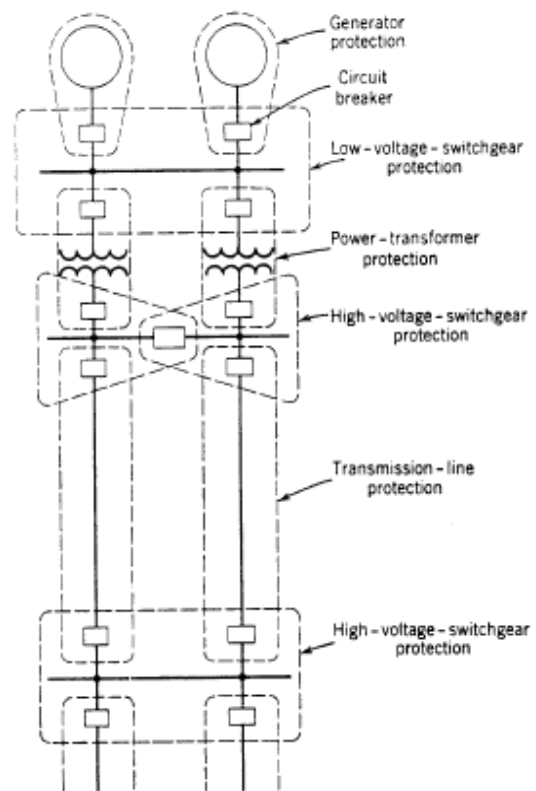


Procesos Transitorios

Material 1

Generalidades de los Procesos Transitorios. Cortocircuitos



Profesor: Dr. Orlys Ernesto Torres Breffe

CENACE

Ecuador

Material 1

Generalidades y conceptos sobre los Procesos Transitorios. Cortocircuitos.

Tema 1: Introducción a los procesos transitorios

Sumario:

- Introducción
- Fenómenos que provocan procesos transitorios (causas)
- Consecuencias (Procesos electromecánicos y Electromagnéticos)
- Diagrama de impedancias:
 - Modelos aproximados de los elementos
 - Identificación de los modelos
- Cortocircuitos
 - Fuentes de corrientes
 - Método de Thevenin para el estudio de los cortocircuitos

Objetivo:

Familiarizar a los cursantes con la metodología básica general utilizada para el análisis de los fenómenos transitorios.

Bibliografía:

1. Barreto García Rafael. Cálculo del Cortocircuito _ La Habana: Editorial Científico - Técnica, 1985_ 281p.
2. Beeman Donald, ...[et al]. Industrial Power Systems Handbook _La Habana: Instituto Del Libro, 1969_971p.
3. Boza Balerino J. Procesos Transitorios.
4. Guerra Castro Augusto M. Equipos Eléctricos de Plantas y Subestaciones _ La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1984 _192p.
5. IEEE Recommendation Practice. Brown Book .Power Systems Analyze, 1996.

6. Stevenson William. Análisis de los sistemas eléctricos de potencia_ La Habana: Edición Revolucionaria, 1986 _ 391p.
7. Venikov V. Procesos Transitorios Electromecánicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia_ Moscow: Mir, 1988 _ 502p.

1.1 Introducción:

Se conoce como Proceso Transitorio a toda variación que posean los parámetros eléctricos de un Sistema Eléctrico que los alejen de sus valores normales establecidos, aunque luego pueda o no regresar a este valor o a uno cercano al mismo.

Durante el funcionamiento normal de los sistemas eléctricos, los parámetros eléctricos; tales como: tensiones, corrientes, potencias, frecuencias, etc., varían constantemente, pero las desviaciones que estos presentan con respecto a un valor establecido son lo suficientemente pequeñas como para considerarlos como magnitudes constantes.

1.2 Fenómenos que provocan procesos transitorios (causas)

Los procesos transitorios pueden ocurrir durante la explotación normal de los sistemas eléctricos como en regímenes de averías y a continuación se expondrán los ejemplos más conocidos en ambas condiciones de operación.

Condiciones normales de explotación:

- Conexión o desconexión de cargas potentes
- Conexión o desconexión de unidades generadoras
- Variación de la excitación de las máquinas

Condiciones anormales o averías:

- Cortocircuitos
- Apertura de uno o más conductores
- Pérdida del sincronismo de algunas máquinas sincrónicas (problemas mecánicos)
- Descargas atmosféricas

Las condiciones de averías se clasifican en transversales y longitudinales. Entre las fallas transversales encontramos todas las variantes de cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, bifásicos a tierra y trifásicos). Como fallas longitudinales se pueden reconocer la apertura

de uno o más conductores, así como los cortocircuitos entre espiras de un mismo devanado que en ocasiones son imperceptibles.

En los sistemas eléctricos la probabilidad de que ocurra una falla u otra, varía en dependencia del tipo, como se muestra en la tabla 1.1 (*Guerra, 1988⁴*)

Tabla 1.1 Probabilidad de ocurrencia de los tipos de cortocircuitos.

Tipo de cortocircuito	1Φ	2Φ	2Φ (aterrada)	3Φ
Porcentaje de ocurrencia	65 – 70	20 - 25	20 - 25	3 - 5

1.3 Consecuencia de los procesos transitorios

Los efectos o consecuencias que los procesos transitorios pueden provocar en los elementos del sistema o en su funcionamiento de forma general pueden ser variadas y están relacionadas con la variación que experimentan los parámetros eléctricos durante la ocurrencia del fenómeno en sí.

Los cortocircuitos o fallas transversales (*Barreto, 1985¹*) son las más peligrosas porque durante su ocurrencia las corrientes en las fases pueden adquirir valores extremadamente superiores a las corrientes nominales y las tensiones disminuir a valores intolerables.

Las elevaciones en las corrientes de las fases pueden traer consigo graves consecuencias en dependencia de sus magnitudes. Comenzando por el excesivo calentamiento que originan en los conductores, lo cual puede deteriorar el aislamiento protector, como destruir el equipo completamente. Las grandes corrientes producen esfuerzos electrodinámicos considerables, en los cables, los aisladores, las barras; hasta llegar a destruirlos en caso de excederse sus límites admisibles.

La recuperación de la tensión luego de eliminado el cortocircuito puede producir el re-arranque de algunos consumidores (motores eléctricos) y por consiguiente, la generación de otros fenómenos transitorios en caso de que el número de estos motores arrancando sea elevado.

Las descargas atmosféricas por lo general ocasionan sobretensiones en los sistemas que pueden ser superiores a los límites permisibles del aislamiento de los elementos del sistema y por tanto provocar perforaciones en los mismos. Luego de una descarga

atmosférica, por lo general, aparece un cortocircuito provocado por las propias protecciones (descargadores) o por la perforación de los aisladores.

Durante la ocurrencia de cortocircuito muy severos, así como cambios bruscos del régimen de carga, puede perderse el equilibrio entre el momento mecánico producido en el eje de la máquina por la turbina o el motor primario y el momento electromagnético originado por la carga; trayendo consigo la pérdida del sincronismo de los generadores. Muchos generadores pueden acelerarse mientras que otros comienzan a detenerse, pudiendo provocar esto la desconexión total del sistema o parte de él.

Muchas veces los estudios de los fenómenos transitorios incluyen las partes mecánicas de los elementos del sistema (rotores de las máquinas) y a estos procesos se les denominan Procesos Transitorios Electromecánicos (*Venikov, 1986⁷*). En ocasiones cuando las fallas no son muy severas y las variaciones en los parámetros mecánicos son despreciables, los análisis solo incluyen componentes eléctricos y magnéticos por lo que a estos fenómenos se les conoce como Procesos Transitorios Electromagnéticos (*Boza³*).

Para el análisis de los procesos transitorios electromecánicos además de incluir las expresiones generales que rigen los fenómenos eléctricos también incluyen expresiones que permiten modelar las variaciones dinámicas de los componentes mecánicos de las máquinas rotatorias que se encuentran funcionando en ese instante.

1.4 Diagrama de impedancias

El método general que se utiliza para el análisis de los fenómenos o procesos transitorios es la conversión o transformación del sistema eléctrico en un circuito eléctrico basado en modelos aproximados de cada elemento. El circuito eléctrico formado por el enlace de todos los modelos de cada uno de los elementos se le denomina Diagrama de Impedancia.

a) Modelos aproximados de los elementos

Todos los elementos del sistema: Generadores, Transformadores, Motores, Líneas, etc, poseen diferentes modelos que aproximadamente el comportamiento real del elemento. La selección de uno u otro, por lo general, depende de la exactitud o el grado de error que se desea introducir (*Guerra, 1988⁴*).

Para el caso de los fenómenos transitorios electromagnéticos se utilizan los modelos siguientes:

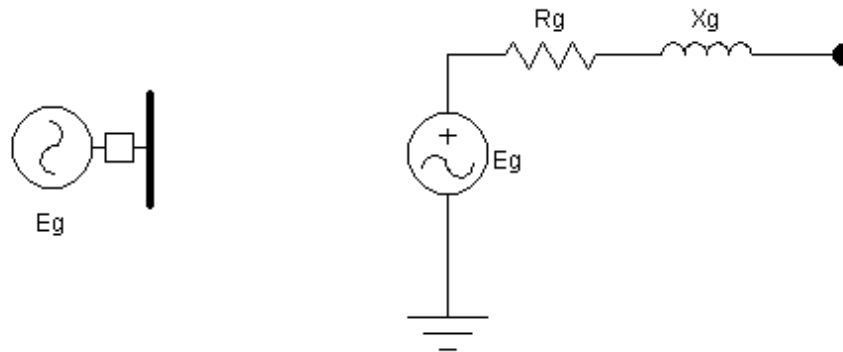


Figura 1.1. Modelo simplificado de una máquina rotatoria

Por lo general en los modelos de las máquinas rotatorias (figura 1.1) se desprecian las resistencias, dado que su valor con respecto a la reactancia que las caracterizan es muy pequeño y no introduce mucho error en los cálculos, principalmente en los niveles de alta tensión.

Es importante destacar que en caso de los generadores sincrónicos principalmente, la fem no es un valor constante, es decir, durante el régimen transitorio puede variar apreciablemente; en el caso de cortocircuitos puede disminuir a valores muy pequeños. Para facilitar los cálculos de estos fenómenos se considera que esta variación ocurre en la reactancia y hasta se llegan a considerar tres valores diferentes: reactancia subtransiente (X''_g), transiente (X'_g), sincrónica (X_g). Lo mismo ocurre en las restantes máquinas rotatorias pero el fenómeno es mucho más rápido.

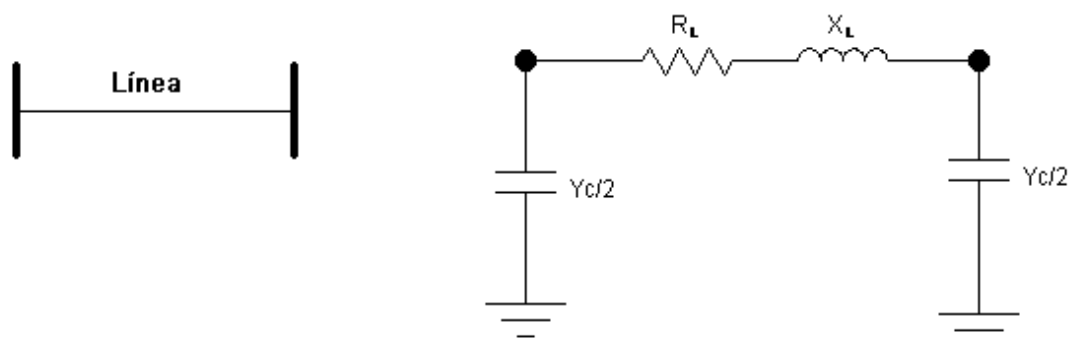


Figura 1.2. Modelo simplificado de una línea aérea.

El modelo de las líneas (figura 1.2) es muy similar al utilizado para representar a cualquier conductor, lo que en las líneas aéreas de alta tensión el efecto capacitivo a tierra y entre fases se presenta con mayor fuerza que en los restantes casos y no puede ser despreciado. Para el caso de las líneas de alta tensión, al igual que en las máquinas, las resistencias suelen despreciarse, pero solo en las referentes a alta tensión porque de hacerlo para media y baja tensión suelen introducirse errores apreciables en los resultados finales del cálculo.

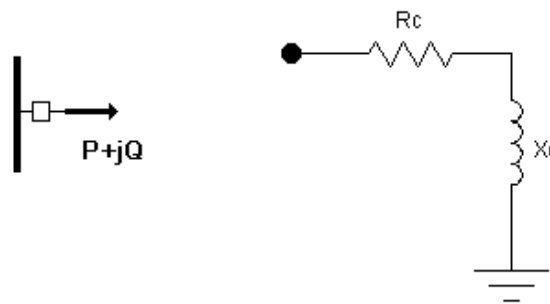


Figura 1.3. Modelo simplificado de un punto de carga constante.

El modelo de una carga constante puede realizarse por una conexión en serie, como se muestra en la figura 3, o con una conexión en paralelo de un resistor y una bobina. La componente activa de la carga la representa la resistencia y la componente reactiva si es inductiva, la bobina. Ahora si la componente reactiva es capacitiva, queda representado por un capacitor.

En la actualidad se consideran varios modelos de cargas en dependencia de su comportamiento en dependencia del valor de tensión (*IEEE Recommendation Practice, 1996⁵*): cargas de potencia constante, impedancia constante (figura 1.3) y corriente constante. Por lo general en este material utilizaremos el modelo de carga a impedancia constante.

Una especial atención se le debe dedicar al transformador, no por la complejidad de su modelo sino por lo que significa su presencia en los parámetros del sistema. De los cursos de máquinas eléctricas se conoce que el modelo general de un transformador cargado con una impedancia Z_c cualquiera, es el que se muestra en la figura 1.4.

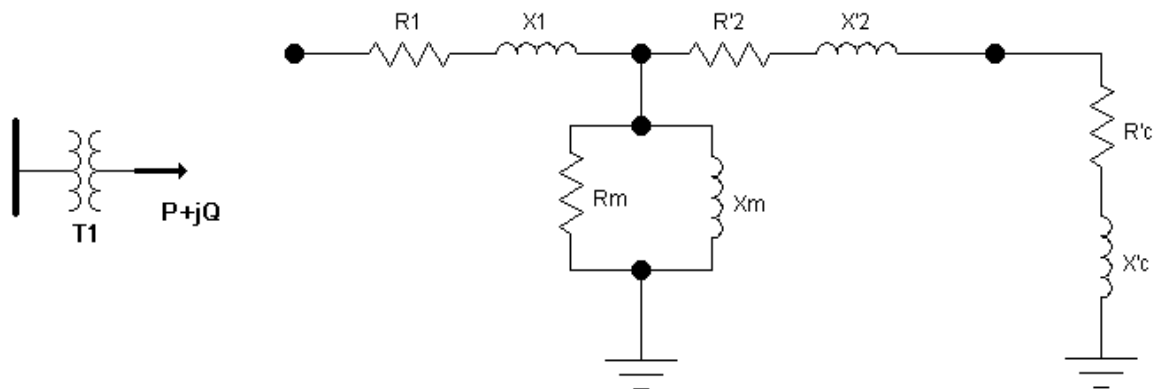


Figura 1.4. Modelo de un transformador que alimenta una carga que se supone constante

Para el análisis de los fenómenos transitorios se puede eliminar la rama magnetizante debido a que la corriente que circula por ella posee valores despreciables en correspondencia con las corrientes de fases cuando ocurren cortocircuitos o fenómenos graves (figura 1.5).

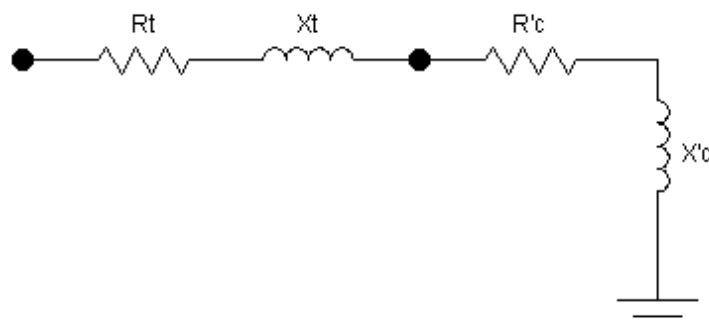


Figura 1.5. Modelo simplificado de un transformador que alimenta una carga constante

Como se observa en el modelo del transformador, los valores de la carga R_c y X_c tuvieron que ser referido ($R'c$, $X'c$) para poder convertir el modelo en un circuito eléctrico razonable. Es decir, que la presencia de un transformador en un circuito eléctrico (diagrama de impedancia) impone referir hacia un determinado devanado (nivel de tensión) los componentes de los restantes modelos conectado al devanado contrario.

A continuación se mostrará un ejemplo mediante el cual se podrán aplicar los conocimientos que hasta el momento se han explicados.

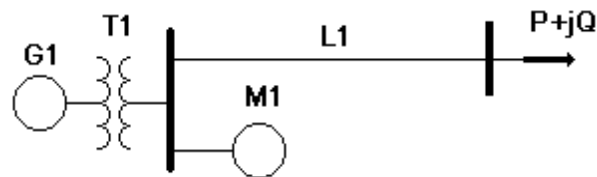
Ejemplo 1:

Figura 1.6. Circuito monolineal que representa un sistema radial sencillo.

En la figura 1.6 se muestra un Sistema Eléctrico de Potencia formado por un generador síncrono que alimenta, a través de un transformador, una carga formada por un motor y un conjunto de otras cargas que se consideran como una carga equivalente constante. Desde la barra principal secundaria del transformador hasta la carga puntual, existe una línea o un conductor alimentador.

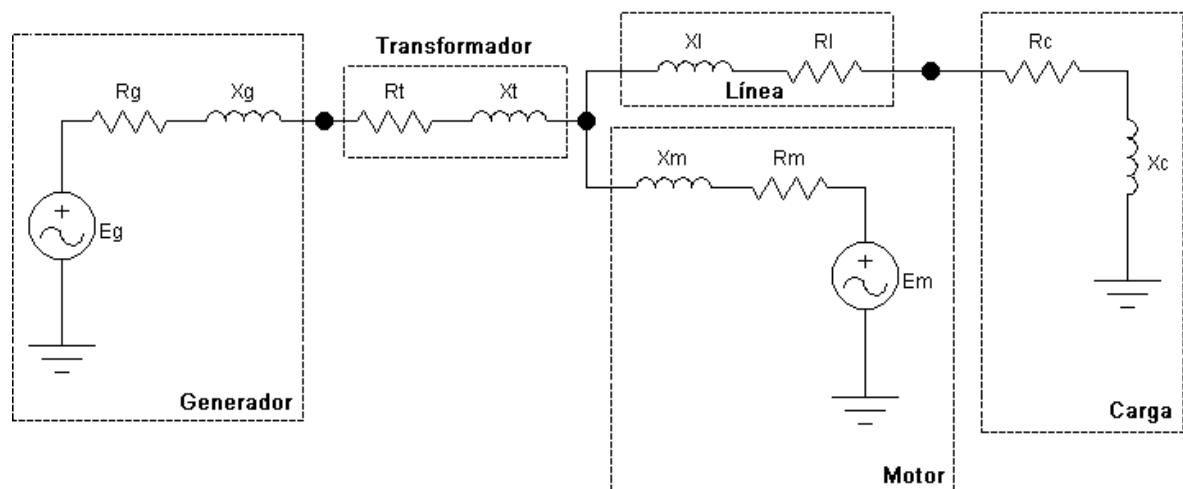


Figura 1.7. Diagrama impedancia que modela el sistema de la figura 1.6.

En la figura 1.7 se muestra el conjunto de modelos que se describieron anteriormente formando un diagrama de impedancia que permitirá el análisis de los fenómenos transitorios en ese sistema eléctrico real. Cada uno de los modelos particulares está encerrado en un rectángulo de líneas discontinuas.

También se puede observar como en el caso de la línea alimentadora fue despreciado el efecto capacitivo a tierra y en el caso del transformador, también fue despreciado el efecto

de la rama magnetizante. Se conoce que el efecto capacitivo no es apreciable en el caso de líneas de baja y media tensión. La rama magnetizante en los transformadores es siempre despreciada en el estudio de los cortocircuitos, no siendo así en el estudio de los flujos de potencia porque se dejarían de tomar en cuenta grandes pérdidas reactivas, entre otros aspectos.

El diagrama de impedancia es la representación de una de las fases del sistema y que por tanto el resultado de su estudio habrá que extrapolarlo al resto de las fases suponiendo que se está en presencia de un sistema balanceado lineal.

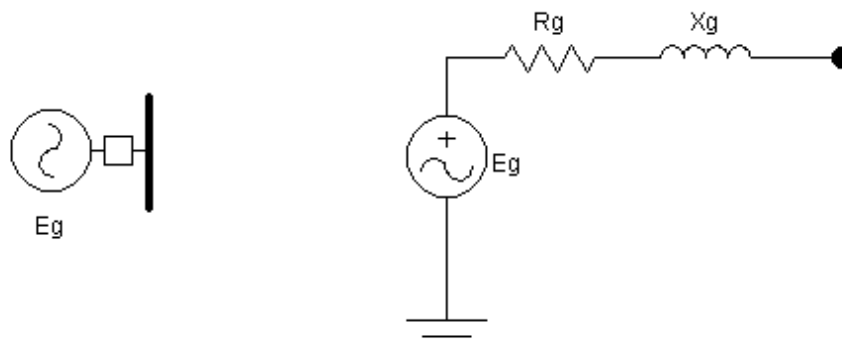
Para representar un sistema eléctrico completo solo basta conformar un circuito eléctrico o diagrama de impedancia con la unión de todos los modelos explicados anteriormente y luego *calcular los valores de los parámetros de cada modelo a lo cual se le denominará como Identificación de los Modelos.*

b) Identificación de los modelos

En las chapas de muchos elementos; generadores, motores, transformadores se encuentran los datos de las reactancias referidas en un % a los parámetros nominales del elemento. En mucho de estos elementos la resistencia (R) es mucho menor que la reactancia (X) y por tanto se desprecia ($R = 0$).

En estos casos es importante entonces conocer la reactancia nominal del elemento para así calcular la que realmente se especifica en chapa. Este se explicará mediante un ejemplo:

Generador o máquinas rotatorias:



Datos de chapa del generador**Expresiones para el cálculo de los parámetros**

$$X = 10\%$$

$$X_{ng} = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{18.8^2}{7.5} = 25.392 \, \Omega$$

$$U_n = 13.8 \, \text{kV}$$

$$X_g = 10 \% X_{ng} = 0.1 \cdot 25.392 = 2.54 \, \Omega$$

$$S_n = 7.5 \, \text{MVA}$$

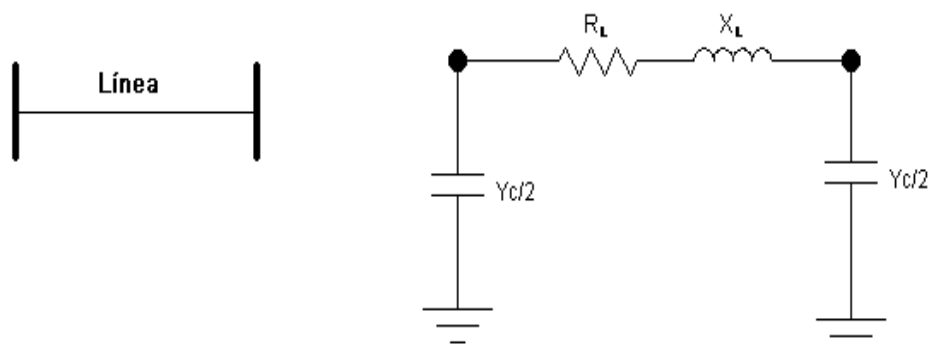
$$E_g = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 7.97 \, \text{kV}$$

La fem de los generadores sincrónicos es siempre mayor que la tensión nominal que existe en barra, pero para reducir los cálculos suelen igualarse y con estos los resultados de los cálculos incorporarán un error. En el caso de los motores asincrónicos resulta exactamente diferente, la fem interna que se utiliza para modelar estas máquinas siempre es menor que la tensión que lo alimenta.

En caso de que se quiera obtener el valor exacto de la fem interna de la máquina será necesario conocer el valor de la potencia activa y reactiva que está circulando por ella y el valor de la impedancia que caracteriza su estator (Venikov, 1988⁷).

Líneas o conductores

Las líneas no poseen chapas y los valores por lo general dependen del tipo de línea, si es soterrada, aérea, por bandejas, el material por el que está compuesta, si es simple o doble circuito, etc. Muchas veces esos datos se encuentran tabulados y se expresan en Ω/Km . El cálculo se expresará en un ejemplo:



Datos de la línea

$$X = 0.4 \, \Omega/\text{km}$$

$$L = 10 \, \text{km}$$

Expresiones para el cálculo de los parámetros

$$R_L = 0$$

$$X_L = X \, \Omega/\text{km} * L \, \text{km}$$

$$X_L = 0.4 \, \Omega/\text{km} * 10 \, \text{km} = 4 \, \Omega$$

Cargas puntuales:

De un nodo del sistema se suelen conocer los datos promedio de las potencias activas y reactivas en un determinado horario o régimen de trabajo, de ahí que para el cálculo de los parámetros se utilicen éstas considerando que la tensión es constante; es decir, el modelo de impedancia constante.

La potencia activa, reactiva y aparente de un de un circuito R-L serie (modelo de carga) se calcula mediante las expresiones:

$$P_f = I_f^2 R$$

$$Q_f = I_f^2 X$$

$$S_f = U_f I_f$$

$$R = \frac{P_f}{I_f^2}$$

$$X = \frac{Q_f}{I_f^2}$$

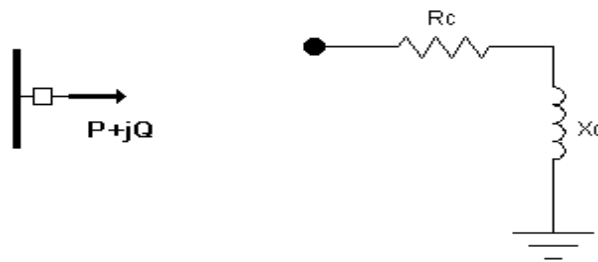
$$I_f^2 = \frac{S_f^2}{U_f^2}$$

Sustituyendo I_f^2 en las ecuaciones de R y X y utilizando valores trifásicos de potencia y las tensiones de línea, se obtiene:

$$R = \frac{P_f}{I_f^2} = \frac{\frac{P/3}{\left(\frac{S/3}{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2}}{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{PU^2}{S^2}$$

$$X = \frac{Q_f}{I_f^2} = \frac{\frac{Q/3}{\left(\frac{S/3}{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}\right)^2}}{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{QU^2}{S^2}$$

Las unidades de medida de la resistencia y la reactancia en estas expresiones, estarán en correspondencia con las unidades utilizadas en las potencias y las tensiones respectivamente. Pueden hasta ser utilizadas en el cálculo de los parámetros en valores referidos (pu). El siguiente ejemplo permitirá comprender mejor la forma de utilización.

**Datos de la carga puntual**

$$P = 10 \text{ MVA}$$

$$Q = 5 \text{ MVA}$$

$$U = 13.8 \text{ kV}$$

Expresiones para el cálculo de los parámetros

$$R = \frac{P U^2}{S^2} = \frac{10 * (13.8)^2}{11.18} = 15.23 \Omega$$

$$X = \frac{Q U^2}{S^2} = \frac{5 * (13.8)^2}{11.18} = 7.6176 \Omega$$

Para finalizar la identificación de los modelos, solo se hace necesario analizar que cuando hay incluido en el circuito o diagrama un transformador, es necesario referir todos los valores de R y X de los restantes elementos al mismo nivel de tensión a que fue referido el transformador.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$(U_1)^2 / Z_1 = (U_2)^2 / Z_2$$

$$Z_1 = (U_1 / U_2)^2 Z_2$$

$$Z_2 = (U_2 / U_1)^2 Z_1$$

Las expresiones de la izquierda permiten obtener los parámetros referidos de un devanado a otro del transformador y la siguiente expresión funge como expresión general, solo es necesario conocer a que devanado se desean referir las impedancias:

$$Z_2 (U_1)^2 = Z_1 (U_2)^2$$

El ejemplo 2 muestra detalladamente la forma de utilización de las expresiones anteriores en un ejemplo hipotético, pero que servirá de base para los cálculos posteriores que se llevarán a cabo en ejercicios prácticos.

Ejemplo 2:

Determinar el diagrama de reactancia del ejemplo 1 para los siguientes datos, si se refieren todos los datos al devanado de baja tensión del transformador:

<u>Generador</u>	<u>Transformador</u>	<u>Motor</u>	<u>Línea</u>	<u>Carga</u>
$S_n = 7.5 \text{ MVA}$	$S_n = 10 \text{ MVA}$	$P_n = 100 \text{ kW}$	$X_L = 0,3 \Omega/\text{Km}$	$P = 1 \text{ MW}$
$U_n = 13.8 \text{ kV}$	$13.8/0.48 \text{ kV}$	$\cos\varphi = 0.8$	$L = 1 \text{ Km}$	$Q = 0,5 \text{ MVAR}$
$X''_d = 10 \%$	$U_{cc} = 5\%$	$U_n = 480 \text{ V}$		$U_n = 480 \text{ V}$
		$X = 20 \%$		
		$\eta = 90 \%$		

Generador

$$X''_g = \frac{X''_d\%}{100} * \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$X''_g = 0.1 \frac{(13.8^2)}{7.5 \text{ MVA}} = 2.54 \Omega$$

$$E_g = \frac{U_g}{\sqrt{3}} = \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 7.97 \text{ kV}$$

Transformador

$$X_T = \frac{U_{cc}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = 0.05 * \frac{(0.48)^2}{10 \text{ MVA}} = 1.15 * 10^{-3} = 0.00115$$

Línea

$$X_L = 0.3 \Omega / \text{km} * 1 \text{ km} = 0.3 \Omega$$

Motor

$$S_n = \frac{P_n}{\eta * \cos\varphi} = \frac{100 \text{ kW}}{0.9 * 0.8} = 0.1389 \text{ MVA}$$

$$X_m = \frac{X_m\%}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = 0.2 * \frac{(0.48 \text{ kV})^2}{0.1389 \text{ MVA}} = 0.33 \Omega$$

$$E_g = \frac{U_g}{\sqrt{3}} = \frac{0.48}{\sqrt{3}} = 0.277 \text{ kV}$$

Carga (modeladas en serie)

$$S_c = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1^2 + (0.5)^2} = 1.12 \text{ MVA}$$

$$R_c = \frac{P \cdot (U)^2}{S^2} = \frac{1 \text{ MW} (0.48 \text{ kV})^2}{(1.12 \text{ MVA})^2} = 0.1837 \Omega$$

$$X_c = \frac{Q \cdot (U)^2}{S^2} = \frac{0.5 \text{ MVar} (0.48 \text{ kV})^2}{(1.12 \text{ MVA})^2} = 0.0918 \Omega$$

Existe un solo elemento referido a una tensión diferente de la que fue referido el transformador y es el generador. Si denominamos como 1 al devanado de alta tensión y 2 al de baja, entonces la tarea consiste en referir la X''_G a la tensión de 480 voltios es decir, al devanado de baja tensión.

$$Z_2 = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 Z_1$$

$$X'_G = X_G \left(\frac{0.48}{13.8} \right)^2 = 2.54 \cdot 1.2 \times 10^{-3} = 3.01 \times 10^{-3} \Omega$$

$$E'_G = E_G \left(\frac{0.48}{13.8} \right) = 0.277 \text{ kV}$$

El diagrama de reactancia que se muestra en la figura 1.8 se puede utilizar para el cálculo de los fenómenos transitorios por ejemplo para el cálculo de los cortocircuitos trifásicos.

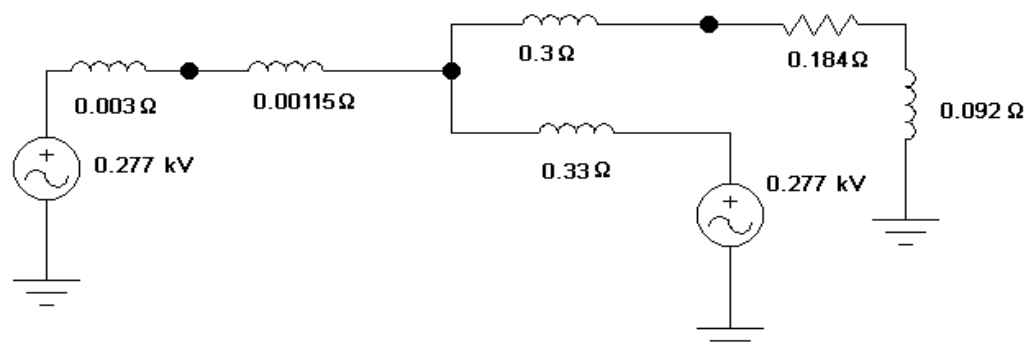


Figura 1.8. Diagrama de reactancia del ejemplo número 2

Otros métodos de identificación del modelo suelen utilizar valores referidos a unos valores bases y a este se le conoce como el *Método de Por Unidad (pu)*, pero finalmente los conceptos que hasta aquí se han referidos son válidos para todos los métodos. Este método de pu es muy empleado para facilitar los cálculos teniendo en cuenta que muchos de los valores ya vienen expresados en por unidad y si se toma como base los mismos valores nominales de estos elementos, los cálculos suelen disminuir considerablemente. En el análisis de procesos transitorios electromecánicos resulta imprescindible.

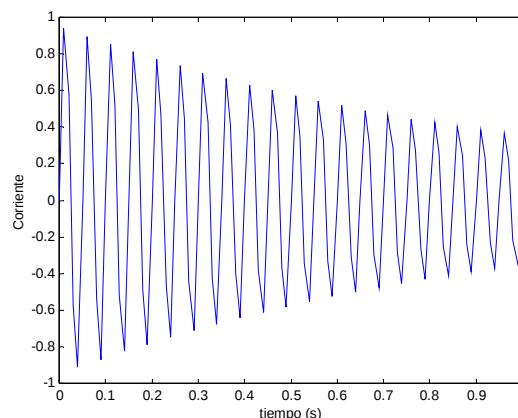
1.5 Cortocircuitos

Este es el fenómeno que provoca los procesos transitorios más severos y por tanto es muy importante conocer las magnitudes que pueden alcanzar. Los efectos que estos fenómenos pueden provocar están en dependencia del punto de ocurrencia o su localización. Evidentemente mientras más alejado esté de las fuentes, menor serán sus efectos.

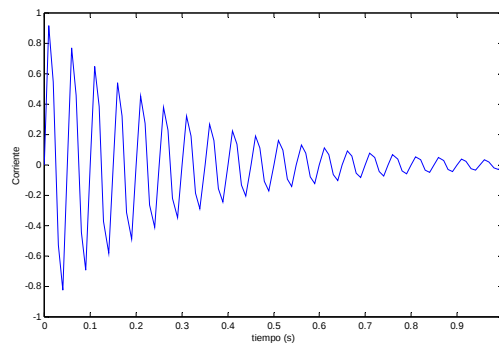
a) Fuentes de corrientes

Se entenderá como fuente de corriente a todo aquel elemento que pueda aportar corriente hacia el punto donde ocurran los cortocircuitos. Entre estos están:

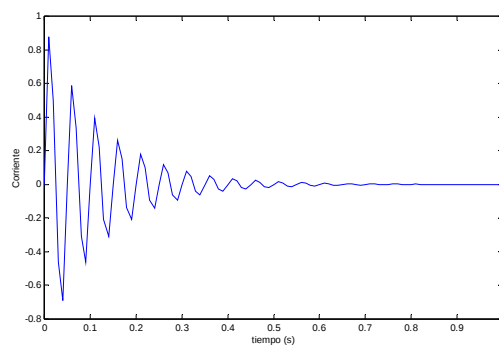
- Generadores



- Motores sincrónicos



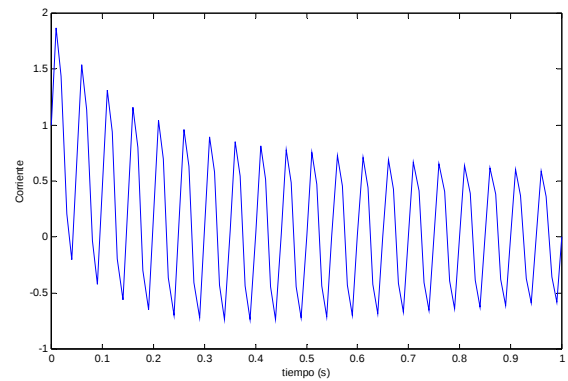
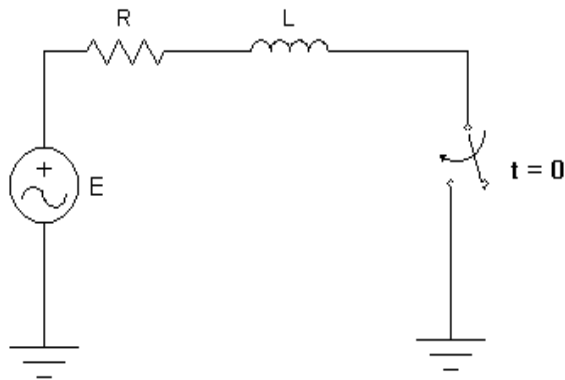
- Motores asincrónicos



- Capacitores. "Su característica es muy similar a las anteriores pero suelen contener elementos de alta frecuencia en los primeros ciclos"

Como se observa, las fuentes que mayor aportan a los cortocircuitos son los generadores y su acción estará influyendo en él, hasta que las protecciones actúen. No siendo así en el caso de los motores dado que su acción cesará cuando se detenga el fenómeno de la inercia mecánica.

De la teoría de circuitos eléctricos se conoce que cuando se realiza la energización de un circuito R - L, provoca el siguiente fenómeno (figura 1.9):



a)

b)

Figura 1.9. Representación del fenómeno transitorio en un circuito R-L serie.

a) Circuito Eléctrico R-L

b) Forma de onda de la corriente

$$i = i_1 + i_2$$

$$i_1 = \frac{E}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

$$i_2 = -\frac{E}{Z} e^{(-R/L)t} \sin(\alpha - \varphi)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene que en dependencia de la relación X/R del diagrama de impedancia, aparecen asimetrías en las corrientes que pueden permanecer más tiempo en caso de que la resistencia del circuito disminuya. Esta asimetría es debido al solapamiento de componentes de corriente de directa con la señal de corriente alterna sinusoidal.

Otro fenómeno que provoca asimetría tiene que ver con el ángulo α en que se encontraba la tensión en el momento de ocurrir el cortocircuito. Para $\alpha = 90^\circ + \varphi$ entonces la simetría alcanza valores máximos y para $\alpha = \varphi$ será mínima. Donde φ es el ángulo de la impedancia del circuito en cuestión.

Método Thevenin

Este método es muy utilizado para el análisis de circuitos sencillos y se basa en el diagrama de impedancia del sistema en cuestión. Si se calculan los parámetros del diagrama referido al punto de cortocircuito, solo quedaría aplicar por ejemplo el Método de Thevenin u otro método cualquiera y determinar los parámetros I , U , P del circuito.

En el caso del Método de Thevenin su aplicación es factible por ejemplo si se desprecia la corriente que existe antes de la aparición del fallo (máquinas generadoras trabajando en vacío) y se demostrará con el ejemplo 3.

Ejemplo 3:

Para un cortocircuito trifásico en la barra alimentada por el devanado de baja del transformador (figura 6), calcular la corriente total que habría en el punto de cortocircuito. El diagrama de impedancia se representa en la figura 1.10.

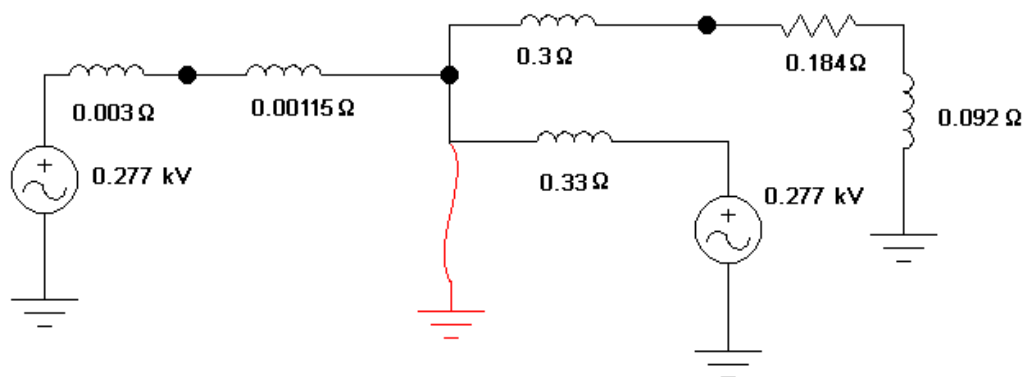


Figura 1.10. Diagrama de impedancia durante el cortocircuito.

El método de Thevenin plantea que se puede convertir la red que queda, si se elimina el elemento donde se desean conocer los parámetros eléctricos, en un dipolo pasivo lineal (figura 1.11) compuesto por una U_{TH} y Z_{TH} . La Tensión de Thevenin U_{TH} es la tensión que existe en el circuito con la rama o el elemento ya eliminado (estado normal del sistema) y la Impedancia de Thevenin (Z_{TH}) constituye el equivalente en el punto donde está la rama o elemento a calcular, si se sustituyen las fuentes ideales de tensiones por cortocircuitos y las de corrientes por circuitos abiertos.

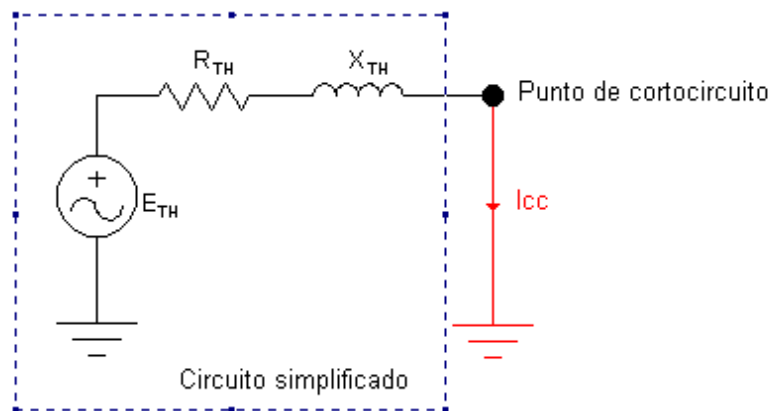


Figura 1.11. Simplificación del circuito de la figura 1.10 según el Método de Thevenin.

La tensión de Thevenin U_{TH} es igual a la que existía sin aparecer el cortocircuito y a menos que se conozca con anterioridad, no constituye un error apreciable suponer que es igual a la tensión nominal de fase en ese punto.

$$U_{TH} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{0.480}{\sqrt{3}} \approx 0.277 \text{ kV}$$

Para obtención de la Impedancia de Thevenin Z_{TH} es necesario calcular el equivalente según la conexión que tengan las impedancias del circuito, para el ejemplo se realiza de la siguiente forma:

$$Z_{TH} = (jX_g + jX_t) // (jX_m)$$

donde

(//) significa que están en paralelo

(+) significa que están en serie,

La impedancia del generador está en serie con la del transformador y en paralelo con la impedancia del motor. Las impedancias de la línea y de la carga quedan cortocircuitadas por la avería y como ésta rama no posee fuente de tensión, entonces se eliminan del cálculo.

$$Z_{TH} = (j0.003 + j0.00115) // (j0.33)$$

$$Z_{TH} = (j0.0045) // (j0.33)$$

$$Z_{TH}=j0.0044^{90^\circ} \Omega$$

De ahí que la corriente de cortocircuito trifásica se pueda calcular de la forma siguiente:

$$I_{CC_{3\phi}} = \frac{U_{TH}}{Z_{TH}} = \frac{0.277.1 \text{ kV}}{0.0040 \Omega} \approx 63^{-90^\circ} \text{ kA}$$

Las corrientes de las restantes fases se supondrán en con el mismo módulo y ángulos desplazados a 120° respectivamente. De tal forma que si 63^{-90° kA es la corriente de la fase A, en la fase B existirá 63^{150° kA y en la fase C habrá 63^{30° kA. En el siguiente diagrama vectorial (figura 1.12) se puede mostrar mejor el comportamiento:

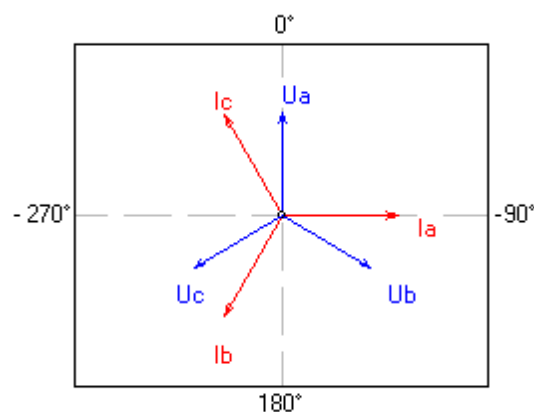


Figura 1.12. Diagrama vectorial del cortocircuito trifásico para el ejemplo 3

Las corrientes se atrasan de las tensiones de sus fases correspondientes casi a 90° , esto es debido al carácter inductivo del circuito en estudio. En este sentido se puede concluir que el carácter resistivo del circuito es despreciable con respecto al inductivo.

Los diagramas vectoriales de los fenómenos transitorios son muy útiles para el análisis de las Protecciones Direccionales de Potencia que se impartirán en momentos posteriores, a la vez que muestran con claridad las características estáticas del fenómeno. Muchos dispositivos de protección actuales incorporan diagramas vectoriales de los fenómenos y en muchos casos hasta giran durante todo el tiempo del fenómeno; es decir, son diagramas vectoriales dinámicos.

1.6 Conclusiones

Se considera un proceso transitorio como cualquier cambio permanente o temporal que experimenten las variables eléctricas. Estos pueden ser provocados por numerosos fenómenos normales y otros anormales que se originan dentro o fuera del sistema. Los cortocircuitos son fenómenos normales internos de un sistema de potencia, que puede provocar fenómenos transitorios. Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos que no se originan en el sistema y que igualmente puede producir fenómenos transitorios.

Existen diferentes fallas, las transversales y las longitudinales. Las fallas transversales se denominan cortocircuitos y ocurren entre fases o entre fases y tierra, mientras que las longitudinales ocurren en una misma fase como la apertura de un conductor. Existen diferentes tipos de cortocircuitos y estos se relacionan según las cantidades de fases involucradas en el fenómeno: cortocircuitos trifásicos, bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos. El monofásico es el más probable y el trifásico es el más grave y menos probable.

Cuando ocurre un cortocircuito la corriente no permanece constante, sino que en los primeros instantes es mayor y luego disminuye a valores estacionarios o constantes en magnitud. Esto es debido por muchos factores entre los que se destacan el ángulo de la tensión en el momento de la avería y la relación resistencia – impedancia de la red en ese momento.

El método de Thevenin se emplea para el cálculo de la componente estable de la corriente de cortocircuito trifásico a partir del conocimiento de los datos del circuito equivalente o diagrama de impedancia del sistema eléctrico.

Las corrientes de cortocircuitos son mayormente inductivas y por tanto se retrasan a la tensión de las fases en un ángulo cercano que está dado por el ángulo de la impedancia equivalente que existe entre la fuente y el punto de cortocircuito.

Estudio independiente:

1. Determinar los aportes del generador al cortocircuito (ejemplo 3) visto en el devanado de alta tensión y la corriente que aporta el motor en el circuito de la figura 10 utilizando los conocimientos de la teoría de circuitos eléctricos.
2. Simular, utilizando MATLAB, las ecuaciones del circuito R-L y demostrar las dependencias de la asimetría con respecto a R y con respecto al ángulo de inicio del cortocircuito.