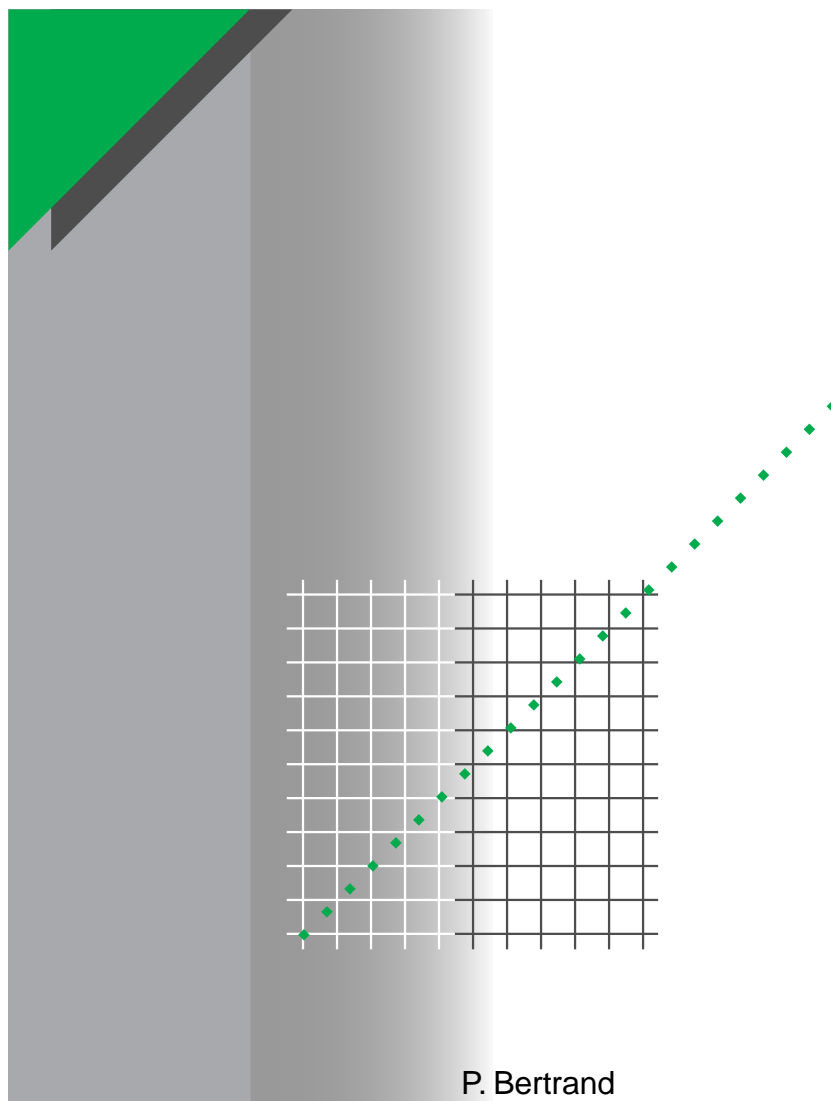


# Cuaderno Técnico nº 181

## Las protecciones direccionales



P. Bertrand

**Merlin Gerin**

**Modicon**

**Square D**

**Telemecanique**



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](mailto:formacion@schneiderelectric.es)

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la "Biblioteca Técnica" de **Schneider Electric España S.A.**

#### **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 181 de Schneider Electric».



**Pierre BERTRAND**

Ingeniero INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble) en 1979.

Entra en Merlin Gerin en 1983 y hasta 1986 lleva a cabo diversos estudios sobre el funcionamiento y las perturbaciones de la red eléctrica.

Después pasa a Protección y Mando-Control, donde realiza diversas funciones técnicas y de marketing.

Actualmente es responsable del grupo de expertos electrotécnicos en el servicio técnico de esta actividad.

# cuaderno técnico nº 181

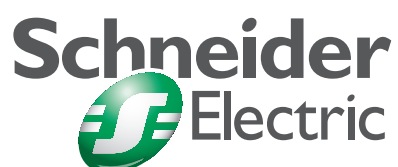
## las protecciones direccionales

Por: Pierre Bertrand

Trad.: Dr. M. Cortes

Edición francesa: julio 96

Versión española: enero 2000



## terminología

---

**ángulo de bifurcación (de una protección direccional de fase):** ángulo entre la magnitud de polarización elegido y la tensión fase-tierra de la fase vigilada (**figura 14**) califica la magnitud de polarización.

**ángulo característico (de una protección direccional):** ángulo entre la magnitud de polarización y la normal al semi-plano de disparo (**figura 10**).

**AT-A (media tensión):** 1 a 50 kV, según la legislación francesa.

**código ANSI:** codificación numérica de una función de protección, definida por la norma ANSI C37-2.

**homopolar (corriente o tensión en una red trifásica):** 1/3 de la magnitud residual.

**magnitud de polarización (de una protección direccional):** magnitud utilizada como referencia de fase.

**plan de protección:** conjunto de las protecciones puestas en servicio sobre una red eléctrica para asegurar la detección de defectos y la puesta sin tensión de la más pequeña porción de la red en defecto.

**protección diferencial:** protección de zona que detecta un defecto por la medida y comparación de las corrientes a la entrada y a la salida de la zona o de un equipamiento protegido.

**protección direccional:** protección que permite detectar un defecto hacia arriba o hacia abajo (en una dirección dada) de su emplazamiento.

**protección de fase:** protección que controla las magnitudes de fase (corriente y/o tensión).

**protección de tierra:** protección que controla las magnitudes residuales (corriente y/o tensión) para detectar un defecto a tierra.

**p.u.:** valor de pico de la tensión simple.

**relé (de protección):** aparato que controla una de las magnitudes eléctricas (corriente y/o tensión), en general para detectar un defecto y ordenar la apertura de un interruptor automático.

**residual:** (corriente o tensión, en una red trifásica): suma vectorial de las magnitudes de las tres fases.

**tensión compuesta (notación):**  $V_{32} = V_2 - V_3$ .

# Las protecciones direccionales

## Índice

<b>1 Introducción</b>	misión de las protecciones direccionales	p. 6
	aplicaciones	p. 6
	códigos y símbolos de los diversos tipos de relés	p. 7
<b>2 Descripción de los relés direccionales</b>	protección direccional de tierra	p. 8
	protecciones direccionales de fase	p. 11
	protección de potencia	p. 12
<b>3 Aplicaciones de las protecciones direccionales</b>	protección de redes radiales	p. 13
	protección de redes en bucle	p. 17
	protección de alternadores	p. 18
<b>4 Instalación</b>	elección de los reductores de medida	p. 21
	elección de una protección bi o trifásica	p. 22
	protección de transformadores en paralelo	p. 22
<b>5 Evolución y perspectivas</b>	evolución de la tecnología de las protecciones	p. 23
	evolución de los sensores	p. 23
	a modo de conclusión	p. 23

Este Cuaderno Técnico tiene el objeto de explicar las protecciones más útiles de redes y máquinas de AT: las «direccionales».

Usadas junto a la selectividad lógica han conseguido, con su actual desarrollo digital, un gran avance en cuanto a fiabilidad y simplicidad de instalación, además de una reducción de su coste.

Contribuyen de forma importante a la elección de arquitecturas de la red y de los sistemas de selectividad que mejoran la disponibilidad de la energía eléctrica.

Después de una somera explicación del principio de funcionamiento, el autor presenta sus numerosas aplicaciones y da algunas informaciones útiles sobre su instalación.

# 1 Introducción

## misión de las protecciones direccionales

El objetivo fundamental de las protecciones de una red eléctrica es detectar un defecto eléctrico y desconectar la sección de la red en la que tiene lugar el defecto, de forma que esta sección sea la menor posible.

La protección direccional permite discriminar la parte de la red con un defecto mucho mejor que lo hace una protección contra sobrecorrientes.

Esta protección diferencial es necesaria en caso de defecto:

- si hay varias fuentes,
- si hay bucles cerrados o cables en paralelo,
- con neutro aislado para el retorno de corrientes capacitivas,
- y para detectar el sentido anormal de circulación de la energía eléctrica activa o reactiva (máquinas giratorias).

Así, en el caso de una red con dos fuentes, como la de la **figura 1**, las protecciones contra sobrecorrientes actuarían.

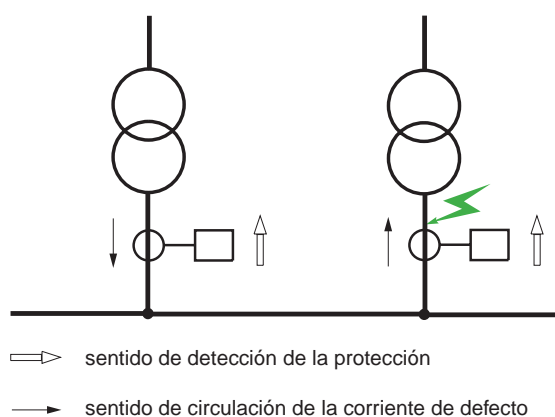


fig. 1: figura que simboliza el objetivo de las protecciones direccionales.

Las protecciones direccionales de corriente solamente se pueden disparar cuando se produce el defecto.

Es la medida del sentido del flujo de la corriente, es decir, de la medida del desfase entre la corriente y la tensión, la que permite detectar la dirección en la que se encuentra el defecto.

Las protecciones de máxima potencia miden o la potencia activa o la potencia reactiva que pasa por el punto en donde están colocados los sensores de corriente.

La protección comprueba si la potencia es superior a un umbral o si circula en el sentido normal.

Puede igualmente usarse para detectar un sentido anormal de circulación de la energía.

Las protecciones direccionales de potencia y de corriente necesitan medir la corriente y la tensión.

## aplicaciones

Las protecciones direccionales son útiles en cualquier punto de la red donde el sentido de circulación de la energía es susceptible de cambiar, especialmente después de un cortocircuito entre fases y/o un defecto a tierra (defecto monofásico).

■ la protección direccional de «fase» se instala para proteger dos enlaces usados en paralelo, un bucle o una sección de red que enlaza dos fuentes de energía (**figura 2**).

■ la protección direccional de «tierra» es sensible al sentido de circulación de la corriente a tierra. Desde el momento que la corriente de defecto fase-tierra se reparte entre varios sistemas de puesta a tierra, es necesario instalar protecciones direccionales de tierra.

Ahora bien, esta corriente circula no sólo por la (o las) puesta a tierra del neutro de la red, sino también por las capacidades fase-tierra de las líneas y de los cables (1 km de cable a 20 kV provoca la circulación de una corriente capacitiva del orden de 3 a 4 amperios).

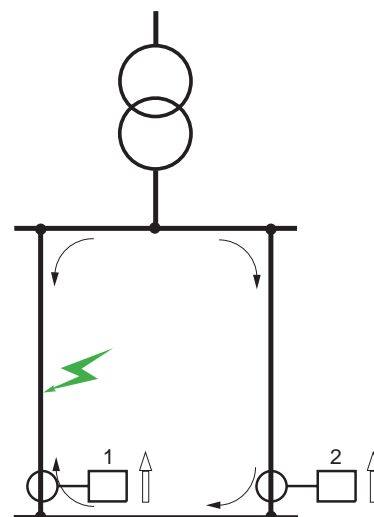


fig. 2: la protección direccional (1) dispara porque el sentido de circulación de la corriente es anormal.

La protección contra máxima corriente residual direccional, así como la protección vatimétrica homopolar se utilizan normalmente para proteger las salidas que tienen una corriente capacitiva del mismo orden de magnitud que la corriente de defecto a tierra. Sobre estas salidas, las capacidades fase-tierra tienen un valor suficientemente importante como para que por ellas circule una corriente homopolar, que la protección detectará, cuando se produzca en la red un cortocircuito fase-tierra y donde quiera que esté situada (figura 3).

Las protecciones direccionales son pues un medio complementario de las protecciones de máxima intensidad, permitiendo, en las situaciones antes citadas, asegurar una buena discriminación de la sección de la red con defecto.

Las protecciones de potencia activa o reactiva se utilizan para detectar un funcionamiento anormal de la red, distinto de un cortocircuito; por ejemplo, la absorción de energía activa o reactiva por parte de un alternador habitualmente encargado de producirla.

**códigos y símbolos de los diversos tipos de relés**

Para cada uno de los códigos ANSI, la tabla de la figura 4 agrupa, en uno o varios tipos de protección, precisando para cada uno de ellos, los nombres usuales y los campos de empleo.

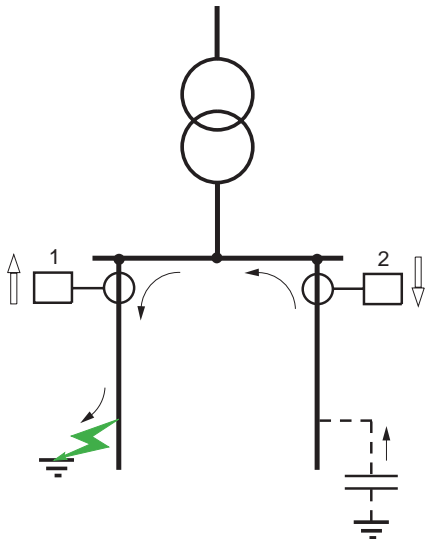


fig. 3: la protección direccional de corriente residual (2) no dispara, porque el sentido de la corriente es inverso.

símbolo gráfico	código ANSI (C37-2)	nombres usuales	campo de utilización
	67	<ul style="list-style-type: none"> <li>máxima corriente residual</li> <li>direccional de fase</li> </ul>	detección direccional de cortocircuitos entre fases
	67 N	<ul style="list-style-type: none"> <li>máxima corriente residual direccional</li> <li>direccional de tierra</li> <li>vatímetro homopolar</li> </ul>	detección direccional de defectos fase-tierra
	32 P	<ul style="list-style-type: none"> <li>máxima potencia activa</li> <li>retorno de potencia activa</li> </ul>	protección de generadores y de motores síncronos o detección de una circulación anormal de potencia
	32 Q	<ul style="list-style-type: none"> <li>máxima potencia reactiva</li> <li>retorno de potencia reactiva</li> </ul>	
	32 P	<ul style="list-style-type: none"> <li>mínima potencia activa</li> </ul>	
	32 Q	<ul style="list-style-type: none"> <li>mínima potencia reactiva</li> </ul>	

fig. 4: código ANSI, símbolos y aplicaciones.

## 2 Descripción de los relés direccionales

Para medir una potencia o para localizar un defecto aguas arriba o aguas abajo del punto donde se mide la corriente, hay que determinar el defasaje de esta corriente con una magnitud de referencia: tensión entre fases, para la dirección de la corriente de fase, o tensión residual, para la dirección de la corriente a tierra.

Esta magnitud de referencia se denomina magnitud de polarización.

### protección direccional de tierra

#### Magnitudes de entrada

Esta protección mide la corriente residual y utiliza generalmente como magnitud de polarización la tensión residual, que no conviene confundir con la tensión homopolar. Recordemos que en todo sistema trifásico,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , la teoría de las componentes simétricas define la magnitud homopolar  $F_h$  por:

$$\bar{F}_h = \frac{1}{3}(\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3).$$

La magnitud **residual**  $F_r = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3$  es tres veces mayor que la magnitud homopolar.

■ la corriente residual se mide o con tres transformadores de intensidad (TI), uno por fase, o mediante un solo toroide que abarque las tres fases:

□ la utilización de tres TI (**figura 5**) tiene sus ventajas:

- los TI se encuentran fácilmente en el mercado,
- es posible medir con ellos corrientes importantes,

□ pero hay ciertos inconvenientes:

- la saturación de los TI en el momento del cortocircuito o en la conexión de un transformador provoca una falsa corriente residual,
- en la práctica, el umbral no puede regularse a un valor inferior al 10 % de la  $I_n$  del TI,

□ la medida realizada por un toroide que abarque las tres fases (**figura 6**):

- tiene la ventaja de tener una gran sensibilidad,

– pero un inconveniente: el toroide (aislado de la baja tensión) no tiene asegurado su aislamiento por instalarse alrededor de un cable no blindado,

■ la tensión residual se mide con tres transformadores de tensión (TT); normalmente, se usan TT con dos secundarios (**figura 7**): el primero, conectado en estrella, permite la medida de las tensiones simples y compuestas; el segundo, conectado en triángulo abierto, permite medir la tensión residual.

Si los TT principales sólo tienen un secundario y además están

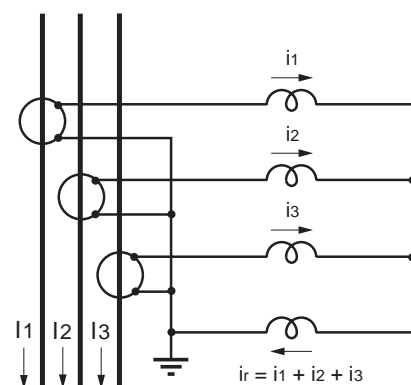


fig. 5: medida de la corriente residual mediante 3 TI.

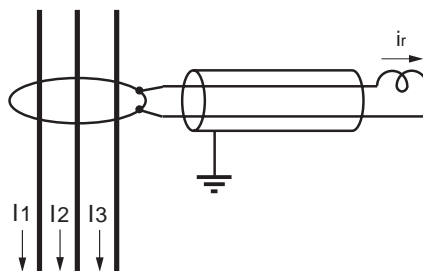


fig. 6: medida de la corriente residual con un único toroide.

conectados en estrella, se puede utilizar un juego de TT auxiliares para medir la tensión residual (**figura 8**). Un caso como el de la figura se encuentra normalmente cuando se ha procedido a un plan de mejora de la protección de instalaciones ya existentes.

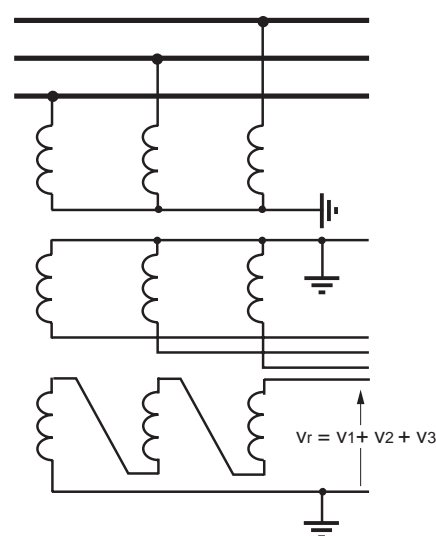


fig. 7: medida de la tensión residual mediante TT con dos arrollamientos secundarios.

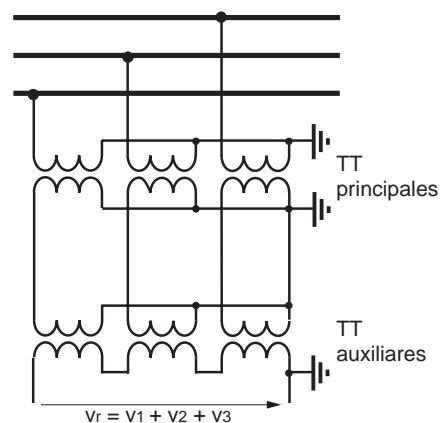


fig. 8: medida de la tensión residual con TT auxiliares.



Hay que indicar que ciertas protecciones no necesitan TT auxiliares y calculan por sí mismas la tensión residual a partir de tres tensiones simples.

■ la magnitud de polarización de un relé direccional de tierra es, en la mayor parte de los casos, la tensión residual; pero puede también usarse la corriente en la puesta a tierra del neutro de la instalación (figura 9).

En teoría, estas dos formas de polarizar la protección son equivalentes. Si  $Z_h$  es la impedancia homopolar del transformador y  $Z_n$  la impedancia del punto neutro, la tensión residual  $V_r$  y la corriente del punto neutro  $I_n$  están relacionadas por la razón de proporcionalidad siguiente (escrita en números complejos):

$$V_r = (Z_h + 3Z_n) I_n.$$

En la práctica, la polarización por la corriente del punto neutro está reservada a las redes que tienen una corriente de defecto a tierra importante (varios centenares de amperios) y muy superior a la corriente debida a las capacidades parásitas de la red.

Entonces, la medida de la corriente es más precisa que la medida de la tensión residual, cuyo valor es bajo. Sólo puede instalarse en centros de transformación y cerca de la puesta a tierra del neutro.

### Ángulo característico

Para determinar la dirección del defecto, la protección mide el defasaje entre la corriente y la magnitud de polarización. Si la magnitud de polarización no está en el eje de simetría de acción del relé (eje característico —figura 10), es necesario volver a poner en fase el relé; esto se hace con el reglaje del ángulo característico.

Después del estudio del plan de protección, el ángulo característico de las protecciones direccionales debe de determinarse de forma que todo defecto en la dirección de detección escogida provoque una corriente situada en la zona de disparo y que todo defecto en la otra dirección provoque una corriente situada fuera de esta zona.

El ángulo característico depende de la magnitud de polarización escogida y

del régimen de neutro de la red (para los relés direccionales de corriente residual). Normalmente, el ángulo característico es, por tanto, regulable. Los principales casos de aplicación y los reglajes correspondientes se verán en el capítulo 3.

Para poder hacer la medida del defasaje entre la corriente y la

magnitud de polarización, es indispensable que esta última tenga una amplitud suficiente (en general  $\geq 0,5$  al 2 % del valor nominal de la magnitud). Si la magnitud de polarización es inferior a este margen, la protección no funciona, cualquiera que sea el valor de la corriente medida.

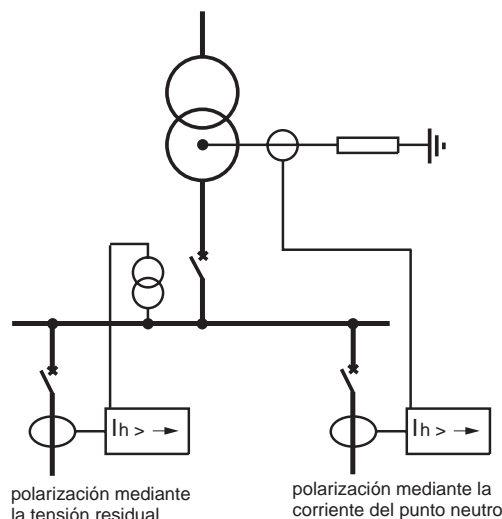


fig. 9: los dos tipos de polarización de una protección direccional de tierra.

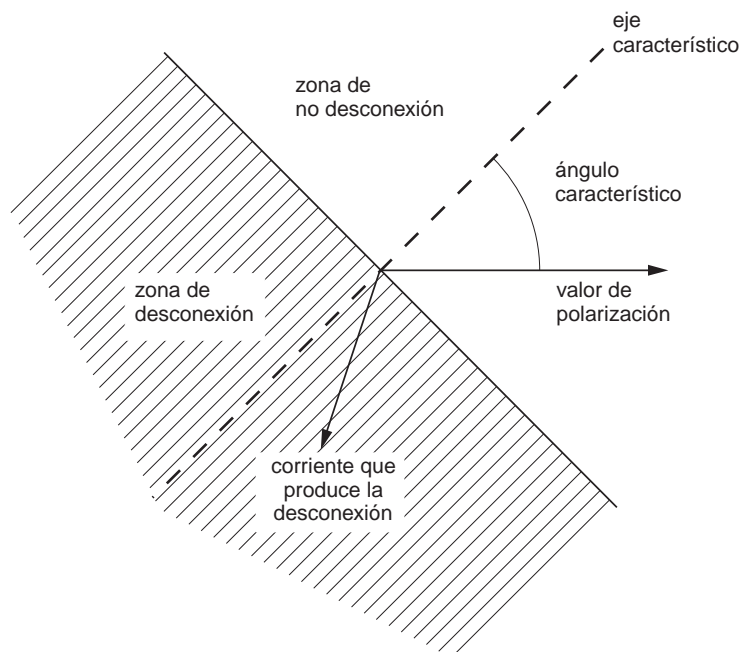


fig. 10: ángulo característico de una protección.

## Principios de detección

Coexisten tres principios de detección que corresponden a necesidades diferentes y, a veces también, a costumbres diferentes:

- funcionamiento con corriente máxima direccional;
- medida de la proyección de corriente;
- medida de la potencia activa residual.

Las dos primeras corresponden a protecciones direccionales de corriente de «fase» o de «tierra»; la tercera a un régimen de neutro particular.

- funcionamiento con relé de máxima corriente direccional (**figura 11**).

Este tipo de relé direccional está constituido por la asociación de una protección contra corriente máxima con un elemento de medida del desfase entre la corriente y la magnitud de polarización.

El disparo depende de las dos condiciones siguientes:

- que la corriente sea superior al umbral, y
- que el desfase entre la corriente y la magnitud de polarización centrado mediante el ángulo característico, esté comprendido en la zona:  $+90^\circ$ ;  $-90^\circ$ .

- medida de la proyección de la corriente (**figura 12**).

Estas protecciones calculan la proyección de la corriente sobre la recta característica. A continuación, el valor obtenido se compara con la referencia para decidir el disparo.

- medida de la potencia activa residual.

Estas protecciones miden efectivamente una potencia activa residual y su umbral se expresa en Vatios. Hay que diseñarlas para evitar un funcionamiento intempestivo debido a las imprecisiones de medida en caso de gran corriente residual capacitiva (gran potencia residual reactiva); la zona de funcionamiento es reducida, como lo muestra la **figura 13**.

Para detectar los defectos a tierra, el principio más universal es la medida de la proyección de corriente.

La utilización de los relés de corriente máxima direccionales no es igualmente adecuada para todos los

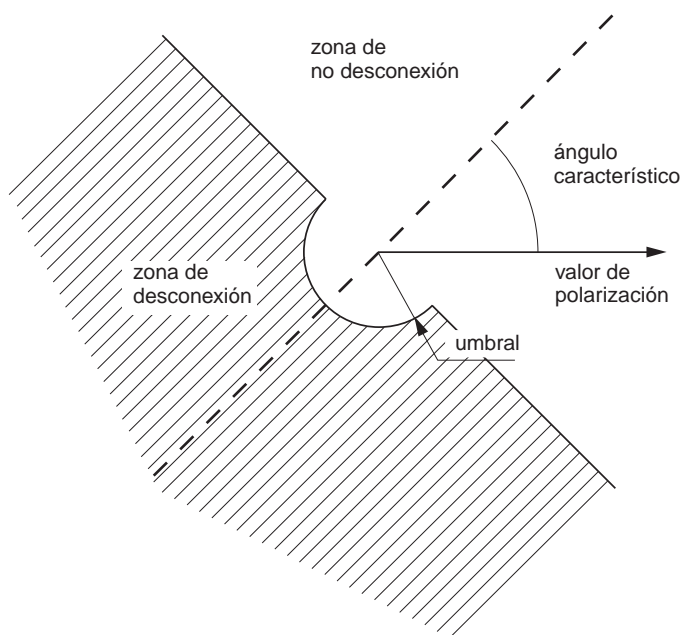


fig. 11: característica de funcionamiento de una protección de máxima corriente direccionalizada.

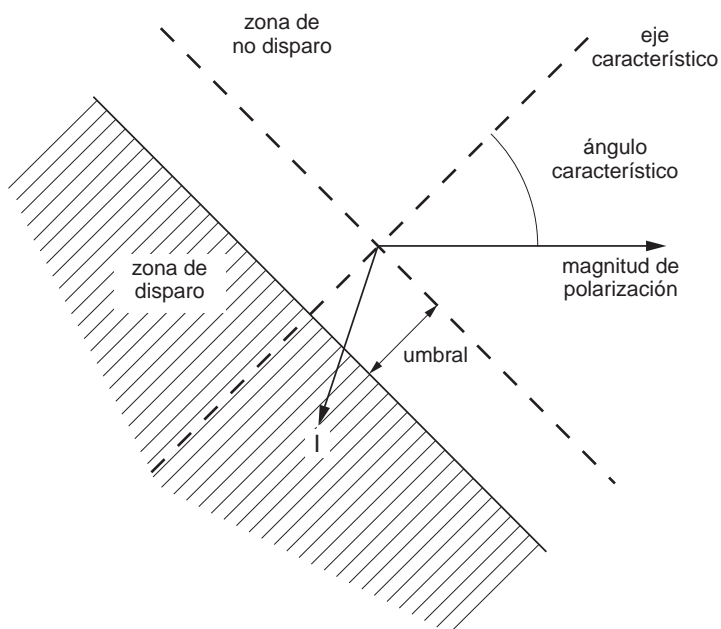


fig. 12: característica de funcionamiento de una protección que mida la proyección de corriente.

regímenes de neutro (el capítulo 3 muestra que este principio no puede utilizarse con neutro compensado).

El uso de la protección midiendo la potencia activa residual está limitado a las redes con neutro compensado, en competencia con los relés de proyección de la corriente.

## protecciones direccionales de fase

### Ángulo de derivación, ángulo característico

■ normalmente, estas protecciones son bifásicas y compuestas por dos elementos monofásicos independientes. A veces se necesita una protección trifásica (ver § 4). Para cada fase vigilada, el relé mide la corriente en la fase y utiliza como magnitud de polarización una tensión compuesta. La tensión simple no se utiliza, puesto que varía mucho si el defecto es a tierra, por efecto del desplazamiento del punto neutro (tensión residual),

■ cuando el relé mide la corriente en la fase 1, la tensión de polarización que más se usa es  $V_2-V_3$ . Se dice entonces que el ángulo de derivación de la protección es de  $90^\circ$  (figura 14),

■ el ángulo característico de una protección direccional de fase define, de la misma manera que para una protección direccional de tierra, la orientación de la zona angular de disparo. Es el ángulo que forma la normal al semiplano de disparo con la magnitud de polarización,

■ para poder efectuar la medida de la dirección del defecto, la magnitud de polarización (la tensión) debe de tener un valor suficiente. En el caso concreto de un defecto trifásico franco muy próximo a un relé direccional no es detectado por éste puesto que todas las tensiones compuestas son nulas. Para asegurar la detección de este tipo de defecto es necesario que la protección utilice una memoria de tensión.

### Principios de detección

Los relés direccionales de fase funcionan o como protecciones de corriente máxima direccionalizadas, o mediante la medida de la proyección de la corriente sobre la recta característica (figuras 11 y 12).

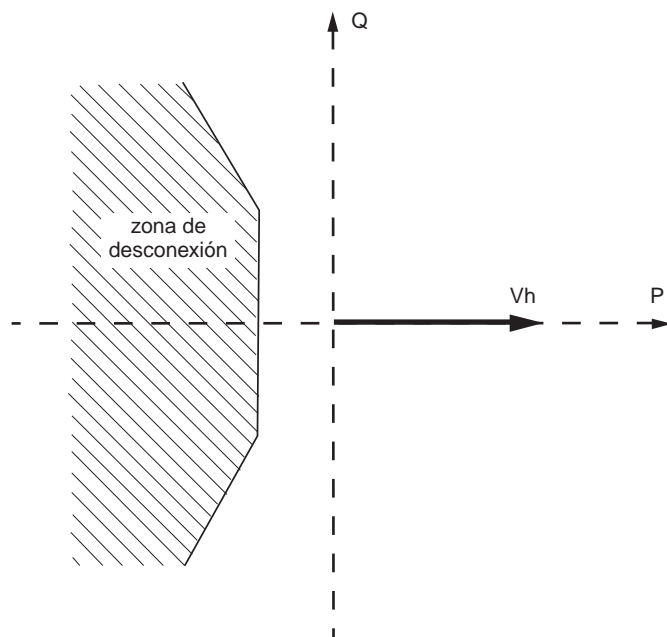


fig. 13: característica de funcionamiento de una protección que mide la potencia activa homopolar.

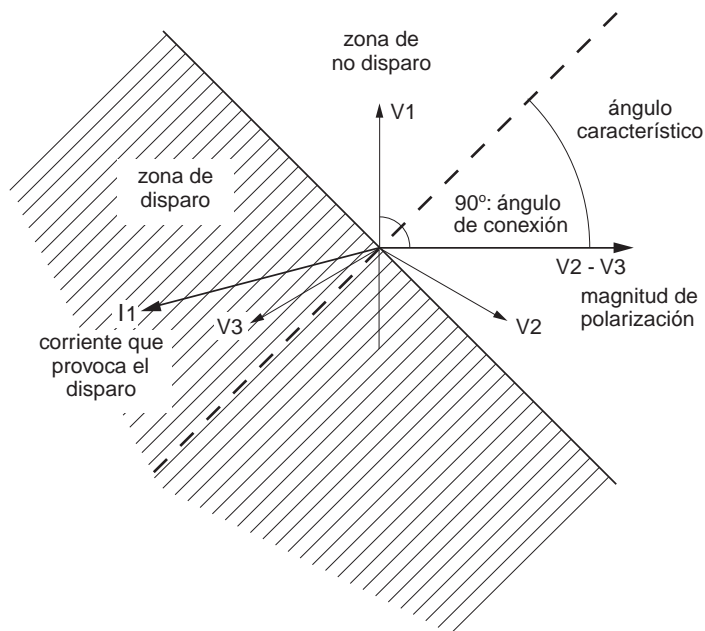


fig. 14: el relé que mide la corriente  $I_1$  y la tensión  $V_2-V_3$  tiene un ángulo de derivación de  $90^\circ$ .

Aunque hay en el mercado relés funcionando según estos dos principios, es preferible el relé de corriente máxima direccionalizado.

La coordinación con las protecciones de corriente máxima es mucho más fácil, pues el umbral de detección es independiente de la fase de la corriente.

La medida de la potencia no se utiliza para la detección de los cortocircuitos. La potencia no es un buen criterio de detección del defecto puesto que, cuando hay un defecto entre fases, su valor es tanto más bajo cuanto más próximo está el defecto.

### protección de potencia

Muy frecuentemente, estas protecciones utilizan el método de los dos vatímetros para medir la potencia activa, y una variante, que nosotros llamaremos método de los dos varímetros, para medir la potencia reactiva.

Recordemos que este método permite medir la potencia a partir de dos corrientes y de dos tensiones compuestas (figura 15). Se aplica a una red trifásica, equilibrada o no, siempre que no circule ninguna corriente homopolar. En concreto este método no se aplica nunca a una red de BT de cuatro hilos, es decir, a una red cuyo neutro está distribuido y que alimenta cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro.

La potencia activa viene dada por la fórmula:

$$P = I_1 \cdot U_{31} \cos(I_1, U_{31}) + I_2 \cdot U_{32} \cos(I_2, U_{32}).$$

Del mismo modo, la potencia reactiva se calcula con la fórmula:

$$Q = I_1 \cdot U_{31} \sin(I_1, U_{31}) + I_2 \cdot U_{32} \sin(I_2, U_{32}).$$

La potencia así medida es una magnitud algebraica, cuyo signo indica el sentido de circulación de la energía. Las protecciones de potencia son pues naturalmente direccionales.

Ciertos relés utilizan tres elementos de medida monofásicos para determinar la potencia. Estos relés serán, pues, utilizables en redes de 4 hilos; por el contrario, tienen el inconveniente de necesitar la instalación de 3 TT y 3 TI.

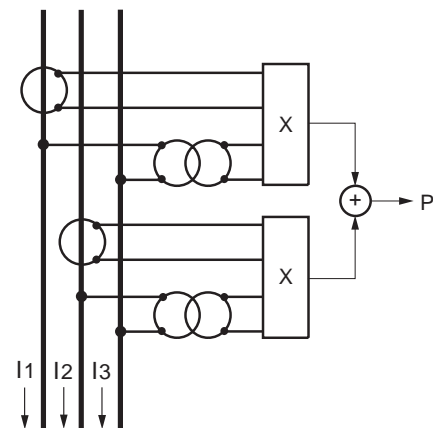


fig. 15: esquema del principio de medida de una potencia.

### 3 Aplicaciones de las protecciones direccionales

#### protección de redes radiales

##### Recordemos...

##### ■ corriente capacitiva

Toda pieza metálica bajo tensión forma con la tierra un condensador (**figura 16**). Esto es especialmente cierto para los cables, cuya capacidad por kilómetro es normalmente de algunos microfaradios; y también es cierto para las líneas, pero con una capacidad unas 100 veces menor.

El efecto capacitivo de los cables es tal que conectar en vacío a 20 kV un cable de 50 km es equivalente a conectar 3 MVar de condensadores entre la red y tierra!.

Mientras el cable esté alimentado por una tensión trifásica equilibrada, la suma de las corrientes capacitivas es prácticamente cero. Pero, cuando se produce en la red un defecto entre fase y tierra, una de las estas tensiones fase-tierra se hace mucho menor que las otras. Entonces, al no estar equilibradas las corrientes capacitivas, aparece una corriente residual capacitiva. La circulación de las corrientes se representa en la **figura 17**.

Para poner en servicio las protecciones es imprescindible calcular, para una salida dada, el valor máximo de la corriente capacitiva residual. Esta es precisamente la corriente que tendrá que medir el toroide situado en esta salida cuando, aguas arriba de él, una fase pasa a potencial de tierra y las otras dos se mantienen a la tensión compuesta de la red. Normalmente se le llama corriente capacitiva de salida.

El valor de esta corriente es:

$$I_c = 3 \cdot C \cdot \omega \cdot V,$$

donde:

- C es la capacidad de cada fase respecto a tierra de salida,
- V es la tensión simple,
- $\omega$  es la pulsación ( $2 \cdot \pi \cdot f$ ).

##### ■ régimen de neutro

La elección del esquema de conexión a tierra del neutro es una parte importante en el diseño de una red eléctrica. Es siempre el resultado de un compromiso entre muchos factores.

Un factor al que se presta especial atención es el cuidado de reducir la corriente de defecto a tierra para mejorar la seguridad de las personas: limitando la subida en tensión de las masas en las proximidades del defecto— y de los materiales — y limitando la energía desprendida por un arco eléctrico de cortocircuito. Veremos que la limitación de la corriente de defecto hace que la detección de la falta sea más crítica y el empleo de la protección direccional de tierra indispensable. Si la corriente

de defecto es suficientemente débil, la interrupción inmediata de la alimentación no es obligatoria, lo que permite una mejora notable de la continuidad del servicio.

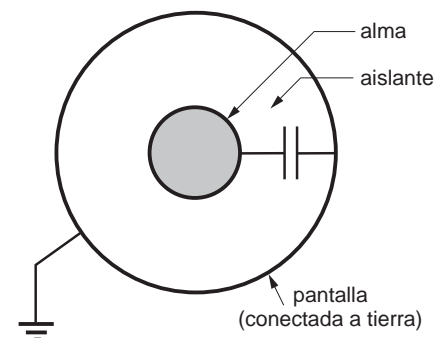


fig. 16: un cable eléctrico se comporta como un condensador.

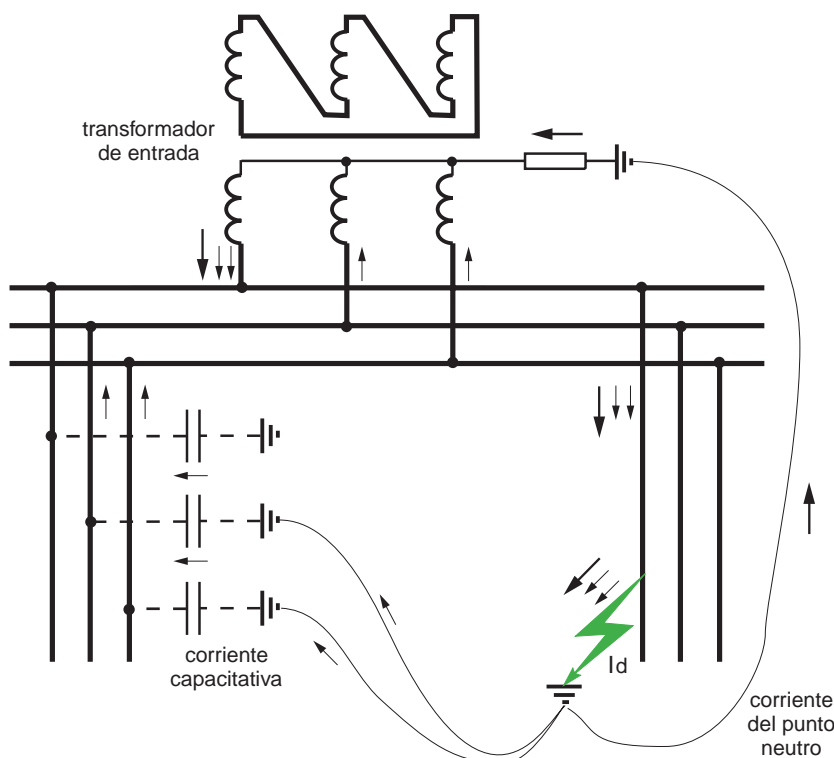


fig.17: circulación de corrientes capacitivas durante un defecto fase-tierra.

Durante el defecto, la corriente capacitiva se superpone a la corriente limitada por la impedancia de puesta a tierra del neutro. Por consiguiente, en las redes con corriente capacitiva importante, la única manera de obtener una corriente de defecto débil es la de elegir una impedancia de puesta a tierra inductiva, en la que la corriente compense la corriente capacitiva. Cuando esta inductancia del punto neutro se ajusta para alcanzar permanentemente la condición ( $3.L.C.\omega^2 = 1$ ), es denominada bobina de Petersen; en este caso, la corriente de defecto es teóricamente nula.

### Protección contra los defectos a tierra

Las protecciones direccionales de tierra se utilizan en dos casos en las redes radiales:

□ cuando la corriente capacitiva de una salida es del mismo orden de magnitud que la corriente de umbral de

protección (que debe ser bastante baja para detectar los defectos impedantes),

□ cuando el neutro está puesto a tierra en varios puntos.

■ redes con salidas de gran longitud

Cuando una salida tiene una corriente capacitiva importante —en la práctica superior al 10 % de la corriente limitada por la impedancia de puesta a tierra del neutro— un simple relé de máxima intensidad residual no permite asegurar una protección sensible y selectiva. Si su umbral está regulado por debajo de la corriente capacitiva de la salida protegida, la protección disparará intempestivamente para cualquier defecto fase-tierra de la red.

En este caso una protección satisfactoria de la salida se realizará con un relé direccional de tierra cuyo umbral podrá regularse por debajo de la corriente capacitiva.

El ángulo característico se ajustará dependiendo del régimen de neutro de la instalación.

□ redes a neutro aislado:

Funcionamiento

– la protección general de la red está asegurada por un controlador permanente de aislamiento o una protección de máxima tensión residual (desplazamiento del punto neutro),

– las protecciones direccionales de tierra aseguran la detección de la salida con defecto,

– elección del ángulo característico:

$\Theta = 90^\circ$  (figura 18).

Nota

El funcionamiento no queda asegurado más que si la corriente capacitiva tiene un valor determinado. El límite mínimo práctico es de 1 A.

□ red a neutro resistente (figura 19):

En la salida con defecto, la corriente en el punto neutro, activa, se suma a la corriente capacitiva de las salidas sanas. Si la resistencia del punto neutro se ha escogido de tal forma que la corriente activa sea superior o igual al doble de la corriente capacitiva de la instalación, la protección direccional no será necesaria.

Elección del ángulo característico:

– A :  $\Theta = 0^\circ$ , para los relés que funcionan con la proyección de la corriente (ajustando así el relé, éste es sensible a la corriente activa residual e insensible a la corriente capacitiva),

– B :  $\Theta = 45^\circ$ , para los relés de corriente máxima direccionalizados.

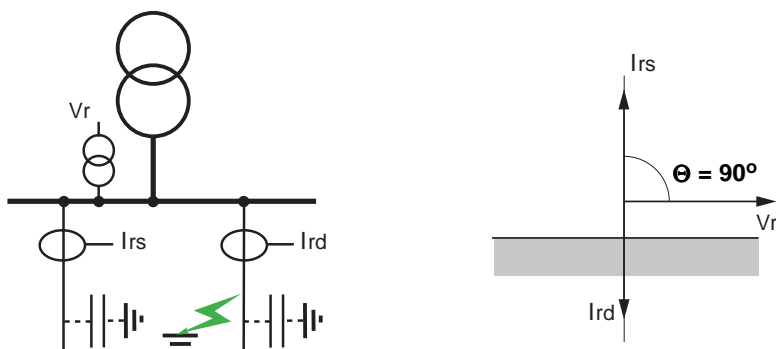


fig. 18: redes con neutro aislado: detección de defectos a tierra.

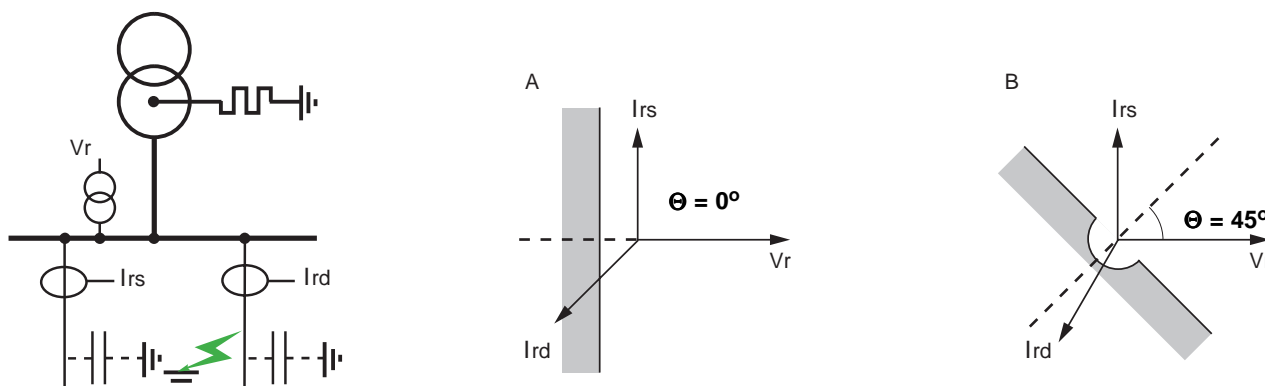
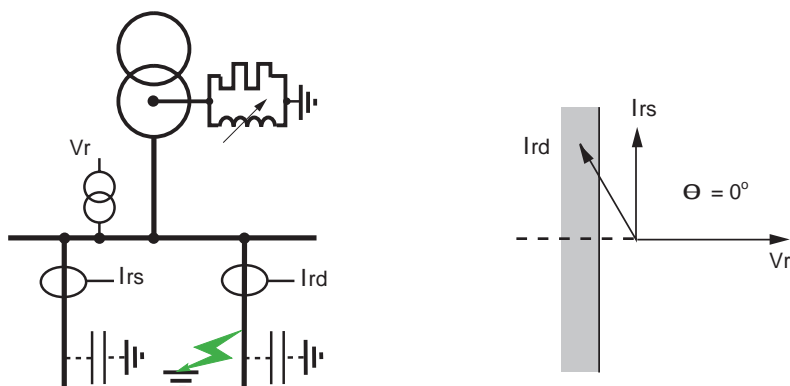


fig. 19: redes con neutro impeditivo: detección de defectos a tierra.

A.- defecto permanente a tierra



B.- defecto recurrente: tensión de la fase con defecto y corriente residual

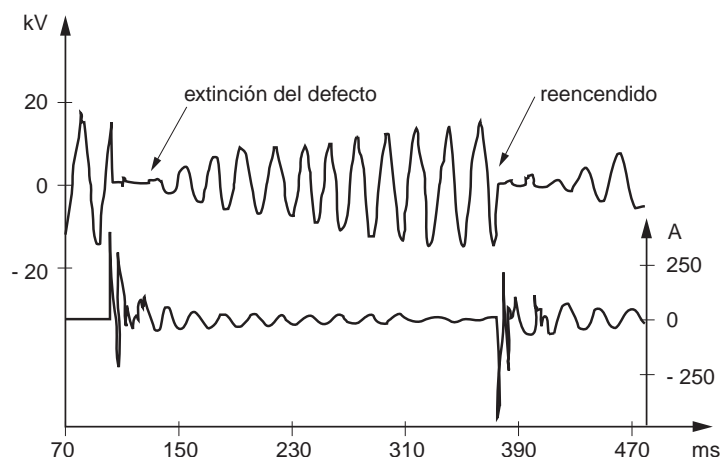


fig. 20: redes con neutro compensado: detección de defectos a tierra.

Hay que destacar que con un ángulo característico de  $45^\circ$ , la corriente residual de la salida sin defecto está, sin ninguna duda, en la zona de no disparo de la protección y por tanto, es necesario utilizar un relé adecuado de protección de corriente.

Con un ángulo característico de  $0^\circ$ , la corriente residual de la salida sana está en el límite de la zona de disparo; por tanto es obligatorio utilizar un relé de proyección de corriente. Esta solución tiene entonces la ventaja de ser totalmente insensible a la corriente capacitiva.

□ red con neutro compensado (figura 20):

Funcionamiento

- la corriente en la salida con defecto es la superposición:

- de la corriente capacitiva de las salidas sanas,
- de la corriente en la bobina que compensa la corriente capacitiva total de la red, y
- de la corriente en la resistencia del punto neutro, en general inferior al 10% de la corriente en la bobina (existen redes donde esta resistencia no está instalada; este caso de configuración no se analiza aquí).

- elección del ángulo característico:  $\Theta = 0^\circ$ .

Nota

es indispensable instalar una protección a proyección de corriente; una protección a máxima de corriente direccionalizada corre el riesgo de provocar desconexiones intempestivas.

Sobre este tipo de red, los defectos de aislamiento presentan a menudo un carácter recurrente: el arco de defecto se apaga después de algunos milisegundos y se vuelve a encender al cabo de algunos periodos, como muestra la parte b de la figura 20. Hay que estudiar con especial cuidado las protecciones para que actúen ante tales defectos.

□ redes con neutro unido directamente a tierra (figura 21).

Funcionamiento

- la corriente en el punto neutro es fundamentalmente inductiva y muy superior a la corriente capacitiva de la red,

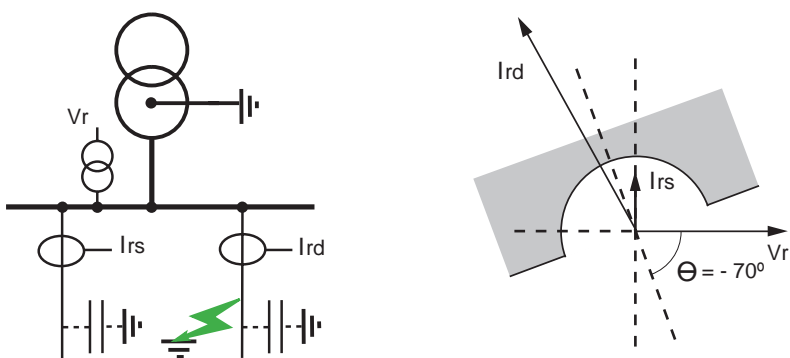


fig. 21: redes con neutro conectado directamente a tierra: detección de defectos a tierra.



– elección del ángulo característico:  
 $\Theta = -45^\circ$  a  $90^\circ$ .

Hay que destacar que un simple relé de máxima, de corriente homopolar, es suficiente para detectar una salida con defecto, con tal de que su umbral se ajuste a un valor superior a la corriente capacitiva de la salida protegida. El relé direccional sólo se utiliza en una red en bucle o que tenga varios puntos neutros.

■ puestas a tierra múltiples  
determinadas redes pueden ser explotadas con el neutro unido a tierra en varios lugares. Es el caso concreto de poner a tierra el neutro en cada fuente de energía (grupo electrógeno o transformador de entrada). La conexión en paralelo de las fuentes conduce entonces a la conexión en paralelo de las puestas a tierra del neutro.

En este caso, la protección selectiva de las fuentes contra los defectos a tierra requiere una protección direccional de tierra en la entrada de cada una de las fuentes.

La **figura 22** representa una solución típica de protecciones contra los defectos a tierra.

En esta figura, la flecha indica el sentido de detección de defecto por la protección direccional de tierra.

Las temporizaciones de las protecciones están indicadas. Los ángulos característicos están escogidos en función de los regímenes del neutro: el de la protección situada en la entrada al grupo, en función de la puesta a tierra del neutro del transformador y el de la protección instalada en la entrada al transformador, en función de la puesta a tierra del neutro del alternador.

#### Protección contra los defectos entre fases

Las protecciones direccionales de fase se utilizan en una red radial en el caso de un centro de transformación alimentado simultáneamente por varias fuentes. Para obtener una buena continuidad de servicio, es importante que un defecto que afecta a una de las fuentes no suponga la desconexión de todas ellas. Con la instalación de una

protección direccional de fase sobre la entrada de cada una de las fuentes se consigue esta selectividad.

La **figura 23** representa una disposición típica de las protecciones contra los defectos entre fases.

En esta figura, la flecha indica el sentido de detección de la protección direccional de fase.

Las protecciones direccionales de fase son en general bifásicas. Los casos en los que se necesita una protección trifásica se describen en el § 4.

Están indicadas las temporizaciones de las protecciones. Los ángulos

característicos se han ajustado teniendo en cuenta el ángulo de ramificación escogido. Para un ángulo de ramificación de  $90^\circ$ , la regulación más normal del ángulo característico es de  $45^\circ$ .

Hay que destacar que si la potencia de cortocircuito del grupo es pequeña respecto a la de la red, la protección direccional instalada en la entrada del grupo puede sustituirse por una simple protección a máxima intensidad, cuyo umbral sea a la vez superior a la corriente de cortocircuito del grupo e inferior a la de la red.

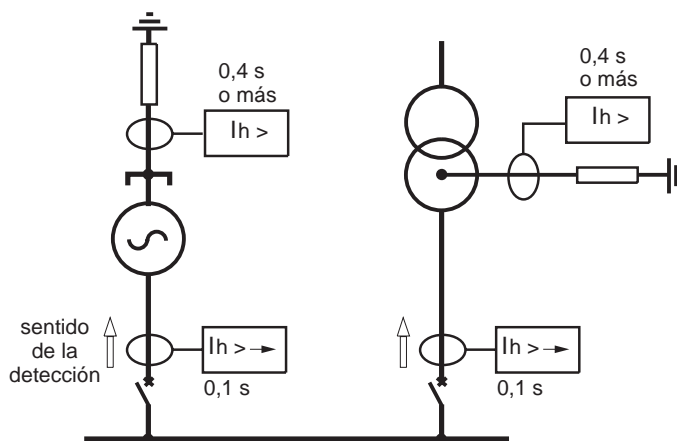


fig. 22: protección contra los defectos a tierra de una red puesta a tierra en varios puntos.

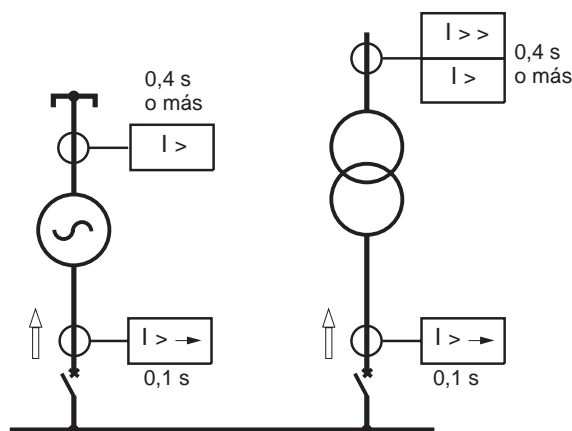


fig. 23: protección contra cortocircuitos de una red con varias fuentes de energía.



## protección de redes en bucle

■ una red en bucle es una red que, en explotación normal, tiene uno o más bucles cerrados (figura 24).

La ventaja de esta configuración de red es que asegura una excelente disponibilidad de energía a todos los consumidores situados en el bucle; en efecto, un enlace con defecto puede separarse de la red sin interrumpir la alimentación de los consumidores.

El inconveniente de esta solución es su coste: es necesario instalar un interruptor automático en cada extremo de cada conexión y las protecciones son complejas.

■ se pueden utilizar dos principios de protección:

- protección diferencial,
- protección direccional.

Este último principio funciona si, en el bucle, hay un único centro de transformación con una o varias fuentes y asegura la puesta a tierra del neutro. En la práctica, la selectividad de las protecciones direccionales está asegurada por los enlaces lógicos.

Comparada con la protección diferencial, que tiene la ventaja de ser rápida, la protección direccional es menos costosa y más fácil de instalar. Destaquemos que la detección de los

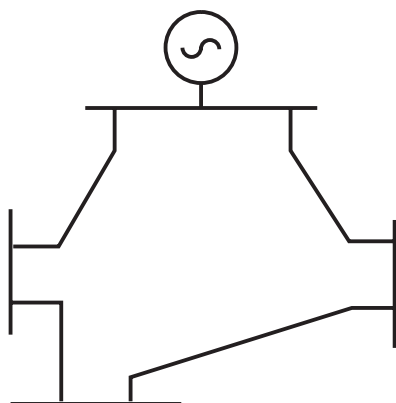


fig. 24 : esquema de una red en bucle.

defectos a tierra puede asegurarse, cualquiera que sea el régimen de neutro de la instalación, en tanto que las protecciones diferenciales de línea tienen una sensibilidad limitada.

### Líneas en paralelo

Dos líneas en paralelo constituyen el caso más simple y más frecuente de redes en bucle. El esquema de las protecciones debe de realizarse de tal forma que un defecto sobre un enlace no provoque la desconexión de la otra línea.

En la figura 25 se representa un esquema típico de las protecciones. En esta figura, la flecha indica el sentido de detección de las protecciones direccionales.

Las protecciones direccionales de fase son bifásicas. Su ángulo característico está regulado teniendo en cuenta el ángulo de derivación escogido ( $45^\circ$  para un ángulo de derivación de  $90^\circ$ ).

El ángulo característico de las protecciones direccionales de tierra se ajusta en función del régimen de neutro, como se ha indicado en los párrafos precedentes.

En la figura también se señalan las temporizaciones de las protecciones. Las protecciones no direccionales que tienen las salidas del centro de transformación hacia arriba están temporizadas para ser selectivas con las protecciones direccionales de las salidas del centro de transformación hacia abajo.

Cuando hay un cortocircuito en una de las líneas, la corriente se divide en dos en función de la impedancia de los circuitos: una parte se dirige directamente al centro de transformación hacia arriba de la línea con el defecto y la otra pasa al centro de transformación hacia abajo. El orden de funcionamiento de las protecciones es el siguiente:

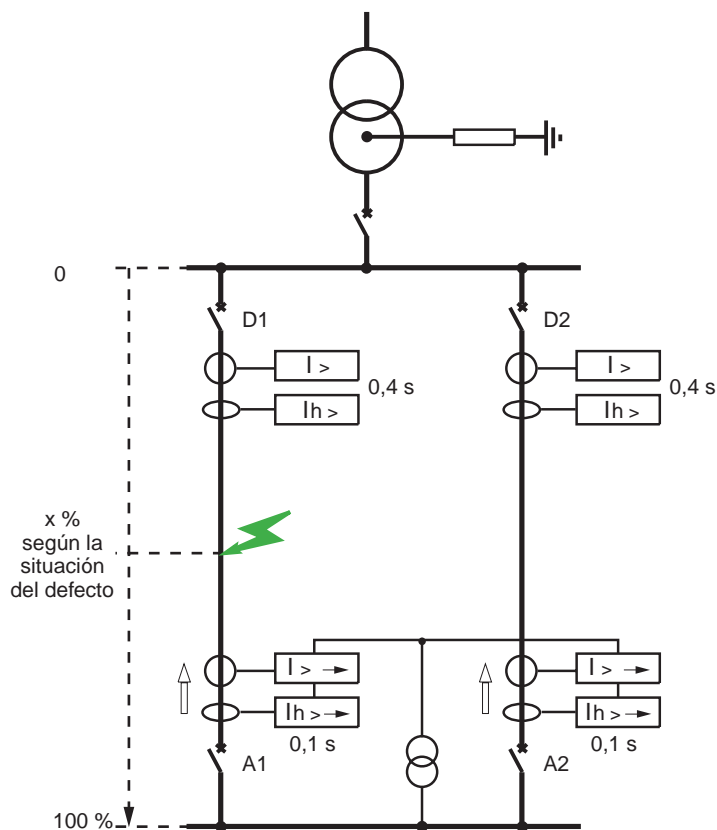


fig. 25 : protección de líneas en paralelo.

- A1, D1 y D2 detectan el defecto,
- A1 dispara (temporización: 0,1 s),
- D2 «se rearma» antes de sobrepasar su temporización,
- D1 dispara (temporización: 0,4 s).

Cuando se produce un cortocircuito en las proximidades del juego de barras hacia arriba del centro de transformación, la proporción de corriente que pasa por el centro de transformación hacia abajo es muy pequeña, inferior al umbral de la protección direccional de fase. Este caso se produce cuando la posición  $x$  del defecto está comprendida entre 0 y 2 veces la razón  $I_s/I_{cc}$  (entre la corriente del umbral de la protección direccional y la corriente de cortocircuito).

En este caso, la protección de máxima intensidad de la salida de la línea en defecto (D1) dispara primero (temporización: 0,4s).

A1 dispara inmediatamente. El tiempo total de eliminación del defecto es pues largo. Este inconveniente puede eliminarse instalando en las salidas D1 y D2 un segundo relé de sobreintensidad con un umbral elevado (desconexión para una  $I_{cc}$  que corresponda a menos del 90 % de la longitud de la línea) y temporización de 0,1s.

#### Bucle cerrado

Cada interruptor automático está equipado de dos conjuntos de protecciones direccionales, cada uno de los cuales detecta el defecto en dos direcciones opuestas (salvo los interruptores automáticos de cabeza del bucle, equipados de un único conjunto de protecciones no direccionales).

Esta disposición de la protección se representa en la **figura 26**. Cada conjunto de protecciones está compuesta de una direccional de fase bifásica y una direccional de tierra. El sentido de detección de cada conjunto de protección está representado por una flecha. Se establecen dos cadenas de selectividad, una para cada sentido de circulación de la corriente de defecto:

- $A > B > C > D > E$ ,
- $F > E > D > C > B$ .

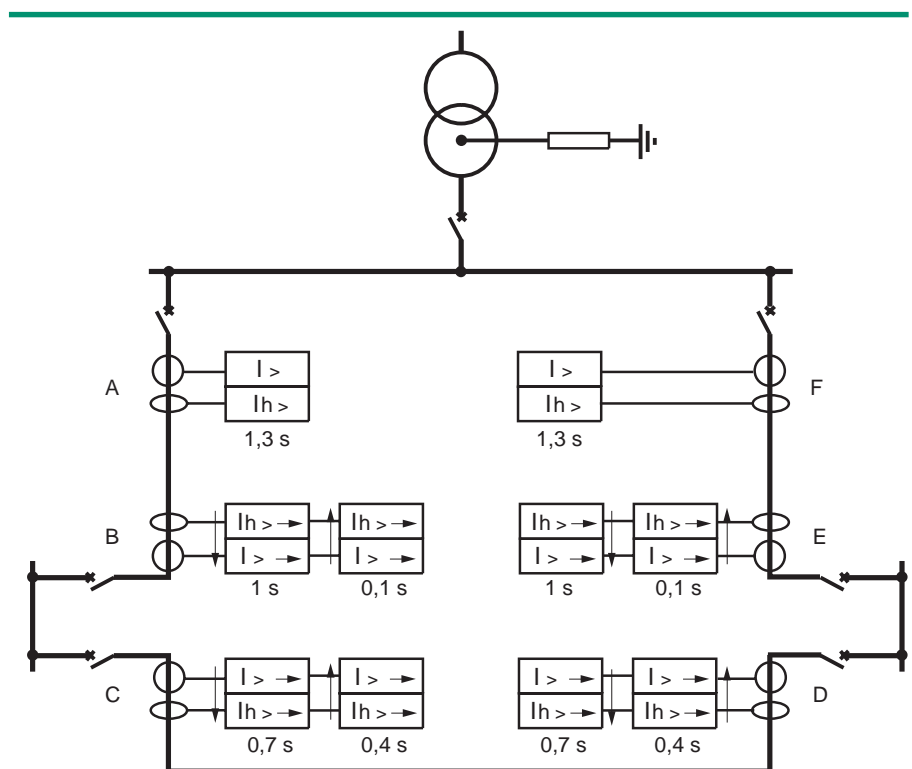


fig. 26: protección de un bucle cerrado mediante relés direccionales y selectividad cronométrica.

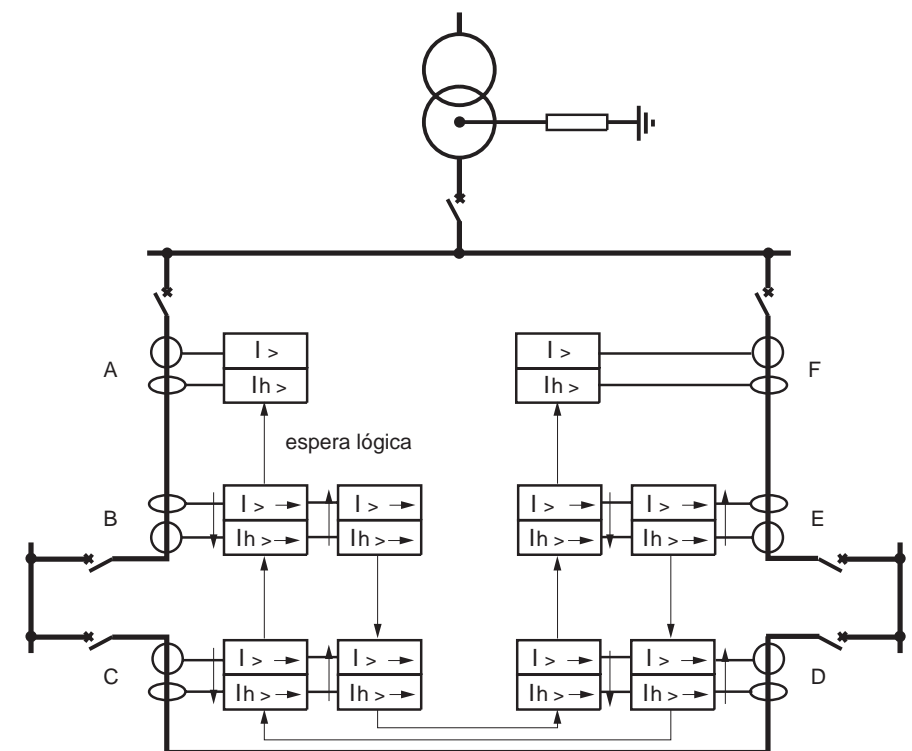


fig. 27: protección de un bucle cerrado mediante relés direccionales y selectividad lógica.

Si la selectividad es cronométrica, los tiempos de desconexión se convierten rápidamente en prohibitivos. En la práctica esta solución se instala solamente con la selectividad lógica (figura 27), que permite tiempos de desconexión muy cortos (0,1 s) utilizando las conexiones ya cableadas entre cada centro de transformación.

## protección de alternadores

### Detección de la pérdida de excitación

El fallo de la excitación de un alternador, sea por circuito abierto sea por cortocircuito, es un defecto de gran importancia, puesto que produce o el funcionamiento del alternador como generador asíncrono o el cese de la conversión de energía y el aumento de velocidad.

Se produce el primer caso (pase a generador asíncrono) si el circuito de excitación está en cortocircuito o si el rotor tiene un devanado amortiguador; el régimen es estable pero la máquina no está dimensionada para aguantarlo mucho tiempo.

En el segundo caso (cese de la conversión de energía y embalamiento), el régimen es inestable y debe darse lo antes posible la orden de paro a la máquina que lo arrastra.

Por tanto, es imprescindible vigilar el circuito de excitación.

Desgraciadamente, éste está normalmente inaccesible, por estar situado totalmente en el rotor (alternador sin anillos ni escobillas). Se mide entonces o la potencia reactiva absorbida por la máquina o la impedancia en sus bornes (figura 28).

La medida de la potencia reactiva es la más simple y la más utilizada para proteger las máquinas de pequeña y mediana potencia. Permite detectar toda absorción de potencia reactiva o lo que es lo mismo, el funcionamiento del alternador como generador asíncrono. El umbral de detección debe poderse regular a un valor inferior a  $S_n$  (potencia aparente nominal de la máquina); típicamente,  $0,4 S_n$ .

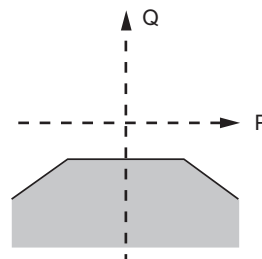
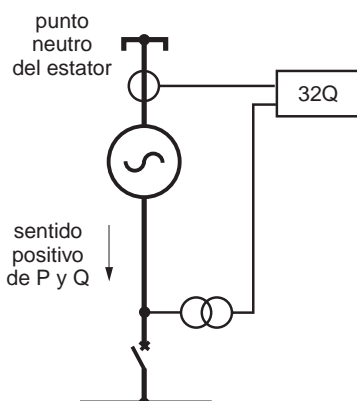


fig. 28: protección contra pérdidas de excitación mediante un relé de retorno de potencia reactiva.

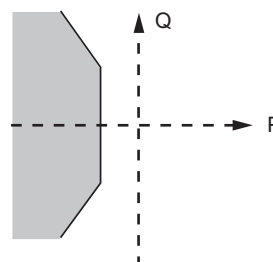
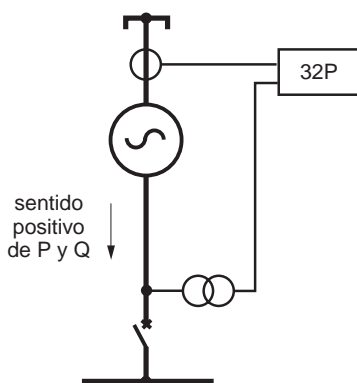


fig. 29: detección de que un alternador funciona como motor, mediante un relé de retorno de potencia activa.

### Detección del funcionamiento como motor

Un grupo electrógeno, conectado a una red de gran potencia, continúa girando en sincronismo aún cuando la máquina que lo arrastra (diesel o turbina) deje de hacerlo: el alternador pasa a funcionar entonces como motor síncrono. Este funcionamiento puede ser perjudicial para la máquina accionante.

Para detectar este tipo de funcionamiento, es obligatorio utilizar un relé directo de potencia activa (figura 29).

El umbral de esta protección está ajustado a un valor bajo respecto a la potencia nominal del alternador, típicamente de un 5 a un 20 %, tal vez algo menos para los turbo-alternadores.

Para asegurar la estabilidad en todos los casos de funcionamiento correcto del alternador, hay que prestar una atención muy especial al diseño de este relé, por otra parte, muy sensible,

### Protección de desacoplo

Cuando una instalación industrial tiene uno o varios alternadores preparados para funcionar en paralelo con la red de distribución de energía eléctrica, conviene prever un conjunto de «protecciones de desconexión».

Esta protección tiene dos objetivos complementarios:

- garantizar la seguridad de la central de producción,
- garantizar la seguridad de la red exterior, que puede pasar a alimentarse por la central del industrial.

En general, estas protecciones se instalan en el interruptor automático de entrada de la instalación industrial y gobiernan la apertura de éste. Estas protecciones pueden también gobernar la apertura de un interruptor de acoplamiento entre dos partes de la instalación.

La **figura 30** representa uno de los objetivos de las protecciones de pérdida de sincronismo: se trata de asegurar la detección del defecto situado más arriba de la instalación industrial, y esto con un doble objetivo:

- la seguridad de esta red: no alimentar el defecto,
  - la seguridad del alternador: evitar que la reconexión de la salida en el centro de transformación, efectuada sin vigilar las condiciones de sincronismo, provoquen un reenganche peligroso.
- La detección del defecto está asegurada por las protecciones direccionales de fase y de tierra:
- la protección direccional de tierra detecta la corriente residual creada por las capacidades fase-tierra de la

instalación y/o generadas por la puesta a tierra de la central,

- la protección direccional de fase detecta un defecto entre fases aguas arriba.

Puesto que son direccionales, estas protecciones son insensibles a un defecto situado en el interior de la instalación industrial.

- aparte de las protecciones direccionales, un conjunto de protecciones de desacoplamiento incluyen frecuentemente un relé de variación de frecuencia ( $df/dt$ ): el aumento intempestivo de la potencia solicitada a la central, en caso de fallo de la fuente principal, provoca una variación de frecuencia en el grupo electrógeno.

El distribuidor puede pedir que se instalen unas protecciones de tensión y de frecuencia para garantizar la calidad de la energía suministrada por la central.

Por último, puede instalarse una protección de máxima potencia activa para señalar un sentido anormal de la circulación de energía.

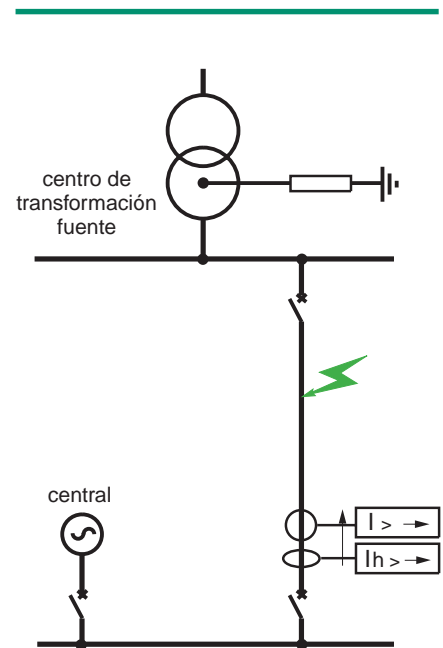


fig. 30: ejemplo de protecciones de desenganche.

## 4 Instalación

### elección de los transductores de medida

La elección de los TT (transformadores de tensión) no supone problemas especiales. Los TT que normalmente se instalan en las redes de distribución son de la clase 0,5 ó 1; sirven perfectamente para alimentar las protecciones direccionales, con la condición de que la suma de cargas que se les conectan no sea ni tan grande que sobrepase su potencia de precisión ni tan pequeña que haya peligro de ferresonancia.

El dimensionamiento de los TI (transformadores de intensidad) es más delicado. En el caso de dimensionamiento insuficiente y cuando la corriente de cortocircuito tiene una componente aperiódica con una constante de tiempo larga, los TI se saturan. Este fenómeno provoca un error en la medida de la fase de la corriente durante el régimen transitorio, como se ve en la **figura 31**. La corriente medida en el secundario del TI saturado está siempre en adelante respecto a la corriente primaria.

El mal dimensionamiento de los TI puede tener dos consecuencias:

- provocar un disparo intempestivo — riesgo tanto menor cuando la temporización de la protección es más larga,

- provocar un disparo retardado — riesgo independiente de la temporización escogida.

El elemento principal que influye sobre el comportamiento de la protección es el desfase  $\alpha$  entre la corriente de cortocircuito y el límite de la zona de desconexión de la protección, como define la **figura 32**.

En la práctica, si este ángulo  $\alpha$  es mayor de  $45^\circ$  (lo que sucede muy a menudo con los reglajes preconizados), las exigencias del dimensionamiento del TI son poco exigentes: escoger el factor límite de precisión del TI (FLP, cuya definición figura en el Cuaderno Técnico nº 164)

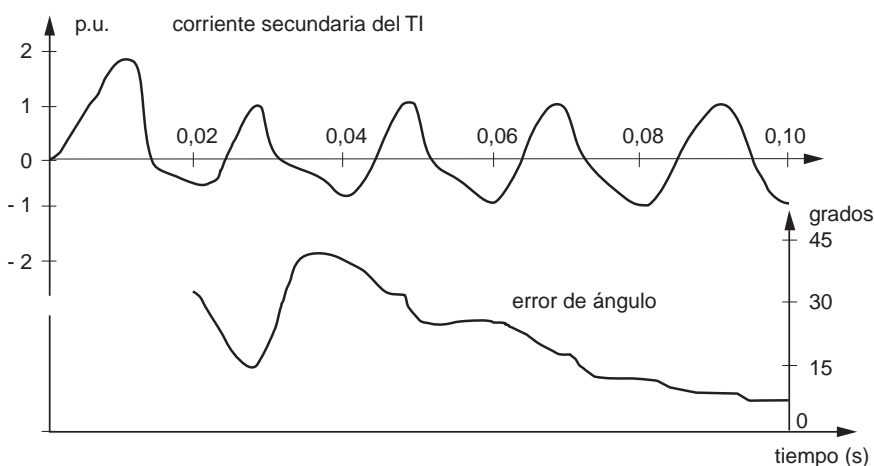


fig. 31: error de ángulo característico calculado en las siguientes condiciones:

- el defecto implica una componente aperiódica del 100 % y de constante de tiempo 40 ms;
- la corriente de saturación de TI vale dos veces la corriente de cortocircuito.

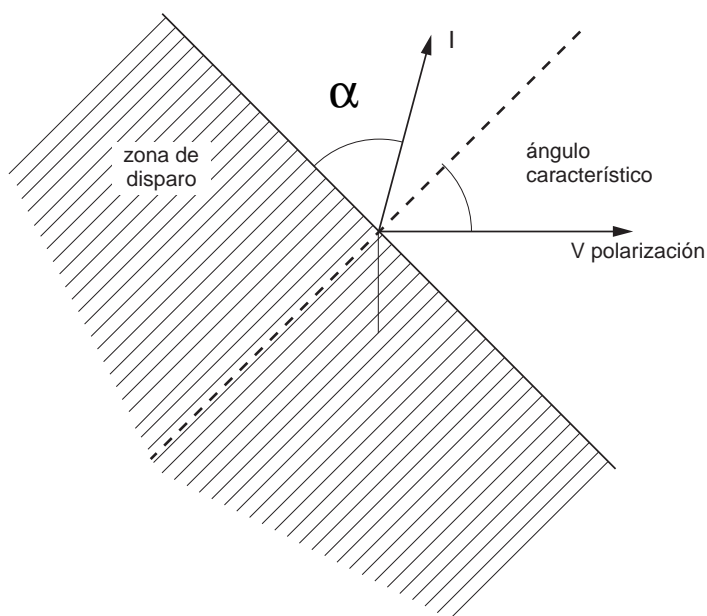


fig. 32: definición del ángulo  $\alpha$ .

mayor o igual a 0,3 veces el valor de la corriente de cortocircuito máximo visto por la protección direccional.

## elección de una protección bi o trifásica

En tecnología analógica, una protección direccional de fase es normalmente monofásica: mide la corriente de una sola fase. Es posible instalar una, dos o las tres fases de un relé.

En tecnología digital, se integran en un mismo aparato varias funciones de protección y lo más frecuente es que el relé direccional de fase sea bifásico y, a veces, trifásico.

Por regla general, cuando se trata de detectar una transferencia de potencia anormal (protección de máquinas), el fenómeno está equilibrado sobre las 3 fases y es suficiente un relé monofásico. Cuando se trata de detectar un cortocircuito entre 2 fases, una protección direccional bifásica es suficiente: una al menos de las dos fases protegidas estará afectada por el defecto.

Para detectar un defecto fase-tierra, hace falta o una protección direccional de fase trifásica o una protección direccional de tierra. Si el neutro de la instalación está puesto directamente a tierra, a menudo es preferible la primera solución. En todos los otros regímenes de neutro, escoger el segundo.

## protección de transformadores en paralelo

Para proteger dos transformadores en paralelo, sobre todo si los dos juegos de barras están algo distantes (en la práctica es imposible cablear los circuitos secundarios de los TI sobre más de un centenar de metros), son preferibles las protecciones direccionales de fase respecto a las protecciones diferenciales.

El esquema de protección que hay que utilizar es, entonces, el de la **figura 33**, con las precauciones de regulación siguientes:

- umbral de la protección instantánea a máxima intensidad ajustado para no detectar más que los defectos situados en el primario del transformador,

- interdesconexión primario-secundario,

- protección direccional de fase regulada para no detectar más que los defectos situados en el secundario del transformador.

Dependiendo del lugar de la puesta a tierra del neutro en el secundario de los transformadores, se presentan dos variantes:

- si el punto neutro secundario está situado sobre el juego de barras, las protecciones direccionales de tierra se sustituyen por simples protecciones de máxima intensidad residual,

- si cada transformador posee su propio punto neutro y si el juego de barras secundarias y los transformadores están situados en el mismo centro de transformación, la protección diferencial de tierra restringida puede reemplazar la protección direccional de tierra.

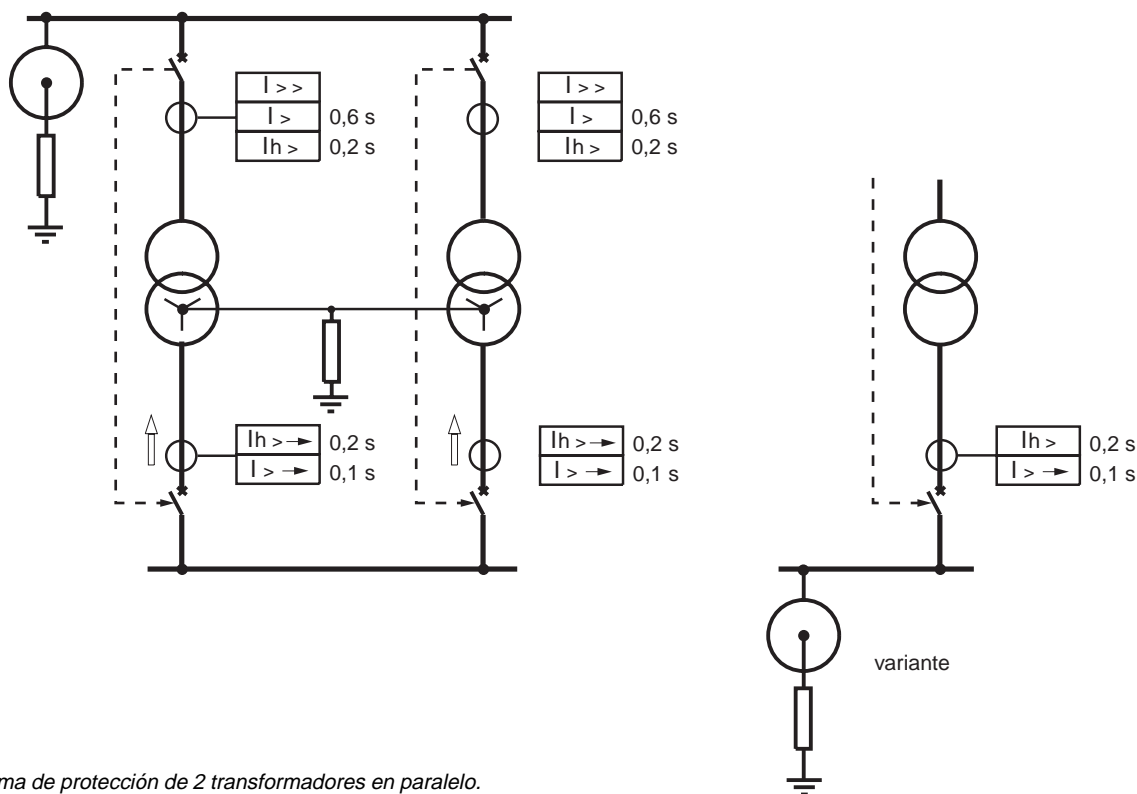


fig. 33 : esquema de protección de 2 transformadores en paralelo.



## 5 Evolución y perspectivas

### evolución de la tecnología de las protecciones

La generalización de los conjuntos de protecciones integradas y digitales hace posible la utilización de las protecciones direccionales simples y poco costosas.

Por tanto, hoy en día, este tipo de protecciones se presentan como una excelente oportunidad para mejorar a la vez la potencia transmitida por una red y la calidad del servicio.

Por ejemplo, dos enlaces, que actualmente se usan el uno para transportar la carga y el otro en vacío, de reserva, pueden, en el futuro, explotarse en paralelo gracias a las protecciones direccionales.

La asociación de la selectividad lógica (Cuaderno Técnico nº 2) y las protecciones direccionales permiten la realización de esquemas que mejoran la disponibilidad de la energía eléctrica. La aparición en el mercado de relés multifuncionales, (es decir asociando a las protecciones toda lógica de mando necesaria) y dedicados a cada aplicación simplifica el diseño y la instalación de un plan de protección (figura 34).

### evolución de los sensores

La aparición de las protecciones digitales, que no necesitan más que muy poca potencia para poder medir, ha permitido el empleo de nuevos sensores.

Los toroides de Rogowski (TI sin hierro), puesto que no se saturan, permiten a las protecciones direccionales de fase conservar su precisión de medida y evitar los errores de ángulo en todos los casos de defecto. La preocupación por el dimensionamiento del TI desaparece en el momento de la instalación de la protección.



fig. 34: el SEPAM 2000, un relé digital multifuncional que permite la utilización de protecciones direccionales juntamente con la selectividad lógica.

En el Cuaderno Técnico nº 170 se describen estos reductores de medida, constituidos por un gran número de espiras alrededor de un núcleo amagnético.

Los divisores resistidos de tensión, de poco coste y reducidas dimensiones, se instalan en las celdas, en las proximidades de cada protección direccional: el cableado de la medida de tensión es mucho más fiable que cuando se utilizan los TT: desaparece el modo común que supondría un TT.

La evolución de los sensores refuerza aún más el interés por las protecciones direccionales, mejorando sus diseños y facilitando su instalación.

### a modo de conclusión

Los avances tecnológicos (sistemas de protección digital, nuevos sensores, selectividad lógica, ...) facilitan el empleo de las protecciones direccionales.

Hoy día estas protecciones con buenas prestaciones y fáciles de instalar constituyen una ayuda incalculable para mejorar la disponibilidad de energía eléctrica. Cada vez se utilizan más para la protección de redes y de máquinas rotativas tanto si se trata de protección de defectos entre fases o de protección de tierra.

El lector interesado por un conocimiento más extenso de las diversas protecciones utilizadas en MT puede dirigirse al Cuaderno Técnico nº 174.