



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

VISTO BUENO DE IMPRESIÓN DE TESIS

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Departamento de Titulación
Presente

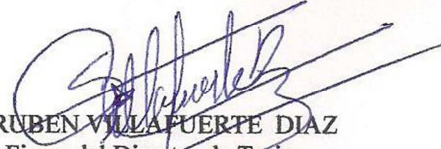
Por medio de la presente me permito comunicarle que con ésta fecha, estoy otorgando a El C. **ASCENCIO ZEFERINO EDGAR** Alumno de esta Facultad el Vo. Bo. De impresión de El trabajo recepcional titulado **"CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA DE LABORATORIO"** En la Modalidad de **MONOGRAFIA**

Que desarrollo para optar por el grado de Ingeniero Mecánico Electricista.

Asimismo estoy manifestando que dicho trabajo recepcional cumple con los requisitos académicos para la sustentación de la réplica profesional en esta facultad.

Atentamente

Cd. Mendoza., Ver a 22/06/12


DR. RUBÉN VILLAFUERTE DÍAZ
Firma del Director de Tesis

Secretario ING. VICTOR M. HERNANDEZ PAREDES

Vocal ING. LEOCADIO ROLANDO VERA ESCOBAR

Suplente ING. JENARO A. GONZALEZ CUEVAS

HOJA DE DATOS DEL JURADO

Director. Dr. Rubén Villafuerte Díaz

Integrante de la academia de electricidad

Perfil profesional: Ciencias de la ingeniería eléctrica

Grado máximo de estudios. Doctorado.

Secretario. Ing. Víctor Manuel Hernández Paredes

Integrante de la academia de electricidad

Perfil profesional: Ciencias de la ingeniería eléctrica

Grado máximo de estudios. Ingeniería.

Vocal. Ing. Leocadio Rolando Vera Escobar

Integrante de la academia de electricidad

Perfil profesional: Ciencias de la ingeniería eléctrica

Grado máximo de estudios. Ingeniería.

Secretario. Ing. Genaro A Gonzales Cuevas

Integrante de la academia de electricidad

Perfil profesional: Ciencias de la ingeniería eléctrica

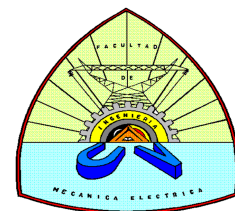
Grado máximo de estudios. Ingeniería.



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

CD. MENDOZA VER.



**TRABAJO QUE ACREDITA LA EXPERIENCIA
RECEPCIONAL DE LA CARRERA.**

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA.

TITULO DEL TEMA.

**CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO
CIRCUITO EN UN SISTEMA DE LABORATORIO**

**MODALIDAD
MONOGRAFIA:**

**PRESENTA.
ASCENCIO ZEFERINO EDGAR**

**ASESOR.
DR. RUBEN VILLAFUERTE DIAZ.**

MATRICULA:

S08002222.

CD. MENDOZA, VER. AGOSTO 2012

Agradecimientos

El autor de este trabajo agradece al Dr. Rubén Villafuerte Díaz, asesor de proyecto, quien con su valiosa ayuda, conocimiento e incentivo me ayudo a terminar este trabajo.

A todas las personas que directa o indirectamente colaboraron para la culminación de este trabajo.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos que tanto me han apoyado en la culminación de mi carrea, así como a mis profesores de la carrea que estuvieron presentes durante mi formación académica, y en especial a mi padre que tanto me apoyo y oriento hasta sus últimos pasos, principalmente por el pude terminar mi carrera..

INDICE GENERAL

INTRODUCCION	1
--------------------	---

Capítulo I

IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

1.1 Origen de los cortocircuitos	3
1.1.1 Tipos de fallas por cortocircuitos en sistemas de potencia	3
1.2 Fallas asimétricas	5
1.3 Mallas de secuencia	6
1.4 Consecuencias de los cortocircuitos	8
1.5 Características de la corriente de cortocircuito	10
1.6 Componente de corriente continua.	13
1.7 fuentes que contribuyen a la falla.	16
1.7.1 Empresa eléctrica.	16
1.7.2 Generador sincrónico.	16
1.7.3 Motores y condensadores sincrónicos.	17
1.7.4 Motores de inducción.	18
1.8 Cálculo de las corrientes de cortocircuito	18
1.8.1 Diagrama Unifilar	18
1.8.2 Diagrama de impedancias	19
1.8.3 Sistema Por Unidad	21

1.9 Métodos para el cálculo de corrientes de cortocircuito.....	23
1.9.1 La matriz de impedancias de barra en los cálculos de cortocircuito.....	24
1.9.2 Método de componentes simétricos.....	26
1.9.3 Cálculo de corrientes de cortocircuito asimétricas utilizando el método de componentes simétricos.....	29
1.10 Armónicos en los sistemas eléctricos de potencia	30
1.11 Coordinación de protecciones	34
1.11.1 Descripción de algunos equipos para protección de sobrecorrientes en sistemas de baja tensión	35
1.11.2 Fusibles limitadores:	36
1.11.3 Interruptores termomagnéticos (breakers, interruptores de caja moldeada):	36
1.11.4 Interruptores de potencia con unidades de disparo (relés) de estado sólido:	37

Capítulo II

FALLAS SIMÉTRICAS

2.1 Fallas simétricas.....	40
2.2 Fenómenos transitorios en circuitos R-L serie	41
2.3 Cortocircuitos trifásicos en sistemas de potencia.....	44
2.4 Matriz de impedancias ybus	48

Capítulo III

Fallas asimétricas.

3.1 Representación del sistema	52
3.2 Falla simple de línea a tierra	55
3.3 Falla de línea a línea	58
3.4 Falla de doble línea a tierra	62
3.5 Matrices de impedancias de secuencia de bus	65

Capítulo IV

Desarrollo de prototipo, pruebas y resultados

4.1 Desarrollo del proyecto:	70
4.2 cálculo y medición de las características de cada bobina.	73
4.2.1 Cálculo de resistencias.....	73
4.2.2 Cálculo de impedancias.	74
4.3 conexión de los elementos del tablero.	74
4.4 Cálculo de matriz de admitancias ybus	74
4.5 cálculo de Zbus del circuito desarrollado.	76
4.6 considerando la red de 4 nodos	77
4.7 cálculo de los voltajes de estado permanente.	80
4.8 cálculo de las corrientes en el circuito con carga.	81

4.9 simulación de fallas en los nodos.	83
4.10 pruebas al tablero.....	89
Conclusiones.....	91
Recomendaciones y/o sugerencias,	94
Bibliografía,	95

INDICE DE FIGURAS.

CAPITULO 1

1.1.1 Tipos de fallas	4
1.2.1 Componentes de secuencias	6
1.3.1 Circuitos equivalentes de secuencia cero para transformadores trifásicos. ...	8
1.5.1 Efecto de asimetría en la corriente de cortocircuito	12
1.5.2 Corrientes de cortocircuito simétricas de algunas fuentes	13
1.6.1 Circuito inductivo excitado por una fuente sinusoidal	14
1.7.1 circuito equivalente del generador síncrono.....	17

CAPITULO 2

2.1.1 circuito RL y grafica de comportamiento en el tiempo.....	41
2.2.1 Diagrama unifilar de un generador síncrono que alimenta a un motor síncrono.....	45
2.3.1 Aplicación de la superposición a un Cortocircuito trifásico en un sistema de potencia	46

CAPITULO 3

3.1.1 bus trifásico general.	53
3.1.2 Redes de secuencia en un bus trifásico general en un sistema balanceado	53
3.2.1 Falta simple línea a tierra	54
3.3.1 Falla de línea a línea	58

3.4.1 Falla de doble línea a tierra	62
3.5.1 Conexión de equivalencias de rastrillo de redes de secuencia para fallas de un sistema trifásico (no se muestran impedancias mutuas).....	65

CAPITULO 4

4.1.1 vista frontal del tablero.	69
4.1.2 detalles de medidas de los accesorios.	70
4.1.3 vista isométrica frontal.....	70
4.1.4 ubicación y distribución de bobinas	71
4.1.5 vista isométrica del tablero terminado	72
4.2.1 circuito del tablero a realizar	74
4.6.1 reducción de circuito eléctrico	78
4.6.2 circuito equivalente.....	78
4.10.1 representaciones de pruebas al prototipo.	90

ÍNDICE DE TABLAS.

1.1.1 promedios de ocurrencia de fallas.....	5
2.1.1 corrientes de cortocircuito R-L en serie.	44
4.2.1 cálculo de resistencias	73
4.2.2 obtención de reactancia inductiva e impedancia	73

Resumen.

Este trabajo abarca sobre la importancia del análisis y estudio de corto circuito.

El capítulo 1 comprende las principales características que originan las fallas, así como los tipos de fallas que suelen presentarse en un sistema eléctrico, además comprende las características que presenta cada una de ellas, así como los efectos que ocasionan dentro de la red eléctrica y las formas en que se pueden calcular los parámetros eléctricos involucrados.

El capítulo 2 se presenta un enfoque a la solución del estudio de las fallas simétricas analizando las características principales que generan en los sistemas eléctricos de potencia.

El capítulo 3 comprende la parte de fallas asimétricas, estas se representan dependiendo las causas u orígenes de los problemas que se generar analizando cada caso presentado, se observará las características que se presentan bajo las condiciones de operación normal y en condiciones de falla.

El capítulo 4 se analiza la implementación de un sistema eléctrico de laboratorio en el cual se realizan pruebas de estado permanente y en condiciones de falla para cada nodo del sistema eléctrico, ayudando a facilitar la comprensión del comportamiento de los sistemas de gran escala.

INTRODUCCION

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos de potencia, requiere de acuciosos estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Estudios típicos que se realizan son: flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de cortocircuito, etc. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio en que se incluye la selección de voltaje, adecuado tamaño del equipamiento y selección apropiada de protecciones.

La mayoría de los estudios necesita de un complejo y detallado modelo que represente al sistema de potencia, generalmente establecido en la etapa de proyecto. Los estudios de cortocircuito son típicos ejemplos de éstos, siendo esencial para la selección de equipos, y el ajuste de sus respectivas protecciones.

La duración del cortocircuito es el tiempo en segundos o ciclos durante el cual, la corriente de cortocircuito circula por el sistema. El fuerte incremento de calor generado por tal magnitud de corriente, puede destruir o envejecer los aislantes del sistema eléctrico, por lo tanto, es de vital importancia reducir este tiempo al mínimo mediante el uso de las protecciones adecuadas.

Los resultados obtenidos del cálculo de cortocircuito son:

La corriente en los diferentes componentes del sistema.

Las tensiones después de la falla en todas las barras del sistema eléctrico.

En el cálculo de cortocircuito es conveniente efectuar las siguientes aproximaciones:

El generador se modela por una fuente de tensión de valor 1.0 en p.u, en serie con su impedancia.

Todos los cálculos se realizan en por unidad.

Las cargas se representan por su impedancia equivalente, independiente de la tensión.

El sistema eléctrico se analiza como si estuviera en régimen estable.

Capítulo 1

Importancia del estudio de corto circuito.

1.1 ORIGEN DE LOS CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos tienen distintos orígenes:

- Por deterioro o perforación del aislamiento: debido a calentamientos excesivos prolongados, ambiente corrosivo o envejecimiento natural.
- Por problemas mecánicos: rotura de conductores o aisladores por objetos extraños o animales, ramas de árboles en líneas aéreas e impactos en cables subterráneos.
- Por sobretensiones debido a descargas atmosféricas, maniobras o a defectos.
- Por factores humanos: falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.
- Otras causas: vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

1.1.1 TIPOS DE FALLAS POR CORTOCIRCUITOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

Se produce un cortocircuito en un sistema de potencia, cuando entran en contacto, entre sí o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases. Normalmente las corrientes de cortocircuito son muy elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla. Los cortocircuitos se pueden clasificar en simétricas (balanceadas) y asimétricas (desbalanceadas). En las fallas simétricas la corriente de las tres fases del sistema son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

- Cortocircuito trifásico: Se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el cortocircuito más severo en la mayoría de los casos.
- Cortocircuito trifásico a tierra: Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema.

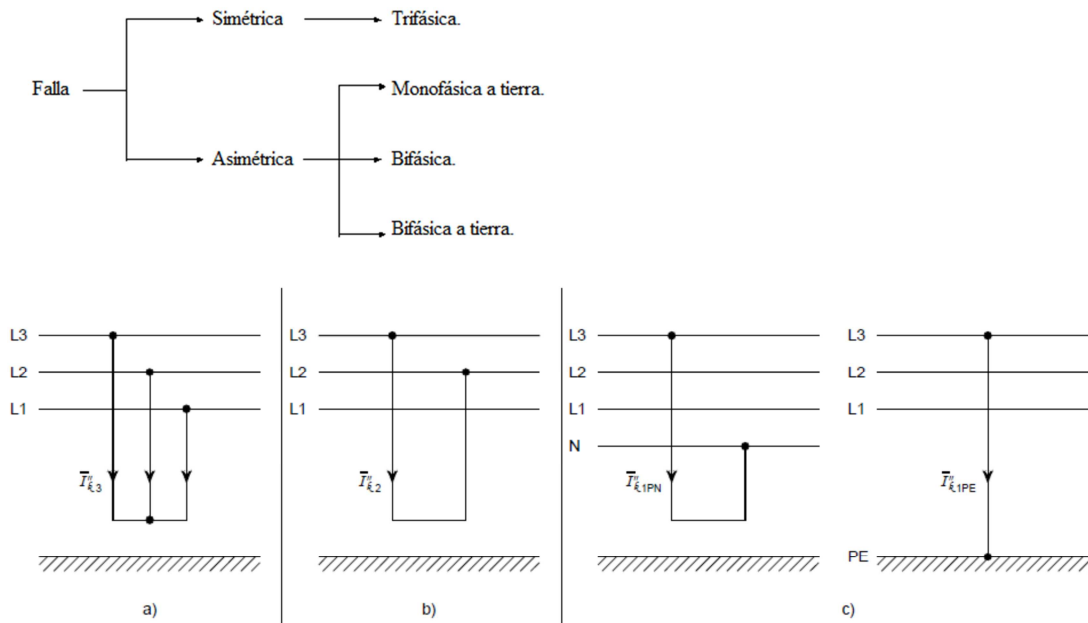
En las fallas asimétricas la corriente en las tres fases del sistema no son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

-Cortocircuito bifásico (fase a fase): Entran en contacto dos fases cualquiera del sistema.

-Cortocircuito bifásico a tierra (dos fases a tierra): Entran en contacto dos fases cualquiera y la tierra del sistema.

-Cortocircuito monofásico (fase a tierra): Ocurre al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema. Es el cortocircuito más frecuente.

Un cortocircuito se manifiesta por la disminución repentina de la impedancia de un circuito determinado, lo que produce un aumento de la corriente. En sistemas eléctricos trifásicos se pueden producir distintos tipos de fallas, las cuales son:



1.1.1 tipos de fallas

a) cortocircuito trifásico equilibrado.

- b) cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).
- c) cortocircuito monofásico fase-tierra y fase-neutro.

Los porcentajes promedios de ocurrencia de cada tipo de cortocircuito en una Instalación, se indican en la tabla siguiente:

Tipos de cortocircuitos	Incidencia %
Monofásicos	80%
Bifásicos	15%
trifásicos	5%

1.1.1 promedios de ocurrencia de fallas

Cada una de estas fallas genera una corriente de amplitud definida y características específicas. La razón de llamarse fallas asimétricas es debido a que las corrientes post-falla son diferentes en magnitudes y no están desfasadas en 120 grados. En el estudio de éstas corrientes, se utiliza generalmente el método de componentes simétricas, el cual constituye una importante herramienta para analizar sistemas desequilibrados.

En sistemas de distribución, para los efectos de evaluar las máximas corrientes de fallas, sólo se calculan las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico

Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud pueden superar a la corriente de falla trifásica. Sin embargo, esto es más frecuente que ocurra en sistemas de transmisión o de distribución en media tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación. Es poco frecuente que la corriente de falla monofásica supere en amplitud la corriente generada por una falla trifásica. La magnitud de la falla monofásica puede superar a la generada por una falla trifásica en el mismo punto, en el caso de que la falla no involucre la malla de tierra

1.2 FALLAS ASIMETRICAS.

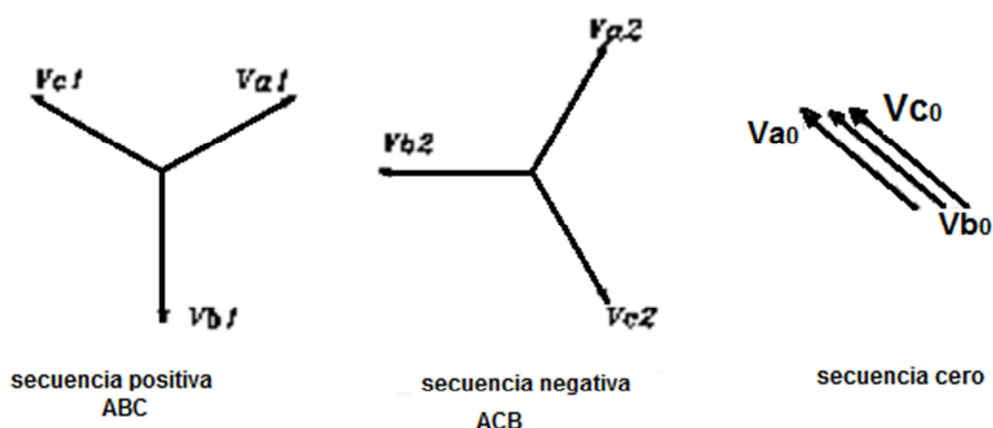
De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados. Los conjuntos balanceados de componentes son:

Componentes de secuencia positiva: están formados por tres fasores de igual módulo, desfasados en 120° que giran con secuencia positiva (ABC), igual al sistema principal.

Componentes de secuencia negativa: están formados por tres fasores de igual módulo, desfasados en 120° que giran con secuencia negativa (ACB), contrario al sistema principal.

Componentes de secuencia cero: están formados por tres vectores de igual módulo, pero en fase.

En la figura 2 se muestran los tres sistemas equilibrados



1.2.1 componentes de secuencias

1.3 MALLAS DE SECUENCIA.

Debido a que los componentes de un sistema de potencia operando en condiciones normales, generan solamente componentes de secuencia positiva. Debe considerarse que para que existan corrientes de secuencia cero el neutro debe estar conectado a tierra.

Se deben establecer circuitos equivalentes monofásicos de secuencia cero, positiva y negativa, para impedancias de carga, transformadores, líneas de transmisión y máquinas que constituyen las partes principales de la red trifásica de transmisión de potencia. Se supone que cada parte individual es lineal, cuando

se conecta en las configuraciones Y o Δ . Con base en estas suposiciones, se encuentra que:

En cualquier parte de la red, la caída de voltaje originada por la corriente de una cierta secuencia solo depende de la impedancia de esa parte de la red al flujo de corriente de esa secuencia.

La impedancia a las corrientes de secuencia positiva y negativa, Z_1 y Z_2 , son iguales en cualquier circuito pasivo y se pueden considerar aproximadamente iguales en máquinas sincrónicas bajo condiciones subtransitorias.

Solamente los circuitos de secuencia positiva de las máquinas rotatorias contienen fuentes que son de voltajes de secuencia positiva.

El neutro es la referencia para los voltajes de los circuitos de secuencia positiva y negativa, y estos voltajes al neutro son iguales a tierra, si hay una conexión física de impedancia cero u otra de valor finito entre el neutro y tierra del circuito real.

No fluyen corrientes de secuencia positiva o negativa entre los puntos neutros y de tierra.

No se incluyen las impedancias Z_n en las conexiones físicas entre el neutro y la tierra en los circuitos de secuencia positivo y negativa, pero se representan por las impedancias $3Z_n$, entre el neutro y la tierra en los circuitos de secuencia cero.

Los circuitos equivalentes de secuencia cero para transformadores trifásicos en diagramas unifilares, se muestran en la figura 3

similar	Circuito equivalente de secuencia cero

1.3.1 Circuitos equivalentes de secuencia cero para transformadores trifásicos.

1.4 CONSECUENCIAS DE LOS CORTOCIRCUITOS

Las consecuencias de los cortocircuitos son variables dependiendo de la naturaleza y duración de los defectos, el punto de la instalación afectado y la magnitud de las corrientes.

En general podemos considerar algunos de los siguientes efectos:

- En el punto de defecto: la presencia de arcos con deterioro de los aislantes, fusión de los conductores, principio de incendio y riesgo para las personas.
- Para el circuito o equipo defectuoso:
 - Esfuerzos electrodinámicos, con deformación de los juegos de barras, deslumbramiento de los cables, rotura de aisladores, averías en bobinados de transformadores o máquinas eléctricas rotativas.
 - Esfuerzo térmicos, con sobrecalentamientos con riesgo de deterioros de los aislantes.
- Para el resto de la instalación: disminución de la tensión durante el tiempo de eliminación del defecto (en BT 10 a 100 ms), puesta fuera de servicio de una parte de la instalación, perturbaciones en los circuitos de control y comunicaciones.

Los cortocircuitos presentan fundamentalmente efectos térmicos y electrodinámicos.

Los efectos térmicos dependen de la energía liberada por efecto Joule y vienen Determinados por la expresión:

$$E_T = \int R \cdot i^2 dt$$

1.4.1

Este punto se estudiará en el tema Canalizaciones Eléctrica.

El esfuerzo electrodinámico, entre conductores paralelos y rectilíneos separados una distancia d y recorridos por una corriente I , viene determinado por la Ley de Biot y Savart:

$$F = \mu\mu_o \frac{I^2}{2\pi d} L$$

1.4.2

En el caso de una corriente alterna, la fuerza máxima entre conductores será Proporcional al cuadrado de la corriente máxima de cortocircuito:

I_s , corriente de cresta máxima

L , longitud entre apoyos del conductor

d , distancia entre conductores

1.5 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

El proceso que ocurre en el sistema de potencia al producirse una falla causada por un cortocircuito es esencialmente de carácter transitorio. La corriente en régimen normal es una onda sinusoidal a 60 herz de frecuencia y amplitud constante, no así cuando sucede un cortocircuito. La forma de onda en este caso sigue teniendo una forma sinusoidal a 60 herz pero va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario (ver figura 4, corriente total).

Para estudiar el sistema en este estado transitorio se divide el período de ocurrencia de la falla en una serie sucesiva de intervalos “casi estacionarios” los cuales son el período subtransitorio, transitorio y estacionario o permanente, y se aplica el concepto de impedancia para determinar la corriente correspondiente a cada uno de estos estados o intervalos.

La aplicación de el concepto de impedancia se ve plasmado en la asignación de impedancias variables con el tiempo a las máquinas rotativas las cuales son las fuentes de corriente de cortocircuito. En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus arrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias (X) asociadas a cada uno de los intervalos en los que se divide la falla:

1) La reactancia subtransitoria X_d'' que es la reactancia aparente del arrollado del estator en el instante del cortocircuito y determina el flujo de corriente en los primeros 30 ciclos (hasta $\frac{1}{2}$ segundo) aproximadamente.

2) La reactancia transitoria X' que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre $\frac{1}{2}$ y 2 segundos después de la ocurrencia del cortocircuito.

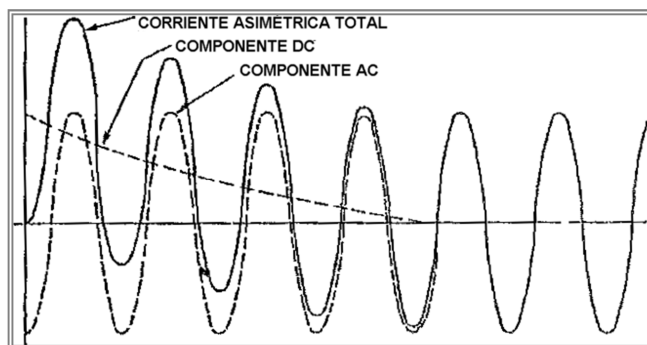
3) La reactancia sincrónica X_d , la cual determina el flujo de corriente cuando se establece el período estacionario.

Dependiendo de la magnitud y defasaje en el tiempo entre las ondas de tensión y corriente de un sistema en el instante del cortocircuito, la corriente de falla puede presentar características de asimetría (ver figura 4) con respecto al eje normal de la corriente; en general esto ocurre cuando la onda de tensión normal se encuentra en un valor distinto a su pico máximo en el momento de ocurrencia de la falla. Para producir la máxima asimetría el cortocircuito siempre debe ocurrir cuando la onda de tensión se encuentre pasando por cero (magnitud cero). En un sistema trifásico balanceado (con tres tensiones defasadas 120°), la máxima corriente asimétrica ocurre solamente en una de las fases del sistema (cualquiera de las tres).

La asimetría de la corriente de cortocircuito surge debido a que bajo las condiciones explicadas anteriormente, la corriente que fluye tiene dos componentes: el componente de corriente alterna (componente ac) y un componente de corriente directa (componente dc) tal como ocurre en los circuitos RL de corriente alterna. Este componente dc decrece a medida que pasa el tiempo ya que su energía se disipa en forma de calor por la resistencia del circuito (efecto Joule). Motivado a esto, la rata de decrecimiento es inversamente proporcional a la relación entre la resistencia y reactancia del circuito (X/R) (entre

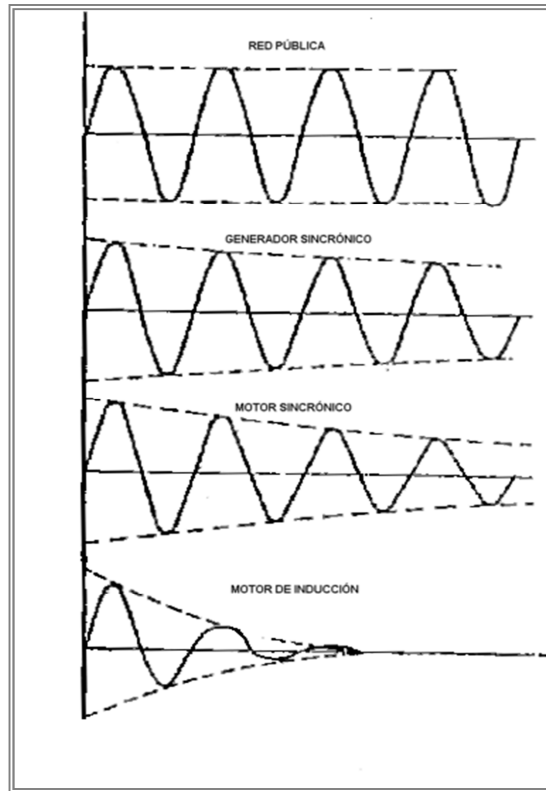
mas baja es la relación X/R , más rápido es el decrecimiento). Por ejemplo, en sistemas de baja tensión, la relación X/R generalmente es baja (menor a 15) por lo que la componente dc decae a cero en un rango entre 1 y 6 ciclos dependiendo del caso.

Como se observa en la figura 4, el valor máximo de la corriente asimétrica ocurre cerca del medio ciclo a partir del instante del cortocircuito.



1.5.1 Efecto de asimetría en la corriente de cortocircuito

Como se dijo anteriormente, las corrientes de cortocircuito tienen varias fuentes, las cuales contribuyen en forma diferente dependiendo de su naturaleza. La forma en que las distintas fuentes alimentan al cortocircuito se muestra en la figura 5. A causa de que las corrientes de las máquinas rotativas decrecen a medida que se reduce el flujo después del cortocircuito, la corriente de cortocircuito total decae con el tiempo. Considerando solamente la parte simétrica de la corriente de cortocircuito, la magnitud es máxima en el primer medio ciclo luego del cortocircuito y de un valor más bajo unos pocos ciclos después. Nótese que el componente del motor de inducción desaparecerá completamente luego de uno o dos ciclos, exceptuando los motores más grandes en la cual se puede presentar por más de cuatro ciclos.

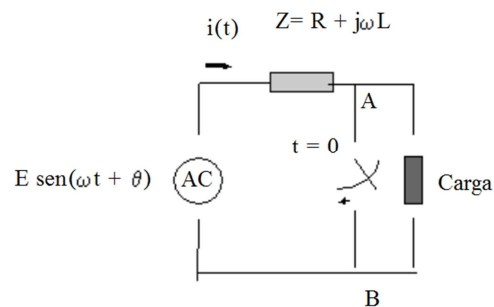


1.5.2 Corrientes de cortocircuito simétricas de algunas fuentes.

1.6 COMPONENTE DE CORRIENTE CONTINUA.

Para justificar la aparición de la componente continua en la corriente de cortocircuito, se considera el circuito de la figura 1.6.1, donde los valores de R y L pertenecen a la impedancia, vista desde la falla hacia la fuente de potencia.

Para simplificar el circuito equivalente de la falla, se toma el circuito equivalente de Thévenin del sistema de distribución.



1.6.1 Circuito inductivo excitado por una fuente sinusoidal.

En el instante $t = 0$ se produce un cortocircuito en los terminales AB. La ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito al establecerse el cortocircuito, es el siguiente:

$$R \cdot i_{(t)} + L \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} = E \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) \quad 1.6.1$$

La solución de la ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes es la que se muestra en la ecuación.

$$i_{(t)} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \left[\sin(\omega \cdot t + \theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad 1.6.2$$

Dónde:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega \cdot L}{R} \quad 1.6.3$$

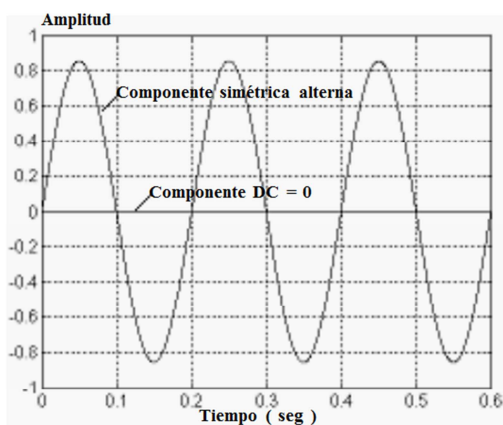
La ecuación muestra que la expresión de la corriente $i(t)$ consta de dos términos, el primero; es una corriente alterna simétrica de frecuencia $f = \omega/2\pi$ ciclos por segundo. El segundo término, es una corriente continua amortiguada, que decae exponencialmente con la constante de tiempo del sistema ($\tau = L/R$). Para $t = 0$, los dos términos son iguales pero con signo cambiado, por lo tanto la corriente total es cero. La amplitud de la componente continua del sistema en que se produce el cortocircuito depende de $\sin(\theta - \phi)$.

En sistemas de media y alta tensión, el valor de la reactancia equivalente del sistema de distribución es mucho mayor que el de la resistencia, por lo que se puede asumir que $\phi = 90^\circ$. En este caso, y asumiendo que el cortocircuito se produce cuando el valor instantáneo del voltaje en la fase en falla es máximo ($\theta = 90^\circ$), el término $\sin(-)$ es cero por el cual no se genera una componente continua. Si por el contrario el cortocircuito se produce cuando el valor instantáneo del voltaje es cero, el término $\sin(-)$ es 1, lo que indica que la amplitud de la componente continua es máxima.

Las dos condiciones extremas antes citadas pueden explicarse desde un punto de vista físico de la siguiente forma:

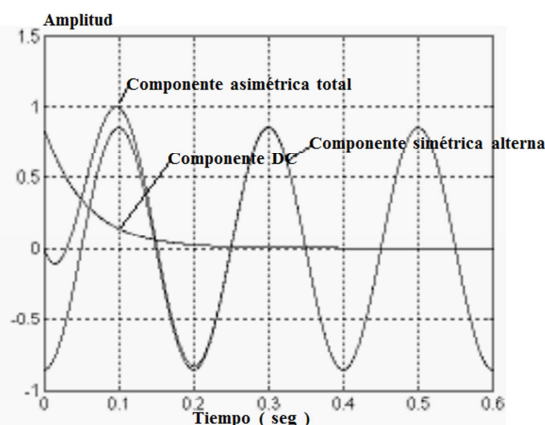
En un circuito puramente inductivo, la corriente atrasa en 90° al voltaje respectivo. Si el cortocircuito se produce cuando el voltaje pasa por un máximo, la corriente se inicia con un desfase de 90° con respecto al voltaje y no existe componente continua. Si el corto circuito se produce cuando el voltaje pasa por cero, la corriente no puede alcanzar su valor máximo instantáneamente y existe un estado

transitorio entre el instante inicial, en que el voltaje y la corriente son simultáneamente iguales a cero y la condición de régimen permanente en que la corriente está atrasada 90° con respecto a el voltaje; en este caso aparece una componente continua cuyo valor inicial es igual en magnitud que el valor inicial máximo de la corriente alterna simétrica, pero de signo contrario.



Condición de cortocircuito para

$\theta = 90^\circ$. Componente DC nula.



Condición de cortocircuito para

$\theta = 0^\circ$. Componente DC máxima.

1.6.2 condición de corto circuito para componente de DC nula y máxima

La corriente alterna decae muy rápidamente en los primeros ciclos y después más lentamente, hasta alcanzar el valor de corriente de cortocircuito de régimen permanente.

1.7 FUENTES QUE CONTRIBUYEN A LA FALLA.

Para evaluar la corriente de cortocircuito de un sistema de potencia es necesario identificar los diferentes equipos que van a contribuir a la corriente de falla. Al producirse un cortocircuito, las corrientes de frecuencia fundamental que circulan por el sistema de distribución, provienen del sistema de transmisión y de las máquinas eléctricas conectadas. Hay que tener presente que los condensadores utilizados para compensar reactivos, generan corrientes de falla que pueden llegar a tener una amplitud elevada, pero su frecuencia de descarga es alta, razón por la cual el tiempo de permanencia en el sistema de distribución es bajo y no se consideran en el cálculo de cortocircuitos.

Las principales fuentes que contribuyen a aumentar las corrientes de cortocircuito son las siguientes:

Empresa de transmisión eléctrica (que suministra la energía).

Generadores sincrónicos.

Motores sincrónicos.

Motores de inducción.

1.7.1 EMPRESA ELÉCTRICA.

Se representa a través de una impedancia de valor constante referida al punto de conexión.

1.7.2 GENERADOR SINCRÓNICO.

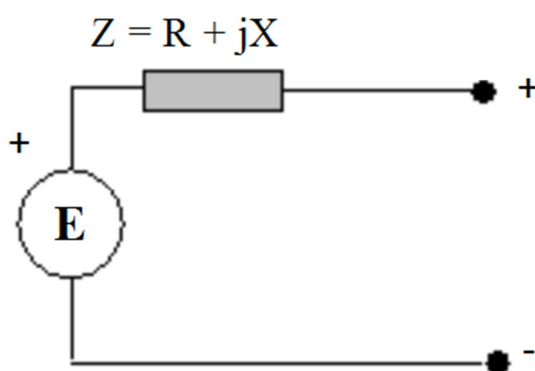
Si se produce un cortocircuito en algún punto del sistema, al cual esta conectado, el generador se comporta de la siguiente manera, la corriente de estator generada tiene la forma de una señal sinusoidal amortiguada pero de frecuencia fija. Como el generador después del cortocircuito sigue recibiendo potencia por su eje mecánico, y el circuito de campo se mantiene excitado con corriente continua, la tensión inducida se mantiene constante y la corriente en el devanado estator permanece hasta alcanzar estado estacionario o ser despejada por el sistema de protecciones. El circuito equivalente del generador al ocurrir una falla en sus terminales queda representado por una fuente de voltaje alterno de valor 1 p.u constante, conectada en serie a una impedancia principalmente reactiva, como muestra la figura N° 3.4. Para efecto de calcular las corrientes de cortocircuito en sistemas industriales, las normas respectivas han definido tres nombres y valores específicos para la reactancia.

Estas son:

Reactancia subtransitoria (X_d''): Limita la amplitud de la corriente de falla en el primer ciclo después de ocurrido el cortocircuito. Esta se define como el valor de reactancia de estator en el intervalo de tiempo transcurrido entre el instante en que se produce la falla y 0.1 segundos.

Reactancia transitoria (X_d'): Limita la corriente de falla después de varios ciclos de producido el cortocircuito. Se define como la reactancia que presenta el generador en el intervalo de tiempo transcurrido entre 0.5 a 2 segundos.

Reactancia sincrónica (X_d): Limita la amplitud de la corriente de falla una vez que se ha alcanzado estado estacionario.



1.7.1 circuito equivalente del generador síncrono

El valor de las reactancias subtransitorias utilizadas para calcular las corrientes de cortocircuito corresponde a los valores de eje directo. Ciertos fabricantes indican dos valores de reactancia subtransiente X''_{dv} y X''_{di} , en este caso el valor X''_{di} debe ser utilizado para calcular las corrientes de cortocircuito.

1.7.3 MOTORES Y CONDENSADORES SINCRÓNICOS.

La corriente de cortocircuito generada por un motor síncrono puede llegar a tener la misma amplitud que la aportada por un generador síncrono. Al producirse un cortocircuito en la barra de alimentación de un motor síncrono, la tensión del sistema disminuye reduciendo el flujo de potencia activa que entrega al motor. Al mismo tiempo, la tensión inducida hace que se invierta el sentido de giro de la corriente de estator, circulando por lo tanto desde el motor hacia el punto de falla. La inercia tanto del motor como de la carga, junto a la mantención de la corriente de campo, hace que el motor se comporte como un generador aportando corriente al cortocircuito. La corriente de cortocircuito aportada por el motor disminuye su amplitud conforme el campo magnético en el entrehierro de la máquina se reduce, producto de la desaceleración del motor.

El circuito equivalente es similar al del generador, y la corriente de falla queda definida por las reactancias subtransitorias, transitorias, y sincrónicas para los diferentes instantes de tiempo.

1.7.4 MOTORES DE INDUCCIÓN.

Tanto los motores de inducción con rotor jaula de ardilla y como los de rotor bobinado pueden contribuir a la corriente de falla. Esta corriente es generada debido a la existencia de energía cinética almacenada en el rotor y la carga, más la presencia de la tensión inducida producto del campo magnético giratorio presente en el entrehierro. Debido a que el campo magnético inducido en el motor de inducción no es mantenido en forma externa, este se hace nulo rápidamente, razón por la cual la corriente aportada a la falla sólo dura algunos ciclos. La corriente de cortocircuito aportada por un motor de inducción en régimen estacionario es cero. El circuito equivalente del motor es similar al mostrado en la figura N° 8. La corriente de cortocircuito aportada por un motor de inducción, está limitada solamente por su reactancia subtransitoria, X''_d

. Este valor es similar a la reactancia de rotor bloqueado del motor.

En el caso de motores de inducción de alta potencia que trabajen con resistencia externa conectada al rotor, su contribución al cortocircuito se puede despreciar.

1.8 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Existen varios métodos para calcular corrientes de c.c. los cuales se describirán más adelante, pero todos necesitan de una elaboración previa de un diagrama unifilar con su correspondiente diagrama de impedancias, explicados a continuación.

1.8.1 DIAGRAMA UNIFILAR

El diagrama unifilar es la representación del sistema a ser estudiado. Resulta de la simplificación de un sistema trifásico equilibrado como un circuito monofásico, formado por una de las tres líneas y un neutro de retorno. Otra de las simplificaciones hechas es suprimir el cierre del circuito por el neutro e indicando sus partes componentes por medio de símbolos normalizados en vez de sus circuitos equivalentes. Los planos del apéndice A son diagramas unifilares que representan el sistema eléctrico del edificio.

La finalidad de un diagrama unifilar es suministrar de manera sencilla y concisa los datos más significativos e importantes de un sistema. La información que se representa en el diagrama depende del estudio que se está realizando. Por ejemplo, para estudios de cortocircuito es fundamental representar los equipos de maniobra y protección tales como interruptores, relés y fusibles.

1.8.2 DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS

El diagrama unifilar debe transformarse en un diagrama de impedancias que muestre el circuito equivalente de cada componente del sistema referido al mismo lado de uno de los transformadores para estudiar el comportamiento en condiciones de carga o al presentarse un cortocircuito.

Los circuitos equivalentes para el estudio de cortocircuito de los distintos componentes del sistema son los siguientes:

- Generadores y Motores: La representación elemental de una máquina sincrónica es una fuente de tensión en serie con una impedancia. Los motores de inducción se representan igual que las máquinas sincrónicas pero se considera su contribución al cortocircuito solo en los primeros ciclos.

- Transformadores: Generalmente se representan por su circuito equivalente "T" ignorando su rama magnetizante.

- Líneas de transmisión y Cables: El circuito equivalente a utilizar depende de la longitud de la línea, usándose el modelo "p" para líneas largas y medias. las líneas y cables cortos se representan como una resistencia en serie con una inductancia.

- Cargas: Se pueden modelar como impedancias de valor constante que consumen potencia activa y reactiva. En estudios de cortocircuito se representan como circuitos abiertos.

-Sistemas externos: Se modela por el circuito equivalente de Thévenin donde la tensión equivalente depende de las tensiones internas de los generadores y la impedancia equivalente depende del resto de elementos del sistema.

El diagrama de impedancia que se describe en esta sección se denomina diagrama de secuencia positiva, ya que representan impedancias para las corrientes equilibradas de un circuito trifásico simétrico. Como se explicará más adelante, también existen diagramas de impedancias para otras secuencias (negativa y cero), siendo en esencia iguales a los de secuencia positiva pero usando otros circuitos equivalentes.

1.8.3 SISTEMA POR UNIDAD

Para simplificar la elaboración del diagrama de impedancias y los cálculos de corrientes de cortocircuito, frecuentemente se transforman los valores reales de las variables e impedancias (Voltios, Amperios, Ohmios) a una nueva magnitud llamada “por unidad” (p.u.). Esta magnitud resulta de dividir el valor real de la variable entre un valor base o de referencia de la misma (un valor razonable), el cual tiene una unidad igual a la del valor real resultando un número adimensional.

$$\text{variable en p. u.} = \frac{\text{valor real de la variable}}{\text{valor base de la variable}} \quad 1.8.1$$

Otro sistema usado es el valor “por ciento” (%) que es igual a 100 veces el valor por unidad.

La utilización del sistema por unidad tiene muchas ventajas, entre ellas:

- Las impedancias de las máquinas rotativas y transformadores son del mismo orden independiente del tamaño de los mismos.
- Permite detectar fácilmente los errores de cálculo.
- Se reduce el empleo de la $\sqrt{3}$ en los cálculos trifásicos.
- Se evita la referencia de cantidades de uno a otro lado de los transformadores.
- Se evita el trabajo con cantidades demasiado grandes, disminuyendo los errores en el caso de usar computadores para los cálculos.
- Los fabricantes normalmente especifican las impedancias de los equipos eléctricos en por unidad o en por ciento.

Una elección arbitraria de dos cantidades (generalmente tensión y potencia) como valores bases, fijan al mismo tiempo los demás valores base necesarios (corriente, impedancia) para elaborar el diagrama a partir de las relaciones entre ellas como por ejemplo la ley de Ohm. Las ecuaciones para la impedancia base y corriente base son las siguientes:

$$Z_{base} = \left(\frac{V_{base}^2}{S_{base}} \right) \quad 1.8.2$$

$$I_{base} = \left(\frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \right) \quad 1.8.3$$

Respetando ciertas condiciones al seleccionar los valores base (como tensión base igual a la tensión línea a línea del sistema), las leyes y relaciones eléctricas más utilizadas tales como la ley de Ohm, leyes de Kirchhoff, ley de la potencias, etc.; se cumplen igual que en un circuito monofásico de corriente alterna.

En muchos casos la impedancia en por unidad de un componente de un sistema está expresado en una base distinta que la seleccionada como base en el estudio (como en el caso de transformadores, generadores y motores), siendo necesario cambiarla a la nueva base usando la ecuación

$$Z_{p.u. \text{ nueva}} = Z_{p.u. \text{ vieja}} \cdot (V_{base \text{ viejo}} / V_{base \text{ nuevo}})^2 \cdot (S_{base \text{ nueva}} / S_{base \text{ vieja}}) \quad \text{ecuación} \quad 1.8.4$$

Donde:

$Z_{p.u. \text{ vieja}}$ = Impedancia de placa del equipo.

$V_{\text{base viejo}} = \text{Tensión nominal del equipo.}$

$V_{\text{base nuevo}} = \text{Tensión base del sistema.}$

$S_{\text{base viejo}} = \text{Potencia nominal del equipo.}$

$S_{\text{base nuevo}} = \text{Potencia base del sistema.}$

1.9 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Existen diferentes métodos para hallar el valor de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de un sistema de potencia, siendo algunos el método de reducción de mallas, el método de contribución y el método de componentes simétricas.

El método de reducción de mallas se basa en el teorema de Thévenin, modelando el sistema en el punto de falla como una fuente de tensión (voltaje Thévenin) con magnitud igual al voltaje previo a la falla en serie con una impedancia equivalente (impedancia de Thévenin vista desde el punto de falla) la cual se halla por reducción de mallas del diagrama de impedancias correspondiente. Ya con el modelo de Thévenin es muy sencillo calcular la corriente de cortocircuito que viene dada por el voltaje de Thévenin entre la impedancia de Thévenin. Este método no considera las corrientes que circulan previas a la falla, pero en la mayoría de los sistemas de potencia la aproximación es razonable.

El método de contribución es una aplicación del teorema de superposición, partiendo del cálculo de la corriente de cortocircuito que produce cada fuente individualmente sobre el punto de falla. Luego, la corriente de cortocircuito total

será la suma de las distintas contribuciones individuales de cada fuente. Presenta la desventaja de ser poco práctico en el caso de existir muchas fuentes de corrientes de cortocircuito.

El método de componentes simétricas está basado en la descomposición de vectores que representan corrientes desequilibradas (fallas asimétricas) en sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricos. Con esta herramienta, las fallas asimétricas se pueden estudiar de manera similar a como se estudian las fallas simétricas (trifásicas). Este método se explicará con más detalle más adelante.

Un método adicional muy usado para el cálculo utilizando computadores es empleando la matriz de impedancia de barra para determinar las corrientes de cortocircuito. Este método se fundamenta en las propiedades que tiene esta matriz las cuales se explican a continuación.

1.9.1 LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE BARRA EN LOS CÁLCULOS DE CORTOCIRCUITO

La matriz de impedancias de barra ($\mathbf{Z}_{\text{barra}}$) es importante y muy útil para efectuar cálculos de fallas. Existen diversos métodos rápidos para desarrollar $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ a partir de una lista de elementos de impedancia. El método que se describe en esta sección es a través de la inversión de la matriz de admitancias de barra ($\mathbf{Y}_{\text{barra}}$) debido a su gran sencillez y exactitud.

Las matrices $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ y $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ son simétricas respecto a la diagonal principal y están relacionadas por $[\mathbf{Z}_{\text{barra}}] = [\mathbf{Y}_{\text{barra}}]^{-1}$. Los elementos de $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ en la diagonal principal se llaman “impedancias propias de los nodos” y los elementos fuera de la diagonal se conocen como “impedancias mutuas de los nodos”.

Para hallar la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ se invierte la matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ por cualquier método (tal como Gauss - Jordan). Para conseguir la matriz de admitancia de barra se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se construye un diagrama de admitancias del sistema a partir del diagrama de impedancias (invirtiendo una a una cada impedancia).

2. Los nodos o puntos de interés (puntos de falla) se consideran como “barras” del sistema.

3. Cada valor de la diagonal de la matriz de admitancia es la suma de las admitancias unidas a la barra respectiva y cada elemento (i,j) fuera de la diagonal es igual al negativo (multiplicada por -1) de la admitancia que une a las dos barras i y j .

Este método se explica con detalle en la sección 7.4 del Stevenson.

Para una falla trifásica en la barra k , con un voltaje de prefalla igual a V_f , la corriente de cortocircuito es $I_{cc} = V_f / Z_{kk}$, donde Z_{kk} es el elemento (k,k) de la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$.

Si se desprecian las corrientes de prefalla, los voltajes de prefalla en todas las barras son iguales, por lo que la tensión en la barra m en el momento de un cortocircuito en la barra k es $V_m = V_f (1 - Z_{mk}/Z_{kk})$.

La corriente total de cortocircuito entre las dos barra n y m es

$I_{nm} = (V_n - V_m) / z_{nm}$, donde z_{nm} es la impedancia del elemento entre las barras n y m .

1.9.2 MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICOS

Este método se usa para estudiar fallas asimétricas en los sistemas de potencia, tales como cortocircuitos, conductores abiertos y fallas a través de impedancias. Este método se basa en un trabajo publicado por C.L. Fortescue, donde se demuestra que un sistema trifásico desequilibrado se puede descomponer en un sistema trifásico de vectores equilibrados llamados “componentes simétricos” de los valores originales. Los conjuntos equilibrados son:

1. Componentes de secuencia positiva, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la misma secuencia de fases de los vectores originales.
2. Componentes de secuencia negativa, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la secuencia de fases opuestas a la de los vectores originales.
3. Componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual módulo y con una diferencia de fase nula.

La caída de tensión que se origina en una parte de la red por la corriente de una secuencia determinada depende de la impedancia de tal parte del circuito para la corriente de dicha secuencia. Las impedancias de un circuito o un elemento a las corrientes de distintas secuencias se suelen llamar impedancias de secuencia positiva, impedancia de secuencia negativa e impedancia de secuencia cero. Las corrientes de cualquier secuencia pueden considerarse como circulando en una red independiente formada por solamente por las impedancias a la corriente de tal secuencia, por lo tanto el análisis de una falla asimétrica en un sistema simétrico consiste en la determinación de los componentes simétricos de las corrientes desequilibradas que circulan.

El circuito equivalente monofásico formado por las impedancias a la corriente de cualquier secuencia exclusivamente, se denomina “red de secuencia” para tal secuencia. las impedancias de secuencia de los distintos elementos que pueden conformar un sistema de potencia son las siguientes:

- Máquinas giratorias: las impedancias de las tres secuencias generalmente son diferentes, aunque no hay casi diferencia entre la magnitud de la impedancia de secuencia positiva y negativa. La impedancia de secuencia cero generalmente tiene un valor menor a las de secuencia positiva y negativa.

- Líneas y Cables: las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales. la impedancia de secuencia cero es de 2 a 3,5 veces mayor que la reactancia de secuencia positiva.

- Transformadores: se acostumbra a suponer que las impedancias de todas las secuencias son iguales, cualquiera sea el tipo de transformador.

- Cargas: las cargas conectadas en estrella o en delta suelen tener también las tres impedancias de secuencia iguales.

En cuanto a las redes de secuencia, se puede decir que las corrientes de secuencia cero circularán sólo si existe un camino de retorno por tierra (puestas a tierra) por donde pueda cerrarse el circuito. La impedancia conectada entre el neutro de una máquina y tierra sólo forma parte de la red de secuencia cero, ya que las corrientes de secuencia positiva y negativa no circularán al ser cero su suma vectorial en el neutro. Si una impedancia con valor Z_n se intercala entre el neutro y la tierra de un circuito conectado en estrella, debe colocarse una impedancia de valor $3Z_n$ entre el neutro y la barra de referencia de la red de secuencia cero.

Un circuito conectado en delta, por no disponer de camino de retorno, presenta una impedancia infinita a las corrientes de secuencia cero, aunque estas pueden circular en el interior de la delta.

Las máquinas rotativas (generadores, motores) tienen tensiones internas solamente de secuencia positiva. Las redes de secuencia negativa y cero, si se necesitan, se hallan sustituyendo las impedancias de secuencia y omitiendo las f.e.m.

La red de secuencia cero de líneas y cables se representan tal cual como su equivalente de secuencia positiva, pero cambiando los valores de la impedancia de secuencia cero. La red de secuencia negativa es igual a la de secuencia positiva.

Las redes de secuencia positiva y negativa de las cargas son iguales, sin embargo, la forma de la red de secuencia cero depende de la forma de conexión de la impedancia entre neutro y tierra. En estudios de corrientes de cortocircuito generalmente se desprecia la influencia de las cargas pasivas.

La red de secuencia negativa de transformadores es igual a la de secuencia positiva, pero las diversas combinaciones posibles de los devanados primario y secundario en estrella y delta varían la red de secuencia cero, tal como se muestra en el anexo B.

1.9.3 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO ASIMÉTRICAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICOS

Luego de determinadas las redes de secuencia del circuito, estas se interconectan para representar los diferentes tipos de falla. Ya que se supone linealidad en las redes de secuencia, cada una de las redes puede reemplazarse por su equivalente de Thévenin, entre la barra de referencia y el punto de falla. La tensión del generador único del circuito equivalente para la red de secuencia positiva es V_f (tensión prefalla) respecto al neutro en el punto de aplicación de la falla. La impedancia Z_1 del circuito equivalente es la impedancia medida entre el punto P y la barra de referencia de la red de secuencia positiva con todas las f.e.m. internas en cortocircuito.

Como no circulan corrientes de secuencia negativa o cero antes de la ocurrencia de la falla, no aparecen f.e.m. en los circuitos equivalentes de las redes de secuencia negativa o cero. Las impedancias Z_2 y Z_0 se miden entre el punto P y la barra de referencia en sus redes respectivas.

Al interconectar las redes de secuencia convenientemente y realizar los análisis correspondientes (véase capítulo 13 del Stevenson), se obtienen los siguientes resultados para las distintas fallas asimétricas en un punto del sistema de potencia:

- Falla simple línea a tierra (fase a tierra):

$$I_a = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_3}, I_b = I_c = 0 \quad 1.9.1$$

- Falla línea a línea (entre las fases b y c):

$$I_b = -I_c = \frac{\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2}, I_a = 0. \quad 1.9.2$$

Si $Z_1 = Z_2$ entonces $I_b = 0.866 I_{cc3\phi}$

- Falla doble línea a tierra (entre las fases b, c y tierra):

$$I_b = -I_c = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}}, \quad I_a = 0 \quad \text{Ecuación 1.9.3}$$

Dónde:

I_a, I_b, I_c = Corrientes de cortocircuito en las fases a, b y c.

V_f = Tensión de prefalla entre fase y neutro

$I_{cc3\phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica

Z_1, Z_2, Z_0 = Impedancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero.

El método de la matriz de impedancias de barra para hallar corrientes de cortocircuito trifásicas se puede ampliar fácilmente a fallas asimétricas teniendo en cuenta que las redes de secuencia negativa y cero pueden representarse por redes equivalentes de igual manera como se hizo con las redes de secuencia positiva. El método es útil para hallar las impedancias equivalentes Z_1, Z_2 y Z_0 , representadas por las impedancias de la diagonal de la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$. Así, con la matriz de impedancias de barra para cada red de secuencia todas las características de las soluciones con un computador digital para fallas simétricas trifásicas pueden extenderse a fallas asimétricas.

1.10 ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La introducción de nuevas tecnologías en los sistemas de potencia tales como cargas no lineales basadas en semiconductores que requieren corrientes no sinusoidales ha traído como consecuencia el flujo de corrientes armónicas hacia

el sistema de potencia AC. Esta situación puede crear interferencia con los equipos de comunicación, sobrecalentamiento de equipos y peligrosas condiciones de resonancia en el sistema.

Los armónicos no son más que componentes senoidales de una onda la cual tiene una frecuencia que es múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz) de una onda no senoidal de tensión y/o corriente. Su efecto se puede observar fácilmente como una deformación de la onda de tensión o corriente, que deja de ser puramente senoidal, como debería ser idealmente.

En edificios comerciales, el que más contribuye al flujo de armónicos es el computador personal (PC) debido a que usan una fuente de alimentación tipo diodo/condensador (switch), al igual que la mayoría de los otros equipos electrónicos de oficina. Las armónicas también son generadas por las bobinas (balastos) para lámparas fluorescentes. En el caso de lámparas con bobinas de núcleos magnéticos normales, la corriente de tercera armónica generada (a 120 Hz) se sitúa en 20% aproximadamente de la frecuencia fundamental a 60 Hz. Los balastos electrónicos generan una tercera armónica aún mayor, de hasta 80%. Otros equipos de estado sólido, como los de comunicación, arrancadores suaves de motores, rectificadores AC-DC y fuentes de energía ininterrumpibles (UPS) también contribuyen en gran proporción al flujo de armónicas en los sistemas de potencia de edificios.

La Distorsión Armónica Total (THD) es un término comúnmente usado para definir el “factor de distorsión armónica” (DF) en la tensión o corriente, es decir, el efecto de los armónicos sobre la tensión o corriente del sistema de potencia. Este factor se usa en sistemas de baja, media y alta tensión. Este factor se expresa en porcentaje de la onda fundamental, y está definido por:

$$\text{THD} = \text{DF} = \sqrt{\frac{\text{Suma de los cuadrados de la amplitudes de todos los armónicos}}{\text{Cuadrado de la amplitud de la fundamental}}} \cdot 100\% \quad 1.10.1$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (\text{en la tensión}) \quad 1.10.2$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (\text{en la corriente}) \quad 1.10.3$$

Dónde:

V_h = Tensión del armónico de orden h ($h=1$ corresponde a la tensión fundamental)

I_h = Corriente del armónico de orden h ($h=1$ corresponde a la corriente fundamental)

Los límites de distorsión armónica en la corriente para sistemas de distribución, en función de la relación I_{cc}/I_L (máxima corriente de cortocircuito simétrica entre la máxima corriente de carga) (ver anexo F). Esta misma norma establece también los límites de distorsión armónica presentes en la tensión para sistemas de potencia (también en el anexo F).

Los principales efectos de los armónicos en los distintos elementos del sistema de potencia son los siguientes:

-Condiciones de resonancia: Es el efecto más peligroso y destructivo de las corrientes armónicas. Estas condiciones aparecen debido a los valores de impedancia que presenta el sistema a las frecuencias armónicas.

-Motores, Generadores y transformadores: Se incrementa el calentamiento debido al aumento de las pérdidas en el cobre y el núcleo a las frecuencias armónicas, disminuyendo su eficiencia. Estos equipos también pudieran tener problemas con el aislamiento.

-Cables: Cuando se ven involucrados en condiciones de resonancia se puede romper su aislamiento. También sufren sobrecalentamientos debido a que la corriente rms total se puede ver incrementada al haber contenido de armónicas en la corriente (el amperaje de los cables generalmente se escoge en base a la corriente fundamental).

-Capacitores: Se ven afectados al existir condiciones de resonancia y están expuestos a tensiones y corrientes considerablemente más altas que las normales, ya que la reactancia del capacitor disminuye a medida que aumenta la frecuencia.

-Equipo electrónico: Es susceptible a la mala operación causada por la distorsión armónica, ya que su funcionamiento depende de la forma de onda de la tensión.

-Equipos de medición: Se pueden presentar errores en la medición tanto positivos como negativos, dependiendo de los armónicos involucrados y del tipo de medidor. En general se requiere un factor de distorsión armónica severo (mayor al 20%) para observar errores significativos.

-Relés de protección: Es muy difícil determinar con exactitud la respuesta de los relés en sistemas que presentan distorsión armónica, pero generalmente se requieren factores de distorsión del 10 al 20% para causar problemas en la operación de los relés.

-Interferencia telefónica: Se introducen ruidos en estos sistemas de comunicación debido a la aparición campos eléctricos y magnéticos en sus proximidades.

1.11 Coordinación de protecciones

Es la operación selectiva de los diferentes dispositivos de protección, de manera que éstos actúen en secuencia, permitan la localización de las condiciones de falla y se saque de servicio solamente la parte afectado.

La coordinación se realiza más fácilmente si las características tiempo - corriente de los diferentes dispositivos son dibujadas en papel log - log (logarítmico). Las gráficas en papel se deben hacer a un solo nivel de tensión y se muestra, en un par de ejes (corriente y tiempo), el período de tiempo que tarda en operar cada dispositivo cuando la corriente es igual al valor seleccionado. El tiempo igual a cero se considera como el momento en que ocurre la falla.

Estas representaciones de las características de los relés de sobrecorrientes, fusibles, interruptores termomagnéticos y otros dispositivos, ayudan en la elección del equipo correcto y la selectividad deseada.

Los pasos generales que se deben seguir para un estudio de coordinación de protecciones, son los siguientes:

1. Recopilar la información necesaria sobre el sistema eléctrico a proteger, indicando las características de los elementos del sistema en el diagrama unifilar.
2. Determinar los valores máximos de carga, de acuerdo a la capacidad nominal del circuito protegido.
3. Calcular las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas en los puntos del sistema que sean importantes para la coordinación.

4. Recopilar y seleccionar información técnica sobre los equipos de protección existentes o que se instalarán en el sistema eléctrico, entre ellas las curvas características de tiempo - corriente de cada dispositivo de protección. Esta información generalmente la suministra el fabricante.

5. Ubicar y seleccionar las características y rango de ajustes de los equipos de protección para que cumplan con las exigencias básicas del circuito a proteger y las normas existentes para tal fin.

6. El proceso de coordinación debe realizarse desde la carga hacia la fuente, en los sistemas radiales.

7. Realizar la coordinación, es decir, escoger las características de operación y ajuste de los dispositivos de protección de modo que exista selectividad. Toda esta información se resume en gráficos de tiempo - corriente (en papel logarítmico) para verificar el cumplimiento de los requerimientos de protección y coordinación.

1.11.1 Descripción de algunos equipos para protección de sobrecorrientes en sistemas de baja tensión

Algunos de los dispositivos de protección más comúnmente usados en los sistemas eléctricos de baja tensión son los fusibles limitadores, interruptores termomagnéticos y conjuntos relés - interruptores de potencia. A continuación se realiza una breve descripción de estos:

1.11.2 Fusibles limitadores:

Los fusibles se definen como dispositivos de sobrecorrientes con una parte extraíble que se calienta y es destruida cuando pasa una cantidad de corriente prefijada, provocando la apertura del circuito asociado al mismo. Todos los fusibles tienen la capacidad de limitar la corriente, pero el término “fusibles limitadores” se aplica a fusibles con una acción limitadora mucho más pronunciada. Estos fusibles son diseñados para actuar mucho más rápido que los fusibles normales, ya que pueden realizar la apertura del circuito en menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo a 60 Hz, antes que la magnitud de la corriente de cortocircuito llegue a sus valores máximos.

Su principal uso es acompañado de interruptores o contactores de bajo voltaje, para evitar su destrucción cuando las magnitudes de la corriente de falla superen la capacidad de interrupción de los mismos.

1.11.3 Interruptores termomagnéticos (breakers, interruptores de caja moldeada):

Son dispositivos diseñados para abrir o cerrar un circuito eléctrico manualmente y para abrir dicho circuito automáticamente cuando circula por él un valor predeterminado de sobrecorriente (sobrecarga o cortocircuito). Estos interruptores son muy utilizados para la protección de sobrecorriente en sistemas eléctricos industriales y en edificios. En el anexo C se pueden observar varios modelos de interruptores de este tipo.

Estos interruptores, como su nombre lo indica, poseen dos acciones de disparo, una térmica y otra magnética. La acción de disparo **térmica** (protección contra sobrecargas), se obtiene a base del empleo de un dispositivo bimetálico que se calienta al circular por él la corriente. La curva de operación de la acción

térmica se conoce como “curva de corriente de tiempo inverso” ya que el dispositivo bimetálico actúa más rápidamente mientras mayor sea la corriente de sobrecarga. La acción de disparo **magnética** (protección contra cortocircuitos), se obtiene al conectar un electroimán en serie con el dispositivo bimetálico. Cuando ocurre un cortocircuito, la corriente activa al electroimán, abriendo los contactos del interruptor instantáneamente (menos de un ciclo).

1.11.4 Interruptores de potencia con unidades de disparo (relés) de estado sólido:

Este conjunto se usa cuando los niveles de corriente no permiten el uso de dispositivos de acción directa. El conjunto requiere elementos de muestreo (transformadores de corriente) y elementos de control para el disparo del interruptor. Generalmente se emplean en los interruptores principales de las subestaciones o en interruptores para alimentadores de importancia. Los relés de estado sólido presentan bastante exactitud en los umbrales de disparo y tienen curvas de operación ajustables según la necesidad. Generalmente estas unidades de disparo incluyen las siguientes funciones:

- Disparo instantáneo: el interruptor opera inmediatamente al ocurrir la falla. Se utiliza para zonas del circuito donde los cortocircuitos deben despejarse en forma rápida para evitar daños.
- Curva de retardo largo (L.T.D.): se utiliza para limitar las sobrecargas en el orden de segundos a minutos.
- Curva de retardo corto (S.T.D.): se provoca un retardo intencional de pocos ciclos de corriente con la finalidad de lograr coordinación con protecciones aguas abajo.
- Falla a tierra: se fija el umbral de corriente y el tiempo de retardo para la operación del interruptor en caso de cortocircuitos monofásicos. Para sensar las

corrientes de falla a tierra generalmente se colocan los transformadores de corriente en conexión residual que detectan el flujo de corriente por tierra (el relé sensa la suma fasorial de las corrientes de fases más la del neutro por medio de la conexión en estrella de los transformadores de corriente. En condiciones normales la suma fasorial es cero). Esta función debe tener un ajuste en corriente y tiempo coordinado con protecciones falla a tierra aguas abajo.

CAPITULO II

FALLAS SIMÉTRICAS

2.1 FALLAS SIMÉTRICAS

Los cortocircuitos ocurren en los sistemas de potencia cuando falla el aislamiento del equipo, debido a sobre voltajes del sistema por rayos o variaciones por maniobras de interruptores, a contaminación del aislamiento (rocío salino o contaminación) o a otras causas mecánicas. El cortocircuito resultante o la corriente de “falla” se determinan por los voltajes internos de las máquinas síncronas y por las impedancias del sistema entre los voltajes de máquina y la falla. Las corrientes de cortocircuito pueden ser mucho más grandes que las corrientes de operación normales y, si se les permite persistir, podrían causar daños térmicos al equipo. Los devanados y barras colectoras también podrían sufrir daño mecánico debido a altas fuerzas magnéticas durante las fallas. Por consiguiente, es necesario eliminar del servicio las secciones con falla de un sistema de potencia tan pronto como sea posible.

Empezamos este capítulo con la revisión de fenómenos transitorios de circuitos R-L en serie en la sección 2.1 y continuamos en la sección 2.2 con una descripción de corrientes de cortocircuito trifásicas en máquinas síncronas sin carga. Se analiza tanto la componente de ca, incluyendo corrientes subtransitorias, transitorias y de estado estable, como la componente de cd de la corriente de falla. Luego, se amplían estos resultados en Las secciones 2.3 y 4.4 a cortocircuitos trifásicos de sistemas de potencia por medio del principio de superposición. Se observa que la matriz de impedancias de bus es la clave para calcular las corrientes de falla.

2.2 FENÓMENOS TRANSITORIOS EN CIRCUITOS R-L EN SERIE

$L di(t)$

Considere el circuito R-L en serie mostrado en la figura 2.1. Cerrar el interruptor SW en $t = 0$ representa una primera aproximación de un cortocircuito

trifásico en las terminales de una máquina síncrona sin carga. Para simplificar, suponga una impedancia de falla igual a cero; es decir, el cortocircuito es una falla sólida o “atornillada”. Se supone que la corriente es cero antes que se cierre SW, y el ángulo de la fuente a determina la fuente de voltaje en $t = 0$. Escribiendo una ecuación de la LKV para el circuito,

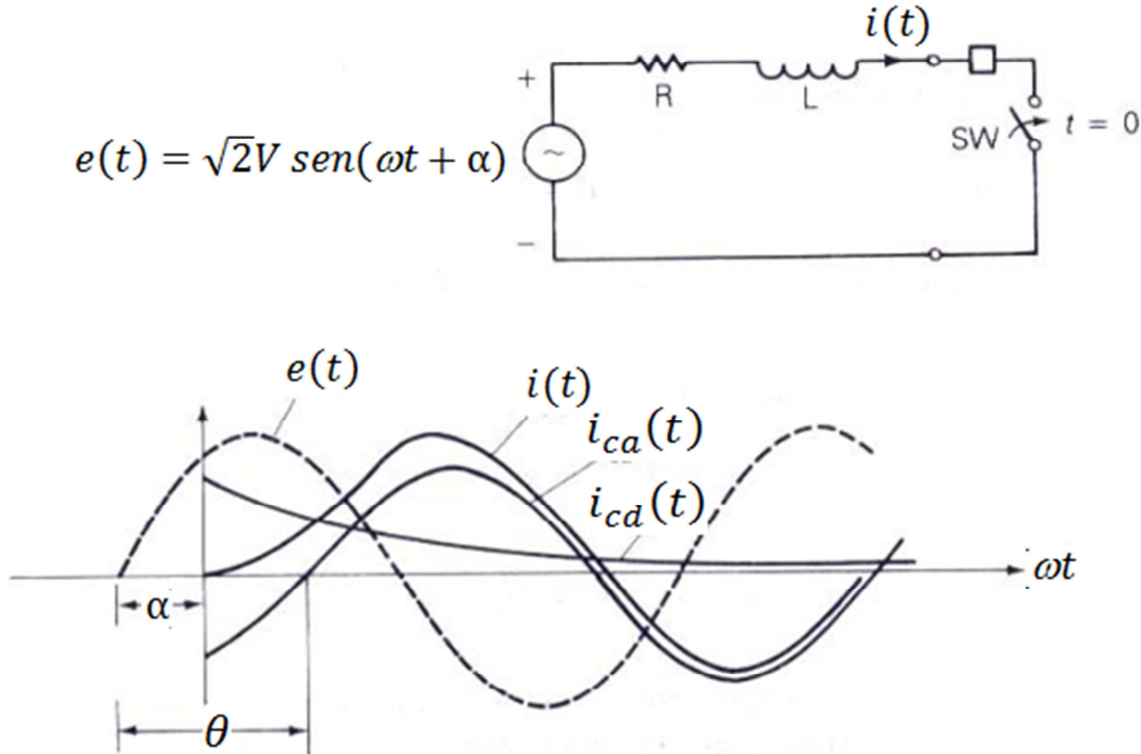
$$\frac{L di(t)}{dt} + Ri(t) = \sqrt{2}V \text{ sen } (\omega t + \alpha) \quad t \geq 0 \quad \text{Ecuación 2.1.1}$$

La solución de la ecuación (2.1) es

$$i(t) = i_{ca}(t) + i_{cd}(t)$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta)e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad A \quad \text{Ecuación 2.1.2}$$

Donde:



2.1.1 circuito RL y grafica de comportamiento en el tiempo

$$i_{ca}(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) A \quad 2.1.3$$

$$i_{cd}(t) = -\frac{\sqrt{2}V}{Z} \text{sen}(\alpha - \theta) e^{-t/T} A \quad 2.1.4$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \Omega \quad 2.1.5$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad 2.1.6$$

$$T = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi f R} \text{ s} \quad 2.1.7$$

La corriente de falla total en la ecuación (2.1.2), llamada corriente de falla asimétrica, se grafica en la figura 2.1 junto con sus dos componentes. La corriente de falta de ca (llamada también corriente de falla simétrica o de estado estable), dada por la ecuación (2.1.3) es una senoide. La corriente de desplazamiento de cd dada por la ecuación (2.1.4) decae en forma exponencial con la constante de tiempo $T = L/R$.

La corriente de falla ca rms es $I_{ca} = V/Z$. La magnitud del desplazamiento cd que depende de α , varía de 0 cuando $\alpha = \theta$ a $\sqrt{2}I_{ca}$ cuando $\alpha = (\theta \pm \pi/2)$. Observe que podría ocurrir un cortocircuito en cualquier instante durante un ciclo de la fuente ca: es decir, α puede tener cualquier valor. Puesto que estamos interesados principalmente en la corriente de falla más grande. Se elige $\alpha = (0 - \pi/2)$. Entonces, la ecuación (2.1.2) se convierte en

$$i(t) = \sqrt{2}I_{ca} \left[\text{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + e^{-\frac{t}{T}} \right] A \quad 2.1.8$$

Dónde:

$$I_{ca} = \frac{V}{Z} A \quad 2.1.9$$

El valor rms de $i(t)$ resulta interesante. Puesto que $i(t)$ en la ecuación (2.1.8) es estrictamente periódica, su valor rms no está definido con claridad. Sin embargo, al tratar el término exponencial como constante, se amplía el concepto rms para calcular la corriente de falla asimétrica rms con el desplazamiento máximo de cd, como sigue:

$$\begin{aligned}
 I_{rms}(t) &= \sqrt{[I_{ca}]^2 + [I_{cd}(t)]^2} \\
 &= \sqrt{[I_{ca}]^2 + [\sqrt{2}I_{ca}e^{-t/T}]^2} \\
 &= I_{ca} \sqrt{1 + 2e^{-2t/T}} \quad A
 \end{aligned}
 \tag{2.1.10}$$

Es conveniente usar ($T = X/2\pi fR$) y $t = \tau / f$, donde τ es el tiempo en ciclos, y la ecuación se escribe como

$$I_{rms}(\tau) = K(\tau)I_{ca} \quad A \tag{2.1.11}$$

Dónde:

$$K(\tau) = \sqrt{1 + 2e^{-4\pi\tau/(X/R)}} \quad \text{por unidad} \tag{2.1.12}$$

De las ecuaciones (2.1.11) y (2.1.12), la corriente de falla asimétrica rms es igual a la corriente de falla de ca rms multiplicada por un factor de asimetría, $K(\tau)$. $I_{rms}(\tau)$ disminuye de $\sqrt{3}I_{ca}$ cuando $\tau=0$ a I_{ca} cuando τ es grande. Asimismo, las relaciones mayores de X a R , (X/R) dan valores mayores de $I_{rms}(\tau)$. En la tabla siguiente se resumen las corrientes de cortocircuito R-L en serie.

componente	Corriente instantánea (A)	Corriente rms (A)
Simétrico (ca)	$i_{ca}(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \text{sen}(\omega t + \alpha - \theta)$	$I_{ca} = \frac{V}{Z}$

Desplazamiento cd	$i_{cd}(t) = -\frac{\sqrt{2}V}{Z} \text{sen}(\alpha - \theta)e^{-t/T}$	
Asimétrico (total)	$i(t) = i_{ca}(t) + i_{cd}(t)$	$I_{rms}(t) = \sqrt{[I_{ca}]^2 + [I_{cd}(t)]^2}$ Con desplazamiento máximo $I_{rms}(\tau) = K(\tau)I_{ca}$

2.1.1 corrientes de cortocircuito R-L en serie.

2.3 CORTOCIRCUITOS TRIFÁSICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

A fin de calcular la corriente de falla subtransitoria para un cortocircuito trifásico en un sistema de potencia, se hacen las suposiciones siguientes:

1. Los transformadores se representan por sus reactancias de dispersión. Se ignoran las resistencias de devanados, las admitancias en derivación y los desfases ΔY .
2. Las líneas de transmisión están representadas por sus reactancias equivalentes en serie. Se ignoran las resistencias en serie y las admitancias en derivación.
3. Las máquinas síncronas están representadas por fuentes de voltaje constante detrás de las reactancias subtransitorias. Se ignoran la resistencia de armadura. La saliencia y la saturación.
4. Se ignoran las cargas de impedancia no giratorias.
5. Se ignoran los motores de inducción (en particular motores pequeños con capacidad nominal abajo de 50 hp) o se representan de la misma manera que las máquinas síncronas.

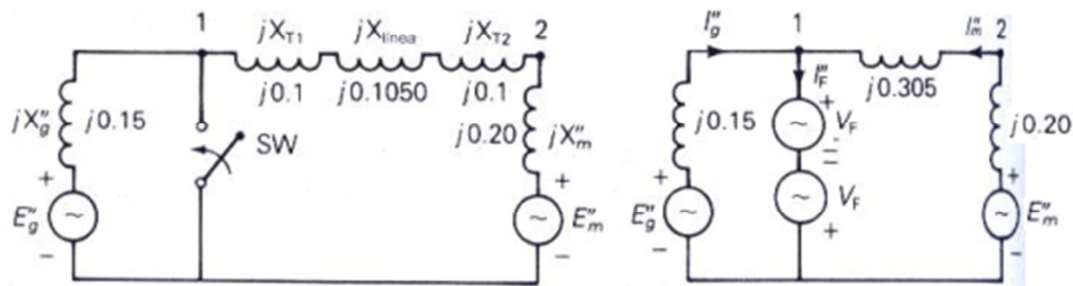
En este texto estas suposiciones se hacen para simplificar. y en la práctica no se deben hacer para todos los casos. Por ejemplo, en sistemas de distribución, las resistencias de las líneas de distribución primarias y secundarias en algunos casos podrían reducir significativamente las magnitudes de las corrientes de falla.

En la figura 2.2.1 se ilustra un diagrama unifilar que consiste en un generador síncrono que alimenta a un motor síncrono a través de dos transformadores y una línea de transmisión. Consideraremos un cortocircuito trifásico en el bus 1. El circuito equivalente de secuencia positiva se ilustra en la figura 2.3(a). Donde los voltajes E_g'' y E_g'' son los voltajes internos de pre falla detrás de las reactancias subtransitoria de las máquinas. y el cierre del interruptor SW representa la falta. Con el fin de calcular la corriente de falla subtransitoria. Se supone que E_g'' y E_g'' son fuentes de voltaje constante.

En la figura 2.3(b) la falla se representa mediante dos fuentes de voltaje opuestas con valores fasoriales V_F iguales. Por medio de la superposición la corriente de falla se calcula a partir de los dos circuitos mostrados en la figura 2.3(c). Sin embargo. Si V_F es igual al voltaje de pre falla en la falla, entonces el segundo circuito de la figura 2.3(c) representa al sistema antes de que ocurra la falla. Como tal, $I_{F2}'' = 0$ y V_F . Que no tiene ningún efecto, se eliminan del segundo circuito, como se muestra en la figura 2.3(d). Entonces, la corriente de falla subtransitoria se determina a partir del primer circuito de la figura 2.3 (d). $I_F'' = I_{F1}''$. La contribución del generador a la falta es $I_g'' + I_{g1}'' + I_{g2}'' = I_{g1}'' + I_L$ donde I_L es la corriente de prefalla del generador. De manera similar. $I_m'' = I_{m1}'' - I_L$.

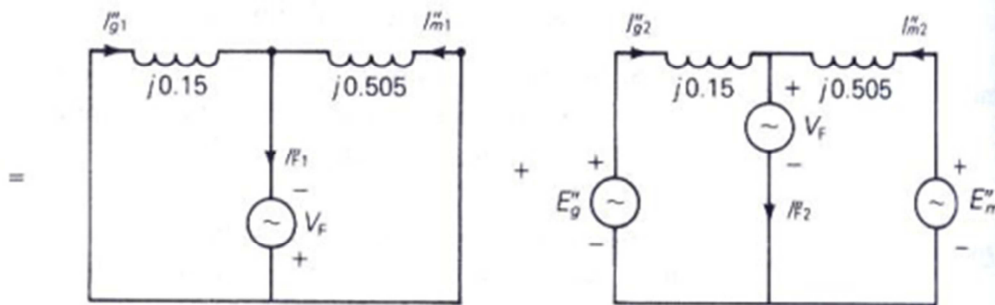


2.2.1 Diagrama unifilar de un generador síncrono que alimenta a un motor síncrono.

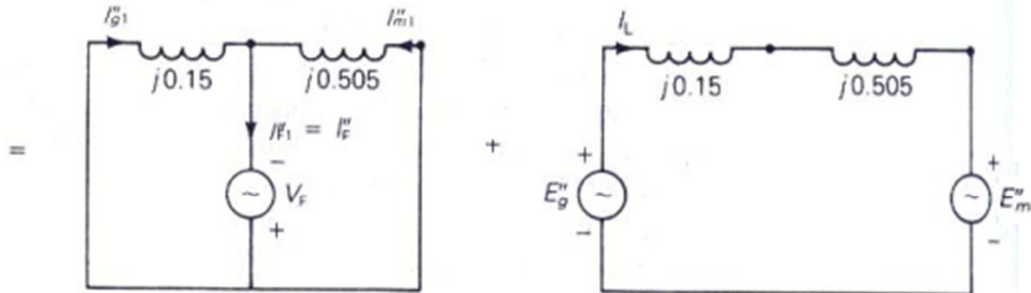


a) cortocircuito trifásico

b) cortocircuito representado por dos fuentes de voltaje opuestas



c) aplicación de la superposición



d) V_F se iguala con el voltaje de prefalla en la falla

2.2.3 Aplicación de la superposición a un Cortocircuito trifásico en un sistema de potencia.

2.4 MATRIZ DE IMPEDANCIA DE Y BUS

Ahora ampliamos los resultados de la sección anterior para calcular las corrientes de falla subtransitorias para fallas trifásicas en un sistema de potencia de N buses. El sistema se modela mediante su red de secuencia positiva, donde las líneas y

los transformadores están representados por reactancias en serie y las máquinas síncronas están representadas por fuentes de voltaje constante detrás de sus reactancias subtransitorias. Como se hizo antes, se ignoran las resistencias, las admitancias en derivación y las cargas de impedancias no giratorias. Para simplificar, también se ignoran las corrientes de carga de pre falla.

Considere un cortocircuito trifásico en cualquier bus n . Por medio del método de superposición, se analizan dos circuitos separados. En el primer circuito, las fuentes de voltaje de máquina son cortocircuitadas y la única fuente se debe al voltaje de pre falla en la falla. Al escribir las ecuaciones nodales para el primer circuito, se tiene que:

$$Y_{bus}E^{(1)} = I^{(1)} \quad (2.3.1)$$

Donde Y_{bus} es la matriz de admitancias de bus de secuencia positiva, $E^{(1)}$ es el vector de los voltajes de bus e $I^{(1)}$ es el vector de la fuentes de corriente. El superíndice (1) denota al primer circuito. Resolviendo la ecuación (2.3.1).

$$Z_{bus}I^{(1)} = E^{(1)} \quad (2.3.2)$$

Dónde:

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (2.3.3)$$

Z_{bus} , la inversa de Y_{bus} llamada matriz de impedancias de bus de secuencia positiva. Tanto Z_{bus} como Y_{bus} son matrices simétricas.

Puesto que el primer circuito contiene sólo una fuente, localizada en el bus n que tiene la falla, el vector de fuentes de corriente contiene sólo un componente

distinto de cero, $I_n^{(1)} = -I_{Fn}''$. También, el voltaje en el bus fallado n en el primer circuito es $E_n^{(1)} = -V_F$. Rescribiendo la ecuación, se tiene

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} & \dots & Z_{nN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{Nn} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_{Fn}'' \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^{(1)} \\ E_2^{(1)} \\ \vdots \\ -V_F \\ \vdots \\ E_N^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

El signo menos asociado con la fuente de corriente en la ecuación anterior indica que la corriente inyectada al bus n es el negativo de I_{Fn}'' , puesto que fluye del bus n al neutro. De la ecuación anterior, la corriente de falta transitoria es

$$I_{Fn}'' = \frac{V_F}{Z_{nn}} \quad (2.3.5)$$

Asimismo, de las ecuaciones (2.3.4) y (2.3.5), el voltaje en cualquier bus k en el primer circuito es

$$E_k^{(1)} = Z_{kn}(-I_{Fn}'') = \frac{-Z_{kn}}{Z_{nn}} V_F \quad 2.3.6$$

El segundo circuito representa las condiciones de pre falla. Despreciando la corriente de carga de pre falla. Todos los voltajes a través del segundo circuito son iguales al voltaje de pre falla: es decir, $E_k^2 = V_F$ para cada bus k. Al aplicar superposición,

$$E_k = E_K^{(1)} + E_k^{(2)} = \frac{-Z_{kn}}{Z_{nn}} V_F + V_F$$

$$= \left(1 - \frac{Z_{kn}}{Z_{nn}}\right) V_F \quad k = 1, 2, \dots, N \quad 2.3.7$$

Capítulo III

Fallas asimétricas.

3.1 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA

Un sistema trifásico se representa mediante las redes de secuencia en este capítulo. Las redes de secuencia cero, positiva y negativa de componentes del sistema generadores, motores, transformadores y líneas de transmisión se pueden usar para construir redes de secuencia cero, positiva y negativa del sistema. Se hacen las consideraciones siguientes:

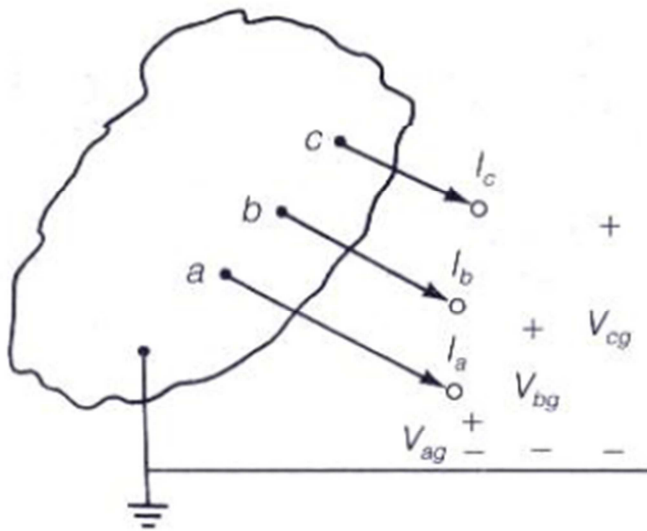
1. El sistema de potencia opera en condiciones balanceadas de estado estable antes de que ocurra la falla. Por tanto, las redes de secuencia cero, positiva y negativa están desacopladas antes de que ocurra la falla. Durante las fallas asimétricas las redes se interconectan sólo en la ubicación de la falla.
2. Se desprecia la corriente de carga de pre falla. Como resultado, los voltajes internos de secuencia positiva de las máquinas son iguales al voltaje de pre falla V_F . Por tanto, el voltaje de pre falla en cada bus de la red de secuencia positiva es igual a V_F .
3. Se desprecian las resistencias de devanados del transformador y las admitancias serie.
4. Se desprecian las resistencias serie de líneas de transmisión y las admitancias en derivación.
5. Se desprecian la resistencia, saliencia y saturación de armadura de la máquina síncrona.
6. Se desprecian las impedancias de cargas no rotatorias.
7. Se desprecian los motores de inducción (en particular los motores con capacidad nominal de 50 hp o menos) o se representan de la misma manera que las máquinas síncronas.

Estas suposiciones se hacen para simplificar, pero en la práctica no es prudente hacerlo en todos los casos. Por ejemplo, en los sistemas de distribución, primarios y secundarios, las corrientes de pre falla en algunos casos podrían equipararse con las corrientes de cortocircuito, y en otros casos, las resistencias de línea podrían reducir en forma importante las corrientes de falla.

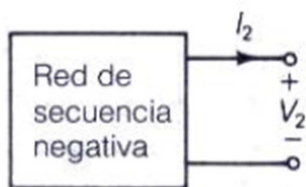
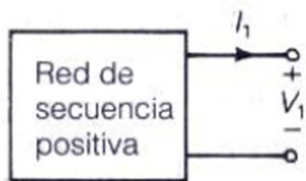
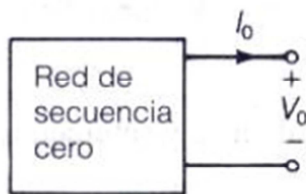
Aunque las corrientes de falla así como las contribuciones a las corrientes de falta en el lado de la falta en transformadores Δ -Y no se ven afectadas por los desfases Δ -Y, las contribuciones a la falta desde el otro lado de tales transformadores están afectadas por los desfases Δ -Y para fallas asimétricas. Por consiguiente. En este capítulo incluimos los efectos de desfases Δ -Y.

Considerarnos las fallas en el bus trifásico general de la figura 3.1. Las terminales abc, denotadas como terminales de falla, se sacan a fin de hacer Las conexiones externas que representas fallas. Antes de que ocurra una falla, las corrientes I_a , I_b e I_c son cero.

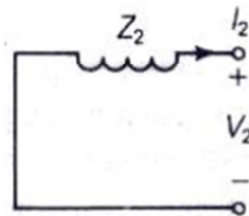
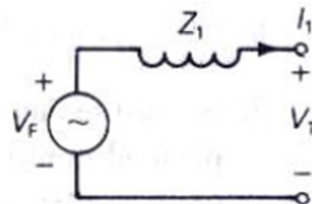
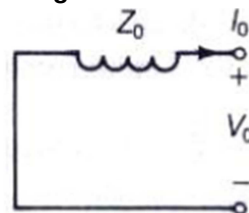
En la figura 3.2(a) se ilustran las redes de secuencia generales vistas desde las terminales de la falla. Puesto que el sistema de pre falla está balanceado, las redes de secuencia cero, positiva y negativa no están acopladas. También, los componentes de secuencia de las corrientes de falla, I_0 , I_1 e I_2 son cero antes que ocurra la falta. Las redes de secuencia generales de la figura 3.2(a) se reducen a sus equivalentes de Thévenin vistos desde las terminales de la falla en la figura 3.2(h). Cada red de secuencia tiene una impedancia equivalente de Thévenin. También, la red de secuencia positiva tiene una fuente de voltaje equivalente de Thévenin, que es igual al voltaje de pre falla V_F .



3.1.1 bus trifásico general.



(a) Redes de secuencia generales

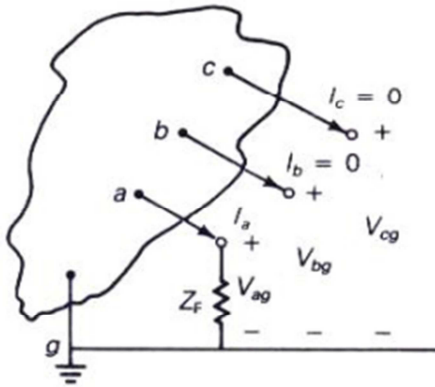


(b) Equivalentes de Thévenin vistos desde las terminales de la falla

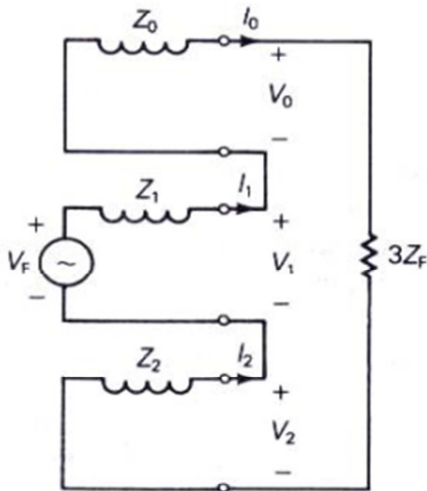
3.1.2 Redes de secuencia en un bus trifásico general en un sistema balanceado

3.2 FALLA SIMPLE DE LÍNEA ATIERRA

Considere una falla simple de línea a tierra de la fase a a tierra en el bus trifásico general que se observa en la figura 3.7(a). Para generalizar, incluimos una impedancia de falla Z_F . En el caso de una falla sólida, $Z_F = 0$, en tanto que para una falla de arco, Z_F es la impedancia de arco. En el caso de una descarga superficial de un aislador de línea de transmisión, Z_F incluye la impedancia de falla total entre la línea y tierra, incluyendo las impedancias del arco y la torre de transmisión, así como el cimiento de la torre si no hay alambres neutros.



(a) Bus trifásico general



(b) Redes de secuencia interconectadas

Condiciones de falla
en el dominio de fase:

$$V_{ag} = Z_F I_a$$

$$I_b = I_c = 0$$

Condiciones de falla en
el dominio de las secuencias:

$$I_0 = I_1 = I_2$$

$$(V_0 + V_1 + V_2) = 3Z_F I_1$$

3.2.1 Falta simple línea a tierra

Las relaciones que se obtendrán aquí sólo se aplican a una falla simple línea a tierra en la fase a. Sin embargo, puesto que cualquiera de las tres fases se puede marcar de manera arbitraria como la fase a, no se consideran las fallas simple línea a tierra en otras fases.

De La figura 3.7(a):

$$\text{Condiciones de falla en el dominio de la fase} \quad I_b = I_c = 0 \quad 3.2.1$$

$$\text{Falla simple línea a tierra} \quad V_{ag} = Z_F I_a \quad 3.2.2$$

Ahora se transforman las ecuaciones anteriores al dominio de las secuencias.

Utilizando la ecuación ($I_b = I_c = 0$) en ($I_s = A^{-1} I_p$),

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad 3.2.3$$

También, utilizando la ecuación ($V_a = V_0 + V_1 + V_2$) y ($I_a = I_0 + I_1 + I_2$) en ($V_{ag} = Z_F I_a$)

$$V_0 + V_1 + V_2 = Z_F (I_0 + I_1 + I_2) \quad 3.2.4$$

De (3.2.3) y (3.2.4)

Condiciones de falla en el dominio de las secuencias

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad 3.2.5$$

Falla simple línea a tierra

$$(V_0 + V_1 + V_2) = (3Z_F) I_1 \quad 3.2.6$$

Las ecuaciones (3.2.5) y (3.2.6) se satisfacen al interconectar las redes de secuencia en serie en las terminales de la falla a través de la impedancia ($3Z_F$),

como se muestra en la figura 3.7(b). De esta figura, los componentes de secuencia de las corrientes de falla son:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_F)} \quad 3.2.7$$

Transformando la ecuación anterior al dominio de fase mediante la ecuación ($I_a = I_0 + I_1 + I_2$)

$$I_a = I_0 = I_1 = I_2 = 3I_1 = \frac{3V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_F)} \quad 3.2.8$$

Observe también de las ecuaciones ($I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2$) y ($I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2$)

$$I_b = (I_0 + a^2 I_1 + a I_2) = (1 + a^2 + a)I_1 = 0 \quad 3.2.9$$

$$I_c = (I_0 + a I_1 + a^2 I_2) = (1 + a + a^2)I_1 = 0 \quad 3.2.10$$

Estas ecuaciones resultan obvias, puesto que la falla simple de línea a tierra está en la fase a, no en la fase b o c.

Los componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en la falla se determinan a partir de la ecuación (3.1.1). Los voltajes de línea a tierra en la falla se pueden obtener transformando los voltajes de secuencia al dominio de fase.

3.3 FALLA DE LÍNEA A LÍNEA

Considere una falla de línea a línea de la fase b a c que se muestra en la figura 3.9(a). De nuevo, para generalizar incluimos una impedancia de falla Z_F . De la figura 3.9(a):

Condiciones de falla en el dominio de la fase

Falla línea a línea

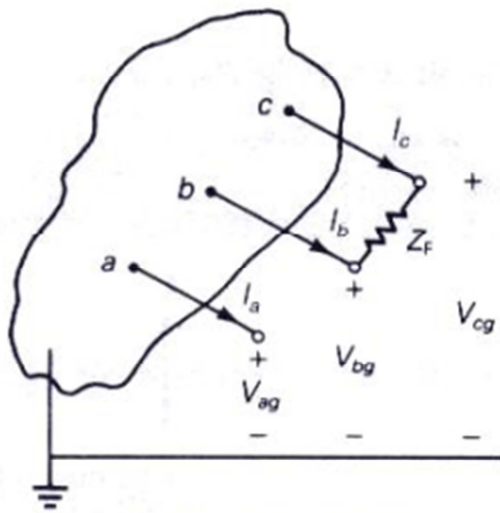
$$I_a = 0 \quad 3.3.1$$

$$I_c = -I_b \quad 3.3.2$$

$$V_{bg} - V_{cg} = Z_F I_b \quad 3.3.3$$

Transformamos las ecuaciones (3.3.1) a (3.3.3) al dominio de las secuencias.

Usando las ecuaciones (3.3.1) y (3.3.2) en $(I_s = A^{-1}I_p)$,



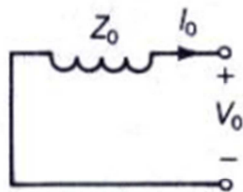
(a) Bus trifásico general

Condiciones de falla
en el dominio de fase:

$$I_a = 0$$

$$I_c = -I_b$$

$$(V_{bg} - V_{cg}) = Z_F I_b$$

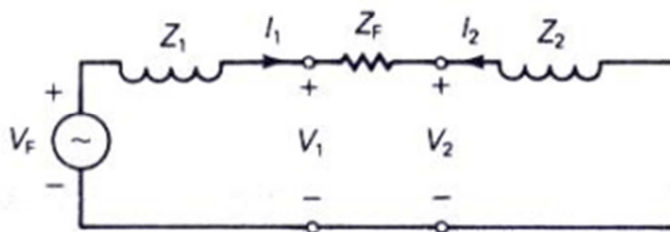


Condiciones de falla en
el dominio de las secuencias:

$$I_0 = 0$$

$$I_2 = -I_1$$

$$(V_1 - V_2) = Z_F I_1$$



(b) Redes de secuencia interconectadas

3.3.1 Falla de línea a línea

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \end{bmatrix} \quad 3.3.4$$

Usando las ecuaciones ($V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2$), ($V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2$) y ($I_b = I_0 + a^2I_1 + aI_2$) en la (3.3.3),

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) - (V_0 + aV_1 + a^2V_2) = Z_F(I_0 + a^2I_1 + aI_2) \quad 3.3.5$$

Observando de la ecuación (3.3.4) que $I_0 = I_2 = -I_1$, la (3.3.5) se simplifica a

$$(a^2 - a)V_1 - (a^2 - a)V_2 = Z_F(a^2 - a)I_1$$

O bien

$$V_1 - V_2 = Z_F I_1 \quad 3.3.6$$

Por consiguiente, de las ecuaciones (3.3.4) y (3.3.6):

Condiciones de falla en el dominio de las secuencias

Falla de línea a línea

$$I_0 = 0 \quad 3.3.7$$

$$I_2 = -I_1 \quad 3.3.8$$

$$V_1 - V_2 = Z_F I_1 \quad 3.3.9$$

Las ecuaciones (3.3.7) a (3.3.9) se satisfacen al conectar las redes de secuencia positiva y negativa en paralelo en las terminales de la falla a través de la

impedancia de falla Z_F , como se muestra en la figura 3.9 (b). De esta figura, las corrientes de falla son:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)} \quad I_0 = 0 \quad 3.3.10$$

Transformando la ecuación (3.3.10) al dominio de fase y usando la identidad $(a^2 - a) = -j\sqrt{3}$, la corriente de falla en la fase b es

$$\begin{aligned} I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 \\ &= -j\sqrt{3} I_1 = \frac{-j\sqrt{3} V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)} \end{aligned} \quad 3.3.11$$

Note también de las ecuaciones $(I_a = I_0 + I_1 + I_2)$ y $(I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2)$ que

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad 3.3.12$$

Y

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = -I_b \quad 3.3.13$$

Que comprueba Las condiciones de falla dadas por (3.3.1) y (3.3.2). Los componentes de secuencia de los voltajes línea a tierra en la falla están dados por la ecuación (3.1.1).

3.4 FALLA DE DOBLE LÍNEA ATIERRA

Una falla de doble línea a tierra de la fase b a La fase e a través de la impedancia de falla Z_F a tierra se muestra en la figura 3.11(a). De esta figura:

Condiciones de falla en el dominio de fase

Falla de doble línea a tierra

$$I_a = 0 \quad 3.4.1$$

$$V_{cg} = V_{bg} \quad 3.4.2$$

$$V_{bg} = Z_F(I_F + I_c) \quad 3.4.3$$

Transformando la ecuación (3.4.1) al dominio de las secuencias mediante la ecuación ($I_a = I_0 + I_1 + I_2$),

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad 3.4.4$$

También, utilizando las ecuaciones ($V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2$) y ($V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2$) en la (3.4.2),

$$(V_0 + aV_1 + a^2V_2) = (V_0 + a^2V_1 + aV_2)$$

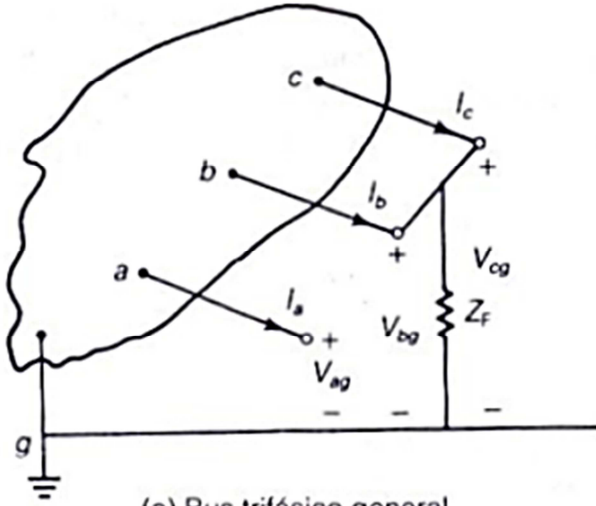
Simplificando:

$$(a^2 - a)V_2 = (a^2 - a)V_1$$

o bien,

$$V_2 = V_1$$

3.4.5

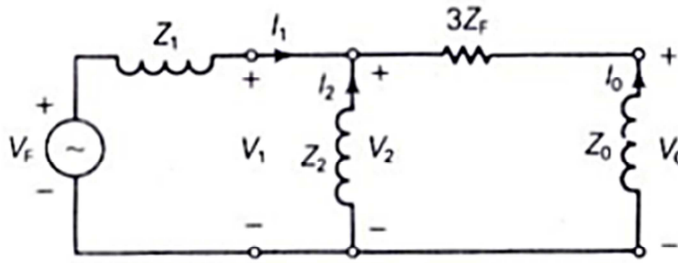


(a) Bus trifásico general

Condiciones de falla
en el dominio de fase:

$$I_a = 0$$

$$V_{bg} = V_{cg} = Z_F(I_b + I_c)$$



(b) Redes de secuencia interconectadas

Condiciones de falla en
el dominio de las secuencias:

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0$$

$$V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0$$

$$V_1 = V_2$$

3.4.1 Falla de doble línea a tierra

Ahora, usando las ecuaciones ($V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2$), ($I_b = I_0 + a^2I_1 + aI_2$) y ($I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2$) en la (3.4.3),

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) = Z_F(I_0 + a^2I_1 + aI_2 + (I_0 + aI_1 + a^2I_2)) \quad 3.4.6$$

Utilizando la ecuación ($V_2 = V_1$

) y La identidad $a^2 + a = -1$ en la (3.4.6),

$$(V_0 - V_1) = Z_F(2I_0 - I_1 - I_2) \quad 3.4.7$$

De la ecuación (3.4.4), $I_0 = -(I_1 + I_2)$; por lo tanto, la ecuación (3.4.7) se convierte en

$$V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0 \quad 3.4.8$$

De las ecuaciones (3.4.4), (3.4.5) y (3.4.8), resumimos:

Condiciones de falla en el dominio de la secuencia

Falla de doble línea a tierra

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad 3.4.9$$

$$V_2 = V_1 \quad 3.4.10$$

$$V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0 \quad 3.4.11$$

Las ecuaciones anteriores se satisfacen al conectar en paralelo las redes de secuencia cero, positiva y negativa en la terminal de la falla; además, $(3Z_F)$ se incluye en serie con la red de secuencia cero. Esta conexión se muestra en la figura 3.11(b). De esta figura, la corriente de falla de secuencia positiva es

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3Z_F)]} = \frac{V_F}{Z_1 + \left[\frac{Z_2(Z_0 + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \right]} \quad 3.4.12$$

Usando la división de corriente en la figura 3.11(b), las corrientes de falla de secuencia negativa y cero son

$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{Z_0 + 3Z_F}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad 3.4.13$$

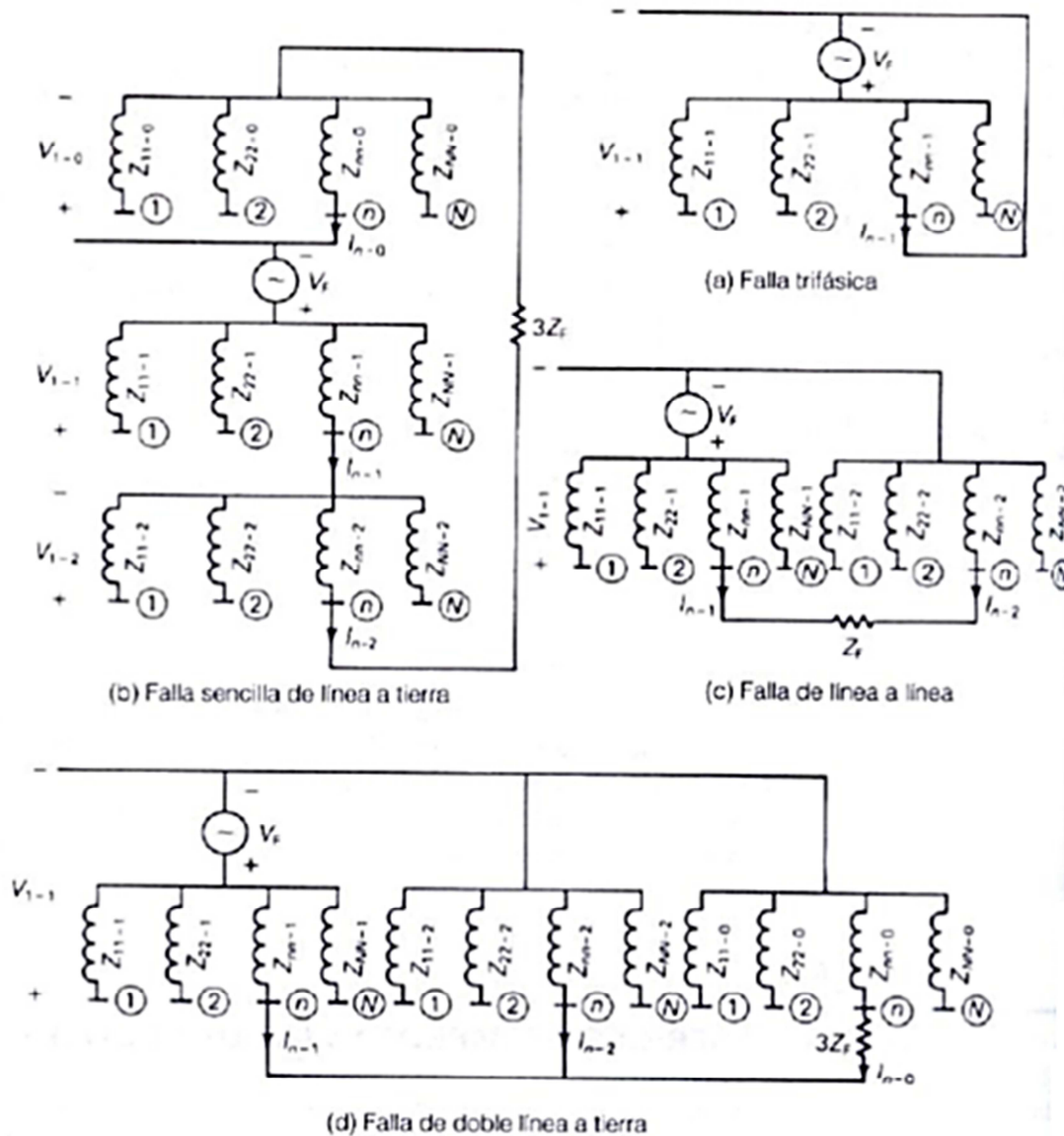
$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad 3.4.14$$

Estas corrientes de falla de secuencia pueden transformarse al dominio de la fase mediante la ecuación ($I_p = AI_s$). También, las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en la falla están dados por la ecuación (3.1.1).

3.5 MATRICES DE IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE BUS

Utilizamos la matriz de impedancias de bus de secuencia positiva de la sección 2.3 para calcular las corrientes y voltajes durante fallas trifásicas balanceadas. Este método se amplía aquí a las fallas asimétricas mediante la representación de cada red de secuencia como un circuito equivalente de impedancia de bus (o como un equivalente de rastrillo). Una matriz de impedancias de bus se puede calcular para cada red de secuencia al invertir la matriz de admitancias de bus correspondiente. Para simplificar, se omiten las resistencias, admitancias en derivación, impedancias de carga no rotatorias y corrientes de carga de prefalla.

En la figura 3.5.1 se muestra la conexión de los equivalentes de rastrillo de secuencia tanto para fallas simétricas como asimétricas en el bus n de un sistema de potencia trifásico de N buses. Cada elemento de impedancia de bus tiene un subíndice adicional 0, 1 o 2, que identifica al equivalente de rastrillo de secuencia donde se localiza. En la figura no se muestran las impedancias mutuas. El voltaje de pre falla V_F se incluye en el equivalente de rastrillo de secuencia positiva. De la figura,



3.5.1 Conexión de equivalencias de rastrillo de redes de secuencia para fallas de un sistema trifásico (no se muestran impedancias mutuas)

Las componentes de secuencia de la corriente de falla para cada tipo de falla en el bus n son como sigue:

$$I_{n-1} = \frac{V_F}{Z_{nn-1}} \quad 3.5.1$$

$$I_{n-0} = I_{n-2} = 0 \quad 3.5.2$$

Falla simple de línea a tierra (fase a a tierra):

$$I_{n-0} = I_{n-1} = I_{n-2} = \frac{V_F}{Z_{nn-0} + Z_{nn-1} + Z_{nn-2} + 3Z_F} \quad 3.5.3$$

Falla de línea a línea (fase b a c):

$$I_{n-1} = -I_{n-2} = \frac{V_F}{Z_{nn-1} + Z_{nn-2} + Z_F} \quad 3.5.4$$

$$I_{n-0} = 0 \quad 3.5.5$$

Falla de doble línea a tierra (fase b a c a tierra):

$$I_{n-1} = \frac{V_F}{Z_{nn-1} \left[\frac{Z_{nn-2}(Z_{nn-0} + 3Z_F)}{Z_{nn-2} + Z_{nn-0} + 3Z_F} \right]} \quad 3.5.6$$

$$I_{n-2} = (-I_{n-1}) \left(\frac{Z_{nn-0} + 3Z_F}{Z_{nn-0} + 3Z_F + Z_{nn-2}} \right) \quad 3.5.7$$

$$I_{n-0} = (-I_{n-1}) \left(\frac{Z_{nn-2}}{Z_{nn-0} + 3Z_F + Z_{nn-2}} \right) \quad 3.5.8$$

También de la figura 3.1.3, las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en cualquier bus k durante una falla en el bus n son:

$$\begin{bmatrix} V_{k-0} \\ V_{k-1} \\ V_{k-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{kn-0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{kn-1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{kn-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n-0} \\ I_{n-1} \\ I_{n-2} \end{bmatrix} \quad 3.5.9$$

Si el bus k está en el lado sin falla de un transformador Δ -Y, entonces los ángulos de fase de V_{k-1} y V_{k-2} en la ecuación (3.5.9) se modifican para tomar en cuenta los desfasamientos Δ -Y. Asimismo, las corrientes de falla de secuencia anteriores y los voltajes de secuencia pueden transformarse al dominio de fase mediante las ecuaciones ($I_p = AI_s$) y ($V_p = AV_s$).

Capítulo IV

Desarrollo de prototipo, pruebas y resultados

4.1 DESARROLLO DEL PROYECTO:

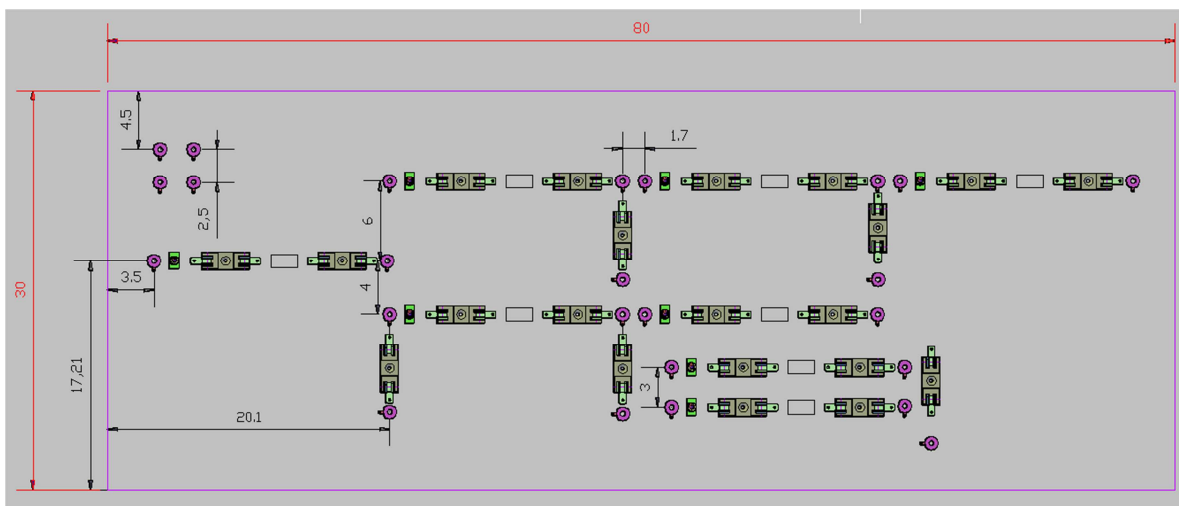
Para el estudio de corto circuito se implementa la construcción de un tablero, en el cual contara con dispositivos de protección (fusibles) bornes de conexión y bobinas que asemejaran las cargas en el sistema, así con la capacidad de poder simular un corto circuito en cualquier nodo del sistema, el tablero contara con las especificaciones siguientes:

Bornes de conexión tipo banana

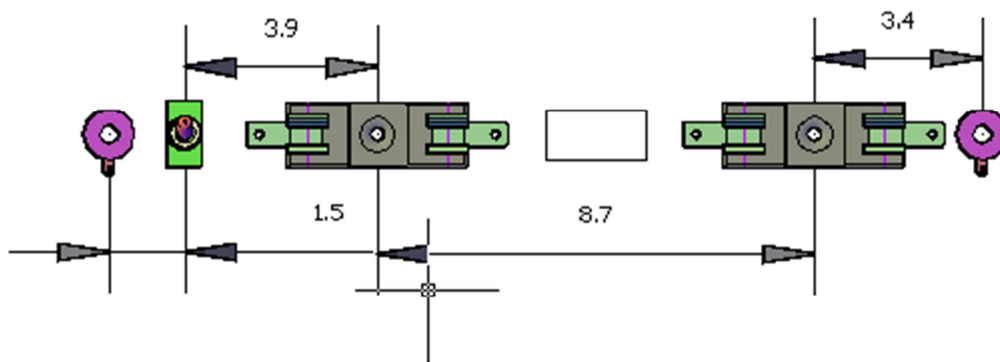
Interruptores de apertura o cierre de nodos

Fusibles de protección

Las medidas con las que se pretende construir el tablero son las siguientes.



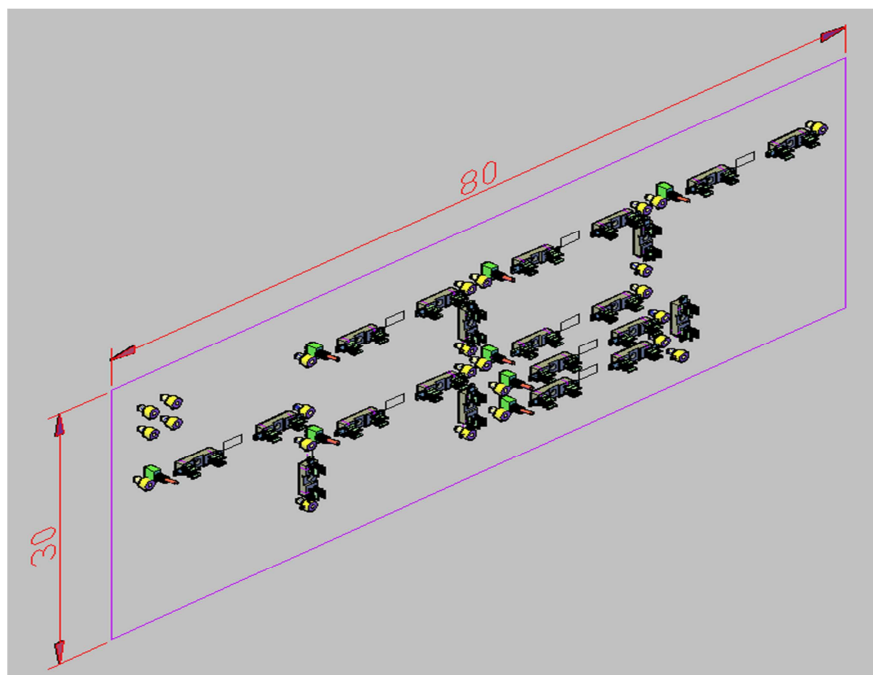
4.1.1 vista frontal del tablero.



4.1.2 detalles de medidas de los accesorios.

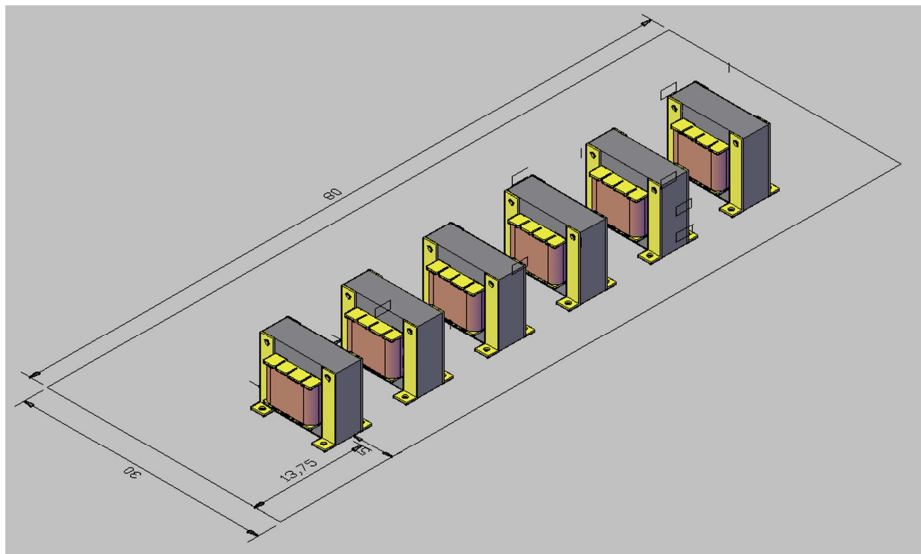
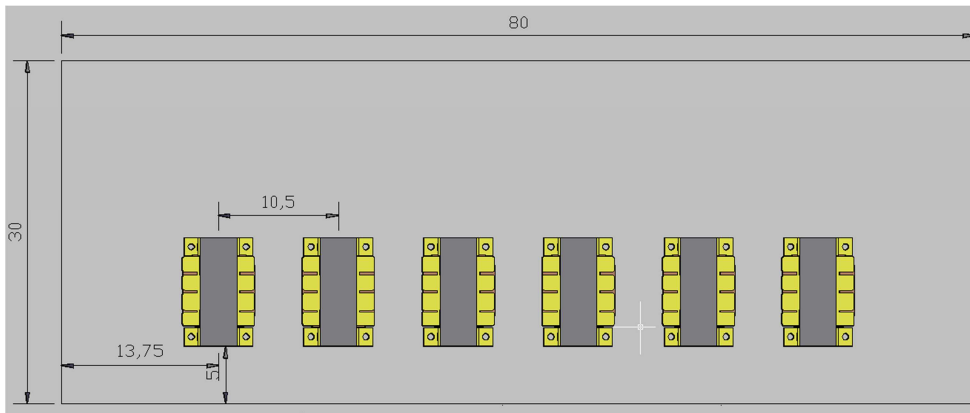
Vista del tablero desde la parte frontal.

En este proyecto facilitara la comprensión de los fenómenos que ocurren en una red eléctrica cuando ocurre una falla.



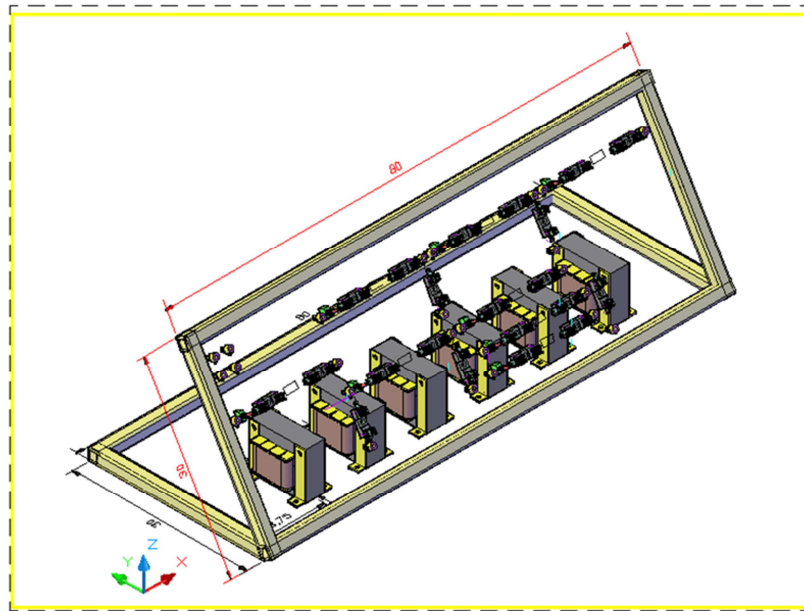
4.1.3 vista isométrica frontal

Vista de ubicación de las bobinas que se pretenden utilizar.



4.1.4 ubicación y distribución de bobinas.

Por ultimo en el desarrollo del proyecto se espera contar con el diseño mostrado en la figura siguiente, el cual se pretende que sea de fácil operación y comprensión por el operador que desee utilizarlo.



4.1.5 vista isométrica del tablero terminado.

4.2 CÁLCULO Y MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA BOBINA.

Para el desarrollo del tablero se construyeron las bobinas con las siguientes propiedades eléctricas y físicas.

Como primer punto se plantea el cálculo de componente resistiva de cada bobina.

4.2.1 CALCULO DE RESISTENCIAS

Una característica que poseen los componentes eléctricos es la resistencia ya que esta característica influye directamente en el flujo de corriente que circula en un conductor.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de la resistencia mediante la ley de ohm usando un voltaje de 5Vcd y obteniendo su corriente con ayuda de un instrumento de medición (amperímetro)

bobina	Vcd	I (A)	$R = \frac{Vcd}{I(A)}$
B1	5	2.6	1.92307692
B2	5	2	2.5
B3	5	1.5	3.33333333
B4	5	1.55	3.22580645
B5	5	1.85	2.7027027
B6	5	1.85	2.7027027
B7	5	2.6	1.92307692
B8	5	2.95	1.69491525

4.2.1 cálculo de resistencias

4.2.2 CALCULO DE IMPEDANCIAS.

En la tabla 4.2.2 se muestra la forma en la cual se obtienen los valores de la impedancia, reactancia inductiva y la inductancia, por medio de un análisis practico- teórico, en el cual con un voltaje aplicado a la bobina (vca) se mide la corriente que circula por la bobina, en base a los parámetros registrados se prosigue a cancelar su impedancia, por consiguiente se calcula su reactancia inductiva usando la impedancia y la resistencia obtenida en el apartado 4.2.1, finalmente se obtiene la inductancia (se usa una frecuencia de 60 Hz)

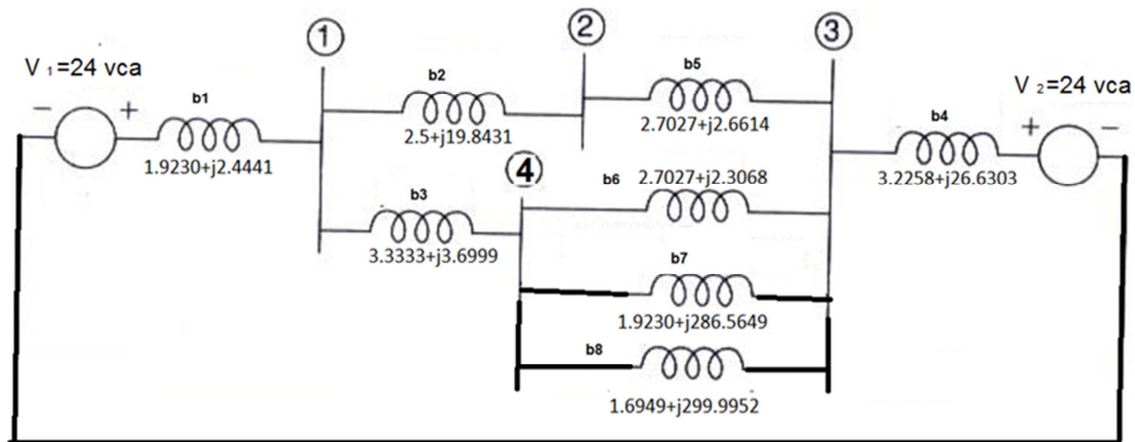
bobina	Vca	I(A)	$Z = \frac{Vca}{I(A)}$	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	$L = \frac{X_L}{2\pi f}$	impedancia
B1	12.44	4	3.11	2.444151215	0.00648331H	1.9230+j2.4441
B2	40	2	20	19.84313483	0.05263555H	2.5+j19.8431
B3	19.92	4	4.98	3.699903906	0.0098143H	3.3333+j3.6999
B4	10.73	0.4	26.825	26.63033604	0.07063916H	3.2258+j26.6303
B5	5.5	1.45	3.79310345	2.661396604	0.00705957H	2.7027+j2.6614
B6	5.33	1.5	3.55333333	2.306854112	0.00611912H	2.7027+j2.3068
B7	100.3	0.35	286.571429	286.564976	0.76013721H	1.9230+j286.5649
B8	102	0.34	300	299.9952121	0.79576202H	1.6949+j299.9952

4.2.2 obtención de reactancia inductiva e impedancia

4.3 CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL TABLERO.

Una vez construidas las bobinas y conociendo sus características físicas y eléctricas se prosiguió al armado del circuito de la figura 4.3.1 tomando en cuenta los nodos donde se pretende realizar las pruebas.

En este circuito se contemplan hacer pruebas de estado permanente, en condiciones de falla y con distintas cargas en los nodos.



4.3.1 circuito del tablero a realizar

4.4 cálculo de la matriz de admitancias.

El este procedimiento se usan las impedancias de cada bobina, y se analizan la forma de interconexión, ya que la admitancia se conoce como el inverso de la impedancia se prosigue a calculas las admitancias que contemplan la matriz analizando los enlaces entre los nodos.

Para facilitar el análisis se reduce en una impedancia equivalente la impedancia 4-3

$$Z_{eq_{43}} = \frac{1}{\frac{1}{2.7027 + 2.3068i} + \frac{1}{1.9230 + 286.5649i} + \frac{1}{1.6949 + 299.9952i}} = 2.6063 + 2.6606i$$

$$y_{11} = \frac{1}{(1.9230 + j2.4441)} + \frac{1}{2.5 + j19.8431} + \frac{1}{3.3333 + j3.6999} = 0.33948 - j0.4515$$

$$y_{12} = -\frac{1}{2.5 + j19.8431} = -0.0062 + j0.04960$$

$$y_{13}=0$$

$$y_{14} = -\frac{1}{3.3333 + j3.6999} = -0.1344 + j0.1492$$

$$y_{21} = -\frac{1}{2.5 + j19.8431} = -0.0062 + j0.0496$$

$$y_{22} = \frac{1}{2.5 + j19.8431} + \frac{1}{2.7027 + j2.6614} = 0.1941 - j0.2345$$

$$y_{23} = -\frac{1}{2.7027 + j2.6614} = -0.1878 + j0.1849$$

$$y_{24} = 0$$

$$y_{31} = 0$$

$$y_{32} = -\frac{1}{2.7027 + j2.6614} = -0.1878 + j0.1849$$

$$y_{33} = \frac{1}{2.7027 + j2.6614} + \frac{1}{(3.2258 + j26.6303)} + \frac{1}{2.6286 + j2.3180} = 0.4063 - 0.4107i$$

$$Y_{34} = -\frac{1}{2.6286 + j2.3180} = -0.2140 + 0.1887i$$

$$y_{41} = -\frac{1}{3.3333 + j3.6999} = -0.1344 + j0.1492$$

$$y_{42} = 0$$

$$Y_{43} = -\frac{1}{2.6286 + j2.3180} = -0.2140 + 0.1887i$$

$$y_{44} = \frac{1}{3.3333 + j3.6999} + \frac{1}{2.6063 + 2.6606i} = 0.3484 - 0.3379i$$

Una vez obtenidos todos los elementos de la matriz y_{bus} se ordenan en forma matricial ordenando todos los elementos de manera simplificada:

Por lo tanto se tiene que:

$$y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515 i & -0.0063 + 0.0496 i & 0 & -0.1344 + 0.1492 i \\ -0.0063 + 0.0496 i & 0.1941 - 0.2346 i & -0.1878 + 0.185 i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185 i & 0.3802 - 0.4138 i & -0.1879 + 0.1918 i \\ -0.1344 + 0.1492 i & 0 & -0.1879 + 0.1918 i & 0.3223 - 0.341 i \end{pmatrix}$$

4.5 CÁLCULO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE LA RED.

A continuación se presenta el desarrollo de z_{bus} de una manera simplificada usando métodos numéricos.

Debido a que los sistemas eléctricos presentan características en la cuales se pueden simplificar mediante análisis matemático se tiene que:

Código usado en matlab:

```
b1=1.9230+2.4441i
b2=2.5+19.8431i
b3=3.3333+3.6999i
b4=3.2258+26.6303i
b5=2.7027+2.6614i
b6=2.7027+2.3068i
b7=1.9230+286.5649i
b8=1.6949+299.952i
bs=(1)/((1/b5)+(1/b7)+(1/b8))
y11=(1/b1)+(1/b2)+(1/b3)
y12=-(1/b2)
y13=0
y14=-(1/b3)
y21=-(1/b2)
y22=(1/b2)+(1/b5)
y23=-(1/b5)
y24=0
```

$$y_{31}=0$$

$$y_{32}=-(1/b_5)$$

$$y_{33}=(1/b_5)+(1/b_4)+(1/b_s)$$

$$y_{34}=-(1/b_s)$$

$$y_{41}=-(1/b_3)$$

$$y_{42}=0$$

$$y_{43}=-(1/b_s)$$

$$y_{44}=(1/b_3)+(1/b_s)$$

$$y_{bus}=[y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}; y_{21}, y_{22}, y_{23}, y_{24}; y_{31}, y_{32}, y_{33}, y_{34}; y_{41}, y_{42}, y_{43}, y_{44}]$$

$$z_{bus}=\text{inv}(y_{bus})$$

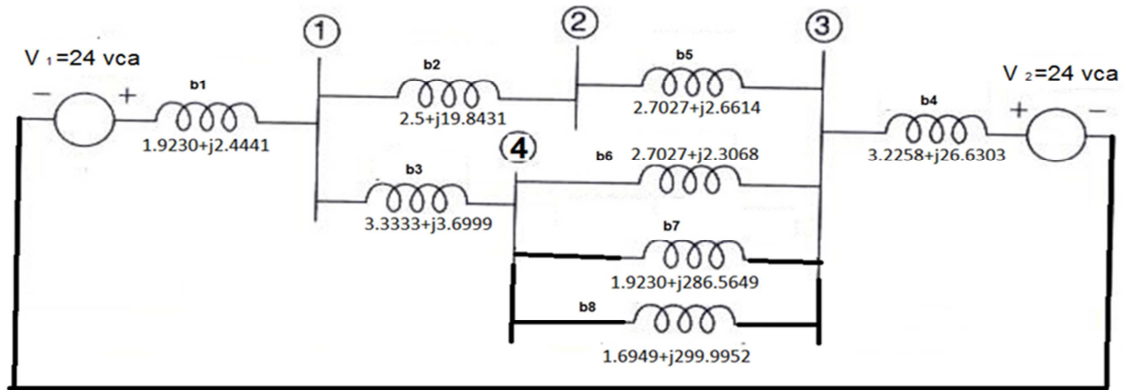
Como $y_{bus}^{-1} = z_{bus}$ se tiene que.

$$z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.6829 + 2.3162i & 1.2905 + 2.0188i & 1.1971 + 2.0205i & 1.408 + 2.1421i \\ 1.2905 + 2.0188i & 4.3023 + 8.0812i & 2.7597 + 5.9696i & 2.0906 + 4.2943i \\ 1.1971 + 2.0205i & 2.7597 + 5.9696i & 3.4558 + 6.375i & 2.4448 + 4.5351i \\ 1.408 + 2.1421i & 2.0906 + 4.2943i & 2.4448 + 4.5351i & 3.4406 + 5.0708i \end{pmatrix}$$

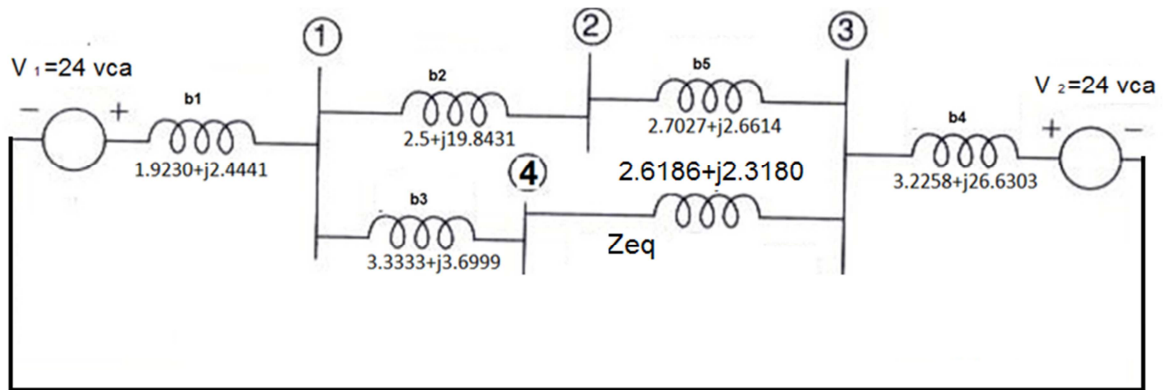
4.6 CONSIDERANDO UNA RED DE 4 NODOS

Analizando el circuito realizado se prosigue al análisis de comportamiento de las variables eléctricas de forma numérica.

Para el sistema mostrado en la figura 4.6.1.



4.6.1 reducción de circuito eléctrico



4.6.2 circuito equivalente.

$$y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515i & -0.0063 + 0.0496i & 0 & -0.1344 + 0.1492i \\ -0.0063 + 0.0496i & 0.1941 - 0.2346i & -0.1878 + 0.185i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185i & 0.3802 - 0.4138i & -0.1879 + 0.1918i \\ -0.1344 + 0.1492i & 0 & -0.1879 + 0.1918i & 0.3223 - 0.341i \end{pmatrix}$$

Como $y_{bus}^{-1} = z_{bus}$ tenemos que.

$$z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.6829 + 2.3162i & 1.2905 + 2.0188i & 1.1971 + 2.0205i & 1.408 + 2.1421i \\ 1.2905 + 2.0188i & 4.3023 + 8.0812i & 2.7597 + 5.9696i & 2.0906 + 4.2943i \\ 1.1971 + 2.0205i & 2.7597 + 5.9696i & 3.4558 + 6.375i & 2.4448 + 4.5351i \\ 1.408 + 2.1421i & 2.0906 + 4.2943i & 2.4448 + 4.5351i & 3.4406 + 5.0708i \end{pmatrix}$$

Calculo los voltajes de estado permanente, considerando dos fuentes de voltaje de 24vca. Aplicando el teorema de thevenin

$$\underline{V} = \underline{Z}_{bus} * \underline{I}$$

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} 1.6821 + 2.3135i & 1.2884 + 2.026i & 1.1958 + 2.0305i & 1.4044 + 2.1337i \\ 1.2884 + 2.026i & 4.3638 + 8.0219i & 2.8218 + 5.8937i & 2.0809 + 4.3399i \\ 1.1958 + 2.0305i & 2.8218 + 5.8937i & 3.5172 + 6.2797i & 2.4405 + 4.5903i \\ 1.4044 + 2.1337i & 2.0809 + 4.3399i & 2.4405 + 4.5903i & 3.4233 + 5.0396i \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.1076 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix} =$$

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} 24 \\ 24 \\ 24 \\ 24 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto se tiene que $\underline{V} =$

Siguiente paso es el cálculo de las corrientes de estado permanente o corrientes de prefalla en cada nodo. Usando la ecuación: $I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \quad i \neq j$ por lo tanto se tiene que:

$$I_{a1} = \frac{V_a - V_1}{Z_a} = \frac{24 - (24)}{1.9230 + j2.4441} = -0.017023 + 0.5366i$$

$$I_{b3} = \frac{V_b - V_3}{Z_b} = \frac{24 - (24)}{3.2258 + j26.6303} = 0$$

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}} = \frac{24 - (24)}{2.5 + j19.8431} = 0$$

$$I_{23} = \frac{V_2 - V_3}{Z_{23}} = \frac{24 - (24)}{2.7027 + j2.6614} = 0$$

$$I_{14} = \frac{V_1 - V_4}{Z_{14}} = \frac{24 - (24)}{3.3333 + j3.6999} = 0$$

$$I_{43} = \frac{V_4 - V_3}{Z_{43}} = \frac{24 - (24)}{2.6063 + 2.6606i} = 0$$

Debido a que el sistema se encuentra trabajando en vacío los voltajes en cada nodo son iguales, esto tiende a que no haya diferencia de voltajes y por lo tanto no hay corrientes circulando entre los nodos.

4.7 Calculo de voltajes en el circuito con carga.

Cuando se tienen los valores de los voltajes en vacío se procede a colocar una carga en un nodo de la red con el fin de analizar su comportamiento.

Se procede a colocar una carga en el nodo dos con una impedancia de 10Ω , por lo tanto se calcula de igual manera la matriz de admitancias y la matriz Z_{bus} , como en el sistema únicamente cambia el valor de la impedancia 22 se tiene que.

$$y_{22} = \frac{1}{2.5 + j19.8431} + \frac{1}{2.7027 + j2.6614} + \frac{1}{10} = 0.2940 - 0.2345i$$

Por lo tanto la matriz de admitancias es igual a:

$$y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515i & -0.0063 + 0.0496i & 0 & -0.1344 + 0.1492i \\ -0.0063 + 0.0496i & 0.294 - 0.2346i & -0.1878 + 0.185i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185i & 0.3802 - 0.4138i & -0.1879 + 0.1918i \\ -0.1344 + 0.1492i & 0 & -0.1879 + 0.1918i & 0.3223 - 0.341i \end{pmatrix}$$

Y la matriz de impedancias:

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.6547 + 1.968i & 1.2889 + 0.6842i & 1.2498 + 1.0633i & 1.4323 + 1.4462i \\ 1.2889 + 0.6842i & 4.7014 + 2.9974i & 3.2511 + 2.3394i & 2.3946 + 1.6514i \\ 1.2498 + 1.0633i & 3.2511 + 2.3394i & 3.9546 + 3.7912i & 2.7694 + 2.6518i \\ 1.4323 + 1.4462i & 2.3946 + 1.6514i & 2.7694 + 2.6518i & 3.6489 + 3.6986i \end{pmatrix}$$

Para la obtener los voltajes en los sistemas se usa la equivalente de thevenin junto con la fórmula: $\underline{V} = \underline{Z}_{bus} * \underline{I}$

Por lo tanto se tiene:

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} 1.6547 + 1.968i & 1.2889 + 0.6842i & 1.2498 + 1.0633i & 1.4323 + 1.4462i \\ 1.2889 + 0.6842i & 4.7014 + 2.9974i & 3.2511 + 2.3394i & 2.3946 + 1.6514i \\ 1.2498 + 1.0633i & 3.2511 + 2.3394i & 3.9546 + 3.7912i & 2.7694 + 2.6518i \\ 1.4323 + 1.4462i & 2.3946 + 1.6514i & 2.7694 + 2.6518i & 3.6489 + 3.6986i \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.1076 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix} =$$

$$\underline{V} = \begin{pmatrix} 20.8822 - 1.6159i \\ 12.7178 - 7.1688i \\ 16.1895 - 5.5923i \\ 18.238 - 3.9391i \end{pmatrix}$$

Por lo tanto se tiene que $\underline{V} =$

En esta parte se puede observar que ya existen caídas de voltaje considerables en la red eléctrica por lo tanto en este caso si existen corrientes circulando bajo estas condiciones de operación.

4.8 CÁLCULO DE CORRIENTES EN EL CIRCUITO CON CARGA.

Para el cálculo de las corrientes que circulan entre los diferentes nodos de la red se usa la ecuación: $I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}}$ donde se usan los voltajes de operación con carga en la red. Se observan que existen caídas de tensión en los diferentes nodos a diferencia de la operación en vacío donde los voltajes son los mismos en todos los nodos.

Los voltajes de las fuentes se consideran constante y controlados a un nivel de 24Vca.

$$v = \begin{bmatrix} 20.8822 - 1.6159i \\ 12.7187 - 7.1688i \\ 16.1895 - 5.5923i \\ 18.238 - 3.9391i \end{bmatrix}$$

Por lo tanto se tiene que :

$$I_{a1} = \frac{V_a - V_1}{Z_a} = \frac{24 - (20.8822 - 1.6159i)}{1.9230 + j2.4441} = 1.0283 - 0.4666i$$

$$I_{b3} = \frac{V_b - V_3}{Z_b} = \frac{24 - (16.1895 - 5.5923i)}{3.2258 + j26.6303} = 0.2420 - 0.2640i$$

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}} = \frac{(20.8822 - 1.6159i) - (12.7187 - 7.1688i)}{2.5 + j19.8431} = 0.3265 - 0.3703i$$

$$I_{23} = \frac{V_2 - V_3}{Z_{23}} = \frac{(12.7187 - 7.1688i) - (16.1895 - 5.5923i)}{2.7027 + j2.6614} = -0.9436 + 0.3459i$$

$$I_{14} = \frac{V_1 - V_4}{Z_{14}} = \frac{(20.8822 - 1.6159i) - (18.238 - 3.9391i)}{3.3333 + j3.6999} = 0.7020 - 0.0822i$$

$$I_{43} = \frac{V_4 - V_3}{Z_{43}} = \frac{24 - (24)}{2.6063 + 2.6606i} = 0.7020 - 0.0823i$$

De igual manera se pueden colocar cargas en distintos puntos de la red y verificar los valores obtenidos, se tiene que llegar a conclusión dependiendo de los valores que tengas las cargas serán afectados los voltajes, a mayor carga se presentara una mayor caída de tensión en la cual se deben aplicar métodos para la corrección de caída de tensión y controlar los voltajes en los nodos.

4.8 SIMULACIÓN DE FALLAS EN TODOS LOS NODOS.

- Una vez que se ha calculado los voltajes y corrientes de estado permanente, se simula una falla en el nodo 4 con una impedancia de falla con valor de $1 \times 10^{-20} \Omega \approx 0$

Matriz de impedancias durante la falla.

Puesto que tiene similares características la y_{bus} . De estado permanente que la de falla, en este caso solo cambia la componente y_{44} se tiene que:

$$y_{44} = \frac{1}{3.3333 + j3.6999} + \frac{1}{2.6063 + 2.6606i} + \frac{1}{1 \times 10^{-20}} = 1 * 10^{20} - 0.3410i$$

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515i & -0.0063 + 0.0496i & 0 & -0.1344 + 0.1492i \\ -0.0063 + 0.0496i & 0.1941 - 0.2346i & -0.1878 + 0.185i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185i & 0.3802 - 0.4138i & -0.1879 + 0.1918i \\ -0.1344 + 0.1492i & 0 & -0.1879 + 0.1918i & 1^{20} - 0.341i \end{pmatrix}$$

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.3265 + 1.4568i & 0.8371 + 0.3457i & 0.6338 + 0.2375i & 0.5261 + 0.1003i \\ 0.8371 + 0.3457i & 3.8637 + 4.8812i & 2.1444 + 2.5402i & 0.9482 + 0.3109i \\ 0.6338 + 0.2375i & 2.1444 + 2.5402i & 2.6396 + 2.7063i & 1.0358 + 0.2928i \\ 0.5261 + 0.1003i & 0.9482 + 0.3109i & 1.0358 + 0.2928i & 1.261 + 0.2213i \end{pmatrix}$$

Siguiente paso es el cálculo de las corrientes de que circulan durante la falla en cada nodo. Usando la ecuación: $I_{f(nodo)}^{(1)} = \frac{v_f}{Z_{ij}^{(1)}}$ y tomando en cuenta los voltajes de prefalla junto con la impedancia equivalente, por lo tanto se tiene que:

$$I_{f(1)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{1.3265 + 1.4568i} = 8.2012 - 9.0068i \text{ A}$$

$$I_{f(2)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{3.8637 + 4.8812i} = 2.3927 - 3.0229i \text{ A}$$

$$I_{f(3)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{2.6396 + 2.7063i} = 4.4327 - 4.5447i \text{ A}$$

$$I_{f(4)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{1.261 + 0.2213i} = 18.4639 - 3.2403i \text{ A}$$

Siguiente pasó cálculo de los voltajes durante el corto circuito

Para el cálculo de los voltajes en cada nodo durante la falla se utiliza la siguiente ecuación. $v_j^{(1)} = v_{pf} - z_{ij}^{(1)} I_i^{(1)}$

Por lo tanto se tiene que:

$$v_1^{(1)} = 24\angle 0 - (0.5260 + 0.1003i)(18.4639 - 3.2403i) = 13.9376 - 0.1496 V$$

$$v_2^{(1)} = 24\angle 0 - (0.9482 + 0.3109i)(18.4639 - 3.2403i) = 5.4851 - 2.6679 V$$

$$v_3^{(1)} = 24\angle 0 - (1.0358 + 0.2928i)(18.4639 - 3.2403i) = 3.9263 - 2.0499i V$$

$$v_4^{(1)} \approx 0$$

Voltajes durante la falla.

$$= \begin{pmatrix} 1.3265 + 1.4568i & 0.8371 + 0.3457i & 0.6338 + 0.2375i & 0.5261 + 0.1003i \\ 0.8371 + 0.3457i & 3.8637 + 4.8812i & 2.1444 + 2.5402i & 0.9482 + 0.3109i \\ 0.6338 + 0.2375i & 2.1444 + 2.5402i & 2.6396 + 2.7063i & 1.0358 + 0.2928i \\ 0.5261 + 0.1003i & 0.9482 + 0.3109i & 1.0358 + 0.2928i & 1.261 + 0.2213i \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.10758 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 13.9419 - 0.1305i \\ 5.4819 - 2.6623i \\ 3.9239 - 2.0477i \\ 2.1989 \cdot 10^{-20} - 3.235 \cdot 10^{-20}i \end{pmatrix}$$

Se considera un voltaje nulo en el nodo fallado

- Una vez que se ha calculado los voltajes y corrientes de estado permanente, se simula una falla en el nodo 3 con una impedancia de falla con valor de $1 \times 10^{-20} \Omega \approx 0$

Matriz de impedancias durante la falla.

Puesto que tiene similares características la y_{bus} . De estado permanente que la de falla, en este caso solo cambia la componente y_{33} se tiene que:

$$y_{33} = \frac{1}{2.7027 + j2.6614} + \frac{1}{(3.2258 + j26.6303)} + \frac{1}{2.6063 + 2.6606i} + \frac{1}{1^{-20}} = 1 * 10^{20} - 0.4137i$$

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515i & -0.0063 + 0.0496i & 0 & -0.1344 + 0.1492i \\ -0.0063 + 0.0496i & 0.1941 - 0.2346i & -0.1878 + 0.185i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185i & 1^{20} - 0.4137i & -0.1879 + 0.1918i \\ -0.1344 + 0.1492i & 0 & -0.1879 + 0.1918i & 0.3223 - 0.341i \end{pmatrix}$$

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.4204 + 1.6919i & 0.7371 + 0.205i & 0.4609 + 0.0634i & 0.8881 + 0.7503i \\ 0.7371 + 0.205i & 3.2771 + 2.8705i & 1.2659 + 0.3079i & 1.0386 + 0.2693i \\ 0.4609 + 0.0634i & 1.2659 + 0.3079i & 1.4146 + 0.25i & 1.0046 + 0.1799i \\ 0.8881 + 0.7503i & 1.0386 + 0.2693i & 1.0046 + 0.1799i & 2.4246 + 1.9741i \end{pmatrix}$$

Siguiente paso es el cálculo de las corrientes de que circulan durante la falla en cada nodo. Usando la ecuación: $I_{f(nodo)}^{(1)} = \frac{v_f}{Z_{ij}^{(1)}}$ y tomando en cuenta los voltajes de prefalla junto con la impedancia equivalente, por lo tanto se tiene que:

$$I_{f(1)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{1.4204 + 1.6919i} = 6.9855 - 8.3207iA$$

$$I_{f(2)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{3.2771 + 2.8705i} = 4.1440 - 3.6299i A$$

$$I_{f(3)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{1.4146 + 0.25i} = 16.4521 - 2.9075i A$$

$$I_{f(4)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{2.4246 + 1.9741i} = 5.9525 - 4.8465i A$$

Siguiente pasó cálculo de los voltajes durante el corto circuito

Para el cálculo de los voltajes en cada nodo durante la falla se utiliza la siguiente ecuación. $v_j^{(1)} = v_{pf} - z_{ij}^{(1)} I_i^{(1)}$

Por lo tanto se tiene que:

$$v_1^{(1)} = 24\angle 0 - (0.4609 + 0.0634i)(16.4521 - 2.9075i) = 16.2328 + 0.2970i V$$

$$v_2^{(1)} = 24\angle 0 - (1.2659 + 0.3079i)(16.4521 - 2.9075i) = 2.2780 - 1.3849i V$$

$$v_4^{(1)} = 24\angle 0 - (1.0046 + 0.1799i)(16.4521 - 2.9075i) = 6.9449 - -0.0388i V$$

$$v_3^{(1)} \approx 0$$

Voltajes durante la falla.

$$\begin{pmatrix} 1.4204 + 1.6919i & 0.7371 + 0.205i & 0.4609 + 0.0634i & 0.8881 + 0.7503i \\ 0.7371 + 0.205i & 3.2771 + 2.8705i & 1.2659 + 0.3079i & 1.0386 + 0.2693i \\ 0.4609 + 0.0634i & 1.2659 + 0.3079i & 1.4146 + 0.25i & 1.0046 + 0.1799i \\ 0.8881 + 0.7503i & 1.0386 + 0.2693i & 1.0046 + 0.1799i & 2.4246 + 1.9741i \end{pmatrix} = * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.1076 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 16.2094 + 0.3157i \\ 2.276 - 1.381i \\ 1.5773 \cdot 10^{-20} - 2.9051 \cdot 10^{-20}i \\ 6.9384 - 0.0311i \end{pmatrix}$$

Se considera un voltaje nulo en el nodo fallado

- Una vez que se ha calculado los voltajes y corrientes de estado permanente, se simula una falla en el nodo 2 con una impedancia de falla con valor de $1 \times 10^{-20} \Omega \approx 0$

Calculo de la matriz de impedancias durante la falla.

Puesto que tiene similares características la y_{bus} . De estado permanente que la de falla, en este caso solo cambia la componente y_{33} se tiene que:

$$y_{22} = \frac{1}{2.5 + j19.8431} + \frac{1}{2.7027 + j2.6614} + \frac{1}{1^{-20}} = 1 * 10^{20} - j0.2346$$

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 0.3395 - 0.4515i & -0.0063 + 0.0496i & 0 & -0.1344 + 0.1492i \\ -0.0063 + 0.0496i & 1^{20} - 0.2346i & -0.1878 + 0.185i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185i & 0.3802 - 0.4138i & -0.1879 + 0.1918i \\ -0.1344 + 0.1492i & 0 & -0.1879 + 0.1918i & 0.3223 - 0.341i \end{pmatrix}$$

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.3835 + 1.8126i & 0.3032 + 0.0098i & 0.5701 + 0.5398i & 0.9312 + 1.076i \\ 0.3032 + 0.0098i & 1.152 + 0.1296i & 0.821 + 0.1394i & 0.5981 + 0.0893i \\ 0.5701 + 0.5398i & 0.821 + 0.1394i & 2.3004 + 2.1152i & 1.5439 + 1.4589i \\ 0.9312 + 1.076i & 0.5981 + 0.0893i & 1.5439 + 1.4589i & 2.7418 + 2.8503i \end{pmatrix}$$

Siguiente paso es el cálculo de las corrientes de que circulan durante la falla en cada nodo. Usando la ecuación: $I_{f(nodo)}^{(1)} = \frac{v_f}{Z_{ij}^{(1)}}$ y tomando en cuenta los voltajes de prefalla junto con la impedancia equivalente, por lo tanto se tiene que:

$$I_{f(1)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{1.3835 + 1.8126i} = 6.3859 - 8.3665i \text{ A}$$

$$I_{f(2)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{1.152 + 0.1296i} = 20.5730 - 2.3145i \text{ A}$$

$$I_{f(3)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{2.3004 + 2.1152i} = 5.6533 - 5.1982i \text{ A}$$

$$I_{f(4)}^{(1)} = \frac{24\angle 0}{2.7418 + 2.8503i} = 4.2069 - 4.3734i \text{ A}$$

Siguiente pasó cálculo de los voltajes durante el corto circuito

Para el cálculo de los voltajes en cada nodo durante la falla se utiliza la siguiente ecuación. $v_j^{(1)} = v_{pf} - z_{ij}^{(1)} I_i^{(1)}$

Por lo tanto se tiene que:

$$v_1^{(1)} = 24\angle 0 - (0.3032 + 0.0098i)(20.5730 - 2.3145i) = 17.7395 + 0.50014i \text{ V}$$

$$v_3^{(1)} = 24\angle 0 - (0.821 + 0.1394i)(20.5730 - 2.3145i) = 6.7869 - 0.9679i \text{ V}$$

$$v_4^{(1)} = 24\angle 0 - (0.5981 + 0.08993i)(20.5730 - 2.3145i) = 11.4871 - 0.4658i \text{ V}$$

$$v_2^{(1)} \approx 0$$

Voltajes durante la falla.

$$\begin{pmatrix} 1.3835 + 1.8126i & 0.3032 + 0.0098i & 0.5701 + 0.5398i & 0.9312 + 1.076i \\ 0.3032 + 0.0098i & 1.152 + 0.1296i & 0.821 + 0.1394i & 0.5981 + 0.0893i \\ 0.5701 + 0.5398i & 0.821 + 0.1394i & 2.3004 + 2.1152i & 1.5439 + 1.4589i \\ 0.9312 + 1.076i & 0.5981 + 0.0893i & 1.5439 + 1.4589i & 2.7418 + 2.8503i \end{pmatrix} = * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.1076 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 17.7133 + 0.5189i \\ 1.2321 \cdot 10^{-20} - 2.3104 \cdot 10^{-20}i \\ 6.7788 - 0.9636i \\ 11.4723 - 0.4414i \end{pmatrix}$$

Se considera un voltaje nulo en el nodo fallado

- Una vez que se ha calculado los voltajes y corrientes de estado permanente, simulamos una falla en el nodo 1 con una impedancia de falla con valor de $1 \times 10^{-20} \Omega \approx 0$

Matriz de impedancias durante la falla.

Puesto que tiene similares características la y_{bus} . De estado permanente que la de falla, en este caso solo cambia la componente y_{33} tenemos que:

$$y_{11} = \frac{1}{(1.9230 + j2.4441)} + \frac{1}{2.5 + j19.8431} + \frac{1}{3.3333 + j3.6999} + \frac{1}{1^{-20}} = 1 \times 10^{20} - j0.4515$$

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 1^{20} - 0.4515 i & -0.0063 + 0.0496 i & 0 & -0.1344 + 0.1492 i \\ -0.0063 + 0.0496 i & 0.1941 - 0.2346 i & -0.1878 + 0.185 i & 0 \\ 0 & -0.1878 + 0.185 i & 0.3802 - 0.4138 i & -0.1879 + 0.1918 i \\ -0.1344 + 0.1492 i & 0 & -0.1879 + 0.1918 i & 0.3223 - 0.341 i \end{pmatrix}$$

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} 1.0438 + 0.3407i & 0.855 + 0.3366i & 0.8264 + 0.3582i & 0.9193 + 0.3484i \\ 0.855 + 0.3366i & 4.0223 + 6.6541i & 2.5329 + 4.5623i & 1.7717 + 2.7716i \\ 0.8264 + 0.3582i & 2.5329 + 4.5623i & 3.2803 + 4.9889i & 2.1829 + 3.0328i \\ 0.9193 + 0.3484i & 1.7717 + 2.7716i & 2.1829 + 3.0328i & 3.0787 + 3.4461i \end{pmatrix}$$

Siguiente paso es el cálculo de las corrientes de que circulan durante la falla en cada nodo. Usando la ecuación: $I_{f(nodo)}^{(1)} = \frac{v_f}{Z_{ij}^{(1)}}$ y tomando en cuenta los voltajes de prefalla junto con la impedancia equivalente, por lo tanto tenemos que:

$$I_{f(1)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{1.0438 + 0.3407i} = 20.7791 - 6.7824i \text{ A}$$

$$I_{f(2)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{4.0223 + 6.6541i} = 1.5968 - 2.6416i \text{ A}$$

$$I_{f(3)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{3.2803 + 4.9889i} = 2.2084 - 3.3586i \text{ A}$$

$$I_{f(4)}^{(1)} = \frac{24 \angle 0}{3.0787 + 3.4461i} = 3.4602 - 3.8731i \text{ A}$$

Siguiente pasó cálculo de los voltajes durante el corto circuito

Para el cálculo de los voltajes en cada nodo durante la falla se utiliza la siguiente ecuación. $v_j^{(1)} = v_{pf} - z_{ij}^{(1)} I_i^{(1)}$

Por lo tanto se tiene que:

$$v_2^{(1)} = 24\angle 0 - (0.855 + 0.3366i)(20.7791 - 6.7824i) = 3.9509 - 1.1952iV$$

$$v_3^{(1)} = 24\angle 0 - (0.8264 + 0.3582i)(20.7791 - 6.7824i) = 4.3986 - 1.8380iV$$

$$v_4^{(1)} = 24\angle 0 - (0.9193 + 0.3484i)(20.7791 - 6.7824i) = 2.5347 - 1.0043iV$$

$$v_1^{(1)} \approx 0$$

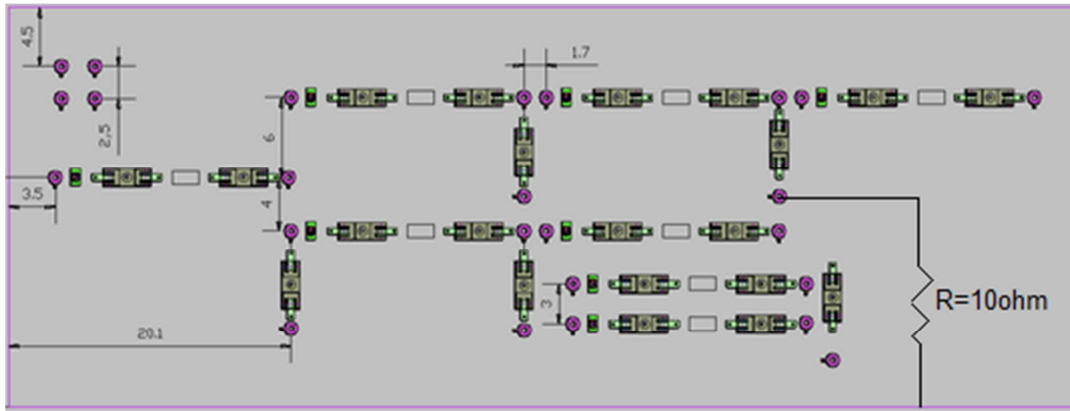
Voltajes durante la falla.

$$= \begin{pmatrix} 1.0438 + 0.3407i & 0.855 + 0.3366i & 0.8264 + 0.3582i & 0.9193 + 0.3484i \\ 0.855 + 0.3366i & 4.0223 + 6.6541i & 2.5329 + 4.5623i & 1.7717 + 2.7716i \\ 0.8264 + 0.3582i & 2.5329 + 4.5623i & 3.2803 + 4.9889i & 2.1829 + 3.0328i \\ 0.9193 + 0.3484i & 1.7717 + 2.7716i & 2.1829 + 3.0328i & 3.0787 + 3.4461i \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 4.7719 - 6.0504i \\ 0 \\ 0.1076 - 0.8881i \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} 4.9278 \cdot 10^{-20} - 6.7675 \cdot 10^{-20}i \\ 3.9496 - 1.198i \\ 4.3979 - 1.8397i \\ 2.5351 - 1.0075i \end{pmatrix}$$

Con estos voltajes se puede observar las caídas de voltaje en la red durante la presencia de una falla en el sistema.

4.10 PRUEBAS AL TABLERO.

Una de las pruebas realizadas al prototipo es colocar una carga resistiva en un nodo de la red (10ohm) y analizar su comportamiento, en este caso se midieron los valores con instrumentos, se observa que al ser conectada la carga, cambian los niveles de voltaje (disminuyen), además en este caso ya existen corrientes circulando en el sistema, a diferencia de la operación en vacío,



4.10.1 representaciones de pruebas al prototipo.

Otra prueba consistió en el mismo nodo donde se colocó la carga generar un corto circuito, en este caso se observa que los voltajes tienen a disminuir más que con la carga de 10 ohm, en el caso del nodo donde se produce la falla tiende a cero.

Las diversas pruebas que se realizan al circuito cumplieron con los esperado en el análisis numérico, por lo tanto es viable el análisis de un circuito antes de la puesta en marcha, de esta forma se puede predecir el comportamiento del sistema y analizar los grandes sistemas de potencia de una manera similar al analizado al prototipo a escala.

Por ultimo este análisis llega a un enfoque de la coordinación de protecciones que puedan soportar las corrientes del circuito el condiciones normales de operación y deben operar en la presencia de alguna falla en la red, empezando por las protecciones primarias.

CONCLUSIONES.

Se ha afrontado el problema del estudio de corto circuito en un sistema de laboratorio, con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables eléctricas y los efectos ocasionados en toda la red eléctrica tales como caídas de voltaje y aumentos considerables en las corrientes que fluyen.

1. El primer enfoque consistió en analizar los orígenes de los cortos circuitos, así como las características que se presentan en cada tipo de falla, frecuencia en que ocurren los diferentes tipos de fallas, así como las fuentes que contribuyen a las fallas eléctricas tales como centrales generadoras, bancos de capacitores, motores síncronos de gran capacidad etc.
2. El segundo enfoque consiste en la construcción de un tablero que nos brinda las bases necesarias para comprender los fenómenos que ocurren en un sistema eléctrico y como afecta a los dispositivos de protección.

Se han analizado varios fenómenos relacionados con los tipos de fallas en los sistemas eléctricos. Por un lado se analizó cuáles son las bases físicas que rigen el comportamiento de una red eléctrica, las cuales nos permiten evaluar las capacidades de funcionamiento. Con los conocimientos anteriores se pueden evaluar las características primordiales de operación en estado permanente y poder comparar con los parámetros presentados durante una falla en cualquier punto del sistema.

las características que posee una falla simétrica de un sistema eléctrico de potencia consiguiendo estudiar que es la falla menos frecuente y la que más problemas de estabilidad ocasiona, debido a que este tipo de falla interrumpe en su totalidad el suministro de energía eléctrica al sector de la red donde se presenta el problema.

Se estudió los tipos de fallas asimétricas que existen, tales como falla de línea a línea, línea a tierra y doble línea a tierra. En este apartado se pudo analizar el comportamiento de los voltajes y corrientes en cada caso, observando que tienen un comportamiento diferente en cuanto a la falla simétrica, por tal motivo es indispensable conocer todos estos fenómenos con el fin de poder controlar en un grado de afectación mínima en conjunto con la coordinación de protecciones eléctricas para cada tipo de falla que se pudiera presentar.

Otro punto importante son las características que presenta el sistema en estado permanente y en condiciones de falla, llegando a la conclusión que una falla en cualquier nodo de la red trae fuertes consecuencias en todos los nodos, además se pudo observar que a cuanto más cercano se encuentre con el nodo de falla tiene mayor impacto y cuanto más alejado del nodo de la falla se tiene un menor efecto. Por ende se deben tener sistemas de bus infinitito con la finalidad de crear una red más robusta a fallas en toda la red.

Dentro de las pruebas realizadas al tablero se observó la gran similitud entre el análisis numérico y el medido de forma práctica, las variaciones se pueden considerar en la calibración de instrumentos de medición o errores de apreciación, las variables medidas y calculadas fueron las variaciones en los niveles de voltaje en estado permanente, con carga variable y en condiciones de falla, así como las corrientes que se presentan en los nodos y entre nodos.

Se observó en el tablero la influencia que presenta la configuración de la interconexión entre el mismo circuito, ya que se presentan corrientes de corto circuito mayores en los puntos más cercanos a la fuente de alimentación, únicamente limitada por la impedancia serie de la fuente o la impedancia de la fuente más la impedancia serie acoplada.

Finalmente por el uso del prototipo se pueden implementar diferentes tipos de cargas y analizar el comportamiento de todas las variables eléctricas como pueden ser capacitores y bobinas, logrando tener un enfoque en la influencia del

factor de potencia y su comportamiento ante la conexión de cargas inductivas y capacitivas.

RECOMENDACIONES Y/O SUGERENCIAS.

Para la operación del tablero se tienen como recomendaciones principales.

1. Debido a que se trabaja con energía eléctrica se debe tener precaución en la manipulación de los componentes.
2. Se recomienda instalar instrumentos de medición para controlar las variables eléctricas.
3. Manejar con precaución los fusibles, ya que al ser de cristal una mala operación puede causar ruptura de los mismos.
4. se puede implementar distintos tipos de cargas en el sistema y analizar su comportamiento
5. usar fusibles para las condiciones de estado permanente, dependiendo de la carga instalada.
6. los cortos circuitos deben ser lo menos prolongados posibles, ya que se pueden originar daños al equipo.
7. para este tablero se pueden agregar las distintas cagas dentro del mismo

BIBLIOGRAFÍA,

j. Duncan Glover Mulukutia S. Sarma, Analisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia, 3° edición, pp 319-491, Editorial Thomson

Willian D. Stevenson, Analisis de sistemas eléctricos de potencia, 2° edición, Editorial Mc. Graw hill.

Gilverto Enriquez Harper, protección de instalaciones eléctricas industriales, 2° edición, editorial limusa.

Antonio Gomez-Exposito. Analisis y operacion de sistemas de energia electrica. McGraw Hill.(2002)

D. Glover, M. Sarma. Power system analysis and design. 2° edicion. PWS (1994)

O. I. Elgerd Electric energy systems theory, an introduction. 2° edicion.McGraw Hill.(1982)

Roeper, "Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos", Siemens.

Páginas de internet

www.fi.uba.ar/materias/6509/Comp%20Sim%E9tricas-Versi%F3n%2013-3-06.pdf

<http://es.wikipedia.org/wiki/Cortocircuito>

http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_circuito/af_circuito_3.htm

www.tuveras.com/lineas/cortocircuito/cortocircuito.htm

es.thefreedictionary.com/cortocircuito

http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electronica/calculocorrientecortocircuito/