

García A., Gervasio

"ANÁLISIS DE FALLAS EN SISTEMAS
INDUSTRIALES"

Tesis de Magíster en Ciencias de la
Ingeniería

1993

Esta versión en pdf está incompleta, faltan
figuras.

A mi esposa Fely,
mi hermano Emilio,
y a toda mi familia
por su confianza y cariño.

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial agradezco al Profesor Supervisor Dr. Hugh Rudnick que con su calidad humana y valiosa colaboración, alentó al autor en la conclusión del presente trabajo.

A la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile por brindarme la oportunidad de seguir estudios de Post-grado y por el respaldo brindado.

A la Universidad Mayor de San Andrés de La Paz, Bolivia por el valioso y alentador apoyo prestado en la continuación de mis estudios.

INDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE GENERAL	iv
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
I. INTRODUCCION	1
1.1 Necesidad de Estudios en Sistemas Eléctricos Industriales Modernos	1
1.2 Necesidades Computacionales en Sistemas Eléctricos Industriales	2
1.3 Objetivos Principales	4
1.4 Organización del Trabajo	4
1.5 Revisión Bibliográfica	6
II. MODELACION DE LA RED	12
2.1 Introducción	12
2.2 Fuente de Suministro	13
2.3 Máquinas Síncronas	14
2.3.1 Cortocircuito trifásico en bornes de una máquina síncrona con enrollados amortiguadores	17
2.3.2 Generadores síncronos	19
2.3.3 Motores y condensadores síncronos	21
2.4 Motores de Inducción	22
2.4.1 Introducción	22
2.4.1 Motores de inducción con contribuciones prolongadas	23
2.5 Cargas Rectificadas	25
2.5.1 Introducción	25
2.5.2 El Puente rectificador trifásico	26
2.5.3 Representación del modelo rectificador	28
2.6 Inversores Estáticos Trifásicos	38
2.6.1 Introducción	38
2.6.2 Tipo de Inversor	42
2.6.3 Operación del Convertidor en Condiciones de Falla	46
2.7 Transformadores	52
2.8 Líneas	52
2.9 Iluminación	53

	Página
III. ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CALCULO DE FALLAS EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES	54
3.1 Introducción	54
3.2 La Matriz Impedancia de Barras en el Cálculo de Fallas	55
3.3 Triangularización de Matrices	58
3.4 Tipos de Fallas	59
3.5 Simplificaciones en el Cálculo de Fallas	60
3.6 Redes y Matrices de Secuencia	61
IV. CALCULO DE CORTOCIRCUITOS SEGUN NORMAS ANSI/IEEE	65
4.1 Introducción	65
4.2 Norma C37.010 - 1979	65
4.3 Norma C37.05 - 1979	70
4.4 Norma C37.13 - 1981	70
4.5 Factores de Multiplicación en el Cálculo de Corrientes de Cortocircuito de Interrupción para Interruptores de Alto Voltaje	73
4.6 Contribución a la Falla de Motores Grandes	75
4.6.1 Introducción	75
4.6.2 Procedimiento de cálculo	76
4.7 Cálculo del Efecto de Cargas Rectificadas sobre el Sistema	81
4.8 Cálculo del aporte de inversores sobre el sistema	83

	Página
V. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL	87
5.1 Características Generales	87
5.2 Lenguaje Utilizado	87
5.3 Componentes del Programa Computacional	88
5.4 Introducción de Datos	90
5.5 Descripción de los Programas	92
5.5.1 Programa CC30ANSI	92
5.5.2 Programa CC10ANSI	97
5.5.3 Programa CC30CONT	100
5.5.4 Programa CC30CR	102
5.5.5 Programa CC30INV	104
 VI. APLICACION DE LOS MODELOS	 107
6.1 Introducción	107
6.2 Validación del Programa Computacional	107
6.3 Estudios y Análisis Realizados para el Sistema Industrial IEEE Std. 141 - 1976	112
6.3.1 Niveles de falla trifásica	113
6.3.2 Contribución individual de motores grandes	120
6.3.3 Aumento gradual de motores al sistema industrial	124

	Página
6.3.4 Sistema industrial IEEE Std. 141 con carga rectificadora	126
6.3.5 Sistema industrial IEEE Std. 141 con inversor	133
6.4 Sistema General Electric Co.	142
6.4.1 Consideraciones Generales	142
6.4.2 Falla Monofásica en Alta Tensión	144
6.5 Sistema Eléctrico Industrial de 22 Barras	146
VII. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	150
7.1 Conclusiones	150
7.2 Desarrollo Futuro	153
REFERENCIAS	155
ANEXOS	161
ANEXO A: Factorización de Matrices, Bi-factorización	162
ANEXO B: Fuentes de Parámetros X, X/R, Reactancias de Secuencia y Factores de Multiplicación ANSI	167
ANEXO C: Curvas Factores de Multiplicación versus Relación X/R	174
ANEXO D: Método de Interpolación Spline Cúbica Natural	178
ANEXO E: Tabla de Valores Nominales Preferidos para Interruptores según Normas ANSI/IEEE	184
ANEXO F: Características, Datos de los Sistemas de Estudio	192
ANEXO G: Ecuaciones Generales del Análisis de Fallas	205
ANEXO H: Solución del Sistema de Ecuaciones Diferenciales	213

INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla II-1	Modos de operación del rectificador	36
Tabla IV-1	Factor multiplicador para interruptores de baja tensión	72
Tabla IV-2	Tiempos mínimos de separación del contacto de interruptores	74
Tabla VI-1	Comparación de niveles de cortocircuito trifásico	110
Tabla VI-2	Resultados de niveles de cortocircuito trifásico en barras - Programa CC30ANSI	114
Tabla VI-3	Voltajes de barra y corrientes por rama para falla trifásica en barra 4	116
Tabla VI-4	Comparación de nivel de cortocircuito en barra 4 con las capacidades de un interruptor	119
Tabla VI-5	Cortocircuito trifásico con la contribución de motores	121
Tabla VI-6	Porcentaje de contribución de motores mayores a 1000 HP	123
Tabla VI-7	Adición subsecuente de motores al sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976	125
Página		
Tabla VI-8	Datos y resultados de falla trifásica en el sistema industrial con carga rectificada	128
Tabla VI-9	Porcentaje de variación de voltajes de barra del sistema industrial con carga rectificada	130
Tabla VI-10	Datos y niveles de cortocircuito trifásico para el sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976 con inversor	135
Tabla VI-11	Porcentaje de incremento de niveles de falla	139
Tabla VI-12	Niveles de cortocircuito para una falla monofásica a tierra	144
Tabla VI-13	Resultados para una falla trifásica en el sistema industrial de 22 barras	148

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Circuito equivalente de una máquina sincrónica	15
Figura 2.2	Uso de la reactancia subtransitoria, transitoria y permanente de la máquina sincrónica durante un cortocircuito simétrico	16
Figura 2.3	Circuito equivalente de un generador sincrónico	20
Figura 2.4	Rectificador Puente de Graetz	27
Figura 2.5	Potencia y voltaje en la barra de un rectificador	28
Figura 2.6	Modelo básico del rectificador	29
Figura 2.7	Modelo dinámico del rectificador	31
Figura 2.8	Formas de ondas de voltaje que muestran los diferentes modos de operación de un rectificador	35
Figura 2.9	Angulo de traslapeo versus tiempo mostrando el comportamiento de un rectificador en condiciones de operación anormal	36
Figura 2.10	Circuito equivalente del rectificador en el modo 4 de operación	37

	Página
Figura 2.11 Diagrama esquemático de un sistema industrial con inversor, en condiciones de falla	41
Figura 2.12 Convertidores en conexión "back-to-back" para flujo de potencia bidireccional	43
Figura 2.13 Esquema de un rectificador-inversor basado en moduladores PWM con corriente controlada	44
Figura 2.14 Control de banda de histéresis h en convertidores PWM con corriente controlada	45
Figura 2.15 Esquema del convertidor dando la respuesta a una falla del sistema	48
Figura 2.16 Circuito equivalente del motor de inducción en estado subtransitorio	48
Figura 3.1 Red general de n -puertas	57
Figura 3.2 Puertas de acceso trifásico	61
Figura 3.3 Redes de secuencia para el análisis de fallas	63
Figura 4.1 Equivalente Thévenin vista desde el rectificador	82
Figura 4.2 Diagrama esquemático del convertidor acoplado a la red para una condición de falla	84

		Página
Figura 5.1	Diagrama general de bloques del programa principal CC30ANSI	91
Figura 5.2	Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de cortocircuitos trifásicos en régimen momentáneo y de interrupción	93
Figura 5.3	Determinación de Zeq mediante una interrupción para ejecutar un programa realizado en Fortran, en el cálculo de cortocircuitos trifásicos	96
Figura 5.4	Diagrama de bloques para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico a tierra (Programa CC10ANSI)	98
Figura 5.5	Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en régimen momentáneo y de interrupción	99
Figura 5.6	Diagrama de bloques para el cálculo de corrientes de falla trifásica en régimen momentáneo considerando la contribución de motores	101
Figura 5.7	Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de los voltajes de barra post-falla en un sistema con carga rectificadora	103

		Página
Figura 5.8	Diagrama de bloques utilizado para el cálculo de corrientes de falla de un sistema con inversor	105
Figura 6.1	Diagrama unilineal del sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976	109
Figura 6.2	Niveles de cortocircuito trifásico en [p.u.] del sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976	115
Figura 6.3	Voltajes de barra para un cortocircuito trifásico en la barra 4, sistema IEEE Std. 141 - 1976	118
Figura 6.4	Corrientes por rama para un cortocircuito trifásico en la barra 4, sistema IEEE Std. 141	118
Figura 6.5	Niveles de cortocircuito en [p.u.] considerando la contribución de motores mayores a 1000 HP	122
Figura 6.6	Niveles de cortocircuito en [kA] considerando la contribución de motores mayores a 1000 HP	122
Figura 6.7	Variación de los niveles de falla ante el incremento del número de motores	126

		Página
Figura 6.8	Diagrama unilineal del sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976, con carga rectificadora	127
Figura 6.9	Voltajes de barra del sistema bajo estudio con y sin carga rectificadora, falla trifásica en barra 4	131
Figura 6.10	Efecto de la variación de la reactancia de conmutación X_c para una falla trifásica en la barra 4	132
Figura 6.11	Efecto de la variación de la reactancia de conmutación X_c para una falla trifásica en la barra 13	133
Figura 6.12	Diagrama unilineal del sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976, con inversor	134
Figura 6.13	Formas de onda de las corrientes instantáneas del convertidor ante una falla en una barra del sistema	137
Figura 6.14	Niveles de falla en [p.u.] del sistema industrial IEEE Std. 141 con y sin inversor	138

	Página
Figura 6.15 Niveles de falla en [kA] del sistema industrial IEEE Std. 141 con y sin inversor	139
Figura 6.16 Variación de niveles de falla debido a convertidores que alimentan distintas potencias de motor	140
Figura 6.17 Porcentajes de variación de niveles de falla respecto del sistema sin convertidor para diferentes potencias de motor	141
Figura 6.18 Niveles de falla para distintas relaciones X/R del lado rectificador	142
Figura 6.19 Diagrama unilineal del sistema industrial General Electric Co.	143
Figura 6.20 Diagrama unilineal del sistema industrial de 22 barras	147

R E S U M E N

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un algoritmo computacional interactivo orientado a realizar un estudio de cortocircuitos en sistemas de distribución industrial con la presencia de equipos rotatorios, cargas rectificadas e inversores.

Se presta especial interés al aporte de corrientes de falla provenientes de máquinas rotatorias conectadas a la barra fallada; a la influencia de cargas rectificadas sobre el sistema bajo condiciones de falla y al efecto de inversores estáticos sobre los niveles de cortocircuito del sistema.

Se construyó un Programa computacional en Lenguaje Turbo Pascal versión 6.0 para el cálculo de cortocircuitos. Tiene incorporado una conversión interna a valores por unidad.

Se presenta, finalmente, la evaluación del programa computacional a través de distintos estudios realizados al Sistema IEEE Std. 146 - 1976 y la aplicación a otros dos sistemas de prueba.

Como resultado de este trabajo, se dispone de una herramienta de asistencia computacional eficaz y adecuada en el área del análisis de fallas en sistemas industriales.

A B S T R A C T

This thesis develops an interactive computational algorithm to study short-circuit levels for industrial power systems with the presence of rotative machines, rectifier loads and static inverters.

Special attention is given to three elements: the short-circuit current contributions by large motors connected to a faulted bus, the influence of rectifier loads on the industrial power system after a fault, and the effect of static inverters on the short-circuit levels.

A computer program in Turbo Pascal 6.0 was written in order to calculate short-circuit currents. It has a built-in per-unit conversion calculation.

Finally, the computer program was validated through different studies with the Power Industrial System IEEE Std. 146 - 1976 and by the application to other two test systems.

As a result of this work, a promising tool for Computer Aided Fault Analysis in Industrial Power Systems is now available.

I. INTRODUCCION

1.1 Necesidad de Estudios en Sistemas Eléctricos Industriales Modernos

El continuo crecimiento de plantas industriales por el aumento en su producción se realiza en forma paralela al aumento de potencia instalada de los equipos, principalmente en motores.

Un Sistema Eléctrico Industrial (SEI) moderno requiere tener características técnicas de funcionamiento aceptables, algunas de las cuales pueden ser: seguridad, confiabilidad, regulación de voltaje, calidad de energía eléctrica, etc.

Tal situación requiere la realización de estudios eléctricos en Sistemas Industriales, tanto en la etapa de planificación, como en la operación, ampliación y mantenimiento.

Un aspecto que interesa es el dimensionamiento de equipos de protección, particularmente interruptores, ante la eventualidad de una falla, considerando la influencia de equipos rotatorios (motores).

Por otro lado, la introducción de nuevas tecnologías en los sistemas eléctricos industriales, ha implicado la necesidad de enfrentar nuevos problemas (Love, 1990), tales como la inyección de armónicas en la red a través de inversores estáticos, que afectan notablemente la calidad de la energía eléctrica.

A todo esta problemática se suma la existencia de cargas que necesitan condiciones específicas de operación, tales como: requerimientos de partida de grandes motores; cargas sensibles (computadores, equipos especiales de laboratorio) y otras cargas no comunes que requieren un alto grado de confiabilidad en el suministro de energía eléctrica.

Por último, el tamaño de los sistemas eléctricos industriales implica manejar una gran cantidad de datos para los estudios, indicando la conveniencia de construir esquemas de bases de datos que apoyen la realización de cálculos.

1.2 Necesidades Computacionales en Sistemas Eléctricos Industriales

La tendencia al uso de la tecnología del computador para aplicaciones en Sistemas Eléctricos de Potencia (Denny, 1988) es creciente; en la Planificación, Operación y Mantenimiento; en la Administración de la Carga por el lado de la Demanda; en la Ingeniería de Diseño (CAD) entre otros, aplicaciones que contribuyen a que las Empresas Eléctricas estén aptas para proveer energía eléctrica con la calidad necesaria que requieren diferentes tipos de consumidores a un razonable costo.

Con la tendencia a la automatización de Sistemas de Distribución (Sistemas SCADA) y la incorporación de equipos nuevos: Centros de Control de Motores, Tableros de Distribución Industrial provistos de equipos de monitoreo y control remoto, se presentan desafíos adicionales en la necesaria readaptación de los Sistemas Eléctricos Industriales (Kennedy y Rickey, 1989).

La aplicación del computador al estudio y análisis de Sistemas Eléctricos se ha orientado fundamentalmente al análisis de sistemas grandes interconectados de transmisión y distribución de energía eléctrica y muy poco al estudio de sistemas con cargas predominantemente industriales.

El presente trabajo pretende dar una aplicación y mostrar que el ahorro del tiempo empleado en la manipulación de datos, puede representar beneficios para la Empresa Eléctrica.

1.3 Objetivos Principales

Debido a la importancia que adquiere el estudio de sistemas eléctricos industriales, el presente trabajo persigue los siguientes objetivos fundamentales :

- i)** Contribuir con una herramienta de análisis, para ser utilizada en estudios de sistemas eléctricos industriales.
- ii)** Desarrollar un algoritmo computacional interactivo orientado a realizar un estudio de cortocircuitos en sistemas de distribución industrial con la presencia de equipos rotatorios, cargas rectificadas e inversores.

1.4 Organización del Trabajo

En este primer capítulo se introduce la problemática general a realizar en el trabajo. Se presentan los objetivos y se realiza una revisión bibliográfica, donde se analizan soluciones al problema planteados por otros autores.

En el capítulo II se presenta aspectos relacionados con la modelación de la red, principalmente de aquellas que contribuyen a la corriente de cortocircuito. También se describe la modelación de cargas rectificadas y equipos convertidores compuestas por un rectificador e inversor.

En el capítulo III se presentan aspectos generales sobre métodos de solución al problema de cálculo de fallas utilizando la matriz de impedancia de barra. Se formula alternativas de su construcción tendientes a reducir el esfuerzo computacional.

En el capítulo IV se plantea los algoritmos del cálculo de cortocircuitos según las normas ANSI/IEEE. A continuación se describe el algoritmo que considera la contribución de corrientes de cortocircuito por motores mayores a 1000 HP. Finalmente se plantea las ecuaciones para determinar la influencia de convertidores unidireccionales y bidireccionales conectados al sistema.

En el capítulo V se dan las razones que se consideraron para seleccionar el lenguaje computacional que se utilizó en este trabajo. Luego se muestra la estructura general de los programas computacionales que se desarrollaron.

En el capítulo VI se entrega la aplicación de los algoritmos computacionales a través de distintos estudios realizados al Sistema IEEE Std. 141 - 1976 y la aplicación a otros dos, denominados, Sistema General Electric Co. de 5 barras y Sistema Industrial de 22 barras.

En el capítulo VII se presentan las conclusiones del trabajo y se formulan desarrollos futuros relacionados con la temática del análisis de fallas en sistemas industriales.

1.5 Revisión Bibliográfica

Se han reportado en la literatura diversos estudios realizados en el ámbito del análisis de fallas en Sistemas Eléctricos Industriales. A continuación citaremos algunos de ellos:

ASDI (Valenzuela et. al., 1987), desarrollan un programa que incluye cálculos de fallas en alta, media y baja tensión, cálculo de reactor limitador de corriente de falla; flujo de carga, regulación de tensión y partida de motores entre otros. El programa está implementado para un VAX-11.

Los datos específicos para el estudio de cortocircuitos son solicitados en [p.u.] y referidas a una base propia. Para el caso de motores solo se solicita la impedancia subtransitoria y el programa determina internamente las impedancias a considerar en los ciclos momentáneo y de interrupción.

El estudio de cortocircuitos está basado en las recomendaciones dadas por las normas ANSI/IEEE: C37.010-1979, C37.5-1975, C37.13-1973, más conocido como el método E/X corregido por decremento CA y CC. Se considera el cálculo de falla trifásica en alta y baja tensión; y falla monofásica en alta tensión. Se calculan corrientes para régimen momentáneo y de interrupción, simétricas y asimétricas.

El cálculo de las corrientes y voltajes de falla se hace por el método de la matriz de cortocircuito. Dependiendo del tipo de falla que se está evaluando se forma la matriz de admitancia respectiva y se resuelve el sistema.

Vass et. al. (1979) presentaron un programa de diseño y análisis de sistemas industriales denominado ASDOP. Se efectúa estudios de cortocircuitos, flujos de carga, partida de motores.

El programa realiza internamente la conversión de datos a por unidad, referidos a una base común; permite el cambio, borrado y adición de datos. Asimismo para identificar los equipos, líneas y una serie de elementos de la red que esta siendo modelada utiliza un código de datos compuesto por números y letras. Para el cálculo de cortocircuitos y flujos de carga se emplea la matriz **Z**.

En relación al estudio de cortocircuitos se emplea la estructura de régimen simétrica para Interruptores divididas en dos clases: Alta Tensión (AT) y Baja Tensión (BT). También

toma en cuenta la contribución a la falla de motores.

Los cálculos en Alta Tensión y Baja Tensión se realizan empleando el método E/X corregido por decremento CA y CC, tomando en cuenta que en Baja Tensión no se desprecia la resistencia al cortocircuito, por lo que se emplea impedancias complejas.

Estudios recientes buscan mejorar métodos del cálculo de fallas. Simpson (1986), desarrolla una metodología de cálculo práctico para la determinación de corrientes de cortocircuitos en Sistemas Eléctricos Industriales en Alta y Baja Tensión sobre la base de algunas suposiciones y aproximaciones tendientes a simplificar el problema de cálculo.

Incluye diagramas de flujo y cálculos para hallar las corrientes de cortocircuito momentánea y de interrupción, relaciones matemáticas que deben ser empleadas para el cálculo de factores multiplicadores aplicados a las impedancias subtransitorias de los motores grandes, tanto de inducción como sincrónicas; y el cálculo de sus respectivas contribuciones a la corriente de cortocircuito.

La obtención de los parámetros del sistema eléctrico industrial es idéntica a la realizada en base a las normas ANSI/IEEE.

Por otra parte, hay estudios que se orientan a simplificar los métodos de cálculo (Huening, 1982). Luego de describir la natural contribución de corrientes de cortocircuito de motores de inducción y algunas técnicas de cálculo, se examina métodos simplificados que toman en cuenta contribuciones de corrientes de cortocircuitos descritos por la Norma ANSI/IEEE C37.010 y C37.5 .

La simplificación consiste en que el decaimiento de la componente AC de la corriente de cortocircuito, se efectúa solo por el aumento de la impedancia subtransitoria del motor, "Z", conforme pasa el tiempo después de la falla. Dichos factores, tanto para Alta Tensión como Baja Tensión, son dados de acuerdo a la potencia nominal del motor y para cada rango de tiempo: ciclo momentáneo y de interrupción.

En contraparte, otros estudios tienden a salir del método tradicional de cálculo.

Dunki et. al. (1988), presentan una comparación entre dos procedimientos de cálculo efectuados, uno según la norma ANSI/IEEE, y el otro un procedimiento de cálculo dinámicamente más riguroso aprovechando las opciones brindadas hoy por los computadores digitales.

La citada referencia, tras realizar un estudio de un Sistema Eléctrico Industrial representativo en el que incluye motores sincrónicos y de inducción en varios niveles de voltaje de diferentes potencias y velocidades nominales, determina niveles de correlación entre los valores calculados por ambos métodos. Obtiene una correlación favorable en el nivel de Media Tensión (2.4-13.8 KV).

Este estudio concluye indicando que los niveles de cortocircuito calculados según la norma ANSI, son mayores que los valores calculados mediante el procedimiento de cálculo dinámico y riguroso.

Finalmente, Roennspiess y Efthymiadis (1990) presentan un método dinámico de cálculo de corrientes de cortocircuito en base a la referencia anterior, incluyendo corrientes de precarga y compara con el procedimiento de cálculo estático ANSI. Según las correlaciones obtenidas se concluye que los métodos ANSI y VDE son suficientemente precisos para la selección y especificación de equipos de protección basados en una corriente de cortocircuito máxima.

Las referencias citadas constituyen un valioso aporte al desarrollo del presente trabajo, con el fin de dar respuesta a una especificación adecuada de interruptores en el marco del análisis de fallas en Sistemas Eléctricos Industriales.

II. MODELACION DE LA RED

2.1 Introducción

Un sistema eléctrico industrial típico tiene principalmente los siguientes componentes:

Alimentación

- i) Fuente de Suministro
- ii) Transformadores y líneas

Consumo

- iii) Motores y Condensadores Síncronos
- iv) Motores de Inducción
- v) Iluminación
- vi) Cargas de otros tipos

La fuente de suministro, en general, proviene de la Empresa Eléctrica, sin embargo, Sistemas Eléctricos Industriales relativamente grandes tienen incorporados generadores locales.

Entre las cargas de otros tipos que, hoy en día, se utilizan podemos citar a las **cargas rectificadas** y los equipos denominados **inversores estáticos**.

Las cargas rectificadas son frecuentemente utilizadas en algunas plantas industriales que requieren el uso de corriente continua en algún proceso.

Los inversores estáticos pueden alimentar a motores de inducción ó síncronos para efectuar el control de la velocidad.

En el cálculo de fallas, la fuente de suministro y las máquinas síncrona y de inducción se consideran como fuentes de contribución a la corriente de falla en un punto de la red. La corriente desde cada máquina está limitada por su impedancia interna y la impedancia desde el equipo al punto de falla.

2.2 Fuente de Suministro

Es la fuente de alimentación de energía eléctrica al sistema industrial, proviene generalmente de centros de generación distantes al centro industrial.

Para una determinada falla, se considera como una fuente de contribución "remota" y se modela como una barra infinita en serie con una reactancia equivalente constante. La Empresa Eléctrica suministradora proporciona el valor de la potencia de cortocircuito trifásico y monofásico en el punto de interconexión.

Las reactancias equivalente de secuencia positiva X_{1s} y secuencia cero X_{0s} , del sistema, pueden ser determinadas por:

$$X_{1s} = \frac{\text{Potencia base [MVA]}}{\text{Potencia de Cortocircuito Trifásico [MVA]}} \quad [\text{pu}] \quad (2.1)$$

$$X_{0s} = \frac{\text{Potencia base [MVA]}}{\text{Potencia de Cortocircuito Monofásico [MVA]}} - 2X_{1s} \quad [\text{pu}]$$

2.3 Máquinas Síncronas

Cuando un cortocircuito ocurre sobre un circuito alimentado por un generador síncrono éste continúa generando un voltaje debido a que se mantiene el campo de excitación y la energía primaria se mantiene invariable. Los motores síncronos en estructura son idénticos a un generador, dependiendo de cual sea la fuente de energía, eléctrica ó mecánica. Tienen un campo excitado por corriente DC y un bobinado estator en el cual fluye una corriente alterna. Tan pronto como un cortocircuito se establece, el voltaje se reduce a un valor muy bajo. En consecuencia detiene el envío de su energía mecánica a la carga, pero por la inercia de ésta el rotor del motor tiende a oponerse a la disminución de la velocidad y esta energía rotante conduce al motor síncrono tal como la energía primaria mecánica de un generador. Por lo tanto el motor comienza a generar y despachar corriente de cortocircuito durante los primeros ciclos después de ocurrida la falla.

La figura 2.1 muestra el circuito equivalente simplificado de una máquina síncrona (Simpson, 1986).

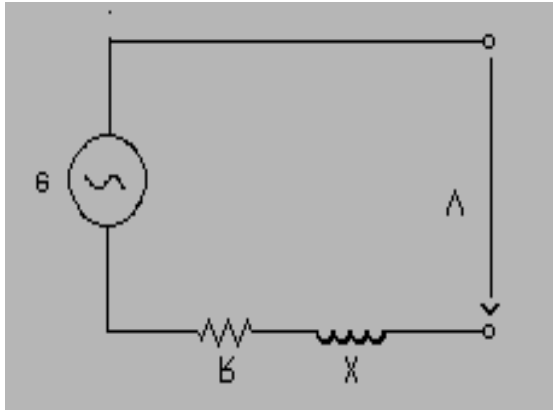


Figura 2.1 Circuito equivalente simplificado de una máquina síncrona.

Para la condición transitoria:

$$\begin{aligned} R &= r_f \\ X &= X'd \end{aligned}$$

Para la condición subtransitoria:

$$\begin{aligned} R &= r_{1d} \\ X &= X''d \end{aligned}$$

donde :

- e** : Tensión de fase en el terminal de la máquina síncrona en vacío
- V** : Tensión de fase en el terminal de la máquina síncrona para cualquier condición de operación
- r_f** : Resistencia de campo
- r_{1d}** : Resistencia de los enrollados amortiguadores en máquinas de polos salientes
- X'd** : Reactancia transitoria de eje directo
- X''d** : Reactancia subtransitoria de eje directo

Las normas actuales usan la reactancia subtransitoria de eje directo **X''d**, para la modelación de la máquina, durante el primer ciclo y la reactancia transitoria **X'd** desde los primeros ciclos hasta el rango de ½ y 2 segundos (Simpson, 1986). Después se usa la reactancia síncrona de estado permanente **Xd**, como se observa en la figura 2.2.

Figura 2.2 Uso de la reactancia subtransitoria, transitoria y permanente de la máquina sincrónica durante un cortocircuito simétrico.

Un caso particular es cuando se produce un súbito cortocircuito en bornes de la máquina sincrónica. Los cambios de la corriente de cortocircuito en el tiempo pueden ser decisivos en la selección de interruptores; los esfuerzos y torques desarrollados durante dicho proceso interesan a los diseñadores del equipo. Para este caso, Simpson (1986) y Kovacs (1984), expresan la corriente en función del tiempo para un cortocircuito en bornes de la máquina tal como se indica en la siguiente sección.

2.3.1 Cortocircuito trifásico en bornes de una máquina sincrónica con enrollados amortiguadores.

Se realiza a partir del modelo de ejes d-q-0 de la máquina con las siguientes suposiciones:

- i)** Durante el periodo transitorio de la falla, la velocidad de la máquina se mantiene constante en el valor de la velocidad sincrónica.
- ii)** Las máquinas sincrónicas son de polos salientes.

Las referencias citadas dan la corriente de armadura $i_a(t)$, para las condiciones establecidas previamente, como:

$$i_a(t) = -\sqrt{2} * E_{f0} * \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) * e^{(-t/T''_d)} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) * e^{(-t/T'_d)} \right]$$

$$* \cos(\omega t + \dot{E}_0) + \frac{\sqrt{2} * E_{f0}}{2} * \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) * e^{(-t/T_a)} * \cos(\dot{E}_0)$$

$$\frac{\sqrt{2} * E_{f0}}{2} * \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) * e^{(-t/T_a)} * \sin(\dot{E}_0)$$

$$+ \frac{E_{f0}}{2} * \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) * e^{(-t/T_a)} \cos(2\omega t + \dot{E}_0) \quad (2.2)$$

donde :

- E_{f0} : Voltaje de entrehierro
- X''_d : Reactancia subtransitoria de eje directo. Determina la magnitud de la corriente durante el primer ciclo después de ocurrida la falla.
- X'_d : Reactancia transitoria de eje directo. Determina la magnitud de la corriente de falla en un rango de 2 a 8 ciclos después de ocurrida la falla.
- X_d : Reactancia permanente de eje directo. Determina la corriente de falla en el estado estacionario.
- X''_q, X'_q, X_q : Reactancias subtransitoria, transitoria y permanente de eje en cuadratura respectivamente.
- T''_d, T'_d : Constantes de tiempo subtransitorio y transitorio de eje directo respectivamente.
- T_a : Constante de tiempo de armadura. El valor de T_a puede ser determinado por la relación:

$$T_a = \frac{1}{R} \left(\frac{2 * X'_d * X_q}{X'_d + X_q} \right) \quad (2.3)$$

donde :

R : Resistencia de armadura

Se observa que la ecuación (2.2) está compuesta por tres componentes : fundamental, continua y de doble frecuencia que decaen con las constantes de tiempo T''_d , T'_d y T_a respectivamente.

Debido a la inclusión del enrollado amortiguador se origina la aparición del término $\sqrt{2} * E_{f0}/X''_d$, en la ecuación (2.2), que determina el valor de la corriente de cortocircuito en el primer instante y que se amortigua con la constante de tiempo T''_d .

2.3.2 Generadores Sincrónicos

Normalmente un sistema eléctrico industrial tiene su

propia generación en base a generadores sincrónicos (turboalternadores) mayormente recibe la denominación de "generación local".

De presentarse una falla, en general, los fusibles e interruptores operan antes de que se alcance la operación normal del generador, por esto muy pocas veces se hace uso de la reactancia sincrónica, mas bien es más significativo usar la reactancia subtransitoria y la transitoria.

En cálculos más simplificados un generador síncrono puede ser modelado como una fuente ideal tras una reactancia. Esto es como un circuito equivalente por fase del generador síncrono, como muestra la figura 2.3 para el caso de un estado subtransitorio (Kindermann, 1992).

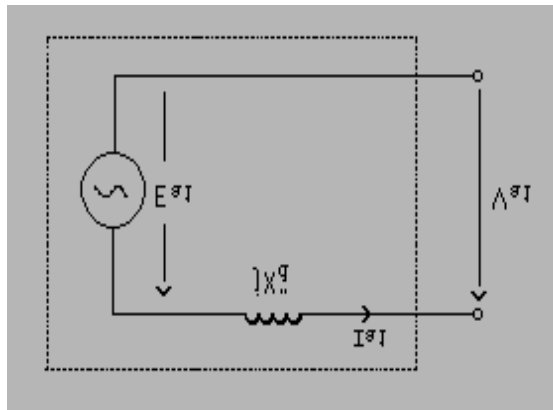


Figura 2.3 Circuito equivalente simplificado de un generador síncrono.

donde :

E_{a1} : Tensión de fase en el terminal del generador en vacío.

V_{a1} : Tensión de fase-neutro de secuencia positiva para cualquier condición de operación.

I_{a1} : Corriente de secuencia positiva de la fase "a".

La ecuación que relaciona el modelo de la figura 2.3 es:

$$V_{a1} = E_{a1} - j X''_d I_{a1} \quad (2.4)$$

2.3.3 Motores y condensadores sincrónicos

El comportamiento electromagnético de un motor sincrónico es similar a su contraparte generador, luego se modela en la misma forma. Es decir, tienen el mismo circuito equivalente, la diferencia radica en que los generadores tienen una mayor inercia y por lo tanto su contribución al cortocircuito es mayor.

Los condensadores sincrónicos son máquinas rotatorias que tradicionalmente se usan para la mejora del factor de potencia de una carga industrial. Se modelan, también, como un generador sincrónico. Actualmente se sustituyen por condensadores estáticos por la ventaja de su menor volumen.

2.4 Motores de Inducción

2.4.1 Introducción

La inercia de la carga y del rotor de un motor de inducción tienen el mismo efecto sobre éste que en un motor sincrónico, aunque existe una diferencia. El motor de inducción no tiene un bobinado de campo CC. En operación normal, hay un flujo constante en el motor mientras se aplica un voltaje al estator desde una fuente externa. Al ocurrir un cortocircuito repentino el flujo en el rotor no puede cambiar instantáneamente y la inercia del rotor impulsa al motor, por consiguiente se genera un voltaje en el bobinado del estator causando el flujo de una corriente de cortocircuito, hasta que el flujo del rotor cae a cero.

Tal como en el caso de las máquinas sincrónicas la modelación de los motores de inducción se realizan sobre ejes d-q-0.

Huening (1982), expresa la corriente que fluye en un instante t , después de un cortocircuito trifásico en los terminales del motor de inducción, como:

$$I_a(t) = \frac{E}{X''} * e^{(-t/T''_d)} \quad (2.5)$$

donde :

- T''_d : Constante de tiempo subtransitorio de eje directo.
- E : Voltaje tras la reactancia subtransiente
- X'' : Reactancia subtransitoria del motor.

Al igual que una máquina sincrónica puede ser

representado, en forma simplificada, a través de una fuente tras una reactancia.

2.4.2 Motores de inducción con contribuciones prolongadas

Cuando uno ó varios motores de inducción afectan apreciablemente a la corriente total de corto circuito en una barra dada, se obtiene mejor precisión calculando la corriente del motor en determinados tiempos de interés después del inicio de un cortocircuito, como ser para tiempos de primer ciclo y en la separación de contactos para interruptores de alta tensión (Huening, 1982). La norma ANSI/IEEE C37.010, 1979 sugiere esto en un nota en la tabla de reactancias de máquinas rotantes.

Las componentes CA y CC de la corriente de cortocircuito pueden ser evaluadas como variables en el tiempo y con decaimiento exponencial (Huening, 1982), usando las siguientes ecuaciones:

$$I_{ac} = (E/Z'') e^{-(2\delta t/T_d'')} \quad (2.6)$$

y

$$I_{dc} = \sqrt{2} (E/Z'') e^{-(2\delta t/T_a)} \quad (2.7)$$

donde :

t : Tiempo en ciclos en la frecuencia del sistema.

T_d'' , T_a : Relación X/R ó constantes de tiempo en [radianes] a la misma frecuencia.

Z'' : Impedancia subtransitoria del motor.

La constante de tiempo para la componente de decaimiento AC T_d'' es X''/R_R donde R_R es la resistencia del rotor y la constante de tiempo para la componente DC T_a es X''/R_s donde R_s es la resistencia del estator.

Muchos fabricantes de motores proveen valores de T_d'' y T_a para motores específicos importantes, determinados acorde a las definiciones en la norma ANSI/NEMA MG1 - 1.58 .

En cálculos más precisos, una relocalización del punto de la falla requiere la inserción de impedancias externas en serie con la impedancia del motor; así se sustituirá Z'' por $(Z''+Z_e)$, esto es T_d'' será $(X''+X_e)/R_R$ y T_a empieza a ser $(X''+X_e)/(R_s+R_e)$; donde $Z_e=R_e+jX_e$ es la impedancia externa.

2.5 Cargas Rectificadas

2.5.1 Introducción

Existe la tendencia a un cada vez mayor requerimiento de equipos de conversión CA - CC en muchas industrias. Así tenemos a plantas de fundición, productores de cloro etc., que necesitan equipos de rectificación. Estos equipos representan, en algunas situaciones, un porcentaje considerable de la potencia instalada total, más aún si ésta carga es constante en periodos de menor demanda. La importancia de la inclusión de estas cargas relativamente grandes en estudios de estabilidad transitoria de Sistemas de Potencia ha sido reconocida (Arrillaga y Arnold, 1984).

Luego de ocurrida una falla en algún punto del sistema, la permanencia de la absorción de potencia activa y reactiva por el rectificador debido a las constantes de tiempo existentes en el lado CC, puede tener los siguientes efectos:

- i) La redistribución de tensiones de barra en el sistema inmediatamente ocurrida la falla.
- ii) Influencia en el comportamiento del rectificador durante la falla.

El presente trabajo sólo se enmarcará al estudio del efecto sobre el sistema, conjuntamente con las siguientes suposiciones:

- a) Los límites de protección del rectificador permitan seguir operando durante el primer ciclo después de ocurrida la falla.
- b) Que el punto de falla en el sistema eléctrico esté en cualquier lugar, tal que, en bornes del rectificador exista una tensión diferente de cero.

2.5.2 El Puente rectificador trifásico

La configuración más común de convertidores AC - DC usada en sistemas de potencia es el rectificador puente trifásico ó de onda completa conocida como el **Puente de Graetz**, tal como muestra la figura 2.4. Estos pueden consistir de un número de puentes conectados en serie y/o paralelo, que producen un alto número de pulsos y puede

lograrse una mínima distorsión de la corriente suministrada.

Por lo tanto un múltiple rectificador puente puede ser modelado por un puente equivalente simple con una alimentación de voltaje sinusoidal en los terminales.

A menudo se asume que el convertidor opera en una manera controlada casi instantáneamente. En estos casos es muy aceptable usar un modelo de estado estacionario modificado (Arrillaga y Arnold, 1984).

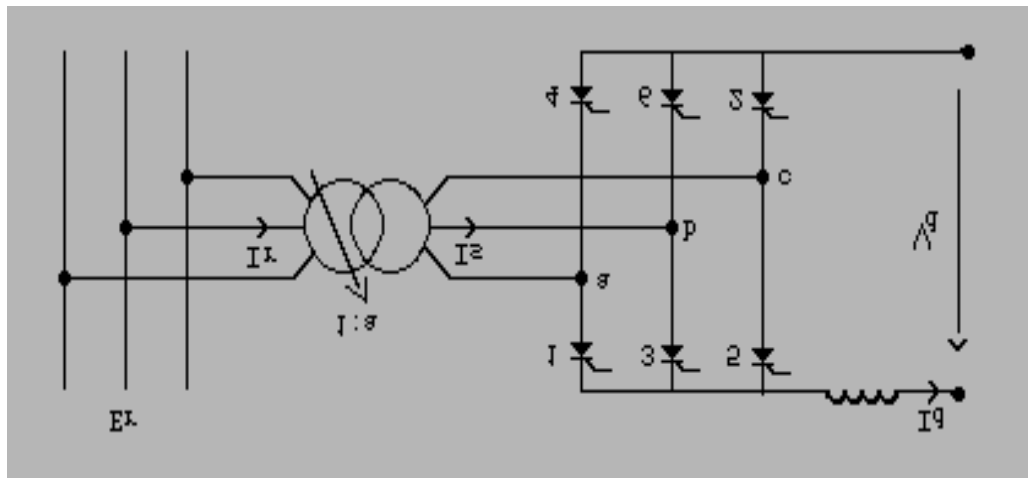


Figura 2.4 Rectificador Puente de Graetz

Las siguientes suposiciones son hechas en el desarrollo de un modelo de estado estacionario:

- i)** La caída de tensión directa en una válvula de conducción se desprecia, de tal forma que la válvula sea considerada como un switch.
- ii)** Las reactancias del transformador convertidor vista desde los terminales del secundario son idénticas para las tres fases. Asimismo la posición del tap queda invariable.
- iii)** Se ignora el ripple de la corriente directa, es decir, se asume una inductancia de alisamiento suficiente sobre el lado CC.
- iv)** La implementación del ángulo de retardo " α " es

instantáneo.

2.5.3 Representación del modelo rectificador

Una carga rectificadora puede ser modelada como tipo Impedancia, Básico y Dinámico (Arrillaga y Arnold, 1984).

La figura 2.5 muestra un ejemplo del comportamiento de los tres modelos alternativos de rectificador bajo un estado de falla y post-falla (Arnold et. al., 1980).

Figura 2.5 Potencia y voltaje en la barra de un rectificador.

2.5.3.1 Modelo Básico del Rectificador

El modelo básico consiste en la representación de un puente rectificador conectado a una carga equivalente con una constante de tiempo nula, tal como se muestra en la figura 2.6.

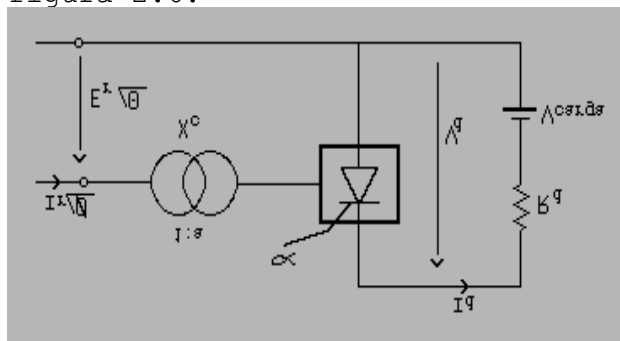


Figura 2.6 Modelo básico del rectificador

donde :

$I_r/\underline{\theta}$: Corriente efectiva de C.A. en los terminales del conjunto rectificador y su respectivo ángulo.

$E_r/\underline{\theta}$: Voltaje terminal en bornes del grupo rectificador

y su respectivo ángulo.

a : Relación de vueltas del transformador para una posición de tap del transformador. ($a < 1$)

X_c : Reactancia de conmutación entre el punto donde existe E_r y el rectificador puente.

α : Ángulo de disparo ó ángulo de retardo de los tiristores.

V_d : Voltaje directo en bornes de la carga de CC.

I_d : Corriente directa en bornes de la carga de CC.

R_d : Resistencia óhmica en la carga.

V_{carga} : Voltaje de CC en la carga.

Con un modelo de este tipo la corriente en el lado CC del puente puede cambiar instantáneamente. Para algunas cargas rectificadas esta suposición puede ser válida; sin embargo, para cargas que tengan una constante de tiempo requiere una representación más completa.

El presente trabajo toma en cuenta la presencia de una constante de tiempo en el lado CC del rectificador, de tal forma que no se permita un cambio instantáneo de la corriente CC. Esto es, considerar la modelación dinámica del Rectificador. Se ha visto que este modelo es el más conveniente en sistemas con baja capacidad de cortocircuito y puntos de falla alejados del rectificador.

2.5.3.2 Modelo Dinámico del Rectificador

La figura 2.7 muestra la representación del modelo para una fase.

El rectificador está controlado por el ángulo de retardo " α " que se imponen a la conducción de los tiristores. Este control es tal que la corriente en el lado CC sea constante (Control de Potencia constante).

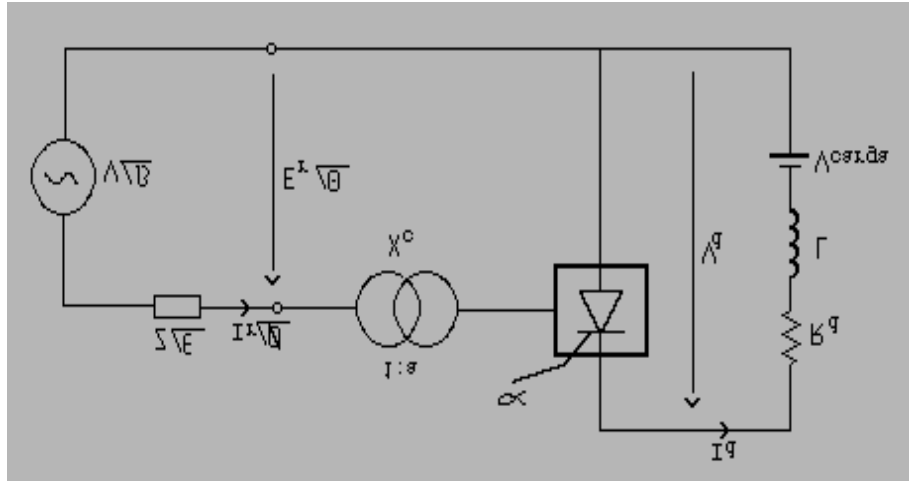


Figura 2.7 Modelo dinámico del rectificador.

Así, el sistema equivalente de la figura 2.7 puede estar descrito por el siguiente conjunto de ecuaciones independientes [14]:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\delta} a E_r \cos(\alpha) - \frac{3}{\delta} X_c I_d \quad (2.8)$$

$$V/\delta - E_r/\delta - Z/\delta I_r/\delta = 0 \quad (2.9)$$

$$V_d I_d - \sqrt{3} a E_r I_r \cos(\delta - \alpha) = 0 \quad (2.10)$$

$$I_r = k \frac{3\sqrt{2}}{\delta} a I_d \quad (2.11)$$

$$V_d = I_d R_d + V_{carga} \quad (2.12)$$

$$I_d - I_{dsp} = 0 \quad (2.13)$$

donde :

V/β : Fuente de voltaje y ángulo de Thévenin vista desde el lado primario del transformador convertidor.

Z/α : Impedancia y ángulo equivalente de Thevenin vista desde el lado primario del transformador convertidor.

L : Inductancia equivalente en la carga CC.

I_{dsp} : Corriente directa especificada, originada por la estrategia de control de corriente constante.

La ecuación (2.8) representa la variación de la tensión CC en función de la corriente continua CC, en forma lineal y con una pendiente negativa.

La ecuación (2.9) nos dá los voltajes de malla escrita para el lado primario del transformador convertidor y es una ecuación compleja que representa a dos ecuaciones escalares.

La ecuación (2.10) es resultado de la conservación de potencia activa entre el lado CC y CA.

La ecuación (2.11) es la relación entre el valor eficaz de la componente fundamental y la corriente directa en [p.u.], depende de la forma de onda en el lado CA. La constante "k" es un factor que toma en cuenta el traslapo en conducción directa. En condiciones normales su valor es muy próximo a la unidad.

La ecuación (2.12) representa la relación de voltajes en el lado CC.

La ecuación (2.13) es la especificación de control dada, es decir, el valor de la corriente directa I_d es impuesta a un valor fijo como I_{dsp} .

Para el anterior conjunto de ecuaciones podemos identificar, en forma conveniente, las variables y datos de nuestro modelo a saber:

Datos : $V, \beta, Z, e, a, X_c, R_d, V_L$
Variables : $V_t, I_r, \dot{E}, \ddot{o}, \dot{a}, V_d, I_d$

Este conjunto de ecuaciones no lineales puede ser resuelto mediante el método de Newton - Raphson.

La lenta respuesta de la corriente continua durante una

falla en el sistema CA puede causar que el rectificador opere en un modo anormal.

2.5.3.3 Modos Anormales de Operación

Después de ocurrida una falla en el lado CA la corriente I_a necesita ser conmutada por un reducido voltaje CA, esto causa que el ángulo de conmutación μ aumente, por esto es necesario extender el modelo.

El rango total de operación del rectificador puede ser clasificado en cuatro modos [14]:

Modo 1 : Operación normal. Solo dos válvulas en el puente están involucradas en una conmutación simultánea.

Modo 2 : Retardo forzado. Esto está impuesto por el ángulo de disparo α . El voltaje directo del tiristor que entrará en conducción es negativo hasta que la conmutación previa se completa ó el ángulo de disparo α excede los 30° .

Modo 3 : Operación anormal. Existe periodos de cortocircuito en las tres fases y cortocircuito CC, los cuales existen cuando conducen 4 válvulas. (Dos traslapos de conmutaciones).

Modo 4 : Continúa el corto circuito de las tres fases y CC, causado por dos conmutaciones que ocurren en forma seguida. Los caminos de corriente CA y CC son independientes.

Las formas de onda de estos modos se muestran en la figura 2.8 y la tabla II-1 resume las condiciones.

Para los cuatro modos de operación existen diferentes ecuaciones que representan al modelo del rectificador.

Figura 2.8 Formas de ondas de voltaje que muestran los diferentes modos de operación de un rectificador. (a) Modo 1, $\mu < 60^\circ$; (b) Modo 2, $\mu = 60^\circ$ con retardo forzado α_1 ; (c) Modo 3, $\mu > 60^\circ$ con un periodo de cortocircuito α_2

Tabla II-1 Modos de operación del rectificador

Modo	Angulo de disparo	Angulo de sobrelapo
1	$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq \mu \leq 60^\circ$
2	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	60°
3	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$60^\circ \leq \mu < 120^\circ$
4	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	120°

El comportamiento del rectificador, durante la falla está influenciada por la capacidad de cortocircuito del sistema y la constante de tiempo en la carga CC.

Figura 2.9 Angulo de traslapo versus tiempo mostrando el comportamiento de un rectificador en condiciones de operación anormal.

Como hay una súbita disminución de la tensión en el lado CA y la corriente CC existe, el rectificador está forzado a operar en el modo 4 de operación, a partir de la cual cambiará a los otros modos 3,2 y 1 tal como muestra la figura 2.9.

Puesto que nuestro interés está en el primer ciclo sólo se tomará en cuenta el modo 4 de operación.

En el modo anormal de operación 4 los sistemas CA y CC están cortocircuitadas y operan en forma independiente. En este caso el sistema equivalente de la fig. 2.7 se reduce a la mostrada en la figura 2.10. La red equivalente puede ser resuelta directamente.

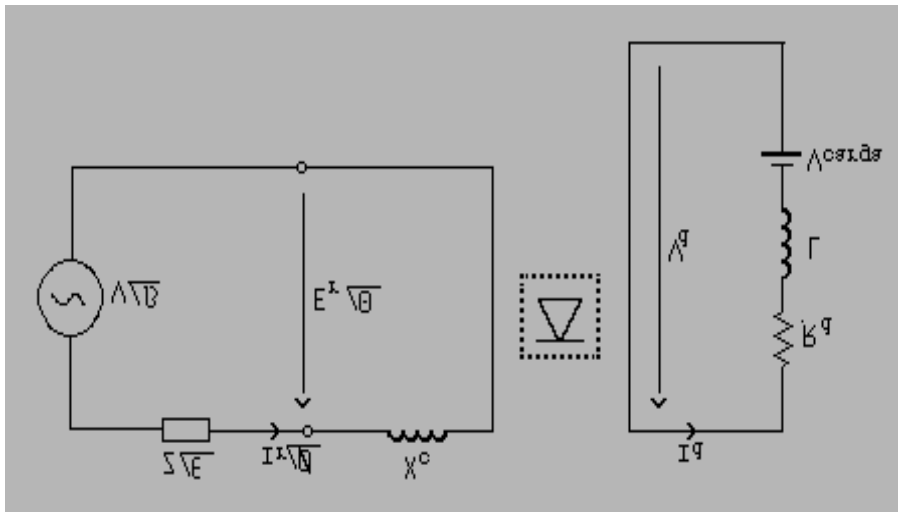


Figura 2.10 Circuito equivalente del rectificador en el modo 4 de operación.

La ecuación que representa el lado DC está dado por:

$$V_d = I_d R + V_{carga} + L \frac{dI_d}{dt} \quad (2.9)$$

La corriente I_d será determinada por el método de integración conocido como de Runge Kutta de cuarto orden.

En el lado AC las ecuaciones que se deducen son:

$$V/\underline{\beta} - E_r/\underline{\dot{E}} - Z/\underline{\dot{a}} I_r/\underline{\dot{o}} = 0 \quad (2.10)$$

$$E_r/\underline{\dot{E}} = I_r/\underline{\dot{o}} X_c/90^\circ \quad (2.11)$$

Cada ecuación compleja representa a dos escalares, sumando cuatro ecuaciones con incógnitas E_r, \dot{E}, I_r y \dot{o} que puede ser resuelta.

La influencia del rectificador sobre el sistema será resuelta por superposición, como se explica en el capítulo 4.

2.6 Inversores Estáticos Trifásicos

2.6.1 Introducción

Los desarrollos tecnológicos de la electrónica industrial están permitiendo utilizar motores CA para aplicaciones que requieren control de la velocidad ó torque y donde antes se utilizaba motores de corriente continua, dando lugar a los denominados "Drives CA". Esto ha implicado el uso creciente de equipos controladores especiales insertos entre la red y el motor.

Básicamente estos controladores ó convertidores constan de un Rectificador, un Inversor y equipos auxiliares de control.

Un circuito Inversor, a su vez puede estar subdividido en función de la fuente eléctrica de entrada en dos tipos: Inversores con fuente de voltaje (VSI) e Inversores con fuente de corriente (CSI). En el primer caso la entrada es un voltaje dc mantenido constante y no controlable. En este caso un voltaje de salida variable se obtiene variando la ganancia del inversor, el cual es normalmente realizada por el control de modulación de ancho de pulso (PWM).

En forma similar los convertidores de entrada pueden ser controlados utilizando el mismo principio de control.

En adelante se nombrará, al conjunto, como "Inversores Estáticos".

Los Inversores Estáticos Trifásicos de Electrónica de Potencia pueden ser aplicados a dos tipos de motores, que son:

- i)** Motores de Inducción
- ii)** Motores Síncronos

Aunque en la práctica por el bajo costo y su menor volumen los que más se utilizan son los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla.

Según se explicara anteriormente, cuando la fuente eléctrica del motor CA es separada y dada la energía cinética asociada con la inercia del motor y su carga, hará que éste se comporte como un generador. Esta energía puede ser disipada por una resistencia o bien ser realimentada a la red a través del Inversor. Una aplicación de esto es el frenado regenerativo del motor.

Al ocurrir una falla en un sistema industrial la tensión baja súbitamente en todas las barras, simultáneamente tiene lugar la alimentación a la falla por los motores conectados a las distintas barras. Esto incluye a los motores conectados mediante inversores que generalmente tienen respuestas rápidas. La figura 2.11 muestra un esquema de lo mencionado.

El presente trabajo pretende cuantificar el aporte que realiza, a la corriente de falla, un motor CA conectado al sistema a través de inversores.

En la actualidad existen varios tipos de configuración que utilizan diferentes estrategias de control. La elección del tipo de convertidor a representar en este trabajo, se hizo en base a los siguientes requerimientos mínimos:

- i) Capacidad de regeneración
 - ii) Formas de onda aproximadamente sinusoidales a la entrada y salida del Convertidor.

Una configuración, empleada en el pasado, consiste en conectar dos convertidores, en base a tiristores, uno tras de otro (Conexión back-to-back) tal como muestra la figura 2.12

Cada convertidor tiene la misma configuración del Puentes de Graetz utilizado en la sección anterior.

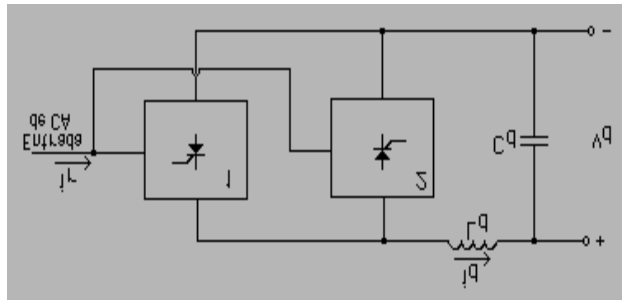


Figura 2.12 Convertidores en conexión back-to-back para flujo de potencia bidireccional

Durante el modo normal, el convertidor 1 actúa como un rectificador y la potencia fluye desde el lado CA al lado CC. Durante el frenado regenerativo, los pulsos de compuerta de los tiristores del convertidor 1 son bloqueados y el convertidor 2 opera en un modo inversor, mientras que la polaridad de v_d queda invariante, la dirección de i_d se invierte.

Hay diversos inconvenientes asociados con esta configuración [35], entre ellas están, una forma de corriente de entrada distorsionada y la posibilidad de fallas de conmutación en el modo inversor debido a posibles perturbaciones en la línea.

Dentro la familia de inversores que utilizan el control de modulación de ancho de pulso (PWM), tenemos aquellos

basados en el control de histéresis de corriente. Los Inversores que usan este tipo de control permiten el flujo bidireccional de la corriente CC [34] y pueden tener ondas aproximadamente sinusoidales en la entrada AC de la red y el motor. Por esta razón en el presente trabajo se utiliza este tipo de inversor.

La figura 2.13 muestra el diagrama esquemático de este Convertidor. El conjunto Rectificador - Inversor está en base a dispositivos del estado sólido, transistores bipolares ó GTO's.

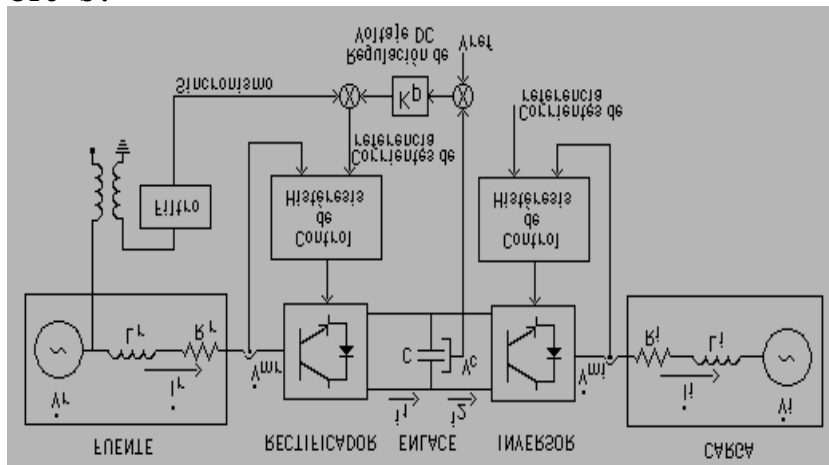


Figura 2.13 Esquema de un Rectificador-Inversor basado en moduladores PWM con corriente controlada.

2.6.2.1 Descripción

Tanto el inversor como el rectificador son idénticamente controlados a través de moduladores PWM con corriente controlada dentro una banda de histéresis, es decir, el encendido y apagado de los transistores bipolares ó GTO's, es tal que la corriente medida en cada fase, sigue la forma de onda de la corriente de referencia dentro de una banda de tolerancia estrecha tal como se muestra en la figura 2.14

Figura 2.14 Control de banda de histéresis h en convertidores PWM con corriente controlada.

La actual corriente sufre cambios de estado en el límite de la banda de tolerancia y cuando ésta es más angosta aumentan estos cambios, haciendo más sinusoidal la corriente.

El rectificador es un convertidor autocontrolado en corriente y regulado en voltaje. Se toma una corriente sinusoidal de 50 Hz a través del filtro y transformador conectado a una fase de la red. No se introduce desfase y como tal se entiende que el rectificador opera con factor de potencia unitario.

El bloque de control de histéresis compara la corriente medida con la corriente de referencia y gobierna la apertura y cierre de los transistores.

En el lado CC, la corriente $i_1(t)$ suministra a la entrada del inversor a través de la corriente $i_2(t)$. Cualquier desbalance en la entrada y salida causa que el capacitor C se cargue ó descargue. Como el voltaje V_c monitorea la falta de suministro y demanda, esto asegura que la potencia de salida del rectificador siempre sigue la demanda del lado inversor. Esto se realiza por la comparación entre V_c y V_{ref} .

El error $(V_{ref}-V_c)$ es amplificado por un factor K_p y después usado como control de amplitud $\sqrt{2} I_r$. Esto cierra el lazo de realimentación del control proporcional.

El inversor consiste de un modulador PWM controlado por corriente, idéntico al rectificador excepto en los controles los cuales deben estar adaptados a la carga del motor AC.

Las corrientes de referencia generalmente tienen la misma frecuencia que la entrada, éstas son introducidas al control de histéresis para su comparación con las corrientes medidas en el lado AC de la carga.

2.6.3 Operación del Convertidor en condiciones de Falla

Las características de operación en condiciones normales del convertidor mostrada en la figura 2.13, han sido estudiadas por muchos investigadores. La referencia [34] es una de ellas, en la que se presenta modelos matemáticos de las diferentes partes funcionales y su integración como un sistema. En esta sección se enfrenta el problema de la

operación anormal del convertidor en base a algunas suposiciones.

Al producirse una falla, en el sistema industrial, hace que exista un cambio de voltaje y corriente en la alimentación, haciendo que la operación del convertidor sea anormal.

Para el planteamiento de las ecuaciones se hacen las siguientes suposiciones:

- i) Que una determinada falla en el sistema sea detectada por el motor aún a través del convertidor.
- ii) Despreciar la corriente de carga del motor previa a la falla.
- iii) Asumir que la inversión es instantánea.
- iv) En condiciones anormales, existe aún la condición trifásica balanceada, en la carga y en el lado CA del rectificador.
- v) Despreciar las pérdidas en el proceso de conmutación de los GTO's tanto en el rectificador como en el inversor.
- vi) Considerar una alta frecuencia de "switching", tal que la distorsión de las formas de onda sean despreciables.
- vii) Que las protecciones del convertidor permitan el flujo de corrientes de cortocircuito al menos durante el primer $\frac{1}{2}$ ciclo después de ocurrida la falla.

La figura 2.15 muestra el diagrama esquemático del inversor dando la respuesta a una determinada falla en el sistema industrial. Los diferentes parámetros eléctricos mostrados son valores instantáneos en función del tiempo t .

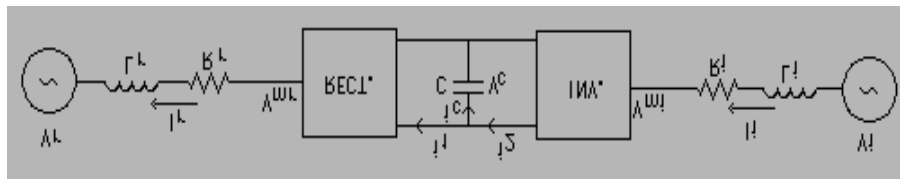


Figura 2.15 Esquema del inversor dando la respuesta a una falla del sistema.

En la figura 2.16 se muestra el circuito equivalente simplificado del motor de inducción en estado subtransitorio. V_{mi} es la tensión modulante en el inversor y X_i generalmente se

utiliza como la reactancia de rotor bloqueado.

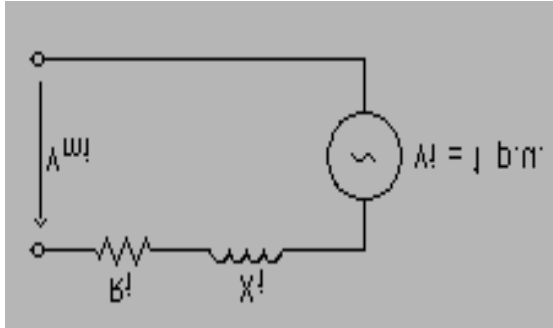


Figura 2.16 Circuito equivalente simplificado del motor de inducción en estado subtransitorio.

A partir de la figura 2.15 pueden obtenerse las siguientes ecuaciones:

La Potencia de CA de entrada al Inversor es:

$$P_i(t) = 3 [V_i(t) I_i(t) - R_i I_i^2(t) - \frac{d}{dt} (\frac{1}{2} L_i I_i^2(t))]$$

$$P_i(t) = 3 [V_i(t) I_i(t) - R_i I_i^2(t) - L_i I_i(t) \frac{dI_i(t)}{dt}]$$

El factor de potencia en el lado inversor es supuesta igual a la unidad.

La corriente $I_i(t)$ tiene la forma : $I_i(t) = I_{max}(t) \text{sen} \omega t$

Se asume que la amplitud de esta corriente tiene un decaimiento exponencial con una constante de tiempo $\delta_i = L_i/R_i$ de la forma:

$$I_i(t) = \sqrt{2} I_{eff}(0) I_B e^{-t/\delta_i} \text{sen } \omega t$$

donde :

$I_{eff}(0)$: Corriente máxima de aporte del motor en el tiempo $t=0$, dada por:

$$I_{eff}(0) = \frac{1}{\text{módulo } (R_i + jX'')} \quad [\text{p.u.}]$$

I_B : Corriente de base [A], dada por:

$$I_B = S_B / (\sqrt{3} U_{Bi})$$

S_B : Potencia base [VA]

U_{Bi} : Tensión base en el Inversor [V]

El voltaje $V_i(t)$ tiene la forma : $V_i(t) = \sqrt{2} U_{Bi} \text{sen } \omega t$

Por otra parte la potencia de CA de salida del rectificador es:

$$P_r(t) = 3[V_r(t) I_r(t) + R_r I_r^2(t) + L_r I_r(t) dI_r(t)/dt] \quad (2.13)$$

El factor de potencia de salida del rectificador también es supuesta igual a la unidad.

La tensión $V_r(t)$ tiene la forma: $V_r(t) = \sqrt{2} V_p U_{Br} \text{sen } \omega t$ donde :

V_p : Tensión postfalla en la barra del convertidor [p.u.]

U_{Br} : Tensión base en el lado CA del rectificador.

En el enlace CC, tenemos que, si no hay pérdidas, las ecuaciones de balance de potencia son :

$$P_i(t) = V_c i_2(t) \quad (2.14)$$

$$P_r(t) = V_c i_1(t) \quad (2.15)$$

La ecuación de balance de corrientes es :

$$i_2(t) = i_1(t) + i_c(t)$$

$$i_2(t) = i_1(t) + C dV_c/dt \quad (2.16)$$

La ecuación de compensación, debido al circuito de realimentación en el circuito de la figura 2.13, es:

$$I_r(t) = K_p(V_{ref} - V_c(t)) \quad (2.17)$$

donde :

$I_r(t)$: Amplitud variable en el tiempo que será multiplicada por el sincronismo $\text{sen}(\omega t)$.

K_p : Ganancia de transferencia [A/V].

Reemplazando las ecuaciones (2.12) y (2.13) en (2.14) y (2.15), luego agregando las ecuaciones (2.16) y (2.17) se tiene el siguiente sistema:

$$i_1(t) = 3[V_r(t) + R_r I_r(t) + L_r dI_r(t)/dt] I_r(t)/V_c(t) \quad (2.18)$$

$$i_2(t) = 3[V_i(t) - R_i I_i(t) - L_i dI_i(t)/dt] I_i(t)/V_c(t) \quad (2.19)$$

$$i_2(t) = i_1(t) + C dV_c/dt \quad (2.20)$$

$$I_r(t) = K_p(V_{ref} - V_c(t)) \quad (2.21)$$

El sistema de ecuaciones tiene como incógnitas I_r , V_c , i_1 , e i_2 .

La solución del sistema no lineal de ecuaciones diferenciales se efectuó por el método de integración numérica denominado Runge Kutta de cuarto orden; para tal efecto se ha construido un programa de simulación descrito en el anexo **H**.

Nos interesa el valor máximo alcanzado por la corriente $I_r(t)$ dentro el primer $\frac{1}{2}$ ciclo. Este valor es utilizado para calcular la corriente de aporte a la falla, tal como se muestra al final del capítulo 4.

2.7 Transformadores

Cambian el nivel de voltaje y corriente y no son consideradas como una fuente de corriente de cortocircuito.

En general, para transformadores de 2 ó 3 arrollamientos, se modelan como una impedancia serie (de secuencia positiva, negativa ó cero). En los transformadores de gran tamaño la resistencia es muy pequeña, luego sólo es considerada la reactancia.

En el presente trabajo se considera las siguientes suposiciones:

- i) Los transformadores operan en la posición de tap nominal.
- ii) No se toma en cuenta transformadores desfasadores.

2.8 Líneas

Los distintos equipos existentes en una red industrial son interconectados a través de líneas que en su mayoría son cables aislados de acuerdo a una norma.

El modelo que las representa es una impedancia compuesta por una resistencia R y una reactancia X en serie. Las tablas 19 y 24 de la referencia [10] muestra valores típicos de R y X que se usarán en el presente trabajo.

2.9 Iluminación

Al estar distribuidas en toda la red industrial como cargas relativamente muy pequeñas no contribuyen a la corriente de cortocircuito, por lo cual se ha prescindido de su modelación.

III. ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CALCULO DE FALLAS EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

3.1 Introducción

La determinación de corrientes de cortocircuito en sistemas de distribución de energía eléctrica es muy importante para la aplicación de dispositivos de protección en toda la red. Tal es así que en sistemas industriales la selección de interruptores, fusibles, arrancadores de motor, etc. deben tener una adecuada capacidad de interrupción.

Previo al cálculo de fallas es necesario representar el sistema eléctrico industrial a través de sus principales componentes y construir el diagrama de impedancias respectivo de la red.

Luego para determinar la corriente de falla en un punto de la red, ésta es reducida a una fuente equivalente de Thévenin tras una impedancia vista desde el punto de falla. Después pueden ser determinadas la corriente de falla, las que fluyen por otras ramas y los voltajes en los distintos nodos de la red.

Una reducción del circuito en forma manual es justificable en pequeñas redes y para pocas fallas en distintos puntos.

Sin embargo, en redes relativamente grandes, donde se requiere desarrollar un efectivo sistema de protección para minimizar los daños, es necesario calcular en muchas más distintas localizaciones y para diferentes tipos de fallas. En consecuencia, el uso de un método computacional resulta ser atractivo para estudios de cortocircuitos.

La matriz impedancia de barras Z_B de la red es factible para el uso del teorema de Thévenin; se han desarrollado diversas técnicas para la formación de esta matriz con la aplicación de computadores digitales (Stagg y El-Abiad, 1968).

3.2 La Matriz Impedancia de Barras en el Cálculo de Fallas

Los elementos de la matriz de impedancia de barras Z_B son los que determina los parámetros eléctricos en la red después de ocurrida una falla.

Si el origen de Z_B proviene de la inversión de la matriz de admitancia de barra Y_B , puede resultar ineficiente computacionalmente, más aún si la red es relativamente grande, por problemas de almacenamiento de la matriz Z_B .

Por otra parte sólo en algunos estudios de fallas se requerirá todos los elementos de la matriz Z_B para el cálculo de corrientes de cortocircuito en todas las barras.

Por esta razón, se empleará otra técnica alternativa de formación de la matriz de impedancia de barra Z_B , aprovechando la dispersidad de la matriz de admitancia nodal Y_B , característica de sistemas radiales. Una de estas técnicas es conocida como la bi-factorización de matrices.

Previamente se muestra un método de evaluación de la matriz Z_B .

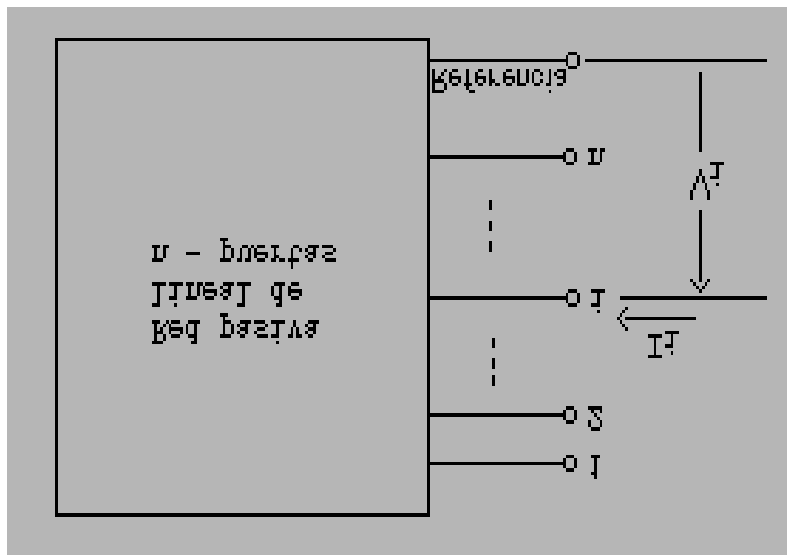


Figura 3.1 Red general de n - puertas.

Consideremos la red mostrada en la figura 3.1, pasiva de n puertas y lineal. La red, en general, puede ser de secuencia positiva, negativa ó cero. Se supone como referencia el nodo cero.

Arbitrariamente definimos corrientes que entran a la red en los nodos $1, 2, \dots, n$. La red puede ser descrita por:

$$\begin{array}{l}
V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2 + \dots + z_{1n}I_n \\
V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2 + \dots + z_{2n}I_n \\
| \\
| \\
V_n = z_{n1}I_1 + z_{n2}I_2 + \dots + z_{nn}I_n
\end{array}
\tag{3.1}$$

ó en forma matricial, la ecuación nodal:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \tag{3.2}$$

El término general z_{ij} puede ser calculado de:

$$z_{ij} = \frac{V_i}{I_j} \quad \text{para } I_1=I_2=\dots=I_n = 0; \quad I_j = 0 \tag{3.3}$$

Es decir, la ecuación sugiere un método para la evaluación de z_{ij} para una red dada. Puesto que todos los elementos impedancia están definidos con todos los nodos abiertos, excepto uno, los elementos impedancia se llaman impedancias de circuito abierto.

Aunque la aplicación de la ecuación (3.3) es una técnica general correcta para la formulación de la matriz Z_B no es la conveniente para nuestros propósitos. A continuación se explica un método alternativo que será usado en el presente trabajo.

3.3 Triangularización de Matrices

En la actualidad existen varias técnicas para resolver grandes sistemas de ecuaciones lineales de la forma:

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{b}$$

La técnica consiste en expresar la matriz \mathbf{A} como producto de matrices triangulares, entre estos tenemos el método de la Factorización **LH (LU)**, Factorización **LDH (LDU)** y la **Bi-Factorización**.

El método de la bi-factorización es adecuado para matrices dispersas con elementos diagonales dominantes y consiste en hallar $2n$ matrices factores para un sistema de orden n , cuyo producto satisface :

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{R}^{(1)} \mathbf{R}^{(2)} \dots \mathbf{R}^{(n)} \mathbf{L}^{(n)} \dots \mathbf{L}^{(2)} \mathbf{L}^{(1)}$$

donde :

\mathbf{A} : Matriz original
 \mathbf{A}^{-1} : Matriz inversa

- R** : Matriz factor lado derecho
- L** : Matriz factor lado izquierdo

En el anexo **A** se muestra en más detalle este método en base a Brameller, Allan (1977) para el caso de una matriz con elementos complejos. Esta técnica ha sido implementada por Brameller (1977), en un conjunto de rutinas llamadas MIOSC que son usadas en el presente trabajo.

3.4 Tipos de Fallas

En un sistema eléctrico de potencia, en general, las fallas se pueden categorizar en uno de los siguientes cuatro tipos, que en orden de frecuencia son:

- i)** Fase a tierra
- ii)** Fase a Fase (bifásica)
- iii)** Doble fase a tierra (bifásica a tierra)
- iv)** Trifásica (balanceada)

Los tres primeros tipos constituyen condiciones de operación desbalanceadas severas. Por tanto, es necesario analizar el sistema en condiciones de operación desbalanceadas. El método de las **componentes simétricas** es conveniente para el análisis de sistemas desbalanceados.

Debido a la alta probabilidad de ocurrencia de las fallas monofásicas y la severidad de las fallas trifásicas, en el presente trabajo sólo se considerarán estos dos tipos.

3.5 Simplificaciones en el Cálculo de Fallas

En general, para un estudio de cortocircuitos se usa circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero para el cálculo de fallas monofásicas y únicamente la secuencia positiva para fallas trifásicas.

Para la representación de los diferentes modelos, en el cálculo de fallas, se realiza las siguientes simplificaciones[23]:

- i)** Cada máquina se representa por una fuente de tensión constante y por una reactancia variable en el tiempo (subtransitoria ó transitoria).
- ii)** Se desprecian las capacidades en el modelo de las

líneas y transformadores.

iii) Se usa la técnica del análisis de circuitos sinusoidales.

iv) Previa a la aplicación de la falla, se fija todas las fuentes de voltaje en $1/\underline{0}^\circ$. Asumir que todas las fuentes están en fase y son de la misma magnitud, es equivalente a despreciar las corrientes de carga de prefalla.

El planteamiento básico del problema considera la situación general mostrada por la figura 3.2.

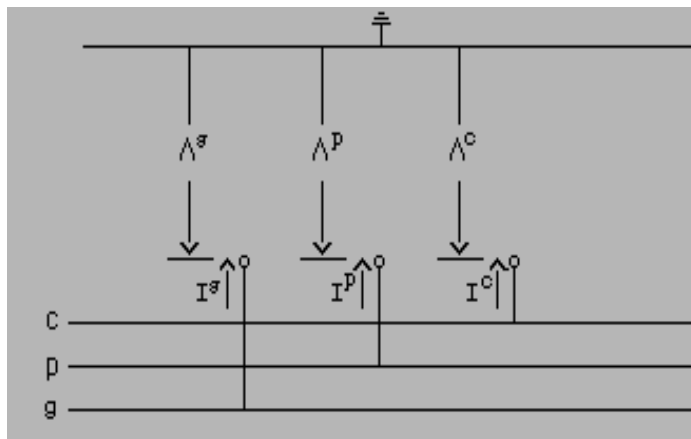


Figura 3.2 Puertas de acceso trifásico.

donde los terminales que salen, representan conexiones externas que alimentan la falla en estudio.

3.6 Redes y Matrices de Secuencia

La figura 3.3 muestra los circuitos equivalentes de secuencia para un sistema en estudio.

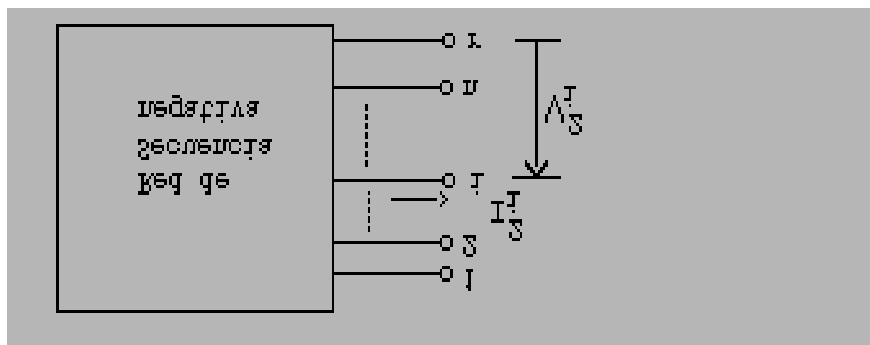
La i -ésima barra es aquella donde se aplica la falla y suponemos que puede variar de 1 a n . El terminal de referencia se denota como "r".

Se define la siguiente notación para las cantidades de secuencia:

V_i^0, V_i^1, V_i^2 : Vector voltaje de barra de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente.
 I_i^0, I_i^1, I_i^2 : Vector corriente de fallas de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente.
 Z_0, Z_1, Z_2 : Matriz de impedancia de falla de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente.

El circuito de secuencia positiva contiene fuentes de voltaje, una para cada máquina rotante en la red (generadores y motores). Si se supone despreciable las corrientes de prefalla, esto tiene dos implicaciones: a) no hay caminos a tierra otro que las máquinas y b) todas las corrientes prefalla de línea son ceros.

Considerando este segundo hecho, entendemos que todas las fuentes de voltaje son iguales en magnitud y fase; por lo tanto se combinan en una fuente equivalente.



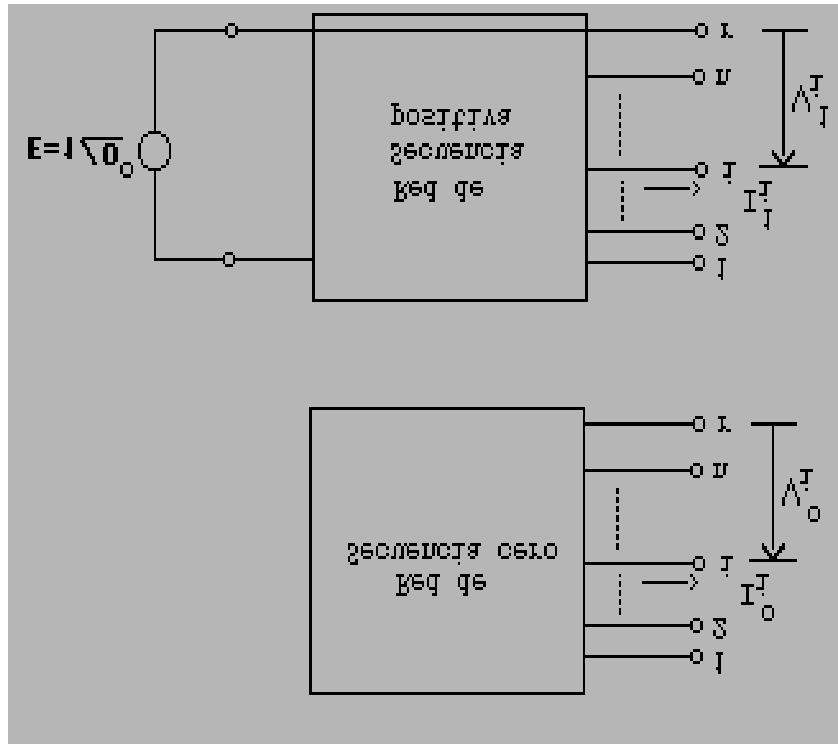


Figura 3.3 Redes de secuencia para el análisis de fallas.

Las ecuaciones que interrelacionan estas cantidades de secuencia, en función de la matriz de impedancia de barra, son:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= -[Z_0] I_0 \\
 V_1 &= E - [Z_1] I_1 \\
 V_2 &= -[Z_2] I_2
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

El vector E contiene $1/\underline{0}^\circ$ en todas las entradas. El signo menos es necesario debido a la dirección definida para la corriente como positiva inversa.

Las ecuaciones generales para el cálculo de fallas trifásicas y monofásicas se encuentran en el anexo **G**.

IV. CALCULO DE CORTOCIRCUITOS SEGUN NORMAS ANSI/IEEE

4.1 Introducción

Hoy en día existen normas relativas al cálculo de cortocircuitos con el fin de especificar interruptores.

Las normas C37.010 - 1979 y C37.5 - 1979 establecen métodos de cálculo de corrientes de cortocircuito en base a valores simétricos y asimétricos respectivamente, para la especificación de interruptores de alta tensión. Para interruptores de baja tensión se encuentra disponible la norma C37.13 - 1981.

4.2 Norma C37.010 - 1979

Esta norma es una guía que nos ayuda en la selección y aplicación de interruptores de alta tensión.

Presenta dos métodos de cálculo: método simplificado E/X y el método corregido de E/X. Por tener resultados más exactos el segundo método, en el presente trabajo sólo se desarrollará éste.

El Método corregido de E/X denominado también "Método corregido de E/X con Decrementos CA y CC", provee un planteamiento preciso para la aplicación de interruptores de Alta Tensión en base a valores simétricos.

Este método nos da un procedimiento para la aplicación de factores de multiplicación a los cálculos de E/X. E es el voltaje típico de prefalla (1 [p.u.]) y X es la reactancia equivalente vista desde el punto de falla.

La norma recomienda seguir una serie de pasos que pueden resumirse de la siguiente manera:

- 1)** Construcción del diagrama de impedancias en base a parámetros y datos del sistema, dados por los fabricantes ó en tablas.
- 2)** Determinación del voltaje de prefalla. En general se asume $E = 1$ p.u.
- 3)** Determinación de la red de reactancias dentro los regímenes momentáneo y de interrupción. Las reactancias de interrupción se corrigen aplicando factores de

multiplicación adecuados dadas por la norma y permiten construir la red de secuencia positiva, negativa y cero.

- 4) Determinación de la red de resistencias de interrupción de secuencia positiva, negativa y cero a partir del diagrama unilineal. Las resistencias son modificadas por los mismos factores de multiplicación aplicados a las reactancias.
- 5) Reducción de las redes de secuencia a reactancias y resistencias equivalentes vistas desde el punto de vista de la falla.
- 6) Cálculo de corrientes de cortocircuito para las redes de interrupción y momentánea, en la barra fallada, como sigue:

Falla trifásica:

$$\begin{aligned} \text{Régimen momentáneo} & : I_{CC30M} = 1.6 * E/X_{M1} \\ \text{Régimen de interrupción} & : I_{CC30I} = E/X_{I1} \end{aligned}$$

Falla Monofásica:

$$\begin{aligned} \text{Régimen momentáneo} & : I_{CC10M} = 1.6 * \frac{3 * E}{(X_{M1}+X_{M2}+X_{M0})} \\ \text{Régimen de interrupción} & : I_{CC10I} = \frac{3 * E}{(X_{I1}+X_{I2}+X_{I0})} \end{aligned}$$

donde:

- I_{CC30I}, I_{CC30M} : Corriente de cortocircuito trifásica de interrupción y momentánea.
- I_{CC10I}, I_{CC10M} : Corriente de cortocircuito monofásica de interrupción y momentánea.
- X_{M1}, X_{M2}, X_{M0} : Reactancias momentáneas de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente, reducidas al punto de falla.
- X_{I1}, X_{I2}, X_{I0} : Reactancias de interrupción de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente, reducidas al punto de falla.

La norma indica que, la selección del interruptor será apropiada si la corriente de cortocircuito calculada multiplicada por el factor de 1.6 no excede la corriente

momentánea nominal del interruptor, es decir, se compara con la corriente de cortocircuito asimétrica.

- 7) Determinación de la razón X/R equivalente en el punto de falla para la **red de interrupción** como sigue:

Falla trifásica:

$$X/R = X_{I1}/R_{I1}$$

Falla monofásica:

$$X/R = \frac{2 * X_{I1} + X_{I0}}{2 * R_{I1} + R_{I0}}$$

donde:

R_{I1} , R_{M1} : Resistencia de interrupción y momentánea de secuencia positiva respectivamente, reducidas al punto de falla.

- 8) Selección del factor de multiplicación (FM) para la corrección de E/X, obtenida en 6) correspondiente a la red de interrupción.

En este paso deben utilizarse las figuras dadas por la norma C37.010 - 1979 (Pag. 34 - 35 de dicha norma) ó ver en anexo **C**, para lo cual en forma previa debe conocerse el tiempo de separación de contactos del interruptor y el valor de la razón X/R determinada para el punto de falla tal como se explica en el paso 7).

La citada norma no explica la construcción de las figuras, pero suponemos se basan en experiencias realizadas con interruptores de características diferentes, como ser el tiempo de partida de contacto de un interruptor.

- 9) Obtenido el factor FM, multiplicamos a la relación E/X para tener la corriente de interrupción impuesta al interruptor.
- 10) Determinar la capacidad de interrupción simétrica del interruptor en base a las características de especificación dadas. La norma C37.06 - 1979, nos dá tablas de valores nominales preferidos de interruptores en base a condiciones de corriente simétrica, ver anexo

E.

4.3 Norma C37.05 - 1979

Al igual que la norma anterior proporciona un método de cálculo en base a valores nominales asimétricos. La diferencia está en el paso 8), puesto que las curvas usadas para la obtención de los factores de multiplicación (FM) son las mostradas en las figuras C-4, C-5, C-6 del anexo **C**.

La norma utiliza estas nuevas curvas debido a que compara con interruptores de alto voltaje en base a la corriente de falla asimétrica ó corriente total.

4.4 Norma C37.13 - 1981

Esta norma titulada "Low Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures" [18], es usada para la aplicación de interruptores de poder de bajo voltaje, hasta 600 voltios.

La norma considera como factores importantes en la determinación de corrientes de cortocircuito, la contribución de sistemas de suministro y de motores calculadas tomando en cuenta la impedancia de los cables que los separa del punto de falla.

Otro aspecto que toma en cuenta la norma es el factor de potencia durante el cortocircuito, asociado a la razón X/R. Para factores de potencia menores al 15 % (X/R mayores a 6) se debe seleccionar un factor multiplicador para la corriente de cortocircuito desde la tabla No. IV-1.

A diferencia de las normas anteriores, ésta no presenta métodos de cálculos de corrientes de falla.

Para el caso de interruptores de baja tensión, el presente trabajo sólo se limita al cálculo de fallas trifásicas y para régimen momentáneo.

Procedimiento de Cálculo - Fallas Trifásicas

1) Representar el sistema como un diagrama unilineal (para datos de X y R puede consultarse el anexo B).

2) Determinar el diagrama de impedancias en régimen

momentáneo. Reducir a una impedancia equivalente vista desde el punto de falla (Z_{eq}). Calcular la razón X/R equivalente.

3) Calcular la corriente de cortocircuito trifásica en la barra fallada : $I_{cc} = 1/Z_{eq}$.

4) Obtener el factor multiplicador para la corriente de falla de la tabla IV-1 con las siguientes condiciones :

- a) Interruptores con fusible : $X/R > 6$
- b) Interruptores sin fusibles : $X/R > 4.9$

Tabla IV-1 Factor multiplicador para interruptores de baja tensión.

Factor de potencia de cortocircuito(%)	Relación X/R	Factor multiplicador (1)	Factor multiplicador (2)
20	4.9	1.00	1.00
15	6.6	1.00	1.07
12	8.27	1.04	1.11
10	9.95	1.07	1.15
8.5	11.72	1.09	1.18
7	14.25	1.11	1.21
5	20.0	1.15	1.26

(1) : Para interruptores sin fusible incorporado

(2) : Para interruptores con fusible incorporado

FUENTE : Norma C37.06 - 1979

5) Seleccionar el interruptor en base a la corriente de cortocircuito calculada y el voltaje de operación, de tablas dadas por la norma [19] (anexo B).

Las normas C37.010 - 1979, C37.05 - 1979 y C37.13 - 1981 serán la base del presente trabajo que nos permitirá especificar en forma adecuada interruptores de alta y baja tensión.

4.5 Factores de Multiplicacion en el Cálculo de Corrientes de Cortocircuito de Interrupción para Interruptores de Alto Voltaje

Las normas de referencia contienen gráficos de factores de multiplicación, los cuales determinan la corriente de

cortocircuito calculada cuando se aplica a valores E/X. El gráfico apropiado se selecciona conociendo la siguiente información:

- 1) Corriente de cortocircuito trifásico ó monofásico.
- 2) Base Nominal del interruptor que esta siendo aplicado (En base a la corriente de cortocircuito total ó corriente de cortocircuito simétrico).
- 3) Tiempo de interrupción nominal del interruptor que esta siendo aplicado.
- 4) Relación X/R en el punto de falla.
- 5) Proximidad de generadores.

La proximidad de generadores determina la elección del gráfico para fallas alimentadas "predominantemente" desde generadores a través de no más de una "transformación" (local) y para fallas alimentadas a través de dos o más transformaciones (remota) [10].

Debido a que no existe una definición más clara con respecto a la interpretación de las palabras "predominantemente" y "transformación", en el presente trabajo se ha utilizado factores de multiplicación remota para calcular los cortocircuitos. Las contribuciones de las Empresas Eléctricas se consideran como generadores remotos.

Las normas especifican el uso de interruptores con capacidad de interrupción en base a corrientes de cortocircuito total (TOT) y simétrica (SYM) con tiempos de interrupción de 2,3,5 y 8 ciclos. Los tiempos mínimos de separación de contacto están definidos en la tabla No.IV-2.

Tabla IV-2 Tiempos mínimos de separación de contactos de interruptores.

Tiempo de Interrupción (Ciclos)	Separación de contactos (Ciclos)
8	4
5	3
3	2
2	1½

FUENTE : IEEE Std. 141 - 1976.

Los gráficos que muestran las curvas X/R versus Factores Multiplicadores (FM) están en las figuras 8,9 y 10 de la norma C37.010 - 1979 [16] ó en las Figuras 81 - 84 de la referencia [10] y que se adjuntan en el anexo C.

4.6 Contribución a la Falla de Motores Grandes

4.6.1 Introducción

Métodos recientes de cálculo de corrientes de cortocircuito toman en cuenta la contribución de grandes motores.

La referencia [6] desarrolla una guía de aplicación de las normas y prácticas recomendadas para el cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas industriales, tomando en cuenta la contribución a la falla de motores mayores a 1000 HP. Para establecer un procedimiento de cálculo de corrientes de cortocircuito se toma en cuenta las normas C37.010 y C37.5, conjuntamente con algunas suposiciones que tienden a simplificar el cálculo.

En base a esta referencia se ha desarrollado un procedimiento de cálculo modificado de corrientes de cortocircuito que contempla fundamentalmente el aporte de corrientes de cortocircuito de un motor que está conectado al punto de falla.

La metodología que se desarrolla está orientada a la especificación de interruptores de Alta Tensión.

4.6.2 Procedimiento de cálculo

Régimen momentáneo

- 1) Desarrollo de un diagrama unilineal del sistema eléctrico industrial cuyos parámetros son obtenidos en forma idéntica a la realizada por la norma ANSI/IEEE.
- 2) Construir el diagrama de impedancias en por unidad del sistema.
- 3) Introducir el número de la barra de cortocircuito.
- 4) Identificar si hay motores mayores a 1000 HP conectados a la barra fallada.

- 5) Si no hay, pasar al punto 7).
- 6) Si hay, calcular los factores de multiplicación y las contribuciones para los motores de inducción ó síncronos. Luego del cálculo, separarlos de la red.

Los factores de multiplicación aplicados a las impedancias subtransitorias de los grandes motores (mayores a 1000 HP) se asumieron tener un crecimiento exponencial con constantes de tiempo T''_d específicos para cada motor y dadas por el fabricante. Simpson (1986) recomienda el uso de los siguientes factores:

Motores de Inducción

$$FM_{mi} = e^{(R_r * t / (X''_d + X_e))} \quad (4.1)$$

Motores síncrónicos

$$FM_{ms} = e^{(t / T''_d)} \quad (4.2)$$

donde :

FM_{mi}, FM_{ms} : Factores de multiplicación para el motor de inducción y síncrono respectivamente.

R_r : Resistencia del rotor.

X''_d : Reactancia subtransitoria del motor.

X_e : Reactancia equivalente desde el motor a la barra de falla.

T''_d : Constante de tiempo subtransitorio.

t : Tiempo en segundos.

Estos factores son usados para determinar únicamente el decaimiento CA de la corriente de cortocircuito.

La misma referencia nos indica que, para calcular el decaimiento total (CA y CC) de la corriente de cortocircuito, aportada por cada motor a la falla, pueden ser halladas a través de las siguientes expresiones:

Motores de Inducción

$$ICC_{mi} = \frac{1}{Z''_{mi}} * \sqrt{(1 + 2 * e^{(-2 * (R_s + R_e) * t / (X''_d + X_e))})} \quad (4.3)$$

Motores síncrónicos

$$I_{CC_{ms}} = \frac{1}{Z''_{ms}} * \sqrt{(1+2 * e^{(-2 * t / T''_a)})} \quad (4.4)$$

$$\text{con } T''_d = T''_{d0} * (X''_d + X_e) / (X'_d + X_e) \quad (4.5)$$

$$\text{y } T''_a = (X_2 + X_e) / (1.25 * R_a + R_e) \quad (4.6)$$

donde :

$I_{CC_{mi}}, I_{CC_{ms}}$: Corrientes de aporte a la falla desde el motor de inducción ó motor sincrónico respectivamente.

Z''_{mi}, Z''_{ms} : Impedancia subtransitoria del motor de inducción y sincrónico respectivamente.

T''_{d0} : Constante de tiempo subtransitorio en circuito abierto.

T''_a : Constante de tiempo CC subtransitorio.

R_e, X_e : Resistencia y reactancia equivalente desde el motor a la barra de falla. ($R_e=0, X_e=0$, cuando el motor esta conectado a la barra fallada).

X'_d, X''_d : Reactancia subtransitoria y transitoria en eje directo.

X_2 : Reactancia de secuencia negativa.

R_a : Resistencia de armadura.

R_s : Resistencia del motor considerado en el diagrama de impedancias.

t : Tiempo en segundos.

Las expresiones (4.3) y 4.4) suponen usar el valor de 1.0 [p.u.] para representar la componente CA en la raiz cuadrada de la suma de los cuadrados de las componentes CA y CC.

7) Determinar la impedancia equivalente de la red vista desde el punto de falla (Z''_{eq}).

8) Hallar la corriente de cortocircuito del sistema en la barra de falla a partir de la expresión:

$$I_{sist} = 1.6 / Z''_{eq} \quad (4.7)$$

9) Calcular la corriente de falla total a partir de :

$$I_{cc} = I_{ccmi} + I_{ccms} + I_{sist} \quad (4.8)$$

10) Comparar con la corriente momentánea simétrica del interruptor considerado.

Régimen de interrupción

Las impedancias momentáneas de las máquinas rotatorias son cambiadas utilizando factores de multiplicación dadas por la norma (anexo **B**). Sólo para el caso de motores conectados a la barra de falla, se calcula el factor multiplicador correspondiente al motor dada por las ecuaciones (4.1) y (4.3). Para el caso de motores sincrónicos T''_d cambia a T'_d la cual está dada por:

$$T'_d = X_f(X'_d + X_e) / R_f(X_d + X_e) \quad (4.9)$$

donde :

R_f, X_f : Resistencia y reactancia autoinductiva del enrollado de campo.

X_d : Reactancia permanente en eje directo saturada.

Cuando la falla ocurre en los terminales del motor $Z_e=0$ y el aporte de los motores se calcula en forma separada.

El aporte de corriente de cortocircuito de los motores es calculada a través de las mismas expresiones (4.2) y (4.4) con la excepción de que Z''_{mi}, Z''_{ms} , cambia a impedancias transitorias Z'_{mi}, Z'_{ms} y para el caso de motores sincrónicos T''_a pasa a ser T_a dada por la misma relacion (4.6). La corriente de falla total será la suma del aporte de los motores y del resto del sistema.

4.7 Cálculo del Efecto de Cargas Rectificadas sobre el Sistema

En el capítulo 2, modelación de las cargas, se ha visto la operación del rectificador en un estado anormal ante la súbita caída de tensión en el lado CA del rectificador.

Mientras existe una tensión postfalla en la barra del rectificador existe el flujo de una corriente hacia el lado del rectificador. Como se verá en esta sección, esto hace que exista una redistribución de voltajes nodales.

Para el cálculo de los nuevos voltajes de barra se ha utilizado el método del algoritmo unificado (Arrillaga y Arnold, 1984). Consiste en seguir los siguientes pasos:

- 1) Reducir la red de corriente alterna, excluyendo el rectificador a un equivalente Thévenin, es decir, a una fuente de voltaje y una impedancia vista desde el lado primario de los terminales del transformador del rectificador, figura 4.1.

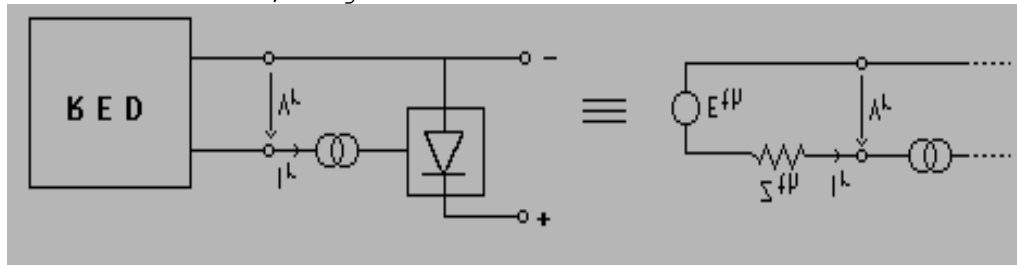


Figura 4.1 Equivalente Thévenin vista desde el rectificador

Para obtener la impedancia equivalente de la red, sólo es necesario inyectar una corriente de 1.0 [p.u.] en la barra que conecta a los terminales del rectificador, mientras en las otras las corrientes inyectadas son ceros. Con un vector de corrientes inyectadas de esta forma se obtiene una solución al sistema $[\mathbf{I}'_{iny}] = [\mathbf{Y}] [\mathbf{V}']$ dada por:

$$[\mathbf{Z}] \equiv [\mathbf{V}'] \equiv [\mathbf{Y}]^{-1} [\mathbf{I}'_{iny}] \quad (4.10)$$

donde $[\mathbf{Z}]$ es el vector columna que contiene la impedancia equivalente de Thévenin z_{rr} (driving point) y las impedancias de transferencia z_{ir} ; $i = 1, \dots, n$ $i = r$

- 2) Este equivalente del sistema, conjuntamente con el rectificador, pueden ser representadas por un número de ecuaciones simultáneas no lineales, para los diferentes modos de operación del rectificador, y resueltas por el algoritmo standard de Newton Raphson. La solución del sistema reducido nos da la corriente efectiva CA: \mathbf{I}_r
- 3) El efecto del rectificador sobre el resto del sistema se determina usando el principio de superposición :

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{V}^0] + [\mathbf{Z}] * \mathbf{I}_r \quad (4.11)$$

donde $[V^o]$ es el vector de voltajes de barra debido a las otras corrientes inyectadas en la red, excluyendo el rectificador.

En el caso de una falla, la única corriente inyectada en la red es la corriente de falla, la cual produce voltajes de barra postfalla $[V^o]$ sin considerar el convertidor.

De esta manera se puede determinar la influencia del rectificador sobre el sistema. Si la falla está alejada de la barra del rectificador, la magnitud del voltaje de la fuente de Thévenin aumenta, entonces la corriente en el lado CA del rectificador también se incrementa.

4.8 Cálculo del aporte de inversores sobre el sistema

Se ha visto, en el capítulo 2, la modelación del convertidor que se representa en el presente trabajo. En esta sección se determinará el aporte realizada por el convertidor cuando se produce un cortocircuito en el sistema industrial.

La figura 4.2 muestra un diagrama esquemático del convertidor acoplado a la red, en condiciones de falla.

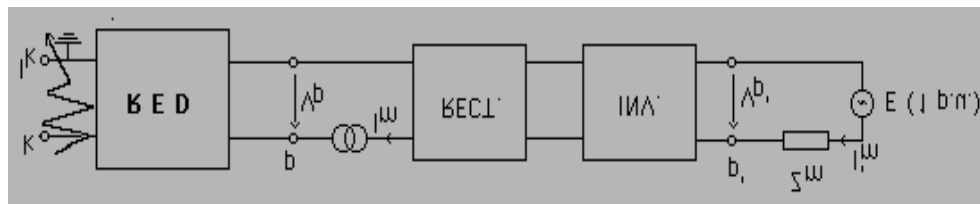


Figura 4.2 Diagrama esquemático del convertidor acoplado a la red para una condición de falla.

donde :

V_p : Tensión de postfalla efectiva en la barra p [p.u.]

I_k : Corriente de falla efectiva en la barra k [p.u.]

I_m : Corriente de aporte efectiva del convertidor [p.u.]

Tal como se ha visto al final de la sección 2.6.3, la corriente I_r es obtenida al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales por el método iterativo de Runge Kutta. El valor máximo de esta corriente I_{maxr} para el primer $\frac{1}{2}$ medio ciclo es determinada por el programa de simulación (Anexo H).

Este programa tiene incluido un método de cálculo de

la corriente efectiva de medio ciclo por el método de integración numérica de Simpson utilizando los valores de I_r .

Sin embargo de ello, se ha considerado el caso más desfavorable en que la corriente I_r no decrece en amplitud, manteniendo una forma sinusoidal.

De esta manera la corriente efectiva I_m debida al motor en la barra p será:

$$I_m = \frac{I_{\max r}}{\sqrt{2} I_B} \text{ [p.u.]} \quad (4.12)$$

siendo :

$I_{\max r}$: Corriente máxima alcanzada por $I_r(t)$ en el intervalo $0 < t < 0.01$ seg. [A]

I_B : Corriente base en la barra p [A]

El valor final de la corriente de falla I_k se halla usando el principio de superposición.

La condición más desfavorable es cuando $p=k$, es decir, el convertidor está conectado a la barra de falla. La nueva corriente de falla I_{kn} será:

$$I_{kn} = I_k + I_m \quad (4.13)$$

Cuando p es distinto de k, existe una impedancia equivalente Z_e entre el convertidor y la barra de falla la cual para el presente trabajo, fué asumida como nula.

Se supone que I_m es una corriente inductiva, como generalmente lo es en estudios de cortocircuitos.

Esta corriente inyectada a la red hará que exista una redistribución de voltajes de barra y corrientes de falla que circulan en las distintas ramas de la red.

En el capítulo VI se dá un ejemplo de aplicación para el presente caso.

V. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

5.1 Características Generales

El programa computacional a desarrollar busca determinar corrientes de cortocircuito para fallas trifásicas y monofásicas, basado en el método dado por la Norma ANSI/IEEE con el fin de especificar interruptores en cualquier elemento de un sistema eléctrico industrial.

Una segunda parte del programa analiza fallas trifásicas considerando la contribución, al cortocircuito, de motores mayores a 1000 HP y que están conectados a la barra de falla.

Por último se ha desarrollado algoritmos para el caso de sistemas industriales con convertidor (Inversor ó Rectificador).

5.2 Lenguaje utilizado

Los programas y rutinas desarrolladas se codificaron en lenguaje Turbo Pascal versión 6.0 de Borland, disponible para computadores personales. La elección de este lenguaje se apoya en las siguientes razones:

- i) Turbo Pascal es un lenguaje modular, estructurado por bloques, lo cual permite que el usuario no tenga mayor dificultad en introducir modificaciones.
- ii) El rango de tipos de datos es amplio. Además de los enteros y reales podemos definir estructuras "array" conteniendo tipos de datos diferentes. La estructura **RECORD** permite la inclusión de diferentes tipos de datos dentro de la misma estructura de datos.
- iii) En general, para un mismo problema de simulación, los requerimientos de espacio para el almacenamiento de los códigos fuente, objeto y ejecutable son menores en comparación a los lenguajes Fortran 77[30] y C. Igualmente el Turbo Pascal tiene un tiempo de compilación menor comparado a los lenguajes anteriores. Sin embargo programas ejecutables en Fortran tienen un tiempo de ejecución menor.

5.3 Componentes del Programa Computacional

Los diferentes algoritmos que se enunciaron en capítulos anteriores fueron transcritos a lenguaje Turbo

Pascal resultando los siguientes programas:

- i) **CC30ANSI** : Permite realizar los siguientes cálculos en base a las normas ANSI/IEEE :
 - a) Cálculo de corrientes de cortocircuito trifásico en régimen momentáneo y de interrupción para la especificación de interruptores de Alta Tensión.
 - b) Cálculo de corrientes de cortocircuito trifásico en régimen momentáneo y de interrupción para la especificación de interruptores de Baja Tensión.
- ii) **CC10ANSI** : Determina corrientes de falla monofásica en régimen momentáneo y de interrupción para especificar interruptores de Alta Tensión.
- iii) **CC30CONT** : Determina corrientes de falla trifásica la contribución de motores grandes.
- iv) **CC30CR** : Determina corrientes de falla y voltajes de barra para un cortocircuito trifásico, considerando la presencia de una carga rectificada en la red.
- v) **CC30INV** : Este programa calcula niveles de cortocircuito trifásico considerando el aporte de un inversor conectado en una barra del sistema.

Los diferentes programas estan compuestos por unidades Turbo Pascal, las cuales contienen **Procedimientos** (Subrutinas) que son llamadas por cada uno de los Programas mencionados líneas arriba. Los cinco programas son administradas por el programa principal llamado **SEI.PAS**, cuyo diagrama de bloques podemos apreciar en la figura 5.1.

5.4 Introducción de datos

Todos los programas tiene una introducción de datos a través de la lectura de archivos residentes en disco fijo. Esto debido a la gran cantidad de datos que se requiere para el estudio de cortocircuitos. La edición de estos se lo realiza utilizando algun editor de texto incluyendo el Turbo Pascal.

Los parámetros de los elementos del sistema están almacenados en diferentes archivos con toda la información

que se requiere para el cálculo. Así system.dat y trafos.dat contienen datos del sistema de suministro y transformadores respectivamente.

En el capítulo 6 correspondiente a ejemplos de aplicación, se ampliará más sobre la estructura de archivos de entrada.

Figura 5.1 Diagrama general de bloques del programa principal SEI.PAS

5.5 Descripción de los Programas

5.5.1 PROGRAMA CC30ANSI

La figura 5.2 muestra el diagrama de bloques del programa CC30ANSI para el caso de fallas **trifásicas** en régimen momentáneo e interrupción para la especificación de interruptores de Alta Tensión. El programa consta de varios procedimientos (subrutinas) cuya breve descripción se hace a continuación :

a) Prepara datos (Prepara_datos)

Una vez leído los datos de los componentes de la red, el programa está capacitado para obtener nuevos datos correspondientes al régimen momentáneo e interrupción aplicando factores de multiplicación dadas por las normas ANSI/IEEE ó excluyendo algunos elementos de la red, como motores pequeños para el caso de un estudio de fallas trifásicas en Alta Tensión.

b) Conversión a valores por unidad (Por_unidad)

La introducción de datos de los equipos estan referidos a base propia (valores de placa); las resistencias y reactancias de las líneas están introducidas en [ohms].

Figura 5.2 Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de cortocircuitos trifásicos en régimen momentáneo y de interrupción. (Programa CC30ANSI).

La rutina Por_unidad transforma todos los parámetros de la red a valores por unidad. Esto requiere una Potencia base, los voltajes nominales primario y secundario de

los transformadores existentes en la red. La rutina calcula la impedancia y la corriente base para cada barra; los resultados de la conversión los almacena en un archivo llamado **sal.dat** .

c) Reducción de paralelos (Reduce_Paralelos)

Sustituye todas las ramas en paralelo por uno equivalente. El algoritmo está en base a la búsqueda de aquellos elementos que tienen nodos iniciales y finales iguales. Con esto se evita que el número de ramas sea mayor al número de barras.

d) Calcula y escribe la admitancia de los elementos (Calcula_y_escribe_Y)

En base a las resistencias y reactancias se halla las componentes de la admitancia, es decir, la conductancia y susceptancia de los elementos, que conjuntamente con los nodos inicial y final se escriben en un archivo llamado **Y.dat**. Este archivo será leído por un programa Fortran.

e) Determinación de la impedancia equivalente

La figura 5.3 muestra el diagrama de bloques para hallar la impedancia equivalente de Thévenin vista desde el punto de falla. El programa principal hace una interrupción para ejecutar el programa de Fortran **VNODALZ.EXE**, el cual lee dos archivos: **CORR.DAT** y **Y.DAT**; genera **VN.TXT** correspondiente a los voltajes nodales de la red. Este último vector contiene las impedancias de circuito abierto y el equivalente de Thévenin.

f) Cálculo de la corriente de cortocircuito momentánea y de interrupción

La rutina **COCO30_AT** efectúa el cálculo de la corriente de cortocircuito simétrica. Para dar mayor precisión al cálculo se ha utilizado valores complejos usando para este efecto la rutina **COMPLEX**. La corriente asimétrica fué determinada usando factores multiplicadores tal como indica la norma ANSI/IEEE (Capítulo 4). Para el caso del régimen de interrupción, los factores multiplicativos se han obtenido desde las curvas FM vs. X/R, en base a una interpolación a polinomios cúbicos procedimiento mostrado en el anexo D y programada en la

rutina **SPLINE**. Esto requiere en forma previa la elección de un tipo de interruptor que se aplicará en el sistema.

Figura 5.3 Determinación de Z_{eq} mediante una interrupción para ejecutar un programa realizado en Fortran en el cálculo de cortocircuitos trifásicos.

Por otra parte también se calcula los voltajes de barra y corrientes de rama que circulan para el régimen momentáneo y de interrupción.

5.5.2 PROGRAMA CC10ANSI

La figura 5.4 nos muestra el diagrama de bloques general y la figura 5.5 nos da el diagrama en detalle para el cálculo de corrientes de cortocircuito **monofásico** en régimen momentáneo y de interrupción para la especificación de interruptores de Alta Tensión.

El programa tiene el mismo tipo de entrada, con la excepción de que se añade más información, como ser el tipo de conexión de transformadores y reactancias de secuencia cero. Debido a que no se considera el desfase de transformadores **no** se calcula las corrientes de rama para fallas monofásicas. Algunas rutinas nuevas son :

a) Formación de la red de secuencia cero (Red_Sec_Cero)

Se realiza en base al tipo de conexión de los transformadores, requiriendo en algunos casos la apertura de la red en varios puntos. Luego se hace la reducción de elementos en paralelo, para las redes de secuencia positiva y cero.

Figura 5.4 Diagrama de bloques para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico a tierra (Programa CC10ANSI).

Figura 5.5 Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de corrientes de cortocircuito monofásico en régimen momentáneo y de interrupción (Programa CC10ANSI).

b) Determinación de impedancias equivalentes $Z_{eq}(+)$ y $Z_{eq}(0)$

En este caso se utilizan dos archivos ejecutables de Fortran **VNODALZ1.EXE** y **VNODALZ0.EXE** que, leen cada uno a dos archivos **Y1.dat** y **Y0.dat** generando luego dos archivos **VN1.TXT** y **VN0.TXT** que constituyen los vectores impedancia que contienen a $Z_{eq}(+)$ y $Z_{eq}(0)$.

c) Corriente de cortocircuito momentánea y de interrupción

Las rutinas **Calculo Monofasico mom** y **Calculo Monofasico interrup** realizan el cálculo de la corriente de cortocircuito compleja momentánea y de interrupción usando la rutina **COMPLEX**.

La corriente de cortocircuito monofásica asimétrica de interrupción se determina en base a un factor multiplicador hallado mediante la rutina **SPLINE** ingresando el tipo de interruptor y una nueva razón : $(2X_1+X_0)/(2R_1+R_0)$.

5.5.3 PROGRAMA CC30CONT

La figura 5.6 muestra el diagrama de bloques para el cálculo de corrientes de falla trifásica, en régimen momentáneo, considerando el aporte de motores mayores a 1000 HP si están conectados a la barra de falla.

Figura 5.6 Diagrama de bloques para el cálculo de corrientes de falla trifásica en régimen momentáneo considerando la contribución de motores.

a) Determinación de motores conectados a la barra de falla

El procedimiento **Motores conectados** busca en los vectores de datos originales de motores síncronos ó inducción si son mayores a 1000 HP y están conectados a la barra fallada. En caso afirmativo calcula el factor multiplicador para el motor a través de los procedimientos: **Calc_Fmult_i** ó **Calc_Fmult_s**; en seguida se halla la contribución del motor mediante las rutinas: **Contrib_i** ó **Contrib_s** para luego excluirlos de la red.

En caso negativo se determina la corriente de cortocircuito del sistema completo. Después se calcula la corriente de falla total con el procedimiento **Calc_corr_total** que incluye la corriente de aporte de posibles motores conectados al nodo de falla.

5.5.4 PROGRAMA CC30CR

En la figura 5.7 se observa el diagrama de bloques

correspondiente al cálculo de corrientes de cortocircuito trifásico y voltajes nodales para un sistema industrial que tiene conectada una carga rectificadora.

Figura 5.7 Diagrama de bloques en detalle para el cálculo de los voltajes de barra post-falla en un sistema con carga rectificadora.

Leídas las barras de ubicación del rectificador y la barra de falla, el programa determina la corriente de cortocircuito a través de la rutina **CoCo30m** y los voltajes nodales mediante **Voltajes_Nodales**.

La impedancia de Thévenin vista desde la barra del rectificador es determinada por el procedimiento **Imped_equiv**. Luego en base a las relaciones mostradas en el capítulo 4 se calcula los parámetros del rectificador usando las rutinas **Calculo_Er_Ir** y **Calculo_Id**.

Finalmente se determina los nuevos voltajes nodales de la red post-falla usando el principio de superposición con el procedimiento **Nuevos_Volt_Nodales**. El programa concluye si no se requiere hacer otro estudio de fallas en otra barra.

5.5.5 Programa CC30INV

La figura 5.8 nos muestra el diagrama de bloques

correspondiente al sistema con inversor. Las nuevas rutinas implementadas son `Cmax_de_Inversor` y `Calculo_Im_Inv`.

La rutina **`Cmax_de_Inversor`** es el programa de simulación implementado para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales por el método de Runge Kutta de cuarto orden para el conjunto convertidor. Como resultado nos entrega la

Figura 5.8 Diagrama de bloques utilizado para el cálculo de corrientes de falla de un sistema con inversor. corriente máxima instantánea del lado rectificador para un rango de tiempo comprendido dentro el primer $\frac{1}{2}$ ciclo.

La rutina **`Calculo_Im_Inv`** determina la corriente efectiva en [p.u.] en base a la corriente máxima hallada en la rutina anterior.

El programa finaliza calculando la nueva corriente en la barra fallada utilizando la rutina **`Calc_Ik_total`**.

VI. APLICACION DE LOS MODELOS

6.1 Introducción

El presente capítulo presenta ejemplos de aplicación que ilustran los métodos del cálculo de variables eléctricas de una red cuando ocurre una determinada falla en el sistema.

En forma previa se efectúa la validación del programa computacional usando el sistema IEEE Std. 141 - 1976 publicado por la IEEE (1976) y el Sistema de 22 barras publicado por Dunki et. al. (1988).

Luego se realiza una serie de estudios al sistema IEEE Std. 141 - 1976 para fallas trifásicas con carga rectificadora ó un inversor estático. El sistema industrial publicado por la General Electric Co. (1980) se usa para fallas monofásicas.

Los datos para los diferentes sistemas estudiados se entregan en el anexo **F**.

6.2 Validación del Programa Computacional

Para la validación de la metodología y los programas desarrollados, en primer lugar, se ha tomado como referencia el Sistema IEEE Std. 141 - 1976.

El sistema, mostrado en la figura 6.1, tiene 19 barras y 48 elementos, según se muestra en la tabla F-1, del anexo **F**.

La IEEE (Red Book, 1976) utiliza el sistema para el cálculo corrientes de cortocircuito trifásico para la especificación de interruptores de alta tensión según las normas IEEE Std. 320 - 1972 y ANSI C37.5 - 1969 (R 1974).

En la referencia citada las redes de resistencia y reactancia se reducen en forma separada y las corrientes de cortocircuito se determinan como E/X para el régimen momentáneo y de interrupción.

En el presente trabajo, los datos de la red se introducen en base propia, el programa realiza la conversión a valores por unidad, para lo cual se utiliza una potencia base de 10 MVA. Después reduce todos los elementos en paralelo a uno equivalente, de esta manera se disminuye el número de elementos componentes de la red. En forma seguida

se hace la reducción de la red tomando a cada elemento como impedancia compleja. Las corrientes de cortocircuito se determinan como E/Z para el régimen momentáneo y de interrupción.

Figura 6.1 Diagrama unilineal del Sistema Industrial IEEE Std.141 - 1976.

La tabla VI-1 muestra una comparación entre los niveles de cortocircuito simétricos y asimétricos determinados por la referencia antes mencionada y el presente trabajo.

Tabla VI-1 Comparación de niveles de cortocircuito trifásico

SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL						
IEEE Std - 141 - 1976 DE 19 BARRAS						
=====						
REGIMEN MOMENTANEO						

1	2	3	4	5	6	7
		IEEE Red Book		Presente Trabajo		
		-----		-----		%
Barra de	Barra	Sim.	Asim.	Sim.	Asim	Correl.
falla	[KV]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]	(*)
4	13.80	25.500	40.800	24.862	39.780	2.56
6	4.16	30.900	49.400	30.681	49.090	0.63
17	4.16	12.200	19.500	12.181	19.490	0.05
REGIMEN DE INTERRUPCION						

4	13.80	24.670	28.370	24.630	27.955	1.49
6	4.16	28.720	28.720	28.580	28.579	0.49
17	4.16	10.840	11.920	10.840	11.728	1.64

* : Correlación = [(columna 4/columna 6) - 1]*100 %

De la tabla VI-1, observamos que los resultados que da el Programa Computacional, del presente trabajo, tienen buena concordancia con los obtenidos por la referencia mencionada.

Los valores menores que se obtuvieron se debe a que, en el presente trabajo, la reducción de la red se la hizo utilizando impedancias complejas.

En segundo lugar, el Programa Computacional, fué comprobado con el Sistema de 22 barras publicado por Dunki et. al. (1988). Los datos correspondientes a este sistema se muestran en el anexo **F**.

La comparación de los niveles de cortocircuitos para las distintas barras determinadas por la mencionada

referencia y el presente trabajo se muestra en la tabla F-9 del anexo **F**.

En dicha tabla se observa que no existe diferencia apreciable en los niveles de cortocircuito simétrico (CA).

Sin embargo, en los niveles de cortocircuito asimétrico (CA + CC) existen diferencias notables, esto se debe principalmente a las siguientes razones:

- i)** El uso del factor multiplicador para la corriente asimétrica en la citada referencia se basa en la recomendación de la norma ANSI C37.010 - 1979 que reconoce la aplicación de un factor multiplicador menor que 1.6, cuando la relación X/R es menor a 25. En el presente trabajo, se utilizó el factor 1.6 en forma constante.
- ii)** Las resistencias de las máquinas síncronas son consideradas como datos y en el presente trabajo son calculadas a partir de las relaciones X/R de la máquina. Los niveles de correlación simétricos (CA) para este caso, considero que son aceptables. Esta afirmación se basa en que las correlaciones están cerca al rango obtenido por otros investigadores. Así la tabla F-10 del anexo **F** muestra una comparación entre los métodos de cálculo standard ANSI, reducción compleja (R+jX) y separada R y jX, publicada por Dunki et. al. (1988).

6.3 Estudios y Análisis Realizados para el Sistema Industrial IEEE Std. 141 - 1976

Un Sistema Industrial puede requerir diversos tipos de estudios relacionados a cortocircuitos industriales, es por esta razón, y aprovechando las bondades del programa computacional se han realizado los siguientes estudios:

Sistema sin Convertidor

- i)** Niveles de falla trifásica, selección de interruptores de Alta Tensión
- ii)** Efecto de la contribución individual de grandes motores (>1000 HP)
- iii)** Aumento gradual de motores al sistema

Sistema con carga Rectificada

- iv) Redistribución de los voltajes de barra
- v) Efecto del cambio de la reactancia de conmutación Xc

Sistema con Inversor

- vi) Efecto de la inclusión de inversores en los niveles de falla
- vii) Efecto de la variación de la Potencia del motor
- viii) Efecto del cambio de la relación X/R del lado Rectificador

6.3.1 Niveles de Falla Trifásica

La tabla VI-2 muestra los resultados de niveles de cortocircuito trifásico en barras para el régimen momentáneo e interrupción. En la figura 6.2, podemos apreciar estos niveles en forma gráfica.

Tabla VI-2 Resultados de niveles de cortocircuito trifásico en barras - Programa CC30ANSI.

```

-----
SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL IEEE Std - 141 - 1976
NIVELES DE CORTOCIRCUITO TRIFASICO EN BARRAS
=====
REGIMEN MOMENTANEO
-----
Barra  Corriente de cortocircuito [rms]
        Magnitud      Angulo
        [p.u.]        [kA]      [grados]
-----
1      185,68      15,54      -87,29
2      135,36      16,99      -83,68
3       18,64      44,83      -86,39
4       95,08      39,78      -87,48
5       68,49      28,66      -71,11
6       35,37      49,09      -85,11
7       22,36     107,60      -86,52
8       22,36     107,60      -86,52
9         4,42      63,76      -84,27
10        4,42      63,76      -84,27
11        4,42      63,76      -84,27
12        4,42      63,76      -84,27
13       22,91      31,80      -68,53
14         4,13      59,60      -84,23
15         4,13      59,60      -84,23
16         4,13      59,60      -84,23

```

17	14,04	19,49	-87,48
18	3,57	51,51	-84,87
19	3,57	51,51	-84,87

REGIMEN DE INTERRUPCION

Barra	X/R	Icc[kA]	Factor	Corriente de CortoCircuito [rms]	
				Magnitud[kA]	Ang[grados]
1	22,15	9,70	1,1124	10,7924	-87,29
2	9,18	10,59	1,0000	10,5946	-83,67
3	16,35	27,61	1,0543	29,1071	-86,38
4	24,56	24,63	1,1348	27,9546	-87,55
5	2,74	17,58	1,0000	17,5753	-69,82
6	11,75	28,58	1,0000	28,5786	-85,02
7	16,51	62,47	1,0559	65,9684	-86,41
8	16,51	62,47	1,0559	65,9684	-86,41
9	10,23	38,40	1,0000	38,4009	-84,30

.....

... continuación de Tabla VI-2

10	10,23	38,40	1,0000	38,4009	-84,30
11	10,23	38,40	1,0000	38,4009	-84,30
12	10,23	38,40	1,0000	38,4009	-84,30
13	2,32	18,30	1,0000	18,2953	-66,61
14	10,14	35,55	1,0000	35,5525	-84,25
15	10,14	35,55	1,0000	35,5525	-84,25
16	10,14	35,55	1,0000	35,5525	-84,25
17	23,90	10,84	1,0810	11,7280	-87,48
18	11,69	29,98	1,0000	29,9751	-84,99
19	11,69	29,98	1,0000	29,9752	-84,99

Figura 6.2 Niveles de cortocircuito trifásico en [p.u.] del sistema industrial IEEE Std. 141

De la figura 6.2, se observa claramente que existe una disminución de los niveles de falla en el régimen de interrupción.

En la tabla VI-3, podemos observar los voltajes por barra y las corrientes que fluyen por las ramas durante el cortocircuito para una falla trifásica en la barra 4, estos mismos resultados podemos apreciar en las figuras 6.3 y 6.4 .

Tabla VI-3 Voltajes de barra y corrientes por rama para falla trifásica en barra 4. - Programa CC30ANSI.

-

R E S U L T A D O S - REGIMEN MOMENTANEO

=====

VOLTAJES DE BARRA PARA FALLA TRIFASICA EN NODO : 4

BARRA	Magnitud [p.u.]	[KV]	Angulo [grados]
1	0.7778	53.6663	-0.0264
2	0.9678	44.5172	-0.0032
3	0.7737	1.8568	-1.0626
4	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0596	0.8222	-47.8714
6	0.6347	2.6402	-1.4847
7	0.1806	0.2168	-1.7839
8	0.1806	0.2168	-1.7839
9	0.0576	0.0230	0.6108
10	0.0576	0.0230	0.6108
11	0.0576	0.0230	0.6108
12	0.0576	0.0230	0.6108
13	0.6552	2.7254	-3.0551
14	0.6557	0.2623	-1.3345
15	0.6557	0.2623	-1.3345
16	0.6557	0.2623	-1.3345
17	0.7082	2.9461	-0.9512
18	0.7250	0.2900	-0.8600
19	0.7250	0.2900	-0.8600

....

.... continuación de tabla VI-3

CORRIENTES DE FALLA POR RAMAS PARA FALLA TRIFASICA EN BARRA: 4

N o d o		Magnitud		Angulo
Inicial	final	[p.u.]	[KA]	[grados]
1	- 4	22.1969	9.2865	-87.18
5	- 6	5.4001	7.4946	96.37
2	- 6	2.5621	3.5559	-83.49
3	- 6	1.2603	1.7491	-84.26
4	- 7	2.4570	1.0279	92.42
4	- 8	2.4570	1.0279	92.42
4	- 9	0.1562	0.0654	96.44
4	- 10	0.1562	0.0654	96.44
4	- 11	0.1562	0.0654	96.44
4	- 12	0.1562	0.0654	96.44
6	- 14	0.0572	0.8253	99.02
6	- 15	0.0572	0.8253	99.02
6	- 16	0.0572	0.8253	99.02
17	- 18	0.0456	0.6583	98.81
17	- 19	0.0456	0.6583	98.81
6	- 17	0.6919	0.9602	94.91
4	- 5	5.4005	2.2594	96.40
6	- 13	0.7147	0.9919	97.91

A partir de los resultados obtenidos se puede llegar a especificar interruptores como se verá a continuación.

Figura 6.3 Voltajes de barra para un cortocircuito trifásico en la barra 4, Sistema IEEE Std. 141 - 1976

Figura 6.4 Corrientes por rama para un cortocircuito trifásico en la barra 4, Sistema IEEE Std. 141

6.3.1.1 Selección de interruptores

Para la selección del interruptor se considera los siguientes pasos:

- i) Identificar la barra de falla
- ii) La capacidad del interruptor se selecciona en base a las corrientes totales de falla en régimen momentáneo y de interrupción.
- iii) Para el caso de interruptores en base a valores simétricos, según la norma ANSI/IEEE C37.06 - 1979, la capacidad de interrupción efectiva está determinada por:

$$CI = K * I_{ccn} \quad (6.1)$$

donde :

- K** : Factor de rango de voltaje
- I_{ccn}** : Corriente de corto circuito nominal del interruptor

La tabla VI-4 nos muestra una comparación entre los niveles de cortocircuito trifásico obtenidos en la barra 4 y las capacidades nominales del interruptor seleccionado de cinco de la tabla E-2, anexo E.

Tabla VI-4 Comparación de nivel de cortocircuito en barra 4 con las capacidades de un interruptor.

VALORES CALCULADOS	Corriente Momentánea [KA]	.....	40.76
	Corriente de Interrupción [KA]	...	27.95
CAPACIDADES DEL INTERRUPTOR	Voltaje Máximo Nominal [KV]	.....	15.00
	Voltaje de Operación [KV]	.....	13.20
	Factor de Rango	.....	1.30
	Corriente de Cortocircuito Nominal [KA]	.....	28.00
	Corriente Momentánea [KA]	.....	58.00
	Corriente de Interrupción [KA]	..	36.40
	(Ecuac. 6.1)		

Seleccionado así, el interruptor cumple con las condiciones dadas por el sistema.

6.3.2 Contribución individual de grandes motores

Utilizando el mismo sistema industrial se ha determinado niveles de falla trifásica considerando el aporte de motores cuando estos están conectados a la barra de falla. La tabla VI-5 nos muestra los niveles de cortocircuito trifásico para el régimen momentáneo.

Tabla VI-5 Cortocircuito trifásico con la contribución de motores.

NIVELES DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO CON LA CONTRIBUCION DE MOTORES > 1000 HP CONECTADOS A LA BARRA FALLADA

~~~~~

Corriente de Corto Circuito

| Barra | Mag[p.u.] | Mag[kA] | Ang[°]   |
|-------|-----------|---------|----------|
| 1     | 185.6841  | 15.5369 | -87.2920 |
| 2     | 135.3605  | 16.9892 | -83.6776 |
| 3     | 18.6360   | 44.8313 | -86.3896 |
| 4     | 95.0814   | 39.7792 | -87.4849 |
| 5     | 68.4944   | 28.6560 | -71.1070 |
| 6     | 35.3687   | 49.0868 | -85.1110 |
| 7     | 17.5695   | 84.5311 | -86.1204 |
| 8     | 17.5695   | 84.5311 | -86.1204 |
| 9     | 4.4008    | 63.5208 | -84.2833 |
| 10    | 4.4008    | 63.5208 | -84.2833 |
| 11    | 4.4008    | 63.5208 | -84.2833 |
| 12    | 4.4008    | 63.5208 | -84.2833 |
| 13    | 19.7854   | 27.4594 | -65.4480 |
| 14    | 4.0859    | 58.9753 | -84.2468 |
| 15    | 4.0859    | 58.9753 | -84.2468 |
| 16    | 4.0859    | 58.9753 | -84.2468 |
| 17    | 10.3957   | 14.4278 | -87.2500 |
| 18    | 3.3067    | 47.7276 | -84.9957 |
| 19    | 3.3067    | 47.7276 | -84.9957 |

-----

CONTRIBUCION DE CORRIENTES DE FALLA

MOTORES DE INDUCCION

| Barra | Factor | Mag[kA] | Ang[°] |
|-------|--------|---------|--------|
|-------|--------|---------|--------|

|    |        |        |          |
|----|--------|--------|----------|
| 13 | 1.0196 | 2.4223 | -88.0061 |
| 13 | 1.0196 | 2.4223 | -88.0061 |
| 17 | 1.0196 | 2.4223 | -88.0061 |
| 17 | 1.0196 | 2.4223 | -88.0061 |

MOTORES SINCRONICOS

| Barra | Factor | Mag [kA] | Ang [°]  |
|-------|--------|----------|----------|
| 7     | 1.0159 | 14.2022  | -87.9991 |
| 8     | 1.0159 | 14.2022  | -87.9991 |

**Figura 6.5** Niveles de cortocircuito en [p.u.] considerando la contribución de motores > 1000 HP.

**Figura 6.6** Niveles de cortocircuito en [kA] considerando la contribución de motores > 1000 HP.

En las figuras 6.5 y 6.6 podemos apreciar la variación de los niveles de cortocircuito que existe en las barras 7, 8, 13 y 17 donde hay conectado(s) motores de potencias mayores a los 1000 HP.

La tabla VI-6 muestra el porcentaje de contribución de los motores sincrónicos y de inducción del sistema industrial.

**Tabla VI-6** Porcentaje de contribución de motores mayores a 1000 HP.

| Barra | Motor      | I <sub>ccT</sub><br>[kA] | I <sub>Mot</sub><br>[kA] | % I <sub>ccT</sub> |
|-------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| 7     | Sincrónico | 84.5311                  | 14.2022                  | 16.80              |
| 8     | Sincrónico | 84.5311                  | 14.2022                  | 16.80              |
| 13    | Inducción  | 19.7854                  | 2.4223                   | 12.24              |
| 13    | Inducción  | 19.7854                  | 2.4223                   | 12.24              |
| 17    | Inducción  | 10.3957                  | 2.4223                   | 23.30              |
| 17    | Inducción  | 10.3957                  | 2.4223                   | 23.30              |

donde :

I<sub>ccT</sub> : Corriente de cortocircuito total  
 I<sub>Mot</sub> : Corriente aportada por el Motor  
 % I<sub>ccT</sub> : Porcentaje de la corriente del motor con respecto a la corriente total.

A partir de las tablas VI-2 y VI-5, las figuras 6.5 y 6.6 se observa que las barras 7 y 8, donde están conectados los motores sincrónicos de 6000 HP, sufren una disminución en el nivel de cortocircuito, significando que la norma ANSI/IEEE C37.5 - 1969 obtiene niveles de falla mayores.

El nivel de corriente de falla trifásica en la barra 7 tiene un decremento del 21.74 % con respecto a lo obtenido por la norma ANSI (Tabla VI-2). Esto debido a que en esta barra, la contribución del motor sincrónico fué calculada en forma diferente a la realizada por la norma. El cálculo hecho, toma en cuenta un decaimiento exponencial de la corriente de aporte del motor según se explica en la sección 4.5.2 del capítulo 4.

### 6.3.3 Aumento gradual de motores al Sistema Industrial

En esta sección veremos la influencia a los niveles de cortocircuito por los diferentes motores que se agregan a un sistema en expansión.

El estudio se basa en las siguientes suposiciones:

- i) Dado un sistema industrial, la adición de motores se hace manteniendo el número de barras constante.
- ii) La adición de motores de inducción y sincrónicos se realiza en orden creciente a su potencia nominal.

La tabla VI-7 muestra un plan de adición de motores al sistema.

**Tabla VI-7** Adición subsecuente de motores al Sistema Industrial IEEE Std. 141 - 1976.

| No. | Motor                                       | barra                        | agregada | Potencia  |      |
|-----|---------------------------------------------|------------------------------|----------|-----------|------|
|     |                                             |                              |          | acumulada |      |
|     |                                             |                              |          | [HP]      | [HP] |
| 1   | M3<br>inducc.<br>( $< 50$ HP)               | 9,10,11,12,14<br>15,16,18,19 |          | 360       | 360  |
| 2   | M4<br>inducc.<br>( $50 < \text{HP} < 150$ ) | 9,10,11,12,14<br>15,16,18,19 |          | 675       | 1035 |
| 3   | M2<br>inducc.                               | 13                           |          | 1750      | 2785 |
| 4   | M2<br>inducc.                               | 13                           |          | 1750      | 4535 |

|                                                        |         |  |    |  |      |  |       |  |
|--------------------------------------------------------|---------|--|----|--|------|--|-------|--|
| \| 5 | \| M2 | \| | \| 17 | \| | \| 1750 | \| | \| 6285 | \| |
| \| | \| inducc. | \| | \| | \| | \| | \| | \| | \| |
| +-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+----- |         |  |    |  |      |  |       |  |
| \| 6 | \| M2 | \| | \| 17 | \| | \| 1750 | \| | \| 8035 | \| |
| \| | \| inducc. | \| | \| | \| | \| | \| | \| | \| |
| +-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+----- |         |  |    |  |      |  |       |  |
| \| 7 | \| M1 | \| | \| 7 | \| | \| 6000 | \| | \| 14035 | \| |
| \| | \| sincr. | \| | \| | \| | \| | \| | \| | \| |
| +-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+----- |         |  |    |  |      |  |       |  |
| \| 8 | \| M1 | \| | \| 8 | \| | \| 6000 | \| | \| 20035 | \| |
| \| | \| sincr. | \| | \| | \| | \| | \| | \| | \| |
| +-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+----- |         |  |    |  |      |  |       |  |

La figura 6.7 nos muestra los distintos niveles de falla obtenidos al adicionar motores en las diferentes barras de la red.

A partir de la figura 6.7 podemos observar que la adición de motores no afecta a las barras de suministro 1 y 2. Esto debido a que la impedancia de Thévenin en estas barras no cambian en forma apreciable. Por otra parte, si no se agregan los motores sincrónicos (barras 7 y 8) el nivel de falla en las distintas barras, prácticamente, está determinado por el nivel de cortocircuito de la Empresa Eléctrica.

**Figura 6.7** Variación de los niveles de falla ante el incremento del número de motores.

#### **6.3.4 Sistema Industrial IEEE Std. 141 con carga Rectificada**

La figura 6.8 muestra el Sistema Industrial IEEE Std. 141, visto ahora con carga rectificadora conectada en la barra 6.



**Figura 6.8**

La tabla VI-8 nos muestra los datos y resultados del convertidor en condiciones de falla, además de los voltajes de barra del sistema para una falla trifásica en la barra 4.

**Tabla VI-8** Datos y resultados de falla trifásica en el sistema industrial con carga rectificadora.

```
-----  
SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL IEEE Std -141 -1976  
DATOS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FALLAS DE UN SISTEMA  
ELECTRICO INDUSTRIAL CON CARGA RECTIFICADA  
=====
```

Falla trifásica en barra : 4  
Corriente de Corto Circuito Asimétrico [kA] : 39.7792  
No. de barra del rectificador : 6  
Tension en bornes del rectificador [p.u.] : 0.4255

Lado CA  
~~~~~  
Datos :

Transformador : 4.16 KV/380 V, trifásico Y/Y
Reactancia de conmutación Xc [O] : 2.00

Resultados :

Irpu	IrAmp	IrAng[°]	Erpu	ErVolt	ErAng[°]
0.2127	89.0073	266.15	0.4255	5.8718	-3.73

Lado CC
~~~~~  
Datos :

Potencia [KW] = 12.00  
Vdc [Volt] = 600.00  
Vcarga = 12.00  
L/R [ms] = 113.00  
R [Ù] = 0.50

Resultados :

Idc (inicio) [Amp] = 20.000

Idc (½ ciclo) [Amp] = 19.950

....

.... continuación de tabla VI-7

| V O L T A J E S   N O D A L E S |                    |         |            |                    |         |            |
|---------------------------------|--------------------|---------|------------|--------------------|---------|------------|
| barra                           | Sin rectificador   |         |            | Con Rectificador   |         |            |
|                                 | Magnitud<br>[p.u.] | [KV]    | Ang<br>[°] | Magnitud<br>[p.u.] | [KV]    | Ang<br>[°] |
| 1                               | 0.6445             | 44.4698 | -0.05      | 0.6448             | 44.4899 | -0.05      |
| 2                               | 0.9484             | 43.6275 | -0.00      | 0.9493             | 43.6658 | -0.01      |
| 3                               | 0.6380             | 1.5313  | -2.07      | 0.6440             | 1.5456  | -2.12      |
| 4                               | 0.6000             | 8.2800  | 180.00     | 0.5987             | 8.2620  | 180.01     |
| 5                               | 0.5408             | 7.4629  | 187.51     | 0.5392             | 7.4403  | 187.61     |
| 6                               | 0.4159             | 1.7302  | -3.62      | 0.4255             | 1.7701  | -3.73      |
| 7                               | 0.3112             | 0.3735  | 181.65     | 0.3101             | 0.3722  | 181.66     |
| 8                               | 0.3112             | 0.3735  | 181.65     | 0.3101             | 0.3722  | 181.66     |
| 9                               | 0.5079             | 0.2032  | 179.89     | 0.5067             | 0.2027  | 179.90     |
| 10                              | 0.5079             | 0.2032  | 179.89     | 0.5067             | 0.2027  | 179.90     |
| 11                              | 0.5079             | 0.2032  | 179.89     | 0.5067             | 0.2027  | 179.90     |
| 12                              | 0.5079             | 0.2032  | 179.89     | 0.5067             | 0.2027  | 179.90     |
| 13                              | 0.4502             | 1.8727  | -7.13      | 0.4593             | 1.9107  | -7.10      |
| 14                              | 0.4493             | 0.1797  | -3.11      | 0.4584             | 0.1834  | -3.21      |
| 15                              | 0.4493             | 0.1797  | -3.11      | 0.4584             | 0.1834  | -3.21      |
| 16                              | 0.4493             | 0.1797  | -3.11      | 0.4584             | 0.1834  | -3.21      |
| 17                              | 0.5333             | 2.2185  | -2.01      | 0.5409             | 2.2502  | -2.11      |
| 18                              | 0.5601             | 0.2240  | -1.78      | 0.5673             | 0.2269  | -1.87      |
| 19                              | 0.5601             | 0.2240  | -1.78      | 0.5673             | 0.2269  | -1.87      |

A continuación se analiza el efecto de la carga rectificadora sobre el sistema.

#### 6.3.4.1 Variación de voltajes de barra

La figura 6.9 y la tabla VI-8 nos muestra la variación de voltajes de barra del sistema cuando el mismo tiene conectada una carga rectificadora. Con ayuda de la tabla VI-9 podemos cuantificar el porcentaje de cambio de los voltajes postfalla.

**Tabla VI-9** Porcentaje de variación de voltajes de barra del Sistema Industrial con carga Rectificada

| barra | SR | CR | % V |
|-------|----|----|-----|
|-------|----|----|-----|

|    | [p.u]  | [p.u.] |       |
|----|--------|--------|-------|
| 1  | 0.6445 | 0.6448 | 0.05  |
| 2  | 0.9484 | 0.9493 | 0.09  |
| 3  | 0.6380 | 0.644  | 0.94  |
| 4  | 0.6000 | 0.5987 | -0.22 |
| 5  | 0.5408 | 0.5392 | -0.30 |
| 6  | 0.4159 | 0.4255 | 2.31  |
| 7  | 0.3112 | 0.3101 | -0.35 |
| 8  | 0.3112 | 0.3101 | -0.35 |
| 9  | 0.5079 | 0.5067 | -0.24 |
| 10 | 0.5079 | 0.5067 | -0.24 |
| 11 | 0.5079 | 0.5067 | -0.24 |
| 12 | 0.5079 | 0.5067 | -0.24 |
| 13 | 0.4502 | 0.4593 | 2.02  |
| 14 | 0.4493 | 0.4584 | 2.03  |
| 15 | 0.4493 | 0.4584 | 2.03  |
| 16 | 0.4493 | 0.4584 | 2.03  |
| 17 | 0.5333 | 0.5409 | 1.43  |
| 18 | 0.5601 | 0.5673 | 1.29  |
| 19 | 0.5601 | 0.5673 | 1.29  |

donde :

SR : Sin rectificador

CR : Con rectificador

% V : Porcentaje de variación del voltaje respecto al sistema sin rectificador.

De la tabla VI-9 y la figura 6.9 observamos que la barra 6, a la cual está conectada el rectificador, tiene un mayor efecto en la variación de la tensión de barra. Otras alejadas de la barra del convertidor tienen una menor influencia, en el voltaje, durante la falla. El grado de variación dependerá de las impedancias de Thévenin y de transferencia vistas desde la barra del rectificador según las ecuaciones (2.10) y (4.11).

**Figura 6.9** Voltajes de barra del Sistema bajo estudio con y sin carga rectificadora, falla trifásica en barra 4.

#### **6.3.4.2 Efecto del cambio de la reactancia de conmutación $X_c$**

Las figuras 6.10 y 6.11 nos muestran el efecto que tiene la disminución de la reactancia de conmutación en el lado CA del rectificador para fallas trifásicas en las barras 4 y 13 respectivamente.

De la figura 6.10 observamos que existe una mayor variación en las barras que están conectadas a la barra del convertidor (aguas abajo).

Para una falla en la barra 13, como muestra la figura 6.11, observamos el mismo efecto, es decir, una variación a partir de la barra 13 hacia las barras de baja tensión dependientes de la barra número 6.

Durante el proceso de simulación de fallas para distintos valores de  $X_c$  se ha observado que los voltajes de barra permanecen constantes para valores mayores a  $X_c=4.0$  ohms.

**Figura 6.10** Efecto de la variación de la reactancia de conmutación  $X_c$  para una falla trifásica asimétrica en la barra 4.

**Figura 6.11** Efecto de la variación de la reactancia de conmutación  $X_c$  para una falla trifásica en la barra 13.

#### **6.3.5 Sistema Industrial IEEE Std. 141 con Inversor**

La figura 6.12 muestra el Sistema industrial de la IEEE Std. 141 de 19 barras con un convertidor bidireccional (Rectificador - Inversor) conectado en la barra 6.

**Figura 6.12** Diagrama unilineal del Sistema Industrial IEEE Std. 141 - 1976, con Inversor.

La tabla VI-10 nos muestra los datos y los niveles de cortocircuito obtenidos para el sistema industrial con inversor.

**Tabla VI-10** Datos y niveles de cortocircuito trifásico para el sistema industrial IEEE Std - 141 - 1976 con inversor.

```
-----  
-  
ESTUDIO DE FALLAS DEL SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL IEEE Std.      141 - 1976  
CON UN INVERSOR CONECTADA EN LA BARRA 6  
=====
```

DATOS DEL SISTEMA  
-----  
Número de barras : 19  
Número de elementos : 38  
Potencia Base [MVA] : 10

DATOS NOMINALES DEL CONVERTIDOR  
-----

Lado del Rectificador  
~~~~~  
Vs = 380 Voltios L-L

Transformador
4.16 KV/380/220 V. , 50 Hz
Zt = 5 % bp
X/R = 10

Enlace DC
~~~~~  
C = 0.01 [Faradios]

Lado Inversor  
~~~~~  
Motor de Inducción

150 HP, trifásico, 380 V., 50 Hz
Z" = 0.2 Impedancia del motor en p.u. bp
X/R = 7.0 Relación X/R del motor

Compensación
~~~~~  
Kp = 3.2 [Amp/Volt]  
Vref = 600 Vdc.

....

.... continuación de tabla VI-9

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FALLAS DE UN SISTEMA  
ELECTRICO INDUSTRIAL CON INVERSOR

```

=====
No. de barra del Convertidor           :           6
Tension en la barra del Convertidor [p.u.] :       0.8786
  
```

NIVELES DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO CON LA CONTRIBUCION DE  
MOTORES CONECTADOS A TRAVES DE CONVERTIDORES

~~~~~

Corriente de Corto Circuito			
Barra	Mag[p.u.]	Mag[kA]	Ang[°]
1	186.5306	15.6078	-87.3038
2	136.5434	17.1377	-83.7315
3	19.8072	47.6488	-86.5960
4	96.3381	40.3049	-87.5161
5	69.7235	29.1702	-71.4499
6	36.0212	49.9925	-85.1975
7	23.1925	111.5850	-86.6373
8	23.4106	112.6341	-86.6675
9	5.1617	74.5024	-85.0823
10	5.1617	74.5024	-85.0823
11	5.1617	74.5024	-85.0823
12	5.0410	72.7604	-84.9673
13	24.2319	33.6306	-69.7482
14	4.8593	70.1375	-85.0808
15	4.8593	70.1375	-85.0808
16	4.8519	70.0313	-85.0735
17	14.6530	20.3364	-87.5775
18	4.2034	60.6702	-85.6314
19	4.2034	60.6702	-85.6314

Las impedancias del transformador convertidor y el motor más las relaciones X/R se utilizan para determinar R_r, L_r, R_i, L_i representados en la figura 2.12 del capítulo 2.

La figura 6.13, nos muestra las formas de onda de las corrientes i_i, i_2, i_1 e I_r (figura 2.12) para una falla trifásica en la barra 4, resultado del programa de simulación, descrito en el anexo H.

Figura 6.13 Formas de onda de las corrientes instantáneas del convertidor ante una falla trifásica en una barra del sistema.

La corriente máxima I_m es obtenida por el programa de simulación, la cual es empleada para calcular la nueva corriente efectiva en la barra fallada.

6.3.5.1 Efecto de la inclusión de Inversores en los niveles de falla

Los resultados de la tabla VI-10 fueron graficados tal como se muestran en las figuras 6.14 y 6.15. Para la obtención de corrientes en kiloamperes se usó los valores de corriente base que se muestran en la tabla F-1 del anexo F. A partir de estos resultados podemos deducir que, para las características del convertidor y motor dados, existe una mayor variación de los niveles de falla a partir de la barra 6 (aguas abajo).

Según se muestra en la tabla VI-11 las mayores variaciones, están en las barras de baja tensión en la que están conectados motores menores a 150 HP.

Figura 6.14 Niveles de falla en [p.u.] del Sistema Industrial IEEE Std. 141 con y sin inversor.

Figura 6.15 Niveles de falla en [kA] del Sistema Industrial IEEE Std. 141 con y sin inversor.

Tabla VI-11 Porcentaje de Incremento de niveles de falla

1	2	3	4
barra	Con Inversor	Sin Inversor	% de Incr.
	[PU]	[PU]	(*)
1	186,5306	185,68	0,46
2	136,5434	135,36	0,87
3	19,8072	18,64	6,26
4	96,3381	95,08	1,32
5	69,7235	68,49	1,80
6	36,0212	35,37	1,84
7	23,1925	22,36	3,72
8	23,4106	22,36	4,70
9	5,1617	4,42	16,78
10	5,1617	4,42	16,78
11	5,1617	4,42	16,78
12	5,041	4,42	14,05
13	24,2319	22,91	5,77
14	4,8593	4,13	17,66
15	4,8593	4,13	17,66
16	4,8593	4,13	17,66
17	14,653	14,04	4,37
18	4,2034	3,57	17,74
19	4,2034	3,57	17,74

(*) : % Incremento = [(col.2/col.3)-1]*100

6.3.5.2 Variación de la Potencia del motor del Inversor

La figura 6.16 muestra los niveles de cortocircuito del sistema sin inversor y los niveles correspondientes a dos casos: sistema con inversor que suministra a un motor de 100 HP y el otro a un motor de 150 HP.

Observamos que, para la potencia menor del motor existe una disminución del aporte a la falla. Para motores entre 100 y 150 HP existe un rango de variación máximo, respecto del sistema sin inversor, de aproximadamente entre el 18 y 27%, tal como se muestra en las barras 18 y 19 de la figura 6.17.

Figura 6.16 Variación de niveles de falla debido a convertidores que alimentan distintas potencias de motor.

Figura 6.17 Porcentajes de variación de niveles de falla respecto del sistema sin convertidor para diferentes potencias de motor.

6.3.5.3 Efecto del cambio de la relación X/R en el lado del rectificador

En la figura 6.18 podemos observar los niveles de falla para distintas relaciones X/R del lado rectificador del convertidor que alimenta a un motor de 150 HP.

Para relaciones X/R menores a 10 existe una tendencia a la disminución de los niveles de cortocircuito en menor grado comparado con el caso anterior. Esto debido al aumento de la resistencia del lado CA del convertidor.

Figura 6.18 Niveles de falla para distintas relaciones X/R del lado rectificador.

6.4 Sistema General Electric Co.

6.4.1 Consideraciones Generales

El sistema industrial publicado por la General Electric Co. (1980) está mostrado en la figura 6.19, consiste en 5 barras y 12 elementos. Los datos de la red se muestran en la tabla F-2 del anexo **F**. Este sistema se ha utilizado para efectuar fallas monofásicas.

aqui la red general Electric

6.3.1 Falla Monofásica en Alta Tensión

Los parámetros de secuencia cero no están claramente especificadas por la norma por lo que se consideró valores típicos de sistemas eléctricos. Los valores de secuencia negativa fueron considerados iguales a las de secuencia positiva según recomendaciones establecidas en la norma C37.010 - 1979.

La tabla F-2 del anexo **F** se muestran los datos de entrada, para la figura 6.19. La tabla VI-12 muestra los niveles de cortocircuito monofásico obtenidos en régimen momentáneo y de interrupción.

Tabla VI-12 Niveles de cortocircuito para una falla monofásica a tierra.

-

RESULTADOS DE CORTOCIRCUITO MONOFASICO PARA EL SISTEMA INDUSTRIAL ELECTRICO DE LA Figura 6.19

NIVELES DE CORTOCIRCUITO POR BARRAS EN [KA]

~~~~~

R E G I M E N            M O M E N T A N E O

| Barra | E/(2*Z1+Zo)<br>[kA] | Corriente Momentánea |        |
|-------|---------------------|----------------------|--------|
|       |                     | Mag[kA]              | Ang[°] |
| 1     | 4,3692              | 6,9907               | -87,26 |
| 2     | 8,4839              | 13,5742              | -87,61 |
| 3     | 12,0769             | 19,3231              | -85,07 |
| 4     | 9,0227              | 14,4364              | -80,88 |
| 5     | 3,8040              | 6,0864               | -49,55 |

.....

..... continuación de tabla VI-12

R E G I M E N    D E    I N T E R R U P C I O N

| Barra | X/R   | $E/(2*Z1+Zo)$<br>[kA] | Factor | Corriente de Interrupción |        |
|-------|-------|-----------------------|--------|---------------------------|--------|
|       |       |                       |        | Mag[kA]                   | Ang[°] |
| 1     | 21.90 | 4.3628                | 1.06   | 4.6428                    | -87.26 |
| 2     | 25.23 | 7.8461                | 1.10   | 8.6121                    | -87.61 |
| 3     | 10.83 | 10.7115               | 1.00   | 10.7115                   | -84.61 |
| 4     | 6.32  | 9.0125                | 1.00   | 9.0125                    | -80.89 |
| 5     | 1.13  | 3.5567                | 1.00   | 3.5567                    | -48.47 |

El cálculo de falla monofásica ha seguido la norma C37.010, la cual da factores de multiplicación según las curvas C.2 del anexo C, incorporadas al programa computacional, de tal forma que permiten hallar la corriente de falla en el régimen de interrupción.

No se determinó corrientes de falla que circulan por las ramas debido a la no consideración del desfase que producen los transformadores.

La aplicación a otros sistemas no se realizó debido a la no disponibilidad de parámetros de secuencia cero en sistemas industriales.

## 6.5 Sistema Eléctrico Industrial de 22 Barras [8],[9]

La figura 6.20, muestra el sistema eléctrico industrial de 22 barras y 51 elementos.

Todos los interruptores de 13.8, 4.16 y 2.4 KV nominales que se usan en el sistema son de 5 ciclos (tiempo de separación de contactos 3 ciclos) clasificados en base a valores simétricos. Los datos del sistema pueden verse en la tabla F-3 del anexo **F** y los resultados para una falla trifásica se muestran en la tabla VI-13 .

Sistema de 22 barras

**Tabla VI-13** Resultados para una falla trifásica en el sistema industrial de 22 barras.

```

-----
-
SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL DE 22 BARRAS
CORTOCIRCUITO TRIFASICO
R E S U L T A D O S      P O R      B A R R A S
=====
REGIMEN MOMENTANEO
-----
Barra      Corriente de cortocircuito [rms]
            Magnitud[kA] Angulo[grados]
-----
2          42.3959      -86.46
-----

REGIMEN DE INTERRUPCION
-----
Barra  X/R      Icc[kA]      Factor      Corriente de CortoCircuito [rms]
            Magnitud[kA]      Ang[grados]
-----
2      16.75   25.34      1.0147      25.7128      -86.46
-----

VOLTAJES DE BARRA PARA FALLA TRIFASICA EN NODO : 2
            Magnitud      Angulo
BARRA      [p.u.]      [KV]      [grados]
-----
1          0.7924      109.3578      3.3434
2          0.0000      0.0000      9.7390
3          0.0073      0.1005      -62.3829
4          0.0067      0.0927      -50.7242
5          0.0047      0.0651      -64.4072
6          0.0047      0.0651      -64.4072
7          0.0132      0.1823      -46.1863
8          0.2326      0.5583      -1.7202
9          0.2505      0.6013      -4.3796
10         0.2492      1.0367      -2.4875
11         0.4884      2.0318      -0.5532
12         1.0000      4.1600      0.0000
13         0.4914      2.0444      -0.8319
14         1.0000      0.4800      0.0000
15         0.6041      0.2900      -0.8085
16         0.4914      0.2359      -0.8319
17         0.6366      0.3056      -2.0437
18         0.6041      0.2900      -0.8085
19         1.0000      0.4800      0.0000

```



|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 20 | 1.0000 | 0.2080 | 0.0000 |
| 21 | 1.0000 | 0.2080 | 0.0000 |
| 22 | 1.0000 | 0.2080 | 0.0000 |

....

.... continuación de la tabla VI-13

CORRIENTES DE FALLA POR RAMAS PARA FALLA TRIFASICA EN BARRA : 2

| N o d o |       | Magnitud | Angulo         |
|---------|-------|----------|----------------|
| Inicial | final | [p.u.]   | [grados]       |
| 1       | - 2   | 26,3877  | 11,0398 -83,93 |
| 7       | - 10  | 5,9870   | 8,3091 92,99   |
| 6       | - 8   | 1,4347   | 3,4513 94,63   |
| 5       | - 8   | 1,4347   | 3,4513 94,63   |
| 12      | - 14  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 13      | - 16  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 13      | - 15  | 0,1853   | 2,2288 98,87   |
| 14      | - 20  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 19      | - 21  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 2       | - 7   | 5,9733   | 2,4991 93,11   |
| 2       | - 6   | 1,4259   | 0,5966 94,11   |
| 2       | - 5   | 1,4259   | 0,5966 94,11   |
| 2       | - 3   | 2,5571   | 1,0698 92,46   |
| 2       | - 4   | 2,4943   | 1,0435 92,25   |
| 11      | - 13  | 0,1849   | 0,2566 98,44   |
| 14      | - 19  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 15      | - 17  | 0,0748   | 0,8994 101,87  |
| 20      | - 22  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 8       | - 9   | 0,4311   | 1,0369 97,25   |
| 15      | - 18  | 0,0000   | 0,0000 0,00    |
| 10      | - 11  | 5,9872   | 8,3094 92,99   |

Este sistema ha sido utilizado por muchos investigadores que buscan métodos de cálculo de corrientes de cortocircuito cada vez con mayor precisión. A diferencia del Sistema de la IEEE Std. 141 - 1976, es un sistema con muchas cargas fundamentalmente máquinas síncronas e inducción lo cual hará que, una "buena" parte de la corriente de falla en las distintas barras del sistema sea aportada por motores.

## **VII. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS**

### **7.1 Conclusiones**

En este trabajo se presenta una formulación de procedimientos claros y relativamente sencillos para el cálculo de niveles de cortocircuito, en un sistema eléctrico industrial, basado en las normas ANSI/IEEE C37.010 - 1979 y C37.13 - 1981.

Los objetivos alcanzados son :

- i)** Desarrollo de un software computacional para determinar variables eléctricas, de un sistema industrial, bajo un estado de falla.
- ii)** Inclusión, en el estudio de fallas, del cálculo individual del aporte de motores mayores a una potencia nominal de 1000 HP, conectados a la barra de falla.
- iii)** La modelación del convertidor Puente de Graetz (CA-CC) y el denominado inversor estático trifásico (CA-CA) con control PWM y corriente controlada, en el estudio de fallas de un sistema industrial.

Entre las principales conclusiones que se tienen del presente trabajo se tiene:

Primero, de acuerdo a una comparación de resultados obtenidos por la norma ANSI/IEEE C37.05 (IEEE Std. 141, 1976), y el presente trabajo, el algoritmo computacional implementado permite ver que los métodos de cálculo dados por la norma obtienen valores en exceso.

La principal razón es que, en el presente trabajo, se usa impedancias complejas. La norma no considera la resistencia en el régimen momentáneo; en el régimen de interrupción, la relación X/R es obtenida desde reducciones de la red de resistencias y reactancias en forma separada.

Segundo, la obtención de la matriz de impedancia compleja  $Z_B$ , por columnas, utilizando el método de la bi - factorización, se traduce en menos uso de memoria y tiempo en el proceso de cálculo. Esto lleva como consecuencia a representar una red industrial casi real sin muchas simplificaciones al número de barras y elementos.

Tercero, al realizar cálculos de cortocircuitos tomando en cuenta la contribución de motores, existe una diferencia numérica con respecto al método propuesto por la norma ANSI/IEEE. Esta diferencia puede ser importante considerar en la especificación de interruptores, de manera especial, en sistemas industriales donde existen gran cantidad de motores con potencias mayores a 1000 HP.

Cuarto, con la inclusión de cargas rectificadas como parte del sistema industrial a través de una modelación dinámica del rectificador y con la consideración de modos anormales de operación, se obtiene una variación en los voltajes de barra, determinando de esta manera el grado de influencia del rectificador en el estudio de fallas de sistemas industriales.

Quinto, con la presencia de inversores estáticos se tiene una influencia en los niveles de cortocircuito, en especial en la barra del inversor. Cuanto mayor es la potencia nominal del motor "drive" se incrementa también el aporte a la corriente de falla.

Sexto, el programa computacional desarrollado es totalmente interactivo al usuario, es de fácil manejo y no requiere de conocimiento computacional para ser utilizado.

Séptimo, el programa desarrollado puede ser utilizado en sistemas de distribución con cargas predominantemente de motores, en parques industriales, en sistemas eléctricos de la minería, como una herramienta de análisis de fallas que permita la toma de decisiones en el campo de la protección de sistemas eléctricos industriales.

## **7.2 Desarrollo Futuro**

Este trabajo contempla una primera parte del análisis de fallas en sistemas industriales. Permite la realización de cálculos de corrientes de cortocircuito bajo las especificaciones de las norma ANSI/IEEE C37.010 - 1979, C37.5 - 1979 y C37.13 - 1981.

A continuación se proponen los siguientes trabajos para desarrollo futuro relacionados con la temática de ésta tesis.

Es frecuente tener en sistemas industriales instalados bancos de capacitores para la mejora de factor de potencia en los terminales de motores y en algunas barras susceptibles de una falla. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta la

modelación de la descarga de capacitores con constantes de tiempo pequeñas haciendo que el capacitor se descargue antes del primer medio ciclo contribuyendo de esta manera a la corriente de cortocircuito total.

Como resultado de la conexión de los bobinados de transformadores de potencia en estrella-delta ó delta-estrella, existe un inevitable desplazamiento de fase entre los circuitos de alta y baja tensión, por esta razón es necesario incluir en un desarrollo futuro un algoritmo al programa computacional para corregir este problema. Un algoritmo para la solución de este tipo de problema propone Gross (1986).

La aparición en forma creciente de equipos de control de velocidad de motores asincrónicos a través de convertidores CA - CA, (rectificación - inversión) es un aspecto importante. Luego, se hace necesario la modelación de inversores que tengan un esquema de control diferente al presentado en este trabajo.

Finalmente, la necesidad de contar con procedimientos normalizados para el cálculo de corrientes de cortocircuito es reconocido desde hace tiempo. Diferentes autores han presentado un número de alternativas, pero desafortunadamente nunca se logró tener una norma aceptada internacionalmente.

Tal es así que en forma creciente han aparecido metodologías de cálculo de cortocircuitos nuevos diferentes a los propuestos por la norma ANSI/IEEE por el avance rápido de la tecnología del computador sobre métodos tradicionales.

## REFERENCIAS

1. LOVE, D. J. (1990) Recent trends in reliability of large industrial power systems. **Proceedings of the 1990 IEEE Colloquium in South America**, Argentina, Brazil, Chile, Uruguay, Agosto-Septiembre, 1990.
2. DENNY, F. I. (1988) Future Computer Applications in Power. **IEEE Computer Applications in Power**, Vol. CAP-1, N° 1, 11-14.
3. KENNEDY, R. A. y RICKEY, D. N. (1989) Monitoring and Control of Industrial Power Systems. **IEEE Computer Applications in Power**, Vol. CAP-1, N° 3, 42-46.
4. VALENZUELA, L., ANIBAL M., CASANOVA M. y CANCINO, J. (1987) ASDI: Programa para el Análisis de Sistemas Eléctricos de Distribución Industrial. **VII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica**, Santiago, Octubre, 1987.
5. VASS, D.W., PRICE, M.M., DALTON, J.G., DALTON, S.G. y WHISENANT, S.G. (1979) ASDOP - An auxiliary system design optimization program. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-98, N° 4, 1303-1309.
6. SIMPSON, R. H. (1986) Multivoltage Short-Circuit Duty Calculations for Industrial Power Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. IA-22, N° 2, 365-381.
7. HUENING, W. C. JR. (1982) Calculating Short-Circuit Currents with Contributions from Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. IA-18, N° 2, 85-92.
8. DUNKI, J.JR., LAM, B. P. y STRATFORD, R. P. (1988) A Comparison of ANSI-Based and Dinamically Rigorous Short-Circuit Current Calculation Procedures. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol IA-24, N° 6, 1180-1194.
9. ROENNSPIESS, O. E. y EFTHYMIADIS, A.E. (1990) A comparison of Static and Dynamic Short-Circuit Analysis Procedures. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol IA-26, N° 3, 463-475.
10. IEEE Std 141 (1976) **Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants**. Institute Electric and Electronics Engineers, Nueva York.

11. IEEE Std. 493 (1980) **Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Comercial Power Systems.** Institute Electric and Electronics Engineers, Nueva York.
12. BEEMAN, D.L. (1955) **Industrial Power Systems Handbook.** McGraw-Hill, New York.
13. ARNOLD, C. P., TURNER K. S. y ARRILLAGA J. (1980) Modelling Rectifier Loads for a Multi-machine transient-stability Programme. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, N° 1, 79-85.**
14. ARRILLAGA I. y ARNOLD, C.P. (1984) **Computer Modelling of Electrical Power Systems,** John Wiley & Sons, New York.
15. BERGEN A. R. (1986) **Power System Analysis,** Prentice Hall, Nueva York.
16. ANSI/IEEE Standard C37.010 (1979) **Application Guide for AC High Voltaje Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.** American National Standards Institute, Inc. Nueva York.
17. ANSI/IEEE Standard C37.5 (1979) **Guide for Calculation of Fault Currents for Application of High Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis.** American National Standards Institute, Inc., Nueva York.
18. ANSI/IEEE Standard C37.13 (1981) **Low Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.** American National Standards Institute, Inc., Nueva York.
19. ANSI/IEEE Standard C37.06 (1979) **Preferred Ratings and Related Required Capabilities for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Simmetrycal.** American National Standards Institute, Inc., Nueva York.
20. STAGG, G. W. y EL-ABIAD, A. H. (1968) **Computer Methods in Power System Analysis.** McGraw - Hill Book Company, Nueva York.
21. MEISEL, J. (1975) **Principios de Conversión Electromecánico de la Energía,** McGraw-Hill, México.
22. BENAVENTE, H. U. (1989) **Cálculo de Cortocircuitos en Sistemas Eléctricos Industriales.** Memoria de Título de Ingeniero Civil Electricista, Departamento de Ingeniería

Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago.

23. GROSS, A. (1986) **Power System Analysis**. John Wiley & Sons, Nueva York.
24. KINDERMANN, G. (1992) **Curto Circuito**. Sagra-Dc Luzzato, Porto Alegre.
25. BRAMELLER, A., ALLAN, R.N. (1977) **Sparsity**. Pitman Publishing, Londres.
26. BRAMELLER A. (1974) Solution of large sparse equations with symmetrical real coefficients. **Working Paper Power Systems Laboratory**, UMIST, Manchester.
27. KOVACS, P.K. (1984) **Transient Phenomena in Electrical Machines**. Elsevier Science Publishers, Nueva York.
28. STIEFEL, L.E. (1969) **An Introduction to Numerical Mathematics**. Academic Press Inc., Nueva York.
29. WALLACH, Y. (1986) **Calculations and Programs for Power System Networks**, Prentice Hall, Nueva Jersey.
30. ALDEN, R.T.H. y KRISHNAMURTHI, R. (1986) Fortran vs. Pascal for power engineering programming under MS-DOS. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol PWRs-1, N° 4, 179-183.
31. YOUNG, D.M. y GREGORY, R.T. (1972) **A Survey of Numerical Mathematics**. Addison Wesley Publishing Company, Nueva York.
32. GENERAL ELECTRIC Co. (1980) **Short-Circuit Current Calculations for Industrial and Commercial Power Systems**. System Engineering Apparatus Distribution Sales Division, GET - 3550B Publication, Colorado.
33. EL-HAWARY M. (1983) **Electric Power Systems: Design and Analysis**. Reston Publishing Company, Reston, Virginia.
34. DIXON, J.W., KULKARNI, A.B., NISHIMOTO, N. y OOI, B.T. (1987) Characteristics of a controlled current PWM rectifier-inverter link. **IEEE Transactions on Industry Applicattions**, Vol IA-23, N° 6, 1022-1028.
35. MOHAN, N., UNDELAND, T.M. y ROBBINS, W.P. (1989) **Power Electronics**. John Wiley and Sons Inc., Nueva York.

36. DIXON, J. (1992) **Apuntes de Curso de Electrónica de Potencia**, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.



A N E X O S

## ANEXO A

### Factorización de Matrices, Bi-factorización

En forma frecuente el análisis de grandes sistemas de potencia requiere la solución de centenares y quizá miles de ecuaciones simultáneas teniendo la forma  $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$ , siendo  $\mathbf{A}$  una matriz de orden  $n$ . Una posibilidad es la inversión directa de la matriz, pero esto requiere  $n^2$  posiciones de almacenamiento para los coeficientes y cerca a  $n^3$  operaciones aritméticas para la solución de  $n$  ecuaciones simultáneas. De igual manera si  $\mathbf{A}$  es muy esparsa, su inversa es completamente llena y por lo tanto este método es muy ineficiente para la solución de un número grande de ecuaciones.

Existen varios métodos alternativos que tienden a ahorrar el uso de memoria de un computador como también el tiempo del proceso de cálculo, mas aún si se aprovecha las técnicas de dispersidad se pueden reducir drásticamente los requerimientos de almacenamiento y el número de operaciones.

Métodos de factorización triangular (LH,LDH) son muy útiles en la solución de un conjunto grande de ecuaciones lineales. Zollenkopf (Brameller y Allan, 1977) combinó estas dos técnicas y la llamó el metodo de la **Bi-factorización**.

El método se basa en encontrar  $2n$  matrices factor para un problema de orden  $n$ -ésimo tal que el producto de estas matrices factor satisface los requerimientos:

$$\mathbf{L}^{(n)} \mathbf{L}^{(n-1)} \dots \mathbf{L}^{(2)} \mathbf{L}^{(1)} \mathbf{A} \mathbf{R}^{(1)} \mathbf{R}^{(2)} \dots \mathbf{R}^{(n-1)} \mathbf{R}^{(n)} = \mathbf{U} \quad (\text{A.1})$$

donde :

$\mathbf{A}$  = matriz de coeficientes originales

$\mathbf{L}$  = matrices factor lado izquierdo

$\mathbf{R}$  = matrices factor lado derecho

$\mathbf{U}$  = matriz unitaria de orden  $n$

La anterior expresión puede ser escrita como :

$$\mathbf{R}^{(1)} \mathbf{R}^{(2)} \dots \mathbf{R}^{(n-1)} \mathbf{R}^{(n)} \mathbf{L}^{(n)} \mathbf{L}^{(n-1)} \dots \mathbf{L}^{(2)} \mathbf{L}^{(1)} = \mathbf{A}^{-1} \quad (\text{A.2})$$

es decir, que la matriz inversa puede ser expresada como producto de matrices factor. Para determinar las matrices factor  $\mathbf{L}$  y  $\mathbf{R}$ , las siguientes matrices intermedias son introducidas:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^{(0)}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}^{(1)} &= \mathbf{L}^{(1)} \mathbf{A}^{(0)} \mathbf{R}^{(1)} \\
\mathbf{A}^{(2)} &= \mathbf{L}^{(2)} \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{R}^{(2)} \\
&\vdots \\
\mathbf{A}^{(k)} &= \mathbf{L}^{(k)} \mathbf{A}^{(k-1)} \mathbf{R}^{(k)} \\
&\vdots \\
\mathbf{A}^{(n)} &= \mathbf{L}^{(n)} \mathbf{A}^{(n-1)} \mathbf{R}^{(n)}
\end{aligned}
\tag{A.3}$$

Los sucesivos triples productos  $\mathbf{L}^{(k)} \mathbf{A}^{(k-1)} \mathbf{R}^{(k)}$  transforma la matriz de coeficiente inicial  $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{(0)}$  a una matriz unitaria  $\mathbf{U}$ .

La producción de las matrices  $\mathbf{L}^{(k)}$ ,  $\mathbf{R}^{(k)}$  y la reducción de los coeficientes de la matriz  $\mathbf{A}$ , se ilustran en la pag. 72 de Brameller y Allan (1977) e implementadas como un conjunto de subrutinas por Brameller (1974).

Estas subrutinas, llamadas MIOS1C, MIOS2C, MIOS3C y MIOS4C tienen como objeto resolver un conjunto de ecuaciones lineales con coeficientes complejos y términos diagonales no ceros, previa lectura de datos en una forma conveniente.

Se ha realizado el programa VNODALZ.FOR con el fin de usar las subrutinas mencionadas para resolver el sistema :

$$\mathbf{Y} \mathbf{V} = \mathbf{I} \tag{A.4}$$

donde :

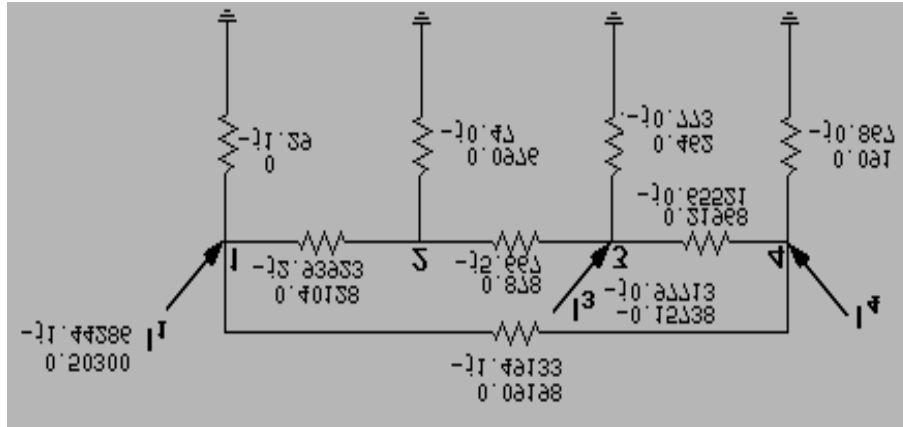
- $\mathbf{Y}$  : matriz de admitancia nodal de la red
- $\mathbf{V}$  : Vector de voltajes nodal
- $\mathbf{I}$  : Vector de corrientes inyectadas en la red

El programa requiere el uso de dos archivos : un archivo de admitancias **Y.dat** y un archivo de corrientes inyectadas **corr.dat**.

El archivo **Y.dat** contiene la información del valor de la admitancia (conductancia y susceptancia) y los nodos inicial y final al cual está conectado.

De la misma manera **corr.dat** contiene la parte real e imaginaria de la corriente y el número de nodo a la cual está inyectada.

A continuación se da un ejemplo para la red mostrada en la figura A.1.



**Figura A.1** Red ejemplo para la obtención de voltajes nodales con el programa VNODALZ.FOR.

La tabla A.1 muestra una salida típica del programa VNODALZ.FOR con los archivos de entrada y los resultados para la red de la fig. A.1.

**Tabla A-1** Salida típica del programa VNODALZ.FOR

```

-----
BIENVENIDO AL PROGRAMA DE OBTENCION DE VOLTAJES NODALES A
PARTIR DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA NODAL YN
*****

```

Archivos de entrada  
=====

Y . D A T

| ni | nf | G        | B         |
|----|----|----------|-----------|
| 1  | 1  | 0,000000 | -1,290000 |
| 2  | 2  | 0,097600 | -0,470000 |
| 3  | 3  | 0,462000 | -0,773000 |
| 4  | 4  | 0,091000 | -0,867000 |
| 1  | 2  | 0,401280 | -2,939230 |
| 1  | 4  | 0,091980 | -1,491330 |

|    |   |          |           |
|----|---|----------|-----------|
| 2  | 3 | 0,878000 | -5,667000 |
| 3  | 4 | 0,219680 | -0,655210 |
| -1 | 0 | 0,000000 | 0,000000  |

corr.dat  
-----

|    |           |           |
|----|-----------|-----------|
| 1  | 0,503000  | -1,442860 |
| 3  | -0,157380 | -0,977130 |
| 4  | 0,166020  | -1,019330 |
| -1 | 0,000000  | 0,000000  |

RESULTADOS  
=====

| NODO | VOLTAJE  |           |
|------|----------|-----------|
|      | REAL     | IMAG      |
| 1    | 1,003942 | 0,038483  |
| 2    | 0,912462 | -0,085249 |
| 3    | 0,940638 | -0,151621 |
| 4    | 1,049491 | 0,000153  |

Stop - Program terminated.

-----

Los formatos de escritura de los archivos de lectura son I3 para los enteros y F12.6 para reales.

**ANEXO B**  
**Fuentes de Parámetros X, X/R, Reactancias de Secuencia y**  
**Factores de Multiplicacion ANSI.**

**Tabla B-1** Valores típicos de  
reactancias de máquinas  
síncronas y de inducción en [p.u.] base  
propia.

| Máquina rotatoria                                                              | X''d | X'd  |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| Turbo-Generadores                                                              |      |      |
| 2 polos                                                                        | 0.09 | 0.15 |
| 4 polos                                                                        | 0.15 | 0.23 |
| Generadores Síncronos con<br>enrollados amortiguadores                         |      |      |
| 12 polos ó menos                                                               | 0.16 | 0.33 |
| 14 polos ó más                                                                 | 0.21 | 0.33 |
| Motores sincrónicos                                                            |      |      |
| 6 polos                                                                        | 0.15 | 0.23 |
| 8-14 polos                                                                     | 0.20 | 0.30 |
| 16 polos ó más                                                                 | 0.28 | 0.40 |
| Condensadores Síncronos                                                        | 0.24 | 0.37 |
| Convertidores Síncronos                                                        |      |      |
| 600 V. DC                                                                      | 0.20 | -    |
| 250 V. DC                                                                      | 0.33 | -    |
| Grandes motores de inducción<br>con tensión mayor a 600 V.                     | 0.17 | -    |
| Grupos de motores de inducción de 50 HP<br>y menos, con tensión menor a 600 V. | 0.25 | -    |

FUENTE : IEEE Std. 141 - 1976.

**Tabla B-2** Factores multiplicadores de máquinas rotatorias.

| Tipo de máquina rotatoria                                                              | Periodo      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|
|                                                                                        | Interrupción |           |
| Momentáneo                                                                             |              |           |
| Turbo-generadores                                                                      |              |           |
| Condensadores Síncronos <sup>(1)</sup>                                                 | 1.0 * X"d    | 1.0 * X"d |
| Hidrogeneradores                                                                       |              |           |
| con enrollados amortiguadores                                                          | 1.0 * X"d    | 1.0 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| sin enrollados amortiguadores <sup>(2)</sup>                                           | 0.75* X'd    | 0.75* X'd |
| Motores Síncronos                                                                      | 1.5 * X"d    | 1.0 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| Motores de Inducción <sup>(3)</sup>                                                    |              |           |
| Mayor a 1000 HP en 1800 RPM ó menos                                                    | 1.5 * X"d    | 1.0 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| Mayor a 250 HP en 3600 RPM                                                             | 1.5 * X"d    | 1.0 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| Desde 50 a 1000 HP en 1800 RPM ó menos                                                 | 3.0 * X"d    | 1.2 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| Desde 50 a 250 HP en 3600 RPM                                                          | 3.0 * X"d    | 1.2 *     |
| X"d                                                                                    |              |           |
| Se desprecian todos los motores de inducción trifásicos y monofásicos menores a 50 HP. |              |           |

(1) X"d : Para motores síncronos es la reactancia subtransitoria de eje directo(saturada). En motores de inducción es igual a la corriente de rotor bloqueado en [p.u].

(2) X'd : Reactancia transitoria de eje directo(saturada) a voltaje nominal.

(3) Cuando la contribución de grandes motores de inducción es apreciable, es recomendable reemplazar los factores

mostrados en esta tabla por factores de multiplicación en base a las constantes de tiempo suministradas por el fabricante usando :

$$I = (E/X''d) * e^{(-t/T'')}.$$

Esta relación considera el decaimiento exponencial de la corriente de cortocircuito en los terminales de la máquina, siendo  $e^{(-t/T'')}$  el factor aplicado a la reactancia y  $T''$  la constante de tiempo de cortocircuito del motor.

-----  
-  
Fuente : ANSI/IEEE C37.010 - 1979.



**Tabla B-3** VALORES DE RESISTENCIA APROXIMADA<sup>1</sup>

| Componente del sistema                   | Resistencia aproximada                                            |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Turbo-alternadores y condensadores       | Resistencia efectiva <sup>2</sup>                                 |
| Generadores y motores de polos salientes | Resistencia efectiva                                              |
| Motores de Inducción                     | 1.2 veces la resistencia de armadura DC                           |
| Transformadores de Potencia              | Resistencia de pérdidas bajo carga (no incluye pérdidas en vacío) |
| Reactores                                | Resistencia AC                                                    |
| Cables y líneas                          | Resistencia AC                                                    |

**Notas:**

- 1) Las resistencias aproximadas de esta tabla deben ser utilizadas siempre y cuando no se tengan datos proporcionados por el fabricante.

2) Resistencia efectiva =  $\frac{X_{2v}}{2\delta f T_{a3}}$

$X_{2v}$  : Reactancia de secuencia negativa a voltaje nominal  
 $T_{a3}$  : Constante de tiempo de armadura del generador a tensión nominal en segundos.

En general, la resistencia efectiva es igual a 1.2 veces la resistencia DC.

FUENTE : ANSI/IEEE C37.010 - 1979.

**Tabla B-4** RANGOS Y VALORES TIPICOS DE RELACIONES X/R

| Componente del sistema                             | Rango        | Valor típico |
|----------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Generadores grandes y<br>Condensadores Sincrónicos | 40 - 120     | 80           |
| Motores de Inducción                               | ver Fig. B.1 | -            |
| Generadores pequeños y<br>motores síncronos        | ver Fig. B.2 | -            |
| Transformadores de Potencia                        | ver Fig. B.3 | -            |
| Reactores                                          | 40 - 120     | 80           |
| Líneas aéreas                                      | 2 - 16       | 5            |
| Cables subterráneos                                | 1 - 3        | 2            |

FUENTE : ANSI/IEEE C37.010 - 1979.

**Tabla B-5** VALOR DE RAZON X/R EQUIVALENTE EN PUNTOS TIPICOS  
(Para aproximaciones rápidas)

| Tipo de Circuito                                                                                                                | Rango    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| (1) Máquinas sincrónicas conectadas directamente a la barra ó a través de reactores                                             | 40 - 120 |
| (2) Máquinas sincrónicas conectadas a través de transformadores de potencia nominal 100 MVA ó mayores                           | 40 - 60  |
| (3) Máquinas sincrónicas conectadas a través de transformadores de potencia nominal entre 25 y 100 MVA por cada banco trifásico | 30 - 50  |
| (4) Máquinas sincrónicas ubicadas en forma remota y conectadas por transformadores con potencias de 100 MVA ó más por cada      |          |

|                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| banco trifásico, donde los transformadores proveen del 90 % o más de la impedancia total al punto de falla.                                           | 30 - 50    |
| <b>(5)</b> Idem a (4) pero para máquinas sincrónicas entre 10 - 100 MVA                                                                               | 15 - 40    |
| <b>(6)</b> Máquinas sincrónicas remotas, conectadas a través de otros tipos de circuitos tales como : líneas, transformadores de 10 MVA ó menos, etc. | 15 ó menos |

---

FUENTE : ANSI/IEEE C37.010 - 1979.

## **ANEXO C**

### **Curvas Factores de Multiplicacion versus Relacion X/R**

Las figuras C.1, C.2 y C.3 muestran las curvas de factores multiplicadores versus la relación X/R para fallas trifásicas y monofásicas para interruptores con valores nominales simétricos (C37.010 - 1979).

Las figuras C.4, C.5 y C.6 muestran las curvas de factores multiplicadores versus la relación X/R para fallas trifásicas y monofásicas para interruptores con valores nominales asimétricos (C37.5 - 1979).

**ANEXO D**  
**Método de Interpolación Spline Cúbica Natural**

Las curvas de las figuras del anexo **C** dadas por la norma C37.010 - 1979 y C37.5 - 1979 que nos permiten hallar factores de multiplicación en función de valores X/R fueron aproximadas a polinomios cúbicos por tramos a través del método de interpolación Spline Cúbica Natural (Young y Gregory, 1972).

**D.1 Fundamento Teórico**

Supongamos que uno está interesado en determinar una función  $F(x)$  que aproxima a una función  $f(x)$  dada en un intervalo  $I=[a,b]$ .

Sea  $I_1 = [x_0, x_1]$ ;  $I_2 = [x_1, x_2]$ ; ...;  $I_N = [x_{N-1}, x_N]$  subintervalos de  $I$ , donde  $a=x_0$ ,  $b=x_N$  y  $x_0 < x_1 < \dots < x_N$ .

Por definición,  $F(x)$  es una Spline cúbica de grado 3 definida en  $[a,b]$  si:

**a)**  $F(x)$  coincide con un polinomio de grado 3 en cada subintervalo:

$$I_k = [x_{k-1}, x_k], \quad k=1, \dots, N$$

**b)**  $F(x)$  es de clase  $C(2)$  en  $[a,b]$ .

Buscamos hallar una función  $F_k(x)$  en el intervalo  $I_k$  tal que:

$$F_k(x) = f(x_i) \quad , \quad i = k-1, k \tag{D.1}$$

También requerimos que para  $k=1, 2, \dots, N-1$

$$F'_k(x_k^-) = F'_{k+1}(x_k^+) \tag{D.2}$$

$$F''_k(x_k^-) = F''_{k+1}(x_k^+) \tag{D.3}$$

El procedimiento requiere la determinación de  $M_k$ , donde

$$M_k = F''_k(x_k^-) = F''_{k+1}(x_k^+) \tag{D.4}$$

Puesto que  $F''_k(x)$  es un polinomio cúbico, representa una función lineal de  $x$  en  $I_k$ , es decir,

$$F''_k(x) = M_{k-1} \frac{x_k - x}{x_k - x_{k-1}} + M_k \frac{x - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \tag{D.5}$$

Integrando tenemos :

$$F'_k(x) = - M_{k-1} \frac{(x_k - x)^2}{2(x_k - x_{k-1})} + M_k \frac{(x - x_{k-1})^2}{2(x_k - x_{k-1})} + C_1 \tag{D.6}$$

donde :

$$h_k = x_k - x_{k-1}$$

y  $C_1$  es una constante de integración a ser determinada.

Integrando nuevamente tenemos:

$$F_k(x) = -M_{k-1} \frac{(x_k - x)^3}{6h_k} + M_k \frac{(x - x_{k-1})^3}{6h_k} + C_1 x + C_2 \quad (D.7)$$

haciendo  $y_k = f(x_k)$ , tenemos:

$$y_{k-1} = M_{k-1} \frac{h_k^2}{6} + C_1 x_{k-1} + C_2 \quad (D.8)$$

$$y_k = M_k \frac{h_k^2}{6} + C_1 x_k + C_2 \quad (D.9)$$

Por consiguiente,

$$C_1 = \frac{(y_k - y_{k-1}) - (M_k - M_{k-1})(h_k^2/6)}{h_k} \quad (D.10)$$

$$C_2 = \frac{(x_k y_{k-1} - x_{k-1} y_k) - (x_k M_{k-1} - x_{k-1} M_k)(h_k^2/6)}{h_k} \quad (D.11)$$

Sustituyendo en (D.7) obtenemos :

$$F_k(x) = M_{k-1} \left( \frac{(x_k - x)((x_k - x)^2 - h_k^2)}{6h_k} \right) + M_k \left( \frac{(x - x_{k-1})((x - x_{k-1})^2 - h_k^2)}{6h_k} \right) \\ + \frac{1}{h_k} y_{k-1} (x_k - x) + \frac{1}{h_k} (x - x_{k-1}) \quad (D.12)$$

Una vez que se han calculado los coeficientes  $M_k$ , la Spline de interpolación queda definida por la ecuación (D.12).

Diferenciando, tenemos :

$$F'_k(x) = M_{k-1} \left( \frac{h_k^2 - 3(x_k - x)^2}{6h_k} \right) + M_k \left( \frac{3(x - x_{k-1})^2 - h_k^2}{6h_k} \right) + \frac{1}{h_k} (y_k - y_{k-1})$$

(D.13)

Si requerimos que  $F'_k(x_k^-) = F'_{k+1}(x_k^+)$  tenemos,

$$\frac{h_k}{6} M_{k-1} + \frac{h_k}{3} M_k - \frac{1}{h_k} (y_k - y_{k-1}) = \frac{h_{k+1}}{3} M_k - \frac{h_{k+1}}{6} M_{k+1} + \frac{1}{h_{k+1}} (y_{k+1} - y_k)$$

(D.14)

ó

$$\frac{h_k}{6} M_{k-1} + \frac{h_k + h_{k+1}}{3} M_k - \frac{h_{k+1}}{6} M_{k+1} = \left\{ \frac{1}{h_{k+1}} (y_{k+1} - y_k) - \frac{1}{h_k} (y_k - y_{k-1}) \right\}$$

(D.15)

(k = 1, 2, ..., N-1)

Esto es un sistema de N-1 ecuaciones algebraicas lineales con incógnitas  $M_0, M_1, \dots, M_N$ , de la forma:

$$\mathbf{A M} = \mathbf{b}$$

(D.16)

Si  $M_0$  y  $M_N$  son ceros la Spline cúbica resultante se llama Spline cúbica natural.

Luego sólo se determina  $M_1, M_2, \dots, M_{N-1}$  incógnitas.

## D.2 Ejemplo del Método de Interpolación

Para ilustrar el método se ha tomado como ejemplo una de las curvas FM vs. X/R de la fig. 84 de la referencia [10] ó figura C.3 anexo C. Específicamente se toma la curva

correspondiente a interruptores de Alta Tensión en base a valores simétricos con tiempos de apertura de 5 ciclos. Este procedimiento fué programado en la unidad de Turbo Pascal llamada SPLINE.PAS.

La tabla D-1 muestra los valores de entrada al programa con los siguientes datos:

- a) Intervalo  $I = [15,40]$
- b) Seis puntos de interpolación  
 $(X/R)_k = k/5$  ,  $k = 0,1,2,\dots,5$   
 lo cual significa  $h_1=h_2= \dots = h = 5$

**Tabla D-1** Datos de entrada al programa SPLINE.PAS

```

-----
      FACTORES DE MULTIPLICACION PARA
INTERRUPTORES DE 5 CICLOS (De figura C.3)
      X/R          FM
-----
      15.00      1.0000
      20.00      1.0444
      25.00      1.0956
      30.00      1.1333
      35.00      1.1722
      40.00      1.2111
-----
  
```

La tabla D-2 muestra los factores multiplicadores para algunos valores de X/R dados en el intervalo I.

**Tabla D-2** Resultados del método de interpolación Spline cúbica natural

```

-----
      RESULTADOS DEL METODO DE INTERPOLACION SPLINE CUBICA NATURAL
      PARA EL CALCULO DE FACTORES DE MULTIPLICACION

Tipo de interruptor : SYM5, Tiempo de apertura 5 ciclos
                    Tiempo de partida de contactos 3
                    ciclos.
=====

M0 = 0; M1 = 0.000675 ; M2 = -0.001069; M3 = 0.000362;
  
```



M4 = -0.000090;

M5=0

| No. | X/R   | FM       |
|-----|-------|----------|
| 1   | 15.00 | 1.000000 |
| 2   | 16.50 | 1.012552 |
| 3   | 19.00 | 1.034710 |
| 4   | 24.56 | 1.091532 |
| 5   | 28.65 | 1.123722 |
| 6   | 29.00 | 1.126181 |
| 7   | 30.00 | 1.133300 |
| 7   | 30.00 | 1.133300 |
| 8   | 32.50 | 1.152326 |
| 9   | 34.80 | 1.170612 |
| 10  | 37.00 | 1.187905 |
| 11  | 39.00 | 1.203392 |
| 12  | 40.00 | 1.211100 |

-----

Se observa que en si X/R cae en algun punto final de un subintervalo se obtiene un mismo valor de factor de multiplicación, esto es que dá lo mismo acercarse al punto por la derecha ó por la izquierda.

## **ANEXO E**

### **Tabla de Valores Nominales Preferidos para Interruptores según Normas ANSI/IEEE**

Las siguientes tablas muestran capacidades preferidas de interruptores especificadas según las normas ANSI C37.06 - 1979 y C37.13 - 1981.

## ANEXO F

### Características, Datos y Resultados de los Sistemas de Estudio

#### F.1 Sistema IEEE Std. 141 - 1976

La red se muestra en la figura 6.1, consta de 19 barras y 48 elementos. En la tabla F-1 se encuentra los datos del sistema.

#### F.2 Sistema General Electric Co.

La figura 6.19 muestra la red empleada para el cálculo de falla monofásica. En la tablas F-2 podemos observar los datos para esta red.

#### F.3 Sistema Industrial de 22 barras

La figura 6.20 muestra la red del Sistema Eléctrico Industrial publicada por Dunky et. al. (1988). La red es utilizada para un cálculo de cortocircuitos trifásicos. Los datos para esta red se muestran en la tabla F-3.

**Tabla F-1** Datos del sistema industrial IEEE Std. 141 - 1976

| DATOS DEL SISTEMA DE SUMINISTRO |      |               |      |       |          |     |      |      |      |      |       |       |
|---------------------------------|------|---------------|------|-------|----------|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| Barra                           | Tipo | PotCoCo [MVA] | KV   | X/R   | Paralelo |     |      |      |      |      |       |       |
| 1                               | S1   | 1000          | 69   | 22    | 1        |     |      |      |      |      |       |       |
| 2                               | S2   | 800           | 46   | 9     | 1        |     |      |      |      |      |       |       |
| DATOS DE MAQUINAS SINCRONAS     |      |               |      |       |          |     |      |      |      |      |       |       |
| G e n e r a d o r e s           |      |               |      |       |          |     |      |      |      |      |       |       |
| Barra                           | Tipo | MVA           | KV   | Polos | RPM      | FP  | X"d  | X'd  | Xd   | X/R  | Paral |       |
| 4                               | G1   | 25            | 13,8 | 2     | 3600     | 0,8 | 0,09 | 0,15 | 0,2  | 45   | 1     |       |
| 3                               | G2   | 5             | 2,4  | 2     | 3600     | 0,8 | 0,09 | 0,15 | 0,2  | 29   | 1     |       |
| 0                               |      |               |      |       |          |     |      |      |      |      |       |       |
| M o t o r e s                   |      |               |      |       |          |     |      |      |      |      |       |       |
| Barra                           | HP   | Tipo          | KV   | Polos | RPM      | FP  | MVA  | X"d  | X'd  | Xd   | X/R   | Paral |
| 7                               | 6000 | M1            | 1,2  | 4     | 720      | 0,8 | 6    | 0,20 | 0,30 | 0,35 | 30    | 1     |
| 8                               | 6000 | M1            | 1,2  | 4     | 720      | 0,8 | 6    | 0,20 | 0,30 | 0,35 | 30    | 1     |

DATOS DE MOTORES DE INDUCCION

=====

| Barra | HP   | Tipo | RPM  | KV   | MVA  | Xd"  | X/R | Paral |
|-------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| 9     | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 9     | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 10    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 10    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 11    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 11    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 12    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 12    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 13    | 1750 | M2   | 1800 | 4,16 | 1,75 | 0,17 | 30  | 1     |
| 13    | 1750 | M2   | 1800 | 4,16 | 1,75 | 0,17 | 30  | 2     |
| 14    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 14    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 15    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 15    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 16    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 16    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 17    | 1750 | M2   | 1800 | 4,16 | 1,75 | 0,17 | 30  | 1     |
| 17    | 1750 | M2   | 1800 | 4,16 | 1,75 | 0,17 | 30  | 2     |
| 18    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 18    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |
| 19    | 40   | M3   | -    | 0,4  | 1    | 0,25 | 9   | 1     |
| 19    | 75   | M4   | -    | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 9   | 2     |

.....

.... continuación de tabla F-1

DATOS DE TRANSFORMADORES Y REACTORES

=====

T r a n s f o r m a d o r e s

| Rama | Tipo | MVA | KVPrim | KVSec | Xl   | X/R   | Paral |   |
|------|------|-----|--------|-------|------|-------|-------|---|
| 1    | 4    | T1  | 20     | 69    | 13,8 | 0,07  | 21    | 1 |
| 5    | 6    | T2  | 5      | 13,8  | 4,16 | 0,055 | 16    | 1 |
| 2    | 6    | T3  | 5      | 46    | 4,16 | 0,065 | 16    | 1 |
| 3    | 6    | T4  | 5      | 2,4   | 4,16 | 0,055 | 12    | 1 |
| 4    | 7    | T5  | 7,5    | 13,8  | 1,20 | 0,055 | 14    | 1 |
| 4    | 8    | T5  | 7,5    | 13,8  | 1,20 | 0,055 | 14    | 1 |
| 4    | 9    | T6  | 1,5    | 13,8  | 0,40 | 0,055 | 10    | 1 |
| 4    | 10   | T6  | 1,5    | 13,8  | 0,40 | 0,055 | 10    | 1 |
| 4    | 11   | T6  | 1,5    | 13,8  | 0,40 | 0,055 | 10    | 1 |

|    |    |    |     |      |      |       |    |   |
|----|----|----|-----|------|------|-------|----|---|
| 4  | 12 | T6 | 1,5 | 13,8 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |
| 6  | 14 | T6 | 1,5 | 4,16 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |
| 6  | 15 | T6 | 1,5 | 4,16 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |
| 6  | 16 | T6 | 1,5 | 4,16 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |
| 17 | 18 | T6 | 1,5 | 4,16 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |
| 17 | 19 | T6 | 1,5 | 4,16 | 0,40 | 0,055 | 10 | 1 |

Reactores

| Rama | Tipo | MVA | KV  | X1   | X/R  | Paral |   |
|------|------|-----|-----|------|------|-------|---|
| 6    | 17   | X1  | 7,5 | 4,16 | 0,08 | 50    | 1 |

CONDUCTORES DE COBRE

| Rama de | Tipo a | Calibre [MCM] | Resist [ $\Omega$ /1000'] | React (Xa) [ $\Omega$ /1000'] | React (Xb) [ $\Omega$ /1000'] | Longitud [pies] | Paral  |   |
|---------|--------|---------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------|---|
| 4       | 5      | R1            | 250                       | 0,0487                        | 0,0922                        | -0,0571         | 3500,0 | 1 |
| 6       | 13     | R2            | 300                       | 0,0407                        | 0,0902                        | -0,0571         | 2500,0 | 1 |
| 6       | 13     | R2            | 300                       | 0,0407                        | 0,0902                        | -0,0571         | 2500,0 | 2 |

-

.... continuación de tabla F-1

Datos del Sistema

-----  
Número de barras : 19  
Número de elementos : 38  
Potencia base [MVA] : 10,00

RESULTADOS DEL SISTEMA EN [P,U,]

| No, | elemento | ni | nf | Paral, | r[p,u,] | x[p,u,] |
|-----|----------|----|----|--------|---------|---------|
| 1   | T1       | 1  | 4  | 1      | 0,0017  | 0,0350  |
| 2   | T2       | 5  | 6  | 1      | 0,0069  | 0,1100  |
| 3   | T3       | 2  | 6  | 1      | 0,0081  | 0,1300  |
| 4   | T4       | 3  | 6  | 1      | 0,0092  | 0,1100  |
| 5   | T5       | 4  | 7  | 1      | 0,0052  | 0,0733  |
| 6   | T5       | 4  | 8  | 1      | 0,0052  | 0,0733  |
| 7   | T6       | 4  | 9  | 1      | 0,0367  | 0,3667  |
| 8   | T6       | 4  | 10 | 1      | 0,0367  | 0,3667  |
| 9   | T6       | 4  | 11 | 1      | 0,0367  | 0,3667  |

|    |    |    |    |   |        |         |
|----|----|----|----|---|--------|---------|
| 10 | T6 | 4  | 12 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 11 | T6 | 6  | 14 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 12 | T6 | 6  | 15 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 13 | T6 | 6  | 16 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 14 | T6 | 17 | 18 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 15 | T6 | 17 | 19 | 1 | 0,0367 | 0,3667  |
| 16 | X1 | 6  | 17 | 1 | 0,0021 | 0,1067  |
| 17 | M4 | 9  | 9  | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 18 | M4 | 10 | 10 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 19 | M4 | 11 | 11 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 20 | M4 | 12 | 12 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 21 | M2 | 13 | 13 | 1 | 0,0486 | 1,4571  |
| 22 | M4 | 14 | 14 | 1 | 0,0486 | 1,4571  |
| 23 | M4 | 15 | 15 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 24 | M4 | 16 | 16 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 25 | M2 | 17 | 17 | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 26 | M4 | 18 | 18 | 1 | 0,0486 | 1,4571  |
| 27 | M4 | 19 | 19 | 1 | 0,0486 | 1,4571  |
| 28 | G1 | 4  | 4  | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 29 | G2 | 3  | 3  | 1 | 1,6667 | 15,0000 |
| 30 | M1 | 7  | 7  | 1 | 0,0008 | 0,0360  |
| 31 | M1 | 8  | 8  | 1 | 0,0062 | 0,1800  |
| 32 | S1 | 1  | 1  | 1 | 0,0167 | 0,5000  |
| 33 | S2 | 2  | 2  | 1 | 0,0167 | 0,5000  |

....

.... continuación de tabla F-1

|    |    |   |    |   |        |        |
|----|----|---|----|---|--------|--------|
| 34 | R1 | 4 | 5  | 1 | 0,0005 | 0,0100 |
| 35 | R2 | 6 | 13 | 1 | 0,0014 | 0,0125 |
| 36 | R1 | 4 | 5  | 1 | 0,0097 | 0,0065 |
| 37 | R2 | 6 | 13 | 1 | 0,0639 | 0,0478 |
| 38 | R2 | 6 | 13 | 2 | 0,0639 | 0,0478 |

V A L O R E S      B A S E

=====

Nodo    Voltaje[KV]    Corriente[kA]    Impedancia[ $\bar{U}$ ]

|   |       |        |          |
|---|-------|--------|----------|
| 1 | 69,00 | 0,0837 | 476,1000 |
| 2 | 46,00 | 0,1255 | 211,6000 |
| 3 | 2,40  | 2,4056 | 0,5760   |
| 4 | 13,80 | 0,4184 | 19,0440  |
| 5 | 13,80 | 0,4184 | 19,0440  |
| 6 | 4,16  | 1,3879 | 1,7306   |

|    |      |         |        |
|----|------|---------|--------|
| 7  | 1,20 | 4,8113  | 0,1440 |
| 8  | 1,20 | 4,8113  | 0,1440 |
| 9  | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 10 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 11 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 12 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 13 | 4,16 | 1,3879  | 1,7306 |
| 14 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 15 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 16 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 17 | 4,16 | 1,3879  | 1,7306 |
| 18 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |
| 19 | 0,40 | 14,4338 | 0,0160 |

---

**Tabla F-2** Datos del sistema industrial General Electric

| DATOS DEL SISTEMA DE SUMINISTRO |      |         |         |    |     |          |
|---------------------------------|------|---------|---------|----|-----|----------|
| Barra                           | Tipo | MVACC30 | MVACC10 | KV | X/R | Paralelo |
| 1                               | S1   | 1500    | 400     | 69 | 22  | 1        |

| DATOS DE MAQUINAS SINCRONAS |      |     |      |       |      |     |       |       |     |       |     |       |
|-----------------------------|------|-----|------|-------|------|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-------|
| G e n e r a d o r e s       |      |     |      |       |      |     |       |       |     |       |     |       |
| Barra                       | Tipo | MVA | KV   | Polos | RPM  | FP  | X"d   | X'd   | Xd  | X0    | X/R | Paral |
| 2                           | G1   | 25  | 13,8 | 2     | 3600 | 0,8 | 0,095 | 0,038 | 0,2 | 0,038 | 30  | 1     |

| M o t o r e s |      |      |      |       |     |     |     |      |      |      |      |     |       |
|---------------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|-------|
| Barra         | HP   | Tipo | KV   | Polos | RPM | FP  | MVA | X"d  | X'd  | Xd   | X0   | X/R | Paral |
| 2             | 6000 | M1   | 13,8 | 4     | 720 | 0,8 | 6   | 0,10 | 0,15 | 0,35 | 0,10 | 30  | 2     |
| 2             | 6000 | M1   | 13,8 | 4     | 720 | 0,8 | 6   | 0,15 | 0,24 | 0,35 | 0,15 | 30  | 2     |

| DATOS DE MOTORES DE INDUCCION |      |      |     |      |     |      |      |       |       |
|-------------------------------|------|------|-----|------|-----|------|------|-------|-------|
| Barra                         | HP   | Tipo | RPM | KV   | MVA | X1d" | X0   | X/R   | Paral |
| 2                             | 4500 | M2   | -   | 13,8 | 4,5 | 0,20 | 0,20 | 3,45  | 2     |
| 3                             | 75   | M3   | -   | 0,48 | 1,5 | 0,25 | 0,25 | 27,00 | 1     |

| DATOS DE TRANSFORMADORES Y REACTORES |      |     |        |       |       |        |        |       |       |
|--------------------------------------|------|-----|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| T r a n s f o r m a d o r e s        |      |     |        |       |       |        |        |       |       |
| Rama                                 | Tipo | MVA | KVPrim | KVSec | X1    | X0     | X/R    | Conex | Paral |
| 1                                    | 2    | T1  | 10,00  | 69    | 13,8  | 0,07   | 0,07   | 17,50 | DY 1  |
| 2                                    | 3    | T2  | 1,5    | 13,8  | 0,48  | 0,0575 | 0,0575 | 10,00 | DY 1  |
| 2                                    | 4    | T3  | 0,5    | 13,8  | 0,208 | 0,050  | 0,050  | 6,25  | DY 1  |

| CONDUCTORES DE COBRE |      |         |           |           |           |         |        |         |
|----------------------|------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|
| Rama                 | Tipo | Calibre | R         | Xa        | Xb        | X0/X1   | Long   | Paral   |
| de                   | a    | [MCM]   | [Ω/1000'] | [Ω/1000'] | [Ω/1000'] |         | [pies] |         |
| 3                    | 5    | R1      | 250       | 0,0487    | 0,0922    | -0,0571 | 1,486  | 800,0 1 |
| 3                    | 5    | R1      | 250       | 0,0487    | 0,0922    | -0,0571 | 1,486  | 800,0 2 |
| 3                    | 5    | R1      | 250       | 0,0487    | 0,0922    | -0,0571 | 1,486  | 800,0 2 |

.....



.... continuación de tabla F-2

DATOS DEL SISTEMA

-----

Número de barras : 5  
Número de elementos : 12  
Potencia base [MVA] : 10,00

D A T O S E N B A S E P R O P I A

-----

PARA REGIMEN MOMENTANEO :

| No. | elemento | ni | nf | Paral. | X[p.u.] | X0[p.u.] | X/R     |
|-----|----------|----|----|--------|---------|----------|---------|
| 1   | T1       | 1  | 2  | 1      | 0,0700  | 0,0700   | 17,5000 |
| 2   | T2       | 2  | 3  | 1      | 0,0575  | 0,0575   | 10,0000 |
| 3   | T3       | 2  | 4  | 1      | 0,0500  | 0,0500   | 6,2500  |
| 4   | M2       | 2  | 2  | 2      | 0,2000  | 0,2000   | 3,4500  |
| 5   | M3       | 3  | 3  | 1      | 0,3000  | 0,3000   | 27,0000 |
| 6   | G1       | 2  | 2  | 1      | 0,0950  | 0,0380   | 30,0000 |
| 7   | M1       | 2  | 2  | 2      | 0,1000  | 0,1000   | 30,0000 |
| 8   | M1       | 2  | 2  | 2      | 0,1500  | 0,1500   | 30,0000 |
| 9   | S1       | 1  | 1  | 1      | 1,0000  | 1,0000   | 22,0000 |
| 10  | R1       | 3  | 5  | 1      | 0,0281  | 0,0417   | 0,7207  |
| 11  | R1       | 3  | 5  | 2      | 0,0281  | 0,0417   | 0,7207  |
| 12  | R1       | 3  | 5  | 2      | 0,0281  | 0,0417   | 0,7207  |

PARA REGIMEN DE INTERRUPCION :

| No. | elemento | ni | nf | Paral. | X[p.u.] | X0[p.u.] | X/R     |
|-----|----------|----|----|--------|---------|----------|---------|
| 1   | T1       | 1  | 2  | 1      | 0,0700  | 0,0700   | 17,5000 |
| 2   | T2       | 2  | 3  | 1      | 0,0575  | 0,0575   | 10,0000 |
| 3   | T3       | 2  | 4  | 1      | 0,0500  | 0,0500   | 6,2500  |
| 4   | M2       | 2  | 2  | 2      | 0,3000  | 0,3000   | 3,4500  |
| 5   | M3       | 3  | 3  | 1      | 0,7500  | 0,7500   | 27,0000 |
| 6   | G1       | 2  | 2  | 1      | 0,0950  | 0,0380   | 30,0000 |
| 7   | M1       | 2  | 2  | 2      | 0,1500  | 0,1500   | 30,0000 |
| 8   | M1       | 2  | 2  | 2      | 0,2250  | 0,2250   | 30,0000 |
| 9   | S1       | 1  | 1  | 1      | 1,0000  | 1,0000   | 22,0000 |

|    |    |   |   |   |        |        |        |
|----|----|---|---|---|--------|--------|--------|
| 10 | R1 | 3 | 5 | 1 | 0,0281 | 0,0417 | 0,6631 |
| 11 | R1 | 3 | 5 | 2 | 0,0281 | 0,0417 | 0,6631 |
| 12 | R1 | 3 | 5 | 2 | 0,0281 | 0,0417 | 0,6631 |

....

.... continuación de tabla F-6

V A L O R E S    B A S E

=====

| Nodo | Voltaje [KV] | Corriente[kA] | Impedancia[Ω] |
|------|--------------|---------------|---------------|
| 1    | 69,00        | 0,0837        | 476,1000      |
| 2    | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 3    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 4    | 0,21         | 27,7572       | 0,0043        |
| 5    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |

V A L O R E S    E N    [P.U.]

=====

| No, elemento | de | hasta | Paral. | r[pu] | x[pu]  | r0[pu] | x0[pu] |
|--------------|----|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1            | T1 | 1     | 2      | 1     | 0,0040 | 0,0700 | 0,0040 |
| 2            | T2 | 2     | 3      | 1     | 0,0383 | 0,3833 | 0,0383 |
| 3            | T3 | 2     | 4      | 1     | 0,1600 | 1,0000 | 0,1600 |
| 4            | M2 | 2     | 2      | 2     | 0,1932 | 0,6667 | 0,1932 |
| 5            | M3 | 3     | 3      | 1     | 0,1852 | 5,0000 | 0,1852 |
| 6            | G1 | 2     | 2      | 1     | 0,0013 | 0,0380 | 0,0005 |
| 7            | M1 | 2     | 2      | 2     | 0,0083 | 0,2500 | 0,0083 |
| 8            | M1 | 2     | 2      | 2     | 0,0125 | 0,3750 | 0,0125 |
| 9            | S1 | 1     | 1      | 1     | 0,0003 | 0,0067 | 0,0003 |
| 10           | R1 | 3     | 5      | 1     | 1,8381 | 1,2188 | 2,7314 |
| 11           | R1 | 3     | 5      | 2     | 1,8381 | 1,2188 | 2,7314 |
| 12           | R1 | 3     | 5      | 2     | 1,8381 | 1,2188 | 2,7314 |

....

**Tabla F-3** Datos del sistema industrial de 22 barras

-----

-

DATOS DEL SISTEMA DE SUMINISTRO

=====

| Barra | Tipo | PotCoCo[MVA] | KV  | X/R | Paralelo |
|-------|------|--------------|-----|-----|----------|
| 1     | S1   | 1300         | 138 | 3   | 1        |

DATOS DE MAQUINAS SINCRONICAS

=====

G e n e r a d o r e s

| Barra | Tipo | MVA   | KV   | Polos | RPM  | FP   | X"d   | X'd   | Xd  | X/R | Paral |
|-------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-----|-----|-------|
| 2     | G1   | 23,53 | 13,8 | 2     | 3600 | 0,85 | 0,102 | 0,154 | 0,2 | 73  | 1     |
| 11    | G2   | 8,375 | 4,16 | 2     | 3600 | 0,8  | 0,096 | 0,137 | 0,2 | 40  | 1     |
| 12    | G3   | 8,375 | 4,16 | 2     | 3600 | 0,8  | 0,096 | 0,137 | 0,2 | 40  | 1     |

M o t o r e s

| Barra | HP   | Tipo | KV   | Polos | RPM  | FP   | MVA   | X"d   | X'd   | Xd    | X/R   | Paral |
|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4     | 6000 | M1   | 13,8 | 6     | 1800 | 0,8  | 5,80  | 0,23  | 0,376 | 2,81  | 35,0  | 1     |
| 11    | 6000 | M2   | 4,16 | 4     | 3600 | 0,8  | 1,94  | 0,176 | 0,282 | 1,926 | 16,6  | 1     |
| 12    | 3000 | M2   | 4,16 | 6     | 1800 | 0,8  | 2,89  | 0,233 | 0,363 | 1,569 | 28,8  | 1     |
| 8     | 2000 | M3   | 2,4  | 6     | 3600 | 0,8  | 1,94  | 0,176 | 0,282 | 1,926 | 16,6  | 1     |
| 8     | 2000 | M3   | 2,4  | 6     | 3600 | 0,8  | 1,94  | 0,176 | 0,282 | 1,926 | 16,6  | 2     |
| 9     | 500  | M4   | 2,4  | 10    | 1800 | 1,0  | 0,392 | 0,197 | 0,347 | 1,32  | 11,5  | 1     |
| 9     | 500  | M4   | 2,4  | 10    | 1800 | 1,0  | 0,392 | 0,197 | 0,347 | 1,32  | 11,5  | 2     |
| 15    | 150  | M5   | 0,48 | 12    | 3600 | 0,80 | 0,154 | 0,196 | 0,317 | 1,497 | 10,95 | 1     |
| 15    | 150  | M5   | 0,48 | 12    | 3600 | 0,80 | 0,154 | 0,196 | 0,317 | 1,497 | 10,95 | 2     |
| 15    | 150  | M5   | 0,48 | 12    | 3600 | 0,80 | 0,154 | 0,196 | 0,317 | 1,497 | 10,95 | 2     |

DATOS DE MOTORES DE INDUCCION

=====

| Barra | HP   | Tipo | Polos | KV   | MVA    | Xd"   | X/R   | Paral |
|-------|------|------|-------|------|--------|-------|-------|-------|
| 3     | 5000 | M6   | 4     | 13,2 | 4,2750 | 0,166 | 26,32 | 1     |
| 12    | 2000 | M7   | 8     | 4,0  | 1,7670 | 0,185 | 15,66 | 1     |
| 12    | 2000 | M7   | 8     | 4,0  | 1,7670 | 0,185 | 15,66 | 2     |
| 11    | 1000 | M8   | 6     | 4,0  | 0,8778 | 0,172 | 10,63 | 1     |
| 11    | 1000 | M8   | 6     | 4,0  | 0,8778 | 0,172 | 10,63 | 2     |
| 11    | 1000 | M8   | 6     | 4,0  | 0,8778 | 0,172 | 10,63 | 2     |
| 8     | 1000 | M9   | 6     | 2,3  | 0,8778 | 0,172 | 10,63 | 1     |
| 8     | 1000 | M10  | 2     | 2,3  | 0,8346 | 0,178 | 20,00 | 2     |
| 9     | 300  | M11  | 4     | 2,3  | 0,2777 | 0,155 | 8,35  | 1     |
| 15    | 100  | M12  | 4     | 0,46 | 0,0924 | 0,170 | 8,00  | 1     |

|    |    |     |   |      |        |       |      |   |
|----|----|-----|---|------|--------|-------|------|---|
| 17 | 75 | M13 | 4 | 0,46 | 0,0780 | 0,157 | 7,00 | 1 |
| 17 | 75 | M13 | 4 | 0,46 | 0,0780 | 0,157 | 7,00 | 2 |
| 17 | 75 | M13 | 4 | 0,46 | 0,0780 | 0,157 | 7,00 | 2 |
| 17 | 75 | M13 | 4 | 0,46 | 0,0780 | 0,157 | 7,00 | 2 |
| 17 | 75 | M13 | 4 | 0,46 | 0,0780 | 0,157 | 7,00 | 2 |
| 17 | 40 | M14 | 4 | 0,48 | 0,0414 | 0,166 | 5,00 | 2 |

....

.... continuación de tabla F-3

|    |    |     |   |       |        |       |      |   |
|----|----|-----|---|-------|--------|-------|------|---|
| 17 | 40 | M14 | 4 | 0,48  | 0,0414 | 0,166 | 5,00 | 2 |
| 17 | 40 | M14 | 4 | 0,48  | 0,0414 | 0,166 | 5,00 | 2 |
| 17 | 40 | M14 | 4 | 0,48  | 0,0414 | 0,166 | 5,00 | 2 |
| 17 | 40 | M14 | 4 | 0,48  | 0,0414 | 0,166 | 5,00 | 2 |
| 16 | 30 | M15 | - | 0,48  | 1,0000 | 0,167 | 6,00 | 1 |
| 19 | 20 | M16 | - | 0,48  | 0,2000 | 0,167 | 4,00 | 1 |
| 20 | 8  | M17 | - | 0,208 | 0,1500 | 0,167 | 3,00 | 1 |

DATOS DE TRANSFORMADORES Y REACTORES

=====

T r a n s f o r m a d o r e s

| Rama | Tipo | MVA | KVPrim | KVSec | X1    | X/R   | Paral |
|------|------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1    | 2    | T1  | 20     | 138   | 13,8  | 0,06  | 1     |
| 7    | 10   | T2  | 15     | 13,8  | 4,16  | 0,06  | 1     |
| 6    | 8    | T3  | 3,75   | 13,8  | 2,4   | 0,06  | 1     |
| 5    | 8    | T3  | 3,75   | 13,8  | 2,4   | 0,06  | 1     |
| 12   | 14   | T4  | 0,5    | 4,16  | 0,48  | 0,044 | 1     |
| 13   | 16   | T5  | 1,0    | 4,16  | 0,48  | 0,059 | 1     |
| 13   | 15   | T8  | 1,0    | 4,16  | 0,48  | 0,059 | 1     |
| 14   | 20   | T6  | 0,2    | 0,48  | 0,208 | 0,038 | 1     |
| 19   | 21   | T7  | 0,1    | 0,48  | 0,208 | 0,039 | 1     |

C O N D U C T O R E S

=====

| Rama de | Tipo | Calibre [MCM] | R [Ù/1000'] | Xa [Ù/1000'] | Xb [Ù/1000'] | X0/X1 | Long [pies] | Paral  |   |
|---------|------|---------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------------|--------|---|
| 2       | 7    | R1            | 250         | 0,0319       | 0,0275       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 2       | 6    | R2            | 300         | 0,0586       | 0,0231       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 2       | 5    | R2            | 300         | 0,0586       | 0,0231       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 2       | 3    | R3            | 300         | 0,0491       | 0,0231       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 2       | 4    | R4            | 250         | 0,0409       | 0,0391       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 10      | 11   | RO            | 330         | 0,0017       | 0,0692       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 10      | 12   | RT            | 333         | 0,0017       | 0,0692       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |
| 11      | 13   | R5            | 300         | 0,0265       | 0,0245       | 0,0   | 1,486       | 1000,0 | 1 |

|    |    |    |     |        |        |     |       |        |   |
|----|----|----|-----|--------|--------|-----|-------|--------|---|
| 14 | 19 | R6 | 300 | 0,0070 | 0,0818 | 0,0 | 1,486 | 1000,0 | 1 |
| 15 | 17 | R7 | 300 | 0,0063 | 0,0088 | 0,0 | 1,486 | 1000,0 | 1 |
| 20 | 22 | R8 | 300 | 0,0195 | 0,0071 | 0,0 | 1,486 | 1000,0 | 1 |
| 8  | 9  | R9 | 200 | 0,0190 | 0,0209 | 0,0 | 1,486 | 1000,0 | 1 |
| 15 | 18 | RD | 250 | 0,0351 | 0,0410 | 0,0 | 1,486 | 1000,0 | 1 |

-----

.... continuación de tabla F-3

Datos del Sistema

-----

Número de barras : 22  
 Número de elementos : 51  
 Potencia base [MVA] : 10,00

V A L O R E S B A S E

=====

| Barra | Voltaje [KV] | Corriente[kA] | Impedancia[Ω] |
|-------|--------------|---------------|---------------|
| 1     | 138,00       | 0,0418        | 1904,4000     |
| 2     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 3     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 4     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 5     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 6     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 7     | 13,80        | 0,4184        | 19,0440       |
| 8     | 2,40         | 2,4056        | 0,5760        |
| 9     | 2,40         | 2,4056        | 0,5760        |
| 10    | 4,16         | 1,3879        | 1,7306        |
| 11    | 4,16         | 1,3879        | 1,7306        |
| 12    | 4,16         | 1,3879        | 1,7306        |
| 13    | 4,16         | 1,3879        | 1,7306        |
| 14    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 15    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 16    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 17    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 18    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 19    | 0,48         | 12,0281       | 0,0230        |
| 20    | 0,21         | 27,7572       | 0,0043        |
| 21    | 0,21         | 27,7572       | 0,0043        |
| 22    | 0,21         | 27,7572       | 0,0043        |

D A T O S D E L S I S T E M A EN [P.U.]

=====

| No, | elemento | ni | nf | Paral. | r[p.u.] | x[p.u.] |
|-----|----------|----|----|--------|---------|---------|
| 1   | T1       | 1  | 2  | 1      | 0,0014  | 0,0300  |
| 2   | T2       | 7  | 10 | 1      | 0,0022  | 0,0400  |
| 3   | T3       | 6  | 8  | 1      | 0,0145  | 0,1600  |
| 4   | T3       | 5  | 8  | 1      | 0,0145  | 0,1600  |
| 5   | T4       | 12 | 14 | 1      | 0,2250  | 0,9000  |

|   |    |    |    |   |        |        |
|---|----|----|----|---|--------|--------|
| 6 | T5 | 13 | 16 | 1 | 0,1000 | 0,6000 |
|---|----|----|----|---|--------|--------|

....

.... continuación de tabla F-8

|    |    |    |    |   |         |         |
|----|----|----|----|---|---------|---------|
| 7  | T8 | 13 | 15 | 1 | 0,1000  | 0,6000  |
| 8  | T6 | 14 | 20 | 1 | 0,6667  | 2,0000  |
| 9  | T7 | 19 | 21 | 1 | 0,8000  | 4,0000  |
| 10 | M6 | 3  | 3  | 1 | 0,0221  | 0,5825  |
| 11 | M7 | 12 | 12 | 1 | 0,1003  | 1,5705  |
| 12 | M8 | 11 | 11 | 2 | 0,1003  | 1,5705  |
| 13 | M9 | 8  | 8  | 1 | 0,2765  | 2,9392  |
| 14 | M1 | 9  | 9  | 1 | 0,2765  | 2,9392  |
| 15 | M1 | 15 | 15 | 1 | 0,2765  | 2,9392  |
| 16 | M1 | 17 | 17 | 2 | 0,2765  | 2,9392  |
| 17 | G1 | 2  | 2  | 1 | 0,1600  | 3,1991  |
| 18 | G2 | 11 | 11 | 1 | 1,0027  | 8,3723  |
| 19 | G3 | 12 | 12 | 1 | 8,2792  | 66,2338 |
| 20 | M1 | 4  | 4  | 1 | 10,3516 | 72,4615 |
| 21 | M2 | 11 | 11 | 1 | 10,3516 | 72,4615 |
| 22 | M2 | 12 | 12 | 1 | 10,3516 | 72,4615 |
| 23 | M3 | 8  | 8  | 1 | 10,3516 | 72,4615 |
| 24 | M4 | 9  | 9  | 1 | 10,3516 | 72,4615 |
| 25 | M5 | 15 | 15 | 2 | 0,0006  | 0,0433  |
| 26 | S1 | 1  | 1  | 1 | 0,0029  | 0,1146  |
| 27 | R1 | 2  | 7  | 1 | 0,0029  | 0,1146  |
| 28 | R2 | 2  | 6  | 1 | 0,0170  | 0,5948  |
| 29 | R2 | 2  | 5  | 1 | 0,0820  | 1,3608  |
| 30 | R3 | 2  | 3  | 1 | 0,0420  | 1,2093  |
| 31 | R4 | 2  | 4  | 1 | 0,0820  | 1,3608  |
| 32 | R5 | 11 | 13 | 1 | 0,0820  | 1,3608  |
| 33 | R6 | 14 | 19 | 1 | 0,6555  | 7,5383  |
| 34 | R7 | 15 | 17 | 1 | 0,6555  | 7,5383  |
| 35 | R8 | 20 | 22 | 1 | 1,7435  | 19,0909 |
| 36 | R9 | 8  | 9  | 1 | 1,7435  | 19,0909 |
| 37 | RD | 15 | 18 | 1 | 1,7435  | 19,0909 |
| 38 | RO | 10 | 11 | 1 | 0,0026  | 0,0077  |
| 39 | R1 | 2  | 7  | 1 | 0,0018  | 0,0014  |
| 40 | R2 | 2  | 6  | 1 | 0,0033  | 0,0012  |
| 41 | R2 | 2  | 5  | 1 | 0,0033  | 0,0012  |
| 42 | R3 | 2  | 3  | 1 | 0,0028  | 0,0012  |
| 43 | R4 | 2  | 4  | 1 | 0,0023  | 0,0016  |
| 44 | R5 | 11 | 13 | 1 | 0,0166  | 0,0142  |
| 45 | R6 | 14 | 19 | 1 | 0,3303  | 3,5503  |
| 46 | R7 | 15 | 17 | 1 | 0,2972  | 0,3819  |
| 47 | R8 | 20 | 22 | 1 | 4,8993  | 1,6411  |

|    |    |    |    |   |        |        |
|----|----|----|----|---|--------|--------|
| 48 | R9 | 8  | 9  | 1 | 0,0359 | 0,0363 |
| 49 | RD | 15 | 18 | 1 | 1,6560 | 1,7795 |
| 50 | RO | 10 | 11 | 1 | 0,0011 | 0,0400 |
| 51 | RT | 10 | 12 | 1 | 0,0011 | 0,0400 |

**Tabla F-4** Comparación de niveles de Cortocircuito del sistema de 22 barras

| SISTEMA INDUSTRIAL DE 22 BARRAS    |               |                |               |                  |               |         |            |
|------------------------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|---------------|---------|------------|
| REGIMEN MOMENTANEO ( T=1/2 ciclo ) |               |                |               |                  |               |         |            |
| 1                                  | 2             | 3              | 4             | 5                | 6             | 7       | 8          |
|                                    |               | DUNKY-JACOBS   |               | PRESENTE TRABAJO |               | Correl. | Correl.    |
|                                    |               | ANSI (Complex) |               | ANSI (Complex)   |               | (1)     | (2)        |
| Barra de<br>falla                  | Barra<br>[KV] | CA<br>[kA]     | CA+CC<br>[kA] | CA<br>[kA]       | CA+CC<br>[kA] | CA<br>% | CA+CC<br>% |
| 1                                  | 138,000       | 6,184          | 7,086         | 5,900            | 9,440         | -4,592  | 33,220     |
| 2                                  | 13,800        | 28,468         | 43,903        | 28,150           | 45,040        | -1,117  | 2,590      |
| 3                                  | 13,800        | 24,243         | 30,776        | 25,669           | 41,070        | 5,881   | 33,448     |
| 4                                  | 13,800        | 24,902         | 32,343        | 24,637           | 39,420        | -1,062  | 21,881     |
| 5                                  | 13,800        | 25,660         | 30,854        | 25,406           | 40,650        | -0,989  | 31,750     |
| 6                                  | 13,800        | 25,660         | 30,854        | 25,406           | 40,650        | -0,989  | 31,750     |
| 7                                  | 13,800        | 26,442         | 36,380        | 26,169           | 41,870        | -1,033  | 15,091     |
| 8                                  | 2,400         | 33,835         | 49,286        | 33,894           | 54,230        | 0,174   | 10,031     |
| 9                                  | 2,400         | 21,933         | 24,350        | 21,925           | 35,080        | -0,036  | 44,066     |
| 10                                 | 4,160         | 47,235         | 73,026        | 47,019           | 75,230        | -0,458  | 3,018      |
| 11                                 | 4,160         | 35,174         | 56,014        | 35,206           | 56,330        | 0,092   | 0,564      |
| 12                                 | 4,160         | 35,741         | 57,267        | 35,400           | 56,640        | -0,954  | -1,095     |
| 13                                 | 4,160         | 24,971         | 28,333        | 24,994           | 39,990        | 0,091   | 41,143     |
| 14                                 | 0,480         | 14,077         | 16,850        | 14,131           | 22,610        | 0,385   | 34,184     |
| 15                                 | 0,480         | 25,034         | 32,511        | 24,906           | 39,850        | -0,510  | 22,574     |
| 16                                 | 0,480         | 22,617         | 29,152        | 24,725           | 39,560        | 9,320   | 35,703     |
| 17                                 | 0,480         | 15,483         | 17,220        | 15,956           | 25,530        | 3,057   | 48,258     |
| 18                                 | 0,480         | 17,381         | 19,132        | 17,981           | 28,770        | 3,453   | 50,376     |
| 19                                 | 0,480         | 3,533          | 4,726         | 3,969            | 6,350         | 12,334  | 34,363     |
| 20                                 | 0,208         | 11,100         | 12,602        | 11,637           | 18,620        | 4,842   | 47,754     |
| 21                                 | 0,208         | 3,750          | 4,834         | 3,894            | 6,230         | 3,833   | 28,879     |
| 22                                 | 0,208         | 4,197          | 4,197         | 4,162            | 6,660         | -0,822  | 58,685     |

(1) Correlación CA = [(columna 5/columna 3) - 1]\*100 %

(2) Correlación CA+CC = [(columna 6/columna 4) - 1]\*100 %



**Tabla F-5** Comparación de métodos de cálculo standard  
ANSI

-----

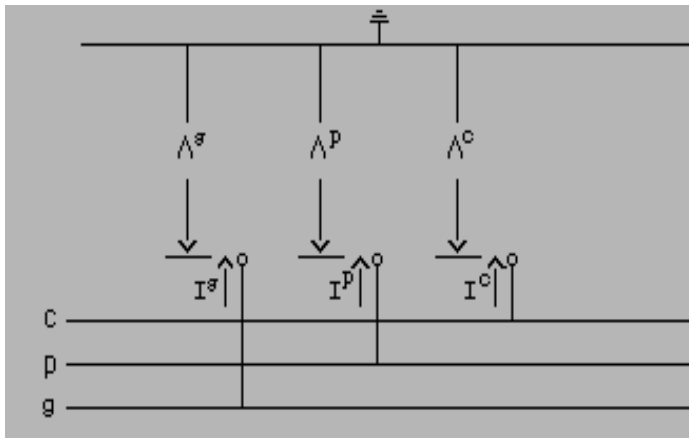
-----

**Fuente** : Dunki et, al, (1988)

## ANEXO G

### Ecuaciones Generales del Análisis de Fallas

Las siguientes ecuaciones que se desarrollan están en base a la figura G.1.



**Figura G.1** Puntos de acceso trifásico.

En la figura G.1 los terminales que salen, representan conexiones externas que alimentan la falla en estudio. Se denomina "i" a la barra de falla.

#### G.1 Falla Trifásica balanceada

Si en la figura G.1 accedemos al punto terminal a través de una impedancia de falla  $Z_f$ , tal como se muestra en la figura G.2, las condiciones en el punto terminal serán:

$$V_a = I_a Z_f$$

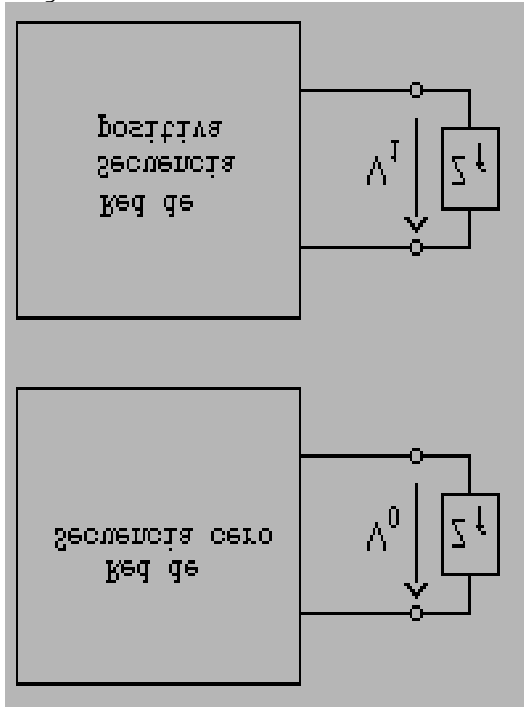
$$V_b = I_b Z_f \quad (G.1)$$

$$V_c = I_c Z_f$$

ó en forma matricial:



La correspondiente red de conexiones está dada por la figura G.3.



Puesto que las redes de secuencia cero y negativa son pasivas, solo la red de secuencia positiva contiene fuente, esto es:

$$(G.5) \quad V_0=V_2=0; \quad I_0=I_2=0;$$

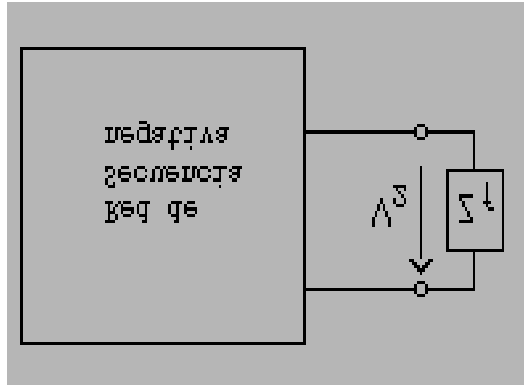
$$\text{y } V_i^1 = z_f I_i^1 \quad (G.6)$$

$$\text{ó } V_i^1 = E - [z_{i1}^1 I_1^1 + \dots + z_{i1}^1 I_i^1 + \dots + z_{in}^1 I_n^1]$$

pero

$$I_1^1 = I_2^1 = \dots = I_n^1 = 0 \quad (G.7)$$

excepto para  $I_i^1$



**Figura G.3** Redes de secuencia para una falla trifásica balanceada.

es decir :

$$V_i^1 = E - [ 0 + \dots + z_{ii}^1 I_i^1 + \dots + 0 ] \quad (G.8)$$

Luego, la corriente de falla en la barra i es:

$$I_i^1 = \frac{E}{z_f + z_{ii}^1} \quad (G.9)$$

Resolviendo para  $V_j$ ,

$$V_j^1 = E - z_{ji}^1 I_i^1 \quad (G.10)$$

Sustituyendo la ecuación (G.9) se tiene el voltaje postfalla en la barra j:

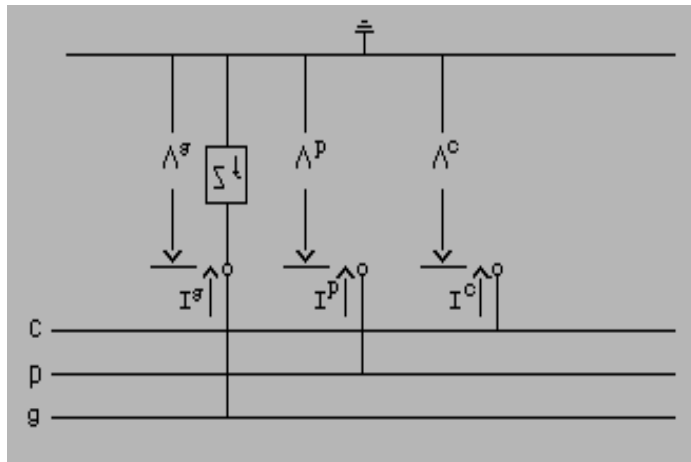
$$V_j^1 = \frac{z_{ii}^1 - z_{ji}^1 + z_f}{z_{ii}^1 + z_f} E \quad (G.11)$$

## G.2 Falla Monofásica a Tierra

Con referencia a la figura G.4, las condiciones en el punto terminal son tales que, podemos escribir:

$$\begin{aligned} I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned} \quad (G.12)$$

$$V_a = I_a Z_f \quad (G.13)$$



**Figura G.4** Falla general monofásica a tierra.

Pasando las corrientes a componentes de secuencia, se tiene:

$$[I_{abc}] = [T] [I_{012}] \quad (G.14)$$

de donde:

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \\ I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \end{aligned} \quad (G.15)$$

De la ecuación (G.12)  $I_b = I_c$  y manipulando la ecuación (G.15), también podemos obtener que  $I_1 = I_2$ . Haciendo  $I_b = 0$  en (G.15) obtenemos  $I_0 = I_1$ .

De la ecuación (G.13), tenemos:

$$V_a = Z_f I_a \quad (G.16)$$

es decir,

$$\begin{aligned} V_0 + V_1 + V_2 &= Z_f (I_0 + I_1 + I_2) \\ V_0 + V_1 + V_2 &= 3 Z_f I_1 \end{aligned} \quad (G.17)$$

Para satisfacer las condiciones de  $I_0 = I_1 = I_2$  y la ecuación (G.17), es necesario que la interconexión de las redes de secuencia sea en la forma indicada por la figura G.5.

En general:

$$\begin{aligned} I_j^0 = I_j^1 = I_j^2 &= 0 \quad ; \quad j=1, \dots, n \quad ; \quad j = i \\ I_i^0 = I_i^1 = I_i^2 \end{aligned} \quad (G.18)$$

Por la 2da. Ley de Kirchoof :

$$\begin{aligned} V_i^0 + V_i^1 + V_i^2 &= 3 Z_f I_i^1 \quad (G.19) \\ E - z_{ii}^0 I_i^0 - z_{ii}^1 I_i^1 - z_{ii}^2 I_i^1 &= 3 z_f I_i^1 \quad (G.20) \end{aligned}$$

Luego, la corriente de falla monofásica será :

$$I_i^1 = \frac{E}{z_{ii}^0 + z_{ii}^1 + z_{ii}^2 + 3 z_f} \quad (G.21)$$

**Figura G.5** Conexión de redes de secuencia para una falla monofásica a tierra.



## ANEXO H

### Solución del Sistema de Ecuaciones Diferenciales

Al final del capítulo 2, se ha obtenido el siguiente sistema de ecuaciones:

$$i_1(t) = 3[ V_r(t) + R_r I_r(t) + L_r dI_r(t)/dt ] I_r(t)/V_c(t) \quad (H.1)$$

$$i_2(t) = 3[ V_i(t) - R_i I_i(t) - L_i dI_i(t)/dt ] I_i(t)/V_c(t) \quad (H.2)$$

$$i_2(t) = i_1(t) + C dV_c/dt \quad (H.3)$$

$$I_r(t) = K_p (V_{ref} - V_c(t)) \quad (H.4)$$

El sistema tiene como incógnitas  $I_r$ ,  $V_c$ ,  $i_1$  e  $i_2$ .

Para resolver, este sistema se ha manipulado las ecuaciones con el fin de obtener una sola ecuación en términos de la variable  $V_c$ , resultando la siguiente expresión:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{[-A_4 V_c^2 + (A_7 \text{Sen}wt + A_3) V_c - (A_1 \text{Sen}wt + A_2) + B_1 e^{-t/T_{aui}} \text{Sen}^2 wt - e^{-2t/T_{aui}} (B_2 \text{Sen}_2 wt + B_3 \text{Sen} 2wt)]}{(A_6 V_c - A_5)} \quad (H.5)$$

donde :

$$\begin{aligned} A_1 &= K_p V_{ref} V_{maxr} & A_5 &= L_r K_p^2 V_{ref} \\ A_2 &= R_r K_p^2 V_{ref}^2 & A_6 &= L_r K_p^2 + C/3 \\ A_3 &= 2 V_{ref} R_r K_p^2 & A_7 &= K_p V_{maxr} \\ A_4 &= R_r K_p^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= I_{max} V_{maxi} \\ B_2 &= (R_i I_{max}^2 - L_i I_{max}^2 / T_{aui}) \\ B_3 &= 1/2 L_i I_{max}^2 w \\ T_{aui} &= L_i / R_i \end{aligned}$$

La ecuación diferencial ha sido resuelta por el método de integración denominado Runge Kutta de cuarto orden, para determinar la variable  $V_c$ .

#### H.1 Programa de Simulación

La figura H.1 muestra el diagrama de flujo general del procedimiento de cálculo de las variables  $V_c$ ,  $I_r$ ,  $i_2$ , e  $i_1$ . El programa fué codificado en lenguaje Turbo Pascal e insertado al Programa principal SEI.PAS para el cálculo de fallas.

**Figura H.1** Diagrama de flujo general del Programa de Simulación para determinar las variables  $V_c$ ,  $I_r$ ,  $i_2$ , e  $i_1$

La figura H.2 muestra la entrada de datos para el caso específico de un voltaje de barra, postfalla, en el lado CA del convertidor.

---

```

Kp   = 2;      { Amp/Volt }
Vref = 600;    { V dc }
Sb   = 10;    { MVA }
f    = 50;    { Hz }
pi   = 3.141592654;
w    = 314.1592654; {rad/seg}
tmax = 0.08;   { seg }

{ Rectificador }
Vs   = 380;    { Voltios L-L }
Rr   = 3.5;    { Ω }
Xr   = 5.0;    { Hy }

{ Enlace DC }
C    = 0.01; {F}

{ Inversor }
Zd2o = 0.2; {Impedancia del motor en p.u. bp}
X_R  = 7.0; { X/R del motor en rad}
KVAm = 100; { HP=KVAm, uno de 150 HP}

Vp:= 0.9745; {Voltaje de barra en el lado CA del Rectificador }

```

---

**Figura H.2** Datos de entrada al programa de simulación

Se ha considerado que en el lado CA del inversor existe el mismo voltaje efectivo nominal, es decir 380 V. línea a línea.

La salida del programa, se visualiza en las formas de onda de la figura 6.13 del capítulo 6.

## H.2 Cálculo de la corriente efectiva $I_r$ de medio ciclo

En forma adicional, el programa de simulación tiene incluido una rutina para el cálculo de la corriente efectiva de  $I_r$  por el método de integración numérica de SIMPSON, siguiendo la siguiente definición:

El valor de T toma el valor de 0.01 segundos (pi radianes). La integral representa el área debajo la curva  $I_r^2(t)$ .

La figura H.3 muestra las instrucciones de la rutina de Simpson para el cálculo de áreas.

---

```

Function Simps(y3 : vector;
              a,b : real;
              lim11, n : integer):real;
var
  h,sumend,summid,x : real;
  k : integer;
{ Parametros de integracion }
begin
h:=(b-a)/(2*n); sumend:=0; summid:=0;
{ Evalua sumend y summid }
for k:=lim11 to n do
  begin
    x:=a+2*h*(k-1);
    sumend:=sumend+y3[k-1];
    summid:=summid+y3[k];
  end;
{ Retorna el valor estimado de la integral }
simps:=(2.0*sumend+4.0*summid- y[lim11]+y3[n])*h/3;
end;

```

---

**Figura H.3** Programa de Simpson para el cálculo de la corriente efectiva de  $I_r$

Para el mismo ejemplo, La figura H.4 muestra los resultados obtenidos.

**METODO DE INTEGRACION DE SIMPSON**

Número de datos en un periodo : 401  
a = 0.000; b = 3.1416; Area = 32264183.534000  
Corriente efectiva [AMP] : 3204.6854

**Figura H.4** Resultados de la rutina de Integración de Simpson

En el capítulo 4, la corriente efectiva se determina a partir de la corriente máxima de  $I_r$ , asumiendo que ésta es una senoide. Para tal caso el valor de la corriente efectiva se obtuvo como  $I_r=3529.7$  [AMP], el cual tiene un exceso de

10.14% con respecto al actual. Esto puede representar un valor sobreestimado, pero es el caso más desfavorable que se puede tener, motivo por el cual se tomó el procedimiento descrito en dicho capítulo.

### **H.3 Validación de las rutinas**

#### **i) Programa de Simulación**

Debido a que no se ha encontrado un modelo de comportamiento subtransitorio del modelo de inversor descrito en el capítulo 2, no se pudo realizar la validación a través de la comparación con un modelo semejante. Sin embargo, la parte más importante del Programa, RUNGE.PAS, en la que se implementó el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden, fué probado en la solución de algunas ecuaciones diferenciales. Así la siguiente ecuación diferencial fué resuelta por dicho método.

**Figura H.5** Resultados utilizando el método de integración de Runge Kutta para la solución de una ecuación diferencial.

La fig H.5 muestra la salida de algunos valores. La solución exacta de esta ecuación es  $y = e^{-x^2/2}$ , si se reemplaza, en ésta, el valor de  $x=1$  el valor obtenido es aproximado al obtenido por el programa.

**ii) Rutina de Simpson**

Esta rutina fué validada realizando el cálculo de la corriente efectiva de una onda sinusoidal, de la forma  $i(t)=I_{\max} \text{ sen } \omega t$ , con la ecuación (H.6). La integral ha sido resuelta por la rutina, que tiene implementada el método de integración de Simpson. El resultado obtenido es muy próximo al valor conocido como  $I_{\max}/\sqrt{2}$ .