

## Cortocircuito Simétrico

### 5.1 Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia, son en general, extensamente complejos compuestos por una gran cantidad de equipos dedicados a la generación, transmisión y distribución de potencia eléctrica los centros de consumo. La variada complejidad de estos sistemas sugiere que las fallas son inevitables, no importando que cuidadosamente esos sistemas se lograsen diseñar. La posibilidad de diseñar y operar un sistema con una tasa de cero fallas, si bien no es realista es económicamente injustificable. Dentro de del contexto del análisis de cortocircuitos, las fallas del sistema se manifiestan como rupturas de aislamiento que puede ser seguido de uno a más de los siguientes fenómenos:

- Indeseables flujos de corriente.
- Corriente de magnitud excesivamente grande, que pueden llevar a los equipos a daño o disfunción de su vida útil.
- Excesivas sobretensiones, de naturaleza transitoria o sostenida, que comprometen la integridad y confiabilidad de varias partes aisladas.
- Depresión de los voltajes en la vecindad de la falla lo cual puede afectar la operación de equipos rotativos.
- Creación en el sistema de condiciones que comprometen la integridad del personal.

Debido a que los cortocircuitos no pueden ser siempre prevenidos, solo se puede tratar de mitigar y para ciertos casos tratar de disminuir sus efectos potencialmente peligrosos. Lo primero que se quiere en el diseño de un sistema de potencia, es disminuir lo más posible la ocurrencia de la falla. Si el cortocircuito ocurre, la mitigación con sus efectos consiste: (a) manipular la magnitud de las corrientes de falla indeseables (b) aislar la parte más pequeña del sistema de potencia alrededor del área de la falla, a fin de mantenerse el servicio en el resto del sistema. Una significativa parte del sistema de protección es dedicado a la detección de las condiciones de cortocircuito en una condición confiable. Una parte considerable del capital de inversión es requerido para los equipos de interrupción a todos los niveles de voltaje que es capaz de soportar la corriente de falla e interrumpirla del área fallada.

Entre las principales razones para realizar un estudio de cortocircuito se tienen:

- Verificación de la adecuada capacidad de interrupción de los equipos instalados. El mismo tipo de estudio formará las bases de la selección de los equipos de interrupción para propósitos de planificación de sistemas.
- Determinación de los ajustes de los dispositivos de protección, tal cual es hecho primariamente por las cantidades que caracterizan el sistema bajo las condiciones de falla. Esas cantidades también referidas *protection handles*, típicamente incluyen corrientes de fase y secuencia o voltajes y ratas de cambio de voltajes o corrientes en el sistema.
- Determinación de los efectos de las corrientes de falla en varios componentes del sistema tales como: cables, líneas de transmisión, sistemas de barras (*busways*), transformadores, y reactores, durante el tiempo en que la falla persista. Los esfuerzos mecánicos y térmicos resultantes de las corrientes de

falla siempre son comparados con el correspondiente término de corta duración, usualmente de primer ciclo, con la capacidad de los equipos.

- Establecer los efectos de los diferentes tipos de cortocircuito de con variedad de severidad en el voltaje de todo el sistema. Estos estudios identificarán áreas en el sistema que en falla pueden resultar en una depresión inaceptable de voltaje.
- Conceptualización, diseño y refinamiento de los esquemas del sistema, de puesta a tierra del neutro, y puesta a tierra de seguridad.

## 5.2 Extensión y Requerimientos de los Estudios de Cortocircuito

Los estudios de cortocircuitos son necesarios para cualquier sistema de potencia en otros estudios fundamentales como; estudios de flujo de carga, estudios de estabilidad transitoria, estudio de análisis de armónicos, etc. Los estudios de cortocircuito pueden ser realizados en la etapa de planeamiento, en razón de ayudar a finalizar el esquema del sistema, determinar los niveles de voltaje, dimensionar cables, transformadores y conductores. En sistemas ya existentes, el estudio de fallas es necesario en casos en que se agrega generación, instalación de carga adicional rotativa, modificaciones en la configuración o esquema del sistema, reajuste de los sistemas de protecciones, verificación de la adecuada capacidad de los breaker existentes, reubicación de swithgear existentes en razón de prevenir innecesarios gastos de capital. En sistemas que han fallado o colapsado, el análisis puede involucrar estudios de cortocircuito para duplicar las razones y condiciones del sistema que provocaron la falla del sistema.

Los requerimientos y extensión del estudio de cortocircuito depende de los objetivos de ingeniería buscados. De hecho, esos objetivos dictaran que tipo de análisis de cortocircuito es requerido. El monto de datos requeridos también dependerá en la extensión y naturaleza del estudio. La gran mayoría de los estudios de cortocircuito en sistemas de potencia comerciales y plantas industriales, requiere de uno o más de los siguientes tipos de cortocircuito:

- *Falla Trifásica (Three-phase fault)*. Puede o no involucrar a tierra. Todas las tres fases son cortocircuitadas juntas.
- *Falla se una sola línea a tierra (Single line-to-ground fault)*. Cualquiera, pero solo una fase es llevada a tierra.
- *Falla Línea a Línea (Line-to-Line fault)*. Cualquiera de dos fases son unidas entre sí.
- *Falla doble línea a tierra (Double Line-to-ground fault)*. Cualquiera de dos fases son conectada entre ellas y tierra.

Estos tipo de cortocircuito son también denominados *fallas shunt*, debido a que las cuatro exhiben el atributo común de estas asociado con corrientes de falla y MVA que fluyen derivados de una parte diferente desde el sitio pre-falla serie.

Los cortocircuitos trifásicos frecuentemente resulta ser el más severo de todos. Es entonces muy común que se realice solo la simulación de la falla trifásica cuando se busca las máximas magnitudes posibles de corrientes de falla. Si embargo, importantes excepciones existen. Por ejemplo, la corriente de falla de un simple cortocircuito a monofásico puede exceder la corriente de falla trifásica cuando ocurren en las vecindades de:

- Una máquina sincrónica solidamente puesta a tierra.
- El lado de estrella solidamente puesto a tierra de una transformador delta estrella con núcleo trifásico (tres columnas *three-leg*).
- El lado de estrella aterrado solidamente de un autotransformador.
- En el devanado en estrella o estrella aterrada de un transformador de tres devanados con delta terciaria.

Para sistemas donde una o más condiciones de las expuesta anteriormente existen, se recomendable realizar la simulación de la falla de una línea a tierra. El hecho de que los *circuit-breaker* de media y alto voltaje, posean

un 15% más alto de capacidad de interrupción para las falla de una sola línea a tierra debe ser tomada de este en cuenta, si elevadas corrientes de falla a tierra son encontradas. Los estudios de falla línea a línea o doble línea a tierra pueden también ser requeridos para la coordinación de dispositivos de protección. Se debe observar que debido a que solo una fase de la falla a línea a tierra puede experimentar más altos requerimientos, la falla trifásica siempre requerirá más energía debido a que las tres fases experimentan los mismos requerimientos de interrupción.

Otros tipos de condiciones de falla pueden ser de interés, incluidas en las llamadas *fallas series*, y pertenecen a una de los siguientes tipos de sistemas desbalanceados:

- *Una línea abierta (One line open)*. Una de las tres fases puede estar abierta.
- *Dos líneas abiertas (Two lines open)*. Dos fases cualquiera de las tres están en abierto.
- *Impedancias desiguales (Unequal impedances)*. Una discontinuidad de impedancia por una línea desbalanceada.

El término de *falla serie* es usado debido a que los desbalances envueltos están asociados con una redistribución de la corriente de carga pre-falla. Las fallas series son de interés cuando se fijan los efectos de rompen los conductores de fase de una línea de transmisión, fallas de la junta de cable, se funden fusibles, falla de un breaker para abrir todos los polos, la inadvertida energización a través de un breaker en uno o dos polos, y cualquier otra situación que resulte en el flujo de corrientes desbalanceadas.

### 5.3 Requerimientos para el Estudio de Cortocircuito

Cuando en un sistema eléctrico de potencia se produce una falla por cortocircuito, el valor de la corriente que circula por la red queda determinado por la fuerza electromotriz de las máquinas conectadas al sistema, por sus impedancias y por las impedancias entre las máquinas y el punto de falla. El cortocircuito es un fenómeno transitorio interesante, debido a que la corriente que circula inmediatamente después de la falla, la que circula varios ciclos después y la que circula en régimen permanente poseen valores distintos, esto se debe al efecto de la corriente en el rotor sobre el flujo que genera tensión en la máquina; entonces la corriente de cortocircuito varía con relativa lentitud desde el valor inicial hasta el de régimen permanente.

En general el análisis de un sistema eléctrico de potencia en condiciones de falla requiere de cierta información:

- Diagrama unifilar del sistema.
- Diagrama de impedancias (o reactancias).
- Tipo de falla.
- Ubicación de la falla.

El desarrollo de una falla por cortocircuito simétrico balanceado, consta de tres etapas:

- El comportamiento del sistema antes que ocurra la falla, siendo estas las condiciones pre-falla.
- El fenómeno transitorio durante y luego de la ocurrencia de la falla.
- Finalmente la condición estable de la falla, esta es una situación la cual no se debe alcanzar, y es tarea de los sistemas de protección, que la falla nunca alcance régimen permanente.

El estudio de una falla dentro del sistema de potencia se basa en el régimen transitorio y permanente de la falla; la condición de régimen permanente en una falla debe ser evitada en todo momento.

### 5.4 Régimen Transitorio de un Circuito RL Serie

Los disyuntores dentro de los sistemas de potencia son los elementos encargados de interrumpir el flujo de energía eléctrica en cualquier situación, por ello la selección de un disyuntor no depende únicamente de la

corriente que pasa a través del interruptor en condiciones nominales, sino que también de la corriente máxima que tiene que interrumpir, al voltaje de operación de operación.

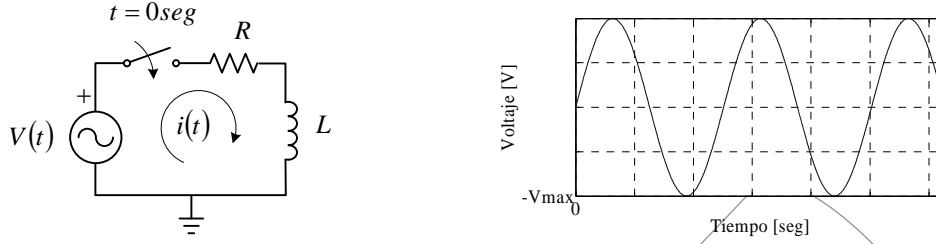


Figura 5.4.1. Circuito RL con excitación senoidal

Para comprender el problema de calcular el valor de la corriente inicial de cortocircuito cuando una máquina sufre un fallo en terminales se analiza el régimen transitorio de un circuito RL serie.

Suponga un circuito RL serie, al cual se le aplica una tensión alterna  $v(t) = V_{max} \text{sen}(\omega t + \phi)$ , donde  $t = 0$  en el momento de aplicar el voltaje. El ángulo  $\phi$  determina el valor del módulo de la tensión al cerrar el circuito. Si la tensión instantánea al cerrar el interruptor es cero, entonces  $\phi = 0^\circ$ , si por el contrario la tensión tiene su valor máximo instantáneo, entonces  $\phi = \pi / 2$ .

El comportamiento dinámico del circuito puede ser obtenido aplicando la ley de tensiones de Kirchoff, entonces la ecuación diferencial es:

$$V_{max} \text{sen}(\omega t + \phi) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

Esta es una ecuación diferencial lineal ordinaria con coeficientes constantes cuya solución, puede ser obtenida por varios medios:

$$i(t) = \frac{V_{max} \left[ \text{sen}(\omega t + \phi + \theta) - e^{-\frac{R}{L}t} \text{sen}(\phi - \theta) \right]}{Z} \quad (2)$$

en donde:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad (4)$$

La expresión de la corriente en régimen transitorio de este circuito puede ser escrita como la suma de dos términos:

$$i(t) = i_p(t) + i_T(t) \quad (5)$$

Donde el primer término  $i_p(t)$ , corresponde a la *componente en régimen permanente o componente alterna*, que varía sinusoidalmente en el tiempo. Este término alterno y periódico es el valor en régimen permanente de la corriente para un circuito RL para la tensión aplicada.

El segundo término de la expresión  $i_T(t)$ , se le denomina *componente transitoria o continua*, la cual es aperiódica y disminuye exponencialmente con una constante de tiempo  $R/L$ .

Si en  $t = 0$ , el valor de la componente de régimen permanente no es cero, aparece una componente transitoria en la solución, para satisfacer la condición física de que la corriente debe ser cero en el instante de cerrar el interruptor  $t = 0^+$ .

$$i_T(t) = \frac{V_{\max} e^{-\frac{R_L T}{L}} \text{sen}(\phi - \theta)}{|Z|} \tag{6}$$

La componente transitoria es nula si en el instante de cierre del interruptor, el punto de voltaje esta en  $\phi - \theta = 0$  o cuando  $\phi - \theta = \pi$ . Por el contrario si el cierre del interruptor tiene lugar en un instante tal que  $\phi - \theta = \frac{\pi}{2}$  de la onda de voltaje, en este caso la componente transitoria tiene un valor inicial máximo y posee un valor igual al valor máximo de la componente de régimen permanente ( $\sqrt{2}I_{ca}$ ).

$$i_T(t) = \frac{V_{\max}}{|Z|} \tag{6}$$

Si:  $\phi - \theta = \frac{\pi}{2}$

La componente transitoria o continua posee un límite en sus valores, que tienen como máximo  $\sqrt{2}I_{ca}$  siendo  $I_{ca}$  la componente de régimen permanente o componente de corriente alterna, y como mínimo cero, estos valores limites para la componente transitoria o continua, surgen del hecho de los posibles valores instantáneos de la tensión en el instante de cierre del interruptor y del factor de potencia del circuito.

La corriente  $i(t)$  que circula por el circuito RL serie, posee una asimetría producto de la componente continua que aparece; de manera que la corriente solo puede ser simétrica para cualquier tiempo solo si la componente transitoria es cero.

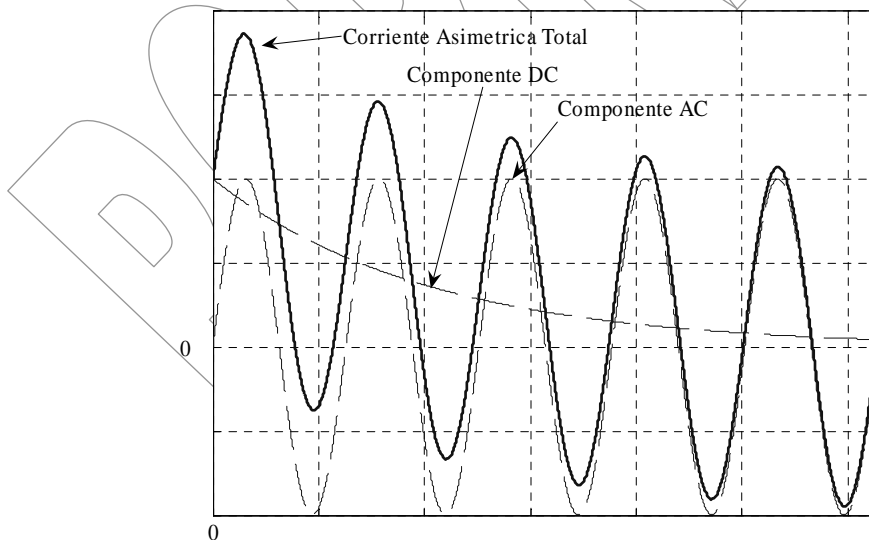
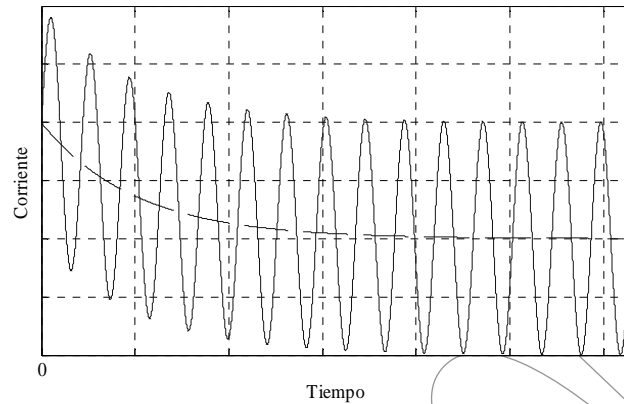
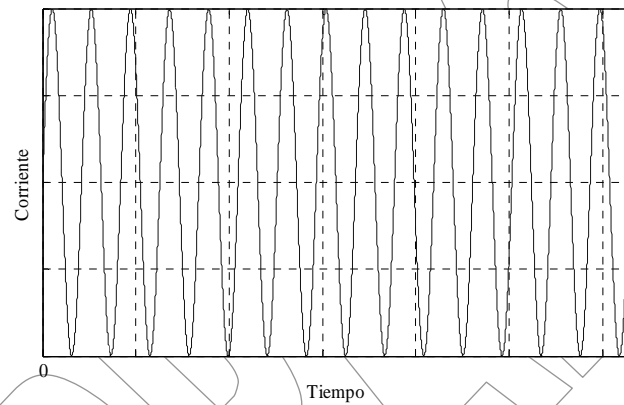


Figura 5.4.2.



(a) Máxima componente continua



(b) Sin componente de continua

**Figura 5.4.3. Corriente en función del tiempo en un circuito RL**

Una conclusión muy importante es que en el instante de cierre del circuito la componente alterna y continua tienen siempre el mismo valor absoluto, pero de signo contrario, por que en el instante de cierre debe ser igual a cero.

Los generadores eléctricos de corriente alterna (alternador), opera a partir de un campo magnético giratorio que genera una tensión en los devanados inducidos los cuales poseen resistencia e inductancia. Cuando un alternador es sometido súbitamente a un cortocircuito, la corriente que por él circula, es similar a la que se hace presente en un circuito RL serie. Se debe realizar la salvedad que el fenómeno transitorio en un alternador, posee similitud al ocurrido en el circuito RL serie, pero existen tremendas diferencias, debido a que la corriente en el inducido afecta al campo giratorio, por lo cual si bien es cierto que los fenómenos poseen semejanzas no se deben confundir.

## 5.5 Cortocircuito en Máquina Síncrona

La conversión de energía por procedimientos electromagnéticos está relacionada con el almacenamiento de energía en los campos magnéticos. Cuando se produce un cambio en las condiciones operativas ya sea por falla o régimen transitorio, no son posible las correspondientes variaciones en la energía magnética almacenada ocurran instantáneamente, sino que por el contrario transcurre cierto periodo transitorio hasta que se estabiliza la situación en las nuevas condiciones impuestas. Es muy frecuente que se deba tener presente la liberación o absorción de energía por parte de las masas en movimiento además de la correspondiente a los campos magnéticos, en general, se deben considerar transitorios electromecánicos más los transitorios eléctricos.

La gran complejidad de los fenómenos asociados al período transitorio de las máquinas sincrónicas puede apreciarse observando los principales detalles estructurales de las mismas. El análisis del período transitorio de la máquina supone la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales de los circuitos acoplados.

Suponiendo que el alternador no tiene polos salientes y añadiendo la hipótesis de que el circuito magnético no está saturado, resulta sencillo realizar el análisis del funcionamiento de la máquina, en realidad hubo una época en que estimar el funcionamiento de una máquina de polos salientes que tenían circuitos más o menos saturados, si bien fue necesario abandonarlo a causa de los resultados irregulares, que con un examen previo hubiesen sido de esperar. La hipótesis de un rotor cilíndrico hace posible combinar las F.M.M. del estator y el rotor por el método de adición vectorial; y la hipótesis de un circuito magnético no saturado hace posible considerar que las F.M.M. individuales crean flujos proporcionales, cada uno de los cuales desarrolla entonces F.E.M. proporcionales, las cuales pueden combinarse adecuadamente con las otras.

Cuando por el devanado inducido de la máquina circula una corriente, la F.E.M. inducida y la corriente no están en fase, es entonces que aparece la *reacción del inducido*, cualquiera que sean las condiciones reales, la corriente puede descomponerse siempre en dos componentes, una de las cuales está en fase con la F.E.M. en el caso del generador, mientras que la otra está en cuadratura con la F.E.M.

En todos los estudios de reacción del inducido se subraya el hecho de que las F.M.M. del inducido y de los devanados de excitación solo pueden combinarse vectorialmente cuando actúan sobre el mismo circuito magnético. Esta situación queda substancialmente satisfecha cuando se trata de alternadores con polos no salientes, pero no se cumple en forma alguna en máquinas del tipo de polos salientes, por lo que no es de extrañar que la aplicación de los métodos primitivos de la F.E.M. y de las F.M.M. a generadores de polos salientes proporcionen resultados discordantes y poco consistentes. El primer análisis satisfactorio del efecto perturbador producido por la construcción de polos salientes fue obra de *André Bordel*; el método que ideó, recibió el nombre de método de las dos reacciones, porque tiene en cuenta que la F.M.M. del inducido contiene, en general, una componente en cuadratura (de magnetización transversal) y otra directa (magnetizante o desmagnetizante), que producen efectos de diferentes clases.

Suponga que un alternador trifásico impulsado a velocidad constante (nominal) se excita de forma que su tensión a circuito abierto sea el voltaje  $E$  de régimen de la máquina y en estas condiciones, sus bornes se ponen repentinamente en cortocircuito. En el instante inicial, la corriente en el inducido está limitada únicamente por la impedancia de dispersión interior del devanado inducido, pero como su resistencia es muy pequeña en comparación con su reactancia; se deduce que la corriente de cortocircuito se retrasa en un ángulo de  $90^\circ$  con respecto a la tensión inducida, por lo tanto  $I_d = I, I_q = 0$ . Se recuerda que cuando se aplica una tensión alterna a un circuito inductivo, la corriente inicial depende de la magnitud de la tensión en ese instante, esto depende del punto de la onda de tensión con el que se cierra el circuito.

Un cortocircuito simétrico trifásico, no perturba la naturaleza equilibrada del circuito del inducido considerado como un todo, con el resultado de que la suma algebraica de las corrientes instantáneas en las tres fases permanece en todo instante igual a cero; los valores punta de las tres corrientes de fase, serán substancialmente los mismos y durante los primeros ciclos después de haberse producido el cortocircuito, puede ser de diez a veinte veces la corriente nominal a plena carga, lo que dependerá de la construcción de la máquina.

La enorme irrupción inicial de corriente, que retasa en casi  $90^\circ$  con respecto a la tensión, crea una F.M.M. desmagnetizante proporcionalmente grande en el eje directo y tiende a reducir el flujo por polo por debajo de su valor primitivo. Pero este flujo representa una cantidad muy considerable de energía almacenada que no puede disiparse instantáneamente; así, aunque el flujo por polo empieza inmediatamente a decrecer, lo hace con gran lentitud, a un régimen que depende de las constantes de tiempo de los circuitos eléctricos asociados, es decir, de la relación inductancia/resistencia de estos circuitos.

La primera irrupción de corriente, muchas veces mayor que la corriente de plena carga, es seguida por un período durante el cual la corriente en el inducido decae gradualmente hasta el valor de cortocircuito mantenido que corresponde a la excitación inicial; en cuanto que la corriente del inducido cae desde su gran valor inicial, la corriente instantánea de excitación que compensa su efecto desmagnetizante, decrece igualmente hasta su magnitud primitiva. El gradual decrecimiento de ambas corrientes es consecuencia del hecho de que la energía almacenada en el campo primitivo se disipa en forma logarítmica en la resistencia del inducido y en los arrollamientos de excitación en el amortiguador y en los caminos de las corrientes parásitas.

## 5.6 Corriente de Cortocircuito y Reactancias de la Máquina Sincrónica

En el estudio del alternador operando en vacío que es sometido súbitamente a un cortocircuito en sus terminales, puede estudiarse de una manera excelente, realizando oscilogramas de las corrientes de cada fase al presentarse el fallo. En el alternador trifásico las tensiones generadas se encuentran desfasadas  $120^\circ$  entre sí, entonces el cortocircuito aplicado en los terminales corresponde a puntos diferentes de las ondas de tensión, de manera que la componente transitoria de la corriente de cada fase es diferente. En general la componente transitoria o continua de una máquina sincrónica puede ser expresada como:

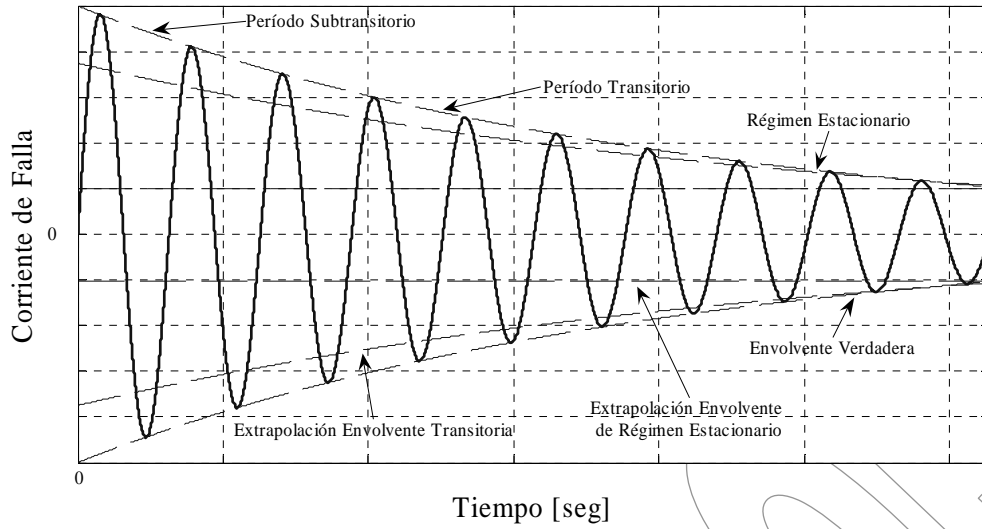
$$i(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (7)$$

donde  $\tau_a$ : es la constante de tiempo de la armadura, por lo general vale 9 ciclos (a frecuencia industrial).

Las reactancias que se estudian en el fenómeno de cortocircuito en una máquina sincrónica, se denominan *reactancias de eje directo*, ellas provienen del hecho que la resistencia del inductor es muy pequeña, por tanto en cortocircuito la corriente de fallo solo es limitada por la reactancia de la máquina, con lo que la corriente atrasa en un ángulo grande, ( $90^\circ$ ) a la tensión generada en vacío. La reactancia de cuadratura se suele utilizar las caídas de tensión originadas por aquella componente de la corriente en el inducido en cuadratura. Se recuerda que el termino cuadratura proviene del hecho de descomponer el flujo de reacción del inducido en dos ejes, un directo y otro de cuadratura.

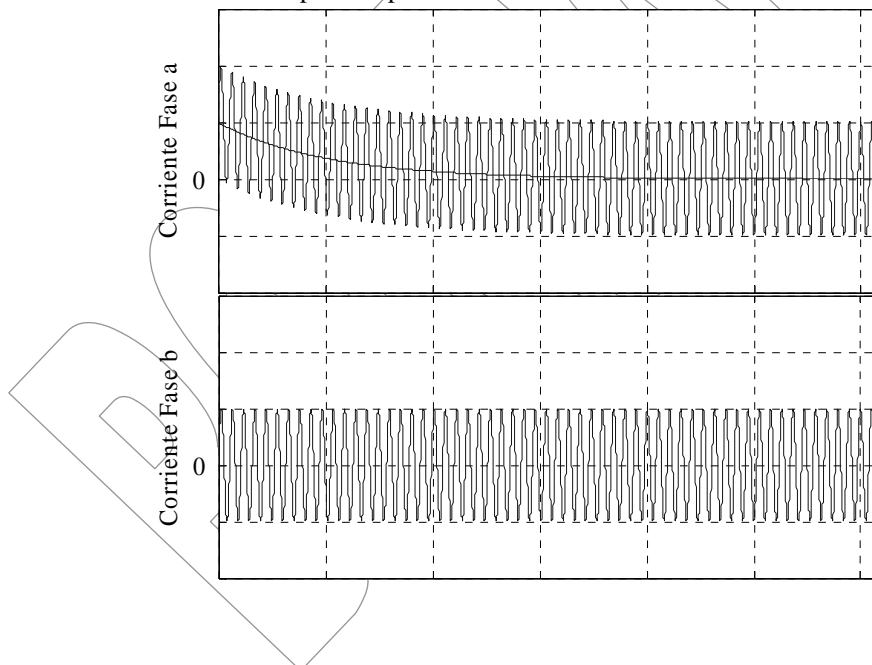
El fenómeno de cortocircuito se suele dividir en tres etapas:

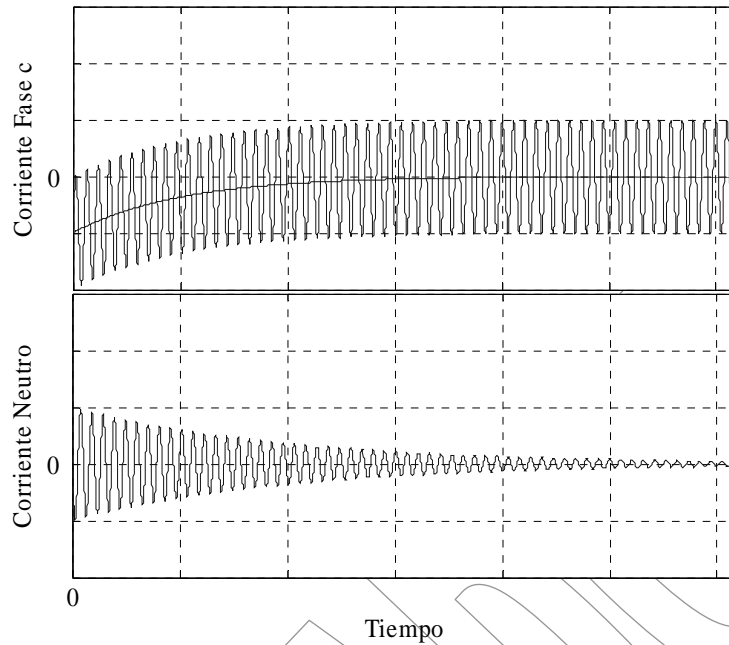
- Período Subtransitorio
- Período Transitorio
- Período Permanente



Cada parte del fenómeno transitorio, esta caracterizado por la duración y magnitudes de sus corrientes.

El *régimen permanente* corresponde a las magnitudes de la corriente una vez que ha transcurrido mucho tiempo luego del cortocircuito, se caracteriza porque los valores de corriente son los menores en magnitud de todo el fenómeno. El *período transitorio* corresponde al comportamiento de la corriente desde varios ciclos luego del cortocircuito hasta que se alcanza el régimen permanente, los valores de las corrientes son más severos que las de régimen permanente. El *período subtransitorio* es el más severo en los valores de las magnitudes de corrientes, tiene una duración muy corta, no mayor a varios ciclos, pero los efectos de las magnitudes de corrientes en este periodo pueden ser devastadores.





**Figura 5.6.1 . Oscilograma de la corriente de cortocircuito en un generador sincrónico**

La división del fenómeno de cortocircuito en estos tres periodos obedece al hecho de la disipación de energía del campo de la máquina es de forma logarítmica, y donde cada periodo corresponde a una constante de tiempo asociada a la disipación de dicha energía. Las tres constantes de tiempo involucradas en el fenómeno de cortocircuito son respectivamente:

- Constante Subtransitoria Longitudinal ( $\tau''_d$ )
- Constante Transitoria Longitudinal ( $\tau'_d$ )
- Constante de Régimen Longitudinal ( $\tau_d$ )

Se recuerda que cada constante de tiempo relaciona la inductancia/resistencia de cada período. La constante de régimen  $\tau_d$  involucra una inductancia que se obtiene por el flujo en régimen permanente del cortocircuito de la máquina, la reactancia que se involucra en este periodo se denomina *reactancia sincrónica directa*  $X_d$ .

Sea  $|I|$  el valor de la corriente de cortocircuito en régimen permanente, entonces el valor máximo de la señal de corriente de cortocircuito es  $\sqrt{2}$  veces el valor  $|I|$ . La *reactancia sincrónica* del alternador o *reactancia sincrónica directa*  $X_d$ , de un alternador se define como la relación de la tensión en vacío de la máquina  $E$  entre el valor de la corriente en régimen permanente  $|I|$ , con factor de potencia bajo durante el cortocircuito. Se conviene despreciar el valor de la resistencia del inducido debido a que su valor es muy pequeño comparada con la reactancia.

La constante de tiempo transitoria longitudinal  $\tau'_d$ , determina la amortiguación de la onda de corriente mediante una envolvente exponencial. Sea  $|I'|$  el valor de la corriente en régimen transitorio al final del cual la corriente se fija en su valor de régimen permanente. La *reactancia transitoria directa*  $X'_d$ , se define como la relación entre la tensión en vacío de la máquina  $E$  y la corriente transitoria de eje directo. La parte más dañina del cortocircuito es el periodo subtransitorio cuya duración es muy corta escasamente alcanza los ocho ciclos. Las magnitudes de las corrientes son muy elevadas y caracterizadas por una elevada amortiguación, producto

de una envolvente muy pronunciada gobernada por la constante de tiempo longitudinal subtransitoria ( $\tau''_d$ ). Cuando un alternador se pone repentinamente en cortocircuito, en la máquina aparece una *reactancia Subtransitoria directa*  $X''_d$ , que considera la reactancia del arrollado de excitación, la reactancia del devanado amortiguador, y la reactancia del arrollado inducido.

La *reactancia Subtransitoria directa*  $X''_d$  se define como el cociente de la tensión en terminales en vacío de la máquina  $E$ , entre la corriente de régimen subtransitoria de cortocircuito  $|I''|$ .

El código de ensayos de la IEEE para máquinas sincrónicas, describe diversos procedimientos para medir  $X''_d$  uno de los cuales se basa en conectar el arrollamiento de excitación en cortocircuito y se aplica una tensión monofásica a dos devanados de fase del circuito en serie (conectados para un desplazamiento de fase de  $120^\circ$ ). Se procede a bloquear el rotor en la posición angular para máxima corriente inducida. Entonces la reactancia subtransitoria  $X''_d$ , es igual a la mitad de la tensión aplicada dividida por la corriente resultante del inducido.

### 5.7 Componente Simétrica de la Corriente de Falla $I_{ca}$

La componente simétrica de la corriente de falla es la que resulta de restar a la corriente total de falla, la componente continua o transitoria, esta componente simétrica es igual para las tres fases y no depende del instante en que ocurre la falla.

En el momento del cortocircuito el flujo en el entrehierro es mayor que unos pocos ciclos después, la reducción en el flujo se debe a la F.M.M de reacción del inducido, pero es necesario un cierto tiempo para que se produzca esta reducción en el flujo magnético de la máquina (consecuencia directa de la ley de flujo constante) y esta disminución produce una reducción en la corriente (la F.E.M. generada por el flujo en el entrehierro determina la corriente).

### 5.8 Efecto del Regulador de Voltaje

Los generadores están equipados con un regulador automático de voltaje, cuya tarea es controlar la corriente de excitación del generador de manera de mantener la tensión en terminales con amplitud constante e igual a un valor prefijado.

En un cortocircuito en un generador, el voltaje en terminales se hace cero, pero el regulador intentara recuperar o restablecer la tensión aumentando la corriente de excitación, (siempre y cuando las protecciones no actúen) esto trae como consecuencia un aumento en la tensión interna de la máquina, lo cual hace que la corriente de cortocircuito aumente. Debido a las constantes de tiempo asociadas, la velocidad de respuesta es muy baja, por lo cual no será hasta unos 20 ciclos después que se note el efecto del regulador en el valor de la corriente de falla (los reguladores modernos de tipo electrónico son más rápidos).

En el estudio de cortocircuito interesan las condiciones de falla los primeros ciclos, por lo que el efecto de los reguladores de tensión puede ser ignorado.

### 5.9 Envolverte de la Componente Simétrica de la Corriente de Cortocircuito

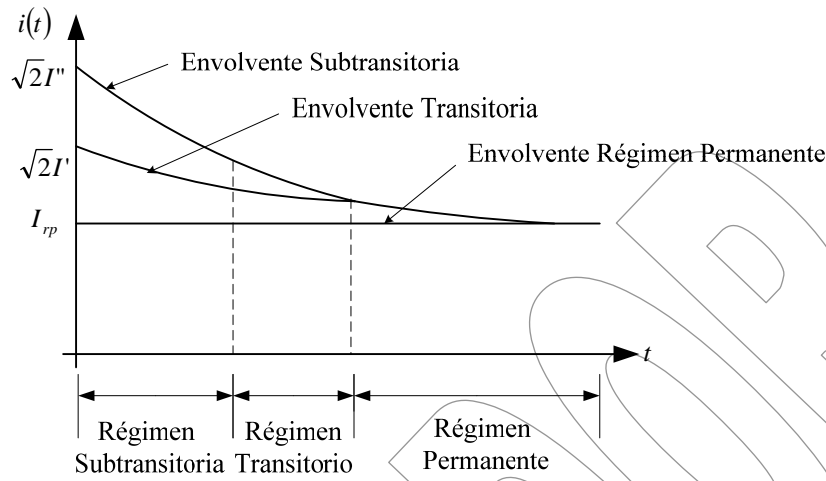
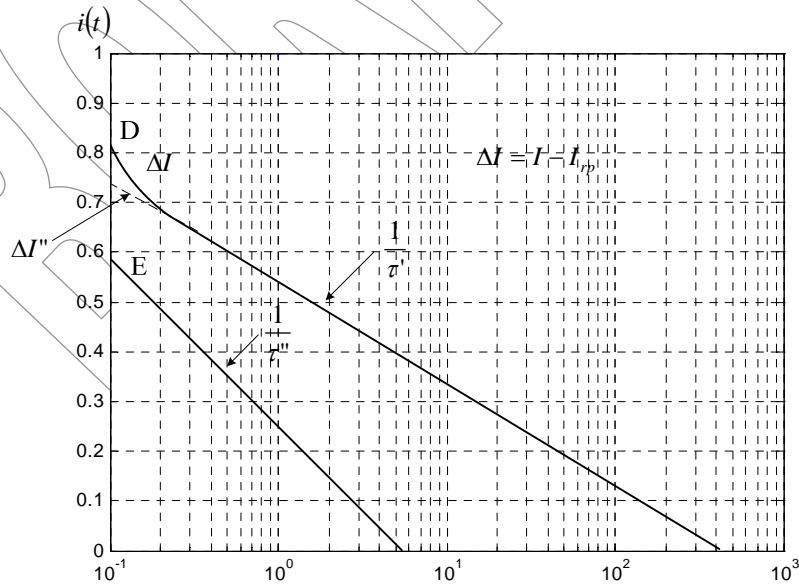


Figura 5.9.1. Estructura en componente de la corriente de cortocircuito

donde:

- $I$  : Envolverte total.
- $I''$  : Envolverte subtansitoria.
- $I'$  : Envolverte transitoria.
- $I_{rp}$  : Envolverte de régimen permanente.



**Figura 5.9.2. Gráfica en forma semilogarítmica de las componentes de la corriente de cortocircuito**

$$\Delta I' = B e^{-\frac{t}{\tau'}}$$

envolvente transitoria de la corriente de falla:

$$I = B e^{-\frac{t}{\tau'}} + I_{rp}$$

$$B = \log[OD]$$

$$\Delta I'' = I - I'$$

$$\Delta I'' = A e^{-\frac{t}{\tau''}}$$

$$A = \log[OE]$$

la envolvente total de la componente simétrica de la corriente de falla:

$$I = \Delta I'' + \Delta I' + I_{rp}$$

$$I_{ca,envolvente} = A e^{-\frac{t}{\tau''}} + B e^{-\frac{t}{\tau'}} + I_{rp}$$

## 5.10 Componente de Doble Frecuencia de la Corriente de Falla

Las componentes de corriente directa presentes en las corrientes del estator, producen una F.M.M en el entrehierro que es unidireccional y fija en el espacio. El circuito de excitación atraviesa el campo producido por esta F.M.M. induciéndose una corriente de doble frecuencia fundamental (60Hz)

La corriente de frecuencia fundamental en el rotor produce un campo el cual puede estudiar como si estuvieran dos campos girando en sentido contrario a la velocidad sincrónica respecto al rotor.

Visto desde el estator el sentido contrario se ve estático, como si girara la componente al doble de la velocidad sincrónica.

El campo estático se opone al campo producido por las corrientes de componente continua.

El campo que gira produce corrientes de doble frecuencia en el estator. Los armónicos debidos a corrientes de frecuencia fundamental en el rotor son pequeños, y si la falla es un punto alejado de la máquina, son más reducidos; por tanto la componente de doble frecuencia de la corriente de cortocircuito en los estudios de falla normalmente se desprecia.

$$I_{Falla} = I_{ca} + I_{cd} + I_{2a} \quad (8)$$

## 5.11 Análisis fasorial de la corriente de falla

$$I_{ca}(t) = I_{ca,envolvente}(t) \text{sen}(\omega t + \alpha + \theta)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad \text{despreciando la resistencia}$$

La variación en la envolvente de la corriente de cortocircuito es relativamente lenta en relación con la rapidez de la función seno, lo cual hace pensar en analizar el cortocircuito por las condiciones del circuito como una sucesión de estados cuasi-estacionarios (aproximadamente).

Para cualquier tiempo  $T_k$ , se determina  $I_{ca,envolvente}(T_k)$  (después de producirse el cortocircuito) y a partir de esto se define un fasor que represente la corriente en el circuito en ese momento como si fuera régimen permanente. El módulo del fasor será:

$$|I_{ca}(T_k)| = \frac{I_{ca,envolvente}(T_k)}{\sqrt{2}}$$

## 5.12 Solución Analítica de Cortocircuito de un Alternador en Vacío

En el curso de máquinas se estudia el comportamiento transitorio del alternador, siendo la corriente de armadura dada por:

$$I_{Fall} = I_{ca} + I_{cd} + I_{2a} \quad (8)$$

en donde:

$$I_{ca} = \sqrt{2}E \left[ \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau''}} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'}} + \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left( \omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (9)$$

$$I_{cd} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_d} \right] \text{sen} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

$$I_{cd} = \frac{\sqrt{2}E}{2} \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] e^{-\frac{t}{\tau_a}} \text{sen} \left( 2\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \quad (9)$$

siendo :

- $\tau_a$  : Constante de tiempo del circuito de armadura.
- $\tau''$  : Constante de tiempo subtransitoria según el eje directo.
- $\tau'$  : Constante de tiempo transitoria según el eje directo.
- $X''_d$  : Reactancia Subtransitoria según el eje directo.
- $X_d$  : Reactancia Sincrónica según el eje directo.
- $X'_d$  : Reactancia Transitoria según el eje directo.
- $X''_g$  : Reactancia subtransitoria según el eje en cuadratura

La envolvente de la componente de corriente alterna viene dada por:

(12)

si se compara con la expresión obtenida de los oscilogramas:

$$I_{ca,envolvente} = Ae^{-\frac{t}{\tau''}} + Be^{-\frac{t}{\tau'}} + i_{rp}$$

de donde:

$$A = \frac{\sqrt{2}E}{\left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right)}$$

$$B = \frac{\sqrt{2}E}{\left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right)}$$

$$i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X_d}$$

En la ecuación de la corriente de cortocircuito en una máquina en vacío, se debe cumplir que la corriente en  $t = 0$  es igual a la corriente Subtransitoria.

$$I_{ca,envolvente}(t=0) = A + B + i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X''_d} \sqrt{2}I''$$

$$I'' = \frac{E}{X''_d} \tag{13}$$

Esta corriente puede ser interpretada como el valor eficaz del fasor que representa la corriente de falla, si la envolvente se mantiene constante en su valor inicial correspondiente a  $t = 0^+$ .

Una vez que se extingue el período Subtransitorio entra en juego el período transitorio y para el cual se cumple:

$$I_{ca,envolvente}(t=0) = B + i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X'_d} \sqrt{2}I'$$

$$I' = \frac{E}{X'_d} \tag{14}$$

La interpretación de esta corriente es como el valor eficaz del fasor que representa la corriente de falla sino existiera el periodo Subtransitorio, y el valor de la envolvente obtenido por la extrapolación de la envolvente transitoria en  $t=0^+$  se mantuviese constante.

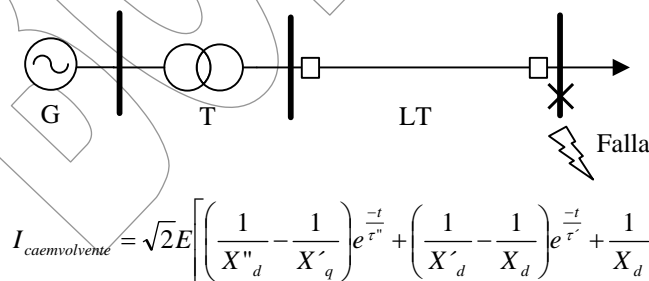
$$I_{rp} = \frac{E}{X_d}$$

$$i_{rp} = \frac{\sqrt{2}E}{X_d} \sqrt{2}I_{rp} \tag{15}$$

Por último se obtuvo el valor de la corriente en régimen permanente de cortocircuito.

### 5.13 Alternador en Vacío con una Impedancia Externa

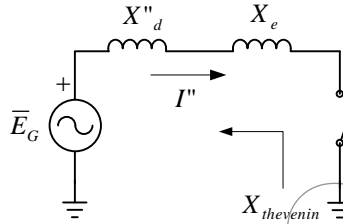
El estudio realizado a un generador que es sometido repentinamente a un cortocircuito trifásico en los terminales, es muy similar al fenómeno que ocurre cuando la falla se sucede a través de una impedancia externa.



**Figura 5.13.1. Esquema de un generador alimentando por medio de un transformador una carga, en la que sucede un cortocircuito**

Supóngase un alternador sincrónico, que se encuentra impulsado a su velocidad nominal y excitado para obtener en terminales la tensión nominal, súbitamente se acontece una falla a través de una impedancia externa  $Z_e = R_e + jX_e$ , en este caso si se considera que la resistencia externa es muy pequeña comparada con la reactancia, entonces se puede considerar simplemente la reactancia externa  $X_e$ , como parte de la reactancia de dispersión del estator de la máquina, modificando las reactancias de la siguiente manera.

- *Condición Subtransitoria:*

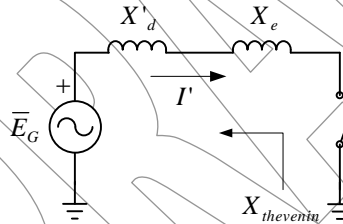


**Figura 5.13.2. Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones subtransitorias**

$$I'' = \frac{E_g}{X''_d + X_e} \quad (16)$$

$$X_{Thevenin} = X''_d + X_e \quad (17)$$

- *Condición Transitoria*

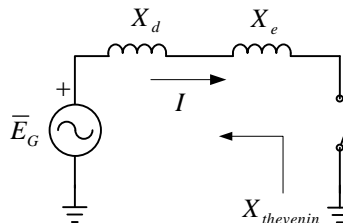


**Figura 5.13.3. Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones transitorias**

$$I' = \frac{E_g}{X'_d + X_e} \quad (18)$$

$$X_{Thevenin} = X'_d + X_e \quad (19)$$

- *Condición de régimen permanente*



**Figura 5.13.4. Modelo equivalente de un generador con una carga externa en condiciones de régimen permanente**

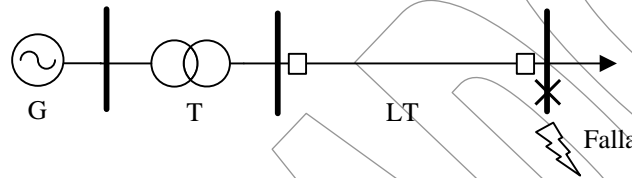
$$I = \frac{E_g}{X_d + X_e} \quad (20)$$

$$X_{Thevenin} = X_d + X_e \quad (21)$$

La parte resistiva de la impedancia externa conectada al generador en el momento del cortocircuito trifásico, realiza una modificación de las constantes de tiempo  $\tau''_d$ ,  $\tau'_d$ ,  $\tau_d$ , etc. Las nuevas constantes de tiempo son obtenidas realizando un cambio similar, se sustituye la resistencia de la armadura por una equivalente que contempla esta última y la resistencia externa.

### 5.14 Cortocircuito Trifásico en un Alternador Sincrónico Bajo Carga

Las fallas de los generadores en vacío (sin carga) es una situación de muy poca ocurrencia -aunque es educativo-, en general, los cortocircuitos en las máquinas suceden en operación, sufriendo una determinada potencia al sistema. El comportamiento del alternador durante un cortocircuito trifásico que se encuentra operando bajo carga es básicamente el mismo desde el punto de vista de circuito eléctrico y magnético, que la misma situación pero el alternador en vacío.



**Figura 5.14.1. Esquema de un generador alimentando por medio de un transformador una carga, en la que sucede un cortocircuito**

El análisis de un alternador que se somete a un cortocircuito trifásico súbitamente, estando en operación con carga, resulta un estudio bastante complicado, siendo la expresión de la corriente en función del tiempo resultan sumamente engorrosas, y están fuera de este curso.

En los casos en que se requiera un conocimiento respecto de la envolvente de la corriente simétrica de cortocircuito en función del tiempo, se suele utilizar bajo ciertas "aproximaciones" la expresión de la corriente de falla del generador en vacío.

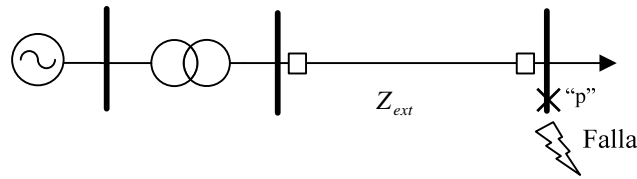
Para el estudio de las condiciones de las corrientes transitorias en un alternador en condiciones de cortocircuito trifásico, existen dos métodos:

- Método de la F.E.M.
- Método de Thevenin.

### 5.15 Método de la Fuerza Electromotriz Inducida (FEM)

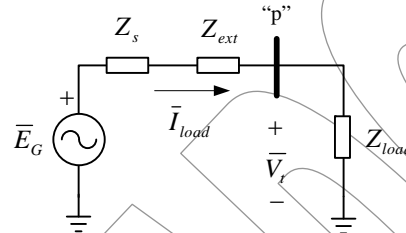
Para comprender este simple método, se hará a partir del análisis simplista de la situación particular de un sistema de potencia con un solo generador y una carga.

Primeramente considérese un alternador sincrónico (que se considera por simplicidad de rotor liso) el cual alimenta a una cierta carga estática  $Z_{load}$ , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar  $Z_{ext}$ , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga  $Z_{load}$ .

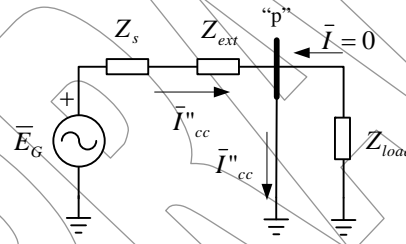


**Figura 5.15.1. Estructura del sistema de potencia**

En estas circunstancias se han de entender y diferenciar perfectamente dos situaciones: una antes de la falla, en la cual el generador se encuentra suministrando energía en forma estable a la carga trifásica equilibrada  $Z_{load}$ , y otra durante la falla en la que se pone de manifiesto el régimen transitorio del cortocircuito (evidenciando sus tres periodos: subtransitorio, transitorio, y régimen permanente. En ambas situaciones antes planteadas, existe un circuito equivalente para el sistema de potencia.



**Figura 5.15.2. Circuito equivalente del sistema de potencia fallado, antes de la falla**



**Figura 5.15.3. Circuito equivalente del sistema de potencia fallado, después de la falla**

El modelo antes de la falla del sistema de potencia, queda compuesto por el modelo del generador sincrónico en régimen permanente, y las respectivas impedancias de la carga  $Z_{load}$ , y las componentes externas  $Z_{ext}$ . El modelo del generador se toma el de régimen permanente ya que la máquina se asume en comportamiento estable alimentando a la carga con una corriente  $I_{load}$ , siendo la tensión en terminales de la carga  $V_t$ . Bajo estas condiciones de operación el generador posee una tensión interna  $E_G$  ajustada para que se cumplan las condiciones anteriores, en serie con la impedancia interna de la máquina de régimen permanente  $Z_s$ .

Conocida las condiciones de carga del generador, se puede determinar el valor de la tensión interna de la misma.

$$\bar{E}_G = (Z_s + Z_{ext} + Z_{load}) \bar{I}_{load} \quad (22)$$

$$\bar{E}_G = (Z_s + Z_{ext}) \bar{I}_{load} + \bar{V}_t \quad (23)$$

En el instante de ocurrir el cortocircuito trifásico en el punto "p", las condiciones de operación del sistema y de la máquina deben cambiar, pasando a un régimen dinámico asociado al cortocircuito y caracterizado por la aparición de las constantes de tiempo para régimen de la máquina, de manera que se pueda estimar el comportamiento del alternador durante la falla.

Durante los primeros instantes del cortocircuito el alternador experimenta una cantante de tiempo subtransitoria  $\tau''_d$ , que se asocia a una reactancia subtransitoria  $X''_d$  la cual involucra las mayores magnitudes de corrientes del cortocircuito.

En un período de tiempo mayor, la constante de tiempo de la máquina cambia pasando al comportamiento transitorio ( $\tau'_d$ ), quedando determinada las corrientes por la combinación con la reactancia transitoria  $X'_d$ .

Si la situación de falla persiste hasta alcanzar un período de tiempo pronunciado, se logra la condición estacionaria de la falla o régimen permanente, siendo asociado este período en la máquina con la reactancia sincrónica  $X_s$  o  $X_d$ .

En las condiciones de cortocircuito el sistema de potencia evidentemente cambia, supóngase que se desea el análisis del período subtransitorio del cortocircuito. Bajo la suposición anterior, se hace necesario construir el circuito equivalente del sistema de potencia, en donde cada elemento es sustituido por su modelo de régimen, en el caso del generador, se ha de emplear el constituido por la impedancia de régimen subtransitorio  $Z''_s$  (ya que se desea estudiar este período), y una fuente ideal de tensión,  $E''_g$ , tensión detrás de la reactancia subtransitoria.

Asumiendo que la máquina se encuentra operando en condiciones normales y estables, la tensión interna de la máquina antes de la falla y durante no cambia; esto se debe a que para que cambie, la inyección de corriente rotórica debe variar, y el único mecanismo de control que opera sobre el es el regulador, el cual tiene un tiempo de operación de 20 ciclos, por lo cual para cuando opere, ya se ha alcanzado el régimen permanente de la falla. Bajo el razonamiento anterior se cumple que:

$$\bar{E}''_g = \bar{E}_g \tag{24}$$

Por otra parte, si alguna parte del sistema de potencia sufre una modificación como consecuencia del período subtransitorio debe ser considerado. En el caso particular de este análisis, la impedancia de la carga  $Z_{load}$ , ya que es estática no sufre modificación al igual que la externa,  $Z_{ext}$ . Después que ocurre la falla en el punto "p", se coloca un camino de conducción de impedancia cero entre el punto "p" del modelo y el neutro del modelo equivalente por fase del sistema de potencia. La corriente subtransitoria de falla,  $I''_{cc}$ , se puede calcular sencillamente con un recorriendo de malla, aplicando la ley de tensión de Kirchoff.

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{E}''_g}{Z''_s + Z_{ext}} \tag{25}$$

en este caso la corriente de falla depende de la tensión interna de la máquina, pero de la ecuación (24) resulta:

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{Z_s + Z_{ext} + Z_{load}}{Z''_s + Z_{ext}} \bar{I}_{load} \tag{25}$$

La corriente de cortocircuito que ha sido calculada corresponde al valor RMS, de la onda de corriente en período subtransitorio.

Un procedimiento similar es el empleado en las situaciones en que se desea estimar el valor de la corriente de cortocircuito en el período transitorio o de régimen permanente, la diferencia es que en el análisis durante la falla, se ha de sustituir las máquinas giratorias por su modelo equivalente en el período respectivo del estudio.

En el caso de los motores sincrónicos, las reactancias que lo caracterizan están asociadas al igual que en el generador con ciertas constantes de tiempo ( $\tau_d$ ,  $\tau'_d$  y  $\tau''_d$ ). Cuando un motor sincrónico experimenta un

cortocircuito en sus terminales de alimentación, deja de recibir energía eléctrica de la línea, pero si su campo rotórico se mantiene excitado (en caso contrario debido a que el flujo de campo magnético no varía instantáneamente), y el motor posee alta inercia, el rotor se mantendrá en movimiento por un período de tiempo, durante el cual la tensión interna del motor sincrónico contribuye con corriente al sistema fallado, por lo que se puede afirmar que durante este corto lapso de tiempo que dura el efecto el motor se comporta como un generador sincrónico.

Durante el intervalo de tiempo en que el motor sincrónico entrega energía las ecuaciones de tensión transitorias y subtransitoria pueden ser escritas como:

$$\bar{E}''_m = \bar{V}_t - Z''_s \bar{I}'' \quad (26)$$

$$\bar{E}'_m = \bar{V}_t - Z'_s \bar{I}' \quad (27)$$

Donde:

$E''_m, E'_m$ : voltajes detrás de las reactancias de régimen subtransitorio y transitorio respectivamente.

$Z''_s, Z'_s$ : reactancias sincrónicas de régimen.

$I'', I'$ : Corriente de régimen.

Se debe dejar claro, que durante el tiempo en que dura el comportamiento del motor como generador, el modelo equivalente es del máquina es semejante al del generador con las excepción de las reactancias son las propias del motor y la fuente posee un valor igual a la tensión interna del motor.

El método de la F.E.M. recibe su nombre del hecho de que para el cálculo de la corriente de cortocircuito, se debe calcular la F.E.M. interna de cada una de las máquinas que intervienen en el sistema de potencia fallado. Para el cálculo de las F.E.M. se hace necesario conocer los datos de carga previos a la falla, y realizar los artificios eléctricos que sean necesarios para tal fin. En la ecuación (25), se evidencia fácilmente que la corriente subtransitoria de falla determinada  $I''_{cc}$ , depende en forma directa de la corriente de carga del sistema  $I_{load}$ .

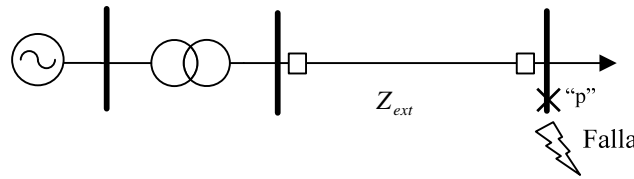
En el análisis de las condiciones de cortocircuito por medio del método de la F.E.M. resulta evidente dos etapas: antes de la falla, en la cual se estiman los valores de las tensiones internas de las máquinas giratorias asociadas y un estudio durante la falla, en el cual se coloca el cortocircuito y conociendo las F.E.M, se procede al calculo por artificios eléctricos de la corriente de cortocircuito.

El método de la F.E.M. tiene la ventaja principal de que es un método exacto, porque considera las características de carga reales en el momento de ocurrir la falla por cortocircuito. El mayor inconveniente de este método reside en que para sistemas con  $n$  máquinas giratorias, previamente se ha de calcular las  $n$  voltajes internos de las máquinas para el posterior calculo de la corriente de cortocircuito. Este método es aplicable especialmente para sistemas de potencia de tamaño reducido, dejándose otros métodos más simples para sistemas mayores.

### 5.16 Método de Thevenin

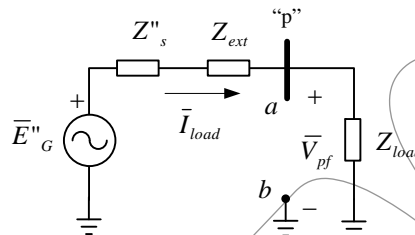
El método de Thevenin ampliado para los sistemas de potencia, en el cálculo de la corriente de cortocircuito guarda especial relación con su aplicación para circuitos eléctricos.

Considérese un generador sincrónico (que se considera por simplicidad de rotor liso) el cual alimenta a una cierta carga estática  $Z_{load}$ , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se puede denominar  $Z_{ext}$ , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga  $Z_{load}$ .



**Figura 5.16.1. Sistema de potencia a analizar**

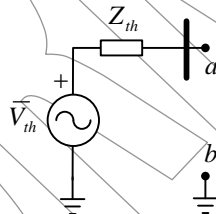
El circuito equivalente antes de la falla, considerando que el generador se encuentra operando en condiciones estables de carga, y que se trata de una carga trifásica estática, resulta el mostrado en la Figura 5.16.2. En este caso particular se ha colocado la impedancia del generador en condiciones subtransitorias, ya que se desea estimar la corriente de cortocircuito a ese régimen.



**Figura 5.16.2. Circuito equivalente del sistema de potencia antes de la falla en condiciones subtransitorias**

Siendo  $V_{pf}$  el voltaje que existe en el punto "p", antes que se produzca la falla. Resulta posible simular el evento del cortocircuito en el sistema de potencia, mediante la aplicación del Teorema de Thevenin, suponiendo como es conocido que el modelo final ha de constar de una fuente ideal de tensión de valor  $V_{th}$ , en serie con una impedancia  $Z_{th}$ .

Siguiendo con lo establecido en el teorema de Thevenin y visto en los cursos de circuito eléctricos. Se procede a inoperar las fuentes de tensión (con un cortocircuito, se simula su tensión igual a cero) y se determina la impedancia equivalente desde el punto donde sucede el cortocircuito (puntos a y b de la Figura 5.16.2).



**Figura 5.16.3. Modelo equivalente de Thevenin**

En el caso particular del alternador sincrónico alimentando una carga  $Z_{load}$  a través de una impedancia externa resulta  $Z_{ext}$ :

$$Z_{th} = \frac{Z_{load}(Z''_s + Z_{ext})}{Z_{load} + Z_{ext} + Z''_s} \tag{28}$$

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito en el punto de falla solo, se requiere de aplicar un cortocircuito al modelo de Thevenin y se estima la corriente subtransitoria  $I''_{cc}$ .

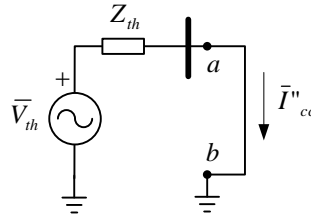


Figura 5.16.4. Modelo de Thevenin cortocircuitado

$$\bar{I}_{cc}'' = \frac{\bar{V}_{th}}{Z_{th}} \quad (29)$$

Ahora bien, la tensión de Thevenin, se obtiene de retirar el cortocircuito en el sistema de potencia estudiado y encontrar la tensión que existen en ese punto. En el caso particular analizado resulta:

$$\bar{V}_{th} = \bar{V}_{pf} \quad (30)$$

Siendo  $V_{pf}$ , el voltaje previa a la falla en el punto "p". En el caso particular en que el sistema posee una tensión en ese punto, en por unidad de  $V_{pf} = 1.0$  p.u., resulta sencillo la expresión de la corriente de cortocircuito.

$$\bar{I}_{cc}'' = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_{th}} [p.u.]$$

El procedimiento es similar para el cálculo de los otros regímenes de cortocircuito, con la salvedad de que las impedancias de las máquinas giratorias, han de ser las del régimen pertinente.

La corriente que se estima por el método de Thevenin, es la que en teoría sale del sistema de potencia en el punto de falla, debido exclusivamente a la reducción a cero de la tensión en dicho punto de falla. Si se desea estimar las contribuciones de corriente a la falla de ciertas ramas de circuito, se suelen emplear artificios eléctricos como divisor de corriente, o las leyes de Kirchoff.

En los sistemas de potencia extensos con una gran cantidad de alternadores y motores se suele resolver convenientemente por la aplicación del método de Thevenin. Este método de cálculo resulta sumamente rápido, ya que no requiere información de carga (si se dispone de la tensión previa a la falla en el punto), y la dificultad estriba solamente en estimar la impedancia equivalente en el punto de falla.

### 5.17 Distribución de Corriente de Cortocircuito (Método de Thevenin) entre Ramas Paralelas

El método de Thevenin permite el cálculo de la corriente de cortocircuito debida exclusivamente a la reducción a cero de la tensión en el punto de falla; de forma tal que si en el sistema de potencia, en el punto de falla se presentan varias ramas en paralelo, la corriente de cortocircuito calculada por este método será la sumatoria algebraica de ellas.

Las corrientes antes determinadas se les deben añadir el valor de las corrientes que circulan antes de la falla, para así obtener las corrientes totales después de la falla. El teorema de superposición justifica plenamente, la razón de la suma de estas corrientes a las obtenidas por el método de Thevenin.

Supóngase nuevamente un generador sincrónico (que se considera por simplicidad de rotor liso) el cual alimenta a una cierta carga estática  $Z_{load}$ , a través de una impedancia externa, cuyo equivalente o valor total se

puede denominar  $Z_{ext}$ , súbitamente se produce un cortocircuito de tipo trifásico en los terminales de la carga  $Z_{load}$ . Supóngase además que la tensión en terminales de la falla antes de ocurrir es  $V_{pf}$ .

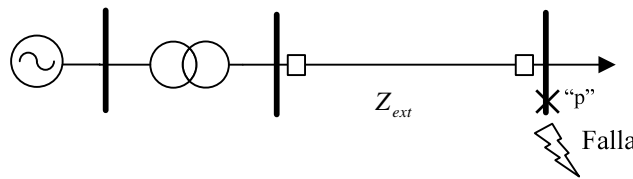


Figura 5.17.1. Sistema de potencia a analizar

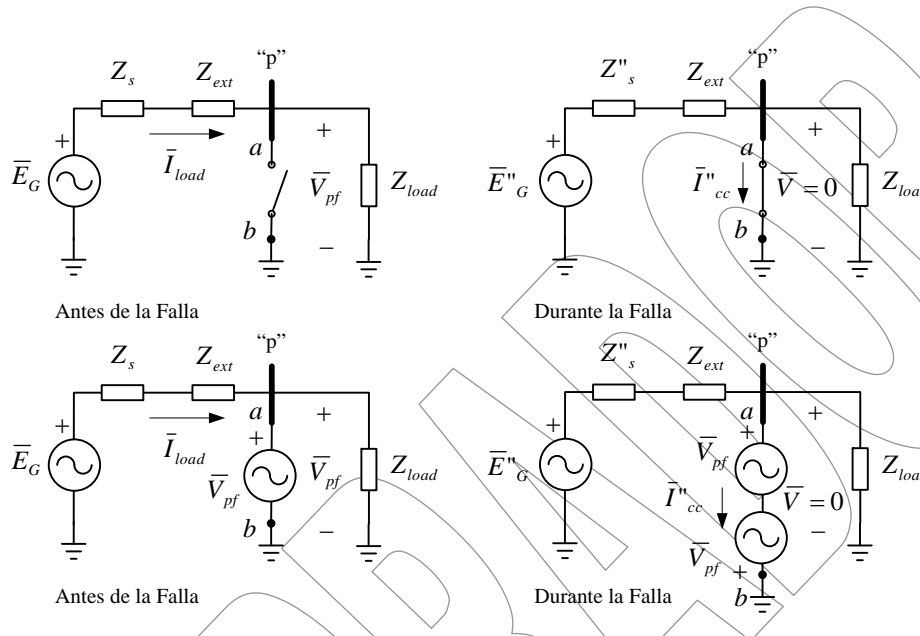


Figura 5.17.2.

Considérese en condiciones de carga, antes de la falla, la tensión en el punto "p", el voltaje previo a la falla  $V_{pf}$ , como una fuente de voltaje ideal, es fácilmente demostrable que por esta fuente la circulación de corriente es nula, ya que se ha colocado de igual valor.

Al ocurrir el cortocircuito, debe ocurrir que el punto "p", se reduce súbitamente a cero, esta situación, puede ser simulado en el papel, como si a la fuente  $V_{pf}$ , que se colocó en ese punto, se le coloca otra más, pero en oposición de fase ( $180^\circ$ ) y del mismo valor, con lo que el voltaje de la rama entre "p" y referencia es cero, con lo que se simula perfectamente un cortocircuito. (ver Figura 5.17.2).

En atención a la situación antes expuesta, se puede aplicar el principio de superposición<sup>1</sup>, para determinar la corriente de cortocircuito. Se toma la condición de colocar dos fuentes en el punto de falla con tensión  $V_{pf}$  en contraposición.

1. Se inopera la fuente hipotética  $-V_{pf}$  que se coloca para simula el cortocircuito, y se deja operando la fuente  $V_{pf}$  y la tensión interna del generador  $E''_G$ .
2. Se procede a cortocircuitar las fuentes  $E''_G$  y  $+V_{pf}$ , con lo que el sistema queda solo la fuente de  $-V_{pf}$ .

<sup>1</sup> El teorema de superposición afirma que una manantial de fuentes que producen un efecto, este efecto puede ser estudiado como la sumatoria de los efectos de cada fuente individual.

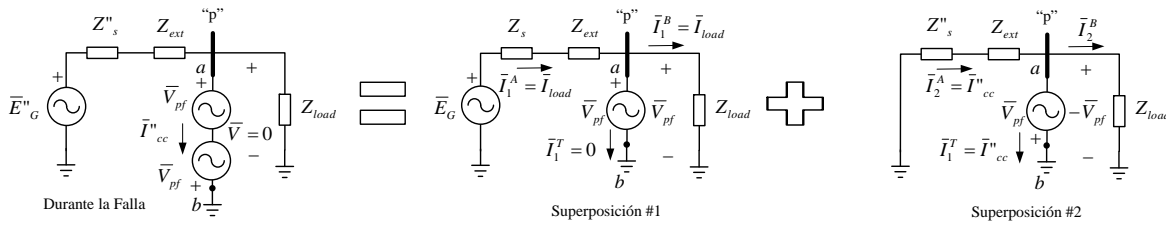


Figura 5.17.3

Superposición 1:

En ésta superposición se dejan operando la fuente  $+V_{pf}$  y la  $E''_G$  (que es igual a  $E_G$ , ya que se asume que el regulador no ha actuado).

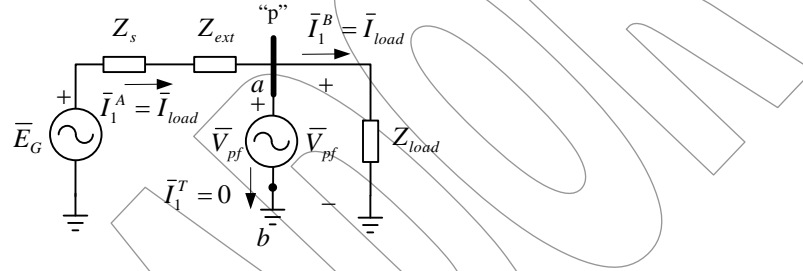


Figura 5.17.4. Superposición 1

En esta superposición, se cumple:

$$\bar{I}_1^A = \bar{I}_{load} \tag{31}$$

$$\bar{I}_1^B = -\bar{I}_{load} \tag{32}$$

$$\bar{I}_1^T = \bar{I}_1^A + \bar{I}_1^B = 0 \tag{33}$$

Como la única corriente que circula es la de carga  $I_{load}$ , por tanto la corriente de cortocircuito de esta superposición es cero.

Superposición 2:

Esta superposición consta de solo dejar operando la fuente  $-V_{pf}$  y se inopera  $E''_G$  y  $+V_{pf}$ .

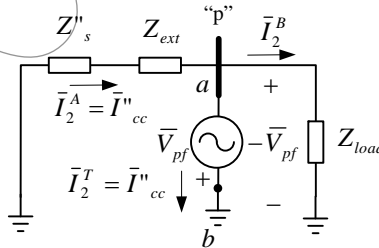


Figura 5.17.5. Superposición 2

En esta superposición, se cumple:

$$\bar{I}_2^A = \bar{I}''_{cc} \tag{34}$$

$$\bar{I}_2^B = 0 \quad (35)$$

$$\bar{I}_2^T = \bar{I}_2^A + \bar{I}_2^B = \bar{I}''_{cc} \quad (36)$$

$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{V}_{pf} (Z_{LOAD} + Z''_s + Z_{EXT})}{Z_{load} (Z''_s + Z_{EXT})} \quad (37)$$

En esta superposición se encuentra la corriente debida a la falla  $I''_{cc}$ . De lo antes expuesto se reduce a analizar el sistema con dos corrientes: la corriente previa a la falla y una corriente debida a un voltaje conectado en el punto de falla, cuyo valor es el voltaje previo a la falla  $V_{pf}$ , que es conocida. La corriente de cortocircuito, finalmente será la suma de las dos superposiciones.

$$\bar{I}_T = \bar{I}_1^T + \bar{I}_2^T = \bar{I}''_{cc} \quad (38)$$

### 5.18 Teorema de Thevenin Generalizado

Un cortocircuito implica una modificación de la impedancia en una parte de un sistema de potencia. Si éste sistema de potencia se considera inicialmente en vacío y constituido por  $n$  fuentes y que está operando inicialmente en vacío con  $m$  barras. Al producirse un cortocircuito trifásico en la barra "p", la corriente de falla se calcula creando la red incremental, es decir, se inoperan las  $n$  fuentes y en el punto de falla, se coloca una fuente con una magnitud igual a voltaje en el punto previo a la falla (bus  $h$ ), pero con el signo menos hacia referencia. La corriente que se calcula como producto de esta red incremental es la corriente de cortocircuito.

Siendo la corriente de cortocircuito establecida por el método de Thevenin.

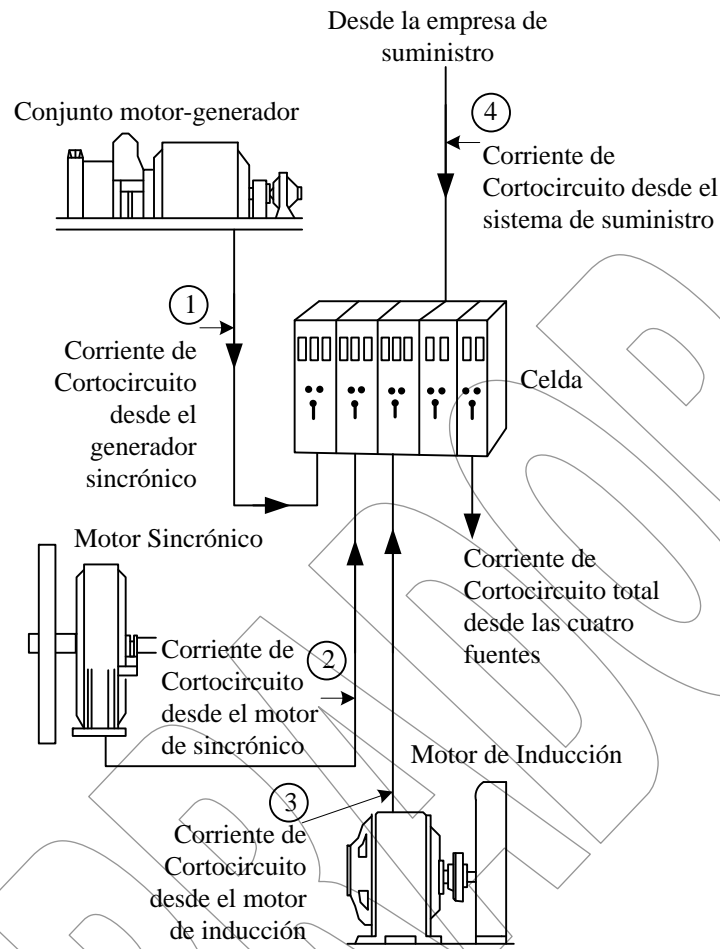
$$\bar{I}''_{cc} = \frac{\bar{V}_{pf}}{Z_{th}} \quad (39)$$

### 5.19 Fuentes de Corriente de Cortocircuito

En los grandes sistemas de potencia las fuentes de corriente de cortocircuito son mayoritariamente los generadores sincrónicos conectados a la red, pero existen una cierta cantidad de equipos eléctricos (máquinas giratorias) que en situación de falla pueden entregar, bajo ciertas condiciones y por un período de tiempo determinado, energía a la falla, y que por lo general al nivel de centrales de subtransmisión o transmisión son despreciados. Cuando se determina la magnitud de las corrientes de cortocircuito, es extremadamente importante que todas las fuentes de corriente de cortocircuito y que las impedancias características de esas fuentes sean conocidas.

Las fuentes básicas de corriente de cortocircuito son cuatro:

- Sistema de Generadores Locales.
- Motores Sincrónicos.
- Motores de Inducción.
- Sistema de suministro eléctrico (*Electric Utility Systems*) o generación remota.



**Figura 5.19.1. Corriente de cortocircuito total, la suma de las cuatro fuentes**

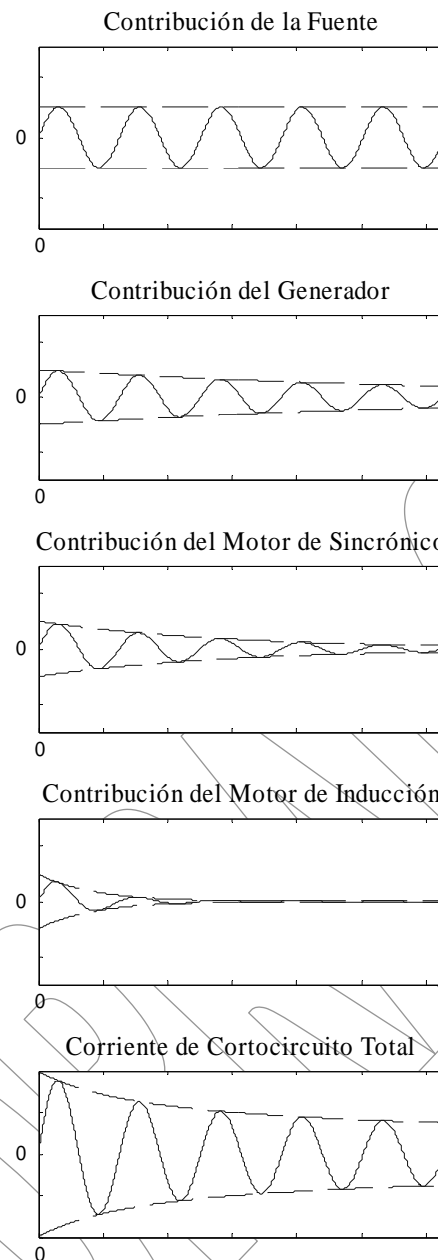


Figura 5.19.2

### 5.19.1. Sistema de Suministro Eléctrico

Una empresa eléctrica moderna típica representa una gran y compleja interconexión de plantas de generación. En un sistema típico, los generadores individuales no son afectados por el máximo cortocircuito en una planta industrial. Las líneas de transmisión, redes de distribución, y transformadores introduce impedancia entre los generadores de la empresa y el consumidor industrial. De modo que ante esta circunstancia la empresa eléctrica puede ser vista como una fuente infinita de corrientes de falla. Antes de comenzar a realizar cálculos, valores precisos de las posibles corrientes de cortocircuitos presentes y proyectadas y la relación  $X/R$ , o impedancia la  $R + jX$  de la fuente, en el punto de suministro deben ser obtenidos de la empresa eléctrica.

### 5.19.2. Sistema de Generadores Locales

Los generadores en planta reaccionan ante un cortocircuito en el sistema en una forma predecible. La corriente de falla desde un generador decrece exponencialmente desde un valor alto inicial a un bajo valor en régimen permanente algún tiempo después del inicio de la falla. Además un generador que continua siendo impulsado por el motor primario, y que posea su campo energizado desde una excitación separada la corriente de falla de régimen permanente persistirá a menos que sea interrumpida por algún dispositivo de protección.

Para propósitos de cálculos de corrientes de cortocircuito, la reactancia variable del generador puede ser representada por tres valores.  $X''_d$ , la reactancia subtransitoria de eje directo, usualmente determina la magnitud de la corriente durante el primer ciclo luego que la falla ocurre. En algunos casos, la constante de tiempo es tan corta que la magnitud de el primer pico puede ser prácticamente determinado por la reactancia transitoria de eje directo.  $X'_d$ , la reactancia transitoria de eje directo, determina la magnitud de la corriente en el rango de 1 o 2 segundos.  $X_d$ , la reactancia sincrónica de eje directo, determina la corriente que fluye luego que la condición de régimen permanente ha sido alcanzada. La gran mayoría de los dispositivos de protección contra fallas, tales como circuit breaker y fusibles, operan antes que la condición de régimen permanente sea alcanzada. Entonces, la reactancia sincrónica es raramente empleada en cálculo de corrientes de fallas para la aplicación de estos dispositivos.

### 5.19.3. Motores Sincrónicos

Los motores sincrónicos en operación, en condiciones normales de operación reciben energía eléctrica del sistema y la transforman en energía mecánica que entregan en su eje; pero al ocurrir una falla en sus terminales, su alimentación se suprime bruscamente. Si la máquina posee una alta inercia en su rotor, éste puede continuar girando un tiempo finito después de la falla, si la excitación del devanado rotórico se mantiene durante este período de tiempo, el campo giratorio induce tensiones en los arrollados del estator y el motor pasa por un período de tiempo, hasta que se detenga el rotor o se desconecte la excitación, a entregar energía a la falla. La magnitud de la corriente transitoria que entregue el motor depende de las constantes de tiempo asociados a sus devanados, características eléctricas y mecánicas de la máquina.

El modelo equivalente de un motor sincrónicos, bajo estas condiciones es semejante al del generador sincrónico, con la salvedad de que en situación normal de operación la corriente entra al modelo y en el período de tiempo de la falla y bajo las condiciones impuestas, la corriente sale de el.

Los motores sincrónicos, entonces suplen corriente a una falla en la mismas manera que lo hace un generador sincrónico. La caída en el voltaje debido a la falla causa que el motor sincrónico reciba menos potencia del sistema para manejar su carga. La inercia del motor y de su carga actúa como un motor primario, y con la excitación mantenida, el motor actúa como un generador. Esta corriente de falla disminuye cuando el motor se detiene y la excitación de campo decae.

La reactancia variable de un motor sincrónico es descrita con la misma designación que un generador. Aunque los valores numéricos de las tres reactancias  $X''_d$ ,  $X'_d$  y  $X_d$  será frecuentemente diferentes para motores y generadores.

### 5.19.4. Motor de Inducción

Cuando un motor de inducción sufre un cortocircuito en sus terminales, este deja de recibir energía del sistema, pero si la máquina posee una gran inercia asociado a sus partes giratorias, una vez que es suprimida la alimentación el rotor puede quedar girando (siempre que la carga lo permita y más aun si colabora con esto). Debido a que el flujo magnético en el rotor no puede variar instantáneamente, un flujo remanente de valor muy pequeño en el rotor inducirá una tensión en el estator, provocando en este una circulación de corriente hacia la falla, durante ese breve transitorio el motor de inducción actúa como un generador. Es importante destacar, que la corriente que provee el motor de inducciones bajo las condiciones descritas es sumamente amortiguada.

El motor de inducción, en las condiciones de falla, puede ser modelado en forma semejante que el motor sincrónico, es decir, una fuente ideal de tensión en serie con una reactancia o bien ser ignorados. La norma ANSI-IEEE, establece que en los sistemas industriales los motores individuales de potencia menor a 50 HP, pueden ser ignorados, debido a que su reactancia es de valor muy elevado y su contribución al cortocircuito es de magnitud despreciable.

La contribución de corriente de falla de un motor de inducción resulta de la acción de generación producida por la inercia manejada por el motor luego antes que la falla ocurra. En contraste al motor sincrónico, el flujo de campo del motor de inducción es producido por la inducción desde el estator como si se tratará de un devanado de corriente continua rotorico. Este flujo decae la remover la fuente de voltaje producto de la falla, y la contribución de un motor de inducción cae con una rápida exponencial que pronto desaparece. En consecuencia, el motor de inducción son solo asignados una reactancia, que es equivalente a la reactancia subtransitoria  $X''_d$  de la máquina sincrónica. Este valor será igual a la reactancia de rotor bloqueado, y define la contribución de corriente de falla inicial será igual que la corriente inicial de arranque de la máquina a pleno voltaje. En los motores de inducción pequeños la resistencia puede ser grande lo que causa un significativo decaimiento en su contribución de corriente de falla después que el primer pico de la corriente de falla es alcanzado.

Los motores de rotor devanado normalmente operan con los anillos de su rotor cortocircuitados y contribuirán con corriente de falla de la misma manera que el motor de inducción de rotor de jaula de ardilla. Ocasionalmente, los grandes motores de rotor devanado son operados con resistencias externas mantenidas en el circuito del rotor. Estas dan una constan de tiempo para cortocircuito que es tan baja que su contribución es insignificante. Una investigación específica debe ser hecha antes de despreciar la contribución que da un motor de rotor devanado.

Las corriente de descarga de capacitores, debido a que poseen una constante de tiempo muy pequeña, pueden ser despreciadas en la gran mayoría de los casos. Aunque, existen algunas aplicaciones en las cuales corrientes transitorias muy altas pueden ser desarrolladas cuando un cortocircuito ocurre cerca de una banco de capacitores energizados. Estas corrientes, generalmente son de muy alta frecuencia que la frecuencia normal de operación, pudiendo exceder en magnitud la corriente de cortocircuito de frecuencia industrial y persistir un largo tiempo, imponiendo un ciclo severo en los componentes del circuito que maneja esta corriente. Si un problema de este se presenta, las corrientes del capacitor deben ser calculadas de la misma manera que para un *back-to-back* interrupción y compararlos con la capacidad de cortocircuito de los dispositivos

### 5.19.5. Condensador sincrónico

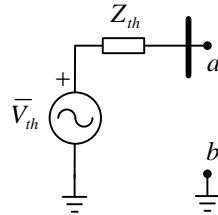
Un condensador sincrónico es una máquina sincrónica que absorbe o entrega potencia reactiva al sistema únicamente dependiendo de la inyección de corriente rotórica, no poseen carga mecánica asociada a su eje. Durante un cortocircuito el condensador sincrónico posee un comportamiento igual que como un generador sincrónico, o como un motor sincrónico de acuerdo se suministre o consuma reactivos a la red, por tanto, se pueden utilizar los lineamientos antes mencionados.

## 5.20 Representación Equivalente de un Sistema de Potencia

En ocasiones se presentan sistemas de potencia que poseen muchas interconexiones, y que en forma general, pero de todos estos, solo se desea realizar el análisis de una parte de ellos; en estas condiciones resulta útil y ventajoso, realizar una representación simplificada de las áreas fuera del análisis y realizar solo la representación detallada de aquella parte del sistema de potencia de mayor interés. El modelo simplificado del sistema de potencia, recibe el nombre de Sistema Exterior, del cual no se desea conocer en profundidad su estructura, de hecho no es necesaria, pero si interesa su contribución o efecto sobre una falla en el sistema bajo estudio.

Un sistema exterior, puede ser considerado como una abstracción de los restantes elementos del sistema de potencia que rebasan los límites del estudio en ejecución.

Cualquier sistema de potencia esta compuesto por generadores, transformadores, líneas de transmisión, cargas, etc, que bajo ciertas consideraciones pueden ser reducidos a una asociación de fuentes de tensión ideales e impedancias, en esencia, el sistema de potencia en ciertas restricciones puede ser interpretado como una red activa lineal, la cual de acuerdo con el teorema de Thevenin puede ser reducido a un modelo equivalente constituido por una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia equivalente.



**Figura 5.20.1. Modelo equivalente de Thevenin**

En el modelo de Thevenin obtenido se puede realizar una abstracción imaginando que se trata de un generador equivalente a todo el sistema de potencia y con una impedancia equivalente asociada. Si se conoce la impedancia equivalente de Thevenin ( $Z_{th}$ ), y las condiciones en los terminales  $a$  y  $b$  ( $V_{ab}$  e  $I_{ab}$ ), entonces es fácil obtener la tensión del modelo equivalente de Thevenin  $V_{th}$ .

$$V_{th} = V_{ab} + Z_{th} I_{ab} \quad (40)$$

El valor de la impedancia equivalente del modelo de Thevenin del sistema de potencia, puede ser determinado a partir de la capacidad de cortocircuito en el punto "p" del sistema de potencia a modelar.

Supóngase que se tiene un sistema exterior, que se encuentra conectado a través de la barra "p" y un interruptor "M" a un sistema de potencia.

Si se supone que el interruptor "M" se encuentra en abierto, y que en esta condición la tensión en la barra "p" es  $V_{oc}$  (*open circuit*), como tensión de línea a línea, entonces si se supone que el sistema exterior va a ser modelado por el teorema de Thevenin, en la condición en que el interruptor "p" se encuentra en abierto, y se produce un cortocircuito en la barra "p", entonces si se desprecia la parte resistiva de la impedancia equivalente y además se conoce que en estas condiciones en el cortocircuito se disipa un potencia  $S_{cc3\phi}$  (MVA). Si ahora se tomo como bases para el cálculo en el sistema por unidad:

$$S_{base} = S_{cc3\phi} [MVA]$$

$$V_{base} = V_{oc} [kV]$$

Entonces:

$$S_{cc3\phi} = 1.0 p.u$$

$$V_{th} = V_{oc} = 1.0 p.u$$

Por teoría del sistema por unidad se conoce que:

$$S_{cc3\phi} = V_{oc} I_{cc} [p.u]$$

$$Z_{th} = \frac{V_{oc}^2}{S_{cc3\phi}}$$

Finalmente sustituyendo los valores en por unidad resulta:

$$Z_{th} = 1.0 p.u \quad (41)$$

De lo antes expuesto se deduce, que la impedancia equivalente de un sistema externo es un en el sistema por unidad siempre que se tome como base:

Voltaje base: El voltaje de circuito abierto del sistema exterior.

Potencia base: En la condición de tensión base, la capacidad de cortocircuito trifásico.

La fortaleza de la barra "p" se refiere a la posibilidad de que su tensión en el momento en que ocurra un cortocircuito se reduzca.

Un análisis muy simple indica que una barra fuerte tiene menor caída de tensión en falla. La impedancia equivalente del modelo del sistema exterior, depende proporcionalmente del cuadrado de la tensión en abierto, e inversamente a la capacidad de cortocircuito de la barra, de la ecuación (40), la tensión en terminales de la barra, se acerca a la tensión en vacío del sistema,  $V_{th}$ , cuando menor sea  $Z_{th}$ , es decir, que mientras mayor es la capacidad de cortocircuito, menor es la impedancia equivalente, y menor será la caída de tensión en la barra, lo que revela que la barra es más fuerte. En teoría una barra de potencia infinita posee una impedancia equivalente nula.

## 5.21 Uso práctico de las corrientes de cortocircuito en fallas balaceadas

El cálculo de la corriente de cortocircuito es de capital importancia para la especificación de los elementos del sistema de potencia además de otras aplicaciones como estudios de armónicos, etc.

Los disyuntores o interruptores además de algunos otros equipos del sistema de potencia, deben de poseer especificado una capacidad máxima de operación, dentro de la cual se permita un funcionamiento seguro en condiciones de falla, y es donde surge con vital importancia el cálculo de la potencia de interrupción.

Por otra parte, en estudios mucho más completos el cálculo de corrientes de cortocircuito es un paso preliminar, tal es el caso de la coordinación de protecciones el cual además de permitir establecer los límites de operación de los equipos, de manera que los relés, fusibles y otros elementos de protección puedan discriminar las situaciones normales de operación del sistema de las de falla, es posible admitir ciertos criterios y margen de error sin que esto influya en el ajuste correcto de las protecciones.

### 5.21.1. Capacidad de Cortocircuito Trifásico de una Barra

Un punto importante del uso de los cálculos de corrientes de cortocircuitos, es la especificación de la capacidad de cortocircuito de las barras. La capacidad de cortocircuito de una barra se define como  $\sqrt{3}$  veces el producto de la tensión de la línea en la barra antes de la falla por la corriente que sale del punto falla durante un cortocircuito trifásico.

$$MVA_{cc3\phi} = \sqrt{3} V_{LLPr eFalla} I''_{cc3\phi} \quad (40)$$

En el sistema por unidad resulta:

$$MVA_{cc3\phi} = V_{LLPreFalla} [p.u.] I''_{cc3\phi} [p.u.] \quad (41)$$

La capacidad de cortocircuito de una barra indica la posible corriente de cortocircuito que puede soportar la barra sin sufrir desperfectos, la fortaleza de la barra, o la sensibilidad a cambiar en el sistema por ella alimentada. Al aumentar la capacidad de cortocircuito, la tensión en la barra se deprime menos por fallas cercanas.

## 5.22 Efecto de la Resistencia Eléctrica en el Cálculo de la Corriente de Cortocircuito

En los grandes sistemas de potencia, la resistencia puede ser obviada en los estudios simplificados, esto debido a que su valor es sumamente pequeño en comparación con la reactancia. En los sistemas industriales el valor de las resistencias son mayores que en los sistemas de potencia, y puede modificar en gran medida la corriente de cortocircuito (en la magnitud y en la fase) por lo que en los estudios de cualquier tipo (al menos que se trate de una mala aproximación) se ha de considerar la resistencia como un factor preponderante en el cálculo de cortocircuito.

Algunos trabajos han establecido que el error cometido en los grandes sistemas de potencia, donde  $R \ll X$  al despreciar la resistencia en los transformadores y generadores es menor al 3%. Si se considera un sistema exterior, el cual es modelado como una fuente ideal ( $V_{th}$ ) de voltaje en serie con una impedancia ( $Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$ ), modelo de Thevenin, la corriente de cortocircuito en terminales del modelo puede ser determinada como:

$$|\bar{I}_{cc}| = \frac{|\bar{V}_{th}|}{|R_{th} + jX_{th}|} \quad (42)$$

Si se aplica una pequeña magia matemática:

$$|\bar{I}_{cc}| = \frac{|\bar{V}_{th}|}{X_{th} \sqrt{1 + \left(\frac{R_{th}}{X_{th}}\right)^2}} \quad (43)$$

Por otra parte, si se realiza el cálculo de la corriente de cortocircuito en el mismo modelo, pero bajo la premisa de que se desprecia la resistencia, es decir, en forma aproximada.

$$|\bar{I}_{cc}|_{aprox} = \frac{|\bar{V}_{th}|}{X_{th}} \quad (44)$$

Entonces relacionando las ecuaciones (43) y (44), se obtiene que:

$$|\bar{I}_{cc}| = \frac{|\bar{I}_{cc}|_{aprox}}{X_{th} \sqrt{1 + \left(\frac{R_{th}}{X_{th}}\right)^2}} \quad (45)$$

Es importante, que si se conoce el valor de la relación  $X/R$  (Reactancia/Resistencia) en el punto de falla, entonces se puede conocer la corriente de falla exacta ( $I_{cc}$ ) a partir de la aproximada. En los casos en que la relación  $X/R \gg 4$ , el error cometido al despreciar la resistencia del sistema de potencia es menor al 4%. En los sistemas en que se cumple que  $X/R > 4$ , se puede despreciar fácilmente la resistencia, mientras que en los sistemas de distribución e industriales esto no es valido, ya que la relación  $X/R$  es completamente menor a 4.

### 5.23 Especificación de Interruptores de Potencia

En el momento de especificar un interruptor de potencia se ha de tomar en cuenta una serie de parámetros, para garantizar su correcto y seguro funcionamiento en condiciones normales y de falla, entre estos parámetros, se encuentran dos de relevante importancia:

- Corriente Asimétrica de Interrupción.
- Corriente Asimétrica Momentánea.

En régimen de cortocircuito, la corriente asimétrica de interrupción, es el valor para el cual debe ser capaz de abrir el interruptor,  $I_{asimInst}$ , se calcula tomando en cuenta el tiempo que ocurre la falla, hasta que empiezan a separarse los contactos del interruptor. Por otra parte, puede suponerse que la máxima corriente de cortocircuito que puede soportar el interruptor es la corriente asimétrica momentánea,  $I_{asimMom}$ .

La duración del período subtransitorio escasamente supera los 6 a 10 ciclos a frecuencia industrial, por tanto, en la especificación de interruptores se ha de considerar los cálculos de corriente de cortocircuito en este período. Para realizar la selección del interruptor un procedimiento seguro, es el considerar que la componente de frecuencia fundamental de la corriente de cortocircuito no se decrementa en el tiempo, sino que por el contrario, se mantiene constante en el tiempo, e igual a su valor inicial subtransitorio ( $I_{AC}$ ), y este se utiliza para el cálculo de la corriente momentánea, pero la componente de corriente continua si se considera.

$$I_{EF}(t) = \sqrt{I_{DC}^2(t) + I_{AC}^2(t)} \quad (46)$$

$$I_{EF}(t) = I_{AC}(t) \sqrt{1 + \left(\frac{I_{DC}(t)}{I_{AC}(t)}\right)^2} \quad (47)$$

Si se define el factor de asimetría  $K(t)$ , se tiene:

$$I_{EF}(t) = K(t)I_{AC}(t) \quad (48)$$

$$K(t) = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{DC}(t)}{I_{AC}(t)}\right)^2} \quad (49)$$

El factor de asimetría máximo  $K_m(t)$ , resulta de tomar en cuenta la componente de corriente continua que produce la máxima asimetría  $I_{DCM}(t)$ .

$$K_M(t) = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{DCM}(t)}{I_{AC}(t)}\right)^2} \quad (50)$$

Se conoce por teoría que la componente de continua que provee máxima asimetría viene dado por:

$$I_{DCM}(t) = \sqrt{2}I_{AC}e^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (51)$$

Siendo  $\tau_a$ , es la constante de tiempo del decremento de la corriente de continua:

$$\tau_a = \frac{1}{\omega} \times \frac{X}{R} \quad (52)$$

Sustituyendo la ecuación (51) en la ecuación (50), resulta:

$$K_M(t) = \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2t}{\tau_a}}} \quad (53)$$

Se puede demostrar que el máximo valor permisible de  $K_m(t)$ , ocurre en  $t = 0$  y es de  $\sqrt{3}$ . Finalmente una vez que se tiene  $K_m(t)$ , el valor efectivos de las corrientes para especificar los interruptores son:

Máxima Corriente Asimétrica Momentánea:

$$I_{AsimMom} = K_M \left( t = \frac{1}{2} \text{Ciclo} \right) I_{ac} \quad (54)$$

Máxima Corriente Asimétrica de Interrupción:

$$I_{AsimInst} = K_M(t = \tau_c) I_{ac} \quad (55)$$

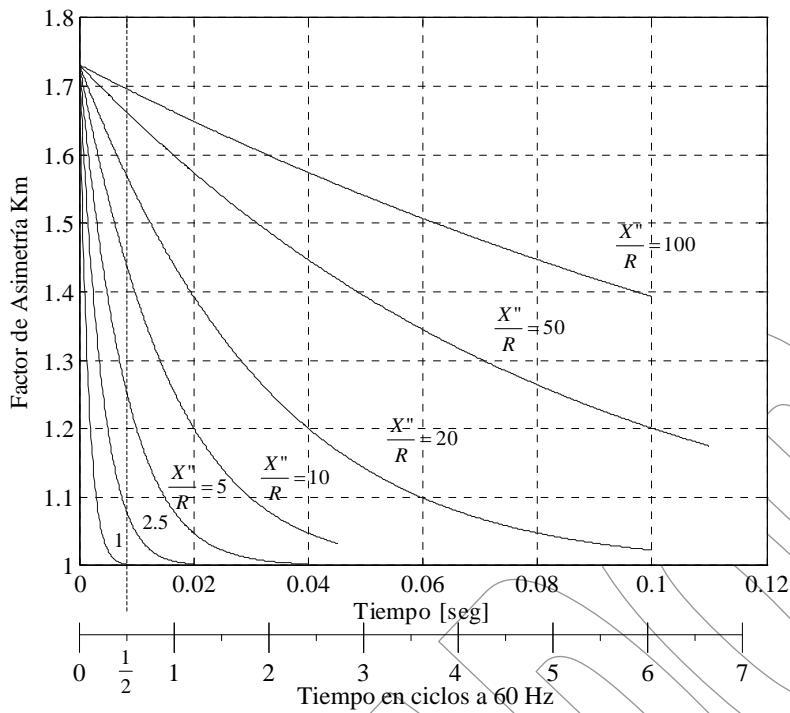
Siendo  $\tau_c$  el tiempo en que empiezan a separarse los contactos de interruptor. El tiempo de operación o régimen de operación de los interruptores se encuentran normalizados según el ASA.

**Tabla 5.23.1. Régimen de operación de los interruptores**

Régimen del Interruptor	Tiempo que tardan en empezar a separarse los contactos	Tiempo mínimo de partida de los contactos $\tau_c^2$	Tiempo que tardan en extinguirse el arco
8 ciclos	3.5	4	4
5 ciclos	2.5	3	2
3 ciclos	1.5	2	1
2 ciclos	1	1.5	0.5

Como ya se ha mencionado, el factor de máxima asimetría  $K_m(t)$ , depende de la constante de tiempo  $\tau_a$ , y esta a su vez de la relación  $X/R$ , en el punto de falla. Se han construido gráficas, en las que se traza el factor de asimetría en función del tiempo y de la relación  $X/R$  en el punto de falla.

<sup>2</sup> Asumiendo que el relé tarda medio ciclo en operar a un frecuencia de 60 Hz.



**Figura 5.23.1. Gráfica Típica del factor de asimetría**

Si se desconoce por algún motivo la relación X/R en el punto de falla, puede emplearse un método alternativo de cálculo menos exacto, realizado ciertas suposiciones.

**Máxima Corriente Asimétrica Momentánea:**

$$I_{AsimMom} = 1.6I_{ac} \tag{55}$$

**Máxima Corriente Asimétrica de Interrupción:**

$$I_{AsimInst} = K_M (Tabla) I_{ac} \tag{56}$$

**Tabla 5.23.2**

Régimen de interrupción o localización de la falla	$K_m(TABLA)$
8 ciclos	1.0
5 ciclos	1.1
3 ciclos	1.2
2 ciclos	1.4
Falla en la barra de generación	Agregue 0.1 a $K_m$
Capacidad de cortocircuito con $I_{AC}$	Agregue 0.1 a $K_m$

Otro método alternativo para estimar el factor de asimetría en aquellos casos en que se desconoce el valor de la relación X/R en el punto de falla es asumir un valor para ella, en función de los equipos que constituyen el sistema de potencia y el punto en que ocurre la falla.

**Tabla 5.23.3**

<i>Tipo de circuito y localización de la falla</i>	<i>Rango de X/R</i>
Estación de generación, falla a tensión de la maquina directamente en los terminales a través de reactores	40-120
Estación de generación. Falla justo en lado de alta de transformadores elevadores de 100 o más MVA	40-60
Idéntico al anterior solo que son transformadores elevadores de 25 a 100 MVA	30-50
Secundario de transformadores en Subestaciones de reducción o acoplamiento, de 100 MVA o más, cuando el transformador representa el 90% o más de la impedancia equivalente de la falla.	30-50
Igual al anterior, pero transformadores de 25 a 100 MVA	15-40
Fallas en sitios remotos de las estaciones de generación, alimentados por transformadores menores de 25 MVA, reactores, líneas, alimentadores de distribución	15 o menos

En el caso de los minúsculos interruptores de potencia de bajo voltaje (600 Volt o menos), no son normalmente activados por relés externos sino que ya poseen sus dispositivos sensores de corriente cercanos al régimen de interrupción, el tiempo de separación de los contactos es muy pequeño, por tanto, la única corriente que se especifica es la corriente asimétrica momentánea (es decir para medio ciclo), ya que puede soportar momentáneamente y la máxima que es capaz de interrumpir son prácticamente iguales.

Los fusibles son elementos limitadores de corriente, y porque ellos deben interrumpir la corriente de falla antes que se alcance su máximo, medio ciclo, los fusibles se especifican en base a la máxima corriente asimétrica momentánea, que fluiría por el circuito si el fusible no estuviese colocado en el circuito.

La capacidad de interrupción del fusible, entonces se calcula con el factor de asimetría en medio ciclo.