

Guías de Aplicación: Información Técnica de Cummins Generator Technologies

AGN 005 – Corrientes de falla y Curvas de Disminución de Cortocircuito

DESCRIPCIÓN

Para facilitar el diseño correcto de un sistema de protección eléctrica y para determinar los esfuerzos electromagnéticos y mecánicos impuestos sobre un alternador durante condiciones de falla, se debe establecer el desempeño de cortocircuito del alternador durante las primeras etapas de una condición de falla.

Las curvas de disminución de cortocircuito representan la corriente de falla del alternador durante los períodos subtransitorio, transitorio y sostenido de la condición de falla.

Por motivos de claridad, las curvas de disminución muestran el rendimiento del alternador para una condición de cortocircuito trifásico, con notas descriptivas que permiten el cálculo de corrientes de falla monofásicas o de fase a fase.

Los niveles de corriente de falla se deciden por la reacción del inducido creada por el efecto de la corriente de falla que fluye a través de los devanados del estator y el efecto resultante de la desmagnetización de los amperios en el flujo del rotor. La reacción del inducido a una falla trifásica es una condición que involucra las 3 fases, por lo tanto, todos los devanados del estator y una corriente de falla mostrada, es una indicación de la reacción de inducido de desmagnetización de la corriente de falla alcanzable en términos de vueltas de amperios sostenibles.

Este mismo nivel de vueltas de amperios, si solo ocurre en una falla bifásica (L-L), debería resultar en unas 3/2 veces más corriente que un cortocircuito trifásico. De manera similar, la falla monofásica L-N debería dar 3/1 veces más corriente, pero debido al flujo pulsante de esta condición muy desequilibrada, la corriente de falla resultante es típicamente 2,5/1 veces el nivel trifásico.

El rendimiento recomendado gráficamente del alternador en condiciones de falla de cortocircuito se basa en la falla que ocurre en los terminales del grupo electrógeno o muy cerca de ellos.

Un grupo electrógeno operando en servicio se conectará a un sistema de distribución sirviendo a la(s) carga(s) conectada(s). Este sistema de distribución tendrá una impedancia (Z), por lo que introducirá un valor de Z entre los terminales del alternador y el punto en el que se ha producido la "falla". La 'falla' también tendrá un valor de Z, y si la naturaleza de la 'falla' es una 'falla a tierra', entonces el camino de 'retorno a tierra' también tendrá un nivel de impedancia.

La impedancia total del circuito de falla del sistema de distribución eléctrica reducirá el nivel real de corriente de falla del que se muestra en la curva de disminución de cortocircuito publicada del alternador.

CURVAS DE DISMINUCIÓN DE CORTOCIRCUITO

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de una curva típica de disminución de cortocircuito trifásico.

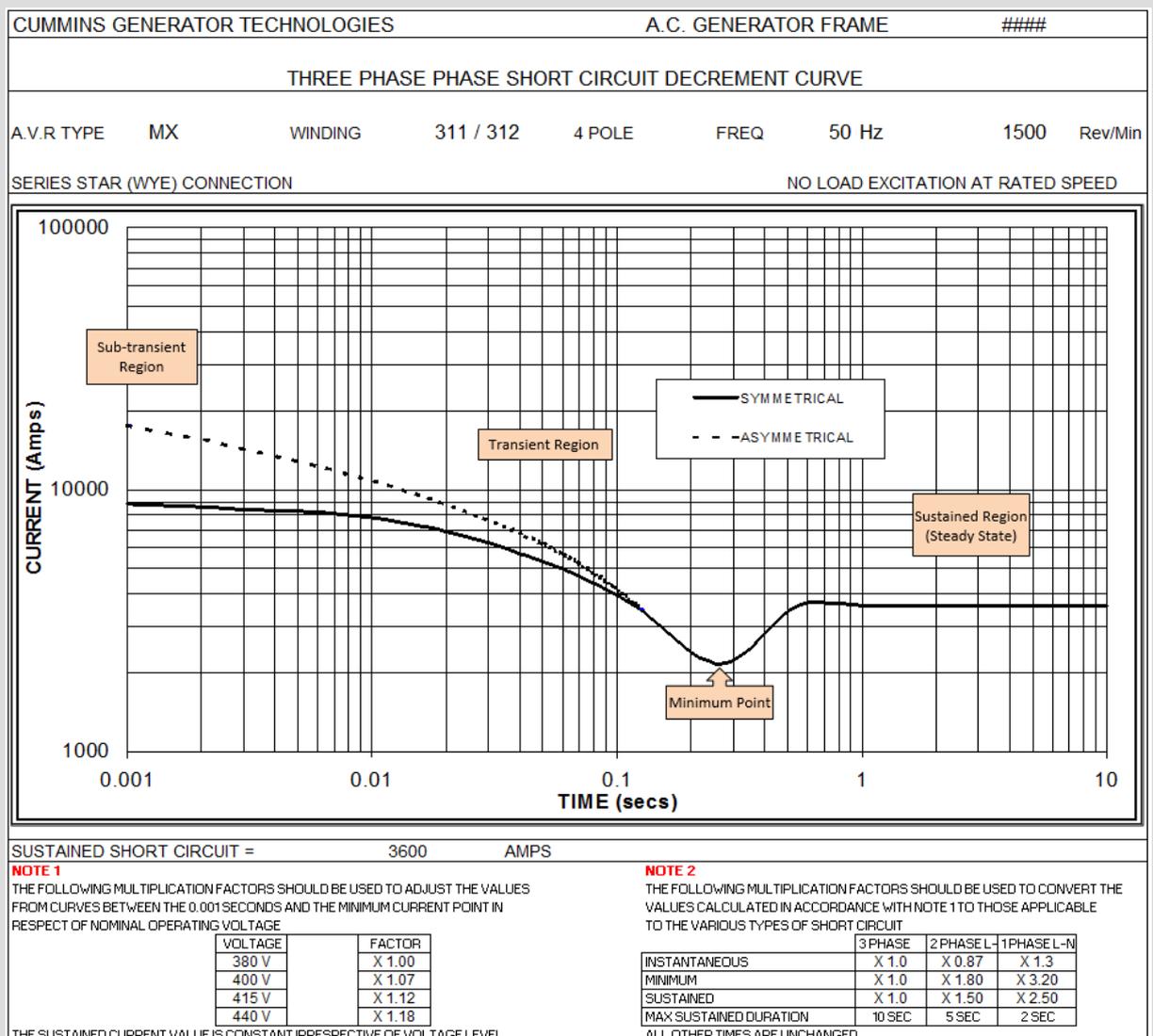


Figura 1: Curva típica de Disminución de Cortocircuito Trifásica

Al ver por primera vez una Curva de Decremento, puede parecer innecesariamente compleja, se espera que la siguiente explicación simplifique la información ilustrada.

Las regiones subtransitoria y transitoria, como se indica en la Figura 1, entregan corriente de falla que resulta de la energía dentro de la fuerza del campo magnético asociada con los circuitos electromagnéticos que prevalecen dentro del alternador asociado con un sistema de excitación que opera para mantener el voltaje de salida nominal, mientras soporta la carga eléctrica conectada. Cuando ocurre inicialmente la falla, esta reserva de energía comienza a dispersarse, impulsando inicialmente los altos niveles de corriente asociados con la región subtransitoria, luego continúa forzando un nivel decreciente de corriente de falla a través de la región transitoria hasta que finalmente se agota la reserva de energía.

Región subtransitoria.

El período de tiempo subtransitorio normalmente no supera los dos ciclos (40 ms a 50 Hz). Esta región del rendimiento de un alternador se considera matemáticamente mediante el uso de la reactancia subtransitoria (X''_d). El nivel simétrico de corriente de falla de tiempo cero para una condición de falla trifásica se puede calcular multiplicando la corriente nominal de salida del alternador por el recíproco del valor de X''_d como un valor en términos por unidad (pu).

Ejemplo: Donde la corriente nominal a plena carga del alternador es 1443A y la reactancia subtransitoria publicada para 400V, 1000kVA es 0.15pu (15%), la corriente de falla simétrica de tiempo cero = $(1/0.15) \times 1443 = 6.66 \times 1443 = 9619A$.

Puede verse que en el tiempo cero cada una de las condiciones de falla comienza en dos puntos individuales desde los cuales se encuentran dos curvas convergentes después de unos 0,1 s (5 x ciclos de CA). La curva inferior para cada condición describe el nivel de corriente de falla asociado con una forma de onda de corriente de falla simétrica, una condición en la que cada mitad de la forma de onda de corriente alterna es igual a la línea de cruce por cero. La curva superior describe el nivel de corriente de falla asociado con una forma de onda de corriente asimétrica, una condición en la que el primer ciclo de forma de onda de corriente sinusoidal se desplaza por completo hacia un lado de la línea de cruce por cero.

El nivel asimétrico de corriente de falla para la condición de falla trifásica es a menudo objeto de debate académico. Una razón para identificar este valor está relacionada con la consideración de la capacidad de la fuente de alimentación con respecto a la "capacidad de ruptura" diseñada de los conjuntos de conductores eléctricos asociados, incluidas las cámaras de barras colectoras y el equipo de distribución. Por lo tanto, el valor asimétrico citado con mayor frecuencia para condiciones de falla trifásica y bifásica se basa en un factor del doble del nivel de corriente simétrica calculado. En una situación práctica, la probabilidad es que el 99,9% de todas las condiciones de falla ocurran en algún lugar entre la simetría perfecta y la asimetría perfecta y, por lo tanto, es muy poco probable someter un sistema de distribución al valor asimétrico recomendado.

Región transitoria.

El tiempo desde la región subtransitoria en adelante, hasta la convergencia de las curvas simétricas y asimétricas y hasta el punto después del cual la corriente de falla comienza a aumentar, se denomina región transitoria. A través de esta región transitoria, la onda sinusoidal de CA de la corriente de falla resuelve alinearse igualmente alrededor de la línea media de cruce por cero. El rendimiento del alternador en toda la región transitoria se puede describir matemáticamente mediante la debida referencia a la reactancia transitoria del alternador (X'_d) relacionada con varias constantes de tiempo.

Cabe señalar que los alternadores auto excitados equipados con un AVR alimentado por la salida del devanado del estator principal del alternador y, por lo tanto, no tienen una fuente de alimentación independiente, son intrínsecamente incapaces de obligar al alternador a entregar un nivel de estado estable de corriente de falla trifásica. Por lo tanto, la región transitoria termina con una corriente de falla cero, lo que significa que el alternador ha dejado de funcionar efectivamente después de un período típico de 0,35 s. Dichos alternadores tienen una cierta capacidad para proporcionar una capacidad de fuerza limitada cuando ese alternador está sujeto a condiciones de falla monofásica.

La captura de la Curva de Disminución de Cortocircuito en la Figura 2 muestra que hay un punto donde se captura el nivel de corriente de falla descendente de las regiones transitorias (punto mínimo) y el nivel de corriente de falla aumenta hasta un punto donde se logra y se mantiene un nivel de corriente de estado estable.

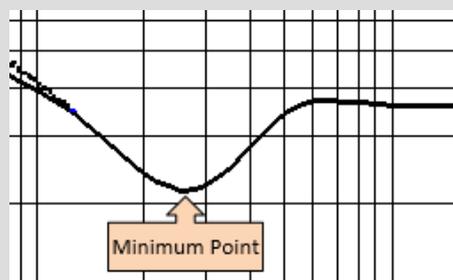


Figura 2: Decremento de Cortocircuito

Este comportamiento es el resultado de que un AVR esté alimentado por una fuente de alimentación dedicada, como un generador de imanes permanentes (PMG), un devanado auxiliar del estator o un suministro de batería. A pesar de que el AVR reconoce inmediatamente que el voltaje de salida del alternador está por debajo del nivel nominal, debido al cortocircuito y responde instantáneamente comenzando a aumentar el nivel de excitación para corregir esa situación, los circuitos electromagnéticos del rotor principal y del excitador tardan un tiempo finito en alcanzar un nivel de fuerza de campo para hacer una contribución positiva para soportar un nivel de corriente de falla positivo. La curva de disminución representa esto con el nivel indicado de corriente de falla comenzando a aumentar. El aumento llega entonces a un punto en el que la corriente de falla se mantiene en un nivel constante. Este nivel constante de corriente de falla es un producto del sistema de excitación que alcanza su máxima capacidad de forzamiento.

Región Sostenida (Estado Estacionario).

Con respecto al nivel de región sostenida de la corriente de falla, esta área a menudo se denomina región de estado estacionario o síncrona. Siendo el nivel de corriente en esta región múltiplos de la corriente de salida nominal, el alternador está operando claramente bajo una condición de excitación forzada; por lo tanto, no se debe hacer ningún esfuerzo para determinar el nivel de corriente de falla de estado estable mediante un cálculo utilizando el valor recomendado por el alternador para la reactancia síncrona (X_d).

El nivel de corriente de cortocircuito sostenido real de un alternador se muestra en la curva de disminución individual para ese diseño de alternador. El "estándar" de la industria de grupos electrógenos de esperar una corriente de cortocircuito del 300 % no es más un "supuesto" que la probabilidad de que las cargas eléctricas conectadas den como resultado que el alternador funcione con un retraso de solo 0,8 pf.

Factores multiplicadores.

La intención de una curva de disminución de cortocircuito es proporcionar información sobre el rendimiento de un alternador en condiciones de falla. Se ha convertido en una práctica común mostrar en forma gráfica el desempeño del alternador bajo una condición de cortocircuito trifásico [L-L-L] donde la corriente de falla potencial es el resultado de una falla que ocurre directamente en los terminales del devanado del estator del alternador y, por lo tanto, de impedancia cero efectiva.

Para mantener el gráfico de la Curva de Decremento lo más simple posible, se han incluido 'Notas' tabuladas para proporcionar factores multiplicadores que se utilizarán para el establecimiento de niveles de corriente de falla prospectivos bajo una condición de falla de impedancia cero de fase a fase [L-L], y también una condición de falla de impedancia cero monofásica [L-N].

Las Notas se encuentran debajo de la Curva de Decremento de Cortocircuito Trifásico, etiquetadas como **Note 1** y **Nota 2**.

Nota 1:

NOTE 1		
THE FOLLOWING MULTIPLICATION FACTORS SHOULD BE USED TO ADJUST THE VALUES FROM CURVES BETWEEN THE 0.001 SECONDS AND THE MINIMUM CURRENT POINT IN RESPECT OF NOMINAL OPERATING VOLTAGE		
VOLTAGE		FACTOR
380 V		X 1.00
400 V		X 1.07
415 V		X 1.12
440 V		X 1.18
THE SUSTAINED CURRENT VALUE IS CONSTANT IRRESPECTIVE OF VOLTAGE LEVEL		

Esta tabla informa sobre los factores matemáticos de la tensión operativa nominal, que deben aplicarse a las curvas gráficas en la región desde el "tiempo cero" hasta el punto de nivel mínimo de corriente.

Ejemplo:

Supongamos un alternador de 400 V:

El valor SIMÉTRICO 'INSTANTÁNEO' tomado del gráfico es 9000A, por lo tanto, al introducir el factor 1.07 recomendado se convierte en $9000A \times 1.07 = 9630 A$

Nota 2:

Los valores que se muestran en la 'Nota 2' para condiciones de falla bifásica (L-L) y monofásica a neutro (L-N) se eligieron por simplicidad matemática, considerando la multitud de diferentes diseños de alternadores fabricados, combinados con la experiencia del rendimiento del alternador.

NOTE 2			
THE FOLLOWING MULTIPLICATION FACTORS SHOULD BE USED TO CONVERT THE VALUES CALCULATED IN ACCORDANCE WITH NOTE 1 TO THOSE APPLICABLE TO THE VARIOUS TYPES OF SHORT CIRCUIT			
	3 PHASE	2 PHASE L-L	1 PHASE L-N
INSTANTANEOUS	X 1.0	X 0.87	X 1.3
MINIMUM	X 1.0	X 1.80	X 3.20
SUSTAINED	X 1.0	X 1.50	X 2.50
MAX SUSTAINED DURATION	10 SEC	5 SEC	2 SEC
ALL OTHER TIMES ARE UNCHANGED			

Para mantener el gráfico de la curva de disminución de cortocircuito lo más simple posible, se ha incluido la Nota 2 para proporcionar factores de multiplicación que se utilizarán para calcular los niveles de corriente de falla probables en una condición de falla de impedancia cero de fase a fase [L-L], y también en una condición de falla de impedancia cero monofásica [L-N].

Ejemplo:

Considere una falla monofásica a neutro:

- El valor **SIMÉTRICO** 'INSTANTÁNEO' tomado del gráfico es 9000A, por lo tanto, al introducir el factor 1.3 recomendado se convierte en 11700 A.
- El valor **ASIMÉTRICO** 'INSTANTÁNEO' tomado del gráfico es 18000A, por lo tanto, al introducir el factor 1.3 recomendado se convierte en 23400 A.
- El valor de **PUNTO MÍNIMO** tomado del gráfico es 2100A, por lo tanto, al introducir el factor 3.2 recomendado se convierte en 6720 A.
- El valor **SOSTENIDO** tomado del gráfico, confirmado en el texto es 3600A, por lo tanto, al introducir el factor 2.5 recomendado se convierte en 9000 A.
- La duración máxima sostenida de una falla de fase a neutro es de 2 segundos.

Con respecto a la condición de falla de 2 fases (L-L); y el momento 'Instantáneo' (tiempo cero). El factor establecido de 0,87 es estrictamente aplicable solo para un alternador con un diseño en el que los valores de X''_d y X_2 son iguales, y esto sería cierto para un diseño de rotor cilíndrico y casi cierto para un diseño de polo saliente con un diseño idealizado y perfecto de la jaula del amortiguador.

Para la mayoría de los diseños de alternadores CGT, parece que X_2 tiene unas $1,5 \times X''_d$. Esto entonces cambia la fórmula estándar de la siguiente manera:

$$X''_d s = [X''_d + X_2] / 1,732 = 2 \times X''_d / 1,732 = 1,15 \times X''_d$$

Y así la corriente de falla $I''_d s = 1/1.15 \times I''_d = 0.87 \times I''_d$

En una fórmula específica donde $X_2 = 1.5 \times X''_d$:

$$X''_d s = ([X''_d + X_2] / X''_d) / 1,732 = 2,5 \times X''_d / 1,732 = 1,44 \times X''_d$$

Y así la corriente de falla $I''_d s = 1/1.44 \times I''_d = 0.7 \times I''_d$

Al considerar la variabilidad de los valores de nivel simétrico hasta asimétrico de corriente I^rd, y luego la pequeña variación entre multiplicar un valor elegido de I^rd Amps por 0.7 o 0.87, la decisión de usar 0.87 en todas las Curvas de Decremento se justifica.

Como justificación adicional para respaldar factores matemáticos simplificados en las columnas L-L y L-N, se deben considerar las siguientes variabilidades.

Un grupo electrógeno operando en servicio se conectará a un sistema de distribución sirviendo a la(s) carga(s) conectada(s). Este sistema de distribución tiene impedancia, por lo que introducirá un valor de Z entre los terminales del alternador y el punto en el que se ha producido la "falla". La 'falla' también tendrá un valor de Z, y si la naturaleza de la 'falla' es una 'falla a tierra', entonces el camino de 'retorno a tierra' también tendrá un nivel de impedancia. El valor total de la impedancia del circuito de "falla" modificará en gran medida el nivel real de la corriente de falla del alternador que se muestra en la Curva de disminución de cortocircuito publicada del alternador.

Las curvas se dibujan para máquinas conectadas en estrella. Para otras conexiones, se deben aplicar los siguientes multiplicadores a los valores actuales:

Estrella paralela = Valor actual de la curva x 2
Serie Delta = Valor actual de la curva x 1.732

Duración máxima sostenida. La nota 2 también detalla la duración máxima sostenida de una condición de falla que el alternador puede soportar. El tiempo de desconexión de la falla es fundamental para evitar daños en el devanado del alternador. Se considera que la guía segura es: < 10 s para una falla en 3 fases (L-L-L), < 5 s para una falla en 2 fases (L-L) y < 2 s para una falla monofásica a Neutro (L-N).

CONDICIONES DE FALLA

El desempeño de un alternador bajo condiciones de falla es descrito por la Curva de Decremento de Cortocircuito, la cual forma parte de la publicación técnica proporcionada por los fabricantes del alternador. El método preferido parece ser una representación gráfica del rendimiento de corriente de falla del alternador, por lo tanto, en términos generales, se alinea con los datos técnicos proporcionados por los fabricantes de dispositivos de protección contra sobre corriente.

Por motivos de claridad, las curvas decrecientes muestran el rendimiento del alternador en una condición de cortocircuito trifásico. Se han realizado cálculos, usando las notas descriptivas asociadas con la curva de decremento, para facilitar la determinación y adición manual de curvas monofásicas o de fase a fase. Para el siguiente ejemplo, se ha realizado un ejercicio de este tipo, con la adición de curvas rojas y azules.

El ejemplo de la Curva de disminución en la Figura 3, en la página siguiente, se aplica a un alternador industrial típico clasificado en 1000 kVA, 400 V, 1443 A, 50 Hz:

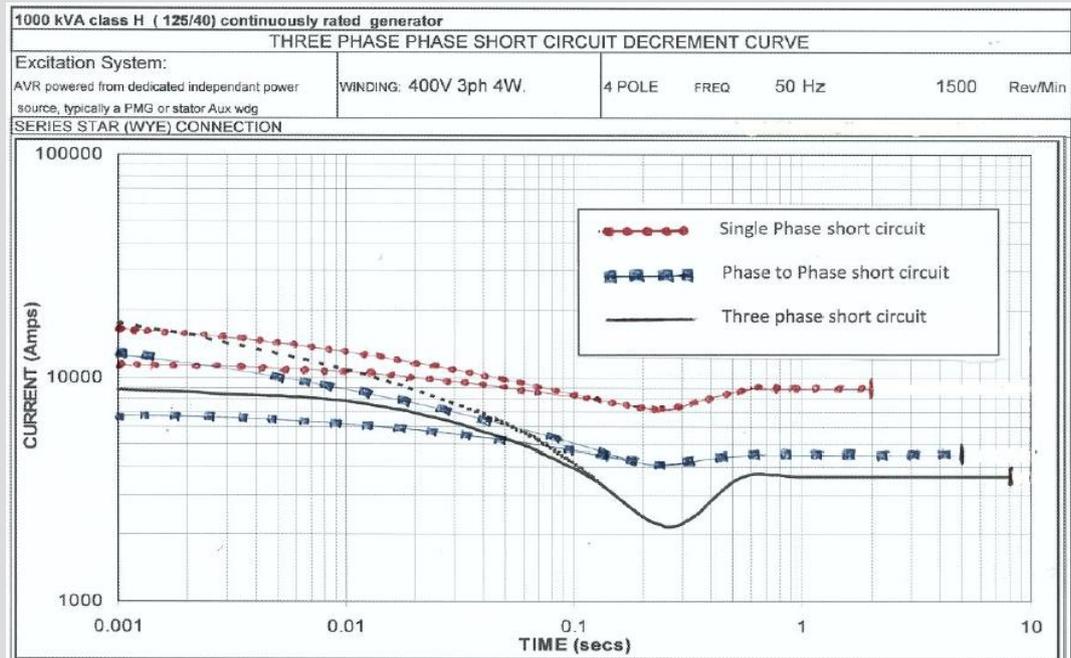


Figura 3: Decremento de Cortocircuito para Condiciones de Fallas Múltiples

Tenga en cuenta que al final de cada línea se ha indicado una "parada" para brindar orientación sobre la duración máxima que el alternador puede tolerar esa condición de falla. Este límite de tiempo es otro factor importante que se debe considerar con respecto a los ajustes de disparo de los interruptores automáticos, ya que el alternador depende de la discriminación efectiva de fallas y, por lo tanto, la eliminación del circuito con falla se realizará dentro del tiempo de duración permitido por el fabricante del alternador de CA. Los fabricantes de alternadores pueden proporcionar un documento separado que muestre los límites de daños térmicos.

Una vez más, el tipo de condición de falla influye al determinar la elección de un disyuntor. El tiempo de desconexión de la falla es fundamental para evitar daños en el devanado del alternador. Una guía inicial es: < 10 s para una falla en 3 fases (L-L-L), < 5 s para una falla en 2 fases (L-L) y < 2 s para una falla monofásica a Neutro (L-N).

Por supuesto, en el mundo real habrá que considerar el cableado del sistema de distribución y las impedancias de falla, por lo que la corriente de falla real será menor que las indicadas en la curva de disminución de cortocircuito.

Sin embargo, la parte de la red eléctrica conectada donde ocurrió la falla sin duda estará protegida por un sistema de distribución en cascada de disyuntores con clasificaciones de corriente más bajas y, por lo tanto, es probable que se dispare fácilmente por la corriente de falla generada, lo que debería ocurrir casi instantáneamente, por razones de menor interferencia con todas las demás cargas conectadas, porque el circuito afectado y su disyuntor se dispararán por el nivel de corriente de falla X^d en ese circuito afectado.

Estrés Mecánico.

Para agregar a la explicación de ingeniería eléctrica anterior, vale la pena incluir algunos comentarios con respecto a la **tensión mecánica momentánea** que una condición de cortocircuito impone a la estructura mecánica de un grupo electrógeno. Al diseñar los componentes mecánicos para un generador de CA (alternador), los niveles de par máximo

momentáneo (piense en términos de reacción de par) en una situación de cortocircuito o un evento de sincronización de choque* deben identificarse e incluirse en las consideraciones de diseño estructural. Por lo general, el factor utilizado para el conjunto del núcleo del estator y el bastidor del alternador, y esto incluye los sujetadores empleados en los pies del bastidor a la estructura del grupo electrógeno, es 12 veces el nivel de potencia nominal continua del alternador. Para la región asociada con el acoplamiento al volante del motor y la carcasa del volante, el factor empleado es 8 veces el nivel de potencia nominal.

Los ingenieros con experiencia en la observación de un grupo electrógeno sometido a pruebas de cortocircuito habrán sido testigos de las fuerzas dinámicas que hacen que el grupo electrógeno se balancee sobre su eje de manera violenta, incluso se levante del suelo por un lado si no está anclado de forma segura y recordará la experiencia audible del equipo que sufre niveles severos de tensión impuesta. De hecho, son las condiciones de cortocircuito desequilibrado las que imponen las mayores fuerzas.

*Evento de sincronización de choque: considere que los alternadores funcionan en paralelo y ocurre una falla dentro del sistema eléctrico que están soportando. Si esa falla está cerca de los alternadores, por lo tanto, de muy baja impedancia, además, la condición de falla no se desconecta inmediatamente mediante un interruptor automático discriminante; es muy probable que el voltaje del sistema se suprima a un nivel que dificulte que los alternadores permanezcan en perfecta sincronización. Cuando se soluciona la falla, el comportamiento resultante de las funciones de control de velocidad y excitación del grupo electrógeno individual puede tener diferencias de rendimiento. Estas diferencias de rendimiento hacen que los grupos electrógenos se vean obligados a realinearse y volver al sincronismo perfecto en lo que a menudo se denomina un evento de "sincronización aproximada". Tal escenario impone un evento doblemente estresante para el equipo.

Niveles de Corriente de Falla en el Sitio.

Operación Paralela. Un punto de partida simplista es mirar la Curva de Disminución de Cortocircuito para cada alternador que está trabajando en paralelo, y luego considerar 'simplemente sumar' cada una de las corrientes de falla 'ideales' pronosticadas del alternador.

Sin embargo, esto dará un valor más alto que el que realmente se logrará en una instalación real, pero esto dará una corriente de "capacidad de ruptura" en el peor de los casos, que puede ser lo que el ingeniero de instalación necesita identificar, debido a las preocupaciones sobre una red de instalación delicada.

Situaciones en el sitio. Comencemos con un solo alternador en una condición de falla real en el sitio. En verdad, las Curvas de Decremento se basan en que el cortocircuito está justo en los terminales del alternador. En servicio, por supuesto, esto es poco probable donde ocurra la falla, por lo que el ingeniero de instalación debe introducir la impedancia (Z) del circuito de los sistemas de distribución. Vale la pena repetir que esto está en la ruta en serie del flujo de corriente 'Generador a falla', y así reducirá el nivel de corriente de falla de la Curva de Disminución 'ideal', a las condiciones reales en el sitio. La 'falla' también tendrá un valor de Z , y si la naturaleza de la 'falla' es una 'falla a tierra', entonces el camino de 'retorno a tierra' también tendrá un nivel de impedancia. El valor total de la impedancia del circuito de 'falla' modificará en gran medida el nivel real de la corriente de falla del alternador que se muestra en la Curva de Disminución de Cortocircuito publicada del alternador.

Cuando opera en paralelo, cada generador está acoplado a la barra colectora común del sistema en el sitio, mediante conductores de sin duda diferentes longitudes, por lo tanto, diferente impedancia, por lo tanto, esto introduce una impedancia 'en serie' inicial del generador a la barra colectora común. Desde la barra colectora común a través de la red de

distribución del sitio y hacia la falla, introduce una segunda impedancia, cuyo valor se basa en el sistema del sitio. Todas estas impedancias en serie reducen el nivel de corriente de falla del que se muestra en las Curvas de Disminución.

Una **Regla de Oro**; siempre que los grupos electrógenos no estén demasiado lejos de la barra colectora común, asuma que el nivel de falla en la barra colectora será el 90 % de la suma total simple de la corriente de falla de cada grupo electrógeno, como se muestra en la curva de disminución de cada alternador. El ingeniero de instalación debe entonces preocuparse por la impedancia de los sistemas de distribución, lo que reducirá aún más el nivel de corriente de falla de barras, y así establecer el ajuste que disparará los dispositivos de protección contra sobre corriente instalados.

Otras Consideraciones.

Existe la idea errónea de que todos los alternadores, equipados con un sistema de excitación adecuado, generarán al menos un 300 % de corriente de cortocircuito en la condición de estado estable asociada a una condición de cortocircuito trifásica equilibrada. Es un mercado con conciencia comercial que ha forzado la aplicación de ingeniería rentable a productos industriales estándar con la consecuencia de que muchos alternadores industriales de tipo Prime (125/40) ahora no alcanzan ese rendimiento. Para el fabricante del grupo electrógeno, esto puede suponer un desafío a la hora de seleccionar un disyuntor con capacidad de discriminación de fallos adecuada, cuando se dispone de un bajo nivel de corriente de fallo. Lo positivo es que la mayoría de las fallas del sistema eléctrico son de fase a tierra o de fase a fase; además, las corrientes de falla muy altas asociadas con la etapa inicial y subtransitoria de las regiones transitorias deberían ser bastante capaces de proporcionar suficiente capacidad de disparo y permitir el tiempo de interrupción mínimo.

Las Sociedades Clasificadoras Marinas aún especifican un requisito del 300% y aquí la selección del alternador incluye la debida consideración de las Curvas de Decremento para los alternadores bajo revisión, con el 300% I.s/c. siendo la función el parámetro de dimensionamiento crítico.