

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. Introducción

El desarrollo del proyecto de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) moderno, así como el estudio racional de sus normas de operación, debe consultar, básicamente, dos aspectos principales: operación en condiciones normales y operación en condiciones anormales.

La operación en condiciones normales supone que el sistema cumple con los requisitos necesarios para servir la demanda del consumo de acuerdo a una cierta calidad prefijada del servicio suministrado. Así, por ejemplo, el sistema deberá poseer la capacidad de reserva necesaria para poder abastecer los aumentos del consumo; mantendrá los niveles de voltaje dentro de rangos adecuados; regulará la frecuencia; las cargas se repartirán entre las diferentes centrales generadoras conforme a la distribución más económica; se mantendrá en forma adecuada; etc.

La operación normal de un sistema no considera la ocurrencia de fallas en el equipo, ni la presencia de fenómenos incontrolables como tormentas y descargas atmosféricas, o los errores cometidos por los operadores.

Cuando el sistema está bajo el efecto de uno de estos factores se dice que está operando bajo condiciones anormales y en este caso pueden ocurrir dos fenómenos de importancia:

- El equipo o parte del sistema, puede sufrir daños de consideración si la intensidad y la duración de la perturbación exceden magnitudes determinadas.
- La calidad del servicio suministrado se resiente gravemente.

Frente al problema de operación anormal, el proyectista de un sistema eléctrico de potencia puede adoptar dos puntos de vista:

- Incorporar al diseño ciertas características que eliminen la posibilidad de fallas.
- Permitir la ocurrencia de las fallas incluyendo en el proyecto características y elementos que reduzcan el daño causado por las mismas.

La primera solución es prácticamente imposible o por lo menos, no justificable económicamente. En la mayoría de los casos, se sigue el criterio de permitir la ocurrencia de ciertas fallas y tratar de aminorar sus efectos tanto en el equipo instalado como en la calidad del servicio suministrado. Un diseño moderno consulta ambas soluciones en la proporción que los estudios económicos aconsejen.

Los sistemas de protecciones eléctricas constituyen el equipo más importante que se incluye en un sistema eléctrico de potencia con el fin de alcanzar el último objetivo, esto es, aminorar los efectos de las fallas sobre el equipo protegido desenergizándolo rápidamente y mejorar la calidad del servicio al eliminar o aislar aquellos elementos que por su operación defectuosa puedan producir perturbaciones.

Con el notable crecimiento de los sistemas eléctricos en los últimos años, el aumento de interconexión, el alto costo del equipo instalado y las exigencias cada vez mayores de un suministro de energía eléctrica seguro y de óptima calidad, la técnica de las protecciones eléctricas ha debido necesariamente perfeccionarse en forma paralela, pues, como ya se ha dicho, son ellas, en gran parte, las responsables de esas características deseables. Por esto, un diseño cuidadoso del sistema de protecciones y la elección adecuada de sus componentes es considerado, hoy en día, de una importancia fundamental en la operación de los sistemas eléctricos.

1.2. Necesidad de un sistema de protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas son los dispositivos que tienen como principal finalidad la de detectar condiciones anormales en la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia y tomar en forma automática las medidas que se requieran para restablecer la operación normal.

En el caso de fallas en equipos eléctricos, la medida será retirarlos del servicio y, en el caso de fallas en un sistema eléctrico, será necesario aislar el sector que produce la anomalía. Durante la operación normal de los sistemas eléctricos, las acciones están entregadas al hombre o a equipos automáticos que desempeñan su función dentro de límites determinados, en cambio, las protecciones no son requeridas en condiciones normales pero deben estar disponibles inmediatamente para manejar condiciones intolerables para el sistema y evitar daños mayores o paralizaciones no deseadas.

1.2.1. Consideraciones técnicas

Como se ha dicho, todos los sistemas eléctricos, sean Industriales, Residenciales o de Servicio Público, tienen el propósito común de suministrar energía eléctrica a los equipos que la utilizan, en la forma más segura y confiable que sea económicamente factible. Es decir, se requiere contar con un sistema eléctrico de buena calidad y sin interrupciones. En efecto, la sociedad moderna presenta una gran variedad de usos y también de usuarios de la energía, a tal punto que para algunos de ellos llega a ser de vital importancia contar con una buena continuidad del servicio eléctrico. A modo de ejemplo se puede citar los ascensores de grandes edificios; los pabellones quirúrgicos, incubadoras y otros equipos de los hospitales; las redes de computación; los hornos de la minería; los sistemas de ventilación de galerías subterráneas y una larga lista de equipos que dependen directamente de la energía eléctrica.

Dentro de los aspectos generales que caracterizan una buena calidad del servicio se encuentran la adecuada regulación de voltaje ($\pm 5\%$) y de frecuencia (banda de $\pm 2\%$), además de una cantidad de interrupciones mínima.

El tema de las protecciones es tan básico para la seguridad y confiabilidad del suministro de energía, que debería ser considerado desde el comienzo en cualquier proyecto bien diseñado y no ser relegado a un segundo lugar, para considerarlo después que se han fijado las demás características del SEP. Considerarlo así, resulta en un sistema de protecciones bien integrado, capaz de ser adecuadamente coordinado y lo suficientemente flexible como para acomodarse a las futuras expansiones del sistema.

1.2.2. Consideraciones económicas

Por lo general, el costo del sistema de protecciones es bastante pequeño comparado con el costo de SEP completo. Se estima entre 0,5 y 10% de la inversión total, creciendo el porcentaje mientras más pequeño sea el sistema eléctrico. Aún así, el costo de las protecciones puede minimizarse diseñando un sistema simple que garantice obtener y conservar una buena protección, lo que a su vez permite disminuir el costo del servicio y evitar la necesidad de efectuar complejas y costosas pruebas.

Durante la operación, las protecciones tienen incidencia sobre dos aspectos de orden económico, a saber:

- **Continuidad del servicio:** A mayor continuidad, mayores son las ventas de energía y en consecuencia los ingresos de todos los operadores del sistema. También representa mayor producción para aquellas empresas en que la electricidad sea su principal insumo.
- **Despeje de fallas:** En la medida que las fallas sean despejadas en forma oportuna y rápida se causarán menores daños a los equipos e instalaciones, con lo cual serán menores los costos de reparación y menores los tiempos de paralización.

1.3. Características de los sistemas de protección

Las características de un sistema de protecciones se analizan principalmente bajo el punto de vista de su operación en condiciones de anormalidad, siendo las principales las que se indican a continuación.

1.3.1. Confiabilidad o seguridad

Es la característica que permite garantizar la operación de las protecciones, cada vez que se produzca una falla. Complementando esta definición se puede agregar que es la característica del relé o del sistema de protecciones que le permite actuar correctamente cuando es requerido y evitar operaciones innecesarias. Cuando se presenta la anormalidad, las protecciones deben estar en condiciones de operar correctamente. En algunos casos, es posible que ciertos equipos sean requeridos muy pocas veces durante su vida útil, pero aún en estas condiciones deberán operar en forma correcta. Para lograr esta cualidad se debe recurrir a diseños simples, con componentes robustos y de buena calidad, que sean periódicamente sometidos a mantención para comprobar que se encuentran bien calibrados, bien conectados y que la orden que emitan sea cumplida por los sistemas de control.

1.3.2. Selectividad

Es la cualidad de las protecciones que les permite discriminar la ubicación de la falla, con el objeto de aislar exclusivamente el equipo fallado, manteniendo en servicio lo que no sea imprescindible desconectar. De este modo se obtiene la máxima continuidad del servicio con un mínimo de desconexiones.

1.3.3. Rapidez

Es conveniente que las protecciones operen en el mínimo tiempo posible, disminuyendo con ello la duración de la falla, las perturbaciones al resto del sistema y los consecuentes daños a los equipos. La rapidez redundante también en una mayor efectividad de las reconexiones automáticas y mejora la estabilidad del sistema. Aunque es deseable la operación instantánea de las protecciones, muchas veces esta cualidad debe sacrificarse con el objeto de mejorar otros aspectos, tales como la selectividad. La temporización en todo caso debe ser compatible con los límites de resistencia de los equipos a las fallas consideradas y su empleo para obtener selectividad está asociado a otra característica que siempre debe considerarse, como es la economía.

1.3.4. Exactitud

Las protecciones deben operar con la mínima desviación respecto de la magnitud teórica de ajuste. La exactitud, se expresa como un error de medida, es decir, como la razón entre el valor de operación y el valor teórico de ajuste. Las desviaciones máximas aceptadas varían entre un 5 y un 10%, según el caso.

1.3.5. Sensibilidad

El sistema de protecciones y sus elementos asociados debe ser capaz de operar detectando la falla de mínimo nivel que ocurra dentro de su zona de operación o la menor variación de la magnitud que controla respecto de la magnitud de referencia o ajuste. Esto no siempre es posible en la práctica. Por ejemplo, en períodos de sequía o en la época de verano, cuando cae una fase a tierra (pavimento) se producen fallas de muy baja corriente, las que pueden no ser detectadas por las protecciones.

Puesto que no es posible satisfacer plenamente cada uno de estos requerimientos en forma simultánea, deben adoptarse algunas soluciones de compromiso. En general se otorga mayor atención a aquellos problemas que de acuerdo a la experiencia es posible que ocurran. De aquí que se diga que el tema de las protecciones tiene mucho de técnica pero es también un arte. De hecho, diferentes especialistas utilizando una lógica razonable pueden llegar a soluciones significativamente diferentes para un mismo problema.

Considerando en su conjunto a las distintas protecciones de un SEP, aparecen dos características adicionales que es necesario tener presentes.

1.3.6. Zonas de operación

Las protecciones del SEP abarcan ciertas zonas de operación según su tipo. Es conveniente que entre las zonas de operación de dos protecciones contiguas no queden sectores sin cubrir por alguna de ellas. Para este efecto se deben superponer los bordes de las zonas contiguas y por lo tanto, no se acepta que sean tangentes. La Figura 1.1 muestra el Diagrama Unilineal de un sistema, indicando las zonas de protección.

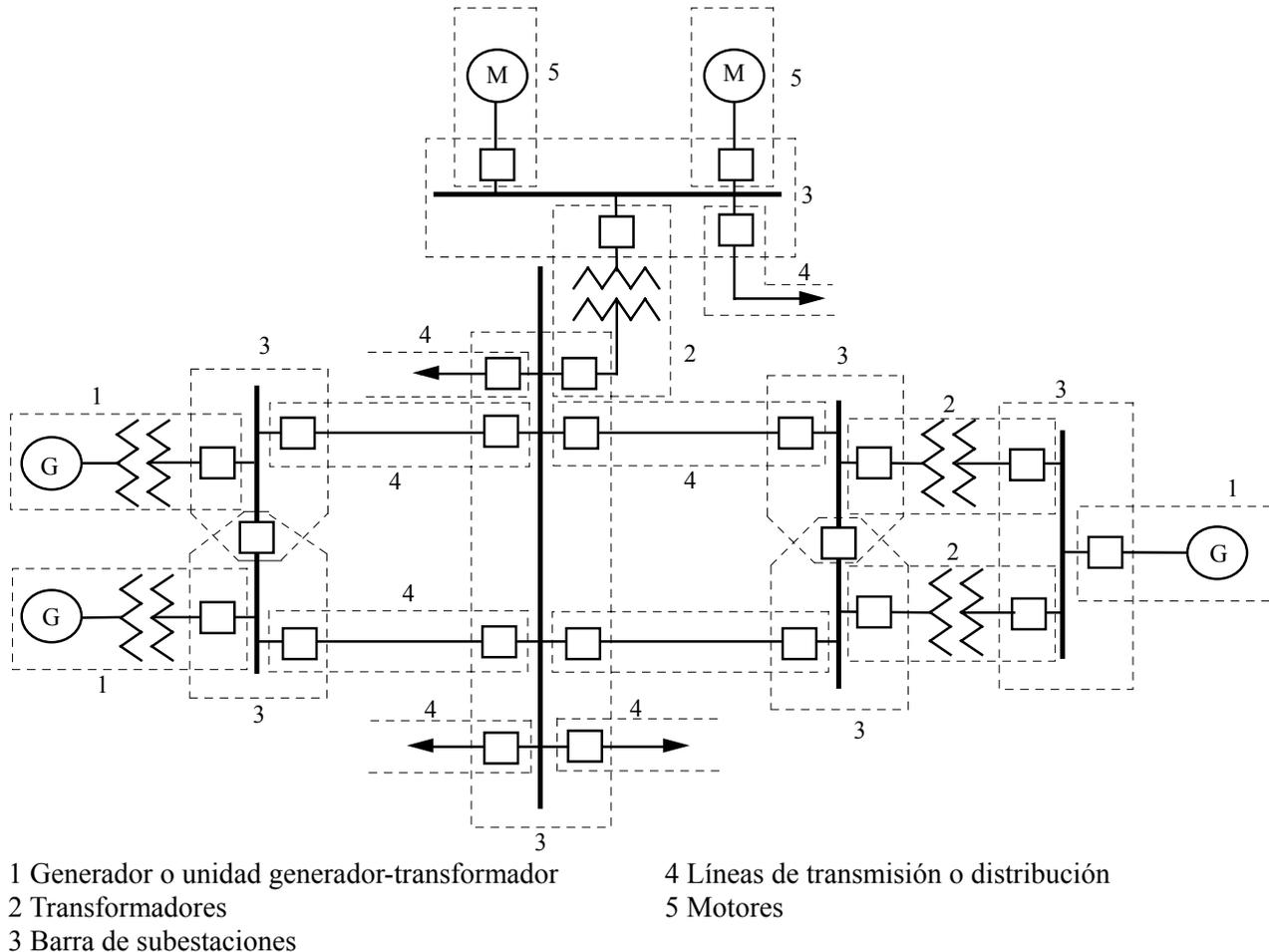


Figura 1.1.- Diagrama unilineal de un sistema indicando sus zonas de protección

1.3.7. Protección de respaldo

Si al producirse una anomalía en el SEP, la protección encargada de aislar la zona (llamada protección principal) no opera, los daños a los equipos serían mayores y la falla se propagaría por el resto del sistema con las consecuencias previsibles. Para que esto no ocurra se utiliza el respaldo, es decir, otra protección deberá ser capaz de detectar la falla y aislarla, aún a costa de dejar fuera de servicio equipos o sectores en condiciones normales. Donde más se aplica esta técnica, por razones económicas es en el caso de los cortocircuitos. Según la ubicación de la protección que da respaldo, este puede ser local o remoto.

a. Respaldo Local

Se ubica en la zona protegida y puede ser del tipo duplicación de la protección completa o parte de ella. Puede ser también del tipo adicional, tal como un relé de tiempo por ejemplo.

Respaldo Remoto

Este tipo de respaldo lo proporciona una protección ubicada en otro punto del SEP. Por lo general, esta protección es del tipo principal en su zona de operación.

1.4. Fallas de las protecciones

Como un antecedente adicional para justificar el respaldo a las protecciones se entrega un resumen estadístico del tipo de falla de las protecciones.

Fallas de los relés	43 %	Contactos sucios, bobinas cortadas, ajustes erróneos, calibración incorrecta.
Falla de interruptores	20 %	Bobinas quemadas, fallas mecánicas, falla de los contactos de poder, otros problemas de bobinas.
Falla de transformadores de medida	10 %	Fusibles quemados, saturación de núcleos, problemas de bobinados, fallas de aislación
Falla de dispositivos auxiliares	9 %	Contactos sucios, conexiones incorrectas
Fallas de alambrado	12 %	Mala aislación, conexiones sueltas e incorrectas
Fallas de la alimentación	6 %	Fusibles quemados, bajo voltaje

En el resumen anterior, no se incluyen otros tipos de problemas que pueden presentarse, tales como: Ajustes mal especificados, errores de cálculo, errores en los datos de los transformadores de medida, etc.

Por otra parte, los diferentes tipos de operación de una protección se pueden clasificar según el efecto obtenido de ellas, en la forma siguiente:

- Operaciones correctas y deseadas
- Operaciones correctas pero no deseadas (como las de respaldo)
- Operaciones incorrectas
- No operación

La confiabilidad general de las protecciones eléctricas (usando equipo electromecánico), es bastante alta. Así entre las operaciones correctas y correctas no deseadas se obtiene un porcentaje de 97 a 99%. Mientras que las operaciones correctas y deseadas van de un 90% a 95%.

1.5. Anormalidades que ocurren en los sistemas eléctricos

De acuerdo a lo planteado en los párrafos anteriores, una de las cualidades esenciales de una distribución moderna de energía eléctrica es la continuidad del servicio. La importancia de las posibles consecuencias de una interrupción, aunque esté limitada a pocos minutos, puede ser considerable tanto para las industrias, como para otro tipo de usuario. De aquí la conveniencia de analizar las anormalidades que ocurren en los sistemas eléctricos.

En relación con las consecuencias, las anormalidades que pueden ocurrir en un sistema eléctrico se clasifican en fallas y perturbaciones, cuyas diferencias aparecen en sus definiciones.

- **Falla:** Condición que impide continuar la operación de uno o más componentes de un sistema y requiere la rápida acción de los esquemas de protecciones para no dañar a los equipos.
- **Perturbación:** Condición que permite continuar la operación del sistema, pero que puede dañar ciertos equipos si se prolonga más de un tiempo determinado.

Tanto las fallas como las perturbaciones deben poder ser detectadas y discriminadas por las protecciones, ya que al ocurrir un defecto en un componente del sistema significa, por lo general, una perturbación para el resto. Al aislar el equipo fallado, se elimina simultáneamente la perturbación, con lo cual el servicio se normaliza.

Entre las fallas, las más comunes son los cortocircuitos. Otras que se pueden mencionar son; la apertura de conductores, la pérdida de excitación de máquinas síncronas, etc., las que pueden producir efectos similares a los cortocircuitos.

Entre las perturbaciones, las más comunes son las sobretensiones, las sobrecargas, las oscilaciones y los desequilibrios.

1.5.1. Cortocircuitos

Un cortocircuito es la desaparición del aislamiento relativo de dos conductores de tensión diferente, alimentados de la misma fuente, sin la presencia de una impedancia conveniente. El cortocircuito puede ser realizado por contacto directo, llamado también cortocircuito metálico, como es el caso de dos conductores que se tocan o el toque de un conductor lanzado a una línea aérea. También puede ser causado por el deterioro o ruptura del aislante, como es el caso de arcos o fugas que se transforman en cortocircuitos.

Las causas de los cortocircuitos son múltiples. En la distribución en baja tensión se deben con mayor frecuencia al deterioro mecánico del aislante. En líneas subterráneas se deben principalmente a la ruptura del material aislante causado por movimientos del terreno, golpes de picota, filtración de humedad a través del envolvente de plomo deteriorado (corrosión química y electrolítica, retornos importantes de corriente por él cuando están vecinos a líneas de tracción eléctrica), etc. En líneas aéreas, los cortocircuitos son mucho más frecuentes y en la mayoría de los casos se deben a ruptura o contaminación de las cadenas de aisladores, cortadura de conductores, balanceo de los conductores por la acción del viento, contacto accidental de la línea con cuerpos extraños, etc.

Otras causas de cortocircuitos dignas de mencionar son: envejecimiento del aislamiento, daño de bobinados, falsas maniobras tales como apertura en carga de desconectores y puesta a tierra de líneas por trabajos, etc.

La forma de los cortocircuitos determina sus efectos y se pueden distinguir varios tipos (trifásico franco y con arco, bifásico, monofásico, etc.). En cuanto a su duración, se pueden distinguir cortocircuitos permanentes y transitorios. A estos últimos, cuando se repiten en cortos intervalos, se les llama intermitentes; es el caso, por ejemplo, de los originados por el balanceo de los conductores.

Las consecuencias de un cortocircuito se deben tanto a los efectos de la sobrecorriente como a los de las caídas de tensión originadas por ésta. En general, las corrientes de cortocircuito alcanzan magnitudes mucho mayores que los valores nominales de los generadores, transformadores y líneas. Si se permite que estas corrientes circulen por un período prolongado, pueden causar un serio daño térmico al equipo y problemas de estabilidad de funcionamiento en el SEP. En este aspecto, el tipo de cortocircuito más severo es el trifásico, el que además de dar valores elevados de corriente, reduce a cero la capacidad de transmisión de una línea, le siguen los cortocircuitos, bifásico y finalmente el monofásico. En cambio, el tipo más frecuente es el monofásico (aproximadamente el 75% de los casos) y el menos frecuente es el trifásico (aproximadamente el 5% de los casos).

De igual forma, se ha comprobado que de los diferentes equipos que conforman un sistema eléctrico de potencia, los que tienen mayor probabilidad de ocurrencia de falla son las líneas aéreas. La probabilidad de ocurrencia de fallas en ellas y en otros equipos se detalla en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1.- Tasa de Ocurrencia de Fallas en Equipos Eléctricos

Equipo	% Ocurrencia
Líneas de Transmisión Aérea	50
Cables	10
Switchgear	15
Transformadores de poder	12
Transformadores de Medida	2
Equipos de Control	3
Otros	8

Dependiendo de la capacidad de generación, la distancia y la impedancia entre la fuente y el punto de falla, la sobrecorriente puede alcanzar una magnitud varias veces superior a la corriente nominal de los equipos. Las consecuencias de esta sobrecorriente son múltiples, tales como: calor del arco o calor producido por el contacto en el cortocircuito, que pueden fundir los conductores, carbonizar los aislantes u originar un incendio. No conviene despreciar tampoco, el calentamiento producido por la corriente de cortocircuito, que se concentra en los puntos más débiles: uniones de líneas, contactos de desconectores, etc., así como los efectos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuito que pueden producir deformaciones en las bobinas de los transformadores, en las barras y cables de poder, etc.

Otros efectos importantes originados por las corrientes de cortocircuito son las sobretensiones en las líneas de telecomunicaciones vecinas a líneas de transmisión, inclusive tan separadas como 1 kilómetro, donde se pueden inducir tensiones de 1.000 o más Volt. Estas sobretensiones pueden provocar daños en las instalaciones y causar accidentes a personas. De aquí que algunos países hayan adoptado los sistemas aislados de tierra, o bien conectados a tierra mediante impedancias, para limitar las corrientes originadas por cortocircuitos monofásicos, que son los más frecuentes.

A su vez, la disminución del voltaje ocasionada por los cortocircuitos trae como consecuencia para el resto del sistema la disminución de su capacidad de transferencia de potencia y con ello, una baja de su estabilidad si se prolonga por algunos segundos

1.5.2. Sobretensiones

Las sobretensiones en un sistema son peligrosas por que:

- Someten a los aislantes a esfuerzos que los envejecen y pueden llegar a destruirlos
- En caso de duración prolongada traen como consecuencia daños en los equipos tanto de los usuarios como de generación y transformación
- En caso de una falla del aislante, traen a su vez como consecuencia inmediata un cortocircuito.

El daño es en estos casos directamente proporcional al valor máximo de la sobretensión y de la velocidad con la cual se establece ésta. Es así como sobretensiones de importancia media de dos a cinco veces la normal y de muy corta duración (algunos microsegundos) son capaces de perforar los aislantes porque su aparición es extremadamente rápida (se les llama de frente escarpado). De aquí la necesidad de consultar entre las pruebas dieléctricas de los equipos la llamada “prueba de impulso”.

Estas sobretensiones se pueden producir por descargas atmosféricas o por apertura de líneas largas de alta tensión (switching).

Las sobretensiones de larga duración, originadas por desconexiones de cargas inductivas en sistemas sin reguladores de voltaje automáticos, provocan efectos importantes en los transformadores, especialmente cuando trabajan con su circuito magnético en el codo de saturación. Por ejemplo, sobretensiones de un 30% pueden, en ciertos casos, hacer subir la corriente de excitación a valores de plena carga.

1.5.3. Sobrecargas

Una línea o un equipo se encuentra sobrecargado cuando su corriente es superior a la nominal. Las sobrecargas son sobrecorrientes, durables o breves según el caso. Las principales causas son:

- Los cortocircuitos que no se aíslan oportunamente
- Los peak de consumos o de transferencia de potencia en líneas de interconexión, que pueden corresponder a sobrecorrientes superiores a 20 o 30 %, durante largo tiempo
- Las sobrecorrientes originadas por desconexiones de circuitos en paralelo, que se pueden prolongar hasta la reposición del circuito desconectado.

Los efectos de altas sobrecargas y de corta duración fueron analizados en 1.5.1. Las sobrecargas más pequeñas, (hasta dos veces la carga normal) sólo tienen efectos térmicos que aparecen después de un tiempo, dependiendo de la constante de tiempo de calentamiento del equipo considerado y de sus condiciones de refrigeración.

1.5.4. Oscilaciones

Las causas más comunes de aparición de oscilaciones son las conexiones y desconexiones de circuitos del sistema, al producirse variaciones de potencia. Esto se debe a que los alternadores no toman instantáneamente el ángulo correspondiente a la carga, sino que después de cierto número de oscilaciones amortiguadas, pudiendo en algunos casos perder su sincronismo, lo que se traduce generalmente en una sobrecorriente. Efectos similares pueden producirse por una mala sincronización.

Además de los efectos eléctricos que es fácil suponer, las partes mecánicas de los alternadores y máquinas motrices pueden sufrir efectos graves por las oscilaciones de potencia.

1.5.5. Desequilibrios

Por el uso de transformadores de distribución en conexión triángulo-estrella y estrella-zigzag, se obtiene una buena simetría y equilibrio en las tensiones y corrientes en los circuitos de alta tensión, por lo cual en la práctica las cargas desbalanceadas en baja tensión no son la causa de desequilibrios de la red primaria. Cuando se producen desequilibrios es preciso determinar rápidamente su causa, pues constituye una anomalía muy peligrosa para el funcionamiento de las máquinas.

Dentro de las causas más comunes se pueden citar, las originadas por desconectores o interruptores con una o dos fases abiertas y la ruptura de un conductor de una línea que no provocó un cortocircuito.

Aunque los desequilibrios no provocan manifestaciones violentas, sus consecuencias no deben ser despreciadas, ya que producen vibraciones y calentamiento anormal en motores, alternadores y transformadores. En las máquinas rotatorias, en particular, se producen campos rotatorios de secuencia negativa, en el estator que, de acuerdo con el deslizamiento relativo, generan en los rotores fuerzas electromotrices y corrientes para las cuales no se encuentran diseñados. En los casos de alternadores se puede llegar a dañar totalmente el sistema de excitación.

El servicio eléctrico también puede ser afectado por esta causa. Por ejemplo, en sistemas con los neutros conectados a tierra, la corriente residual que se produce, retorna por tierra provocando inducciones o sobretensiones en las líneas de telecomunicaciones vecinas, cuyos efectos son peligrosos.

1.6. Métodos para determinar ocurrencia de anomalías

El funcionamiento anormal de un sistema o de alguno de sus componentes, se puede detectar por los fenómenos físicos que se presentan en éstos. A continuación se analizarán brevemente, los fenómenos mensurables (factibles de medir) que pueden aparecer al ocurrir anomalías.

1.6.1. Aumento de la corriente

Uno de los efectos más característicos de un cortocircuito es el aumento excesivo del valor de la corriente por sobre el valor nominal correspondiente al equipo afectado por la falla. Esta característica proporciona el método más simple para desarrollar un esquema de protección, conocido con el nombre de protección de sobrecorriente. Cualquiera de las formas de relés básicos del tipo electromecánico o estático, incluyendo los fusibles, pueden servir con tal objeto.

1.6.2. Disminución de tensión

Se le usa ampliamente para proteger motores y aparatos que pueden sufrir daños al trabajar con tensiones inferiores a la nominal. También se emplea en relés de verificación, para deshabilitar circuitos de partida de motores que requieren la atención de un operador para iniciar la marcha.

Contrariamente a lo que se podría suponer, no se usa para detectar cortocircuitos porque la tensión es variable entre el punto de falla y el punto de generación. Además, en el punto de medida, está en función de la magnitud de la corriente de cortocircuito. Por otra parte, esta protección operaría al desenergizarse el circuito de alimentación.

1.6.3. Aumento de la tensión

El aumento de tensión sobre su valor nominal es, en general, peligroso para todos los componentes de un sistema eléctrico y en especial para las máquinas. El problema de la sobretensión radica en que los equipos de un sistema poseen aislación con capacidad limitada para soportar los esfuerzos dieléctricos. Como la causa más común de sobretensiones de componente fundamental (50 Hz) proviene de sobre excitación de generadores, se usa justamente en estas máquinas. También es posible que se presenten sobretensiones debido al “efecto Ferranti”, producido en las líneas de alta tensión con un bajo nivel de carga ó en vacío.

A las protecciones que operan por efecto de sobretensiones se les conoce como “relés de sobre voltaje”. En casos muy especiales, se aplican protecciones basadas en otros fenómenos (variaciones de los flujos de potencia por ejemplo). Las sobretensiones de ondas no fundamentales (tensiones distintas de la fundamental de 50 Hz), no periódicas o transitorias, motivadas por maniobras de interruptores (switching), descargas atmosféricas, etc., se protegen por medio de chisperos y dispositivos llamados pararrayos.

1.6.4. Aumento de la temperatura

El aumento de temperatura, se emplea para proteger contra sobrecarga a las máquinas. La protección consiste fundamentalmente en alimentar con corriente a un dispositivo que dispone de un calefactor y que en conjunto tiene la misma constante de tiempo de calentamiento de la máquina. Al ajustarse este dispositivo para operar a cierta temperatura, su funcionamiento es independiente del valor instantáneo de la corriente y en consecuencia permite la operación de la máquina en régimen de sobrecarga no peligrosa; es decir, sobrecarga controlada.

En transformadores de potencia se usa la protección denominada de “imagen térmica”, con la cual se trata de medir indirectamente la temperatura de los devanados. Consta básicamente de un detector de temperatura que mide la temperatura del aceite en el estanque en la parte superior. Este detector lleva, además, en sus proximidades un calefactor alimentado por una corriente proporcional a la del devanado. La constante de tiempo total considera entonces la del aceite (lenta) y la del devanado (rápido).

En máquinas sincrónicas se usan detectores de temperatura ubicados en el núcleo del estator y también cerca de los devanados y en general dan indicación y alarma. Además se usan termostatos ubicados dentro del housing, ajustados para detectar altas temperaturas producto de incendios. Comandan los controles encargados de la desconexión y detención de la máquina así como los de extinción de incendios.

1.6.5. Comparación de corrientes

En las zonas de un sistema donde no hay consumos, la corriente que entra y la que sale debe cumplir una relación bien definida. Si el acoplamiento es conductivo, la razón es 1:1 y si es inductivo, es inversa a la razón de tensiones, al despreciar las pérdidas. Al ocurrir un cortocircuito en estas zonas se pierde la relación anterior, lo que se usa en las denominadas “protecciones diferenciales”, que se aplican en equipos, tales como: generadores, transformadores, etc. En forma similar, al comparar corrientes que entran a una línea de doble circuito, se han desarrollado las protecciones denominadas “de corrientes balanceadas”.

1.6.6. Variaciones de flujos de potencia

La variación de la magnitud y el sentido de la potencia se pueden usar en forma combinada o por separado. La variación del sentido de la potencia se usa en ciertos casos para impedir el trabajo de un alternador como motor (se previene el “motoreo” de un grupo electrógeno, por ejemplo). Estas protecciones se denominan “contrainvertión del flujo de potencia activa”.

La variación de magnitud se usa en protecciones de “sobrepotencia activa” o reactiva cuando se desea, por ejemplo, independizar un pequeño sistema que se encuentra conectado a otro de mayor capacidad, cuyas fuentes de generación se han desconectado. Con esto se evita perder el servicio en el sistema más pequeño al desconectarse por sobrecarga. De la misma forma se pueden usar protecciones de “sobrepotencia reactiva capacitiva”, para evitar mantener energizadas líneas de alta tensión en vacío (efecto Ferranti).

1.6.7. Disminución de la impedancia o reactancia

Mediante la información de tensiones y corrientes de circuitos o elementos auxiliares, se alimentan protecciones que miden en todo instante la impedancia y/o reactancia por fase en el sentido de su operación, y operan cuando ésta baja de cierto valor conforme a su curva característica. La impedancia o reactancia que se puede medir en un punto dado del sistema es el valor que resulta de sumar los parámetros del mismo (en el sentido del flujo de la potencia) y del consumo; al quedar cortocircuitado este último, se produce una disminución del valor medido que bien podría ser el valor de ajuste para la protección. A estas protecciones se les denomina “direccionales de distancia” y se les usa ampliamente en la protección líneas de transmisión.

1.6.8. Aparición de componentes de secuencia cero

Mediante la conexión de transformadores de medida en forma adecuada, es posible obtener corrientes y tensiones de secuencia cero (residuales) en sistemas conectados a tierra, al producirse fallas con retorno por tierra. Estas magnitudes pueden alimentar relés de protección que operan de acuerdo con sus características y en forma direccional, es decir, sólo en un sentido del flujo de potencia que toma la falla. Cuando sólo se alimentan con corriente residual se les llama “protecciones de sobrecorriente residual”.

La corriente residual se puede obtener también de los neutros de los transformadores de poder o bien de la conexión en paralelo de transformadores de corriente ubicados en cada fase. En sistemas aislados de tierra es posible detectar, con la conexión de transformadores de potencial en delta inconclusa (“delta abierta”), contactos de una fase a tierra.

1.6.9. Aparición de componentes de secuencia negativa

Las componentes simétricas constituyen parte de un método de resolución analítica de circuitos polifásicos. Sin embargo, es posible separar las componentes de secuencia por medio del uso de los llamados “filtros de secuencia”. Estos filtros son combinaciones adecuadas de resistencias, bobinas y condensadores que entregan un voltaje o una corriente proporcional a la componente de secuencia específica que se busca. La componente de secuencia negativa es especialmente peligrosa en los rotores de las máquinas sincrónicas, ya que induce corrientes parásitas de doble frecuencia, y por lo tanto, calentamiento. Las máquinas son bastantes limitadas en este aspecto, en especial las de rotor cilíndrico. En estos casos se usan filtros de secuencia negativa para proveer protección.

1.6.10. Velocidad de variación de la impedancia

Al ocurrir un cortocircuito, el valor de la impedancia entre los puntos de medida y de falla baja instantáneamente al valor correspondiente del sistema incluido entre estos dos puntos. En cambio, al ocurrir perturbaciones, tales como oscilaciones de potencia, el valor de la impedancia varía en magnitud y fase en forma más o menos periódica. Esta particularidad se emplea en esquemas destinados a bloquear la orden de apertura de interruptores comandados por protecciones que miden la impedancia y/o reactancia, donde resulta indeseable una apertura del sistema en condiciones de oscilaciones

1.7. Condiciones que debe cumplir un sistema de protección

De acuerdo con lo expuesto, en cuanto a los diferentes tipos de anomalías que se pueden presentar, y además que los esquemas de protecciones están íntimamente asociados con los circuitos destinados a ser comandados voluntariamente por los operadores de los equipos de poder, los sistemas de protecciones deben cumplir las siguientes condiciones:

1.7.1. Independencia de la operación del sistema eléctrico

Los sistemas de protecciones deben ser, en lo posible, totalmente independientes de la configuración ocasional del sistema de poder, motivada por la operación de éste. Por ejemplo, al desconectar parte de los equipos, las protecciones del resto deben continuar cumpliendo con sus funciones sin que sea preciso modificar sus ajustes o sus circuitos.

1.7.2. Discriminar entre carga, sobrecarga y cortocircuito

En general, los equipos que componen los esquemas de protecciones son diseñados para soportar en forma permanente una sobrecarga de un 20% del nivel normal. Es decir, si su corriente nominal corresponde, en términos primarios o secundarios, a la carga normal del circuito de poder, no sufren deterioro si en forma permanente estos últimos operan a 120% de carga. Evidentemente, esto se refiere sólo a los transformadores de corriente y circuitos amperométricos de las protecciones.

Las protecciones deben cumplir con la condición de poder diferenciar entre carga o sobrecarga respecto a corrientes motivadas por cortocircuitos. Esto es importante, ya que en ciertos casos la corriente de cortocircuito mínima puede ser inferior a la nominal de un determinado equipo.

1.7.3. Discriminar entre falla y perturbación

En 1.5, se indican las diferentes características con que se presentan estas anomalías. Estas diferencias deben ser aprovechadas por las protecciones para evitar producir desconexiones cuando aparecen perturbaciones fugitivas o decrecientes que pueden permanecer por tiempos cortos sin dañar a los equipos.

1.7.4. No ser afectado por anomalías en los circuitos de control

La fuente de alimentación de los circuitos de control debe cumplir con la máxima confiabilidad o seguridad de servicio. Los circuitos de control deben ser simples y eficaces, a prueba de daños que pudieren ocasionarles agentes extraños y atmosféricos, ya que gran parte de ellos interconectan elementos y dispositivos que se encuentran físicamente separados a distancias tales como 100 o 150 metros, por ejemplo.

Debe evitarse emplear elementos que puedan ordenar apertura de interruptores u operaciones básicas para la mantención del servicio al quedar desenergizados. Aun teniendo presente lo anterior, deben consultarse en estos casos sistemas de señalización visual o auditiva para indicar esta condición. Tal es el caso de las ampollitas indicadoras de las protecciones diferenciales, de interruptores de poder, bocinas de alarma de bajo voltaje en los circuitos de control, instrumento indicador de aislación en los circuitos de control, etc. También en los esquemas de protecciones debe evitarse que los elementos de medida de protecciones produzcan una apertura indeseable de interruptores al faltarles parte de su alimentación normal.