

Capítulo 4

Anormalidades en Sistemas de Potencia

4.1 Introducción

La planificación, diseño y operación de un sistema de potencia requiere un continuo y comprensivo análisis para evaluar el rendimiento actual y establecer planes efectivos de expansión y mejora. El trabajo computacional para determinar los flujos de potencia (*power flows*) y niveles de voltaje (*voltage levels*) resultantes de una condición sencilla de operación para aunque una pequeña red es del todo intolerable, si se realiza por métodos manuales. La necesidad de ayuda computacional dio origen al diseño de una computadora de analógica de propósito especial (analizador de res de ac; *ac network analyzer*) a comienzos de 1929. Este provee la posibilidad de determinar los flujos de carga y voltajes durante condiciones normales y de emergencia y estudiar el comportamiento transitorio del sistema resultante de una condición de falla o de conmutación.

Las primeras aplicaciones de computadoras digitales a problemas de sistemas de potencia datan de l comienzo de 1940. La mayoría de las aplicaciones eran limitadas en el alcance debido a la pequeña capacidad de las calculadoras de tarjetas perforadas en uso durante ese período. Las computadoras digitales de gran escala se hicieron posibles en la mitad de los 1950, y los primeros intentos de programas de flujo de carga permitieron el desarrollo de programas para cortocircuito y cálculos de estabilidad.

Hoy, las computadoras digitales son una herramienta imprescindible en la planificación de sistemas de potencia, en el cual es necesario predecir el crecimiento futuro y simular día a día la operación por períodos superiores a los veinte años y más. Tal como la tecnología de la computación ha avanzado, también la complejidad en los sistemas de potencia industrial y comercial ha ocurrido lo mismo. Estos sistemas de potencia han crecido en las décadas recientes con capacidades que exceden al de las pequeñas empresas de distribución de electricidad.

Hoy, el intensamente competitivo ambiente de negocios ha forzado a las plantas o personal de la gerencia de las empresas eléctricas a ser muy cuidadoso del costo total directo de distribución de electricidad. Entonces ellos deben asegurar el máximo retorno del capital de inversión en el sistema de potencia. El uso de computadoras digitales hace posible estudiar el rendimiento de sistemas de potencias actuales y propuestas bajo muy variadas condiciones de operación. Respuestas a múltiples preguntas sobre el impacto de expansiones en el sistema, capacidad de cortocircuito, estabilidad de distribución de carga, etc. pueden ser inteligentemente y económicamente obtenidas.

4.2 Aplicaciones de Análisis de Sistemas de Potencia

La planificación, diseño y operación de lo sistemas de potencia requiere de estudios de ingeniería para evaluar el rendimiento del sistema existente, confiabilidad, seguridad y economía. Los estudios, propiamente concebidos y conducidos, son una vía de costo efectivo, parta prevenir sorpresas y optimizar la selección de equipos. En la etapa de diseño, los estudios identifican y alertan potenciales deficiencias en el sistema antes

Francisco M. Gonzalez-Longatt

que este entre en operación. En sistemas existentes, ayudan a localizar la causa de falla de equipos y mala operación, y determina medidas correctivas para mejorar el rendimiento del sistema.

La complejidad de los modernos sistemas de potencia, hacen el estudio por medios manuales difíciles, tediosos y de un consumo alto de tiempo. Las herramientas computacionales asociados con los estudios de sistemas de potencia han sido grandemente simplificados por el uso de programas de computadoras digitales. Algunas veces, requerimientos de estudios y economía obligan al uso de computadoras analógicas –un analizador de transitorios de redes (*transient network analyzer TNA*)- el cual provee un modelo a escala del sistema de potencia.

Los programas digitales ofrecen a los ingenieros una poderosa herramienta para realizar estudios de rendimientos del sistema eficientemente. Las computadoras permiten diseños óptimos a mínimos costos, independientemente de la complejidad del sistema. Los avances en la tecnología de computación, han no solo reducido los costos de cómputo sino también el tiempo de ingeniería necesario para el uso de los programas. Los estudios formales ya pueden ser hechos fuera de las consultoras siendo posible ser hechos en casa. Los programas altamente amigables al usuario, con menús interactivos, ayudas en línea e interfaces gráficas de usuario (*GUI Graphical user interface*) guía a los ingenieros a través del programa para emprender los análisis.

El *Transient network analyser (TNA)* es una poderosa herramienta para los estudios de sobretensiones. El uso de microcomputadores para el control y adquisición de datos desde el TNA permitiendo la incorporación de probabilidad y estadística en el análisis de sobretensiones de maniobra (*switching surge*). Una de las mayores ventajas del TNA, es que permite una fácil y rápida reconfiguración de sistemas complejos con un resultado inmediato, evitando el relativamente alto tiempo asociado con el ejecutase de programas digitales para esos sistemas.

Los más comunes estudios en sistemas de potencia son:

- Estudios de Flujo de Potencia (*Load Flow Studies*)
- Estudios de Cortocircuitos (*Short-circuit studies*)
- Estudios de Estabilidad (*Stability studies*)
- Estudios de arranque de motores (*Motor-starting studies*)
- Estudios de armónicos (*Harmonic analysis studies*)

4.2.1. Estudios de Flujo de Potencia

El estudio de flujo de carga, determina el voltaje, corriente, potencia activa y reactiva además del factor de potencia, en un sistema de potencia. Los estudios de flujo de carga son una excelente herramienta para la planificación del sistema. Un número de procedimientos de operación, pueden ser analizados, incluyendo condiciones de contingencias, tales como la pérdida de un generador, una línea de transmisión, o una carga. Estos estudios alertaran al usuario sobre las condiciones que pueden causar sobrecarga de los equipos o pobres niveles de voltaje. Los estudios de flujo de carga pueden ser usados para determinar el tamaño y localización óptima para capacitores de potencia para mejora de factor de potencia. También, son muy usuales en la determinación de los voltajes del sistema bajo condiciones de repentinas aplicaciones o desconexiones de carga. Los resultados de un estudio de flujo de carga son también punto de partida de estudios de estabilidad. Las computadoras digitales son usadas ampliamente en los estudios de flujo de carga debido a la complejidad de los cálculos involucrados.

4.2.2. Estudios de Cortocircuito

Los estudios de cortocircuito son hechos para determinar la magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia a varios intervalos de tiempo luego que una falla ocurre. La magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia luego de una falla varía con el tiempo a menos que alcancen la condición de régimen permanente. Este comportamiento es debido a las características del sistema y

dinámica. Durante este tiempo, los sistemas de protección son llamados a detectar, interrumpir e aislar esa falla. Los esfuerzos impuestos en estos equipos dependen también de la magnitud de la corriente, la cual dependen del tiempo de la inserción de la falla. Esto es hecho para varios tipos de falla (trifásica, fase a fase, doble fase a tierra y fase a tierra) a diferentes localizaciones a través del sistema. La información es usada para seleccionar fusibles, *breakers*, y *swichgear* en adición con los ajustes de los dispositivos de protección.

4.2.3. Estudios de Estabilidad

La habilidad de un sistema de potencia, que contiene dos o más maquinas sincrónicas, de continuar operando luego que un cambio ocurre en el sistema es una medida de su estabilidad. El problema de estabilidad toma dos formas: estabilidad de régimen permanente y estabilidad transitoria. La estabilidad de régimen permanente puede ser definida como la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo entre las maquinas dentro del sistema luego de una relativamente lento cambio de carga. La estabilidad transitoria es la habilidad del sistema de mantener en sincronismo bajo condiciones transitorias, tales como fallas, operaciones de maniobra, etc.

En un sistema industrial de potencia, la estabilidad puede envolver el sistema de la empresa eléctrica y uno o más generadores dentro de la empresa o motores sincrónicos. Las contingencias, tales como botes de *carga* (*load rejection*), poseen un impacto directo sobre la estabilidad. Los esquemas de aislar (*Load-shedding*) cargas y el tiempo total de despeje de falla (*critical fault-clearing times*) pueden ser determinados en función de seleccionar los apropiados ajustes de los relés de protección.

Este tipo de estudios son probablemente el más complejo de los hechos en un sistema de potencia. Una simulación debe incluir modelos de los generadores sincrónicos y sus controles, por ejemplo: reguladores de voltaje, sistemas de excitación, y gobernadores. Los motores son algunas veces representados por sus características dinámicas como son los compensadores estáticos y relés de protección.

4.2.4. Estudio de Arranque de Motores

La corriente de arranque de la mayoría de los motores AC son varias veces la corriente normal de plena carga. Tanto los motores sincrónicos como los de inducción pueden maneja entre 5 y 10 veces la corriente a plena carga cuando arrancan desde la línea de alimentación. El torque de arranque varía directamente con el cuadrado del voltaje aplicado. Si el voltaje en terminalés cae en forma excesiva, el motor puede no tener suficiente toque como para acelerar y alcanzar la velocidad de operación. Los motores funcionando pueden aparecer por una excesiva caída de voltaje, o por la operación de los relés de bajo voltaje. En adición a estos, si los motores son arrancados frecuentemente, la variación del voltaje puede causar *flicker* apreciables en los sistemas de iluminación.

Con el uso de las técnicas de estudios en el arranque de motores, estos problemas pueden ser precedidos antes de la instalación del motor. Si un dispositivo de arranque es necesario, su característica y ajuste puede ser fácilmente determinado. Una típica computadora digital puede calcular la velocidad, deslizamiento, toque eléctrico de salida, corriente de carga, y voltaje en terminalés en intervalos de tiempo discretos desde la velocidad de rotor bloqueado hasta la de plena carga. También, el voltaje en importantes puntos a través del sistema durante arranque puede ser monitoreado. El estudio ayuda a seleccionar el mejor método de arranque, el diseño apropiado del motor, y los requerimientos de diseño del sistema para minimizar el impacto del arranque del motor en el sistema entero.

4.2.5. Estudio de Armónicos

Un armónico producido por una carga puede afectar a las otras cargas si una distorsión significativa de voltaje es causada. La distorsión de voltaje causada por una carga productora de armónicos es una función, tanto de la impedancia del sistema como del valor del armónico de corriente inyectado. El hecho real es que para una corriente de carga dada está distorsionada, no siempre significa que generara efectos adversos a los otros consumidores. Si la impedancia del sistema es baja, la distorsión de voltaje es usualmente despreciable en la

ausencia de resonancia armónica. Sin embargo, si la resonancia armónica prevalece, voltajes y corrientes armónicas son intolerables. Algunos de los efectos primarios de la distorsión de voltaje son los siguientes:

- Interferencia de sistemas de control y comunicaciones.
- Calentamiento en máquinas rotatorias.
- Sobre calentamiento y falla de capacitores

Cuando las corrientes armónicas son altas y viajan en una parte significativa expuesta a circuito paralelo de comunicación, el efecto principal es la interferencia telefónica. Este problema depende de las partes físicas del circuito como también de la frecuencia y magnitud de las corrientes armónicas. Las corrientes armónicas también causan pérdidas adicionales en la línea y adicionales pérdidas por histéresis en los transformadores.

Errores en las mediciones de Energía son frecuentemente causadas por armónicos. A una frecuencia armónica, el medidor puede registrar un valor más alto o más bajo dependiendo de los armónicos presentes y de la respuesta del medidor a ese armónico. Afortunadamente el error es usualmente bajo. Los análisis son comúnmente hechos para predecir los niveles de distorsión en adición de una nueva carga generadora de armónicos o un banco de capacitores. El procedimiento es primero desarrollar un modelo que pueda precisamente simular la respuesta armónica de el sistema actual y entonces se agrega el modelo de la nueva adición. El análisis también comúnmente hecho evalúa alternativas para corregir los problemas encontrados por mediciones.

Solo pequeños circuitos pueden ser analizados sin un programa computacional. Típicamente, un programa computacional, para el análisis de armónicos, proveerá al ingeniero de la capacidad para calcular la respuesta en frecuencia del sistema de potencia y mostrará su respuesta en forma gráfica. Los programas proveen la capacidad de predecir la distorsión real basado de modelos de convertidores, hornos de arco y otras cargas no lineales.

4.3 Clasificación Clásica del Análisis de los Sistemas de Potencia

Una concepción clásica del análisis de sistemas eléctricos de gran potencia, se basa en el estudio de la red bajo dos condiciones temporales posibles, *régimen permanente* y *régimen dinámico*.

En el estudio de los sistemas de potencias en condiciones de régimen permanente se remite solamente problemas donde se ameritan la resolución de ecuaciones algebraicas, mientras que los problemas de régimen dinámico determinar alguna variable implica la resolución de ecuaciones diferenciales en el plano temporal, lo cual hace la mayor parte de las veces que los estudios dinámicos de sistema de potencia se transformen en materia de postgrado. Los grandes y complejos sistemas eléctricos de potencia requieren el planteamiento y resolución de un gran número de ecuaciones ya sean algebraicas o diferenciales, por esto, en ocasiones este laborioso trabajo es realizado por computadores digitales. Es importante mencionar que un sistema de potencia se considera simétrico, siendo la línea de transmisión el único elemento que provee asimetría, pero si se supone que la línea es transpuesta o es de una longitud muy corta, se logra desprestigiar o eliminar los efectos asimétricos y se estudia como balanceada.

En condiciones asimétricas el estudio del comportamiento del sistema requiere un tratamiento especial, sobre la base de la teoría de componentes simétricas¹. Las condiciones de desbalances del sistema no solo lo imponen las cargas sino que también las fallas.

4.4 Causas del Funcionamiento Anormal del Sistema de Potencia

En sistema de potencia puede ser afectado por muchas situaciones anormales que produzcan una operación fuera de las condiciones normales, estas posibles causas pueden ser:

- Falla de los componentes del sistema

¹ Las condiciones de desbalances del sistema no solo lo imponen las cargas sino que también las fallas.

- Situaciones de carácter imprevisto (Por ejemplo: Tormentas, etc.)
- Errores de operación. (Manuales o automáticos)

Estas situaciones provocan efectos muy variados en el sistema de potencia tales como:

- Mal servicio.
- Pérdida de la estabilidad.
- Daños de los equipos.

Las grandes compañías eléctricas son las encargadas de desempeñar las funciones de los grandes sistemas de potencia, siendo importante para ellas eliminar las situaciones anormales de operación. Las interrupciones del servicio, y la variación de los parámetros de la red (tensión, corriente, frecuencia, etc.) fuera de los límites, son consecuencia común de una operación anormal, causando enormes inconvenientes técnicos y económicos.

4.5 Anormalidades dentro de un Sistema de Potencia

Una clasificación sencilla de las anormalidades de acuerdo a su severidad con que afectan al sistema de potencia es:

- Perturbaciones.
- Fallas.

4.5.1. Perturbaciones

Las perturbaciones son condiciones que permiten continuar la operación de un sistema pero que pueden ocasionar el daño de ciertos equipos si su duración es prolongada. Las perturbaciones pueden ser causadas por:

- Sobretensiones.
- Sobrecarga.
- Oscilaciones de potencia.

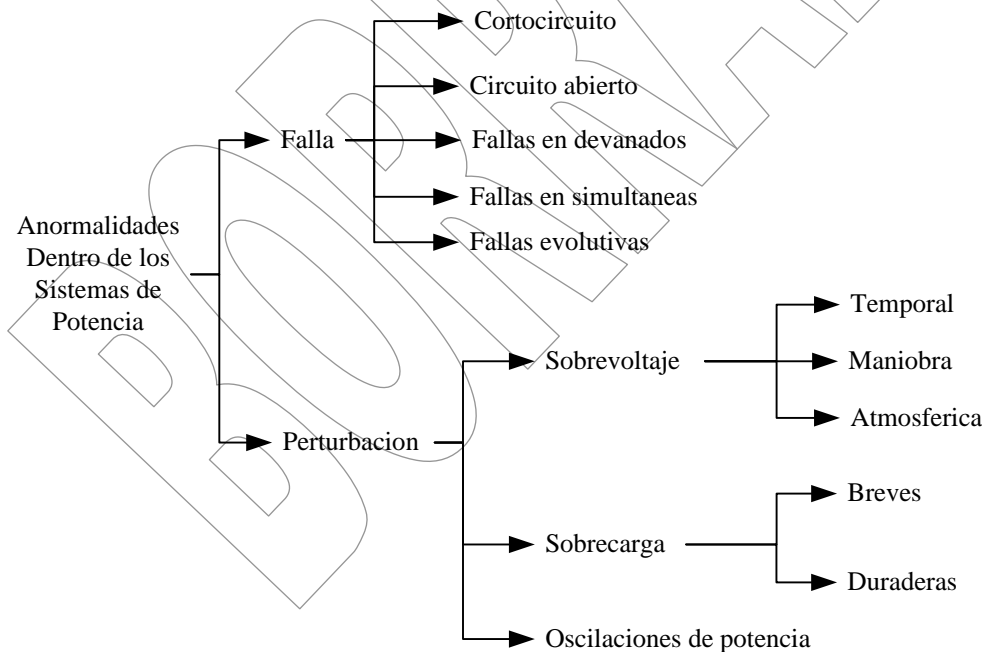


Figura 4.5.1. Anormalidades en Sistemas de Potencia

4.5.1.1. Sobretensiones

Las sobretensiones son cualquier valor de tensión entre fase y tierra, cuyo valor pico, es mayor que la tensión máxima del sistema. La tensión en el sistema eléctrico de potencia es variable, dependiendo de las condiciones del sistema, estas variaciones están limitadas por las características de los equipos, tensión nominal, tensión máxima.

- *Voltaje Nominal*: Es el valor de la tensión para el cual se proyectó el sistema y se fabricó y probaron los equipos. Ejemplo: En Venezuela el sistema de proyecto para las siguientes voltajes nominales: 115, 230, 400 y 765 kV.
- *Voltaje Máxima*: comprende un aumento de 5% a 10% por encima de la tensión nominal del sistema. Ejemplo: En Venezuela las máximas tensiones de operación son respectivamente: 115/123; 230/242; 400/440; 765/800 kV.

Ejemplo 4.1.

En el sistema de 230 kV de CADAFE en la Subestación La Arenosa, se presenta una tensión de 242 kV (RMS). Estimar el valor de la sobretensión.

$$V_{fasepico} = \sqrt{2} \frac{242kV}{\sqrt{3}}$$

$$V_{fasepico} = 198kV$$

Una clasificación de las sobretensiones puede ser realizada en función de la duración de las mismas, quedando:

- Sobretensiones Temporales.
- Sobretensiones de Maniobra.
- Sobretensiones Atmosféricas.

4.5.1.1.1 Sobretensiones Temporal

Una sobretensión temporal es una tensión oscilatoria en fases o entre fases y tierra de larga duración no amortiguadas o en su defecto ligeramente amortiguado. Las sobretensiones temporales consisten en cambios en la amplitud de la componente de 60Hz de la tensión o sus armónicas por efecto de operaciones de maniobra, cambios den el flujo de potencia reactiva, fallas o bien por *Ferroresonancia*. La sobretensión, si es superior al 20% de la tensión nominal y de acuerdo a la ubicación del codo de la curva de magnetización de los transformadores puede ocasionar una fuerte saturación del núcleo magnético, vibraciones en el núcleo, etc., además se genera corrientes armónicas que pueden producir resonancia en el sistema dando origen a sobretensiones adicionales. Los orígenes de las sobretensiones temporales pueden ser:

- *Energización de líneas (Efecto Ferranti)*: Una línea larga alimentada por una fuente inductiva en vacío no compensada en el extremo receptor es mayor que en el extremo de envío. Para compensar estas sobretensiones temporales, en especial, en su período inicial o de líneas largas energizadas por fuentes de relativa poca potencia es necesario utilizar reactores en derivación, la cantidad de compensación varía del 60 al 90%. El grado de compensación se expresa como la relación entre la potencia de los reactores a la potencia capacitiva generada por la línea. Ejemplo: Para una línea de 230 kV, el factor de sobretensión (Voltaje de Recepción/Voltaje de Envío) por efecto Ferranti en función del largo es:

Tabla 4.14.2 Relación de Sobretensión, para una línea de 230 kV

Largo	200 Km.	300 Km.	400 Km.	500 Km.
V_r/V_t	1.03	1.03	1.11	1.18

Fuente: Muñoz, J. (1983). Técnicas de Alta Tensión. UC

- *Cambios bruscos de carga:* Cuando la carga suministrada al sistema se desconecta, total o parcialmente, se producen sobretensiones de la frecuencia industrial que pueden durar varios segundos. Estas sobretensiones se deben a la sobreexcitación de los generadores y duran hasta que los reguladores llevan estas variaciones a sus valores normales. Si en general se alimenta una carga y por alguna razón se tiene una pérdida súbita de la carga, la tensión tiende a ser la tensión interna del generador tras la reactancia transitoria.
- *Sobretensiones por falla:* En un sistema eléctrico de potencia se pueden presentar entre otras las siguientes fallas: Una línea a tierra, dos líneas a tierra, bifásica levantada tierra, trifásica. De estas fallas, la que produce mayores sobretensiones en las fases sanas, son las fallas a tierra, en especial, una fase a tierra debido a su asimetría.
- *Ferresonancia:* Es el fenómeno oscilatorio creado por la capacitancia del sistema de potencia, en conjunto con la inductancia no lineal de un elemento con núcleo magnético (transformador de potencia, de medición o un reactor de compensación). Este fenómeno se observa por lo general en sistema de alta tensión y casi nunca en sistemas de distribución de energía, ya que es precisamente la capacitancia de líneas de muy larga distancia la que induce la ferresonancia, siempre que la inductancia asociada al circuito se encuentra en condiciones favorables para entrar en resonancia. La operación en vacío de un transformador de potencia, o con muy poca carga, puede crear las condiciones favorables.
- *Conductores en abierto.*

4.5.1.1.2 Sobretensiones de Maniobra

Las sobretensiones de maniobra son tensiones transitorias que se producen por cambios bruscos en el sistema, son de corta duración (mili-microsegundos) y que son altamente amortiguadas. Las posibles causas de sobretensiones de maniobra son: apertura de corrientes de falla, Falla kilométrica (falla en una línea a una distancia de algunos kilómetros del interruptor), Apertura de transformadores en vacío y reactores, Aperturas de circuitos capacitivos.

4.5.1.1.3 Sobretensiones Atmosféricas

Las sobretensiones atmosféricas son elevaciones de la tensión causadas por descargas eléctricas atmosféricas entre nube y tierra, que impactan en las instalaciones y líneas de transmisión, estas sobretensiones son unidireccionales y de muy corta duración y su valor no depende de la tensión del sistema. Las descargas pueden ser:

- *Directas:* La descarga alcanza directamente alguno de los conductores de fase, es la más grave, debido a que la magnitud de estas sobretensiones son independientes de la tensión del sistema y por lo general sumamente elevadas.
- *Indirectas:* Cuando la descarga se produce sobre los cables de guarda, las torres o a los elementos de apantallamiento o blindaje.
- *Inducidas:* Corresponde cuando la descarga tiene lugar en las cercanías de las líneas o instalaciones.

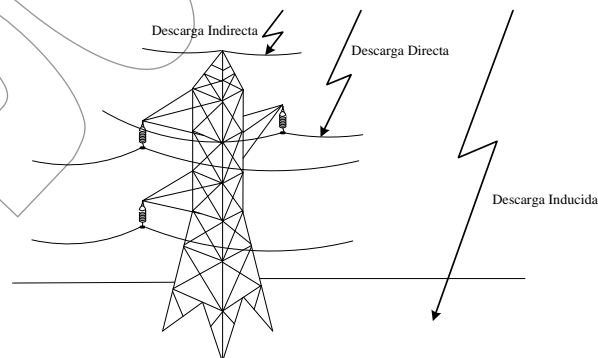


Figura 4.5.2. Presentación esquemática de los posibles tipos de descargas atmosféricas

4.5.1.2. Sobrecargas

Se dice que un equipo esta en sobre cargado cuando la corriente es mayor que el valor de la corriente nominal. De acuerdo a la duración de las sobrecargas estas son clasificadas en: Sobrecargas *Breves* y *Duraderas*. Una sobre carga puede ser causada por una gran diversidad de situaciones, pero las más comunes son:

- Cortocircuitos no aislados oportunamente.
- Excesos de carga, ya sea por picos de cargas posibles o desconexión de circuitos paralelos.

Es importante tener presente que la sobrecarga² por lo general viene acompañado de efectos térmicos, propios del efecto Joule.

4.5.1.3. Oscilaciones de potencia

Las oscilaciones de potencia son causadas comúnmente por la conexión y desconexión de circuitos del sistema eléctrico cuando se producen variaciones de potencia. Esto es debido a que los generadores no toman instantáneamente el ángulo de la impedancia de la carga, sino después de varias oscilaciones amortiguadas, pudiéndose inclusive perder el sincronismo, esto se traduce en una sobrecarga ya que las corrientes generadas son de diferente frecuencia a la frecuencia industrial.

Las oscilaciones de potencia son especialmente graves para los generadores y turbinas, existen unos ciertos equipos específicos que tratan de controlar las oscilaciones de potencia, estos son los denominados gobernadores o reguladores de velocidad.

4.5.2. Falla Eléctrica

Una falla es una condición que impide la operación de uno o más equipos de un sistema y que permitiera de la rápida intervención de los sistemas de protección para evitar el daño de los equipos.

Las estadísticas de fallas, consiste en un registro continuo de las fallas que se presentan en un sistema. El registro de fallas sirve para establecer programas de mantenimiento, y para planificaciones futuras.

Según *CADAFE*, la definición arbitraria de falla es:

Se considera una falla a aquel evento que:

1. *Produzca la apertura de un interruptor (automáticamente).*
2. *Error de operación de un interruptor o seccionador.*
3. *Cualquier interrupción del servicio no planificado.*

Una falla eléctrica implica dos posibles estados, una falta de aislación que se traduce en un cortocircuito, o una falta de continuidad eléctrica que implica un circuito abierto.

Los tipos de fallas eléctricas en un sistema de potencia son:

- Cortocircuitos.
- Circuitos Abiertos.
- Fallas simultáneas.
- Fallas en devanados.
- Fallas en evolución.

² En el estudio de sistemas eléctricos de potencia, se suele considerar hasta dos veces el valor de la corriente nominal como una sobrecarga.

4.5.2.1. Cortocircuito

Un concepto muy simple pero efectivo de cortocircuito, es el que lo define como el fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí, caracterizándose por la circulación de elevadas magnitudes de corriente hasta el punto de falla.

Según Martí, J. (1975) *Un cortocircuito se produce en un sistema eléctrico cuando entra en contacto entre sí o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases.*

La enciclopedia del CEAC, agrupa bajo el nombre de cortocircuito a todos los defectos provocados por un contacto, bien entre conductor y tierra o cualquier pieza metálica unida a ella o bien entre conductores.

En palabras de este autor, un cortocircuito es el fenómeno transitorio que tiene lugar cuando elementos de un sistema de potencia que poseen una diferencia de potencia entran en contacto entre sí, provocando una circulación de corriente varias veces mayor a la corriente nominal. La única impedancia que limita la corriente en un cortocircuito es la impedancia³ vista desde la fuente de generación y el punto de falla. La magnitud de la corriente de cortocircuito es grande, por lo general, es de 5 a 20 veces la capacidad nominal del sistema⁴.

En un cortocircuito un simple, el valor de la corriente, depende del número de generadores conectados y la configuración de la red además del momento en que ocurre la falla, y el tipo de falla; incluyendo otros factores⁵.

4.5.2.1.1 Clasificación de los Cortocircuitos

Los cortocircuitos pueden ser clasificados de acuerdo a la forma que se efectúa el contacto entre sí o con tierra los conductores energizados, a saber:

- *Cortocircuito por contacto directo:* Es aquel que surge por el contacto directo entre los conductores de fases distintas o de fases con tierra. *Ejemplo.* Cuando los conductores de una línea de transmisión de fases distintas entran en contacto por balanceo de los mismos ocasionado por el viento.
- *Cortocircuito por ruptura de aislamiento:* Es el cortocircuito que se produce como consecuencia de un arco eléctrico que atraviesa el medio aislante. Un arco eléctrico es generado en cualquier medio, cuando el gradiente de potencial supera la rigidez dieléctrica del medio, provocando la creación de un camino de baja resistencia por donde fluye la corriente por el medio. (la ruptura dieléctrica se genera por sendas diferencias de potencial por lo general producto de sobretensiones).

4.5.2.1.2 Causas de un Cortocircuito

Los cortocircuitos pueden ser consecuencias de una multitud de fenómenos, entre los cuales se encuentran:

- Origen Eléctrico.
- Origen Mecánico.
- Origen Fortuito

Origen Eléctrico: Se considera que un cortocircuito tiene causa eléctrica, cuando el mismo es producto de la modificación extrema de los parámetros eléctricos de los elementos del sistema, ya sea por causa interna o

³ En ciertas condiciones, se hace necesario considerar el valor de la impedancia de contacto entre las partes que enfrentan el cortocircuito.

⁴ Esto no es una regla general, por el contrario es solo un indicativo poco fiable, debido a que la magnitud de la corriente de cortocircuito depende de otra gran cantidad de características del sistema.

⁵ El tipo de aterramiento, es decir, como esta conectado el neutro del sistema a la tierra. En el caso de los sistemas con neutro aislado, hipotéticamente deben soportar infinitamente una falla línea a tierra, ya que la única relación con tierra es a través de las capacitancias parásitas.

externa. Este tipo de causa, resultan de la incapacidad de los elementos de soportar la tensión o condiciones eléctricas del sistema.

Dentro de las causas eléctricas se encuentran:

- *Sobretensiones Atmosféricas.* son causados por el rayo que alcanza los conductores de una línea, bien sea por tempestad, la niebla o el hielo. La caída directa de un rayo en una torre, si la resistencia de puesta a tierra tiene un valor excesivo, puede resultar un potencial a tierra suficientemente alto para que simultáneamente se produzca el cebado de las fases (*descarga de retroceso*) resultando en un cortocircuito trifásico en ocasiones.
- *Sobretensiones de Maniobra.*
- *Contaminación de los aisladores o envejecimiento del aislamiento.* Cuando las condiciones de un material aislante,

Origen Mecánico: Las causas mecánicas de un cortocircuito engloba todos los eventos que pueden producir el contacto entre las fases o fases y tierra. Es común la rotura de cadena de aisladores, la caída de un cuerpo extraño tal como la rama de un árbol sobre una línea aérea, un golpe de excavadora en un cable subterráneo, la destrucción de una torre, la caída de un avión o helicóptero sobre una línea.

Origen Fortuito: En esta categoría entran todas las causas que no pueden ser incluidas en las de tipo eléctrico y mecánico. En esta entran los cortocircuitos debido a falsas maniobras, la apertura de un seccionador bajo carga, etc.

4.5.2.1.3 Tipos de Cortocircuitos

En los sistemas de potencia pueden ocurrir diferentes tipos de fallas por cortocircuito. Los cuales pueden ser divididos de acuerdo a la forma en que el evento tenga lugar, es decir, según el número de fases afectadas o que intervienen en él, dividiéndose:

- *Cortocircuito Trifásico:* Se origina cuando los tres conductores de fases entren en contacto entre sí.
- *Cortocircuito Bifásico a Tierra:* Tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre si y tierra.
- *Cortocircuito Línea a Tierra:* Este cortocircuito es el más común, provocado cuando un conductor de fase energizado toca tierra.
- *Cortocircuito Trifásico a Tierra:* La ocurrencia de este cortocircuito es remota pero posible, consiste en que los conductores de las tres fases energizados realicen un contacto con tierra.

El cortocircuito de mayor frecuencia en los sistemas eléctricos es el Línea a Tierra. En el caso de sistemas de con tensión nominal mayor a 115 kV, la ocurrencia de cortocircuitos es:

Tabla 4.3. Probabilidad de Ocurrencia de Fallas por Tipo

<i>Tipo de Falla</i>	<i>Probabilidad de Ocurrencia</i>
De un conductor a tierra, Monofásicas	70%
Entre dos fases, Bifásicas	15%
Entre dos fases y tierra	10%
Trifásicas	5%

Fuente: Westinghouse Electric CO (1964). Electrical Transmission and Distribution Reference Book

Tabla 4.4. Distribución de fallas por equipos en un sistema de transmisión

<i>Equipo</i>	<i>Probabilidad de Ocurrencia</i>
Líneas Aéreas	48.9%
Equipos de conmutación	13.2%
Transformadores	10.2%
Cables	8.4%
Transformadores de medición	0.9%
Equipos de Protección ^(*)	14.9%
Equipos de control ^(*)	1.5%
Misceláneos	2.0%

Fuente: Electric Council (1969). Power System Protection

^(*)Corresponden a operaciones defectuosas de los equipos de protección y control, pudiendo corresponder o no a fallas del sistema

Tabla 4.5. Fallas en generadores por tipo de causa

<i>Equipo</i>	<i>Probabilidad de Ocurrencia</i>
Estator	21.3%
Rotor	20.0%
Sistema de Excitación	28.7%
Equipo de control	25.0%
Conexiones arrollamiento de campo	5.0%

Fuente: Electric Council (1969). Power System Protection

Tabla 4.6. Causa de fallas en un sistema típico de 115 KV

<i>Causa</i>	<i>Probabilidad de Ocurrencia</i>
Descargas atmosféricas	56%
Viento y bamboleo de los conductores	11%
Fallas de equipos	11%
Cierre sobre falla	11%
Misceláneos	11%

Fuente: Westinghouse Electric CO (1964). Electrical Transmission and Distribution Refence Book

Tabla 4.7. Fallas en 115 kV y 230 kV

<i>Tipo de Falla</i>	<i>Numero de fallas</i>	<i>%Total de fallas</i>
Monofásica	43	61
Bifásica	7	10
Bifásica a tierra	10	14
Trifásicas	11	15
Totales	71	100

Tabla 4.8. Fallas en 115 kV y 230 kV

<i>Nivel de falla</i>	<i>Numero de fallas</i>	<i>%Total de fallas</i>
400 kV	22	18
230 kV	41	35
115 kV	43	37
Disturbio total	3	3
Celdas de 13.8 kV	8	7
Totales	117	100

La estadística de fallas, revela que la falla más frecuente es la de un conductor a tierra (monofásica), y la de menor ocurrencia es la que las tres fases entran en contacto entre sí (trifásica). Al no producirse una falla trifásica, el sistema deje de ser desbalanceado y la condición resultante no se puede estudiar tan sencillamente, de hecho el método para el estudio de las mismas, "*Componentes Simétricas*", será motivo de estudio posterior.

Aunque la falla monofásica es la de mayor ocurrencia, por ser esta de tipo no simétrica, se deja para su posterior estudio. La falla trifásica, por su lado, pese a ser la de menor ocurrencia, es conveniente de estudiar en primera instancia, ya que esta es la más fácil de calcular, y los conceptos y métodos desarrollados para este pueden ser extendidos para fallas asimétricas.

El cortocircuito más perjudicial es del trifásico, aunque bajo ciertas situaciones hay excepciones, en la que no es así.

4.5.2.1.4 Consecuencias de un Cortocircuito

Las consecuencias de un cortocircuito son muy variables y depende de un gran número de variables, pero por lo general depende de tres factores básicamente:

- Ubicación del sitio afectado.
- Potencia asociada al cortocircuito.
- Duración del cortocircuito.

Tomando en cuenta los factores antes expuestos, a continuación se presentan algunos de los efectos más comunes y sus causas.

- *Destrucción física del lugar del cortocircuito:* Esto se debe a la gran cantidad de energía disipada por el arco eléctrico en el momento de la falla.
- *Solicitud Dinámica, o esfuerzos mecánicos:* Las tremendas intensidades de corrientes que circulan en el momento de un cortocircuito inducen grandes campos magnéticos que interactúan provocando fuerzas que producen esfuerzos mecánicos severos. Ejemplo: En situación de cortocircuito es común encontrar barras y núcleos de transformadores deformados.
- *Solicitud Térmica:* La circulación de la corriente de cortocircuito provoca una gran disipación térmica como consecuencia del efecto Joule.
- *Interrupción del suministro de energía:* Las disminuciones de la tensión del sistema como consecuencia del cortocircuito, provoca que los sistemas de protección para proteger la integridad del sistema, despeje o desconecte el circuito fallado.
- *Sobretensiones:* Como consecuencia de la asimetría producida por el cortocircuito las fases sanas elevan su tensión por encima del valor máximo del sistema, provocando una sobretensión. La superposición de tensiones, excitación de armónicos y subarmónicos, incrementan las tensiones en las fases sanas.
- *Oscilación Electromagnética en la Máquina Síncrona:* Debido a que las corrientes de cortocircuito alteran el equilibrio entre la potencia mecánica y eléctrica en la máquina.

- *Generación de par rotórico negativo. Carga del devanado de amortiguación del rotor.* Esto es producto de las asimetrías imperantes en las tensiones y las corrientes.
- *Alteración de la relación de transformación de los transformadores de medida:* Como consecuencia de la componente continua de la corriente de cortocircuito.
- *Incremento de la tensión de paso y toque:* Debido a la intensidad de corriente que circula por tierra durante la falla.
- *Perturbación inductiva en sistemas vecinos:* Estos es consecuencia del campo magnético asociado a la falla, es decir, a la corriente de cortocircuito respectiva.

Cuando se diseña un sistema de transmisión de energía es necesario considerar todos los efectos del cortocircuito. Los sistemas de baja tensión es fácil de suponer que no son expuestos de la misma forma que los de alta tensión; pero en los de baja tensión es más notable la sollicitación térmica y dinámica.

Los sistemas de potencia deben ser convenientemente diseñados para una adecuada sollicitación térmica y mecánica. Ambos aspectos dependen de la máxima intensidad de la corriente de cortocircuito que se puede presentar en el sistema; en caso de que no se limitase este valor, el sistema quedaría expuesto a daños permanente, los cuales serán mayores mientras más tiempo circule la intensidad de corriente de falla.

4.5.2.2. Conductores en Circuito Abierto

Los conductores en circuito abierto, consisten en la falta de continuidad eléctrica de una o más fases del circuito. Las causas de los circuitos abiertos son muy variadas entre ellas se pueden mencionar: la operación incorrecta de un interruptor al abrir o cerrar, la ruptura de los puentes de amarre de una línea de transmisión, etc.

La importancia del estudio de las condiciones de circuito abierto, es debido a la presencia de tensiones y corrientes desbalanceadas, constituyendo un gran riesgo de daño para las máquinas.

4.5.2.3. Fallas Simultáneas

Las fallas simultáneas son combinaciones de dos o más fallas de ocurrencia al mismo tiempo. Las fallas pueden ser del mismo tipo o diferentes y ocurrir en el mismo punto o diferentes.

Las fallas simultáneas pueden poseer causas en común o diferentes, y en casos como consecuencia de la primera. Es posible que las fallas sean consecuencias de eventos totalmente diferentes, pero esto es poco probable. *Ejemplo.* Las fallas de dos circuitos en una línea doble circuito por una causa en común. Estas dos fallas aunque son geográficamente coincidentes, son separadas eléctricamente.

Falla Campo traviesa (Cross-Country Earth-Fault): consiste en una falla línea a tierra en un punto y en una fase coincidentes otra falla línea a tierra y en otra fase. Este tipo de falla ocurre con sistemas puestos a tierra por impedancias; la segunda falla ocurre por el aumento de tensión en las fases sanas, debido al desplazamiento del neutro producido por la primera falla.

Una falla simultánea puede ser causada en una línea de transmisión aérea, por la ruptura de un conductor cercano a una torre que sostenga por el aislador de suspensión mientras que la otra parte cae a tierra produciendo una falla línea a tierra.

4.5.2.4. Fallas en Devanados

Consiste básicamente a las situaciones en los devanados que provocan una operación anormal del sistema de potencia.

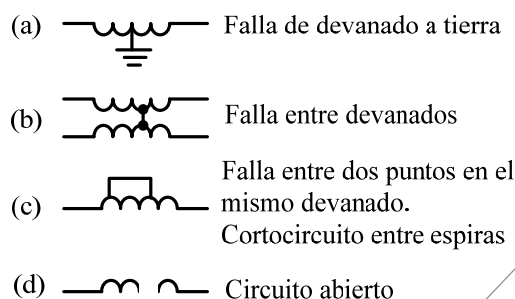


Fig. 4.1. Distintos tipos de fallas en devanados

La falla de circuito abierto en devanados es de muy rara ocurrencia. *Ejemplo.* Un transformador con cambiador de tomas (tap) automático, por una mala operación puede provocar una falla en devanados.

4.5.2.5. Fallas Evolutivas

Las fallas evolutivas son fallas que cambian durante el tiempo de permanencia u ocurrencia de las mismas, estas son causadas comúnmente por la propagación del arco o la difusión de gastos tensados a otras fases y eventualmente a otros circuitos.

Ejemplo. Una falla línea a tierra evoluciona y se transforma en una falla doble línea a tierra y eventualmente evoluciona a una falla trifásica.

El análisis de fallas evolutivas no presenta ningún inconveniente ya que una falla de este tipo puede estudiarse como una

4.6 Importancia de cálculo de la corriente de falla

Estimar el valor de la corriente de falla por cortocircuito en un sistema de potencia es muy importante porque permite realizar en función de sus resultados una serie de mejoras y arreglos dentro del mismo para contrarrestar los efectos de la fallas, y entre otras cosas:

- La selección y coordinación de protecciones.
- Determinar las capacidades de interrupción de los interruptores.
- Determinar los esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones.
- Determinar la capacidad de cortocircuito de una central o un sistema.

4.7 Factores que afectan la Severidad de una Falla

Las corrientes de cortocircuito o falla dependen de varios factores, pero en especial existen algunos que provocan un aumento del su valor, haciendo más severa la falla.

- *Las condiciones de las fuentes afectan una falla*, es necesario conocer cada uno de los generadores además de los extremos mínimos y máximos de generación.
- Es necesario contar la *configuración del sistema en servicio*, debido a que ciertas configuraciones hacen más severas las fallas que otros.
- *La situación de los neutros*, en el caso de una falla asimétrica que incluye tierra. La corriente que circula en cortocircuito se verá grandemente afectada por el número de neutros puestos a tierra y afectados por la manera de conexión de los neutros a tierra.
- *Ubicación y tipo de falla*, estos factores influyen en la magnitud y en la distribución de la corriente de falla.

La falla trifásica (normalmente) es la más severa, pero en ciertas ocasiones y condiciones se estudia la falla línea a tierra porque en sistemas sólidamente aterrados en ocasiones la corriente de falla puede ser mayor a la trifásica.

Ejemplo.: Para el cálculo de interruptores, se diseñan a partir de las corrientes de falla trifásica y monofásica.

4.8 Equipos para detectar fallas y limitar sus efectos

En el objetivo de eliminar las anomalías o fallas de un sistema eléctrico, se incorporan una serie de componentes e instalaciones asociadas con el fin de eliminar completamente los efectos de estas anomalías, esto no es posible y aproximarse a esta solución es muy caro, en la práctica se reduce en lo posible los efectos de las anomalías.

Los equipos utilizados para la detección de las fallas son:

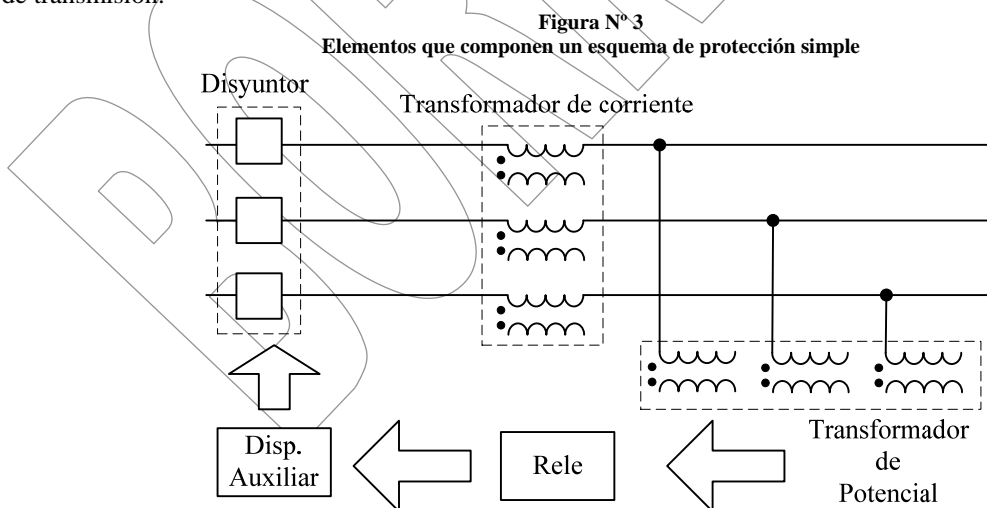
- *Relés.* Son dispositivos que reciben información del sistema, y pueden discriminar condiciones normales y anormales de operación; es básicamente un equipo de detección. Los relés pueden ser de dos tipos:
 - Relés electromecánicos (Antiguos).
 - Relés electrónicos.
- *Fusibles.* Son elementos cuya función es detectar sobrecorrientes, su funcionamiento se basa en el hecho que un materia atravesado por una corriente suficientemente grande puede fundir el dispositivo conductor interrumpiendo el paso de la corriente. Los fusibles e interruptores son elementos utilizados para despejar cortocircuitos o sobrecorrientes.
- *Pararrayos.* Son dispositivos limitadores de sobretensión, se basan en el hecho de a partir de un nivel de tensión de ruptura fijado, el pararrayo se hace conductor a tierra, a medida que la sobretensión es mayor a la tensión de ruptura la resistencia que presenta disminuye eliminando rápidamente las sobretensiones.

Los fusibles, interruptores y pararrayos constituyen los llamados equipos limitadores.

4.9 Introducción a los Sistemas de Protección

Un sistema de protecciones es un conjunto de elementos y de circuitos de control unidos entre sí cuya función es detectar cualquier falla y proteger a uno o más equipos del sistema.

Ejemplo: A continuación se presentan los componentes de un sistema de protección para el caso de una línea de transmisión.



Los elementos de un sistema de protección son:

- *Transformadores de medida.* (Transformadores de corriente T.C, Transformadores de potencial T.P.) son dispositivos que permiten obtener información del sistema en forma de tensiones y corrientes.
- *Relés.* Es un dispositivo capaz de discriminar condiciones normales y anormales de operación, que cierran y abren contactos que habilitan en forma de detector directa o indirectamente los circuitos de apertura del interruptor.
- *Interruptor.* Este elemento accionado por el relé (automáticamente) o por el operador (manualmente) cumplen la función de aislar los equipos en carga.

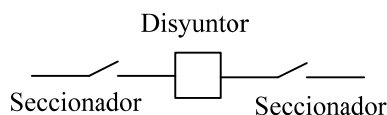


Figura 4.9.1. Esquema de conexión típico de un interruptor de potencia y los seccionadores asociados

Un interruptor puede interrumpir un circuito en condiciones normales en cambio un seccionador que solo permite aislar desde el punto de vista dieléctrico dos puntos del circuito y no pueden trabajar con carga.

- *Equipos de Control.* son los elementos y dispositivos que conectan a los anteriores. *Ejemplo.* el alambrado, comunicadores de información de ondas portadoras y dispositivos auxiliares (suiches, lámparas, alarmas, relés eléctricos).

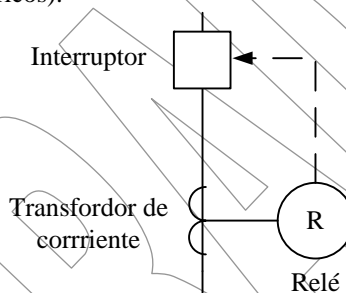


Figura 4.9.2. Esquema de protección por sobrecorriente de un alimentador

4.10 Consideraciones Generales para la Selección del Esquema de Puesta a Tierra del Neutro

Es usual conectar a tierra los neutros de un sistema para tensiones mayores a 35.4 kV. La puesta a tierra de los neutros de un sistema de potencia juega un papel importante en las sobretensiones por fallas y corrientes de cortocircuitos. Un sistema puede estar puesto a tierra de diferentes modos, siendo los casos extremos:

- Neutro aislado de tierra.
- Neutro sólidamente aterrado.

4.11 Factores a considerar para la selección del esquema de aterramiento

En el proceso de selección del esquema de aterramiento se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Las magnitudes de las corrientes que resultan de fallas a tierra.
- Las magnitudes posibles de sobretensiones transitorias.
- Las magnitudes de sobretensiones temporales.
- Localización de las posibles fallas.
- La seguridad de los operadores, tensión de paso y toque.

Para limitar las sobretensiones en situación de falla se aterran los sistemas de potencia, existen muchas y variadas formas de conectar los neutros a tierra, las diferencia entre los distintos esquemas son los valores de la corriente de falla y las sobretensiones que se presentan.

En los casos extremos, neutro aislado, las sobretensiones son grandes mientras que las corrientes de falla son pequeñas, caso contrario de la conexión sólidamente aterrado, donde la corrientes de fallas son intensas y las sobretensiones pequeñas.

Para equilibrar las condiciones de corriente de cortocircuito y sobretensiones, se suele colocar una impedancia entre el neutro y tierra.

Sistema efectivamente aterrado. Se dice que un sistema se encuentra efectivamente aterrado cuando la tensión en las fases sanas, en régimen permanente, para el caso de una falla línea a tierra no excede del 80% de la tensión de la línea.

4.12 Tratamiento del Neutro

Existen varias formas de conectar el neutro de un sistema de potencia a tierra, desde los casos extremos en los que no hay conexión alguna (neutro aislado), hasta llegar el neutro sólidamente puesto a tierra.

4.12.1. Neutro Aislado

En un sistema de transmisión de energía con el neutro flotante o aislado, en el caso de ocurrir una falla monofásica, solamente las capacitancias entre fase y tierra tienen influencia sobre la magnitud de la corriente de falla, mientras que las capacitancias entre fase y fase solo revisten una importancia secundaria.

En condiciones normales de operación del sistema, la tensión entre el neutro del sistema y tierra es cero, debido a que se supone que el sistema se encuentra balanceado por transposición y con cargas terminales simétricas.

En el instante que ocurra un cortocircuito monofásico, se observa que el neutro adquiere un potencial $V_{neutro} = V / \sqrt{3}$ respecto a tierra, y un defasaje de 180° respecto a la fase afectada; las tensiones de las fases no falladas se incrementan su valor en $\sqrt{3}$.

La tensión del neutro, V_{neutro} , obliga la circulación de corriente capacitivas a través del circuito, las cuales se superponen en el punto de falla. En la realidad, el desplazamiento o corrimiento del neutro hacia la fase fallada no es total, si se consideran las resistencias del circuito.

Si el neutro está aislado hay una conexión a tierra de alta impedancia a través de las capacitancias parásitas del alternador, de modo que las corrientes de falla son pequeñas, una fracción de la corriente nominal; sin embargo, las tensiones pueden aparecer son elevadas.

Una de las principales ventajas a favor de los sistemas con neutro aislado es que una falla a tierra en una de las fases puede tolerarse en forma indefinida (teóricamente). Este esquema de aterramiento se utiliza en niveles de voltaje 3.3, 6.6 y 13.8 kV con éxito, pero existe la posibilidad de la sobretensión por resonancia o fallas intermitentes.

Ventajas:

- Esta conexión a tierra resulta sencilla y económica, pues no requiere ningún tipo de elementos de conexión entre el neutro y la tierra.
- La tensión de paso (*step voltage*) y toque (*touch voltage*) no adquieren valores significativos, debido al relativamente bajo valor de corriente de falla; caso contrario a lo que se observa en los sistemas con neutros rígidamente o sólidamente puesto a tierra,

Desventajas:

- Cuando sucede una cortocircuito monofásico, la tensión en las fases sanas se incrementa en $\sqrt{3}$, 73%. Por tal motivo, el empleo del neutro flotante queda restringido a voltajes intermedios (69, 115 y muy raras veces 230 kV), ya que se tiene que diseñar el aislamiento para este valor.
- La corriente cortocircuito a tierra es de naturaleza capacitiva, lo cual puede ocasionar reencendidos del arco y desagradables sobretensiones. Esto obliga a reenganche o recierre (*reclosed*) rápidos, al tratar de despejar una falla por este medio. Las posibilidades de una falla en las fases sanas aumenta, ya que eleva su valor y pueden degenerar en la ruptura de aislamiento.
- La intensidad de corriente de la falla asimétrica, en vista de lo cual se necesita la conexión aditiva de tres transformadores de corriente para su registro; es decir que si los esquemas de medición no son los propios, la protección no detecta la falla debido a el bajo valor de corriente.

En la práctica se suele desconectar de tierra al neutro, cuando la potencia de corto circuito, en particular en sistemas muy mallados, ha alcanzado valores intolerables.

Finalmente, cabe señalar que en un sistema bajo carga la intensidad de corriente de falla se superpone a las intensidades de corriente determinadas por esta y a las intensidades de corriente que obligan las capacitancias entre fase y fase. Estas consideraciones no se hicieron en los cálculos y análisis anteriores

4.12.2. Neutro Sólidamente a Tierra

La conexión en la que no se coloca ningún elemento reactivo o estrictamente resistivo entre el neutro y la tierra, recibe el nombre de neutro sólidamente o rígidamente puesto a tierra. En este esquema de aterramiento resulta el mayor valor de la corriente de falla y por tanto el mayor daño en el punto de falla, además resulta en el máximo esfuerzo en los devanados de las máquinas razón por la cual no se usa en estas. En cambio en Venezuela es muy utilizado para conectar a tierra los neutros de los transformadores.

4.12.3. Neutro Efectivamente Aterrado

La norma IEC y la norma VDE, han tratado el tema del punto óptimo del valor de impedancia que se debe colocar entre el neutro y la tierra, para lograr un balance entre las sobretensiones de las fases no afectadas y la magnitud de la corriente de falla a tierra; generando el concepto de conexión a tierra efectiva del sistema (*effectively grounded*).

La conexión efectivamente puesta a tierra del neutro, exige que en caso de una falla a tierra monofásica en cualquiera de las fases, la tensión de las fases sanas no deba incrementar su valor por encima del 80% de la tensión reinante entre línea y línea. La relación existente entre las tensiones de fase a tierra de las fases no afectadas ($V_{sana1\phi}$), y la tensión de línea a línea ($V_{nominal}$), se conoce como coeficiente de puesta a tierra (*earthing coefficient*)

$$m = \frac{V_{sana1\phi}}{V_{nominal}} \quad (1)$$

Si el factor de aterramiento (m) es menor a 0.8, se tiene un sistema efectivamente aterrado, o sólidamente puesto a tierra, de lo contrario el sistema no esta efectivamente aterrado o simplemente esta conectado en forma semi-rígida.

Este tipo de conexión a tierra se ha difundido mucho en los sistemas de extra y ultra alta tensión, ya que en caso de una falla a tierra monofásica la tensión de las fases sanas no se incrementan en $\sqrt{3}$, en particular un incremento de tensión de esa magnitud en sistemas de 400, 525 y 800 kV resulta intolerable.

Cuando ocurre una falla monofásica en cualquiera de las fases, el neutro o centro eléctrico del sistema y tierra denotan el mismo potencial, de modo que el neutro no se desplaza hacia la fase afectada, como sucede en los sistemas sólidamente y puestos a tierra por reactancias.

En sistema se encuentra efectivamente aterrado, cuando el factor de puesta a tierra sea del 75%. La principal ventaja es los sistemas efectivamente aterrados, es que no presentan sobretensiones elevadas, el aislamiento del equipo es más liviano que en el caso de neutro aislado, lo que representa una gran economía para sistemas de alta tensión; siendo usual en los sistemas sobre 100 kV. Como contrapartida, las corrientes de falla son elevadas y el sistema debe tener un esquema de protección rápida contra sobrecorrientes.

4.12.4. Neutro a tierra por medio de resistencias

Este esquema de aterramiento se utiliza para limitar la magnitud de las sobretensiones y las corrientes de falla (100-2000 Amp). El valor de la resistencia limitadora es aquel que permite que la corriente de falla sea igual a la corriente trifásica.

- *Conexión a tierra por medio de una resistencia de bajo valor.* Los fabricantes de los generadores especifican que un alternador es capaz de resistir un cortocircuito trifásico en bornes del alternador, por un corto período de tiempo, mientras actúan las protecciones, pero no garantizan el comportamiento frente a una falla monofásica en bornes. Para limitar esta corriente a la correspondiente a un cortocircuito trifásico, se puede conectar una resistencia en el neutro de alternador, de modo que la corriente de monofásica de falla a tierra sea del orden de la corriente de falla trifásica. En este caso el sistema se comporta como uno efectivamente aterrado, es decir, con bajas sobretensiones y altas corrientes de falla.
- *Conexión a tierra con resistencia elevada.* Esta es la conexión usual en los sistemas de potencia, en este caso se desea limitar la corriente de falla a un valor pequeño, no mayor a 5 Amp. y el sistema se comportará como uno con neutro aislado. En el caso del generador, la resistencia se conecta a través de un transformador de potencial o de distribución, en cuyo secundario se conecta el esquema de protección, ya sea mediante relés de sobrecorriente o de sobretensión. Esta forma de aterramiento es muy utilizada en sistemas en los que cada generador eleva individualmente.

4.12.5. Neutro aterrado a través de un Reactor

La conexión a tierra inductiva del neutro, consisten en la interconexión de una bobina o reactor entre el neutro del sistema y tierra. Este tipo de conexión a tierra del neutro, en sus diferentes configuraciones y variantes, posee un marcado desarrollo en Alemania. Se tiene por ejemplo el *transformador Reithoffer*, y el de *Bauch*, los cuales se fundamentan en la inyección de corriente inductiva, la cual trata de compensar (anular) la intensidad de corriente capacitiva de la falla. Si bien éstos transformadores o reactores han resultado ser efectivos, no lograron obtener la difusión y acogida de la *bobina Petersen*.

En año de 1916, el profesor de la Universidad Técnica de Darmstadt, *Waldemar Petersen*, se ve atraído por las posibles consecuencias de la falla a tierra en los sistemas de transmisión de energía de la época. La bobina o reactor Petersen se impuso rápidamente por su sencillez y compensación automática de la falla, se logra con un entrehierro variables y tomas múltiples (taps) en el embobinado. En mecanismo de operación ante una falla monofásica ocurre en cualquiera de las fases, el neutro del transformador adquiere el potencial diferente del de referencia, lo cual obliga entonces a la circulación de una intensidad de corriente inductiva entre la falla a tierra y la bobina. Las diferentes tomas de la bobina y el entrehierro variable hacen posible una compensación automática bastante satisfactoria entre la intensidad de corriente inductiva suministrada por la bobina, y la capacitiva generada por la falla. Como consecuencia del defasaje existente entre ambas intensidades de corriente se cancelan los efectos; aunque en la realidad esta compensación no se completa en su totalidad, debido al porcentaje de resistencia presente en el sistema y también a la falta de un ajuste continuo (entrehierro variable y taps) por parte de la bobina. Estos efectos hacen que se permita la circulación de una intensidad de corriente resistiva que es la registrada por el real de falla a tierra. En la práctica los valores observados de esta corriente de falla residual ohmica oscilan entre 5 y 20 Amperes, según el grado de

compensación del sistema. Otro aspecto que permite la corriente circulante, es que la potencia de las bobinas (MVAR) se encuentra normalizados en valores discretos y bien definidos.

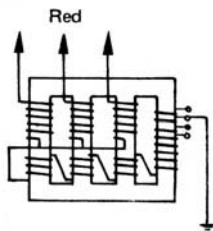


Figura 4.12.1. Esquema básico del transformador Reithoffer

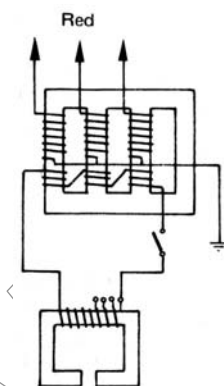


Figura 4.12.2. Transformador de Bauch para la compensación reactiva de la falla

A frecuencia fundamental o de operación (60Hz) la reactancia inductiva de la bobina Peterson debe ser igual a la reactancia capacitiva de los conductores del sistema de tierra.

Ventajas:

- La bobina Petersen actúa en forma inmediata, sin retraso alguno, basta con que el neutro se desplace hacia una de las fases afectadas para que ella inyecte una intensidad de corriente inductiva en el mismo.
- Esta bobina permite una extinción de la falla en un tiempo relativamente corto (0.01 a 0.8 segundos).
- Una vez despejada la falla, la tensión en las fases sanas se restablece lentamente, sin incrementos dinámicos o bruscos, ya que el neutro del sistema, desplazado hacia la fase afectada retorna lentamente a su punto de partida.
- En el caso de una falla monofásica el sistema puede operar por espacio de horas, aun cuando la falla persista, esta ventaja se empleó con mucha frecuencia durante la segunda guerra mundial en Alemania.
- La bobina Petersen permite derivar a tierra cargas estáticas acumuladas en el sistema, lo que resulta imposible con el neutro aislado o flotante.
- La compensación de corriente que logra esta bobina, hace que en lugar de la falla, la tensión de paso y de toque no adquieran valores peligrosos; siendo esto ventajoso ya que simplifica el diseño de las conexiones a tierra de patios, estructuras, torres, etc.
- Con el uso de la bobina Petersen se elimina la posibilidad de la falla a tierra intermitente por reencendido del arco eléctrico. Esto obedece a la compensación inductiva en el mismo lugar de la falla a tierra.

Desventajas:

- Como se conoce durante la ocurrencia de una falla monofásica, las tensiones de las fases no afectadas el incrementan en $\sqrt{3}$, lo que limita la aplicación de la bobina Petersen a tensiones intermedias, siendo máximo su uso en 245 kV, ya que de lo contrario resultaría muy oneroso; debido a los costos por aislamiento de los equipos.
- Este tipo de aterramiento del neutro, demanda la incorporación al sistema de un equipo adicional, no necesariamente barato, además de ocupar un espacio determinado en la subestación, que no es sencillo en los centros densamente poblados.
- La compensación no se efectúa completamente sino que resulta una relativamente pequeña corriente residual. Esto no necesariamente es una desventaja, pues se ha visto, que esta se presta para registrar y ubicar la falla en el sistema. En el caso de sistemas densamente mallados o muy extensos la magnitud de la corriente residual puede llegar a ser apreciable, lo que limita la aplicación de este tipo de conexión a tierra porque limita su efectividad.

4.12.6. Neutro aterrado a través de un transformador de potencial (Generador)

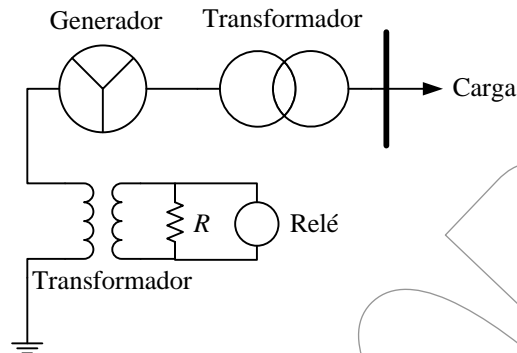


Figura 4.12.3. Esquema de aterramiento de neutro por medio de un transformador de potencial

4.12.7. Neutro aterrado a través de transformadores de puesta a tierra (Y- Δ - Zig-Zag)

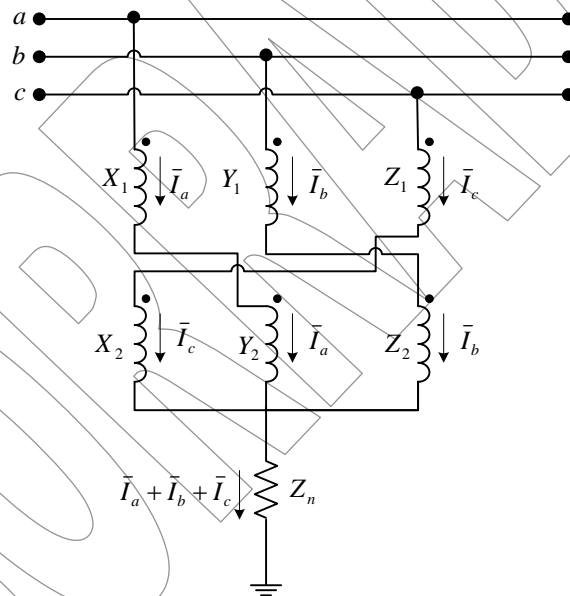


Figura 4.12.4. Esquema de aterramiento de neutro por medio de un transformador zig-zag