



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS  
ELECTRICOS DE CORRIENTE DIRECTA

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO ELECTRICO Y  
E L E C T R O N I C O**

**P R E S E N T A N :**  
**YEUDIEL VALDIVIA AGUILERA  
LUIS MANUEL HERNANDEZ SALVATIERRA  
RAFAEL LOPEZ HERNANDEZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
M. I. RODOLFO LORENZO BAUTISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.,

MARZO 2005

m.342217





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# AGRADECIMIENTOS

### **Agradecimiento**

Esta tesis representa la culminación de una etapa importante de mi formación profesional así como la base para continuar en dicho proceso y me permito reflexionar acerca de las personas que han estado conmigo a lo largo de todo este tiempo. Agradezco a mi familia y en especial a mis padres por confiar en mí y por apoyarme en todo, sin ellos todo habría sido más difícil.

Un especial agradecimiento al M.I. Rodolfo Lorenzo Bautista por el gran apoyo que me ha brindado para el desarrollo de esta tesis y además por contribuir ampliamente en mi formación profesional.

Gracias a todos mis profesores y compañeros por compartir parte de su vida conmigo y de quienes aprendí mucho, no solo en el aspecto académico. Finalmente, agradezco a la Facultad de Ingeniería y a mi casa la UNAM por permitirme formar en ella.

*Yeudiel Valdivia Aguilera.*

### **Agradecimiento**

Con el presente texto quiero darle las gracias, primeramente a dios por sobre todas las cosas que nunca me ha abandonado, a mi madre Yolanda Salvatierra, a mi padre Manuel Salvatierra y a mi hermana Mónica Hernández por haberme apoyado incondicionalmente para terminar los estudios de una carrera profesional.

Y a mis compañeros de trabajo de tesis Rafael y Yeudiel, por haber aceptado colaborar conmigo en esta investigación.

A mi exnovia Claudia Lusthoff, por haberme levantado el orgullo de retomar el trabajo de tesis.

Así como también agradecer a los ingenieros Alex Ramírez Rivero, Carlos Martínez Calderón, David Vázquez Ortiz, Rodolfo Lorenzo Bautista y Tomás Castellanos López que me brindaron su ayuda para mi formación académica.

Por lo que finalmente gracias a todos estoy terminando la meta fijada.

A todos ellos gracias.

*Luis Manuel Hernández Salvatierra.*

### **Agradecimiento**

A mis padres ya que de no haber sido por el apoyo amoroso, su estímulo y su indubitable confianza en mi destino "jamás habría llegado a la cima". Por eso, con gratitud permanente de emoción y respeto hoy les digo ¡he cumplido!

Inicio un nuevo camino, y de hoy en adelante la responsabilidad es mía. No pienso defraudar a nadie, sino por el contrario, deseo superarme para que se sientan orgullosos de su hijo.

A mis hermanos, Gabriela, Guadalupe y Miguel Ángel por el apoyo, la confianza y paciencia brindada durante tanto tiempo.

A mis maestros con cariño, afecto y agradecimiento, por sus conocimientos, consejos y llamadas de atención que me brindaron a lo largo de mis estudios que no tuvieron otro fin mas que el de mejorar mi desempeño.

Por haber creído y confiado en mi trabajo y esfuerzo, dándome así la vitalidad para continuar y concluir este trabajo, que con desvelos, cansancio y sacrificios hemos realizado, pero que hoy, al verlo concluido, nos provoca una gran satisfacción.

A mis amigos que me daban ánimos y consejos para buscar siempre la culminación de cada una de las actividades a realizar dentro y fuera de la escuela. A Guillermo por las facilidades brindadas para combinar el trabajo y la escuela; a los muchachos por facilitarme el mismo.

*Rafael López Hernández.*

# JUSTIFICACIÓN

### **Justificación**

El presente documento tiene como objeto el desarrollo del trabajo de Tesis para obtener el Título de Ingeniero Eléctrico Electrónico de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Asimismo presenta una base teórica para que los alumnos de la carrera de Ingeniería Eléctrica y Electrónica se introduzcan en el estudio detallado del Análisis de Corto Circuito en Sistemas Eléctricos de Corriente Directa ; análisis que tiene gran importancia debido a la demanda de la operación confiable de los sistemas eléctricos de potencia de corriente directa.

A diferencia de los sistemas de potencia de corriente alterna, no existen muchos estándares internacionales que presenten procedimientos simplificados para el cálculo de las corrientes de corto circuito de CD, lo cual hace más atractivo y útil el estudio presentado en esta tesis.



## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>I. FUENTES DE CORTO CIRCUITO</b> .....	<b>8</b>
I.1. Introducción.....	8
I.2. Fuentes de corriente de corto circuito de CD .....	9
<b>II. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO</b> .....	<b>14</b>
II.1. Introducción.....	14
II.2. Procedimientos de cálculo .....	15
II.2.1. Procedimiento de cálculo IEC .....	15
II.2.2. Métodos de Matriz.....	16
II.3. Corto circuito de una batería de plomo ácido.....	16
II.4. Generadores y motores de CD .....	28
II.5. Corriente de corto circuito de un rectificador.....	39
II.6. Corto circuito de un capacitor cargado.....	47
II.7. Conductores.....	49
II.8. Características y comportamiento de convertidores .....	51
II.8.1. Disturbios en convertidores.....	51
II.8.2. Corto circuito interno en los convertidores .....	51
<b>III. CORRIENTE TOTAL DE CORTO CIRCUITO DE CD</b> .....	<b>58</b>
III.1. Cálculo de la corriente de corto circuito .....	62
III.1.1. Corto circuito en el punto F1 .....	62
III.1.1.A. Corriente de corto circuito debida al rectificador.....	62
III.1.1.B. Corriente de corto circuito debida a la batería .....	65
III.1.1.C. Corriente de corto circuito debida al capacitor.....	66
III.1.1.D. Corriente de corto circuito debida al motor .....	70
III.1.1.E. Tabla de resultados .....	78
III.1.2. Corto circuito en el punto F2 .....	80
III.1.2.A. Corriente de corto circuito debida al rectificador.....	80
III.1.2.B. Corriente de corto circuito debida a la batería .....	82
III.1.2.C. Corriente de corto circuito debida al capacitor.....	83
III.1.2.D. Corriente de corto circuito debida al motor .....	84
III.1.2.E. Tabla de resultados .....	87
III.1.3. Corto circuito en el punto F3 .....	92
III.1.3.A. Corriente de corto circuito debida al rectificador.....	92
III.1.3.B. Corriente de corto circuito debida a la batería .....	94
III.1.3.C. Corriente de corto circuito debida al capacitor.....	95
III.1.3.D. Corriente de corto circuito debida al motor .....	97
III.1.3.E. Tabla de resultados .....	100
III.1.4. Corto circuito en el punto F4 .....	105
III.1.4.A. Corriente de corto circuito debida al rectificador.....	105
III.1.4.B. Corriente de corto circuito debida a la batería .....	107
III.1.4.C. Corriente de corto circuito debida al capacitor.....	108
III.1.4.D. Corriente de corto circuito debida al motor .....	109
III.1.4.E. Tabla de resultados .....	112
<b>IV. APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO</b> .....	<b>119</b>
IV.1. Interruptores en baja tensión en sistemas de CD.....	119
IV.1.1. Introducción .....	119
IV.1.2. Función básica de un interruptor automático .....	119
IV.1.2.A. Variedad de interruptores .....	120

IV.1.2.B. Variedad del elemento disparador.....	121
IV.1.3. Censado la sobrecorriente.....	121
IV.1.3.A. Características Termomagnéticas.....	121
IV.1.3.B. Región de tiempo largo.....	122
IV.1.3.C. Región de transición.....	123
IV.1.3.D. Región instantánea.....	124
• IV.1.4. Interrupción de corriente en CD.....	125
IV.1.4.A. Circuito de corriente directa.....	125
IV.1.4.B. Interrupción del circuito.....	126
IV.1.5. Clasificación, prueba y certificación.....	131
IV.1.5.A. Interruptores de caja moldeada y de caja aislada.....	132
IV.1.5.B. Interruptores de potencia en baja tensión.....	135
IV.2. Sistema de tracción eléctrico.....	137
IV.2.1. Introducción.....	137
IV.2.2. Tablero de distribución de CD básico.....	137
IV.2.3. Requerimientos del interruptor.....	137
IV.2.3.A. Especificaciones del interruptor.....	138
IV.2.3.B. Niveles máximos de corto circuito.....	140
IV.2.3.C. Interrupción de máxima energía del circuito.....	140
IV.2.3.D. Interrupción de falla distante.....	140
IV.2.3.E. Baja corriente de interrupción.....	141
IV.2.3.F. Interruptor del rectificador.....	141
IV.2.3.G. Especificación del tablero de distribución.....	142
IV.2.4. Requerimientos de protección.....	143
IV.2.4.A. Protección del alimentador.....	143
IV.2.4.B. Protección del rectificador.....	147
IV.2.4.C. Protección del tablero de distribución.....	148
IV.3. Puesta a tierra del sistema de tracción de potencia de CD.....	149
IV.3.1. Introducción.....	149
IV.3.2. Sistema de potencia de tracción de CD.....	150
IV.3.3. Puesta a tierra del equipo.....	151
IV.3.3.A. Método de puesta a tierra de alta resistencia.....	152
IV.3.3.B. Método de puesta a tierra de baja resistencia.....	152
IV.3.4. Puesta a tierra del sistema de potencia de CD.....	154
IV.3.4.A. Sistema sólidamente aterrizado.....	154
IV.3.4.B. Sistema de puesta a tierra con diodo.....	155
IV.3.4.C. Interruptor automático de puesta a tierra.....	155
IV.3.4.D. Sistema sin aterrizarse.....	156
IV.3.4.E. Método de puesta a tierra con un tiristor.....	156
IV.3.5. Falla de la cubierta del equipo de CD.....	158
IV.3.5.A. Sistema de potencia sin aterrizarse.....	158
IV.3.5.B. Sistema de potencia aterrizado.....	158
IV.3.6. Falla fuera de la cubierta de CD.....	160
IV.3.7. Corriente disipada de CD.....	161
IV.3.8. Análisis de seguridad.....	162
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>164</b>
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>168</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>170</b>

# INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

La importancia de la operación confiable de los sistemas eléctricos de potencia de corriente directa se ha incrementado firmemente durante los últimos años. Dichos sistemas son, por ejemplo, las fuentes de suministro de potencia que actúan bajo condiciones de emergencia en las estaciones generadoras, las instalaciones para el proceso de datos, compañías de teléfonos de larga distancia, los sistemas de tracción eléctrica, HVDC entre otros.

Como resultado de lo anterior, se ha hecho necesario extender el cálculo de las corrientes de corto circuito a sistemas eléctricos de corriente directa para diseñar y verificar la operación correcta de plantas y equipo. Esto ha incrementado el papel del ingeniero dentro del área de los sistemas de corriente directa donde es necesario realizar un análisis a profundidad de éstos sistemas.

La introducción de los programas de computadora para el análisis de sistemas de potencia de CD ha proporcionado al ingeniero, herramientas más poderosas para realizar estos análisis. Ahora se pueden realizar análisis más complejos en menos tiempo. Los análisis de sistemas de potencia de CD que usualmente tomaban semanas, incluso meses, pueden ahora realizarse en días.

Para realizar el análisis de los sistemas de potencia de corriente directa y en específico, de corto circuito, es necesario tratar el modelado de sistemas y el desarrollo del diagrama unifilar apropiado para el estudio de interés, incluyendo las fuentes, los conductores y las cargas.

Actualmente existen muchos estándares los cuales proporcionan una orientación para el análisis de sistemas de potencia de CD.

Estos documentos son por ejemplo IEEE, UL, NEMA, GE, los cuales se distribuyen en toda la industria.

Sin embargo no existe un procedimiento simplificado para el cálculo de corrientes de corto circuito en sistemas de CD que esté bien establecido. Por ejemplo, no existe un estándar de ANSI/IEEE para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD.

Algunos procedimientos simplificados se han propuesto por los Comités Internacionales para proporcionar métodos de referencia en el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CA, no así para el caso de sistemas de CD.

El desarrollo de las computadoras ha forzado a los ingenieros a adoptar simulaciones dinámicas para el estudio del corto circuito y sobre todo al uso de los procedimientos simplificados proporcionados por dichos estándares.

Desde hace algunos años se ha hecho notable el interés en el cálculo de las corrientes de corto circuito y ello se refleja en la presencia de muchos programas de computadora que hacen uso del método computacional del estado casi estable propuesto por los estándares internacionales y además en los trabajos recientes en los cuales se realizan comparaciones de estándares y procedimientos de diferentes institutos.

Como ya se mencionó no existen procedimientos simplificados para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD que estén bien establecidos. Fue en 1993 que en la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) por sus siglas en inglés, se contó con una versión tipo borrador del estándar titulado "Cálculo de las corrientes de corto circuito en instalaciones auxiliares de CD y en plantas de potencia y subestaciones" que se encontraba bajo estudio. Mas tarde, se presentó como el estándar 61660-1 de IEC y fue publicado en 1997.

Éste estándar es el único documento comprensible y disponible en la materia, sin embargo sólo se enfoca a instalaciones eléctricas de CD en plantas y subestaciones pero no en sistemas más grandes como el sistema de tracción eléctrica.

El estándar antes citado realiza el cálculo de algunos parámetros característicos que pueden describir la variación en el tiempo, de las corrientes en la localización del corto circuito, desde su inicio hasta su fin. Dichos métodos de cálculo se presentan en el capítulo II de ésta tesis.

Una de las aplicaciones del cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD es en la selección de interruptores de corriente directa. Los interruptores de potencia de CD de propósito general y bajo voltaje no limitan la corriente pico.

Un interruptor de alta velocidad limita el pico a un valor menor que el de la corriente disponible y éstos interruptores tienen un valor de corto circuito y de un tiempo corto. Los interruptores que operan a una velocidad intermedia, es decir, ni alta ni baja, no limitan la corriente de corto circuito en circuitos con inductancia mínima pero si lo hace para circuitos altamente inductivos.

Otra de las aplicaciones es en el sistema de potencia de tracción de CD. Los sistemas de tránsito rápido se están expandiendo a gran velocidad en todo el mundo, sin embargo existe muy poco esfuerzo en el desarrollo de estándares para el diseño y protección de sistemas de potencia de CD comparado con los sistemas de potencia de CA usados en la industria en general. Estas aplicaciones del corto circuito en CD se tratan en el capítulo IV de ésta tesis.

# CAPÍTULO I

## CAPÍTULO 1 FUENTES DE CORTO CIRCUITO

### Introducción

Cargadores de batería, convertidores de potencia (rectificadores), y generadores son generalmente fuentes en las que su voltaje de salida está bien regulado, desde las condiciones de vacío o sin carga hasta que están a carga plena. Para los estudios de flujo de potencia / caída de voltaje, estas fuentes pueden ser modeladas como una fuente de voltaje ideal en serie con una resistencia pequeña.

Fuentes electrónicas como cargadores y convertidores comúnmente tienen un circuito limitador de corriente integrado. Este circuito reduce su voltaje de salida para limitar la corriente de salida a un valor seguro para sus componentes electrónicos internos. El circuito limitador de corriente normalmente tiene un valor ajustable que no excederá el 50% de los amperes nominales del cargador. Cuando este valor se incrementa, estas fuentes empiezan a comportarse más como una fuente de corriente constante que como una fuente de voltaje constante.

El voltaje de salida de los generadores de CD normalmente empieza a disminuir conforme la corriente de carga aumenta y rebasa el valor nominal. Esto resulta en una regulación más pobre, pero el voltaje no disminuye tanto como en cargadores o convertidores.

Uno de los principales objetivos de los estudios de flujo de carga / caída de voltaje es determinar qué fuentes se están aplicando arriba de su corriente de salida nominal. Por lo tanto, éste tipo de fuentes son normalmente modeladas como fuentes de voltaje constantes para estos estudios.

Las baterías no son fuentes bien reguladas ya que su voltaje a la salida en cualquier tiempo dado depende tanto de la corriente de carga que está suministrando como de la energía total que se ha obtenido de ella desde el inicio hasta el tiempo en cuestión. Como los estudios de flujo de carga / caída de voltaje son problemas de estado estable, el voltaje de la batería se calcula por lo general para el tiempo específico en cuestión.

Los fabricantes de baterías comúnmente proporcionan las curvas características de descarga (fig. 2-2) o tablas para determinar la capacidad de la batería y el voltaje en las terminales.

La energía removida (energía que se ha sacado) de una batería se mide en amperes – horas (Ah) removidos, y puede ser calculada fácilmente para cualquier perfil de carga.

Dados los Ah removidos (amperes que se han sacado de la batería en una hora), el número de placas positivas en una celda, y la corriente que fluye a través de la celda, puede determinarse el voltaje de la celda de los datos del fabricante.

Multiplicando el voltaje de la celda por el número de celdas, se obtiene el voltaje en las terminales de la batería.

### Fuentes de corriente de corto circuito de CD.

Se pueden considerar cuatro tipos de fuentes de CD:

- Baterías de plomo ácido.
- Motores de CD
- Convertidores
- Capacitores

La figura 1-1 muestra las gráficas típicas de corriente de corto circuito como función del tiempo de estas fuentes y la figura 1-2 muestra la función estándar aproximada que se considera en el estándar 61660-1 de IEC.

$I_k$  = Corriente de corto circuito del estado casi estable.

$i_p$  = Corriente de corto circuito pico.

$T_k$  = Duración del corto circuito.

$t_p$  = tiempo en que ocurre la corriente de pico.

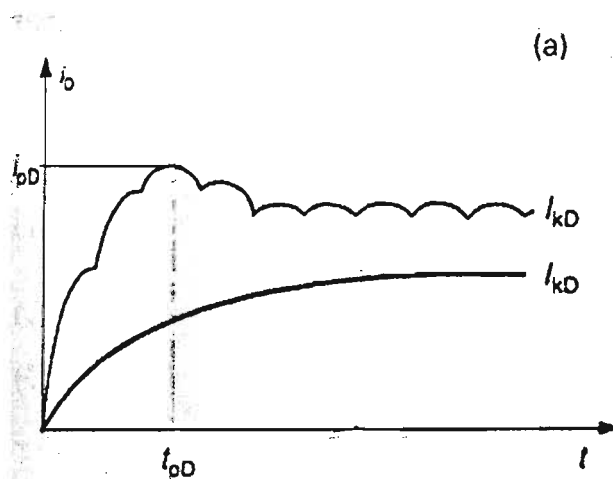


FIGURA 1-1

Gráficas de corriente de corto circuito en función del tiempo de varias fuentes: (a) rectificador con y sin reactor; (b) batería; (c) capacitor; (d) motor de CD con y sin masa de inercia adicional.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> La masa de inercia adicional se le coloca al motor para que el momento de inercia aumente.



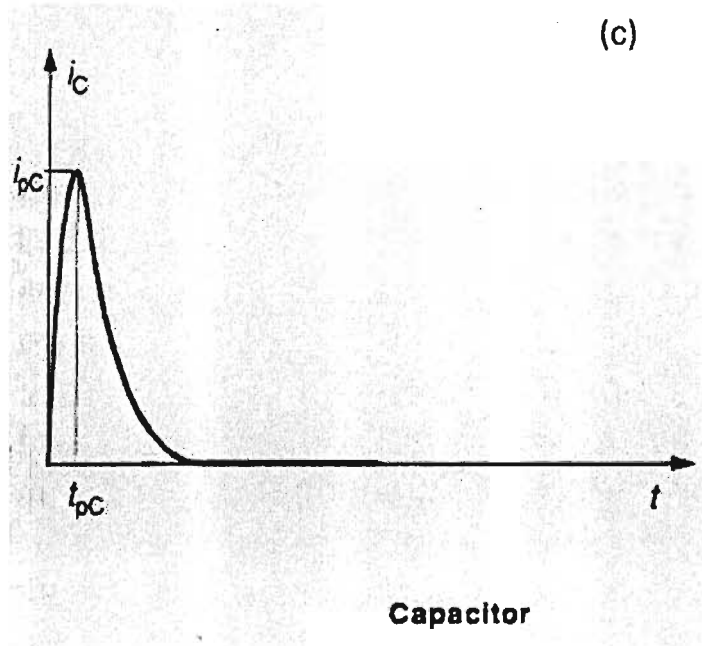
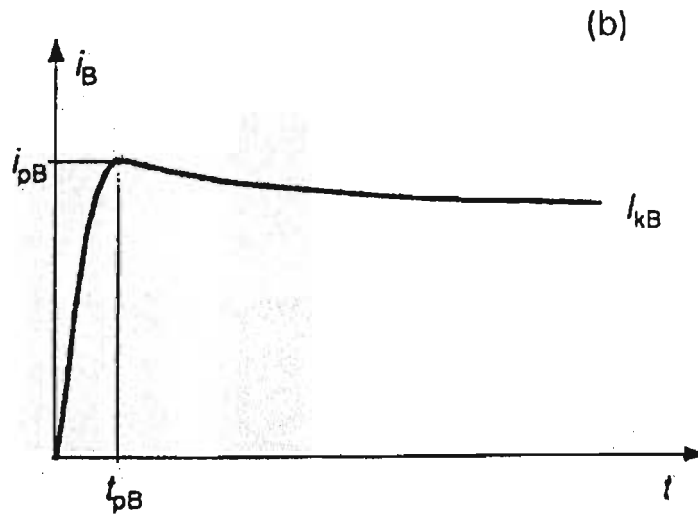


Figura 1-1 (Continuación)

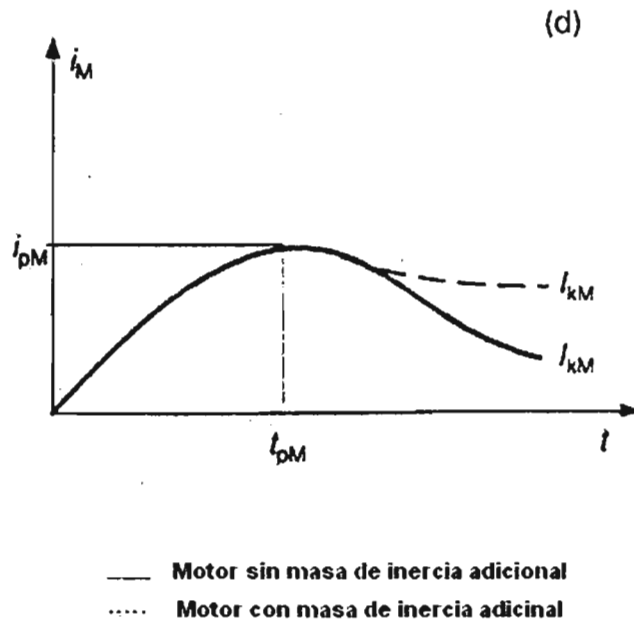


FIGURA 1-1 (Continuación)

En la siguiente figura, se muestra la gráfica de una aproximación estándar de la función de corto circuito.

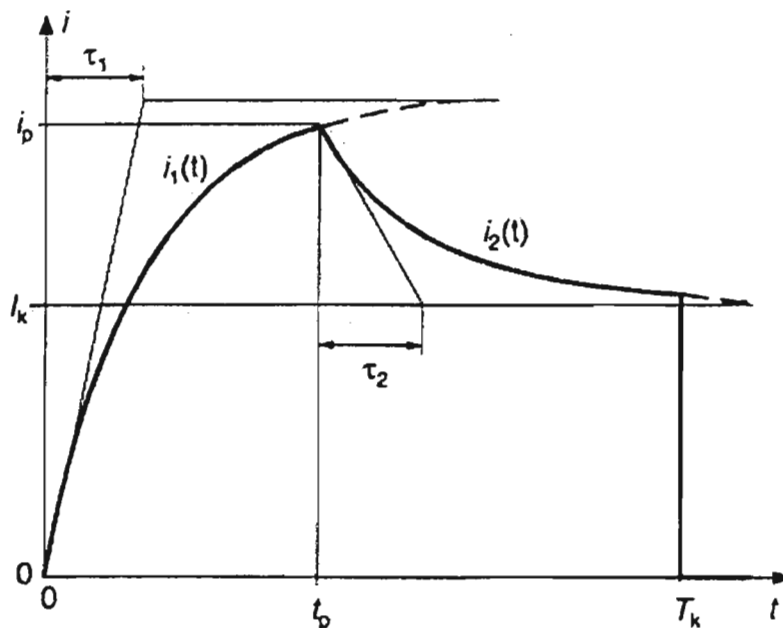


FIGURA 1-2  
Aproximación estándar de la función de corto circuito.

De la figura 1-2.

$\tau_1$  = Constante del tiempo de ascenso<sup>2</sup> (tiempo para pasar del 0.1 al 0.9 del valor final)

$\tau_2$  = Constante del tiempo de descenso<sup>3</sup> (tiempo para que el sistema alcance y permanezca en una banda del 5% alrededor del valor final)

La función mostrada en la figura 1-2 se describe por:

$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad (1.1)$$

$$i_2(t) = i_p \left[ (1 - \alpha) e^{-(t-t_p)/\tau_2} + \alpha \right] \quad t \geq t_p \quad (1.2)$$

$$\alpha = I_k / i_p \quad (1.3)$$

Donde:

$i_p$  = Corriente de corto circuito pico.

$\tau_1$  = Constante del tiempo de ascenso

$\tau_2$  = Constante del tiempo de descenso

$t_p$  = tiempo en que ocurre la corriente de pico.

La corriente del estado casi estable<sup>4</sup>  $I_k$  se considera, por convención, como 1 segundo después del inicio del corto circuito. Si se presenta un máximo no definido como se observa en la figura 1-1(a) para la corriente del convertidor, entonces la función estará dada únicamente por la ecuación (1.1).

<sup>2</sup> El **tiempo de ascenso** se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón se eleve del 10% al 90% de su valor final y en algunos casos se aproxima como el tiempo para pasar del 0% al 100% del valor final de la respuesta.

<sup>3</sup> El **tiempo de descenso** se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón disminuya y permanezca dentro de un porcentaje específico de su valor final. Una cifra de uso frecuente es 5%.

<sup>4</sup> El **estado casi estable** (quasi steady-state) es una aproximación del estado estable de un sistema. Desde hace algunos años se ha hecho notable el interés en el cálculo de las corrientes de corto circuito y ello se refleja en la presencia de muchos programas de computadora que hacen uso del método computacional del estado casi estable propuesto por los estándares internacionales.

# CAPÍTULO II

## CAPÍTULO II PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Características y comportamiento de equipos eléctricos

### II.1. Introducción

El cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de corriente directa es esencial para el diseño y aplicación de dispositivos de protección y distribución usados en estos sistemas. Los sistemas de CD incluyen motores de CD, baterías, sistemas de emergencia de suministro de potencia para estaciones generadoras, instalaciones para el procesamiento de datos y sistemas de potencia de corriente directa.

Se deben considerar las corrientes máximas de corto circuito para la selección del equipo eléctrico como cables, buses, y sus soportes. Los dispositivos de protección de corriente directa de alta velocidad pueden interrumpir la corriente antes de que se alcance el valor máximo. Por lo tanto, es necesario considerar el valor de la pendiente de la corriente junto con el tiempo en que ésta se interrumpe, para determinar así la corriente máxima que será obtenida realmente. Los dispositivos de protección de corriente directa de baja velocidad pueden permitir que el valor máximo se alcance antes de que la corriente sea interrumpida.

Aunque los procedimientos simplificados para el cálculo de las corrientes de corto circuito de CD están documentados en algunas publicaciones, éstos no están bien establecidos. Una publicación de General Electric Company (*GE Industrial Power System Data Book. Schenectady, NY, 1987*) y el estándar C37.14 de ANSI / IEEE (*Standard for low-voltage DC power circuit breakers used in enclosures, 1979*) proporcionan algunos procedimientos. El estándar 61660-1 de IEC (*Short-circuit currents in DC auxiliary installations in power plants and substations*) publicado en 1997, es el único documento completo y disponible para el tema.

El estándar IEC describe métodos de estado casi estable para sistemas de CD. En el presente documento se discutirá la variación en el tiempo de las características de la mayoría de las fuentes que contribuyen para la corriente de corto circuito desde el inicio hasta que se alcanza el estado estable y se mostrarán curvas apropiadas de estimación así como procedimientos. Una opción, es una simulación dinámica, sin embargo, así como con el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CA; estos métodos simplificados son sencillos de usar y aplicar, aunque, en sentido estricto los resultados deben ser verificados a través de una simulación.

## II.2 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

### II.2.1. Procedimiento de cálculo IEC.

La figura 2-11 muestra un sistema de distribución de CD el cual tiene cuatro fuentes de corriente de corto circuito: una batería, un cargador, un capacitor, y un motor de CD. Se muestran dos puntos de corto circuito: Uno localizado en la falla F1, sin considerar la rama común, y otro en la falla F2, a través de una resistencia e inductancia,  $R_y$  y  $L_y$  de la rama común. La corriente de corto circuito en F1 es la suma de las corrientes de corto circuito de las cuatro fuentes, como si éstas estuvieran actuando a través de la resistencia e inductancia en serie.

Para calcular la corriente de corto circuito en F2, se calculan las corrientes de corto circuito como en F1 pero agregando  $R_y$  y  $L_y$  en serie al circuito.

Para el cálculo de la corriente de corto circuito máxima o mínima, se ignoran las cargas y la impedancia se considera como cero.

Para la corriente de corto circuito máxima se aplican las siguientes condiciones:

- No se considera la resistencia de empalmes en los buses.
- La resistencia del conductor está referida a 20°C.
- Los controles para limitar la corriente del rectificador no son eficaces.
- Los diodos para la parte de desacoplamiento no se consideran.
- La batería está cargada completamente.
- Los efectos debidos a la limitación de la corriente por fusibles u otros dispositivos de protección son tomados en cuenta.

Para el cálculo de la corriente de corto circuito mínima:

- La resistencia del conductor está referida a la temperatura máxima.
- Se toma en cuenta la resistencia de empalmes.
- La contribución del rectificador es el valor de su corriente de corto circuito.
- El voltaje de la batería es el especificado por el fabricante.
- Cualquier diodo en la parte de desacoplamiento se toma en cuenta.
- Los efectos debidos a la limitación de corriente por fusibles u otros dispositivos de protección son tomados en cuenta.

### II.2.2. Métodos de Matriz

Los métodos de matriz contrastan con las técnicas de superposición. En un ejemplo de cálculo proporcionado en *GE Industrial Power System Data Book. Schenectady, NY, 1987*, tres fuentes de corriente: un generador, un rectificador y una batería están conectadas en paralelo. Las inductancias y resistencias de los componentes del sistema se calculan y se construyen las redes de resistencias e inductancias de forma similar que con el método proporcionado por el estándar ANSI / IEEE para el cálculo de la corriente de corto circuito en sistemas de CA. Éstas redes se reducen a una sola resistencia e inductancia para después obtener la corriente de corto circuito máxima, simplemente dividiendo el voltaje entre la resistencia equivalente y el valor de la pendiente esta dado por la constante de tiempo equivalente la cual es igual a la razón de la inductancia equivalente sobre la resistencia. Este procedimiento asume que todas las fuentes tienen el mismo voltaje. Cuando los voltajes de las fuentes difieren, se puede calcular la corriente parcial de cada fuente y sumarlas. Para el cálculo de las corrientes de un rectificador se necesita un procedimiento iterativo ya que se necesita calcular la resistencia que se usará en el circuito equivalente de Thévenin para cierto nivel de voltaje terminal durante una falla.

### II.3. Corto circuito de una batería de plomo ácido.

El modelo del corto circuito de la batería se muestra en la figura 2-1;  $R_B$  es la resistencia interna de la batería,  $E_B$  es el voltaje interno,  $R_C$  es la resistencia de los conectores de celda,  $L_{CC}$  es la inductancia del circuito de la celda en H (*Henries*), y  $L_{BC}$  es la inductancia de las celdas de la batería consideradas como un bus. La inductancia interna de la propia celda es cero.

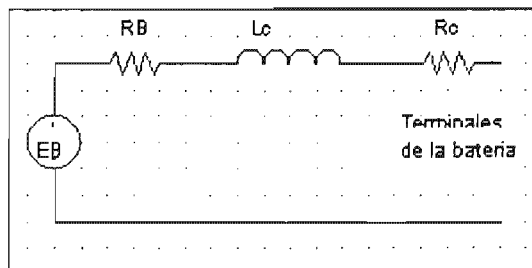


Fig. 2-1 Modelo de corto circuito de la batería

A continuación se presenta un ejemplo para el cálculo de los parámetros del modelo de corto circuito de la batería usando varios métodos.

Aunque no existe un estándar de ANSI / IEEE para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD, en el estándar 946 de IEEE<sup>5</sup> se presenta un método para el cálculo de los parámetros de una batería

<sup>5</sup> IEEE. DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations, 1992. Standard 946.

MÉTODO IEEE: De acuerdo a éste método la resistencia interna de una celda es calculada a partir de los volts línea iniciales. La figura 2-2 muestra una curva característica de descarga para 200 Ah, 17 placas totales por celda.

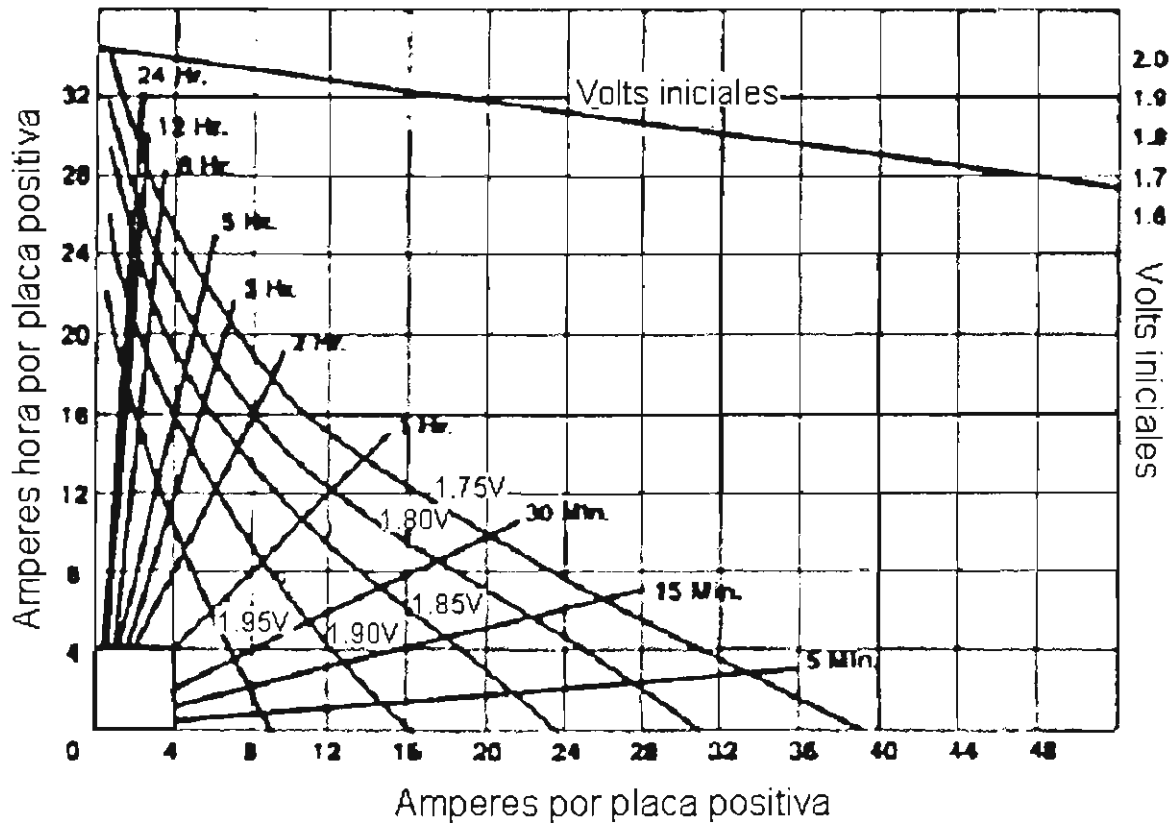


Fig. 2-2. Curva de descarga para una celda típica de plomo ácido.

$$R_{cel} = \frac{R_p}{N_p} \tag{2.1}$$

donde:

- R<sub>cel</sub> = Resistencia interna total de la celda, Ω;
- R<sub>p</sub> = Resistencia por placa positiva, Ω;
- N<sub>p</sub> = Número de placas positivas;

Y

$$R_p = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \Omega \cdot \text{placa positiva} \tag{2.2}$$



**Ejemplo 2.1:**

Para este ejemplo, si consideramos dos valores cualesquiera de voltaje y corriente a lo largo de la línea:

$$V_1 = 1.90 \text{ V};$$

$$I_1 = 16 \text{ A / placa positiva};$$

$$V_2 = 1.70 \text{ V};$$

$$I_2 = 47 \text{ A / placa positiva}.$$

Entonces por (2.2)

$$R_p = \frac{1.9 - 1.70}{47 - 16} = 0.00645 \text{ } \Omega \bullet \text{ placa positiva}$$

Y dado que se tiene::

1) 17 placas totales (8 placas positivas / celda);

2) 60 celdas y 2.00 V<sub>pc</sub>;

Entonces la resistencia de una celda es:

$$R_{cel} = \frac{R_p}{N_p} = \frac{0.00645}{8} = 0.000806 \Omega$$

Multiplicando éste valor por el número total de celdas se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} R_B &= R_{cel} \times \text{No. de celdas} & (2.3) \\ R_B &= 0.000806 \times 60 = 0.048 \Omega \end{aligned}$$

**MÉTODO GE:** De acuerdo al método usado por el estándar de General Eléctric, la resistencia interna de una batería puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$R_B = \frac{E_B}{100 \times I_{8h}} \Omega \quad (2.4)$$

donde

$E_B$  : voltaje de la celda X No. de celdas

$I_{8h}$  : Amperes de la batería en 8 horas

**Ejemplo 2.2.** Dado que el voltaje de la celda es 2.00 Vpc; (Vpc = volts por celda).

$$E_B = 60 \times 2.00 \quad (2.5)$$

$$E_B = 120 \text{ V}.$$

De la figura 2-2 se observa que los 8 Ah; (Ah = Ampere hora) nominales ( $I_{8h}$ ) a 77°F y un voltaje de celda final de 1.75 Vpc resultan en 3.125 A por placa positiva.

Dado que la batería tiene 8 placas positivas por celda, esto corresponde a 25 A por celda (8 placas X 3.125 A).

Entonces

$$R_B = \frac{120}{100 \times 25} = 0.048\Omega$$

Lo cual concuerda con el valor calculado a través del método proporcionado por el estándar IEEE.

El siguiente paso es calcular la resistencia de los conectores de las celdas de la batería ( $R_c$ ) como se muestra a continuación:

Nota: Esto puede no ser siempre necesario ya que muchas curvas de descarga del fabricante incluyen caída de voltaje en el conector.

$R_{conector}$  = Resistencia del conector.

$R_c$  = Longitud total de los conectores de las celdas X  $R_{conector}$  (2.6)

Para ilustrar el cálculo de la resistencia de los conectores de las celdas se presenta el siguiente ejemplo:

*Ejemplo 2.3.*

- 1) Longitud total de los conectores de la celda ( $longitud_{cc}$ )

Si cada conector tiene una longitud de 0.5 ft y son 60 celdas entonces la longitud total es:

$$longitud_{cc} = 60 \times 0.5 \text{ ft} = 30 \text{ ft.} \quad (2.7)$$

- 2) El cable conector es de cobre calibre 2 AWG, el cual tiene una resistencia de  $0.162 \Omega / 1000 \text{ ft}$  a  $25^\circ \text{ C}$  (ver ejemplo 2.13)

Entonces

$$R_c = 30 \text{ ft} \times \frac{0.162\Omega}{1000 \text{ ft}} = 0.0049\Omega$$

La inductancia del circuito de la batería ( $L_c$ ) es igual a la inductancia del circuito de la celda ( $L_{cc}$ ) mas la inductancia de las celdas de la batería ( $L_{BC}$ ).

La inductancia del circuito de la celda ( $L_{cc}$ ) es determinada de la figura 2-3 y la fórmula [2-8]:

$$L_{cc} = 30.5 \times 10^{-9} \left( 2 \ln \frac{d}{r} + 0.5 \right) \text{ H / ft} \tag{2.8}$$

donde

d : distancia entre centros de conductores (pulgadas) = 30 pulgadas;  
 r : radio del conductor = 0.146 pulgadas (NEC 1993, cap. 9, tablas 8 y 9)

luego

$$L_{cc} = 30.5 \times 10^{-9} \left( 2 \ln \frac{30}{0.146} + 0.5 \right) = 0.340 \mu\text{H / ft}$$

De la figura 2-3, la longitud del circuito de la celda es resultado de multiplicar 3 hileras por 20 ft cada una:

3 hileras X 20 ft = 60 ft.

Entonces

$$L_{cc} = 0.340 \frac{\mu\text{H}}{\text{ft}} \times 60 \text{ ft} = 20.4 \mu\text{H} \tag{2.9}$$

La inductancia de las celdas de la batería ( $L_{bc}$ ) se puede determinar tratando cada serie de celdas como un bus y obteniendo la inductancia basada en las dimensiones de la batería y el espaciamiento entre cada serie de celdas de la figura 2-4.

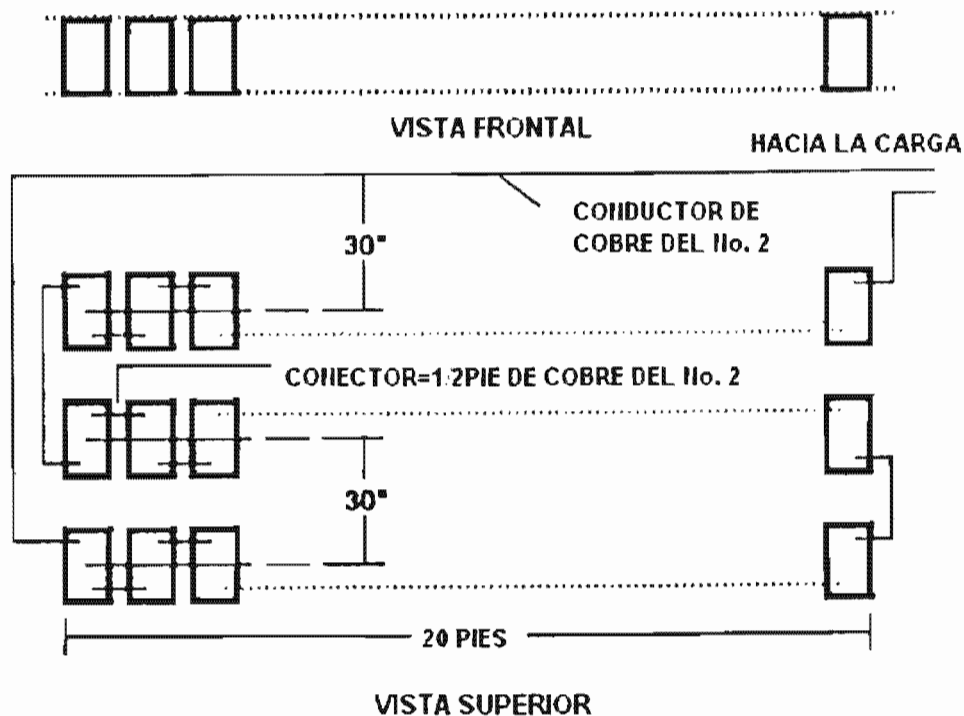


Fig. 2-3. Instalación típica de una batería de 60 celdas dispuestas en 3 hileras.

**Ejemplo 3.4:** Dada la figura 2-3, las dimensiones de la batería son:

- a : Ancho de la batería = 10 pulgadas;
- b : Altura de la batería = 10 pulgadas;
- c : distancia entre centros de series de celdas = 30 pulgadas.

Los parámetros requeridos de la figura 2-4 son los siguientes:

$$a / b = 10 / 10 = 1.0 \quad (2.10)$$

$$s / (a+b) = 30 / (10+10) = 1.5 \quad (2.11)$$

De la figura 2-4 se observa que la reactancia ( $X_{bc}$ ) de la celda de la batería es 47.0  $\mu\Omega / ft$ .

Entonces

$$L = X_{bc} / 377 \quad (2.12)$$

$$L = 47.0 \times 10^{-6} / 377 = 0.125 \mu H / ft$$

$$L_{bc} = 0.125 \frac{\mu H}{ft} \times 60 ft = 7.5 \mu H$$

Los valores de inductancia de la celda de la batería obtenidos en las pruebas realizadas a las celdas de plomo ácido en un rango de 10 – 1600 Ah se presentan en la publicación de *E. Willihnganz, "Battery impedance: Farads, milliohms, microhenrys"*

Estos resultados indican que las inductancias de la batería son del orden de 0.1  $\mu H / celda$ .

Específicamente, los rangos de inductancia van de 0.07 a  $\approx 0.135 \mu H / celda$  para celdas de 10 – 300 Ah (una pila), y de  $\approx 0.135$  a  $\approx 0.145 \mu H / celda$  para celdas de 300 – 1600 Ah (doble pila).

Si consideramos 0.135  $\mu H / celda$  para el caso en el que se tienen 200 Ah, y una batería de 60 celdas, se obtiene:

$$L_{bc} = 0.135 \mu H / celda \times 60 celdas = 8.1 \mu H \quad (2.13)$$

Lo cual se aproxima al valor calculado usando el método propuesto por GE en la publicación "Short-circuit characteristics of lead-acid storage batteries" del GE Industrial Power Systems Data Book.

Entonces la inductancia del circuito de la batería ( $L_C$ ) es:

$$\begin{aligned} L_C &= L_{CC} + L_{bc} = 20.4 \mu H + 7.5 \mu H \\ L_C &= 27.9 \mu H \end{aligned} \quad (2.14)$$

El resultado del circuito equivalente de la batería se muestra en la figura 2-5.

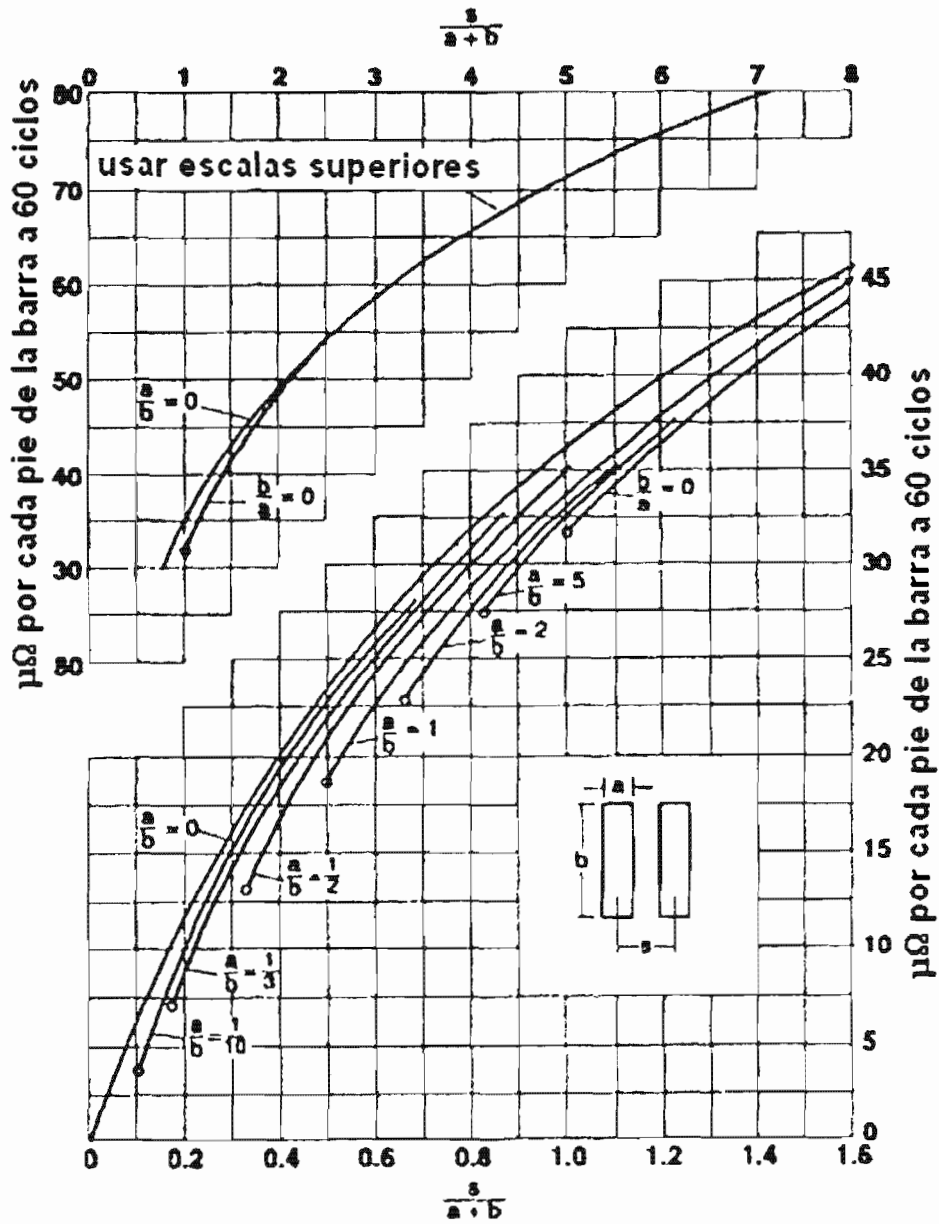


Fig. 2-4 Reactancia de la barra rectangular.

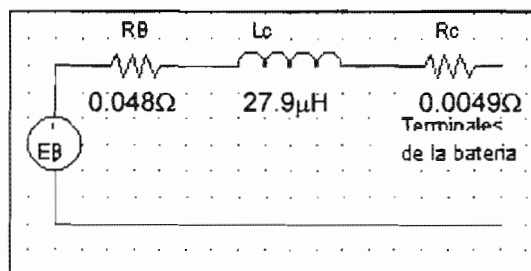


Fig. 2-5 Circuito equivalente de la batería para el ejemplo de cálculo.

Actualmente la mayoría de los cargadores de batería son alimentados con una corriente acotada que limita la cantidad de corriente de falla con la que el cargador puede contribuir al sistema. Generalmente se considera que el cargador no entregará más del 150% de su valor de salida nominal.

En el estándar 946 de IEEE afirma que para un sistema típico de CD, la corriente de corto circuito del cargador alcanza su valor máximo y decae antes de que el corto circuito de la batería alcance su valor pico. Debido a este tiempo de la batería, la corriente de corto circuito máxima coincidente puede ser calculada como la suma del corto circuito máximo de la batería y el valor de corriente límite del cargador.

A continuación se muestra un ejemplo para el cálculo de la corriente de corto circuito de una batería.

### *Ejemplo 2.5.*

Una batería de plomo ácido con 60 celdas y 120V tiene los siguientes datos: Batería = 200Ah, 8-h de descarga a 1.75V por celda. Cada celda tiene las siguientes dimensiones: altura = 7.9 pulgadas (200mm), longitud = 10.7 pulgadas (272mm) y ancho = 6.8 pulgadas (173mm). La batería tiene 30 celdas por hilera y la configuración se muestra en la figura 2-6. Los conectores de las celdas son de 250 KCMIL, diámetro = 0.575 pulgadas.

Calcule la corriente de corto circuito de la batería. Si la batería se conecta a través de un cable con aproximadamente 100 pies de longitud a un interruptor, la resistencia del cable es de  $5m\Omega$  y la inductancia de  $14\mu H$ . Calcule la corriente de corto circuito en las terminales del interruptor.

De acuerdo a la siguiente ecuación y considerando un voltaje de celda de 2V por celda, la resistencia de la batería es:

$$R_B = \frac{E_B}{100 \times I_{8h}} = \frac{120}{100 \times 200} = 6m\Omega$$

El fabricante proporciona la siguiente ecuación para calcular la resistencia de la batería:

$$R_B = \frac{31 \times E_B}{I_{8hr}} m\Omega \quad (2.15)$$

Sustituyendo los valores se obtiene un valor de  $18.6m\Omega$  para la resistencia de la batería. Se observa que este último valor es aproximadamente tres veces mayor que el obtenido con la ecuación 2.4 y se debe usar el valor obtenido con la fórmula proporcionada por el fabricante. De la figura 2-6 los conectores de la batería tienen una longitud total de 28 pies y calibre de 250 KCM.

De la hoja de datos del conductor se obtiene una resistencia de  $1.498\text{m}\Omega$  considerando una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . La resistencia total del circuito de la batería es:

$$R_B + R_C = 20.098\text{m}\Omega$$

Por lo tanto la corriente máxima de corto circuito es:

$$\frac{120}{20.098 \times 10^{-3}} = 5970\text{A}$$

La inductancia  $L_C$  del circuito de la batería es la suma de la inductancia del circuito de la celda  $L_{CC}$  mas la inductancia de las celdas de la batería  $L_{CB}$ . La inductancia de dos conductores de radio  $r$  separados una distancia  $d$ , está dada por la expresión:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left( 0.25 + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (2.16)$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ . De la figura 2-6 la distancia  $d = 24$  pulgadas y  $r$  que es el radio de un conductor de 250 KCM es  $r = 0.2875$  pulgadas. Sustituyendo los valores en la ecuación anterior, la inductancia es de  $1.87 \mu\text{H}/\text{m}$ . Por lo tanto, para una longitud de 18 pies, la inductancia  $L_{CC}$  es:  $L_{CC} = 10.25 \mu\text{H}$ .

La inductancia de las celdas de la batería se puede determinar considerando cada hilera de celdas como un bus. De ésta manera, las dos hileras de celdas son equivalentes a dos buses en paralelo separadas una distancia  $d = 24$  pulgadas, la altura del bus es  $h =$  altura de la celda  $= 7.95$  pulgadas y el ancho de los buses es  $w =$  ancho de la celda  $= 6.8$  pulgadas.

La expresión para la inductancia de buses en esta configuración es la siguiente:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left( \frac{3}{2} + \ln \frac{d}{h+w} \right) \quad (2.17)$$

Se obtiene la inductancia en H por metro. Para 18 pies, se obtiene una inductancia  $L_{BC} = 4.36 \mu\text{H}$ . La inductancia total es  $14.61 \mu\text{H}$ . El valor inicial de la pendiente de la corriente de corto circuito está dado por:

$$\frac{E_B}{L_C} = \frac{120}{14.61 \times 10^{-6}} = 8.21 \times 10^6 \text{ A/s}$$

La constante de tiempo es la relación de la inductancia total entre la resistencia total del circuito de la batería:

$$\frac{L_C}{R_B + R_C} = \frac{14.61 \times 10^{-6}}{20.01 \times 10^{-3}} = 0.73 \text{ms}$$

La corriente alcanza  $0.63 \times 5970 = 3761 \text{A}$  en  $0.73 \text{ms}$  y en  $1.46 \text{ms}$  se tendrá una corriente de  $0.87 \times 5970 = 5194 \text{A}$ .

La resistencia e inductancia del cable se puede agregar a los valores calculados anteriormente, y entonces la resistencia total sería de  $25.01 \text{m}\Omega$  y la inductancia total de  $28.61 \mu\text{H}$ .

La corriente máxima de corto circuito es entonces,  $4798 \text{A}$  y la constante de tiempo cambia a  $1.14 \text{ms}$ .

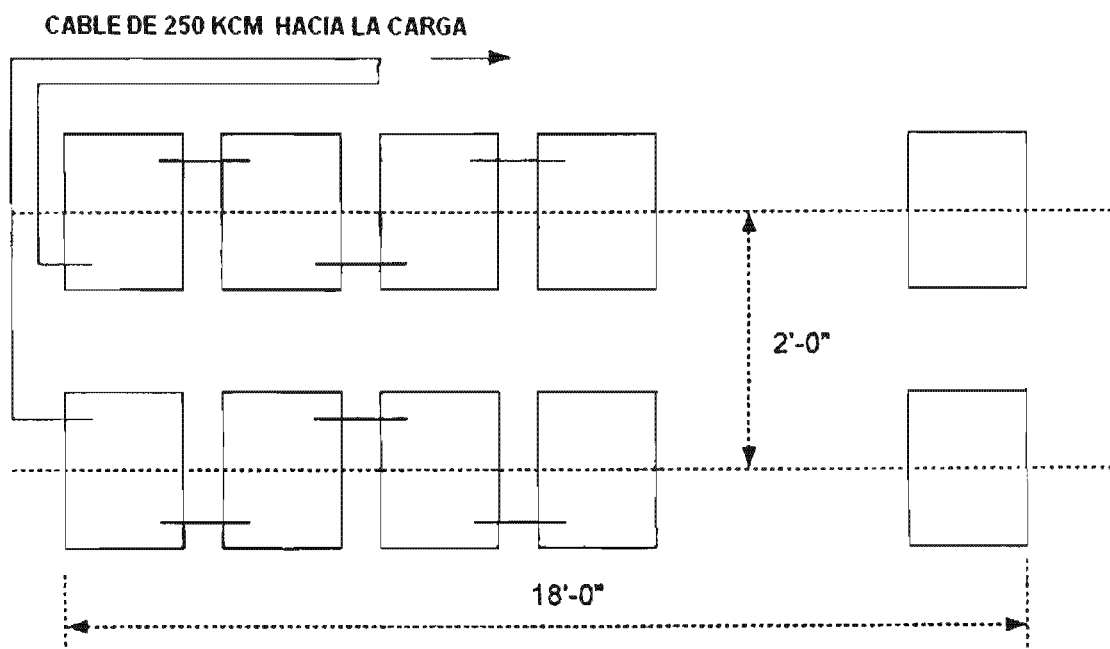


Fig. 2-6. Esquema para el cálculo de la corriente de corto circuito (Ejemplo 2.5 y 2.6)

## CÁLCULO IEC

Para calcular la corriente máxima de corto circuito o la corriente pico de acuerdo al método proporcionado por IEC, la resistencia de la batería  $R_B$  se multiplica por un factor de 0.9, esto se hace para tener un margen de seguridad ya que al hacerlo, la resistencia obtenida es menor y la corriente de corto circuito, mayor. Las demás resistencias del circuito equivalente no cambian. Además, si el voltaje en circuito abierto de la batería se desconoce, entonces se usa  $E_B = 1.05V_{NB}$  donde  $V_{NB} = 2.0 \text{V/celda}$  para baterías de plomo ácido. La corriente pico está dada por:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (2.18)$$



Donde  $i_{pB}$  es la corriente pico de corto circuito de la batería y  $R_{BBr}$  es la resistencia equivalente total del circuito de la batería con  $R_B$  multiplicado por el factor 0.9. El tiempo para pico (tiempo en que ocurre el valor pico de la corriente) y el tiempo de ascenso (tiempo para pasar del 0.1 al 0.9 del valor final) se obtiene de las curvas que aparecen en la figura 2-7 donde se necesita el valor  $1/\delta$  que se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \tag{2.19}$$

La constante de tiempo  $T_B$  es igual a 30ms y  $L_{BBr}$  es la inductancia total equivalente en el punto de falla en el circuito de la batería. La constante de tiempo de descenso (tiempo para que el sistema alcance y permanezca en una banda del 2% alrededor del valor final)  $\tau_{2B}$  se considera como 100ms. La corriente de corto circuito del estado casi estable está dada por:

$$I_{kB} = \frac{0.95E_B}{R_{BBr} + 0.1R_B} \tag{2.20}$$

Esta expresión considera que el voltaje de la batería cae y la resistencia interna de la celda crece después de suceder el corto circuito. Se debe notar que todas las ecuaciones de IEC están en unidades MKS.

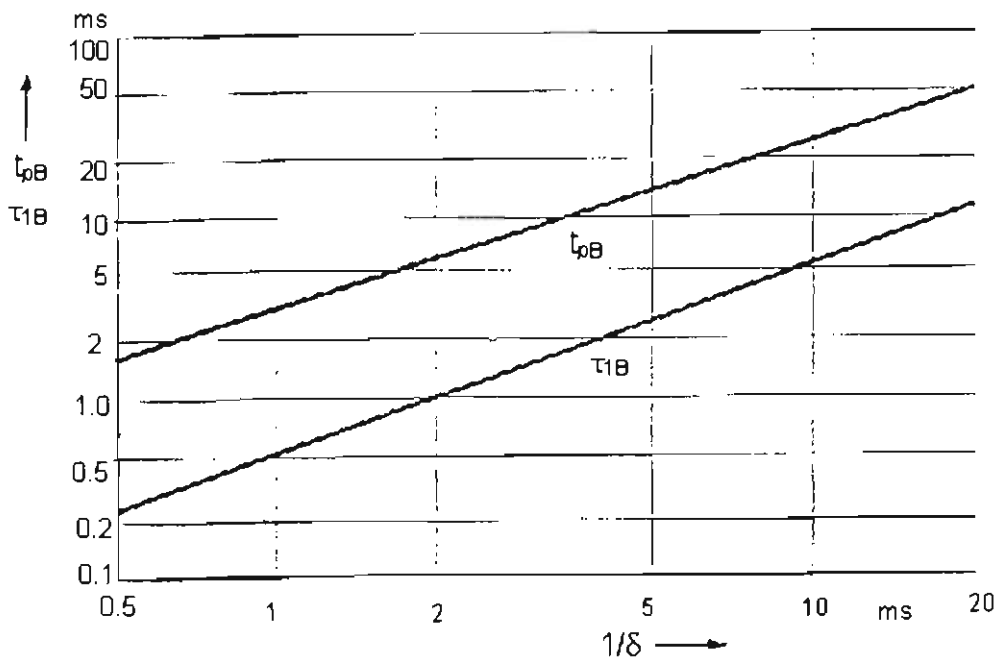


Fig. 2-7. Tiempo para pico  $t_{pB}$ <sup>6</sup> y constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1B}$  para el corto circuito de una batería.

<sup>6</sup> El tiempo para pico  $t_{pB}$  es el tiempo en el que ocurre el valor pico o máximo de corriente, en éste caso, de la batería.

A continuación se muestra un ejemplo para el cálculo de la corriente de corto circuito usando el método proporcionado por IEC.

### Ejemplo 2.6

Calcule la corriente de corto circuito de la batería del ejemplo 2.5 por el método IEC. La resistencia total en el circuito de la batería, sin cable externo, es:

$$0.9 \times 18.6 + 1.498 = 18.238\text{m}\Omega$$

El voltaje de la batería de 120V multiplicado por el factor 1.05. Entonces, la corriente pico de corto circuito es:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{1.05 \times 120}{18.238 \times 10^{-3}} = 6908.6\text{A}$$

Éste valor es 15.7% mayor que el obtenido en el ejemplo anterior.

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{18.23 \times 10^{-3}}{14.61 \times 10^{-6}} + \frac{1}{30 \times 10^{-3}}} = 1.56\text{ms}$$

De la figura 2-7, el tiempo para pico es 4.3ms y la constante del tiempo de ascenso es 0.75ms. La corriente de corto circuito del estado casi estable es:

$$I_{kB} = \frac{0.95 \times 126 \times 10^3}{18.238 + 0.1(18.6)} = 5956\text{A}$$

El cálculo con cable externo se realiza de manera similar. La resistencia del cable es 5mΩ y la inductancia es 14μH. Por lo tanto,  $R_{BBr} = (0.9)(18.6) + 1.498 + 5 = 23.24\text{m}\Omega$ . Usando un valor de resistencia de  $R_{BBr} = 23.24$ , se obtiene una corriente pico o corriente máxima de 5422 A;  $1/\delta = 2.4\text{ms}$  y el tiempo a pico es 7ms. La constante del tiempo de ascenso es 1.3ms y la corriente de corto circuito del estado casi estable es de 4796 A.

La gráfica de la corriente de corto circuito se muestra en la figura 2-8.

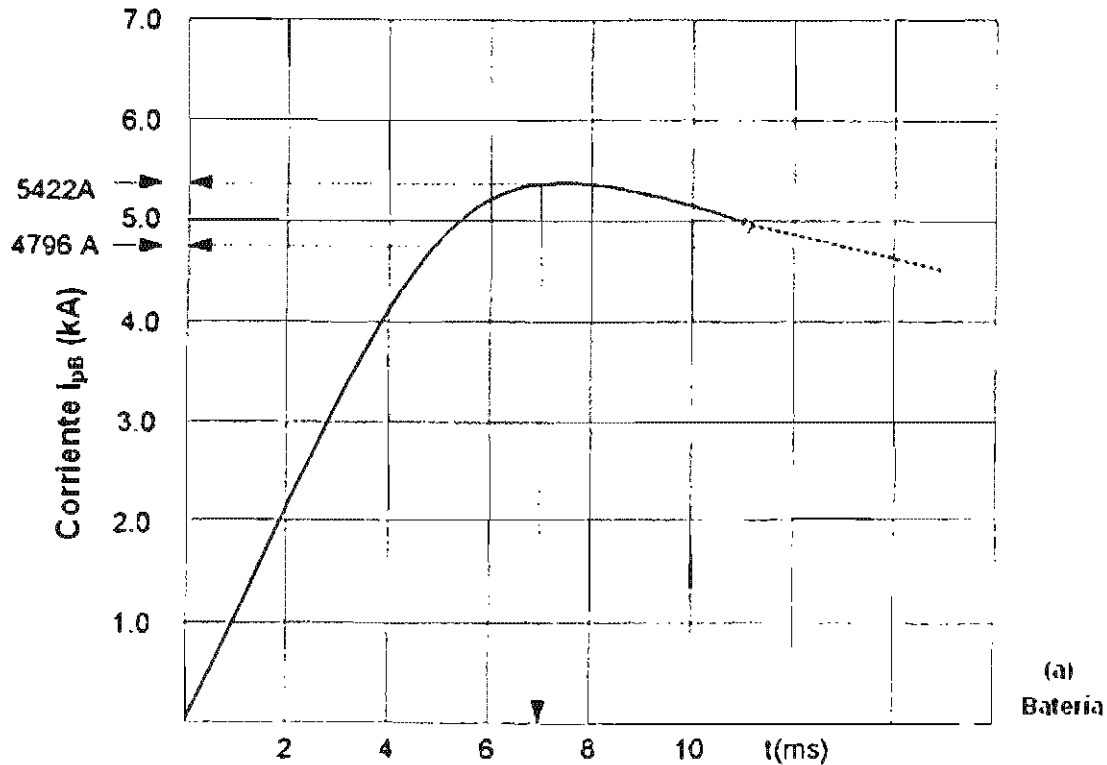


Fig. 2-8. Gráfica de la corriente de corto circuito de la batería en función del tiempo

#### II.4. Generadores y motores de CD.

Una expresión para el corto circuito de generadores y motores de corriente directa es:

$$i_a = \frac{e_0}{r_d'} (1 - e^{-\sigma_a t}) - \left( \frac{e_0}{r_d'} - \frac{e_0}{r_d} \right) (1 - e^{-\sigma_f t}) \quad (2.21)$$

Donde:

$i_a$  = corriente en por unidad.

$e_0$  = fem interna antes de que ocurra el corto circuito en por unidad.

$r_d$  = resistencia efectiva de estado estable de la máquina en por unidad.

$r_d'$  = resistencia efectiva transitoria de la máquina en por unidad.

$\sigma_a$  = factor de decremento del circuito de la armadura.

$\sigma_f$  = factor de decremento del circuito del campo.

La primera parte de la ecuación tiene una constante de tiempo de la armadura, la cual es relativamente pequeña y controla el aumento gradual y el pico de la

corriente de corto circuito, la segunda parte se determina por la excitación del campo y controla el decremento del valor pico de la corriente.

El problema del cálculo es que las constantes de tiempo en ésta ecuación no son invariantes en el tiempo. La saturación ocasiona que el factor de decremento del circuito de la armadura se incremente conforme el motor se satura. Los valores aproximados para tener condiciones de saturación son 1.5-3.0 veces el valor sin saturación y por lo general se usa el valor de 3.0. El valor sin saturación se aplica al inicio de la corriente de corto circuito mientras que el valor de saturación se aplica a la corriente máxima. Entre estos dos valores extremos el decremento está cambiando de un valor a otro.

La figura 2-9 muestra la curva aproximada de la corriente de corto circuito así como su circuito equivalente. Para los dos primeros tercios de la curva el circuito se representa por una inductancia de la máquina sin saturación  $L_a'$  y para el último tercio,  $L_a'$  se reduce a un tercio de su valor con una resistencia transitoria en serie. La corriente pico de corto circuito en por unidad está dada por:

$$i_a' = \frac{e_0}{r_d'} \quad (2.22)$$

La resistencia interna efectiva es:

$$r_d' = r_w + r_b' + r_x' \quad (2.23)$$

Donde  $r_w$  es la resistencia total de los embobinados en el circuito de la armadura,  $r_x'$  es el equivalente a la reducción del flujo en por unidad y  $r_b'$  es la resistencia transitoria igual al voltaje de reactancia y la resistencia de contacto de las escobillas en por unidad. La reducción del flujo y la distorsión se consideran como resistencias en ohms. Los valores de la resistencia transitoria  $r_d'$  en por unidad están dados gráficamente en función de los datos de la máquina, el voltaje y la velocidad.

La resistencia transitoria no es constante y existe un rango de variación. También la carga conectada a la máquina puede influir en la resistencia transitoria. De manera similar, la resistencia de estado estable se define como:

$$r_d = r_w + r_b + r_x \quad (2.24)$$

Donde  $r_b$  es la resistencia de estado estable equivalente al voltaje de la reactancia y a la resistencia de contacto de las escobillas en por unidad, y  $r_x$  es la resistencia de estado estable equivalente a la reducción del flujo en por unidad.

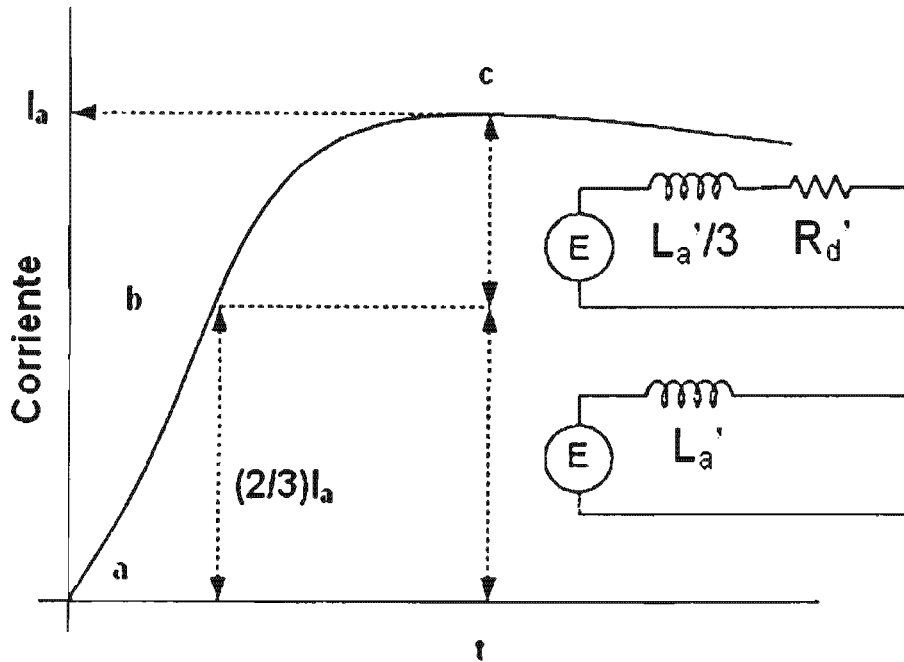


Fig. 2-9. Curva de la corriente de corto circuito contra tiempo para un motor o generador de CD y dos constantes de tiempo distintas.

El valor máximo de la pendiente de la corriente depende de la inductancia de la armadura sin saturación. La inductancia unitaria se define como:

$$L_{a1} = \frac{V_1}{I_a} \frac{2 \times 60}{2\pi P N_1} \tag{2.25}$$

La inductancia en por unidad es la inductancia de la máquina  $L_a'$  dividida por la inductancia unitaria:

$$C_x = \frac{L_a'}{L_{a1}} = \frac{P N_1 L_a' I_a}{19.1 V_1} \tag{2.26}$$

Despejando  $L_a'$  se obtiene:

$$L_a' = \frac{19.1 C_x V_1}{P N_1 I_a} \tag{2.27}$$

Donde:

$P$  = número de polos.

$N_1$  = velocidad.

$V_1$  = voltaje nominal.

$I_a$  = corriente nominal de la máquina.

$C_x$  = varía de acuerdo al tipo de máquina.

La gráfica de inductancia inicial contra inductancia unitaria muestra una relación lineal para ciertos grupos de máquinas. Para éste propósito, las máquinas están divididas en cuatro categorías:

Motores:  $C_x = 0.4$  para motores sin polos sombreados

Motores:  $C_x = 0.1$  para motores con polos sombreados

Generadores:  $C_x = 0.6$  para generadores sin polos sombreados

Generadores:  $C_x = 0.2$  para generadores con polos sombreados

El factor de decremento del circuito de la armadura es:

$$\sigma_a = \frac{r_d' 2\pi f}{C_x} \quad (2.28)$$

Donde  $C_x$  es la inductancia en por unidad de la máquina,  $r_d'$  es la resistencia transitoria en por unidad y  $f$  es la frecuencia.

El máximo valor para la pendiente de la corriente en amperes por segundo está dado por:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_1 e_0}{L_a'} \quad (2.29)$$

El valor de la pendiente de la corriente se puede expresar también en términos de la corriente en por unidad.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{PN_1 e_0}{19.1 C_x} \quad (2.30)$$

En las ecuaciones 2.29 y 2.30  $e_0$  se puede tomar como unitario sin tener un error apreciable. De forma más exacta,  $e_0$  se puede considerar como 0.97 en por unidad para motores y 1.03 pu para generadores. La inductancia  $L_a'$  se puede obtener de forma gráfica y en tablas. La figura (2-10) muestra los valores de  $L_a'$  en  $mH$  para ciertos tamaños de motores sin polos sombreados.

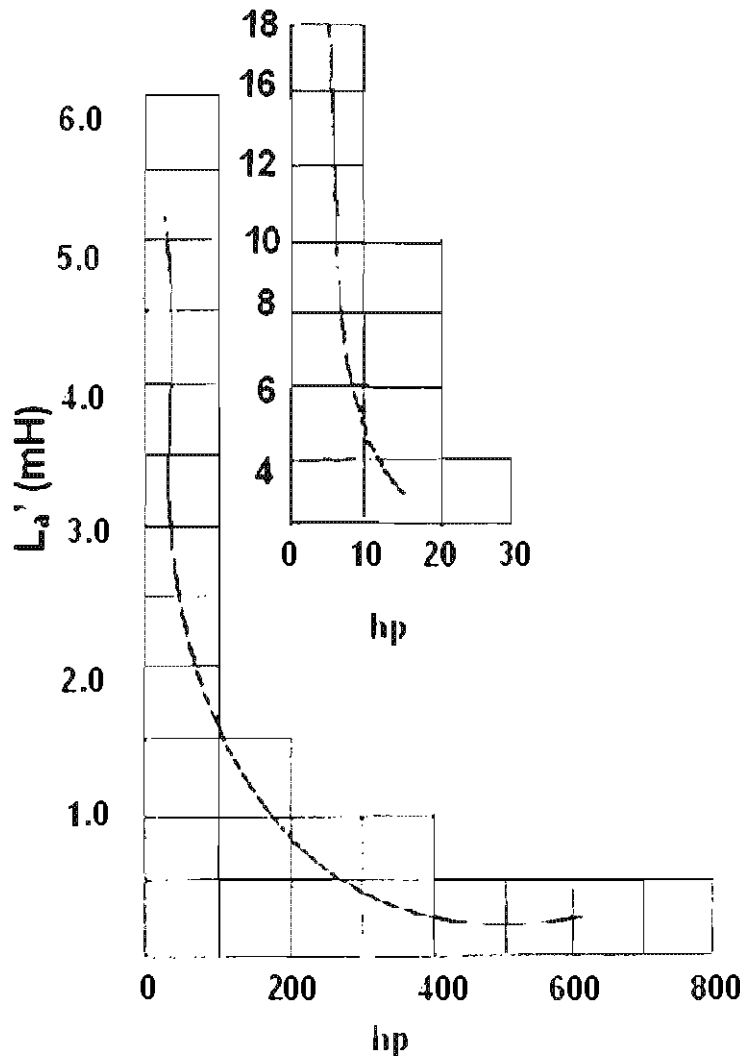


Fig. 2-10. Inductancia de motores de CD en unidades de  $mH$  (mili Henries) como función de los hp del motor.

Se realizara un ejemplo para ilustrar el cálculo de la corriente de corto circuito de un motor con ciertas características.

*Ejemplo 2.7*

Calcule la corriente de corto circuito de un motor de 230-V, 15-hp, 1150-rpm, para un corto circuito en las terminales del motor. La corriente de armadura de motor es de 541 A.

De tablas se obtiene que la resistencia transitoria es 0.068 p.u. y de la gráfica de la figura 2-10 la inductancia  $L_a'$  es 1.0mH.

Entonces la corriente pico de corto circuito es:

$$I_a' = \frac{I_a}{r_d'} = \frac{541}{0.068} = 7956A$$

y el valor inicial de la pendiente de la corriente es:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_1}{L_a'} = \frac{230}{1 \times 10^{-3}} = 230 \text{ kA/s}$$

Como se muestra en la figura 2-9, la constante de tiempo cambia al punto b.

$$\frac{L_a'}{3r_d'}$$

Los ohms base son  $V_a / I_a = 230/541 = 0.425$ . Por lo tanto  $r_d'$  en ohms es  $(0.425) \times (0.068) = 0.0289 \Omega$ . Con estos valores se obtiene una constante de tiempo de 11.52ms.

La red de resistencias e inductancias del corto circuito de una máquina de CD se muestra en la figura (2-11). La resistencia e inductancia equivalentes son:

$$\begin{aligned} R_{MB} &= R_M + R_{ML} + R_y \\ L_{MB} &= L_M + L_{ML} + L_y \end{aligned} \quad (2.31)$$

Donde  $R_M$ , y  $L_M$  son la resistencia e inductancia del circuito de la armadura incluyendo las escobillas,  $R_{ML}$ , y  $L_{ML}$  son la resistencia e inductancia del conductor del circuito del motor, y  $R_y$  y  $L_y$  son la resistencia e inductancia de la rama común. La constante de tiempo del circuito de la armadura hasta la localización del corto circuito,  $\tau_M$  está dada por:

$$\tau_M = \frac{L_{MB}}{R_{MB}} \quad (2.32)$$

La corriente de corto circuito del estado casi estable está dada por:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{0F}} \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MB}} I(k_M = 0, \text{ cuando } n \rightarrow 0) \quad (2.33)$$

Donde:

$L_F$  = inductancia con saturación del circuito de campo bajo condiciones de corto circuito.

$L_{0F}$  = inductancia sin saturación del circuito de campo sin carga.

$U_{rM}$  = voltaje nominal del motor.

$I_{rM}$  = corriente nominal del motor.

$n$  = velocidad a la que el motor esta trabajando

$n_n$  = velocidad nominal del motor



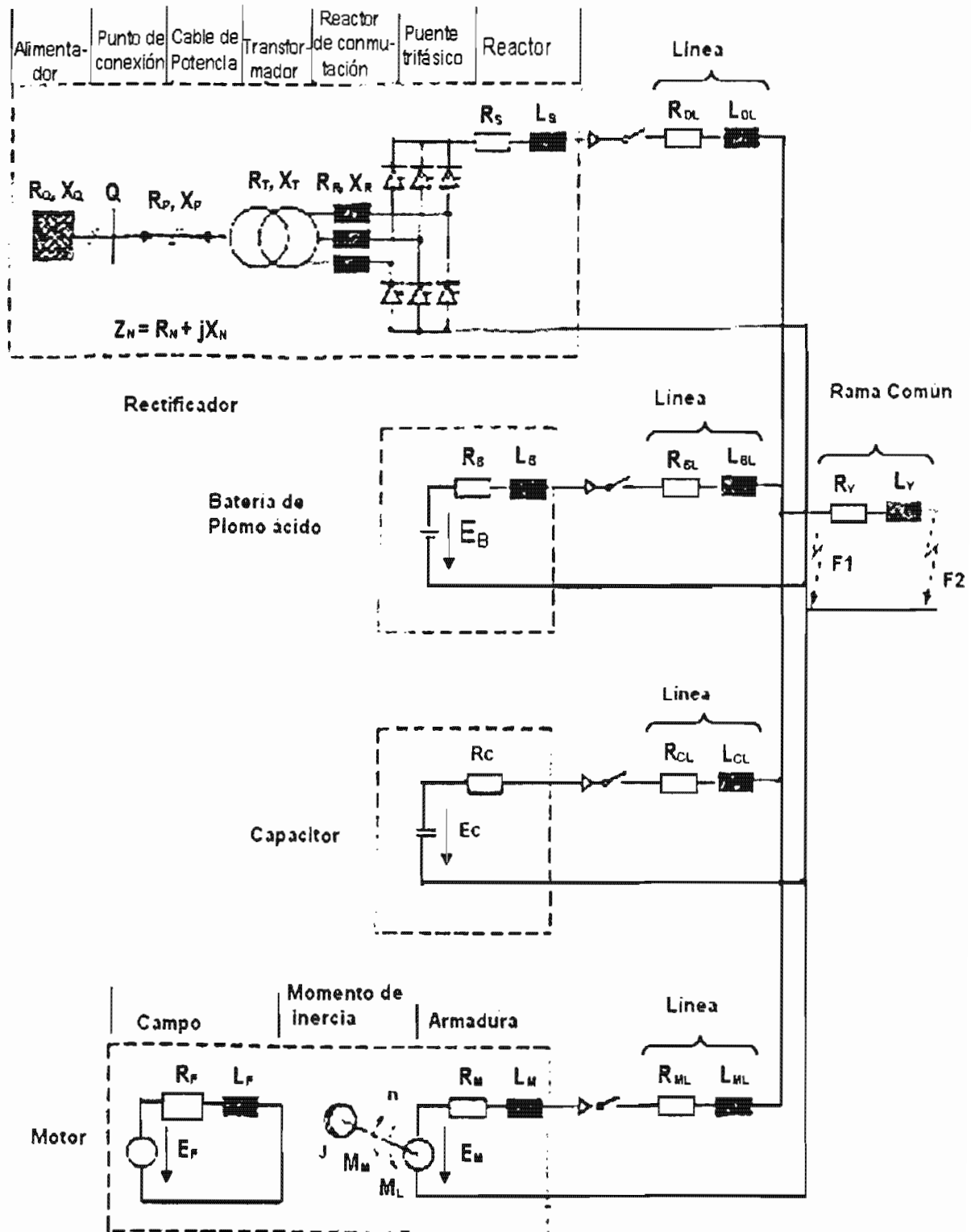


Fig. 2-11. Sistema de distribución de CD.

La corriente pico de corto circuito del motor está dada por:

$$i_{pM} = k_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MB}} \quad (2.34)$$

A velocidad normal o velocidad decreciente con  $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ , el factor  $k_M = 1$ , donde  $\tau_{mec}$  es la constante de tiempo mecánica y está dada por:

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi J n_0 R_{MB} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \quad (2.35)$$

Donde:

$J$ : Momento de inercia

$M_r$ : Torque nominal del motor

La constante de tiempo del circuito de campo esta dada por la siguiente ecuación:

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} \quad (2.36)$$

Para  $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$  el tiempo a pico y la constante de tiempo están dados por:

$$\begin{aligned} t_{pM} &= k_{1M} \tau_M \\ \tau_{1M} &= k_{2M} \tau_M \end{aligned} \quad (2.37)$$

El factor  $k_{1M}$  y  $k_{2M}$  se obtienen de la figura 2-12 y éstos dependen de la relación  $\tau_F/\tau_M$  y  $L_F/L_{0F}$ . Para velocidad decreciente con  $\tau_{mec} \leq 10\tau_F$ , el factor  $k_M$  depende de  $1/\delta = 2\tau_M$  y  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left( 1 - \frac{I_{rM} R_M}{U_{rM}} \right) \quad (2.38)$$

Donde  $\omega_0$  es la frecuencia angular natural y  $\delta$  es el coeficiente de decremento;  $k_M$  se obtiene de las curvas del estándar 61660-1 de IEC.

Para velocidad decreciente con  $\tau_{mec} < 10\tau_F$ , el tiempo a pico (tiempo en el que ocurre el pico o valor máximo de la corriente)  $\tau_M$  se obtiene de la curva del estándar 61660-1 de IEC y la constante del tiempo de ascenso está dada por:

$$\tau_{1M} = k_{3M} \tau_M \quad (2.39)$$

donde el factor  $k_{3M}$  es de nuevo obtenido de las curvas del estándar 61660-1 de IEC.

**CONSTANTE DEL TIEMPO DE DESCENSO  $\tau_{2M}$**

Para la velocidad nominal o velocidad decreciente con  $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ :

Cuando:  $n = n_n = \text{constante}$

$$\tau_{2M} = \tau_F$$

Cuando:  $n \rightarrow 0$

$$\tau_{2M} = \frac{L_{0F}}{L_F} k_{4M} \tau_{mec} \tag{2.40}$$

Para velocidad decreciente con  $\tau_{mec} < 10\tau_F$ :

$$\tau_{2M} = k_{4M} \tau_{mec} \tag{2.41}$$

Donde  $k_{4M}$  es de nuevo obtenida de la curva del estándar de IEC. Por lo tanto, el método de cálculo proporcionado por IEC requiere datos completos del motor y el uso de varias gráficas proporcionadas en el estándar.

Las constantes de tiempo de ascenso y descenso están relacionadas a:

$$\tau_{mec} < 10\tau_F \text{ ó } \tau_{mec} \geq 10\tau_F.$$

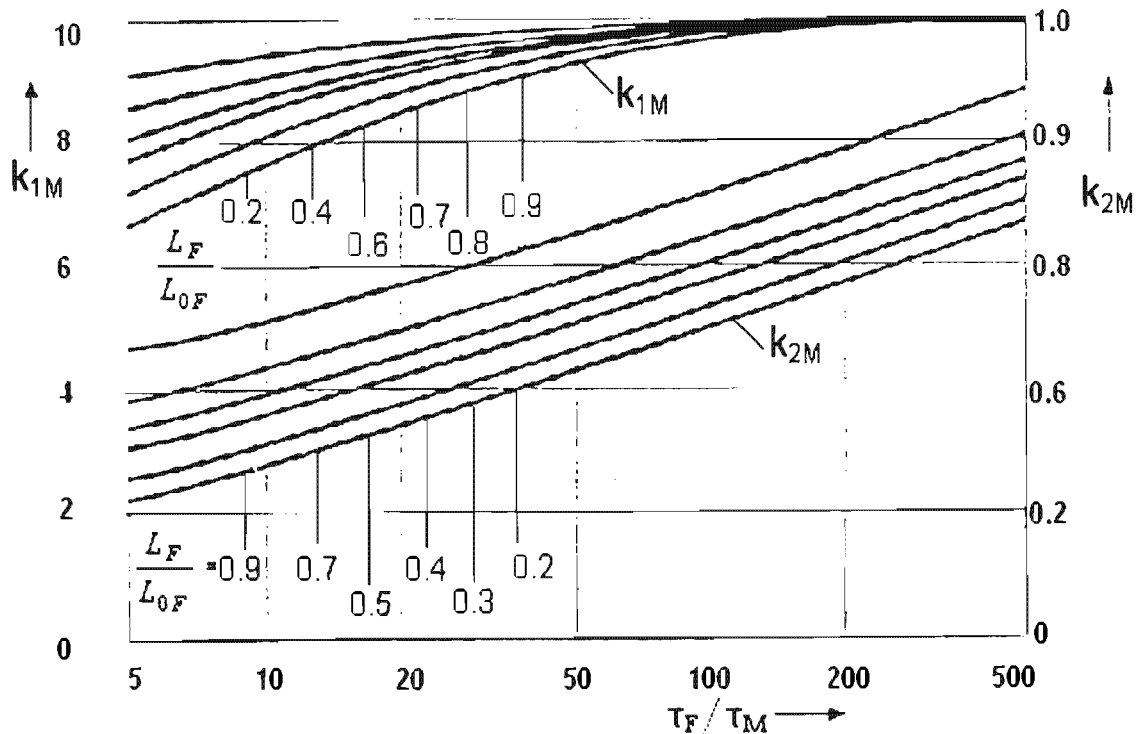


Fig. 2-12. Factores  $k_{1M}$  y  $k_{2M}$  para determinar el tiempo a pico  $t_{pM}$  y la constante del tiempo de ascenso  $\tau_1$  para velocidad normal y decreciente con  $\tau_{mec} \geq 10\tau_F$ ; que se necesitan para el cálculo del corto circuito de un motor de CD.

En el siguiente ejemplo se muestra el cálculo de la corriente de corto circuito de un motor de CD.

### Ejemplo 2.8

Calcule la corriente de corto circuito para una falla terminal en un motor de 115-V, 1150-rpm, seis polos y 15-hp. La corriente de armadura es 106 A, la resistencia del circuito de armadura y de las escobillas es  $0.1\Omega$ , y la inductancia en el circuito de la armadura es 8mH;  $\tau_F = 0.8\text{s}$ ,  $\tau_{mec} > 10\tau_F$ ,  $L_{0F}/L_F = 0.5$ , y  $\tau_{mec} = 20\text{s}$ .

En este caso no hay resistencia ni inductancia externa al circuito del motor por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (2.31)  $R_{MBr} = R_M = 0.10\Omega$ .

Y la constante de tiempo es:

$$\tau_M = \frac{L_M}{R_M} = \frac{8 \times 10^{-3}}{0.10} = 80\text{ms}$$

La corriente del estado casi estable de la ecuación (2.33) es:

$$0.5 \left( \frac{115 - (0.10)106}{0.10} \right) = 522\text{A}$$

De la ecuación (2.34) la corriente pico es 1044 A ya que  $\tau_{mec} > 10\tau_F$ , el factor  $k_M$  en la ecuación (2.34) es igual a uno. El tiempo a pico y la constante de tiempo están dados por la ecuación (3.37), de la figura (2-12) y para  $\tau_F/\tau_M = 10$  y  $L_F/L_{0F} = 0.5$ , el factor  $k_{1M} = 8.3$  y  $k_{2M} = 3.7$ . Por lo tanto, el tiempo a pico es 640ms y la constante de tiempo  $\tau_{1M} = 296\text{ms}$ .

La gráfica del corto circuito se muestra en la figura (2-13).

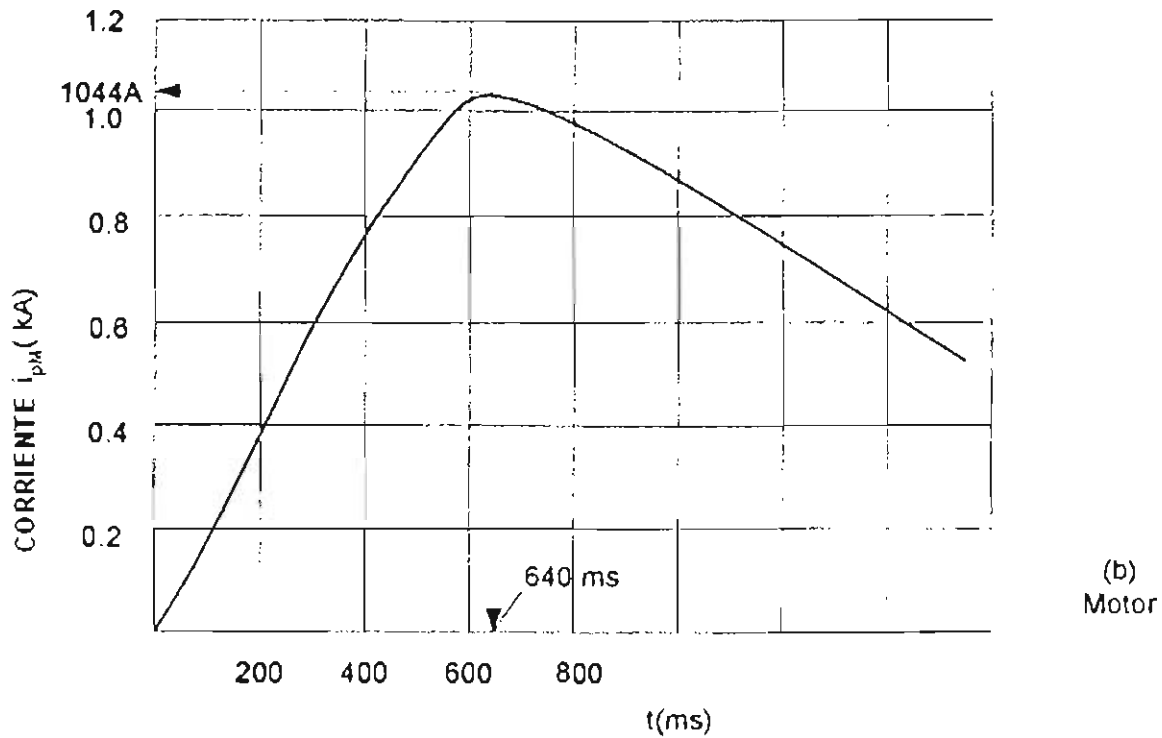


Fig. 2-13. Corriente de corto circuito contra tiempo del motor de CD del ejemplo 2.8.

**Ejemplo 2.9:**

Dados los siguientes parámetros de un motor:

Motor de 4 polos;  
 Velocidad constante (1900 r/min) ( $N_1$ );  
 3 hp;  
 115 V ( $V_1$ );  
 Corriente nominal de 22 A ( $I_a$ );  
 $R'_a$  0.175

La corriente máxima de corto circuito es:

$$I'a = \frac{I_a}{R'_a} = \frac{22}{0.175} = 126 \text{ A.}$$

El valor inicial de la pendiente es:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_1}{L'a}$$

donde

$$L'a = \frac{19.1 C_x V_1}{P N_1 I_a} = \frac{19.1 \times 0.4 \times 115}{4 \times 1900 \times 22} = 0.0053 \mu H.$$

Entonces

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{115}{0.0053} = 21700 A/s$$

## II.5. Corriente de corto circuito de un rectificador.

La curva típica para la corriente de corto circuito de un rectificador se muestra en la figura (2-14). La corriente máxima se alcanza en la primera mitad del ciclo después de que ocurre la falla. El pico en la mitad del ciclo es causado por el mismo fenómeno que origina un "offset"<sup>7</sup> en el cálculo de corto circuito de CA. La magnitud de éste pico depende de la razón de  $X/R$ , de la reactancia del sistema de CA, de la impedancia del transformador rectificador y de la resistencia y reactancia a través de la cual la corriente fluye en el sistema de CD.

Al agregar la resistencia o inductancia al sistema de CD y dependiendo de la magnitud de éstos componentes, se reduce el pico y puede ser completamente eliminado con un reactor de CD, como se muestra en la figura 1-1(a). La región A en la figura 2-14 cubre el valor inicial de la pendiente de la corriente, la corriente pico ocurre en la región B, y la región C abarca el tiempo de un ciclo después de que la corriente es interrumpida.

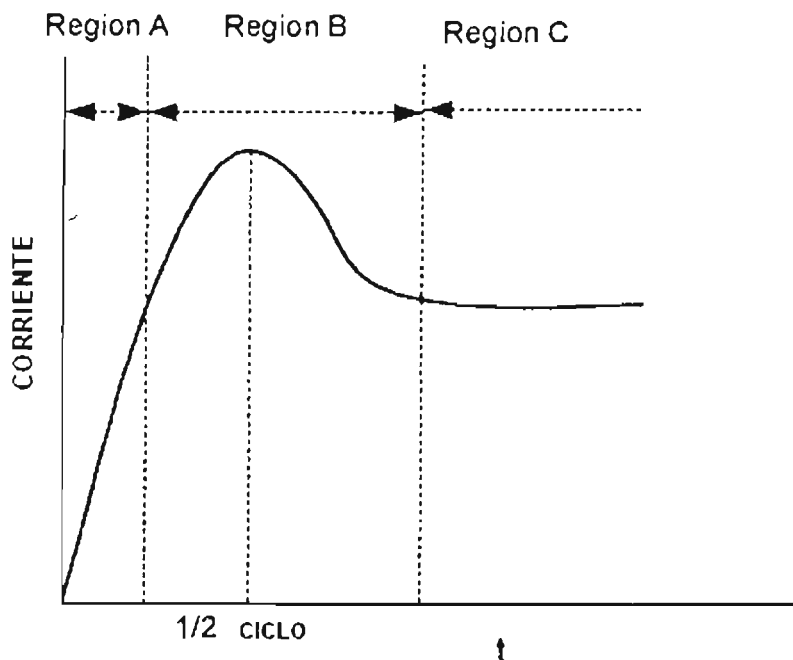


Fig. 2-14. Gráfica de la corriente de corto circuito de un rectificador

<sup>7</sup> Un offset es un nivel diferente de cero de CD.

El valor inicial de la pendiente de la corriente de corto circuito de CD para una falla, varía con la magnitud de la corriente de corto circuito. La adición de la inductancia al circuito de CD tiende a decrecer el valor de la pendiente.

Un circuito equivalente de la corriente de corto circuito de un rectificador se desarrolla con una fuente de voltaje y resistencia e inductancia equivalentes. La resistencia equivalente varía con el voltaje terminal del rectificador el cual está en función de la corriente de corto circuito. La resistencia equivalente se determina de la curva de regulación del rectificador a través de un proceso iterativo, el cual se puede programar con la ayuda de una computadora.

La inductancia equivalente se determina con una corriente de corto circuito para una falla y conociendo el voltaje del sistema.

La magnitud de la corriente pico se determina con las características de la impedancia de los sistemas de CA y CD.

Se puede usar el siguiente procedimiento:

Calcular la impedancia total del sistema de CA:

$$Z_C = R_C + X_C [\Omega]$$

Convertir a impedancia en por unidad  $z_C$ , a la cual puede se le denomina impedancia de conmutación en por unidad para los KVA base de un transformador rectificador, y ésta depende del tipo de circuito rectificador. Para un circuito "doble Y" y seis fases, la conversión está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_C = z_C \times 0.6 \times \frac{E_D}{I_D} [\Omega] \quad (2.42)$$

Asumir un valor de voltaje terminal del rectificador  $e_{da}$  bajo condiciones de falla y obtener el factor  $k_2$  de la figura 2-15.

El valor preliminar calculado de la corriente de corto circuito está dado por:

$$I_{da} = \frac{k_2}{z_C} I_D \quad (2.43)$$

Donde  $I_D$  es el valor nominal de la corriente de CD del rectificador. La resistencia equivalente del rectificador está dada por:

$$R_R = \frac{(E_D - E_{da})}{I_{da}} [\Omega] \quad (2.44)$$

Donde  $E_D$  es el voltaje nominal del rectificador en volts y  $E_{da}$  es el voltaje terminal del rectificador bajo condiciones de falla en volts.

El valor de la corriente de falla es:

$$I_{dc} = \frac{E_D}{R_R + R_D} [A] \quad (2.45)$$

Donde  $R_D$  es la resistencia exterior al circuito del rectificador. El voltaje terminal del rectificador en volts es:

$$E_{dc} = E_D - I_{dc} R_R \quad (2.46)$$

El valor de  $E_{da} = e_{da} \times E_D$  debe estar dentro del 10% del valor calculado de  $E_{dc}$  y es el voltaje terminal del rectificador bajo la corriente de corto circuito. El proceso iterativo se repite hasta alcanzar la tolerancia deseada.

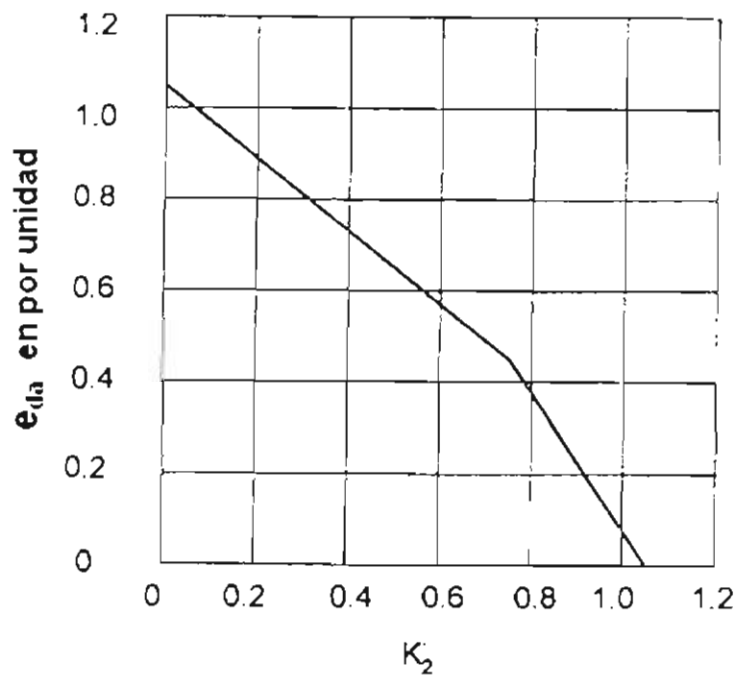


Fig. 2-15. Factor de la corriente de falla sostenida como función del voltaje terminal del rectificador

### Ejemplo 2.10

Considerar una fuente de CD, 100kW y 125-V. La resistencia del cable alimentador,  $R_D$  es  $0.004\Omega$ . La impedancia de la fuente de CA y el transformador rectificador es  $z_C = 0.05pu$  y  $I_D = 800$  A.

Calcule la resistencia del rectificador para una falla al final del cable.

Asuma que  $e_{da} = 0.5pu$ ,  $E_{da} = 62.5V$  y de la figura 2-15,  $k_2 = 0.63$ .



Por lo tanto:

$$I_{da} = \frac{k_2}{z_C} I_D = \frac{0.63}{0.05} \times 800 = 10080A$$

$$R_R = \frac{E_D - E_{da}}{I_{da}} = \frac{62.5}{10080} = 0.0062\Omega$$

$$I_{dc} = \frac{E_D}{R_R + R_D} = \frac{125}{0.0062 + 0.004} = 12255A$$

$$E_{dc} = 125 - (12255)(0.0062) = 75.98V$$

Se puede realizar una iteración mas para tener una estimación más aproximada de  $R_R$ :

$$E_{dc} = 76V$$

$$E_{da} = 49V$$

$$K = 0.77$$

$$I_{da} = 12320 A$$

$$R_R = 0.006169\Omega$$

$$I_{dc} = 12292.5 A$$

$$E_{dc} = 49.17V$$

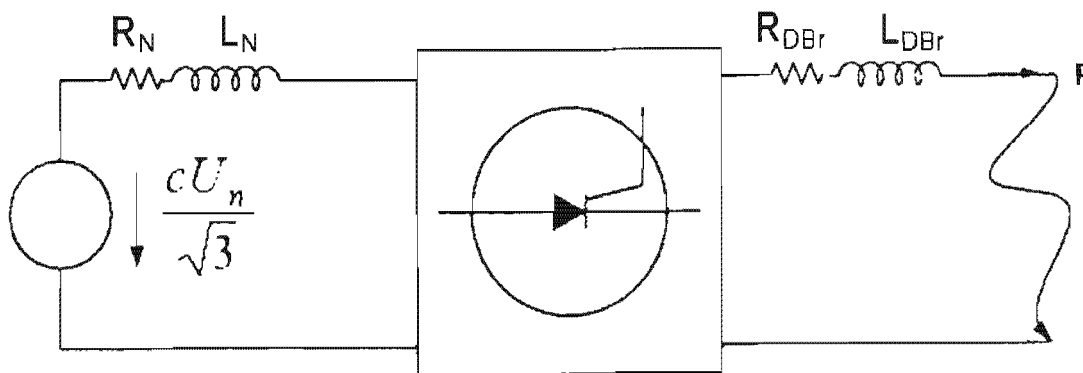


Fig. 2-16. Circuito equivalente para el cálculo de la corriente de corto circuito de un rectificador.

MÉTODO DE IEC.

El diagrama equivalente de corto circuito se muestra en la figura 2-16. La corriente máxima de corto circuito de CD está dada por la impedancia mínima  $Z_{Qmin}$ , la cual se obtiene de la corriente máxima de corto circuito del sistema de CA,  $I''_{kQmax}$ . La impedancia mínima se obtiene con la fórmula:

$$Z_{Q\min} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kQ\max}} \quad (2.47)$$

La corriente mínima de CD ocurre con  $Z_{Q\max}$  y ésta se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Z_{Q\max} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{kQ\min}} \quad (2.48)$$

En la figura 2-16 la resistencia e inductancia del lado de CA son:

$$\begin{aligned} R_N &= R_Q + R_p + R_T + R_R \\ X_N &= X_Q + X_p + X_T + X_R \end{aligned} \quad (2.49)$$

Donde  $R_Q$  y  $X_p$  son la resistencia y reactancia de corto circuito de la fuente de CA referida al secundario del transformador rectificador,  $R_p$  y  $X_p$  son la resistencia y reactancia de corto circuito del cable de suministro de potencia referidas al secundario del transformador,  $R_T$  y  $X_T$  son la resistencia y reactancia de corto circuito del transformador rectificador referidas al secundario del transformador, y  $R_R$  y  $X_R$  son la resistencia y reactancia del reactor de conmutación.

De manera similar, del lado de CD:

$$\begin{aligned} R_{DBr} &= R_S + R_{DL} + R_y \\ L_{DBr} &= L_S + L_{DL} + L_y \end{aligned} \quad (2.50)$$

Donde  $R_S$ ,  $R_{DL}$  y  $R_y$  son las resistencias del reactor de CD, del conductor en el circuito del rectificador, y de la rama común, respectivamente y  $L_S$ ,  $L_{DL}$  y  $L_y$  son las inductancias correspondientes. La corriente de corto circuito del estado casi estable es:

$$i_{kD} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad (2.51)$$

Donde  $Z_N$  es la impedancia del lado de CA de la red trifásica. El factor  $\lambda_D$  como función de  $R_N/X_N$  y  $R_{DBr}/R_N$  se obtiene de las curvas proporcionadas en el estándar 61660-1 de IEC. Alternativamente el factor  $\lambda_D$  está dado por la siguiente ecuación:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + (R_N / X_N)^2}{1 + (R_N / X_N)^2 (1 + 0.667(R_{DBr} / R_N))^2}} \quad (2.52)$$

La corriente pico de corto circuito está dada por:

$$i_{pD} = k_D I_{kD} \quad (2.53)$$

Donde el factor  $k_D$  depende de:

$$\frac{R_N}{X_N} \left[ 1 + \frac{2R_{DBr}}{3R_N} \right] \quad \text{y} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \quad (2.54)$$

y se obtiene de las curvas del estándar 61660-1 de IEC o a partir de la ecuación siguiente:

$$k_D = \frac{i_{pD}}{I_{kD}} = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \phi_D\right) \cot \phi_D} \sin \phi_D \left( \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \quad (2.55)$$

Donde:

$$\phi_D = \arctan \frac{1}{\frac{R_N}{X_N} \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \quad (2.56)$$

El tiempo a pico (tiempo en que ocurre el pico o valor máximo de la corriente)  $t_{pD}$ , cuando  $k_D \geq 1.05$ , está dado por:

$$t_{pD} = (3k_D + 6) [ms] ; \quad \text{Cuando} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1$$

$$t_{pD} = \left[ (3k_D + 6) + 4 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] [ms] ; \quad \text{Cuando} \quad L_{DBr} L_N > 1 \quad (2.57)$$

Si  $k_D < 1.05$ , la corriente máxima comparada con la corriente de corto circuito del estado casi estable es despreciable, y se usa  $t_{pD} = T_K$ .

La constante del tiempo de ascenso para 50Hz está dada por:

$$\tau_{1D} = \left[ 2 + (k_D - 0.9) \left( 2.5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] [ms] ; \quad \text{Cuando} \quad k_D \geq 1.05 \quad (2.58)$$

$$\tau_{1D} = \left[ 0.7 + \left[ 7 - \frac{R_N}{X_N} \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \left( 0.1 + 0.2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] [ms] ; \quad \text{Cuando} \quad k_D < 1.05$$

Por simplicidad se puede usar la siguiente aproximación:

$$\tau_{1D} = \frac{1}{3} t_{pD} \quad (2.59)$$

La constante del tiempo de descenso  $\tau_{2D}$  para una frecuencia de 50 Hz está dada por:

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \left( 0.6 + 0.9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} [ms] \quad (2.60)$$

Las constantes de tiempo para un sistema de potencia de 60Hz no se proporcionan en el estándar de IEC.

A continuación se presenta un ejemplo para el cálculo de la corriente de corto circuito de un rectificador trifásico.

#### Ejemplo 2.11

Un rectificador trifásico se conecta del lado de CA a un transformador trifásico de 480-120V, 100KVA,  $Z_T = 3\%$  y  $X/R = 4$ . Los MVA de corto circuito de la fuente de 480-V son 30MVA, y la razón  $X/R = 6$ . La inductancia del lado de CD es  $5\mu\text{H}$  y la resistencia del cable de conexiones es de  $0.002\Omega$ . Calcular y graficar la corriente de corto circuito al final del cable del lado de CD.

Basados en los datos del lado de CA, la impedancia de la fuente, en serie con la impedancia del transformador, referida al lado del secundario del transformador rectificador es:

$$R_Q + jX_Q = 0.00008 + j0.00048[\Omega]$$

$$R_T + jX_T = 0.001 + j0.00419[\Omega]$$

Por lo tanto:

$$R_N + jX_N = 0.0011 + j0.004671\Omega$$

En el lado de CD:

$$R_{DBr} = 0.002\Omega \quad \text{y} \quad L_{DBr} = 5\mu\text{H}$$

Esto proporciona las siguientes relaciones:

$$\frac{R_N}{X_N} = 0.24 \quad \text{y} \quad \frac{R_{DBr}}{R_N} = 2.0$$

Calcular  $\lambda_D$  de la ecuación (2.52)

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + (0.24)^2}{1 + (0.24)^2 + (1 + 0.667)(2.0)^2}} = 0.897$$

La corriente del estado casi estable es, por lo tanto, de la ecuación (2.51):

$$I_{kD} = (0.897) \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) \left( \frac{1.05 \times 480}{\sqrt{3} \times 0.0048} \right) \left( \frac{120}{480} \right) = 18.36 \text{ kA}$$

Para calcular la corriente pico, se calcula lo siguiente:

$$\frac{R_N}{X_N} \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) = (0.24)(1 + 0.667 \times 2) = 0.56$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{5 \times 10^{-6}}{0.0128 \times 10^{-3}} = 0.392$$

Calcular  $k_D$  de las ecuaciones (2.55) y (2.56).

De la ecuación (2.56):

$$\phi_D = \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + 0.667(2.0)} \right) = 60.75^\circ$$

Y de la ecuación (2.55),  $k_D = 1.204$ . Por lo tanto, la corriente pico de corto circuito es:

$$i_{pD} = k_D I_{kD} = 1.204 \times 18.36 = 22.10 \text{ kA}$$

El tiempo a pico (tiempo en que ocurre el pico o valor máximo de la corriente) está dado por la ecuación (2.57) y es igual a:

$$t_{pD} = (3k_D + 6)[\text{ms}] = (3 \times 1.204 + 6) = 9.62 \text{ ms}$$

La constante del tiempo de ascenso está dada por la ecuación (2.58) y es igual a 3.83ms, y la constante de tiempo de descenso está dada por la ecuación (2.60) y es igual a 4.58ms.

La gráfica de la corriente se muestra en la figura 2-17, donde se observan los valores calculados. La forma intermedia de la curva se puede graficar usando las ecuaciones (1.1) y (1.2).

Note que en éste ejemplo las ecuaciones proporcionadas por el estándar IEC, son para un sistema de 50 Hz. Para un sistema basado en una frecuencia de 60 Hz, el valor pico de la corriente ocurrirá alrededor de los 8.3ms.

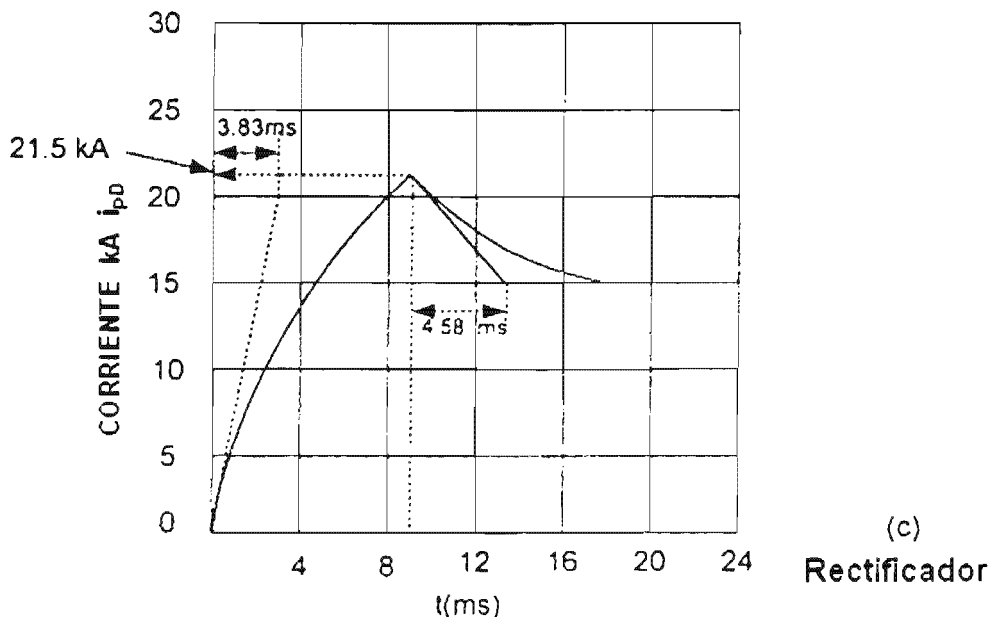


Fig. 2-17 Gráfica de la corriente de corto circuito en función tiempo para el rectificador del ejemplo 2.11

## II.6. Corto circuito de un capacitor cargado

### MÉTODO DE IEC.

La resistencia e inductancia en el circuito del capacitor de la figura 2-18 son:

$$\begin{aligned} R_{CBr} &= R_C + R_{CL} + R_y \\ L_{CBr} &= L_{CL} + L_y \end{aligned} \quad (2.61)$$

Donde  $R_C$  es la resistencia equivalente de CD del capacitor, y  $R_{CL}$  y  $L_{CL}$  son la resistencia e inductancia de un conductor en el circuito del capacitor. La corriente de corto circuito de estado estable del capacitor es cero y la corriente pico está dada por:

$$i_{PC} = k_C \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (2.62)$$

Donde  $E_C$  es el voltaje del capacitor antes de que ocurra el corto circuito, y  $k_C$  se obtiene de las curvas del estándar 61660-1 de IEC con base en:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (2.63)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}}$$

Si  $L_{CBr} = 0$ , entonces  $K_C = 1$ .

El tiempo a pico  $t_{pC}$  se obtiene de las curvas del estándar de IEC. Si  $L_{CBr} = 0$ , entonces  $t_{pC} = 0$ . La constante del tiempo de ascenso es:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} \quad (2.64)$$

Donde  $k_{1C}$  se obtiene de las curvas en el IEC. La constante de tiempo de descenso es:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C \quad (2.65)$$

Donde  $k_{2C}$  también se obtiene de las curvas del estándar de IEC.

### Ejemplo 2.12

Un capacitor de 120-V y 100 $\mu$ F tiene  $R_{CBr} = 0.05\Omega$  y  $L_{CBr} = 10$ mH. Obtenga la gráfica del corto circuito.

De las ecuaciones (2.63):

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 \times 10 \times 10^{-3}}{0.05} = 0.4$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{10 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6}}} = 1000$$

De las curvas del estándar de IEC,  $k_C = 0.92$ . La corriente pico de la ecuación (2.62) es por lo tanto:

$$(0.92) \times (120/0.05) = 2208 \text{ A.}$$

De las curvas de IEC se obtiene que el tiempo a pico es de 0.75ms, y  $k_{1C} = 0.58$ . De la ecuación (2.64) la constante del tiempo de ascenso es:

$$(0.58) \times (0.75) = 0.435 \text{ ms.}$$

También,  $k_{2C} = 1$ , y de la ecuación (2.65) se obtiene que la constante de tiempo de descenso es de  $5\mu s$ . La gráfica de la corriente de corto circuito se muestra en la figura 2-18.

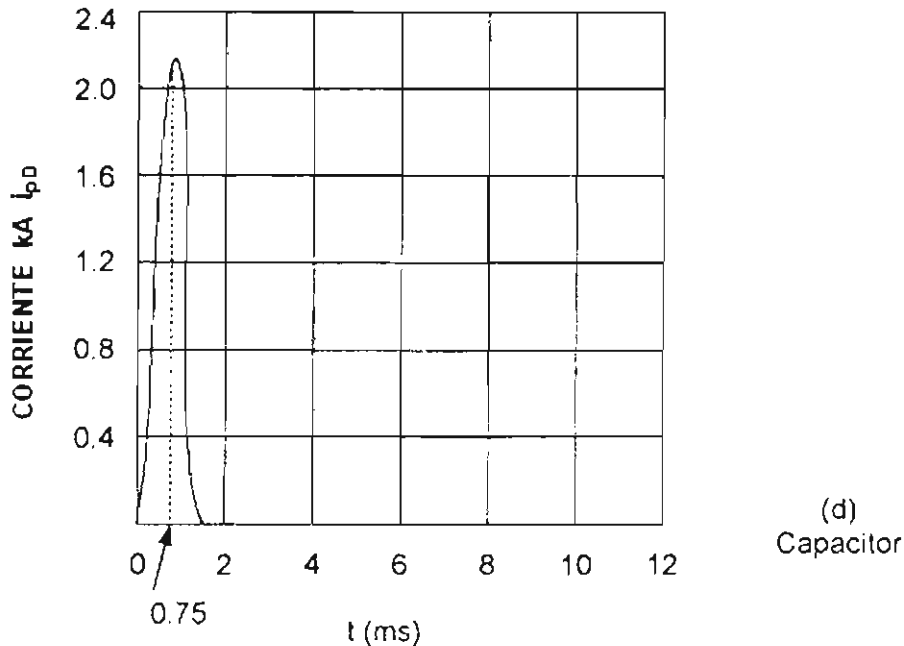


Fig. 2-18. Gráfica de la corriente de corto circuito en función del tiempo del capacitor del ejemplo 2.12

## II.7. Conductores

Para estudios de flujo de carga / caída de potencial, los conductores son modelados como elementos puramente resistivos. Los valores de resistencia de CD para los calibres de buses y cables más comunes pueden encontrarse fácilmente en muchos códigos y manuales. Las tablas de resistencia en la mayoría de los códigos y manuales también incluyen fórmulas o factores de corrección por temperatura.

La resistividad de la mayoría de los metales aumenta con la temperatura. El efecto de ésta resistencia adicional puede ser muy significativo para circuitos con gran longitud y/o cables pequeños. Entonces, es común considerar que un conductor se encuentra a su valor de temperatura nominal ( $75$  o  $90^\circ$ ) cuando se realizan estudios de flujo de carga / caída de voltaje.

La resistencia para cada conductor debe incluir la resistencia del elemento térmico de sobrecarga en los arrancadores de motores. La resistencia del elemento térmico de sobrecarga es una porción significativa de la resistencia del circuito de un conductor. Para motores pequeños es a menudo mayor que la resistencia de los conductores del circuito. La resistencia de fusibles, interruptores, contactos de



arrancadores y cuchillas por lo general no se consideran y no se incluyen en la mayoría de los modelos de conductores.

Los conductores comúnmente modelados para el análisis de sistemas de potencia de CD son cables y buses. Éstos se representan como la resistencia de CD a 25°C para los estudios de corto circuito, la resistencia del cable disminuye conforme la temperatura de éste disminuya.

Para corregir la resistencia del cable de una temperatura inicial a una temperatura final se usa la siguiente formula:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (2.66)$$

Donde:

$R_2$  = resistencia a la temperatura deseada ( $T_2$ );

$R_1$  = resistencia a la temperatura inicial ( $T_1$ );

$\alpha$  = 0.00323 para conductores de cobre;

$T_1$  = Temperatura inicial;

$T_2$  = Temperatura final.

### *Ejemplo 2.13*

Un cable de cobre calibre 2 AWG tiene una resistencia a 75° de 0.194Ω, obtener la resistencia a una temperatura de 25°C.

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] = 0.194[1 + 0.00323(25 - 75)]$$

$$R_2 = 0.162\Omega$$

## **II.8. Características y comportamiento de convertidores.**

Los convertidores forman una parte muy importante de un sistema de potencia de corriente alterna (CA). Tanto los sistemas de protección de corriente alterna (CA) como los de corriente directa (CD), tienen márgenes de seguridad los cuales son basados en estadísticas de riesgos, distinguiendo entre los disturbios independientes y posibles fallas en cascada.

Las características de los convertidores ante fallas interiores y externas deben ser consideradas por separado.

### **II.8.1 Disturbios en convertidores**

De acuerdo con el origen de los disturbios, el mal funcionamiento de los convertidores puede ser dividido en tres grupos.

- a) Mal funcionamiento de los tiristores del equipo, los cuales repercuten en las principales fallas: falla al arrancar y disparo.
- b) Falla en la conmutación: Son los disturbios más comunes durante la operación de inversión, tanto en fallas internas y externas.
- c) Corto circuito dentro de los convertidores: No son muy comunes, pero deben ser consideradas en el diseño de los convertidores.

En este análisis solo se discutirá el inciso c)

### **II.8.2 Corto circuito interno en los convertidores.**

Aunque los cortos circuitos no son muy frecuentes pueden ocurrir en varios puntos de los convertidores como se muestra en la figura 2-19. Estos pueden ser causa de la mala operación de las conexiones a tierra, es decir un mal sistema de tierra, aisladores deteriorados o vida del equipo particularmente durante sobrevoltajes transitorios. Un arco a través de la terminal no conductora del tiristor, es decir en estado de no conducción, produce un corto circuito de fase a fase lo cual provoca que circule una sobrecorriente en la terminal conductora del tiristor, es decir en estado de conducción.

Los grandes esfuerzos son producidos durante la rectificación con un pequeño disparo con retardo, este efecto se da inmediatamente después de la conmutación. En este caso la corriente en el tiristor V3 es solo limitada por la impedancia del transformador y la impedancia del sistema (equivalente de thevenin en ese punto).

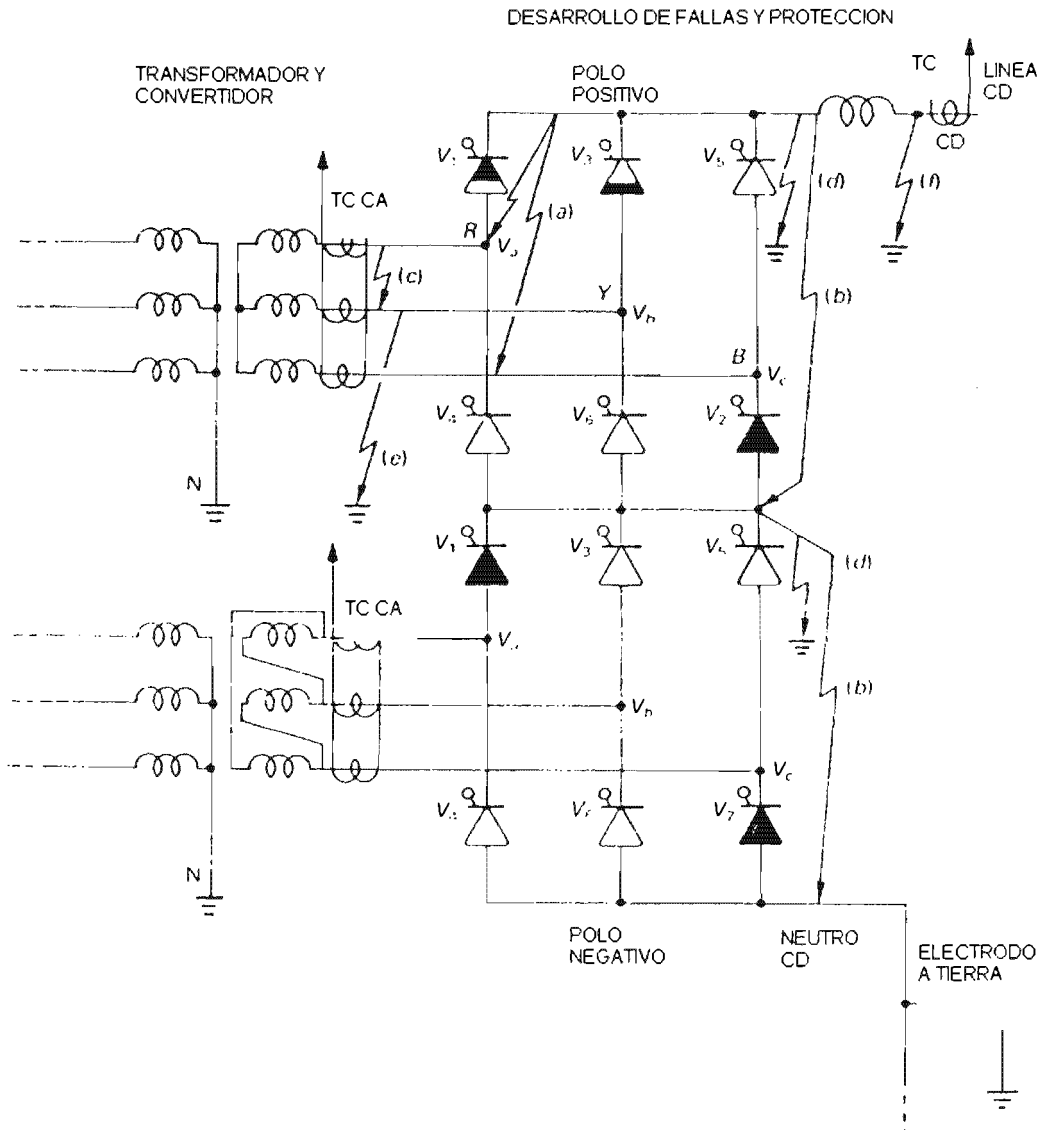


Figura 2-19

Posibles localizaciones de fallas internas en un convertidor de doce tiristores CA /CD.

- a) Falla a través de un tiristor en estado de no conducción.
- b) Falla entre terminales del sistema de corriente directa, línea de CD y neutro de CD, es decir entre polos positivo y negativo.
- c) Falla bifásica en CA del lado del convertidor – transformador.
- d) Falla a tierra del lado de CD.
- e) Falla a tierra en CA del lado del convertidor – transformador.
- f) Fallas a tierra en un polo de CD o en el bus de CD.

### *Acción bypass*

Muchas de las fallas en los tiristores son de tipo temporal y pueden ser eliminadas a través de la no conducción temporal, por medio de un arreglo de tiristores BYPASS. Estos tiristores son bloqueados en el estado de conducción en condiciones normales de operación y en condiciones de falla, los tiristores del arreglo BYPASS son disparados mientras que los tiristores principales son bloqueados. Una vez que los tiristores del arreglo BYPASS han sido disparados estos pueden ser bloqueados solo por la primera interrupción de corriente.

### *Fallas en sistemas de corriente alterna (CA).*

Una falla en el lado de CA, provoca una gran pérdida de voltaje en las terminales de un convertidor lo cual reduce o elimina la transmisión de potencia en un sistema CA / CD. Sin embargo la corriente directa CD no puede ser reestablecida instantáneamente a los valores originales ya que las constantes de tiempo de los sistemas de control y circuitos de CD provocan este desfase de tiempo. Además una falla en el lado de CA afecta la potencia reactiva y consecuentemente la conversión de voltajes.

Desde la transmisión de potencia en CD que consiste en el producto de  $V_d$  por  $I_d$ , el objetivo principal de los sistemas de conversión y control de CA / CD es el comportamiento del voltaje y la corriente.

### *Falla trifásica.*

La severidad de un corto circuito trifásico reduce significativamente la interconexión de los sistemas CA / CD, ya que la corriente es muy alta y si la falla es de tipo transitorio a los controladores no les da tiempo de actuar. Si la falla ocurre en el lado del rectificador no se necesita un control especial ya que a través de un arreglo BYPASS el rectificador puede seguir operando la rectificación de voltaje en CD y cuando la falla es liberada, el rectificador puede restablecerse sin la acción de sistemas de control especiales.

Un corto circuito trifásico provoca el bloqueo en las terminales de un inversor, lo cual se ve afectado en la conmutación de los tiristores produciendo picos de voltaje prolongados en CD y por lo tanto hay que reducir el ángulo de disparo de los tiristores.

La velocidad con la que se reestablece es considerada para la impedancia del sistema y los gradientes de voltaje y corriente.

### *Fallas asimétricas en CA*

En el caso de fallas asimétricas existe la suficiente conmutación de voltaje para continuar con la operación de enlace entre el sistema de CA y el sistema CD, bajo condiciones reducidas en potencia. Por lo tanto, en la práctica el control correcto del convertidor aumenta la energía suficiente para continuar operando por un tiempo considerable durante un disturbio. La restauración completa de la transmisión de potencia rápida después de una falla es muy similar al cortocircuito trifásico.

Debido a la asimetría, se produce modulación de doble frecuencia la cual es introducida en el lado de CD y en el lado de CA se presentan oscilaciones fuertes.

### *Desarrollo de fallas en la línea de CD*

La característica principal del corto-circuito en una línea en CD es que una vez iniciado debido a alguna falla permanente o transitoria esta no será extinguida por si misma ante de que la corriente llegue a un valor cero o nulo y el arco sea desionizado. Las fallas de CD pueden deberse también a descargas atmosféricas sobre las líneas y liberándose por si mismas ya que en su desionización provoca que la corriente alcance un valor cero o nulo, sin embargo esto puede apenas ser garantizado.

Cuando ocurre la falla en la línea de CD se presentan colapsos en el voltaje y la corriente en el rectificador tiende a aumentar mientras que la corriente en el inversor tiende a disminuir. El ángulo de disparo en el inversor será adelantado un ángulo mayor a  $90^\circ$ , si es necesario dentro de la rectificación, lo cual causa una pequeña caída de tensión del lado de CA pero aun así provee el suficiente voltaje para mantener la corriente en el inversor.

Por lo tanto el control normal del convertidor no es adecuado para reducir la corriente de falla a cero, sin embargo la acción de control idóneamente hace que la corriente pueda ser reducida a cero muy rápidamente comparada con la protección de CA. En la práctica esto es un éxito por la conducción temporal de los elementos de estado sólido como son los tiristores dentro de la inversión y por lo tanto se libera la energía almacenada rápidamente en el circuito de CD, esta acción requiere una inversión en el rectificador de voltaje para dar seguimiento en la detección de la falla.

### *Detención de fallas en CD*

Los gradientes de voltaje y corriente de los frentes de ondas enviados por la falla proveen las bases para una rápida reflexión y sincronización de la falla, su polaridad con respecto al voltaje de la línea manda la suficiente información para identificar fallas monopolares y bipolares. Una falla monopolar puede indicar sobrevoltajes.

La localización de las fallas y las características de la línea afecta la magnitud de los voltajes en las terminales, pero los controles de los convertidores no tienen prácticamente algún efecto en las ondas reflejadas en las terminales que generalmente están involucradas en los picos de voltaje.

En el caso de que la falla sea en la línea de CD, el valor del voltaje de falla en las terminales del rectificador es alto para el convertidor al sistema de CA por lo que en seguida habrá más inductancia en el circuito, sin embargo en la alta resistencia a tierra la falla es liberada en el inversor, esta información está basada exclusivamente en la magnitud del voltaje por lo tanto para una discriminación de la falla en CD es mejor usar la suma de los gradientes de voltaje [ $V_d$ ] y corriente [ $I_d$ ]:

$$E = K_1 V_d + K_2 I_d$$

Cuando la relación es directa entre ondas iniciales de voltaje y corriente debidas a la falla, contienen información sobre qué tipo de falla es y su localización. En una línea bipolar de CD cada polo requiere este tipo de detección.

Aunque las consideraciones involucradas han tenido relación al final del rectificador y al final del inversor deben ser equipados con un esquema similar de detección, pero con diferentes características para garantizar la extinción del arco.

Las características de sensibilidad de los detectores de los frentes de onda tienen que ser valorados por las principales pruebas en la línea, recientes pruebas realizadas en simuladores digitales han arrojado diferentes valores:

+0-3kV/ms: en un simulador de H.V.D.C

+0-7kV/ms: en una simulación en computadora digital

+3-7kV/ms: en pruebas de planta

Las fallas en cables son generalmente permanentes y su rápida detección es normalmente usada sin embargo es importante tener en cuenta un confiable esquema de detección de fallas.

### *Liberación y reestablecimiento de fallas en CD*

En la detección de una falla de una línea de CD, el ángulo de disparo del rectificador es atrasado dentro de la región de inversión donde  $\alpha$  va de  $120^\circ$  a  $135^\circ$  para un colapso rápido de corriente en el rectificador el cual se mantiene hasta que el arco se ha extinguido y desionizado por completo. Simplemente para asegurar que el voltaje y su polaridad se mantenga correctos en el inversor es necesario limitar el ángulo de disparo en el inversor adelantando de modo que  $\beta < 80^\circ$ .

Sin embargo la presencia del efecto capacitivo particularmente en cables de transmisión y la inductancia pueden crear un sobre desbalanceo e invertir la polaridad del voltaje en la línea de CD al final del inversor.

# CAPÍTULO III



### **CAPÍTULO III**

#### **CORRIENTE TOTAL DE CORTO CIRCUITO**

Para el cálculo de la corriente total de corto circuito en un Sistema Eléctrico de CD se procederá a utilizar el método de superposición, es decir primero se calcularán las corrientes de contribución debidas a las máquinas rotatorias, en este caso generadores y motores de CD; capacitores, baterías y rectificadores y después se obtendrá la corriente total de corto circuito, como se muestra en el siguiente ejemplo.

**EJEMPLO:** Dada la siguiente Instalación de un sistema de CD, así como los datos del equipo calcular la corriente total de corto circuito en los puntos de falla F1, F2, F3 y F4.

NOTA: La simbología empleada se explica en la tabla 1.

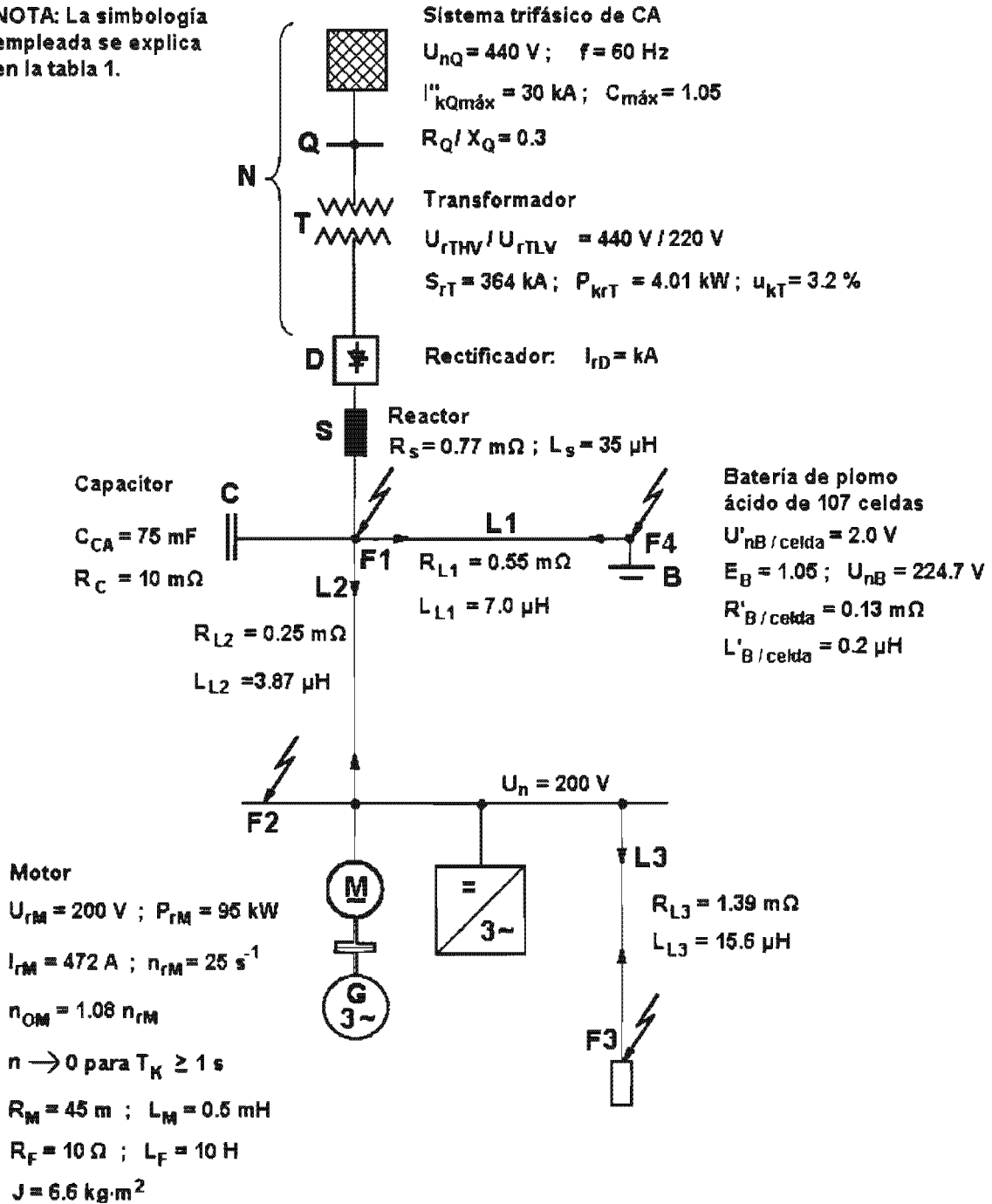


Figura 1. Instalación de CD a 220 V, para fallas localizadas en los puntos F1, F2, F3 y F4, así como los datos técnicos de los equipos.

Tabla 1. SIMBOLOGÍA

<b>C</b>	Capacitancia.
<b>c</b>	Factor de corrección del voltaje de acuerdo con IEC 60909.
<b><math>c_{Un} / 3</math></b>	Fuente de voltaje equivalente de acuerdo con IEC 60909.
<b><math>E_B</math></b>	Voltaje de circuito abierto de la batería.
<b>F</b>	Frecuencia del sistema
<b><math>I''_k</math></b>	Corriente de corto circuito trifásica inicial simétrica.
<b><math>I_K</math></b>	Corriente de corto circuito en estado casi estable.
<b><math>I_r</math></b>	Corriente nominal.
<b>i</b>	Corriente instantánea.
<b><math>i_1, i_2</math></b>	Funciones de la aproximación estándar.
<b><math>i_{Br}</math></b>	Corriente de corto circuito en una carga.
<b><math>i_p</math></b>	Corriente de corto circuito pico.
<b><math>I_{rD}</math></b>	Corriente nominal del rectificador.
<b><math>i_{cor}</math></b>	Corriente corregida.
<b>J</b>	Momento de inercia del rotor del motor.
<b>k</b>	Factor para calcular la corriente de corto circuito pico.
<b><math>K_{1C}, K_{2C}</math></b>	Factores para calcular la constante de tiempo de ascenso y descenso para la corriente del capacitor.
<b><math>K_{1M}</math></b>	Factor para calcular el tiempo que le toma a la corriente del motor alcanzar su valor pico.
<b><math>K_{2M}, K_{3M}</math></b>	Factores para calcular la constante de tiempo de ascenso para la corriente del motor.
<b><math>K_{4M}</math></b>	Factores para calcular la constante de tiempo de descenso para la corriente del motor.
<b>L, L'</b>	Inductancia, inductancia en por unidad.
<b><math>L'_B / \text{celda}</math></b>	Inductancia de cada celda que compone la batería.
<b><math>L_F</math></b>	Inductancia saturada equivalente del campo del circuito durante el corto circuito.
<b><math>L_{DF}</math></b>	Inductancia equivalente no saturada del campo del circuito sin carga.
<b>L</b>	Longitud.
<b>n, <math>n_{OM}</math>, <math>n_{rM}</math></b>	Velocidad del motor, velocidad del motor sin carga, velocidad nominal del motor.
<b>P</b>	Relación $I_k / I_p$ .
<b><math>P_{krT}</math></b>	Potencia real del transformador.
<b><math>P_{rM}</math></b>	Torque nominal del motor.
<b>R, R'</b>	Resistencia, resistencia en por unidad.
<b><math>R'_B / \text{celda}</math></b>	Resistencia de cada celda que compone la batería.
<b><math>R_F</math></b>	Resistencia equivalente del campo del circuito durante el corto circuito.
<b><math>R_{joint}</math></b>	Resistencia de uniones o conexiones.
<b><math>S_{rT}</math></b>	Capacidad del transformador.

$T_k$	Duración del corto circuito.
$T$	Tiempo.
$t_p$	Tiempo pico.
$U$	Voltaje de prefalla en el punto del corto circuito.
$U_{kT}$	Impedancia del transformador.
$U_n$	Voltaje trifásico en CA entre fases del sistema.
$U_{nB}$	Voltaje nominal de la batería.
$U_{rTHV}/U_{rTLV}$	Relación de transformación.
$X$	Reactancia.
$Z_N$	Impedancia equivalente de Thévenin del sistema en CA.
$\delta$	Coefficiente de descenso.
$\lambda_D$	Factor para calcular la corriente de corto circuito en estado casi estable del rectificador.
$\mu_0$	Permeabilidad absoluta del vacío, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.
$\rho$	Resistividad.
$\sigma$	Factor de corrección de la corriente de contribución de corto circuito.
$\tau_M$	Constante de tiempo de la armadura del motor.
$\tau_f$	Constante de tiempo del campo del circuito del motor.
$\tau_{mec}$	Constante de tiempo mecánica del motor.
$\tau_1, \tau_2$	Constantes de tiempo de ascenso y descenso de la función aproximada estándar.
$\omega_o, \omega_d$	Frecuencia natural angular no amortiguada, frecuencia natural angular amortiguada.

### ABREVIATURAS:

CA: Corriente alterna.  
 B: Batería.  
 Br: Carga en el lado de CD.  
 C: Capacitor.  
 cor: corregido.  
 D: Rectificador.  
 CD: Corriente Directa.  
 F: Punto en el cual es el corto circuito.  
 F: Campo del circuito del motor.  
 HV, LV: Alto y bajo voltaje.  
 i: Interno  
 j, m: Numero y numero de Fuentes de voltaje.  
 k: Corto circuito.  
 L: Línea  
 M: Motor.  
 max, min: Máximo y mínimo.  
 mec: mecánico.

N: Sistema trifásico en CA.

n : Nominal.

p: Pico.

P: Cable de potencia.

Q: Punto o Bus de unión del sistema hacia el transformador, es decir es la acometida.

S: Reactor uniforme.

T: Transformador.

### III.1. Cálculo de la corriente de corto circuito.

Las corrientes de corto circuito serán calculadas en los puntos de falla  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  y  $F_4$ . La duración de corto circuito, para este ejemplo, será de  $T_k = 0.1$  s. La corriente total de corto circuito  $I_k$ , en su duración final, se asume casi estable, es decir, se mantiene casi constante.

**NOTA.-** Para encontrar las corrientes de contribución  $i_D(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  e  $i_M(t)$ , en estado casi estable  $I_{KD}(t)$ ,  $I_{KB}(t)$ ,  $I_{KC}(t)$  e  $I_{KM}(t)$  se evaluarán en  $t = 1$  s después de haber iniciado el corto circuito.

#### III.1.1 Corto circuito en el punto $F_1$ .

##### III.1.1. A. Corriente de corto circuito debido a la contribución del rectificador D.

La impedancia equivalente de Thevenin de un sistema de CA trifásico en la conexión del punto Q de acuerdo con IEC 60909-0 se corrige con el factor  $C = C_{max} = 1.05$ , y el índice t para referir la impedancia al lado de baja tensión del transformador

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ_{max}}} \left( \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \right)^2 = \frac{1.05 \times 440}{\sqrt{3} \times 30 \text{ kA}} \left( \frac{220}{440} \right)^2 = 2.222 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Qt} = \frac{Z_{Qt}}{\sqrt{1 + (R_{Qt} / X_{Qt})^2}} = \frac{2.222 \text{ m}\Omega}{\sqrt{1 + 0.3^2}} = 2.128 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0.3 X_{Qt} = 0.638 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0.638 \text{ m}\Omega$$

Impedancia del transformador T:

$$Z_{TLV} = \frac{U_{kT} (U_{rTLV})^2}{100\% (S_{rT})} = \frac{3.2\% (220 \text{ V})^2}{100\% (364 \text{ kVA})} = 4.254 \text{ m}\Omega$$

$$R_{TLV} = \frac{P_{KT} (U_{rTLV})^2}{(S_{rT})^2} = \frac{4.01kW(220V)^2}{(364kVA)^2} = 1.464m\Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{(Z_{TLV})^2 - (R_{TLV})^2} = \sqrt{(4.254)^2 - (1.464)^2} m\Omega = 4.254m\Omega$$

Cálculo de resistencias y reaktancias del lado de CA del transformador:

$$\left. \begin{aligned} R_N &= R_{QT} + R_{TLV} = 0.638 m\Omega + 1.464 m\Omega = 2.102 m\Omega \\ X_N &= X_{QT} + X_{TLV} = 2.128 m\Omega + 3.994 m\Omega = 6.122 m\Omega \end{aligned} \right\} Z_N = 6.472 m\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6.472 m\Omega / 2 \pi 60 \text{ Hz} = 16.23 \mu\text{H}$$

Cálculo de la resistencia e impedancia del lado de CD del rectificador.

$$R_{DBr} = R_s = 0.77 m\Omega$$

$$L_{DBr} = L_s = 35 \mu\text{H}$$

Esto conduce a las siguientes relaciones:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2.102m\Omega}{6.122m\Omega} = 0.343$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{0.77m\Omega}{2.102m\Omega} = 0.366$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{35\mu\text{H}}{6.122\mu\text{H}} = 2.156$$

La corriente de corto circuito  $I_{KD}$  en estado casi estable:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2 R_{DBr}}{3 R_N}\right)^2\right]}} = \sqrt{\frac{1 + (0.343)^2}{1 + (0.343)^2 \left[1 + \left(\frac{2}{3} 0.366\right)^2\right]}}$$

$$\lambda_D = 0.972$$

$$I_{KD} = \frac{\lambda_D 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = \frac{0.854 \times 3\sqrt{2}}{\pi\sqrt{3}} \frac{1.05(440V) 220V}{(6.472m\Omega) 440V} = 27.04kA$$

Corriente de corto circuito pico  $\dot{i}_{pD}$

$$K_D = 1 + (2 / \pi) e^{-[(\pi / 3) + \varphi_D] \cot \varphi_D} \operatorname{sen} \varphi_D [(2 / \pi) - \operatorname{ang} \tan (L_{DBr} / L_N)]$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(R_N / X_N)(1 + (2 R_{DBr} / 3 R_N))])$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(0.343)(1 + (2 / 3) (0.366))])$$

$$\varphi_D = 66.89^\circ = 1.167 \text{ rad}$$

$$K_D = 1 + (2 / \pi) e^{-[(\pi / 3) + 1.167] \cot 66.89^\circ} \operatorname{sen} 66.89^\circ [(2 / \pi) - \operatorname{ang} \tan 2.156]$$

$$K_D = 1.09$$

Con  $k_D = 1.09$ :

$$\dot{i}_{pD} = K_D I_{kD} = 1.09 \times 27.04 \text{ kA} = 29.70 \text{ kA}$$

Además:

$$\frac{R_N}{X_N} \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right] = 0.343 \left[ 1 + \frac{2}{3} (0.366) \right] = 0.426 \quad \text{y} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} = 2.156$$

Tiempo pico  $t_{pD}$  para cuando  $L_{DBr}/L_N > 1$ :

$$t_{pD} = \left[ (3k_D + 6) + 4 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ms} = [(3 \times 1.09 + 6) + 4(2.156 - 1)] \text{ms}$$

$$t_{pD} = 13.89 \text{ ms}$$

Constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1D}$  para cuando  $k_D \geq 1.05$ :

$$\tau_{1D} = \left[ 2 + (k_D - 0.9) \left[ 2.5 + 9 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \right] \text{ms} = [2 + (1.09 - 0.9)(2.5 + 9 \times 2.156)] \text{ms}$$

$$\tau_{1D} = 6.16 \text{ ms}$$

Constante de tiempo de descenso  $\tau_{2D}$

$$\tau_{2D} = \frac{2\text{ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[ 0.6 + 0.9 \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right]} = \frac{2\text{ms}}{0.343(0.6 + 0.9 \times 0.366)} = 6.27\text{ms}$$

### III.1.1. B. Corriente de corto circuito debido a la contribución de la Batería B.

De acuerdo al capítulo II para la batería recargable.

$E_B = 1.05 U_{nB}$  lo anterior para una batería recargable, además de que la batería es de plomo ácido  $U_{nB} = 2 \text{ V / celda}$ , se tiene lo siguiente:

$$E_B = 1.05 \times 107 \times 2.0 \text{ V} = 224.7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0.13 \text{ m}\Omega = 13.91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0.2 \text{ }\mu\text{H} = 21.40 \text{ }\mu\text{H}$$

Resistencias e inductancias de la batería.

$$R_{BBr} = 0.9 R_B + R_{L1} = 0.9 \times 13.91 \text{ m}\Omega + 0.55 \text{ m}\Omega = 13.069 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} = 21.40 \text{ }\mu\text{H} + 7.0 \text{ }\mu\text{H} = 28.40 \text{ }\mu\text{H}$$

Corriente de cortocircuito  $I_{kB}$  en estado casi estable.

$$I_{kB} = \frac{0.95 E_B}{R_{BBr} + 0.1 R_B} = \frac{0.95(224.7\text{V})}{13.069\text{m}\Omega + 0.1(13.91\text{m}\Omega)} = 14.76\text{kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pB}$

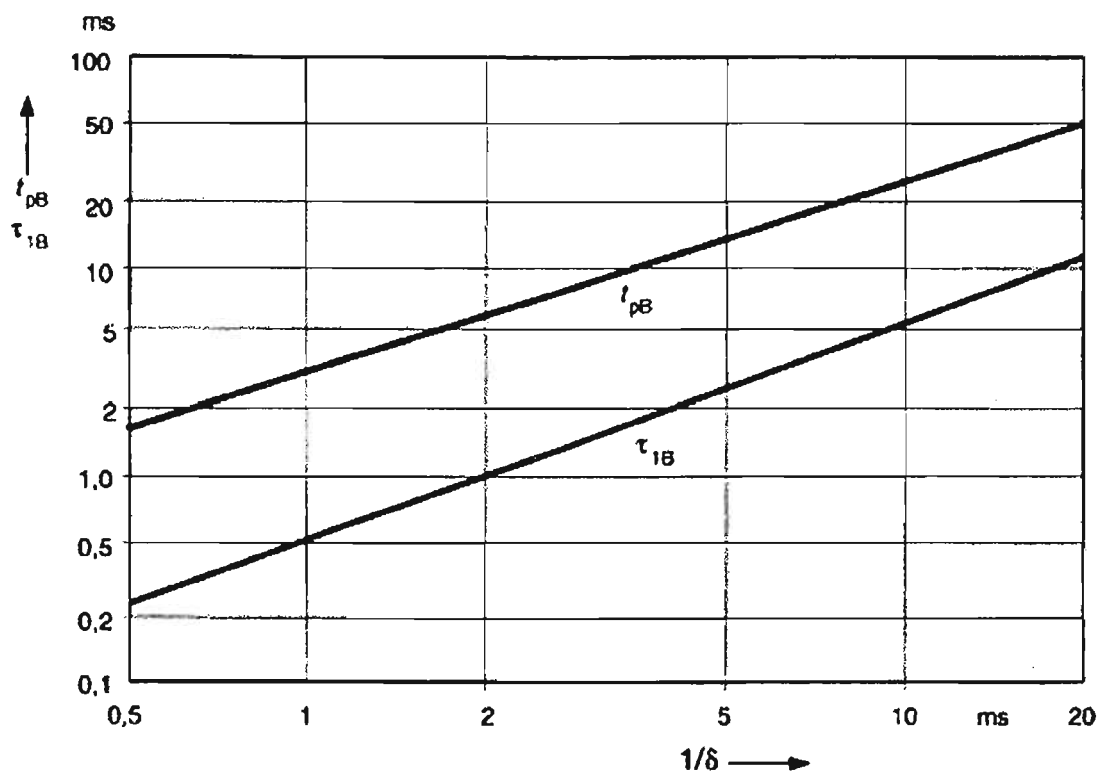
$$I_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224.7\text{V}}{13.069\text{m}\Omega} = 17.19\text{kA}$$

Tiempo para  $t_{pB}$  y constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1B}$  con  $1/\delta$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{13.069\text{m}\Omega}{28.40\text{ }\mu\text{H}} + \frac{1}{30\text{ms}}} = 4.05\text{ms}$$

Por lo tanto y de acuerdo a la gráfica 10 de IEC 61660-1, se obtienen  $t_{pB}$  y  $\tau_{1B}$ :





Gráfica 10. tiempo pico  $t_{pB}$  y constante de tiempo de asentamiento  $\tau_{1B}$  para el corto circuito de una batería.

Cuyos valores son:

$$\left. \begin{array}{l} t_{pB} = 12 \text{ ms} \\ \tau_{1B} = 2 \text{ ms} \end{array} \right\}$$

Por definición la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2B}$  es de 100 ms

### III.1.1. C. Corriente de corto circuito debido a la contribución del capacitor C.

Resistencia, inductancia y capacitancia del capacitor

$$R_{CBr} = R_C + R_r + R_{CL}$$

$R_{CL}, L_{CL} = 0$ : Porque no hay un alimentador el cual conecte al capacitor.

$R_r, L_r = 0$ : Porque no hay una carga común entre el capacitor y el punto de falla.

$$\begin{array}{l} R_{CBr} = R_C = 15 \text{ m}\Omega \\ L_{CBr} = 0 \end{array}$$

Debido a que se desconoce el valor de  $C_{CD}$  se aplica la siguiente fórmula:

$$C = 1.2 C_{CA} = 1.2 \times 80 \text{ mF} = 96 \text{ mF}$$

Por definición la corriente de corto circuito  $I_{KC}$  en estado casi estable.

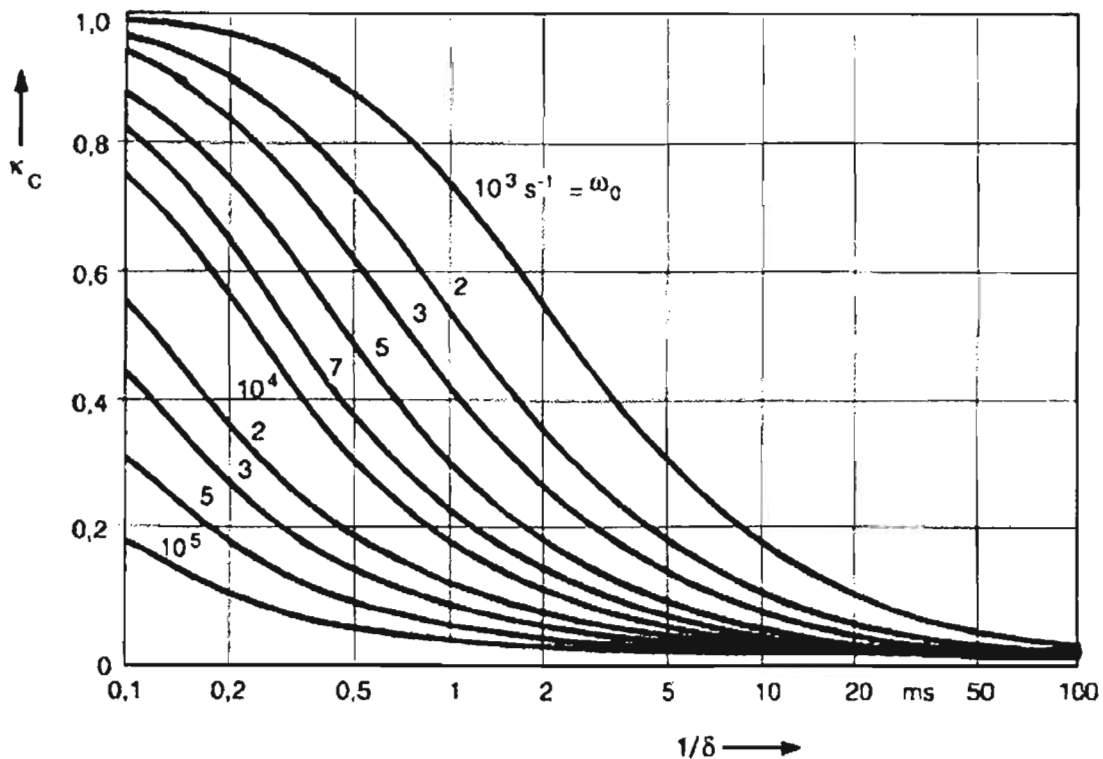
$$I_{KC} = 0$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pC}$ , con  $E_c = 1.05 U_{nB}$ :

De acuerdo a las siguientes ecuaciones con  $L_{cBr} = 0$  y de la grafica 12 de IEC 61660-1.

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{cBr}}{R_{cBr}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{cBr}C}}$$



Gráfica 12. Gráfica para determinar el factor  $k_c$  de la corriente pico de corto circuito  $i_{pC}$ .

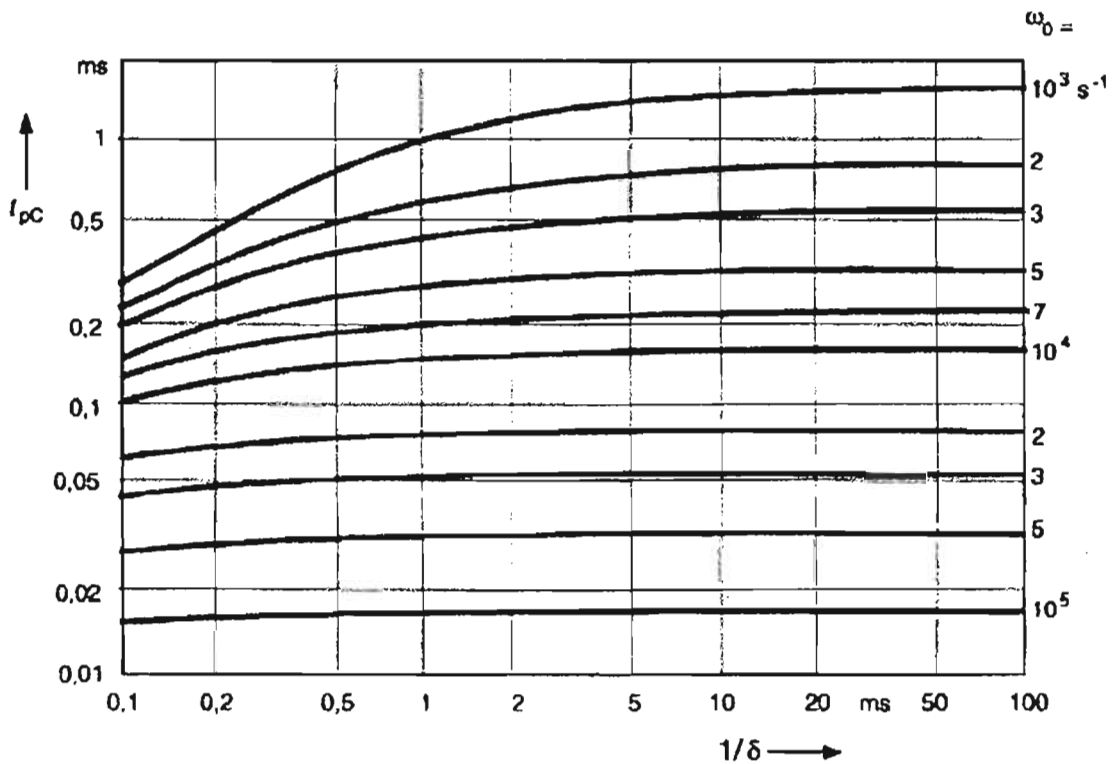
Por lo tanto se obtiene  $K_C = 1.0$

$$i_{pC} = K_C \frac{E_C}{R_{CBr}} = 1.0 \frac{224.7V}{15m\Omega} = 14.98kA$$

De acuerdo a las siguientes ecuaciones con  $L_{CBr} = 0$  y de la gráfica 13 de IEC 61660-1:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}}$$



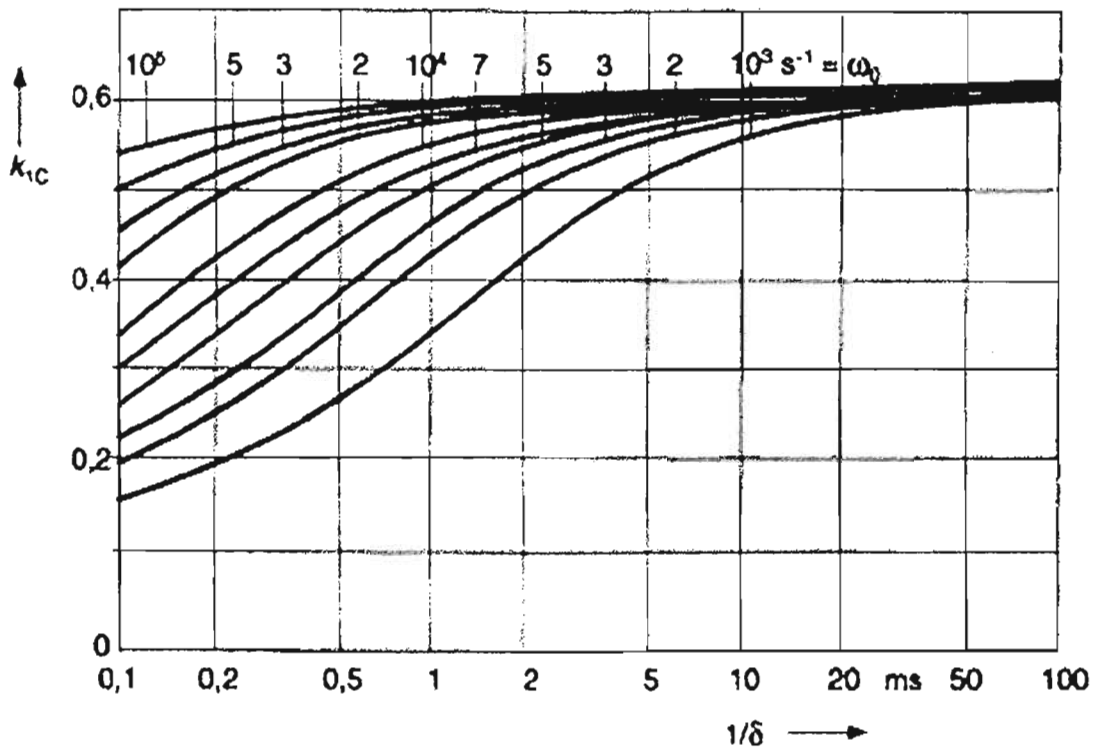
Gráfica 13. Gráfica para determinar el tiempo pico  $t_{pD}$ .

Por lo tanto se obtiene  $t_{pC} = 0$

Utilizando las siguientes ecuaciones con el valor de  $L_{CBr} = 0$  y de la gráfica 14 de IEC 61660-1:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}}$$



Gráfica 14. Gráfica para determinar el factor  $k_{1C}$  de la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1C}$ .

Por lo tanto se obtiene  $K_{1C} = 0.55$

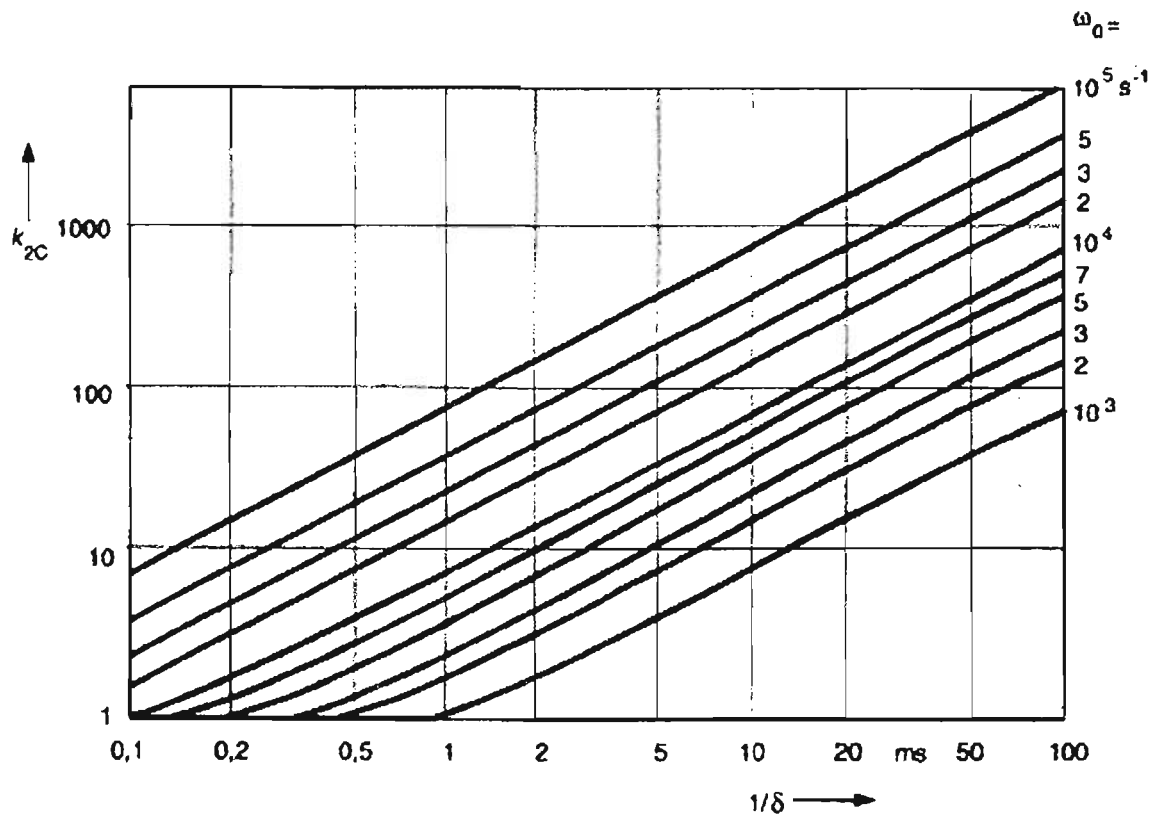
La constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1C}$  se obtiene con los valores de  $t_{pc} = 0$  y de  $K_{1C} = 0.55$ , por lo que se tiene:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pc} = 0$$

Empleando también las siguientes ecuaciones con  $L_{cBr} = 0$  y de la gráfica 15 de IEC 61660-1:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{cBr}}{R_{cBr}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{cBr}C}}$$



Gráfica 15. Gráfica para determinar el factor  $K_{2C}$  de la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ .

Por lo que se obtiene  $K_{2C} = 1.0$

Y la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ , se obtiene con  $k_{2C} = 1.0$ :

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C = 1.0 \times 15 \text{ m}\Omega \times 96 \text{ mF} = 1.44 \text{ ms}$$

### III.1.1. D. Corriente de corto circuito debido a la contribución del motor M.

$$R_{MBr} = R_M + R_{L2} = 45\text{m}\Omega + 0.25\text{m}\Omega = 45.25 \text{ m}\Omega$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{L2} = 0.5 \text{ mH} + 3.87 \text{ }\mu\text{H} = 503.87 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\tau_M = L_{MBr}/R_{MBr} = 503.87 \text{ }\mu\text{H}/45.25 \text{ m}\Omega = 11.13\text{ms}$$

Corriente de corto circuito  $I_{kM}$  en estado casi estable:

$$I_{kM} = 0 \text{ para } n \rightarrow 0$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{\rho M}$

$$i_{pM} = K_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBr}} = 0.88 \frac{200V - 472A(0.045\Omega)}{45.25m\Omega} = 3.47kA$$

Ya que el factor  $K_M$  depende de la constante de tiempo mecánica  $\tau_{mec}$  es decir si  $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$  el factor  $K_M = 1.0$ , en caso contrario  $K_M$  dependerá de  $1/\delta$  y  $\omega_0$ :

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_{oM} J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} = \frac{2\pi 1.08 n_{rM} J R_{MBr} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2\pi n_{rM}} U_{rM}}$$

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi 1.08 \times 25s^{-1} \times 6.6kgm^2 \times 45.25m\Omega \times 472A}{\frac{95kW}{2\pi \times 25s^{-1}} \times 200V}$$

Donde  $P_{rM}$  es la potencia mecánica del motor.

$$\tau_{mec} = 197.70 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F / R_F = 11 \text{ H} / 11 \Omega = 1 \text{ s}$$

$$\tau_{mec} = 197.70 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$$

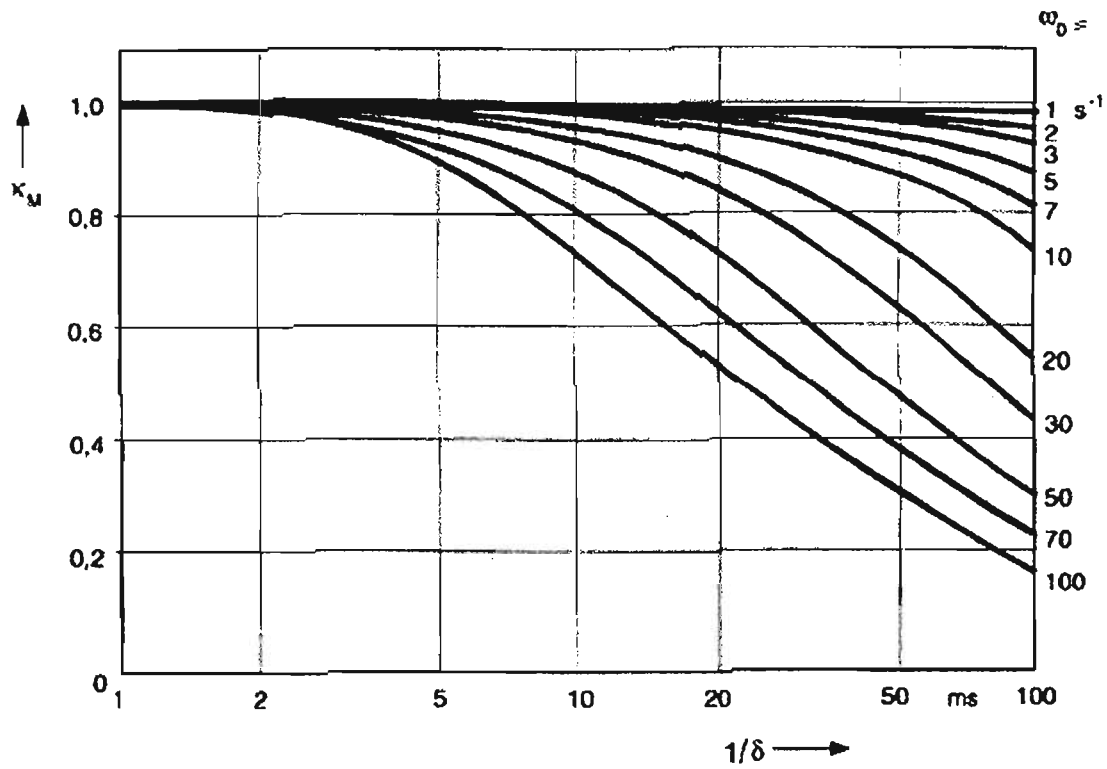
Por consiguiente y de acuerdo a las siguientes ecuaciones y de la gráfica 17 de IEC 61660-1:

$$1/\delta = 2 \tau_M = 22.26 \text{ ms}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left( 1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{197.70m\Omega \times 11.13ms} \left( 1 - \frac{0.045\Omega \times 472A}{200V} \right)}$$

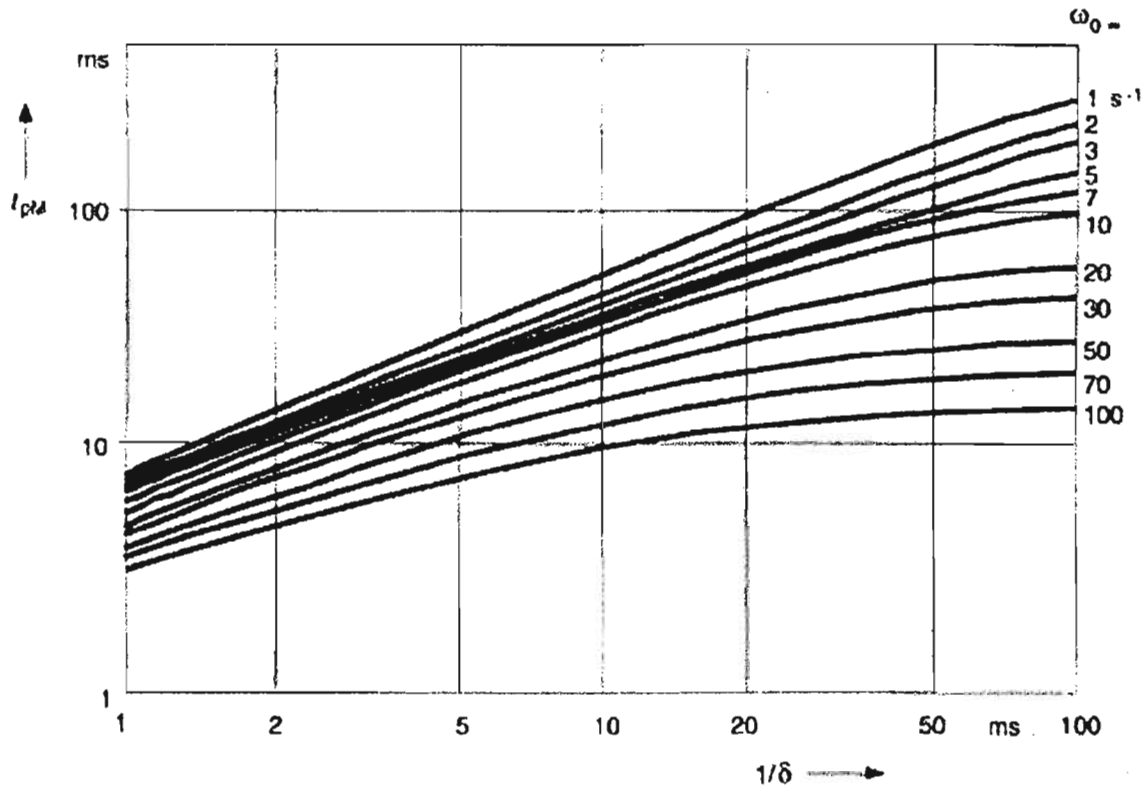
$$\omega_0 = 20.15 \text{ s}^{-1}$$



Gráfica 17. Gráfica para determinar el factor  $K_M$  de la corriente pico de corto circuito  $i_{pM}$  con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .

Se obtiene un valor de 0.88 para  $K_M$ .

También con el empleo de los valores de  $1/\delta = 2\tau_M = 22.26 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.15 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 19 de IEC 61660-1, se obtiene el valor del tiempo  $t_{pM}$ .

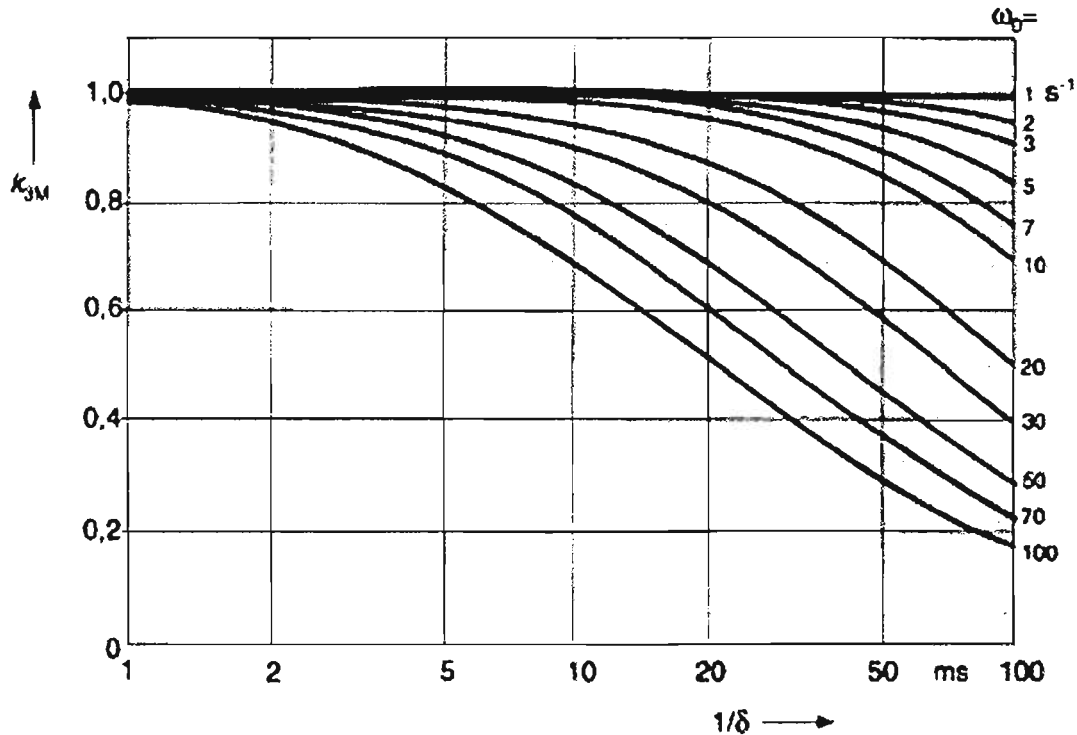


Gráfica 19. Gráfica para determinar el tiempo pico  $t_{pM}$  para el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .

Se obtiene:  $t_{pM} = 50 \text{ ms}$

Además de acuerdo con  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.26 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.15 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 20 de IEC 61660-1, el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$  nos proporciona el factor  $k_{3m} = 0.84$ .





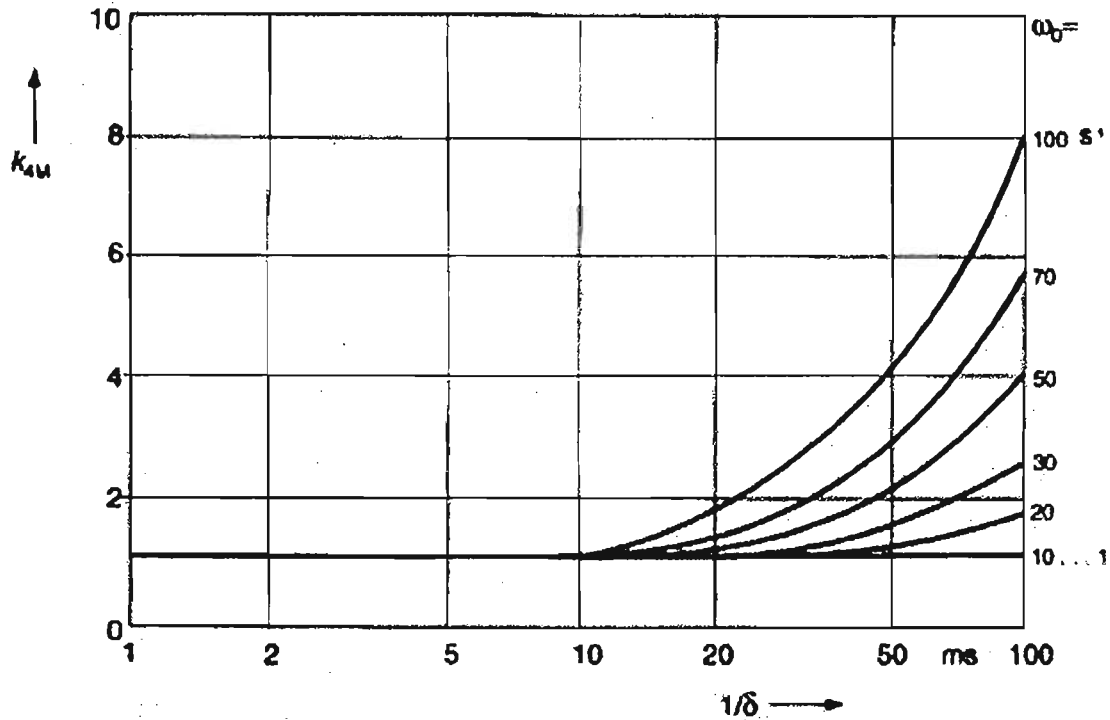
Gráfica 20. Gráfica para determinar el factor  $k_{3M}$  de la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1M}$  para decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .

El valor obtenido para  $k_{3m}$  es de 0.84

Por consiguiente la constante de tiempo de ascenso es:

$$\tau_{1M} = k_{3m} \tau_M = 0.84 \times 11.13 \text{ ms} = 9.34 \text{ ms}$$

De acuerdo con  $1/\delta = 2\tau_M = 22.26 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 21.12 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 21 de IEC 61660-1, el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , se obtiene el factor  $k_{4m}$ .



Gráfica 21. Gráfica para determinar el factor  $k_{4M}$  de la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{2M}$  para decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .

El valor obtenido para  $k_{4m}$  es de 1.0

La constante de tiempo de descenso es:

$$\tau_{2M} = k_{4m} \tau_{mec} = 1.0 \times 197.70 \text{ ms} = 197.70 \text{ ms}$$

### Corriente de corto circuito para la falla en el punto $F_1$ .

La corriente de corto circuito en la falla  $F_1$  será calculada de acuerdo a la figura 1.2 de IEC 61660-1 (ver capítulo I), obtenida por el método de superposición de las corrientes de contribución de corto circuito,  $i_D(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  e  $i_M(t)$ .

### Rectificador D:

$$i_{ID}(t) = i_{pD} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-t_{pD}/\tau_{1D}}} = 29.70 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t/6.2 \text{ ms}}}{1 - e^{-13.9 \text{ ms}/6.2 \text{ ms}}}$$

$$= 33.23 \text{ kA} (1 - e^{-t/6.2 \text{ ms}})$$

$$P_D = I_{kD} / I_{pD} = 27.04 \text{ kA} / 29.70 \text{ kA} = 0.91$$

$$\begin{aligned} i_{2D}(t) &= I_{pD} \left[ (1 - P_D) e^{-(t - t_{pD}) / \tau_{2D}} + P_D \right] \\ &= 29.70 \text{ kA} \left[ 0.91 + 0.089 e^{-(t - 13.9 \text{ ms}) / 6.3 \text{ ms}} \right] \end{aligned}$$

**Batería B:**

$$i_{1B}(t) = I_{pB} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1B}}}{1 - e^{-t_{pB} / \tau_{1B}}} = 17.19 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t / 2 \text{ ms}}}{1 - e^{-12 \text{ ms} / 2 \text{ ms}}} = 17.23 \text{ kA} \left[ 1 - e^{-t / 2 \text{ ms}} \right]$$

$$P_B = I_{kB} / I_{pB} = 14.76 \text{ kA} / 17.19 \text{ kA} = 0.858$$

$$\begin{aligned} i_{2B}(t) &= I_{pB} \left[ (1 - P_B) e^{-(t - t_{pB}) / \tau_{2B}} + P_B \right] \\ i_{2B}(t) &= 17.19 \text{ kA} \left[ 0.858 + 0.142 e^{-(t - 12 \text{ ms}) / 100 \text{ ms}} \right] \end{aligned}$$

**Capacitor C:**

$$i_{1C}(t) = I_{pC} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1C}}}{1 - e^{-t_{pC} / \tau_{1C}}} = 14.98 \text{ kA}$$

$$P_C = I_{kC} / I_{pC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = I_{pC} e^{-(t - t_{pC}) / \tau_{2C}} = 14.98 \text{ kA} e^{-t / 1.44 \text{ ms}}$$

**Motor M**

$$\begin{aligned} i_{1M}(t) &= I_{pM} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1M}}}{1 - e^{-t_{pM} / \tau_{1M}}} = 3.47 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t / 9.34 \text{ ms}}}{1 - e^{-50 \text{ ms} / 9.34 \text{ ms}}} \\ &= 3.48 \text{ kA} \left[ 1 - e^{-t / 9.34 \text{ ms}} \right] \end{aligned}$$

$$P_M = I_{kM} / I_{pM} = 0$$

$$i_{2M}(t) = I_{pM} e^{-(t - t_{pM}) / \tau_{2M}} = 3.48 \text{ kA} e^{-(t - 50 \text{ ms}) / 197.70 \text{ ms}}$$

Para obtener  $i_k$  total se hace  $t = T_k$  para cada componente del sistema y en este caso  $T_k = 100$  ms, obteniendo por superposición la corriente para cada uno de éstos.

$$i_{2D}(t) = 29.70 \text{ kA} [0.91 + 0.089 e^{-(t-13.9\text{ms})/6.3 \text{ ms}}]$$

$$i_{2D}(t) = 29.70 \text{ kA} [0.91 + 0.089 e^{-(100\text{ms} - 13.9\text{ms})/6.3 \text{ ms}}] = 27.02 \text{ kA}$$

$$i_{2B}(t) = 17.19 \text{ kA} [0.858 + 0.142 e^{-(100\text{ms} - 12 \text{ ms})/100 \text{ ms}}] = 15.761 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t) = 14.98 \text{ kA} e^{-100\text{ms}/1.44 \text{ ms}} = 0 \text{ kA}$$

$$i_{2M}(t) = 3.48 \text{ kA} e^{-(100\text{ms} - 50 \text{ ms})/197.70 \text{ ms}} = 2.635 \text{ kA}$$

Haciendo la suma se obtiene que:

$$i_k = i_{2D} + i_{2B} + i_{2C} + i_{2M} = (27.02 + 15.761 + 0 + 2.635) \text{ kA} = 45.41 \text{ kA}.$$

Para obtener  $i_p$  se toma el mínimo de los  $t_p$  de los componentes del sistema, sin considerar el capacitor y se obtiene para ese  $t_p$  mínimo los valores de corriente para cada componente y finalmente se realiza la suma.

$$i_{2D}(t=12\text{ms}) = 29.70 \text{ kA} [0.91 + 0.089 e^{-(12\text{ms} - 13.9\text{ms})/6.3 \text{ ms}}] = 30.35 \text{ kA}$$

$$i_{2B}(t=12\text{ms}) = 17.19 \text{ kA} [0.858 + 0.142 e^{-(12\text{ms} - 12 \text{ ms})/100 \text{ ms}}] = 17.19 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t=12\text{ms}) = 14.98 \text{ kA} e^{-12\text{ms}/1.44 \text{ ms}} = 0.004\text{kA}$$

$$i_{2M}(t=12\text{ms}) = 3.48 \text{ kA} e^{-(12\text{ms} - 50 \text{ ms})/197.70 \text{ ms}} = 4.297 \text{ kA}$$

$$i_p = (30.35 + 17.19 + 0.004 + 4.297) \text{ kA} = 51.841 \text{ kA}$$

Para calcular  $\tau_1$  total se toma en cuenta lo siguiente:

$$\tau_1 = t_p/3$$

Donde  $t_p$  es el mínimo.

Por lo tanto:

$$\tau_1 = 12\text{ms} / 3 = 4\text{ms}$$

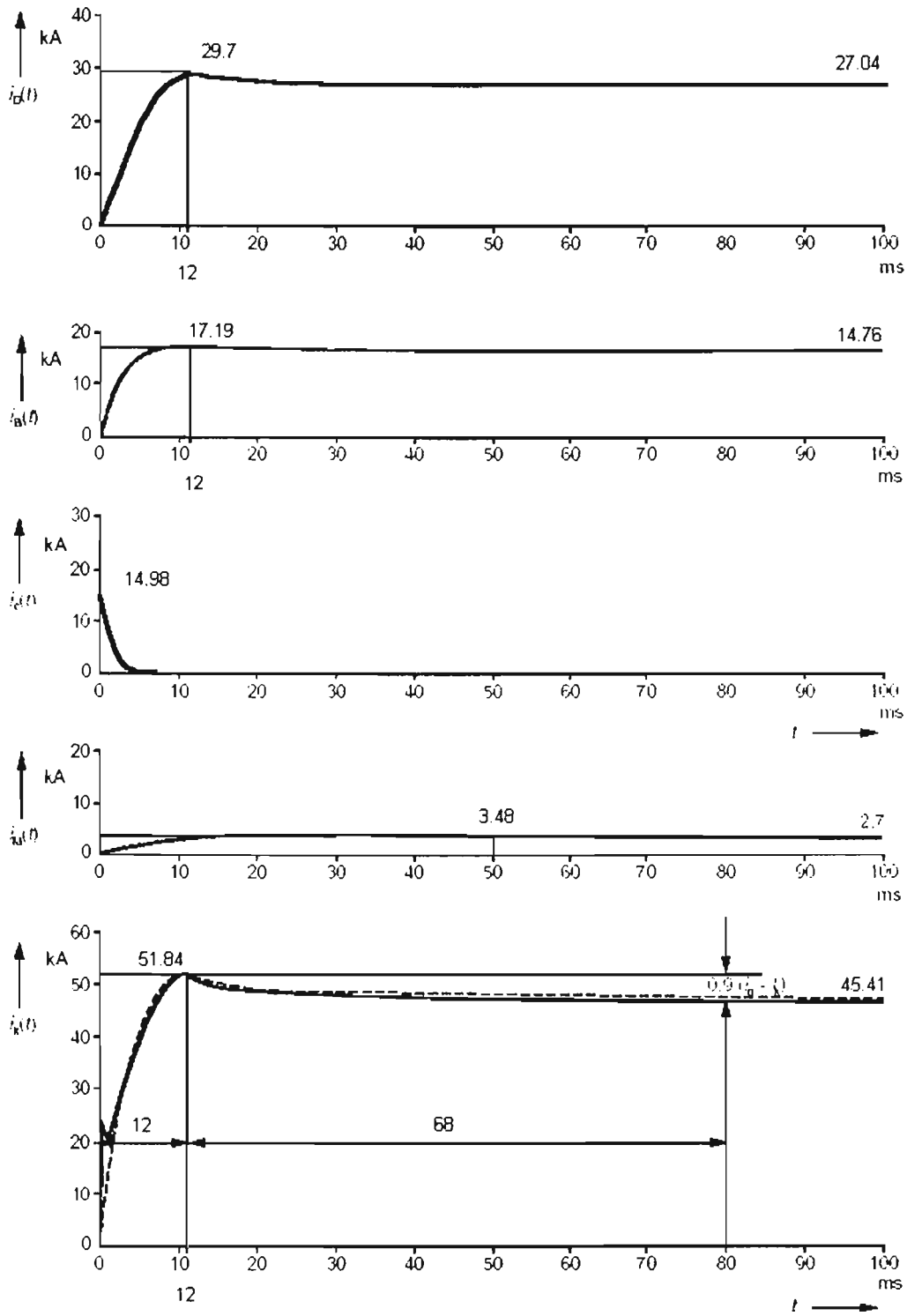
**III.1.1. E. Tabla de resultados.**

En la tabla 1 se muestran los principales resultados para las corrientes de corto circuito en F1

Tabla1 – Corrientes de corto circuito en F1

FUENTE DE CORTO CIRCUITO	$i_p$ kA	$I_k$ kA	$t_p$ ms	$\tau_1$ ms	$\tau_2$ ms
Rectificador	29.70	27.04	13.9	6.2	6.3
Batería B	17.19	14.76	12.0	2.0	100
Capacitor C	14.98	0	0	0	1.44
Motor M	3.48	0	50.0	9.34	197.70
Corriente total de corto circuito	51.841	45.41	12.0	4.0	*

\* Este valor se puede obtener de la simulación de la falla.



- Corriente de corto circuito.
- - - - Aproximación de la función estándar para la corriente de corto circuito.

Figura 2. Gráficas de las corrientes de corto circuito para el punto de falla F1.

### III.1.2. Corto circuito en el punto F2.

#### III.1.2. A. Corriente del corto circuito debido a la contribución del rectificador D.

$$R_N = R_{QT} + R_{TLV} = 0.638 \text{ m}\Omega + 1.464 \text{ m}\Omega = 2.102 \text{ m}\Omega$$

$$X_N = X_{Qt} + X_{TLV} = 2.128 \text{ m}\Omega + 3.994 \text{ m}\Omega = 6.122 \text{ m}\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6.472 \text{ m}\Omega / 2\pi 60 \text{ Hz} = 16.23 \text{ }\mu\text{H}$$

$$Z_N = 6.472 \text{ m}\Omega$$

Resistencias e inductancias del lado de CD del rectificador cuando el corto circuito es en el punto de falla F2.

$$R_{DBr} = R_S + R_{L2} = (0.77 + 0.25) \text{ m}\Omega = 1.11 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{L2} = (35 + 3.87) \text{ }\mu\text{H} = 38.87 \text{ }\mu\text{H}$$

Esto conduce a las siguientes relaciones:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2.102 \text{ m}\Omega}{6.122 \text{ m}\Omega} = 0.343$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{0.77 \text{ m}\Omega}{2.102 \text{ m}\Omega} = 0.366$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{35 \text{ }\mu\text{H}}{6.122 \text{ }\mu\text{H}} = 2.156$$

Corriente del corto circuito casi estable  $I_{kD}$ :

$$\lambda_D = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2} \left[1 + \left(\frac{2 R_{DBr}}{3 R_N}\right)^2\right]} = \frac{\sqrt{1 + (0.343)^2}}{\sqrt{1 + (0.343)^2} \left[1 + \left(\frac{2}{3} 0.485\right)^2\right]}$$

Con  $\lambda_D = 0.963$

$$I_{kD} = \frac{\lambda_D 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = \frac{0.963 \times 3\sqrt{2}}{\pi\sqrt{3}} \frac{1.05(440\text{V})}{(6.472 \text{ m}\Omega)} \frac{220\text{V}}{440\text{V}}$$

$$I_{kD} = 26.77 \text{ kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pD}$ :

$$K_D = 1 + (2 / \pi) e^{-[(\pi / 3) + \varphi_D] \cot \varphi_D} \operatorname{sen} \varphi_D [(2 / \pi) - \operatorname{ang} \tan (L_{DBr} / L_N)]$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(R_N / X_N)(1 + (2 R_{DBr} / 3 R_N))])$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(0.343)(1 + (2 / 3) (0.485))])$$

$$\varphi_D = 65.56^\circ = 1.144 \text{ rad}$$

$$K_D = 1 + (2 / \pi) e^{-[(\pi / 3) + 1.144] \cot 65.56^\circ} \operatorname{sen} 65.56^\circ [(2 / \pi) - \operatorname{ang} \tan 2.393]$$

$$K_D = 1.08$$

Con  $K_D = 1.08$ :

$$i_{pD} = K_D I_{KD} = 1.08 \times 26.77 \text{ kA} = 29.04 \text{ kA}$$

Además:

$$\frac{R_N}{X_N} \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right] = 0.343 \left[ 1 + \frac{2}{3} (0.485) \right] = 0.455$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = 2.393$$

Tiempo pico  $t_{pD}$  para  $L_{DBr}/L_N > 1$ :

$$t_{pD} = \left[ (3k_D + 6) + 4 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ms} = [(3 \times 1.08 + 6) + 4(2.393 - 1)] \text{ms}$$

$$t_{pD} = 14.83 \text{ ms}$$

Constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1D}$  para  $k_D \geq 1.05$ :

$$\tau_{1D} = \left[ 2 + (k_D - 0.9) \left[ 2.5 + 9 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \right] \text{ms} = [2 + (1.08 - 0.9)(2.5 + 9 \times 2.393)] \text{ms}$$

$$\tau_{1D} = 6.44 \text{ ms}$$



Constante de tiempo descendente  $\tau_{2D}$

$$\tau_{2D} = \frac{2\text{ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[ 0.6 + 0.9 \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right]} = \frac{2\text{ms}}{0.343(0.6 + 0.9 \times 0.485)} = 5.62\text{ms}$$

### III.1.2. B. Corriente de corto circuito debido a la contribución de la batería B.

$$E_B = 1.05 U_{nB}$$

$$U_{nB} = 2 \text{ V /celda}$$

$$E_B = 1.05 \times 107 \times 2 = 224.7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0.13 = 13.91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0.2 \mu\text{H} = 21.40 \mu\text{H}$$

$$R_{BBr} = 0.9 R_B + R_{L1} + R_{L2} = [ (0.9 \times 13.91) + 0.55 + 0.25 ] \text{ m}\Omega = 13.319 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} + L_{L2} = (21.4 + 7.0 + 3.87) \mu\text{H} = 32.27 \mu\text{H}$$

Corriente de corto circuito  $I_{kB}$  casi estable:

$$I_{kB} = \frac{0.95 E_B}{R_{BBr} + 0.10 R_B} = \frac{0.95(224.7\text{V})}{13.391\text{m}\Omega + 0.1(13.91\text{m}\Omega)} = 14.51\text{kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pC}$ .

$$I_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224.7\text{V}}{13.391\text{m}\Omega} = 16.87\text{kA}$$

Tiempo pico  $t_{pB}$  y constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1B}$  con  $1/\delta$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{13.391\text{m}\Omega}{32.27\mu\text{H}} + \frac{1}{30\text{ms}}} = 4.48\text{ms}$$

Con este valor y de la gráfica 10 de IEC 61660-1 (ver falla F1), se obtiene que:

$$t_{pB} = 13 \text{ ms}$$

$$\tau_{1B} = 2.2 \text{ ms}$$

Por definición la constante de tiempo descendente  $\tau_{2B}$  es de 100ms.

### III.1.2. C. Corriente de corto circuito debido a la contribución del capacitor C.

Resistencias, inductancias y capacitancia del capacitor cuando el corto circuito es en el punto de falla F2.

$$R_{CBr} = R_C + R_{L2} = (15 + 0.25) \text{ m}\Omega = 15.25 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = L_{L2} = 3.87 \text{ }\mu\text{H}$$

$$C = 1.2 C_{a.c.} = 1.2 \times 80 \text{ mF} = 96 \text{ mF}$$

Corriente de corto circuito casi constante  $I_{KC}$

$$I_{KC} = 0$$

De acuerdo a las siguientes ecuaciones con  $L_{CBr} = 3.87 \text{ }\mu\text{H}$  y  $R_{CBr} = 15.25 \text{ m}\Omega$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CBr}}{R_{CBr}} = \frac{2(3.87\mu\text{H})}{15.25\text{m}\Omega} = 0.528$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr}C}} = \frac{1}{\sqrt{(3.87\mu\text{H})96\text{mF}}} = 1.64 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

De la gráfica 12 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) y con los valores obtenidos de  $1 / \delta = 0.528$ , y de  $\omega_0 = 1.624 \text{ s}^{-1}$  se determina el valor de  $K_C$ . Por lo tanto el valor es:

$$K_C = 1.0$$

De la gráfica 13 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) y con los valores obtenidos de  $1 / \delta = 0.528$ , y de  $\omega_0 = 1.624 \text{ s}^{-1}$  se determina el valor de  $t_{pC}$ , se determina el valor de:

$$t_{pC} = 0.6 \text{ ms}$$

De la gráfica 14 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) y con los valores obtenidos de  $1 / \delta = 0.528$ , y de  $\omega_0 = 1.624 \text{ s}^{-1}$  se determina el valor de  $k_{1C}$ , se determina el valor de:

$$K_{1C} = 0.34$$

Constante de tiempo de ascenso

$$\tau_{1C} = K_{1C} t_{pC} = 0.34 \times 0.6 \text{ ms} = 0.204 \text{ ms}$$

De la figura 15 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) y con los valores obtenidos de  $1/\delta = 0.528$ , y de  $\omega_0 = 1.624 \text{ s}^{-1}$  se determina el valor de  $t_{pC}$ , se determina el valor de  $k_{2C}$  y se obtiene:

$$k_{2C} = 1.5$$

Constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ , con  $k_{2C} = 1.5$ :

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C = 1.5 \times 15.25 \text{ m}\Omega \times 96 \text{ mF} = 2.196 \text{ ms}$$

### III.1.2. D. Corriente de corto circuito debido a la contribución del motor M.

Resistencias y reactancias del motor cuando el corto circuito es en el punto de falla F2.

$$R_{MBr} = R_M = 45 \text{ m}\Omega$$

$$L_{MBr} = R_M = 500 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\tau_M = L_{MBr} / R_{MBr} = 500 \text{ }\mu\text{H} / 45 \text{ m}\Omega = 11.11 \text{ ms}$$

Corriente de corto circuito casi estable  $I_{kM}$

$$I_{kM} = 0 \text{ para } n \rightarrow 0$$

Corriente de corto circuito pico  $I_{pM}$

$$I_{pM} = K_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBr}} = 0.90 \frac{200\text{V} - 472\text{A}(0.045\Omega)}{45.25\text{m}\Omega} = 3.5\text{kA}$$

Ya que el factor  $K_M$  depende de la constante de tiempo mecánica  $\tau_{mec}$ , es decir, si  $\tau_{mec} \geq 10 \tau_f$  el factor  $K_M = 1.0$ , en caso contrario  $K_M$  dependerá de  $1/\delta$  y  $\omega_0$ :

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_{oM} J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} = \frac{2\pi 1.08 n_{rM} J R_{MBr} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2\pi n_{rM}} U_{rM}}$$

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi \cdot 1.08 \times 25 \text{ s}^{-1} \times 6.6 \text{ kgm}^2 \times 45 \text{ m} \Omega \times 472 \text{ A}}{\frac{95 \text{ kW}}{2\pi \times 25 \text{ s}^{-1}} \times 200 \text{ V}}$$

Donde  $P_{rM}$  es la potencia mecánica del motor.

$$\tau_{mec} = 196.61 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F / R_F = 11 \text{ H} / 11 \Omega = 1 \text{ s}$$

$$\tau_{mec} = 196.61 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$$

Por lo tanto, y de acuerdo a la siguiente ecuación, de la gráfica 17 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) y de la relación  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$  se obtiene:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left( 1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{196.61 \text{ m} \Omega \times 11.11 \text{ ms} \left( 1 - \frac{0.045 \Omega \times 472 \text{ A}}{200 \text{ V}} \right)}} = 20.23 \text{ S}^{-1}$$

$$K_M = 0.90$$

De acuerdo a  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.23 \text{ s}^{-1}$ , así como de la gráfica 19 de IEC 61660-1 (ver en la falla F1), el tiempo  $t_{pM}$  y la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1m}$  para el decremento de velocidad es:

$$t_{pM} = 45 \text{ ms}$$

De acuerdo a  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.23 \text{ s}^{-1}$ , además del empleo de la gráfica 20 de IEC 61660-1 (consultarla en el anexo), el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , el factor  $k_{3m} = 0.88$ .

La constante de tiempo de ascenso es:

$$\tau_{1M} = k_{3m} \tau_M = 0.88 \times 11.11 \text{ ms} = 9.77 \text{ ms}$$

Además, de acuerdo con  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.23 \text{ s}^{-1}$ , así como de la gráfica 21 de IEC 61660-1 (obsérvese en el anexo), el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , el factor  $k_{4m} = 1.4$ .

La constante de tiempo de descenso es:

$$\tau_{2M} = k_{4m} \tau_{mec} = 1.4 \times 196.61 \text{ ms} = 275.26 \text{ ms}$$

### Factores de corrección $\sigma_j$ para las corrientes de contribución al corto circuito en el punto de falla F2.

Los factores de corrección para este caso no son directamente dados en IEC 61660-1, porque es un rectificador D, la batería B y el capacitor C, y L3 es el alimentador común para las cuatro corrientes de contribución al corto circuito. Los factores de corrección para este caso se dan en el anexo.

Con el valor  $R_{ij}$  y  $R_X = R_{L2}$ ,  $R_Y = R_{L3}$ , se encuentran los siguientes factores de corrección  $\sigma_j$

$$R_{iD} = \frac{U}{I_{kD}} - (R_X + R_Y) = \frac{220 \text{ V}}{26.77 \text{ kA}} - (0.25 + 1.39) \text{ m}\Omega = 6.57 \text{ m}\Omega$$

$$R_{iB} = R_B + R_{L1} = (13.91 + 0.55) \text{ m}\Omega = 14.46 \text{ m}\Omega$$

$$R_{iC} = R_C = 10 \text{ m}\Omega$$

$$R_{resC} = 5.14 \text{ m}\Omega$$

$\sigma_M = 1.0$  porque la corriente de corto circuito  $i_M(t)$  debido a la contribución del motor fluye directamente al punto de falla F2.

$$\sigma_D = \frac{14.46 (6.57+0.25) (\text{m}\Omega)^3}{[(6.57 \times 14.46) + (6.57 \times 0.25) + (14.46 \times 0.25)] (\text{m}\Omega)^3}$$

$$\sigma_D = 0.983$$

$$\sigma_B = \frac{6.57 (14.46+ 0.25) (\text{m}\Omega)^3}{[(6.57 \times 14.46) + (6.57 \times 0.25) + (14.46 \times 0.25)] (\text{m}\Omega)^3}$$

$$\sigma_B = 0.964$$

$$\sigma_C = \frac{5.14 \times (15 + 0.25) (\text{m}\Omega)^3}{[(5.14 \times 15) + (15 \times 0.25) + (0.25 \times 5.14)] (\text{m}\Omega)^3}$$

$$\sigma_C = 0.954$$

### III.1.2. E. Tabla de resultados.

En la siguiente tabla se proporcionan las corrientes correctas  $i_{pcorj}$  y  $i_{kcorj}$

Tabla 3. Corrientes de corto debidas a la contribución del Rectificador, Batería, Capacitor y Motor y la corriente total de corto circuito en el punto F3.

FUENTE DE CORTO CIRCUITO	$\sigma_j$	$i_{pj}$ kA	$i_{pcorj}$ kA	$i_{kj}$ kA	$i_{kcorj}$ kA	$t_{pj}$ ms	$\tau_{1j}$ ms	$\tau_{2j}$ ms
Rectificador	0.983	29.04	28.54	26.77	26.31	14.83	6.44	5.62
Batería B	0.98	16.87	16.53	14.51	14.21	13	2.2	100
Capacitor C	0.954	14.73	14.05	0	0	0.6	0.204	2.196
Motor M	1.0	3.5	3.5	0	0	45	9.77	275.26
Corriente total de corto circuito			49.75		44.16	13	4.33	*

\* Este valor se puede obtener de una simulación

Obtención de las corrientes corregidas presentadas en la tabla 3.

$$i_{pcorj} = \sigma_j i_{pj}$$

$$i_{kcorj} = \sigma_j i_{kj}$$

Para el rectificador:

$$i_{pcorj} = 0.983 \times 29.04 \text{ kA} = 28.54 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0.983 \times 26.77 \text{ kA} = 26.31 \text{ kA}$$

Para la batería:

$$i_{pcorj} = 0.98 \times 16.87 \text{ kA} = 16.53 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0.98 \times 14.51 \text{ kA} = 14.21 \text{ kA}$$

Para el capacitor:

$$i_{pcorj} = 0.954 \times 14.73 \text{ kA} = 14.05 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0$$

Para el motor:

$$i_{pcorj} = 1.0 \times 3.5 \text{ kA} = 3.5 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0$$

### Cálculo de la Corriente de corto circuito en el punto de falla F2.

La corriente de corto circuito en el punto de falla F2 es determinada por el método de superposición de las corrientes de corto circuito de contribución  $i_D(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  y  $i_M(t)$ , las cuales se evalúan con  $t = 13$  ms

Rectificador D:

$$i_{1D}(t) = i_{pcorD} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-tpD/\tau_{1D}}} = 28.54 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/6.44 \text{ ms}}}{1 - e^{-14.83\text{ms}/6.44 \text{ ms}}}$$

$$i_{1D}(t) = 31.74 \text{ kA} (1 - e^{-t/6.44 \text{ ms}})$$

$$P_D = i_{kcorD} / i_{pcorD} = 26.31 \text{ kA} / 28.54 \text{ kA} = 0.921$$

$$i_{2D}(t) = i_{pcorD} [(1 - P_D) e^{-(t-tpD)/\sigma_{2D}} + P_D]$$

$$i_{2D}(t) = 28.54 \text{ kA} [0.921 + 0.079 e^{-(t-14.83 \text{ ms})/5.62 \text{ ms}}]$$

Batería B:

$$i_{1B}(t) = i_{pcorB} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1B}}}{1 - e^{-tpB/\tau_{1B}}} = 16.53 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/2.2 \text{ ms}}}{1 - e^{-13 \text{ ms}/2.2 \text{ ms}}}$$

$$i_{1B}(t) = 16.57 \text{ kA} (1 - e^{-t/2.2 \text{ ms}})$$

$$i_{1B}(t = 13 \text{ ms}) = 16.37 \text{ kA}$$

$$P_B = i_{kcorB} / i_{pcorB} = 14.21 \text{ kA} / 16.53 \text{ kA} = 0.859$$

$$i_{2B}(t) = i_{pcorB} [(1 - P_B) e^{-(t-tpB)/\tau_{2B}} + P_B]$$

$$i_{2B}(t) = 16.53 \text{ kA} (0.859 + 0.140 e^{-(t-13 \text{ ms})/100 \text{ ms}})$$

Capacitor C:

$$i_{1C}(t) = i_{pcorC} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1C}}}{1 - e^{-tpC/\tau_{1C}}} = 14.05 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/0.204 \text{ ms}}}{1 - e^{-tpC/0.204 \text{ ms}}}$$

$$1 - e^{-t_p C / \tau_{1C}} \quad 1 - e^{-0.6 \text{ ms} / 0.204 \text{ ms}}$$

$$i_{1C}(t) = 14.85 \text{ kA} (1 - e^{-t / 0.204 \text{ ms}})$$

$$P_C = i_{kcorC} / i_{pcorC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = i_{pcorC} e^{-(t - t_p C) / \tau_{2C}} = 14.05 \text{ kA} e^{-(t - 0.6 \text{ ms}) / 2.196 \text{ ms}}$$

Motor M:

$$i_{1M}(t) = i_{pcorM} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1M}}}{1 - e^{-t_p M / \tau_{1M}}} = 3.5 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t / 9.78 \text{ ms}}}{1 - e^{-45 \text{ ms} / 9.78 \text{ ms}}}$$

$$i_{1M}(t) = 3.54 \text{ kA} (1 - e^{-t / 9.78 \text{ ms}})$$

$$P_M = i_{kcorM} / i_{pcorM} = 0$$

$$i_{2M}(t) = i_{pcorM} e^{-(t - t_p M) / \tau_{2M}} = 3.5 \text{ kA} e^{-(t - 45 \text{ ms}) / 275.26 \text{ ms}}$$

Para obtener  $I_k$  total se hace  $t = T_k$  para cada componente del sistema y en este caso  $T_k = 100 \text{ ms}$ , obteniendo por superposición la corriente para cada uno de éstos.

$$i_{2D}(t=100\text{ms}) = 28.54 \text{ kA} [0.921 + 0.079 e^{-(100 \text{ ms} - 14.83 \text{ ms}) / 5.62 \text{ ms}}] = 26.28 \text{ kA}$$

$$i_{2B}(t=100\text{ms}) = 16.37 \text{ kA} [0.859 + 0.140 e^{-(100 \text{ ms} - 13 \text{ ms}) / 100 \text{ ms}}] = 15.021 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t=100\text{ms}) = 14.05 \text{ kA} e^{-(100 \text{ ms} - 0.6 \text{ ms}) / 2.196 \text{ ms}} = 0 \text{ kA}$$

$$i_{2M}(t=100\text{ms}) = 3.5 \text{ kA} e^{-(100\text{ms} - 45 \text{ ms}) / 275.26 \text{ ms}} = 2.86 \text{ kA}$$

Haciendo la suma se obtiene que:

$$I_k = i_{2D} + i_{2B} + i_{2C} + i_{2M} = (26.28 + 15.021 + 0 + 2.86) \text{ kA} = 44.16 \text{ kA}.$$

Para obtener  $i_p$  se toma el mínimo de los  $t_p$  de los componentes del sistema, sin considerar el capacitor y se obtiene para ese  $t_p$  mínimo los valores de corriente para cada componente y finalmente se realiza la suma.

$$i_{2D}(t=13\text{ms}) = 28.54 \text{ kA} [0.921 + 0.079 e^{-(13 \text{ ms} - 14.83 \text{ ms}) / 5.62 \text{ ms}}] = 29.40 \text{ kA}$$



$$i_{2B}(t=13\text{ms}) = 16.37 \text{ kA} [0.859 + 0.140 e^{-(13 \text{ ms} - 13 \text{ ms}) / 100 \text{ ms}}] = 16.37 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t=13\text{ms}) = 14.05 \text{ kA} e^{-13 \text{ ms} / 2.196 \text{ ms}} = 0.049 \text{ kA}$$

$$i_{2M}(t=13\text{ms}) = 3.5 \text{ kA} e^{-(13 \text{ ms} - 45 \text{ ms}) / 275.26 \text{ ms}} = 3.931 \text{ kA}$$

$$i_p = (29.40 + 16.37 + 0.049 + 3.931) \text{ kA} = 49.75 \text{ kA}$$

Para calcular  $\tau_1$  total se toma en cuenta lo siguiente:

$$\tau_1 = t_p / 3$$

Donde  $t_p$  es el mínimo.

Por lo tanto:

$$\tau_1 = 13\text{ms} / 3 = 4.33 \text{ ms}$$

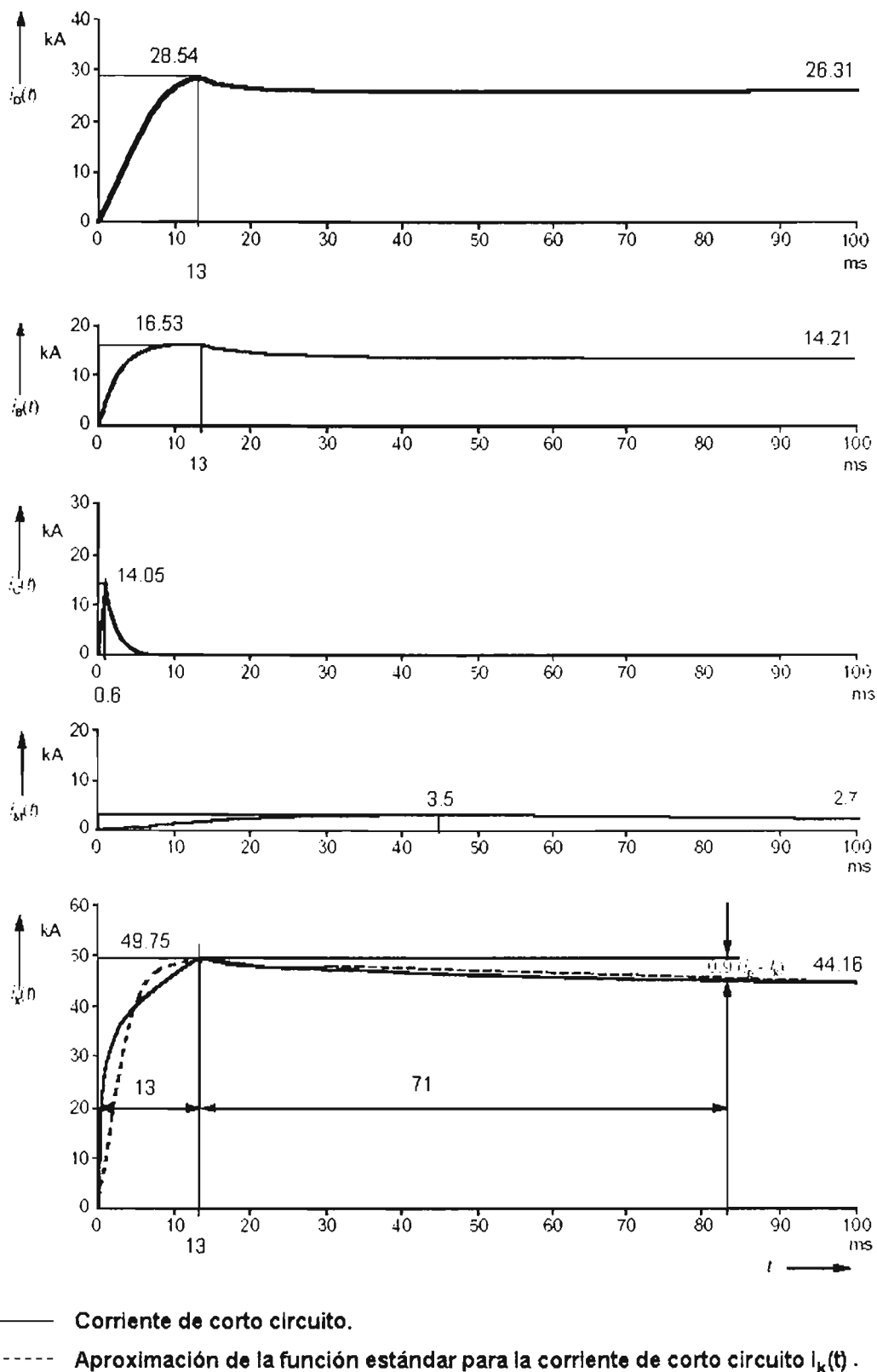


Figura 3. Gráficas de las corrientes de corto circuito para el punto de falla F2.

### III.1.3. Corto circuito en el punto F3.

#### III.1.3. A. Corriente del corto circuito debido a la contribución del rectificador D.

Cálculo de resistencias y reactancias del lado de CA del transformador:

$$R_N = R_{QT} + R_{TLV} = 0.638 \text{ m}\Omega + 1.464 \text{ m}\Omega = 2.102 \text{ m}\Omega$$

$$X_N = X_{Qt} + X_{TLV} = 2.128 \text{ m}\Omega + 3.994 \text{ m}\Omega = 6.122 \text{ m}\Omega$$

$$Z_N = 6.475 \text{ m}\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6.122 \text{ m}\Omega / 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} = 16.23 \text{ }\mu\text{H}$$

Resistencias e inductancias del lado de CD del rectificador cuando el corto circuito es en el punto de falla F3.

$$R_{DBr} = R_S + R_{L2} + R_{L3} = (0.77 + 0.25 + 1.39) \text{ m}\Omega = 2.41 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{L2} + L_{L3} = (35 + 3.87 + 15.6) \text{ }\mu\text{H} = 54.47 \text{ }\mu\text{H}$$

Esto conduce a las siguientes relaciones:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2.102 \text{ m}\Omega}{6.122 \text{ m}\Omega} = 0.343$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{2.41 \text{ m}\Omega}{2.102 \text{ m}\Omega} = 1.146$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{54.47 \text{ }\mu\text{H}}{16.23 \text{ }\mu\text{H}} = 3.3532.156$$

Corriente del corto circuito casi estable  $i_{kD}$ :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N}\right)^2\right]}} = \sqrt{\frac{1 + (0.343)^2}{1 + (0.343)^2 \left[1 + \left(\frac{2}{3} \cdot 1.146\right)^2\right]}}$$

Con  $\lambda_D = 0.904$

$$I_{kD} = \frac{\lambda_D 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = \frac{0.904 \times 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{1.05(440\text{V})}{\sqrt{3}(6.472 \text{ m}\Omega)} \frac{220\text{V}}{440\text{V}}$$

$$I_{kD} = 25.15 \text{ kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pD}$ :

$$K_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-[(\pi/3) + \varphi_D] \cot \varphi_D} \operatorname{sen} \varphi_D [(\pi/2) - \operatorname{ang} \tan (L_{DBr} / L_N)]$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(R_N / X_N)(1 + (2 R_{DBr} / 3 R_N))])$$

$$\varphi_D = \operatorname{ang} \tan (1 / [(0.343)(1 + (2 / 3)(1.146))])$$

$$\varphi_D = 58.79^\circ = 1.026 \text{ rad}$$

$$K_D = 1 + \frac{2}{\pi} e^{-[(\pi/3) + 1.026] \cot 58.79^\circ} \operatorname{sen} 58.79^\circ [(2/\pi) - \operatorname{ang} \tan 3.353]$$

$$K_D = 1.044$$

$$i_{pD} = K_D I_{kD} = 1.044 \times 25.15 \text{ kA} = 26.28 \text{ kA}$$

$$\frac{R_N}{X_N} \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right] = 0.343 \left[ 1 + \frac{2}{3} 1.146 \right] = 0.6050$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = 3.353$$

Tiempo pico  $t_{pD}$  para  $L_{DBr} / L_N > 1$ :

$$t_{pD} = \left[ (3k_D + 6) + 4 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ms} = [(3 \times 1.044 + 6) + 4(3.353 - 1)] \text{ms}$$

$$t_{pD} = 14.44 \text{ ms}$$

Constante de tiempo ascendente  $\tau_{1D}$  para  $k_D < 1.05$ :

$$\tau_{1D} = \left[ 0.7 + \left( 7 - \frac{R_N}{X_N} \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right) \left( 0.1 + 0.2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ms}$$

$$\tau_{1D} = \left[ 0.7 + \left( 7 - 0.343 \left( 1 + \frac{2}{3} 3.353 \right) \right) (0.1 + 0.2 \times 3.353) \right] \text{ms}$$

$$\tau_{1D} = 5.24\text{ms}$$

Constante de tiempo descendente  $\tau_{2D}$

$$\tau_{2D} = \frac{2\text{ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[ 0.6 + 0.9 \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right]} = \frac{2\text{ms}}{0.343(0.6 + 0.9 \times 1.146)} = 3.57\text{ms}$$

### III.1.3. B. Corriente de corto circuito debido a la contribución de la batería B.

Para el cargador de baterías.

$E_B = 1.05 U_{nB}$  para un cargador de baterías y debido a que la batería es de plomo ácido  $U_{nB} = 2 \text{ V / celda}$ :

$$E_B = 1.05 \times 107 \times 2.0 \text{ V} = 224.7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0.13 \text{ m}\Omega = 13.91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0.2 \text{ }\mu\text{H} = 21.4 \text{ }\mu\text{H}$$

Además:

$$R_{BBr} = 0.9 \times R_B + R_{L1} + R_{L2} + R_{L3} = (0.9 \times 13.91 + 0.55 + 0.25 + 1.39) \text{ m}\Omega$$

$$R_{BBr} = 14.71 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} + L_{L2} + L_{L3} = (21.4 + 7.0 + 3.87 + 15.6) \text{ }\mu\text{H} = 47.87 \text{ }\mu\text{H}$$

$$L_{BBr} = 47.87 \text{ }\mu\text{H}$$

Corriente de corto circuito  $I_{kB}$  casi estable:

$$I_{kB} = \frac{0.95E_B}{R_{BBr} + 0.1R_B} = \frac{0.95(224.7\text{V})}{14.7\text{m}\Omega + 0.1(13.91\text{m}\Omega)} = 13.26\text{kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pK}$ .

$$I_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224.7\text{V}}{14.71\text{m}\Omega} = 15.28\text{kA}$$

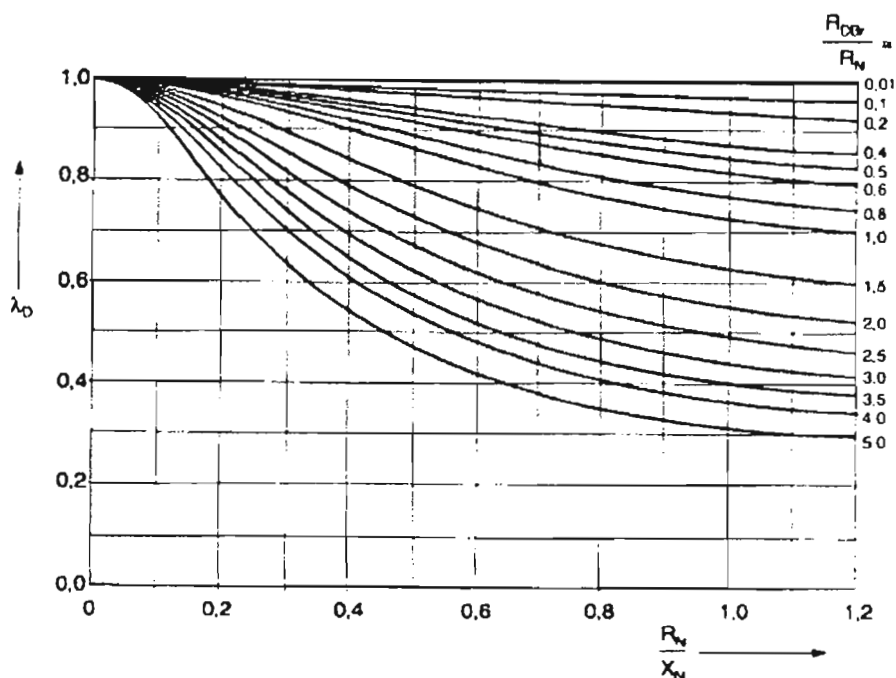
Tiempo pico  $t_{pB}$  y constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1B}$  con  $1/\delta$  y  $T_B = 30 \text{ ms}$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{14.71\text{m}\Omega}{47.87\mu\text{H}} + \frac{1}{30\text{ms}}} = 5.88\text{ms}$$

Por lo tanto de acuerdo a la gráfica 7 de IEC 61660-1 se obtienen:

$$t_{pB} = 18 \text{ ms}$$

$$\tau_{1B} = 3.5 \text{ ms}$$



Gráfica 7

Por definición la constante de tiempo descendente  $\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$

### III.1.3. C. Corriente de corto circuito debido a la contribución del capacitor C.

Resistencias, inductancias y capacitancia del capacitor cuando el corto circuito es en el punto de falla F3.

$$R_{CBr} = R_C + R_{L2} + R_{L3} = (15 + 0.25 + 1.39) \text{ m}\Omega = 16.64 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = L_{L2} + L_{L3} = (3.87 + 15.6) \mu\text{H} = 19.47 \mu\text{H}$$

$$C = 1.2 C_{a.c.} = 1.2 \times 80 \text{ mF} = 96 \text{ mF}$$

Corriente de corto circuito casi constante  $I_{KC}$

$$I_{KC} = 0$$

De acuerdo a las siguientes ecuaciones con  $L_{CB_r} = 19.47 \mu\text{H}$  y  $R_{CB_r} = 16.64 \text{ m}\Omega$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CB_r}}{R_{CB_r}} = \frac{2(19.47 \mu\text{H})}{16.64 \text{ m}\Omega} = 2.34 \text{ ms}; \quad \delta = 0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CB_r} C}} = \frac{1}{\sqrt{19.47 \mu\text{H}(96 \text{ mF})}} = 0.731 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

Debido a que  $\omega_0 = 0.731 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  está fuera del rango de las gráficas 12 y 13 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), se emplearan las siguientes ecuaciones cuando  $\delta < \omega_0$ :

$$\omega_d = \sqrt{(\omega_0)^2 - (\delta)^2} = \sqrt{(0.731)^2 - (0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1})^2}$$

$$\omega_d = 0.593 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$t_{pc} = \frac{1}{\omega_d} \arctan\left(\frac{\omega_d}{\delta}\right) = \frac{1}{0.593 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} \arctan\left(\frac{0.593 \times 10^3 \text{ s}^{-1}}{0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1}}\right) = 1.59 \text{ ms}$$

$$k_C = \frac{2\delta e^{-\delta t_{pc}}}{\omega_d} \text{sen}(\omega_d t_{pc})$$

$$k_C = \frac{2(0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1}) e^{-0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1}(1.59 \text{ ms})}}{0.593 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} \text{sen}(0.593 \times 10^3 \text{ s}^{-1}(1.59 \text{ ms}))$$

$$k_C = 0.591$$

$$i_{pc} = k_C \frac{E_c}{R_{CB_r}} = 0.591 \frac{224.7 \text{ V}}{16.64 \text{ m}\Omega}$$

$$i_{pc} = 7.98 \text{ kA}$$

De acuerdo a las siguientes ecuaciones y con  $L_{CB_r} = 19.47 \mu\text{H}$  y  $R_{CB_r} = 16.64 \text{ m}\Omega$ , así como de la gráfica 14 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1):

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CB_r}}{R_{CB_r}} = \frac{2(19.47 \mu\text{H})}{16.64 \text{ m}\Omega} = 2.34 \text{ ms}; \quad \delta = 0.427 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBF} C}} = \frac{1}{\sqrt{19.47 \mu\text{H}(96\text{mF})}} = 0.731 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

Por lo tanto, y de acuerdo a la gráfica se obtiene  $K_{1C} = 0.6$

Y la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1C}$  con  $t_{pc} = 0$  y  $K_{1C} = 0.6$

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pc} = 0.6 \times 1.59 = 0.957$$

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, con  $L_{CBF} = 19.47 \mu\text{H}$ ,  $R_{CBF} = 16.64 \text{ m}\Omega$  y de la gráfica 15 de IEC 61660-1 (ver en la falla F1), se obtiene  $K_{2C} = 11$

Y la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ , con  $k_{2C} = 11$ :

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBF} C = 11 \times 16.64 \text{ m}\Omega \times 96 \text{ mF} = 17.57 \text{ ms}$$

### III.1.3. D. Corriente de corto circuito debido a la contribución del motor M.

Resistencias y reactancias del motor cuando el corto circuito es en el punto de falla F3.

$$\begin{aligned} R_{MBF} &= R_M + R_{L3} = (45 + 1.39) \text{ m}\Omega = 46.39 \text{ m}\Omega \\ L_{MBF} &= R_M + L_{L3} = (500 + 15.6) \mu\text{H} = 515.6 \mu\text{H} \\ \tau_M &= L_{MBF}/R_{MBF} = 515.6 \mu\text{H}/46.39 \text{ m}\Omega = 11.11 \text{ ms} \end{aligned}$$

Corriente de corto circuito casi estable  $I_{kM}$

$$I_{kM} = 0 \text{ para } n \rightarrow 0$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pM}$

$$i_{pM} = K_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBF}} = 0.85 \frac{200\text{V} - 472\text{A}(0.045\Omega)}{46.39\text{m}\Omega} = 3.27\text{kA}$$

Ya que el factor  $K_M$  depende de la constante de tiempo mecánica  $\tau_{mec}$  es decir si  $\tau_{mec} \geq 10 \tau$  el factor  $K_M = 1.0$ , en caso contrario  $K_M$  dependerá de  $1/\delta$  y  $\omega_0$ :

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_{oM} J R_{MBF} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \qquad \tau_{mec} = \frac{2\pi 1.08 n_{rM} J R_{MBF} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2\pi n_{rM}} U_{rM}}$$



$$\tau_{mec} = \frac{2\pi \cdot 1.08 \times 25 \text{ s}^{-1} \times 6.6 \text{ kgm}^2 \times 46.39 \text{ m}\Omega \times 472 \text{ A}}{\frac{95 \text{ kW}}{2\pi \times 25 \text{ s}^{-1}} \times 200 \text{ V}}$$

Donde  $P_{rM}$  es la potencia mecánica del motor.

$$\tau_{mec} = 202.68 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F/R_F = 11 \text{ H}/11 \Omega = 1 \text{ s}$$

$$\tau_{mec} = 202.68 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$$

Por lo tanto, y de acuerdo a las siguientes ecuaciones así como de la gráfica 17 de IEC 61660-1 (ver en la falla F1):

$$1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left( 1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{202.68 \text{ m}\Omega \times 11.11 \text{ ms} \left( 1 - \frac{0.045 \Omega \times 472 \text{ A}}{200 \text{ V}} \right)}} = 19.92 \text{ s}^{-1}$$

$$K_M = 0.85$$

De acuerdo con  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 19.92 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 19 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), el tiempo  $t_{pM}$  y la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1m}$  para el decremento de velocidad es:

$$t_{pM} = 55 \text{ ms}$$

De acuerdo con  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 19.92 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 20 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , se obtiene el factor  $k_{3m} = 0.88$ .

La constante de tiempo de ascenso es:

$$\tau_{1M} = k_{3m} \tau_M = 0.88 \times 11.11 \text{ ms} = 9.77 \text{ ms}$$

Además de acuerdo con  $1/\delta = 2 \tau_M = 22.22 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 19.92 \text{ s}^{-1}$  así como de la gráfica 21 de IEC 61660-1 (consultar en la falla f1), y como el decremento en la velocidad cumple con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , se proporciona el factor  $k_{4m} = 1.2$ .

La constante de tiempo de descenso es:

$$\tau_{2M} = k_{4m} \tau_{mec} = 1.2 \times 202.68 \text{ ms} = 243.22 \text{ ms}$$

### Factores de corrección $\sigma_j$ para las corrientes de contribución al corto circuito en el punto F3.

Los factores de corrección para este caso no son directamente dados en IEC 61660-1, porque es un rectificador D, la batería B y el capacitor C, y L3 es el alimentador común para las cuatro corrientes de contribución al corto circuito. Los factores de corrección para este caso se dan a continuación.

Con el valor  $R_{ij}$  y  $R_x = R_{L2}$ ,  $R_y = R_{L3}$ , se encuentran los siguientes factores de corrección  $\sigma_j$ :

$$R_{iD} = \frac{U}{I_{kD}} - (R_x + R_y) = \frac{220 \text{ V}}{25.15 \text{ kA}} - (0.25 + 1.39) \text{ m}\Omega = 7.11 \text{ m}\Omega$$

$$R_{iB} = R_B + R_{L1} = (13.91 + 0.55) \text{ m}\Omega = 14.46 \text{ m}\Omega$$

$$R_{iC} = R_C = 15 \text{ m}\Omega$$

$$R_{iM} = R_M = 45 \text{ m}\Omega$$

Para el rectificador:

$$\sigma_D = \frac{14.46 \times 45 (7.11 + 0.25 + 1.39) (\text{m}\Omega)^3}{[(7.11 \times 14.46 + 7.11 \times 0.25 + 14.46 \times 0.25)(45 + 1.39) + (7.11 + 14.46)45 \times 1.39] (\text{m}\Omega)}$$

$$\sigma_D = 0.894$$

Para la batería:

$$\sigma_B = \frac{7.11 \times 45 \times (14.46 + 0.25 + 1.39) (\text{m}\Omega)^3}{6365.739 (\text{m}\Omega)^3}$$

$$\sigma_B = 0.809$$

Para el capacitor:

$$\sigma_C = \frac{7.11 \times 14.46 \times 45 (\text{m}\Omega)^3}{6365.739 (\text{m}\Omega)^3}$$

$$\sigma_C = 0.726$$

Para el motor:

$$\sigma_M = \frac{(7.11 \times 14.46 + 7.11 \times 0.25 + 14.46 \times 0.25) (45+1.39) (m\Omega)^3}{6365.739 (m\Omega)^3}$$

$$\sigma_M = 0.788$$

### III.1.3. E. Tabla de resultados

En la Tabla 4 se muestran las corrientes corregidas  $i_{pcorj}$  y  $i_{kcorj}$

Tabla 4. Corrientes de corto debidas a la contribución del Rectificador, Batería, Capacitor y Motor y la corriente total de corto circuito en el punto F3.

FUENTE DE CORTO CIRCUITO	$\sigma_j$	$i_{pj}$ kA	$i_{pcorj}$ kA	$i_{kj}$ kA	$i_{kcorj}$ kA	$t_{pj}$ ms	$\tau_{1j}$ ms	$\tau_{2j}$ ms
Rectificador	0.894	26.28	23.5	25.15	22.49	18.55	5.24	3.57
Batería B	0.809	15.28	12.35	13.26	10.72	18	3.5	100
Capacitor C	0.726	7.98	5.8	0	0	1.59	0.957	17.57
Motor M	0.788	3.27	2.58	0	0	55	9.77	243.22
Corriente total de corto circuito			44.1		38.75	18	6	*

\* Se obtiene a partir de una simulación.

Obtención de las corrientes corregidas presentadas en la tabla 4.

$$i_{pcorj} = \sigma_j i_{pj}$$

$$i_{kcorj} = \sigma_j i_{kj}$$

Para el rectificador:

$$i_{pcorj} = 0.894 \times 26.25 \text{ kA} = 23.5 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0.894 \times 25.15 \text{ kA} = 22.49 \text{ kA}$$

Para la batería:

$$i_{pcorj} = 0.809 \times 15.28 \text{ kA} = 12.35 \text{ kA}$$

$$i_{k\text{corj}} = 0.809 \times 13.26 \text{ kA} = 10.72 \text{ kA}$$

Para el capacitor:

$$i_{p\text{corj}} = 0.726 \times 7.98 \text{ kA} = 5.8 \text{ kA}$$

$$i_{k\text{corj}} = 0$$

Para el motor:

$$i_{p\text{corj}} = 0.788 \times 3.27 \text{ kA} = 2.58 \text{ kA}$$

$$i_{k\text{corj}} = 0$$

### Cálculo de la corriente de corto circuito en el punto F3.

La corriente de corto circuito en el punto de falla F3 es determinada mediante el empleo del método de superposición de las corrientes de corto circuito de contribución  $i_D(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  y  $i_M(t)$ :

#### Rectificador D:

$$i_{1D}(t) = i_{p\text{corD}} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-t_{pD}/\tau_{1D}}} = 23.5 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/5.24 \text{ ms}}}{1 - e^{-18.55\text{ms}/5.24 \text{ ms}}}$$

$$i_{1D}(t) = 24.2 \text{ kA} (1 - e^{-t/5.24 \text{ ms}})$$

$$P_D = i_{k\text{corD}} / i_{p\text{corD}} = 22.49 \text{ kA} / 23.5 \text{ kA} = 0.957$$

$$i_{2D}(t) = i_{p\text{corD}} [ (1 - P_D) e^{-(t - t_{pD})/\sigma_{2D}} + P_D ]$$

$$i_{2D}(t) = 26.28 \text{ kA} [ 0.957 + 0.043 e^{-(t - 18.55 \text{ ms})/3.57 \text{ ms}} ]$$

$$i_{2D}(t = 100 \text{ ms}) = 25.15 \text{ kA}$$

#### Batería B:

$$i_{1B}(t) = i_{p\text{corB}} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1B}}}{1 - e^{-t_{pB}/\tau_{1B}}} = 12.35 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/3.5 \text{ ms}}}{1 - e^{-18 \text{ ms}/3.5 \text{ ms}}}$$

$$i_{1B}(t) = 12.43 \text{ kA} (1 - e^{-t/3.5 \text{ ms}})$$

$$P_B = i_{kcorB} / i_{pcorB} = 10.72 \text{ kA} / 12.35 \text{ kA} = 0.868$$

$$i_{2B}(t) = i_{pcorB} \left( (1 - P_B) e^{-(t - t_{pB}) / \tau_{2B}} + P_B \right)$$

$$i_{2B}(t) = 12.35 \text{ kA} (0.868 + 0.132 e^{-(t - 18 \text{ ms}) / 100 \text{ ms}})$$

$$i_{2B}(t = 100 \text{ ms}) = 11.44 \text{ kA}$$

### Capacitor C:

$$i_{1C}(t) = i_{pcorC} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1C}}}{1 - e^{-t_{pC} / \tau_{1C}}} = 5.8 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t / 0.957 \text{ ms}}}{1 - e^{-1.59 \text{ ms} / 0.957 \text{ ms}}}$$

$$i_{1C}(t) = 7.147 \text{ kA} (1 - e^{-t / 0.957 \text{ ms}})$$

$$P_C = i_{kcorC} / i_{pcorC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = i_{pcorC} e^{-(t - t_{pC}) / \tau_{2C}} = 5.8 \text{ kA} e^{-(t - 1.59 \text{ ms}) / 17.57 \text{ ms}}$$

$$i_{2C}(t = 100 \text{ ms}) = 21.43 \text{ A}$$

### Motor M:

$$i_{1M}(t) = i_{pcorM} \frac{1 - e^{-t / \tau_{1M}}}{1 - e^{-t_{pM} / \tau_{1M}}} = 2.58 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t / 9.77 \text{ ms}}}{1 - e^{-55 \text{ ms} / 9.77 \text{ ms}}}$$

$$i_{1M}(t) = 2.59 \text{ kA} (1 - e^{-t / 9.77 \text{ ms}})$$

$$P_M = i_{kcorM} / i_{pcorM} = 0$$

$$i_{2M}(t) = i_{pcorM} e^{-(t - t_{pM}) / \tau_{2M}} = 2.58 \text{ kA} e^{-(t - 55 \text{ ms}) / 243.22 \text{ ms}}$$

$$i_{2M}(t = 100 \text{ ms}) = 2.14 \text{ kA}$$

Obteniendo por superposición la corriente total y realizando la suma se obtiene que:

$$I_K = i_{2D} + i_{2B} + i_{2C} + i_{2M} = (25.15 + 11.44 + 0.021 + 2.14) \text{ kA} = 38.75 \text{ kA.}$$

Para obtener  $i_p$  se toma el mínimo de los  $t_p$  de los componentes del sistema, sin considerar el capacitor y se obtiene para ese  $t_p$  mínimo los valores de corriente para cada componente y finalmente se realiza la suma.

$$i_{2D}(t = 18 \text{ ms}) = 26.28 \text{ kA} \left( 0.957 + e^{-(18 \text{ ms} - 18.55 \text{ ms}) / 3.57 \text{ ms}} \right) = 26.47 \text{ kA}$$

$$i_{2B}(t = 18 \text{ ms}) = 12.35 \text{ kA} \left( 0.868 + 0.133 e^{-(18 \text{ ms} - 18 \text{ ms}) / 100 \text{ ms}} \right) = 12.35 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t = 18 \text{ ms}) = 5.8 \text{ kA} e^{-(18 \text{ ms} - 1.59 \text{ ms}) / 17.57 \text{ ms}} = 2.28 \text{ kA}$$

$$i_{2M}(t = 18 \text{ ms}) = 2.58 \text{ kA} e^{-(18 \text{ ms} - 55 \text{ ms}) / 243.22 \text{ ms}} = 3.0 \text{ kA}$$

$$i_p = (26.47 + 12.35 + 2.28 + 3.0) \text{ kA} = 44.1 \text{ kA}$$

Para calcular  $\tau_1$  total se toma en cuenta lo siguiente:

$$\tau_1 = t_p / 3 \text{ donde } t_p \text{ es el mínimo.}$$

Por lo tanto:

$$\tau_1 = 18 \text{ ms} / 3 = 6 \text{ ms}$$

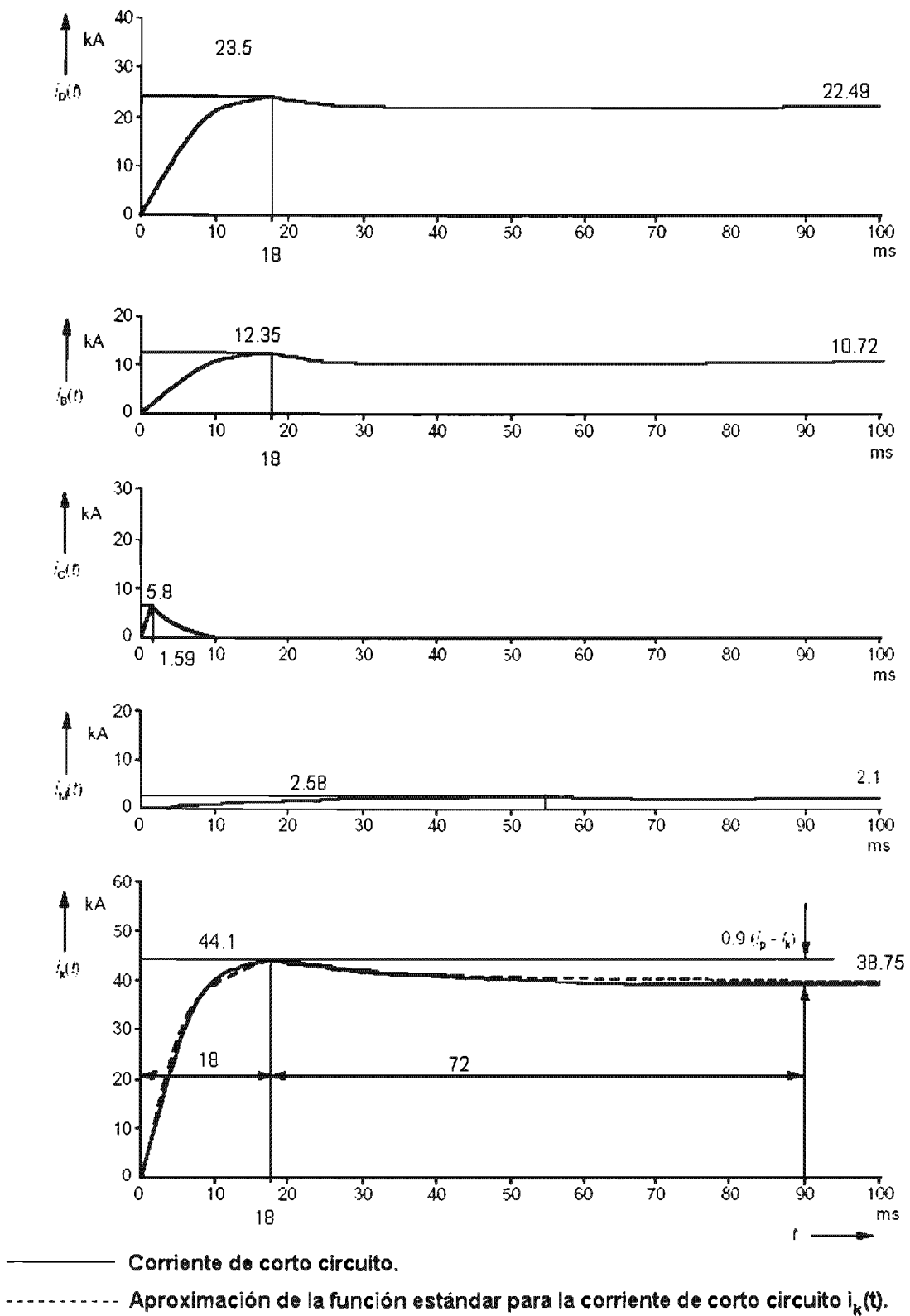


Figura 4. Gráficas de las corrientes de corto circuito para el punto de falla F3.

### III.1.4. Corto circuito en el punto F4.

#### III.1.4.A. Corriente de corto circuito debido a la contribución del rectificador D.

$$R_N = R_{QT} + R_{TLV} = 0.638 \text{ m}\Omega + 1.464 \text{ m}\Omega = 2.102 \text{ m}\Omega$$

$$X_N = X_{Qt} + X_{TLV} = 2.128 \text{ m}\Omega + 3.994 \text{ m}\Omega = 6.122 \text{ m}\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6.472 \text{ m}\Omega / 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} = 16.23 \text{ }\mu\text{H}$$

$$Z_N = 6.475 \text{ m}\Omega$$

$$R_{DBr} = R_S + R_{L1} = (0.77 + 0.55) \text{ m}\Omega = 1.32 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{L1} = (35 + 7.0) \text{ }\mu\text{H} = 42 \text{ }\mu\text{H}$$

Esto conduce a las siguientes relaciones:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2.102 \text{ m}\Omega}{6.122 \text{ m}\Omega} = 0.343$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{1.32 \text{ m}\Omega}{2.102 \text{ m}\Omega} = 0.627$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{42 \text{ }\mu\text{H}}{16.23 \text{ }\mu\text{H}} = 2.587$$

Corriente del corto circuito casi estable  $i_{kD}$ :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2 R_{DBr}}{3 R_N}\right)^2\right]}} = \sqrt{\frac{1 + (0.343)^2}{1 + (0.343)^2 \left[1 + \left(\frac{2}{3} \cdot 0.627\right)^2\right]}}$$

Con  $\lambda_D = 0.950$

$$i_{kD} = \frac{\lambda_D 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = \frac{0.950 \times 3\sqrt{2}}{\pi} \frac{1.05(440\text{V})}{\sqrt{3}(6.475 \text{ m}\Omega)} \frac{220\text{V}}{440\text{V}}$$

$$i_{kD} = 26.45 \text{ kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pD}$ :

$$i_{pD} = \frac{2}{\pi} i_{kD} \left[ \frac{1}{\cos \varphi_D} - \frac{1}{\cos \varphi_D} \cot \varphi_D \right] = \frac{2}{\pi} i_{kD} \left[ \frac{1}{\cos \varphi_D} - \frac{1}{\cos \varphi_D} \cot \varphi_D \right]$$



$$\varphi_D = \text{ang tan } (1 / [(0.343)(1 + (2 / 3) (0.627))])$$

$$\varphi_D = 64.03^\circ = 1.118 \text{ rad}$$

$$K_D = 1 + (2 / \pi) e^{-[(\pi / 3) + 1.118] \cot 64.03^\circ} \text{sen } 64.03^\circ [(2 / \pi) - \text{ang tan } 2.587]$$

$$K_D = 1.09$$

$$i_{pD} = K_D / K_D = 1.09 \times 26.45 \text{ kA} = 28.84 \text{ kA}$$

$$\frac{R_N}{X_N} \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right] = 0.343 \left[ 1 + \frac{2}{3} 0.627 \right] = 0.487$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = 2.587$$

Tiempo pico  $t_{pD}$  para  $L_{DBr}/L_N > 1$ :

$$t_{pD} = \left[ (3k_D + 6) + 4 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ms} = [(3 \times 1.09 + 6) + 4(2.587 - 1)] \text{ms}$$

$$t_{pD} = 15.62 \text{ ms}$$

Constante de tiempo ascendente  $\tau_{1D}$  para  $k_D \geq 1.05$ :

$$\tau_{1D} = \left[ 2 + (k_D - 0.9) \left[ 2.5 + 9 \left( \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \right] \text{ms} = [2 + (1.09 - 0.9)(2.5 + 9 \times 2.587)] \text{ms}$$

$$\tau_{1D} = 6.91 \text{ ms}$$

Constante de tiempo descendente  $\tau_{2D}$

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[ 0.6 + 0.9 \left( \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \right]} = \frac{2 \text{ms}}{0.343(0.6 + 0.9 \times 0.627)} = 4.99 \text{ms}$$

**III.1.4. B. Corriente de corto circuito debido a la contribución de la batería B:**

$$E_B = 1.05 \times 107 \times 2.0 \text{ V} = 224.7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0.13 \text{ m}\Omega = 13.91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0.2 \text{ }\mu\text{H} = 21.4 \text{ }\mu\text{H}$$

Resistencias e inductancias de la batería:

$$R_{BBr} = 0.9 R_B = 0.9 \times 13.91 \text{ m}\Omega = 12.52 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B = 21.4 \text{ }\mu\text{H}$$

Corriente de corto circuito casi estable  $i_{kB}$  :

$$i_{kB} = \frac{0.95E_B}{R_{BBr} + 0.1R_B} = \frac{0.95(224.7\text{V})}{12.52\text{m}\Omega + 0.1(13.91\text{m}\Omega)} = 15.35\text{kA}$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pB}$ :

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224.7\text{V}}{12.52\text{m}\Omega} = 17.95\text{kA}$$

Tiempo pico  $t_{pB}$  y constante de tiempo de ascendente  $\tau_{1B}$  con  $1/\delta$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{12.52\text{m}\Omega}{21.40\mu\text{H}} + \frac{1}{30\text{ms}}} = 3.23\text{ms}$$

De acuerdo a la grafica 10 del IEC 61660-1 (consultar en la falla F1) se obtienen:

$$t_{pB} = 9.0 \text{ ms}$$

$$\tau_{1B} = 1.5 \text{ ms}$$

Por definición la constante de tiempo descendente  $\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$

**III.1.4. C. Corriente de corto circuito debido a la contribución del capacitor C:**

$$\begin{aligned}R_{CB_r} &= R_C + R_{L1} = (15 + 0.55) \text{ m}\Omega = 15.55 \text{ m}\Omega \\L_{CB_r} &= L_{L1} = 7.0 \text{ }\mu\text{H} \\C &= 96 \text{ mF}\end{aligned}$$

Corriente de corto circuito casi estable

$$I_{kC} = 0$$

De acuerdo a las siguientes ecuaciones con  $L_{CB_r} = 7.0 \text{ }\mu\text{H}$  y  $R_{CB_r} = 15.55 \text{ m}\Omega$  y de la gráfica 12 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1):

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2L_{CB_r}}{R_{CB_r}} = \frac{2(7.0\mu\text{H})}{15.55\text{m}\Omega} = 0.9\text{ms}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CB_r} C}} = \frac{1}{\sqrt{7.0\mu\text{H}(96\text{mF})}} = 1.22 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

Se obtiene  $k_C = 0.72$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pC}$  con  $E_C = 1.05 U_{nB}$ :

$$i_{pC} = K_C \frac{E_C}{R_{CB_r}} = 0.72 \frac{224.7\text{V}}{15.55\text{m}\Omega} = 10.4\text{kA}$$

De acuerdo con  $1/\delta = 0.9 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 1.22 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 13 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), se obtiene el tiempo pico  $t_{pC}$ :

$$t_{pC} = 0.8 \text{ ms}$$

Además, de acuerdo con  $1/\delta = 0.9 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 1.22 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 14 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), se obtiene la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1C}$ :

$$k_{1C} = 0.34$$

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} = 0.34 \times 0.8 \text{ ms} = 0.272 \text{ ms}$$

Empleando  $1/\delta = 0.9 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 1.22 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 15 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), se obtiene la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ :

$$k_{2C} = 2$$

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CB_r} C = 2 \times 15.55 \text{ m}\Omega \times 96 \text{ mF} = 2.99 \text{ ms}$$

#### III.1.4. D. Corriente de corto circuito debido a la contribución del motor M.

Resistencias y reactancias del motor cuando el corto circuito es en el punto de falla F4.

$$R_{MBr} = R_M + R_{L2} + R_{L1} = (45 + 0.25 + 0.55) \text{ m}\Omega = 45.8 \text{ m}\Omega$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{L2} + L_{L1} = (500 + 3.87 + 7.0) \mu\text{H} = 510.87 \mu\text{H}$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} = \frac{510.87 \mu\text{H}}{45.8 \text{ m}\Omega} = 11.15 \text{ ms}$$

Corriente de corto circuito casi estable  $I_{kM}$

$$I_{kM} = 0 \quad n \rightarrow 0$$

Corriente de corto circuito pico  $i_{pM}$ :

$$i_{pM} = K_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBr}} = 0.9 \frac{200 \text{ V} - 472 \text{ A} (0.045 \Omega)}{45.8 \text{ m}\Omega} = 3.51 \text{ kA}$$

Ya que el factor  $K_M$  depende de la constante de tiempo mecánica  $\tau_{mec}$ , es decir, si  $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$  el factor  $K_M = 1.0$ , en caso contrario  $K_M$  dependerá de  $1/\delta$  y  $\omega_0$ :

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_{oM} J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \quad \tau_{mec} = \frac{2\pi 1.08 n_{rM} J R_{MBr} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2\pi n_{rM}} U_{rM}}$$

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi 1.08 \times 25 \text{ s}^{-1} \times 6.6 \text{ kgm}^2 \times 45.8 \text{ m}\Omega \times 472 \text{ A}}{\frac{95 \text{ kW}}{2\pi \times 25 \text{ s}^{-1}} \times 200 \text{ V}}$$

Donde  $P_{rM}$  es la potencia mecánica del motor.

$$\tau_{mec} = 200 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F / R_F = 11 \text{ H} / 11 \Omega = 1 \text{ s}$$

$$\tau_{mec} = 200 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$$

Por lo tanto, de acuerdo a las siguientes ecuaciones y de la gráfica 17 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1):

$$1/\delta = 2\tau_M = 22.30 \text{ ms}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec}\tau_M} \left(1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}}\right)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{200\text{m}\Omega \times 11.15\text{ms}} \left(1 - \frac{0.045\Omega \times 472\text{A}}{200\text{V}}\right)} = 20.02\text{s}^{-1}$$

Se obtiene:  $K_M = 0.88$

De acuerdo con  $1/\delta = 2\tau_M = 22.30 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.02 \text{ s}^{-1}$  y de la gráfica 19 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), el tiempo pico  $t_{pM}$  para el decremento de velocidad es:

$$t_{pM} = 55 \text{ ms}$$

Empleando  $1/\delta = 2\tau_M = 22.30 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.02 \text{ s}^{-1}$  así como la gráfica 20 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ ; se obtiene el factor  $k_{3m} = 0.88$ .

La constante de tiempo de ascenso es:

$$\tau_{1M} = k_{3m} \tau_M = 0.88 \times 11.15 \text{ ms} = 9.82 \text{ ms}$$

Además, con  $1/\delta = 2\tau_M = 22.23 \text{ ms}$ ,  $\omega_0 = 20.02 \text{ s}^{-1}$ , la gráfica 21 de IEC 61660-1 (consultar en la falla F1), y el decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ , proporciona el factor  $k_{4m} = 1.2$ .

La constante de tiempo de descenso es:

$$\tau_{2M} = k_{4m} \tau_{mec} = 1.2 \times 200 \text{ ms} = 240 \text{ ms}$$

### **Factores de corrección del Capacitor $\sigma_j$ calculados para las cargas del Rectificador D, Capacitor C y Motor M.**

El factor de corrección para la batería se hace  $\sigma_B = 1.0$  porque la corriente de corto circuito debido a la contribución de la batería  $i_B(t)$  es directamente alimentada hacia el corto circuito en el punto de falla F4.

Tabla 5 – Obtención de las resistencias  $R_{ij}$  y  $R_{resj}$

Fuente j de Corto Circuito	$R_{ij}$	$R_{resj}$
Rectificador D	$R_{iD} = \frac{U}{i_{kD}} - R_y = \frac{U}{i_{kD}} = R_{Li} \quad 1)$ $R_{iD} = \frac{220V}{26.43kA} = 0m\Omega$ $R_{iD} = 7.77m\Omega$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}} = R_{iM} \quad 2)$ $R_{iD} = 45.25m\Omega$
Capacitor C	$R_{iC} = R_C = 15m\Omega$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}} = R_{iD} \quad 2)$ $R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}}$ $R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{7.77m\Omega} + \frac{1}{45.25m\Omega}}$ $R_{iD} = 6.63m\Omega$
Motor B	$R_{iM} = R_M + R_{L2}$ $R_{iM} = 45m\Omega + 0.25m\Omega$ $R_{iM} = 45.25m\Omega$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}} = R_{iD} \quad 2)$ $R_{iD} = 7.77m\Omega$

1) Voltaje antes del corto circuito  $U = 220 V$ .  
 2) La batería se omite porque en este caso para la falla F4 ya que no está en paralelo al el rectificador y el motor.

Para el rectificador:

$$\sigma_D = \frac{R_{resD}(R_{iD} + R_{L1})}{R_{resD}R_{iD} + R_{iD}R_{L1} + R_{L1}R_{resD}}$$

$$\sigma_D = \frac{45.25m\Omega(7.77m\Omega + 0.55m\Omega)}{45.25m\Omega \times 7.77m\Omega + 7.77m\Omega \times 0.55m\Omega + 0.55m\Omega \times 45.25m\Omega}$$

$$\sigma_D = 0.988$$

Para la batería:

$$\sigma_B = 1.0$$

Para el capacitor:

$$\sigma_C = \frac{R_{resC}(R_{iC} + R_{L1})}{R_{resC}R_{iC} + R_{iC}R_{L1} + R_{L1}R_{resC}}$$

$$\sigma_C = \frac{6.63m\Omega(15m\Omega + 0.55m\Omega)}{6.63m\Omega \times 15m\Omega + 15m\Omega \times 0.55m\Omega + 0.55m\Omega \times 6.63m\Omega}$$

$$\sigma_C = 0.925$$

Para el motor:

$$\sigma_M = \frac{R_{resM}(R_{iM} + R_{L1})}{R_{resM}R_{iM} + R_{iM}R_{L1} + R_{L1}R_{resM}}$$

$$\sigma_M = \frac{7.77m\Omega(45.25m\Omega + 0.55m\Omega)}{7.77m\Omega \times 45.25m\Omega + 45.25m\Omega \times 0.55m\Omega + 0.55m\Omega \times 7.77m\Omega}$$

$$\sigma_M = 0.934$$

### III.1.4. E. Tabla de resultados

En la tabla 6 se muestran las corrientes corregidas  $i_{pcorj}$  y  $I_{kcorj}$ :

Tabla 6. Corrientes de corto circuito debidas a la contribución del Rectificador, Batería, Capacitor y Motor, así como la corriente total en el alimentador L1 y el punto de falla F4.

FUENTE DE CORTO CIRCUITO	$\sigma_j$	$i_{pj}$ kA	$i_{pcorj}$ kA	$I_{kj}$ kA	$I_{kcorj}$ kA	$t_{pj}$ ms	$\tau_{1j}$ ms	$\tau_{2j}$ ms
Rectificador	0.988	28.84	28.52	26.45	26.15	15.62	6.91	4.99
Batería B	1.0	17.95	17.04	15.35	15.35	9.0	1.5	100
Capacitor C	0.925	10.40	9.63	0	0	0.8	0.272	2.99
Motor M	0.934	3.51	3.28	0	0	55	9.82	240
Corriente de corto circuito total en F4	-		57.6		45.27	9	3	*

\* Se puede obtener directamente de una simulación.

Obtención de las corrientes corregidas presentadas en la tabla 6.

$$i_{pcorj} = \sigma_j i_{pj}$$

$$i_{kcorj} = \sigma_j i_{kj}$$

Para el rectificador:

$$i_{pcorj} = 0.988 \times 28.84 \text{ kA} = 28.52 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0.988 \times 26.45 \text{ kA} = 26.15 \text{ kA}$$

Para la batería:

$$i_{pcorj} = 1 \times 17.95 \text{ kA} = 17.95 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 1 \times 15.35 \text{ kA} = 15.35 \text{ kA}$$

Para el capacitor:

$$i_{pcorj} = 0.925 \times 10.40 \text{ kA} = 9.63 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0$$

Para el motor:

$$i_{pcorj} = 0.934 \times 3.51 \text{ kA} = 3.28 \text{ kA}$$

$$i_{kcorj} = 0$$

Corrientes de corto circuito debidas a la contribución del Rectificador D, Capacitor C y Motor M, fluyendo por el alimentador L1 de la batería en el punto F4, en el cual se produce un corto circuito.

La corriente de corto circuito que fluye por el alimentador L1 de la batería es determinada por el método de superposición de las corrientes de corto circuito de contribución  $i_D(t)$ ,  $i_C(t)$  y  $i_M(t)$ . Esta corriente es decisiva para el diseño del alimentador L1, por tanto esta función de aproximación estándar es calculada también.

La corriente de corto circuito que fluye hacia el corto circuito en el punto F4 se determina con la siguiente figura de la superposición de la corrientes de corto circuito de contribución  $i_D(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  y  $i_M(t)$ .



**Rectificador D:**

$$i_{1D}(t) = i_{pcorD} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-tpD/\tau_{1D}}} = 28.52 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/6.91 \text{ ms}}}{1 - e^{-15.62 \text{ ms}/6.91 \text{ ms}}}$$

$$i_{1D}(t) = 31.84 \text{ kA} (1 - e^{-t/6.91 \text{ ms}})$$

$$p_D = i_{kcorD} / i_{pcorD} = 26.15 \text{ kA} / 28.52 \text{ kA} = 0.917$$

$$i_{2D}(t) = i_{pcorD} [(1 - p_D) e^{-(t-tpD)/\sigma_{2D}} + p_D]$$

$$i_{2D}(t) = 28.52 \text{ kA} [0.917 + 0.083 e^{-(t-15.62 \text{ ms})/4.99 \text{ ms}}]$$

$$i_{2D}(t = 100 \text{ ms}) = 26.15 \text{ kA}$$

**Batería B:**

$$i_{1B}(t) = i_{pcorB} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1B}}}{1 - e^{-tpB/\tau_{1B}}} = 17.95 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/1.5 \text{ ms}}}{1 - e^{-9 \text{ ms}/1.5 \text{ ms}}}$$

$$i_{1B}(t) = 17.99 \text{ kA} (1 - e^{-t/1.5 \text{ ms}})$$

$$P_B = i_{kcorB} / i_{pcorB} = 15.35 \text{ kA} / 17.95 \text{ kA} = 0.855$$

$$i_{2B}(t) = i_{pcorB} ((1 - P_B) e^{-(t-tpB)/\tau_{2B}} + P_B)$$

$$i_{2B}(t) = 17.95 \text{ kA} (0.855 + 0.145 e^{-(t-9 \text{ ms})/100 \text{ ms}})$$

$$i_{2B}(t = 100 \text{ ms}) = 16.39 \text{ kA}$$

**Capacitor C:**

$$i_{1C}(t) = i_{pcorC} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1C}}}{1 - e^{-tpC/\tau_{1C}}} = 9.63 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/0.272 \text{ ms}}}{1 - e^{-0.8 \text{ ms}/0.272 \text{ ms}}}$$

$$i_{1C}(t) = 10.17 \text{ kA} (1 - e^{-t/0.272 \text{ ms}})$$

$$P_C = i_{kcorC} / i_{pcorC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = i_{pcorC} e^{-(t-t_{pC})/\tau_{2C}} = 9.63 \text{ kA } e^{-(t-0.8 \text{ ms})/2.99 \text{ ms}}$$

$$i_{2C}(t = 100 \text{ ms}) = 0 \text{ A}$$

### Motor M:

$$i_{1M}(t) = i_{pcorM} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1M}}}{1 - e^{-t_{pM}/\tau_{1M}}} = 3.28 \text{ kA } \frac{1 - e^{-t/9.82 \text{ ms}}}{1 - e^{-55 \text{ ms}/9.82 \text{ ms}}}$$

$$i_{1M}(t) = 3.29 \text{ kA } (1 - e^{-t/9.82 \text{ ms}})$$

$$P_M = i_{kcorM} / i_{pcorM} = 0$$

$$i_{2M}(t) = i_{pcorM} e^{-(t-t_{pM})/\tau_{2M}} = 3.28 \text{ kA } e^{-(t-55 \text{ ms})/240 \text{ ms}}$$

$$i_{2M}(t = 100 \text{ ms}) = 2.72 \text{ kA}$$

Para obtener  $i_k$  total se considero  $t = T_k$  para cada componente del sistema y en este caso  $T_k = 100 \text{ ms}$ , obteniendo por superposición la corriente para cada uno de éstos. Haciendo la suma se obtiene que:

$$i_k = i_{1D} + i_{2B} + i_{2C} + i_{2M} = (26.15 + 16.39 + 0 + 2.72) \text{ kA} = 45.27 \text{ kA}.$$

Para obtener  $i_p$  se toma el mínimo de los  $t_p$  de los componentes del sistema, sin considerar el capacitor y se obtiene para ese  $t_p$  mínimo los valores de corriente para cada componente y finalmente se realiza la suma.

$$i_{2D}(t = 9 \text{ ms}) = 28.52 \text{ kA } (0.917 + e^{-(9 \text{ ms} - 15.62 \text{ ms})/4.99 \text{ ms}}) = 35.05 \text{ kA}$$

$$i_{2B}(t = 9 \text{ ms}) = 17.95 \text{ kA } (0.855 + 0.145 e^{-(9 \text{ ms} - 9 \text{ ms})/100 \text{ ms}}) = 17.95 \text{ kA}$$

$$i_{2C}(t = 9 \text{ ms}) = 9.63 \text{ kA } e^{-(9 \text{ ms} - 0.8 \text{ ms})/2.99 \text{ ms}} = 0.62 \text{ kA}$$

$$i_{2M}(t = 9 \text{ ms}) = 3.28 \text{ kA } e^{-(9 \text{ ms} - 55 \text{ ms})/240 \text{ ms}} = 3.97 \text{ kA}$$

$$i_p = (35.05 + 17.95 + 0.62 + 3.97) \text{ kA} = 57.6 \text{ kA}$$

Para calcular  $\tau_1$  total se toma en cuenta lo siguiente:

$$\tau_1 = t_p/3 \text{ donde } t_p \text{ es el m\u00ednimo.}$$

Por lo tanto:

$$\tau_1 = 9 \text{ ms} / 3 = 3 \text{ ms}$$

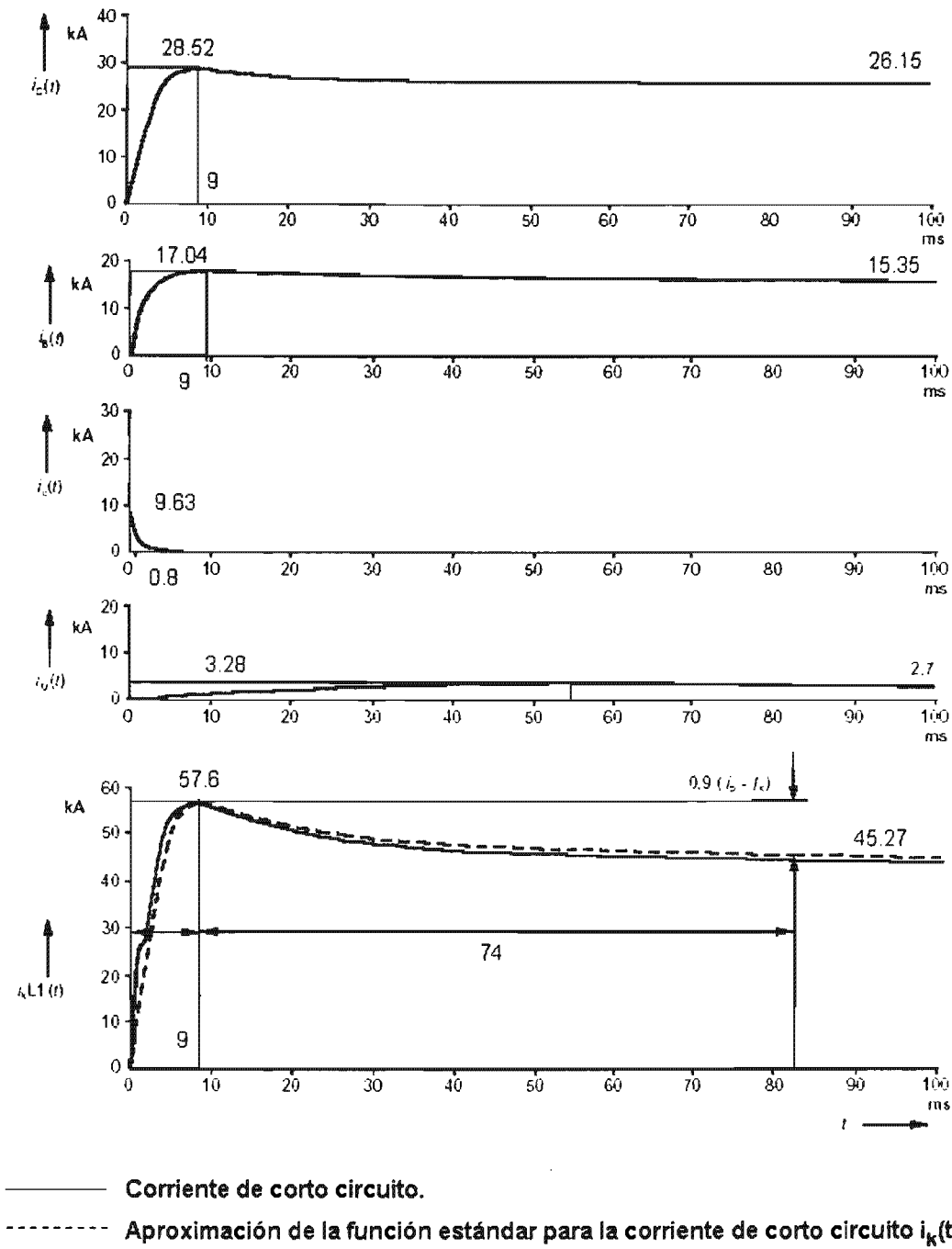


Figura 5. Gráficas de las corrientes de corto circuito para el punto de falla F4.

# CAPÍTULO IV

## **CAPÍTULO IV APLICACIONES DEL ANALISIS DE CORTO CIRCUITO**

### **IV.1. INTERRUPTORES EN BAJA TENSIÓN EN SISTEMAS DE CD**

#### **IV.1.1. Introducción**

En baja tensión hay equipos que utilizan corriente directa como son los sistemas de control, los sistemas ininterrumpibles de potencia (UPS) y los sistemas de telecomunicaciones, los cuales han recibido mayor atención en los años recientes. Hay dos razones para ello, la potencia necesaria y la atención de las agencias reguladoras. Esta parte del capítulo intenta ayudar a llenar un hueco existente con material disponible acerca de la aplicación y rangos característicos de los interruptores de baja tensión en sistemas de CD.

Aquí se presentaran brevemente las funciones básicas de interrupción y de protección de un interruptor instantáneo, la tecnología utilizada para censar e interrumpir en condiciones de sobrecorriente, en condiciones normales de operación y alguna aplicación básica de guía de línea.

Un objetivo es incrementar el conocimiento entre la diferencia de un circuito de CA y uno de CD así como sus factores de protección y clasificación. Otro es hacer un informe sencillo del hecho de que los interruptores señalados con la palabra CD están dentro de una clasificación válida.

#### **IV.1.2. Función básica de un interruptor automático.**

Como se define en el artículo 100 del Código Nacional Eléctrico NEC, un interruptor es: "Un dispositivo diseñado para abrir y cerrar un circuito por un medio no automático y abrir un circuito automáticamente por una sobrecorriente predeterminada sin que se dañe el mismo cuando es aplicado apropiadamente dentro de su rango". En otras palabras, tiene dos funciones. La primera es interrumpir la corriente en cierto valor en proporción al voltaje. La segunda es percibir las condiciones de sobrecorriente y efectuar la apertura automáticamente para proteger por sobrecorriente.

Refiriéndonos a la figura 4.1-1, el interruptor típico tiene un juego de contactos que pueden ser manualmente accionados para abrirse o cerrarse utilizando una palanca. Esto lleva a cabo la primera función. En un interruptor multipolo, todos los polos están ligados mecánicamente para abrirlos y cerrarlos al mismo tiempo. La operación puede ser por medio de resortes precargados o eléctricamente (por medio de un motor) en lugar de operarlos manualmente, especialmente para interruptores más grandes.

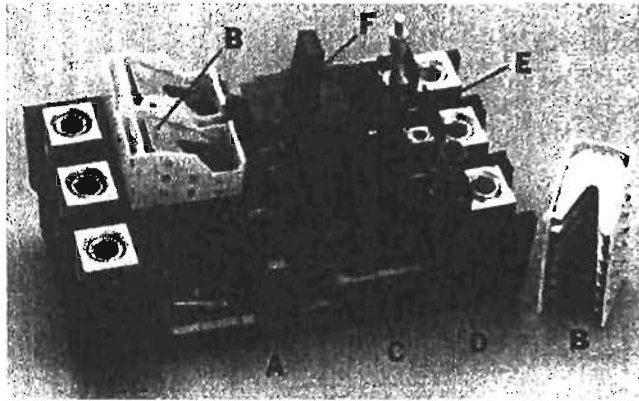


Figura 4.1-1. Interruptor de caja moldeada. A: contactos, B: Cámara de arqueo, C: bimetetal, D: imán, E: mecanismo, F: palanca.

El interruptor también tiene un sistema que censa la corriente para cada uno de los polos. El sistema sensor es empalmado mecánicamente a un seguro. Si una condición de sobrecorriente es alcanzada y sostenida por un tiempo predeterminado de retraso, el elemento sensor puede causar la apertura del mecanismo. El interruptor es abierto automáticamente por medio de la energía reservada en el resorte en cuanto su mecanismo es liberado. Ya que los polos de un interruptor multipolo son unidos mecánicamente, todos los polos son abiertos. El sistema realiza la segunda función de proteger por sobrecorriente. Una vez que la sobrecorriente ha pasado, el interruptor puede ser reajustado y es entonces puesto en condiciones nuevamente para realizar una nueva apertura. La corriente censada del sistema puede ser contenida en un elemento disipador intercambiable o puede ser una parte integrada de un interruptor sellado.

#### **IV.1.2.A. Variedad de interruptores.**

Esta discusión se desarrollará alrededor del interruptor de caja moldeada. La misma discusión se referirá a interruptores de potencia de baja tensión e interruptores de caja aislada excepto los que se tratarán bajo la clasificación posterior dentro de este capítulo. Como una ayuda para la distinción entre los diversos tipos de interruptores disponibles, se proporciona la siguiente descripción.

*Interruptor de Caja Moldeada (MCCB):* Es un interruptor que se ensambla como un elemento integrado en un soporte que esta incluido en el material aislante. Los MCCB's se encuentran típicamente en rangos de 10 hasta 2500 A, de 600 V o menos y se hacen funcionar por un mecanismo manual. Ellos son probados por la norma UL489.

*Interruptores de Potencia de Baja Tensión (LVPCB):* Es un interruptor para utilizarse en circuitos de rangos de 1000  $V_{CA}$  o menores, o 3000  $V_{CD}$  o menores, pero sin incluir los interruptores de caja moldeada. Los LVPCB's están por lo general en estructuras grandes y magnitudes desde 400 hasta 6000 A. Generalmente tienen un mecanismo que almacena energía en dos pasos. Son probados por la Serie de Estándares ANSI C37.

*Interruptor de Caja Aislada (ICCB):* Un interruptor con un soporte y encerrado en material aislante y con un mecanismo de dos pasos que almacena energía es un ICCB. Los ICCB's son típicamente de estructuras más grandes, se clasifican desde 400 hasta 5000 A. Son probados por la norma UL489, y en algunos casos específicos son también probados por la serie de estándares ANSI C37.

#### **IV.1.2.B. Variedad del elemento disparador**

*Termo magnético.* Estos son los elementos disparadores más comunes en CD basados en la clasificación de los MCCB's. En la sección IV.1.3 se tratarán sus características de disparo.

*Neumático-magnético.* Estos son de poco uso se utilizan en aplicaciones especiales de MCCB's. Un electroimán humedecido percibe la corriente neumáticamente en la región de tiempo largo. La única característica para aplicaciones en CD será proporcionada por el fabricante.

*Instantáneo.* Estos MCCB's disparan electromagnéticamente, proporcionando el disparo en el instante o corto circuito, en la región instantánea solamente. El nivel del disparo magnético es ajustable. A causa de ello tenemos sin protección la región de tiempo largo, los Underwriters Laboratories Inc. Recognized Components recomiendan la conveniencia de que la aplicación sea determinada por la UL u otra autoridad reconocida.

*Amortiguador Mecánico.* Este elemento disparador es instalado mas frecuentemente en LVPCB's o ICCB's. Cada uno tiene una característica única que es proporcionada por el fabricante. Éstos se prueban bajo el estándar C37.17 de ANSI (American National Standard for Trip Devices for AC and General-Purpose DC Low-Voltage Power Circuit Breakers)

*Disparador Electrónico.* Prácticamente todos los interruptores con elemento disparador electrónico utilizan un transformador de corriente para percibir la corriente. Ya que la corriente del transformador no es conveniente para circuitos en CD, este interruptor no es de utilidad para los circuitos de CD. Para los casos especiales en los cuales el interruptor dispararía electrónicamente será diseñado para percibir en CD, el fabricante debe de ser consultado para la aplicación de la información.

### **IV.1.3. Censando la sobrecorriente.**

#### **IV.1.3.A. Características termomagnéticas**

La figura 4.1-2 ilustra una curva típica de tiempo-corriente del disparo característico para un interruptor termomagnético. Actualmente en la mayoría de los casos, es provista por los fabricantes como la curva de CA, y sus múltiplos son dados para que en sus aplicaciones en ingeniería se pueda convertir y poder utilizarla en circuitos de CD.



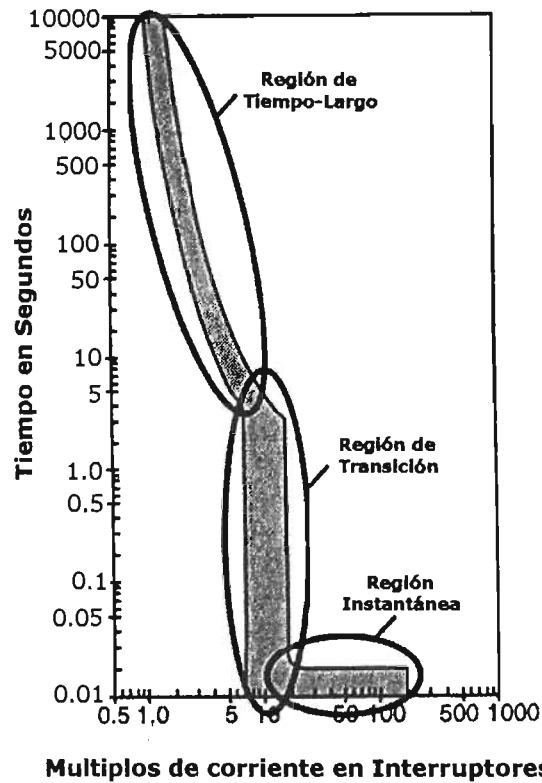


Figura 4.1-2. Curva típica de tiempo-corriente para una unidad de disparo termomagnética no ajustable.

El disparador característico puede ser separado en tres regiones: la región de retraso que es el tiempo-largo en la parte superior de la curva, la región de transición en el centro y la región instantánea en la base.

#### IV.1.3.B. Región de tiempo-largo

La región de retraso tiempo-largo generalmente incluye corrientes desde el 100% del valor que el interruptor alcanzaría indefinidamente para el nivel en el cual la corriente ordenaría comenzar instantáneamente el disparo. En la mayoría de los casos el nivel en este tiempo largo es superior en aproximadamente el 500% del valor de la corriente. El elemento que censa en esta región es un bimetálico para el interruptor termomagnético. El bimetálico es calentado por el flujo de corriente a través del interruptor. La desviación es proporcional a  $I^2$  de tal manera que se comporte como un sensor ideal de corriente rms. La desviación en CD sería la misma como con el valor rms de CA, así que el tiempo característico de corriente es el mismo para ambos en la región de retraso tiempo-largo.

### **IV.1.3.C. Región de transición**

La región de transición generalmente cubre la sobrecorriente justo arriba de las cercanías de la corriente de rotor bloqueado para motores, normalmente de 400 A a 1200 A del valor de la corriente. El tiempo de disparo en esta región no está definido con precisión, ya que es aquí donde la transición de térmico a magnético ocurre en el disparo. Dependiendo del nivel de flujo de corriente, el disparo puede ser térmico, con la construcción del retraso mostrado en la curva térmica o con un retraso magnético no intencional. El disparo magnético se puede considerar como que no hace caso durante el disparo térmico para niveles de corriente mayores. El electroimán es activado por el flujo de corriente a través del interruptor. La fuerza magnética es proporcional al cuadrado del valor instantáneo de la corriente, más que el valor rms sobre algunos periodos. La corriente en CA que dispara en la curva es expresada en términos de valores rms mientras que la corriente en CD es expresada con valores instantáneos. Esta diferencia al expresar las corrientes es un factor esencial en el ajuste de las curvas de los sistemas en CA y CD.

Hay otro factor de diferenciación a partir del disparo en CA y CD que tiene que ver con ciclos de fuerza a partir de ciclos de CA. Bajo una sobrecorriente en CA la armadura puede “castañear”, golpeando el seguro apagándolo parcialmente con cada ciclo eléctrico. En CD, la fuerza del imán debe de ser suficiente para abrir con un solo movimiento forzado.

Otras diferencias entre CD y CA pueden ser las características en la región de transición ya que son únicas para cada proyecto.

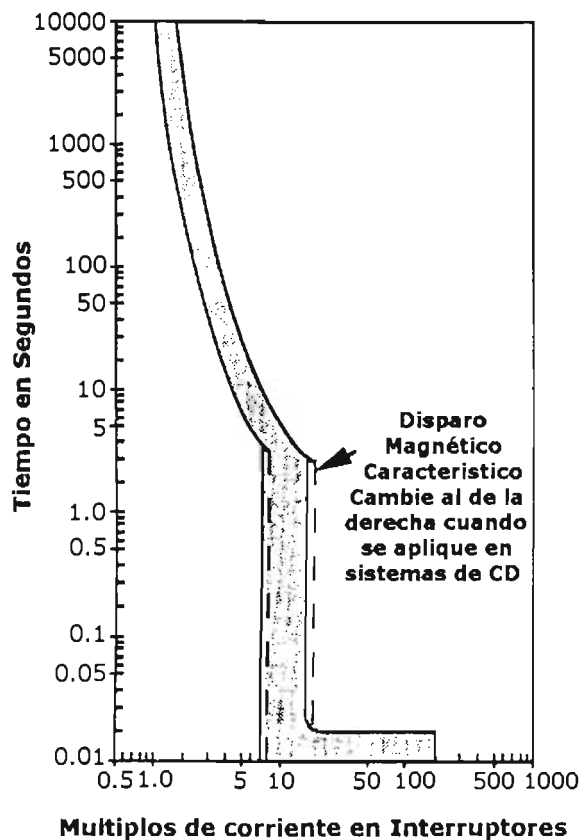


Figura 4.1-3. Curva característica de un MCCB termomagnético modificado para aplicarse en CD.

Combinando varias diferencias, los fabricantes generalmente proporcionan ajustes para las curvas de disparo en la región de transición en forma de múltiplos o curvas de disparo redibujadas en CA. El efecto de estos ajustes es para incrementar ligeramente los niveles indicados en CA del disparo magnético cuando el mismo interruptor es utilizado en circuitos de CD como se indica en la figura 4.1-3. Varios fabricantes expresan esta diferencia aplicando un factor de multiplicación de 1.1 a 1.4 al tiempo de disparo en CA para el de CD.

Varios fabricantes suministran interruptores con niveles especiales de disparo magnético diseñados bajo estándares y proyectados para protección de baterías en contra de sobrecargas sostenidas.

#### IV.1.3.D. Región instantánea

La región instantánea es el alcance del disparo en el nivel de corriente superior al de transición. En esta región, el disparo y disipación son instantáneos, sin retraso intencional, sea en un circuito de CA o de CD. El disparo es realizado por el electroimán antes discutido para la región de sobrecarga. El tiempo verdadero de dispersión varía dependiendo según sea el circuito de CA o de CD en el diseño del sistema de interrupción del interruptor. Sin embargo, el tiempo máximo total de

dispersión es en general expresado conservadoramente como una duración larga en la curva de disparo de CA a causa del gran número de otras variables tan largas como la elevación de corriente cuya constante de tiempo es de 10 ms o menos. A no ser que se aclare por el fabricante, el tiempo máximo de dispersión de CA también satisface al de CD.

#### IV.1.4. Interrupción de corriente en CD

##### IV.1.4. Circuito de corriente directa

El circuito conocido de CD típicamente aplicado para sistemas de distribución de baja tensión es mostrado en la figura 4.1-4. Contiene resistencia e inductancia, pero la capacitancia es considerada despreciable. Suponiendo que  $V$  es una onda cuadrada, la expresión para la corriente es:

$$i(t) = (V/R)(1 - e^{-Rt/L}) = (V/R)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

En la cual  $\tau = L/R$  es la constante de tiempo, o el tiempo en el cual la corriente alcanza 0.632 del valor pleno, en estado estable. El valor de estado estable o corriente máxima es  $I = V/R$ .

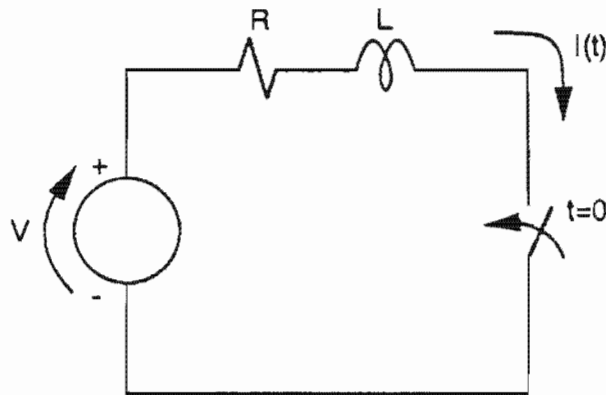


Figura 4.1-4 Circuito RL con interruptor.

En la figura 4.1-5, el circuito es más práctico para el propósito de esta discusión, y eso es debido a la adición de una carga inductiva y un interruptor que le precede. Para la figura 4.1-5, la expresión para la corriente es:

$$i(t) = [V / (R_S + R_L)] (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

En este caso la constante de tiempo es  $\tau = (L_S + L_L) / (R_S + R_L)$  y la corriente de estado estable cambia a  $I = V / (R_S + R_L)$ .

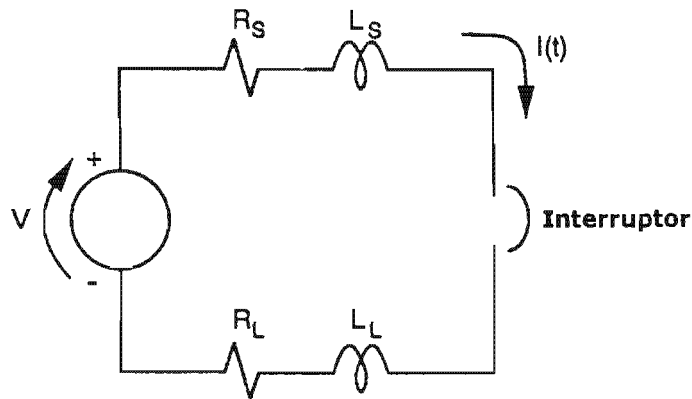


Figura 4.1-5 Circuito RL con interruptor y carga.

#### IV.1.4.B. Interrupción del circuito

La inductancia de este circuito almacena energía la cual intentará consumir a través de un arco eléctrico cuando el circuito es conmutado o interrumpido. Revisemos el arco de interrupción de CD, ello es útil para recordar detalles básicos del arco eléctrico.

En un cortocircuito, el arco estacionario tiene un voltaje típico con una distancia característica única tal como se muestra en la figura 4.1-6, de importancia para esta discusión es como se describe en P. J. McCleer, *The Theory and Practice Of Overcurrent Protection*. Jackson: Michigan Mechanical Products, 1987, "la disminución de voltaje o "caída" dentro de las regiones de decremento del cátodo o ánodo son funciones fuertes de los materiales utilizados como electrodos del cátodo y ánodo, pero funciones relativamente débiles del nivel de corriente en el arco". Y adicionalmente, "las magnitudes de los campos eléctricos (disminución de voltaje por unidad de distancia) dentro de las regiones de decremento del cátodo y ánodo son mucho más altas que las magnitudes de los campos dentro del cátodo y ánodo metálicos. Y mucho mayores que la magnitud del campo dentro de la región de plasma". Para nuestro propósito podemos utilizar la estimación proporcionada en F. W. Kussy and J. L. Warren, *Design Fundamentals for Low-Voltage Distribution and Control*. New York: Dekker, 1987, en el cual  $V_c$  esta alrededor de 10 V en el cátodo y  $V_a$  es de alrededor de 5 V en el ánodo.

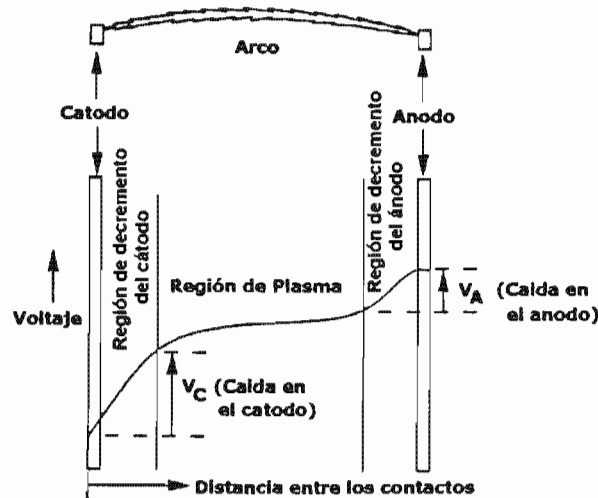


Figura 4.1-6 Característica voltaje-distancia del arco estacionario.

Otro enfoque importante del arco es la curva voltaje-corriente característica del arco estacionario mostrada en la figura 4.1-7. Es llamada resistencia característica del diferencial negativo. Para interrumpir el circuito y dispersar el arco, es necesario incrementar el voltaje hasta un punto en el cual el arco es inestable, en donde la conductividad del arco es baja. El mayor contribuyente para la conductividad en la región de plasma y que es influenciado por el dispositivo de interrupción es la temperatura.

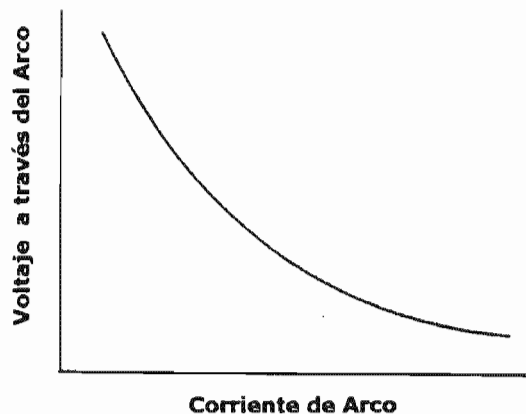


Figura 4.1-7. Curva característica voltaje-corriente del arco estacionario.

Se permitirá un movimiento para la interrupción del circuito utilizando un interruptor. Como los contactores del interruptor abren bajo condiciones de sobrecarga o corto circuito, un arco eléctrico es formado entre ellos. Partiendo de la discusión de arriba, sabemos que para extinguir y dispersar el arco es necesario:

- Levantar el voltaje a través del arco, y/o
- Disminuir la conductividad (ionización) por reducción de la temperatura en la región de plasma.

La cámara de arqueo es de placa metálica y las variaciones de este, es todavía la tecnología más común utilizada en la interrupción de circuitos en baja tensión. Utilizando este concepto el arco es forzado contra la pila de arco por medio de: a) la fuerza magnética de Lorentz que obliga la interacción de la corriente del arco con la placa de acero de la pila de arco, b) la fuerza magnética de Lorentz entre las partes del interruptor que transportan corriente y la corriente del arco, o c) a partir de la presión de gas tras el arco sacada de los materiales de la cámara de arco tiene como propósito la ablación de las altas temperaturas del arco. La pila divide al arco en un número de pequeños arcos en serie, cada uno con un perfil semejante al mostrado en la figura 6. Cada segmento de arco tiene su propia caída de cátodo y ánodo y el voltaje resultante a través de la serie de arcos es incrementado. Añadiendo, la superficie de metal de la placa absorbe calor desde el arco y disminuye la temperatura y el grado de ionización. Bajo condiciones apropiadas de refrigeración y separación, el arco llega a ser inestable y por lo tanto extinguido. Entonces, la separación de contacto es tan larga como suficientemente dieléctrica y el grado de enfriamiento es suficiente para desionizar la cámara, el arco quedaría sin dominio y la interrupción es realizada.

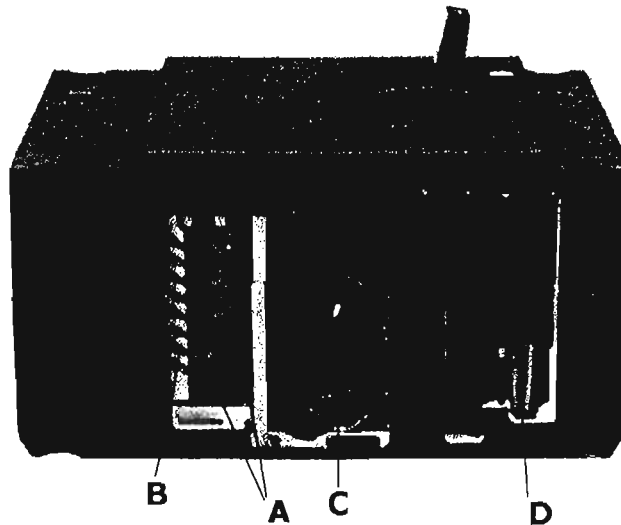


Figura 4.1-8 MCCB limitador de corriente. A: contactos; B: Cámara de arqueo; C: bimetálico; E: imán.

Un incremento significativo de la corriente restrictiva diseñada junto con el contacto es libre de moverse independientemente del mecanismo. La fuerza magnética abre los contactos exactamente con el paso de la corriente de corto circuito puesto que su magnitud se incrementa sin que espere a que el sistema sensor, el seguro y el mecanismo reaccionen. En muchos de estos diseños, el arco es forzado hacia la cámara con una fuerza magnética a partir del flujo de la corriente de falla. Y en algunos casos, con acero laminado se rodean los contactos

formando una ranura de motor que aumenta la velocidad de apertura de contactos así como el movimiento hacia la pila de arco. En cualquiera de estas variaciones el arco es accionado, enfriado y extinguido muy rápidamente en varios milisegundos.

Otra variación es la de contactos múltiples. Un grupo de fabricantes de interruptores proporciona interruptores con polos conectados en serie cuando se utilizan en circuitos de CD, especialmente en aquellos superiores a 250 V<sub>CD</sub>. Este procedimiento separa al arco en varios arcos distintos, cada uno con su propia caída de cátodo y ánodo, así como de características de extinción diferentes a las del diseño.

La velocidad es uno de los factores más críticos para la interrupción, especialmente en circuitos de CD. La refrigeración de la región de plasma del arco es una causa fundamental de la inestabilidad del arco, esto se llega a limpiar durante la falla, el calor excedente es transferido a los elementos del interruptor lo que enfriara al arco. Por consiguiente, un arco que se vuelve estable dentro de una cámara caliente de arco con contactos abiertos puede que nunca se extinga, por lo menos dentro del tiempo esperado para la protección por sobrecorriente. Esta es una de las razones por la que son importantes para seleccionar los diseños que serán aprobados para el rango en el cual serán aplicados para cualquiera de los niveles de corriente a conmutar o interrumpir.

Al considerar el factor de tiempo, vale la pena volver a revisar los parámetros del circuito y examinar el rango de tiempo de elevación de la corriente. La figura 4.1-9 muestra tres trazos de corriente para comparar.

Trazo 1: Corriente senoidal a 60 Hz solamente con resistencia; trazo de referencia.

Trazo 2: Corriente senoidal a 60 Hz, inductiva; con factor de potencia del 50%;  $X / R = 1.73$ ; máxima asimetría.

Trazo 3: Corriente directa; idéntica L y R como en el trazo 2;  $\tau = 0.0046$  s.

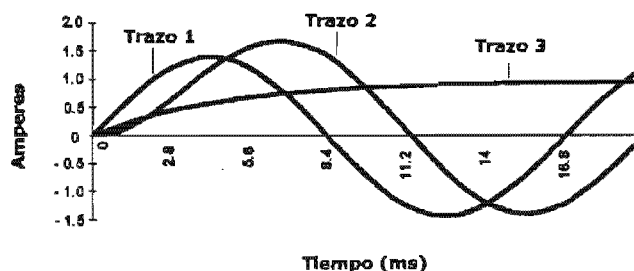


Figura 4.1-9 Corriente de corto circuito con  $L / R = 0.0046$ .

Las tres curvas entregan el mismo valor de corriente rms, en estado estable. No obstante la diferencia en el valor inicial de elevación que es dramática. La figura 4.1-10 muestra las mismas tres curvas pero con un circuito más inductivo: en CA



con un factor de potencia del 20% para el trazo 2 y  $\tau = 0.013$  s para el trazo 3. Además en la figura 4.1-10 los mismos valores de R y L son utilizados para los trazos 2 y 3.

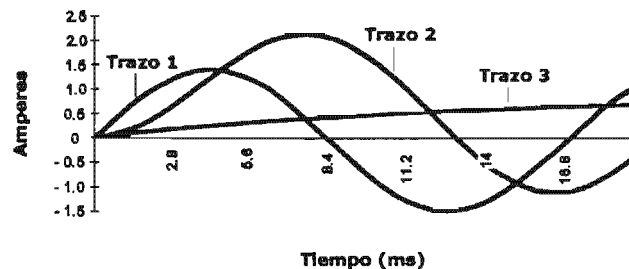


Figura 4.1-10. Corriente de corto circuito con  $L/R = 0.013$ .

Las fuerzas que operan dentro del interruptor para censar el nivel de corriente, separar contactos y el arco continuo son por lo general proporcionales al cuadrado de la corriente instantánea,  $i^2(t)$ . Cualquiera de esas condiciones se produciría rápidamente en un circuito de CA o de CD. Un retraso relativo en percibir y moverse para interrumpir el circuito de CD puede reducir la efectividad de la cámara de arco para forzar el arco hacia la placa de arco y/o puede causar un calentamiento adicional debido a la duración de la corriente de falla en comparación con el circuito de CA. La fuerza tiende a dañar el aislamiento o desplazar los elementos del circuito rápidamente, esto también ocurre en el circuito de CA. El funcionamiento del mismo interruptor en un circuito de CA se espera que fuera muy diferente al de un circuito de CD aunque los parámetros del circuito parecen ser los mismos.

Otra diferencia importante entre la interrupción de los circuitos de CA y de CD es ilustrada en los trazos mostrados en las figuras 4.1-9 y 4.1-10. En el caso de la corriente alterna, la corriente pasa a una corriente nula por ser un voltaje senoidal. En este caso, si el grado de ionización es suficientemente bajo aunque la corriente normalmente alcance un valor nulo en una onda senoidal, el arco no es dominado y la sobrecorriente es dispersada. En este sentido, el circuito de CA tiene poco soporte de capacidad interruptiva. En muchos diseños, los interruptores restringen la corriente para aproximarla a un valor nulo lo más rápido posible ya que éstos no pueden esperar un periodo de la onda senoidal durante condiciones de corto circuito. Para esas interrupciones, es indiferente que el circuito sea de CA o de CD, ya que la interrupción es iniciada y prolongada a través y durante el inicio de la corriente de falla. Sin embargo el coeficiente de elevación o forma de la corriente transitoria tiene una influencia significativa sobre la capacidad de sistemas mecánicos y eléctricos dentro del interruptor para causar la interrupción.

Puesto que el tiempo de elevación de la corriente es importante para una aplicación adecuada, es necesario estar consciente de que el tiempo de elevación varía en el orden para proteger los componentes de ciertos circuitos. Considerando el circuito equivalente de Thévenin visto a partir de la falla con

respecto a la fuente, tal como se representa en la figura 4.1-4, cuando el sistema es suministrado a partir de un gran generador y quizás vinculado a líneas de transmisión, el circuito es muy inductivo. Cuando el sistema es suministrado a partir de baterías y la falla es cercana a las terminales de la batería, el tiempo de elevación de la corriente es muy rápido así como con inductancia pequeña. Sin embargo, la corriente disminuye dentro de un sistema de baterías con cables y cargas semejantes al mostrado en la figura 4.1-5 donde el tiempo de elevación es largo. El generador y las baterías son sistemas parecidos que suministran energía con tiempo de elevación de corriente a diferente potencial.

Ejemplos de interrupciones reales de CD y de CA son mostrados en las figuras 4.1-11 y 4.1-12 respectivamente.

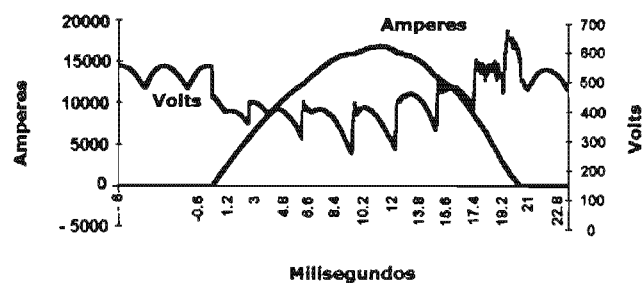


Figura 11. Interrupción en CD de un MCCB a 1000 A.

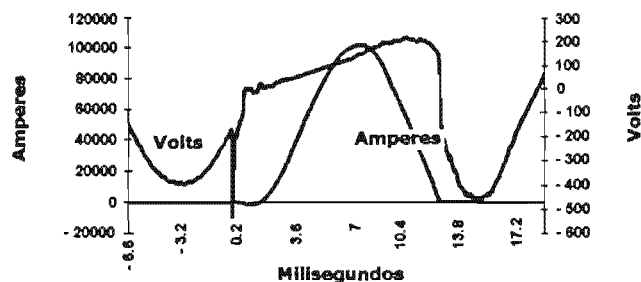


Figura 12. Interrupción en CA de un MCCB a 1000 A.

Para resumir la interrupción en CD se tienen los siguientes puntos:

- 1) La interrupción del sistema debe de alargar, separar y enfriar el arco lo suficiente para reducir la ionización a un punto en el cual la corriente no pueda ser sostenida. Las leyes físicas son las mismas como en el caso de la corriente alterna, excepto que, la conducción del voltaje no es senoidal y no causa una condición normal de corriente nula.
- 2) La constante de tiempo de CD para la cual el interruptor es valorado debe de ser igual o mayor que la del sistema en el cual es utilizado. La variedad de sistemas de CD sería instalada y provista de una variedad de constantes

de tiempo, aparentemente, que pueden no corresponder a aquellos para los cuales el interruptor dice ser probado bajo estándares existentes.

- 3) El rango de pruebas en CD debe de cubrir plenamente las variaciones de corriente, desde el tiempo-largo a través del rango de interrupción de corto circuito.
- 4) El interruptor debe de ser probado y clasificado para su aplicación en CD. Una correlación entre la clasificación de CA y de CD normalmente no puede ser establecida y las pruebas son el único camino para verificar la realización de la interrupción.

#### **IV.1.5. Clasificación, prueba y certificación**

##### **IV.1.5.A. Interruptores de Caja Moldeada e Interruptores de Caja Aislada.**

Los MCCB's y los ICCB's para su aplicación bajo el Código Eléctrico Nacional NEC son certificados con la norma UL489 (Molded-Case Circuit Breakers and Circuit Breaker Enclosures, UL Standard 489, 1991) ya sea para CA o CD, son sometidos a una serie de pruebas en cada una de las tres regiones características de la curva. Estas pruebas son amplias en la evaluación del funcionamiento del interruptor para el rango demandado. Sin tener en cuenta si la certificación UL es requerida en la aplicación, ésta debe de ser considerada, la serie de pruebas de la UL489 tendrían una exposición de tiempo superior para demostrar una protección segura y adecuada sobre una extensión de condiciones cuando los interruptores son aplicados dentro de sus rangos. Con respecto a la clasificación para la protección de UPS o sistemas de baterías, ahí son varios los factores a los cuales pondremos especial atención.

- 1) Hacer una lista de MCCB's para utilizarse con Suministros de Potencia Ininterrumpible (UPS): la UL489 contiene un suplemento con requisitos específicos para protección de baterías en UPS. Los interruptores certificados para esos requisitos son marcados con el siguiente mensaje: "Para uso exclusivo en UPS". Esos requisitos son idénticos en esencia con los de la UL489, requisitos con los siguientes puntos especiales:
  - a) Voltaje nominal y máximo (flotante): Considerando que los sistemas de baterías fluctúan por encima del voltaje nominal cuando la carga es mínima, las pruebas de resistencia y sobre carga son hechas en el voltaje máximo (flotante). Además, la prueba de nivel de resistencia dieléctrica se basa en el voltaje máximo. Ambos voltajes, nominal y máximo son marcados en el interruptor.
  - b) Operación con sobrecarga y resistencia: Para algunos tamaños de estructuras, la cantidad de resistencia y operaciones en sobrecarga es reducida a partir de que se requiere para la aplicación general del

interruptor. No es de suponer que esos interruptores sean utilizados para aplicaciones con conmutaciones frecuentes.

- c) **Conexión de polos:** Muchos interruptores utilizados para la protección de circuitos de CD tienen sus polos conectados en serie, especialmente los superiores a 250 V<sub>CD</sub>. La figura 4.1-13 ilustra las conexiones más comúnmente especificadas. Por la conexión de los polos en serie, la interrupción del arco es compartida, permitiendo una elongación más efectiva y la segregación del arco inductivo. Los requisitos para tales conexiones son marcados en el interruptor y en las instrucciones para sus aplicaciones. Los interruptores conectados de esta manera no son considerados generalmente convenientes para utilizarse en sistemas con una polaridad y puesta a tierra como se discutirá en los sistemas de puesta a tierra más adelante.

La UL hace una lista de interruptores marcados con la clasificación de CD y no identificados como "Para uso exclusivo en UPS" que son apropiados para aplicaciones generales en CD así como para sistemas de UPS cuando el voltaje marcado es tomado como el voltaje máximo (flotante).

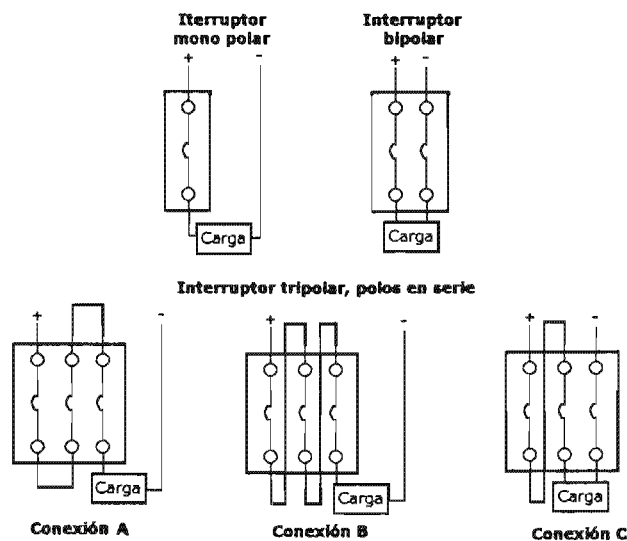


Figura 4.1-13 Conexiones más comunes de un interruptor en CD.

- 2) **Tiempo de elevación de la corriente:** Probado bajo la UL489, el tiempo de elevación de la corriente para la prueba de interrupción de circuitos es calculada para circuitos RL los cuales presentan elevación exponencial de la corriente en circuitos de corriente directa. Ese tiempo de elevación es expresado como la constante de tiempo, o el tiempo a partir de que inicia la corriente hasta que la corriente alcanza 0.632 de su valor máximo. Esta medida determina el grado de la impedancia reactiva en el circuito. Las constantes de tiempo son mostradas en la Tabla I. La adecuación de las

pruebas a esas constantes de tiempo puede ser necesaria para hacer el sujeto de evaluación en el diseño de sistemas de protección. Algunos diseños permiten ser evaluados para tiempos de elevación más largos asociados con algunas instalaciones de baterías. El fabricante debe de ser consultado para tal información.

Tabla I

Prueba	Corriente de prueba (amperes)	Constante de tiempo mínima (segundos)
Resistencia	Cualquiera	0.003
Sobre carga	Cualquiera	0.003
Corto circuito	10 000 y por debajo	0.003
Corto circuito	Arriba de 10 000	0.008

- 3) Sistemas de puesta a tierra: La UL lista diseños de interruptores que permiten ser probados en corto circuito con valor de voltaje pleno a través de polos individuales en los que se puede conseguir una interrupción limitada, la capacidad de la prueba es considerada adecuada para utilizarse en sistemas en los cuales una polaridad es puesta a tierra. Esos interruptores no tienen marca especial con respecto a la conexión a tierra. Los interruptores evaluados para utilizarse en UPS u otros sistemas utilizando las conexiones multipolo ilustradas en la figura 4.1-13, no son consideradas convenientes para utilizarse en sistemas de una polaridad puesta a tierra. La razón es que una falla simple a tierra puede causar una condición de sobrecorriente a voltaje pleno a través de un solo polo. Esas conexiones de multipolo en los interruptores son marcadas para utilizarse solamente en sistemas no aterrizados.

La clasificación típica de corriente continua disponible actualmente proporcionada por los fabricantes es mostrada en la Tabla II.

**Tabla II**  
**RANGOS TÍPICOS DE INTERRUPCIÓN EN CORRIENTE DIRECTA DE INTERRUPTORES DE CAJA MOLDEADA PARA APLICACIONES COMERCIALES E INDUSTRIALES.**

Amperes	Número de polos #	Rangos de interrupción en kilo amperes en voltaje de CD				
		125 V <sub>CD</sub>	250 V <sub>CD</sub>		500 V <sub>CD</sub> ** o 600 V <sub>CD</sub>	
		Estándar	Estándar	Alto	Estándar	Alto
100, 150	1	10				
	2		10	30		
	3				14	42
225, 250	2		10	30		
	3				20	42
400, 600	2		10	30		
	3				20	42
800, 1000	2		14	30		
	3				20	50
1200	2		14	30		
	3				25	50
1600 – 2500	2			30		
	3				25	50

\* No incluye los interruptores de caja moldeada proyectadas en primer lugar para aplicaciones residenciales.

Remitirse al fabricante en específico para información sobre aquellas construcciones residenciales.

\*\* Típicamente para 500 V nominales y 600 V máximo (flotante), para su aplicación en UPS. Algunos fabricantes tienen clasificaciones similares para otras aplicaciones y en otros voltajes.

# Ver diagramas de conexiones en la figura 4.1-13 para las configuraciones de los polos.

Nota: Las clasificaciones mostradas son típicas. Las variaciones entre los fabricantes o cambios en los productos pueden ser resultado de clasificaciones actuales, que difieren con respecto a las mostradas. Consultar la literatura específica del fabricante para una mejor orientación.

#### **IV.1.5.B. Interruptores de potencia en baja tensión.**

Los LVPCB's para su aplicación en sistemas de CD son evaluados y clasificados bajo las normas ANSI C37.14, C37.16 Y C37.17.

Los LVPCB's son marcados con sus rangos en CD y tienen un tiempo-corriente característico el cual se aplica específicamente en corriente continua y dados rangos de voltaje.

Por definición bajo el estándar ANSI / IEEE C 37.100:

Los interruptores de potencia de baja tensión en corriente continua son subdivididos según su capacidad específica para limitar la magnitud de la corriente de falla, por esencia llamados de propósito general, de alta velocidad, de velocidad media, o de ánodo.

Una sección de la "Guía de Aplicación" del ANSI / IEEE C37.14 provee mas detalles que se presentaran aquí. "Los interruptores de media velocidad limitan la corriente de corto circuito producida por máquinas rotatorias, baterías y celdas electrolíticas así que el valor de la cresta de la corriente no ocurre después de 30 ms posteriores al comienzo de la corriente de corto circuito y una proporción máxima de elevación de la corriente de corto circuito no menor que  $1.7 \text{ A} / \mu\text{s}$ ". En otro estado, "Los interruptores de alta velocidad limitan tanto a la corriente de corto circuito que el valor de la cresta de la corriente no ocurre después de 10 ms después de que la corriente de corto circuito alcance el valor de funcionamiento ajustado en el dispositivo disparador y un coeficiente de elevación de corriente de corto circuito no menor a  $5.0 \text{ A} / \mu\text{s}$ ". Los LVPCB's de propósito general no son proyectados para limitar la corriente de corto circuito.

Considerando la siguiente clasificación cuando se aplican los LVPCB's:

- Estimando el voltaje(s) máximo,
- Estimando la corriente directa (amperes rms)
- Estimando la corriente de carga máxima,
- Estimando la corriente de tiempo-corto (amperes rms),
- Estimar la corriente de corto circuito, y
- Estimar el control de voltaje(s).

Los factores son proporcionados en C37.14 y C37.16 y/o por los fabricantes para considerar la energía almacenada del sistema, el cual es un factor esencial en muchos sistemas.

Ya que en éste documento no se tiene una lista de la clasificación típica de LVPCB's, se sugiere consultar la clasificación presentada en C37.16 como referencia.

## IV.2. Sistema de Tracción Eléctrico

### IV.2.1 Introducción.

Los requerimientos para los interruptores de corriente directa y sus sistemas de protección varían en el mundo porque no existen especificaciones ni estándares internacionales que definan las necesidades especiales para los sistemas de tránsito (transporte). Ya que la aplicación es un campo especializado, las autoridades en materia de transporte han desarrollado sus propias especificaciones para su equipo y han tenido un desempeño satisfactorio. Sólo en Estados Unidos hay estándares disponibles para el tablero de distribución e interruptores. Se realizó una revisión a estos estándares a finales de los años 70's y se reconocieron algunas características de los sistemas de tránsito así como la especificación de los requerimientos de prueba apropiados.

En esta parte del capítulo se examinan los requerimientos para los interruptores de corriente directa y se sugiere definir el criterio con el cual conocer todas las condiciones con que se puede interrumpir el sistema. También se muestran los requerimientos básicos para cada tipo de protección y algunas de sus limitaciones.

### IV.2.2. Tablero de distribución de CD básico.

La figura 4.2-1 muestra el diagrama unifilar de un tablero típico de distribución de una subestación de CD el cual contiene dos rectificadores y cuatro alimentadores que suministran potencia a la vía. Generalmente se usan dos rectificadores para dar flexibilidad permitiendo que uno de ellos esté fuera de servicio durante periodos en que hay carga debido a lámparas o durante mantenimiento. El interruptor de cada alimentador suministra potencia a cada extremo de la vía y por lo tanto cada vía recibe potencia por ambos extremos, cada alimentador pertenece a una subestación adyacente, o a una estación acoplada. Esta última es similar a una subestación de potencia pero sin rectificadores.

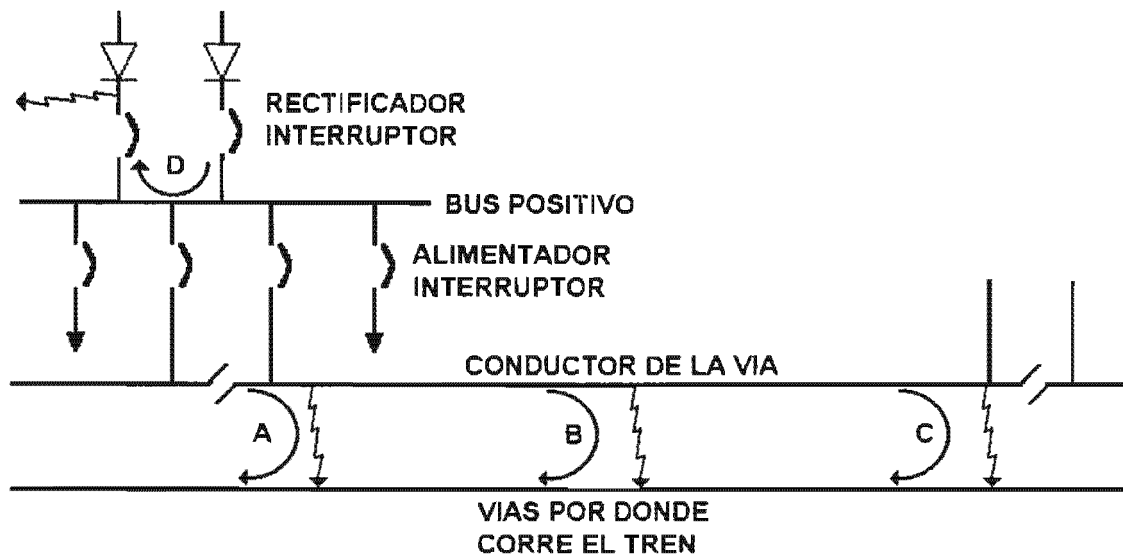
### IV.2.3. Requerimientos del Interruptor.

De la figura 4.2-1 se puede observar que hay dos tipos de aplicaciones del interruptor. El interruptor del rectificador controla la salida de potencia en los buses principales del tablero de distribución y el interruptor del alimentador controla y protege la salida de potencia de uno de los extremos de una vía individual. El servicio de interrupción para cada uno de estos interruptores es diferente.

- 1) El interruptor del rectificador controla y protege la salida de corriente directa de su propio transformador rectificador por lo que desconecta inmediatamente el extremo de CD por si ocurre una falla interna.
- 2) El interruptor del alimentador controla y protege solo la entrada de potencia en uno de los extremos de su propia vía por lo que desconecta la fuente o



suministro en caso de condiciones anormales (posiciones A-C de la figura 4.2-1). Esto se debe hacer en un tiempo rápido para limitar la energía que entra a la falla. Este interruptor no debe operar para fallas de vías adyacentes.



- A FALLA PRINCIPAL
- B FALLA DE ENERGIA MAXIMA
- C FALLA DISTANTE
- D FALLA DEL RECTIFICADOR

Figura 4.2-1 Diagrama unifilar de una subestación de CD y vía.

#### IV.2.3.A. Especificaciones del interruptor.

Los requerimientos básicos para el interruptor se especifican en el estándar C37.14 de ANSI (*Low-voltage DC power circuit breakers used in enclosures*) con los niveles de desempeño dados en el estándar C37.16 de ANSI (*Preferred ratings, related requirements, and application recommendations for low-voltage power circuit breakers and AC circuit protectors*)

ANSI reconoce dos clases de interruptores que se aplican en transporte, que son los de semi-alta velocidad y los de alta velocidad. Por definición, el primero alcanza la corriente de corto circuito en 0.03 segundos y el último alcanza la corriente de corto circuito en 0.01 segundos. Por lo tanto para el equipo del transformador rectificador que usa diodos de silicon, el interruptor de semi-alta velocidad no limitaría el pico de la corriente de corto circuito mientras que interruptor de alta velocidad sin duda lo hará. La figura 5.2-2 muestra las características típicas para la interrupción de cada tipo de interruptor.

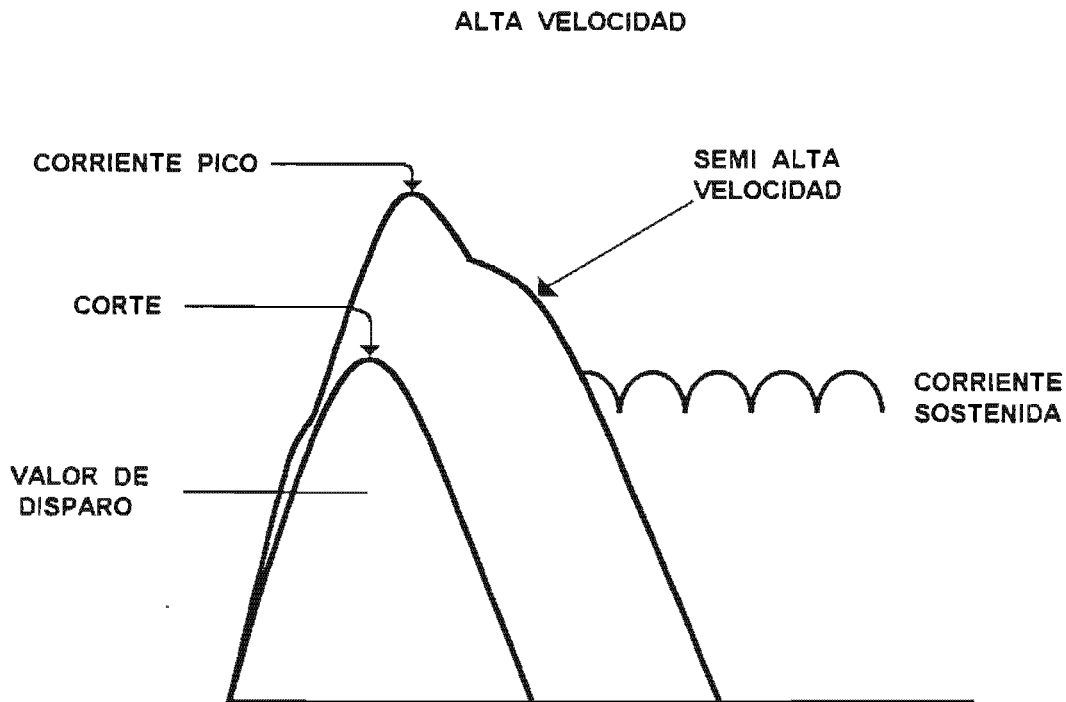


Figura 4.2-2. Corrientes que permiten los interruptores.

En el estándar C37.16 de ANSI se especifica una corriente de corto circuito pico para cada valor de voltaje, por ejemplo, 200 kA a 800 V de CD, y éste es el único valor asignado para ambos tipos de interruptores. Este valor se basa en la falla máxima a la salida de una subestación de 8000 kW.

En el estándar no se da una guía para escoger el tipo de interruptor. Se deja a criterio del usuario la elección que por lo general se hace en base al costo. Algunas especificaciones establecen que ambos son aceptables, pero la desconexión en el modo de alta velocidad tiene la ventaja de reducir la energía que se va por la falla de la misma forma que un fusible lo hace.

Se debe entender que la definición de cada tipo de interruptor es para las condiciones de falla afuera de la subestación ya que ésta proporciona la corriente de falla máxima. El estándar ANSI establece que se deben conocer las especificaciones de cada clase de interruptor para valores pequeños de corriente, definidos como  $di/dt$  ( $t=0$ ). Esto es el valor inicial de la pendiente de la corriente. Para los de alta velocidad el valor es de  $5 \text{ A}/\mu\text{s}$ , y  $1.7 \text{ A}/\mu\text{s}$  para los de semi-alta velocidad.

Los límites más bajos se pueden conseguir cuando se tiene un nivel de falla de la fuente de 200 kA y la impedancia del circuito reduce el parámetro  $di/dt$ .

### **IV.2.3.B. Niveles Máximos de Corto Circuito**

Este nivel máximo ocurre cuando la falla es del lado de la vía que está inmediatamente adyacente al interruptor del alimentador (posición A, figura 4.2-1). De acuerdo a ANSI, a 800V de CD, en el tablero de distribución se acepta solo un valor pico de 200 kA, consistente con una falla máxima de una subestación de 8000 kW y al tratar de cumplir este requerimiento en una aplicación de 2000 kW se puede considerar excesivo. Algunas personas sostienen que el equipo debe cumplir con el estándar proporcionado por ANSI. De la misma forma que para un tablero de distribución de CA, es mejor si el estándar reconoce diferentes valores de corriente pico como; 50, 80, 100, 150, 200 y 250 kA.

### **IV.2.3.C. Interrupción de Máxima Energía del Circuito**

Esta condición ocurre en un sistema de tránsito o transporte de CD a una distancia corta de la vía (posición B, figura 4.2-1). El estándar C37.16 de ANSI establece esta condición como un requerimiento de prueba, identificado como la prueba C.

La impedancia de la carga de un sistema de tránsito es la impedancia de la vía. Se reconocen dos tipos de impedancia, las de alta frecuencia y la de baja frecuencia lo cual resulta en dos constantes de tiempo de 50 ms y 210 ms respectivamente. Ya que éste es un rango muy amplio se sugiere usar un incremento de 50 ms, y se tiene 50, 100, 150, y 200 ms para hacer que la variación entre los sistemas sea menor.

Algunos interruptores han fallado bajo condiciones de energía máxima del circuito aún cuando éstos hayan funcionado para la corriente más alta a la salida de la subestación. Las condiciones de energía máxima del circuito ocurren en la posición de la vía donde la corriente de CD es la mitad de la corriente máxima a la salida de la subestación y donde la constante de tiempo resultante es la mitad que la de la propia vía. La figura 4.2-3 ilustra cómo varía la energía del circuito para fallas a lo largo de la vía, se muestran dos constantes de tiempo diferentes.

### **IV.2.3.D. Interrupción de falla distante**

Esta condición se asocia con una falla en el extremo lejano de la vía adyacente a la siguiente subestación (posición C de la figura 4.2-1). Estas fallas sólo pueden tener valores de corriente de dos veces el valor nominal del interruptor pero tienen constantes de tiempo que son la de la propia vía. Los requerimientos a los que los interruptores están sujetos son estrictos en cuanto a una larga duración del arco provocado por la interrupción.

#### **IV.2.3.E. Baja corriente de interrupción**

Los interruptores del alimentador funcionan, es decir, se abren automáticamente cuando ocurren condiciones anormales. También se pueden abrir para condiciones de vacío (sin carga) o carga de luminarias para alcanzar el aislamiento. La carga producida por luminarias, usualmente se asocia a un tren estacionario con solo sus auxiliares. Esta condición generalmente se presenta en un almacén o en una vía muerta (fuera de servicio).

Ya que las condiciones de interrupción alcanzan valores de corriente desde 15 A y hasta 500 A, el interruptor puede no tener una interrupción satisfactoria debido a que el campo magnético producido por el arco para corrientes pequeñas es débil. Estos valores de corriente están definidos en los estándares internacionales como corrientes críticas ya que producen una duración larga del arco para una constante de tiempo en específico.

#### **IV.2.3.F. Interruptor del rectificador**

Un interruptor que se usa para un tablero debe ser capaz de llevar toda la corriente de corto circuito a la salida del rectificador por lo tanto se debe conocer el valor de la corriente de corto tiempo del rectificador. En el estándar C37.14 de ANSI se establece lo anterior como un requisito opcional. Algunas autoridades en tema de tránsito o de transportes especifican la necesidad de éste requisito ya que en E.U. existe una norma para los tableros de distribución.

La corriente de corto tiempo se puede definir como un valor de ocho veces el valor del interruptor y se especifica para 2 horas y 160% de sobrecarga.

O bien, de una manera mas adecuada, se define como doce veces el valor del interruptor.

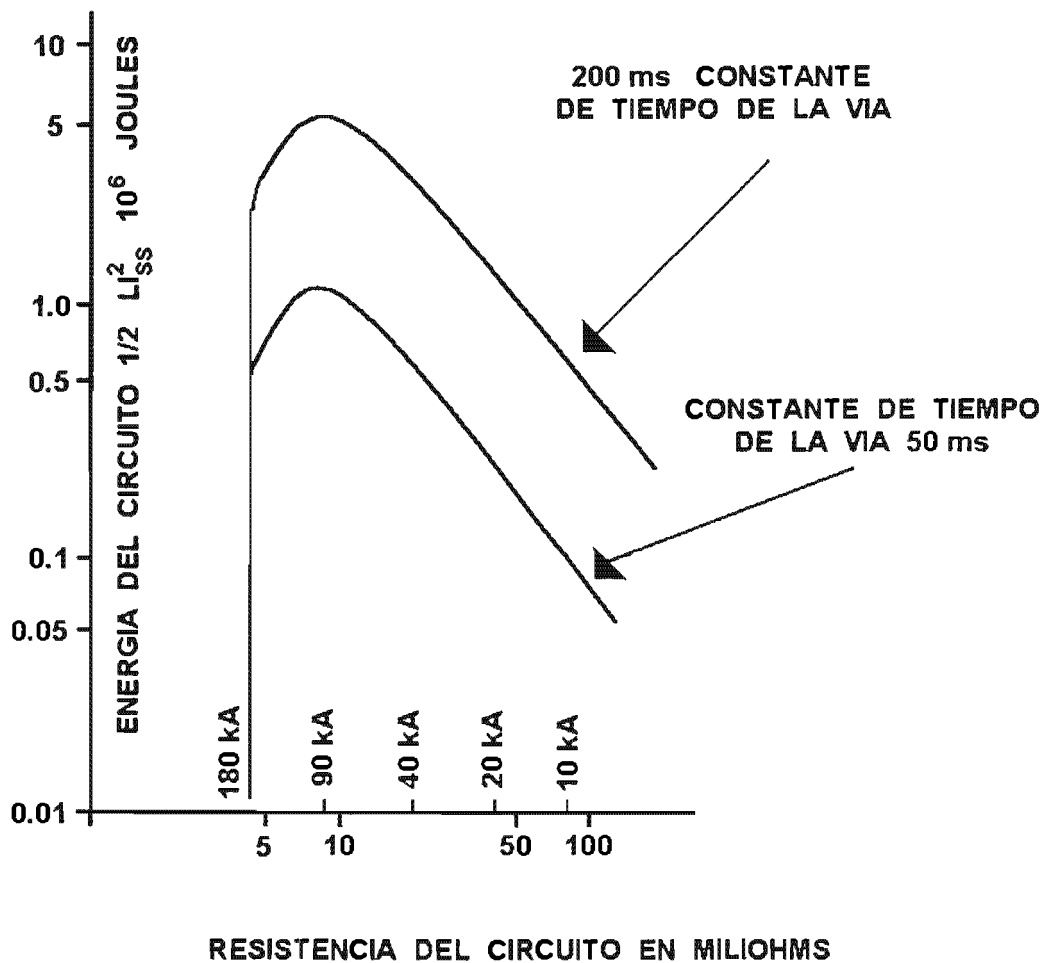


Figura 4.2-3 Gráfica de la energía en función de la resistencia de la vía.

#### IV.2.3.G. Especificación del tablero de distribución

Los requerimientos para el tablero de distribución están en el estándar C37.20 de ANSI (*Switchgear assemblies including metal-enclosed bus*). Se debe hacer énfasis en que es esencial que el interruptor se pruebe dentro de su propia cubierta para todas las pruebas de interrupción. De ésta forma, las tensiones eléctricas a través de cualquier gas posiblemente ionizado entre los conductores con energía y el armazón se revisan para que resistan bajo todas las condiciones.

Las autoridades en tema de tránsito, ya que saben que no han definido todas las condiciones de interrupción, requieren pruebas de campo extensivas del equipo completo. Si se cumple con todos los requerimientos en una estación de pruebas y además se pueden probar completamente entonces este tipo de pruebas de campo no son necesarias. Esto reducirá los costos de instalación y asegura que solo el equipo completamente probado será adquirido de la

misma forma que se hace en la práctica estándar para un tablero de distribución de CA.

#### IV.2.4. Requerimientos de Protección

Los requerimientos de protección cubren tres áreas específicas:

- a) Alimentadores
- b) Rectificadores
- c) Tablero de distribución

Los estándares sólo tratan con los dispositivos inherentes de protección de los interruptores. Los relés los cuales tienen características similares han sido considerados por las autoridades desde hace muchos años por la experiencia de su servicio. Éstos varían en todo el mundo y algunas veces, por seguridad, se usan varios tipos.

Un sistema de transporte de corriente directa nunca se puede proteger por completo ya que las protecciones no siempre distinguen entre las fallas de arco distantes y las corrientes de carga. Algunas autoridades en el tema reconocen esta deficiencia y balancean el grado de protección contra el trastorno o daño que se puede tolerar en la fuente. La protección del equipo principal o más importante del sistema de potencia se debe considerar primero.

##### IV.2.4.A. Protección del alimentador

###### a) Protección contra corto circuito:

El interruptor siempre es apropiado para actuar directamente con un conjunto de dispositivos de disparo instantáneo calibrados en un rango de 100%-400%. Su función es detectar inmediatamente y después desconectar el alimentador. El interruptor debe operar con un valor lo más bajo posible pero cuidando que no opere para cuando un tren arranca fuera de la subestación. Dependiendo de las características del sistema y de los valores alcanzados, la protección para corto circuito debe tener un alcance para una distancia de más de 1km desde la subestación. Idealmente, un interruptor para un alimentador debe tener características de protección unidireccionales para actuar solo hacia delante. Ya que la contribución de la corriente de falla que puede pasar en la dirección opuesta proviene del interruptor del extremo lejano del alimentador y es menor que el valor del dispositivo instantáneo, comúnmente se usan dispositivos de corto circuito bidireccionales.

###### b) Protección contra sobrecarga:

Ésta proporciona una protección térmicamente para la vía y toma la forma de un relé de tiempo inverso que opera del lado de la parte liberadora del interruptor. La curva característica se debe aproximar a la línea más débil entre los componentes de la vía.

c) Protección contra sobrecorriente usando relés diferenciales ( $di/dt$ ):

Para fallas que ocurren a distancias mayores a 0.5km desde el interruptor del circuito y más allá de la siguiente subestación, la corriente es generalmente menor que la corriente de arranque del tren. Para discriminar entre estas dos condiciones, se han diseñado relés especiales los cuales diferencian las dos condiciones en la parte inicial de la pendiente de la corriente. La figura 4.2-4 ilustra la corriente de arranque de un tren y una corriente de falla distante, ambas con magnitudes similares pero de formas diferentes. El incremento o cambio  $di/dt$  (pendiente) de la corriente del tren excede los valores del relé para un tiempo más largo que el tiempo de retraso lo cual provoca un disparo del relé.

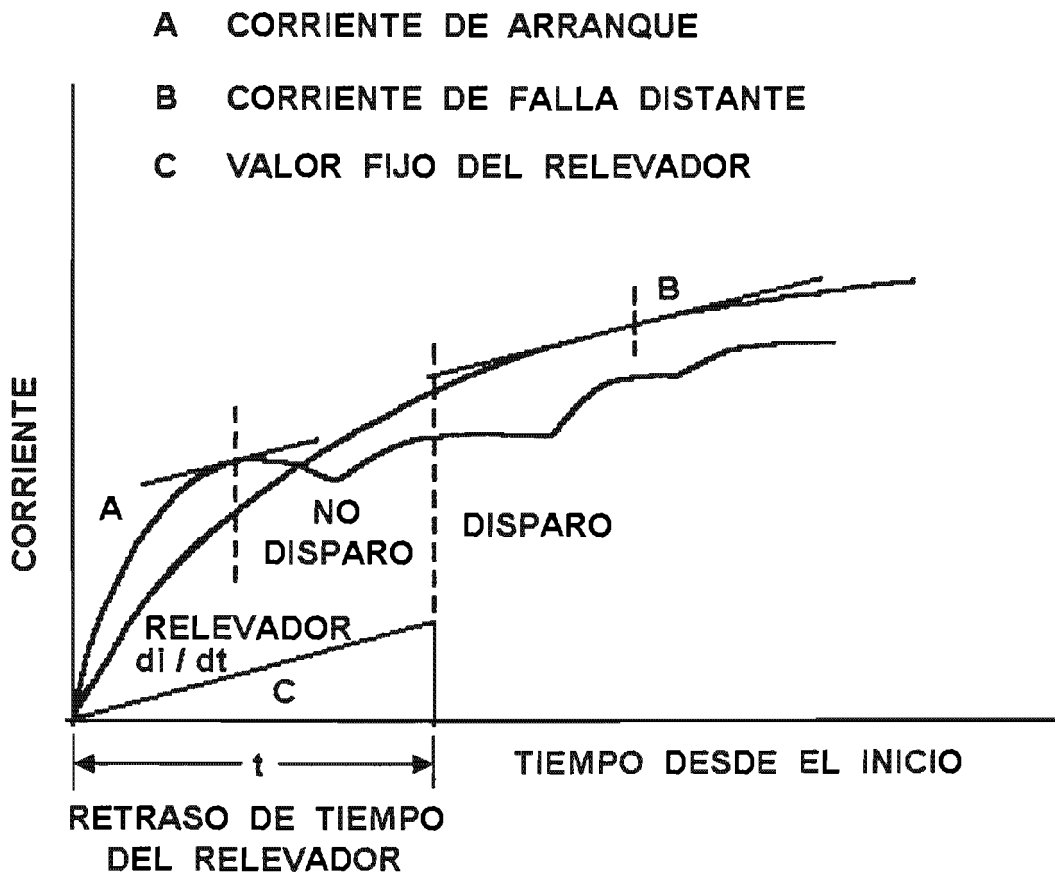


Figura 4.2-4 Discriminación del relé diferencial  $di/dt$ .

El relé operará para corrientes menores que las del valor nominal del interruptor, pero no debe operar para valores negativos de  $di/dt$  (pendiente de la corriente) es decir para corrientes en el sentido contrario.

Esta característica unidireccional se puede obtener fácilmente con un relé electrónico. Las variaciones de éste relé para la protección  $\Delta I$  (delta I o diferencial) la cual detecta un incremento cambian el nivel de la corriente

para un retraso fijo del tiempo. Cuando se usa una protección  $di/dt$  se puede tener mayor discriminación para detectar corrientes de falla mas pequeñas.

d) Protección contra bajo voltaje:

Un arreglo usa un dispositivo modificado de disparo instantáneo que mantiene un voltaje de polarización de la vía. La figura 4.2-5 ilustra una serie de curvas características que muestran que la calibración se reduce cuando el voltaje del sistema se reduce. También una característica de bajo voltaje ocasiona un disparo para un voltaje mínimo de la vía. Cuando se dibuja una línea de resistencia de la longitud de la vía se observa que todos los valores que están a la izquierda de la línea causarán un disparo para cualquier falla en la vía. Si el arco que se produce en una falla reduce una resistencia la cual mueve la línea a la izquierda entonces no ocurrirá un disparo.

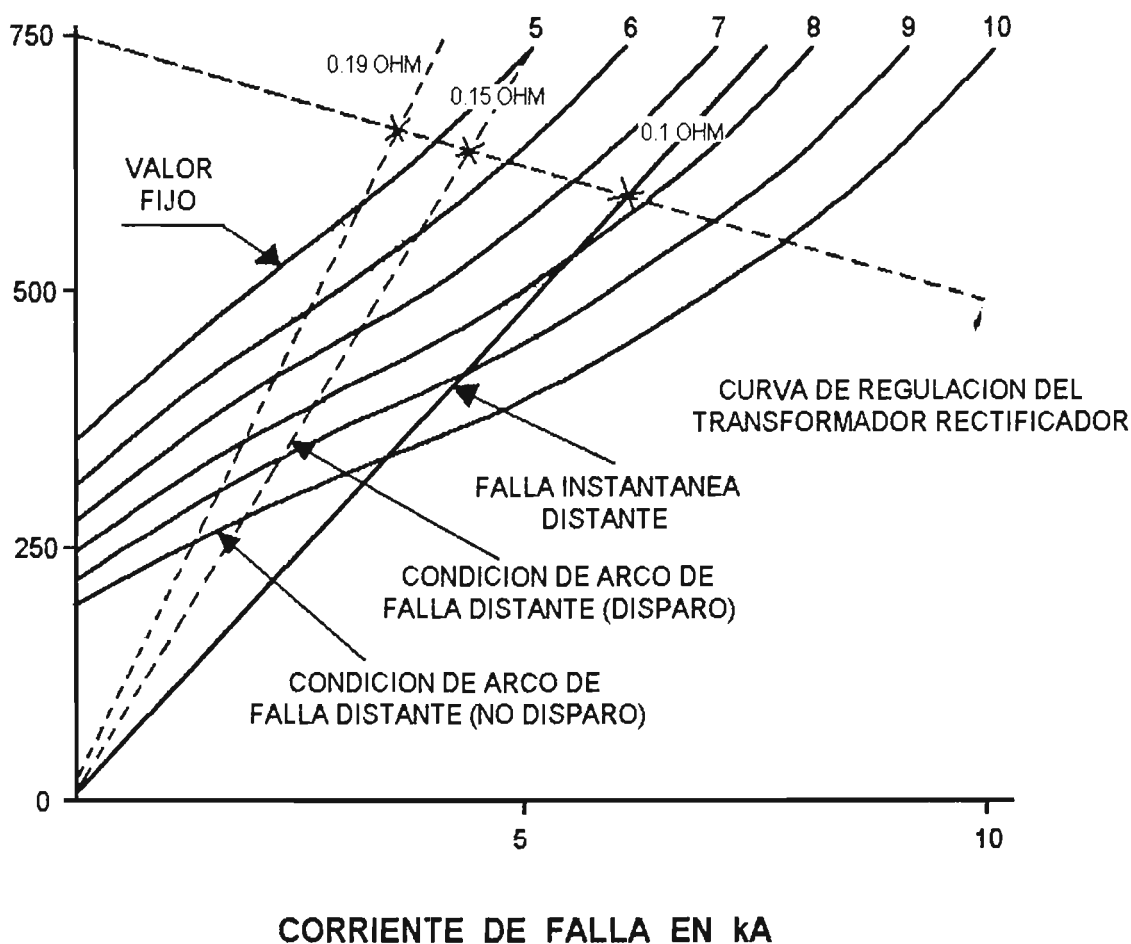


Figura 4.2-5 Características de la reducción del voltaje.



e) Disparador de traspaso al alimentador de la vía:

Proporciona disparos entre subestaciones adyacentes en cada vía por si el alimentador detecta una falla en alguno de sus extremos. Esto reduce la ocurrencia de una falla distante que no sea detectada porque ésta es una falla cercana al interruptor del otro extremo del alimentador. Para lograr el disparo entre subestaciones adyacentes se necesita una supervisión continua para probar la integridad.

f) Protección para bajo voltaje de la vía:

Éste sistema usa relés sensibles al bajo voltaje en cada extremo de la vía y en el punto medio. Su propósito es detectar una falla distante a través de una disminución en el voltaje de la vía. Las salidas del relé se conectan a un esquema de disparadores de transferencia que liberan o aíslan ambos extremos del alimentador cuando opera un relé. Los relés tienen un retraso en el tiempo para evitar que haya un disparo cuando el voltaje disminuye en el momento en que el tren arranca, pero no habrá disparo para corrientes menores a plena carga del tren.

g) Medición de carga y auto-recierre:

Este sistema evita el cierre de un interruptor en una falla de la vía y su uso se recomienda cuando se provoca el recierre automático después de la interrupción de una falla. El sistema estaba originalmente diseñado para minimizar interrupciones innecesarias e impuestas a un interruptor. De este modo se alarga la vida de los contactos. La figura 4.2-6 muestra el diagrama unifilar de un esquema muy básico. Antes de que ocurra cualquier cierre, el relé de voltaje (dispositivo 183) detecta si el voltaje en la vía excede el voltaje de operación mínimo de la vía. Si esto sucede, entonces hay un cierre inmediato y la vía esta de nuevo lista para funcionar. Si no hay volts o el voltaje esta por debajo del nivel inferior de voltaje, entonces se inicia la medición de carga.

Los contactores (dispositivo 129) insertan un resistor pequeño en paralelo con el interruptor abierto y el relé que mide la carga (dispositivo 182) toma la medición como una caída o disminución en el voltaje a través de la propia vía, realizando la conversión de la lectura en ohms. Si ésta cantidad es baja, entonces existe una falla y el recierre se inhibe, pero si la cantidad medida es mayor que el valor establecido se permite el cierre.

Por lo general, el relé de auto-recierre se asocia con una secuencia de tiempo que permite que varias mediciones secuenciales de la carga se realicen, finalmente si el último intento no es exitoso, un valor bajo de voltaje en el relé de voltaje evita que se mida la carga si es que el voltaje de la carga es mayor al del relé ya que habría una medición poco exacta debido una excesiva caída del voltaje.

#### IV.2.4.B. Protección del Rectificador

##### a) Corto circuito en el rectificador.

El interruptor siempre es apropiado para un dispositivo de disparo instantáneo de corriente inversa que tiene un valor fijo menor al valor nominal del interruptor. Para rectificadores con diodo de silicón un valor del 50% es adecuado y se puede obtener una buena estabilidad con dispositivos de armadura con atracción electromagnética, no debe haber disparo hacia delante cuando se observa la salida total del rectificador. Se pueden alcanzar valores menores con el uso de un relé por separado ya que no es un requerimiento tener una alta velocidad para corrientes mas bajas.

##### b) Refuerzo para la protección del alimentador.

El interruptor del rectificador no debe tener protección instantánea hacia delante ya que no discriminará con el interruptor del alimentador en caso de fallas. Para una protección de refuerzo se necesita un relé con un tiempo de retraso grande y su valor se debe ajustar de acuerdo a las curvas del rectificador y a las del interruptor del alimentador.

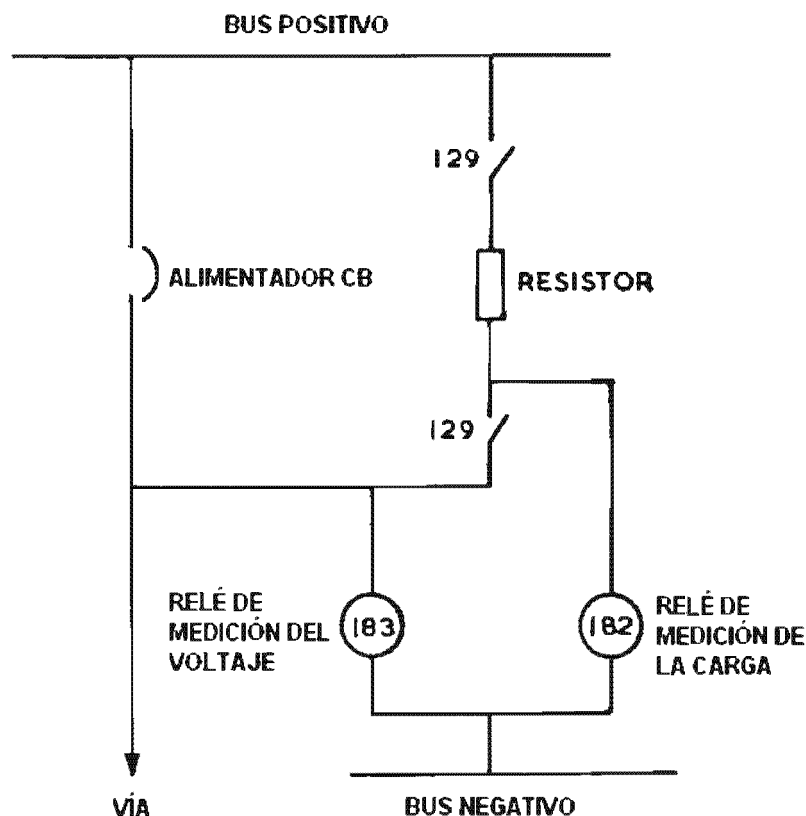


Figura 4.2-6 Circuito para medir la carga.

#### **IV.2.4.C. Protección del tablero de distribución**

Antes los tableros de distribución de transporte de CD eran de tipo abierto y usaban interruptores sin interrupción de arco. Una cantidad grande de gas ionizado era emitido y se requerían barreras de aislante para evitar destellos o chispas con las estructuras de la construcción. Las nuevas técnicas para el control del arco incluyen:

- a. Estirar o alargar el arco o reducir la emisión de gas ionizado y
- b. Usar el principio del cátodo frío el cual reduce más el tamaño del arco e incluso produce menor emisión de gas ionizado. Los tableros de distribución se han llegado a hacer con cubiertas de metal, con una reducción considerable en el tamaño comparadas con los tableros de CA.

##### a) Protección para falla a tierra:

La introducción de tableros de distribución con cubierta metálica trajo consigo la protección del tablero para falla a tierra, aplicada de manera similar que en la zona de protección del bus de un tablero de distribución de CA. Hay dos tipos de uso general:

1. Puesta a tierra con una alta resistencia, la cual requiere poner el tablero de distribución en un piso aislante y una alarma que detecte cuando hay una falla a tierra (el piso debe estar aislado alrededor del tablero de distribución para la seguridad del personal).
2. Puesta a tierra a través de una baja resistencia o solidamente aterrizado, el cual debe dar un disparo instantáneo masivo a todos los interruptores para eliminar el arco interno y minimizar el daño.

Si la falla a tierra es en el interruptor de un alimentador dentro del tablero de distribución, el arco interno no se extinguirá si el alimentador en el extremo lejano de la vía no ha detectado la falla. Un disparador masivo también debe disparar (aislar) a las subestaciones adyacentes, sacando de servicio todos los alimentadores internos.

### IV.3. Puesta a tierra del sistema de tracción de potencia de CD.

#### IV.3.1 Introducción

Los sistemas de tránsito rápido se han expandido a gran velocidad en todo el mundo, sin embargo existe muy poco esfuerzo en el desarrollo de estándares para el diseño y protección de sistemas de potencia de CD comparados con los todos lo estándares que existen para sistemas de potencia de CA usados en la industria. Cada que se inicia un proyecto de transporte se aplican métodos de puesta a tierra del sistema y del equipo que tal vez no han sido completamente evaluados debido a la falta de un claro entendimiento entre la corriente que se disipa o escapa y la seguridad del personal. En la actualidad no existen manuales de recomendaciones o estándares industriales que cubran el tema de la puesta a tierra de los sistemas de potencia de tracción de CD, mientras que para la puesta a tierra de los sistemas de CA existe la serie de libros de colores.

En ésta parte del capítulo 4 se pretende proporcionar las bases para los métodos para aterrizar los sistemas de potencia de tracción de CD y las cubiertas del equipo de CD así como la relación que hay entre ellos.

En la figura 4.3-1 se incluye un diagrama típico para la electrificación de CD de un sistema de tracción eléctrico con esquemas de relés de protección de puesta a tierra que protegen el equipo así como los métodos de puesta a tierra del sistema de potencia de CD.

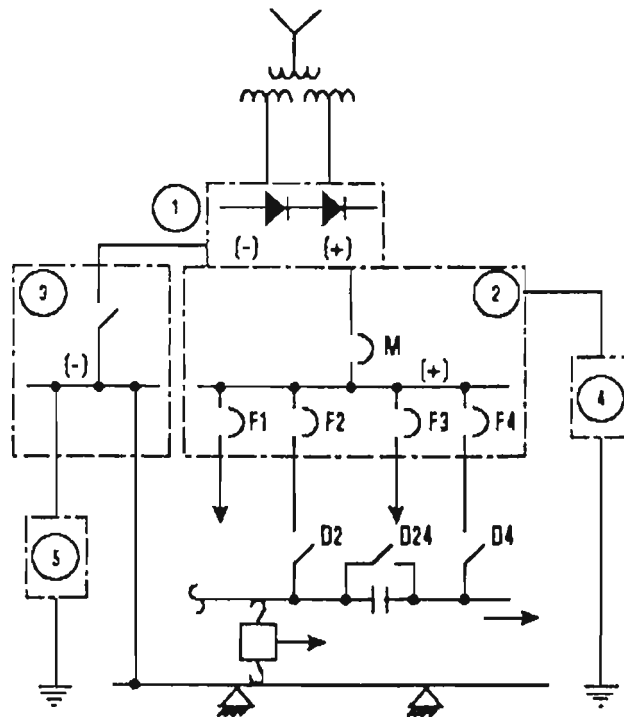


Figura 4.3-1 Diagrama unifilar de electrificación de CD, 1: Rectificador; 2: tablero de distribución de CD; 3: bus negativo; 4: protección de puesta tierra del equipo; 5: protección de puesta a tierra del sistema.

### IV.3.2. Sistema de Potencia de Tracción de CD

En un sistema de potencia de tracción de CD, la corriente proveniente de las subestaciones de potencia se reparte a los trenes en movimiento a través del tercer riel o por medio del cable de contacto superior OCS por sus siglas en inglés (Overhead Contact System) y regresa a la subestación por las vías del tren. La configuración de instalación de las estaciones de subestaciones de potencia de tracción TPSSs por sus siglas en inglés (Traction Power Substation Stations), de los cables alimentadores positivo y negativo y de las vías por donde corre el tren debe ser adecuada para que el tercer riel o el OCS actúe a lo largo de todo el conductor positivo y las barras conectadas transversalmente a lo largo de las vías actúen como conductor negativo, mientras que cada TPSS está en paralelo entre estos dos conductores.

La seccionalización del conductor positivo se logra con los interruptores de CD del alimentador en cada subestación de potencia de tracción. Algunas veces, el espacio destinado para las subestaciones es a la mitad de dos subestaciones de potencia de tracción para incrementar la seccionalización, especialmente para un sistema de 1500 V de CD cuando la distancia entre las subestaciones de potencia de tracción es relativamente grande.

Bajo la operación normal del sistema, para minimizar la corriente que se disipa (escapa) y sus efectos de corrosión sobre los dispositivos que están enterrados, las vías por donde corre el tren y el sistema negativo de potencia de tracción de CD permanecen sin aterrizar.

En la práctica actual, los sistemas de potencia de tracción de CD se diseñan para voltajes entre un rango de 600V-1500V de CD y en la mayoría de los proyectos se elige un valor de 750 V de CD. El tablero de distribución de CD consiste de una sola polaridad (positiva) e interruptores de CD de alta velocidad o semi-alta velocidad para suministrar potencia de corriente directa al sistema de propulsión del tren a través del tercer riel o del OCS.

La figura 4-3.1 muestra varios componentes del sistema de electrificación de CD incluyendo al vehículo. Se debe hacer notar que el voltaje de contacto del vehículo es prácticamente el mismo que el potencial que hay entre la vía y tierra, especialmente si no hay otra forma de aterrizar el vehículo.

Para realizar adecuadamente la puesta a tierra se debe entender diferencia entre puesta a tierra del "equipo" y puesta a tierra del "sistema". La puesta a tierra del equipo se refiere a aterrizar la cubierta o carcasa del rectificador y del tablero de distribución de CD.

La puesta a tierra del sistema se refiere a aterrizar el conductor de corriente del sistema negativo de CD. Este sistema negativo es la parte negativa del rectificador en cada TPSS y las vías por donde regresa la corriente negativa. Las tres configuraciones básicas son las siguientes

- 1) Sin aterrizar
- 2) Puesta a tierra a través de una impedancia
- 3) Puesta a tierra efectiva aplicada a sistemas de potencia de CA la cual se puede aplicar a los sistemas de potencia de tracción de CD.

Bajo la operación normal del sistema, no existe una conexión eléctrica directa entre el negativo de CD y tierra. Sin embargo, éste sistema sin aterrizar establece su referencia a tierra a través de la resistencia de las vías por donde corre el tren. Esta resistencia depende del material de aislamiento de la vía y es generalmente del orden de  $200\Omega/1000$  ft de vía bajo condiciones normales de humedad. Este valor está sujeto a cambios dependiendo del tipo de la construcción de la vía, de las condiciones climáticas y de la antigüedad de la vía debido a la acumulación de residuos metálicos. Por eso, el sistema de potencia de tracción de CD sin aterrizar, realmente está aterrizado a través de una resistencia que conecta con tierra al tren ( $R_{ng}$ ) y se obtiene con la expresión (4.3-1)

$$R_{ng} = \frac{50}{5.28D} [\Omega] \quad (4.3-1)$$

Donde D representa la mitad de la suma de las distancias entre subestaciones de potencia de tracción adyacentes en millas.

Estas características inherentes del sistema de potencia de tracción de CD que se aterrizará a través de la resistencia de las vías establecerá el camino de retorno para una corriente de falla del positivo a tierra.

### IV.3.3. Puesta a tierra del equipo

El diseño de la puesta tierra de las carcasas del equipo de CD debe asegurar la máxima seguridad del personal y del equipo bajo condiciones de falla. El daño provocado al personal es por fuego, metal fundido y destellos brillantes producidos por una corriente alta de corto circuito de CD además del riesgo por shock eléctrico producido por el voltaje de CD que se presenta en las partes metálicas del equipo bajo condiciones de falla. Antes, poner a tierra una de las polaridades del sistema de CD era una práctica común (estándar) para ferrocarriles y en la industria minera. Como resultado de estas experiencias, el desarrollo de esquemas de relés de protección para la puesta a tierra de alta resistencia del equipo se convirtió en una norma en la industria del transporte en los Estados Unidos. Estas prácticas llevaron a que se agregara el siguiente párrafo en el estándar C37.20.1 de ANSI.

Excepción: Los interruptores de bajo voltaje que tienen una sola polaridad de CD, con valores por arriba de los 250 V, deben ser aterrizados. Se recomienda que se conecten a tierra sólo a través de dispositivos de alta resistencia.

El Código Nacional Eléctrico NEC en su artículo 250-110 (1) establece que las partes metálicas expuestas que no llevan corriente del equipo fijo y que pudiera

ser energizado con la posibilidad de estar en contacto con personas, se debe aterrizar si se encuentra a una distancia menor a 8 pies en el sentido vertical y 5 pies en el sentido horizontal desde la superficie de la tierra.

Se ha reconocido por la industria del transporte que la carcasa o cubierta metálica del equipo de CD, y de rectificadores así como la cubierta metálica del tablero de distribución de CD deben ser aterrizados usando un esquema de relés de protección apropiado para la seguridad del personal y del equipo. Este esquema de relés de protección, el cual emplea métodos de puesta a tierra de alta o baja resistencia del equipo ha estado sujeto a debate y discusiones de los proveedores del equipo, de los ingenieros de diseño y las autoridades representativas en tema de tránsito. Cada propiedad de tránsito emplea uno u otro método de puesta a tierra dependiendo de su propio concepto de seguridad y cuestiones de diseño. Se debe mencionar que el potencial de contacto tolerable para sistemas de CD relativamente grandes es del orden de 3.5 veces el valor que para un sistema de CA.

#### **IV.3.3.A. Método de puesta a tierra de alta resistencia (HRGM)**

El equipo esta completamente aislado de todas las estructuras aterrizadas circundantes usando un piso aislante, conduit aislante y subestaciones aisladas de los equipos por medio de paredes. Un voltaje constante del orden de 25 V de CD se aplica entre la carcasa o cubierta y tierra (ver figura 4.3-2). Este voltaje produce una corriente lo suficientemente alta para energizar el relé 64M pero no para el relé 64T. Por debajo de este voltaje o en caso de una falla de la carcasa a tierra, el relé 64M se desenergizará para proporcionar una indicación de alarma. En caso de un corto del bus de CD a la carcasa, la corriente será lo suficientemente grande para energizar el relé 64T que disparará los interruptores de AC y CD de la subestación. El dispositivo de interrupción de corto 57 y el relé de sobrevoltaje o dispositivo 59 son componentes de uno de los esquemas de puesta a tierra del sistema. Vale la pena mencionar que el valor de resistencia del esquema del HRGM asegurará que durante una falla en el equipo, el valor fijo del dispositivo 59 permitirá su activación para avisar sobre la falla.

#### **IV.3.3.B. Método de puesta a tierra de baja resistencia (LRGM)**

La carcasa o cubierta del equipo permanece aislada de todas las estructuras conectadas a tierra circundantes. La carcasa se aterriza a un punto a través de un esquema de relé de protección de baja resistencia (ver figura 4.3-3). Un voltaje bajo, del orden de 1 V de CD se aplica entre la carcasa y tierra para monitorear la integridad de la protección de puesta tierra de baja resistencia. El relé de alarma, o dispositivo 74 proporcionará una alarma cuando este voltaje sea interrumpido. Durante la condición de falla de la carcasa, el dispositivo 64 se energizará para disparar los interruptores de CA y CD de la subestación debido a la magnitud relativamente alta de la corriente de falla cuando el interruptor 57 se cierra una vez que se energiza el relé 59. El disparador de transferencia de los interruptores de alimentador de CD en una subestación adyacente debe liberar la falla del lado de

la carga del interruptor de alimentador de CD local. Sin este disparador de transferencia, se producen mayores daños al equipo cuando se usa un esquema de puesta a tierra de baja resistencia del equipo.

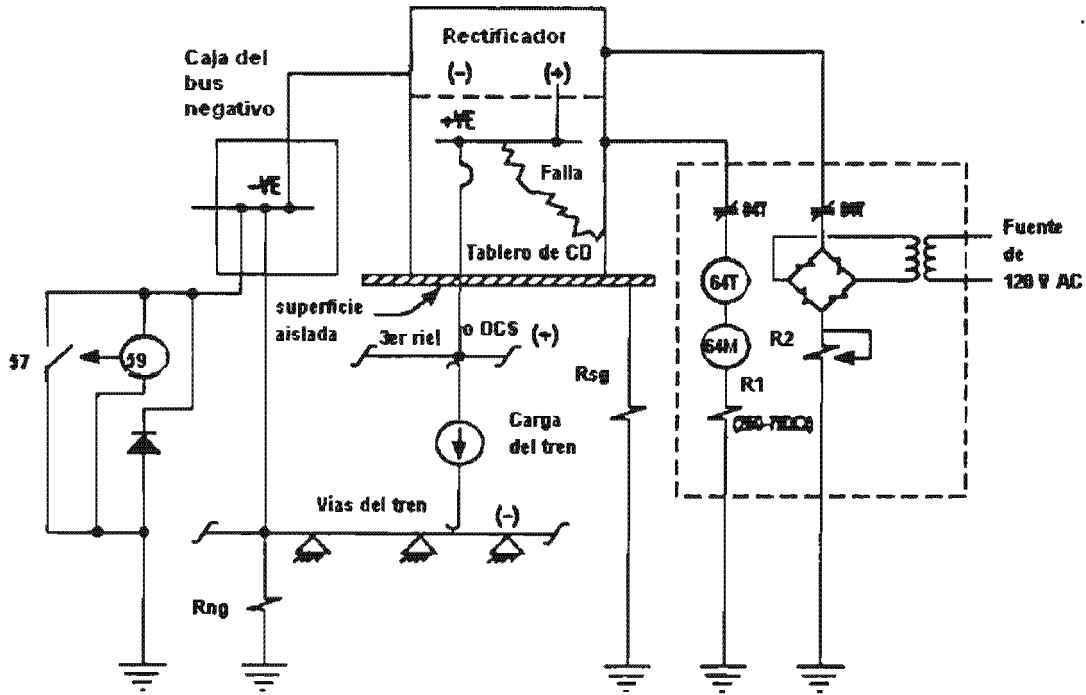


Figura 4.3-2 HRGM, 64M: Relé de monitoreo de falla a tierra; 64T: Relé de disparo de falla en la carcasa o cubierta metálica

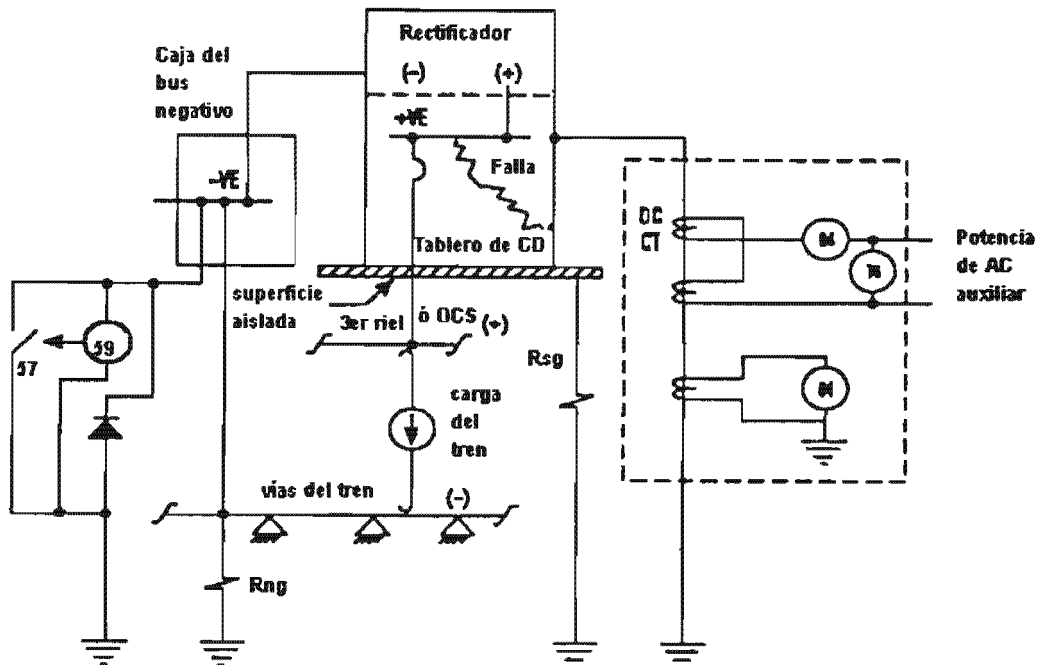


Figura 4.3-3 LRGM. 74: Relé de alarma; 64: relé de disparo de detección de falla en la carcasa.



#### IV.3.4. Puesta a tierra del sistema de potencia de CD

El diseño de la puesta a tierra del sistema de potencia de CD necesita cumplir con dos requerimientos:

- a) Corriente que se disipa (escapa) de CD mínima
- b) Máxima seguridad del personal y del equipo

Para lograr este objetivo, la puesta a tierra del sistema se debe diseñar para satisfacer los siguientes requerimientos básicos:

- 1) Bajo operación normal del sistema, el sistema de puesta a tierra debe minimizar la corriente de CD que se disipa (escapa). Esto se puede lograr manteniendo la puesta a tierra del sistema flotando (sin conectar). Se hace una conexión no intencional entre el sistema negativo y tierra.
- 2) Bajo operación anormal del sistema con potencial entre la vía y tierra no seguro, el sistema se debe aterrizar conectando la polaridad negativa a tierra para eliminar el voltaje que no es seguro. El método de conectar la vía o el negativo de la subestación a tierra se debe lograr automáticamente a través de los relés de protección y los dispositivos de conexión en el menor tiempo posible. Después de quitar esta situación anormal, el sistema regresará automáticamente al estado original de un sistema de potencia no aterrizado. A continuación se presentan varios métodos empleados para los esquemas de puesta a tierra del sistema y sus limitaciones.

##### IV.3.4.A. Sistema sólidamente aterrizado

El negativo de cada subestación se aterriza a la malla local de tierra sin ninguna impedancia intencional en el circuito de puesta a tierra (ver figura 4.3-4). Se debe reconocer que el circuito de retorno negativo a través de las vías está en paralelo con tierra y por lo tanto una parte considerable de la corriente de retorno negativa puede buscar el camino a tierra, incrementando los efectos corrosivos en los dispositivos enterrados. Este método sólo existe en los sistemas de tránsito antiguos. Los sistemas modernos no emplean un sistema de puesta a tierra como éste.

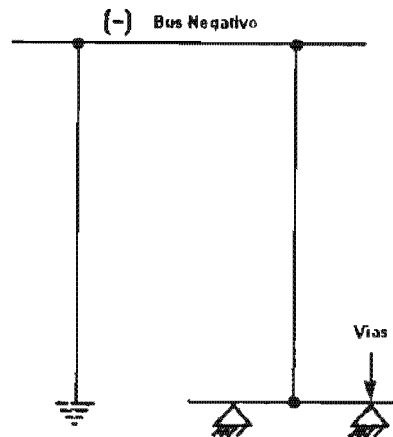


Figura 4.3-4 Sistema sólidamente aterrizado

#### IV.3.4.B. Sistema de puesta a tierra con diodo

Un arreglo paralelo de diodos con un contactor de CD y relés de protección se emplea en cada subestación de potencia de tracción (ver figura 4.3-5). Después de que se detecta el nivel de voltaje, el dispositivo 59 energiza un contactor de CD para aterrizar automáticamente el sistema negativo. El dispositivo de relé de sobrecorriente direccional (32) abre el contactor para niveles bajos de corrientes hacia delante y libera el sistema de potencia de tracción si el nivel alto de la corriente de falla a tierra permanece. Se debe hacer notar que bajo la operación normal del sistema para magnitudes pequeñas de la diferencia de potencial entre la vía y tierra, los diodos siempre conducen.

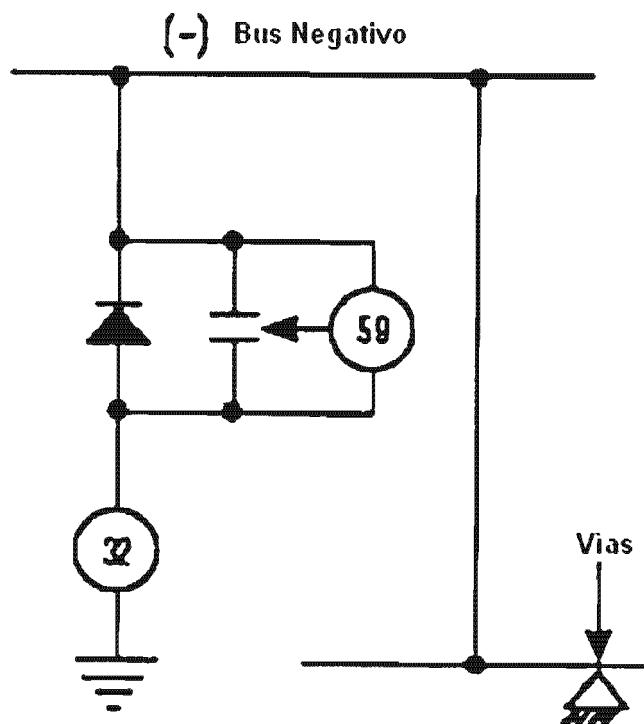


Figura 4.3-5 Sistema de puesta a tierra con diodo

#### IV.3.4.C. Interruptor automático de puesta a tierra

El dispositivo de interruptor 57, el dispositivo de relé de sobrevoltaje 59, y el dispositivo de relé de sobrecorriente 50 se emplean en cada subestación de potencia de tracción (ver figura 4.3-6). Después de detectar el nivel de voltaje, el dispositivo 59 activa y cierra el interruptor para aterrizar automáticamente el sistema negativo. Después de detectar la corriente de corto circuito, el dispositivo 50 se activa para desenergizar la subestación de potencia de tracción. Además, el dispositivo 50 proporciona una indicación local y una alarma remota que reajusta manualmente el interruptor. Se debe mencionar que el interruptor es un dispositivo mecánico y toma un tiempo definido para activarse; el voltaje de daño puede ocurrir durante este tiempo.

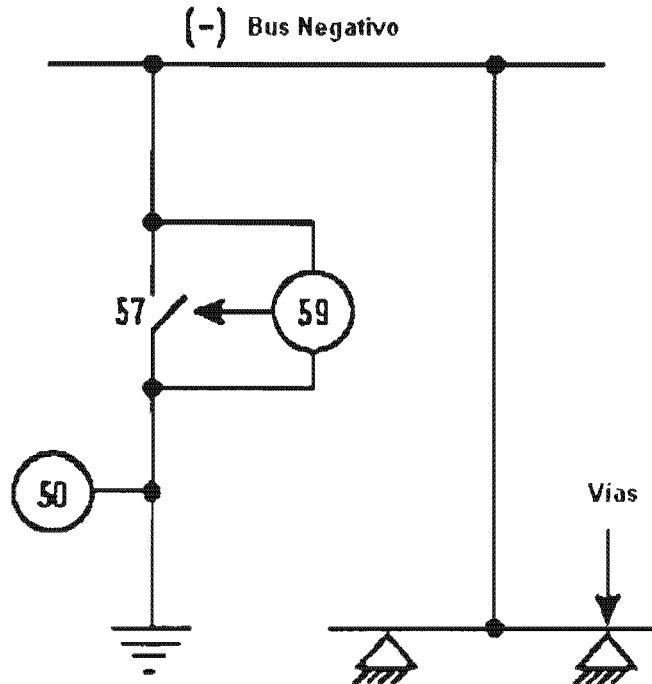


Figura 4.3-6 Interruptor automático de puesta a tierra

#### IV.3.4.D. Sistema sin aterrizar (flotante)

Este sistema es el que permanece sin aterrizar bajo condiciones normales y anormales. Este sistema proporciona la menor corriente disipada; sin embargo esto puede provocar daños al público en general y al personal de mantenimiento ya que el vehículo o las vías pueden estar a un elevado voltaje de CD con respecto a tierra, especialmente durante una falla del positivo a tierra. Este método no se usa en los sistemas de tránsito actuales por razones de seguridad, especialmente bajo condiciones anormales ó de falla.

#### IV.3.4.E. Método de puesta a tierra con un tiristor.

Los diferentes dispositivos del relé de protección del esquema de puesta a tierra con un tiristor se muestran en la figura 4.3-7. El dispositivo de relé de sobrevoltaje 59 supervisa continuamente el voltaje del negativo a tierra. Cuando este voltaje excede un valor actual, el relé acciona la compuerta del tiristor GTO por sus siglas en inglés (gate-turn-off thyristor) por un dispositivo de relé auxiliar 59X que aterriza el sistema negativo. Esto limita el daño producido por voltaje de la vía a tierra permitiendo que la corriente regrese a la fuente.

Los contactos del dispositivo de relé de corriente instantáneo 50 energizan los relés auxiliares con retraso de tiempo 50X1 y 50X2. Después de un retraso corto y una vez que se detecta un decremento en la corriente, el dispositivo 50X1 proporciona una alarma así como una señal (GTO) al tiristor para reanudar su posición normal de un sistema sin aterrizar. Sin embargo, si la corriente continúa fluyendo en el caso de una falla del positivo a tierra, entonces, después de un

retraso de tiempo, el dispositivo 50X2 liberará (abrirá) todos los interruptores de CD de los alimentadores.

El valor fijo del dispositivo de relé 59 debe ser del orden de 60 V, el cual se considera como el potencial de contacto seguro. Esto permitirá que el sistema opere sin estar aterrizado para condiciones normales mientras que el potencial entre la vía negativa y tierra se incrementa hasta un límite de 60 V bajo condiciones anormales de falla del alimentador positivo a tierra.

Los interruptores de CD de los alimentadores se cerrarán automáticamente con el esquema de relé de protección de medición de la carga, excepto para los interruptores del alimentador fallado y por lo tanto, proporciona una indicación de circuito fallado.

Se debe mencionar que se puede requerir una unidad GTO bidireccional dependiendo de la configuración del sistema y de una corriente de arranque excesiva del tren que se refleja en un voltaje de la vía respecto a tierra peligroso. La ventaja que tiene un esquema de tiristor bidireccional sobre un esquema de puesta a tierra de diodos es que el tiristor aterrizará el sistema solo cuando ocurra un voltaje peligroso debido a las corrientes de carga del tren o fallas del alimentador positivo a tierra. Bajo la operación normal del sistema abajo del sobrevoltaje del negativo a tierra, el sistema permanece sin aterrizar y por lo tanto la corriente disipada es mínima.

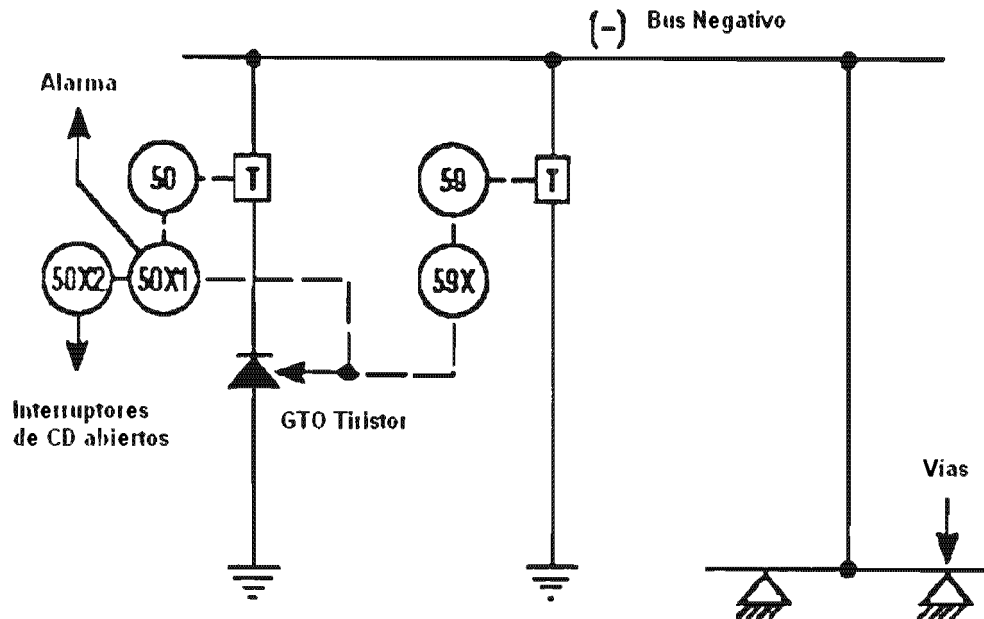


Figura 4.3-7 Sistema de puesta a tierra con tiristor.

### IV.3.5. Falla de la cubierta del equipo de CD.

Al unir el bus de CD a la carcasa se puede dirigir la falla hacia el interior de la cubierta de CD. Dependiendo de las condiciones del sistema, es decir, de si será aterrizado o no, la corriente de falla se controlará por los diferentes parámetros de resistencia definidos en seguida.

$R_{ng}$ : Resistencia de las vías. Se puede calcular usando la expresión (4.3-1).

$R_{sg}$ : Resistencia de la malla de tierra de la subestación. Este valor puede ser del orden de  $5 \Omega$  o menor para un diseño apropiado de la malla de tierra del TPSS.

$R_{rc}$ : Resistencia del esquema de protección de puesta a tierra del equipo.

$V$ : Voltaje nominal de CD del sistema.

#### IV.3.5.A. Sistema de potencia sin aterrizar

Cuando el sistema está sin aterrizar, la corriente de falla instantánea de CD del estado estable ( $I_{bfc}$ ) y la corriente de falla de arco ( $I_{arc}$ ) dentro de la cubierta o carcasa del equipo de CD se pueden calcular usando las siguientes expresiones:

$$I_{bfc} = \frac{V}{R_{ng} + R_{rc} + R_{sg}} \quad (4.3-2)$$

$$I_{arc} = \frac{V - 200}{R_{ng} + R_{rc} + R_{sg}} \quad (4.3-3)$$

#### IV.3.5.B. Sistema de potencia aterrizado

Cuando cualquiera de los esquemas de protección de puesta a tierra del sistema aterriza la vía negativa, entonces el valor de la resistencia del riel a tierra así como la resistencia de la malla de tierra local en las expresiones (4.3-2) y (4.3-3) se vuelven cero, por lo que se incrementan los valores de la corriente de falla. Las expresiones de la corriente de falla para un sistema aterrizado serán las siguientes:

$$I_{bfc} = \frac{V}{R_{rc}} \quad (4.3-4)$$

$$I_{arc} = \frac{V - 200}{R_{rc}} \quad (4.3-5)$$

Las expresiones (4.3-2) a (4.3-5) son sólo para comparar las configuraciones de puesta a tierra y no para calcular exactamente la corriente de corto circuito de CD. Se debe hacer notar que el voltaje de contacto de la carcasa en el caso de una falla de arco o falla instantánea entre el bus positivo de CD y la carcasa es prácticamente igual al valor de la caída de voltaje a través de la resistencia del

esquema de protección de puesta a tierra del equipo. Por lo tanto, el potencial de contacto en el caso del método de puesta a tierra de baja resistencia del equipo será menor que el potencial de contacto en el caso del método de alta resistencia. Sin embargo, la corriente de corto circuito correspondiente para el método de baja resistencia será considerablemente mayor que el valor correspondiente para el método de alta resistencia.

Es importante que el valor fijo del dispositivo de relé 59 asociado con los relés de protección de puesta a tierra del sistema sea tal que el dispositivo 59 se active para hacer que el sistema sin aterrizar se aterrice y así liberar de la falla. Los valores calculados para las corrientes de arco e instantánea que se muestran en la tabla 1 están basados en un voltaje del sistema de 750 V y una resistencia de la malla de tierra de 5  $\Omega$ , para ambos sistemas, es decir, aterrizado y sin aterrizar. La caída de voltaje a través del arco se considera que es de 200 V como se muestra en las expresiones (4.3-2) y (4.3-5).

La tabla 1 indica que los valores de la corriente de corto circuito para el caso de HRGM (método de puesta a tierra de alta resistencia) comparados con los valores de la corriente de corto circuito para el método de puesta a tierra de baja resistencia tienen pequeños cambios ocasionados por el cambio de sistema aterrizado a sistema sin aterrizar. Usando los valores de corto circuito de la tabla 1, se puede concluir que la pendiente del potencial de la tierra de la subestación local para el HRGM es pequeño comparado con el del método de baja resistencia. Esto puede no ser detectado por el dispositivo de relé 59 de puesta a tierra del sistema.

Descripción de las características técnicas	Método de Alta Resistencia		Método de Baja Resistencia	
Voltaje de monitoreo constante	25 V de CD		1 V de CD	
Resistencia del esquema de relés ( $R_{rc}$ )	200-700 ohms Usar 500 ohms		Menos de 1 ohm Usar 0.5 ohms	
Corriente de falla instantánea de la carcasa de la caja de velocidades a tierra ( $I_{bfc}$ )	1.48 A* 1.48 A**	1.50 A*** 1.50 A***	101.35 A* 116.28 A**	1500 A*** 1500 A***
Corriente de falla de arco de la caja de velocidades a tierra ( $I_{arc}$ )	1.08 A* 1.08 A**	1.1 A*** 1.1 A***	74.32 A* 85.27 A**	1100 A*** 1100 A***
Claro de seguridad entre la carcasa de la caja de velocidades de CD y la superficie aterrizada adyacente	5 pies horizontales 8 pies verticales piso aislado		Piso aislado para mayor seguridad	

Tabla 1  
Métodos de alta resistencia y baja resistencia de puesta a tierra del equipo.

\* Indica valores asociados con doble vía con longitud de 5 millas con resistencia de 200  $\Omega$ /1000 pies de vía, sistema sin aterrizar.

\*\* Indica valores correspondientes para una vía con longitud de 10 millas, sistema sin aterrizar.

\*\*\* Valores para un sistema aterrizado, para cualquiera de los dos métodos de puesta a tierra, conectando la vía negativa a tierra y con dispositivo de relé de sensor de voltaje 59.

### IV.3.6. Fallas fuera de la cubierta de CD

Existen dos tipos de fallas posibles externas a la cubierta o carcasa de CD en las vías electrificadas. Estas fallas son de arco (del positivo a tierra) y fallas de corto circuito instantáneas (del positivo al negativo). La falla de arco generalmente involucra alta impedancia en el punto de falla, mientras que una falla instantánea no tiene impedancia de falla intencional en el punto de falla. Ambos tipos de corrientes de falla serán controladas por los parámetros de resistencia de puesta a tierra del sistema y/o la resistencia de la vía a tierra independientemente del tipo de método de puesta a tierra del equipo.

Si el alimentador positivo toca tierra afuera de la subestación de potencia de tracción, esto va a conducir a una falla de alta impedancia con una pequeña magnitud de la corriente. Sin embargo, el potencial de tierra se elevará con

respecto a la vía con la posibilidad de que se active el dispositivo de relé 59 como se muestra en los métodos de puesta a tierra del sistema. Esto disparará los interruptores de los alimentadores de la subestación para liberar de la condición de falla.

A menos que el negativo se corto-circuite con tierra por medio de un esquema de relé de protección adecuado, la corriente de falla se controla por la resistencia de la vía a tierra y por la impedancia de falla. En muchas ocasiones esta corriente de falla será muy pequeña como para que los relés de protección del interruptor de CD del alimentador sean capaces de detectarla y liberar las condiciones de falla en un tiempo adecuado.

### IV.3.7. Corriente disipada de CD

En la parte de la corriente de CD de la carga que regresa a la subestación de potencia de tracción a través de las vías negativas existe una fracción de corriente que se filtra o escapa a tierra debido a la resistencia ocasionada por las capas de aislante que hay entre las vías y tierra. Para minimizar la corriente que se disipa, el valor de la caída de voltaje a través de las vías de regreso negativas debe permanecer bajo y el sistema negativo de tracción de potencia permanece sin aterrizar para la operación normal del sistema. La magnitud relativa de la corriente que se disipa (escapa) y el potencial de contacto del vehículo para varias configuraciones de la puesta a tierra del sistema se muestran en la tabla 2. Con el método de puesta a tierra con tiristor tanto la corriente disipada como la seguridad de las personas parecen estar balanceadas.

Método de Puesta a Tierra del Sistema	Potencial de la vía a tierra (Potencial de contacto del vehículo)	Nivel de corriente disipada (escapada)
Sólidamente aterrizado	Bajo	Alto
Aterrizado con diodo	Moderado/Bajo	Moderado/Alto
Aterrizado con tiristor	Moderado/Alto	Moderado/Bajo
Sistema sin aterrizar	Alto	Bajo

Tabla 2

Potencial de contacto y corriente disipada para diferentes métodos de puesta a tierra del sistema

Los relés de protección mostrados en la figura 4.3-7 proporcionan una liberación (disparo) completa y aislamiento del sistema de potencia de tracción en caso de una corriente de corto circuito grande debida a una falla del positivo a tierra y automáticamente regresa a la configuración normal una vez que se ha liberado de la falla.



### IV.3.8. Análisis de seguridad

Se ha probado que el arco asociado con la corriente de CD es muy peligroso para el personal y el equipo. Por lo tanto, la puesta a tierra del equipo y los esquemas de protección de puesta a tierra del sistema se deben optimizar para minimizar tanto como sea posible la corriente de falla de CD. El diseño debe también asegurar que una persona en contacto con la carcasa del equipo fallado de CD o con el vehículo de transporte no está expuesta a daño por shock eléctrico. Un voltaje de CD en el rango de 60-90 V se considera seguro de acuerdo con la práctica actual de la industria del transporte. Con las nuevas investigaciones médicas que revelan la presencia de componentes metálicos dentro de los huesos humanos, se considera que un voltaje seguro debe ser menor de 60 V.

Para reducir el efecto de shock eléctrico a pasajeros, la plataforma de la estación debe emplear superficies de goma. De forma similar, dentro de la subestación de potencia de tracción, los pisos aislados con componentes de una resistividad volumétrica muy alta tienden a incrementar la seguridad del operador contra shock eléctrico.

Desde el punto de vista de seguridad, las vías del tren se deben aterrizar, sin embargo, desde el punto de vista de corriente disipada (filtrada), éstas deben permanecer aisladas de tierra. Para cumplir con estos requerimientos, el esquema de relé de protección de puesta a tierra del sistema debe aterrizar las vías después de conocer el voltaje peligroso que existe entre éstas y tierra, y automáticamente regresar al estado normal, es decir, a que estén las vías sin aterrizar cuando el voltaje peligroso ha desaparecido.

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar una guía para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas eléctricos de corriente directa ya que en la actualidad existen muy pocos estándares que cubren este tipo de análisis. Debido a que existe poco esfuerzo en el desarrollo de estándares que traten éste tema en comparación con los ya existentes para sistemas de CA, lo que se logre aportar será muy provechoso, sobre todo por la importancia de la operación confiable de los sistemas de CD como son las fuentes de suministro de potencia que actúan bajo condiciones de emergencia en las estaciones generadoras, las instalaciones para el proceso de datos, compañías de teléfonos de larga distancia, los sistemas de tracción eléctrica, HVDC entre otros.

Algunas indicaciones útiles en el tema se propusieron en el estándar C37.14 de ANSI/IEEE en 1979, donde se presentaron algunos procedimientos y en particular, recomendaciones para instalaciones especiales, como baterías y sistemas de transporte eléctrico. Hasta la fecha el mayor esfuerzo que se ha tenido en cuanto estandarización es el que representa el estándar titulado "Calculation of Short-Circuit Currents in DC Auxiliary Installations in Power Plants and Substations" proporcionado por la Comisión Electrotécnica Internacional o IEC por sus siglas en inglés (Internacional Electrotechnical Commission).

En el capítulo II de esta tesis se presentan y discuten los procedimientos para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD de acuerdo al método proporcionado por IEC. El estándar de IEC, como su nombre lo indica, se aplica a instalaciones auxiliares de CD en estaciones generadoras y subestaciones pero no para el cálculo de corrientes de falla en sistemas más grandes como por ejemplo el sistema de tracción eléctrica. Para éste último, incluso si la metodología que se sigue para el cálculo es la misma, es necesario introducir nuevos factores de multiplicación en función de los valores de los parámetros eléctricos en el lado de CD.

El objetivo principal es consolidar y presentar algunos de los desarrollos más recientes en el análisis de sistemas de potencia de CD, incluyendo el modelado de sistemas de CD. En éste trabajo se describen los valores característicos de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD propuestos por el estándar de IEC. También se analiza el método de cálculo para las corrientes de falla de diferentes fuentes, particularmente en presencia de un bus común.

En el estándar de IEC antes mencionado se presenta una sobre estimación en el aspecto de seguridad, en particular en las contribuciones de baterías y convertidores. Por el contrario, para las contribuciones a la corriente de falla de un motor de CD, dicho estándar presenta una estimación baja en este sentido. Por otro lado, el estándar de IEC muestra un buen grado de susceptibilidad y precisión a las variaciones de los parámetros eléctricos en sistemas de CD.

En el capítulo III de este trabajo se presentó un ejemplo de cálculo para la corriente total de corto circuito en un sistema de CD, ubicando 4 fallas en diferentes puntos.

En el capítulo IV de esta tesis se presentan algunas aplicaciones del cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de CD. Una de ellas es la aplicación de interruptores de baja tensión en sistemas de corriente directa donde podemos concluir que los interruptores se clasifican por conmutación y protección por sobrecorriente de sistemas de CD incluyendo sistemas de baterías. Los termomagnéticos MCCB's e ICCB's o LVPCB's con unidades de disparo de acción directa están disponibles con clasificación para esos sistemas. Se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- 1) Los criterios de clasificación durante la interrupción en CD no se pueden relacionar directamente con la interrupción en CA.
- 2) Los voltajes pueden ser expresados como máximo (flotante) y nominal. En la ausencia de ambos voltajes, el rango de voltaje es considerado máximo.
- 3) Para sistemas con un tiempo largo de elevación de corriente, se debe considerar la constante de tiempo examinada. Para LVPCB's, la disipación de energía puede también necesitar evaluación.
- 4) Muchos MCCB's son clasificados y probados para la operación e interrupción con dos o más polos del interruptor conectados en serie con otro diferente. Esas conexiones no son recomendadas para sistemas de una polaridad y tierra.
- 5) Las curvas de disparo para las aplicaciones en CA de los MCCB's son utilizadas frecuentemente también para aplicaciones en CD. Los fabricantes generalmente publican factores de ajuste para los disparos instantáneos de niveles de corriente.

Otra de las aplicaciones presentadas en el capítulo IV es en los interruptores y requerimientos de protección para tableros de distribución usados en sistemas de tránsito rápido necesarios para identificar los parámetros relevantes de dicho sistema y para entender las condiciones críticas de interrupción de los interruptores de CD. En ésta parte de la tesis, se discutieron los requerimientos básicos para cada tipo de protección así como sus limitaciones.

Dentro de los sistemas de potencia de tracción de CD, también se trataron los métodos empleados para la puesta a tierra de dichos sistemas. Se realizó un análisis de la puesta a tierra del equipo y de la puesta a tierra del sistema así como sus relaciones para conseguir la seguridad del personal y del equipo. De la puesta a tierra del sistema de potencia de tracción de CD se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) Se presentaron los esquemas de protección de los métodos de puesta a tierra de alta resistencia y de baja resistencia del equipo. No existen valores de resistencia estándares para los esquemas de relés de protección de alta o baja resistencia. Algunos proveedores promueven sus esquemas de relés de protección de baja resistencia sin establecer la corriente de corto circuito que resisten, lo cual puede ser peligroso y destructivo en caso de que se presente una corriente de corto circuito grande. Los esquemas de relés de protección así como los dispositivos de contacto deben de ser capaces de resistir el peor caso de la máxima corriente de corto circuito de CD.
- b) Se deben evaluar los esquemas de relés de protección de la puesta a tierra de alta y baja resistencia del equipo en combinación con el esquema de protección de puesta a tierra del sistema GTO (gate-turn-off thyristor). Dicha evaluación se debe basar en el cálculo del potencial de la vía a tierra así como en el corto circuito.
- c) Cuando la estación de pasajeros está físicamente separada de las subestaciones de potencia de tracción, se debe usar un esquema de protección de puesta a tierra del sistema con GTO, similar al usado en la subestación de potencia de tracción. Esto incrementará la seguridad del personal para un voltaje de contacto grande del vehículo, para cuando dos trenes arrancan al mismo tiempo.

Finalmente es trascendente mencionar la importancia del cálculo de las corrientes de falla y sobre todo su aplicación, para tener así un diseño tanto de la puesta a tierra como de las protecciones que nos garanticen la mayor confiabilidad para la seguridad del personal y del equipo.

# BIBLIOGRAFÍA

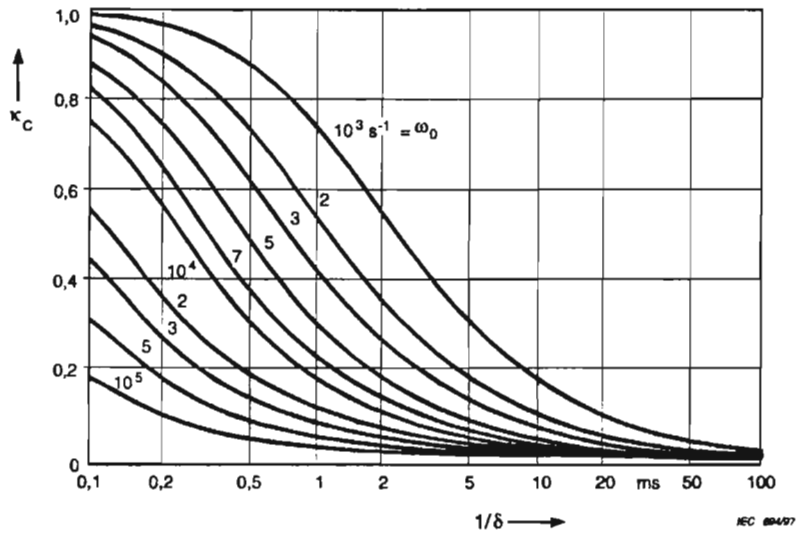
**Referencias y Bibliografía**

- Fleischer Ken and R. Scott Munnings. "Power Systems Analysis for Direct Current (DC) Distribution Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, No. 5, sept./oct. 1996.
- Berizzi Alberto, Silvestri Andrea, Zaninelli Dario. "Short-Circuit Current Calculations for DC Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, No. 5, sept./oct. 1996.
- J.S. Morton, "Circuit breaker and protection requirements for DC switchgear used in rapid transit systems". IEEE Transactions on industry applications, vol. IA-21, No. 5. Sept./Oct. 1985.
- Dev Paul, "DC Traction Power System Grounding". IEEE Transactions on industry applications, vol. 38, No. 3. May./June 2002.
- APPLYING LOW-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS IN DIRECT CURRENT SYSTEMS, George D. Gregory, member IEEE. IEEE transactions on industry applications, vol. 31, no. 4 july / august 1995.
- HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT TRANSMISSION, J. Arrillaga. IEE Power Engineering Series 6, ed. Peter Peregrinus Ltd, 1983.
- International Standard IEC 61660-1 "Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations. First Edition, 1997.
- Kuo, Benjamin C. "Sistemas de control automático". Prentice Hall, séptima edición, 1996.

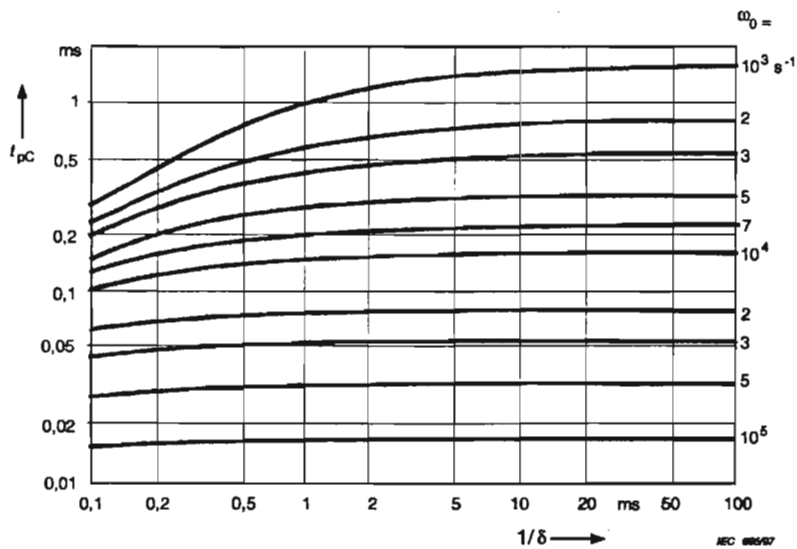
ANEXO  
**ANEXO**



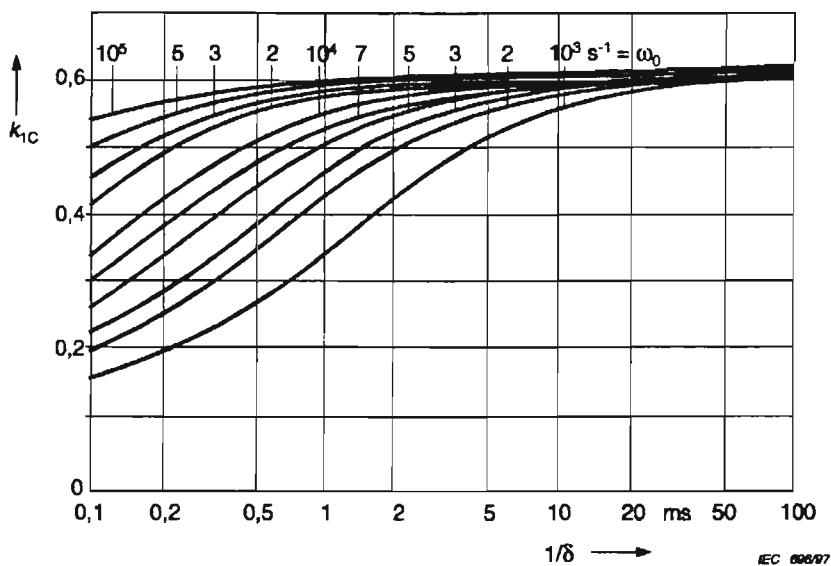
GRAFICAS DEL ESTANDAR INTERNACIONAL IEC 61660 – 1.



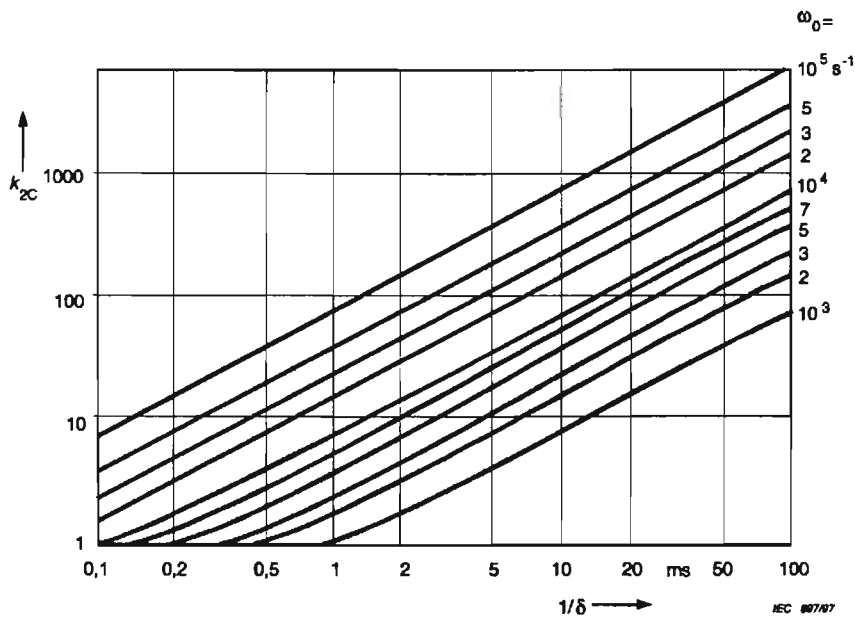
GRAFICA 12: Grafica para determinar el factor  $K_c$  de la corriente pico de corto circuito  $i_{pC}$ .



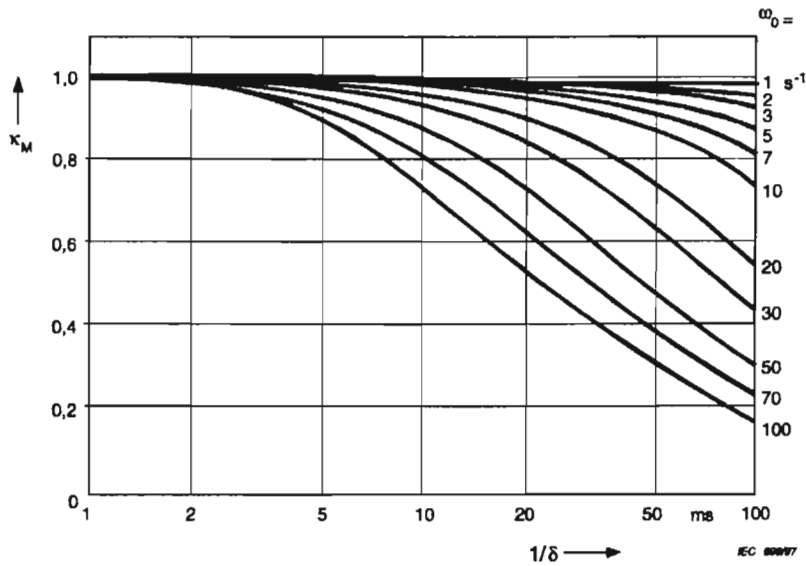
GRAFICA 13: Grafica para determinar el tiempo pico  $t_{pC}$ .



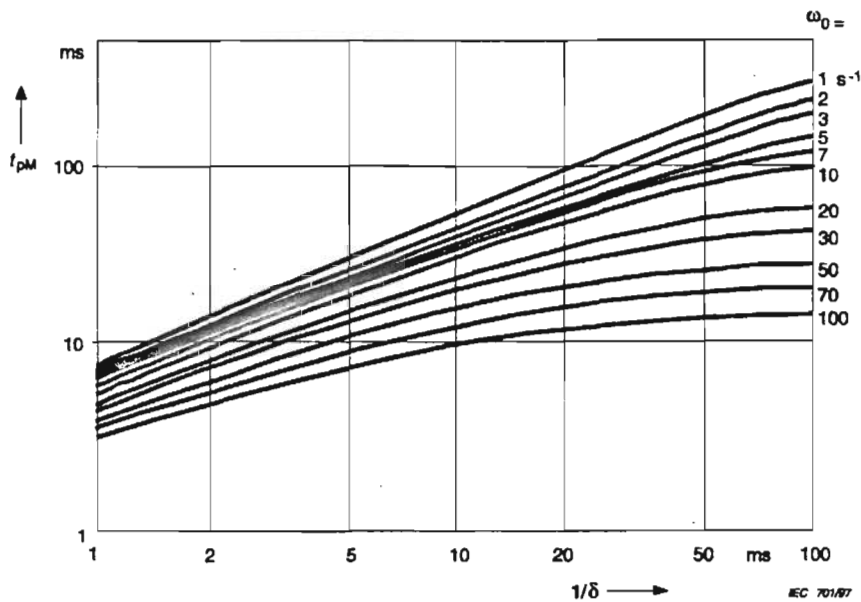
GRAFICA 14: Grafica para determinar el factor  $K_{1C}$  de la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1C}$ .



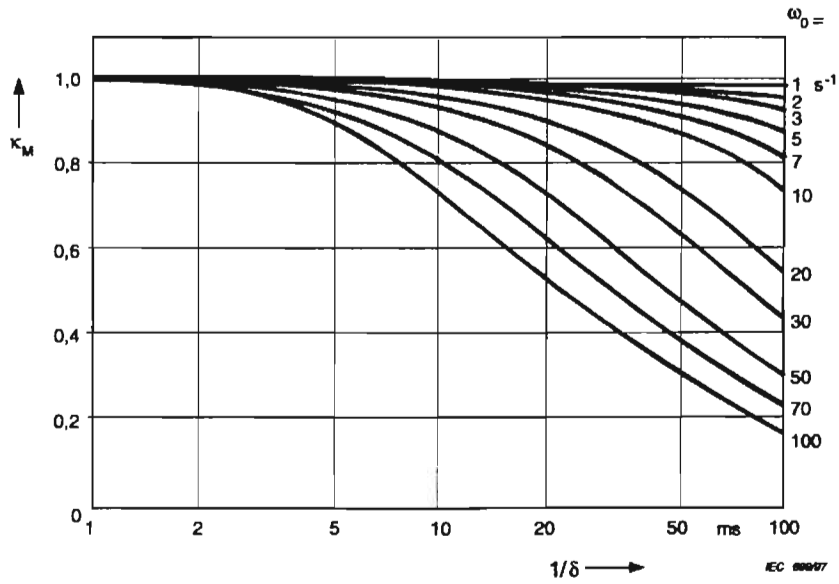
GRAFICA 15: Grafica para determinar el factor  $K_{2C}$  de la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2C}$ .



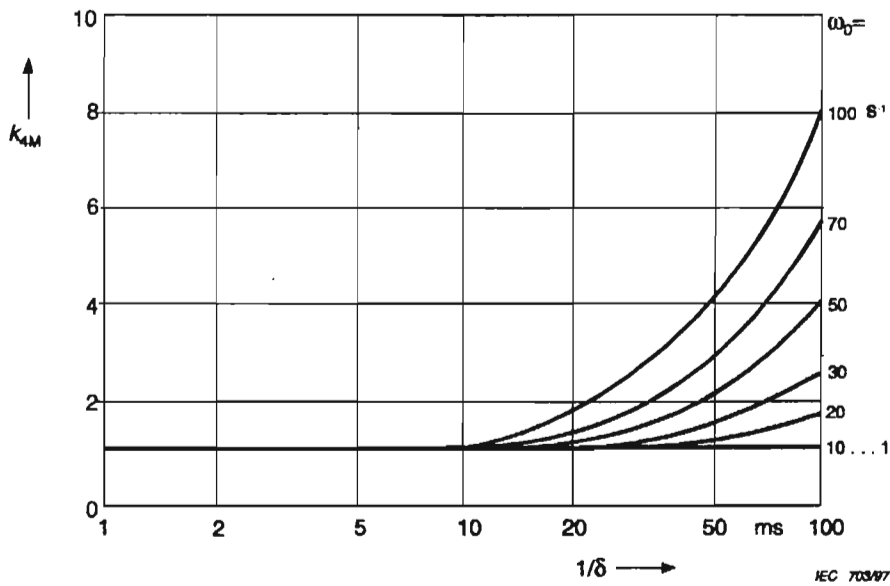
GRAFICA 17: Grafica para determinar el factor  $K_M$  de la corriente pico de corto circuito  $i_{pM}$  con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .



GRAFICA 19: Grafica para determinar el tiempo pico  $t_{pM}$  para decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .



GRAFICA 20: Grafica para determinar el factor  $K_{3M}$  de la constante de tiempo de ascenso  $\tau_{1M}$  para decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .



GRAFICA 21: Grafica para determinar el factor  $K_{4M}$  de la constante de tiempo de descenso  $\tau_{2M}$  para decremento en la velocidad con  $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ .