

ANEXO TÉCNICO:

Cálculo de Nivel Máximo de Cortocircuito

TÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

Artículo 1

El objetivo del presente Anexo Técnico es establecer los términos, las normas, las condiciones técnicas y la metodología que se debe considerar al efectuar el cálculo del máximo nivel de corriente de cortocircuito existente en cada punto del SI, a efectos de la verificación de las Exigencias Mínimas que se establecen en el Artículo 3-3, letra d) de la presente Norma en relación a los niveles de corriente de cortocircuito que deben soportar las instalaciones del SI.

Artículo 2

Están sujetos a verificación de capacidad todos los equipos primarios comprendidos en las instalaciones de Centrales de Generación y del Sistema de Transmisión del SI, vigentes a la fecha de realización del cálculo del máximo nivel de corriente de cortocircuito. Estos equipos primarios deberán contar con la suficiente capacidad que les permita soportar al menos los niveles máximos individuales de corriente de cortocircuito que se establezcan en cada uno de éstos, a consecuencia de las correspondientes fallas en el SI.

Artículo 3

Los criterios y supuestos establecidos en el presente Anexo se sustentan en la Norma IEC 60909 (2001): "Short-Circuit current in three-phase a.c. systems".

Artículo 4

Sin perjuicio que se aplican las definiciones y abreviaturas establecidas en el TÍTULO 1-2 de la presente Norma, para este Anexo, se precisan además las siguientes definiciones:

1. **Corriente de cortocircuito simétrica:** Valor r.m.s. de la componente simétrica de corriente alterna (ca.) de una corriente de cortocircuito. La componente continua o no periódica de la corriente, no es considerada.
2. **Corriente de cortocircuito simétrica inicial:** Valor r.m.s. de la componente simétrica de ca. de una corriente de cortocircuito, aplicable en el instante de iniciado el corto circuito, considerando que la impedancia mantiene el valor del instante $t=0$.
3. **Componente continua (no-periódica) de la corriente de cortocircuito (i_{dc}):** Valor medio de la envolvente de la corriente de cortocircuito decayendo desde un valor inicial hasta cero.
4. **Corriente de cortocircuito máxima (peak):** Valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito.
5. **Corriente de cortocircuito simétrica de interrupción:** Valor r.m.s. de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito, integrada en 1 ciclo, para el instante de separación de los contactos del primer polo del dispositivo de interrupción.
6. **Corriente de cortocircuito de régimen permanente:** Valor r.m.s de la corriente de cortocircuito que permanece después del decaimiento de los fenómenos transitorios.

7. **Corriente de cortocircuito de equivalente térmico (I_{th}):** Valor r.m.s de una corriente que tiene el mismo efecto térmico e igual duración que la corriente de cortocircuito.
8. **Tensión nominal del sistema (V_n):** Tensión (línea a línea) de diseño del sistema.
9. **Cortocircuitos lejanos al generador:** Cortocircuito durante el cual la magnitud de la componente simétrica de corriente alterna (ca.) de la corriente de cortocircuito permanece esencialmente constante.
10. **Cortocircuitos cercanos al generador:** Cortocircuito en el que al menos una máquina sincrónica contribuye con una corriente de cortocircuito simétrica inicial que es mayor que dos veces la corriente de nominal de la máquina, o un cortocircuito para el cual la contribución de los motores asincrónicos es mayor que el 5% de la corriente de cortocircuito simétrica inicial sin los motores.
11. **Reactancia subtransiente de una máquina sincrónica:** Corresponde a la reactancia que efectivamente se establece al momento del cortocircuito.

TÍTULO II. INFORMACIÓN Y SUPUESTOS DEL CÁLCULO

Artículo 5

Los parámetros técnicos de las instalaciones a utilizar en el cálculo de corrientes de cortocircuito corresponden a los establecidos en la Norma IEC 60909, los cuales deberán estar disponibles en el sitio WEB del Coordinador.

Artículo 6

El modelo del sistema interconectado que se utilice en el cálculo de corrientes de cortocircuito deberá considerar la red detallada en los diagramas unilineales de las instalaciones del SI vigente a la fecha de evaluación, diagramas que deberán ser solicitados al Coordinador o validados por éste en su oportunidad.

Artículo 7

El modelo del SI, con la topología y los parámetros correspondientes a las instalaciones de generación y de transmisión del SI se encontrará disponible en la base de datos del Coordinador en el formato del programa de simulación utilizado por éste. Esta base de datos podrá ser solicitada al Coordinador a efectos de realizar el cálculo del nivel máximo de cortocircuito.

Artículo 8

De acuerdo con la Norma IEC 60909, el cálculo de las corrientes de cortocircuito debe considerar los siguientes supuestos:

- a) Durante el tiempo de duración del cortocircuito no existe cambio en el tipo de cortocircuito, esto es, un cortocircuito trifásico permanece trifásico y un cortocircuito monofásico permanece monofásico durante todo el tiempo del cortocircuito;
- b) Durante el tiempo de duración del cortocircuito, no existen cambios topológicos en la red;
- c) La impedancia de los transformadores es referida a la posición nominal del cambiador de tomas. No obstante, el cálculo de corrientes de cortocircuito debe considerar un factor de corrección que represente a la posición del cambiador de tomas que dé origen a la menor impedancia de cortocircuito;
- d) Las magnitudes de la resistencia del arco del cortocircuito y de la impedancia de falla se consideran despreciables; y
- e) No se consideran: las capacitancias de las líneas, las admitancias shunt y las cargas estáticas (no-rotatorias), excepto las correspondientes a la red de secuencia cero del sistema.

TÍTULO III. METODOLOGÍA

Artículo 9

El método de cálculo de las corrientes de cortocircuito corresponde al definido por la Norma IEC 60909: 2001, para el cálculo de corrientes de cortocircuito en sistema trifásicos de corriente alterna.

Para todo efecto relativo a representación de las instalaciones y detalle del proceso de cálculo, se debe referir a dicha Norma y documentos asociados.

Artículo 10

El cálculo de las corrientes de cortocircuitos deberá contemplar las siguientes condiciones para su aplicación:

- a) Factor de tensión (c): De acuerdo con los niveles de tensión de las instalaciones del SI que contempla este Anexo, se deberá considerar un factor de tensión c igual a 1,1. Esto corresponde a una tensión pre-falla igual a 1,1 veces la tensión nominal de la instalación directamente afectada;
- b) Topología de la red: En el caso de nuevas instalaciones, se deberá considerar la configuración del sistema que presente la mayor contribución de centrales de generación al cortocircuito, esto es, tener conectadas todas las unidades de generación, todas las líneas y transformadores en servicio, a fin de que se configure el mayor Enmallamiento del sistema.

En el caso de la determinación de corrientes de cortocircuito para instalaciones existentes, se deberá considerar la configuración del sistema en relación a su topología y despacho de unidades de generación, junto con el escenario más exigentes y que representen la mayor contribución al cortocircuito en la operación del SEN;
- c) Sistema equivalente: En caso de usar redes equivalentes externas para representar el sistema o parte de este, se deberá utilizar la mínima impedancia de cortocircuito equivalente que corresponde a la máxima contribución de corriente al cortocircuito desde la red externa equivalente modelada; y
- d) Duración del cortocircuito: Se deberá considerar un tiempo de duración del cortocircuito, o tiempo de despeje de falla, de un segundo.

Artículo 11

Las corrientes de cortocircuito deben ser evaluadas para los siguientes tipos de falla:

- a) Trifásica;
- b) Bifásica aislada de tierra;
- c) Bifásica a tierra; y
- d) Monofásica a tierra.

Artículo 12

Para cada uno de los tipos de cortocircuitos indicados en el artículo precedente, se deberán determinar las siguientes componentes de la corriente de cortocircuito, definidas en el Artículo 4:

- a) Corriente de cortocircuito simétrica inicial: I''_k (r.m.s);
- b) Corriente de cortocircuito máxima instantánea: i_p ;
- c) Corriente de cortocircuito simétrica de interrupción: I_b (r.m.s);
- d) Componente continua de la corriente de cortocircuito: i_{dc} ;
- e) Corriente de cortocircuito asimétrica de interrupción: I_{ASI} (r.m.s);
- f) Corriente de cortocircuito de régimen permanente: I_k (r.m.s); y
- g) Corriente de cortocircuito de equivalente térmico: I_{th} (r.m.s).

En el cálculo de estas componentes, con la excepción de la correspondiente a régimen permanente, se deberán emplear los siguientes parámetros de las máquinas rotatorias:

- En las máquinas sincrónicas la reactancia subtransiente saturada o 0,8 veces el valor de la reactancia subtransiente no saturada.
- En las máquinas asincrónicas la impedancia de rotor bloqueado.

Para el cálculo de la corriente de régimen permanente, las máquinas sincrónicas se representan por su reactancia sincrónica y no se considera aporte de las máquinas asincrónicas.

Por otra parte, en el cálculo de las componentes de corriente de cortocircuito de interrupción, simétrica y asimétrica, y de la componente continua de la corriente de cortocircuito, se deberá emplear 40 milisegundos como tiempo mínimo en la separación de los contactos de un interruptor.

Artículo 13

Los niveles máximos de cortocircuito de las componentes de corrientes de cortocircuito indicadas en el artículo precedente, se podrán determinar de la siguiente forma:

- a) El nivel máximo de la corriente de cortocircuito simétrica inicial, estará dado por la mayor de las correspondientes corrientes determinadas para cada tipo de cortocircuito de los indicados en el Artículo 11 del presente Anexo Técnico, de acuerdo a las expresiones señaladas en el DOCUMENTO TÉCNICO 1:. Sea esta corriente de cortocircuito denotada como I''_{KMax} ;

- b) El nivel máximo de la corriente de cortocircuito máxima instantánea, se considera igual:

$$i_{pMax} = 2,7 \cdot I''_{KMax};$$

- c) El nivel máximo de la corriente de cortocircuito simétrica de interrupción, se considera igual:

$$I_{bMax} = I''_{KMax};$$

- d) El nivel máximo de la corriente de cortocircuito asimétrica de interrupción, se considera igual:

$$I_{ASIMax} = \sqrt{2} \cdot I''_{KMax};$$

- e) El nivel máximo de la corriente de cortocircuito de régimen permanente (IK Max), estará dado por la mayor de las correspondientes corrientes determinadas para cada tipo de cortocircuito de los indicados en el Artículo 10 del presente Anexo Técnico, de acuerdo a las expresiones señaladas en el DOCUMENTO TÉCNICO 1.; y
- f) El nivel máximo de la corriente de equivalente térmico (IthMax), será igual al nivel máximo de la corriente de cortocircuito simétrica inicial (I''K Max) para un tiempo de duración del cortocircuito de 1 segundo. Para otros tiempos de duración del cortocircuito (t) el nivel máximo de la corriente de equivalente térmico, se estimará con la siguiente expresión:

$$I_{thMax} = \sqrt{t} \cdot I''_{KMax}$$

Para la estimación de las corrientes indicadas en los incisos b) y d), se ha considerado como referencia un valor de razón de reactancia a resistencia de cortocircuito (X/R) igual a 35.

En el caso que se requiera determinar las corrientes de cortocircuito con mayor precisión, primero se deberá calcular la razón (X/R) específica del sistema, por medio de las expresiones matemáticas que se indican en el DOCUMENTO TÉCNICO 1.; y a continuación, calcular las componentes de las corrientes de cortocircuito mediante las expresiones que se indican en el DOCUMENTO TÉCNICO 2 de este Anexo.

Artículo 14

Las instalaciones del sistema de transmisión con tensión nominal igual o superior a 200 [kV] y las instalaciones de generación, deberán soportar el efecto térmico equivalente al máximo nivel de corriente de cortocircuito simétrica inicial que se determine, considerando una duración del cortocircuito de al menos 0,5 segundos.

Las instalaciones del sistema de transmisión con tensión nominal inferior a 200 [kV] deberán soportar el efecto térmico equivalente al máximo nivel de corriente de cortocircuito simétrica inicial que se determine, considerando una duración del cortocircuito de al menos un segundo.

En cualquier caso los propietarios de las instalaciones deberán demostrar que los tiempos señalados en los incisos precedentes son compatibles con los tiempos de despeje de las fallas correspondientes, para operaciones de protecciones en respaldo en las condiciones más desfavorables.

DOCUMENTO TÉCNICO 1:

Expresiones matemáticas de corrientes de cortocircuitos simétricas según tipos de cortocircuitos.

Las siguientes expresiones de tipo general se pueden emplear para calcular; la corriente de cortocircuito simétrica inicia (I''_k), la corriente de cortocircuito simétrica de interrupción (I_b) y las correspondientes razones (X/R), según los tipos de cortocircuito.

Cortocircuito Trifásico:

$$I_{CC3F} = \frac{cV_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|} \quad (X/R)_{CC3F} = \frac{X_1}{R_1}$$

Cortocircuito Monofásico a tierra:

$$I_{CC1FT} = \frac{\sqrt{3}cV_n}{|(Z_1 + Z_2 + Z_0)|} \quad (X/R)_{CC1FT} = \frac{X_1 + X_2 + X_0}{R_1 + R_2 + R_0}$$

Cortocircuito Bifásico aislado de tierra:

$$I_{CC2F} = \frac{cV_n}{|(Z_1 + Z_2)|} \quad (X/R)_{CC2F} = \frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}$$

Cortocircuito Bifásico a tierra:

$$I_{CC2FT_B} = cV_n \left[-j \cdot \frac{(Z_0 - a \cdot Z_2)}{(Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0)} \right] \quad a = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad : \text{operador}$$

$$I_{CC2FT_C} = cV_n \left[j \cdot \frac{(Z_0 - a^2 \cdot Z_2)}{(Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0)} \right] \quad a^2 = -0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad : \text{operador}$$

$$I_{CC2FT} = I_{CC2FT_B} + I_{CC2FT_C} = -cV_n \left[\frac{\sqrt{3} \cdot Z_2}{(Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0)} \right]$$

$$Z_{CC2FT} = \frac{(Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0)}{\sqrt{3} \cdot Z_2} \quad (X/R)_{CC2FT} = \frac{\text{Imag}\{Z_{CC2FT}\}}{\text{Real}\{Z_{CC2FT}\}}$$

Donde:

V_n : Tensión nominal línea a línea del sistema en el punto de falla, en [kV].

c : Factor de tensión, según Norma IEC 60909, este factor es igual a 1,1.

$Z_1=R_1+jX_1$: Impedancia del circuito equivalente de Thevenin de la red de secuencia positiva en el punto de falla, en [Ω].

$Z_2=R_2+jX_2$: Impedancia del circuito equivalente de Thevenin de la red de secuencia negativa en el punto de falla, en [Ω].

$Z_0=R_0+jX_0$: Impedancia del circuito equivalente de Thevenin de la red de secuencia cero en el punto de falla, en [Ω].

I_{CC3F} : Corriente de cortocircuito simétrica RMS de fase, para cortocircuito trifásico, en [kA].

I_{CC1FT} : Corriente de cortocircuito simétrica RMS de fase, para cortocircuito monofásico a tierra, en [kA].

- I_{CC2F} : Corriente de cortocircuito simétrica RMS de fase, para cortocircuito bifásico aislado de tierra, en [kA].
- I_{CC2FT} : Corriente de cortocircuito simétrica RMS de fase, para cortocircuito bifásico a tierra, en [kA].
- $(X/R)_{CC3F}$: Razón X/R del cortocircuito trifásico.
- $(X/R)_{CC1FT}$: Razón X/R del cortocircuito monofásico a tierra.
- $(X/R)_{CC2F}$: Razón X/R del cortocircuito bifásico aislado de tierra.
- $(X/R)_{CC2FT}$: Razón X/R del cortocircuito bifásico a tierra.

DOCUMENTO TÉCNICO 2:

Expresiones matemáticas de las componentes de corriente de cortocircuito.

Corriente de cortocircuito máxima instantánea (i_p)

$$i_p = \sqrt{2}I_{CCMax} \left[1 + e^{-\left(\frac{\pi}{(X/R)_{CCMax}}\right)} \right]$$

Componente continua de la corriente de cortocircuito (i_{dc})

$$i_{dc} = \sqrt{2}I_{CCMax} e^{-\left(\frac{4\pi}{X/R}\right)}$$

Corriente de cortocircuito asimétrica de interrupción (I_{ASI})

$$I_{ASI} = I_{CCMax} \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\left(\frac{8\pi}{(X/R)_{CCMax}}\right)}}$$