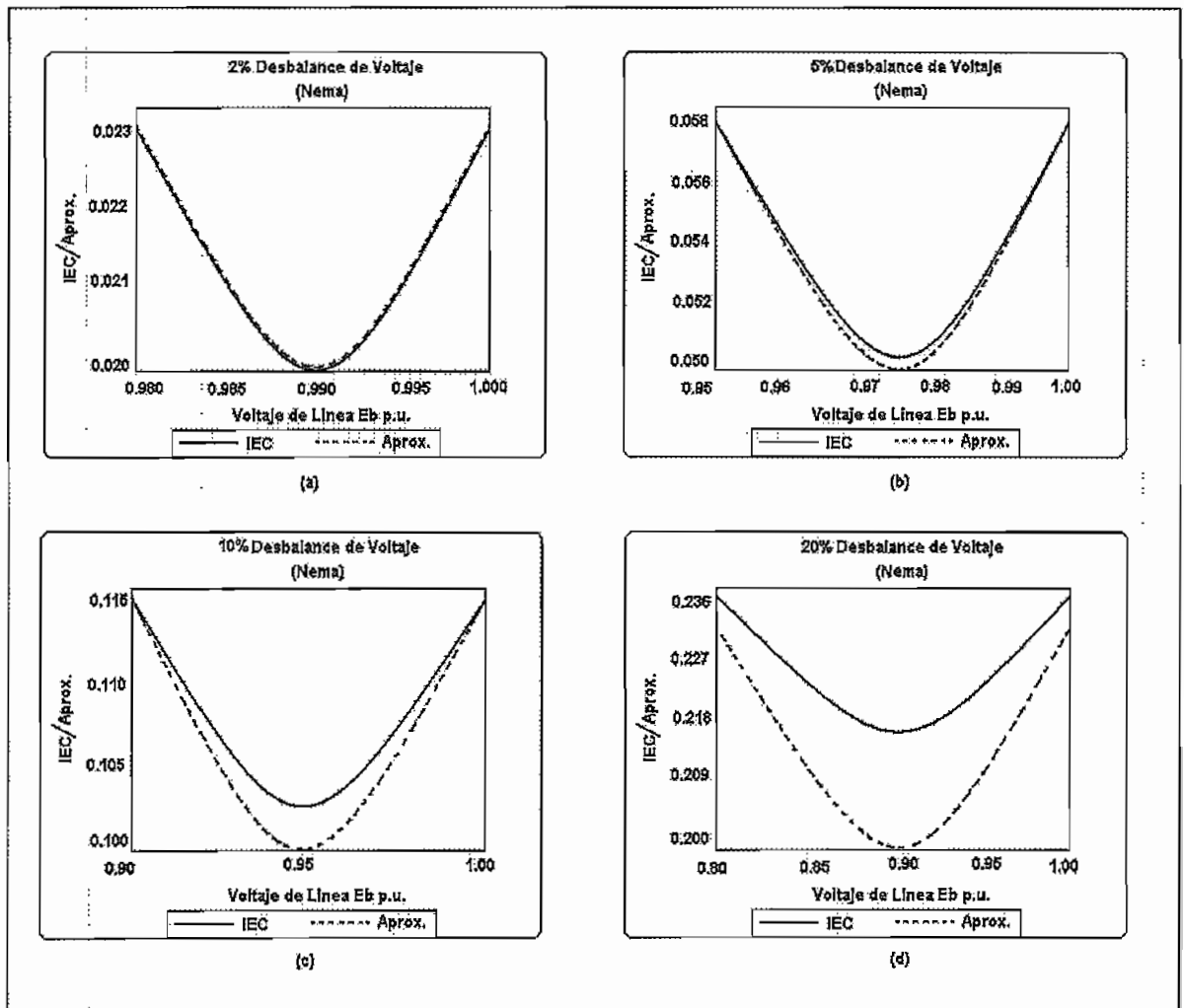


Figura N° 2.6. Relación entre la definición IEC de desbalance de voltaje y la definición de la NEMA, para 2%, 5%, 10% y 20% de desbalance de voltaje.

La figura 2.6(a) muestra que para un 2% de desbalance de voltaje según NEMA, el valor de la definición de la IEC y valor la fórmula aproximada son muy cercanos. Para 5% de desbalance según NEMA en la figura 2.6(b), los valores obtenidos de la fórmula aproximada comienza ligeramente a desviarse de la definición verdadera. En la figura 2.6 (c) y (d) se nota que al incrementar el % de desbalance según NEMA, la fórmula aproximada se desvía aún más de la definición verdadera.

Los resultados obtenidos al utilizar la definición de la NEMA y la definición de la IEC pueden sustancialmente diferir cuando el desbalance de voltaje es

extremadamente alto, como se muestra en la figura 2.6(d). Por otro lado la tabla 2.1 muestra el rango de desbalance de voltaje para las definiciones de la IEC y la fórmula aproximada, al obtener diferentes porcentajes de desbalance de voltaje utilizando la definición de la NEMA.

NEMA	IEC	FORMULA APROXIMADA
%	%	%
2	2 – 2.3	2 - 2.3
5	5 – 5.8	5 - 5.8
10	10.3 - 11.6	10 - 11.6
20	21 - 23.8	20 - 23.2

Con valores menores que el 5% de desbalance la diferencia entre la definición de la NEMA y de la IEC es muy pequeña (0.8%). Arriba de este valor, es decir un 20% de desbalance, la diferencia puede ser muy alta como 3.8%. El motor de inducción esta respondiendo a un valor de 23.8% según IEC, pero NEMA está asumiendo un 20% de desbalance.

2.6. NORMAS GENERALES SOBRE DESBALANCE DE VOLTAJE

Hasta el año 1970, el ahorro y la calidad de energía no fue considerado como un factor de diseño como lo es hoy en día y la asistencia basada en computadoras para diseñar aparatos eléctricos no eran disponibles. Consecuentemente, la mayoría de motores y equipos diseñados en la actualidad cumplen estándares que han permitido tolerar altos niveles de disturbios. Estos estándares son citados a continuación.

El estándar C84.1-1995 "Sistema Eléctrico de Potencia y Rangos de Voltaje para Equipos (60Hz)" del Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI), que fue desarrollado por la Asociación Eléctrica Nacional de Fabricantes (NEMA) recomienda que los sistemas eléctricos deben ser diseñados para operar con un

límite máximo de desbalance de voltaje de 3%. Por otra parte la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) en la norma IEC61000-2-2 "Compatibilidad Electromagnética" recomienda que el límite máximo de desbalance de voltaje para un sistema de eléctrico debe ser de 2%.

Adicionalmente hay que citar las recomendaciones efectuadas por el estándar europeo CENELEC () EN 50160 "Voltaje characteristics of electricity supplied by public distribution systems" (Ver Tabla 2.2) por ser las más comprensiva para la evaluación de la calidad de voltaje, el cual fija como límite 2% de desbalance de voltaje y cuando durante un 5% ó más del periodo de medición de 7 días continuos sobrepasan este límite, existe problemas en la calidad del producto.

Parameter	Averaging time	Limits for 95% of 1 week	Limits for 1 week
Voltage variations	10 min	$\pm 10\%$	
Flicker	Pst 10 min Plt 120 min	Plt < 1	
Harmonics	10 min	table up to 40, Harm.	
THD	10 min	< 8%	
Signaling voltage	3 sec	< 5% of U_N (1...10kV) 99% of 1 day	
Frequency	10 sec	$\pm 1\%$	+4% / -6%
Unbalance	10 min	< 2%	
voltage dip	10 msec	not defined	
Interruptions	10 msec	not defined	

Tabla 2.2 Límites Norma EN 50 160.

Los métodos de evaluación para determinar los índices de desbalance de voltaje, se hablará con más detalle en el capítulo 4.

Simultáneamente NEMA, al desarrollar el estándar ANSI C84.1-1995, presenta el estándar NEMA MG1-1993 "Motores y Generadores" y recomiendan que el desbalance de voltaje no debe ser mayor que el 1% en motores de inducción.

Los estándares IEC también restringen el desbalance de voltaje a 1% sobre los motores de inducción. Además la ANSI/IEEE Std. 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" (Libro Rojo), y la ANSI/IEEE Std.241-1990, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings" (Libro Gris) indican que para un equipo electrónico, tal como computadoras, deberían experimentar problemas si el desbalance de voltaje es mayor que 2 ó 2.5%. Ambas recomendaciones afirman que en general, las cargas monofásicas no deberían estar conectadas bajo un circuito trifásico y menos aún equipos sensibles a desbalance de fases, en cambio un circuito por separado debería ser usado para esta clase de equipos.

Una aparente contradicción en ANSI C84.1-1995 (permitiendo un 3% de desbalance de voltaje en sistemas eléctricos) y la NEMA MG1-1993 (recomendando 1% de desbalance) pueden ser explicados por el siguiente razonamiento. Al desarrollarse el estándar ANSI C84.1 recomendado para desbalance de voltaje, un estudio económico determinó lo siguiente:

1. Finalmente, el consumidor está utilizando la relación de costos requeridos para reducir el desbalance de voltaje y la relación de costos de fabricación requeridos para adquirir motores que pueden estar operando con un rango de desbalance de voltaje,
2. Los consumidores al implementar mejoras en el equipo, los costos invertidos son máximos si se quiere llegar a tener un desbalance de voltaje cercano a cero y los costos declinan al permitir un incremento de desbalance,
3. Los fabricantes por otra parte, determinan que los costos de fabricación de los motores son bajos al diseñarlos para que operen sin desbalance de voltaje y que los costos de fabricación se incrementan rápidamente si se diseñan para que soporten desbalances de voltaje.

Cuando estos costos, excluyendo los costos relacionados a consumo de energía, son combinados, se obtiene la curva que se muestra en la Figura N° 2.7, donde se indica el incremento anual de los costos para los consumidores para varios límites de desbalance de voltaje.

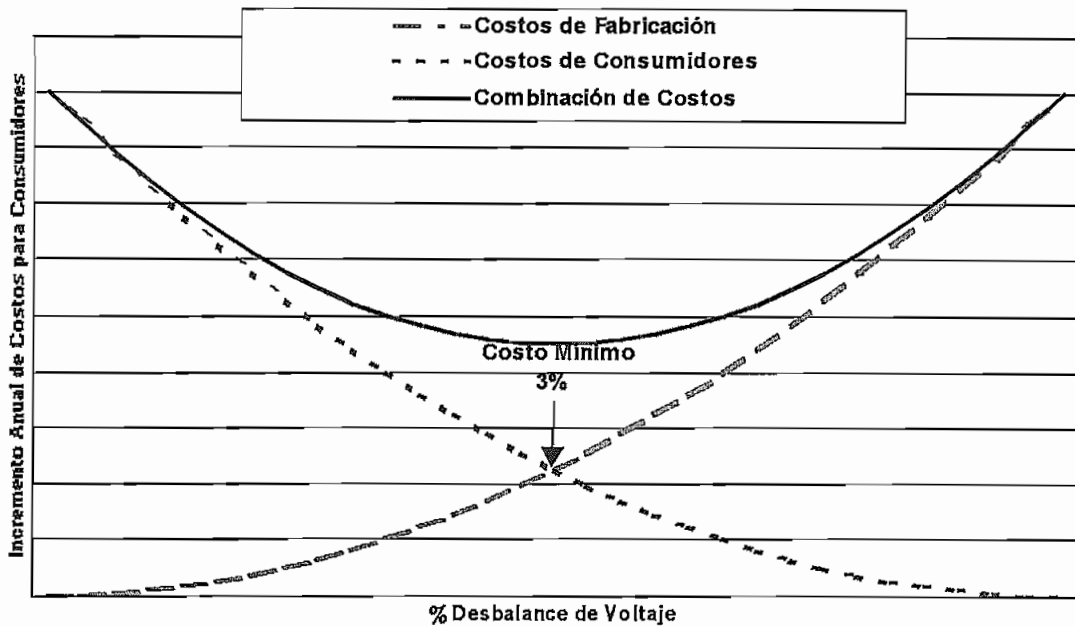


Figura N° 2.7. Incremento anual de los costos a consumidores para varios límites % de desbalance de voltaje, se muestra el costo mínimo aproximadamente 3% de desbalance de voltaje.

El rango óptimo de desbalance de voltaje ocurre cuando el costo de inversión del consumidor es minimizado, el cual es implícito en ANSI C84.1 al ser este aproximadamente 3% de desbalance de voltaje como se indica en la figura N° 2.7.

Hasta el momento solo se indica los límites de desbalance de voltaje que se aplican para sistemas de distribución y equipos eléctricos, sin embargo en la Tabla 2.3, se indica los límites correspondientes para sistemas de transmisión y subtransmisión reconocidos por la Asociación Eléctrica de Canadá (CEA).

VOLTAJE (KV)	DESBALANCE DE VOLTAJE %
230 - 315	1
69 - 20 - 161	1.5
44 - 49	2

TABLA 2.3. Límites para sistemas eléctricos mayores a 44 KV (CEA).

Por eso los fabricantes de motores y usuarios son los llamados a exigir a la empresa eléctrica de distribución, un suministro de energía con un bajo nivel de desbalance de voltaje, el cual debe permitir el correcto funcionamiento de los equipos.

CAPITULO 3

CAUSAS Y EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE

3.1. INTRODUCCIÓN

El desbalance de voltaje es mirado como un problema en la calidad de la energía eléctrica, que concierne significativamente en los niveles establecidos para el buen funcionamiento del sistema eléctrico. Aunque los voltajes son realmente bien balanceados en la generación y transmisión, los niveles de voltaje en el punto de utilización pueden llegar a ser desbalanceados.

Además, el incremento de la velocidad en la operación de los microprocesadores y la cada vez mayor integración de componentes electrónicos en los equipos con los que se trabaja, hace que los mismos sean cada vez más susceptibles a ser afectados por problemas relacionados con la baja calidad de la energía eléctrica. Los disturbios eléctricos que afectan la calidad de energía eléctrica causan una serie de fallas y a la vez degradan los componentes del sistema, debilitándolos un poco más cada vez, de la misma manera que el óxido ataca el metal.

Generalmente el daño no es visible hasta que el componente falla y entonces, es demasiado tarde. Estos disturbios son responsables de la mayoría de las fallas inexplicables que ocurren de tiempo en tiempo. Estos tipos de disturbios causan interrupciones del sistema, archivos perdidos, errores de comunicación, datos de prueba imprecisos y en general, un bajo rendimiento del sistema.

Uno de los disturbios eléctricos que afecta la calidad de energía es precisamente el desbalance de voltaje, que particularmente produce efectos contrarios en el funcionamiento de los equipos eléctricos y sobre todo en el sistema eléctrico de distribución. Bajo las condiciones de desbalance, el sistema de distribución puede presentar efectos de calentamiento entre sus componentes y por ende incurrir en más pérdidas. Los efectos de desbalance de voltaje también puede ser

perjudiciales en equipos tales como motores de inducción, convertidores electrónicos de potencia, variadores de velocidad (ASDs), etc.

En relación al consumidor final, el desbalance de voltaje puede ser causado por desbalance de cargas, sobrecarga de equipos y conexión de altas impedancias, como por ejemplo, contactos malos o flojos.

El propósito de este capítulo es plantear las causas y efectos de desbalance de voltaje, inclusive señalar varias técnicas para reducir los efectos de desbalance.

3.2. CAUSAS Y EFECTOS SOBRE EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

La función básica del sistema eléctrico es entregar la potencia y energía requerida por los consumidores, por lo tanto el sistema debe operar y ofrecer en el punto de entrega un servicio bajo condiciones balanceadas de voltaje

Desde esta perspectiva, las empresas de distribución, deben entregar un producto de calidad, lo cual está determinado por la regulación de voltaje, factor de potencia y nivel de distorsión, valores que son limitados por regulaciones nacionales y normas internacionales.

Unas de las causas más comunes del desbalance de voltaje son:

- Desbalance de voltaje en el suministro
- Desigual configuración de los taps en los transformadores.
- Gran cantidad de transformadores monofásicos en el sistema eléctrico de distribución.
- Fase abierta de un primario sobre un transformador trifásico.
- Falla o mala conexión de tierra en un transformador de potencia.
- Conexión Delta Abierto en un banco de transformación.

- Un fusible abierto sobre un banco trifásico de capacitores.
- Impedancia desigual de conductores de una instalación eléctrica.
- Distribución desigual de cargas monofásicas tales como iluminación.
- Altos reactivos de cargas monofásicas como por ejemplo las soldadoras eléctricas.

A continuación se explicara con más detenimiento los problemas que se presentan en cada componente del sistema eléctrico de potencia debido al desbalance de voltaje.

3.2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN

El voltaje a la salida del sistema de generación es prácticamente muy simétrico, debido que las centrales de generación eléctrica operan con generadores sincrónicos . Por tal razón, las centrales de generación no contribuyen al desbalance de voltaje. Sin embargo, donde existen sistemas de generación en pequeña escala o sistemas de generación débil, el problema del desbalance de voltaje llega a tener una importancia significativa al generar energía eléctrica. Por tal motivo el voltaje de fase de los generadores debe ser de igual magnitud y el ángulo de fase igual a 120° , las desviaciones de estos valores resultaran en decremento de la eficiencia, torque negativo, vibraciones y recalentamientos.

Actualmente en el campo de la generación se buscan otras alternativas no habituales para producir energía eléctrica, éste es el caso de las centrales eólicas, que utilizan las propiedades del viento para la obtención de energía. Normalmente, con la construcción de este tipo de centrales se busca reducir los costos de generación, puesto que la materia prima es el viento y que a la vez no tiene un precio. Sin embargo, la calidad del voltaje puede resultar deficiente y el desbalance de voltaje puede ocurrir. Además hay que resaltar que las máquinas de inducción son atractivas para utilizarlas como turbinas de generación en estos sistemas, debido a su bajo costo y la pequeña necesidad de mantenimiento. Por lo cual si la máquina de inducción es conectada bajo condiciones de desbalance

de voltaje, la corriente del estator es altamente desbalanceada y crea un calentamiento sobre los devanados del estator y pulsaciones en el torque del generador.

3.2.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Una de las causas principales del desbalance de voltaje en el sistema eléctrico, es debido a que las impedancias de las líneas que conforman el sistema de potencia, no es la misma en cada fase. Por ejemplo la configuración geométrica de las líneas aéreas, son asimétricas respecto a tierra y causa una diferencia en los parámetros de la línea. Generalmente estas diferencias son muy pequeñas y sus efectos pueden ser pasados por alto cuando se tiene suficiente precaución, al utilizar la transposición de las líneas.

3.2.3. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El desbalance de voltaje es frecuentemente encontrado en el sistema de distribución. Estudios realizados por el EPRI (Electric Power Research Institute), sobre desbalance de voltaje en Sistemas Eléctricos de Distribución de los Estados Unidos, determinan que, aproximadamente un 66% de los sistemas eléctricos de distribución tienen desbalance de voltaje menores al 1% y un 98% de los sistemas de distribución tienen desbalances debajo de un 3% (Ver Figura N° 3.1).

La principal causa del desbalance de voltaje en el sistema de distribución eléctrica, es la distribución desigual de las cargas monofásicas en la red eléctrica (Ver Figura N° 3.2), el cuál se debe al cambio continuo de una parte del sistema eléctrico de distribución. El desbalance en las cargas usualmente causa una corriente en el neutro.

Adicionalmente, como se indico anteriormente, las causas del desbalance de voltaje en el sistema de distribución, puede ser por ejemplo, la impedancia asimétrica de los devanados en los transformadores, la desigual configuración de

los taps en los transformadores, gran cantidad de transformadores monofásicos en el sistema eléctrico de distribución, banco de transformadores en delta abierto, etc.

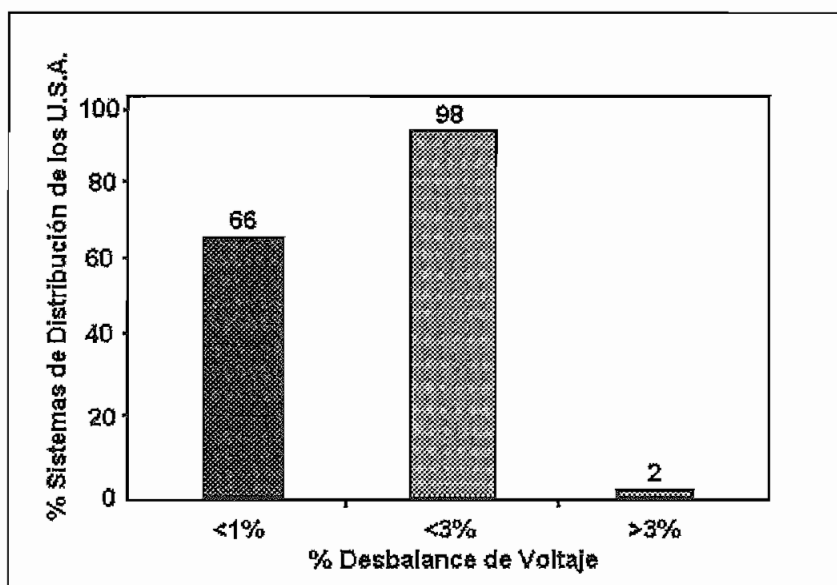


Figura N° 3.1. Porcentaje aproximado de desbalance de voltaje en sistemas de distribución en los U.S.A.

El desbalance de voltaje y las corrientes desbalanceadas son los principales factores que originan pérdidas, interferencia en las comunicaciones, sobrecalentamiento de los equipos y mal funcionamiento de los relés de protección. Consecuentemente, el servicio de la calidad y la operación eficiente del sistema de distribución es reducida.

Además, el uso de equipos electrónicos modernos ha cambiado nuestras vidas, pero también han variado las características de las cargas por lo que se les ha asignado el nombre de no lineales. Algunos de los efectos de la concentración de cargas no lineales son:

DESBALANCE DE CARGA

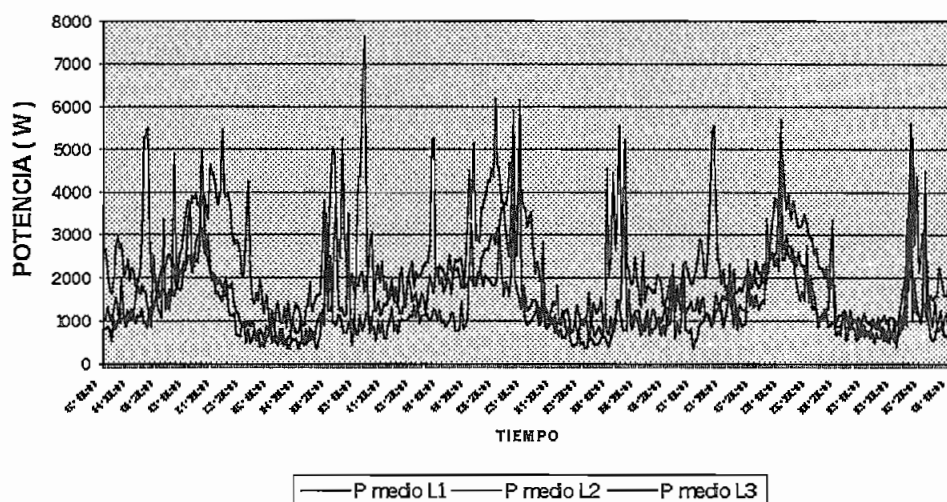


Figura N° 3.2. Desbalance de Carga

- Distorsión de voltaje en el sistema eléctrico
- Interrupción de procesos productivos
- Excesivas corrientes de retorno en el neutro
- Altos niveles de voltaje neutro a tierra
- Sobrecalentamiento en los transformadores y elevados campos electromagnéticos
- Disminución en la capacidad de los equipos de distribución, etc.

Las distorsiones armónicas son especialmente dañinas para los sistemas de distribución. La 3ª armónica y sus múltiplos reciben especial atención debido a que retornan y sobrecargan el neutro (Figura N° 3.3). Las armónicas de secuencia negativa (5ª, 11ª, 17ª), tienen gran impacto en transformadores y motores debido a que su rotación se opone a la de la componente fundamental (60 Hz) y producen calentamientos en los núcleos ferromagnéticos. Las armónicas de orden par causan una amplia gama de problemas como temperaturas elevadas en motores, deterioro en los rodamientos y vibraciones. El problema de la distorsión armónica se tratara con detalle más adelante.

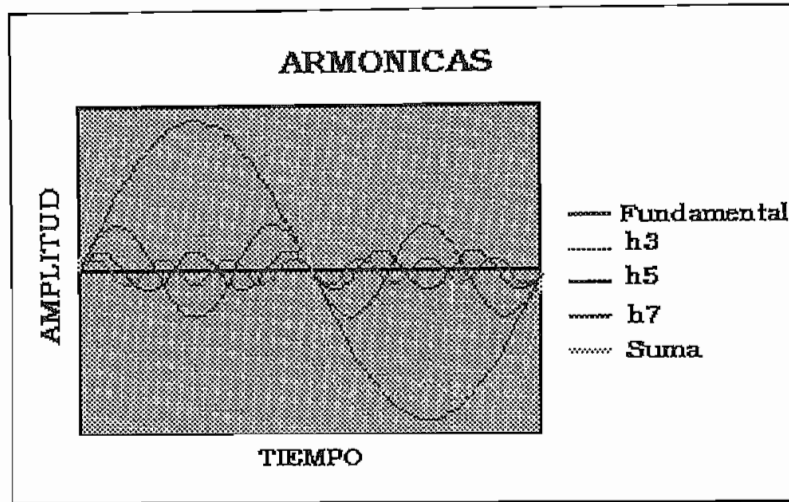


Figura N° 3.3. Descomposición de las componentes armónicas

3.2.3.1. Capacidad de transformadores, cables y líneas

La capacidad de los transformadores, cables y líneas es reducida debido a las componentes de secuencia negativa. El límite operacional es un factor determinado por el valor RMS de la corriente total, siendo parcialmente falsa al existir una corriente indirecta debido a la secuencia negativa. Esto tiene que ser considerado cuando se procede al seteo de los dispositivos de protección. La máxima capacidad puede ser expresada por el factor de derating, establecido por el fabricante, el cual puede ser usado al seleccionar un sistema grande, capaz de manipular la carga.

3.3. CAUSAS Y EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE MOTORES ELÉCTRICOS

Los efectos adversos del desbalance de voltaje sobre motores de inducción ha sido documentado desde el año de 1950, en 1954 Williams¹ demostró que un motor operando bajo condiciones de desbalance de voltaje experimenta una reducción en su eficiencia. En 1959, Gafford² demostró el incremento en los

¹ J. W. Williams, "Operation of 3 phase induction motors on unbalanced voltages", 1954.

² Gafford, W. C., "Heating of induction motors on unbalanced voltages", 1959.

efectos de calentamiento durante la operación del motor de inducción bajo desbalance de voltaje, y estas condiciones podrían llevar a una falla prematura del motor.

Los efectos del desbalance de voltaje usualmente pueden ocurrir por la variación en la carga. Esencialmente, el resultado actual del desbalance de voltaje es causada no solamente por el sistema desbalanceado de voltaje, si no también por la naturaleza de las cargas que causan desbalance, y los equipos que operan con cargas, particularmente los motores.

Los mayores efectos de desbalance de voltaje están presentes en los motores trifásicos de inducción. El motor trifásico de inducción es una de las cargas más comunes en una red eléctrica y son encontrados en un número considerable, especialmente en el ambiente industrial.

Cuando los voltajes de fase aplicados a un motor de inducción no son exactamente los mismos, el síntoma más común que ocasiona el desbalance de voltaje es el alto deterioro de los motores eléctricos. El desbalance de voltaje en los terminales del motor producen desbalance de corrientes en las fases, encontrando valores entre 6 a 10 veces el porcentaje de desbalance de voltaje en un motor con carga máxima.

En el estándar MG 1-1433 de la NEMA se refiere a los efectos del desbalance de voltaje sobre los motores polifásicos como: " Los efectos de desbalance de voltaje sobre un motor polifásico es equivalente a introducir la 'secuencia negativa del voltaje' teniendo una rotación opuesta a la originada con voltajes balanceados" que reducen el torque del motor. Esto puede ser explicado con referencia a los dos giros en sentido contrario establecidos cuando el motor está sujeto a desbalance de voltaje.

En relación a la componente de secuencia positiva del voltaje, si el deslizamiento del motor es:

$$S_1 = \frac{N_s - N_r}{N_s} ; \quad (3.1)$$

donde: N_s = Velocidad sincrónica

N_r = Velocidad del rotor

El deslizamiento correspondiente de la secuencia negativa del voltaje debería ser:

$$S_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s} ; \quad (3.2)$$

El deslizamiento S_2 puede ser expresado en términos de S_1 y por lo tanto

$$S_2 = \frac{-N_s - N_r}{-N_s} = (2 - S_1) \quad (3.3)$$

Como el deslizamiento S_1 de la secuencia positiva es normalmente muy pequeño (cercano a cero), el deslizamiento S_2 de la secuencia negativa llega a ser muy grande (cerca de 2). Según la teoría básica de motores de inducción, la impedancia de un motor de inducción es muy dependiente del deslizamiento, donde un valor alto de deslizamiento presentaría una pequeña impedancia y viceversa, un bajo deslizamiento conllevaría a una impedancia muy alta. Por consiguiente, esto puede ser aproximadamente establecido con la relación de la impedancia de secuencia positiva y la impedancia de secuencia negativa como se indica a continuación:

$$\frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{I_{arranque}}{I_{no\ min\ al}} \quad (3.4)$$

Como la corriente de secuencia positiva está dada por $I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$ y la corriente de

secuencia negativa está dada por $I_2 = \frac{V_2}{Z_2}$ esto puede ser expresado de la

siguiente manera:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2}{V_1} * \frac{I_{arranque}}{I_{nominal}} ; \text{ y finalmente} \quad (3.5)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \%VUF * \frac{I_{arranque}}{I_{nominal}} \quad (3.6)$$

Como un ejemplo , si el desbalance de voltaje es 1%, la corriente desbalanceada podría llegar en cualquier instante desde 6% hasta 10%, (Ver Figura N° 3.4). Las sobrecorrientes que están presentes en el motor producen un excesivo calentamiento, reducción en la vida del motor, y por lo tanto, eventualmente se quemaría. En general, un pequeño desbalance de voltaje sobre cualquier tipo de motor de inducción, presenta un grado considerable de corriente desbalanceada. Para un desbalance de voltaje dado, el desbalance de la corriente es grande sin carga y decrece al estar con carga, presentando menos efectos al ser expuesto bajo condiciones de bloqueo. Este fenómeno es conveniente mostrarlo en la figura N° 3.4.

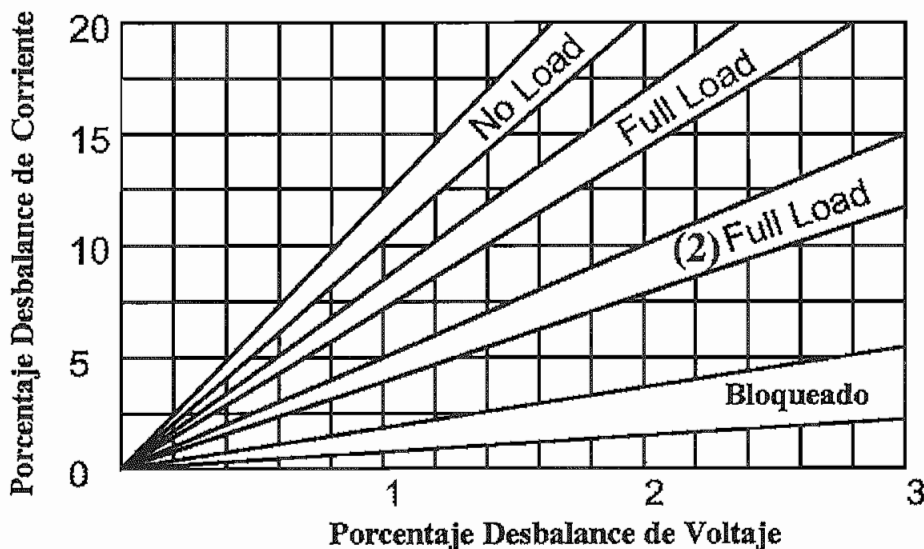


Figura N° 3.4 . Relación entre el desbalance de voltaje y el desbalance de corriente.
(Application Manual for NEMA Motors)

La Tabla 3.1 ilustra los efectos del desbalance de voltaje sobre un típico motor eléctrico con las siguientes características: 5 hp , 3fases, 230V, 60Hz, 1725 rpm.

Tabla 3.1 Valores de desbalance de voltaje para un motor eléctrico			
CARACTERÍSTICAS	RENDIMIENTO		
Voltaje Promedio	230	230	230
Porcentaje de Desbalance de Voltaje	0.3	2.3	5.4
Porcentaje de Desbalance de Corriente	0.4	17.7	40
Incremento de la temperatura °C	0	30	40

Otros efectos sobre los motores, es que la velocidad a carga máxima se reduciría levemente, y el torque también se reduciría. Si el desbalance de voltaje es bastante grande, el torque reduce la capacidad de la potencia diseñada y el motor no logra la velocidad adecuada. Sin embargo el desbalance de voltaje tiene prácticamente un pequeño efecto sobre los motores de inducción referente al torque. La siguiente relación* nos permite encontrar el porcentaje del torque a plena carga con desbalance de voltaje.

$$\frac{\text{Torque con Desbalance de voltaje (\%)}}{\text{Torque sin Desbalance de Voltaje (\%)}} = K * \left[1 - \left(\frac{\% \text{ Desbalance de voltaje}}{100} \right)^2 \right]$$

Donde: K = 1 para rotor bloqueado (3.7)

Por otra parte un pequeño desbalance de voltaje en las fases podría causar un incremento significativo en la temperatura del motor. Aunque esto no es exacto, la siguiente fórmula determina el efecto del desbalance de voltaje sobre la elevación de la temperatura, una prueba de laboratorio indica que el incremento del porcentaje de la temperatura es aproximadamente igual a dos veces el cuadrado del porcentaje del desbalance de voltaje. Esto está expresado en la siguiente fórmula*:

$$\frac{\text{Temperatura sobre un sistema Desbalanceado}}{\text{Temperatura sobre un sistema Balanceado}} = \left[1 + 2 \left(\frac{\% \text{ Desbalance Voltaje}}{100} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

* Application Manual for NEMA Motors, SIEMENS.

Uno de los efectos más perjudiciales, es que la vida del aislante de los devanados es aproximadamente la mitad por cada 10°C de incremento en la temperatura de los devanados. Un motor a menudo, continua operando con desbalance de voltaje; sin embargo, su eficiencia se reduce. Esta reducción de la eficiencia es causada por el incremento de la corriente y el incremento de la resistencia debido al calentamiento del motor. El incremento de la resistencia y la corriente contribuye a un incremento exponencial en el calentamiento del motor, causando pérdidas extras en el motor. Mediante la siguiente relación se determina que el incremento de las pérdidas en el motor es proporcional al cuadrado del desbalance del voltaje:

$$\% \text{ Incremento de Pérdidas en el motor} = 2 * (\text{Desbalance de Voltaje})^2 \quad (3.9)$$

Como por ejemplo, para un 3.2% de desbalance de voltaje el incremento de las pérdidas del motor llegan a ser un 20.1%. La figura N° 3.5 ilustra el porcentaje típico del incremento de las pérdidas en el motor y el calentamiento para varios niveles de desbalance de voltaje.

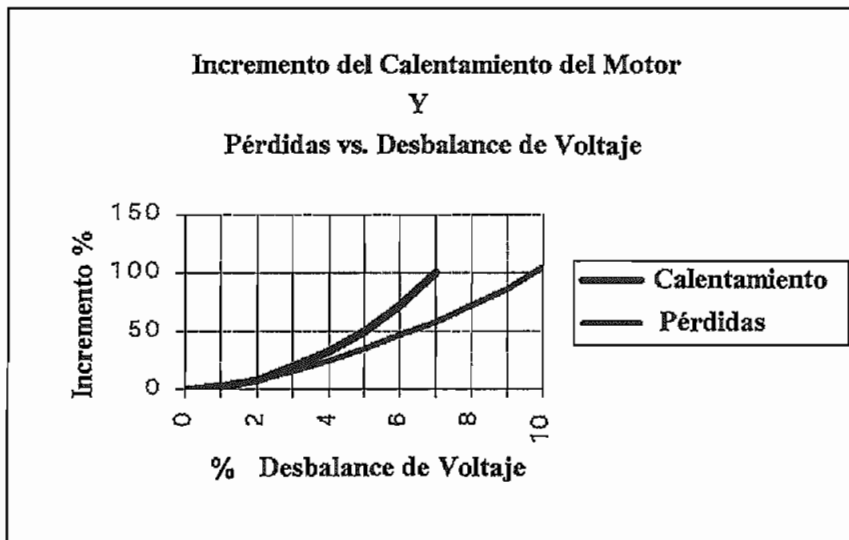


Figura N° 3.5. Incremento del Calentamiento y Pérdidas en un motor eléctrico respecto a un porcentaje de desbalance de voltaje.

De esta forma, cuando un motor opera bajo condiciones de desbalance de voltaje, los diferentes problemas que se presentan, contribuyen en la disminución de la vida útil del motor, para el que fue diseñado. En la figura N° 3.6 se muestra la disminución de la vida útil del motor para un incremento adicional de temperatura.

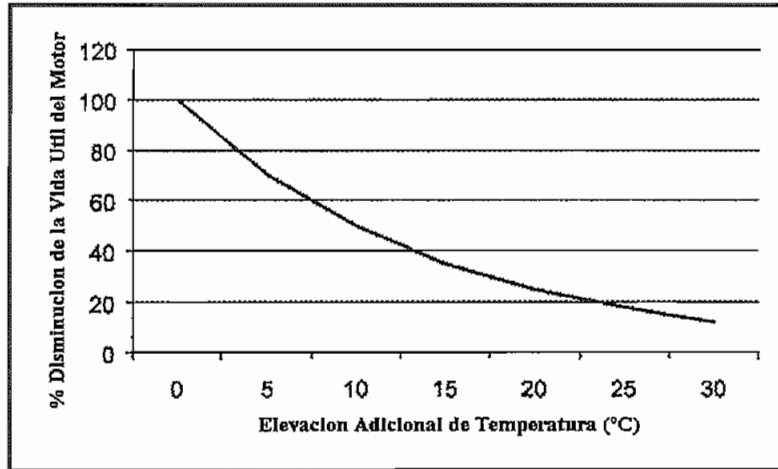


Figura N° 3.6. Reducción de la vida útil del motor debido al incremento de la temperatura.

A causa del exceso de calentamiento, la NEMA en el estándar MG 1-1993 recomienda que el valor de potencia del motor debería ser multiplicado por el factor de derating basado en el grado de desbalance de voltaje como se muestra en la figura N° 3.7.

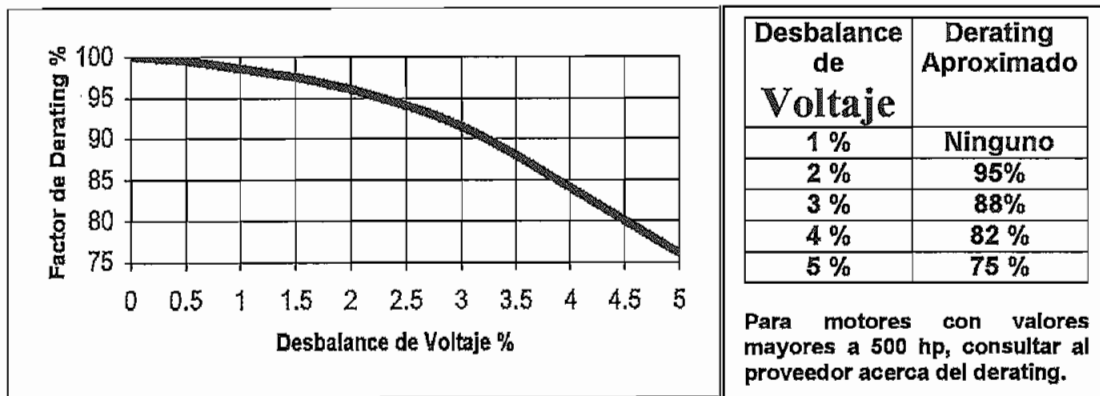


Figura N° 3.7. Gráfico del Factor de Derating y Tabla para motores de inducción basados en un porcentaje de Desbalance de Voltaje (NEMA Estándar MG 1-1993: Motors and Generators).

La curva asume que el motor está operando con carga nominal. Sin embargo, la mayoría de motores no operan con el valor nominal de carga y puede ser que operen con valores mayores de desbalance de voltaje, puesto que un porcentaje significativo de carga contribuye a que los efectos del desbalance de voltaje sean más notorios. De la figura N° 3.7 se puede observar que al exceder el 1% de desbalance de voltaje, la potencia del motor debe disminuir, pero todavía puede operar con éxito. En cambio al incrementarse el porcentaje de desbalance de voltaje la potencia del motor va disminuyendo considerablemente. Según NEMA, no es recomendable operar un motor con un desbalance de voltaje sobre el 5%.

Por ejemplo si el desbalance es igual a 3% un motor de 10kW debería ser cargado con solo 9kW. Si la potencia del motor es de 10kW y diseñado con un desbalance de voltaje de 3%, el motor debería tener un valor alrededor de los 12kW de potencia o debería tener un factor de servicio de 1.15. En la Tabla N° 3.2 se presenta un resumen de los efectos que produce la variación del voltaje, según el estándar de la NEMA MG-1-12.45 "EFFICIENT INDUCTION MOTOR CHARACTERISTICS" publicado en Junio de 1993.

VARIACIÓN	ARRANQUE & MAX TORQUE DE FUNCIONAMIENTO	VELOCIDAD SINCRÓNICA	VELOCIDAD A CARGA MAX	EFICIENCIA CARGA MAX	FACTOR DE POTENCIA A CARGA MAX	CORRIENTE A CARGA MAX	ELEVACION TEMP, CARGA MAX
110% voltaje	Aumenta 21%	No Cambia	Aumenta 1%	Leve Incremento	Disminuye 5-10 puntos	Aumenta 2-4%	Aumenta 3-4 °C
Función del voltaje	(Voltage) ²	Constante	Perturba Velocidad Sincrónica				
90% voltaje	Disminuye 19%	No Cambia	Disminuye 1-1/2%	Disminuye 2 puntos	Aumenta 5 puntos	Aumenta 10-11%	Aumenta 6-7 °C
1% Desbalance	Leve Disminución	Leve Disminución	Leve Disminución	Disminuye 2%	Disminuye 5-6%	Aumenta 1-1/2%	Aumenta 2%
2% Desbalance	Leve Disminución	Leve Disminución	Leve Disminución	Disminuye 8%	Disminuye 7%	Aumenta 3%	Aumenta 8%

Tabla N° 3.2. "EFFICIENT INDUCTION MOTOR CHARACTERISTICS"

NOTA: Esta tabla muestra efectos generales, el cual puede variar para otras especificaciones.

3.4. EFECTOS DE DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE CONVERSORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA Y VARIADORES DE VELOCIDAD

Los conversores electrónicos de potencia sirven como interfaz para la mayoría de los equipos electrónicos. Un sistema de rectificación trifásica con diodos es una parte esencial de las fuentes ininterrumpibles de energía (UPSs), en la operación de motores con variación de velocidad, a través del uso de los variadores de velocidad (Adjustable Speed Drive, "ASD"). La mayoría de los conversores contienen un sistema de rectificación entrada-salida, como se muestra en la figura N° 3.8 y un capacitor DC de ENLACE que transforma el voltaje AC de entrada a un voltaje de onda continua. En la figura N° 3.8, el modulador de ancho de pulso (PWM) invertido, convierte el voltaje DC a un voltaje variable trifásico de AC. La magnitud y frecuencia del PWM invertido controla la salida de la velocidad del motor.

Los conversores trifásicos con diodos rectificadores entrada-salida presentan corrientes no sinusoidales ricas en armónicos impares. Para sistemas de rectificación alimentados por un voltaje de servicio balanceado, las características de los armónicos de la corriente de entrada son determinados por:

$$h = kq \pm 1; \quad (3.10)$$

donde:

h = orden de los armónicos;

k = 1, 2, 3, 4,.....,n;

q = número de pulsos del sistema de rectificación.

Convencionalmente los ASDs como se muestra en la Fig. N° 3.8 tienen rectificadores de "seis pulsos" (q = 6), definido en realidad por el voltaje DC que resulta de una porción de la forma de onda del voltaje AC línea-línea y repeticiones con 60° de duración, contiendo los seis pulsos en 360°.

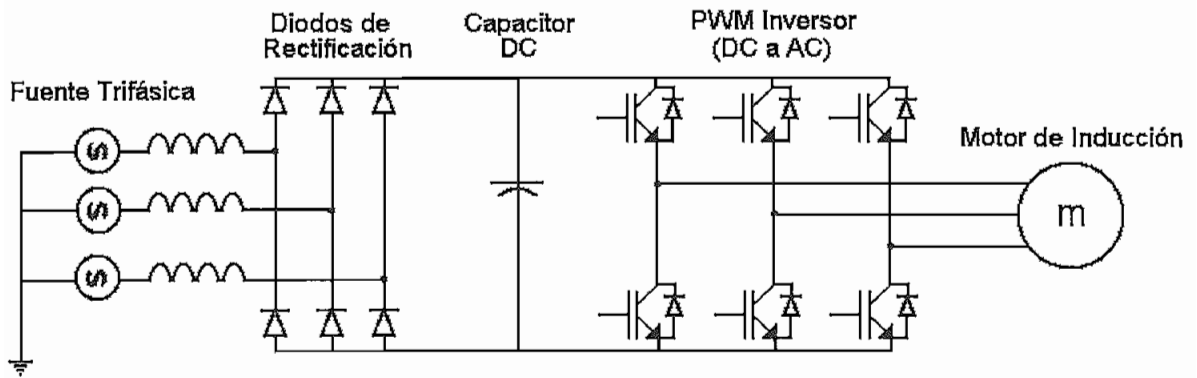


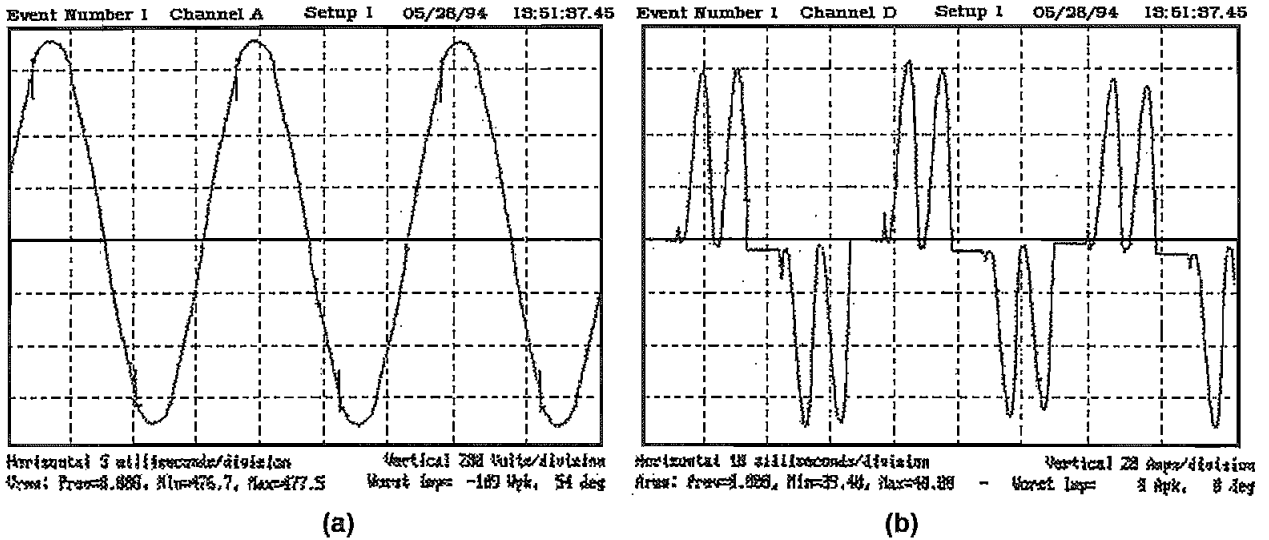
Figura N° 3.8. Sistema Típico de un Variador de Velocidad (ASD)

Por eso, las características de los armónicos de corriente presentes en la salida del ASD serían $h = 5^{\text{th}}$ (300 Hz) , 7^{th} (420 Hz) , 11^{th} y 13^{th} , etc., como se muestra en la Fig. N° 3.9 para un ASD de 460V, 80kVA. Se observa en la Fig. N° 3.9 las características de doble-pulso de la forma de onda de la corriente, resultando una distorsión armónica total (THD) en la corriente de entrada del ASD igual a 79.4%.

Bajo las condiciones de un servicio con desbalance de voltaje, la entrada de corrientes armónicas no son restringidas por el conversor y pueden aparecer los armónicos triples tales como la 3^{ra} y 9^{na} armónicas, como es demostrado en las Figs. 3.10 y 3.11 con 0.3% y 3.75% de desbalance de voltaje, respectivamente. Estos armónicos merecen especial atención porque la respuesta del sistema es a menudo considerablemente diferente para los armónicos triples que para el resto de armónicos. El modo normal para los armónicos triples es de secuencia cero. Durante desbalances, los armónicos triples pueden tener componentes de secuencia positiva y negativa. Cuando las fases no están balanceadas las corriente de los armónicos triples pueden aparecer donde ellos no estén esperados.

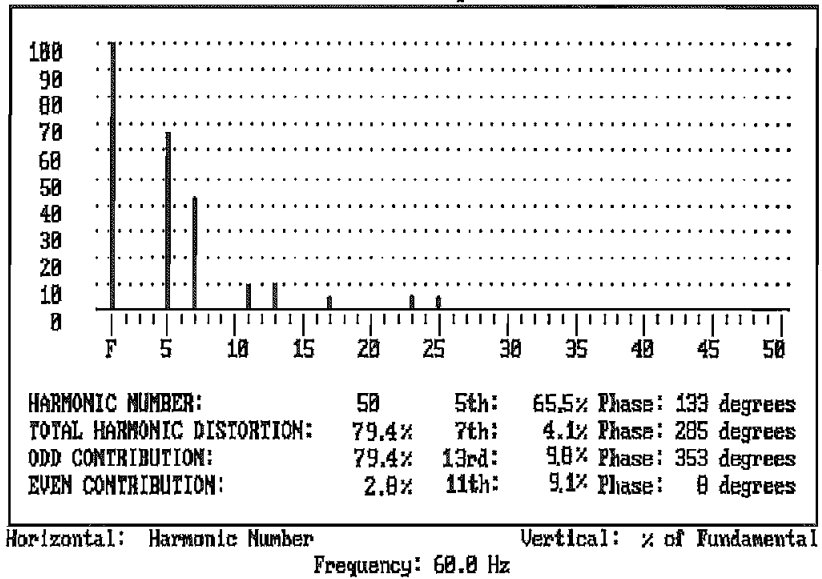
Hay que fijarse que a la entrada del ASD el desbalance de voltaje se incrementa, la corriente llega a ser significativamente más desbalanceada y existen cambios de la onda de doble-pulso a una onda de un pulso (Fig. 3.11) debido a la

asimetría en la conducción de los diodos. El desbalance de voltaje puede causar una corriente excesiva en una o dos fases, la cual puede activar los circuitos de protección de sobrecarga.



650 GRAPHICAL & HARMONIC ANALYSIS (c)1988-1994 Danetz Technologies, Inc.
thunper2

Event Number 37 Channel D Setup 14 05/16/91 14:50:43.81

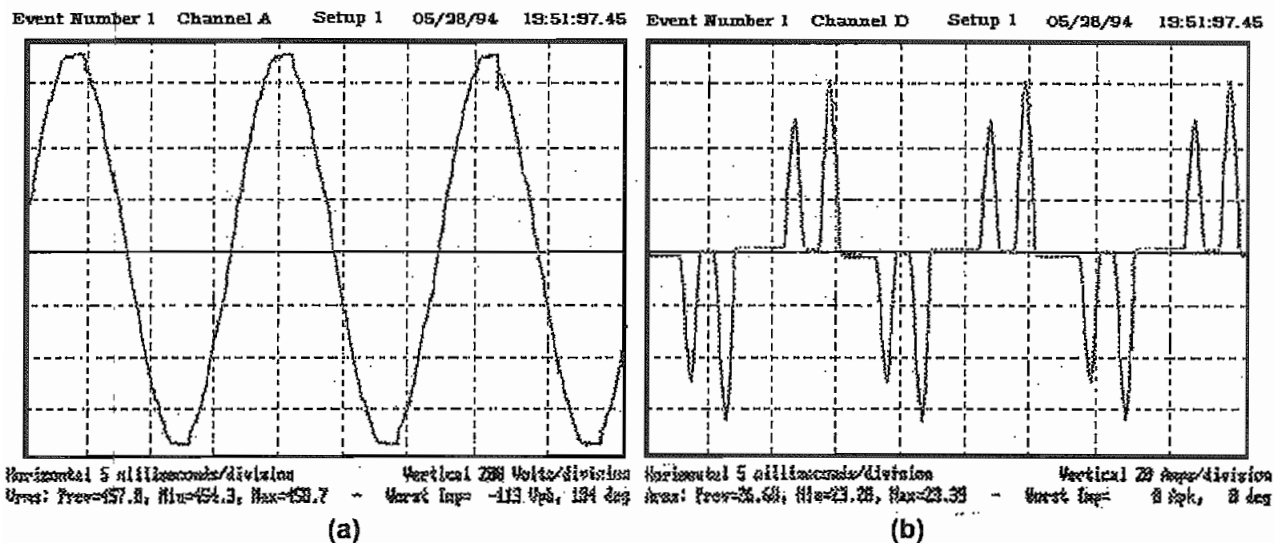


(c)

Figura N° 3.9. Caso 1: ASD de 460V, 80kVA (a) V_{ab} . (b) i_a . (c) Espectro de frecuencia de i_a

El incremento de la corriente puede también causar un excesivo calentamiento de los diodos y disminuir la vida útil de los capacitores o requieren el uso de grandes

capacitores. La Tabla 3.3 nos da una comparación de los tres casos, que indica las diferencias existentes. Note que el incremento en el porcentaje de la 3^{era} armónica es de 2.1%, a 19.2% y al 83.7% cuando se incrementa el desbalance de voltaje respectivamente. La significativa 3^{ra} armónica puede incrementar más armónicos y problemas de resonancia en el sistema, como también requerir filtros con rangos muy altos.



650 GRAPHICAL & HARMONIC ANALYSIS (c)1988-1994 Dranetz Technologies, Inc.
 thumper2

Event Number 37 Channel D Setup 14 05/16/91 14:58:43.81

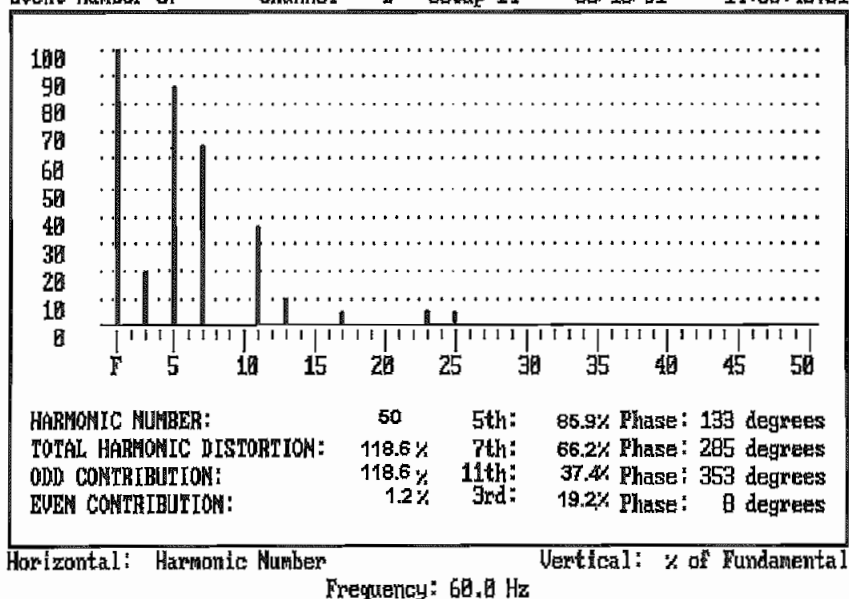
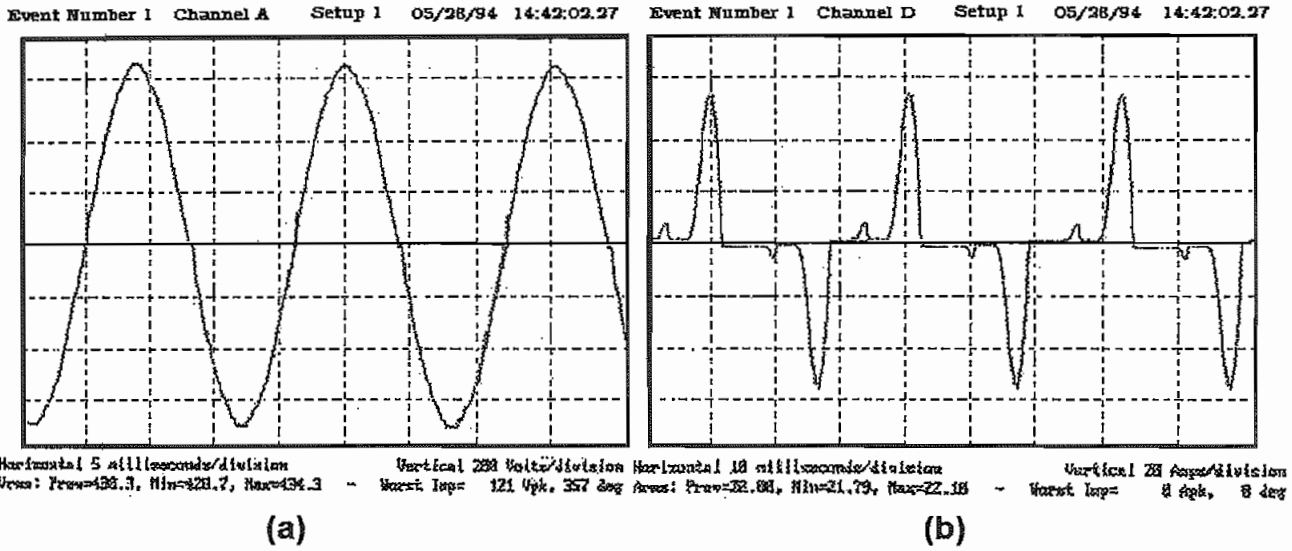
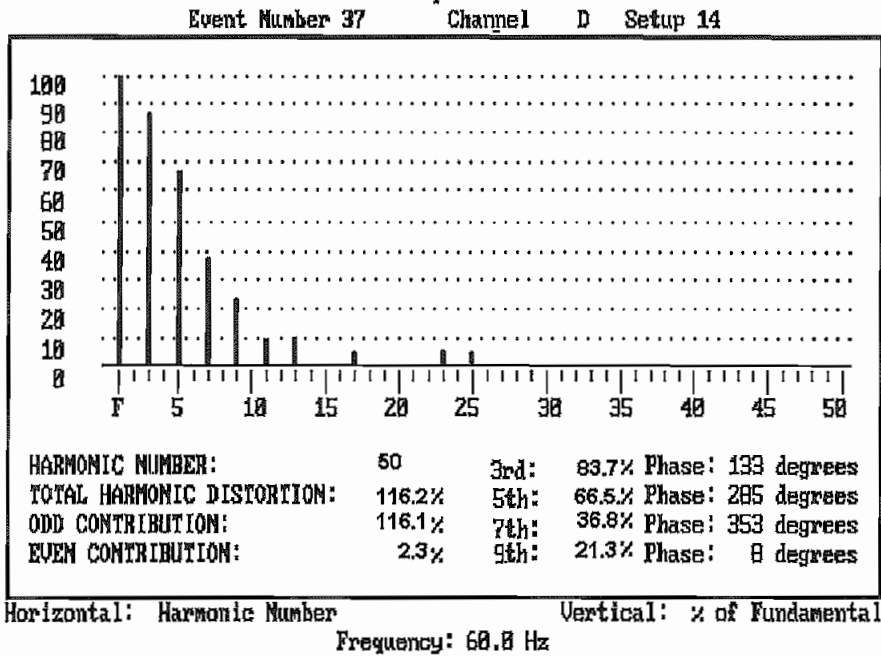


Figura N° 3.10. Caso 2: ASD de 460V, 30kVA con 0.30% de desbalance de voltaje. (a) V_{ab} . (b) i_a . (c) Espectro de frecuencia de i_a



650 GRAPHICAL & HARMONIC ANALYSIS (c)1988-1994 Dranetz Technologies, Inc.
 thumper2



(c)

Figura N° 3.11. Caso 3: ASD de 460V, 30kVA con 3.75% de desbalance de voltaje. (a) V_{ab} .
 (b) i_a . (c) Espectro de frecuencia de i_a

	Desbalance de Voltaje	RMS	60Hz							THD
		Corriente de Entrada	Corriente de Línea I1	I3 (% de I1)	I5 (% de I1)	I7 (% de I1)				
	%	Amps	Amps	Amps	%	Amps	%	Amps	%	%
Caso 1	-	40.66	31.84	0.67	2.1	20.86	65.5	13.31	41.8	79.4
Caso 2	0.30	25.04	16.15	3.10	19.2	13.87	85.9	10.69	66.2	118.6
Caso 3	3.75	21.96	14.33	12	83.7	9.53	66.5	5.16	36	116.2

Tabla 3.3. Comparación del Desbalance de Voltaje

3.4.1. DISTORSIÓN ARMÓNICA

Debido a la presencia de los armónicos y su respuesta frente al desbalance de voltaje, este fenómeno merece una particular atención ya que repercute sus efectos en diversos equipos capaces de controlar el producto final como: iluminación variable, velocidad ajustables, etc.

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz) por ejemplo (Figura N° 3.12). Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente.

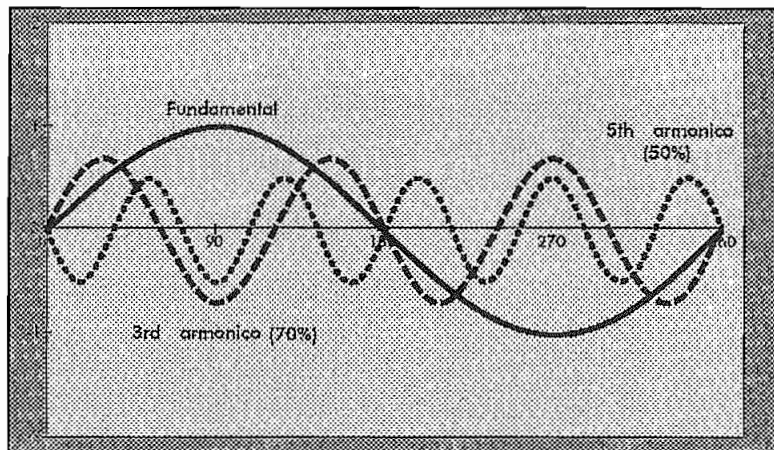


Figura N° 3.12. Forma de onda (fundamental con 3^{er} y 5^{to} armónico)

Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes. Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas.

3.4.1.1. Fuentes de Armónicas

En general, cualquier tipo de carga no lineal conectada al sistema eléctrico causará distorsión armónica. A continuación se muestra una lista de ejemplos comunes de fuentes de armónicas en sistemas de potencia, entre las que se citan algunas cuyos efectos se pueden despreciar de manera segura en sistemas de distribución:

- a. Saturación de transformadores
- b. Corrientes de energización de transformadores
- c. Conexiones al neutro de transformadores
- d. Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna
- e. Hornos de arco eléctrico
- f. Lámparas fluorescentes
- g. Fuentes reguladas por conmutación
- h. Cargadores de baterías
- i. Compensadores estáticos de VAR's
- j. Variadores de frecuencia para motores ("drives"), inversores
- k. Convertidores de estado sólido

Es importante señalar que las armónicas son una situación de estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios. Aun y cuando las corrientes de energización en los transformadores son transitorios en sistemas eléctricos, también se pueden citar dentro de fuentes que producen armónicas si operan en sistemas que presentan una resonancia aguda en alguna de las frecuencias de esta corriente (en su mayoría la 2^{da}, 3^{ra}, 4^{ta} y 5^{ta} armónicas). Esto causaría una distorsión en voltaje que a su vez afectará a la corriente de energización del transformador, por ende excitando aún más la frecuencia de resonancia del sistema e incrementando la distorsión en voltaje hasta niveles que pueden degradar o dañar equipo en forma instantánea o eventual.

3.5. TÉCNICAS PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DEL DESBALANCE DE VOLTAJE

Si bien existen varias técnicas de reducción para recomendar en la corrección del desbalance de voltaje, mantener un balance de voltaje exacto en las tres fases en el punto de servicio es virtualmente imposible por las siguientes razones:

- Las cargas monofásicas están continuamente conectadas y desconectadas en el sistema eléctrico,
- Las cargas monofásicas no son distribuidas uniformemente entre las tres fases,
- El sistema eléctrico de potencia puede ser inherentemente asimétrico.

Por eso, algo de desbalance de voltaje es inevitable en cualquier tipo de sistema eléctrico trifásico.

3.5.1. TÉCNICAS PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE VOLTAJE EN UN SISTEMA DE POTENCIA

La causa principal del desbalance de voltaje son las cargas desbalanceadas sobre el sistema de distribución y para minimizar sus efectos, se puede intentar distribuir igualmente una gran cantidad de cargas monofásicas a través de las tres fases. Sin embargo, el desbalance de voltaje puede originarse con anterioridad en el sistema de transmisión y para minimizar sus efectos se debe realizar una correcta transposición de las líneas. Continuando, el sistema de distribución puede ser balanceado cuando se cambia la configuración del sistema mediante la operación manual y automática de los interruptores al transferir cargas entre los alimentadores primarios. La configuración puede ser ejecutada para reducir pérdidas, y tienen una tendencia natural para balancear cargas entre los circuitos.

Varias reconfiguraciones utilizan algoritmos que han sido desarrollados para optimizar alimentadores primarios, por ejemplo ubicando interruptores, de esta forma utilizando una estimación de la carga proveniente de la información obtenida para el tiempo en el cual se realiza el análisis, se obtiene la mejor opción de configuración.

Las impedancias desbalanceadas, incluyendo transformadores y otras conexiones, son a menudo las que más contribuyen al desbalance de voltaje. Por eso, la correcta selección de los transformadores de distribución es un paso muy importante para prevenir el desbalance de voltaje, prestando particularmente atención al balancear un banco de transformadores en delta abierto. Si la cantidad del desbalance tiende a variar con la carga del consumidor, esto es una muy posibilidad de que el transformador es la causa de la condición del desbalance. Una manera de determinar que el banco de transformadores contribuye al desbalance de voltaje es la medida de los voltajes en el lado primario y el voltaje en el lado secundario del transformador y calcular el porcentaje del desbalance en cada punto.

Un regulador trifásico de voltaje también puede suplir algo en la corrección del desbalance de voltaje, pero la configuración debe ser controlada cuidadosamente para evitar que adicionalmente se originen desbalances de voltaje. Además, en condiciones de sobrecarga y por motivo de seguridad el sistema de potencia debería siempre ser corregido tan pronto como sea posible por un número suficiente de protecciones, como también compensación ante desbalance de voltaje. La compensación de desbalance también puede ser realizado por medio de filtros pasivos, por ejemplo balancear la impedancia de la carga, donde la corriente de la carga es balanceada al añadir elementos reactivos en paralelo con la carga. De forma rápida, a continuación citaremos algunas soluciones prácticas que nos permitan reducir los efectos del desbalance de voltaje.

3.5.1.1. Transposición de líneas de transmisión

Cuando los conductores de una línea trifásica no están espaciados de manera simétrica, el problema del desbalance es más evidente. En un sistema desbalanceado se obtiene una inductancia diferente en cada fase. Por tal motivo, la simetría de las líneas trifásicas es necesario y se puede solucionar el desbalance de voltaje reestableciendo el balance en las tres fases intercambiando las posiciones de los conductores en intervalos regulares a lo largo de la línea, de forma que cada conductor ocupe la posición que tenían originalmente los otros a igual distancia. A este intercambio de posiciones de los conductores se le conoce como **“transposición”**. En la figura N° 3.13 se muestra un ciclo compuesto de transposición. Se designa a los conductores de fase a, b y c, y las posiciones que ocupan se numeran como 1, 2 y 3, respectivamente. La transposición da como resultado que cada conductor tenga la misma inductancia promedio en todo el ciclo.

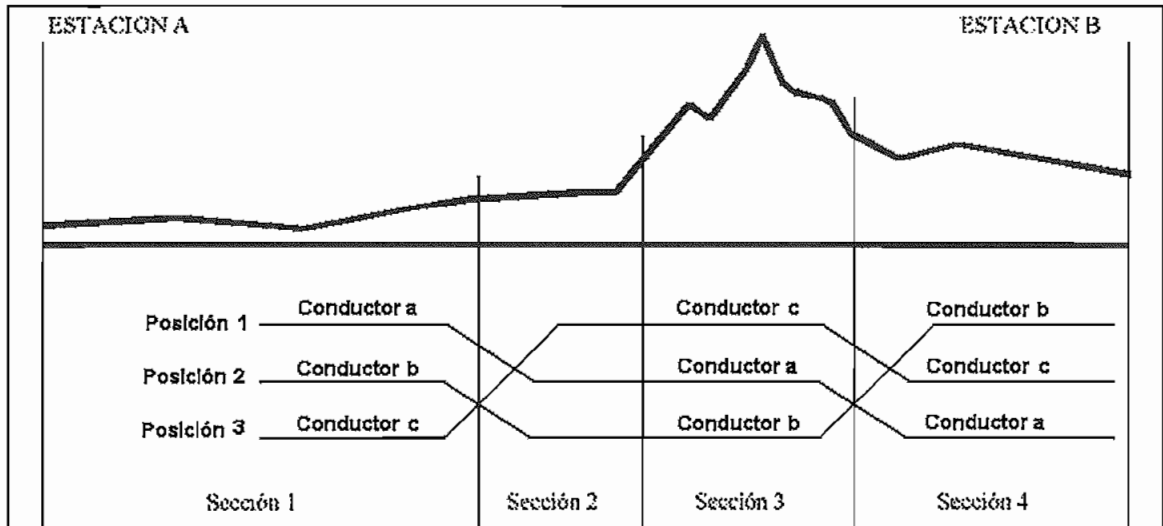


Figura N° 3.13 Ciclo de transposición.

Por lo general, las líneas de los sistemas de potencia modernos no se transponen en intervalos regulares, aunque se puede hacer un intercambio de las posiciones de los conductores en las subestaciones de interconexión, con el fin de balancear las inductancias de las fases en forma aproximada. Generalmente la asimetría de las fases de una línea que no está transpuesta es pequeña y se desprecia en la mayoría de los cálculos de inductancia. Si la asimetría es despreciable, la inductancia de la línea no transpuesta se toma como igual al valor promedio de la reactancia inductiva de una fase de la misma línea transpuesta correctamente.

3.5.1.2. Reconfiguración de primarios en un sistema de distribución

Los alimentadores primarios son líneas de media voltaje que interconectan las subestaciones de distribución con los transformadores de distribución, generalmente adoptan una configuración radial y son los principales responsables de la continuidad de servicio eléctrico.

La reconfiguración de alimentadores se la puede definir como una alteración a la estructura topológica de los alimentadores primarios, esta alteración se da por

cambios en las condiciones (abierto - cerrado) de los interruptores de seccionamiento y/o enlace.

Cuando el sistema se encuentra en situaciones operativas normales, la reconfiguración puede ser utilizada para evitar sobrecarga en transformadores de las subestaciones, en alimentadores y por otro lado mejorar el perfil de voltaje a lo largo de los mismos, mientras simultáneamente se minimizan las pérdidas reales de energía. Cuando el sistema experimente alguna situación de falla, dicha reconfiguración es utilizada para restaurar la mayor cantidad de carga, que no se encuentre ligada directamente con las secciones afectadas por la falla, con esto, se mantiene los índices de calidad de servicio, y si se logra lo anterior estaremos reduciendo pérdidas de tipo económico. Todo esto es posible siempre y cuando existan los medios físicos que permitan la interconexión con otros alimentadores de la misma o de diferente subestación eléctrica.

Adicionalmente, se deduce que con una eficiente metodología de reconfiguración de alimentadores primarios se puede determinar la mejor ubicación de puntos de seccionamiento y/o enlace de un sistema para minimizar los impactos provocados por las fallas.

Las bondades más relevantes en el tratamiento de la reconfiguración de alimentadores primarios son: reducción de pérdidas técnicas, mejoramiento en la continuidad del servicio eléctrico, limitación de sobrecargas térmicas, mejorar perfil de voltaje (desbalance de voltaje). Ver figura N° 3.14.

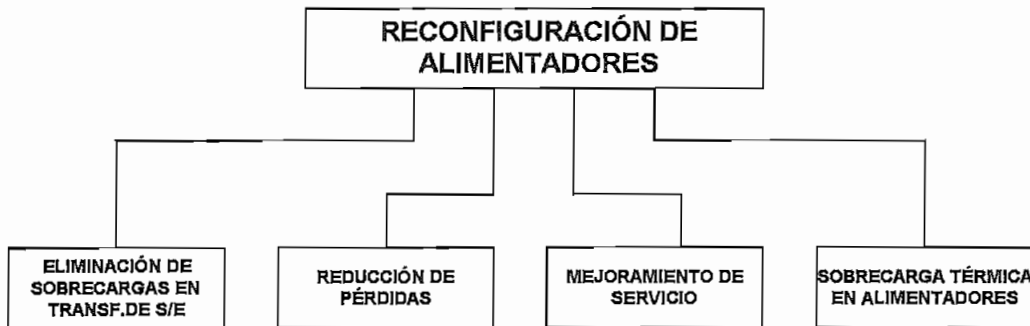


Figura N° 3.14. Soluciones ante la reconfiguración de primarios.

La reconfiguración de alimentadores debe tener en cuenta un conjunto de restricciones técnicas y operativas, citadas a continuación:

- Radiabilidad de los alimentadores.
- Restricciones que imponen las ecuaciones de flujos.
- Límites en la caída de voltaje.
- Límites en la capacidad de las líneas o de los transformadores.
- Límites en el número de operación de los equipos de corte y maniobra.
- Restricciones de recursos: Disponibilidad de personal y nivel de automatización

Debido a la característica radial de las redes de distribución, cuando ocurre una falla, los dispositivos de protección no sólo aíslan al elemento fallado, sino también a transformadores y clientes, los cuales, como se dijo anteriormente, pueden ser restaurados mediante la reconfiguración y transferencia de carga. El problema de la restauración se vuelve complejo, debido a la gran cantidad de alternativas de transferencia de carga, pues es función del número de aparatos de maniobra, por lo que se convierte en un gran problema combinatorial, sujeto a una serie de restricciones topológicas, eléctricas, operacionales y de recursos.

Básicamente el proceso de restauración se inicia con la activación de los dispositivos de protección en presencia de fallas que originen interrupciones, luego se deberá buscar la mejor solución de restauración, en primera instancia la falla debe ser localizada y aislada para luego determinar el conjunto de operaciones sobre los dispositivos de maniobra.

Desde el punto de vista matemático, el problema de la reconfiguración de alimentadores se caracteriza por:

- Problema multiobjetivo: Los objetivos pueden ser variados: restaurar la mayor carga posible, hacerlo en el menor tiempo posible, o restaurar cargas importantes, etc.

- Restringido: Presenta restricciones topológicas, eléctricas, operacionales, etc.
- No lineal: Intervienen flujos de potencia para su solución.
- No diferenciable: Existencia de variables discretas, Estado de seccionadores Abierto (0), Cerrado (1).
- Combinatorial: Es una de las principales complejidades del problema.

Actualmente, en el mercado existe una gran variedad de programas computacionales que nos permiten automatizar la reconfiguración de primarios y de ésta manera dar soluciones confiables en el menor tiempo posible.

3.5.1.3. Regulación de voltaje

Las empresas de distribución eléctrica generalmente tratan de mantener el voltaje de servicio dentro los niveles establecidos en las regulaciones y por ende minimizar los efectos del desbalance de voltaje.

A continuación se presenta las opciones para mejorar la regulación de voltaje:

1. Agregar reguladores de voltaje, los cuales ayudan al voltaje aparente V_l .
2. Añadir capacitores en serie para eliminar y bajar la impedancia inductiva (I_X).
3. Rediseñar los conductores de las líneas a secciones superiores para reducir la impedancia, Z .
4. Cambiar los transformadores de servicio a potencias mayores para reducir la impedancia, Z .
5. Añadir compensadores estáticos de var (voltio - amperios reactivos), los cuales realizarán el mismo propósito que los capacitores para rápidos cambios de cargas.

3.5.1.4. Compensador estático de voltio-amperios reactivos (VAR).

Para cargas no lineales, el desbalance de voltaje a la entrada puede ser corregido por medio de un compensador tiristor-estático-controlado (VAR), donde la corriente de la carga es balanceada al añadir elementos reactivos en paralelo con la carga.

Los compensadores estáticos pueden ayudar a regular el voltaje respondiendo muy rápidamente para suministrar o consumir potencia reactiva. Este compensador actúa con el sistema de impedancias para subir o bajar el voltaje. Existen dos tipos principales de compensadores estáticos de VAR para el uso común, como se muestran en la figura 3.15.

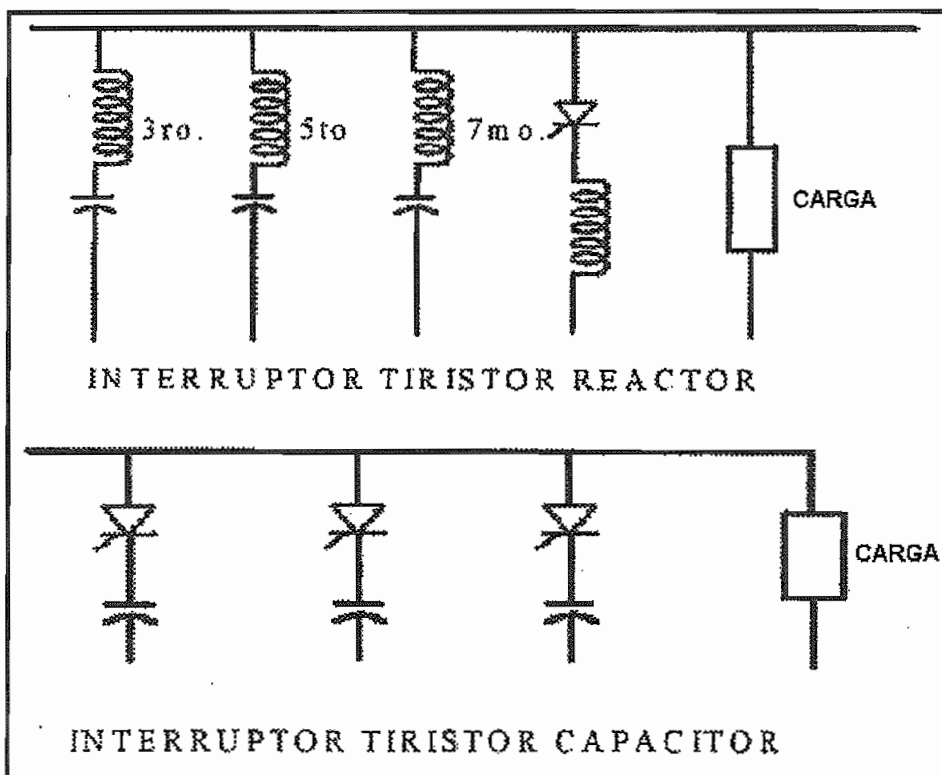


Figura 3.15 Configuración común de un compensador estático de var.

El esquema tiristor reactor controlado (thyristor-controlled reactor (TCR)) es probablemente el más común. Se emplea un banco de capacitores estable y fijo para suministrar potencia reactiva en adelanto, además un tiristor controla a una

inductancia que es una compuerta con varios valores para cancelar todo o una parte del efecto de la capacitancia. Los capacitores son frecuentemente configurados como filtros para limpiar la distorsión armónica causada por los tiristores.

Los interruptores tiristores capacitores operados por la conmutación de múltiples pasos de capacitores iguala los requerimientos de carga tan rápido como sea posible. Esta es una regulación más ordinaria que un TCR, pero es frecuentemente suficiente. Los capacitores son generalmente controlados totalmente de modo que no exista armónicos en las corrientes. Los puntos de conmutación son controlados de modo de que no exista transitorios por la conexión o desconexión de los capacitores.

3.5.1.5. Distribución balanceada de cargas

Actualmente, muchos hogares residenciales e instalaciones comerciales reciben, en sus entradas de servicio, las tres fases en una red de distribución de energía eléctrica de tres fases provista por la empresa eléctrica. En un entorno de distribución trifásico cada una de las fases proporciona uno o más circuitos derivados. La determinación de qué circuito o circuitos derivados conectar a cada una de las tres fases entrantes se hace por lo general una vez que la instalación está terminada. Por ejemplo, en una instalación residencial, diferentes circuitos derivados pueden suministrar a la cocina, la sala, habitaciones, etc. con electricidad. En un entorno comercial, diferentes circuitos derivados pueden suministrar la maquinaria, oficinas, etc. Un problema que surge frecuentemente es cómo distribuir de manera uniforme la energía eléctrica a través de las tres fases entrantes, proporcionadas por la empresa eléctrica, a todos los circuitos derivados.

A menudo, con el tiempo, la topología de la carga en una instalación cambiará, algunas veces drásticamente. Algunos circuitos derivados se convertirán más fuertemente cargados y otros cargados menos fuertemente, debido a, por

ejemplo, movimiento de maquinaria en un piso de la fábrica, la adición de un movimiento de electrodomésticos de gran consumo (es decir, refrigerador, estufa eléctrica, horno de microondas, etc.) en un hogar. Así, la carga en cada una de las tres fases entrantes también cambiará con el cambio de carga en los circuitos derivados.

Una red trifásica que se balanceó uniformemente en el inicio se puede haber desbalanceado con el tiempo. Una solución a este problema es reasignar cada uno de los circuitos derivados a una fase entrante para alcanzar una carga uniforme a través de las tres fases al recablear físicamente cada circuito derivado (Figura N° 3.16).

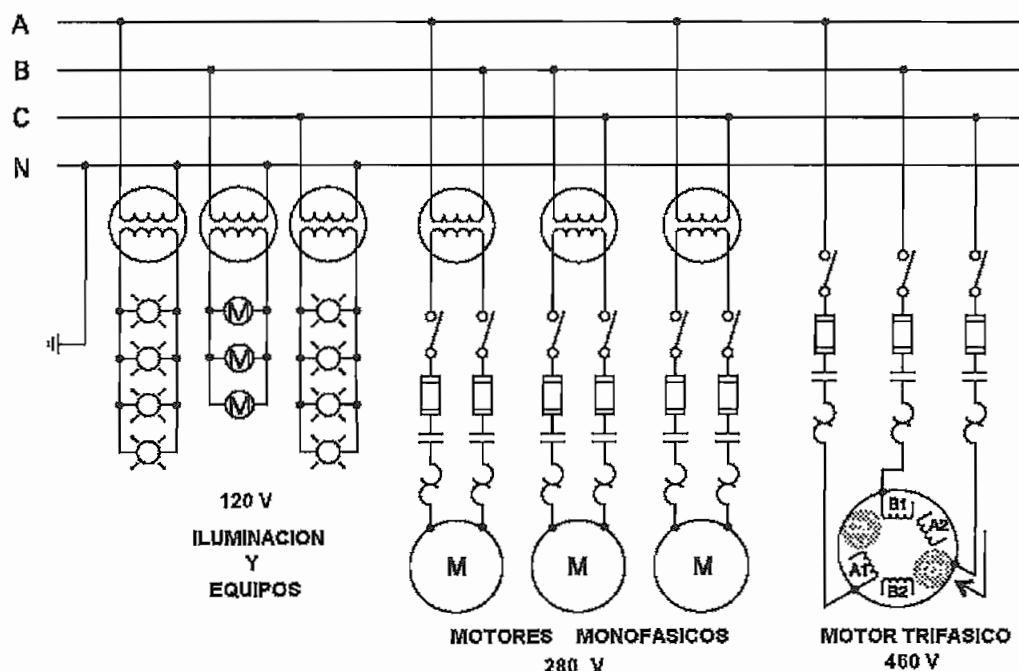


Figura N° 3.16. Cargas balanceadas en las tres fases

La recomendación para minimizar los problemas de cargas balanceadas es que todos los proyectos de electrificación deberán tener una planificación básica, que permita un desarrollo progresivo, dentro de la expectativa de crecimiento de la red eléctrica.

En un área donde exista la necesidad de implantación de redes nuevas, deberá ser efectuada una planificación básica, por medio del análisis de las condiciones locales, observando el grado de electrificación existente y áreas con características semejantes que tienen datos de carga. Por lo tanto, se deberá realizarse la estimación de la demanda (perfil) de las cargas existentes, mediante un registrador de energía.

A nivel del sistema de distribución se logra balancear las cargas, por medio de la reconfiguración de primarios, sin embargo, como se dijo anteriormente, mantener un sistema balanceado es virtualmente imposible, debido al cambio continuo de las cargas en la red eléctrica y que las cargas no son distribuidas uniformemente entre las tres fases.

3.5.2. TÉCNICAS PARA REDUCIR PROBLEMAS DE DESBALANCE DE VOLTAJE SOBRE EQUIPOS ELÉCTRICOS

Primero, dentro de una instalación eléctrica, todo el equipo que este sobrecargado debería ser corregido. Adicionalmente, filtros pasivos y compensadores estáticos (VAR) conectado en paralelo, similar a lo que se describió en la sección 3.5.1.4 para reducir el desbalance de voltaje sobre el sistema de potencia, puede ser usado para compensar el desbalance a la entrada de la instalación eléctrica del consumidor.

Además un regulador de voltaje puede ser usado para corregir bajo voltaje y sobrevoltaje, como también desbalance de voltaje.

Relés de protección especiales pueden ser usados para detectar el desbalance de voltaje y proteger al equipo de la degradación de los efectos del desbalance. Los relés son usualmente digitales y son disponibles con numerosas funciones. Típicamente, estos dispositivos son pequeños, relativamente baratos, con reseteo automático o manual, ofrecen diferentes programaciones en tiempo y seleccionar el límite del desbalance. También pueden ser conectados con activación de

alarma, activación de un circuito, o ambas a la vez cuando excede el límite de desbalance predeterminado. Añadiendo, estas versatilidades de los relés, pueden ser readecuados en el circuito de control del motor o en cualquier parte del sistema eléctrico de distribución.

Otro tipo son los relés de secuencia negativa de voltaje, el cual puede detectar desbalance entre las fases, y la inversión de las fases en la red del suministro eléctrico. Estos relés sienten anomalías solamente antes de la localización del circuito. Por lo tanto este tipo de relé no podría ser capaz de detectar problemas internos en el motor o en cargas aledañas, igualmente.

Por otra parte, la reducción de los efectos desfavorables del desbalance de voltaje sobre los ASDs, se puede lograr a través de rectificadores PWM (modulador de ancho de pulso).

3.5.2.1. Solución a los problemas de calidad de energía

Hay dos métodos para reducir los problemas de la calidad de la energía. El primer método es llamado condicionamiento de la carga, el cual asegura que los equipos que son menos sensitivos a disturbios eléctricos, permitan la operación aún bajo distorsiones significantes de voltaje. La otra solución es la instalación de sistemas condicionantes en línea que supriman o contrarresten los disturbios en el sistema de potencia.

Una flexible y versátil solución a los problemas de calidad del voltaje es ofrecido por los filtros pasivos y filtros activos de potencia.

3.5.2.1.1. Filtros

Como se explico anteriormente el problema del desbalance de voltaje se acentúa más cuando existen armónicos en la red eléctrica, por lo tanto hay que tomar en

cuenta algunos principios básicos para controlar los armónicos. En la actualidad hay diferentes tipos de supresores de armónicos que son usados para reducir la distorsión en el sistema de potencia. La opción para determinar el tipo de supresor de armónicos, debería ser en particular el índice técnico como también el económico.

La circulación de armónicos por la red tiene efectos muy nocivos tanto para el suministrador eléctrico como para el usuario de la red. Entre otros efectos, produce una distorsión en el voltaje de red haciendo que la calidad de la energía disminuya considerablemente. Además pueden producir numerosas distorsiones en aparatos de medida y telecomunicaciones e incrementan las pérdidas de potencia por las líneas al aumentar el valor de la corriente eficaz. Idealmente para evitar esta circulación de armónicos, la corriente demandada por los equipos debería ser senoidal y para evitar componentes reactivas, debería estar en fase con el voltaje. Pero actualmente pocos convertidores implementan un control de la corriente y producen una demanda de corriente discontinua que se aleja mucho de la senoidal deseada. Para evitar este problema en la red, organismos internacionales establecen una normativa (por ejemplo la norma IEC 1000-3-2) para controlar los armónicos producidos por equipos, limitando la cantidad máxima de armónicos que pueden demandar, en función de la clase de equipo y de la potencia de éste. De esta forma se hace necesaria una nueva orientación de los próximos equipos de potencia.

Para enfrentarse a este nuevo problema surgen distintos métodos para conseguir disminuir la cantidad de armónicos que estos equipos introducen en la red. Los más empleados en la actualidad son el uso de filtros pasivos y/o activos, y la sustitución del rectificador y el filtro por condensador por un convertidor PWM que además de controlar el voltaje de salida, controlan la corriente que demandan.

3.5.2.1.2. *Filtros pasivos y activos*

Para mantener las arquitecturas clásicas de alimentación de equipos basados en convertidores de potencia sin control de la corriente demandada aparecen la idea del uso de filtros pasivos y/o activos.

Los **filtros pasivos** están constituidos por elementos reactivos (bobinas y condensadores, ver figura N° 3.17) conectados en paralelo con la carga. Su gran ventaja es la simplicidad, fiabilidad y robustez de su diseño al estar compuesto de elementos pasivos. Pero también poseen numerosas desventajas, como son el gran tamaño de la bobina y el condensador, la pobre respuesta dinámica ante cambios en la carga, la gran influencia de la impedancia de red en el filtrado, la posibilidad de que aparezcan resonancias, la imposibilidad de eliminar más de un número limitado de armónicos.

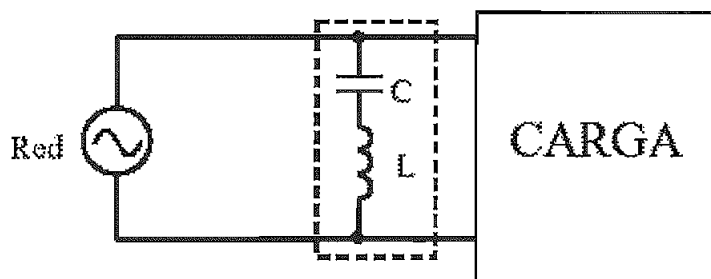
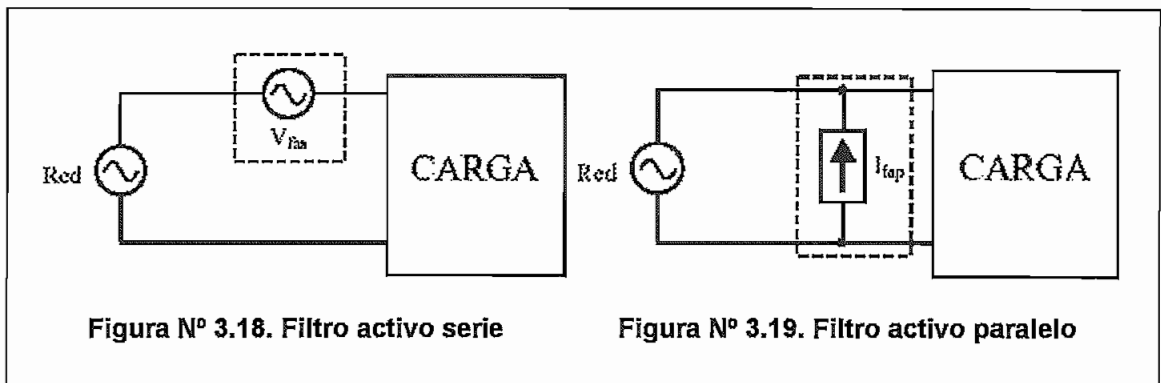


Figura N° 3.17. Ejemplo de filtro pasivo

Los **filtros activos** se componen de elementos pasivos y transistores gobernados por circuitos de control (Figuras N° 3.18 y 3.19). En realidad se trata de convertidores que filtran la corriente de entrada. Estos tipos de filtros son capaces de filtrar prácticamente la totalidad de los armónicos de baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos. En contra tienen un peor rendimiento y generan un rizado de corriente de alta frecuencia. Según la posición en donde vaya colocado, existen dos tipos de filtros: activo serie y activo paralelo. Los filtros activos serie actúan como fuentes de voltaje conectados en serie antes de la carga proporcionando una muy alta impedancia a los armónicos y casi nula a la frecuencia de red. Por otro lado, los filtros activos paralelo actúan como una

fuente de corriente en paralelo con la carga inyectando o absorbiendo corriente según se precise. La ventaja de los filtros serie es que manejan una menor potencia aunque producen ligeras distorsiones en el voltaje. Pero por otro lado los filtros paralelo tienen la enorme ventaja de tener una gran modularidad ya que pueden conectarse sin necesidad de cortar la línea y además se pueden colocar varios módulos en paralelo para poder corregir los armónicos de cargas de mayor potencia.



Existe un tercer tipo de filtro que presenta una combinación de los filtros activo y pasivo: el filtro híbrido (Figura N° 3.20). En este tipo de filtro se coloca el filtro pasivo para filtrar los armónicos más importantes y lograr así que el filtro activo maneje menor potencia y para filtrar las componentes de alta frecuencia que el filtro activo no puede eliminar.

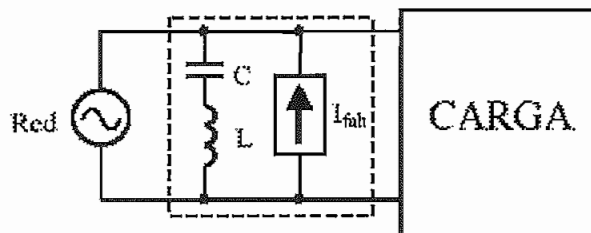


Figura 3.20. Ejemplo de filtro híbrido

Actualmente, estos filtros son basados en convertidores PWM y conectados en serie o en paralelo en bajo y medio voltaje del sistema eléctrico de distribución. Los filtros activos de potencia pueden ejecutar una o más de las funciones requeridas para compensar el sistema de potencia y mejorar la calidad de energía eléctrica. Su rendimiento depende de los valores de potencia y velocidad

de respuesta. La selección del tipo de filtro activo que mejore la calidad del suministro de energía depende del origen del problema, como se puede observar en la tabla N° 3.4.

CONECCION FILTRO ACTIVO	CARGA SOBRE FUENTE AC	FUENTE AC SOBRE CARGA
PARALELO	-Filtrar armónicos de corriente -Compensación de corriente reactiva -Desbalance de Corriente -Flicker	
SERIE	-Filtrar armónicos de corriente -Compensación de corriente reactiva -Desbalance de Corriente -Flicker -Desbalance de Voltaje	-Voltaje sag/swell -Desbalance de Voltaje -Distorsión de Voltaje -Interrupción de Voltaje -Flicker -Hendiduras de Voltaje(notching)

TABLA N° 3.4. Solución de Filtros Activos a problemas de calidad de energía.

3.5.2.2. Filtro activo serie para compensar armónicos de corriente y simultáneamente desbalance de voltaje

Normalmente, los filtros activos tienen un estado que proponen la compensación no-lineal de cargas balanceadas en las tres fases. Esta es una situación típica en las industrias del sistema eléctrico de distribución, donde la mayoría de las cargas son balanceadas y conectadas a las tres fases del sistema de potencia. Sin embargo, en la zona urbana, rural o comercial del sistema de distribución, la

mayoría de las cargas son monofásicas y desbalanceadas, generando una gran cantidad de armónicos de corriente. Estas características que presentan las corrientes armónicas retornan por el conductor del neutro, sobrecalentando los transformadores de distribución y el cable del neutro.

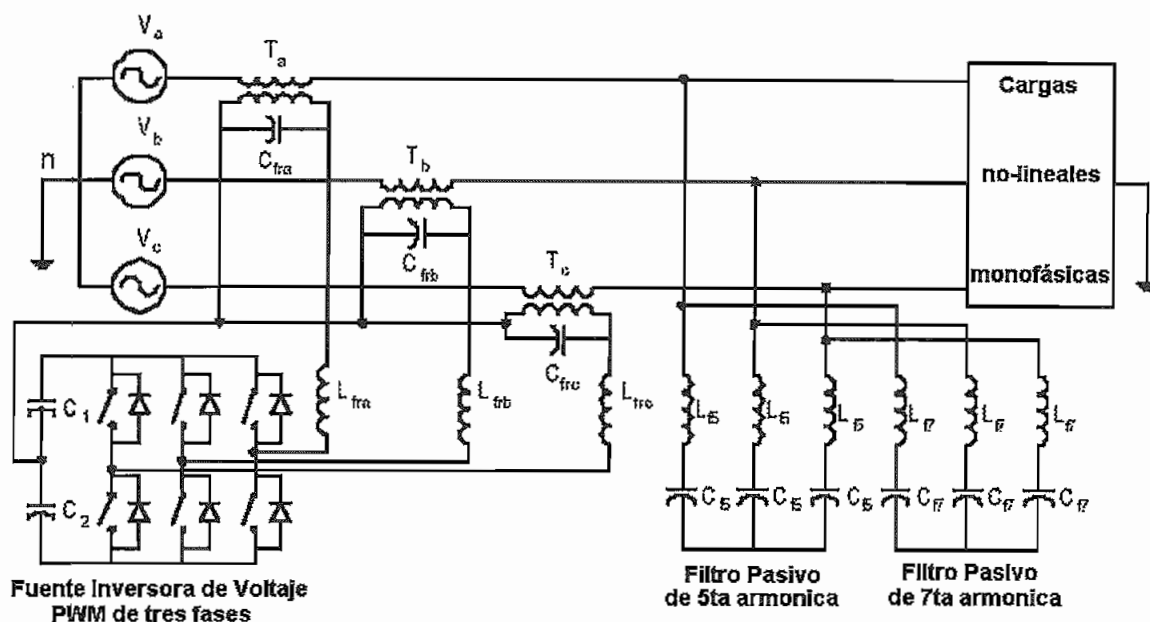


Figura N° 3.21. Topología del filtro activo serie implementado con un inversor PWM trifásico.

La topología del filtro activo serie es presentado en el grafico N° 3.21. La configuración propuesta está basado en una fuente inversora de voltaje PWM trifásica conectada en serie con las líneas de potencia por tres transformadores monofásicos. Para permitir la compensación del armónico de corriente, un filtro paralelo LC debe ser conectado entre la carga no-lineal y los transformadores en serie (Figura N° 3.21). La compensación de la corriente armónica y el desbalance de voltaje son logradas por la generación apropiada de la forma de onda del voltaje con el inversor PWM trifásico (Figura N° 3.21). Aunque hay un gran número de artículos que tratan con el análisis y diseños de los filtros activos de potencia conectados en serie, los filtros activos en serie presentados a continuación, tiene las siguientes diferencias, enfocadas de la siguiente manera:

- (a) Este filtro es implementado con un inversor trifásico de voltaje PWM,
- (b) El filtro activo es conveniente para compensar el sistema trifásico con tres y cuatro conductores (tres fases más el neutro), así el filtro puede compensar las componentes de las armónicas de corriente generadas por cargas trifásicas y cargas monofásicas,
- (c) Los filtros activos en serie es capaz de compensar simultáneamente el desbalance de voltaje en los terminales de la carga y componentes armónicas de corriente,
- (d) Para la compensación de la secuencia cero de la componente armónica generada por las cargas monofásicas, la corriente que fluye a través del cable del neutro es significativamente reducida, y la distorsión armónica total en la forma de onda de la corriente de línea son mejoradas.

Puesto que el desbalance de voltaje es causado principalmente por las componentes fundamentales, el filtro activo serie puede compensar la componente de secuencia negativa y componente de secuencia cero de los voltajes de la carga y corrientes armónicas simultáneamente. Además, la componente de secuencia cero de las corrientes armónicas que fluyen por el conductor del neutro son compensadas sin modificar la correspondiente corriente del neutro.

3.5.2.2.1. Principio de operación

Los filtros activos serie compensan las corrientes distorsionadas del sistema causadas por cargas no-lineales mediante la imposición de una alta impedancia en la trayectoria de los armónicos de corriente, el cual obliga que las corrientes de alta frecuencia fluyan a través del filtro pasivo LC conectado en paralelo con la carga. La alta impedancia impuesta por el filtro activo serie es creado por la generación de voltajes de la misma frecuencia que las componentes armónicas de corriente que necesitan ser eliminadas. El desbalance de voltaje es corregido

por la compensación de la frecuencia fundamental de las componentes de secuencia negativa y cero del sistema.

La topología del circuito de potencia del filtro activo serie está compuesto de un inversor de voltaje (PWM trifásico), en segundo lugar filtros resonantes LC, un transformador de corriente, y el secundario un filtro de rizado (Figura N° 3.21). Las principales características de cada componente son descritos a continuación.

3.5.2.2.2. Fuente inversora de voltaje PWM

Puesto que el filtro activo serie propuesto es para compensar el desbalance de voltaje y los armónicos de corriente simultáneamente, el valor de la potencia del PWM puede ser obtenido al calcular la potencia aparente generada en la bobina del primario del transformador serie.

El voltaje reflejado por la bobina es definida por la siguiente expresión:

$$V_{serie} = \sqrt{K_1^2 \sqrt{\sum_{k \neq 1} I_{sk}^2} + K_2^2 (V_2 + V_0)^2} \quad (3.11)$$

donde V_{serie} es el voltaje RMS por la bobina del primario del transformador serie. K_1 depende de los valores del filtro LC, mientras que K_2 es igual a uno. La corriente que fluye a través de la bobina del primario del transformador serie, debido a las corrientes armónicas (ecuación 3.11), puede ser obtenida por el circuito equivalente mostrado en la figura N° 3.21.

$$I_{sk} = \frac{Z_{fk} I_{lk}}{Z_{fk} + Z_{sk} + K_1} \quad (3.12)$$

donde $V_{serie} = -K_1 I_{sk}$. La componente fundamental de la corriente de la bobina del primario, depende de la amplitud de la componente de secuencia negativa y cero de la fuente de voltaje, debido al sistema desbalanceado.

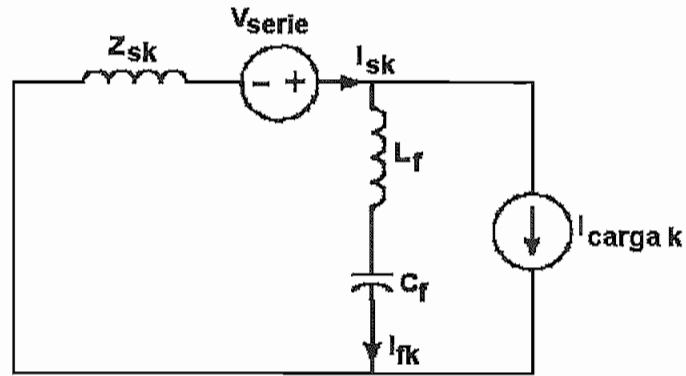


Figura N° 3.21. Circuito equivalente del filtro activo serie para componentes de armónicos

3.5.2.2.3. Transformador serie

La potencia aparente total requerida por cada transformador serie es $1/3$ del total de la potencia aparente del inversor. La relación del número de vueltas del transformador serie es especificada conforme el diseño del filtro activo. En general, la relación del número de espiras del transformador debe ser alta para reducir la amplitud de la corriente de salida del inversor y para reducir el voltaje inducido por la bobina del primario. También, la selección de la relación de transformación influye en el rendimiento del filtro de onda conectado a la salida del inversor PWM.

3.5.2.2.4. Filtro de rizado en el secundario

El diseño del filtro de rizado conectado en paralelo a la bobina del secundario del transformador serie depende de la relación del número de espiras del transformador serie. El filtro de rizado es conectado a la salida del inversor evitando la inducción del rizado de alta frecuencia generado por el inversor PWM, conmutando la bobina del primario del transformador serie. De esta manera, el voltaje aplicado en serie con el sistema de potencia corresponde a los componentes requeridos para compensar el desbalance de voltaje y las corrientes armónicas. El circuito equivalente del filtro de rizado es mostrado en la figura N° 3.22.

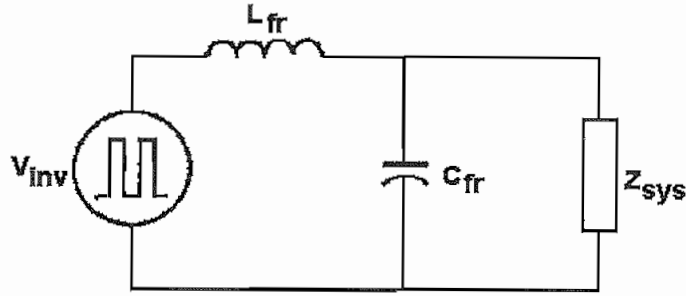


Figura N° 3.22. Circuito equivalente del filtro de rizado

El filtro de rizado debe ser diseñado para transmitir la frecuencia del inversor PWM. Para calcular C_{fr} y L_{fr} del sistema equivalente, la impedancia que transmite la frecuencia, Z_{sys} , reflejada por la bobina del secundario debe ser conocida. Esta impedancia es igual a :

$$Z_{sys(secundario)} = a^2 \cdot Z_{sys(primario)} \quad (3.13)$$

donde a es la relación del número de espiras.

Para transmitir la frecuencia, el siguiente criterio de diseño debe ser cumplido:

$X_{Cfr} \ll X_{Lfr}$, para asegurar que se transmita la frecuencia, el voltaje de salida del inversor debe pasar por L_{fr} .

X_{Cfr} y $X_{Lfr} \ll Z_{sys}$, para asegurar que el voltaje se divida entre L_{fr} y C_{fr} .

3.5.3. RECOMENDACIONES PARA ASEGURAR LA CALIDAD DE ENERGÍA

La estrategia adecuada para asegurar la calidad de energía de acuerdo con el Emerald Book de la IEEE (Power and Grounding Sensitive Electronic Equipment) considera los siguientes puntos en orden de prioridad:

- Conexión a tierra, empalmes y alambrado de acuerdo a las normas establecidas.
- Filtros, eliminación de ruido transitorio y picos de voltaje a través de SPD (Surge Protective Device) y TVSS (Transient Voltage Surge Suppressor).
- Reguladores de Voltaje.
- Interruptores estáticos de transferencia, generadores de emergencia y UPS (Uninterruptible Power Supply).