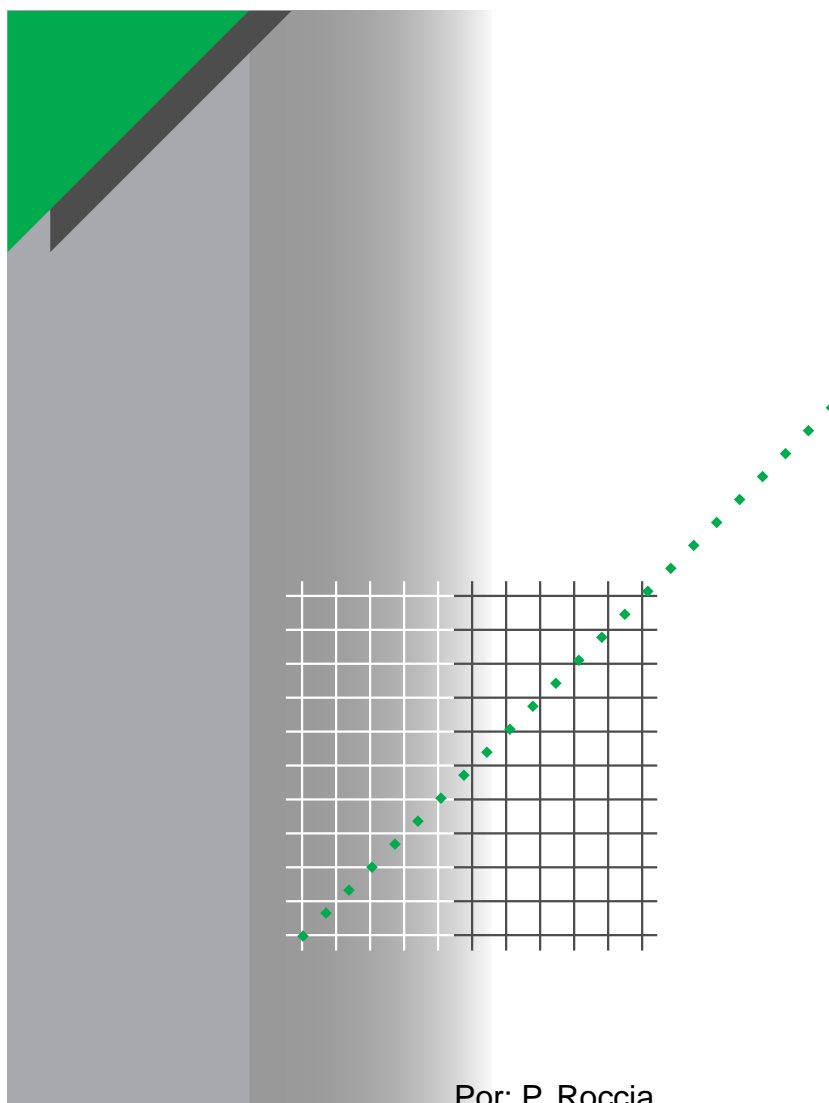


# Cuaderno Técnico nº 113

## Protección de las máquinas y de las redes industriales de AT



Por: P. Roccia



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

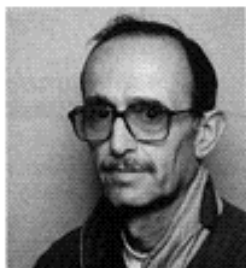
Telf. (93) 285 35 80  
Fax: (93) 219 64 40  
e-mail: [formacion@schneiderelectric.es](mailto:formacion@schneiderelectric.es)

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» 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 contenidas en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 113 de Schneider Electric».



**Pierre ROCCIA**

Diplomado en 1969 como Ingeniero Eléctrico por el Institut National Polytechnique de Grenoble. Después de haber ocupado un puesto de responsabilidad en el sector del equipamiento industrial y de la distribución pública AT, pasó a encargarse de ampliar la gama de relés de protección Merlin Gerin y de concretar una filosofía técnica sobre la protección de redes industriales AT gracias a los dispositivos asociados a los interruptores automáticos. Este Cuaderno Técnico es un reflejo de esta actividad.

Pasó a encargarse después de Formación. Actualmente es Ingeniero de Estudios al servicio del diseño de equipos y conjuntos.

# **Cuaderno Técnico nº 113**

## **Protección de las máquinas y de las redes industriales de AT**

Por: P. Roccia

Trad.: Dr. M. Cortes, J.M. Giró

Edición francesa: junio 1985

Versión española: abril 1991



# Protección de las máquinas y de las redes industriales de AT

## Índice

1 Defectos principales que se que pueden presentar en las redes y máquinas	p. 5
2 Relés de protección	p. 14
3 Selectividad	p. 27
4 Protecciones típicas	p. 29
5 Conclusión	p. 33
6 Bibliografía	p. 33

La limitación de las consecuencias de un defecto en las redes de distribución y en las máquinas (costes de la reposición del servicio y pérdidas en la explotación) se obtiene por la utilización de dispositivos de vigilancia, denominados «protecciones».

El objeto de este Cuaderno Técnico es el de definir los defectos y sus características, exponer sus causas y consecuencias y los medios de protección. Los diferentes relés de protección empleados se presentan sucesivamente. Se dan los criterios de ajuste, en función de los parámetros eléctricos de la red y de las máquinas y de la selectividad que se pretende conseguir.

Asimismo, se estudian los problemas de la protección de las máquinas y de las redes industriales, incluyendo los relativos a las redes de transporte y de distribución pública, que exigen equipos de protección específicos (relés de distancia, de impedancia, etc.).

# 1 Defectos principales que se pueden presentar en las redes y las máquinas

Antes de estudiar las causas, las consecuencias y los medios de protección relativos a los principales defectos, juzgamos de interés recordar que éstos son muy variados y pueden determinar el corte de la alimentación eléctrica o el disparo de una alarma.

Los defectos pueden caracterizarse:

## ■ Por sus orígenes

Los defectos que afectan al funcionamiento correcto de una red o de una máquina se deben a causas:

- de origen eléctrico,
- de origen mecánico, modificando los parámetros eléctricos (impedancias),
- de origen humano, errores de explotación.

## ■ Por su localización

Al considerar un componente de la red de potencia (línea o máquina), es necesario distinguir:

- los defectos internos, caracterizados generalmente por los deterioros del aislamiento,
- los defectos externos, en los que las consecuencias se limitan a unas perturbaciones que pueden llevar, en mayor o menor medida, a desperfectos en el elemento afectado y pueden conducir a un defecto permanente.

## ■ Por su duración

- si el defecto desaparece por sí mismo se le denomina **auto-extintor**,
- si el defecto desaparece por la acción de la protección, sin dejar deterioros que afecten al funcionamiento de la red, el defecto es denominado **fugitivo**.

El diseño de la red y las protecciones tienden a limitar los errores de explotación a defectos fugitivos.

- si el defecto entraña deterioros que impliquen reparaciones es denominado **permanente**.

En la redes de cables y en las máquinas los defectos de origen eléctrico son, generalmente,

permanentes. Salvo casos particulares, exigen la desconexión de la tensión.

Las protecciones son función del tipo de defecto. La selectividad en la desconexión está directamente ligada a la localización del defecto. El carácter permanente de un defecto obliga a utilizar relés con enclavamiento (con retención).

## Cortocircuito entre fases

### Causas

- La degradación de los aislantes:
  - degradación de la calidad de las superficies (polución),
  - degradación térmica (temperaturas excesivas),
  - descargas parciales en los intersticios (microcavidades) en la masa de los aislantes.
- Disminución accidental de las distancias de aislamiento, (presencia de animales, herramientas dejadas por inadvertencia en los juegos de barras, contactos entre conductores aéreos).
- Roturas por causas externas (pedradas, golpes de pico, etc.).
- Sobretensiones.

### Consecuencias

- Además de los esfuerzos electrodinámicos, se producen efectos térmicos: incendios en los puntos del arco de defecto, calentamientos en las partes que recorren las corrientes de cortocircuito.

La ruptura rápida limita los efectos térmicos.

- El defecto modifica las magnitudes eléctricas de la red: origen de ceros de tensión, desequilibrios, intercambios de energía reactiva, etc.

Estas magnitudes al ser accidentalmente modificadas perturban el funcionamiento de las máquinas de la red (inestabilidad) y constituyen un peligro (sobretensiones).

- Las corrientes de defecto determinan fenómenos de inducción electromagnética en los circuitos auxiliares próximos.

### Medios de protección

Empleo de relés de máxima corriente (máximo de I) a tiempo independiente o a tiempo dependiente. El relé limita:

- los efectos térmicos,
- los riesgos de inestabilidad de la red.

La coordinación entre los diversos relés a máxima corriente de una red se realiza limitándose a dejar sin tensión, únicamente, la parte con defecto (selectividad).

Estos relés no pueden mantener la selectividad en las redes en anillo o de estructura mallada. En éstas se emplean relés:

- direccionales,
- diferenciales longitudinales.

## Defecto fase-tierra

### Causas

Son las mismas que determinan los cortocircuitos fase-fase.

Los contactos accidentales tienen lugar entre fase y tierra o entre fase y masa, estando las masas unidas a tierra.

Los defectos permanentes producen la desconexión, excepto bajo ciertas condiciones, en régimen de neutro aislado (o fuertemente impeditivo).

### Consecuencias

Las corrientes de defecto fase-tierra son moderadas y no exceden generalmente de 1/10 la corriente de cortocircuito entre fases.

Las consecuencias se reducen generalmente a:

- elevación del potencial de las masas, poniendo en juego la seguridad de las personas. La tensión de contacto no deberá exceder de 50 V permanentes,

- cocción de las tomas de tierra, puntos calientes en las masas, quemaduras,
- calentamiento de los circuitos magnéticos. La corriente de defecto fase-tierra en una máquina deberá limitarse a unos veinte amperios, lo que evitará daños en los circuitos magnéticos,
- calentamiento del apantallado de los cables,
- sobretensiones en la red.

### Medios de protección

- **Régimen de neutro débilmente impedante** (TT, con factor de defecto a tierra  $\leq 1,4$ ) es el más empleado.

La corriente de defecto, aunque limitada, permite la utilización de **relés de máxima corriente homopolar**. La coordinación de estos relés se realiza de manera que dejen sólo sin tensión la parte con defecto (selectividad cronométrica). Los mismos no pueden guardar la selectividad en las redes en anillo o de estructura mallada. En estos casos se emplean:

- relés diferenciales longitudinales de corriente homopolar,
- relés direccionales de corriente homopolar, que al ser regulados, tienen también la ventaja de poder ser insensibilizados a las corrientes capacitivas de los cables.

La utilización de relés voltimétricos homopolares puede ser útil para detectar, a partir de un punto voluntariamente elegido en el conjunto de la red, los defectos fase-tierra, o fase-masa, que se originan en un punto cualquiera de la red.

- **Régimen de neutro aislado, o fuertemente impedante** (IT, factor de defecto a tierra  $> 1,4$ ) con el cual es posible continuar la explotación con un primer defecto.

Por lo general, la detección del primer defecto no es selectiva.

Esta detección es entonces asegurada, bien sea por:

- un relé voltimétrico homopolar conectado entre el borne neutro del generador y tierra y regulado en función del aumento del potencial del neutro,

- un controlador permanente de aislamiento, el cual tiene la ventaja de medir el aislamiento de la red y funcionar incluso sin tensión en la red.

El defecto doble es eliminado por las protecciones de máxima corriente de la instalación.

En las salidas no preferentes que se desconectan al primer defecto, después de un cuidadoso estudio técnico se pueden emplear relés direccionales de la corriente fase-tierra o fase-masa. Generalmente el empleo de relés de máxima corriente homopolar, que funcionen por las corrientes capacitivas de la red es difícil, sino imposible.

## Error de acoplamiento

### Causas

Este defecto se presenta cuando, al conectar en paralelo dos redes de fases diferentes (con diferentes índices horarios), un generador se conecta en oposición de fase.

### Consecuencias

En el peor de los casos, las consecuencias son las mismas que las de un cortocircuito entre fases. Los daños debidos a los defectos térmicos son generalmente limitados, la energía del defecto es esencialmente liberada en la cámara de ruptura del interruptor automático.

Se pueden observar deterioros mecánicos en los generadores.

### Medios de protección

Las medidas de protección previas y los enclavamientos tienen que imposibilitar los errores de acoplamiento. No obstante, si se produce el error de acoplamiento, los medios de protección empleados contra cortocircuitos han de ser suficientemente eficaces.

## Sobrecarga

### Causas

Se deben esencialmente al aumento de la demanda de energía.

Tienen un origen:

- **mecánico**: aumento del par exigido (machacadoras),
- **eléctrico**: aumento anormal del número de consumidores.

Las sobrecargas se deben también a una disminución del factor de potencia, o a una disminución o aumento de la tensión de la red.

### Consecuencias

Las sobrecargas son sinónimo de sobreintensidades.

Las sobrecargas provocan un aumento exagerado del calentamiento de los cables, los transformadores y los motores. Disminuyen la vida de los aislantes.

### Medios de protección

Control de la intensidad mediante un relé de imagen térmica o un relé de máxima corriente de tiempo constante para limitar en el tiempo sobrecargas constantes y conocidas.

Se trata, por ejemplo de una sobrecarga, cuya duración y frecuencia de repetición están bien determinadas (apretado de tirafondos de laminación).

## Inversión del sentido de circulación de la energía en ausencia de defecto eléctrico

### Causas

El buen funcionamiento de la red se caracteriza por la transferencia de energía de las fuentes a los consumidores, respetando las potencias nominales y las intensidades admisibles.

Esta transferencia normal de energía puede alterarse por ejemplo por:

- **una bajada de la tensión de la red de distribución**, que ocasiona el suministro de energía a esta red por un abonado que disponga de una central de producción autónoma,
- **un ciclo rápido de reenganche**: la energía cinética almacenada por motores de gran potencia provoca la alimentación por retorno de los receptores.

La detección de este retorno de energía permite el desacoplamiento

rápido de estos potentes motores. La reconexión de estos motores podrá hacerse inmediatamente en condiciones óptimas (ausencia de acoplamiento en oposición al flujo remanente).

Los abonados 1 y 2 (figura 1) son alimentados por el abonado 3, por ejemplo, por causa de una desconexión, con reenganche rápido a nivel del Centro de Transformación. Se pueden constatar las dificultades de la reanudación del servicio de los motores (recuperación de la velocidad) al retorno de la tensión de alimentación,

■ **del funcionamiento de un motor como alternador** (pérdida de potencia del motor de funcionamiento).

### Consecuencias

Son numerosas y se pueden citar:

- sobrecarga de una fuente autónoma,
- desequilibrio del balance energético de la red,

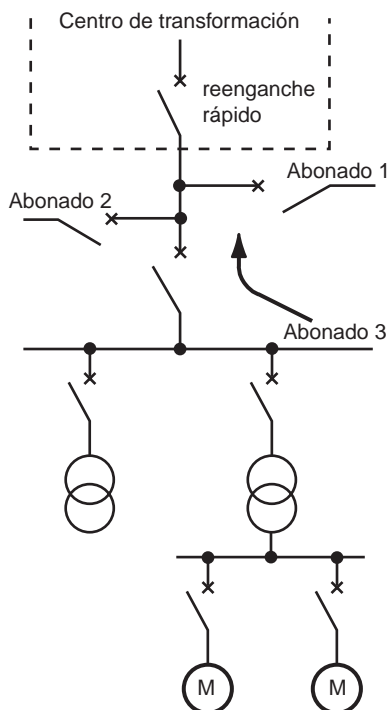


Fig. 1.

■ fallos de selectividad en la técnica selectiva cronométrica si a una inversión del sentido de la energía le sigue un defecto eléctrico,

■ que el alternador pase a arrastrar a la turbina o diesel depauperados.

### Medios de protección

Empleo de un relé a retorno de corriente activa, o de un relé de potencia activa direccional. En el caso de la que la red esté equilibrada en tensión y en intensidad, el relé puede ser monofásico.

El relé amperimétrico controla el valor algebraico de:

$$I_{act} = I \cos \varphi,$$

lo que da, a tensión constante:

$$P_W = U_N \sqrt{3} I \cos \varphi$$

## Variación de tensión

### Causas

#### ■ bajadas de tensión

Las bajadas de tensión se deben a una sobrecarga de la red o a un mal funcionamiento del regulador de tensión en carga del transformador o de un regulador.

#### ■ sobretensiones

Las sobretensiones pueden deberse a un mal funcionamiento en carga de un regulador, de un regulador de velocidad, o de la disminución brusca de la potencia demandada.

### Consecuencias

■ las bajadas de tensión disminuyen el par de los motores. En efecto:

$C_m = kU^2$ , para una velocidad dada ( $\omega$ ), en donde:

$C_m$ : par motor,

$U$ : tensión de la red.

La disminución del par de un motor asíncrono conlleva:

□ un aumento del tiempo de arranque:

$$C_m - C_r = J \frac{d\omega}{dt}$$

$J = mr^2$ : momento de inercia del grupo,

$C_r$ : momento resistente.

Si en la puesta en marcha  $C_m = C_r$ , el motor no acelera, «ronca» y sus pérdidas son importantes.

□ una reducción de la velocidad en marcha normal, lo que generalmente hace aumentar la intensidad absorbida, las pérdidas por efecto Joule en el estator y, especialmente, las pérdidas rotóricas.

■ las elevaciones de tensión provocan un calentamiento de los circuitos magnéticos por aumento de las pérdidas en el hierro. Este calentamiento es independiente del estado de carga de la máquina y no es por tanto controlado por los relés de sobrecarga.

### Medios de protección

Se utilizará un relé de protección contra las bajadas de tensión:

- controlar el funcionamiento de los reguladores de tensión,
- descargar la red de los consumos no prioritarios,
- cortar la alimentación de los motores si la tensión de alimentación es demasiado baja. Se empleará un relé de tensión máxima para controlar los reguladores y los compensadores en carga.

## Presencia de una componente inversa en marcha monofásica

### Causas

En el conjunto de una red, se origina una componente inversa de tensión cuando se corta un conductor de fase de la línea, o a causa de un gran consumo monofásico conectado entre fases. La influencia de un defecto externo provoca la aparición de una componente inversa de la intensidad en los arrollamientos de la máquina de red que alimenta a la red con defecto.

Si el corte de la fase se encuentra en la canalización de la máquina, ésta sufre un desequilibrio completo.

También aparece un desequilibrio por corriente inversa cuando se produce un corte en el devanado de una máquina, o un cortocircuito entre espiras de un mismo arrollamiento.

## Consecuencias

Los elementos de la red que presentan una impedancia inversa  $Z_i$ , distinta de la impedancia directa  $Z_d$ , son sensibles a la componente inversa de la tensión. Son las máquinas rotativas las que más acusan esta componente, pues reaccionan de forma diversa según que su sentido de giro coincida con el del campo inductor o sea opuesto al mismo. Se observa en estas máquinas un calentamiento peligroso de la jaula rotórica o de la jaula de amortiguamiento (máquinas síncronas), una reducción del par motor y del rendimiento: imposibilidad de arrancar si falta una fase, ralentización de los motores asíncronos.

El fenómeno no es necesariamente detectado por simples relés térmicos.

## Medios de protección

Son:

■ **preventivos:** evitar que el corte de la fase externa se traduzca con el tiempo en un defecto interno,

■ **curativos:** por detección de una anomalía en el devanado de una máquina, aparte del cortocircuito entre fases, o de un defecto de aislamiento.

A este propósito se emplea un relé de desequilibrio inverso de máxima componente inversa.

Todo sistema trifásico desequilibrado de tensiones, o de intensidades, se descompone en una suma, fase a fase, de dos sistemas equilibrados: trifásico directo (sucesión 1, 2, 3), trifásico inverso (sucesión 1, 3, 2) y un sistema trifásico homopolar, (1, 2, 3, en fase) (figura 2) y por tanto un sistema que relaciona las intensidades a sus componentes simétricas. El mismo razonamiento es válido aplicado a las tensiones.

Vectorialmente, o en números complejos podemos escribir:

$$\begin{aligned}\overline{I_1} &= \overline{I_{1d}} + \overline{I_{1i}} + \overline{I_{1h}} \\ \overline{I_2} &= \overline{I_{2d}} + \overline{I_{2i}} + \overline{I_{2h}} \\ \overline{I_3} &= \overline{I_{3d}} + \overline{I_{3i}} + \overline{I_{3h}}\end{aligned}$$

Tomando la fase 1 como referencia:

$$\begin{aligned}\overline{I_{1d}} &= \overline{I_d} \\ \overline{I_{1i}} &= \overline{I_i} \\ \overline{I_{1h}} &= \overline{I_h}\end{aligned}$$

Con la ayuda del operador:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

podemos expresar  $I_1, I_2, I_3$ , en función de:

$$\begin{aligned}\overline{I_d}, \overline{I_i}, \overline{I_h}, \\ \overline{I_1} &= \overline{I_d} + \overline{I_i} + \overline{I_h} \\ \overline{I_2} &= \alpha^2 \overline{I_d} + \alpha \overline{I_i} + \overline{I_h} \\ \overline{I_3} &= \alpha \overline{I_d} + \alpha^2 \overline{I_i} + \overline{I_h}\end{aligned}$$

Las componentes de tensión y de corriente están relacionadas por:

la impedancia directa:

$$\overline{Z_d} = \frac{\overline{V_d}}{\overline{I_d}}$$

la impedancia inversa:

$$\overline{Z_i} = \frac{\overline{V_i}}{\overline{I_i}}$$

la impedancia homopolar:

$$\overline{Z_h} = \frac{\overline{V_h}}{\overline{I_h}}$$

En todo cuanto sigue tomaremos

$\overline{V_h} = \overline{I_h} = 0$ , hipótesis que se verifica en ausencia de un defecto fase tierra, en el sistema trifásico a 3 hilos.

Para una línea:

$$\overline{Z_d} = \overline{Z_i}$$

Para un transformador:

$$\overline{Z_d} = \overline{Z_i} = \frac{\overline{V_d}}{\overline{I_d}} = \frac{\overline{V_i}}{\overline{I_i}}$$

Para un motor girando:

$$\overline{Z_d} \neq \overline{Z_i} \quad \overline{Z_i} < \overline{Z_d}$$

Tracemos, a tensión constante, el diagrama del circuito simplificado  $I(g)$ , de un motor de inducción (figura 3).

Con el motor en marcha, se toman los siguientes valores:

■ la relación:

$$\frac{\overline{Z_d}}{\overline{Z_i}} = \frac{\text{impedancia directa}}{\text{impedancia inversa}}$$

■ la relación entre el deslizamiento directo  $g_d$  y el deslizamiento inverso  $g_i$ . Se demuestra seguidamente que la energía de frenado (debida a la componente inversa) se disipa en el rotor.

Supongamos que el motor es arrastrado por la carga, a velocidad  $\omega$  en sentido inverso al campo

giratorio  $\frac{\omega}{p}$ , el deslizamiento

$$g = 1 - \frac{\Omega}{\omega} \text{ es mayor que 1. Este tipo}$$

de funcionamiento corresponde a un frenado contra corriente, o a la componente inversa de la intensidad debida, por ejemplo, a la ruptura de

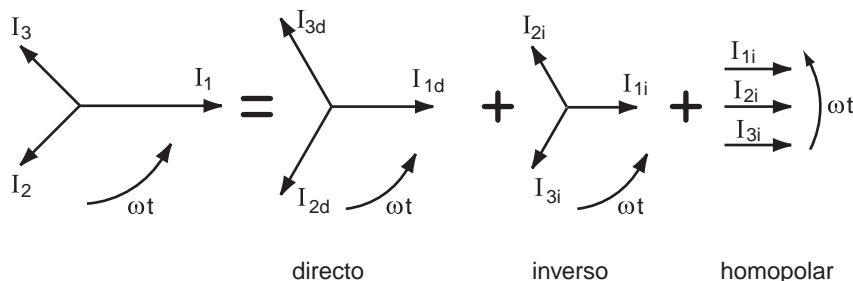
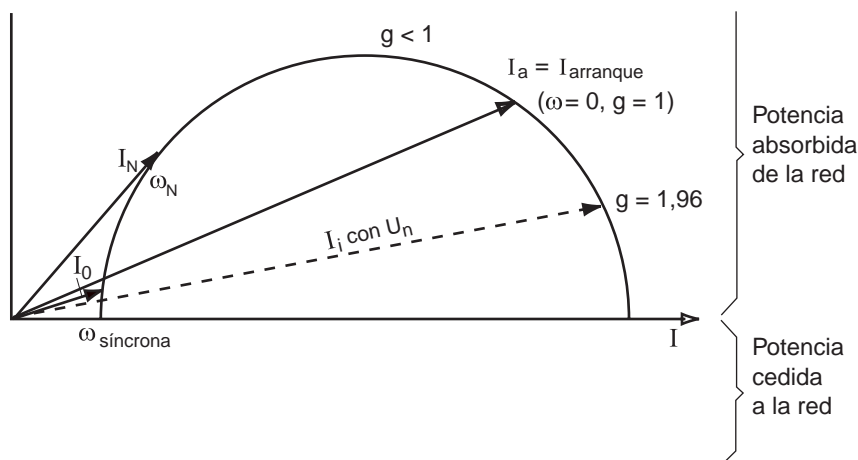


Fig. 2.





**Fig. 3:** Diagrama de círculo (g).

una fase, lo que provoca un campo giratorio parásito de sentido inverso al de rotación del eje. A tensión constante, si  $g > 1$ , la intensidad absorbida es mayor que la intensidad de arranque  $I_D$ , y ésta mayor que la intensidad nominal:

$$I_{N(gn)} < I_a < I_{(g>1)}.$$

En general, en las condiciones nominales de funcionamiento el deslizamiento  $g_n$  es del orden de 0,04.

Un ensayo a contra corriente realizado a la velocidad nominal  $\omega = -\omega_n$  ( $g = 1,96$ ) y extrapolado a la tensión nominal permite escribir:

$$\frac{I(g=1,96)}{I_N(g_n=0,04)} = \frac{Z_d}{Z_i}$$

en funcionamiento normal,

y como  $I_a(g=1) < I(g=1,96)$

$$\text{se tiene } \frac{I_D}{I_N} < \frac{Z_d}{Z_i}$$

según el diagrama  $I(g)$  de la **figura 3**.

En una primera aproximación  $\frac{Z_d}{Z_i}$

oscila entre 6 y 7.

En general la intensidad de arranque  $I_D$  es función de:

$\omega$  = pulsación  $2\pi f$

$p$  = número de pares de polos

$\omega/p$  = velocidad del campo giratorio (velocidad de sincronismo)

$\Omega$  = velocidad de giro del eje

Se demuestra que si un motor es alimentado con un porcentaje,  $t$ , de componente inversa de la tensión:

$$t = \frac{V_i}{V_d} \text{ la tasa de componente}$$

inversa de la intensidad será:

$$\frac{I_i}{I_d} > t \frac{I_D}{I_N}$$

lo que explica que se alcancen rápidamente valores elevados de la componente inversa de la intensidad.

#### Energía perdida en el rotor de una máquina asíncrona

El deslizamiento viene expresado

$$\text{por la relación: } g = \frac{\frac{\omega}{p} - \Omega}{\frac{\omega}{p}} = 1 - \frac{\Omega}{\frac{\omega}{p}}$$

Se pueden apreciar dos puntos singulares:

$g = 0$  para  $\Omega = \omega/p$  (máquina síncrona), y

$g = 1$ , para  $\Omega = 0$  (máquina con tensión y parada).

Las corrientes inducidas en el rotor tienen la pulsación  $\omega = g \omega$ .

La posibilidad de una alimentación que presente una componente inversa permite definir dos deslizamientos:

un deslizamiento directo:

$$g_d = 1 - \frac{\Omega}{\frac{\omega}{p}},$$

y un deslizamiento inverso:

$$g_i = 1 + \frac{\Omega}{\frac{\omega}{p}}$$

de donde se deduce que

$$g_d + g_i = 2.$$

En una máquina asíncrona, con un débil porcentaje de componente inversa se tiene

$$g_d = 0,04 \text{ y } g_i = 1,96.$$

En una máquina síncrona:

$$g_d = 0 \text{ y } g_i = 2.$$

Las corrientes inducidas en el amortiguador de una máquina síncrona por la componente inversa tienen la pulsación  $2\omega$ .

En general se tiene:

$$0 \leq g_d \leq 1$$

$$1 \leq g_i \leq 2.$$

En la **figura 4** se indica el análisis energético de un motor asíncrono despreciando las pérdidas estáticas por efecto Joule y las pérdidas mecánicas.

#### Esquema energético de un motor asíncrono despreciando las pérdidas estáticas y las pérdidas mecánicas

**Sistema directo:** alimentación normal, trifásica equilibrada (**figura 5**).

**Sistema inverso:** contribución de la componente inversa de la tensión, en una alimentación trifásica desequilibrada (**figura 6**).

La potencia útil en el eje es disminuida por la presencia de una componente inversa.

Las pérdidas rotóricas debidas a la componente inversa vienen dadas por la suma de dos energías:

- la que se absorbe de la red,
- y la que se toma del eje (frenado).

En el supuesto de una componente inversa de la tensión de

$$\left( \frac{V_i}{V_d} = 0,025 \right), \text{ que da una}$$

componente inversa de la intensidad

$$\text{de } \left( \frac{I_i}{I_d} = 0,15 \right), \text{ se demuestra que}$$

las pérdidas rotóricas se incrementarán entre un 5 y un 6%, con relación a las mismas pérdidas en régimen equilibrado.

Los datos de los cálculos numéricos dan los siguientes valores:

$$\frac{Z_d}{Z_i} = 6$$

$$\cos \varphi_i \approx 0,25$$

$$\cos \varphi_d \approx 0,85$$

$$g_i = 1,96$$

$$g_d = 0,04$$

En marcha monofásica  $\left( \frac{I_i}{I_d} = 1 \right)$

las pérdidas rotóricas pueden triplicarse.

Con todo rigor, se deberán tener en cuenta:

- las pérdidas estatísticas,
- la reducción de la velocidad a consecuencia de la disminución del par resultante.

Vemos con esto todo el interés que tiene el relé sensible a la componente inversa de la intensidad, relé de protección rotórica por excelencia.

## Frecuencia de arranque demasiado elevada

### Causas

- mal funcionamiento del automatismo de mando,
- accionamiento manual demasiado frecuente,
- o, mucho peor, una serie de reconexiones con defecto.

### Consecuencias

Además de un exagerado calentamiento del estator y particularmente del rotor, se produce una sucesión de choques mecánicos en los acoplamientos y en las cabezas de bobina perjudiciales para los materiales, en particular para los aislantes.

Anotemos que un defecto fase-masa, a menudo, es la consecuencia de la rotura de los aislantes de las cabezas de bobina en el extremo de las ranuras.

	Sistema directo	Sistema inverso
Potencia eléctrica global	$= C_{md} \frac{\omega}{p}$	$+ C_{mi} \frac{\omega}{p}$
=		
Pérdidas rotóricas	$= C_{md} g_d \frac{\omega}{p}$	$+ C_{mi} g_i \frac{\omega}{p}$
+		
Potencia disponible en el eje	$= C_{md}(1-g_d) \frac{\omega}{p}$	$+ C_{mi}(1-g_i) \frac{\omega}{p}$

Fig. 4.

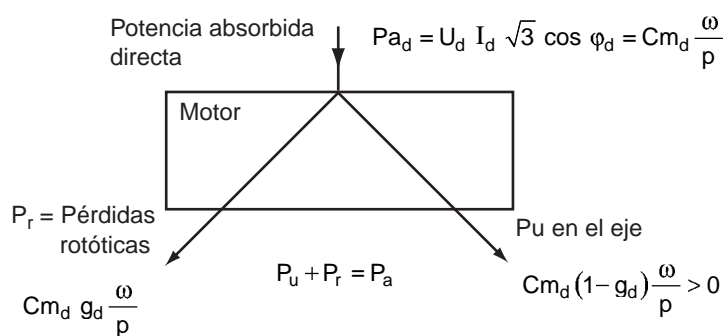


Fig. 5.

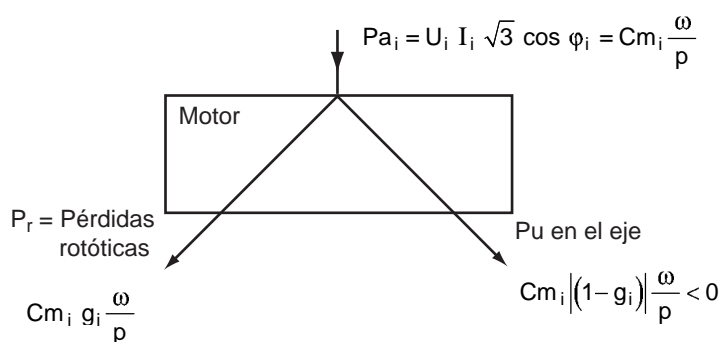


Fig. 6.

### Medios de protección

Se empleará un relé de protección, que cuente el número de arranques durante un tiempo determinado.

Si el número de arranques efectuados durante un tiempo determinado excede del número de

arranques permitido, el relé bloqueará las ordenes de conexión durante un intervalo de tiempo predeterminado. El relé permite limitar la frecuencia de los arranques a un valor fijado por el constructor del motor.

## Agarrotamiento en marcha de un motor asíncrono y arranque demasiado largo

### Causas

Los bloqueos mecánicos de un motor en marcha son debidos:

- sea a un defecto mecánico: agarrotamiento,
- sea a una explotación que tiene riesgos especiales de agarrotamiento, como por ejemplo, el motor de una quebrantadora.

Los bloqueos se producen cada vez que el par resistente es mayor que el par motor máximo.

Los arranques demasiado largos se producen cuando el motor está cargado en exceso, o está alimentado con una tensión reducida.

### Consecuencias

El agarrotamiento del motor origina un choque mecánico sobre los acoplamientos, cojinetes, bobinados, etc.

El calentamiento es muy rápido, pues la intensidad alcanza el valor de la corriente del arranque  $I_D$  y la energía absorbida de la red se disipa principalmente en el rotor. La falta de ventilación aumenta la temperatura.

El arranque demasiado largo provoca esfuerzos térmicos perjudiciales para la esperanza de vida de los aislantes.

### Medios de protección

Se utilizará un relé de máxima intensidad, inhibido durante el periodo de arranque.

Se presentan dos casos:

- al final del periodo normal de arranque la intensidad sigue siendo superior al valor nominal:

se tratará de un arranque muy largo debido a un par acelerador muy bajo,

- en marcha normal, la intensidad alcanza rápidamente el valor de la corriente de arranque:

el motor se ha agarrotado.

El relé corta rápidamente la alimentación del motor para limitar las consecuencias del defecto.

Si, a la puesta en marcha del motor, existe el riesgo de que el rotor quede agarrotado, éste deberá soportar el calentamiento correspondiente durante un tiempo superior al tiempo de arranque.

Un estudio de la evolución de la intensidad y si es posible, del factor de potencia, durante el tiempo de arranque:  $I = f_1(t)$ ;  $\cos \varphi = f_2(t)$ , permitirá determinar si es posible la utilización de un relé de máxima intensidad, o de un relé de impedancia (figura 7).

## Descebado de las bombas

Es una protección específica de las bombas aspirantes.

### Causas

La ausencia de líquido en la bomba, su no cebado o el descebado de la misma, el funcionamiento con las válvulas cerradas, son las causas que pueden llevar al deterioro de la bomba por calentamiento.

### Consecuencias

El síntoma de que la bomba está descebada, o no eleva líquido, lo da la corriente absorbida por el motor eléctrico de accionamiento.

## Medios de protección

Se utilizará un relé de corriente mínima enclavado en el arranque y regulado entre:

- la corriente de vacío, o con las válvulas cerradas,
- la corriente absorbida en régimen normal de funcionamiento de la bomba.

Si las condiciones de explotación indican que la diferencia entre los valores anteriores es demasiado pequeña, diferencia en la que intervienen los diferentes errores de precisión, se podrán tener en cuenta las variaciones del factor de potencia y utilizar un relé de mínima potencia activa.

## Pérdida de la excitación de las máquinas síncronas

### Causas

Pueden ser una reducción notable de la corriente de excitación o una ruptura del devanado inductor.

### Consecuencias

Con objeto de compensar la pérdida de la energía magnetizante del

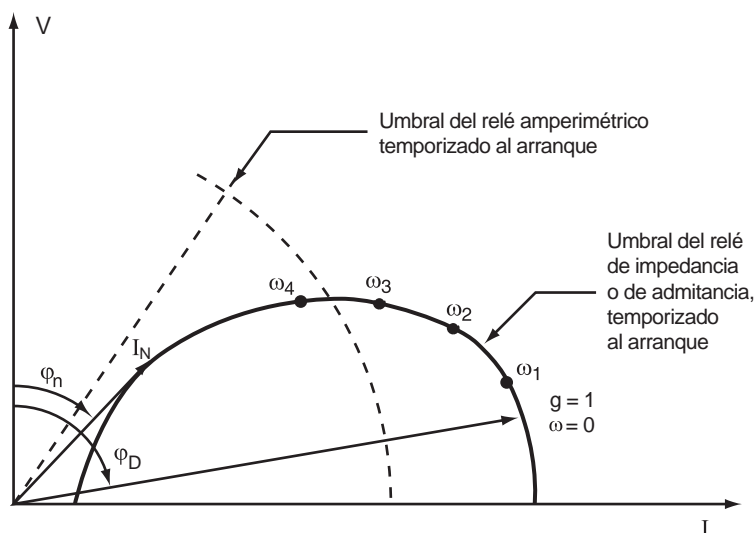


Fig. 7.

inductor, la máquina la absorbe de la red bajo la forma de energía reactiva. El efecto se traduce por una reducción del factor de potencia. Si el defecto viene seguido de una pérdida del sincronismo, el rotor y la jaula de amortiguamiento soportarán corrientes inducidas que pueden producir fuertes calentamientos en los mismos.

### Medidas de protección

Se puede emplear un relé de mínima de corriente continua en el circuito de excitación, si éste es accesible.

De no ser posible, la protección deberá detectar el aumento de energía reactiva absorbida. Se utilizará a tal efecto, un relé direccional de corriente reactiva o de energía reactiva.

Aplicados a la protección de un motor síncrono estos relés deberán inhibirse durante el arranque asíncrono del motor.

## Variación de la frecuencia

### Causas

Se pueden citar entre las causas de variación de la frecuencia:

- las sobrecargas de una red, alimentada por fuentes de potencia limitada (redes autónomas),

- la ausencia de control de sincronismo de un alternador o de un motor síncrono bajo micro-rupturas de la red (reenganche rápido). Es el caso de las microcentrales conectadas a una red,

- corte de la alimentación de una estación equipada de grandes motores asíncronos,

- mal funcionamiento del regulador de velocidad de un grupo motor alternador.

### Consecuencias

Las variaciones de frecuencia enclavan los pilotajes y harán necesarias las operaciones de acoplamiento al reiniciar la explotación normal.

- las variaciones de frecuencia perjudican el funcionamiento de los receptores síncronos (registradores, relojes, etc.),

- las variaciones de frecuencia modifican las pérdidas en el hierro de los circuitos magnéticos.

### Medios de protección

A partir del control de la frecuencia por un relé de regulación (mini-maxi o los dos):

- se realiza una desconexión selectiva suprimiendo los consumidores no prioritarios en caso de sobrecarga,

- se fracciona la red en redes elementales si aparece una perturbación en la frecuencia, perturbaciones a menudo debidas a una fuerte sobrecarga o a un defecto eléctrico.

La perturbación de frecuencia será mucho más importante, si el defecto no se elimina rápidamente. En estas condiciones, se pondrá a prueba la estabilidad de las máquinas síncronas de la red. Los motores serán adecuadamente desconectados de la red.

- se aíslan las microcentrales que no tienen un sistema de control síncrono,

- desconexión de una estación con grandes motores asíncronos bajo microcortes de la red (reenganche rápido y lento).

En la tabla de la **figura 8** se puede ver un resumen de los principales defectos descritos.

<b>Defecto</b>	<b>Origen del defecto</b>	<b>Duración del defecto</b>	<b>Particularidad del relé recomendado</b>
<b>Cortocircuito entre fases</b>	eléctrico	permanente	con enclavamiento
<b>Defecto fase-tierra</b>	eléctrico	permanente	con enclavamiento
<b>Error de acoplamiento</b>	eléctrico error de explotación	fugitivo	con enclavamiento
<b>Sobrecarga</b>	mecánico error de explotación	fugitivo	con enclavamiento (bajo precaución, sin enclavamiento)
<b>Inversión del sentido de circulación de la energía, en ausencia de defecto eléctrico</b>	mecánico o error de explotación	fugitivo	con enclavamiento si es mecánico
<b>Variación de la tensión</b>	eléctrico o error de explotación	permanente o fugitivo si es debido a una sobrecarga	con o sin enclavamiento
<b>Fallo de una fase</b>	eléctrico	permanente	con enclavamiento
<b>Presencia de una componente inversa</b>	eléctrico	permanente o fugitivo	con enclavamiento (bajo condiciones, sin enclavamiento)
<b>Frecuencia de arranques muy elevada</b>	azares del mando	fugitivo	sin enclavamiento
<b>Agarrotamiento del rotor</b>	mecánico	permanente	con enclavamiento
<b>Descebado de la bomba hidráulica</b>	mecánico	permanente	con enclavamiento
<b>Pérdida de la excitación</b>	eléctrico	permanente	con enclavamiento
<b>Variación de la frecuencia</b>	mecánico o sobrecarga	permanente o fugitivo	con enclavamiento (sin enclavamiento)

El enclavamiento es un mecanismo de cerrojo que deja al operador un tiempo de reflexión antes de reanudar el servicio. El enclavamiento de los relés es imperativo en el caso de defectos permanentes. El enclavamiento es aconsejable en caso de errores de explotación.

**Fig. 8:** Principales defectos que se encuentran en las redes.

## 2 Relés de protección

### Definición

Los relés de protección son dispositivos, más o menos complejos, que deciden una acción, generalmente la apertura de un interruptor automático, si aparece un defecto en la red, en la alimentación o en la máquina controlada.

Estos dispositivos se denominan «relés», porque son unos intermediarios entre una magnitud física controlada y un disparador. En AT son del tipo indirecto, por cuanto toman la información a través de captadores (TC, TT, toroides).

La utilización de relés directos en AT va disminuyendo porque son rudimentarios, imprecisos y de difícil instalación debido a las distancias de aislamiento que hay que respetar.

Ante un defecto, los relés dan la orden de apertura a los interruptores automáticos (figura 9).

Un relé puede ser:

■ **de alimentación propia (o autónomo):** toma la energía de la red a través de captadores,

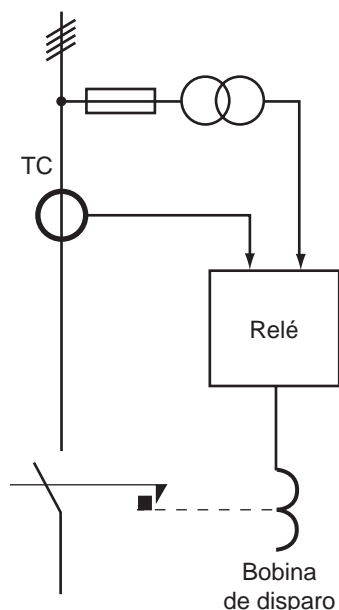


Fig. 9.

■ **de alimentación auxiliar:** toma la energía necesaria para su funcionamiento de una fuente auxiliar de tensión (continua o alterna).

### Relés de corriente máxima para la detección de cortocircuitos entre fases

Este relé tiene (figura 10):

■ un ajuste de intensidad,  
■ una temporización, en la que el instante inicial corresponde al de rebase del umbral y el final a la orden de apertura del interruptor automático,

□ la temporización puede ser fija, para cualquier exceso del umbral: relé a tiempo constante o a tiempo independiente.

El usuario puede ajustar el margen de intensidad y la temporización:

□ la temporización puede depender del desvío entre la corriente de sobrecarga y el umbral del relé:

es el caso del relé a tiempo dependiente o a tiempo inverso.

La temporización está especificada para un valor de corriente ( $10 I_r$ ) y es regulada por el usuario. El transformador de corriente de alimentación no debe saturarse

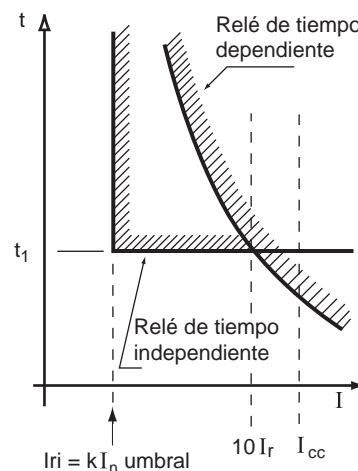


Fig. 10.

dentro del campo de la curva útil del relé.

El relé es generalmente bipolar, si está asociado a un relé amperimétrico homopolar (contra los defectos fase-masa).

**Otras características (figura 11)**

■ tiempo de memoria después de la desaparición de un defecto: es la diferencia de tiempo entre el defecto de más larga duración que

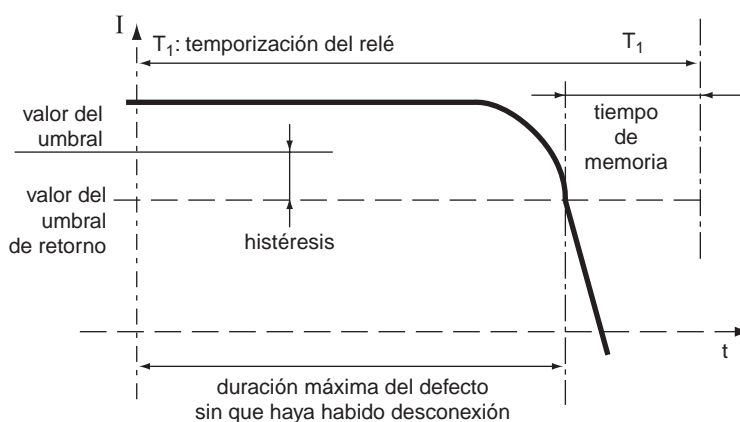


Fig. 11.

no produce el disparo y la temporización del relé. Este tiempo debe ser lo más limitado posible para facilitar la selectividad cronométrica.

- el umbral de retorno es el valor de la magnitud controlada (o magnitud regulada) que provoca el retorno del detector del relé al estado de espera (o de reposo),

- el tiempo de retorno es la diferencia de tiempo entre el paso del umbral de retorno y el momento en que el relé electromagnético de salida vuelve a alcanzar el reposo. Es igual al tiempo de memoria, incrementado en el tiempo de puesta a cero de la temporización y el tiempo de vuelta al reposo del relé electromagnético de salida. El tiempo de retorno de un relé con enclavamiento no es determinante.

## Relé de corriente máxima para la protección de máquinas contra cortocircuitos internos

Es un relé tripolar que mide la intensidad diferencial longitudinal de fase.

El relé es sensible únicamente a los defectos internos que se sitúan entre los dos transformadores de corriente que delimitan la zona protegida (figura 12).

Para el par de transformadores de medida,  $i_A$  e  $i_B$  son imágenes de  $I_A$  e  $I_B$ .

$$\overline{i_A} = k \overline{I_A}$$

$$\overline{i_B} = k \overline{I_B}$$

$$i_{\text{que atraviesa el relé}} = \overline{i_A} - \overline{i_B} = k(\overline{I_A} - \overline{I_B})$$

En ausencia de defecto interno en la zona comprendida entre los dos captadores, la intensidad de entrada en una fase  $I_A$  es igual a la intensidad de salida  $I_B$ . La ventaja del relé diferencial es que permite una regulación por debajo de la corriente nominal  $I_N$ .

El relé sólo es sensible a los defectos internos que suponen una:

$$\overline{I_A} - \overline{I_B} \neq 0$$

El relé puede ser:

- a porcentaje

$$\frac{i}{\frac{|i_A| + |i_B|}{2}}$$

o

- a valor real, pero graduado en

$$s\% = \frac{i_s}{I_N}$$

En este caso, cada elemento de medida del relé se pone en serie con una resistencia de estabilización R.

Esta resistencia R aumenta artificialmente la impedancia del relé. De esta forma si uno de los dos transformadores de corriente, por causa de un defecto externo, se satura, la corriente de medida  $i = i_A - i_B$  no alcanzará el valor de umbral.

El valor de la resistencia R se elegirá para que:

$$\square R \cdot (s\% I_N) \geq (R_2 + R_1) i_A$$

$$\square R \cdot (s\% I_N) + (R_2 + R_1) i_A < \frac{U_c}{2}$$

R: resistencia de estabilización,  
s% x  $I_N$ : corriente de umbral,

$R_2$ : resistencia del secundario del transformador de corriente,

$R_1$ : el mayor valor de las dos resistencias del bucle A o B del relé a los transformadores de medida,

$i_A$ : el mayor valor de la corriente de cortocircuito teórica para un defecto externo; el ejemplo supone que se satura el transformador A,

$U_c$ : tensión de codo de los transformadores de corriente (TC).

Esto implica transformadores clase PS, o sea 30 VA 5P 15.

La regulación del relé será del 15 al 20% de  $I_N$ .

- este relé puede proteger los juegos de barras en los casos más simples,

- en el marco de la protección de un transformador, es necesario compensar la relación de transformación de éste:

- en magnitud: compensación del número de espiras,

- en fase: compensación del índice horario, la rapidez de intervención, la distinción entre la punta de conexión y el disparo bajo un cortocircuito, hacen que este relé sea complejo.

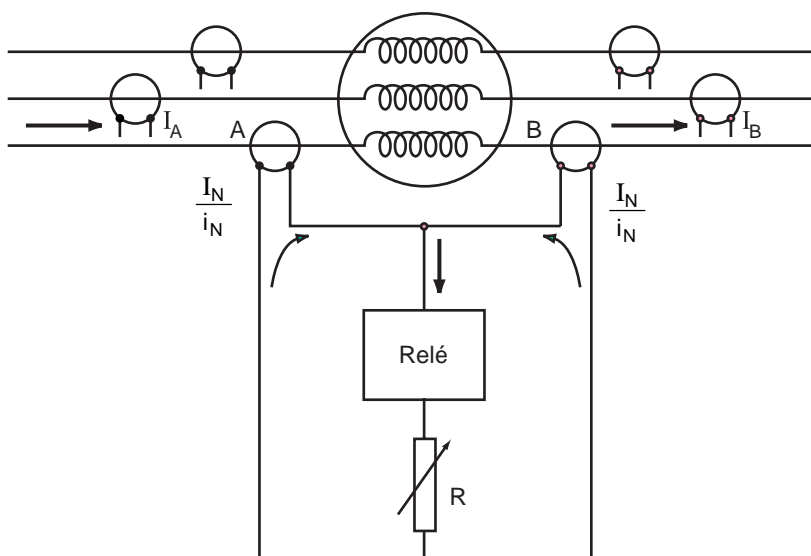


Fig. 12.



## Relé de corriente máxima para la detección direccional o de retorno de corriente de los cortocircuitos fase-fase

Se trata de un relé de corriente máxima en el que la sensibilidad está supeditada a la «fase» de la corriente respecto a la tensión.

El relé tiene en consecuencia:

- un umbral de intensidad dependiente de la fase de la corriente respecto a la tensión,
- una temporización en la que el instante inicial corresponde al paso del umbral, bajo una cierta condición de la fase (o defasaje).

Salvaguardando la continuidad de servicio en la distribución con dos líneas en paralelo, el relé es capaz de eliminar muy rápidamente las corrientes de cortocircuito de retorno por desconexión aguas abajo de las dos líneas, dejando a continuación a los relés de máxima intensidad, con selectividad cronométrica o lógica, la tarea de cortar definitivamente el cortocircuito de la línea con defecto.

El relé es inoperante si el cortocircuito se produce en el juego de barras alimentado por dos líneas en paralelo. Para que responda a esta incidencia se debe discriminar en un conductor  $-\overline{I_{cc}}$  de  $+\overline{I_{cc}}$ , o dicho de otra forma el signo de  $\cos \varphi_{cc}$ :

Desconexión para  $-\overline{I_{cc}}$

No disparo para  $+\overline{I_{cc}}$

Se compara a este propósito el desfase del vector representativo de la corriente de una fase con un

vector «eje característico del relé» ligado a la tensión entre las otras dos fases.

Se observará que esta comparación debe ser bastante laxa para permitir el buen funcionamiento sobre todos los cables y para todas las distancias del cortocircuito al relé. Además el relé debe tener una alta sensibilidad a la tensión, pues ésta es muy reducida en los cortocircuitos trifásicos equilibrados próximos al relé.

El esquema y el diagrama vectorial de principio aclaran el funcionamiento (figura 13).

Al ser el relé generalmente unipolar, se demuestra que son necesarios y suficientes dos relés para poner en evidencia el cortocircuito trifásico equilibrado y los tres cortocircuitos bifásicos.

Se deberá seguir el esquema de cableado que da el constructor.

□ cortocircuito trifásico de impedancia nula (atornillado):

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x}{r}$$

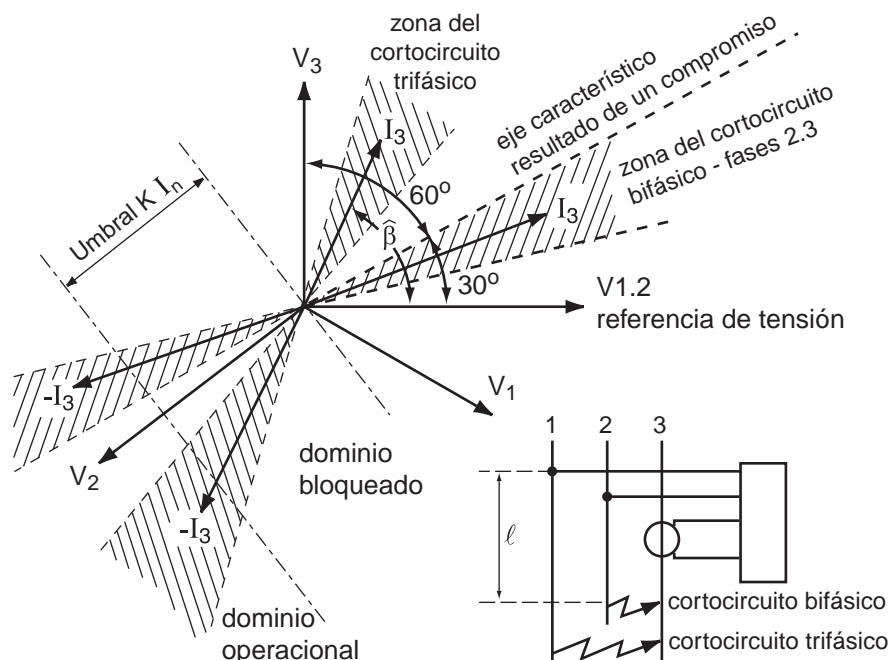


Fig. 13.



□ cortocircuito bifásico de impedancia nula (atornillado) fases 2.3:

$$t_g \beta = \frac{\sqrt{3} R + \ell (r\sqrt{3} - x)}{\sqrt{3} X + \ell (r\sqrt{3} + r)}$$

en general  $\beta$  = entre  $15^\circ$  y  $30^\circ$ ,

$U_{1.2}$ : tensión de referencia,

$x$ : inductancia por unidad de longitud del cable cortocircuitado,

$r$ : resistencia por unidad de longitud del cable cortocircuitado,

-  $I_3$ : corriente que da origen al disparo,

+  $I_3$ : corriente que no determina el disparo,

$R$  y  $X$ : componentes de la impedancia de la red vista lado aguas arriba del punto de lectura de la tensión,

$\ell$ : longitud del cable desde el defecto al punto de medida de la tensión (figura 14).

### Relé diferencial longitudinal de máxima intensidad, para la protección de líneas contra los cortocircuitos

Este relé se asemeja al diferencial longitudinal para la protección de máquinas contra los cortocircuitos.

La transmisión, fase por fase de la información, «intensidad», en los puntos de lectura límites de la zona protegida, se reduce de 4 a 2 hilos, lo que supone una buena economía en la transmisión a largas distancias. (Figura 15).

La información de la igualdad de corrientes de entrada y salida de la zona protegida, por fase, se transmite por 2 conductores por el principio de una combinación lineal única de los vectores de intensidad. Este principio tiene validez para un régimen senoidal, por lo que es necesario que los transformadores no lleguen a saturarse. Ésta es una de las razones de la dificultad de esta protección.

Además debe añadirse que la línea piloto debe tener corrientes de fuga muy débiles y que no se han de

producir efectos inductivos por proximidad con los conductores de potencia.

Éstas son las exigencias que determinan las peculiaridades entre los constructores.

La utilización de las protecciones diferenciales se generaliza en los bucles cerrados con un número cualquiera de centros de transformación intermedios. La selectividad es total y la continuidad de la distribución es segura.

### Relé de corriente máxima para la detección de los defectos fase-masa o fase-tierra

(utilizable en régimen de neutro débilmente impedante)

Es un relé similar al de protección contra los cortocircuitos fase-fase,

pero unipolar y mucho más sensible. Detecta las corrientes de defecto fase-tierra, llamadas corrientes homopolares.

La imprecisión de los relés a tiempo inverso para valores reducidos de la corriente de defecto fase-tierra y la pequeña impedancia relativa de las líneas (caída de tensión según la posición del defecto) respecto a las impedancias red-tierra, hacen que se aconseje utilizar un relé a tiempo constante.

Los captadores son:

■ 3 transformadores de corriente que en la conexión neutro de sus secundarios dan el valor de la intensidad de defecto:

$$I_d = I_1 + I_2 + I_3 = 3 I_h$$

siendo  $I_h$  la corriente homopolar, o

■ 1 transformador toroidal excitado por los 3 conductores de fase. Las espiras del toro concatenan un flujo magnético  $\Phi$ , igual a:

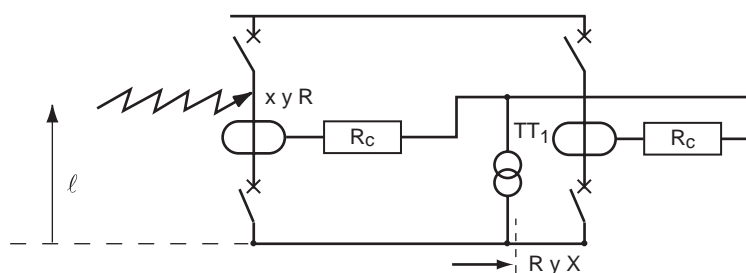
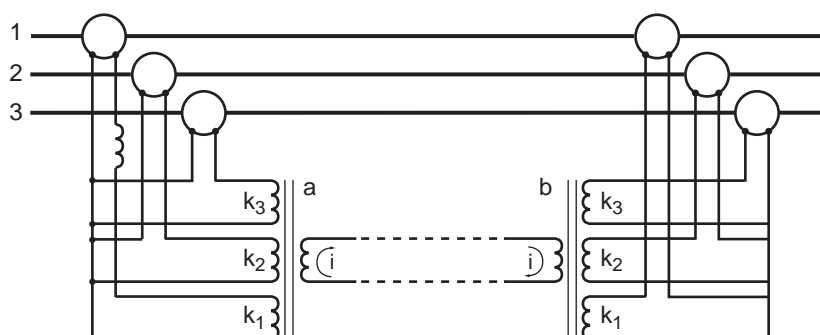


Fig. 14.



$$\begin{aligned} \overline{i}_a &= k_1 \overline{I}_{1a} + k_2 \overline{I}_{2a} + k_3 \overline{I}_{3a} \\ \overline{i}_b &= k_1 \overline{I}_{1b} + k_2 \overline{I}_{2b} + k_3 \overline{I}_{3b} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_a &= i_b, \text{ solamente si} \\ \overline{I}_{1a} &= \overline{I}_{1b}; \overline{I}_{2a} = \overline{I}_{2b}; \overline{I}_{3a} = \overline{I}_{3b}; \end{aligned}$$

Fig. 15.

$\overline{\phi} = \overline{\phi}_1 + \overline{\phi}_2 + \overline{\phi}_3$  lejos de la

saturación.  $\overline{\phi}_1, \overline{\phi}_2, \overline{\phi}_3$  son proporcionales a las corrientes de fase  $I_1, I_2, I_3$  y  $\overline{\phi}$ , al igual que la señal de salida del toro, son proporcionales a  $3 I_h$ .

Es conveniente respetar el montaje de la **figura 16** si los cables son blindados.

El relé es insensible a los terceros armónicos de la corriente generados por los terceros armónicos de la tensión y las capacidades de los cables (**figura 17**).

Veamos por qué es necesaria esta insensibilidad a los terceros armónicos.

Se pueden presentar dos casos:

■ la presencia de los terceros armónicos en los secundarios de los tres transformadores de corriente saturados cuando aparece una corriente importante,

■ la presencia de terceros armónicos de la tensión. En este caso y en ausencia de defecto, como se demuestra a continuación, se tiene una falsa corriente homopolar debida a las capacidades parásitas.

Despreciando la resistencia de aislamiento, la impedancia fase-tierra de un cable viene definida por:

$$Z_{\Omega} = \frac{1}{j C \omega}$$

$\omega$ : pulsación en rad/seg,

C: capacidad alma-pantalla, o conductor-tierra, en faradios.

Si aplicamos en el origen de la conexión, a cada uno de los cables de fase, una tensión respecto a tierra del mismo valor y de la misma fase,  $\overline{V}_1 = \overline{V}_2 = \overline{V}_3 = \overline{V}$  y se hace la conexión en vacío:

la corriente vista por el toro (o por los 3 transformadores TC) será:

$$I_c = (3 V) C \omega.$$

Esta corriente se identifica con una corriente de defecto fase-tierra

$$I_{\text{defecto}} = 3 V C \omega$$

o

$$\overline{I}_{\text{defecto}} = 3 \overline{I}_h = 3 j \overline{V}_h C \omega; \quad \overline{V} \text{ se}$$

identifica entonces con  $\overline{V}_h$ , y  $\overline{V} C \omega$  con la corriente homopolar  $I_h$ .

El oscilograma de la **figura 18** pone de manifiesto que el tercer armónico genera  $3.V$ .

En el oscilograma se destaca que las tensiones armónicas están en fase, teniendo V una tasa de componente armónica de 3:  $\tau$ .

$$\overline{V}_{(t)} = |V| \sqrt{2} \sin \omega t + \tau V \sqrt{2} \sin 3 \omega t$$

la suma de las tensiones V de cada

fase es igual a  $3 \tau V \sqrt{2} \sin 3 \omega t$  que corresponde a una tensión homopolar de 150 Hz, lo que demuestra que la tensión armónica es equivalente a una tensión homopolar.

La corriente armónica es equivalente a una corriente homopolar y (aún cuando no se tenga defecto fase-tierra, o sea, aún cuando en la onda

fundamental  $\overline{I}_1 + \overline{I}_2 + \overline{I}_3 = 0$ ) el toro ve una suma de 3 corrientes

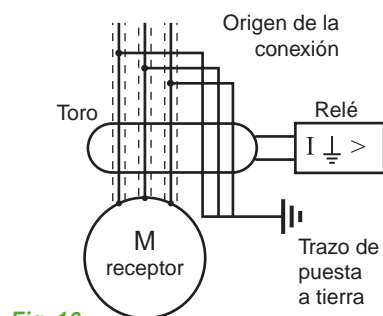


Fig. 16.

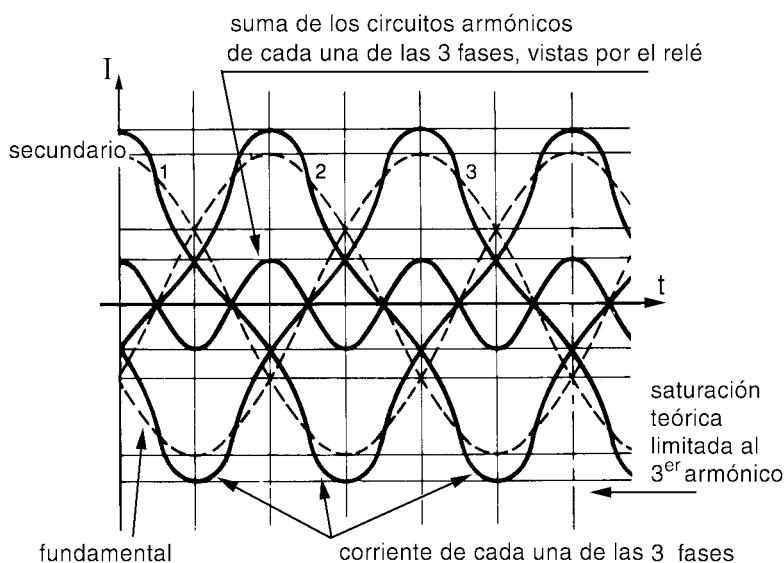
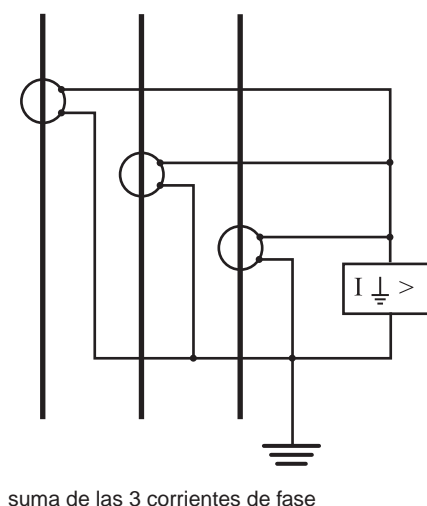


Fig. 17.



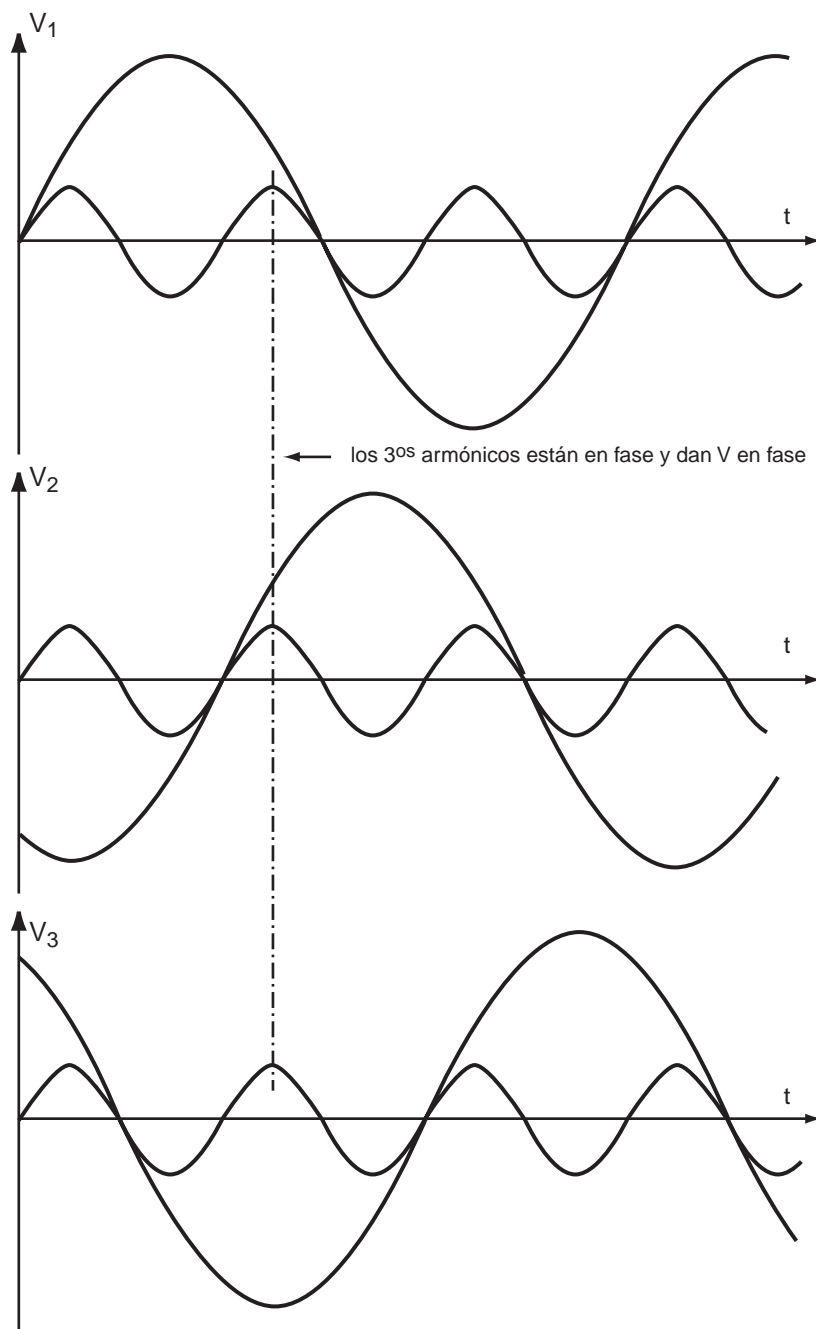


Fig. 18.

armónicas en fase, de lo que se deriva una alteración de la sensibilidad del relé, o incluso una desconexión intempestiva si no se han tomado las precauciones requeridas para insensibilizar el relé al 3<sup>er</sup> armónico y a los armónicos múltiples de 3.

### Relé de corriente máxima para la detección direccional (o de retorno de corriente) de los defectos fase-masa, o fase-tierra

El relé es casi idéntico al relé de corriente máxima para la detección direccional de las corrientes de cortocircuito fase-fase.

Se diferencian de este último en:

- la medida de la intensidad a partir de un toro que mide la corriente homopolar,
- la presencia de un filtro del 3<sup>er</sup> armónico en las entradas,
- la tensión de referencia del eje característico es la tensión homopolar, o tensión eléctrica tierra-neutro.

La utilización de un dispositivo auxiliar compuesto de 3 pequeños transformadores monofásicos, cuyos secundarios están conectados en serie, permite la elaboración de la tensión homopolar cuando la resistencia de limitación está muy alejada. El dispositivo imperativamente debe ser montado sobre 3 transformadores de tensión conectados en estrella (primarios y secundarios), con los neutros a tierra (es necesario realizar un estudio especial en el régimen IT supervisado por un medidor permanente del aislamiento).

Salvaguardando la continuidad de servicio, el relé es capaz de:

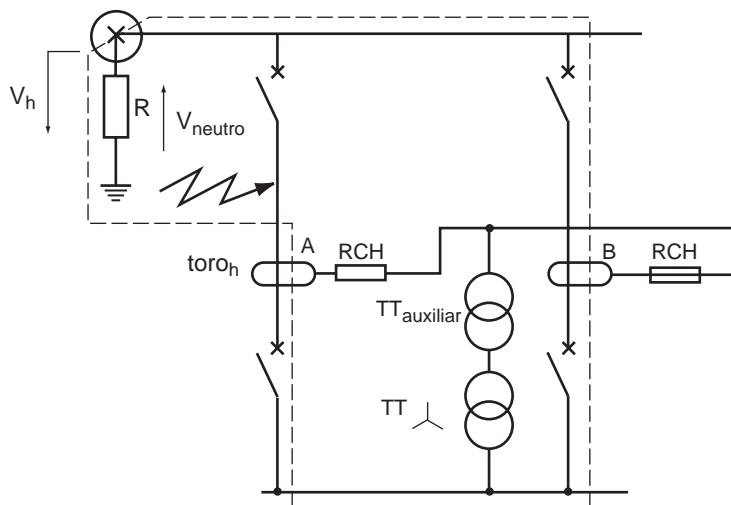
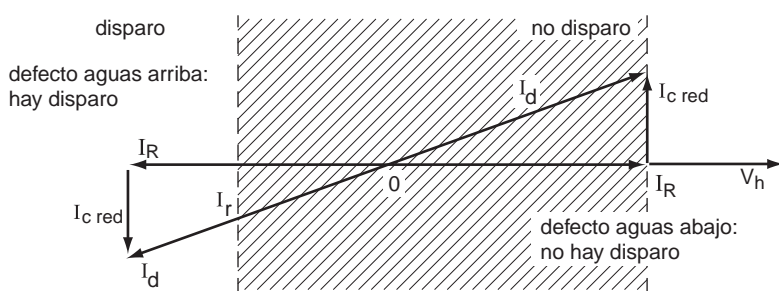


Fig. 19.



$I_r$ : regulación,  
 $I_R$ : corriente limitada por la resistencia del neutro  
o por el generador homopolar

Fig. 20.

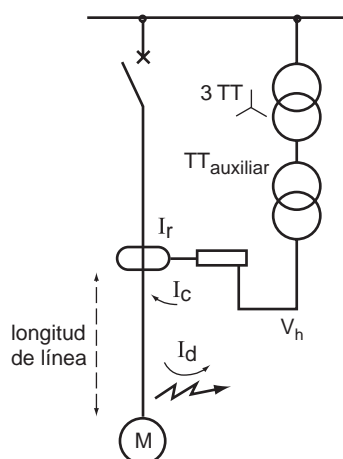


Fig. 21.

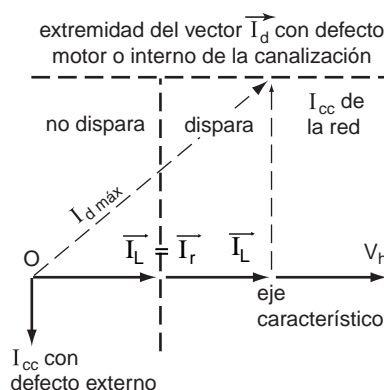


Fig. 22.

■ desacoplar 2 líneas en paralelo, si se produce un defecto interno en la línea protegida,

■ ser sensible a las corrientes capacitivas, lo cual permite en canalizaciones largas, una buena protección contra defectos internos en los motores.

Es suficiente un relé unipolar por canalización.

**Utilización en el caso de 2 líneas en paralelo (figuras 19 y 20)**

**Utilización en el caso de una línea larga, insensibilidad a la corriente capacitiva (figuras 21 y 22)**

$$I_r = (1 - \alpha) I_L,$$

$I_L$ : corriente limitada por la resistencia de tierra R, o límite superior de la corriente  $I_R$ ,

$\alpha$ : porcentaje de cobertura del bobinado motor,

$I_r$ : regulación del relé,

$I_c$ : corriente capacitiva de la salida.

Incompatibilidad  $I_r < 1,3 I_c$  que implica disparo por un defecto exterior.

Posición de los vectores de las magnitudes aplicadas al relé (figura 22).

## Relé de tensión máxima homopolar para la detección del defecto fase-masa o fase-tierra

Es un relé de tensión máxima

regulado a una fracción de  $\frac{U_n}{\sqrt{3}}$ ,

que vigila la subida de la tensión del neutro respecto a tierra

$\overline{V_{neutro}} = \overline{V_h}$ , fenómeno motivado por un defecto fase-tierra en la red.

Difiere de los relés de tensión máxima por:

■ su campo de ajuste de la tensión (inferior a  $U_n/V_3$ ),

■ la presencia de un filtro de 3<sup>er</sup> armónico.

La tensión homopolar se lee en los bornes de la resistencia de limitación de la corriente de tierra, o bien, cuando la resistencia está muy

alejada, en los bornes de los secundarios en serie de tres pequeños transformadores monofásicos, los cuales constituyen el dispositivo auxiliar utilizado, también, en la aplicación del relé de máxima corriente para la detección direccional de los defectos fase-masa. Como su información no es selectiva permite detectar el defecto a tierra de la red a la que está conectado el relé, cualquiera que sea su localización.

Bajo defecto permite:

- seccionar inmediatamente en sub-redes, una red de fuentes múltiples permitiendo con ello el funcionamiento selectivo de los relés de máxima corriente homopolar para la detección de los defectos fase-tierra,
- detectar el primer defecto en el régimen IT, aunque no ofrece el servicio de un controlador permanente de aislamiento,
- proteger un alternador excitado, no acoplado en paralelo, contra los defectos de aislamiento fase-masa alimentando normalmente una red en régimen TT (débilmente impedante). En este caso su temporización debe ser más elevada que la de los relés de corriente homopolar máxima de la red.

## Relé de corriente máxima a imagen térmica, para la protección contra sobrecargas en las máquinas

El relé empleado tiene en cuenta la sobrecarga y el régimen de marcha precedente a la sobrecarga.

El relé emite una orden cuando se alcanza el valor presumido del calentamiento máximo.

Calentamiento:  $\theta - \theta_a$ ,

$\theta$ : temperatura del punto de liberación de la energía térmica,

$\theta_a$ : temperatura ambiente.

La energía térmica es generada por efecto Joule.

$I$  es la intensidad controlada.

En primera aproximación el relé verifica en todo instante la ecuación de equilibrio térmico:

$$C \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{R_{th}} \theta = k I^2(t) + \frac{1}{R_{th}} \theta_a$$

en la que:

$C$ : calor específico del medio homogéneo considerado,

$R_{th}$ : resistencia térmica: incluye conducción, convección, ventilación, la cual se considera constante,

$C R_{th}$ : constante de tiempo  $\tau$ .

El relé se regula a la intensidad nominal de la máquina protegida, ( $I_N$  máquina) a partir de la intensidad nominal de los transformadores de corriente (captadores)  $I_{NTC}$  (figura 23).

La imagen de la evolución de los calentamientos en función de la

carga y/o de la sobrecarga  $\frac{I}{I_R} = \frac{I}{I_N}$

viene dada por las curvas de la figura 24.

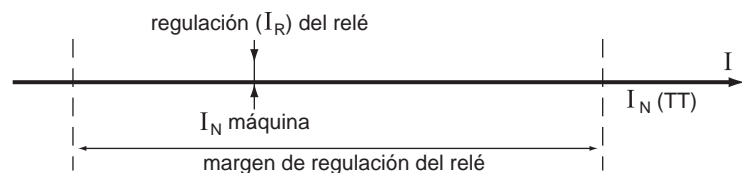


Fig. 23.

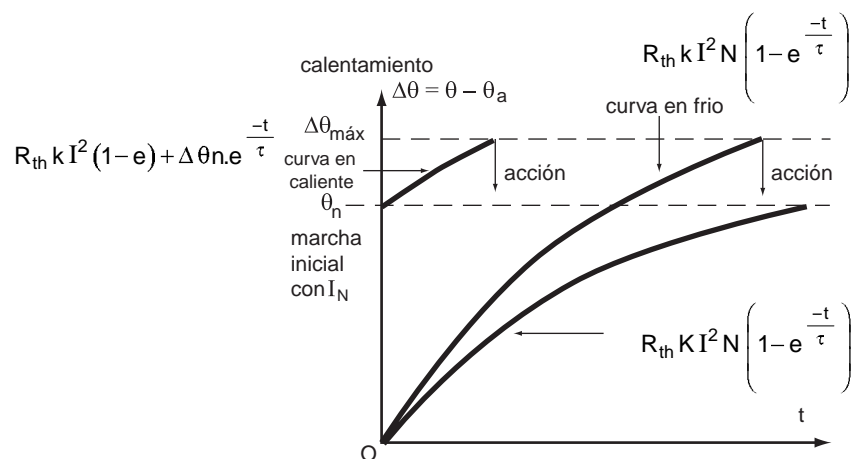


Fig. 24.

A partir de estas curvas se pueden trazar los puntos de disparo que se traducen por dos curvas límites trazadas para  $\theta_{\text{máx}}$  (figura 25).

■ una en frío: la máquina está a la temperatura ambiente, con sobrecarga desde la puesta en tensión,

■ otra en caliente: inicialmente (en  $t_0$ ), la máquina funciona en el **régimen nominal establecido** y alcanzado el equilibrio térmico.

Un régimen de funcionamiento inferior a  $I_N$  establecido antes de la sobrecarga daría una curva de disparo comprendida entre las dos curvas anteriores:

$$A = \frac{\theta_{\text{máx.}} - \theta_{\text{amb.}}}{\theta_{\text{a régimen } I_N} - \theta_{\text{amb.}}}$$

Los calentamientos máximos y los calentamientos en marcha normal con  $I_N$ , definidos por las distintas clases de aislamiento, muestran que si se toma arbitrariamente

$\sqrt{A} = 1,07$ , la protección queda establecida cualquiera que sea la clase de aislamiento.

Después de la parada, la curva en caliente vuelve lentamente a la curva en frío.

Las curvas pueden ser deformadas para salvar, por ejemplo, las puntas de arranque.

## Relé de detección de retorno de energía activa

Este relé es sensible a la proyección de un vector, representativo de la intensidad de línea, sobre una combinación de vectores representativos de las tensiones entre fases.

Regulando el relé de tal forma que la combinación de los vectores tensión sea proporcional y colineal con el vector de la tensión simple, se obtiene la medida de  $I \cos \varphi$  (figura 26).

El vector tensión OA es regulable en magnitud y en fase accionando el potenciómetro.

El potencial de A respecto a O puede tomar todos los valores comprendidos entre  $\overline{VA'}$  y  $\overline{VA''}$ .

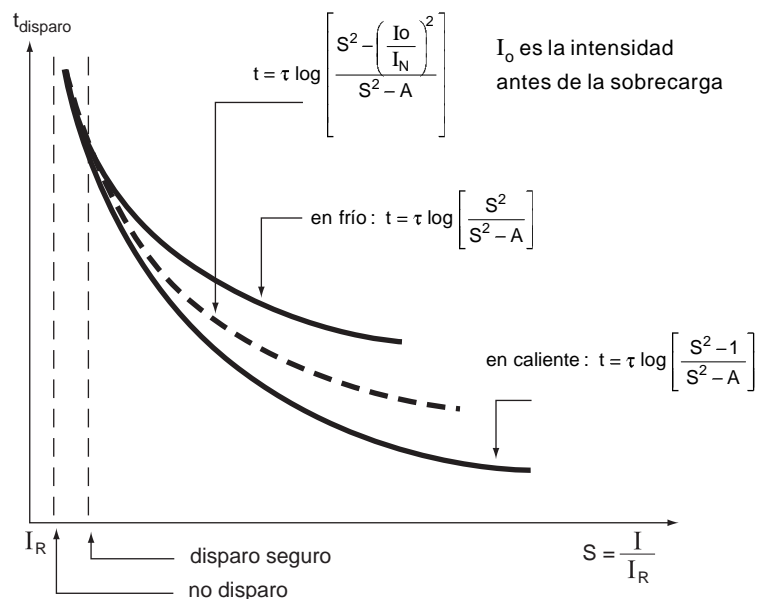


Fig. 25.

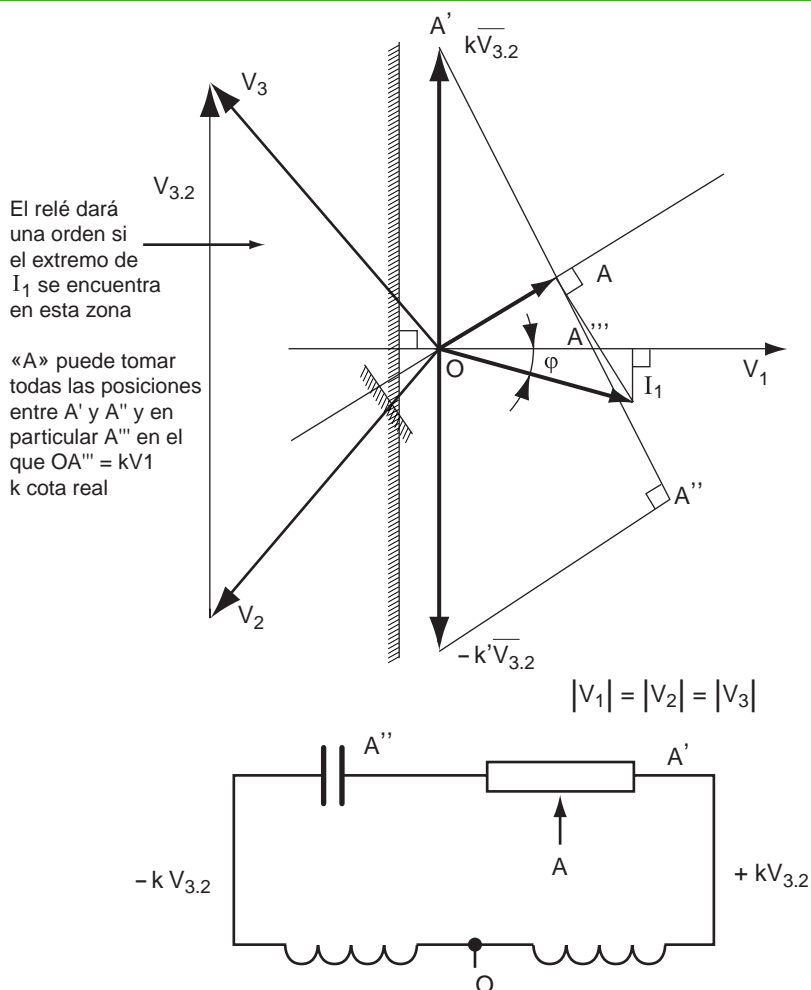


Fig. 26.

En particular  $\overline{VA''}$ . El vector  $OA''$  (que es igual a  $VA''$ ) es entonces proporcional al vector  $V_1$ :

$$\overline{VA''} = C \overline{V_1}; C = \text{constante real.}$$

Se utiliza el ángulo de fase de  $VA''$  para elaborar  $I \cos \varphi$ .

En régimen equilibrado de tensiones e intensidades  $P_W = U_n \sqrt{3} I \cos \varphi$ .

El funcionamiento del relé está asegurado en el dominio:

$$-1 \leq \cos \varphi < 0, \text{ retorno de corriente}$$

$$\text{y para } I_s \leq |I \cos \varphi|.$$

$I_s$  viene generalmente dada bajo la forma de  $I_s = \text{umbral \%} \times I_N$ .

## Relé de detección de las variaciones de tensión

### Contra las bajadas de la tensión, (subtensión)

Se trata de un relé de tensión mínima de tiempo constante.

Es un relé bipolar.

Generalmente controla dos tensiones en valor eficaz, unidas por un potencial común.

Se transforma en relé unipolar por la alimentación en paralelo de 2 captadores.

Conectado entre fases, como indica la **figura 27** la falta de tensión de la fase 2 es detectada si el relé está regulado por debajo del 50% del valor nominal de la tensión controlada ( $U_N$ ). Para obtener el funcionamiento con valores decrecientes, es suficiente que una de las dos tensiones que se miden baje del umbral. Regulado al 20% de  $U_N$  e instantáneo, el relé permite desenclavar la conexión cuando, después de un corte en la red, la tensión residual de una máquina asíncrona desciende lo suficiente como para permitir la reconexión de la explotación.

### Contra las sobretensiones

Se trata de un relé de tensión máxima a tiempo constante.

Es un relé unipolar.

El umbral y la temporización son regulables.

## Relé amperimétrico de detección de desequilibrios y pérdida de fase

A partir de dos intensidades de fase, este relé elabora la componente inversa con la ayuda de un desfasador.

A partir del sistema de las componentes simétricas de las intensidades de línea (teorema de Stokvis).

$$\begin{cases} \overline{I_1} = \overline{I_d} + \overline{I_i} + \overline{I_h} \\ \overline{I_2} = a^2 \overline{I_d} + a \overline{I_i} + \overline{I_h} \\ \overline{I_3} = a \overline{I_d} + a^2 \overline{I_i} + \overline{I_h} \end{cases} \quad a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$$

Se obtiene el sistema inverso:

$$3 \overline{I_d} = \overline{I_1} + a \overline{I_2} + a^2 \overline{I_3}$$

$$3 \overline{I_i} = \overline{I_1} + a^2 \overline{I_2} + a \overline{I_3}$$

$$3 \overline{I_h} = \overline{I_1} + \overline{I_2} + \overline{I_3}$$

De la ecuación:

$$3 \overline{I_i} = \overline{I_1} + a^2 \overline{I_2} + a \overline{I_3}$$

y considerando el hecho de que en ausencia de un defecto a tierra

$$\overline{I_3} = -(\overline{I_1} + \overline{I_2}), \text{ se deduce la}$$

función de  $\overline{I_1}$  e  $\overline{I_2}$ :

$$\frac{3 \overline{I_i}}{1 - \alpha} = \overline{I_1} - \alpha \overline{I_2}$$

que en valores absolutos será

$$\sqrt{3} I_i = |\overline{I_1} - \alpha \overline{I_2}|$$

(« $\alpha$ » se obtiene por el desfasador del relé).

Este relé está destinado a la protección de los rotores de las máquinas giratorias.

Montado principalmente sobre la alimentación directa de las máquinas, puede, no obstante, encontrarse sobre las líneas, donde detecta el corte de una fase.

La importancia de la acción preventiva de este relé es evidente. Limita las perturbaciones peligrosas en las máquinas, subsiguientes a un defecto externo (corte de fase) alejado.

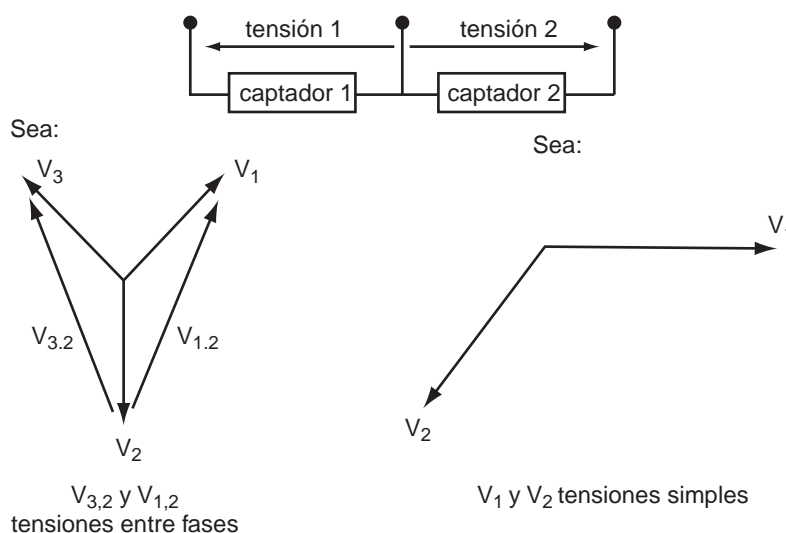


Fig. 27.



El relé está graduado en  $\frac{I_i}{I_n T_c}$ , tasa

de componente inversa respecto a la corriente nominal del transformador de corriente colocado sobre la canalización de la máquina. Un motor asíncrono puede funcionar indefinidamente con una tasa de 2% de componente inversa de tensión, o con un 10% en corriente.

En efecto:

■ **alimentación en monofásico en el arranque** a partir de una red trifásica equilibrada de tensión simple V.

$$|I_i| = \left| \frac{V}{Z_d + Z_i} \right|$$

En el arranque  $Z_d = Z_i = Z$  (impedancia de arranque)

$$|I_i| = \frac{V}{2Z} = \frac{I_D}{2}$$

y también

$$|I_d| = \frac{V}{2Z} = \frac{I_D}{2}$$

La componente inversa de la intensidad representa el 50% de la corriente de arranque y el 100% de la componente directa.

Este valor de la componente inversa es superior a la regulación máxima del relé.

■ **alimentación monofásica en marcha normal:** la red está siempre equilibrada en tensión, la impedancia directa  $Z_d$  es mayor que la impedancia de arranque  $Z_A$ .

$$\frac{Z_d}{Z_i} > \frac{I_D}{I_N}$$

con

$$Z_i = \frac{Z_d}{6}$$

$$|I_i| = \left| \frac{V}{Z_d + Z_i} \right| = \frac{6}{7} \left| \frac{V}{Z_d} \right| = \frac{6}{7} I_N$$

La componente inversa de la intensidad toma entonces un valor del orden del 85% de  $I_N$ , tasa muy superior a todas las regulaciones.

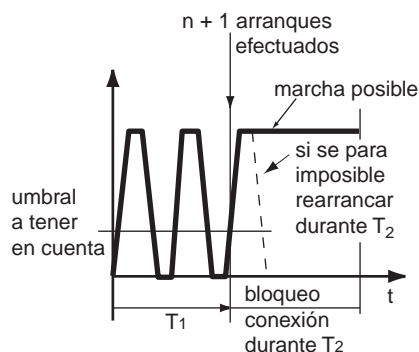


Fig. 28.

### Causas de error

Las desconexiones intempestivas son debidas, esencialmente, a la dispersión de los captadores de corriente (TC) en el momento del arranque.

- elegir captadores (TC) de 10 a 15 VA 10 P 10,
- cargar los dos captadores (TC) simétricamente.

### Nota:

- el relé detecta la apertura, siempre peligrosa, de los circuitos secundarios en carga,
- al ser el relé amperimétrico, no detecta la pérdida de las fases en ausencia de carga.

### Relé de protección contra los arranques demasiado frecuentes

Se trata de un contador (figura 28). A partir del estado en el que la intensidad es nula (reposo), el relé cuenta un arranque cada vez que la intensidad excede del umbral de regulación.

Este umbral es de tal cuantía que el relé no toma en consideración las puntas de intensidad debidas a los dispositivos de arranque (resistencias rotóricas, auto-transformadores, etc.) ni las puestas en carga a partir de un funcionamiento en vacío.

El contador es puesto automáticamente a cero al final de cada periodo  $T_1$ .

Si la lectura del contador excede en una unidad a un valor prefijado, el relé funciona y bloquea durante  $T_2$  todo nuevo arranque.

Al final del tiempo  $T_2$ , el relé vuelve al estado inicial.

La regulación del relé se obtiene a partir de los datos facilitados por el constructor del motor.

### Relé de detección del agarrotamiento del rotor en marcha de los motores asíncronos

Es un relé de máxima intensidad. Puede ser monofásico, ya que las corrientes estáticas con un rotor agarrotado, están equilibradas (ausencia de defecto eléctrico interno).

Para poder tener una temporización regulable, el usuario inhibe la actuación del relé durante el periodo de arranque normal. Más allá el relé se activa con cualquier sobreintensidad que rebase su umbral.

La inhibición durante el arranque se consigue permitiendo sobrepasar el umbral amperimétrico bajo, lo que significa que se ha sustituido el estado de reposo por el estado «en tensión».

El relé se ajustará en un margen que irá de las máximas intensidades admisibles a la de arranque.

Si se desea obtener una protección contra los arranques excesivamente largos, se regulará el relé a un valor inmediatamente por encima de la corriente absorbida al final de un arranque normal (figura 29).

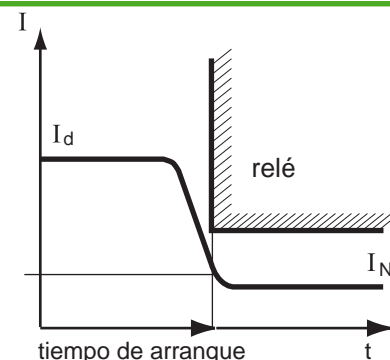


Fig. 29.



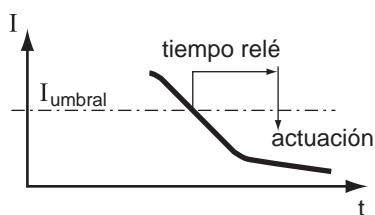


Fig. 30.

## Relé de detección del descebado de las bombas hidráulicas

Es un relé de intensidad mínima, su funcionamiento viene definido por el paso del umbral para un valor decreciente de la corriente (figura 30).

El relé no tiene en cuenta las intensidades nulas (reposo).

El reposo es unipolar.

El umbral del relé será regulado entre:

- la corriente en vacío del grupo motor-bomba con las válvulas cerradas,
- la corriente normalmente absorbida en carga.

## Relé de detección de las pérdidas en la excitación de las máquinas síncronas

Este relé puede ser el mismo que el que se utiliza para detectar el retorno de la energía activa, con una conexión y una regulación diferentes, de forma que pueda detectar la energía reactiva absorbida de la red.

La regulación del relé se basa en llevar la combinación de vectores tensión, ortogonalmente al vector tensión simple.

Como indica el diagrama de la figura 31, el vector  $\vec{V}A'''$  es de la forma  $\vec{V}A''' + jC\vec{V}1$ , siendo C una constante real y j el complejo imaginario de valor 1 y fase  $\pi/2$ .

De  $\vec{V}A'''$  sólo interesa su ángulo de fase ( $-\pi/2$ ) para obtener

$$I \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = I \sin \varphi.$$

En régimen equilibrado, de tensión e intensidad,  $P_{VAR} = U_N \sqrt{3} I \sin \varphi$ .

$I \sin \varphi$  generalmente viene dado bajo la forma  $I_s = (\text{umbral } \%) \times I_N$ .

En la zona A el motor síncrono absorbe energía reactiva lo que indica un funcionamiento anormal (pérdida de la excitación).

**Atención: el relé debe estar enclavado durante el arranque asíncrono.**

Como consecuencia de una regulación continua para determinar  $A'''$  y por la combinación de las tensiones de entrada, son posibles otras funciones, en particular el relé a retorno de corriente aparente I:

$$P_{VA} = U_N I \sqrt{3}$$

## Determinación del umbral de un relé de retorno de corriente reactiva, empleado en la protección de la pérdida de excitación de un motor síncrono.

Empleado con una carga bajo la cual el par es sólo función de la velocidad, el motor síncrono funciona a potencia útil constante.

Despreciando las pérdidas estatóricas el motor trabaja con una potencia absorbida:

$$P_{aw} = U_v I_A \sqrt{3} \cos \varphi = \text{constante.}$$

El diagrama simplificado (figura 32) verifica que:  $\vec{V} = \vec{E} + jLj\vec{I}$  en cada fase.

V, tensión simple, viene dada por la red.

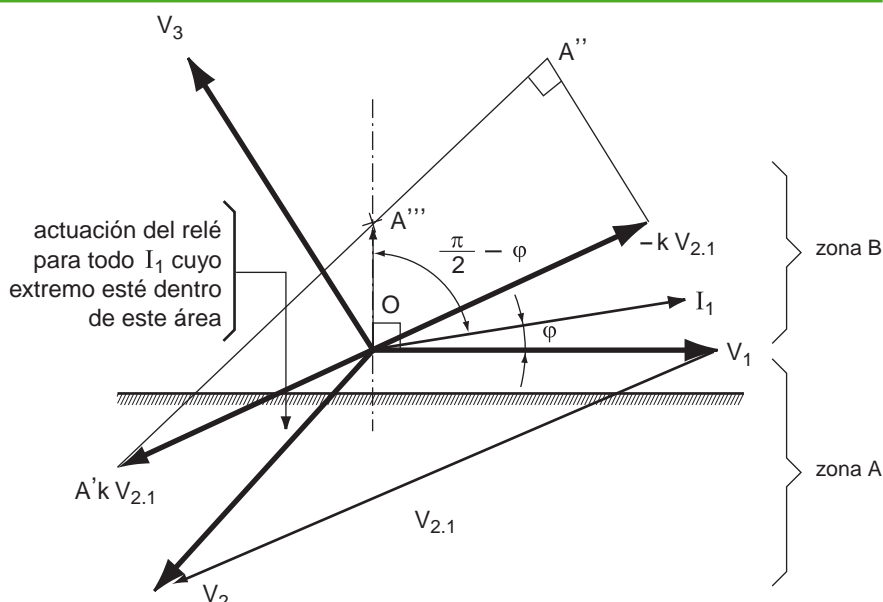


Fig. 31.

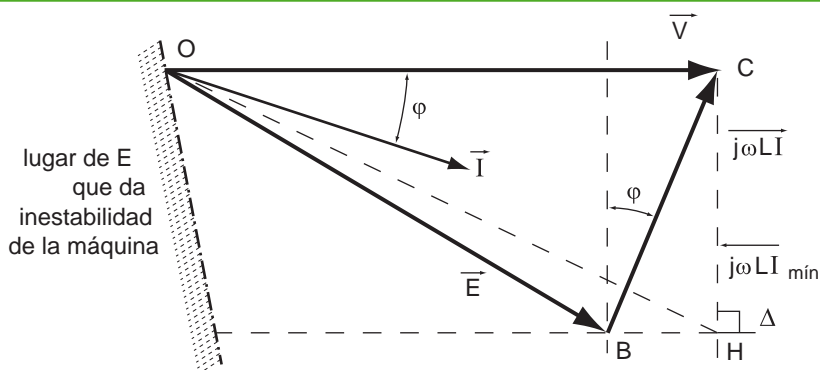


Fig. 32.

$$\begin{aligned}\text{Área OBC} &= k_1 \cdot |V| \cdot \omega \cdot L \cdot |I| \cdot \cos \varphi \\ &= k_2 P_{\text{eléctrica}}.\end{aligned}$$

Al ser constante la potencia eléctrica, el punto B, extremidad del vector «fuerza contraelectromotriz E debida al inductor» se desplaza sobre la recta Δ, cuando se varía la excitación.

Sea  $I_{\min}$  la intensidad absorbida con  $\cos \varphi = 1$ .

El triángulo BCH da:

$$I = \frac{I_{\min}}{\cos \varphi}$$

$$I \sin \varphi = I_{\min} \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

$$\text{Si hacemos } A = \frac{I_{\text{NTC}}}{I_{\min}} = \text{constante},$$

para una carga dada, se obtiene:

$$\frac{I \sin \varphi}{I_{\text{NTC}}} = \frac{1}{A} \operatorname{tg} \varphi = \begin{cases} \text{umbral del relé} \\ \text{a retorno de corriente} \\ \text{reactiva, con respecto} \\ \text{a } I_{\text{NTC}}. \end{cases}$$

$I_{\text{NTC}}$  es la intensidad nominal primaria de los transformadores de corriente.

## Relé de detección de las variaciones de frecuencia

Se compara la frecuencia de la red F con una frecuencia patrón  $F_0$  generada por el relé.

■ para los relés a mínima frecuencia

si:  $F - F_0 < 0 \Rightarrow$  el relé funciona,

■ para los relés a máxima

frecuencia si:  $F - F_0 > 0 \Rightarrow$  el relé funciona.

El relé es unipolar y toma la información por medio de la tensión de la red, con un TT.

## Ventajas de los relés estáticos respecto a los electromagnéticos

Para detectar la magnitud controlada, los relés electrónicos, sólo necesitan una potencia despreciable, que se cifra en mVA e incluso en μVA, lo cual les da unas características de linealidad, de tiempo de puesta en marcha, mucho mejores que los de los relés electromagnéticos.

Estas características aportan a los relés estáticos las propiedades:

■ de funcionar en el caso de un cortocircuito fase-fase, aunque se saturen los transformadores de corriente,

■ de hacer que los captadores funcionen en las condiciones ideales, a saber:

□ en vacío los transformadores de tensión (TT),

□ en cortocircuito los transformadores de corriente (TC), lo que tiene la ventaja de remontar el punto de saturación C, muy por encima del factor límite de precisión (FLP).

En efecto, la igualdad

$$CP = C_n P_n \quad (1)$$

siendo:  
 $C_n$ : factor límite de precisión correspondiente a  $P_n$ , con la intensidad nominal,

$P_n$ : potencia nominal con la corriente nominal,

C: coeficiente límite de precisión para una potencia P, con la corriente nominal, que indica que el coeficiente límite de precisión es inversamente proporcional a la potencia suministrada a la carga.

La fuerza electromotriz en el secundario es de la forma

$$e = - \frac{d(n_2 \phi)}{dt}$$

donde:

$n_2 \phi$  es el flujo concatenado total por el secundario.

En los dos casos que siguen consideramos el mismo valor para  $n_2 \phi$ , para el límite de linealidad.

■ el transformador tiene su carga nominal  $Z_{2n}$  y, con esta carga, cede una corriente  $I_2$ :

$$P_n = Z_{2n} I_{2n}^2$$

$$e = Z_{2n} I_2 = Z_{2n} C_n I_{2n} = C_n \frac{P_n}{I_{2n}} \quad (2)$$

■ el transformador tiene una carga cualquiera  $Z_2$  y, con esta carga, cede una corriente  $I_2$ :

$$e = Z_2 I_2 = Z_2 C I_{2n} = C \frac{P}{I_{2n}} \quad (3)$$

(2) y (3) demuestran la igualdad anterior:

$$CP = C_n \cdot P_n \quad (1)$$

En rigor debería considerarse la potencia eléctrica  $P = e I_2$ ; Z incluye la resistencia interna del secundario del transformador, la cual no puede ser despreciada cuando la impedancia de carga es muy pequeña.

La ausencia de engrase y de corrosiones en los pivotes y la ausencia de resortes antagonistas, son otros tantos factores que favorecen una fiabilidad y una precisión superiores.

Por otra parte, los choques mecánicos (no destructivos) no provocan funcionamientos intempestivos (por ejemplo: insensibilidad al cierre de las puertas).

Por último, el relé estático es, por lo general, económico, pues utiliza componentes no específicos contrariamente a las piezas mecánicas de los relés electromagnéticos.

### 3 Selectividad

Una red de AT alimenta muchísimos consumidores para los que una interrupción de la alimentación puede ser grave. Una buena coordinación de las protecciones contra los cortocircuitos fase-fase, las sobrecargas, los defectos fase-tierra, permite una continuidad de la explotación óptima.

La coordinación de las protecciones puede requerir un estudio bastante complejo. En los casos muy simples, redes en antena, la selectividad al disparo, se limita a verificar cuándo se tienen sobreintensidades.

Se consigue la selectividad si, para todas las corrientes superiores a las de regulación de los distintos relés que detectan el defecto, el tiempo mas allá del cual el proceso de disparo del interruptor de ruptura aguas arriba es ya irreversible, es superior al tiempo total de ruptura del interruptor aguas abajo.

Esta condición se verifica fácilmente por yuxtaposición de las curvas características de funcionamiento de los relés (**figura 33**).

La coordinación del conjunto de las protecciones debe tomar en consideración la presencia eventual de máquinas giratorias y su comportamiento en el momento del defecto.

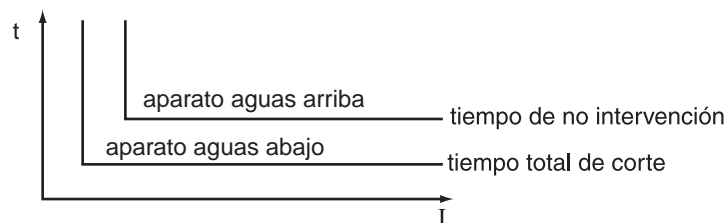
#### Elementos de regulación en la selectividad cronométrica

(**figura 34**)

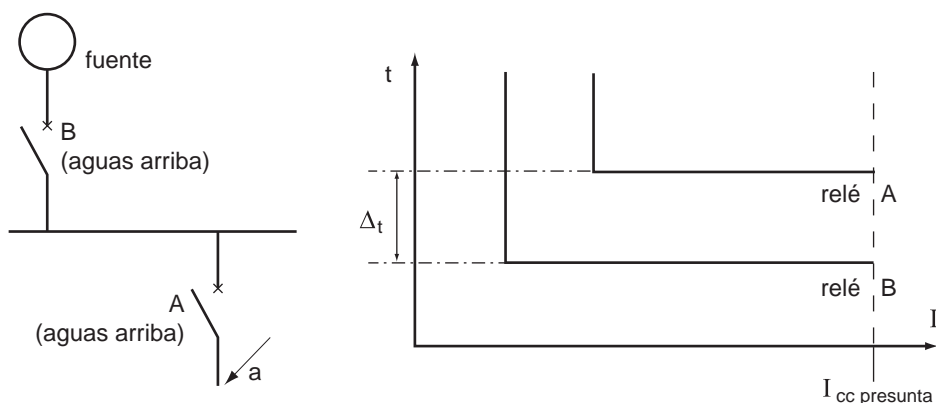
El margen  $\Delta t$  incluye:

- el error de temporización de los relés A y B,
- el tiempo de memoria del relé B,
- el tiempo de funcionamiento del interruptor automático A,
- un margen de seguridad.

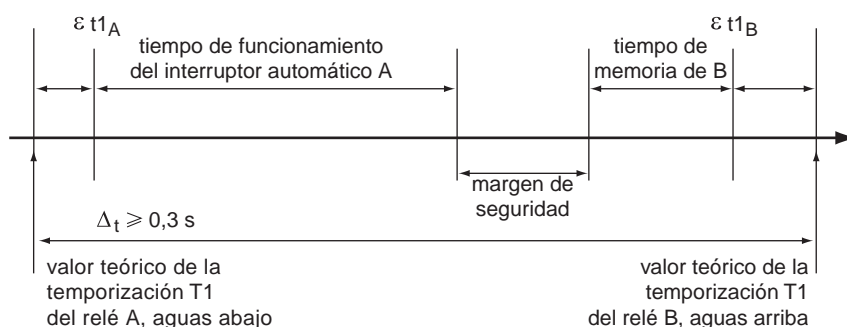
Prácticamente se considera  $\Delta t \geq 0,3s$  (**figura 35**).



**Fig. 33.**



**Fig. 34.**



$\varepsilon t_{1A}$  : error de la temporización en el relé A

$\varepsilon t_{1B}$  : error de la temporización en el relé B

**Fig. 35.**

Una buena precisión y una buena fidelidad de las regulaciones de los umbrales y de las temporizaciones permiten admitir márgenes de regulación más reducidos.

En resumen, las regulaciones de las redes a máxima intensidad, utilizadas en las protecciones contra los cortocircuitos fase-fase y los defectos fase-tierra deben tener en cuenta:

#### A nivel del umbral

- la menor corriente posible de cortocircuito que puede provocar aguas abajo la toma de información. La regulación será inferior a 0,5 veces el valor de esta corriente,
- inmediatamente superior a las más elevadas corrientes de sobrecarga,
- superior al umbral del relé aguas abajo (aproximadamente en 30%),
- la corriente capacitiva. La regulación será superior al 30% de la mayor corriente capacitiva que atraviesa el relé. Esta regla es aplicable, esencialmente a los relés de tierra.

#### A nivel de la temporización

- 0,3 segundos más que el relé aguas abajo en la selectividad cronométrica,
- el paso necesario de las puntas de intensidad debidas a la conexión de transformadores en vacío, y eventualmente las debidas a la reconexión de motores, fija los límites inferiores de la temporización (capítulo 4 protecciones típicas).

#### Aspecto práctico

El cálculo de las regulaciones, tanto del umbral como de la temporización, así como la verificación de la selectividad por un gráfico, constituye el estudio de la selectividad. A este propósito se usa un papel doble logarítmico. Por década se utiliza una longitud doble en abscisas ( $I_A$ ) y una longitud simple en ordenadas (tiempo), lo que permitirá representar las capacidades térmicas adiabáticas,  $I^2t = \text{constante}$ , para una recta diagonal de un cuadrado (optimización de los errores).

El gráfico permite verificar, si es necesario:

- la selectividad entre interruptores automáticos y cortocircuitos,
- la capacidad térmica de los cables, transformadores, etc. a las corrientes de cortocircuito.

A este propósito deberá calcularse la corriente de cortocircuito en el punto considerado.

### Sistema de selectividad lógica

Este sistema desarrollado y patentado por Merlin Gerin, se refiere a una técnica de selectividad fundamentada en el enclavamiento temporal de los relés situados aguas arriba.

En base a este principio, se pueden obtener márgenes de regulación nulas, o negativas.

Únicamente las puntas de conexión impiden anular las temporizaciones.

En particular, cuando la regulación de la temporización de las protecciones situadas en los orígenes de la instalación es corta y viene impuesta, la selectividad lógica permite obtener la selectividad total al disparo, cualquiera que sea el número de escalones del nivel de tensión de cada escalón.

El disparo amperimétrico de los alternadores auxiliares tiene lugar durante el transitorio de las corrientes de cortocircuito.

Los choques térmicos son disminuidos en los defectos próximos al origen de la instalación.

- se mejora la estabilidad de la red; se limitan las perturbaciones que provoca un defecto al funcionamiento de las máquinas rotativas, (máquinas síncronas, rearranque en marcha de motores asíncronos),
- la ampliación de la red es siempre posible sin retoques de las regulaciones de los relés existentes, en particular a nivel de la protección general emplazada en el origen de la instalación.

### Principio del sistema de selectividad lógica

A continuación se recuerda brevemente el principio de funcionamiento (figura 36).

El relé aguas abajo envía una orden de espera lógica al relé inmediatamente superior a través de una línea piloto bifilar.

Únicamente el relé directamente aguas arriba del defecto está disponible y provoca la desconexión del interruptor automático asociado.

Inmediatamente después, los relés aguas arriba quedan liberados. La espera lógica es regulada, por el usuario, a la duración presumida de eliminación del defecto.

La selectividad lógica se utiliza en la protección contra cortocircuitos entre fases y contra defectos fase-tierra (régimen neutro impedante).

### Protección de zona por medidas amperimétricas diferenciales

La insensibilidad de la protección a los defectos exteriores a la máquina, o a la zona cubierta, hace que este tipo de protección no se tome en cuenta en los estudios de selectividad cronométrica o lógica.

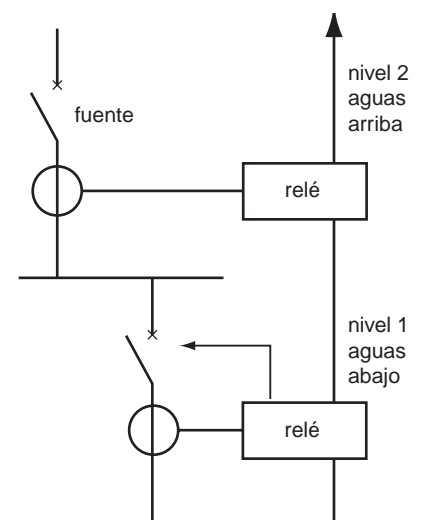


Fig. 36.

## 4 Protecciones típicas

El objetivo de esta última parte es establecer la lista de protecciones específicas a cada función de la distribución de MT, el término «función» corresponde, muy frecuentemente, a cada una de las celdas que constituyen un cuadro MT.

### Protección de las entradas o de las salidas de alimentaciones o «feeders»

#### En régimen neutro impedante

- un relé de intensidad máxima a tiempo independiente bipolar, contra los cortocircuitos fase-fase,
- un relé de intensidad máxima a tiempo independiente, unipolar, insensible a los terceros armónicos, contra los defectos fase-tierra,
- dos relés de intensidad máxima direccionales sobre cada entrada en paralelo.

#### En régimen de neutro aislado

Un relé de máxima intensidad a tiempo independiente tripolar contra los defectos fase-fase.

Bajo determinadas condiciones: empleo de un relé de corriente máxima a tiempo independiente unipolar, insensible al 3<sup>er</sup> armónico contra los defectos fase-tierra, o empleo de un relé direccional homopolar.

Se recuerda que la detección del primer defecto es obligatoria.

#### Notas (figura 37)

Si la celda de llegada alimenta una salida correspondiente a un transformador de gran potencia, se añadirá un relé de intensidad máxima a tiempo independiente bipolar o tripolar de umbral bajo.

El objetivo de este relé es el de asegurar una protección complementaria contra los cortocircuitos que se producen en los bornes del secundario del transformador. Esto sólo es posible si:

$$\alpha I_n < I_n < 0,5 I_{12CC}$$

siendo:

$I_n$ : corriente nominal de los transformadores de corriente,  
 $\alpha I_n$ : sobrecarga admisible temporal,  
 $I_s$ : umbral del relé,

$I_{12CC}$ : corriente de cortocircuito trifásico equilibrado en el secundario, vista desde el primario del transformador.

La protección de sobrecarga de la red, aguas abajo, es otra aplicación de este relé. Otras protecciones, tales como: relé de frecuencia, relé de tensión, relé a retorno de corriente, equipan a menudo estas celdas.

### Protección de generadores (alternadores) auxiliares

#### Contra los defectos externos eléctricos

■ Un relé de máxima intensidad, bipolar (neutro impedante), tripolar (neutro aislado) de tiempo constante contra los cortocircuitos fase-fase. La regulación del relé deberá tener en cuenta:

- la necesidad de disparar rápidamente bajo la impedancia transitoria del alternador,
- la exigencia de la selectividad,

■ un relé de máxima para la corriente homopolar (si el neutro es impedante), a tiempo constante si el generador de la corriente homopolar (resistencia de tierra) está conectado al neutro del alternador,

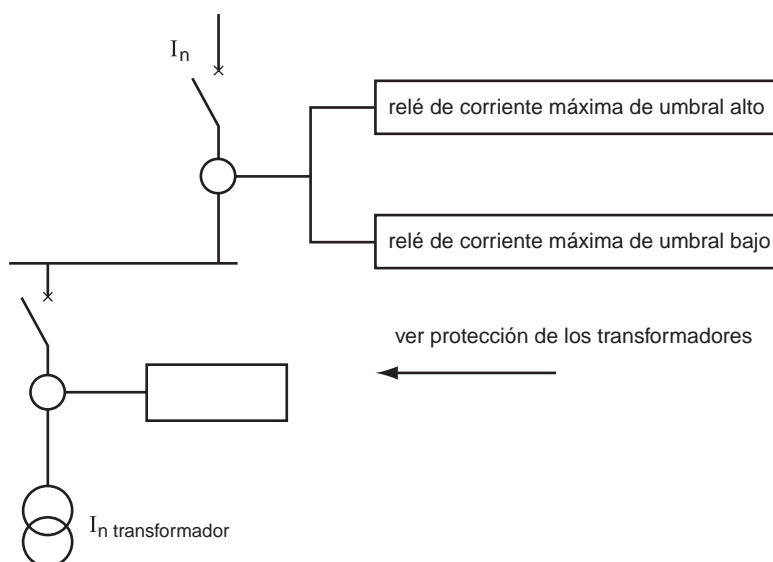


Fig. 37.

- un relé sensible a la componente inversa de la corriente contra los defectos desequilibrados.

#### Contra los defectos internos eléctricos

- un relé de máxima corriente tripolar, de medida diferencial longitudinal contra los defectos fase-fase,
- un relé de máxima corriente homopolar si el generador homopolar está conectado al juego de barras,
- o
- un relé de máxima corriente homopolar cuyo toroide (captador) esté en la conexión de puesta a tierra del neutro del alternador,
- o
- un relé de corriente homopolar de medida diferencial longitudinal,
- un relé de máxima tensión homopolar delante del acoplamiento si el generador de corriente homopolar está en el juego de barras. La regulación de tiempo de este relé debe superar todas las regulaciones de los relés de la red, o un control permanente de aislamiento antes del acoplamiento.

#### Contra los errores de explotación

- un relé a imagen térmica contra las sobrecargas,
- un relé sensible a la componente inversa de la corriente contra los consumos desequilibrados.

**Atención: los desequilibrios inversos se transmiten a través de los transformadores cuyos devanados estén acoplados en Yd; Dy; Yy.**

#### Contra los defectos de las máquinas motrices

- un relé de retorno de corriente activa, para detectar la marcha como motor síncrono. Prácticamente se utilizará este relé en los grupos diesel, simultáneamente con un control de la tensión,
- un relé contra las variaciones de frecuencia. Este relé de mínima frecuencia, es obligatorio si el alternador está acoplado a una red de distribución sujeta a reenganches rápidos.

#### Contra los defectos en el circuito de excitación

- un relé de tensión mínima y máxima: control del regulador,
- un relé de retorno de corriente reactiva; absorción de energía reactiva por la máquina desexcitada. Si el arrollamiento de excitación es accesible:
- utilizar un relé amperimétrico contra los cortes y los cortocircuitos,
- empleo de un controlador permanente de aislamiento (defectos masa-rotor).

#### Protección de los transformadores

##### Contra los defectos eléctricos externos e internos

El relé Buchholz o presostato detecta los defectos eléctricos internos de los transformadores en baño de aceite.

El empleo de relés indirectos es, no obstante, frecuente, teniendo en cuenta su corto tiempo de respuesta. Se utilizará:

- un relé de máxima corriente bipolar (neutro impedante) o tripolar (neutro aislado), con:
- un umbral alto instantáneo (50 ms) contra los defectos fase-fase en el primario,
- un umbral bajo, a tiempo independiente, contra los defectos fase-fase en el secundario, vistos desde el primario. La temporización permite el funcionamiento selectivo de las protecciones de la red aguas abajo del transformador. La regulación del umbral alto estará inmediatamente por encima de  $I_{12cc}$ , corriente de cortocircuito trifásico en el secundario, vista desde el primario. La regulación del umbral bajo se hará a partir de  $2I_N$ ; se puede considerar, salvo casos particulares, que las sobrecargas no pueden exceder de  $2I_N$ , siendo:

$$\frac{I_N}{I_{12cc}} = \frac{I_N}{I_{1cc}} + U_{cc}$$

$I_N$ : Intensidad nominal del transformador del primario, con la tensión primaria  $U_N$ .

$I_{11cc}$ : corriente de cortocircuito trifásico en el primario,

$I_{12cc}$ : corriente de cortocircuito trifásico en el secundario, vista desde el primario,

$U_{cc}$ : tensión de cortocircuito del transformador en valor decimal (ej. 0,1).

Con selectividad lógica, es suficiente el relé con un solo umbral. Éste tiene en cuenta  $I_{12cc}$  con un tiempo compatible con la conexión del transformador en vacío.



Deberá verificarse que el paso de la punta de conexión en vacío del transformador no dispare el relé.

El umbral  $n_r$  suficiente de los relés de nivel alto, nivel bajo, o lógico, deberá ser tal que:

$$n_r > \frac{1}{\sqrt{2}} n_e \frac{I_{N \text{ transfo.}}}{I_{NTC}} e^{-\frac{t_r}{t_e}}$$

siendo:

$$n_r: \text{umbral del relé} = \frac{I_{\text{umbral}}}{I_{NTC}}$$

$t_r$ : temporización del relé (deducido el tiempo de memoria),

$t_e$ : constante de tiempo de la componente aperiódica de la corriente de conexión, (es un dato del transformador),

$I_{N \text{ transfo.}}$ : intensidad nominal del transformador con la tensión primaria  $U_n$ ,

$I_{NTC}$ : intensidad nominal de los transformadores de corriente

$$n_e = \frac{I_{\text{cresta conexión}}}{I_{N \text{ eficaz}}}$$

es un dato del transformador (figura 38),

■ un relé de máxima corriente homopolar en redes con neutro impedante, o bajo ciertas condiciones, en redes con neutro aislado.

Potencia del transformador en kVA	$n_e$	$t_e$
50	15	0,10
100	14	0,15
160	12	0,20
400	12	0,25
630	11	0,30
800	10	0,30
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,40
2000	8	0,45

Fig. 38.

**Nota:** la protección fase-masa secundaria se realiza por un relé de máxima corriente homopolar, en el que el toro captador está emplazado en la conexión de puesta a tierra del neutro. Si el régimen secundario es con neutro impedante, este relé actuará sobre el interruptor automático primario,

■ la protección diferencial del transformador será necesaria cuando la energía pueda circular en los dos sentidos, lo que normalmente excluye las unidades de potencia limitada.

Como todas las protecciones diferenciales, será regulada por debajo de la corriente nominal y es independiente de la temporización de los otros relés de la red.

La protección es sólo sensible a los defectos internos del transformador.

Esta protección no exime de la necesidad de relés de máxima corriente contra cortocircuitos por defectos externos.

El relé es complejo, pues es necesario:

■ distinguir la punta de conexión de una maniobra de cierre en cortocircuito,

■ compensar el número de espiras, el acoplamiento y el índice horario, sin dejar de tener en cuenta la corriente magnetizante.

Se regula, alrededor del 25% de  $I_N$ .

### Contra los errores de explotación

Empleo de un relé de imagen térmica bipolar si no existen receptores monofásicos. Caso contrario se utilizará un relé tripolar o un relé bipolar asociado a un relé de desequilibrio. El relé de imagen térmica es necesario en los transformadores secos. Se utilizará conjuntamente con el termostato en las grandes unidades.

## Protección de los motores asíncronos

### Contra los defectos externos

Se emplea:

■ un relé de retorno de energía que desacople las grandes unidades, si al desconectar la red, es posible la

realimentación de otras cargas. En algunos casos, se asocia a este relé un relé de mínima tensión remanente, verificando, después de la desmagnetización y reducción de la velocidad suficientes, la posibilidad de una reconexión a la red,

■ un relé de mínima tensión

Si los relés de mínima son, en general, comunes a varios motores, se monta una protección individual,

■ un relé amperimétrico contra la presencia de una componente inversa, o de ruptura de fase en la red.

### Contra los defectos eléctricos internos

La zona protegida comprende la línea de alimentación del motor y el propio motor.

Se emplea:

■ un relé de máxima corriente, bipolar (neutro impedante), tripolar (neutro aislado) contra los cortocircuitos fase-fase. El relé es regulado por encima de la corriente de arranque.

O un relé de máxima corriente tripolar diferencial longitudinal entrada-salida. Este relé es regulado por debajo de la corriente nominal del motor. (Se encuentra sobre todo en las grandes unidades).

■ un relé de máxima corriente homopolar con un captador toroidal, contra los defectos fase-masa (neutro impedante), o un relé de corriente para la detección direccional. Si la línea es larga, hay influencia de la corriente capacitiva.

■ un relé amperimétrico de máxima para la corriente inversa contra:

□ los cortes de fase,

□ los desequilibrios de fase que siguen al cortocircuito entre espiras de un arrollamiento.

El relé realiza igualmente la protección contra un defecto externo.

### Contra los defectos de explotación

■ un relé de imagen térmica contra las sobrecargas,

■ un relé limitador de los arranques, si lo requieren las condiciones de la explotación.

### Contra los defectos mecánicos

- un relé contra el agarrotamiento en marcha del motor,
- en un grupo moto-bomba un relé par las bajadas de intensidad.

## Protección de los motores síncronos

### Contra los defectos externos

- un relé a mínima tensión,
- un relé amperimétrico contra la presencia de una componente inversa, o de fallo de fase en la red,
- un relé de retorno de corriente activa para evitar la marcha como generador,
- un relé que detecte las bajadas de frecuencia, lo que evitará, cuando vuelva la tensión, después de un microcorte, el acoplamiento en oposición de fase,
- un relé amperimétrico de desconexión bajo un cortocircuito externo.

### Contra los defectos internos

Se utilizan las protecciones siguientes (ver protección de generadores):

- un relé de máxima corriente tripolar diferencial longitudinal, entrada-salida, contra los defectos fase,
- un relé de máxima corriente contra los defectos fase-tierra,
- un relé de desequilibrio inverso contra las variaciones de impedancia interna (ruptura del bobinado, cortocircuito entre espiras),
- un relé de retorno de corriente reactiva (absorción de energía reactiva por la máquina desexcitada). Se inhibirá este relé durante el periodo de arranque.

Si el arrollamiento inductor es accesible, se pueden también utilizar dos relés de corriente continua contra los cortes de devanado y los cortocircuitos, así como un controlador permanente de aislamiento (defectos masa-rotor),

- un relé contra el agarrotamiento del rotor en marcha y los arranques demasiado largos,
- un relé de sobrecarga de imagen térmica contra los incrementos de par,
- un relé de limitación de la frecuencia de los arranques.

## Protección de las baterías de condensadores

Se limita a la protección contra los defectos internos, cortocircuitos fase-fase y defectos fase-tierra (según el régimen de neutro).

- un relé de máxima corriente bipolar (neutro impedante) o tripolar (neutro aislado), de tiempo definido y constante contra los defectos fase-fase,
- un relé de máxima corriente unipolar, homopolar (neutro impedante) contra los defectos fase-masa.

Con frecuencia se instalan relés específicos en las baterías de condensadores, como por ejemplo: relés de desequilibrio, etc.



## 5 Conclusión

La continuidad de la explotación y la limitación al mínimo estricto de las consecuencias de todos los tipos de defectos, se consiguen con una elección adecuada de los dispositivos de protección y su correcta regulación.

Deseamos que este documento sea una ayuda eficaz para los

proyectistas, los instaladores y los responsables del mantenimiento en cuanto afecta al conocimiento de los defectos y el de los relés de protección correspondientes.

Merlin Gerin dispone de una gama de relés estáticos, Vigirack, para la seguridad de las instalaciones industriales de MT.

## 6 Bibliografía

### **Conférence aux Colloques ELEC organisés par le GIMEE.**

M. AMBLARD. Asociación des matériels de protection.

**Protección de redes por el sistema de selectividad lógica.** R. CALVAS y SAUTRIAU. Cuaderno Técnico Schneider nº 2.

**Análisis de redes trifásicas mediante las componentes simétricas.** JOLY y NORTIER. Cuaderno Técnico Schneider nº 18.

**Puesta a tierra del neutro en una red industrial AT.** MM. SAUTRIAU y TOUCHET. Cuaderno Técnico Schneider nº 62.

**Control, mando y protección de motores MT.** J.Y.BLANC. Cuaderno Técnico Schneider nº 165.

**La concepción de redes industriales en MT.** G. THOMASSET. Cuaderno Técnico Schneider nº 169.