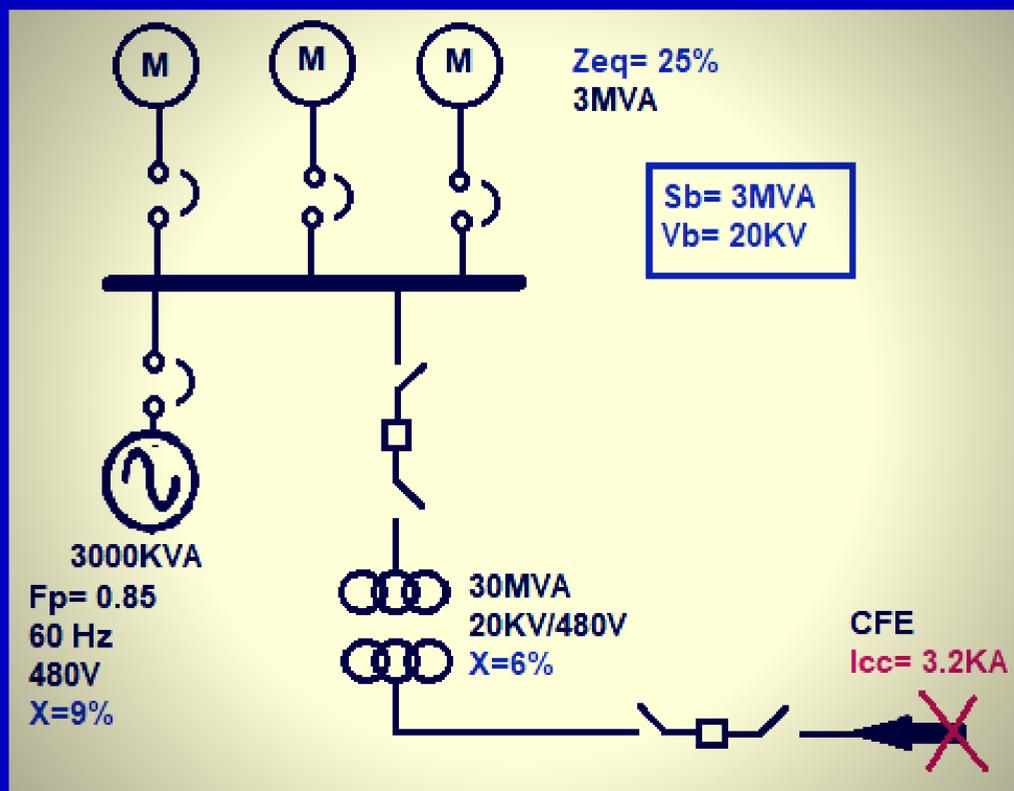


**Cursos Tesla**



# ***ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO (FALLAS TRIFÁSICAS) EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.***



---

# ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO (FALLAS TRIFÁSICAS) EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

---

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>2</b>
1.0.1. HISTORIA DEL ORIGEN DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS. . . . .	2
<b>2. FASÓRES.</b>	<b>3</b>
2.1. REPRESENTACIÓN DE LOS FASÓRES. . . . .	3
<b>3. VALORES EN POR UNIDAD.</b>	<b>4</b>
3.1. DEFINICIÓN DE POR UNIDAD Y PORCIENTO. . . . .	4
3.2. VENTAJAS DE USAR VALORES EN POR UNIDAD. . . . .	5
3.2.1. CAMBIO DE VALORES EN PU A NUEVOS VALORES EN PU. . . . .	8
<b>4. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LAS REDES DE SECUENCIA.</b>	<b>11</b>
4.1. RED DE SECUENCIA POSITIVA. . . . .	11
4.2. RED DE SECUENCIA NEGATIVA. . . . .	12
4.3. RED DE SECUENCIA ZERO. . . . .	13
<b>5. ANÁLISIS DE FALLAS (SIMÉTRICAS).</b>	<b>15</b>
5.1. CALCULO DE FALLAS TRIFÁSICAS. . . . .	16
5.1.1. MODELO DE ADMITANCIAS E IMPEDANCIAS Y LOS CÁLCULOS DE RED (FORMACIÓN DE $Y_{BUS}$ . . . . .	26
5.2. CALCULO DE FALLAS TRIFÁSICAS POR MÉTODO DE $Y_{BUS}$ Y $Z_{BUS}$ ). . . . .	27

## 1. INTRODUCCIÓN.

Este pequeño libro hablaremos sobre temas de la Ingeniería Eléctrica, como valores en por unidad, componentes simétricas, análisis de cortocircuito de una falla trifásica en sistemas eléctricos de potencia, ver también el método de componentes simétricas proporciona una práctica tecnológica para comprender y analizar el sistema eléctrico de potencia y operación durante condiciones desbalanceadas. Desequilibrios típicos son las causadas por fallas entre las fases y / o la tierra (fase a fase, doble fase a tierra, fase a tierra), fases abiertas, impedancias desequilibradas, y combinaciones de estas, las fallas trifásica están incluidas.

Además, muchas de las protecciones, los relés por ejemplo operan desde cantidades de componentes simétricos. Por ejemplo, la mayoría de los relés proceden de cantidades de secuencia cero, que normalmente no están presentes en el sistema de potencia. Por lo tanto, una buena comprensión de este tema es de gran importancia y es una herramienta muy importante en la protección del sistema. En un sistema simétrico o equilibrado, las tensiones de fuente (generadores) son iguales en magnitud y están en fase, con sus tres fases desplazadas  $120^\circ$  en relaciones de fase. Además, las impedancias de los equipos de tres fases son de igual magnitud y ángulo de fase.

En cierto sentido, las componentes simétricas se pueden llamar el idioma del ingeniero o técnico de protección eléctricas. Su gran valor es tanto pensar como visualizar desequilibrios del sistema, y como un medio de análisis detallado de los mismos desde los parámetros del sistema en este caso es como un lenguaje, en el sentido de que requiere experiencia y practica para facilitar el acceso y la aplicación. Afortunadamente, las fallas y los desequilibrios ocurren con poca frecuencia, y ninguno requiere una descripción detallada de análisis. Por lo tanto, es difícil practicar el idioma. Esta dificultad ha aumentado significativamente con la lista disponibilidad de estudios de fallas a través de computadoras estos proporcionan un rápido acceso a datos voluminosos, frecuentemente con poca comprensión por parte del usuario de la información, el fondo o el método que proporciona los datos.

### 1.0.1. HISTORIA DEL ORIGEN DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS.

El método de componentes simétricas se desarrolló por los años de 1913 por Charles L. Fortescue de Westinghouse, al investigar matemáticamente la operación de motores de inducción bajo condiciones desbalanceadas. En la 34<sup>a</sup> Convención Anual de la AIEE el 28 de junio de 1918, en Atlantic City, presentó un artículo titulado Método de coordenadas simétricas aplicado a la Solución de Polyphase Networks. Esto fue publicado en la asociación AIEE, Volumen 37, Parte 11, páginas 1027-1 140. El trabajo publicado fue de 89 páginas (5 por 8 pulgadas) de longitud, con 25 páginas de discusión por seis conocidos "gigantes" de la ingeniería eléctrica: J. Slepian, C. P. Steinmetz, V. Karapetoff, A. M. Dudley, Charles F. Scott y C. O. Mailloux.

La aplicación del método a estudios de cortocircuito y disturbios del sistema eléctrico, y el método tal como lo conocemos hoy era hecho por C. F. Wagner y R. D. Evans. Comenzaron una serie de artículos en la revista Westinghouse The Electric Journal, desde marzo de 1928 hasta noviembre de 1931. Esta serie fue ampliada por los dos autores y publicada en el clásico y aún muy útil book symmetrical Components, publicado por McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1933. Justo cuando el libro de Wagner-Evans estaba a punto de ser impreso, otro ingeniero de Westinghouse, W. A. Lewis, desarrolló el concepto de dividir la reactancia de línea en componentes: uno asociado con la reactancia del conductor ( $X_a$ ), asociada con el espaciado para los conductores ( $X_d$ ) de retorno, y uno asociado con la profundidad de la vuelta de la tierra ( $X_e$ ) T.h se agregó a la libro como apéndice (VII).

## 2. FASÓRES.

Los fasóres son importantes para analizar, documentar y comprender el funcionamiento de energía eléctrica y las corrientes y voltajes asociados con fallas y disturbios. Por lo tanto, un sólido conocimiento teórico y práctico de esto es un recurso fundamental y valioso.

El manual de IEEE (IEEE 100-1984) define un fasór como un número complejo. A menos que se especifique lo contrario, se usa solo dentro del contexto de sistemas lineales alternados de estado estacionario. El valor absoluto del número complejo corresponde a la amplitud del pico o al cuadrado de la raíz (rms) valor de la cantidad, y la fase a el ángulo de fase en el momento cero. Por extensión, el término fasór también se puede aplicar a la impedancia y a las cantidades complejas relacionadas que no dependen del tiempo. En este libro, los fasóres se usarán para documentar varios voltajes, corrientes, flujos, impedancias y potencia de AC. Por muchos años los fasóres fueron referidos a vectores, pero este uso está en desuso para evitar confusiones con los vectores espaciales. Sin embargo, el uso anterior persiste, o de vez en cuando un lapso de vectores puede ocurrir.

### 2.1. REPRESENTACIÓN DE LOS FASÓRES.

La forma pictórica común para representar eléctrica y magnéticamente las Cantidades fasoriáles se utiliza el plano cartesiano, el eje  $X$  como los cantidades reales y  $Y$  como el eje de cantidades imaginarias y la letra  $C$  representa el número complejo. Esto se ilustra en la figura que se muestra enseguida.

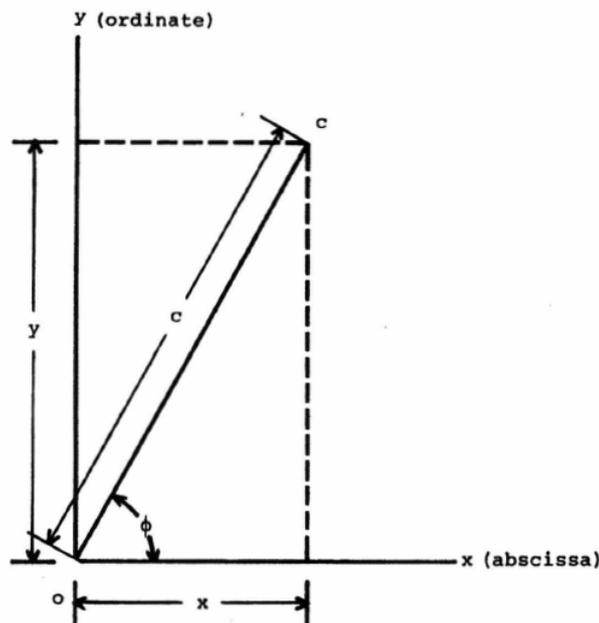


Figura 1: Representación de un fasór en el plano cartesiano.

Las formas de representación de un fasór, usando números complejos (forma polar, forma rectangular, forma exponencial, fasór), como se muestra en la figura (2).

Phasor form	Rectangular form	Complex form	Exponential form	Polar form
$c$	$= x + jy$	$=  c (\cos \phi + j \sin \phi)$	$=  c  e^{j\phi}$	$=  c  \angle +\phi$

Figura 2: Representación de un fasor con números complejos.

EJEMPLOS: Representación de los números complejos.

1.-Forma rectangular.

$$12 + J30$$

Donde el numero 12 es el numero real y J30 es el numero imaginario, cuando se hacen operaciones con números rectangulares como (+,-,x,/), se deben realizar dichas operaciones numero real con real y numero imaginario con imaginario.

2.-Forma polar.

$$25 < 50^\circ$$

En los números polares el numero 25 viene representando la magnitud ya sea de corriente o voltaje, impedancia o potencia, y el  $50^\circ$  es el angulo, al realizar operaciones como (+,-,x,/), la operación que se realice debe de ser magnitud con magnitud, y en este caso los ángulos de suman.

### 3. VALORES EN POR UNIDAD.

Los sistemas de potencia funciona a voltajes en los que el kilovoltio (kV) es la Unidad más conveniente para expresar el voltaje. Estos sistemas transmiten grandes cantidades de energía, de modo que el kilovolt-ampere (kVA) y megavolt-ampere (MVA) se utilizan para expresar el total (potencia aparente) potencia trifásica. Estas cantidades, juntas con kilovatios, kilovares, amperios, ohmios, flujo, etc., son generalmente expresado como por unidad o por ciento de una referencia o base valor. Las nomenclaturas por unidad y por ciento son amplia mente utilizadas porque simplifican la especificación y los cálculos, especialmente donde intervienen diferentes niveles de voltaje y equipos.

#### 3.1. DEFINICIÓN DE POR UNIDAD Y PORCIENTO.

El porcentaje es 100 veces por unidad. Ambos se usan como una cuestión de conveniencia o de elección personal y es importante designar ya sea por ciento o por unidad (pu). El valor por unidad de cualquier cantidad es la relación entre cantidad a su valor base, la relación expresada como un numero decimal no dimensional. Así, las cantidades reales, como voltaje (V), corriente (I), potencia (P), potencia reactiva (Q), volt-amperes (VA), resistencia (R), reactancia (X), y impedancia (Z), se expresen en por unidad o por ciento de la siguiente manera:

$$\text{Valorenporunidad} = \frac{\text{valorreal}}{\text{valorbase}} \dots\dots(2.1)$$

$$\text{Valorenporciento} = (\text{Valorenporunidad})x(100)\dots\dots(2.2)$$

Donde: el valor real es un valor medido o de dato de placa del cual se quiere obtener un valor en (pu), un valor base puede ser un dato nominal de dato de placa o un valor cualquiera que sirve como referencia para considerar el valor en (pu).

Es más conveniente usar la notación KVA o MVA en lugar de S, y kV en lugar de V. Las cantidades base son cantidades escalares, esta notación fasorial no es requerida para las ecuaciones básicas.

$$MVA_b = (\sqrt{3})(KV_B)(I_b).....(2.3)$$

$$I_b = \frac{MVA_b}{(\sqrt{3})(KV_b)}.....(2.4)$$

$$Z_b = \frac{KV_b^2}{MVA_b}.....(2.5)$$

### 3.2. VENTAJAS DE USAR VALORES EN POR UNIDAD.

Algunas de las ventajas de usar valores en por unidad o por ciento son:

1. Su representación da como resultado datos más significativos donde las magnitudes relativas de todas las magnitudes de circuito similares se puede comparar directamente.
2. La impedancia equivalente en por unidad de cualquier transformador es lo mismo cuando se refiere al lado primario o al secundario.
3. La impedancia en por unidad de un transformador en un sistema trifásico, es el mismo que el de las conexiones de bobinado (estrella-delta, delta-estrella, estrella-estrella o delta-delta).
4. El método en por unidad es independiente de los cambios de voltaje y cambios de fase a través de transformadores, donde la base las tensiones en los bobinados son proporcionales al número de vueltas en los devanados.
5. Los fabricantes generalmente especifican la impedancia del equipo en por unidad o porcentaje en la placa de datos del equipo, como clasificación de potencia (generalmente kVA) y tensión (V o kV). Por lo tanto, la impedancia nominal se puede usar directamente si las bases elegidas son las mismas que las clasificaciones de la placa de datos.
6. Los valores de impedancia unitarios de varios datos de los equipos se encuentra en un rango estrecho, mientras que el óhmico real los valores pueden variar amplia mente. Por lo tanto, donde los valores reales no se conocen, se puede usar un buen valor aproximado. Valores típicos para varios tipos de equipos están disponibles de muchas fuentes y libros de referencia, también la exactitud de una unidad especificada se puede verificar sabiendo los valores típicos.
7. Hay menos posibilidades de confusión entre potencia monofásica y potencia trifásica, o entre línea a línea o voltaje de línea a neutro.
8. El método en por unidad es muy útil para simular el comportamiento de estado estacionario y transitorio de los sistemas de potencia en ordenadores.
9. El voltaje de la fuente de alimentación usualmente puede ser asumido a ser 1,0 pu para los cálculos de fallas y voltaje.
10. Con valores en por unidad, el producto de dos cantidades expresadas en por unidad se expresa en por unidad misma, sin embargo, el producto de dos cantidades expresadas en porcentaje debe ser dividido por 100 para obtener el resultado en porcentaje. Por esta razón es deseable usar valores en por unidad en lugar de por ciento en softwares computacionales.

\* Un ejemplo sencillo para usar la ecuación (2,1), para calcular el voltaje en por unidad es como sigue:

datos:

$$V_{medido} = 13,7kv = V_{real}, V_{nom} = 13,8kv = V_{base}$$

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{13,7kv}{13,8kv} = 0,992_{puV}$$

\* NOTA: Cuando el valor real es mayor que el valor base el resultado en pu es en unidad.

Por lo regular en un sistema de potencia se especificara a la potencia en MVA y el voltaje en Kv, por lo cual para el caso de la impedancia, la impedancia base puede ser calculada como sigue:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \dots\dots(2,6)$$

Enseguida se analizaran los valores en pu, para los siguiente equipos:

### 1.-La maquina sincrona

### 2.-Transformador monofásico

### 3.-Transformador trifásico de 2 devanados

\* MAQUINA SINCRONA.

Datos:

$$P = 9MW$$

$$V_b = 20kv$$

$$V_t = 20kv$$

$$R_L = 09\Omega$$

$$X_L = 1\Omega$$

$$FP = 0,9$$

SOLUCIÓN:

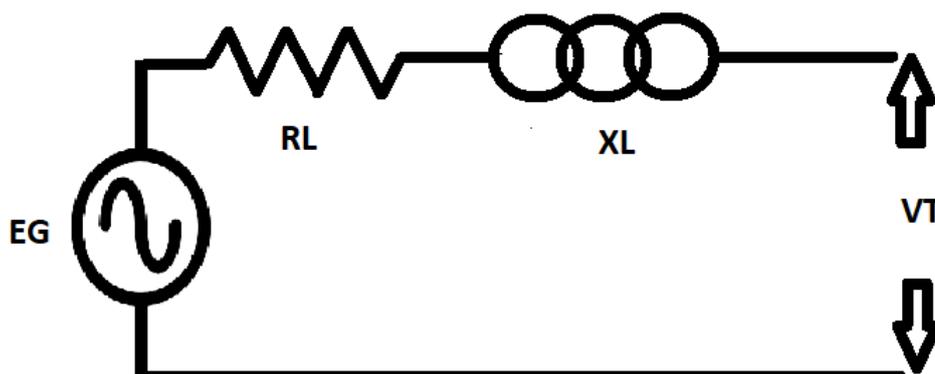


Figura 3: Circuito sencillo de la maquina sincrona

1.-Primero procedemos a calcular la impedancia real de la maquina sincrona con los parámetros que nos da el fabricante con la ecuación siguiente:

$$Z_{real} = R_L + jX_L = 0,9\Omega + j1\Omega = 1,34 < 48^\circ\Omega$$

2.-Una vez calculado la impedancia real, se procede a calcular la potencia aparente de la maquina sincrona (S), ya que este valor se necesita para calcular la impedancia base:

$$S = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{9MW}{0,9} = 10MVA$$

3.-Con la potencia aparente de la maquina sincrona (S), calculamos la Zb como se ve a continuación:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(20kv)^2}{10MVA} = 40\Omega$$

4.-Ya por ultimo teniendo la Zb podemos calcular nuestra impedancia en por unidad como se observa en la siguiente ecuación:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{1,34 \angle 48\Omega^\circ}{40\Omega} = 0,0335 < 48^\circ pu\Omega$$

\* TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

Un transformador de 20KVA, 480v/120v, tiene una impedancia referida al lado de baja de  $0,0525 < 78,13\Omega^\circ$ . Determine el valor en por unidad de la impedancia.

Datos:

$$V_b = 120v$$

$$S_b = 20KVA$$

SOLUCIÓN:

1.-Calculamos primero la impedancia base con los datos que nos da el problema:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(120v)^2}{20KVA} = 0,72\Omega$$

2.-Ya teniendo la Zb y la impedancia real que ya nos da el problema podemos calcular la impedancia en por unidad como se ve a continuación:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{0,0525 \angle 78,13\Omega^\circ}{0,72\Omega} = 0,0729 < 78,13^\circ pu\Omega$$

\* NOTA: Los valores en por unidad en lado alta o baja del transformador son los mismos, aunque hay una ecuación para referir alas impedancias en por unidad en lado alta y baja:

$$Z_{Href} = a_2 x Z_x medida$$

\* TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 2 DEVANADOS.

El siguiente transformador tiene una impedancia de cortocircuito de  $0,121\Omega$  y una  $S_b = 400KVA$ , en el lado de baja, despreciando el valor de la resistencia del transformador, determine:

a).-El valor en por unidad de la impedancia al considerarlo en forma aislada.

b).-Determine el valor en por unidad al considerarlo como parte de un sistema cuyas bases sean 100MVA y 230KV.

SOLUCIÓN:

Al igual que el ejemplo pasado siguiendo los mismos pasos podemos calcular la impedancia en por unidad como lo pide el inciso a:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(22kv)^2}{400KVA} = 1,21\Omega$$

Calculando ahora la impedancia en pu:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J0,121\Omega}{J1,21\Omega} = J0,1pu\Omega$$

Ahora pasándonos a solucionar el inciso b:

$$Z_{Href} = a_2 x Z_{xmedida} = \left( \frac{(220kv)^2}{22kv} \right) (J0,121\Omega) = 12,1\Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(230kv)^2}{100MVA} = 529\Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J12,1\Omega}{529\Omega} = J0,022pu\Omega$$

\* NOTA: Hay una ecuación que permite re-calcular los valores en pu, a unas nuevas bases:

$$Z_{puN} = (Z_{puA}) \left( \frac{V_{bA}}{V_{bN}} \right)^2 \left( \frac{S_{bN}}{S_{bA}} \right) \dots\dots (2.7)$$

$$Z_{puN} = (J0,1\Omega) \left( \frac{220kv}{230kv} \right)^2 \left( \frac{100MVA}{400MVA} \right) = J0,022pu\Omega$$

\* NOTA: La N en la ecuación 'Zpu'N' significa valor nuevo a sus nuevas bases.

### 3.2.1. CAMBIO DE VALORES EN PU A NUEVOS VALORES EN PU.

Como vimos en el ejemplo anterior al utilizar la ecuación (2.7), podemos calcular valores de impedancia en pu de cualquiera equipo a sus nuevas bases según se requiera y teniendo las bases correctas para poder calcular esas impedancias nuevas, esta ecuación es muy común usarla en cálculos de corrientes de cortocircuito mas adelante se entenderá mejor esta ecuación al emplearla en esos estudios, a continuación veremos un ejemplo donde se empleara esta ecuación con el fin de que se entienda mejor el uso de esta ecuación.

\* EJEMPLO: Se tienen 3 motores conectados a 6.6 kv a un mismo bus, encontrar las reactancias en pu a una base de 100KVA y un voltaje de 7.2kv.

SOLUCIÓN:

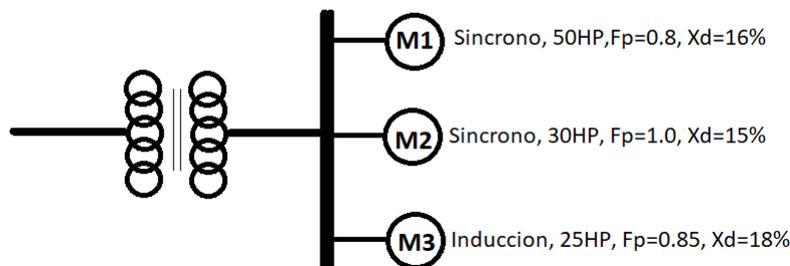


Figura 4: Diagrama unifilar de 3 motores conectados al mismo bus.

Para el motor 1 (M1), tenemos que:

1.- Lo primero es sacar la potencia activa que consume este motor con la ecuación siguiente si sabemos que 1HP es igual a 0.746W, entonces:

$$P = 50HP \left( \frac{0,746w}{1HP} \right) = 37,3Kw$$

2.-Ahora que tenemos la potencia activa que consume este motor podemos usar este dato para utilizar la siguiente ecuación de potencia aparente(S), lo cual sera nuestra potencia aparente base nueva:

$$S = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{37,7kw}{0,8} = 46,625KVA$$

3.-Ya con este valor base podemos usar la ecuacion (2.7), para poder calcular la impedancia en pu nueva:

$$Z_{puN} = (J0,16\Omega) \left( \frac{6,6kv}{7,2kv} \right)^2 \left( \frac{100KVA}{46,625KVA} \right) = J0,2883pu\Omega$$

Para el motor 2 (M2), se realizan los mismos pasos que (M1):

$$1.- P = 30HP \left( \frac{0,746w}{1HP} \right) = 22,38Kw$$

$$2.- S = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{22,38kw}{1,0} = 22,38KVA$$

3.-

$$Z_{puN} = (J0,15\Omega) \left( \frac{6,6kv}{7,2kv} \right)^2 \left( \frac{100KVA}{22,38KVA} \right) = J0,5631pu\Omega$$

Para el motor 3 (M3), se realizan los mismos pasos que (M1),(M2):

$$1.- P = 25HP \left( \frac{0,746w}{1HP} \right) = 18,65Kw$$

$$2.- S = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{18,65kw}{0,85} = 21,94KVA$$

3.-

$$Z_{puN} = (J0,18\Omega) \left( \frac{6,6kv}{7,2kv} \right)^2 \left( \frac{100KVA}{21,94KVA} \right) = J0,6893pu\Omega$$

\* EJEMPLO: Sea el siguiente sistema, considere una base de 25MVA y 19KV, en el generador:

- Dibujar el diagrama de Xd con sus valores en pu.
- Calcular el voltaje generado en KV.

SOLUCIÓN:

NOTA: Observamos en la figura (5), que el Vb nuevo para diferentes niveles de tension en los transformadores de potencia en el sistema eléctrico se puede realizar con un simple calculo usando la regla de 3 simple como se observa en el diagrama, y las flechas indican claramente las tensiones que se toman para dicha regla de 3, los resultados de esa regla de 3 vienen en color azul esos son los nuevos Vb para cada nivel de tension.

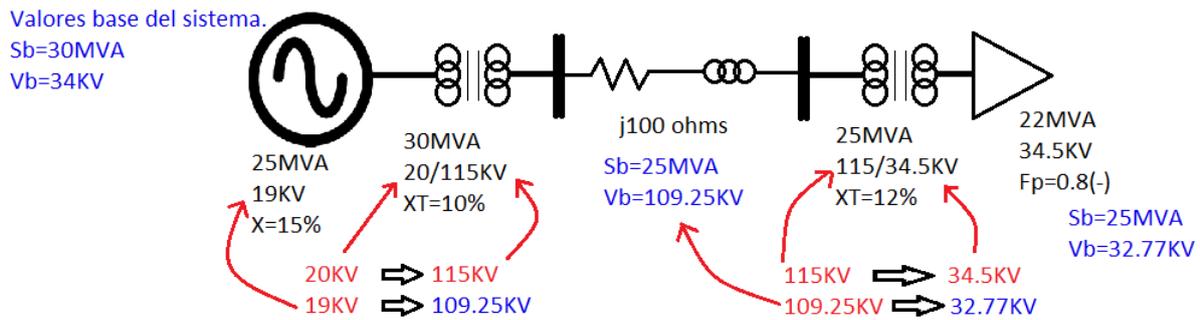


Figura 5: Diagrama unifilar de sistema eléctrico de potencia.

1.- Lo primero se calculan las impedancias en pu en sus valores nuevos de los dispositivos eléctricos del sistema eléctrico de potencia, utilizando la ecuación (2.7).

Para el generador:

$$Z_{puN} = (j0,15\Omega) \left(\frac{19kv}{19kv}\right)^2 \left(\frac{25MVA}{25MVA}\right) = j0,15pu\Omega$$

Para el transformador lado generación:

$$Z_{puN} = (j0,1\Omega) \left(\frac{20kv}{19kv}\right)^2 \left(\frac{25MVA}{30MVA}\right) = j0,09pu\Omega$$

Para la línea de transmisión:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{(109,25kv)^2}{25MVA} = 477,42\Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{j100\Omega}{477,42\Omega} = j0,20pu\Omega$$

Para el transformador lado carga:

$$Z_{puN} = (j0,12\Omega) \left(\frac{34,5kv}{32,77kv}\right)^2 \left(\frac{25MVA}{25MVA}\right) = j0,13pu\Omega$$

Para la carga:

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_b} = \frac{34,5KV}{32,77KV} = 1,05 < 0^\circ puV$$

El ángulo de la corriente lo podemos calcular con el dato de factor de potencia de la carga con la siguiente ecuación:

$$\cos^{-1}0,8 = 36,86^\circ$$

El ángulo nos da  $36,86^\circ$ , pero como en la figura (5) nos dice que el fp en la carga está en atraso (-), se le pone ángulo negativo a la corriente, recordemos que el factor de potencia en atraso nos indica que hay muchos elementos inductivos en este caso en la carga.

$$I_{real} = \frac{MVA}{(\sqrt{3})(KV)} = \frac{22MVA}{(\sqrt{3})(34,5KV)} = 368,15 < -36,86^\circ A$$

$$I_b = \frac{S_b}{(\sqrt{3})(V_b)} = \frac{25MVA}{(\sqrt{3})(32,77KV)} = 440,45A$$

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_b} = \frac{368,15 < -36,86^\circ}{440,45A} = 0,835 < -36,86^\circ puA$$

Nuestro diagrama de reactancias de secuencia positiva queda como se muestra a continuación:

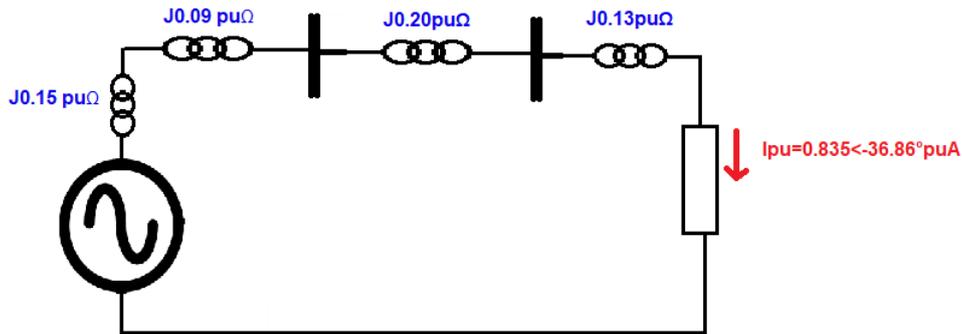


Figura 6: Diagrama de reactancias de secuencia positiva.

## 4. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LAS REDES DE SECUENCIA.

Para los sistemas eléctricos trifásicos, hay tres conjuntos de componentes simétricas: secuencia positiva, negativa y cero, estas secuencias son para tanto corrientes y voltajes.

### 4.1. RED DE SECUENCIA POSITIVA.

La red de secuencia positiva consiste en las corrientes trifásicas equilibradas (simétricas), y tensiones trifásicas de línea a neutro suministradas por generadores de los sistemas eléctricos, por lo tanto, siempre son iguales en magnitud y fase desplazadas  $120^\circ$ . Con una secuencia de fases del sistema de potencia de a, b, c.

En la siguiente figura observamos los fasores de corriente de secuencia positiva.

$$a = 1/\underline{120^\circ} = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1/\underline{240^\circ} = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = 1/\underline{360^\circ} = 1/\underline{0^\circ} = 1.0 + j0$$

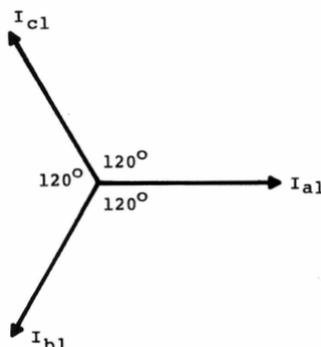
Figura 7: Operador (a), desplazamiento de  $120^\circ$ .

Figura 8: Fasores de corriente de secuencia positiva.

Por lo tanto, el conjunto de secuencia positiva se puede designar como la figura (9):

$$\begin{array}{ll}
 I_{a1} = I_1 & V_{a1} = V_1 \\
 I_{b1} = a^2 I_{a1} = a^2 I_1 = I_1 / \underline{240^\circ} & V_{b1} = a^2 V_1 = V_1 / \underline{240^\circ} \\
 I_{c1} = a I_{a1} = a I_1 = I_1 / \underline{120^\circ} & V_{c1} = a V_1 = V_1 / \underline{120^\circ}
 \end{array}$$

Figura 9: Conjunto de secuencia positiva en voltajes y corriente.

#### 4.2. RED DE SECUENCIA NEGATIVA.

Este conjunto también se equilibra con tres magnitudes de igual magnitud a  $120^\circ$  de distancia, pero con la rotación de fase o la secuencia invertida como se ilustra en la figura siguiente, por lo tanto, si la secuencia positiva es a, b, c, negativo será a, c, b.

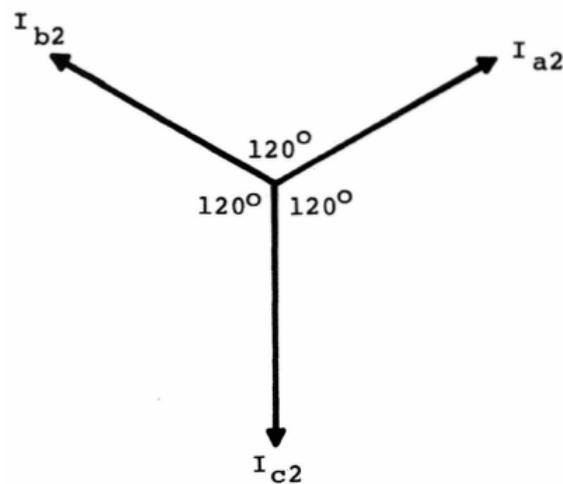


Figura 10: Fasores de corriente de secuencia negativa.

Por lo tanto, el conjunto de secuencia negativa se puede designar como la figura siguiente:

$$\begin{array}{ll}
 I_{a2} = I_2 & V_{a2} = V_2 \\
 I_{b2} = a I_{a2} = a I_2 = I_2 / \underline{120^\circ} & V_{b2} = a V_2 = V_2 / \underline{120^\circ} \\
 I_{c2} = a^2 I_{a2} = a^2 I_2 = I_2 / \underline{240^\circ} & V_{c2} = a^2 V_2 = V_2 / \underline{240^\circ}
 \end{array}$$

Figura 11: Conjunto de secuencia negativa de voltajes y corrientes.

### 4.3. RED DE SECUENCIA ZERO.

Los miembros de este conjunto de fasóres giratorios son siempre iguales en magnitud y en fase.

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \quad V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0$$

Figura 12: Fasores de voltajes y corrientes igual en magnitud y en fase.

De igual manera el fasór de corriente de secuencia zero se muestra a continuación:

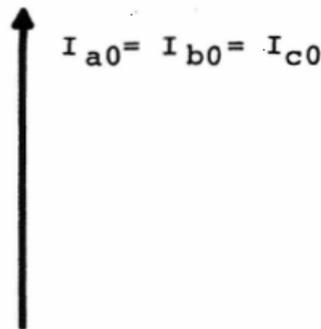


Figura 13: Fasor de corriente de secuencia zero.

Las tres secuencias que se acabaron de ver la positiva, negativa y zero, la positiva como se dijo se va a usar para poder calcular las fallas trifásicas de cortocircuito (simétricas), la red de secuencia negativa y zero se usan en conjunto con la red de secuencia positiva para poder hacer análisis de fallas de cortocircuito de línea a tierra o doble línea a tierra, la red de secuencia positiva y negativa se usan en conjunto para hacer análisis de fallas entre líneas y la red de secuencia zero hay que analizar los arreglos que existen para esta secuencia en los aterrizamientos de los transformadores de potencia.

NOTA: En este libro solamente se empleará la red de secuencia positiva, ya que esta red es la que se ocupa para el análisis de cortocircuito para fallas trifásicas (simétricas).

A continuación se verá un ejemplo sencillo de cómo representar las tres redes de secuencia en un sistema eléctrico de potencia:

\* EJEMPLO: Sea el siguiente sistema eléctrico de potencia dibuje las tres redes de secuencia (+, -, 0).

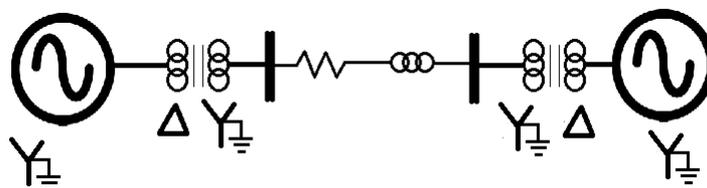


Figura 14: Sistema eléctrico de potencia con datos de aterrizamiento.

En la figura anterior podemos observar un sistema eléctrico de potencia sencillo tipo radial, donde nos muestra los aterrizamientos de los equipos del sistema eléctrico como los generadores y transformadores, estos datos nos ayudan a realizar los diagramas de secuencia (+, -, 0), en la secuencia zero tenemos algo importante que señalar, los transformadores de potencia dependiendo su aterrizado es como se va a considerar el diagrama de secuencia zero, en la figura (17) observamos cómo se debe de tomar el diagrama para los transformadores dependiendo su conexión de devanados y aterrizamiento:

\*RED DE SECUENCIA (+).

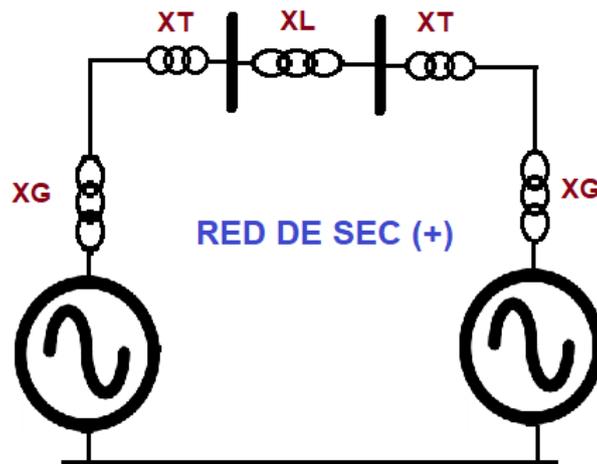


Figura 15: Red de secuencia (+).

\*RED DE SECUENCIA (-).

NOTA: La red de secuencia negativa se dibuja igual que la de secuencia (+), solo que sin los generadores.

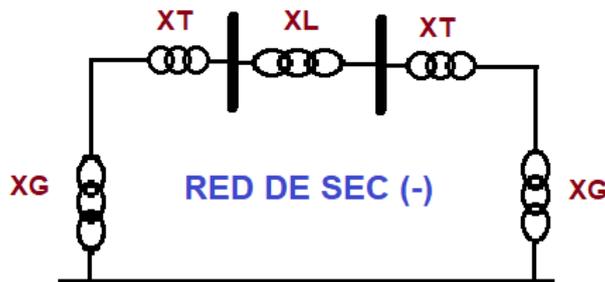


Figura 16: Red de secuencia (-).

\*RED DE SECUENCIA (0).

Para la red de secuencia zero utilizaremos los arreglos para los transformadores dependiendo de su conexión y aterrizamiento de devanados:

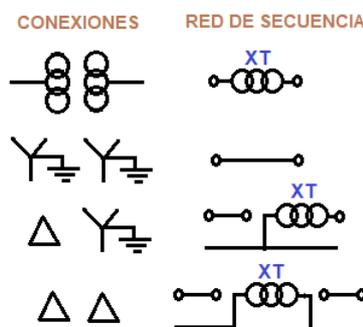


Figura 17: Redes de secuencia (0), para transformadores (Aterrizamientos).

Ahora si conociendo los diagramas de secuencia zero para transformadores podemos dibujar la red de secuencia zero para el sistema eléctrico de potencia.

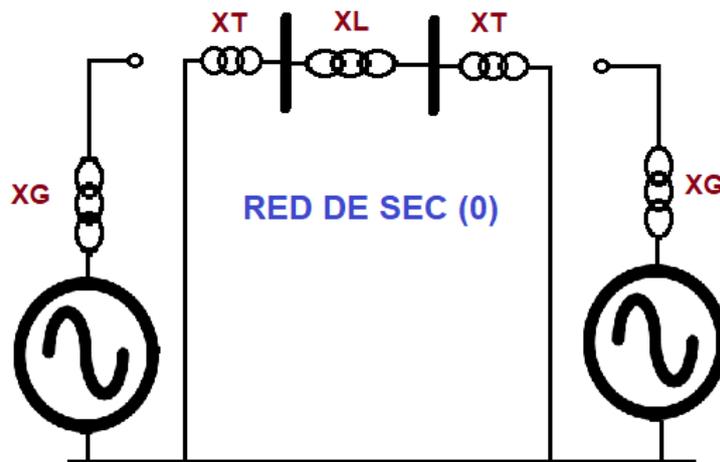


Figura 18: Red de secuencia (0).

## 5. ANÁLISIS DE FALLAS (SIMÉTRICAS).

Los estudios de cortocircuito, se requieren para el diseño de sistemas eléctricos de potencia, ya que para dimensionamiento y sistemas no solo depende de los requisitos del estado estable, sino también de condiciones anormales como son las sobrecargas, las fallas de cortocircuito, así como aquellas que imponen esfuerzos térmicos y mecánicos a los equipos.

Los estudios de cortocircuito, se requieren para:

- \* **Calculo de la capacidad de fusibles.**
- \* **Calculo de la capacidad interruptora y de cierre de interruptores.**
- \* **Calculo de la capacidad térmica, de cables, buses, transformadores.**
- \* **Calculo de la precisión de los transformadores de instrumentos.**
- \* **Selección y ajuste de los dispositivos de protección.**
- \* **Calculo y dimensionamiento de redes de tierra.**
- \* **Calculo de esfuerzos dinámicos.**

De acuerdo al numero de fases involucradas las fallas pueden ser:

- \* **Trifásicas (Simétricas).**
- \* **Falla de fase a tierra (Asimétrica).**
- \* **Falla de dos fases a tierra (Asimétrica).**
- \* **Falla entre dos fases (Asimétrica).**

Con el tiempo en el que esta presente la falla puede ser:

**1.- Fallas permanentes.**

**2.- Fallas temporales.**

\*TIPOS DE FALLAS TEMPORALES:

Conductores que se toquen con el viento, descargas atmosféricas sobre conductores, animales pequeños que hagan tierra, ramas de arboles que toquen líneas energizadas, sobrecorrientes por reenergización de cargas.

\*TIPOS DE FALLAS PERMANENTES.

Esta es cuando un conductor por ejemplo se desprende del aislador y cae al suelo, la falla permanecerá hasta que la compañía repare la falla, también si por ejemplo una persona choca con algún poste donde hay líneas y lo tumba también habrá suspensión de suministro eléctrico hasta que se repare el accidente.

### 5.1. CALCULO DE FALLAS TRIFÁSICAS.

Los métodos a emplear en el calculo de fallas trifásicas serán el método de thevenin y el modelo de admitancias e impedancias.

\*METODO DE THEVENIN.

En este metodo se requiere utilizar la red de secuencia (+), en la cual los generadores se representan por una fuente de voltaje y una reactancia, las líneas y transformadores solo por una reactancia. El circuito de thevenin utiliza en el punto de falla un generador equivalente y las fuentes se cortocircuitan teniendo polaridad contraria a la red de secuencia (+).

\*EJEMPLO: Sea el siguiente sistema, calcule los valores de falla en el bus numero 2.

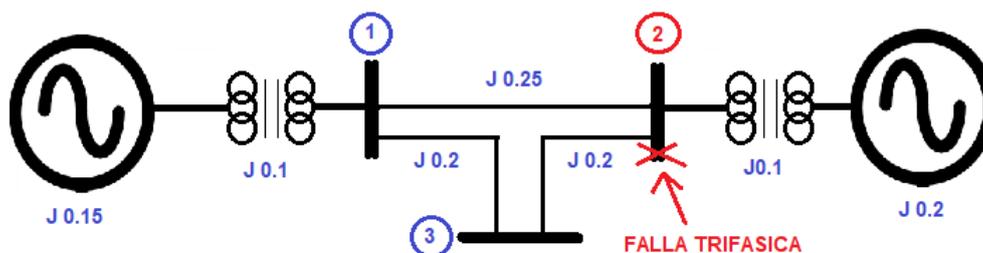


Figura 19: Sistema de potencia con falla trifásica en bus 2.

NOTA: Hay que decir que las reactancias que se muestra el diagrama unifilar anterior, ya son reactancias calculadas en pu, con las formulas vistas en el capítulo 3.

La figura (20),mostrara como quedara nuestro diagrama de secuencia (+), con la fuente de thevenin en el bus 2 que es el de donde se presenta la falla trifásica.

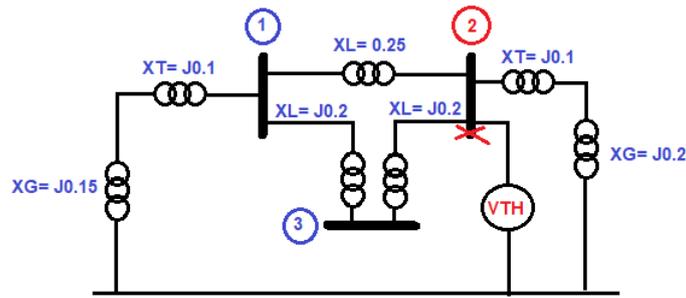


Figura 20: Circuito de thevenin, con reactancias en pu.

SOLUCIÓN:

1.-Ahora teniendo ya el circuito de thevenin con las respectivas reactancias en pu, lo que se va a proceder es a resolver el circuito de thevenin, jugando con circuitos serie y paralelo, reduciendo hacia donde es la falla que es en el bus 2.

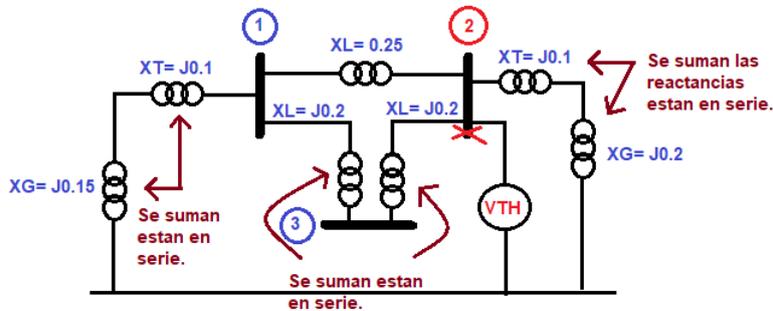


Figura 21: Reducción circuito de thevenin, reactancias en serie.

$$X1 = XG + XT = J0,15 + J0,1 = J0,25pu\Omega$$

$$X2 = XL + XL = J0,2 + J0,2 = J0,4pu\Omega$$

$$X3 = XG + XT = J0,2 + J0,1 = J0,3pu\Omega$$

2.-Realizando estas operaciones sencillas nuestra reducción del circuito de thevenin nos queda como se muestra a continuación:

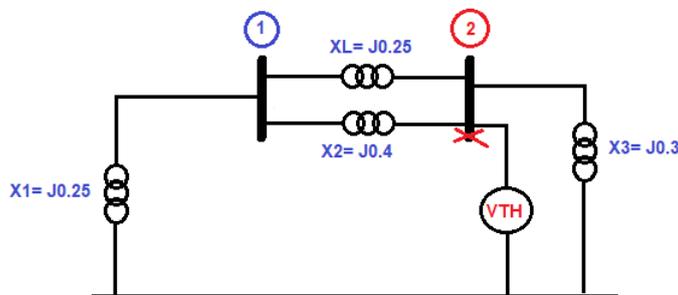


Figura 22: Reducción de circuito de thevenin.

3.-Seguimos con la reducción, ahora sacamos el paralelo de las líneas de transmisión X2 con XL.

$$X_{Leq} = \frac{(J0,25)(J0,4)}{J0,25+J0,4} = J0,15pu\Omega$$

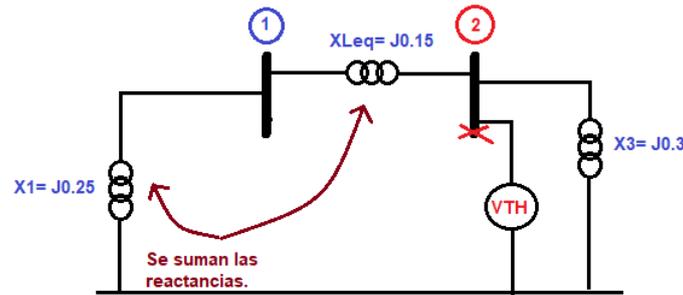


Figura 23: Reducción del circuito de thevenin, líneas en paralelo.

4.-El siguiente paso sera reducir las reactancias  $X_{Leq}$  y  $X_1$ , ya que están en serie las sumamos.

$$X_{eq1} = X_1 + X_{Leq} = J0,25 + J0,15 = J0,4pu\Omega$$

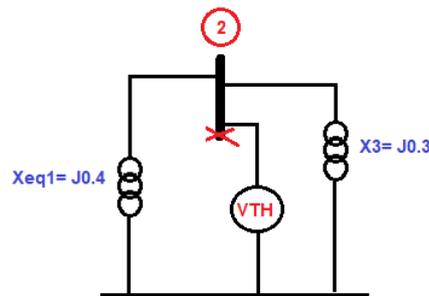


Figura 24: Reducción de circuito de thevenin.

5.-En la figura (24), como observamos ya solo queda sacar el paralelo de  $X_{eq1}$  y  $X_3$ , para obtener la  $X_{eq}$ , que viene siendo la reactancia total del circuito de thevenin en donde esta la falla que es en el bus 2, o impedancia total total también podríamos llamarla de las dos formas reactancia total o impedancia total equivalente, el signo de (+), en la reactancia total equivalente significa que es de secuencia positiva, como ya habíamos comentado anteriormente solo necesitamos la red de secuencia positiva para calcular la falla trifásica.

$$X_{eq+} = \frac{(J0,4)(J0,3)}{J0,4+J0,3} = J0,17pu\Omega$$

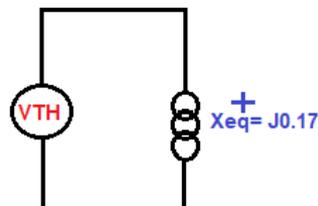


Figura 25: Reactancia o impedancia total del circuito de thevenin.

Ahora si teniendo la reactancia total del circuito del bus 2 de thevenin, podemos calcular la corriente de cortocircuito con la ecuación que se muestra a continuación:

$$I_f^+ = \frac{V_f}{X_{eq}} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{J0,17} = 5,882 \angle -90^\circ puA$$

\*NOTA:El voltaje de falla siempre se toma como  $1,0 \angle 0^\circ$  (Voltaje plano).

Ahora bien si quiero saber la corriente real de falla en el bus 2, solamente tengo que usar la ecuación (2.4) de  $I_b$ , y ya teniendo esta corriente ya puedo calcular la corriente real de falla que hay en el bus 2.

$$I_b = \frac{S_b}{(\sqrt{3})(V_b)} = \frac{100MVA}{(\sqrt{3})(115KV)} = 502,04A$$

$$I_{real} = (I_{pu})(I_b) = (5,882 \angle 90^\circ puA)(502,04A) = 2952 \angle -90^\circ A$$

Como dato extra podemos calcular teniendo la corriente de corto circuito real del bus 2, con este dato podemos calcular la potencia aparente de cortocircuito de este bus, con la ecuación que se ve a continuación.

$$S_{cc} = (\sqrt{3})(V_{cc})(I_{cc}) = (\sqrt{3})(115KV)(2952A) = 587,59MVA$$

\*Nota: Algo importante de señalar en este tipo de problemas de calculo de fallas es que por lo regular CFE, que es nuestra compañía de electricidad en nuestro país, ellos proporcionan en la acometida de las compañías los MVA de cortocircuito o la corriente de cortocircuito para obtener así la impedancia total del sistema, hasta el bus donde se quiera calcular la corriente de falla.

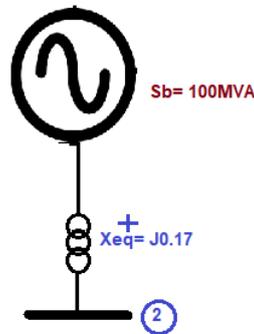


Figura 26: Diagrama equivalente con impedancia equivalente.

\*EJEMPLO: Calcule la corriente de falla trifásica en el punto D del siguiente sistema eléctrico.

\*NOTA: Las flechas azules en el diagrama del sistema de la figura (27), significan que las reactancias de los transformadores o generadores o líneas de transmisión son las mismas del valor dado, y ojo las reactancias están en por ciento hay que pasarlas a valor normal dividiéndolas entre 100.

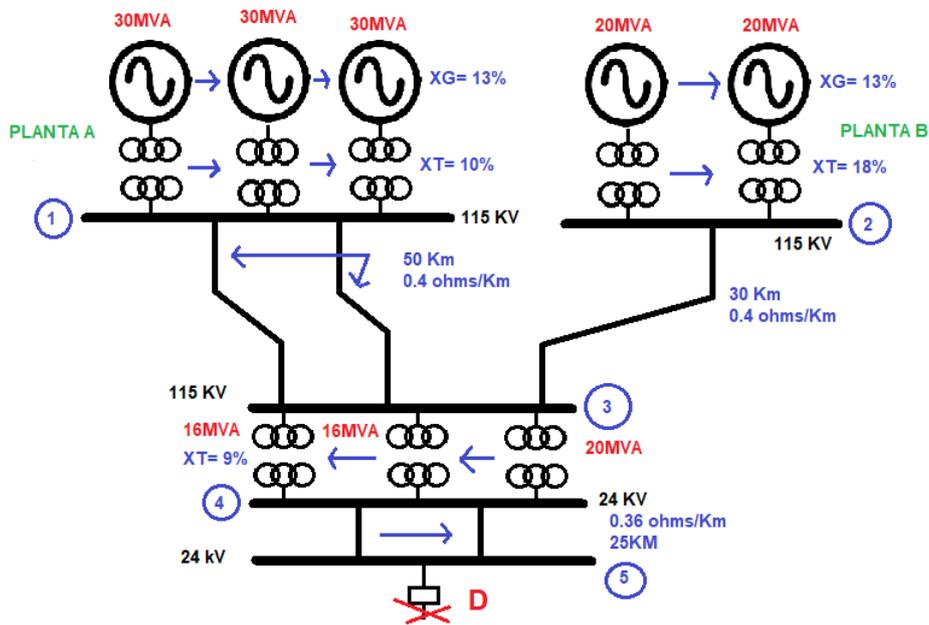


Figura 27: Sistema eléctrico de potencia a analizar.

Considerando una base de 100 MVA y un  $V_b$  de acuerdo a cada nivel que se tiene:

\*SOLUCION:

1.- Para la planta A, tenemos que sumar las reactancias del generador con las de los transformadores ya que están en serie.

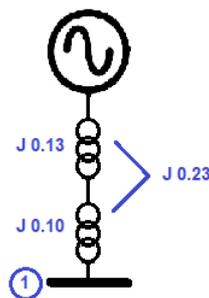


Figura 28: Suma de reactancias de XT Y XG de la planta A.

2.- Una vez sacada la reactancia de la suma de los transformadores y generadores de la planta A, procedemos a sacar la impedancia en su nuevo valor base con la ecuación (2.7), y una vez sacada la impedancia se procede a sacar el paralelo de las impedancias equivalentes de la planta A, solo se hará un solo cálculo de las impedancias y del paralelo ya que las impedancias equivalentes son las mismas en la planta A, para que quede mejor entendido ver la figura siguiente (29).

$$X_{plantaA} = X_G + X_T = J0,10 + J0,10 = J0,23pu\Omega$$

$$Z_{puN} = (J0,23\Omega) \left(\frac{115kv}{115kv}\right)^2 \left(\frac{100MVA}{30MVA}\right) = J0,76pu\Omega$$

$$Z_{plantaA} = \frac{1}{(1/J0,76)+(1/J0,76)+(1/J0,76)} = J0,2555pu\Omega$$

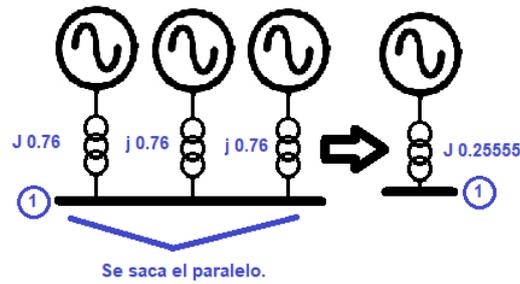


Figura 29: Impedancia equivalente de la planta A.

3.- Para la planta B seguimos los mismos pasos que la planta A, para sacar su reactancias de generadores y transformadores, y después la impedancia total de la planta B.

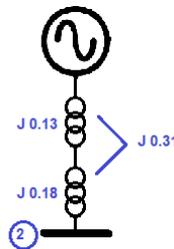


Figura 30: Suma de reactancias XG Y XT de la planta B.

4.- Repetimos paso 2 como se hizo en planta A.

$$X_{plantaB} = XG + XT = J0,13 + J0,18 = J0,31pu\Omega$$

$$Z_{puN} = (J0,31\Omega) \left(\frac{115kv}{115kv}\right)^2 \left(\frac{100MVA}{20MVA}\right) = J1,55pu\Omega$$

$$Z_{plantaB} = \frac{1}{(1/J1,55)+(1/J1,55)+(1/1,55)} = J0,775pu\Omega$$

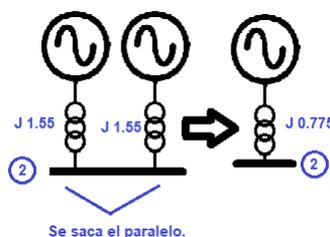


Figura 31: Impedancia equivalente de la planta B.

5.- Pasamos con las líneas de transmisión de 50Km, aquí vamos a ocupar la ecuación (2.1) y (2.5), como las dos líneas son del mismo valor óhmico y la misma distancia, las ecuaciones solo las realizamos una vez, teniendo la impedancia en pu, sacamos el paralelo de las dos líneas  $Z_{Lineas}$ .

\*NOTA: Hay que sacar la reactancia de la línea total por los 50 Km, ya que los 0.4 ohms son por Km.

$$XL = (0,4\Omega/Km)(50Km) = J20\Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{115KV^2}{100MVA} = 132,25\Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J20\Omega}{132,25\Omega} = J0,1512pu\Omega$$

$$Z_{Lineas} = \frac{(J0,1512)(J0,1512)}{J0,1512+J0,1512} = J0,0756pu\Omega$$

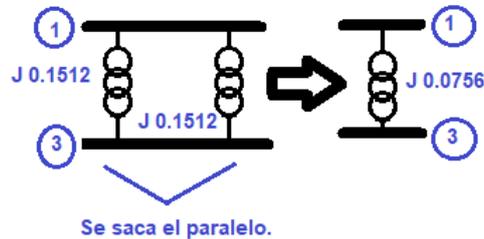


Figura 32: Impedancia equivalente de líneas de transmisión de 50 Km.

6.-Para la línea de transmisión de 30 Km, repetimos el paso 5 solo que aquí ya no se saca el paralelo porque es una sola línea.

$$XL = (0,4\Omega/Km)(30Km) = J12\Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{115KV^2}{100MVA} = 132,25\Omega$$

$$Z_{L30} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J12\Omega}{132,25\Omega} = J0,090pu\Omega$$

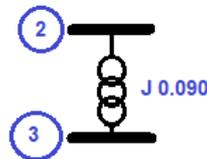


Figura 33: Impedancia de la línea de transmisión de 30 Km.

7.-Para los dos transformadores de 16 MVA y el de 20 MVA, sacamos su impedancias en por unidad con sus nuevas bases, y al sacar las impedancias equivalentes de los tres transformadores  $Z_{eqT}$ , y en La figura (34) vamos a ver el diagrama de impedancias de cada transformador y su equivalente.

$$Z_{puN} = (J0,091\Omega) \left(\frac{115kv}{115kv}\right)^2 \left(\frac{100MVA}{16MVA}\right) = J0,5625pu\Omega$$

$$Z_{puN} = (J0,09\Omega) \left(\frac{115kv}{115kv}\right)^2 \left(\frac{100MVA}{20MVA}\right) = J0,45pu\Omega$$

$$Z_{eqT} = \frac{1}{(1/J0,5625)+(1/J0,5625)+(1/J0,45)} = J0,1730pu\Omega$$

8.-Para las líneas de transmisión de 25 Km, repetimos igual el paso 6, utilizando las mismas ecuaciones, figura (35).

$$XL = (0,36\Omega/Km)(25Km) = J9\Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{24KV^2}{100MVA} = 5,76\Omega$$

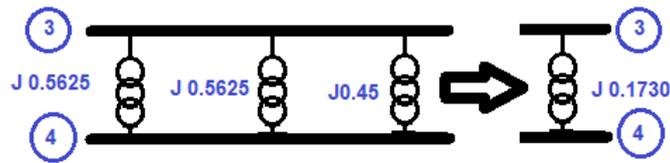


Figura 34: Impedancias equivalentes de transformadores de entre buses 3 y 4.

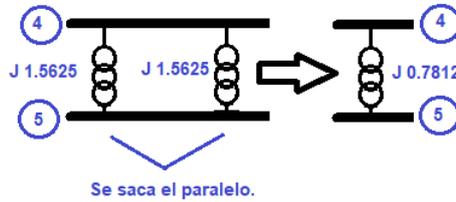


Figura 35: Impedancias equivalentes de líneas de transmisión de entre buses 4 y 5.

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J9\Omega}{5,76\Omega} = J1,5625pu\Omega$$

$$Z_{Lineas45} = \frac{(J1,5625)(J1,5625)}{J1,5625+J1,5625} = J0,7812pu\Omega$$

9.-Ya terminando de sacar todas las impedancias equivalentes del sistema, pasaremos a realizar el diagrama equivalente de secuencia (+).

Después lo siguiente sera reducir el diagrama de de thevenin, jugando de nuevo con serie y paralelo de circuitos, no olvidemos colocar la fuente de thevenin en donde se encuentra la falla trifásica.

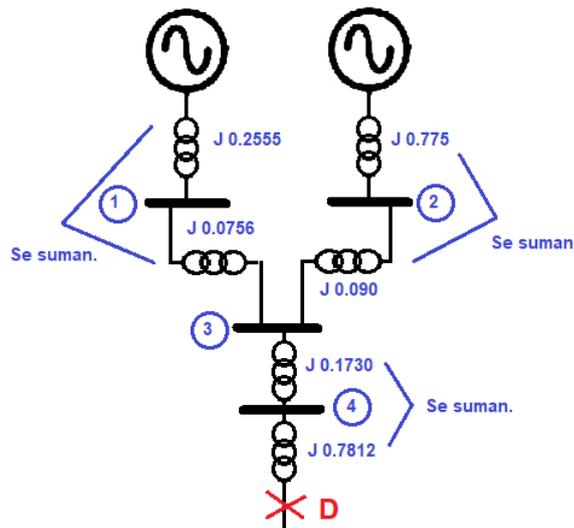


Figura 36: Diagrama de secuencia (+), de impedancias equivalentes.

Las operaciones de la reducción del circuito de thevenin:

$$Z_{plantaALineas} = Z_{plantaA} + Z_{Lineas} = J0,2555 + J0,0756 = J0,3311pu\Omega$$

$$Z_{plantaBL30} = Z_{plantaB} + Z_{L30} = J0,775 + J0,090 = J0,8657pu\Omega$$

$$Z_{eqTLineas45} = Z_{eqT} + Z_{Lineas45} = J0,1730 + J0,7812 = J0,9542pu\Omega$$

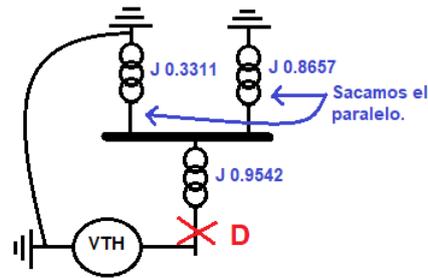


Figura 37: Reducción de circuito de thevenin.

$$Z_{eq1} = \frac{(J0,3311)(J0,8657)}{J0,3311+J0,8657} = J0,2394pu\Omega$$

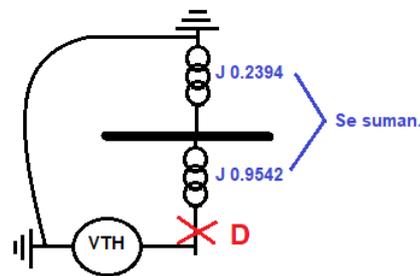


Figura 38: Reducción de circuito de thevenin.

10.-Ya que reducimos completo el circuito de thevenin, teniendo la  $Z_{eq}$ , ya podemos calcular la corriente de falla trifásica de cortocircuito en el punto D.

$$Z_{eq} = Z_{eq1} + Z_{Lineas45} = J0,2394 + J0,9542 = J1,1936pu\Omega$$

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{eq}} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{J1,1936} = 0,8378 \angle -90^\circ puA$$

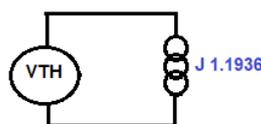


Figura 39: Impedancia equivalente de thevenin en la falla en el punto D.

\*EJEMPLO: Calcular la corriente de cortocircuito para una falla trifásica localizada en el bus de 480v, en una instalación industrial con los datos que se muestran. La corriente de cortocircuito en la acometida que proporciona CFE es de 3.2KA.

\*SOLUCIÓN. Lo primero sera calcular la potencia aparente de corto circuito del bus fallado, ya que tenemos la corriente de cortocircuito que proporciona CFE, podemos calcular la  $S_{cc}$ , como se muestra a continuación.

$$S_{cc} = (\sqrt{3})(V_{cc})(I_{cc}) = (\sqrt{3})(20KV)(3,2KA) = 110,85MVA$$

Enseguida de calcular la  $S_{cc}$ , usando la siguiente ecuación podemos calcular la  $S_{ccpu}$ , y por ultimo calculando este dato podemos calcular la  $Z_{sist}$ , la impedancia del sistema equivalente en donde queremos calcular la falla trifásica.

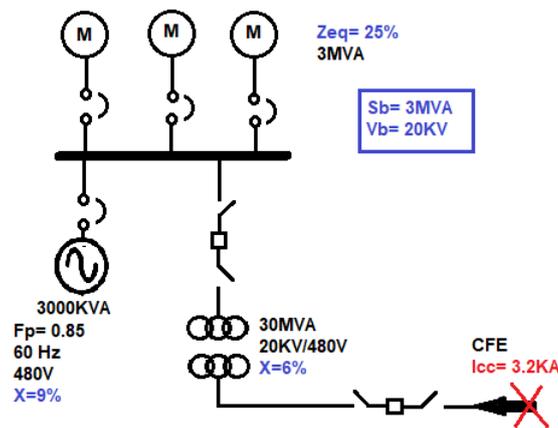


Figura 40: Diagrama unifilar, sistema eléctrico industrial.

$$S_{ccpu} = \frac{S_{cc}}{S_b} = \frac{110,85MVA}{3MVA} = 36,95puVA$$

$$Z_{sist} = \frac{1}{S_{ccpu}} = \frac{1}{36,95} = J0,0270pu\Omega$$

El diagrama de secuencia (+) y la reducción del circuito de thevenin quedarán como se muestran en las figuras siguientes.

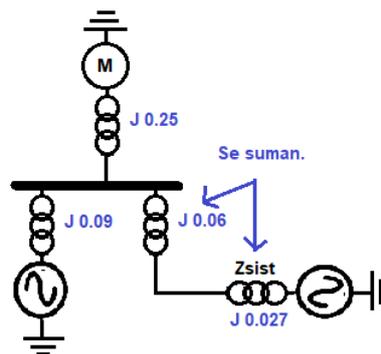


Figura 41: Diagrama de secuencia (+).

$$Z_{sistT} = Z_T + Z_{sist} = J0,06 + J0,027 = J0,087pu\Omega$$

Reduciendo el circuito de thevenin, como en los ejemplos anteriores no se debe olvidar de colocar la fuente de thevenin en el punto de falla.

Nuestro circuito equivalente de thevenin, al sumar las impedancias que se vieron en el diagrama de sec (+), figura anterior, las impedancias que quedan con respecto a la fuente de thevenin, figura (42), están en paralelo así que se saca ese cálculo como se muestra a continuación.

$$Z_{eq}^+ = \frac{1}{(1/J0,35) + (1/J0,09) + (1/J0,087)} = J0,03738pu\Omega$$

Una vez sacado la impedancia equivalente en el punto de falla, y haber hecho el diagrama de secuencia (+), y reducido el circuito de thevenin, procedemos a calcular la corriente de falla trifásica en por unidad, como se muestra a continuación.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{eq}} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{J0,03738} = 26,60 \angle -90^\circ puA$$

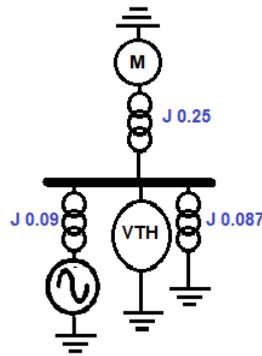


Figura 42: Reducción de circuito de thevenin.

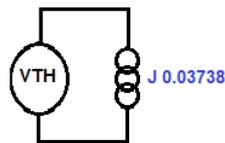


Figura 43: Circuito equivalente de thevenin y impedancia equivalente en el punto de falla.

### 5.1.1. MODELO DE ADMITANCIAS E IMPEDANCIAS Y LOS CÁLCULOS DE RED (FORMACIÓN DE $Y_{BUS}$ )

Para obtener la matriz de admitancias se debe de considerar lo siguiente:

- 1.-Los elementos de la diagonal principal se obtienen al sumar los recíprocos de las impedancias que concurren al nodo en cuestión.
- 2.-Los elementos fuera de la diagonal principal se obtienen con el inverso de la impedancia que este entre los buses multiplicándose por -1.

\*EJEMPLO: Obtenga la matriz  $Y_{BUS}$ , del siguiente sistema y obtenga la  $Z_{bus}$ .

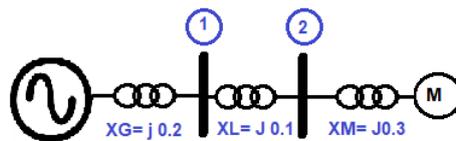


Figura 44: Diagrama de sistema de potencia a analizar.

\*NOTA: Hay que tener en cuenta que la letra (Y) significa admitancia que es el inverso de la impedancia (Z), los subíndices en la admitancia ( $Y_{11}$ ), significan el numero de nodos, en este caso (1,1), significa que es todas las admitancias que llegan al nodo 1, cuando es ( $Y_{12}$ ), quiere decir que es la admitancia que va del nodo 1 al nodo 2, normalmente son líneas de transmisión, o transformadores, etc., Otro punto importante es que todos los elementos de la diagonal principal de la matriz  $Y_{BUS}$ , siempre serán negativos, osea  $Y_{11}, Y_{22}, \dots, Y_{nn}$ .

\*SOLUCIÓN.

$$Y_{11} = \frac{1}{XG} + \frac{1}{XL} = \frac{1}{j0,2} + \frac{1}{j0,1} = -j15$$

$$Y_{22} = \frac{1}{XL} + \frac{1}{XM} = \frac{1}{j0,1} + \frac{1}{j0,3} = -j13,333$$

$$Y_{12} = Y_{21} = (-1) \frac{1}{j0,1} = j10$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} -J15 & J10 \\ J10 & -J13,333 \end{bmatrix}$$

Para poder calcular la  $Z_{BUS}$ , podemos utilizar un software matemático como matlab o maple, lo único que hay que realizar es una inversa de matriz en este caso sabemos que  $Z_{BUS} = \frac{1}{Y_{BUS}} = Y_{BUS}^{-1}$ , con esta ecuación podemos calcular la inversa de  $Y_{BUS}$ , para obtener  $Z_{BUS}$ , el resultado será el siguiente.

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} J0,1333 & J0,10 \\ J0,10 & J0,15 \end{bmatrix}$$

## 5.2. CALCULO DE FALLAS TRIFÁSICAS POR MÉTODO DE $Y_{BUS}$ Y $Z_{BUS}$ .

Para este tipo de fallas se utiliza la red de secuencia (+), que consiste en la representación por los elementos por su impedancia en circuitos simplificados. En esta falla los voltajes y corrientes son iguales en cada una de las fases (simétricas).

La corriente de cortocircuito trifásica subtransitoria, recordemos que subtransitorio es la corriente de falla que se presenta en los primeros 3 ciclos y tratándose de que es trifásica es la más agresiva, se calcula de igual manera que el método de Thevenin solo que aquí la impedancia equivalente la calculamos por el método de admitancias e impedancias.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} \dots \dots \dots (2.8)$$

Donde:

$V_f$  = Voltaje pre falla (voltaje plano  $1,0 < 0^\circ puV$ ).

$Z_{KK}^+$  = Impedancia de cualquier elemento de la  $Z_{BUS}$  las letras KK representan el número de bus o nodo fallado y el signo (+), se refiere a que pertenece a la red de secuencia (+).

\*EJEMPLO: Sea el siguiente sistema determine:

- La  $Y_{BUS}$  del sistema.
- La  $Z_{BUS}$  del sistema.
- Calcular las corrientes trifásicas de cortocircuito de los tres nodos.

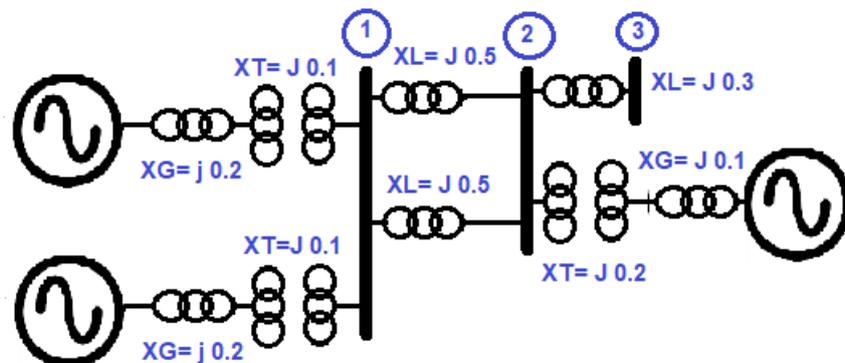


Figura 45: Diagrama de sistema eléctrico de potencia, con impedancias en pu.

\*SOLUCIÓN.

- Sacamos todas las admitancias que llegan a los nodos y las que salen de un nodo para ir a otro, hay que sumar las impedancias de los generadores con la de los transformadores de potencia, ya que están en serie,  $XG + XT = J0,2 + J0,1 = J0,3$ .

$$Y_{11} = \frac{1}{XG+XT} + \frac{1}{XG+XT} + \frac{1}{XL} + \frac{1}{XL} = \frac{1}{j0,3} + \frac{1}{j0,3} + \frac{1}{j0,5} + \frac{1}{j0,5} = -j10,666$$

$$Y_{22} = \frac{1}{XL} + \frac{1}{XL} + \frac{1}{XG+XT} + \frac{1}{XL} = \frac{1}{j0,5} + \frac{1}{j0,5} + \frac{1}{j0,3} + \frac{1}{j0,3} = -j10,666$$

$$Y_{33} = \frac{1}{XL} = \frac{1}{j0,3} = -j3,333$$

$$Y_{21} = \frac{-1}{XL} + \frac{-1}{XL} = \frac{-1}{j0,5} + \frac{-1}{j0,5} = j4$$

$$Y_{23} = \frac{-1}{XL} = \frac{-1}{j0,3} = j3,333$$

$$Y_{31} = 0$$

Ya calculando todas las admitancias, procedemos a armar nuestra  $Y_{BUS}$ .

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} -j10,666 & j4 & 0 \\ j4 & -j10,666 & j3,333 \\ 0 & j3,333 & -j3,333 \end{bmatrix}$$

b).-Habiendo armado nuestra  $Y_{BUS}$ , procedemos a calcular con nuestro software matemático como matlab o maple, sacamos la inversa y los resultados sera nuestra  $Z_{BUS}$ .

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} j0,1178 & j0,0643 & j0,0643 \\ j0,0643 & j0,1715 & j0,1715 \\ j0,0643 & j0,1715 & j0,4718 \end{bmatrix}$$

c).- Con la  $Z_{BUS}$ , ya podemos calcular las corrientes de cortocircuito trifásicas de los tres nodos.

Para el bus numero 3.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{j0,4718} = 2,1195 \angle -90^\circ puA$$

Para el bus numero 2.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{j0,1715} = 5,83 \angle -90^\circ puA$$

Para el bus numero 1.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{j0,1178} = 8,48 \angle -90^\circ puA$$

\*EJEMPLO: Sea el siguiente sistema eléctrico de potencia determine, la corriente de corto circuito trifásica en el bus 1 y 4.

\*SOLUCIÓN.

1.- La figura anterior vemos que cada elemento del sistema eléctrico de potencia, tiene sus reactancias o impedancias, y no estan en por ciento entonces con estos valores podemos calcular, con las ecuaciones de impedancias en pu en sus valores nuevos  $Z_{puN}$ ,  $Z_{pu}$  y  $Z_b$ , para calcular cada impedancia de cada elemento con su nuevo valor de impedancia, los datos base del sistema son  $S_b = 100MVA$  y el  $V_b$  dependerá del nivel de tension en el cual se encuentre el elemento a calcular.

Para el generador 1 (G1):

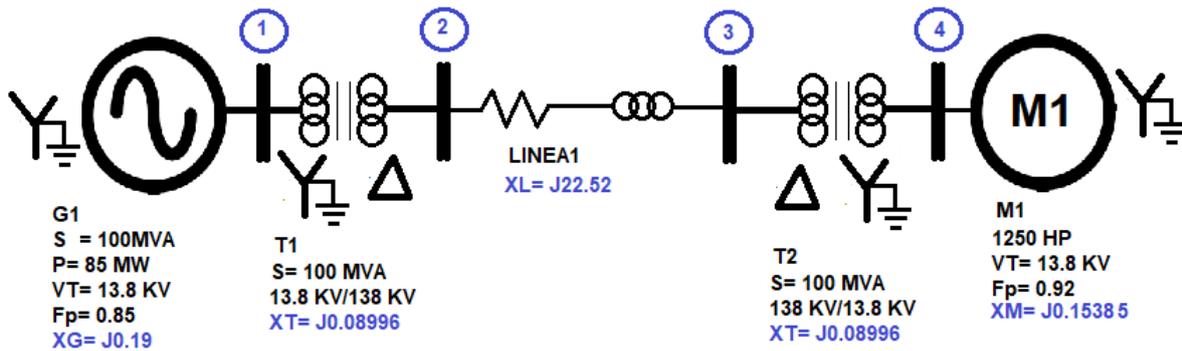


Figura 46: Diagrama unifilar de sistema eléctrico de potencia, con datos de elementos del sistema.

$$Z_{puN} = (J0,19\Omega) \left( \frac{13,8kv}{13,8kv} \right)^2 \left( \frac{100MVA}{100MVA} \right) = J0,19pu\Omega$$

Para el transformador 1 y 2 (T1,T2), se calcularán los dos a la vez ya que manejan los mismos valores base y los mismos datos de impedancias.

$$Z_{puN} = (J0,08996\Omega) \left( \frac{13,8kv}{13,8kv} \right)^2 \left( \frac{100MVA}{100MVA} \right) = J0,08996pu\Omega$$

Para la línea de transmisión (LINEA1).

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{138KV^2}{100MVA} = 190,44\Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_b} = \frac{J22,52\Omega}{190,44\Omega} = J0,118294pu\Omega$$

Para el motor sincrónico 1 (M1), calculamos primero su potencia activa que consume, después con ese cálculo calculamos la potencia aparente (S) que es la que necesitamos para poder calcular la impedancia con sus nuevos valores base.

$$P = HP * \frac{0,746W}{1HP} = 1250HP * \frac{0,746W}{1HP} = 0,9325MW$$

$$S = \frac{P}{F_p} = \frac{0,9325MW}{0,92} = 1,0085MVA$$

$$Z_{puN} = (J0,15385\Omega) \left( \frac{13,8kv}{13,8kv} \right)^2 \left( \frac{100MVA}{1,0085MVA} \right) = J15,25pu\Omega$$

Con los cálculos de las impedancias en sus nuevas bases, procedemos a realizar el diagrama de secuencia (+), con los valores de las impedancias.

El siguiente paso es calcular las admitancias y formar la  $Y_{BUS}$ .

\*NOTA: Viendo el diagrama de secuencia (+), entre los buses 1 y 4, las impedancias de  $XT1$ ,  $XL$ ,  $XT2$ , las sumamos  $X_{eq} = XT1 + XL + XT2 = J0,08996 + J0,1182 + J0,08996 = J0,2982$  ya que están en serie, y ya que se busca calcular las fallas en los buses 1 y 4.

$$Y_{11} = \frac{1}{X_G} + \frac{1}{X_{eq}} = \frac{1}{J0,19} + \frac{1}{J0,2982} = -J8,6164$$

$$Y_{22} = \frac{1}{X_{eq}} + \frac{1}{X_M} = \frac{1}{J0,2982} + \frac{1}{J15,25} = -J3,4188$$

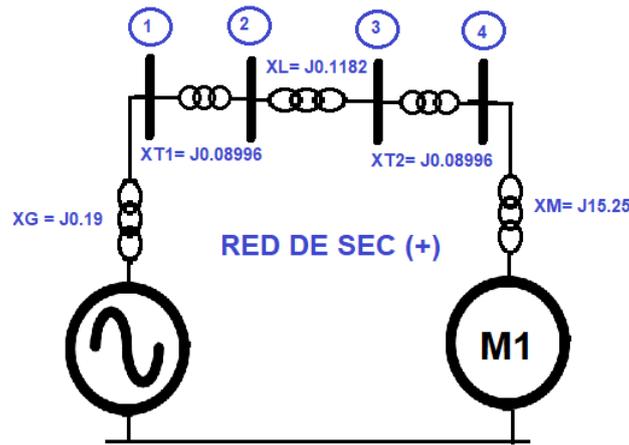


Figura 47: Diagrama de secuencia (+), con impedancias en sus nuevas base.

$$Y_{12} = \frac{-1}{X_{eq}} = \frac{-1}{J0,2982} = J3,3532$$

La matriz de admitancias quedara de la siguiente manera.

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} -J8,6164 & J3,3532 \\ J3,3532 & -J3,4188 \end{bmatrix}$$

\*NOTA: La matriz de admitancias como se observa es de 2x2, no de 4x4, aunque debería de ser de 4x4, ya que el sistema eléctrico de potencia es de 4 nodos, solo que con fines de evitar hacer mas operaciones ya que en el problema solo se piden las fallas en el bus 1 y 4, los buses 2 y 3 se eliminaron con la suma de impedancias de  $XT1$ ,  $XL$ ,  $XT2$ , es por eso que la matriz de admitancias quedo de 2x2, al invertir la matriz y sacar la  $Z_{BUS}$ , el elemento  $Z_{22}$ , representara el nodo 4.

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} J0,18770 & J0,18410 \\ J0,18410 & J0,47307 \end{bmatrix}$$

Ya con nuestra matriz  $Z_{BUS}$ , podemos pasar a calcular las corrientes de cortocircuito trifásicas en los buses o nodos que se piden que son 1 y 4.

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{J0,18770} = 5,3274 \angle -90^\circ \text{ puA}$$

Para saber la corriente de corto circuito trifásica real ya que la que calculamos esta en por unidad, calculamos la  $I_b$ , esta corriente base que calcularemos es la misma para ambos cálculos de falla tanto en el bus 1 y 4.

$$I_b = \frac{S_b}{(\sqrt{3})(V_b)} = \frac{100 \text{ MVA}}{(\sqrt{3})(13,8 \text{ KV})} = 4183,69 \text{ A}$$

Decimos que la corriente de falla trifásica real del bus 1 es:

$$I_{freal} = (I_{fpu})(I_b) = (5,3274 \angle -90^\circ \text{ puA})(4183,69 \text{ A}) = 22,28 \text{ KA}$$

Para el bus 4, la corriente de cortocircuito trifásica queda como sigue:

$$I_f^+ = \frac{V_f}{Z_{KK}^+} = \frac{1,0 \angle 0^\circ}{J0,47307} = 2,1138 \angle -90^\circ \text{ puA}$$

Y la corriente de falla trifásica real del bus 4 es:

$$I_{freal} = (I_{fpu})(I_b) = (2,1138 \angle -90^\circ \text{ puA})(4183,69 \text{ A}) = 8,843 \text{ KA}$$