

Análisis del corto circuito en instalaciones eléctricas industriales trifásicas mediante la Normativa IEC-NOM

MOSQUEDA-VALADEZ, Armando†, JURADO-PÉREZ, Fernando* y LOZANO-LUNA A.

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Recibido Marzo 25, 2016; Aceptado Junio 02, 2016

Resumen

En la presente investigación se desarrolla un sistema para el análisis de estudios de corto circuito en los interruptores de potencia de una subestación principal dentro de un complejo industrial a la par con todos sus tableros de distribución principales y derivaciones de alimentación secundarios. Por lo cual se hace indispensable el levantamiento en campo de los diversos dispositivos y equipos para poder precisar el análisis de los cálculos de las corrientes de corto circuito en sistemas de baja tensión, Los análisis de los estudios de fallas en la red eléctrica se precisan en diferentes puntos y para diferentes fallas ya sean estas monofásica, bifásica o bien trifásica como se establece en la Normativa IEC - NOM.

Corto circuito (CC), Normativa IEC – NOM

Citación: MOSQUEDA-VALADEZ, Armando, JURADO-PÉREZ, Fernando y LOZANO-LUNA A. Análisis del corto circuito en instalaciones eléctricas industriales trifásicas mediante la Normativa IEC-NOM. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-7: 1-8.

Abstract

In this research a system for analyzing short-circuit studies switches a main power substation in an industrial par with all its main distribution boards and shunts secondary power complex develops. Whereby the field survey of the various devices and equipment to precise analysis calculations of short circuit currents in low voltage systems, it is essential analyzes of studies of failures in the power grid are specified in different points for different faults and whether they are single-phase, two-phase or three-phase as stated in IEC - NOM.

Short circuit CC IEC Standards - NOM

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: fejurado@itesi.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El diseño del estudio de corto circuito considera como parte importante la instalación eléctrica, mediante la realización de éste, se determinan las corrientes que circulan por cada uno de los elementos que conforman el sistema eléctrico cuando se presenta un evento y/o falla. Las fallas en la red eléctrica se evalúan en diferentes puntos, para diferentes niveles de tensión y para diferentes tipos de falla: trifásica, monofásica, bifásica y bifásica a tierra.

Analizando todos los modelos de operación del sistema, para revisar las capacidades interruptivas de los equipos de desconexión y en caso necesario, especificar los equipos adecuados. De tal modo tomar en cuenta, algunos de los siguientes factores, corrientes nominales, sobrecorrientes provocadas por las descargas y los cortocircuitos.

Las corrientes de corto circuito están caracterizadas por un incremento instantáneo y muy por encima de la corriente nominal a diferencia con la corriente de sobrecarga la cual se caracteriza por un incremento sostenido de un intervalo de tiempo superior a la corriente nominal. En la Figura 1 se puede apreciar un sistema simple de una interrupción.

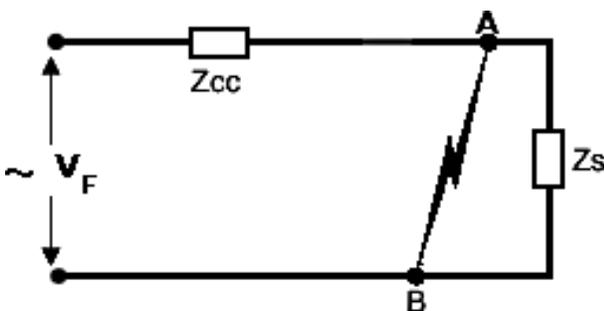


Figura 1 Esquema Simplificado de una Línea Eléctrica

En el presente trabajo se obtendrá el corto circuito por el método de punto a punto, en cada una de las entradas del tablero principal. Para tal efecto la corriente de corto circuito para el lado primario: E_{L-L}

$$\overline{I_{L-L}} = \frac{\overline{KVA} \times 1000}{\overline{E_{L-L}} \times 1.732} \quad (1)$$

$\overline{I_{L-L}}$, Corriente del transformador
 \overline{KVA} Poder del transformador de la fuente
 $\overline{E_{L-L}}$, Voltaje secundario del transformador

La impedancia de carga del sistema supera algunos de los componentes de una subestación por mencionar los transformadores cables etc. Como se describe a continuación:

$$\overline{Z_L} \gg \overline{Z_G} + \overline{Z_C} \quad (2)$$

$$\overline{I_L} \cong \frac{\overline{E}}{\overline{Z_L}}$$

La corriente de carga está limitada en esencia por la impedancia de carga. En un corto circuito franco se puede describir analíticamente (impedancia cero):

$$\overline{I_{CC}} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z_G} + \overline{Z_C}} \quad (3)$$

La corriente queda limitada por las impedancias del sistema.

$$\overline{I_{CC}} \gg \overline{I_L} \quad (4)$$

Las corrientes cortocircuito producen esfuerzos muy importantes sobre algunos de los componentes de un sistema en la instalación.

Generalidades de los cortocircuitos

La energía del sistema es un factor primordial durante la ocurrencia del cortocircuito.

El tiempo es la otra variable a considerar, al igual en una descarga atmosférica, los cortocircuitos introducen un aumento desproporcional de corriente al sistema, pero difiere en cuanto a la duración, ésta va a depender de muchos factores como: la magnitud de la corriente, acción de los elementos de protección, características de la fuente, o verse reflejado el efecto del cortocircuito. La Figura 2 muestra los impactos de un cortocircuito efectuado en un sistema digital y mostrando además los tipos de cortocircuitos.

- Cortocircuito trifásico equilibrado.
- Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).
- Cortocircuito entre dos fases a tierra
- Cortocircuito monofásico fase-tierra y fase-neutro.
-

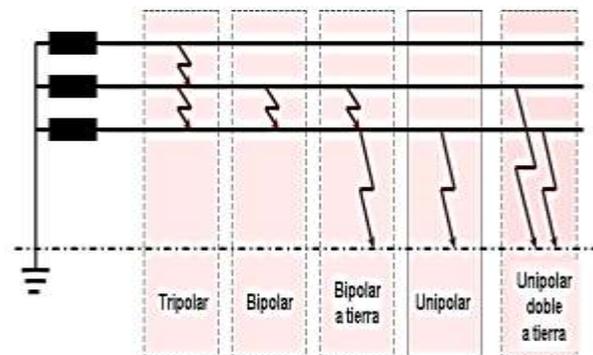


Figura 2 Tipos de cortocircuito

Consecuencias de los cortocircuitos

Puede existir un sin número de efectos ocasionados por cortocircuito, puede llegar a ser sumamente destructivo, una energía incontrolada provoca severo estrés tanto mecánico como térmico en el sistema, también se emiten pulsos electromagnéticos, radiación no ionizante, ruido, en fin una transformación tras otra de energía.

Dependiendo de la localización y severidad del corto, éste pudiera ocasionar:

- Baja tensión
- Sobre tensión (sobretudo en fallas asimétricas, (LT,LL,LLT))
- Inversiones del flujo de potencia (los motores aportar corriente en lugar de consumirla)
- Inestabilidad en generadores

En el sitio donde se produce el corto usualmente se concentra la mayor cantidad de daño, pero también pudiera afectar a los demás elementos de sistema eléctrico, En otras palabras sería una falla “pasante” pues no se ha producido en el equipo pero su magnitud si que pasa a través de este es por eso que los cortocircuitos presentan los siguientes efectos térmicos y estos son dependientes de la energía liberada por el efecto Joule, los cuales se determinan mediante la siguientes ecuaciones:

$$E_T = \int R \cdot i^2 dt \quad (5)$$

Así como el efecto termico tiene un punto de salida de tal modo el esfuerzo electrodinámico, entre conductores paralelos separados una d de distancia y recorridos por una corriente I , viene determinado por la Ley de Biot y Savart:

$$F = \mu\mu_0 \frac{I^2}{2\pi d} L \quad (6)$$

Si se presenta una corriente alterna, su fuerza máxima en conductores será proporcional al cuadrado del cortocircuito:

$$F_{MAX} \propto \frac{I_s^2}{d} L \quad (7)$$

- I_s , corriente de cresta máxima.
 L , longitud entre apoyos del conductor.
 d , distancia entre conductores.

Comportamiento de un circuito en Serie RL

En la siguiente Figura se puede apreciar un circuito en serie RL, y sus ecuaciones que lo describen.

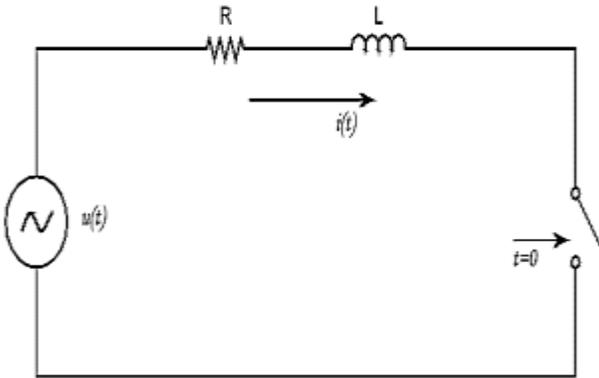


Figura 3 Circuito RL en serie

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \tag{8}$$

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \tag{9}$$

A continuación se desarrolla un caso del circuito previamente mencionado.

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) + K \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}}, \theta = \text{Arctg}\left(\frac{L\omega}{R}\right) \tag{10}$$

En el desarrollo de las ecuaciones obtenemos el valor de K mediante las condiciones iniciales. De la corriente.

$$i(0) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) + K = 0 \tag{11}$$

$$K = -\sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) \tag{12}$$

De tal modo se obtiene la expresión de la corriente versus tiempo resultando así:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \left[\text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) - \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right] \tag{13}$$

Y determinando la componente alterna es:

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta), \tag{14}$$

Y la componente de continua es:

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}, \tag{15}$$

La determinación del ángulo φ es para conocer el valor inicial de la tensión cuando se cierra el circuito.

$$u(0) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}\varphi \tag{16}$$

Y el ángulo θ estará determinado mediante la reactancia ($L\omega$) y su resistencia R , así como su desfase de la tensión y su componente de corriente alterna.

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) \tag{17}$$

En la siguiente Figura 4 se muestra la representación de un ciclo de la onda de corriente.

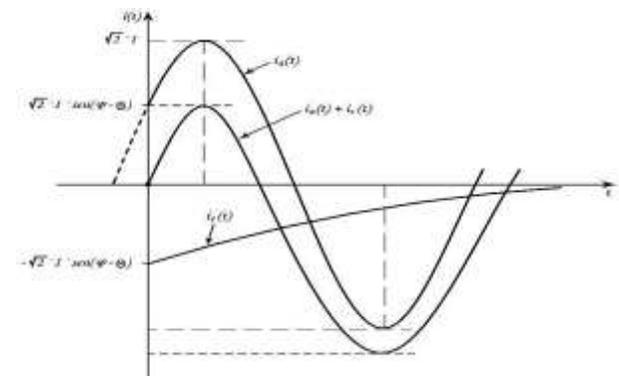


Figura 4 Corrientes i_a y i_c

Caso de estudio de una instalación eléctrica industrial.

A continuación se presenta el siguiente caso de estudio con componentes y valores prácticos de campo de una instalación eléctrica industrial, y que utiliza el método de punto a punto. Se realiza el desarrollo del estudio de cortocircuito, en cada una de las entradas de los tableros para lo cual se describen las siguientes características del sistema, este cuenta con una carga de 861 kw alimentada por varios transformadores los cuales dan un total de 2612.5 kva con voltajes de entrada y salida de 13.2 kv-440/254V y dicho estudio se realiza para un solo transformador de 500 kva.

Corriente de cortocircuito lado primario para un sistema trifásico:

Step I: Determinar la cantidad de corriente que puede circular a través del transformador en el lado primario.

$$\overline{I}_{f-1} = \frac{Kva * 1000}{E_{L-L} * 1.73}$$

$$\overline{I}_{FLA} = \frac{500 * 1000}{440 * 1.73} = 761.2 \text{ Amp.}$$

Se obtiene un valor de corriente de 761.2 A corriente a la cual estará sometido el interruptor térmico para la falla trifásica del transformador de 500 kva, y dicho valor se considera de utilidad en la selección del valor del interruptor principal del centro de carga.

De la siguiente forma se plantea el análisis para cortocircuito para el lado de baja del transformador de 500 kva.

Falla 1

Step II: Encontrar el multiplicador del transformador.

Este dato sirve para encontrar el Multiplicador, que es tomado de la impedancia del transformador.

$$M = \frac{100}{\%Z\text{-Transf.}}$$

$$M = \frac{100}{5.75} = 17.39 \text{ Amp.}$$

Step 3: Determinar la cantidad de corriente que soporta el transformador en el lado de alta tensión.

$$I_{sc} = I_{f,1} \times M$$

$$I_{sc} = 656 * 17.39 = 11.409 \text{ Amp.}$$

$$I_{cc} = 656 * 4 = 2.624 \text{ Amp.}$$

$$I_{3\phi} = 11.409 + 2.624 = 14.033 \text{ Amp.}$$

Step 4: Calculando el factor “f”

$$f = \frac{1.73 * L * I_{3\phi}}{C * E_{L-L}}$$

$$f = \frac{1.73 * 25 * 14.033}{3278 * 440 * 1.73} = 0.14$$

Step 5. Calculando el multiplicador

$$M = \frac{1}{1+f}$$

$$M = \frac{1}{1+0.14} = 0.87$$

Step 6. Calculando el valor de la corriente rms en el punto de la falla.

$$I_{s.c. \text{ RMS}} = 14.033 * 0.87 = 12.305 \text{ Amp.}$$

Así tomando en cuenta la contribución del motor con mayor demanda de corriente en el sistema.

$$I_{s.c. \text{ contrib. de motor}} = 4 * 0.7612 = 3.0448 \text{ Amp}$$

Por lo tanto la corriente para la falla No. 1 sería la siguiente:

$$I_{total \text{ s.c. RMS(Fault X1)}} = 12.305 + 3.0448 = 15.349 \text{ Amp}$$

Observe la falla trifásica del transformador de 500 kv en la Figura 5.

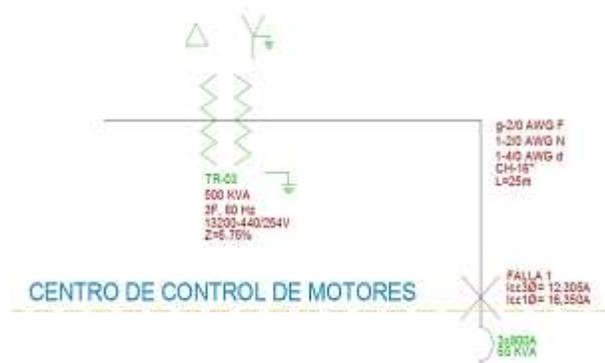


Figura 5 Esquema de falla trifásica del transformador

Falla No. 2

Partiendo en el mismo sentido base se realiza el cálculo de cortocircuito para las condiciones del sistema secundario en el transformador.

Step I: Calculando la corriente en el secundario para sistema trifásico.

$$f = \frac{I_{s.c. \text{ primario}} \cdot V_{\text{primario}} \cdot 1.732 (\%Z)}{100,000 \cdot kva_{\text{transf.}}}$$

$$f = \frac{1.732 \cdot 13200 \cdot 12.305}{100,000 \cdot 500} = 0.0056$$

Step II: encontrando el multiplicador

$$M = \frac{1}{1 + f}$$

$$M = \frac{1}{1 + 0.0056} = 0.9944 \text{ Amp.}$$

Step III: Realizando el cálculo del cortocircuito para el sistema secundario.

$$I_{s.c. \text{ secundario}} = I_{s.c. \text{ primario}} \cdot M$$

$$I_{s.c. \text{ RMS}} = 15.304 \cdot 0.9949 = 15.2259 \text{ Amp.}$$

Y considerando la contribucion del motor con mayor demanda de corriente en el sistema, en la Figura 6 se presenta un esquemático de la falla en el secundario.

$$I_{s.c. \text{ con. del motor}} = 4 \cdot 761.2 = 3.0448 \text{ Amp}$$

$$I_{total \text{ s.c. RMS(Fault X2)}} = 15.2259 + 3.0448 = 18.2707 \text{ Amp}$$

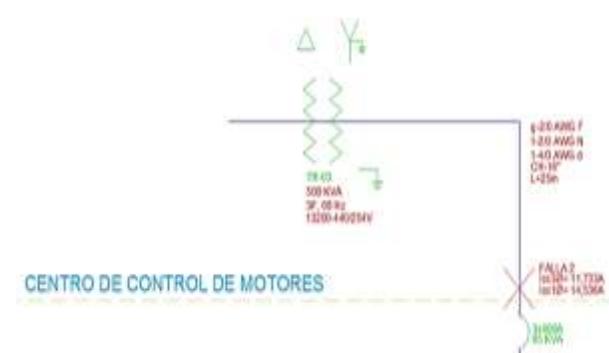


Figura 6 Falla en el secundario

El mismo proceso se realiza pero ahora para una sola fase del sistema secundario del transformador.

Falla Monofásica 1 ϕ Transformador de 500 kva

Falla 1

Step I

$$\overline{I}_{f-1} = \frac{Kva \cdot 1000}{E_{L-L}}$$

$$\overline{I}_{f-1} = \frac{500 \cdot 1000}{440} = 1,136 \text{ Amp.}$$

Step II

$$\text{Multiplicador} = \frac{100}{5.75} = 17.39 \text{ Amp.}$$

Step III

$$\text{Is. c.} = 1136 * 17.39 = 19.761 \text{ Amp.}$$

$$\text{Is. c. contrib. del motor} = 1,136 * 4 = 4,544 \text{ Amp.}$$

$$I = 19.761 + 4.544 = 24.305 \text{ Amp.}$$

$$f = \frac{2 * 25 * 24.305}{3278 * 254 * 3} = 0.48$$

$$M = \frac{1}{1 + 0.48} = 0.67$$

$$I_{\text{total s.c. RMS(Fault X1)}} = 24.305 * 0.67 = 16.305 \text{ Amp.}$$

Falla Monofasica 1 ϕ Transformador de 500 kva

Falla 2

$$\overline{I_{f-1}} = \frac{Kva * 1000}{E_{L-L}}$$

$$\overline{I_{FLA}} = \frac{500 * 1000}{440} = 1.136 \text{ Amp.}$$

$$M = \frac{100}{5.75} = 17.39 \text{ Amp.}$$

$$\text{Is. c.} = 1136 * 17.39 = 19.761 \text{ Amp.}$$

$$\text{Icc} = 1136 * 4 = 4.544 \text{ Amp.}$$

$$\text{Is. c. con. del motor} = 19.761 + 4.544 = 24.305 \text{ Amp.}$$

$$f = \frac{2 * 35 * 24.305}{3278 * 254 * 3} = 0.67$$

$$M = \frac{1}{1 + 0.67} = 0.59$$

$$I_{cc} \text{ 1}\phi \text{ Falla 2} = 24.305 * 0.59 = 14.536 \text{ Amp.}$$

Falla Monofasica 1 ϕ Transformador de 500 kva

$$I_{cc} \text{ 1}\phi \text{ Falla 2} = 24.305 * 0.59 = 14.536 \text{ Amp.}$$

$$\begin{aligned} \text{Falla 3} \\ f &= \frac{2 * 125 * 14.536}{1160 * 254 * 1} = 12.33 & M &= \\ \frac{1}{1 + 12.33} &= 0.07 \\ I_{cc} \text{ 1}\phi \text{ Falla 3} &= 14.536 * 0.07 = 1.090 \text{ Amp.} \end{aligned}$$

Conclusiones

El análisis del cortocircuito en específico en instalaciones industriales que impliquen subestaciones y por ende transformadores, involucra una gran cantidad de conceptos de diversos campos de la ciencia eléctrica, es por eso que para la investigación de este trabajo se debe comenzar con la parte básica.

Se deben de detallar las partes principales de estas ecuaciones enfocadas al cortocircuito, así como entender su funcionamiento abarcando por supuesto su principio de operación, de la misma manera se debe de conocer sus diversas clasificaciones y usos, y por último sus características eléctricas y de manufactura dentro una instalación eléctrica.

Al momento de realizar el cálculo de acuerdo al procedimiento de cada una de las normas (ANSI/IEEE) y con los datos proporcionados del transformador se llegó a la conclusión de que los criterios son muy similares en cuanto a la capacidad de soportar las corrientes de cortocircuito.

Es decir al llegar a obtener el resultado de la magnitud de la corriente de cortocircuito, los valores obtenidos por cada uno de los procedimientos de las normas no variaron en gran porcentaje una de la otra, por lo que se puede decir que son relativamente iguales.

Referencias

ANSI/IEEE, “Applications guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis”. October 16 1979.

NRF-022-CFE-2002 “Interruptores de potencia” March 11 2002

Wayne L. Carey, “Short Circuit Calculations” January 4 2016.