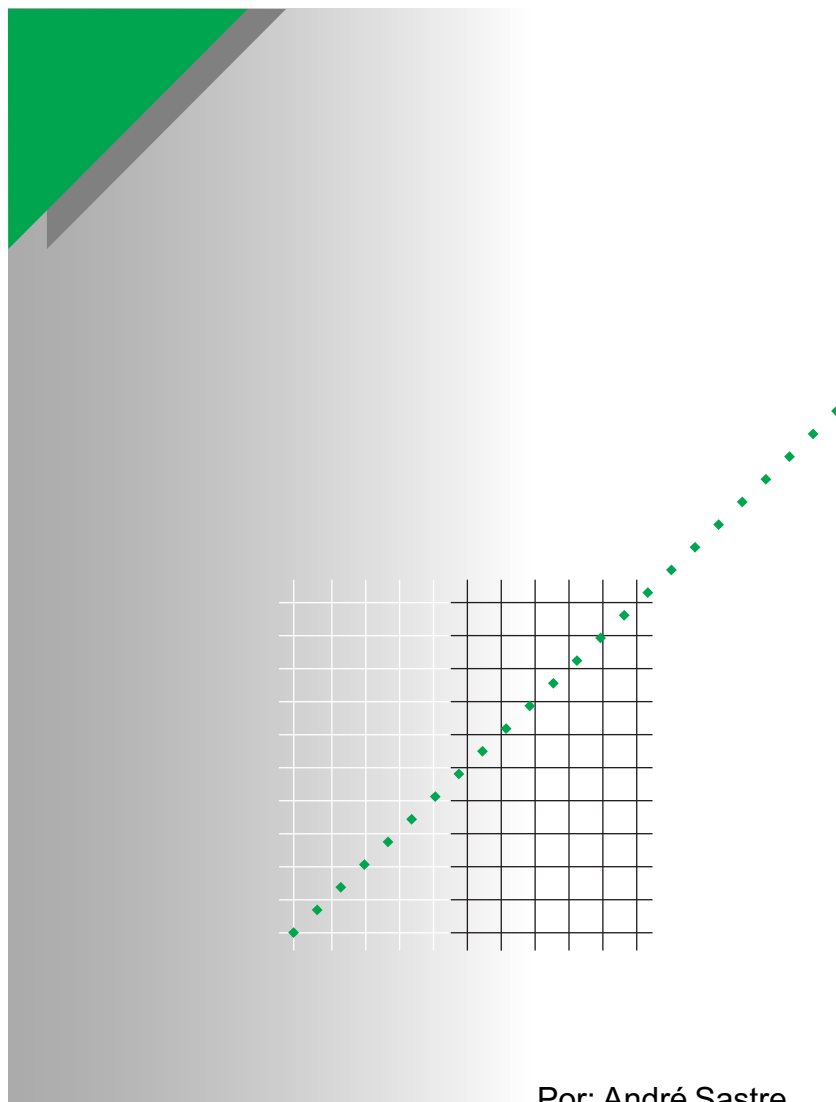


Cuaderno Técnico nº 174

Protección de redes de AT industriales y terciarias



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Por: André Sastre

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 174 de Schneider Electric».



André SASTRE

En 1966 se especializa en las medidas electrotécnicas y los automatismos industriales.

Ingeniero autodidacta, entra en 1971 en Merlin Gerin en 1988 y participa en la creación de la actividad Protección-Control-Mando AT-A.

Actualmente se encarga del funcionamiento de la red comercial para esta actividad.

cuaderno técnico nº 174

Protección de redes de AT industriales y terciarias

Por: André Sastre

Trad.: J.M. Giró

Edición francesa: diciembre 1994

Versión española: noviembre 1995

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Terminología

AMDEC:

método de estudio «Analyse des modes de Defaillance, de leurs Effets et de leur Criticité» (Análisis de las formas de los fallos, sus efectos y su criticidad), en la que, según una definición de la CEI 812 «un modo de fallo es un efecto por medio del cual se observa el fallo de un elemento del sistema estudiado».

BT-AyBT-B:

categorías de tensiones definidas (en Francia) por el decreto de 14 de noviembre de 1988:

■ en alterna

50 V < BT-A ≤ 500V

500 V < BT-B ≤ 1000V

■ en continua (porcentaje de rizado < 10 %)

120 V < BT-A ≤ 750V

750 V < BT-B ≤ 1500V

Estas dos categorías se reagrupan en el grupo I, según la CEI 364 y (en Francia) la NF C 15-100.

Corriente diferencial residual:

suma vectorial de las corrientes que recorren todos los conductores activos (fases y neutro) de un circuito

en un punto de la instalación (también se llama corriente residual).

Electrización:

acción por la que un cuerpo adquiere una carga eléctrica; estado de una persona conectada a un elemento bajo tensión.

Electrocución:

muerte accidental causada por la corriente eléctrica; última fase de la electrocución.

AT-AyAT-B:

las categorías de tensión son objeto de diferentes clasificaciones según los decretos, las normas, y otras especificaciones particulares, tales como las de ciertos distribuidores de energía, como en lo que se refiere a las tensiones alternas superiores a los 1000 V:

■ el decreto francés de 14 noviembre de 1988 define dos categorías de tensión:

AT.A = 1 kV < U ≤ 50 kV,

AT.B = U > 50 kV.

■ la publicación CEI 71 concreta unas gamas de las tensiones más elevadas para los materiales:

□ gama A = 1 kV < U < 52 kV,

□ gama B = 52 kV ≤ U < 300 kV,

□ gama C = U ≥ 300 kV.

Está prevista una revisión que abarca solamente dos gamas:

□ gama I = 1 kV < U ≤ 245 kV,

□ gama II = U ≥ 245 kV.

Medida RMS -Root Mean Square-:

valor de corriente eficaz, incluidas las corrientes de los armónicos =

$$= I_{\text{eff}} = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h3}^2 + I_{h5}^2 + \dots + I_{hn}^2}$$

siendo:

h1 = 1^{er} armónico,

h3 = 3^{er} armónico,

hn = armónico de orden n.

Pcc:

potencia de cortocircuito.

Estabilidad dinámica de una red:

facultad que tiene una red, compuesta por varias máquinas giratorias asíncronas y síncronas, de volver a un funcionamiento normal a continuación de una gran perturbación que haya supuesto una modificación de su configuración o bien transitoria (caso de un cortocircuito) o bien permanente (apertura de una línea).

Protección de las redes de AT industriales y terciarias

Índice

1 Protección eléctrica y seguridad	Las consecuencias de un fallo eléctrico	p. 6
	Las necesidades del usuario	p. 6
	La estructura de una red eléctrica	p. 7
	El plan de protección	p. 7
	La selectividad	p. 9
	La fiabilidad de las protecciones	p. 10
	Las funciones de protección y de mando-control reunidas	p. 10
2 Los tipos de selectividad y de protección	Selectividad amperimétrica	p. 12
	Selectividad cronométrica	p. 12
	Selectividad lógica	p. 14
	Protección diferencial	p. 15
	Protección direccional	p. 16
	Protección de mínima impedancia	p. 18
	La selectividad óptima	p. 18
	Síntesis de empleo de los diversos tipos de protección	p. 20
3 Empleo de las protecciones	Precauciones en la elección y empleo de las protecciones	p. 21
	Precauciones relativas a los captadores	p. 22
	Precauciones relativas a la red	p. 23
4 Guía de elección		p. 24
5 Conclusión		p. 26
6 Informaciones prácticas	Datos necesarios para realizar un estudio de selectividad	p. 27
	Diagrama de selectividad	p. 27
7 Bibliografía		p. 29

La protección de redes eléctricas necesita la utilización de numerosas y diferentes técnicas de organización, o un plan de protección: necesita los conocimientos de un especialista.

En efecto, este trabajo obliga a conocer los reglamentos y normas, pero también a equilibrar los aspectos técnicos y económicos, que a veces son opuestos. Este especialista debe de satisfacer las necesidades de utilización en términos de seguridad y disponibilidad de la energía eléctrica. Conseguir este objetivo de seguridad depende, en su mayor parte, de la selectividad entre los dispositivos de protección.

Para permitir a un no-especialista hablar de forma útil con el diseñador de una instalación eléctrica AT-A, este Cuaderno Técnico aborda simplemente estas técnicas de protección y de selectividad. Un lector ya informado podrá empezar su lectura a partir del segundo capítulo, y una persona experimentada podrá irse directamente al capítulo tercero.

1 Protección eléctrica y seguridad

Las consecuencias de un fallo eléctrico

Las consecuencias de un fallo eléctrico son múltiples, algunas veces no evidentes, y, a priori, difíciles de imaginar; he aquí algunos ejemplos:

- aguas abajo del fallo, la red sin tensión provoca una parada parcial e intempestiva de los consumidores;

- el lugar del fallo queda frecuentemente dañado, por lo que hay que desmontar, reparar, sustituir piezas, reiniciar el trabajo, hacer un informe pericial...;

- mientras se produce el fallo, el personal está expuesto a riesgo de electrocución, de quemaduras (efectos térmicos), y a la vez de traumatismos (proyección o caída).

Las consecuencias pueden sentirse igualmente en las zonas sanas de la red, por ejemplo durante un cortocircuito:

- una bajada de la tensión resulta perjudicial para los autómatas y para los equipos informáticos ...

- la pérdida de estabilidad de las máquinas giratorias puede complicarse, inmediatamente después de la eliminación del fallo, hasta provocar la caída total de la distribución principal y de las fuentes secundarias de seguridad previstas para asegurar la continuidad de la alimentación.

Por tanto, casi en todos los casos, un fallo provoca una interrupción de la alimentación y de la producción. Interrupción que, en cuanto a los aspectos económicos, es cada vez menos aceptable.

La parada de la explotación puede, sin embargo, quedar circunscrita a una sola parte de la red, según:

- el punto del fallo,
- la eficacia de las protecciones,
- el sistema de selectividad empleado.

Esta reducción del riesgo de interrupción se consigue con un sistema de protección bien coordinado. La misión de las protecciones es provocar rápidamente la desconexión de la tensión en la parte de la red afectada por el defecto, para limitar sus consecuencias. La selectividad pretende no desconectar más que esta parte de la red, y solamente ésta (figura 1).

Las necesidades del usuario

Si esta necesidad debiera expresarse con una sola palabra, ésta sería **SEGURIDAD**.

Esta palabra tiene varias acepciones (Cuadernos Técnicos n° 134 y 144); en este documento, los dos sentidos que hay que recordar, son:

- seguridad,
- disponibilidad,

pero tomados bajo el punto de vista de las protecciones eléctricas.

Así, los dispositivos de protección tienen una gran incidencia en la seguridad, porque deben de eliminar el fallo, lo más rápidamente posible, para proteger a las personas y a los bienes contra sus consecuencias (accidente corporal, degradación material).

Estos mismos dispositivos tienen una gran influencia sobre la disponibilidad, porque :

- su selectividad limita la zona afectada por el fallo,
- limitan el tiempo de restablecimiento de la tensión,
- porque sus autocontroles, o mejor, sus autodiagnósticos, reducen el riesgo de no-funcionamiento y de caída intempestiva,
- dan al usuario la posibilidad de diagnóstico a distancia (es la función de comunicación),

- pueden estar formando parte de los automatismos de maniobra (reenganches, secuencias de arranque, conmutación...).

Hay que destacar que la seguridad se opone a la disponibilidad, porque los dispositivos automáticos de protección provocan con frecuencia interrupciones del servicio. Así, el nivel de seguridad conseguido en una instalación es el resultado de un compromiso que tiene en cuenta una multitud de elecciones formalizadas en el plan de protección.

Por tanto, cualquier modificación, durante su estudio y posteriormente, debe de analizarse con sumo cuidado en cuanto a las consecuencias que pueda tener en la seguridad y en la disponibilidad. Para esto, los diferentes niveles de seguridad buscados en la red deben de estar necesariamente fijados:

- desde el estudio del diseño, por tanto mucho antes de la elección de los componentes,
- y durante la elección del modo de comportamiento.

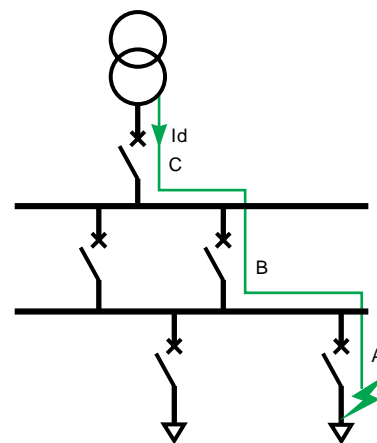


Fig. 1: Hay selectividad entre las protecciones A y B, y también B y C cuando, para cualquier fallo aguas abajo de A, sólo el interruptor A abre, a pesar de que la corriente del fallo I_d ha sido también detectada por B y C.

La estructura de una red eléctrica

Se representa normalmente por un esquema unifilar que detalla los principales componentes de la red (transformadores, alternadores, máquinas, ...) y cómo están conectados entre ellos (líneas, juegos de barras ...). Los niveles de continuidad del servicio dependen en gran parte de esta estructura.

En efecto, los tipos de protecciones y los sistemas de selectividad se eligen según el esquema a montar (en antena, en doble derivación, en bucle, con un juego de barras sencillo o doble...), pero también según la posición relativa de los componentes (ver Cuaderno Técnico n° 169).

Para satisfacer las necesidades del usuario lo más económicamente posible, puede ser aconsejable el método siguiente, que tiene cuatro etapas:

- 1 - fijar los objetivos de seguridad para la zona de utilización de la energía,
- 2 - crear una estructura de red partiendo de los consumidores (esquema unifilar),
- 3 - elaborar el plan de protección necesario para la elección de las técnicas de protección y selectividad,
- 4 - verificar que se consiguen los objetivos de seguridad.

Si no es éste el caso, hay que modificar parcialmente la segunda etapa (estructura), y después volver a realizar las etapas 3 y 4.

Para realizar sólo los estudios de disponibilidad, los diseñadores pueden utilizar los sistemas expertos. Por ejemplo, se usa normalmente el sistema ADELIA durante los estudios de redes de distribución eléctrica confiados a la Sociedad Merlin Gerin. Estos sistemas trabajan a partir de los datos de fiabilidad AMDEC y de los árboles de fallos (Cuaderno Técnico 144). También se puede cuantificar la disponibilidad de las diferentes estructuras para, a continuación, seleccionar la más adecuada.

El plan de protección

Es un conjunto coherente y eficaz de protecciones seleccionadas con el fin de satisfacer los objetivos de disponibilidad de energía y de seguridad para las personas y los equipamientos.

El plan de protección necesita condiciones de actuación y de no-actuación de las protecciones en momentos de fallo, durante los transitorios normales (debidos a maniobras de explotación, por ejemplo), y también en presencia de armónicos, perturbaciones inducidas y/o rayos...

El plan se apoya en los datos generales e inherentes a la instalación en cuestión, tales como:

- los reglamentos,
- las normas,
- la práctica habitual,
- las condiciones de utilización,
- los receptores,
- el régimen de neutro,
- la coordinación entre protecciones,
- las consecuencias de un fallo,
- la presencia (o no) de diversas fuentes de energía.

Todos estos datos constituyen un repertorio de los diferentes riesgos potenciales, que son muy variados, frecuentemente independientes y difíciles de cuantificar. Por ejemplo:

- los relacionados con la estructura de la red (en antena, en bucle cerrado, con fuentes en paralelo...), que están ligados al tipo de régimen de neutro utilizado, pero también al entorno (vías de acceso, humedad, altitud, ...).
- los inherentes a los receptores: un transformador no está sujeto a los mismos riesgos que un motor, una laminadora no está sujeta a los mismos contratiempos que una trituradora...

En fin, para todos los componentes de la red, incluidos los generadores, los conductores y los receptores, el plan de protección define, por lo menos, la elección y los ajustes de los dispositivos de protección contra los fallos por cortocircuito fase-fase y fase-tierra.

Los reglamentos

Son todos los textos legales, o con el valor de una ley, que obligan a una elección incuestionable (por ejemplo, en Francia, el decreto que se refiere a la protección de los trabajadores).

Las normas

Siempre hay que tener en cuenta las normas aplicables a la instalación en cuestión.

Para las instalaciones eléctricas las normas que hay que aplicar dependen de los valores de tensión de cada circuito y están generalmente sujetas a diversos parámetros. Así, en Francia, la norma NF C 13-200, que se aplica a «Las instalaciones privadas de alta tensión», tiene también en cuenta el clima y el entorno.

La práctica habitual

Aunque se refieren a la elección de la estructura, los tipos de protecciones, y también a las formas de utilización, las costumbres no siempre están escritas.

Sin embargo, su aplicación hace más fácil la explotación: el usuario no tiene que enfrentarse más que a principios de funcionamiento que ya conoce bien.

Las condiciones de utilización

Funcionamiento centralizado o no de la red, posibilidad de manejo local, constitución de los equipos, asignación local o no, con demora de intervención, etc, son otras tantas condiciones que influyen sobre el plan.

Los receptores

Todos los receptores tienen su propia influencia: los motores por sus características de arranque, los alternadores por su reactancia, los transformadores por su corriente de cortocircuito, los cables por su capacidad y por su comportamiento ante un cortocircuito...

El régimen de neutro (Cuaderno Técnico n° 62)

El esquema de las conexiones de la red a tierra, o régimen de neutro, se determina en función del nivel que se quiera conseguir:

- de seguridad para las personas y los equipos,

- según las necesidades de continuidad en el servicio.

Se debe tener en cuenta:

- la cualificación del personal de la explotación,

- los riesgos de deterioro del material,

- la intención de limitar las sobretensiones.

El régimen así obtenido afecta al valor de la corriente de defecto a tierra fijado por el sistema de puesta a tierra, valor que resulta de un compromiso entre

- tener una corriente suficientemente fuerte para

- realizar una buena selectividad: la corriente residual debe de ser detectada sin ser confundida con las corrientes capacitativas de las conexiones sanas (los cables),

- protegerse contra las sobretensiones por disminución de la impedancia entre la red y la tierra;

- y tener una corriente débil para limitar los daños (especialmente en las máquinas giratorias y los transformadores) pero también los riesgos de incendio o explosión en las zonas sensibles (petroquímica, minas, ...).

Para una instalación que ya existe, las protecciones instaladas y el estudio de la selectividad, están directamente condicionadas al régimen de neutro existente.

Para una instalación nueva, el estudio de la selectividad permite dar por válidas las conclusiones obtenidas (régimen de neutro, valor máximo de corriente de defecto a tierra y el emplazamiento adecuado de la toma de tierra), y hasta pensar otras soluciones.

La coordinación de las protecciones

Para la coordinación hace falta comprender «cómo armonizar el funcionamiento de los dispositivos de protección», y, más en concreto, «velar por su selectividad».

Es raro que una red de distribución eléctrica sea totalmente independiente de otra instalación, en

concreto, esta coordinación es obligatoria entre

- la red de instalación proyectada y la instalación ya existente,

- o entre

- la red de la instalación proyectada y la red aguas arriba y/o la red pública.

Su estudio se hace a partir:

- de las gráficas de funcionamiento de las protecciones; por ejemplo, es juicioso prever una protección a tiempo extremadamente inverso para «coordinarse» con un fusible;

- de los tiempos de corte (selectividad).

Nota: los distribuidores públicos de energía eléctrica obligan generalmente a unos ajustes máximos aplicables en los centros de salida (en Francia, EDF exige para los centros de transformación de AT-A de 20 kV un tiempo de 0,2 s).

Un estudio de coordinación determina los tiempos de eliminación del defecto, que deben de ser:

- satisfactorios para la seguridad del personal,

- conforme a la resistencia del material (calentamientos, esfuerzos electrodinámicos),

- selectivos con las instalaciones próximas.

Las consecuencias de un fallo

Son los accidentes corporales, el desgaste y destrucciones del material, las pérdidas de productividad...

Se valoran en términos de riesgo:

- para las personas, a partir de la corriente de defecto, de la elevación del potencial de las masas accesibles, de la impedancia de los circuitos de tierra...

- para los materiales, a partir de los esfuerzos térmicos y/o electrodinámicos, de la posibilidad de que se quemen o perforen las bobinas de los circuitos magnéticos de los equipos, de su sensibilidad a las bajadas o cortes de tensión...

- los calentamientos y esfuerzos electrodinámicos afectan más a la esperanza de vida de los materiales cuando son fuertes y duraderos.

Interrumpirlos rápidamente evita un envejecimiento rápido (fatiga) del material.

- los cortes de tensión, frecuentemente debidos a un defecto detectado por un aparato de protección. Afectan a toda la red aguas abajo:

- pueden ser cortos, como es el caso de los cortes seguidos de reenganches automáticos o de conmutación de fuentes. Perjudican sobre todo a los materiales electrónicos (regulación, informática, ...), y menos a las máquinas con gran inercia (hornos, ventiladores, ...).

- de hecho, pueden resultar largos para aquellos trabajos que necesitan una acción previa a su conexión a la tensión, y entonces afectan financieramente a la empresa.

- las bajadas de tensión se deben frecuentemente a cortocircuitos. Se notan tanto más, cuanto más cerca se está del punto del defecto, y pueden ser fuente de graves desórdenes, incluso sobre las partes sanas de la red.

Limitar la duración de todos estos fallos y defectos contribuye a reducir su influencia sobre los receptores.

- según el tipo de equipo (motores síncronos o asíncronos, transformadores secos y húmedos, alternadores...).

- Cuando se trabaja independientemente de la red de distribución pública, según la importancia relativa de las potencias acumuladas por las máquinas rotativas (motores y alternadores), es posible que una pérdida de estabilidad provoque el hundimiento total de la distribución y de las fuentes secundarias, que precisamente tienen que asegurar la continuidad del servicio. Hay que destacar que, inmediatamente después de la eliminación del defecto, esta pérdida de estabilidad se puede agravar. El mantener en funcionamiento todas las máquinas giratorias, síncronas y asíncronas, es todavía más probable si los huecos y cortes de la tensión son todavía de menor duración. Resumiendo, se ve claramente que la rapidez de

eliminación de un defecto es importantísima para reducir los riesgos, y además mejora la disponibilidad y la facilidad de mantenimiento.

Una vez valoradas, se discuten las consecuencias de un incidente para, finalmente, aceptarlas o rechazarlas, con las disposiciones particulares:

- selectividad parcial,
- transformador de aislamiento,
- régimen de neutro temporal,
- protección cronológica o lógica,
- permiso o no de funcionamiento de fuentes en paralelo,
- generador homopolar sobre el juego de barras,
- etc.

Coexistencia de fuentes diversas

Cuando una red puede, durante ciertos períodos, alimentarse con configuraciones y fuentes diferentes, hace falta para cada caso, determinar las corrientes de cortocircuito fase-fase y fase-tierra. Normalmente son muy diferentes y conocerlas es indispensable para asegurar la protección y la selectividad en cualquier circunstancia. Las protecciones necesitan entonces ajustes y temporizaciones diferentes según la configuración (**figura 2a**). Es ciertamente necesario «doblar» los fusibles para la protección de los contactos indirectos para asegurar la selectividad cuando las corrientes de defecto pueden ser de baja intensidad (alta impedancia durante el defecto o potencia limitada de la fuente); caso que se presenta en la **figura 2b**, donde

$I_{CC\text{transformador}} \gg I_{CC\text{alternador}}$.

Una solución práctica es el teleajuste, pero la solución ideal es la televalidación o elección a distancia de valores predefinidos y probados (**figura 2c**).

La selectividad

La selectividad consiste en cortar la alimentación a la parte afectada por el defecto y solamente a ésta. Organiza los disparos de los diversos dispositivos de protección de fases y de tierra, que deben de actuar lo más

rápidamente posible (Cuaderno Técnico n° 62).

Para esto, cada instalación es objeto de un «estudio de selectividad». Su finalidad es confirmar que cualquier defecto previsible será eliminado adecuadamente dentro de los límites técnicos fijados para el material de la instalación (p. ej.: poder de corte) y para los consumidores (p. ej.: duración máxima del corte). Para hacer esto, hay que buscar la topología de red más apropiada cambiando o no las protecciones en tal o cual punto del árbol que forma la red eléctrica.

Contenido de un estudio de selectividad

En la práctica, un estudio sobre la selectividad consiste en determinar los diversos ajustes (temporizaciones y umbrales) de los aparatos de protección verificando a la vez la compatibilidad entre los tiempos de actuación definidos para los aparatos aguas arriba y los definidos para los aparatos aguas abajo.

Un estudio así es importante porque:

- tiene presentes los diversos valores de corriente de defecto que pueden presentarse en los diferentes puntos de una red;
- verifica que cada uno de los defectos probables puedan eliminarlo dos protecciones diferentes, para prever un eventual fallo de la protección más próxima o de uno de sus elementos asociados, como cableado, reductores, interruptores automáticos, conexión...

Nótese que los ajustes de los aparatos aguas arriba de la red (llegadas) los impone normalmente el distribuidor de energía y que los ajustes de estos dos aparatos aguas abajo (salidas) lo están por el circuito de mayor potencia.

Presentación de un estudio de selectividad

Un estudio así debe de abarcar:

- la descripción de los modos de utilización hechos por el estudio,
- un esquema unifilar simplificado,

- los diagramas de selectividad, los de protección de fases y los de protección de defecto a tierra,
- una memoria técnica,
- la hoja de ajustes.

■ esquema unifilar simplificado. Representa la estructura de la red, los órganos de maniobra esenciales, y la referencia de las protecciones (**figura 3a**).

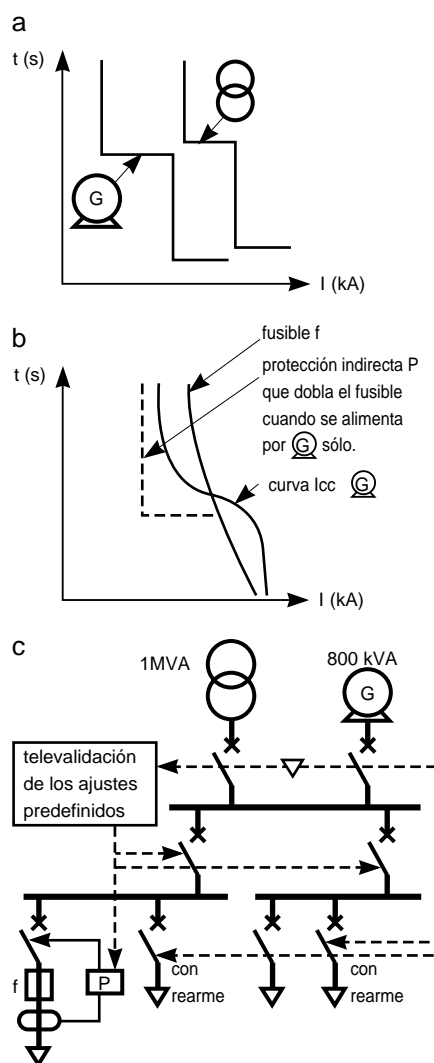


Fig. 2: Ejemplo interesante de televalidación. Después de la conmutación de la fuente de alimentación, es necesario adaptar los ajustes de las protecciones de salida para cambiar el umbral (a) y/o conectar la protección complementaria (b). La televalidación (c) mejora la seguridad (disponibilidad y seguridad).

■ diagramas de selectividad. Sobre estos diagramas (**figura 3b**) se visualizan las curvas de disparo de cada una de las protecciones con sus referencias correspondientes a las notas del esquema unifilar (**figura 3a**).

■ memoria técnica.

Describe los principios de la selectividad que en los diagramas no pueden representarse (selectividad lógica y diferencial, por ejemplo). Presenta y explica los resultados, destacando la duración de los disparos obtenida a nivel del interruptor automático de cabeza. Señala los riesgos y, si es necesario, propone las soluciones que, como ya se ha dicho, pueden influir en la topología de la distribución. Se exponen algunos ejemplos en la tabla de la **figura 4**. Esta lista, no exhaustiva, muestra las relaciones importantes entre los estudios de:

- de topología de red,
- de corrientes de cortocircuito,
- de selectividad.

Emprender estos estudios desde el principio de un proyecto resulta por tanto especialmente útil.

■ la hoja de ajustes.

Este documento reúne todos los valores de ajuste de todas las protecciones. Indispensable durante la instalación, es el resultado del estudio de la selectividad.

La fiabilidad de las protecciones

La fiabilidad de las protecciones es un factor esencial de la seguridad y de la disponibilidad de una instalación eléctrica.

Los fabricantes de aparatos de protección persiguen, durante el diseño y la fabricación, un doble objetivo:

- estar seguros del disparo
⇒ seguridad,
- que no se produzcan disparos impestivos
⇒ disponibilidad.

Este objetivo se consigue ahora con tecnología digital, porque:

■ después de haber efectuado, en diseño y en fabricación, numerosas pruebas de compatibilidad electromagnética, pueden colocarse en ambientes severos;

■ una vez instalados:

□ en prestaciones, efectúan el auto-control (es decir, la función de «perro guardián»),

□ durante un defecto, efectúan un autodiagnóstico que indica la causa y además, disminuye el tiempo de no-disponibilidad.

Sin embargo, sea cual sea el tipo de protección, el objetivo global no se puede alcanzar, más que si:

- los captadores son de buena calidad,
- la alimentación auxiliar es fiable,
- la puesta en funcionamiento se hace correctamente y los ajustes están bien hechos.

Las funciones de protección y de mando-control reunidas

Los dispositivos de protección, con las capacidades de trabajo atendidas por microprocesadores (**figura 5**), desempeñan numerosas funciones:

■ así, procesan la información suministrada por los diferentes captadores de corriente y de tensión, calculan diversas medidas (I , W , $\cos \varphi$, P , Q , etc.) y realizan la protección de las diferentes magnitudes.

■ además, pueden también reemplazar las funciones locales de un automatismo:

- la conmutación (o transferencia automática),
- el tratamiento previo de las alarmas,
- la memorización de las informaciones (disparos, bloqueos...),
- que guarden relación los disparos entre los dos extremos de una línea, o entre el primario y secundario de un transformador,

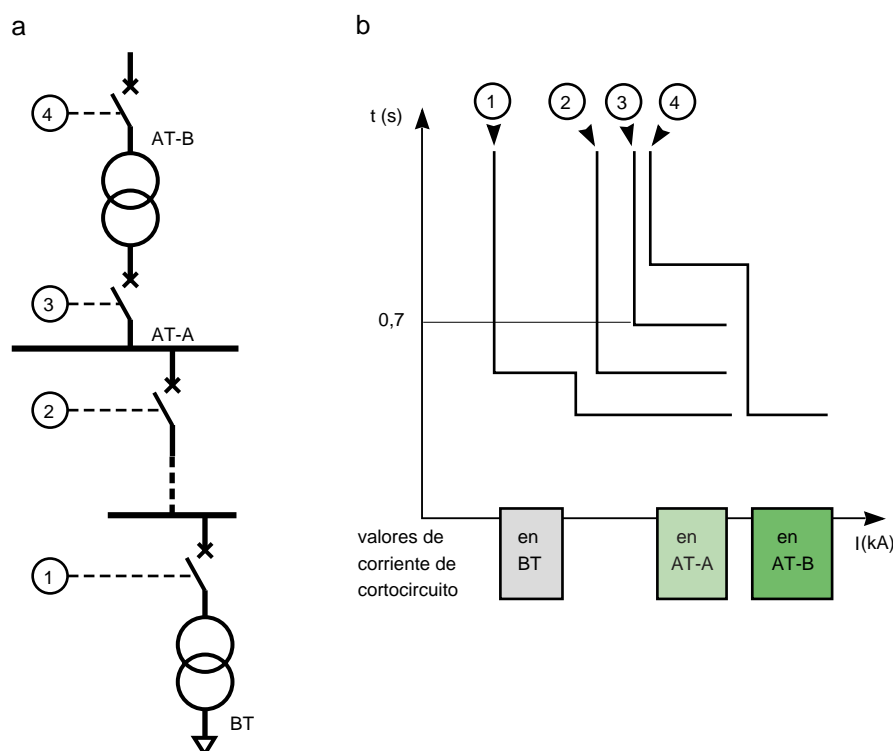


Fig. 3: Ejemplo de un esquema unifilar (a) y de un diagrama de selectividad de sus protecciones (b). Nótese que, para poder compararlas las I_{cc} se expresan en un mismo nivel de tensión.

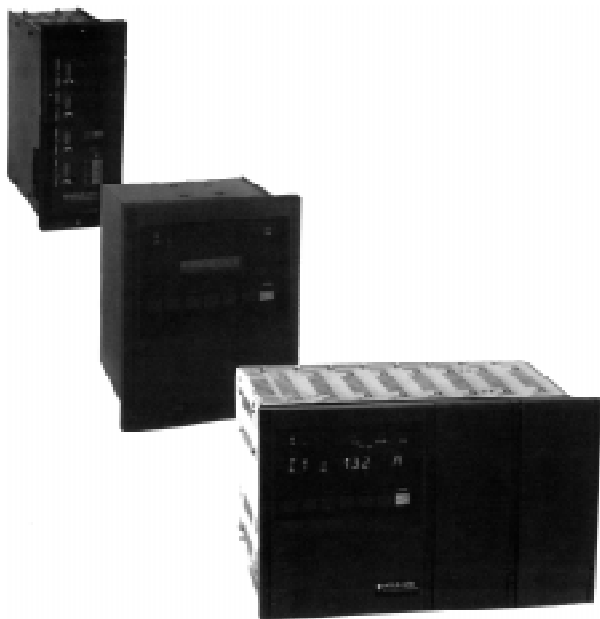


Fig. 5: Sepam, una gama de dispositivos de protección, pero también de mando-control, basado en microprocesadores (Merlin Gerin).

problemas que se presentan	soluciones
incompatibilidad entre los tiempos de intervención de las protecciones	<ul style="list-style-type: none"> ■ revisar la arquitectura para ganar uno o varios escalones en la selectividad ■ modificar el plan de protección para utilizar una selectividad lógica o diferencial ■ negociar con el distribuidor de energía un tiempo más largo en el centro de suministro ■ cambiar la tensión de distribución o de utilización
incompatibilidad entre la corriente de cortocircuito y los equipos	<ul style="list-style-type: none"> ■ impedir la conexión en paralelo de las fuentes ■ aumentar la Ucc de los transformadores ■ añadir inductancias de limitación ■ escoger otros equipos
no se funde el fusible	<ul style="list-style-type: none"> ■ cambiar el calibre de los fusibles ■ añadir un relé de protección indirecto asociado a un interruptor ■ sustituir los fusibles por un interruptor automático ■ modificar la fuente: <ul style="list-style-type: none"> □ aumentar la potencia de cortocircuito □ bajar la Ucc del transformador aguas arriba
duración de la interrupción demasiado larga	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentar con doble derivación ■ prever la conexión rápida de una fuente auxiliar (suministro de socorro) y, si es necesario, desconectar los receptores no prioritarios ■ utilizar una conmutación automática y motorizar los aparatos de corte

Fig. 4: Problemas y soluciones que pueden influir en una topología de distribución.

- la selectividad lógica (ver Cuaderno Técnico n° 2),
- la descarga y el rearmado.

Estos automatismos repartidos son tan importantes como la selectividad desde el punto de vista del objetivo de la continuidad en el servicio.

Estos conjuntos o unidades de protección y de mando-control tienen además la facultad de comunicarse entre ellos y, en este sentido, responden al principio de la inteligencia repartida.

Por inteligencia repartida hay que entender que la decisión se deja a iniciativa del dispositivo más próximo a la acción a efectuar:

- un disparo que sigue a un cortocircuito se decide y se lleva a cabo inmediatamente aguas arriba del punto del fallo;
- una apertura se ordena según la importancia de la sobrecarga, sea «in situ» (unidad de gestión local), sea a nivel de la acometida (unidad de gestión central).

Este principio tiene la ventaja de favorecer mucho la disponibilidad y la gestión de una red eléctrica.

En efecto, estas unidades asociadas que se comunican con un microprocesador dan la oportunidad de tener en cuenta numerosos parámetros que, comparados con los valores de referencia, permiten detectar las consecuencias peligrosas. Entonces es posible dar una alarma para asegurar un mantenimiento preventivo; por ejemplo:

- se puede señalar el riesgo de un probable bloqueo cuando la corriente de arranque de un motor aumenta de forma significativa,
- se puede anunciar el envejecimiento prematuro de un equipo después de una sobrecarga prolongada,
- se puede alertar sobre un próximo cortocircuito a partir de un aumento de la corriente residual (bajo aislamiento).

2 Los tipos de selectividad y de protección

Las protecciones escogidas durante la elaboración del plan de protección afectan directamente a la selectividad.

En este capítulo se hace un rápido repaso de los diferentes tipos de selectividad y de protección.

Estos tipos de selectividad y de protección tienen diversos orígenes:

- práctica habitual,
- modo de utilización,
- influencia de los distribuidores de energía nacionales,
- evolución tecnológica,
- técnicas elaboradas por los fabricantes.

Se conservan porque todos tienen sus ventajas. Por tanto, para ser juiciosos, en un punto determinado de la red se debe elegir entre uno de ellos: el que proporcione mayores ventajas.

Esta libertad de optimizar la elección queda facilitada por el empleo de dispositivos susceptibles de ofrecer varias soluciones en un mismo equipo.

Selectividad amperimétrica

Para asegurar una selectividad de tipo amperimétrico, la magnitud a controlar es la corriente.

En una red, una corriente de cortocircuito es tanto más débil cuanto más alejado esté el punto del defecto de la fuente.

La selectividad de ese circuito puede obtenerse teóricamente ajustando el umbral de los dispositivos de protección a la corriente de cortocircuito previsible según su posición en la distribución (**figura 6a**).

Este tipo de selectividad, no hace intervenir ningún retardo de funcionamiento (es instantánea), porque cada protección es independiente de las otras. Se utiliza frecuentemente en BTA terminal. Pero

se encuentra poco en ATA porque las variaciones reales de una corriente de cortocircuito entre dos puntos son demasiado poco significativas (las impedancias de conexión son despreciables), la selectividad no es, por tanto, más que parcial. (**Figura 6b**). Nótese que en AT generalmente un defecto de impedancia evoluciona muy rápidamente en un defecto franco.

El inconveniente mayor de este tipo de selectividad es que no tiene un seguro aguas arriba respecto a aguas abajo (no tiene redundancia).

En fin, el handicap esencial de la selectividad amperimétrica es que el umbral de una protección es tanto más elevado cuanto más cerca está

de la fuente, por lo que hay mayor riesgo de daños importantes. Por tanto, frecuentemente, no permite conseguir el objetivo de seguridad definido en el **capítulo 1** que da preferencia a la seguridad.

Selectividad cromométrica

Esta selectividad añade una noción de tiempo a la magnitud controlada, que es la corriente; voluntariamente la acción de los dispositivos de protección amperimétrica está condicionada por una temporización.

Para esto, los umbrales de intervención se definen con los tiempos de funcionamiento elegidos aguas abajo respecto a aguas arriba.

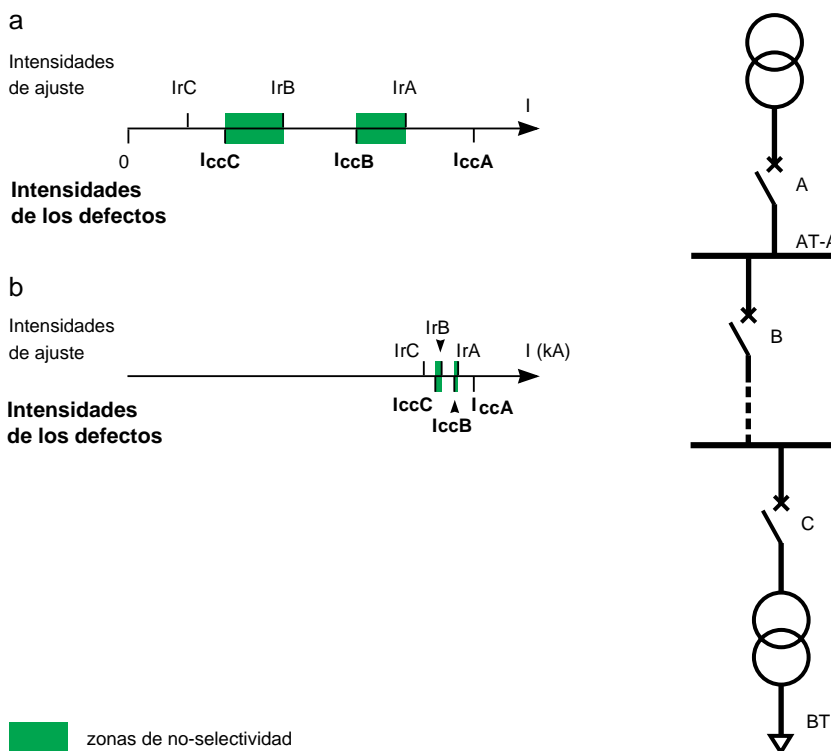


Fig. 6: En teoría (**a**) para hacer una selectividad amperimétrica; hay que verificar que $I_{ccA} > I_{rA} > I_{ccB} > I_{rB} > I_{ccC} > I_{rC}$.

En la práctica (**b**) la proximidad de los valores de ajuste hace que esta selectividad no sea más que parcial.

Así, durante un defecto, son varios los dispositivos aguas arriba que lo detectan (redundancia), pero sólo la protección situada inmediatamente encima de él dispara: el defecto ya no recibe más alimentación y las otras protecciones dejan de «verlo» antes de que acaben sus respectivas temporizaciones....

La verificación se puede hacer por comparación (superposición) de las gráficas de funcionamiento (figura 7) que deben de estar suficientemente separadas para asegurar esta selectividad (por ejemplo 0,3 s).

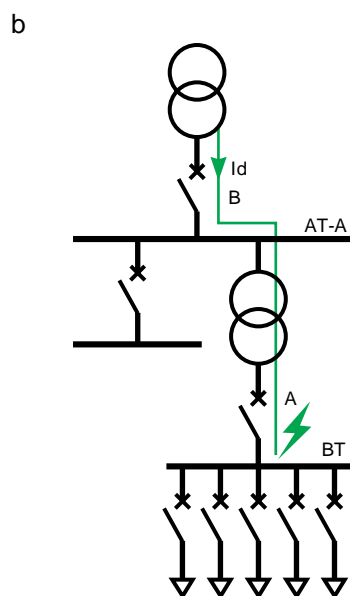
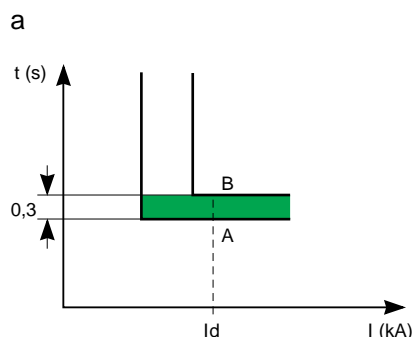
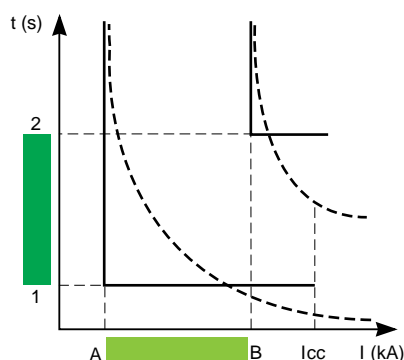


Fig. 7: La superposición de las curvas de disparo (a) permite comprobar que la selectividad es efectiva entre los interruptores automáticos A y B (b) que detectan la misma corriente de defecto I_d .

Sin embargo, cuando dos dispositivos controlan una misma corriente nominal (con o sin cambio de tensión), para escapar de las tolerancias de funcionamiento, es necesario prever también una separación de los ajustes de los márgenes de alrededor del 20 % aguas arriba respecto a aguas abajo. Las temporizaciones son o del tipo a tiempo dependiente del valor de la intensidad de defecto, o del tipo independiente (figura 8).

La selectividad cronométrica se usa con frecuencia porque es simple. Sin embargo tiene un inconveniente: el tiempo de actuación aumenta poco a poco en 0,2 ó 0,3 s, para cada «escalón» a medida que se aproxima a la fuente. Una separación así es necesaria teniendo en cuenta las tolerancias en los tiempos de respuesta de los elementos de la cadena de protección (captadores, circuitería electrónica, disparador e interruptor automático) además del tiempo de arco del interruptor automático aguas abajo.

Por consiguiente, son los defectos con mayor energía y situados más cerca de la fuente, los que están



1 = ajuste de «tiempo» mínimo
2 = ajuste de «tiempo» máximo
→ margen de ajuste «tiempos» = 1 a 2

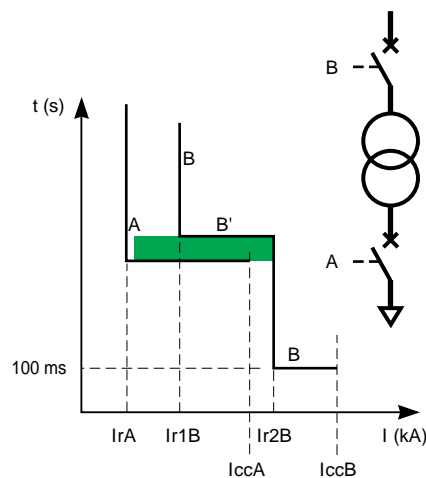
A = ajuste «umbral» de mínimo
B = ajuste «umbral» de máximo
→ margen de ajuste «umbral» = A a B

Fig. 8: Curvas de disparo a tiempo independiente (o constante [—]) y a tiempo dependiente (o inverso [---]).

durante más tiempo alimentados (daños más importantes). El objetivo de seguridad no se consigue totalmente, pero aplicando esta selectividad entre dos o tres escalones, se puede encontrar un equilibrio entre la seguridad y la disponibilidad.

Nota 1: de hecho por su simplicidad de instalación, este tipo de selectividad es interesante para proteger una conexión entre dos subestaciones distantes.

Nota 2: la unión de las selectividades cronométrica y amperimétrica es especialmente interesante para proteger el primario de un transformador. En efecto, las diferencias entre las corrientes de cortocircuito de los circuitos primario y secundario son muy significativas (figura 9). Entonces es posible tener una protección rápida (≈ 100 ms) en el circuito primario si su margen se ajusta por encima de la corriente I_{cc} secundaria «vu» después del primario.



I_{r1B} = umbral bajo $\geq 1,2 \cdot I_{rA}$ para evitar imprecisiones. Habitualmente se prevé un intervalo de selectividad de 300 ms (curva B') como seguro de A.

I_{r2B} = umbral alto $< I_{ccB}$, pero $I_{r2B} > I_{ccA}$, para disparo rápido en 100 ms para aceptar la sobrecorriente de accionamiento.

Fig. 9: Las selectividades cronométricas y amperimétricas aplicadas a los centros de transformación.

Selectividad lógica

(ver Cuaderno Técnico n° 2)

Este tipo de selectividad se llama también Sistema de Selectividad Lógica o SSL. Es objeto de una patente registrada por Merlin Gerin y se emplea para intercambios de información entre unidades de protección. La magnitud que se controla es la corriente.

Todas las unidades de protección SSL se comunican por medio de un cable (conexión piloto): por medio de este circuito todas las unidades solicitadas por un defecto envían instantáneamente un impulso lógico de espera a la unidad aguas arriba.

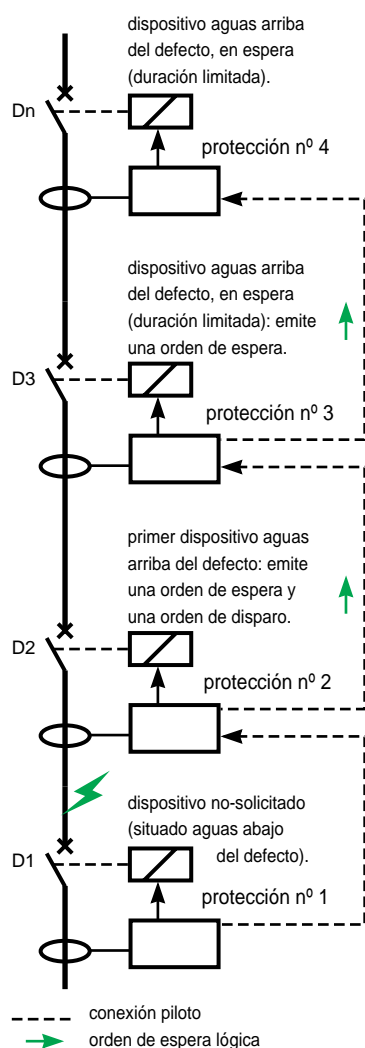


Fig. 10: Principio de la selectividad lógica.

Así, sólo la protección situada inmediatamente encima del fallo tiene libertad de funcionar, puesto que no ha recibido la orden lógica de espera (**figura 10**).

La ventaja del SSL es poder acortar los tiempos de disparo (**figura 11**) y especialmente en las proximidades de la fuente:

- sea ajustando todas las unidades con la misma temporización,
- sea poniendo tiempos de intervención cada vez más cortos de aguas abajo hacia arriba, contrariamente a lo que sucede con la selectividad cronológica (ver el apartado anterior).

Como con la selectividad cronométrica, lo ven todas las protecciones aguas arriba del defecto (redundancia).

Sin embargo, a pesar del inconveniente de tener que conectar por medio de un cable piloto todas las unidades de protección SSL, este tipo de selectividad es más satisfactorio en la búsqueda del objetivo de seguridad respecto de los presentados antes.

Nota: esta selectividad tiene una aplicación interesante para la protección de las entradas y salidas de un mismo cuadro. Aquí, los cables de conexión no son un inconveniente para la instalación: no recorren más que el cuadro. Pueden quedar integrados dentro del montaje. Además, esta solución permite poner tiempos de corte del defecto más cortos en las llegadas que en las salidas.

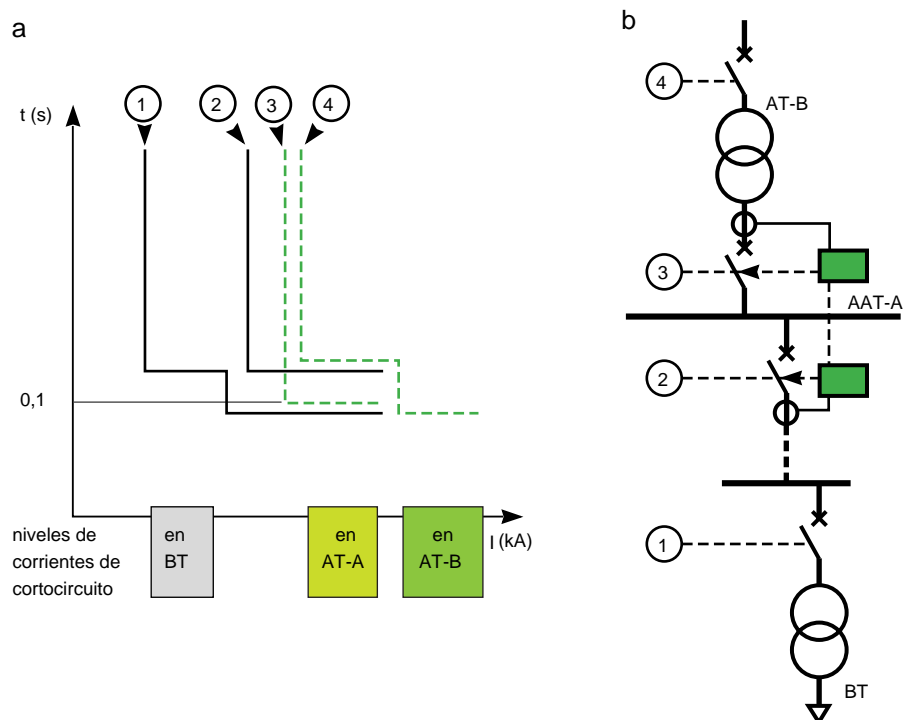


Fig. 11: Ejemplo de un esquema unifilar y de un diagrama de selectividad de las protecciones que incluye un escalón de selectividad lógica (entre 2 y 3). Este diagrama se puede comparar con el de la **figura 3** (las curvas modificadas están en trazo discontinuo). Esto demuestra que, para un mismo circuito, esta selectividad permite una importante reducción del retardo de disparo (en el interruptor automático 3, por ejemplo, es de 0,7 a 0,1 s).

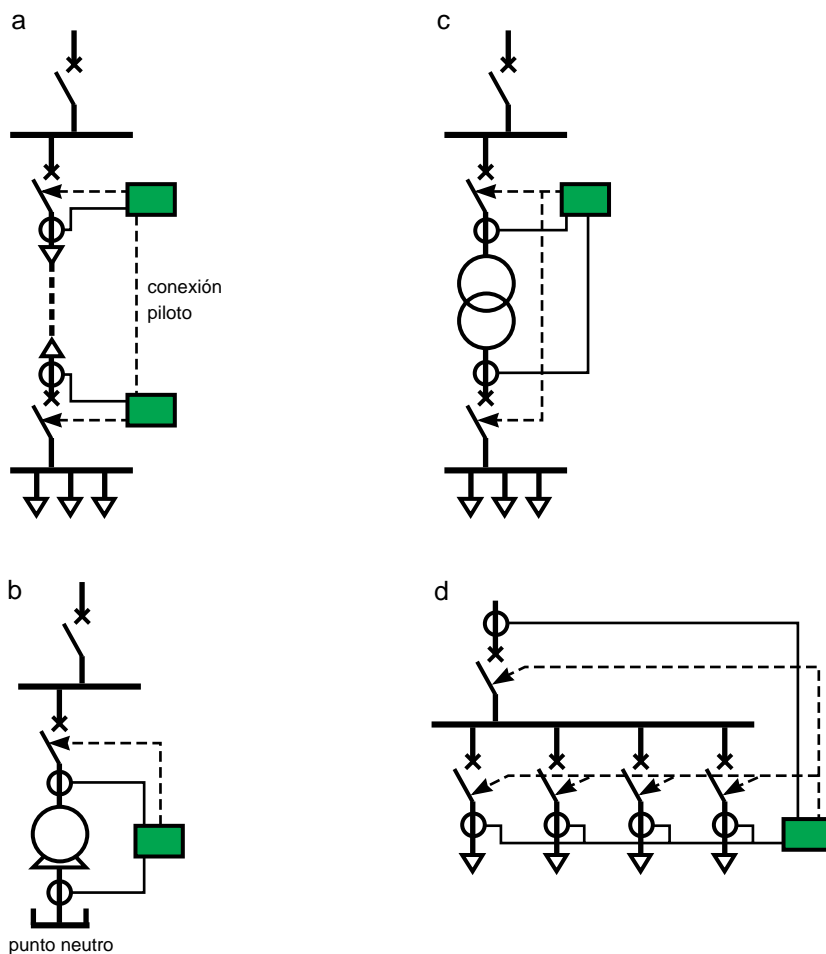


Fig. 12: Ejemplo de empleo de la protección diferencial.

a - protección diferencial de un cable: ante un defecto, los dos interruptores automáticos abren,

b - protección diferencial de una máquina, motor o alternador,

c - protección diferencial de transformador: si hay fuentes aguas abajo, ante un defecto abren los dos interruptores automáticos,

d - protección diferencial de un juego de barras: si hay fuentes aguas abajo, ante un defecto, abren todos los interruptores automáticos.

Protección diferencial

En principio, cuando no hay un defecto, las corrientes que entran en cada elemento de una instalación de distribución de energía eléctrica son iguales, fase a fase, que las que salen. La protección diferencial tiene como misión controlar estas igualdades, medir la posible diferencia entre las dos corrientes (debida a un defecto) y, para un umbral determinado, dar la orden de disparo. El elemento defectuoso queda entonces aislado de la red (figura 12).

Esta protección permite supervisar una zona bien delimitada por medio de un par de juegos de reductores de corriente (o transformadores de corriente): es autoselectiva y puede, por tanto, ser instantánea. Esta ventaja debe de conservarse durante los períodos en los que se producen fenómenos transitorios; sin embargo, su sensibilidad debe de limitarse a los fenómenos debidos a defectos y no a otros que son normales (corrientes de enganche...).

Las características de los «transitorios» son peculiares para

cada elemento de la red: las protecciones diferenciales son, por tanto, tecnológicamente «especiales», según sea:

- diferencial de líneas y cables,
- diferencial de juego de barras,
- diferencial de transformador,
- diferencial de motor,
- diferencial de alternador.

El empleo de esta protección queda limitado porque necesita un cableado (cables piloto o conexiones de los secundarios de los transformadores de corriente), unos reductores de corriente, y unos ajustes especialmente delicados para asegurar que no se produzcan disparos intempestivos. Se usa cada vez que es obligatorio eliminar muy rápidamente un defecto:

- reducción del tiempo aguas arriba en una cadena de selectividad cronométrica, por supresión de un eslabón de esta misma cadena,
- mejora de la estabilidad dinámica de una instalación que tiene máquinas rotativas,
- protección suplementaria de un elemento de gran importancia por su valor intrínseco o por las consecuencias inaceptables de su desconexión por un fallo...

La instalación de este tipo de protección impone también ciertas obligaciones:

- un TI -Transformador de Intensidad- en cada fase y en cada extremo de la zona controlada.

■ una conexión entre los dos dispositivos para la protección diferencial de cable. Antes de decidirse por esta protección es conveniente asegurarse de su eficacia para todo tipo de defectos imaginables. En efecto, el principio de detección utilizado frecuentemente para una protección diferencial con hilo piloto, hace que la sensibilidad dependa de la fase defectuosa y del tipo de defecto (fase-fase o fase-tierra).

- para la protección diferencial de una máquina: los extremos de los bobinados del lado del neutro deben de ser accesibles, para conectar los TI.

■ para la protección diferencial de un transformador:

□ según que el relé de protección se instale en la celda aguas arriba o aguas abajo, el cableado hacia el otro juego de TI será relativamente largo; es entonces necesario vigilar su sección (consumo) y su trazado (perturbaciones).

□ si el régimen de neutro es muy diferente de una parte a otra del transformador, los defectos «a tierra» no siempre son todos detectables; en estos casos hay que hacer un tratamiento especial.

■ para la protección diferencial de un juego de barras: con ciertos tipos de aparatos todos los TI deben de tener un mismo rendimiento e igual al del mayor TI. Esta protección de alta impedancia, usada sobre todo en los países de influencia anglosajona, presenta graves dificultades:

□ para la derivación de los circuitos secundarios de los TI, cuando el juego de barras alimenta numerosas salidas con diferentes configuraciones;

□ para la realización de los cableados, porque su gran impedancia puede, durante el defecto, inducir sobretensiones en el cableado de los secundarios de los TI. Estas sobretensiones pueden necesitar la colocación de dispositivos supresores de sobretensiones.

Recuérdese que la selectividad lógica, más práctica de usar, responde también al problema de la ganancia de tiempo.

Protección direccional

Este tipo de protección funciona a partir de la corriente, de la tensión y del sentido de circulación de la energía. Actúa cuando simultáneamente la corriente o la potencia sobrepasan el umbral y la energía fluye en dirección anormal. Hay protecciones direccionales:

- de corriente de fase,
- de corriente residual,
- de potencia activa,
- de potencia reactiva,
- de potencia homopolar (no desarrollada en este Cuaderno

Técnico porque se usa sobre todo en redes de distribución pública de neutro compensado).

Protección direccional de corriente de fase

Cuando dos fuentes, dos conexiones o más funcionan normalmente en paralelo hay un peligro de fallo general de la distribución cuando un defecto no afecta más que a uno de los elementos. En efecto, la corriente de defecto recorre todos estos elementos, con un cambio del sentido de la corriente en el elemento defectuoso (**figura 13**).

Las protecciones direccionales se usan, por tanto, para distinguir únicamente el elemento defectuoso y ordenar su aislamiento de los otros elementos todavía sanos. Para poder aislar el elemento defectuoso, estos dispositivos son aproximadamente 250 ms más rápidos que las protecciones de corriente máxima afectadas por el mismo defecto.

Protección direccional de corriente de defecto a tierra

Si una red está alimentada por dos o más transformadores (o por

alternadores) con sus puntos de neutro simultáneamente conectados a tierra, durante un defecto a tierra en una sola de las fuentes, todas las otras son recorridas por una corriente residual. Sólo la que está afectada por el defecto «ve» una corriente residual de sentido inverso respecto a las otras. Los dispositivos de protección direccional de tierra pueden, de este modo, distinguir entre los elementos con defecto y sin defecto (**figura 14**).

La dirección se conoce por una medida del defasaje entre los vectores «corriente residual» y «tensión residual».

Estos dispositivos se emplean también para seleccionar la salida defectuosa en redes con una gran corriente capacitiva, especialmente cuando los cables de conexión son largos: todas las salidas sanas son recorridas por una corriente residual del mismo sentido, y esta corriente es de sentido opuesto en la salida defectuosa (**figura 15**).

Nota: En este último caso, para realizar la selectividad sin protección direccional, se utiliza también otra

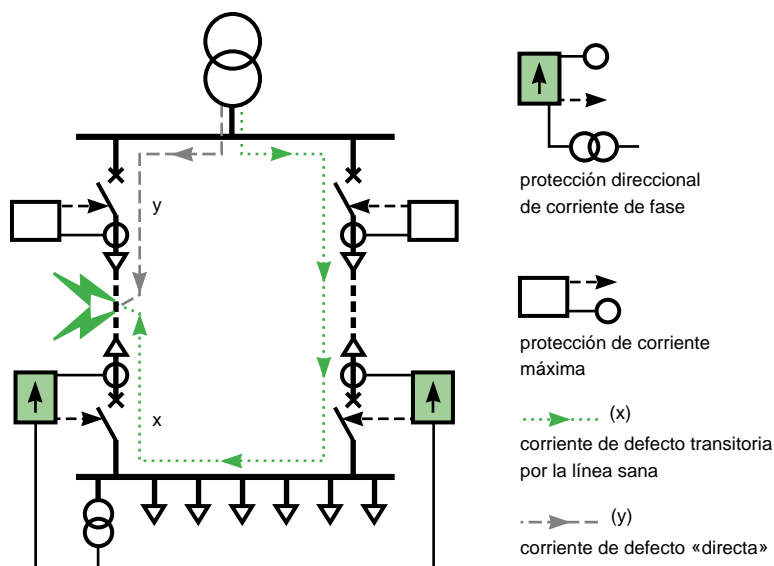


Fig. 13: Principio de la protección direccional de corriente de fase.

En una misma conexión, un dispositivo direccional es más rápido (≈ 250 ms) que un dispositivo de corriente máxima, de ahí la selectividad: aquí el disparo se produce primero en x después que en y.

Hay que mencionar que si estas conexiones se sustituyen por dos transformadores en paralelo, el principio se mantiene igual.

solución. Utiliza protecciones amperimétricas de defecto a tierra. Pero el margen I_s de estas protecciones debe de satisfacer que:

$$I_{C_{salida}} < I_s < \sum I_{C_{instalación}}$$

siendo I_C = corriente capacitiva,
 I_s = intensidad de ajuste.

En general $I_s \approx 1,3$ a $1,5 I_{C_{salida}}$

Pero esta solución no se puede aplicar si no se cumple, para cada salida,

$$I_{C_{salida}} \ll \sum I_{C_{instalación}}$$

Si esto no es posible, hay que prever un generador de corriente homopolar.

Si no, las protecciones de las conexiones sanas y largas disparan intempestivamente (disparo por simpatía) porque se activan por la corriente capacitiva generada por todas estas conexiones.

Protección direccional de potencia activa

Este tipo de protección se utiliza, por ejemplo, para:

- desacoplar una red de un alternador que absorbe energía (marcha como motor) a continuación de un fallo de la fuente de energía mecánica,
- cortar la alimentación de un motor en el momento de producirse un hueco de tensión.

Además de la medida de corrientes y tensiones, este tipo de protección mide también el desfase para determinar la potencia:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Protección direccional de potencia reactiva

Este tipo de protección se utiliza, por ejemplo, para cortar la alimentación de una máquina síncrona durante un fallo de la excitación. En efecto, la

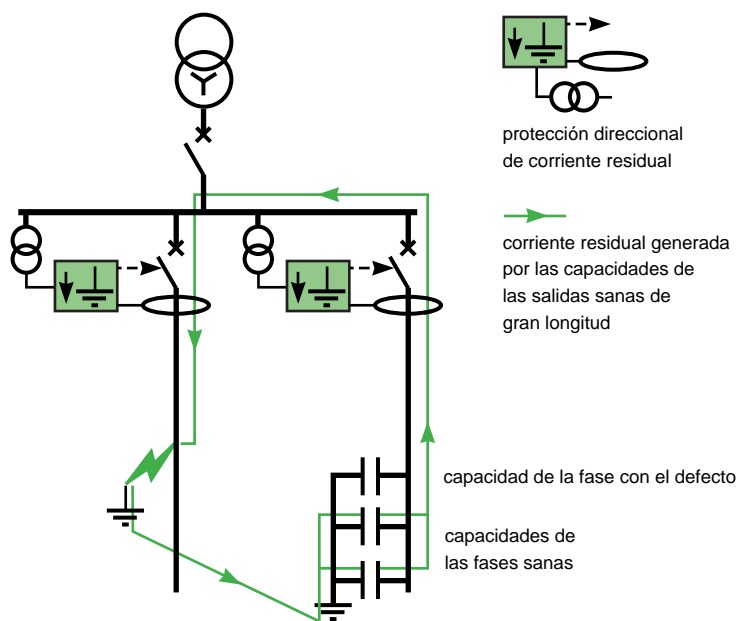


Fig. 15: El empleo de dispositivos de protección direccional de corriente de defecto a tierra, en una instalación que tenga salidas con gran longitud, permite distinguir la defectuosa de las sanas.

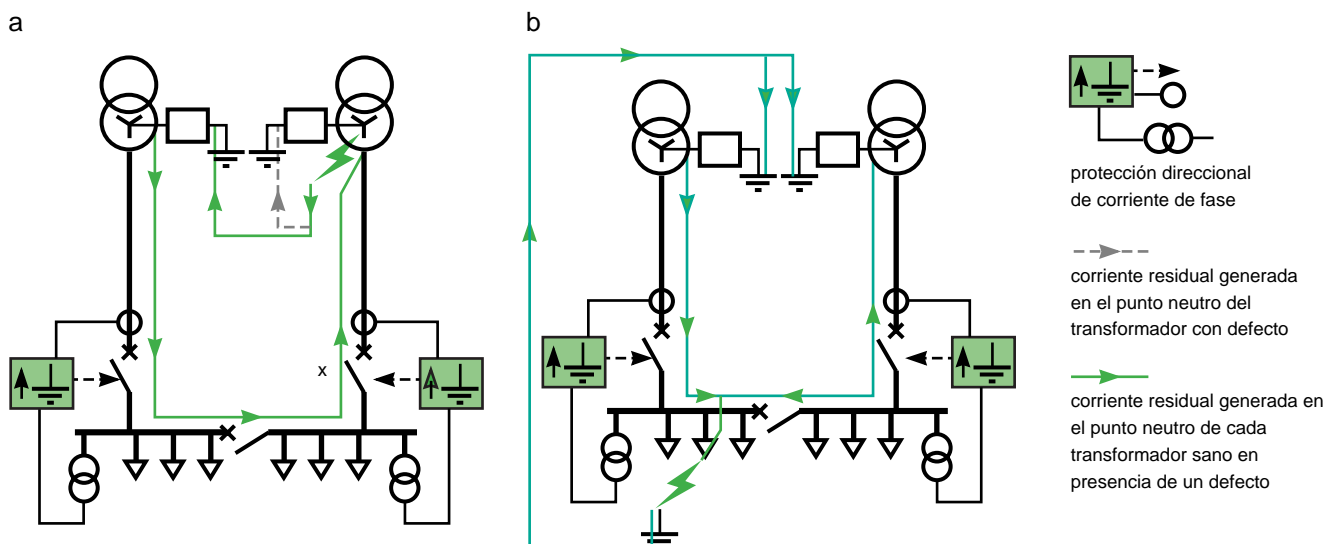


Fig. 14: Una protección direccional de corriente de defecto a tierra permite distinguir el transformador con el defecto (a), o ser insensible a un defecto en la salida (b).

Este mismo principio se aplica a los alternadores conectados a una misma red y que tengan los neutros conectados a tierra.

energía reactiva de magnetización en el caso de una excitación insuficiente será aportada por la red hacia la máquina. Además de la medida de corrientes y de tensiones, este tipo de protección mide también el desfase para determinar la potencia:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Protección de mínima impedancia

Este tipo de protección funciona a partir de las magnitudes medidas, que son la corriente, la tensión y el sentido de circulación de la energía. Con la ayuda de estas informaciones, el dispositivo de protección calcula la impedancia del equipo que controla; sus márgenes son ajustables (mínimo de impedancia Z -en ohm- o de admitancia $1/Z$ -en mho-).

Esta protección usa el principio de la bajada importante de impedancia de un elemento cuando está en cortocircuito. Se emplea sobre todo en línea de transporte de energía (redes malladas), pero también en los juegos de barras y de grandes máquinas giratorias. Se llama también «protección de zonas». Efectúa sus medidas en una u otra dirección de su lugar de conexión (figura 16). La extensión de su control depende del margen de variación de la medida y de la variación lineal de la impedancia del equipo protegido. Se pueden poner varios dispositivos sobre una misma red, y ser independientes los unos de los otros, porque la zona de control de cada uno está bien delimitada. Por esta misma razón, sus tiempos de actuación pueden reducirse muchísimo.

Observaciones:

- las variaciones bruscas de carga y los picos de corriente los «ven» estas protecciones como variaciones de impedancia.

Para evitar estos disparos intempestivos hay que escoger bien sus características de funcionamiento (circular, elíptica, poligonal...) (figura 16).

- la variación de impedancia es proporcional a la longitud

supervisada. Esta variación longitudinal es más rápida para las máquinas giratorias y los transformadores que para los cables y líneas aéreas. Por este motivo, una protección de mínima impedancia puede supervisar una pequeña zona limitada por una máquina o un transformador. Sin embargo, cuando un dispositivo de éstos está previsto para supervisar un juego de barras, su zona de control puede llegar a una parte de los bobinados de los transformadores que están conectados a este J de B. Esto que parece un inconveniente se convierte en una ventaja: las primeras espiras de un transformador, que son las más expuestas (sobretensiones, perforaciones...) están así mejor protegidas. Esta protección se utiliza especialmente en los centros de transformación AT.B/AT.B de las redes de transporte o de alimentación de las zonas industriales muy grandes.

Caso particular: protección a distancia

Se trata de una protección especial de impedancia que se aplica a las líneas de AT de las redes de transporte de energía, y, a veces, a ciertas redes de distribución.

La selectividad óptima

La experiencia demuestra que todos estos tipos de selectividad y protección tienen por objeto áreas de empleo preferentes, por ejemplo:

- selectividad amperimétrica = distribución en baja tensión,
- selectividad cronométrica y lógica = distribución en AT.A,
- protección a distancia = transporte AT.B.

Seleccionar uno u otro tipo se convierte, por tanto, con frecuencia, en una elección técnico-económica con una fuerte influencia de las prácticas habituales.

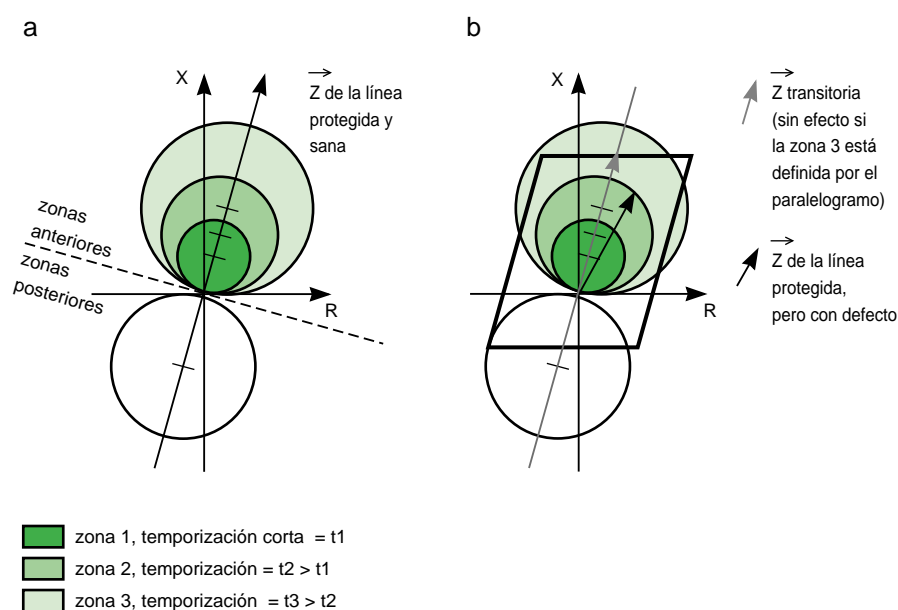
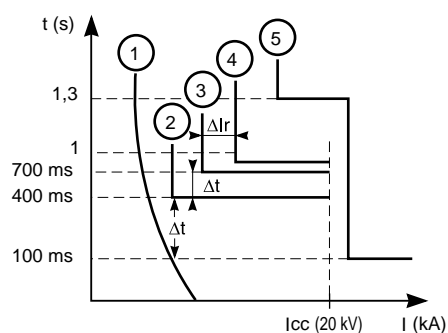
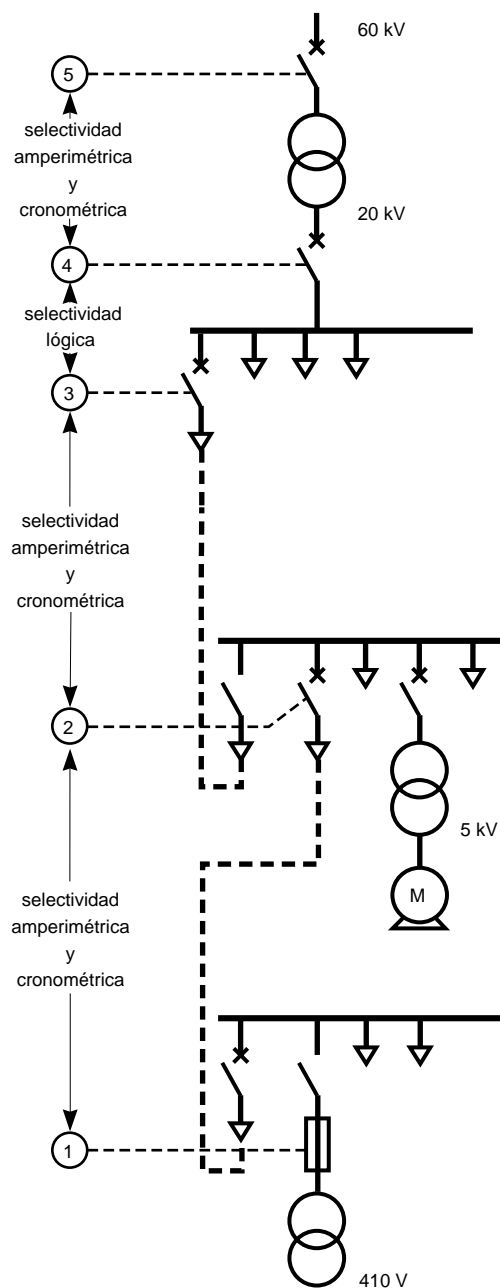


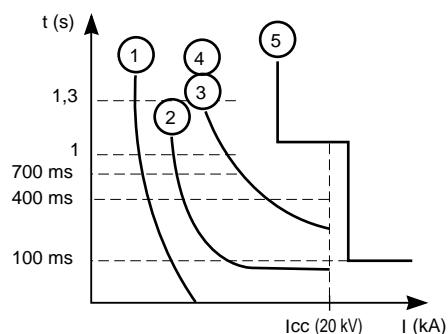
Fig. 16: Diagrama de funcionamiento de una protección de zonas (a).

El disparo se obtiene cuando el extremo del vector de impedancia de la línea protegida entra en una zona de funcionamiento del dispositivo (b), estando activada una temporización en alguna de estas zonas.

Para evitar los disparos intempestivos debidos a variaciones de carga (vector de impedancia transitorio), las zonas de funcionamiento pueden tener diversas formas, círculos o cuadriláteros: es el caso de la figura b cuando la zona 3 está definida por un paralelogramo en lugar de un círculo.



a - Diagrama de las curvas de selectividad cuando se usa sólo la selectividad cronométrica con los dispositivos de protección a tiempo constante. Recuerdese que entre las curvas 2, 3 y 5 hace falta que $\Delta t = 300$ ms y $\Delta r = 20\%$



b - Diagrama de las curvas cuando se usan diversos tipos de selectividad y dispositivos de protección

solución	a	b
ajuste de las protecciones		
1	fusible	fusible
2	400	80
3	700	300
4	700	300
5	100	100

c - comparación de tiempos de eliminación (ms) de cortocircuitos entre las dos soluciones **a** y **b** presentadas aquí arriba.

Fig. 17: La selectividad óptima, en este ejemplo, se obtiene usando diversas técnicas.

diagrama **a**: técnicas amperimétricas, cronométricas y lógicas,

diagrama **b**: técnicas cronométricas con curvas a tiempo extremadamente inverso (2), inverso (y lógico) (3) y (4), constante (5).

La evolución tecnológica y, sobre todo, la evolución digital, permiten la combinación de diversos principios de protección y de selectividad. Así es posible aplicar, a cada sección de la red, la mejor de las soluciones.

Síntesis de empleo de los diversos tipos de protección

Asociación de diversas selectividades

El esquema de la **figura 17** muestra que una selectividad óptima puede necesitar la instalación de varios de los tipos de protección hasta ahora presentados. Esta combinación consigue una eliminación del defecto mucho más rápida.

tipo	aplicaciones principales
amperimétrica	■ entre aguas arriba y abajo de un transformador
cronométrica	■ entre dos subestaciones
lógica	■ entre las entradas y salidas de un mismo cuadro ■ entre aguas arriba y abajo de un transformador ■ entre dos subestaciones cuando se puede instalar una conexión lógica
diferencial	■ en todo elemento en el que la seguridad debe de ser máxima (cables, máquinas, ...)
direccional	■ sobre conexiones, alternadores, transformadores que funcionen en paralelo ■ sobre salidas con gran corriente capacitiva ■ sobre redes que tengan varios puntos neutros ■ sobre redes con neutro compensado
de mínima impedancia	■ igual aplicación que la diferencial y cuando la zona es de una extensión o complejidad tales que hace prohibitiva la suma de las corrientes entrantes y salientes
a distancia	■ para las redes malladas (transporte de energía)

Fig. 18: Síntesis de empleo de los diversos tipos de protección selectiva tratados en este capítulo.

3 Empleo de las protecciones

El empleo y montaje de los diversos dispositivos de protección obliga a ciertas precauciones.

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer, pero también proponer las soluciones prácticas.

Es evidente que, ciertas configuraciones de red y la alimentación de las máquinas, puesto que tienen características particulares, necesitan estudios específicos que no pueden detallarse en este cuaderno.

Precauciones en la elección y empleo de las protecciones

La elección de un tipo de protección a continuación de un dispositivo se hace después de haber evaluado los riesgos que puede correr el elemento a proteger y las consecuencias que siguen a un eventual defecto.

En principio, para todos los elementos de una red, hay que prever, como mínimo, la protección contra los riesgos de:

- cortocircuito «fase-fase» (protección contra corriente máxima de fase),

- cortocircuito «fase-tierra» (protección contra máxima corriente residual).

Cuando las corrientes de defecto a «tierra» y de fase son del mismo orden de magnitud, una sola protección trifásica cubre los dos tipos de riesgos, aunque sin discriminarlas.

Protección contra máxima corriente de «fase»

Una protección así no puede ser correcta más que si su funcionamiento satisface las inequivalencias:

Umbral de «fase» < I_{cc} mínima

y

Umbral de «fase» > I máxima sin defecto (transitorio de activación o de enganche)

Para esto hace falta efectuar los siguientes controles:

- la condición «umbral de disparo inferior a la I_{cc} mínima» hay que verificarla para el caso de que se produzca el defecto bifásico:

- en una red alimentada por un único transformador, aunque esté normalmente alimentada por varios transformadores en paralelo,

- en una red alimentada por una fuente auxiliar,

- en el extremo de una conexión de una línea de gran longitud;

- la condición «umbral de disparo superior en valor y/o en temporización a las corrientes máximas sin defecto» se ha de verificar para:

- el arranque de motores,

- la conexión de transformadores,

- la conexión de baterías de condensadores.

- verificar el incidente de sobreintensidades consecutivas en baja tensión, cortes breves, conmutaciones de red...

Protección contra la máxima corriente de defecto a «tierra»

El umbral, que debe adaptarse al sistema de puesta a tierra, debe, también, cumplir las dos inequivalencias:

Umbral residual < $0,2 I_{o\text{limitada}}$

y

Umbral residual > $1,3 I_{o\text{capacitiva}}$ generada por tramo protegido.

De donde:

- un margen objetivo de 0,1 a 0,2 $I_{o\text{limitada}}$ de cara a proteger como mínimo el 80 % de la longitud de los arrollamientos de las bobinas.

- un margen superior a $1,3 I_{o\text{capacitivo}}$ de la conexión protegida para evitar los disparos intempestivos durante un defecto en una u otra sección de la red. En el caso de una instalación (o zona) de seguridad explotada con el neutro aislado de tierra, los ajustes

de los dispositivos de protección contra defectos a tierra se calculan a partir de los umbrales de las corrientes capacitivas de la red ($I_{o\text{ limitada}} = \sum I_{o\text{ capacitiva}}$).

Recuérdese: que para mejorar la continuidad del servicio, ciertas redes poco atendidas, se explotan con el neutro aislado de tierra. En Francia, la legislación obliga al uso de un control permanente del aislamiento -CPI- destinado a advertir de las bajadas de aislamiento y a evitar así un disparo por defecto a tierra.

Protección por imagen térmica y sondas de temperatura

La protección por imagen térmica no debe contemplarse más que si se pueden producir sobrecargas. Sus constantes de tiempo de calentamiento y de enfriamiento deben adaptarse a las características del equipo protegido.

Las sondas de temperatura colocadas dentro de los bobinados (normalmente del tipo PT 100, según la norma CEI 751) son indispensables cuando:

- el ambiente polvoriento es un handicap para la buena ventilación del equipo protegido,

- el funcionamiento de la máquina depende de una ventilación forzada independiente.

En estos dos casos, la falta de ventilación no provoca sobreintensidad, pero puede originar un calentamiento destructor.

Armónicos

Las cargas no lineales son origen de la polución en las redes eléctricas. Esta polución se caracteriza por una distorsión de la tensión, y por corrientes armónicas que son principalmente perjudiciales para la resistencia térmica de las máquinas rotativas y de los transformadores. Esta presencia de armónicos puede tratarse desde tres frentes:

■ sea con la instalación de filtros cuyas características y lugar de colocación se determinan por un estudio sobre los armónicos.

■ sea con protecciones que tengan en cuenta la corriente eficaz resultante de la suma cuadrática de los armónicos de orden impar (RMS: Root Mean Square).

■ sea, si las protecciones no tienen en cuenta la corriente eficaz, por haber rebajado los equipos para no hacerlos actuar hasta 0,8 ó 0,9 veces la potencia nominal. El margen de sus protecciones de sobrecarga queda rebajado otro tanto si no se tiene en cuenta la fundamental.

Precauciones relativas a los captadores

Número

El número de captadores necesarios para detectar los defectos polifásicos ha evolucionado con la tecnología: las protecciones electromagnéticas necesitan tres captadores para distinguir el conductor de fase defectuoso; con la tecnología digital bastan dos captadores (el valor de corriente del tercer captador se calcula). Pero atención, para un buen funcionamiento del plan de protección es indispensable que en toda la red los dos captadores estén

colocados en los dos mismos conductores de fase.

Repaso: hay tres maneras de marcar los conductores:

- por números = 1, 2 y 3,
- por letras = A, B y C, o R, S y T.

Transformadores de intensidad -TI-

Deben de estar pensados para conseguir un buen funcionamiento de la protección y no producir una señal deformada que sería vista por la protección como un defecto, provocando, por tanto, un disparo intempestivo.

Así :

■ su potencia debe de estar adaptada al dispositivo de protección y al cableado;

■ su calibre nominal debe de ser mayor o igual a la intensidad a controlar;

■ su linealidad debe de verificarse en el conjunto para la variación de corriente útil (una saturación por tales corrientes puede desequilibrar las señales de los secundarios);

■ su precisión debe de ser coherente con la de la medida (margen).

Decir también que el montaje de Nicholson (**figura 19**), para medir una corriente residual de bajo valor, obliga frecuentemente a un

emparejamiento de los TI. Además, el error absoluto en la medida impide usar pequeños márgenes de corriente residual. En cambio, los captadores sin hierro o amagnéticos, llamados de ROGOWSKI (ver Cuaderno Técnico n° 170), eliminan un gran número de estos importantes inconvenientes por el hecho de su linealidad y dinámica.

Toroides homopolares

La utilización de protecciones de «tierra» sensibles es particularmente útil para limitar los fallos en los

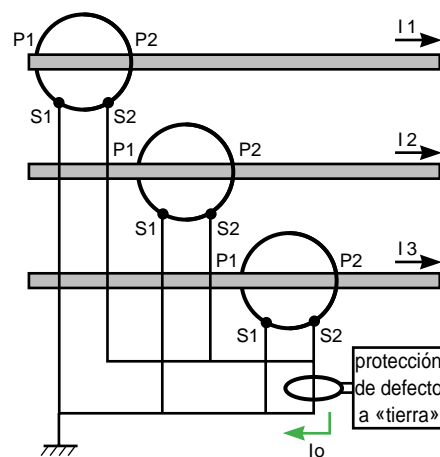
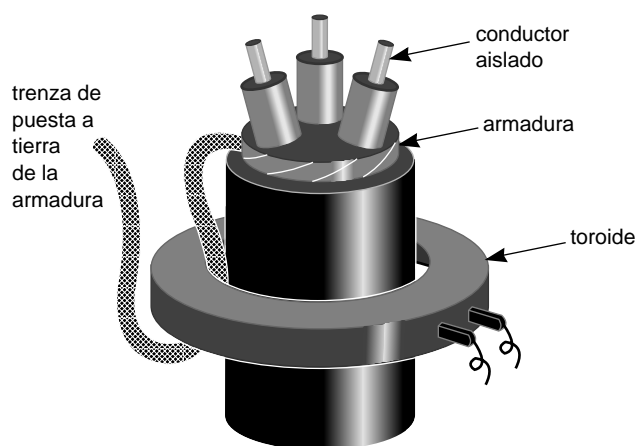


Fig. 19: El montaje de Nicholson.

con cables secos



con caja terminal de cables

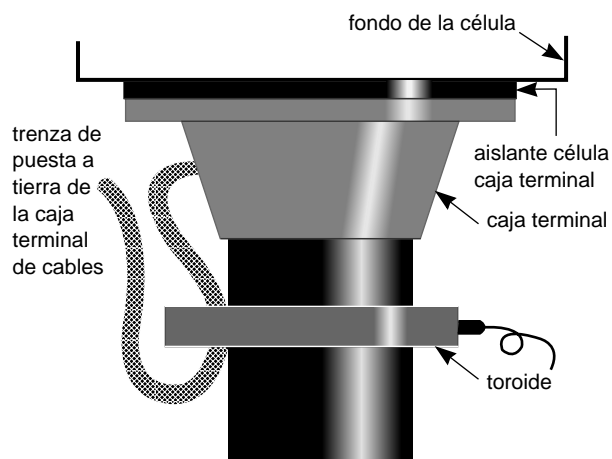


Fig. 20: Montajes de un toroide sobre un cable de alta tensión.

equipos porque permite impedancias de limitación más altas. La detección de corrientes residuales débiles se hace preferentemente con un captador toroidal que abarque las tres fases.

Téngase presente que la instalación de estos captadores requiere algunas precauciones:

- la trenza de la conexión a tierra de la armadura del cable debe de pasar por el exterior del toroide o volver a pasarse por el interior (**figura 20**);
- hay que comprobar el aislamiento entre conductores activos y el toroide; frecuentemente es la envoltura de los cables la que lo proporciona;
- para evitar un funcionamiento defectuoso, es conveniente agrupar y centrar los conductores en el toroide.

Transformadores de tensión

Para evitar el deterioro debido a la ferorresonancia (sobretensión), los transformadores de tensión -TU- deben de estar cargados con un valor próximo a su potencia nominal.

Precauciones relativas a la red

Red con varios puntos neutro puestos a tierra

Una red que tenga varios puntos «neutro» es un nido de corrientes armónicas de tercer grado y de sus múltiplos, que circularán entre estos puntos. Para evitar el tener que

desensibilizar las protecciones de defecto a tierra, es lógico escogerlas dotadas de filtros para el 3^{er} armónico.

Redes con alternadores y motores

Durante los períodos de funcionamiento con grupo, si una parte importante de la potencia es absorbida por motores, los dispositivos de protección deben de funcionar suficientemente deprisa como para evitar el hundimiento de la red (conservación de la estabilidad dinámica).

Sobretensiones

La distribución por cable genera, en el momento de defectos a tierra, una corriente capacitiva que puede crear otros disparos por simpatía, (**capítulo 2**, el § protección direccional), y sobretensiones por resonancia (**figura 21**).

Para minimizar estas sobretensiones, el mejor medio es que la conexión a tierra del neutro se haga por una resistencia. Esta solución se aplica normalmente en redes industriales.

La norma que generalmente hay que respetar es:

$$I_{0R} \geq 2 I_{0C}$$

siendo

I_{0R} = corriente residual debida a la conexión a tierra,

I_{0C} = corriente residual capacitiva inherente a la red.

Durante la evolución de una red

Desde el punto de vista de las protecciones, durante la modificación de una red, hay dos verificaciones útiles:

- el régimen de neutro y las protecciones existentes, ¿son compatibles con las nuevas corrientes capacitativas?
- las protecciones de las fases y los transformadores de corriente ya colocados ¿se adaptan bien a las nuevas corrientes nominales y a las de cortocircuito?

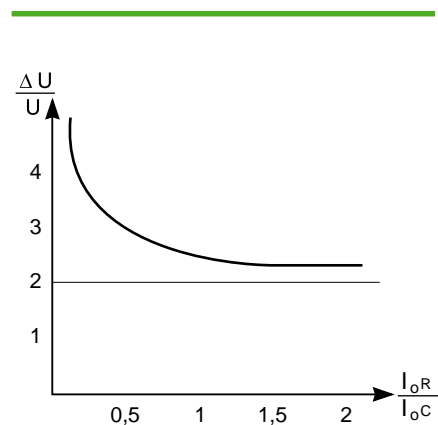


Fig. 21: Niveles de sobretensiones por resonancia que pueden generarse, en el momento de un defecto a tierra, por la corriente capacitiva de las distribuciones por cables.

4 Guía de elección

La tabla de la **figura 22** da una elección indicativa de protecciones en función del elemento a proteger. En efecto, la gran variedad de estructuras de distribución e

imperativos de utilización no permite afirmar que una solución sea de aplicación universal.

Recuérdese que, para cada elemento a proteger, es

necesario prever sistemáticamente una protección contra los cortocircuitos y los defectos a tierra (o de aislamiento).

elemento a proteger	instalación a la que se refiere	riesgo previsto	protección a prever	comentarios
líneas y cables	cables en antena, en paralelo o en bucle cerrado	cortocircuito	■ diferencial con hilo piloto	
	cables en paralelo o en bucle	cortocircuito y defecto a tierra	■ direccional de corriente de fase y residual	
	salidas con fuerte corriente capacitiva, puestas a tierra múltiples, cables en paralelo o en bucle	defecto a tierra	■ direccional de corriente residual	
juegos de barras	cuadros que representen un nudo importante de la distribución, cuadros con gran Pcc	cortocircuito	■ SSL ■ diferencial de barras	
			■ de mínima impedancia	protege también una parte de los transformadores
alternadores		sobrecarga	■ imagen térmica	
		interrupción de la ventilación forzada y/o presencia de polvo	■ sondas de temperatura	
	máquinas costosas o importantes para la explotación	defecto interno	■ de mínima impedancia o ■ diferencial de alternador	protecciones muy rápidas
			■ pérdida de excitación o ■ retorno de potencia reactiva	
			■ marcha como motor	si hay otra fuente en paralelo
			■ tensión máx. y mín. ■ frecuencia	si funciona en vacío
			■ desequilibrio y ruptura de fase	si hay cargas monofásicas > 10 % de las cargas

Fig. 22 (primera parte): Elección indicativa de protecciones en función del elemento a proteger.

elemento a proteger	instalación a la que se refiere	riesgo previsto	protección a prever	comentarios
condensadores	baterías de condensadores en paralelo (doble estrella)		■ desequilibrio de los puntos neutros	
transformador		sobrecarga	■ imagen térmica	
		interrupción de la ventilación forzada y/o presencia de polvo	■ control de temperatura	
		sobreintensidad en el secundario defecto interno	■ 1 ^{er} margen temporizado < I _{cc} primaria ■ 2 ^o margen instantáneo > I _{cc} secundaria	
	transformador importante	defecto interno	■ diferencial de transformador	
motor asíncrono		sobrecarga	■ imagen térmica	
		interrupción de la ventilación forzada y/o presencia de polvo	■ control de temperatura	
	máquina importante		■ diferencial de motor	
	mezcladora, ventilador	par anormalmente elevado o tensión	■ arranque demasiado largo	
			■ bloqueo del rotor motor en servicio	control de corriente después del arranque
		bloqueo del rotor del motor en el arranque	■ de mínima impedancia o de control de velocidad	
	bombas	calentamiento interno	■ control de arranques sucesivos ■ control de los intervalos de tiempo entre arranques sucesivos	según el proceso y después de la instalación de una máquina (ensayos)
		descebado	■ de corriente mínima o de potencia activa	
		desequilibrio de la tensión de alimentación o fallo de fase	■ componente inversa (ver Cuaderno Técnico nº 18)	
motor síncrono			mismas protecciones que para un motor asíncrono, añadiendo: ■ pérdida de sincronismo ■ control de la excitación	
		funcionamiento como generador después de un fallo	■ direccional de corriente o de potencia	desenganche rápido de la red de alimentación
		par motor débil	■ de tensión mínima directa	
		reaceleración al vuelo	■ de tensión mínima remanente	

Fig. 22 (segunda parte): Elección indicativa de protecciones en función del elemento a proteger.

5 Conclusión

Las técnicas de protección son numerosas y variadas y conviene conocerlas bien antes de hacer una elección.

La selectividad lógica, después de salir al mercado, ha evolucionado poco. Es normal, porque estas protecciones están siempre destinadas a reducir las consecuencias de los mismos fallos de origen eléctrico o mecánico.

En cambio, sus tecnologías han evolucionado:

- relé electromecánico monofuncional,
- relé electrónico analógico monofuncional,
- conjunto electrónico analógico (rack) con varias funciones.

El Vigirack, creado en 1970 por Merlin Gerin es un ejemplo. Este tipo «de unidad de protección» no necesita más que un poco de energía para los captadores, disponiendo de un relé de alarma y de disparo precableado de fábrica.

- unidad digital multifunción, que usa microprocesadores.

El Sepam, otro dispositivo de fabricación Merlin Gerin es un ejemplo.

La multifuncionalidad agrupa:

- las funciones de protección,
- la medida y los contadores,
- los automatismos locales,
- el autodiagnóstico,
- la visualización y tratamiento de alarmas,
- la comunicación.

Estas unidades «inteligentes» pueden, por simple modificación de sus parámetros, realizables por un electricista, asumir varias de estas funciones.

Este tipo de material reduce al mínimo en número de captadores, pues solamente necesita los TI de protección, para efectuar:

- las medidas,
- las lecturas,
- y las protecciones.

El diseñador gana en flexibilidad en la elaboración del plan de protección y el estudio de la selectividad.

En cuanto a los captadores sin hierro, mejoran la sensibilidad y la estabilidad de las protecciones y sus variantes permiten conciliar las funciones de medida y protección: de hecho su empleo reduce el tiempo de estudio.

Los componentes actuales permiten igualmente rebajar el coste de protecciones muy completas y con prestaciones equivalentes a la «direccionalidad». Así, por tanto, ya no son más:

- ni reservadas solamente para máquinas potentes, de tensiones elevadas, de procesos industriales sensibles...

- ni aisladas, especiales, olvidadas sino integradas en un sistema multifuncional que proporcionan al que las usa y las maneja todos los datos que se refieren al elemento que controlan.

La comunicación con los sistemas de gestión de red permite en todo instante:

- conocer los datos eléctricos,
- conocer los defectos y sucesos en su orden cronológico,
- conocer la posición de los interruptores automáticos y de otros órganos de maniobra,
- saber si todo funciona bien (perro guardián),
- efectuar las maniobras de explotación,
- analizar las numerosas medidas necesarias para una explotación más eficaz,
- conducir del mejor modo posible la red gracias a un cuadro de mandos completo y amigable.

Las consecuencias directas de esta evolución son una mejora de la seguridad y de la disponibilidad de la energía, así como una mayor eficacia y facilidad de mantenimiento.

6 Informaciones prácticas

La lista de los datos citados permite realizar un estudio de la selectividad con suficiente precisión.

Cuando algunos de estos datos no se conocen (antes del proyecto, por ejemplo) «el experto» los definirá en sus hipótesis. Su experiencia le permitirá escoger los valores prácticos tales que:

- Icc para un valor de la tensión de alimentación,
- Ucc según los tipos de transformadores,
- tiempo de arranque de los motores en función de su utilización.

Datos necesarios para realizar un estudio de selectividad

Redes

- esquema unifilar,
- configuraciones posibles de la explotación,
- tensiones,
- frecuencia,
- potencia de cortocircuito de la red aguas arriba (valores máximo y mínimo),
- esquemas de las conexiones a tierra (régimen de neutro),
- conexiones (longitud y tipo de cables, número de cables en paralelo),
- calibre de los transformadores de corriente (TI) existentes,
- calibre de los fusibles existentes,
- ajustes de las protecciones existentes (aguas arriba y abajo).

Transformador

- potencia nominal,
- tensión de cortocircuito (% Ucc),
- pérdidas en el cobre,
- tipo de conexionado,
- tomas variables (valores máximo y mínimo).

Alternador

- tipo de alternador (turboalternador o máquina de polos salientes),
- potencia nominal,
- tensión nominal,
- factor de potencia nominal,
- reactancias subtransitorias (en el eje directo y en cuadratura),
- corriente de cortocircuito permanente (valores máximo y mínimo),

o

- tensión de excitación / valor nominal,
- reactancia síncrona saturada.

Motor

- tipo (síncrono o asíncrono),
- potencia nominal,
- tensión nominal,
- corriente de arranque,
- tiempo de arranque,
- riesgo o no de bloqueo del rotor (si es que sí, el tiempo que resiste el rotor bloqueado),
- número de arranques y duración permitida de los intervalos (con frío y con calor),
- constante de tiempo térmica del estator.

Diagrama de selectividad

Presentación de un diagrama

Un diagrama de selectividad corriente-tiempo se representa preferentemente en coordenadas doble logarítmica porque estas variables pueden cambiar en grandes proporciones:

- las corrientes, desde algunos amperios hasta varios kiloamperios,
- las temporizaciones, desde algunas décimas de milisegundos (para disparos instantáneos) a centenas de segundos (para el funcionamiento de las protecciones de sobregarga -imagen térmica-).

Para que las curvas representadas sean comparables, hay que definir una tensión de referencia, preferentemente la que se usa más en la instalación. Así, gran parte de las comparaciones y estudios se hacen sobre curvas con «lectura directa»; la observación de las curvas que se refieren a otras tensiones se hace entonces según la razón inversa de las tensiones.

Por ejemplo, en un diagrama donde la tensión de referencia es AT.A, y por tanto

- las corrientes en AT.A se hacen en «lectura directa»,

- las corrientes en BT

$$= \text{valor BT} \times \frac{\text{tensión BT}}{\text{tensión AT-A}}$$

- las corrientes en AT-B

$$= \text{valor AT-B} \times \frac{\text{tensión AT-B}}{\text{tensión AT-A}}$$

- las corrientes de defecto a tierra y las corrientes de fase dependen de sistemas diferentes y se representan, por tanto, sobre diagramas diferentes.

- para mejorar la legibilidad de los diagramas, se representa sólo la parte útil de las curvas: desde la corriente mínima de servicio hasta la corriente de cortocircuito máxima de la zona considerada.

Principios de selectividad

- al menos dos curvas deben de referirse a cada nivel de la corriente de defecto.
- la selectividad es total entre dos protecciones cuando sus diferentes curvas no se cruzan, excepto si se utiliza la selectividad lógica (figura 11).

Lectura de un diagrama

Un diagrama de este tipo (**figura 23**) agrupa numerosas informaciones.

- en el eje de corrientes
- las corrientes nominales,
- las corrientes de cortocircuito,
- los márgenes de las protecciones.

a = margen bajo de ①

a' = margen alto de ①

b = margen de ②

c = margen de ③

d = margen bajo de ④

d' = margen alto de ④

■ en el eje de tiempo

m = temporización de margen alto

de ① y de ④

n = temporización de margen

de ② y de margen bajo de ①

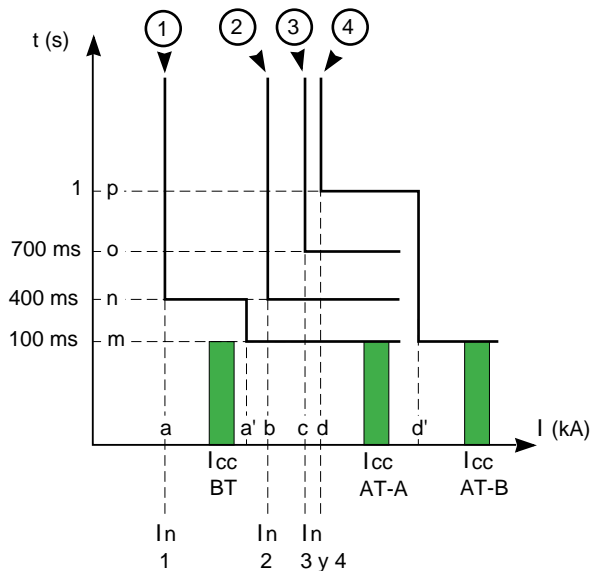
o = temporización de ③

p = temporización de margen

bajo de ④

Los valores de los márgenes y de las temporizaciones están reunidos en la placa de ajustes utilizada en la instalación.

a



b

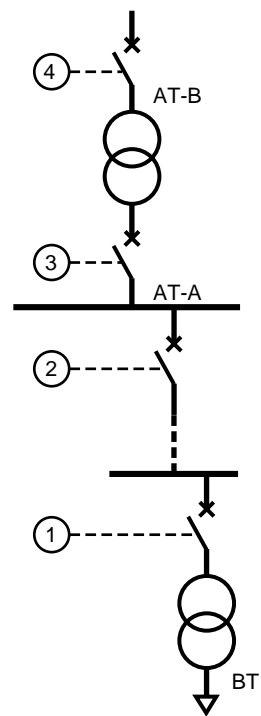


Fig. 23: Ejemplo de diagrama de selectividad (a) de las protecciones del esquema unifilar (b). Recuérdese que para ser comparables las I_{cc} se expresan para un mismo valor de tensión, aquí AT.A.

7 Bibliografía

Normas

- ANSI C 37-2: Numeración de las protecciones.
- CEI 117-3: Simbología de las protecciones.
- CEI 255-3: Relés de medida de tiempo independiente.
- CEI 255-4: Relés de medida de tiempo dependiente.
- CEI 812: Técnicas de Análisis de las formas de los fallos, sus efectos y su criticidad (AMDE).
- NF C 13-100: Centros de distribución ubicados en el interior de edificios y alimentados por una red de distribución pública de segunda categoría.
- NF C 13-200: Instalaciones eléctricas de alta tensión: Reglas.

Cuadernos Técnicos Merlin Gerin

- Protección de redes por el sistema de selectividad lógica.
CT n° 2 - F. SAUTRIAU.
- Análisis de redes trifásicas en régimen perturbado con la ayuda de las componentes simétricas.
CT n° 18 - B. DE METZ NOBLAT.
Puesta a tierra del neutro en una red industrial.
CT n° 62 - F. SAUTRIAU.
- Cálculo de corrientes de cortocircuito.
CT n° 158 - R. CALVAS, B. DE METZ NOBLAT, A. DUCLUZAUX y G. THOMASSET.
- El transformador de corriente para la protección en AT.
CT n° 164 - M. ORLHAC.
- El diseño de redes industriales en AT.
CT n° 169 - G. THOMASSET.
- Los transformadores de corriente con captadores híbridos.
CT n° 170 - C. TEYSSANDIER.

Publicaciones diversas

- Guía de la protección de MT.
Merlin Gerin, referencia CG0021X.
- Elección del régimen de neutro de una red industrial de AT de 1 a 36 kV.
J. VERSCHOORE,
Revue RGE n°11, Noviembre 1980.